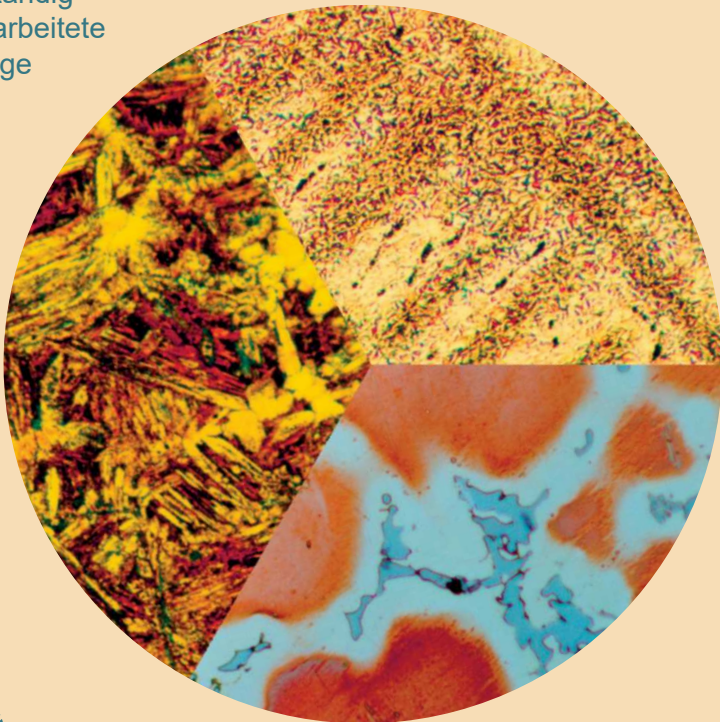


**Georg Salbert**  
fortgeführt von **Karl Maile** und **Rudi Scheck**

# Metallographie

## Grundlagen und Anwendung

3. vollständig  
überarbeitete  
Auflage



**Gebrüder Borntraeger • Stuttgart**

**NEU**

**Qcut 150 M  
Tennmaschine**



**NEU**

**Qmount  
UV-Einbettgerät**



**NEU**

**Qgrind XL  
Planschleifgerät**



**NEU**

**Qness 150 CS ECO  
Rockwell  
Härteprüfer**



**NEU**

**Qness 60 A+ EVO  
Mikro  
Härteprüfer**



## **Qprep** VERBRAUCHSMATERIALIEN



**Premium-Trennscheiben**



**Diamantsuspensionen mit  
hoher Diamantkonzentration**



**Solution Boxen,  
inkl. Präparationsleitfaden**

**TRENNEN | EINBETTEN | SCHLEIFEN, POLIEREN | ÄTZEN | HÄRTEPRÜFUNG, ANALYSIEREN**

# **INNOVATIVE LÖSUNGEN FÜR DIE MATERIALOGRAPHIE**

QATM ist ein weltweit führender Hersteller von Maschinen für die Materialographie und Härteprüfung in der Qualitätskontrolle. Neben einer großen Bandbreite innovativer Geräte liefert QATM passendes Zubehör, Verbrauchsmaterialien, Komplettlabbore sowie maßgeschneiderte Sonderlösungen.

In unserem expandierenden Unternehmen bieten wir Arbeits- und Ausbildungsplätze mit Zukunftsperspektive für verschiedene Fachrichtungen.

# Metallographie

## Grundlagen und Anwendung

**Georg Salbert**

fortgeführt von

**Karl Maile und Rudi Scheck**

3. vollständig überarbeitete Auflage

Mit 212 teilweise farbigen Abbildungen  
und 26 Tabellen



**Borntraeger 2022**

## Maile, K. & Scheck, R.: Metallographie – Grundlagen und Anwendung

### **Karl Maile**

war stellvertretender Direktor der Materialprüfungsanstalt Stuttgart mit über 40jähriger Erfahrung in der Bearbeitung von Forschungsprojekten, in Material- und Werkstoffprüfung, Bauteilbewertung und -berechnung sowie Schadensanalyse. Langjährige Tätigkeiten als Gutachter und Leiter von internationalen/nationalen Fachkonferenzen sowie Fortbildungsveranstaltungen.

### **Rudi Scheck**

Ausbildung als Werkstoffprüfer, über 40 Jahre Erfahrung als Metallograph, 20 Jahre Leitung der Metallographie an einem bekannten Institut der Materialprüfung, Veröffentlichungen zu metallographischen und werkstofftechnischen Themen, Preisträger DGM „Best Paper Award 2016“ und Metallographiepreis 2021, Mitarbeit in verschiedenen metallographischen Arbeitskreisen. Leitung der Fortbildungsveranstaltung „Metallographische Untersuchungsverfahren“ an der TAE Esslingen  
(<https://www.metallografiekurs-tae.de/>)

#### *Anschrift der Autoren:*

Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 32a  
70569 Stuttgart

[karl.maile@mpa.uni-stuttgart.de](mailto:karl.maile@mpa.uni-stuttgart.de); [rudi.scheck@mpa.uni-stuttgart.de](mailto:rudi.scheck@mpa.uni-stuttgart.de)

- 3. vollständig überarbeitete Auflage (Borntraeger 2022)
- 2. durchgesehene und korrigierte Auflage (Borntraeger 2015)
- 1. Auflage (Borntraeger 2010)

Gerne nehmen wir Hinweise zum Inhalt und Bemerkungen zu diesem Buch entgegen:  
[editors@schweizerbart.de](mailto:editors@schweizerbart.de)

ISBN 978-3-443-23021-0

ISBN ebook (epdf) 978-3-443-23022-7

Informationen zu diesem Titel: [www.borntraeger-cramer.de/9783443230210](http://www.borntraeger-cramer.de/9783443230210)

© 2022 Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Germany

Das Werk, einschließlich aller Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Verlag: Gebr. Borntrager Verlagsbuchhandlung  
Johannesstraße 3A, 70176 Stuttgart, Germany  
[mail@borntraeger-cramer.de](mailto:mail@borntraeger-cramer.de), [www.borntraeger-cramer.de](http://www.borntraeger-cramer.de)

♾ Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier nach ISO 9706:1994  
Printed in Germany by Gulde Druck GmbH, Tübingen



# Vorwort zur 3. vollständig überarbeiteten Auflage

Der Vorteil von Metallographie besteht darin, dass das Grundwissen und die Erkenntnisse über wesentliche metallographische und werkstoffkundliche Zusammenhänge unabhängig von der Zeit ihre Gültigkeit bewahren. Aus diesem Grund haben wir uns in der Überarbeitung auf weitere, in der Technik eingeführte metallische Werkstoffe, wie Nickellegierungen, mehrphasige Stähle sowie auf die Erweiterung und Vervollständigung neuer metallographischer Präparationsverfahren, wie das Vibrationspolieren konzentriert. Mit in die Überarbeitung einbezogen wurden neue und bestehende Herstellungs- und Bearbeitungsverfahren. Dies bezieht sich auf die additive Fertigung, die bei bekannten Werkstoffen abweichende von den bei konventionellen Herstellungsverfahren metallographische Erscheinungsbilder erzeugt. Auch das Kapitel Schweißen wurde – seiner technischen Bedeutung entsprechend – im Hinblick auf die metallographische Bewertung neu gestaltet. Dem wichtigen Aspekt der Qualitätssicherung in metallographischen Labors wurde über die Einfügung von Hinweisen zu Fehlerquellen bis hin zur Aufführung praktischer Tipps bei spezifischen metallographischen Arbeiten Rechnung getragen.

Alle Normen und Bezüge zu Normen in Form von Werkstoffbezeichnungen wurden aktualisiert und der Stand der Normung mit der Jahreszahl angegeben.

Bei den metallographischen Bildern wurde teilweise neues verbessertes Bildmaterial eingesetzt. Der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, den Wieland Werken Ulm sowie Frau G. Ketzer-Raichle vom Institut für Materialforschung (IMFAA) an der Hochschule Aalen sei an dieser Stelle für die Bereitstellung von Bildern gedankt.

