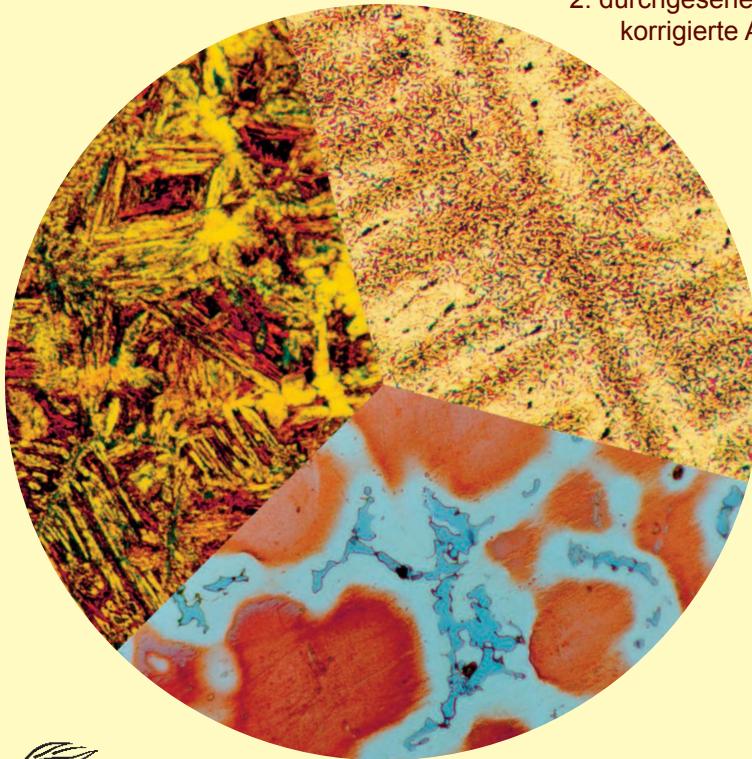


Georg Salbert

# Metallographie

## Grundlagen und Anwendung

2. durchgesehene und  
korrigierte Auflage



Borntraeger, Stuttgart



*PlanarMet™ 300 Planschleifgerät – plane Proben in Sekunden*

Eine sauber präparierte Probe ist Voraussetzung, um das wahre Gefüge ihres Werkstoffes sichtbar machen zu können.

Seit 1936 hilft Buehler weltweit Metallographen bei der Probenpräparation.

Unser Lieferprogramm umfasst neben metallographischen Geräten und Verbrauchsmaterialien vor allem Härteprüferäte und Systeme zur quantitativen Gefügeanalyse und Bildspeicherung.

**Solutions for Materials Preparation, Testing and Analysis**

Georg Salbert  
**Metallographie**  
Grundlagen und Anwendung  
2. durchgesehene und korrigierte Auflage



Materialkundlich-  
Technische  
Reihe **14**

---

# **Metallographie**

## **Grundlagen und Anwendung**

**von**  
**Georg Salbert**

2. durchgesehene und korrigierte Auflage

mit 159 Abbildungen



**Borntraeger 2015**

Georg Salbert: Metallographie

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

2. durchgesehene und korrigierte Auflage, 2015  
1. Auflage, 2010

ISBN ebook (pdf) 978-3-443-01156-7  
ISBN 978-3-443-23018-0

Informationen zu diesem Buch auf unserer Webseite:  
[www.borntraeger-cramer.de/9783443230180](http://www.borntraeger-cramer.de/9783443230180)

© 2015 Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Germany

Das Werk einschließlich aller seiner 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. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Johannesstr. 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

Satz: Frank Erdrich, Medienwerkstatt, Stuttgart  
Druck: e-kurz + Co., Stuttgart

# Vorwort

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 bereits 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

