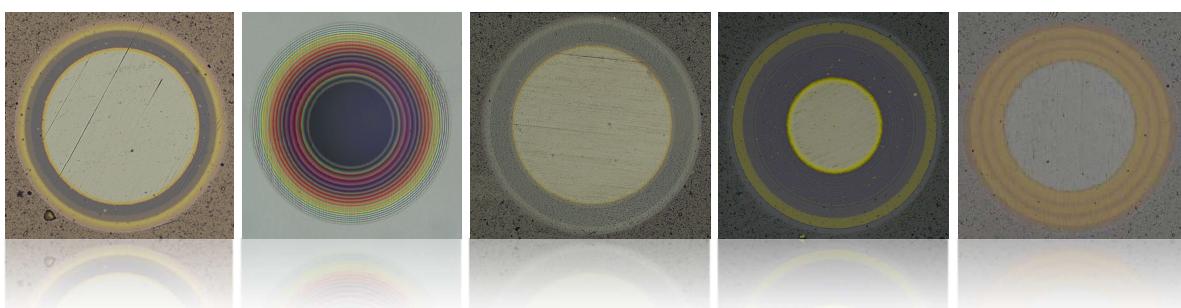


Schichtdickenmessung mit dem Kalottenschleifverfahren (Calotest)



Automatisierung und Qualitätssicherung

Messprinzip

Mit den Schichtdickenmessgeräten der kaloMAX-Familie wird die Schichtdicke per Kalottenschleifverfahren gemessen. Eine lose zwischen Antriebswelle und Probe aufliegende gehärtete Stahlkugel mit exakt definiertem Durchmesser wird durch die motorisch angetriebene Welle in Rotation versetzt (vgl. Prinzipskizze).

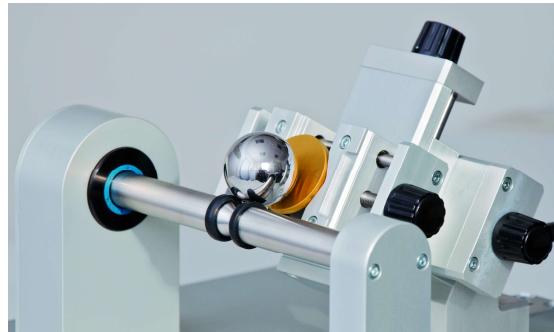
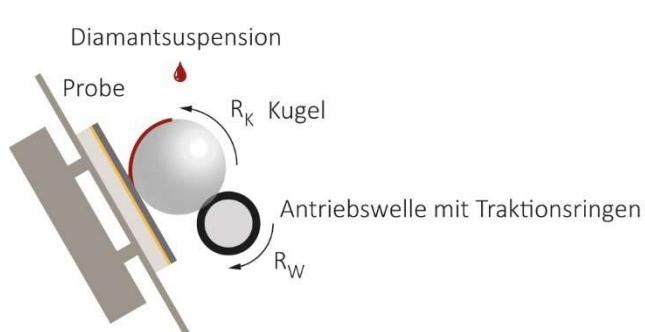


Abbildung 1: Messprinzip Kalottenschliff

Die Kugel dient dabei als Träger für ein Abrasivmittel (Diamantsuspension, Diamantpaste o.ä.). Dadurch wird eine Vertiefung in die Probe geschliffen – die sogenannte Kalotte. Die Schleifdauer beträgt je nach Schichttyp (Dicke und Verschleißfestigkeit) wenige Sekunden bis einige Minuten. Wird das Schichtsystem der eingespannten Probe durchgeschliffen (Schlifftiefe > Schichtdicke), ist jede einzelne Schicht unter dem Mikroskop als konzentrischer Ring (ebene Probe) bzw. Ellipse (zylindrische Probe) zu erkennen.