Der Stil und die Gliederung wurden weitgehend beibehalten. Zur Vertiefung der Inhalte sind zusätzliche Zusammenfassungen nach jedem Abschnitt eingefügt, sodass der Leser einen schnellen Überblick über die wichtigsten Inhalte und Zusammenhänge erhält.

Mit der Überarbeitung wurde das vorliegende Werk dem aktuellen Stand der Technik und des Wissens sowohl hinsichtlich der vorgestellten Werkstoffe als auch hinsichtlich der dafür einzusetzenden metallographischen Methoden angepasst.

Stuttgart, Mai 2022, Karl Maile und Rudi Scheck

## Vorwort zur 1. Auflage

Die Metallographie als wichtiger Teilbereich der Werkstofftechnik nimmt unverändert auch heute noch einen bedeutsamen Stellenwert sowohl in der Ausbildung von Werkstofffachleuten als auch in der Praxis der Werkstoffherstellung, -verarbeitung und -prüfung ein.

Obwohl den angehenden und praktizierenden Metallographen und Werkstoffingenieuren bereits einige wertvolle Fachbücher zur Verfügung stehen, wird mit dieser Ausarbeitung versucht, die vorhandene Fachliteratur zu erweitern, und zwar mit der Absicht, eine Zusammenfassung mit durchschaubarem Umfang zu erstellen, die die wesentlichen Aspekte und Zusammenhänge der Metallographie, die das Grundwissen eines Werkstofffachmanns ausmachen, erläutert, ohne dabei die weniger wichtigen Details dieser umfangreichen Materie übermäßig zu behandeln.

Dieses Buch baut auf dem Skript des Autors „Metallographisches Praktikum“ für Studenten des Fachbereiches Werkstofftechnik der Universität des Saarlandes auf und umfasst ähnlich wie das Skript die Kapitel: Schliffherstellung, makroskopische Schliffuntersuchungen, Gefüge unlegierter Eisen-Kohlenstoff-Werkstoffe sowie Gefüge ausgewählter Nichteisenmetalle. Der ursprüngliche Skriptinhalt wurde jedoch weitgehend überarbeitet und um wichtige Einzelheiten ergänzt. Auch die Sachverhalte der einzelnen Kapitel werden in dieser Neufassung ausführlicher erläutert, wobei auch hier die Gefüge unlegierter Eisenwerkstoffe schwerpunktmäßig behandelt wurden.

Jedes Kapitel dieses Buches schließt mit einem praktischen Teil, in dem Übungen vorgeschlagen werden, die die theoretischen Grundlagen festigen und gleichzeitig die praktischen Erfahrungen bei der Deutung von Gefügebildern sowie die manuellen Fertigkeiten bei der Schliffpräparation verbessern sollen.

Am Ende des Buches wurden einige Literaturquellen angegeben, die eine Vertiefung der behandelten Themen ermöglichen.

Der im vorliegenden Buch behandelte Stoff dient der Vorbereitung von Werkstofffachkräften auf eine selbstständige Tätigkeit im Metallographielabor wie auch einem besseren Verständnis von Zusammenhängen zwischen den betrachteten Gefügebildern und den technologischen Parametern der Behandlung des untersuchten Schliffmaterials.

Das Buch ist vornehmlich für angehende Werkstoffprüfer, Metallographen und Studenten der Werkstoffwissenschaft gedacht. Es kann ebenfalls als Handhabe für Studierende des allgemeinen Maschinenbaus und der Fertigungstechnik sowie für angehende Gewerbestudienräte und nicht zuletzt als Nachschlagewerk für praktizierende Werkstofffachleute genutzt werden.

An dieser Stelle möchte ich allen, die mir bei der Herausgabe des Buches behilflich waren, herzlich danken. Ein ganz besonderer Dank gebührt dem be-

reits verstorbenen Herrn Prof. Dr. J. Breme, dem ehemaligen Leiter des Institutes Metallische Werkstoffe der Universität des Saarlandes, für seine uneingeschränkte Unterstützung meiner Arbeit, vor allem für die Ermöglichung von Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop wie auch für das Überlassen einiger Gefügebilder von Titanlegierungen. Herrn Dr. F. Aubertin vom selben Institut möchte ich danken für die Erstellung einiger rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen und die Durchführung von Röntgenmikroanalysen. Des Weiteren gilt mein Dank allen, die mir bei der Beschaffung geeigneten Schliffmaterials behilflich waren sowie den Studenten, die die Computer-Zeichnungen zum Grundlagenteil des ersten Kapitels erstellt haben. Nicht zuletzt möchte ich Frau Gudrun Müller sowie meiner Tochter Dr. Bernadette Weisgerber für die aufwendige Textkorrektur herzlich danken.

Saarwellingen, im Dezember 2009

Georg Joachim Salbert



# Inhalt

|          |                                                   |           |
|----------|---------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Die Schliffherstellung .....</b>               | <b>1</b>  |
| 1.1      | Begriffe: Schliff, Gefüge .....                   | 1         |
| 1.2      | Ablauf .....                                      | 1         |
| 1.3      | Die Schliffpräparation .....                      | 2         |
| 1.3.1    | Probennahme und Kennzeichnung .....               | 3         |
| 1.3.2    | Einbetten .....                                   | 5         |
| 1.3.2.1  | Allgemeines Vorgehen .....                        | 5         |
| 1.3.2.2  | Kalteinbetten .....                               | 7         |
| 1.3.2.3  | Warmeinbetten .....                               | 8         |
| 1.3.3    | Schleifen der ausgewählten Schlifffläche .....    | 8         |
| 1.3.4    | Polieren der geschliffenen Oberfläche .....       | 11        |
| 1.3.4.1  | Maschinelles Polieren .....                       | 13        |
| 1.3.4.2  | Elektrolytisches Polieren .....                   | 16        |
| 1.3.4.3  | Vibrationspolieren .....                          | 18        |
| 1.3.5    | Anwendung polierter Schliffe .....                | 19        |
| 1.3.5.1  | Schliffbilder ungeätzter Metallproben .....       | 20        |
| 1.3.6    | Ätzen polierter Schliffe .....                    | 21        |
| 1.3.7    | Gefügentwicklung .....                            | 23        |
| 1.4      | Praktische Übungen .....                          | 26        |
| 1.5      | Praktische Tipps für die Schliffherstellung ..... | 26        |
| 1.6      | Fehler und Probleme .....                         | 28        |
| <b>2</b> | <b>Makroskopische Untersuchung .....</b>          | <b>30</b> |
| 2.1      | Anwendungsbereich .....                           | 30        |
| 2.1.1    | Einteilung makroskopischer Verfahren .....        | 31        |
| 2.1.2    | Flachätzverfahren .....                           | 31        |
| 2.1.2.1  | Ätzung nach Fry .....                             | 32        |
| 2.1.2.2  | Das Heyn'sche Verfahren .....                     | 33        |
| 2.1.2.3  | Das Oberhoffer-Verfahren .....                    | 35        |
| 2.1.2.4  | Makroätzung mit alkoholischer Salpetersäure ..... | 36        |
| 2.1.2.5  | Makroätzung nach Adler .....                      | 38        |
| 2.1.2.6  | Makroätzung von Aluminium .....                   | 39        |
| 2.1.2.7  | Makroätzung von Nickellegierungen .....           | 41        |
| 2.1.3    | Tiefätzverfahren .....                            | 42        |
| 2.1.4    | Abdruckverfahren .....                            | 43        |
| 2.1.5    | Praktische Übungen .....                          | 45        |
| 2.2      | Weitere Ätzverfahren .....                        | 46        |

