

# 1 Systematik und Methoden zur Kennzeichnung des Aufbaus der Werkstoffe

## 1.1 Einleitung

Die Materialwissenschaft behandelt den Zusammenhang zwischen dem Aufbau und den nützlichen Eigenschaften aller Werkstoffgruppen. Für die Strukturen unterscheiden wir drei Größenbereiche  $\Delta x$ : makro ( $1 \text{ mm} \leq \Delta x_{\text{Makro}} \leq \infty$ ), mikro ( $10 \text{ nm} \leq \Delta x_{\text{Mikro}} \leq 1 \text{ mm}$ ), nano ( $0,1 \text{ nm} \leq \Delta x_{\text{Nano}} \leq 10 \text{ nm}$ ). Die zugehörigen Methoden werden entsprechend als Makroskopie, Mikroskopie, Nanoskopie bezeichnet. Diese sind in der Lage eine vollständige Beschreibung vom Aufbau der festen Stoffe zu geben: von den Grundbausteinen (Atom und Molekül), über die Phasen (Kristall, Quasikristall, Glas/amorpher Festkörper) mit ihren Baufehlern, bis zu dem, was in Zeiten als lichtmikroskopische Methoden vorherrschten, als das Gefüge bezeichnet wurde. Diesen nützlichen Begriff gibt es allerdings nur in der deutschen Sprache. Wir unterscheiden jetzt wiederum Makro-, Mikro- und Nanogefüge. Letzteres ist Gegenstand elektronenoptischer Methoden. Besonders vielfältig anwendbar ist direkte Durchstrahlung von Proben mit Elektronen. Deshalb findet diese Methode in diesem Buch besondere Beachtung. Heute können wir alle Ebenen der Struktur, auch kompliziert aufgebauter Werkstoffe der Technik, lückenlos analysieren und den Eigenschaften zuordnen. Viele werkstofftechnische Entwicklungen werden auf dieser Grundlage gezielt und damit auch am wirtschaftlichsten durchgeführt.

Ziel des vorliegenden Buches ist eine knappe, aber trotzdem umfassende Darstellung der Werkstoffmikroskopie. Dabei werden physikalische Grundlagen, soweit unbedingt notwendig, ebenso behandelt wie die kompliziert aufgebauten Gefüge von Werkstoffen der Technik wie zum Beispiel ausscheidungsgehärtete Aluminiumlegierungen und thermo-mechanisch behandelte Stähle. Die verschiedenen mikroskopischen Methoden werden systematisch und vergleichend erörtert. Im Mittelpunkt stehen aber die Methoden der Transmissionselektronenmikroskopie, einschließlich Beugung zur Analyse der Struktur der Phasen sowie Spektroskopie für die quantitative Bestimmung der Atomarten. Der Grund dafür ist, dass die Auswertung der Abbildungen der meisten mikroskopischen Methoden relativ vordergründig ist. Dies gilt nicht für die Transmissionselektronenmikroskopie, wo ohne Kenntnisse der Grundlagen der Bildentstehung wenig auszurichten ist. Andererseits gibt gerade diese Methode die bei weitem umfassendste Auskunft über den Aufbau der Werkstoffe. Sie steht deshalb im Mittelpunkt der mikroskopischen Methoden. In den allermeisten Fällen muss sie aber durch andere Methoden, insbesondere die Lichtmikroskopie und die Rasterelektronenmikroskopie, ergänzt werden.

Das Buch beruht auf Vorlesungen und Übungen, die von den Autoren im Rahmen des Vertiefungsfaches Werkstoffwissenschaft an der Ruhr-Universität gehalten

ten wurden. Es ist aber auch zum Selbststudium für alle Naturwissenschaftler und Ingenieure geeignet, die einen Einstieg in das Gebiet der Mikroskopie von metallischen, keramischen und polymeren Werkstoffen suchen. Weiterführende Literatur ist am Ende eines jeden Kapitels angegeben.