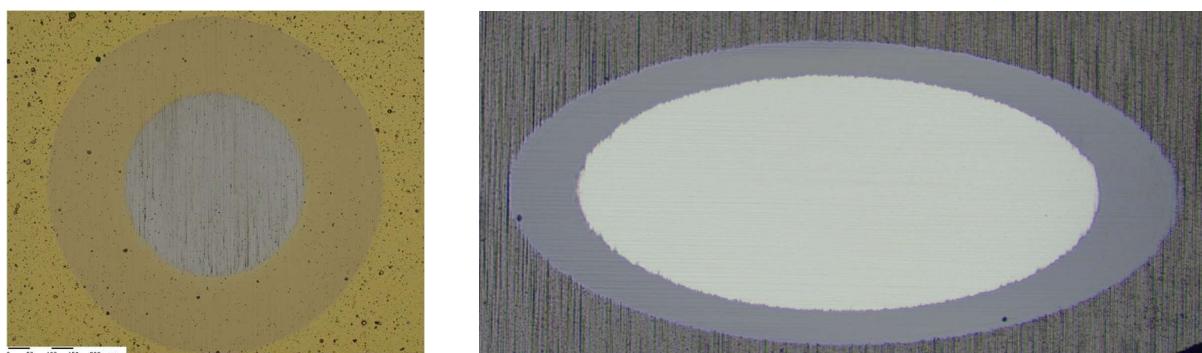


Abbildung 2: Kalotten auf ebener (links) und zylindrischer Probe (rechts)

Mit dem Kalottenschleifverfahren lassen sich sowohl Einzel- als auch Mehrlagenschichten analysieren. Da der Durchmesser der gehärteten Stahlkugel sehr groß im Vergleich zu den Schichtdicken ist, wird das Schichtsystem unter einem sehr flachen Winkel angeschliffen, wodurch die Schicht gewissermaßen verbreitert wird (der Durchmesser der einzelnen Ringe ist typischerweise ca. um den Faktor 200 größer als die Schichtdicke).

Dies ist neben der enormen Zeitsparnis ein wesentlicher Vorteil des Kalottenschleifverfahrens z.B. gegenüber dem Querschliff, da die Genauigkeit der Messung durch die „Schichtverbreiterung“ erheblich verbessert wird und die Auswertung mit einem normalen Auflichtmikroskop erfolgen kann. Abbildung 3 verdeutlicht das Prinzip des Verfahrens anhand eines Zweischichtsystems.

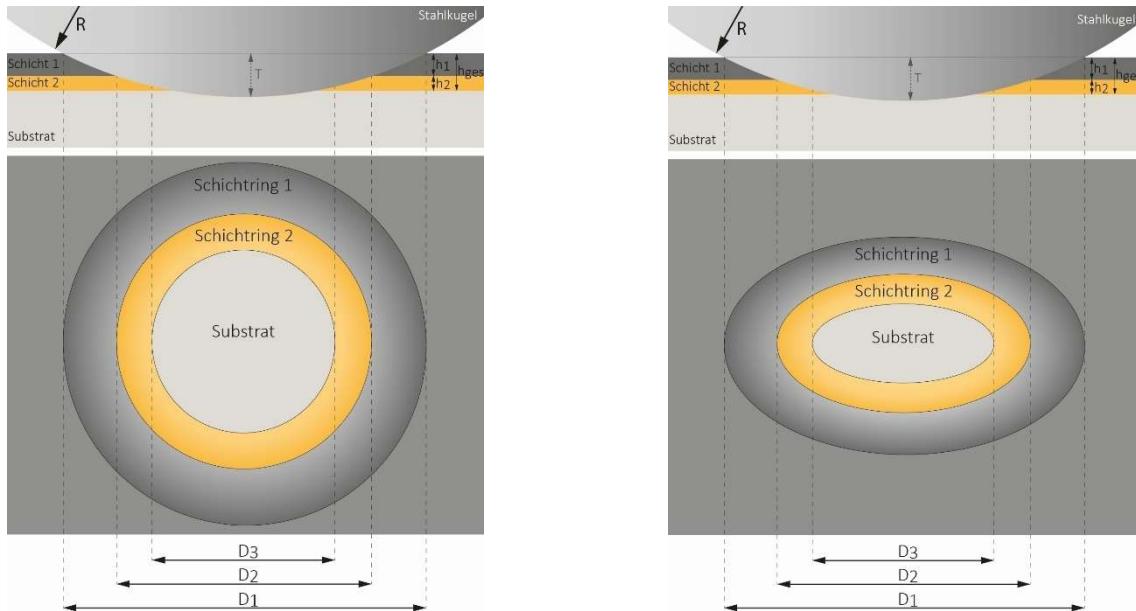


Abbildung 3: Schichtdickenbestimmung auf ebener (links) und zylindrischer Probe (rechts)