|           |                                                                             |           |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3       | Praktische Tipps für makroskopische Untersuchungen .....                    | 46        |
| 2.4       | Fehler und Probleme bei makroskopischen Untersuchungen.....                 | 49        |
| <b>3</b>  | <b>Gefüge unlegierter Eisen-Kohlenstoff-Werkstoffe.....</b>                 | <b>50</b> |
| 3.1       | Der Kohlenstoff als Zementit; Gefüge des metastabilen Fe-C-Systems .....    | 50        |
| 3.1.1     | Gefüge des metastabilen Systems im Stahlbereich .....                       | 53        |
| 3.1.1.1   | Gefüge untereutektoider Stähle .....                                        | 54        |
| 3.1.1.1.1 | Grobkorngefüge und nadeliges Umwandlungsgefüge .....                        | 58        |
| 3.1.1.1.2 | Entartetes Gefüge .....                                                     | 60        |
| 3.1.1.1.3 | Gefügezeitigkeit .....                                                      | 60        |
| 3.1.1.2   | Gefüge eutektoider Stähle.....                                              | 62        |
| 3.1.1.3   | Gefüge übereutektoider Stähle .....                                         | 66        |
| 3.1.2     | Praktische Tipps für die Präparation von ferritisch-perlitischem Stahl..... | 70        |
| 3.1.3     | Fehler und Probleme bei der Gefügeinterpretation.....                       | 71        |
| 3.2       | Gefüge des metastabilen Systems im Gusseisenbereich.....                    | 71        |
| 3.2.1     | Gefüge von untereutektischem weißem Gusseisen.....                          | 72        |
| 3.2.2     | Gefüge von eutektischem weißem Gusseisen.....                               | 75        |
| 3.2.3     | Gefüge von übereutektischem weißem Gusseisen.....                           | 76        |
| 3.3       | Der Kohlenstoff als Graphit; Gefüge des stabilen Fe-C-Systems .....         | 78        |
| 3.3.1     | Die häufigsten Formen des Graphits.....                                     | 80        |
| 3.3.1.1   | Die Lamellenform.....                                                       | 80        |
| 3.3.1.2   | Die Kugelform .....                                                         | 84        |
| 3.3.1.3   | Gusseisen mit Vermiculargraphit.....                                        | 87        |
| 3.3.1.4   | Die Flockenform .....                                                       | 89        |
| 3.3.2     | Hartguss – Schalenhartguss und meliertes Gusseisen.....                     | 91        |
| 3.4       | Praktische Tipps für die Präparation von Gusseisen.....                     | 92        |
| 3.5       | Fehler und Probleme bei der Gefügeinterpretation.....                       | 93        |
| 3.6       | Der im Eisengitter gelöste Kohlenstoff – Umwandlungsgefüge des Stahls ..... | 94        |
| 3.6.1     | Zerfall des unterkühlten Austenits .....                                    | 95        |
| 3.6.1.1   | Das Härtegefüge .....                                                       | 95        |
| 3.6.1.2   | Das Zwischenstufengefüge (Bainit).....                                      | 102       |
| 3.6.1.3   | Die Perlitbildung .....                                                     | 105       |
| 3.6.2     | Anlassgefüge.....                                                           | 105       |
| 3.6.2.1   | Gefüge nach niedrigem Anlassen (1. Anlassstufe) .                           | 106       |
| 3.6.2.2   | Gefüge nach mittlerem Anlassen (2. und 3. Anlassstufe) .....                | 106       |

|                                                                                                        |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.6.2.3 Gefüge eines hoch angelassenen Stahls (4. Anlassstufe) .....                                   | 108        |
| 3.7 Praktische Tipps für die Präparation und Gefügeinterpretation von Stählen mit Härtingsgefügen..... | 110        |
| 3.8 Gefüge von Stählen mit mehrphasigem Gefüge.....                                                    | 111        |
| 3.9 Praktische Übungen .....                                                                           | 114        |
| <b>4 Gefüge ausgewählter Nichteisenmetalle.....</b>                                                    | <b>118</b> |
| 4.1 Kupferlegierungen .....                                                                            | 119        |
| 4.1.1 Cu-Sn-Legierungen, Zinnbronzen .....                                                             | 122        |
| 4.1.1.1 Cu-Sn-Knetlegierungen .....                                                                    | 122        |
| 4.1.1.2 Cu-Sn-Gusslegierungen .....                                                                    | 127        |
| 4.1.1.3 Cu-Sn-Sinterlegierungen (Sinterbronzen) .....                                                  | 129        |
| 4.1.2 Mehrstoff-Bronzen.....                                                                           | 130        |
| 4.1.2.1 Mehrstoff-Knetbronzen.....                                                                     | 130        |
| 4.1.2.2 Mehrstoff-Gussbronzen .....                                                                    | 131        |
| 4.1.3 Speziallegierungen.....                                                                          | 134        |
| 4.1.3.1 Kupfer-Aluminiumlegierungen (Aluminiumbronzen) ..                                              | 134        |
| 4.1.3.1.1 Erstarrungsgefüge von Kupfer-Aluminiumlegierungen (Aluminiumbronzen).....                    | 135        |
| 4.1.3.1.2 Gefügeveränderungen von Aluminiumbronzen beim Abkühlen im festen Zustand .....               | 136        |
| 4.1.3.2 Kupfer-Beryllium-Legierungen (Berylliumbronzen) ....                                           | 141        |
| 4.1.3.3 Kupfer-Chrom-Legierungen .....                                                                 | 144        |
| 4.1.3.4 Kupfer-Blei-Legierungen (Bleibronzen) .....                                                    | 145        |
| 4.1.4 Cu-Zn-Legierungen (Messing) .....                                                                | 146        |
| 4.1.4.1 Cu-Zn-Knetlegierungen .....                                                                    | 148        |
| 4.1.4.1.1 Einphasige Cu-Zn-Knetlegierungen .....                                                       | 148        |
| 4.1.4.1.2 Zweiphasige Cu-Zn-Knetlegierungen .....                                                      | 150        |
| 4.1.4.2 Cu-Zn-Gusslegierungen.....                                                                     | 155        |
| 4.1.5 Kupfer-Nickel-Legierungen.....                                                                   | 156        |
| 4.2 Praktische Tipps für die Präparation und Gefügeinterpretation von Kupferlegierungen .....          | 158        |
| 4.3 Fehler und Probleme bei der Gefügeinterpretation.....                                              | 161        |
| 4.4 Aluminiumlegierungen .....                                                                         | 161        |
| 4.4.1 Al-Knetlegierungen .....                                                                         | 162        |
| 4.4.1.1 Nicht aushärtbare Al-Knetlegierungen .....                                                     | 162        |
| 4.4.1.2 Aushärtbare Al-Knetlegierungen .....                                                           | 164        |
| 4.4.2 Typische Al-Gusslegierungen .....                                                                | 168        |
| 4.4.3 Al-Sinterlegierungen.....                                                                        | 174        |