Die Forschung auf dem Gebiet der Werkstoffe ist in den letzten 100 Jahren sehr schnell fortgeschritten. Die Anregung dafür stammt aus zwei Quellen. Die Ergebnisse der Materialwissenschaft haben dazu beigetragen, dass wir viele Eigenschaften der bekannten Werkstoffe besser verstehen. So hat die Theorie der Baufehler des Kristallgitters zu einem quantitativen Verständnis der Metallplastizität geführt, die Theorie der ferromagnetischen Bezirke zum Verständnis der Eigenschaften magnetisch weicher und harter Stoffe. Die zweite Anregung stammt von der Technik. Für deren neue Entwicklungen müssen neue oder sehr verbesserte Werkstoffe entwickelt werden, zum Beispiel für Gasturbinen oder integrierte Schaltungen. Außerdem wird von vielen bekannten Werkstoffen größere Reproduzierbarkeit ihrer Eigenschaften gefordert.

Für diese Werkstoffentwicklungen ist es immer weniger sinnvoll, den früher allein üblichen empirischen Weg zu gehen. Es ist vielmehr zweckmäßig, die Eigenschaften eines Werkstoffes aus der Mikrostruktur abzuleiten. Die moderne Festkörperforschung liefert Theorien, in denen mikroskopischer Aufbau und makroskopische Eigenschaften in einfachen Fällen verknüpft werden. In zunehmendem Maße lassen sich auch technisch wichtige Eigenschaften wie Empfindlichkeit gegen Spannungskorrosion und Ermüdung oder Neigung zu Sprödbbruch aus dem mikroskopischen Aufbau ableiten. Voraussetzung dazu ist in jedem Fall, dass der mikroskopische Aufbau eines Stoffes lückenlos bekannt ist.

Zusätzlich zu den seit langem bekannten Methoden zur Untersuchung des Aufbaus der Stoffe

- Chemische Analyse - zur Bestimmung der Atomarten,
- Beugung von Röntgenstrahlen - zur Bestimmung der Kristallstrukturen,
- Lichtmikroskopie - zur Untersuchung des Mikrogefüges

sind in den letzten Jahren weitere Methoden gekommen, die vorzugsweise mit Korpuskelstrahlen (= Teilchenstrahlen) als Sonden zur Untersuchung der Nanostrukturen arbeiten. Die wichtigsten sollen nachstehend aufgeführt werden:

- Durchstrahlungs-Elektronenmikroskopie,
- Emissions-Elektronenmikroskopie,
- Raster-Elektronenmikroskopie,
- Elektronenstrahl-Mikrosonde,
- Feldionen-Mikroskopie,
- Rastersondenmikroskopie
- Computertomographie.

Jedes dieser Verfahren hat seinen mehr oder weniger weiten Anwendungsbereich, in dem es vor allen anderen Verfahren die beste Information über einen mikroskopischen Parameter liefert. Durch eine geeignete Kombination dieser Verfahren

sind wir heute in der Lage, eine lückenlose mikroskopische Kennzeichnung zu geben. Gegenstand der Kapitel 2 bis 12 dieses Buches ist ein Teilgebiet der Werkstoffmikroskopie - die direkte Durchstrahlung des Werkstoffes mit Elektronen -, ein Verfahren, das sich durch eine große Breite der Anwendungsmöglichkeiten auszeichnet.

## 1.2 Systematik des Gefüges

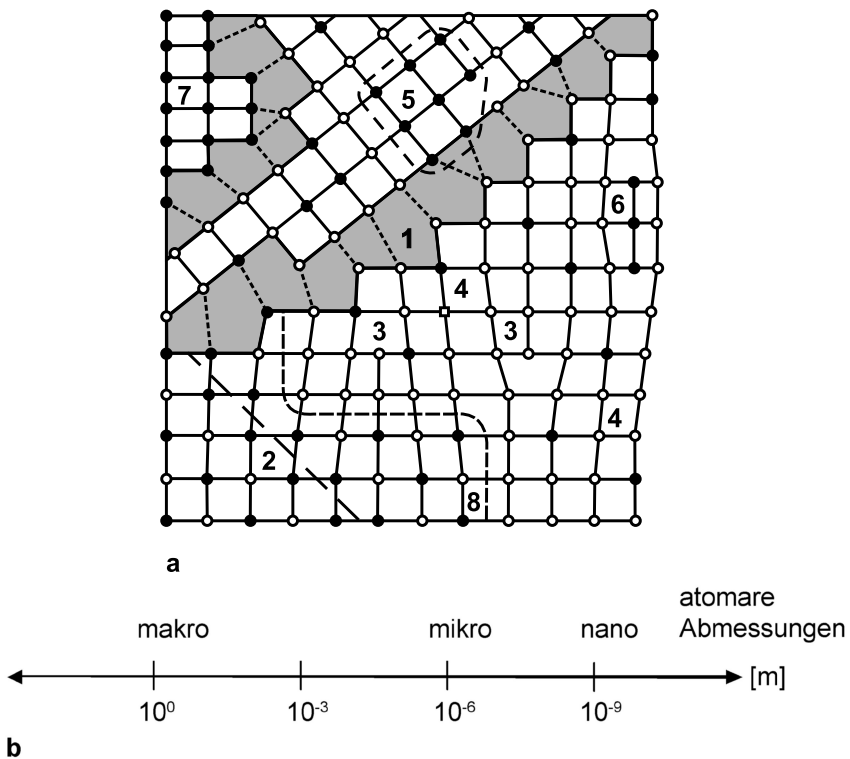
Zu einer vollständigen mikroskopischen Kennzeichnung eines Werkstoffes gehören folgende Größen, die z. T. in Abb. 1.1a in einer zweidimensionalen Darstellung schematisch gezeigt werden:

- Atomart (d. h. die chemische Zusammensetzung),
- Moleküle, die Grundbausteine einer Phase für Polymerwerkstoffe,
- die Anordnung der Grundbausteine mit den Grenzfällen "perfekter Kristall" (größtmögliche Ordnung) und "Glas" oder "amorpher Festkörper" (kleinstmögliche Ordnung im festen Zustand),
- die Volumenanteile, Größe, Form und Verteilung der Phasen (für den Fall von mehrphasigen Stoffen),
- in kristallinen Stoffen die nicht im thermodynamischen Gleichgewicht befindlichen Gitterstörungen wie Korngrenzen, Stapelfehler, Zwillingsgrenzen, Versetzungen, Leerstellen; im Falle von kristallinen und nichtkristallinen Phasengemischen zusätzlich die Phasengrenzen nach Art, Form, Dichte und Verteilung,
- elektronische Strukturen wie Bloch- und Néel-Wände (= Grenzen zwischen Bereichen mit unterschiedlicher Magnetisierungsrichtung, s. Kap. 10), Flussfäden der Supraleiter, ferroelektrische Bezirke,
- Struktur und Morphologie der Oberfläche des Werkstoffes.

Abb. 1.1b definiert die Begriffe „makro“, „mikro“ und „nano“ im Größenbereich von Strukturen. So liegen z.B. Nanoteilchen im Größenbereich von  $10^{-9}$  m.

Die Eigenschaften der festen Stoffe können danach eingeteilt werden, ob sie primär abhängen von

- Atomart - z. B. Dichte, kernphysikalische Eigenschaften,
- Molekülstruktur - z. B. chemische Eigenschaften, Schmelztemperatur von Molekulkristallen, Viskosität,
- Kristallstruktur - z. B. Kristallanisotropie, Anisotropie des Elastizitätsmoduls,
- Gitterstörungen - z. B. Kristallplastizität, magnetische Hysterese, Leitfähigkeit von Halbleitern.



**Abb. 1.1:** a) Zweidimensionale schematische Darstellung des Gefüges eines Stoffes, der aus mehreren Kristallarten besteht, die wiederum verschiedene Arten von Gitterbaufehlern enthalten: 1. Korngrenze, 2. Antiphasengrenze, 3. Stufenversetzung, 4. Leerstelle, 5. kohärentes Teilchen, 6. teilkohärentes Teilchen, 7. nicht kohärentes Teilchen, 8. Grenze zwischen geordneter Phase und ungeordnetem Mischkristall, b) Größenbereiche der Strukturen

Die Strukturen der untersuchten Werkstoffe können durch ganz verschiedene Ursachen entstanden sein. Zum Beispiel:

- *Thermodynamisches Gleichgewicht:* sehr langsame Abkühlung: Meteoriten, graues Gusseisen (Abb. 1.9c), Einkristalle.
- *Eingefroren:* Glas als eingefrorene Flüssigkeit (Abb. 4.5b), Leerstellen in abgeschreckten Mischkristallen, Versetzungen in kalt verformten Kristallen (Abb. 6.9e).
- *Evolutionäre Struktur:* entstanden in zeitlicher Folge durch Keimbildung und Wachstum aus Glas (Abb. 8.11, 8.12) oder übersättigtem Mischkristall (Abb. 1.29, 8.6, 8.7, 8.9, 8.10, 8.13, 9.4).
- *Historische Struktur:* z.B. Schadensfälle (Abb. 1.26 bis 1.28, 9.3, 9.18 bis 9.21), entstanden in zeitlicher Folge aus Risskeim und dessen Wachstum bis zum kritischen Zustand.