Da der Durchmesser der Stahlkugel sehr genau bekannt ist, können sämtliche Schichtdicken durch einen einfachen geometrischen Zusammenhang berechnet werden. Dazu müssen lediglich die Durchmesser (ebene Probe) bzw. die langen Diagonalen (zylindrische Probe) bestimmt werden. Anschließend können alle vorhandenen Schichtdicken entsprechend folgender Formel berechnet werden:

$$h = \frac{(D^2 - d^2)}{8 \cdot R} \quad (1) \quad \begin{aligned} D: & \text{ äußerer Durchmesser (eben) bzw. äußere Diagonale (zylindrisch)} \\ d: & \text{ innerer Durchmesser (eben) bzw. innere Diagonale (zylindrisch)} \end{aligned}$$

R: Kugelradius (i.d.R. 15 mm)

h: Schichtdicke

T: Schlifftiefe

Betrachtung der Messgenauigkeit des Kalottenschleifverfahrens

Grundvoraussetzung für eine bestmögliche Messgenauigkeit ist zunächst ein optimaler Rundlauf der Kugel während des Schleifprozesses. Höhenschlag oder seitliche Bewegungen der Kugel würden die Größe der Kalotte und somit auch die Messergebnisse verfälschen. Aus diesem Grund werden bei BAQ sog. Traktionsringe als Kontaktfläche für die Kugel verwendet. Diese werden im fertig montierten Zustand während der Rotation bei hoher Drehzahl mit einer speziellen Vorrichtung angeschliffen. Im Vergleich zu einer reinen Stahlwelle werden dadurch sowohl Höhenschlag als auch die seitliche Bewegung der Kugel auf ein Minimum reduziert, sodass dieser Einfluss auf das Messergebnis vernachlässigbar ist.

Des Weiteren hängt die Messgenauigkeit davon ab, mit welcher Genauigkeit die Durchmesser D und d bestimmt werden können (siehe Gleichung 1). Wie folgende Abbildung zeigt, hat vor allem die Oberflächenrauheit der Probe einen wesentlichen Einfluss darauf, mit welcher Genauigkeit D und d durch den Anwender festgelegt werden können.

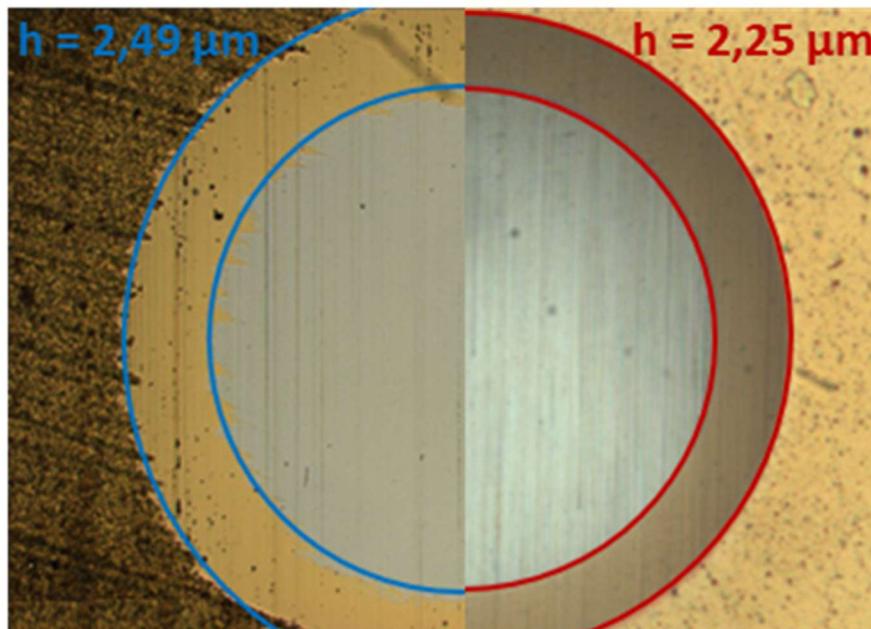


Abbildung 4: Einfluss der Oberflächenrauheit

Wie bei allen Messverfahren zur Schichtdickenmessung gilt auch für den Kalottenschliff: je geringer die Oberflächenrauheit der Probe, desto besser die Messgenauigkeit. Der Vorteil des Kalottenschleifverfahrens gegenüber anderen Verfahren besteht jedoch darin, dass der Anwender direkt sieht, wie das Messergebnis zustande kommt und dieses somit sehr gut beurteilen kann. Laut DIN EN ISO 26423 sollte die Oberflächenrauheit der Schicht und/oder des Substrates 20 % der Schichtdicke nicht überschreiten.