|          |                                                                                              |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.5      | Praktische Tipps für die Präparation und Gefügeinterpretation von Aluminiumlegierungen ..... | 175        |
| 4.6      | Fehler und Probleme bei der Gefügeinterpretation.....                                        | 177        |
| 4.7      | Titanlegierungen .....                                                                       | 177        |
| 4.7.1    | Einphasige $\alpha$ -Legierungen .....                                                       | 178        |
| 4.7.2    | Einphasige $\beta$ -Legierungen .....                                                        | 179        |
| 4.7.3    | Zweiphasige ( $\alpha+\beta$ )-Legierungen.....                                              | 179        |
| 4.8      | Praktische Tipps für die Präparation und Gefügeinterpretation von Titanlegierungen .....     | 183        |
| 4.9      | Fehler und Probleme bei der Gefügeinterpretation.....                                        | 185        |
| 4.10     | Nickellegierungen.....                                                                       | 185        |
| 4.10.1   | Superlegierungen .....                                                                       | 188        |
| 4.10.2   | Phasen in Ni-Fe-Cr-Knetlegierungen .....                                                     | 188        |
| 4.10.2.1 | Mischkristallhärtende Legierungen .....                                                      | 192        |
| 4.10.2.2 | $\gamma'$ aushärtende Legierungen .....                                                      | 194        |
| 4.10.3   | Gusslegierungen.....                                                                         | 198        |
| 4.11     | Praktische Tipps für die Präparation und Gefügeinterpretation von Nickellegierungen.....     | 200        |
| 4.12     | Fehler und Probleme bei der Gefügeinterpretation .....                                       | 201        |
| 4.13     | Praktische Übungen zu Kapitel 4 .....                                                        | 201        |
| <b>5</b> | <b>Gefüge von Schweißverbindungen.....</b>                                                   | <b>205</b> |
| 5.1      | Schweißverbindungen aus Stahl .....                                                          | 205        |
| 5.1.1    | Metallographische Präparation .....                                                          | 205        |
| 5.2      | Schweißverbindungen aus Nichteisenmetallen .....                                             | 212        |
| 5.2.1    | Bewertung von Schweißverbindungen .....                                                      | 214        |
| 5.3      | Besondere Schweißverfahren .....                                                             | 214        |
| 5.3.1    | Widerstandpressschweißen .....                                                               | 214        |
| 5.3.2    | Rührreisschweißen.....                                                                       | 216        |
| 5.4      | Praktische Tipps für die Präparation und Gefügeinterpretation von Schweißverbindungen.....   | 217        |
| 5.5      | Praktische Übungen .....                                                                     | 217        |
| <b>6</b> | <b>Gefüge von additiv gefertigten Werkstoffen .....</b>                                      | <b>219</b> |
| <b>7</b> | <b>Literatur .....</b>                                                                       | <b>224</b> |
| <b>8</b> | <b>Index .....</b>                                                                           | <b>225</b> |

# 1 Die Schliffherstellung

## 1.1 Begriffe: Schliff, Gefüge

Als **Schliff** bezeichnet man eine entsprechend behandelte Materialprobe, die für eine eindeutige Gefügeuntersuchung bzw. Untersuchung der Struktur des Bauteils (z.B. Risse, Anordnung Schweißgut) geeignet ist.

Das **Gefüge** ist der innere Aufbau metallischer Werkstoffe. Er ist festgelegt durch die Art der beteiligten Atome und ihrer dreidimensionalen Anordnung im Nano-, Mikro- und Makrobereich. Oft wird als Gefüge nur das zweidimensionale Bild (Kornbild) bezeichnet, wie es sich in einem Anschliff darstellt und Informationen über die Art, Größe, Form und Anordnung der Körner (Kristallite) sowie der Poren, Risse und Fremdeinschlüsse vermittelt. Metallische Werkstoffe sind kristallin aufgebaut: die Körner stellen Kristallite mit unterschiedlicher Orientierung im Raum dar, die sich durch Korngrenzen voneinander abtrennen. Kristallite mit einheitlicher Struktur (chemischer Zusammensetzung) stellen eine **Phase** dar, die i. Allg. besondere metallographische Namen tragen, wie z.B. Ferrit ( $\alpha$ -Mischkristall) oder Zementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

Im Schliff kann bei der lichtoptischen Betrachtung das metallographische Gefüge bestehend aus unterschiedlichen Phasen (verschiedenartige chemisch homogene Mischkristalle in unterschiedlicher Korngröße und -form; chemische Verbindungen aus Metallen/Metallen oder Metall/Nichtmetall), die sich durch Korngrenzen voneinander abgrenzen, betrachtet werden. Darüber hinaus können aber auch Oxide und Sulfide bei ausreichender Größe sowie Fehlstellen wie Risse, Poren, Lunker etc. beurteilt werden. Die Ausbildung von Phasen lässt sich in den werkstoffspezifischen Phasendiagrammen beurteilen.

## 1.2 Ablauf

Der Ablauf der metallographischen Untersuchung teilt sich in folgende Arbeitsschritte auf:

Nach der Einlieferung der Untersuchungsteile und Erteilung des Auftrags mit Festlegung des Untersuchungszieles und -umfanges (Abb. 1.1) wird eine Ablaufplanung erstellt. Sie enthält die Vorgehensweise bei der Probennahme und Schliffherstellung. In dieser Phase sollte auch überprüft werden, ob es sich

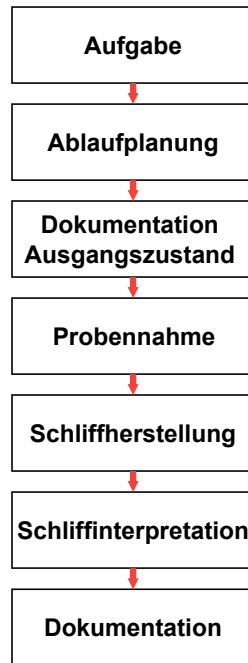


Abb. 1.1: Ablauf einer metallographischen Untersuchung.

bei dem zur Untersuchung eingelieferten Stück um die richtige Probe handelt. Eine makroskopische Untersuchung dient dazu festzustellen, ob an der Oberfläche Besonderheiten vorliegen, die ggf. in die spätere Schliffebene einzubeziehen sind. Vor dem Zerlegen erfolgt eine (fotografische) Dokumentation der Untersuchungsteile. Der Zerlegeplan ist Teil der Gesamtdokumentation. Die Dokumentation ist wichtig, um die Rückverfolgbarkeit der späteren Ergebnisse sicherzustellen. Die sorgfältige Schliffherstellung ist eine wesentliche Voraussetzung für die spätere Interpretation der Befunde. Bereits in dieser Phase sind werkstoffbezogene Besonderheiten zu berücksichtigen.

### 1.3 Die Schliffpräparation

Die Schliffherstellung besteht aus folgenden Arbeitsschritten:

- Probenahme und Einbetten
- Schleifen der ausgewählten Schliffoberfläche
- Polieren der geschliffenen Oberfläche und ggf. deren Betrachtung
- Ätzen der polierten Schliffoberfläche

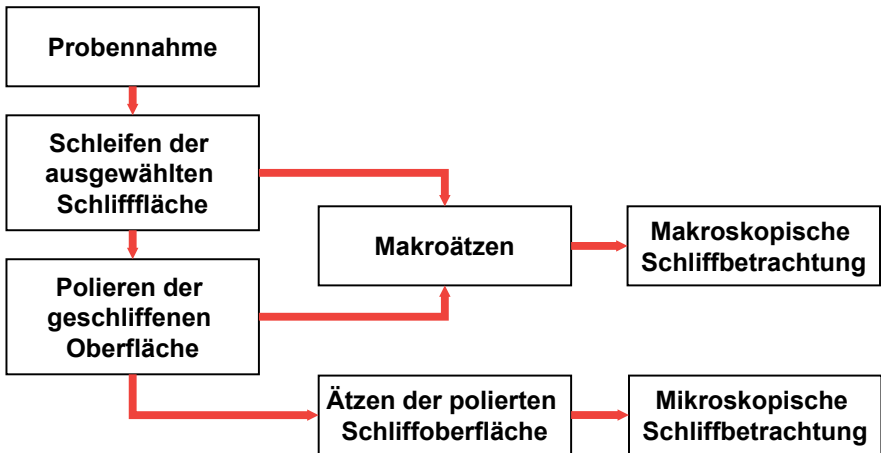


Abb. 1.2: Ablauf der Schliifherstellung und Auswertungsmöglichkeiten.

Nach erfolgreichem Abschluss dieser Präparationsschritte kann die mikroskopische Schliifbetrachtung stattfinden (Abb. 1.2). Nicht alle Schliife werden so weit präpariert, dass eine mikroskopische Gefügeuntersuchung erfolgen kann. In manchen Fällen reicht eine Makroätzung im geschliffenen bzw. halbpolierten Zustand, um die gewünschten Untersuchungen vornehmen zu können, wie z.B. die Darstellung einer Gefügemakrostruktur sowie die Ausbildung einer Schweißnaht, siehe Abschnitt 5.