- *Fraktale Strukturen*: raue Linien, Flächen – nichteuklidische Dimensionen von Gitterfehlern, Oberflächen (Abb. 1.6).
- *Künstliche Strukturen*: hergestellt mittels menschlicher Intelligenz, z.B. durch Aufdampftechniken (integrierte Schaltkreise) oder Sintern (Abb. 5.7c, Abb. 7.6).

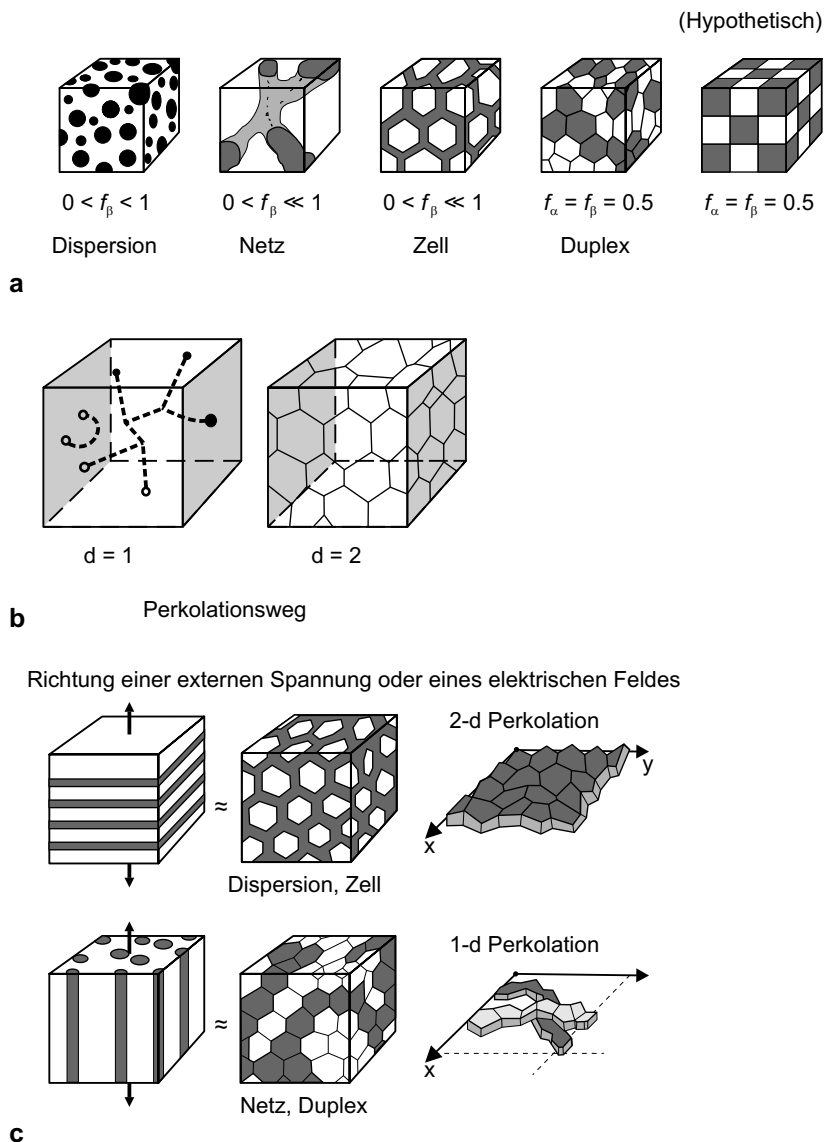
Ein Verständnis der Werkstoffeigenschaften setzt eine vollständige Kenntnis der Mikrostruktur voraus. Dafür ist eine klare Systematik erforderlich, die alle Aspekte enthält und die Voraussetzungen für eine quantitative Beschreibung liefert. Zunächst unterscheiden wir die bereits erwähnten Ebenen der Struktur, die, ausgehend vom makroskopischen Werkstoff (Probe, Bauteil), vom Gefüge bis zu den Elementarteilchen reichen (Tabelle 1.1, Abb. 1.1b). Das Gefüge steht in der Werkstoffmikroskopie im Mittelpunkt des Interesses. Es folgen die Phasenstruktur (Kristall, Quasikristall, Glas) und die Atomart. Die für die hochpolymeren Stoffe so wichtige Ebene der molekularen Struktur ist den üblichen Mikroskopen nicht zugänglich, sondern spektroskopischen und nanoskopischen Methoden vorbehalten.