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	V
<b>1 Die Schliffherstellung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Begriffe: Schliff, Gefüge .....	1
1.2 Die Schliffpräparation .....	1
1.2.1 Probenahme .....	1
1.2.2 Schleifen der ausgewählten Schlifffläche .....	4
1.2.3 Polieren der geschliffenen Oberfläche .....	5
1.2.3.1 Maschinelles Polieren .....	6
1.2.3.2 Elektrolytisches Polieren .....	9
1.2.4 Anwendung polierter Schlitte .....	10
1.2.4.1 Schliffbilder ungeätzter Metallproben .....	11
1.2.5 Ätzen der polierten Schliffoberfläche .....	12
1.2.5.1 Gefügeentwicklung .....	13
1.3 Praktische Übungen .....	15
<b>2 Makroskopische Untersuchungen .....</b>	<b>17</b>
2.1 Anwendungsbereich .....	17
2.2 Einteilung makroskopischer Verfahren .....	18
2.2.1 Flachätzverfahren .....	18
2.2.1.1 Das Heyn'sche Verfahren .....	18
2.2.1.2 Das Oberhoffer-Verfahren .....	20
2.2.1.3 Makroätzung mit alkoholischer Salpetersäure .....	22
2.2.1.4 Makroätzung nach Adler .....	23
2.2.1.5 Makroätzung von Aluminium .....	25
2.2.2 Tiefätzverfahren .....	26
2.2.3 Abdruckverfahren .....	28
2.3 Praktische Übungen .....	31
<b>3 Gefüge unlegierter Eisen-Kohlenstoff-Werkstoffe .....</b>	<b>32</b>
3.1 Der Kohlenstoff als Zementit; Gefüge des metastabilen Fe-C-Systems .....	32
3.1.1 Gefüge des metastabilen Systems im Stahlbereich .....	34
3.1.1.1 Gefüge untereutektoider Stähle .....	35
3.1.1.1.1 Grobkorngefüge und nadeliges Umwandlungsgefüge .....	40
3.1.1.1.2 Entartetes Gefüge .....	41
3.1.1.1.3 Gefügezeiligkeit .....	42

3.1.1.1.4	Schweißnahtgefuge .....	44
3.1.1.2	Gefuge eutektoider Stähle .....	47
3.1.1.3	Gefuge übereutektoider Stähle .....	49
3.1.2	Gefuge des metastabilen Systems im Gusseisenbereich .....	55
3.1.2.1	Gefuge untereutektischer weißer Gusseisen .....	55
3.1.2.2	Gefuge eutektischer weißer Gusseisen .....	57
3.1.2.3	Gefuge übereutektischer weißer Gusseisen .....	59
3.2	Der Kohlenstoff als Graphit; Gefuge des stabilen Fe-C-Systems	60
3.2.1	Die häufigsten geometrischen Formen des Graphits .....	62
3.2.1.1	Die Lamellenform .....	62
3.2.1.2	Die Kugelform .....	66
3.2.1.3	Kompaktgraphit und Graupelgraphit .....	68
3.2.1.4	Die Flockenform .....	70
3.2.2	Schalenhartguss und meliertes Gusseisen .....	73
3.3	Der im Eisengitter gelöste Kohlenstoff .....	74
3.3.1	Zerfall des unterkühlten Austenits .....	75
3.3.1.1	Das Härtegefuge .....	75
3.3.1.2	Das Zwischenstufengefuge .....	82
3.3.1.3	Die Perlitbildung .....	83
3.3.2	Anlassgefuge .....	85
3.3.2.1	Gefuge nach niedrigem Anlassen .....	85
3.3.2.2	Gefuge nach mittlerem Anlassen .....	86
3.3.2.3	Gefuge eines hoch angelassenen Stahls .....	86
3.4	Praktische Übungen .....	89
<b>4</b>	<b>Gefuge ausgewählter Nichteisenmetalle .....</b>	<b>91</b>
4.1	Kupferlegierungen .....	92
4.1.1	Cu-Sn-Legierungen; Zinnbronzen .....	95
4.1.1.1	Cu-Sn-Knetlegierungen .....	95
4.1.1.2	Cu-Sn-Gusslegierungen .....	100
4.1.1.3	Cu-Sn-Sinterlegierungen .....	100
4.1.2	Mehrstoff-Bronzen .....	102
4.1.2.1	Mehrstoff-Knetbronzen .....	102
4.1.2.2	Mehrstoff-Gussbronzen .....	103
4.1.3	Spezialbronzen .....	105
4.1.3.1	Aluminiumbronzen .....	105
4.1.3.1.1	Erstarrungsgefuge von Aluminiumbronzen .....	106
4.1.3.1.2	Gefügeveränderungen von Aluminiumbronzen beim Abkühlen im festen Zustand .....	107
4.1.3.2	Berylliumbronzen .....	112
4.1.3.3	Bleibronzen .....	115