### 1.3.1 Probennahme und Kennzeichnung

Für mikroskopische Untersuchungen sind Proben einer bestimmten Größe geeignet. Die optimalen Schliifmaße liegen zwischen ca. 1 cm und 5 cm Kantenlänge. Ist das zu untersuchende Materialstück zu groß, so werden mit Hilfe einer Trennschleifmaschine oder Säge – je nach Werkstoffhärte – Stücke entsprechender Größe herausgetrennt.

Während des Trennvorganges und auch während der folgenden Präparationsstufen muss eine ausreichende **Kühlung** der Probe gewährleistet sein, damit die Probentemperatur einen zugelassenen Höchstwert nicht überschreitet.

Beim Trennen (Sägen) wird Probenmaterial zerspannt – eine entsprechende Zugabe (= Abstand zur späteren Schliifebene) ist erforderlich und muss bei der Festlegung der Schnitt- bzw. Trennebene berücksichtigt werden. Der Anpressdruck ist so gering wie möglich zu halten, um die dadurch erzeugte lokale Verformung zu begrenzen.

Die Anfertigung eines **Zerlegeplanes** (Abb. 1.3) ermöglicht die spätere Zuordnung der Schliffebenen zum Bauteil. Damit wird auch eine Probenverwechslung bei gleichzeitiger Entnahme mehrerer Proben verhindert. Die Trennebenen sind dauerhaft auf dem Bauteil anzubringen. Das Bauteil ist vor dem Zerlegen mit der Kennzeichnung zu dokumentieren – damit wie bereits erwähnt eine Rekonstruktion des Entnahmeortes und der Orientierung der Proben zum Bauteil möglich ist. Die Kennzeichnung kann mit einem (wasserfesten) Filzstift oder Klebeetiketten oder dauerhaft mit einer Anreißnadel, Gravierstift, Elektroschreiber oder Schlagbuchstaben erfolgen, sofern dabei die Probe nicht beschädigt wird. Die entnommenen Proben sind ebenfalls zu kennzeichnen. Der Zerlegeplan sollte alle Schliffebenen enthalten (mit deren Bezeichnung) und muss ggf. bei Anfertigung weiterer Schliffe im Zuge der Untersuchung aktualisiert werden.

Nach der Probennahme sollten die Proben gereinigt werden, z.B. im Ultraschallbad. Damit wird erreicht, dass Verschmutzungen die Schlifffläche nicht beeinflussen und Spalte und Hohlräume von losen Partikeln gereinigt werden.

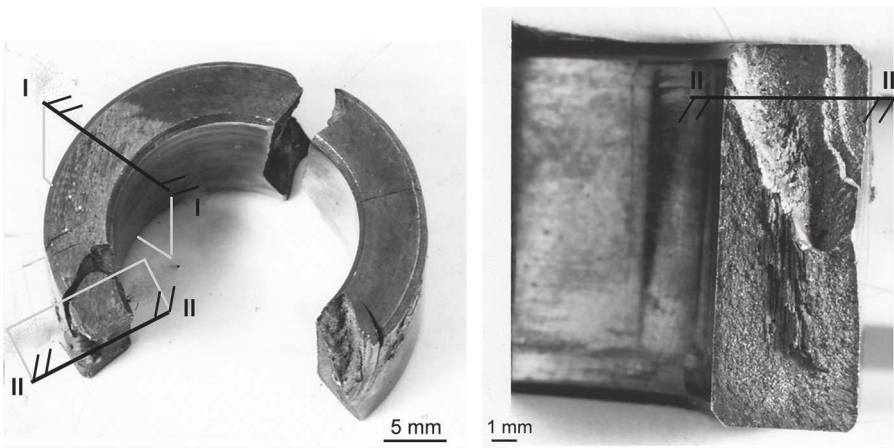


Abb. 1.3: Beispiel für die Dokumentation einer Probe und Kennzeichnung der Schliffe.

Wichtig ist allerdings, dass keine Reinigung erfolgen sollte, wenn Oberflächenbeläge untersucht werden, da diese durch die Reinigung beschädigt werden können oder wenn der Nachweis von chemischen Verbindungen über zusätzliche elektronenmikroskopische Untersuchungen erfolgen soll. Dies gilt auch für die Kühlung mit Flüssigkeiten während des Trennens.

Beim Trennen selbst sind folgende Vorgaben zu beachten:

- Trennfläche sollten möglichst plan sein
- Rautiefe möglichst klein
- Keine Verformungen in trennflächennahen Bereichen
- Kein bzw. geringer Temperatureintrag in die spätere Schliiffläche
- Keine Verstärkung oder Neubildung von Materialfehlern (z.B. Risse)
- Wenig Materialverlust (Schnittbreite)
- Trennstelle genau positionieren – ein Abplatzen von vorhandenen, mit zu untersuchenden Schichten ist zu vermeiden

Nach dem Trennvorgang dürfen die Kanten des späteren Schliifs nicht entgratet werden. Alle anderen Kanten, die nicht für die Schliifpräparation vorgesehen sind, werden entgratet.

### 1.3.2 Einbetten

#### 1.3.2.1 Allgemeines Vorgehen

Kleine Probenstücke wie Drähte, Nadeln, dünne Bleche, Späne usw., bei denen die Abmessungen deutlich unterhalb von 0,5 cm liegen, müssen zwecks bequemer Handhabung „vergrößert“ werden. Dies geschieht beispielsweise durch **Einbetten** in Kunststoffmassen, z.B. in Acrylmassen, oder durch **Einklemmen** in einfache Klemmvorrichtungen – Abb. 1.4. Zudem bietet das Einbetten oder Einklemmen die Möglichkeit, mehrere Proben gleichzeitig zu bearbeiten.

Das Einbetten bzw. Einklemmen ist auch bei größeren Schliiffen erforderlich, und zwar dann, wenn sich die spätere Betrachtung auf den Schliifftrand beziehen soll, wie z.B. bei der Untersuchung von Diffusionszonen oder von galvanischen Überzügen. Schliiffe, die ohne Einbettung oder Einklemmung hergestellt werden, weisen eine deutliche **Abrundung** der Randzonen auf, was ein unscharfes Gefügebild dieser Zone zur Folge hat. Durch die Einbettung oder Einklemmung wird die Abrundung in die Randzone der Einklemmvorrichtung verlagert, wodurch der Schliifftrand eben und scharfkantig bleibt (Abb. 1.5).

Damit die Abtragung von Schliiff und Einbett- bzw. Einklemmmaterial während des Schleifens möglichst gleichmäßig verläuft, muss die Härte der Einbettung bzw. Einklemmung der Schliiffhärte angepasst sein. Durch Zugabe von Aluminiumoxid lässt sich die Härte von Kunststoffeintrittmassen anheben.

Um die Einbettmasse leitend für Strom zu machen, was z.B. für das spätere elektrolytische Polieren erforderlich ist, wird unter die Einbettmasse Silber- oder Kupferpulver gemischt.

Sehr vorteilhaft bei der Untersuchung dünner Randzonen ist der **Schrägschliiff** (Abb. 1.6). Durch eine Abschrägung, deren Winkellage beliebig gewählt werden kann, wird die dünne Randzone zu einer größeren Fläche aus-

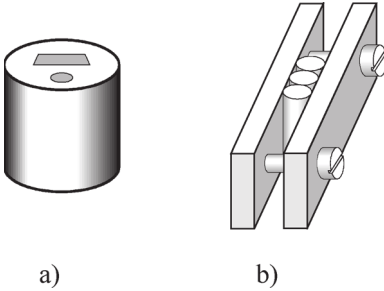


Abb. 1.4: a) eingebettete Schliffe, b) eingeklemmte Proben.

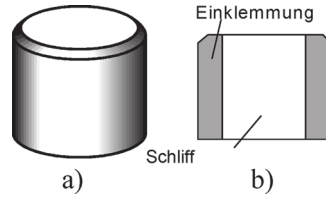


Abb. 1.5: a) Schliff mit abgerundeter Randzone, b) Verlagerung der Abrundung in die Kante der Einklemmung bzw. der Einbettmasse.