**Tabelle 1.1:** Strukturebenen von Werkstoffen

+5	Industrie	Makrostruktur	
+4	Anlage		
+3	Maschine		
+2	Einfaches System		
+1	Bauteil		
0	Probe/Halbzeug		Größenordnung [m]
-1	Gefüge	Mikrostruktur	$5 \cdot 10^{-9} - 10^0$
-2	Phase		$10^{-9} - 10^{-6}$
-3	Molekül		$10^{-9} - 10^{-4}$
-4	Atom		$10^{-9}$
-5	Elementarteilchen		$10^{-15}$

Für eine Beschreibung des Gefüges ist es sehr sinnvoll, Elemente entsprechend ihrer euklidischen geometrischen Dimension  $d$  zu definieren. Im dreidimensionalen Raum ergeben sich vier Gruppen: punkt-, linien-, flächenförmige sowie räumliche Elemente (Tabelle 1.2). Sie werden quantitativ als Dichten  $\rho_i$  (Defektdichten:  $d \cdot m^{-3}$ ) angegeben und besitzen eine Energie  $e$  (Einheit  $J \cdot d^{-1}$ ); das Produkt  $\rho_i \cdot e_i$  hat dann immer die Einheit  $Jm^{-3}$ . Es handelt sich also um eine Energiedichte, nämlich die Gefügeenergie. Die mikroskopischen Methoden sind hilfreich

bei ihrer Bestimmung in Ergänzung zur Kalorimetrie (= Messung von Wärmemengen). In der Praxis spielt diese Energie eine wichtige Rolle, zum Beispiel als Triebkraft für Kristallerholung, Rekristallisation und Kornwachstum.



**Abb. 1.2:** a) Prinzipielle Gefügetypen in zweiphasigen Mikrostrukturen (schematisch). Bei gleichen Volumenanteilen der Phasen führen die verschiedenen Gefügetypen zu unterschiedlichen Eigenschaften des Werkstoffes. b) Perkolation (i.e. lückenlose Durchdringung) von Gefügeelementen (Versetzungen  $d = 1$ , Korngrenzen  $d = 2$ ) c) Perkolation in anisotropen und isotropen homogenen Gefügen

**Tabelle 1.2:** Euklidische Dimensionen  $d$  und spezifische Energien  $e$  von Gefügeelementen.

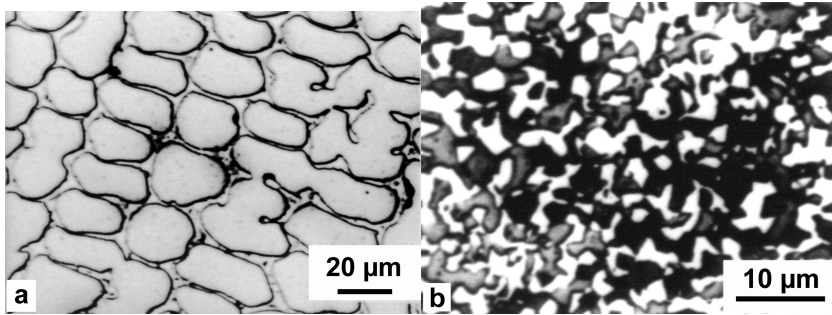
$d$	Element	Dichte $\rho$	spezifische Energie $e$	Härtungsmechanismus
0	Leerstelle Zwischengitteratom Substitutionsatom	$\text{m}^{-3}$	J	Bestrahlungshärtung Mischkristallhärtung
1	Versetzung	$\text{m}^{-2}$	$\text{Jm}^{-1}$	Kaltverfestigung
2	Korngrenzen Zwillingsgrenzen Antiphasengrenzen	$\text{m}^{-1}$	$\text{Jm}^{-2}$	Feinkornhärtung
3	dispergierte Teilchen	$\text{m}^0$	$\text{Jm}^{-3}$	Ausscheidungshärtung