---

4.1.4	Cu-Zn-Legierungen (Messing) .....	116
4.1.4.1	Cu-Zn-Knetlegierungen .....	118
4.1.4.1.1	Einphasige Cu-Zn-Knetlegierungen .....	118
4.1.4.1.2	Zweiphasige Cu-Zn-Knetlegierungen .....	119
4.1.4.2	Cu-Zn-Gusslegierungen .....	123
4.1.5	Kupfer-Nickel-Legierungen .....	124
4.2	Aluminiumlegierungen .....	126
4.2.1	Al-Knetlegierungen .....	126
4.2.1.1	Nicht aushärtbare Al-Knetlegierungen .....	126
4.2.1.2	Aushärtbare Al-Knetlegierungen .....	127
4.2.2	Typische Al-Gusslegierungen .....	130
4.2.3	Al-Sinterlegierungen .....	137
4.3	Titanlegierungen .....	138
4.3.1	Einphasige $\alpha$ -Legierungen .....	139
4.3.2	Einphasige $\beta$ -Legierungen .....	140
4.3.3	Zweiphasige ( $\alpha+\beta$ )-Legierungen .....	140
4.4	Praktische Übungen .....	145
	Literaturverzeichnis .....	146
	Sachwortverzeichnis .....	147



# 1 Die Schliffherstellung

## 1.1 Begriffe: Schliff, Gefüge

Als **Schliff** bezeichnet man eine entsprechend behandelte Materialprobe, die für eine eindeutige Gefügeuntersuchung 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 und Fremdeinschlüsse vermittelt.

## 1.2 Die Schliffpräparation

Die Schliffherstellung besteht aus folgenden Arbeitsschritten:

- Probenahme
- Schleifen der ausgewählten Schliffoberfläche
- Polieren der geschliffenen Oberfläche
- Ätzen der polierten Schliffoberfläche

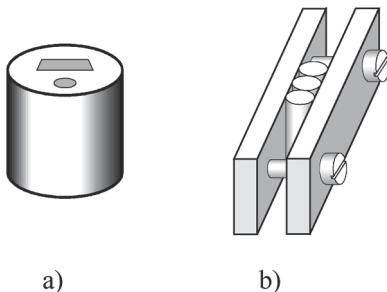
Nach erfolgreichem Abschluss dieser Präparationsschritte kann die mikroskopische Schliffbetrachtung stattfinden.

### 1.2.1 Probenahme

Für mikroskopische Untersuchungen sind Proben einer bestimmten Größe geeignet. Die optimalen Schliffmaße liegen zwischen ca. 1 cm und 5 cm Kantenlänge. Ist das zu untersuchende Materialstück größer, 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. Dieser Wert beträgt für Stahlproben ca. 80 °C und entspricht der Temperatur, bei der die ersten Gefügeveränderungen stattfinden können.

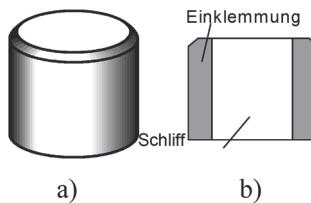
Kleine Probenstücke wie Drähte, Nadeln, dünne Bleche, Späne usw., bei denen die Abmessungen deutlich unterhalb von 0,5 cm liegen, müssen zwecks bequemer Handhabung „vergrößert“ werden. Dies geschieht beispielsweise durch **Einbetten** in Kunststoffmassen, z.B. in Akrylmassen oder durch **Einklemmen** in einfache Klemmvorrichtungen – Abb. 1.1. Zudem bietet das Einbetten oder Einklemmen die Möglichkeit, mehrere Schritte gleichzeitig zu bearbeiten.



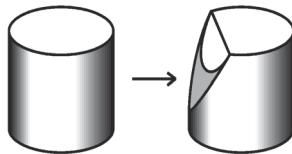
**Abb. 1.1:** a) eingebettete Schritte, b) eingeklemmte Schritte

Das Einbetten bzw. Einklemmen ist auch bei größeren Schritten erforderlich, und zwar dann, wenn sich die spätere Betrachtung auf den Schliffrand beziehen soll, wie z.B. bei der Untersuchung von Diffusionszonen oder von galvanischen Überzügen. Schritte, 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 Schliffrand eben und scharfkantig bleibt – Abb. 1.2.

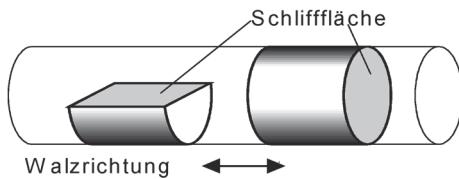
Damit die Abtragung von Schliff und Einbett- bzw. Einklemmmaterial während des Schleifens möglichst gleichmäßig verläuft, muss die Härte der Einbettung bzw. Einklemmung der Schliffhärte angepasst sein. Durch Zugabe von Aluminiumoxid lässt sich die Härte von Kunststoffeinbettmassen anheben.