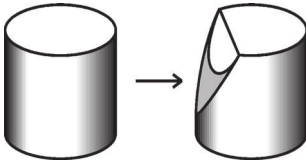


Abb. 1.6: Vergrößerung der Betrachtungsfläche dünner Randschichten durch einen Schräganschliff.

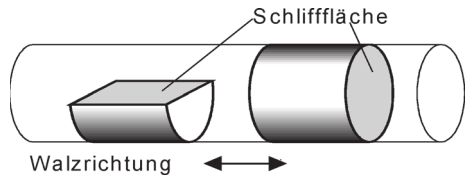


Abb. 1.7: Längsschliff (links) und Querschliff (rechts) eines gewalzten Stabes.

geweitet. Es ist zu beachten, dass ein Winkel von  $11^\circ$  eine 5fache Verzerrung der Schlifffläche mit sich bringt.

Bei plastisch verformten Werkstücken kann die Schlifffläche in Verformungsrichtung oder quer zur Verformungsrichtung gewählt werden. Im ersten Fall spricht man vom **Längsschliff**<sup>1</sup>, im zweiten Fall hingegen vom **Querschliff** (Abb. 1.7). Entsprechend bezeichnet man einen zur Verformungsrichtung abgewinkelten Schliff als **Schrägschliff**.

Die Betrachtung eines Längsschliffes liefert z.B. Informationen über den Verformungsgrad der Körner und ihre Längsmaße, die Gleichmäßigkeit der Verformung, die Anordnung der Einschlüsse sowie über die Ausprägung der Zeiligkeit.

Der Querschliff wird gewählt, um die Quermaße der Körner zu bestimmen und die Phasen sowie Einschlüsse qualitativ auszuwerten.

Beim Einbetten in Kunststoffe können weitere Unterscheidungen getroffen werden, wie das Warm- bzw. Kalteinbetten. Bei der Auswahl des Einbettver-

<sup>1</sup> Die Bezeichnung Längs- bzw. Querschliff muss sich nicht ausschließlich auf die Verformungsrichtung beziehen, sondern kann auch in Abhängigkeit von der Geometrie bzw. Bauteilgestaltung vorgenommen, wie z.B. quer zu einer Schweißnaht.

fahrens sind unterschiedliche Kriterien zu beachten, wie später ausgeführt wird. Grundsätzlich muss die Einbettmasse an die Probe angepasst werden: z.B. harte Proben können nicht in weiche Einbettmittel eingebettet werden, da sonst eine Kantenabrundung der Probe erfolgt.

### 1.3.2.2 Kalteinbetten

Nach dem Eingießen der Probe mit dem Kalteinbettmittel erfolgt eine nur geringe Temperaturentwicklung beim Aushärten der Gießmasse in der Form.

Kalteinbetten wird bei Proben angewendet, die nicht bzw. nur gering erwärmt werden dürfen, z.B. aushärtbare Al-Legierungen. Im Vergleich mit dem Warmeinbetten ist der Aufwand geringer.

Vor dem Einbetten ist die Probe mit Alkohol zu reinigen. Bei starker Verschmutzung ist die Probe im Ultraschallbad zu reinigen. Sie muss frei von Fetten und losen Teilen sein. Nach dem Reinigen muss die Probe sorgfältig unter dem Föhn getrocknet werden. Danach werden die Proben nur noch mit Handschuhen oder Pinzette angefasst.

Die Einbettform ist an die Größe der Schliiffprobe anzupassen: ein Abstand von 5 mm zwischen Probe und Rand der fertigen Einbettung ist einzuhalten. Ein Abstand über 10 mm ist zu vermeiden. Die Menge an Kalteinbettmittel ist an die Probengröße bzw. das -volumen anzupassen. Die Arbeiten mit dem Kalteinbettmittel sind im Abzug und unter Verwendung von persönlichen Schutzmaßnahmen: Schutzbrille, Handschuhe, Schutzkleidung vorzunehmen. Die entsprechenden Sicherheitshinweise der Verpackung sind zu beachten. Die saubere, trockene Probe wird mit der späteren Schliiffflche nach unten eingelegt. Korrektes Gewicht bzw. Volumen der Komponenten entsprechend der Vorgaben des Herstellers abmessen. Die Komponenten sorgfältig vermischen, die Mischung über die Probe gießen und die gefllte Einbettform zum Aushärten stehenlassen bzw. zur Vermeidung von Blasen oder Hohlraumbildung in einen Drucktopf stellen. Mischen und Aushärtezeit sind wichtige Parameter für die Qualität der Einbettung. Deswegen unbedingt die Vorgaben des Herstellers beachten. Nach dem Aushärten die Probe aus der Einbettform entnehmen. Sofern die Einbettform nicht beschädigt ist, kann sie für weitere Einbettvorgnge wiederverwendet werden. Nach dem Kantenabrunden der Kalteinbettmasse wird die Probe – wie bereits erwähnt – mit einem lsungsmittelbestndigen Stift oder mit einer Reibnadel bezeichnet.

Eine Alternative zu den herkömmlichen Kalteinbettverfahren stellt die Verwendung von UV-Einbettmitteln dar. Die Proben werden in UV-transparenten Einbettformen mit der Schliiffflche nach unten platziert und mit dem UV-Einbettmittel befllt. Mit speziellen Geräten erfolgt in, im Vergleich zum herkömmlichen Kalteinbetten, relativ kurzer Zeit (rd. 60 s) unter UV-Einstrahlung die



Aushärtung. Ein weiterer Vorteil ist die transparente Einbettung. Die Erwärmung mit bis zu 90 °C liegt noch unter der Temperatur des Warmeinbettsens.

1.3.2.3 Warmeinbetten

Die Proben müssen vor dem Einbetten gereinigt werden, um die Haftung des Einbettmittels zu verbessern. Am besten eignen sich dafür Aceton oder zumindest Ethanol. Auch die Reinigung in einem Ultraschallbad kann erforderlich sein. Anschließend müssen die Proben sorgfältig getrocknet werden. Gereinigte Proben werden nur mit Handschuhen oder Pinzette berührt. Der Durchmesser der Probe wird an den des Zylinders angepasst, wobei der Abstand zur Zylinderwand etwa 3–5 mm betragen sollte. Auch die Höhe der Probe wird angepasst, wobei die endgültige Höhe der Einbettung etwa 20 mm beträgt. Abschließend wird ein geeignetes Warmeinbettmittel (duroplastisches oder thermoplastisches Material) gewählt. Die Einbettmasse härtet unter Druck und Temperatur in einer Maschine aus. Die Probe wird deutlich bis zu ca.180 °C erwärmt und nach Möglichkeit unter Druck abgekühlt, um Schrumpfspannungen möglichst zu minimieren.

Tabelle 1.1: Vergleich Kalt- und Warmeinbetten.

| Kalteinbetten                                                                                                                                                                                                                                    | Warmeinbetten                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>- Spalt zwischen Probe und Einbettmasse</li><li>- Poren, Einschnitte, Risse werden nicht ausgefüllt, schnell und einfach</li><li>- Keine (geringe) Beeinträchtigung der Probe (Gefüge, Struktur)</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>- Auswirkung auf Probe (Gefüge, Struktur) möglich wegen Druck und hoher Temperatur</li><li>- Aufwändiger, erfordert Gerät</li><li>- Kein bzw. nur geringfügiger Spalt zwischen Probe und Einbettmasse</li><li>- Poren, Einschnitte, Risse werden ausgefüllt</li><li>- Bessere Randschicht und Schliffqualität</li></ul> |

1.3.3 Schleifen der ausgewählten Schlifffläche

Nachdem die Schliffoberfläche festgelegt wurde, folgt die Glättung dieser Fläche durch Schleifen auf Schleifpapieren. Das Schleifen kann maschinell oder von Hand bei Anwendung nasser oder trockener Schleifpapiere geschehen. Aus Zeitgründen wird das maschinelle Schleifen bevorzugt. Hygienische Aspekte und die Gewährleistung der Schliffkühlung sprechen eindeutig für die Anwendung nasser Schleifpapiere, die während des Schleifens von einem leichten Wasserstrahl überspült werden.