Ein weiteres wichtiges Gebiet ist die Beschreibung mehrphasiger Gefüge. Zum Beispiel kann ein Werkstoff aus 50 v/o  $\alpha$ -Phase und 50 v/o  $\beta$ -Phase bestehen. Dann gibt es drei grundsätzliche Möglichkeiten, diese Phasen anzuordnen (Abb. 1.2). Sie sind als Gefügetypen bekannt und zwar: Dispersions-, Zell- und Netzgefüge.

Zellstrukturen, deren eine Komponente ein Gas ist, sind als Schäume oder Schwämme bekannt. Falls Perkolation (= Durchdringen) des Gases möglich ist, handelt es sich um offene Schäume, sonst um geschlossene Schäume.

Eine Variante des Netzgefüges ist das Duplexgefüge, während Dualphasengefüge einen speziellen Fall der Dispersionen darstellen. Duplexstähle und Dualphasenstähle weisen derartige Gefüge auf. Duplexstähle weisen zweiphasige Gefüge mit etwa gleichen Anteilen von Ferrit ( $\alpha$ -Eisen) und Austenit ( $\gamma$ -Eisen) auf. Sie werden in korrosiven Umgebungen und bei tiefer Temperatur eingesetzt. Dualphasenstähle sind ebenfalls zweiphasig, aber ihr Gefüge besteht aus einer ferritischen Matrix mit martensitischen Körnern, die auf den Ferritkorngrenzen dispergiert sind. Der Martensitanteil beträgt etwa 10 – 20 %. Diese Stähle werden als Bleche im Karosseriebau eingesetzt, da sie sich durch Tief- und Streckziehen gut umformen lassen.

Es ist plausibel, dass verschiedene Gefügetypen trotz gleichen Volumenanteils zu unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften führen können. Dies wird deutlich durch eine Festlegung dieser Gefügetypen mit Hilfe der *Perkolation*. Dies bedeutet eigentlich Durchdringungsfähigkeit. In einer Dispersion kann in der Grundmasse  $\alpha$  immer ein Weg von einem Ende der Probe bis zur anderen gefunden werden. Die Teilchen liegen darin völlig isoliert. Entsprechendes gilt für das Zellgefüge, in dem dieser Weg jedoch entlang der Zellwände führt, in denen das Zellinnere isoliert ist. Für die Beurteilung der Leitfähigkeit von Metallen ist entscheidend, ob Elektronen diesen Weg finden. Ist in der Dispersion die Grundmasse elektrisch leitend, so ist es der Gesamtwerkstoff. Das gleiche gilt für die Phase, die eine Zellwand bildet. Schließlich muss in diesem Zusammenhang der *Netz-* oder *Duplex-Typ* erwähnt werden. Hier haben wir Perkolation durch  $\alpha$ - und  $\beta$ -Phasen.



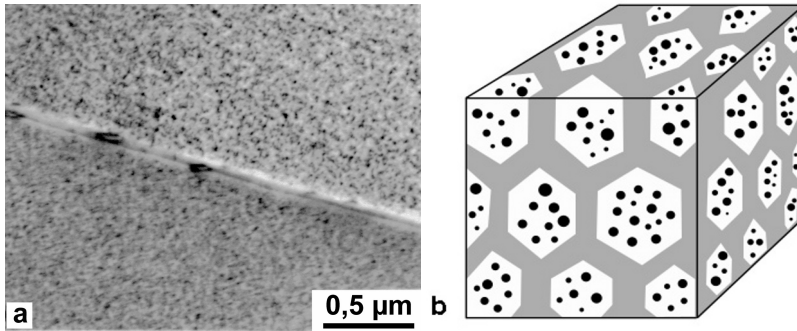
**Abb. 1.3:** Beispiele für zweiphasige Gefüge a) Zellstruktur, Fe-12Mn-0,5 B-12C (wt. %), LM b) Duplexgefüge, Fe-9 Ni, Ferrit + Martensit, LM

Diese Zusammenhänge sind nicht nur für Leitfähigkeiten, sondern auch für Diffusions-, Korrosions- oder Bruchvorgänge von Bedeutung. Dreidimensionale Licht- und Elektronenmikroskopie erlauben eine eindeutige Kennzeichnung der Gefügetypen (Abb. 1.3).