Bei für diese Anwendung typischen Oberflächenrauheiten liegt die Genauigkeit bei der Festlegung der Durchmesser bei ca. $\pm 10 \mu\text{m}$. Neben dem sorgsamen Ausmessen dieser Durchmesser spielt für die Messgenauigkeit auch die Schlifftiefe eine entscheidende Rolle. Dies wird anhand des folgenden Beispiels deutlich, für das folgende Annahmen getroffen werden:

Annahme 1: Die Durchmesser D und d können vom Anwender unabhängig von der Schlifftiefe mit einer Genauigkeit von $\pm 10 \mu\text{m}$ bestimmt werden.

Annahme 2: Die tatsächliche Schichtdicke beträgt $2,25 \mu\text{m}$

Fall 1: Schlifftiefe zu groß

Die Kalotte wird so tief geschliffen, dass die entsprechenden Durchmesser $D = 1400 \mu\text{m}$ bzw. $d = 1300 \mu\text{m}$ betragen. Die tatsächliche Schichtdicke beträgt demnach:

$$\frac{1400^2 - 1300^2}{8 \cdot 15000} = 2,25 \mu\text{m} \quad (\text{vgl. Annahme 2})$$

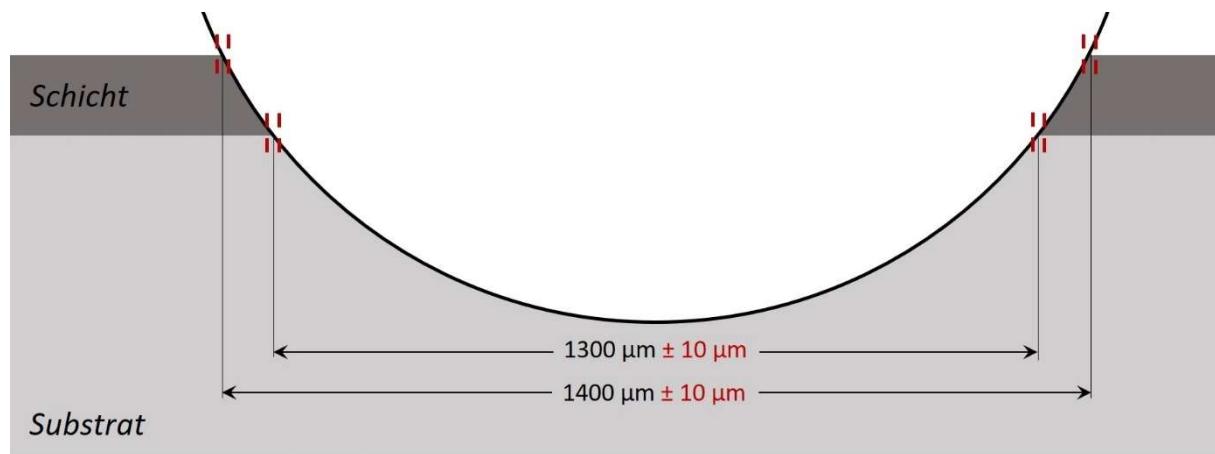


Abbildung 5: zu große Schlifftiefe

Da die Durchmesser D bzw. d entsprechend Annahme 1 mit einer Genauigkeit von $\pm 10 \mu\text{m}$ bestimmt werden können, kann die durch den Anwender gemessene Schichtdicke jedoch innerhalb folgender Grenzen liegen:

Minimalwert:
$$\frac{(1400 - 10)^2 - (1300 + 10)^2}{8 \cdot 15000} = 1,80 \mu\text{m}$$

Maximalwert:
$$\frac{(1400 + 10)^2 - (1300 - 10)^2}{8 \cdot 15000} = 2,70 \mu\text{m}$$