Der Schleifvorgang beginnt mit einem grob arbeitenden Papier niedriger Körnung, wird auf Papieren zunehmender Körnung fortgesetzt und endet schließlich mit einem sehr fein arbeitenden Papier, z.B. der Körnung 1000 oder 1200. Bei Bedarf (z.B. bei Aluminium- oder Kupferlegierungen) kann der Schleifvorgang

auf Papieren der Körnung 2400 bzw. 4000 abgeschlossen werden, die mittlerweile von Herstellerseite zur Verfügung stehen. Durch die Anwendung dieser feinkörnigen Schleifpapiere kann der dem Schleifen folgende Poliervorgang wesentlich verkürzt werden.

Die **Körnung** (Siebkörnungsnummer), die stets auf der Rückseite des Schleifpapiers als Zahl angegeben ist, bedeutet die Anzahl der Siebmaschen, die auf 1 Zoll Länge des Siebes entfallen, durch das das Schleifmittel vor dem Beschichten des Schleifpapiers gesiebt wurde.

Als Schleifpulver wird vornehmlich **Siliciumkarbid** ( $\text{SiC}$ ), auch **Karborund** genannt, verwendet. Vereinzelt wird als Schleifpulver auch noch Aluminiumoxid (Korund) verwendet. In neuester Zeit kommen auch vermehrt Diamantschleiffolien zum Einsatz.

Der Aufwand, der beim Schleifen getätigt wird, wird von der Vorgabe, ob ein Makro- oder Mikroschliff herzustellen ist, bestimmt. Für die Beurteilung makroskopischer Größen, die im Mikroskop bis zu einer Vergrößerung von rd. 50fach erkennbar sind, wird ein Makroschliff mit geringerem Auswand angefertigt. Müssen mikroskopische Gefügebestandteile identifiziert werden, muss ein Mikroschliff mit höherem Aufwand beim Schleifen und Polieren hergestellt werden. Bei der Beurteilung von Randbereichen, Schichtdickenmessungen, Reinheitsgrad, Korngrößen oder vom vorhandenen Grundgefüge ist ein Mikroschliff erforderlich. Bei der Beurteilung von z.B. Härteverläufen, Ungänzen/Fehlern im 1/10 mm-Bereich, Schweißnahtgeometrien reicht ein Makroschliff aus.

Beim mikroskopischen Schliff ist in der Regel ein Planschleifen erforderlich. Wird eine bestimmte Ebene im Bauteil als Schliffebene vorgegeben, ist darauf zu achten, dass diese nicht weggeschliffen wird, wenn die Bearbeitungszugabe zu gering ist. Bei zu großer Zugabe wächst der Aufwand an Schleifarbeit.

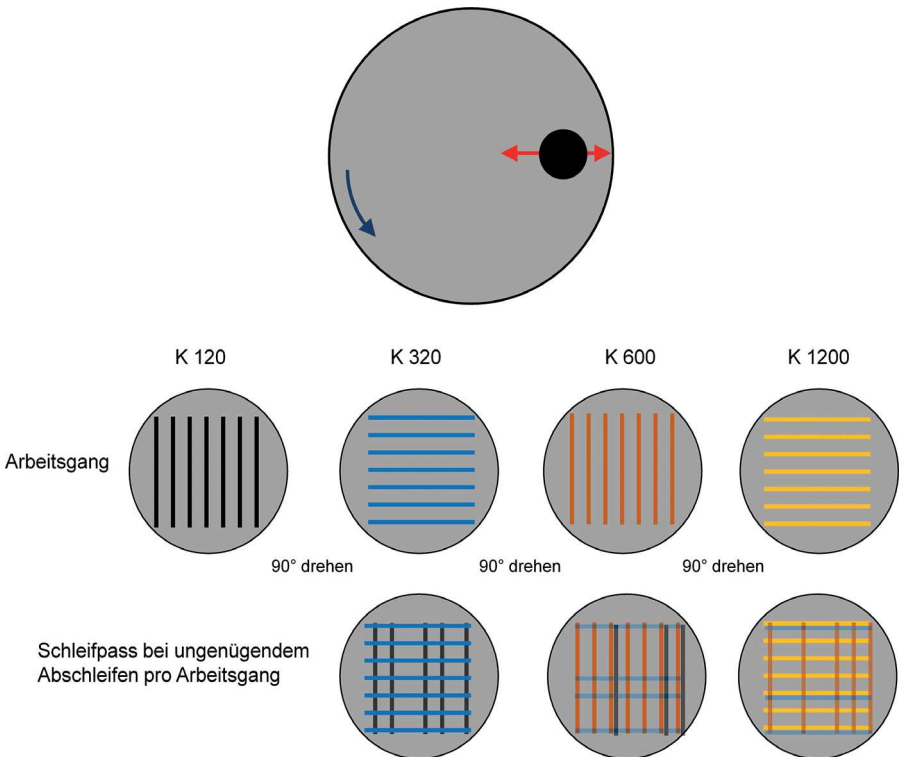
Die Werkstoffeigenschaften der Probe, wie z.B. Härte und Verformbarkeit, wirken sich ebenfalls aus. Harte Werkstoffe (z.B. martensitische Werkstoffe) sind in Bezug auf Gefügeverformungen deutlich weniger empfindlich als weiche und verformungsanfällige, wie z.B. TiAl oder Nickelbasiswerkstoffe. Dies ist auch zu beachten, wenn anschließend Härteprüfungen gemacht werden.

Wenn in der Probe Härteunterschiede vorhanden sind, können sich Stufen ausbilden, die bei der Gefügeinterpretation zu falschen Schlüssen führen. Hierbei ist zu beachten, dass nicht zu lange geschliffen wird und die Schleifunterlage rechtzeitig gewechselt wird.

Auch die Geometrie der Probe, wenn z.B. starke Querschnittsänderungen vorliegen, ist beim Schleifen zu berücksichtigen.

Die Arbeitsschritte beim Schleifen lassen sich wie folgt zusammenfassen (Abb. 1.8):

- Planschleifen: Siliziumkarbid/Korund, Körnungen 60–120 bzw. Diamant (manuell), Körnungen 250–120  $\mu\text{m}$
- Feinschleifen: Siliziumkarbid/Korund, Körnungen 320–800 bzw. Diamant, Körnungen 75–25  $\mu\text{m}$
- Feinstschleifen: Siliziumkarbid Körnungen 1000–4000 bzw. Diamant, Körnungen 15–7  $\mu\text{m}$



**Abb. 1.8:** Aufsetzen der Probe beim manuellen Schleifen und Schleiffolge (Bild oben) sowie in der Schlifffläche sich einstellender Schleifpass.

Beim maschinellen Schleifen darf dank der hohen Schnittgeschwindigkeit der Schleifpapiersatz auf folgende Körnungen reduziert werden: 220, 320, 500, 800, 1000, 1200.

Für makroskopische Zwecke genügt in der Regel ein grobes Schleifen bis zur Körnung 500.

Durch sorgfältiges **Spülen** von Schliff und Händen nach jeder Schleifstufe soll eine Übertragung von Resten des Schleifmittels des vorangegangenen Papiers auf das feinere Schleifpapier vermieden werden.

Das Schleifen für mikroskopische Zwecke muss in allen Schleifstufen sehr sorgfältig durchgeführt werden. Das Wechseln vom gröberen zum feineren Schleifpapier darf erst dann stattfinden, wenn alle Riefen des vorangegangenen Papiers beseitigt wurden. Damit eine einfache und wirksame Kontrolle des Verschwindens der Schleifriefen des vorangegangenen Papiers möglich ist, wird bei jedem Papierwechsel die Schleifrichtung um ca.  $90^\circ$  verändert.