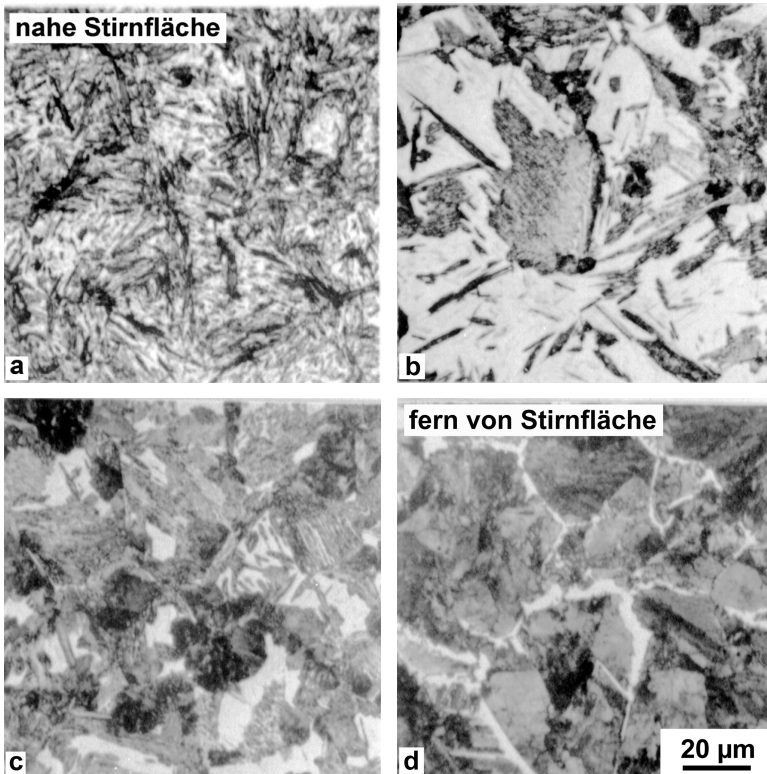
Elemente und Typen reichen manchmal nicht zur vollständigen Kennzeichnung der in der Praxis gefundenen Gefüge aus. Häufig treten mehrere Elemente und Gefügetypen auf. So können die teilchenfreien Zonen in der Umgebung von Korngrenzen ausscheidungsgehärteter Legierungen als Zellgefüge betrachtet werden, das sich dem Dispersionsgefüge im Korninneren überlagert (Abb. 1.4). Weitere wichtige Aspekte sind Gefügegradienten (= Gefügeänderungen, z.B. von der Oberfläche ins Innere, siehe Abb. 1.5), Ordnung und Unordnung im Gefüge und fraktale Gefüge (Abb. 1.6).

Fraktale (oder selbstähnliche) Gefüge sind Strukturen wie z.B. raue oder zerklüftete Oberflächen, Dendriten, Agglomerate und verzweigte Risse, die relativ ungeordnet, aber noch nicht chaotisch sind. Selbstähnlichkeit bedeutet, dass bei höherer Vergrößerung und größerem Auflösungsvermögen die beobachtete Form der ursprünglichen Form geometrisch ähnlich ist. Für eine Fraktalanalyse ist daher die kombinierte Anwendung mehrerer mikroskopischer Methoden erforderlich. Martensit, wie er in Abb. 1.6 dargestellt ist, lässt sich mit klassischer quantitativer Metallographie nicht beschreiben, kann aber mit der nicht-ganzzahligen Fraktaldimension  $D$  gekennzeichnet werden (Abb. 1.6d).