**Abb. 1.2:** a) Schliff mit abgerundeter Randzone, b) Verlagerung der Abrundung in die Kante der Einklemmung bzw. der Einbettmasse



**Abb. 1.3:** Vergrößerung der Betrachtungsfläche dünner Randschichten durch einen Schräganschliff



**Abb. 1.4:** Längsschliff und Querschliff eines gewalzten Stabes

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

Sehr vorteilhaft bei der Untersuchung dünner Randzonen ist der **Schräganschliff** – Abb. 1.3. Durch eine Abschrägung, deren Winkellage beliebig gewählt werden kann, wird die dünne Randzone zu einer größeren Fläche ausgeweitet.

In Proben plastisch verformter Werkstücke kann die Schlifffläche in Verformungsrichtung oder quer zur Verformungsrichtung gewählt werden. Im ersten

Fall spricht man vom **Längsschliff**, im zweiten Fall hingegen vom **Querschliff** – Abb. 1.4. 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 und quantitativ auszuwerten.

## 1.2.2 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 arbeitendem Papier niedriger Körnung, wird auf Papieren zunehmender Körnung fortgesetzt und endet schließlich auf einem sehr fein arbeitendem Papier, z.B. der Körnung 1000 oder 1200.

Bei Bedarf 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** (SiC), auch **Karborund** genannt, verwendet.

Zum manuellen Schleifen von Stahlproben für mikroskopische Betrachtungen hat man früher einen Papiersatz mit folgenden Körnungen verwendet: 150 (180), 220, 320, 400, 500, 600, 800, 1000 bzw. 1200.

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 400.

Durch sorgfältiges **Spülen** von Schleif 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° verändert.

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

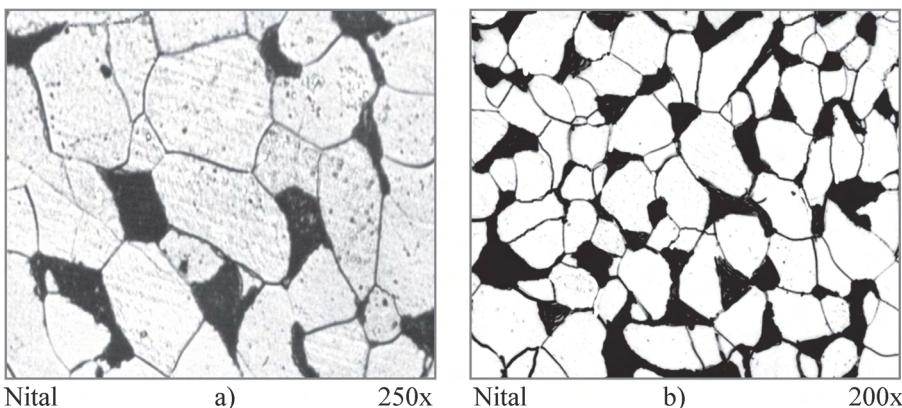
Vor Beginn des Polierens müssen etwaige Rückstände des Schleifmittels von Schleif und Hand durch ausgiebiges Spülen entfernt werden.

### 1.2.3 Polieren der geschliffenen Oberfläche

Das Polieren hat zunächst die Aufgabe, eine ebene und riefenfreie Schleifoberfläche zu erzeugen. Aus dieser Sicht betrachtet man einen Schleif dann als gut poliert, wenn bei einer **Dunkelfeldbeobachtung**<sup>1</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 µm tiefen Oberflächenschicht hervorrufen, muss im Poliervorgang diese verformte Schicht, die so genannte **Beilby-Schicht**, beseitigt werden. Eine unzulängliche Beseitigung dieser Verformungsschicht hätte nämlich eine deutliche Störung des anschließend geätzten Gefügebildes zufolge. Abb. 1.5 lässt den Unterschied der Bildqualität eines nicht ausreichend und eines gut polierten Schleifes deutlich erkennen.

<sup>1</sup> Dank einer speziellen Objektivkonstruktion und eines ringförmigen Lichtstrahls fällt das Licht nicht wie bei einer Hellfeldbeobachtung senkrecht auf die Schleifoberfläche, sondern schräg (Abb. 1.15b), wodurch etwaige Riefen, Kratzer und andere Oberflächenvertiefungen hell leuchtend und auffällig in einem dunklen Umfeld zum Vorschein kommen.



**Abb. 1.5:** 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

Die Praxis zeigt, dass eine vollständige Beseitigung der Verformungsschicht erst durch eine drei- bis viermalige Wiederholung des durch ein Zwischenätnen unterbrochenen Poliervorganges erreicht werden kann.

Das Einsetzen der feinsten Schleifpapiere 2400 und 4000 am Ende des Schleifvorganges oder ein Vorpölern mit Poliermitteln 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.

### 1.2.3.1 Maschinelles Polieren

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

Um die Entstehung so genannter **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 Berei-