Selbst bei größter Sorgfalt beim Schleifvorgang, und sogar dann, wenn der Schleifvorgang mit einem außergewöhnlich feinen Papier der Körnung 2400 oder gar 4000 enden würde, wäre der Schliff für mikroskopische Untersuchungen noch immer nicht geeignet. Für mikroskopische Zwecke ist ein weiteres Glätten der Schliffoberfläche, nämlich durch **Polieren**, erforderlich.

Vor Beginn des Polierens müssen etwaige Rückstände des Schleifmittels von Schliff und Hand durch ausgiebiges Spülen entfernt werden.

### 1.3.4 Polieren der geschliffenen Oberfläche

Das Polieren hat zunächst die Aufgabe, eine ebene und riefenfreie Schliffoberfläche zu erzeugen. Aus dieser Sicht betrachtet man einen Schliff dann als gut poliert, wenn bei einer **Dunkelfeldbeobachtung**<sup>2</sup> mit 500facher Vergrößerung keine Riefen mehr erkennbar sind.

Da beim Schleifen, vor allem in den ersten Schleifstufen, die Schleifkörner nicht nur ein feines Zerspanen verursachen, sondern gleichzeitig eine Verformung einer bis zu ca.  $50\text{ }\mu\text{m}$  tiefen Oberflächenschicht hervorrufen, muss im Poliervorgang diese verformte Schicht, die sogenannte **Beilby-Schicht**, beseitigt werden (Abb. 1.9). Eine unzulängliche Beseitigung dieser Verformungsschicht hätte nämlich eine deutliche Störung des anschließend geätzten Gefügebildes zur Folge sowie eine Verfälschung bei evtl. Härteprüfungen, besonders bei Mikrohärteprüfungen. Abb. 1.10 lässt den Unterschied der Bildqualität eines nicht ausreichend und eines gut polierten Schliffes deutlich erkennen.

Eine vollständige Beseitigung der Verformungsschicht kann durch wiederholtes Zwischenätzen während des Poliervorganges oder durch Vibrationspolieren erreicht werden kann.

<sup>2</sup> Dank einer speziellen Objektivkonstruktion und eines ringförmigen Lichtstrahls fällt das Licht nicht wie bei einer Hellfeldbetrachtung senkrecht auf die Schliffoberfläche, sondern schräg (Abb. 1.24b), wodurch etwaige Riefen, Kratzer und andere Oberflächenvertiefungen hell leuchtend und auffällig in einem dunklen Umfeld zum Vorschein kommen.

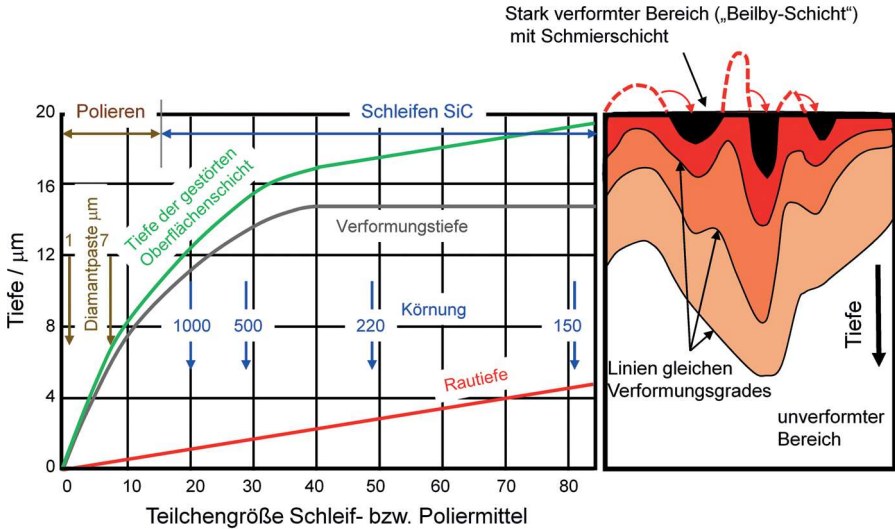
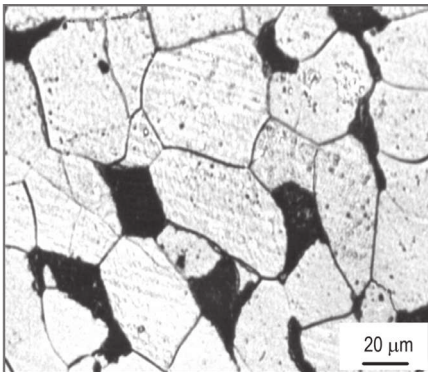
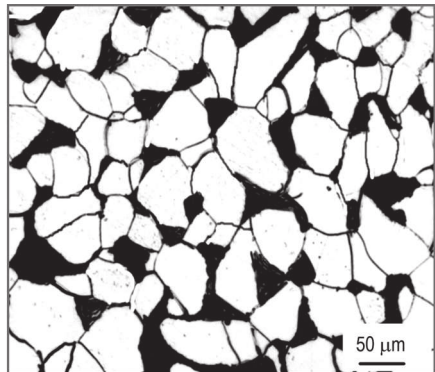


Abb. 1.9: Schematische Darstellung der Verformungsschicht beim Polieren (rechts) und Rau-, Verformungs- und Gesamttiefen der Schicht in Abhängigkeit von der Korngröße [2].



Nital

a)



Nital

b)

Abb. 1.10: Gefügebilder einer zweiphasigen Fe-C-Legierung: a) mit erkennbar schlechter Bildqualität als Folge unvollständiger Beseitigung der Schleifriefen und der Beilby-Schicht, b) nach ausreichender Beseitigung dieser Schicht.

Das Einsetzen der feinsten Schleifpapiere 2400 und 4000 am Ende des Schleifvorganges oder ein Polieren mit der Körnung  $3\text{ }\mu\text{m}$  bewirken einen beschleunigten Abbau der Beilby-Schicht und somit eine Verkürzung des Poliervorganges.

Man unterscheidet das mechanische (maschinelle) und das elektrolytische Polieren.

#### 1.3.4.1 Maschinelles Polieren

Der Schliff wird von Hand oder mit Hilfe einer Haltevorrichtung gegen eine rotierende und mit einem **Poliertuch** versehene Kunststoff- oder Metallscheibe gedrückt, die eine Drehfrequenz von ca. 150 1/min bis 600 1/min ausübt. Poliertücher werden aus Samt, Filz (Baumwolle), Leinen, Seide oder Kunststoff hergestellt.

Um die Entstehung sogenannter **Polierschatten** (Kometenschweife) zu verhindern, aber auch um die gesamte Fläche des Poliertuches zu nutzen, soll der Schliff eine bogenförmige Bewegung oder eine Radialbewegung auf der Polierscheibe ausführen. Polierschatten sind nicht ausreichend polierte Bereiche der Schliffoberfläche, die sich hinter harten Gefügebestandteilen bzw. Einschlüssen bilden (Abb. 1.11).

Die Oberfläche des Poliertuches wird in bestimmten Zeitintervallen, die experimentell festgelegt werden, mit einer wässrigen oder alkoholischen Suspension eines geeigneten Poliermittels besprüht.

Als **Poliermittel** wird bevorzugt **Aluminiumoxid** (Tonerde,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) oder **Diamant** verwendet.

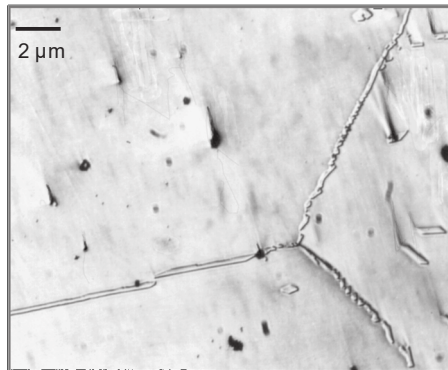


Abb. 1.11: Schlifffläche mit erkennbaren Polierschatten.