Die Messgenauigkeit liegt in diesem Fall bei $\pm 0,45 \mu\text{m}$

Fall 2: optimierte Schleifftiefe

Die Kalotte wird so tief geschliffen, dass der äußere Durchmesser D doppelt so groß wie der innere Durchmesser d ist. Bei einer Schichtdicke von $2,25 \mu\text{m}$ beträgt $D = 600 \mu\text{m}$ bzw. $d = 300 \mu\text{m}$:

$$\frac{600^2 - 300^2}{8 \cdot 15000} = 2,25 \mu\text{m} \quad (\text{vgl. Annahme 2})$$

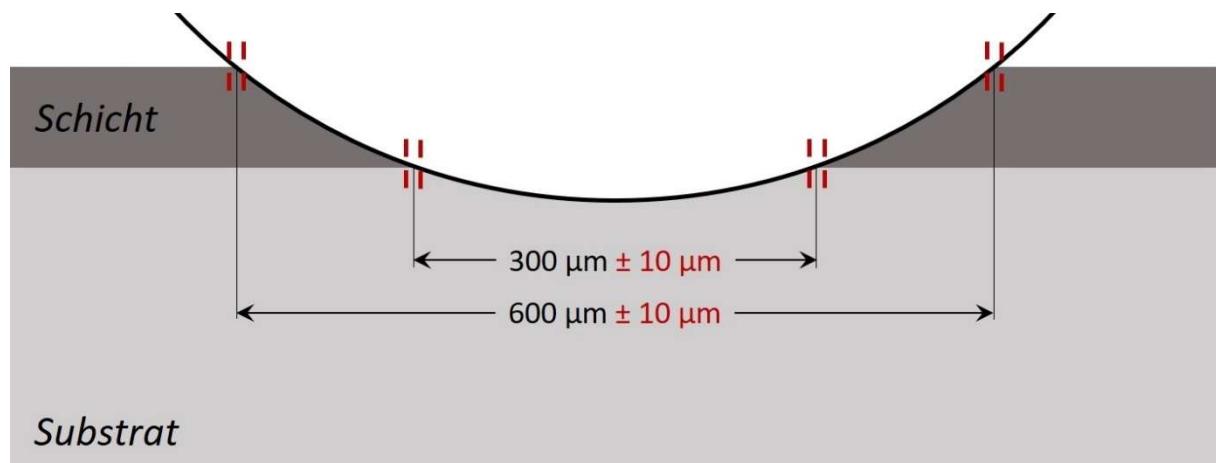


Abbildung 6: optimierte Schleifftiefe

Da die Durchmesser D bzw. d entsprechend Annahme 1 mit einer Genauigkeit von $\pm 10 \mu\text{m}$ bestimmt werden können, kann die durch den Anwender gemessene Schichtdicke theoretisch innerhalb folgender Grenzen liegen:

Minimalwert: $\frac{(600-10)^2 - (300+10)^2}{8 \cdot 15000} = 2,10 \mu\text{m}$

Maximalwert: $\frac{(600+10)^2 - (300-10)^2}{8 \cdot 15000} = 2,40 \mu\text{m}$

Die Messgenauigkeit liegt in diesem Fall bei $\pm 0,15 \mu\text{m}$. Allein durch die Reduzierung der Schleifftiefe wurde die Messgenauigkeit um Faktor 3 verbessert.

➔ Wir empfehlen, die Schleifftiefe stets so zu wählen, dass $D \approx 2 \cdot d$

Vorteile:

- **Sehr einfach** kein Fachpersonal erforderlich
- **Schnell** keine Probenpräparation erforderlich; Messergebnisse liegen nach wenigen Minuten vor
- **Vielseitig** Messung von Ein- und Mehrschichtsystemen
- **Hohe Genauigkeit** „Schichtverbreiterung“
- **Werkstoffunabhängig** prinzipiell für alle Substrat/Beschichtungs-Kombinationen geeignet
- **Geometrieunabhängig** Ergebnis unabhängig von Probenform (eben, zylindrisch, kugelförmig und ellipsoidal)
- **Nachvollziehbarkeit** durch direkte Messung sieht der Benutzer, wie Ergebnis zustande kommt

Anwendungsgebiete:

- PVD-Schichten
- CVD-Schichten
- Metallschichten
- Galvanische Beschichtungen
- Chemische Beschichtungen
- Polymerschichten
- Lackschichten (ausgehärtet)
- Dekorschichten
- Oxidschichten
- Uvm.

Normen:

- DIN EN ISO 26423
- DIN EN ISO 1071-2 (zurückgezogen)
- VDI 3198 (zurückgezogen)