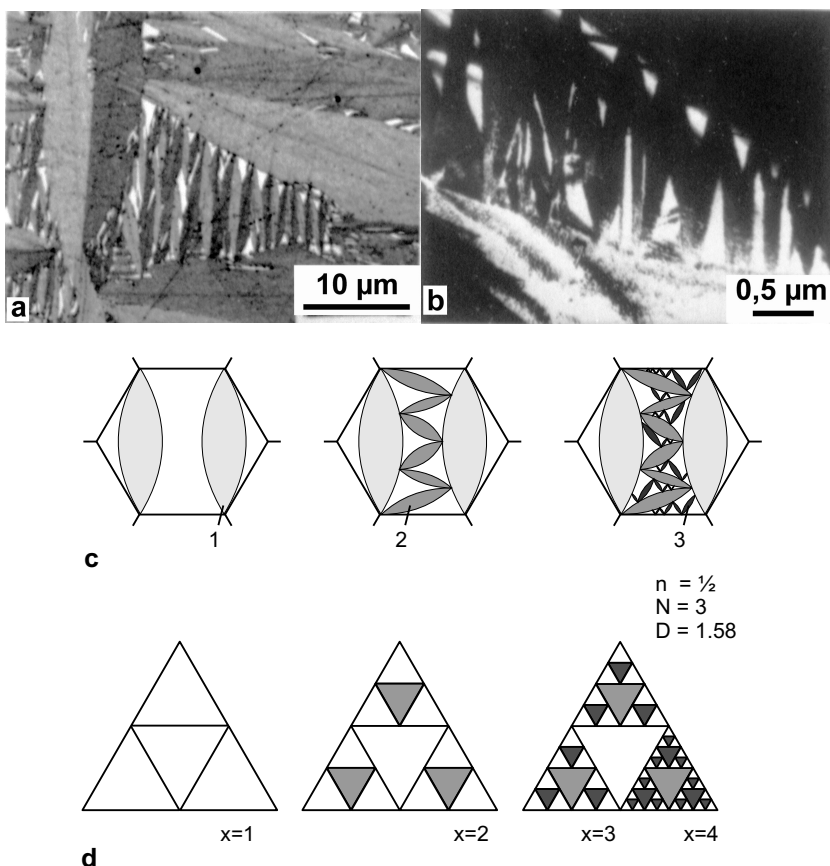




**Abb. 1.4:** Überlagerung von Zell- und Dispersionsgefüge. a) Teilchenfreie Zone in der Umgebung der Korngrenze einer ausscheidungsgehärteten AlMgSi1-Legierungen (B. Grzempa) b) schematisch: Überlagerung von groben Zell- und feinen Dispersionsgefügen



**Abb. 1.5:** Gefügegradient einer Stirnabschreckprobe. Das Gefüge ändert sich mit zunehmendem Abstand  $x$  von der Stirnfläche. a)  $x = 1,5$  mm: Martensit b)  $x = 6$  mm: Martensit und Bainit c)  $x = 7$  mm: Martensit, Bainit und Perlit d)  $x = 24$  mm: Perlit und Ferrit, Zellgefüge des Ferrit (E. Kobus)



**Abb. 1.6:** a-b) Fraktale Gefüge. a) Martensitisches Gefüge; Fe-31.6 Ni-1.7 Cu (LM) b) Martensit im TEM; Fe-31 Ni-10 Co-3.5 Ti (wt.%) (K. Escher) c) Bildung von drei Martensitkristallgenerationen im Austenit (schematisch) d) Sierpinsky-Dreieck, durch aufeinanderfolgende Fragmentation gebildet, dient als Modell für martensitische Umwandlung  $\alpha$ , von Austenit  $\gamma$ ; Hausdorff-Dimension:  $1 < D = 1,58 < 2$

### 1.3 Optische Verfahren zur Analyse des Aufbaus der Werkstoffe

Es gibt eine sehr große Zahl von Methoden zur Analyse der verschiedenen Ebenen der Struktur. Sie beruhen alle auf der Wechselwirkung entweder von elektromagnetischen Wellen (Licht, Röntgenstrahlen) oder Korpustelstrahlen (Elektronen, Neutronen) mit dem zu untersuchenden Stoff (Tabelle 1.3). Die grundsätzlichen Wirkungsweisen dieser Methoden und deren wichtigste Anwendungsgebiete sollen im nächsten Abschnitt kurz behandelt werden.

**Tabelle 1.3:** Verfahren für Festkörperanalyse mittels Elektronen, Röntgenstrahlen und Ionen

Ab- kürzung	Struktur- ebene	Methode	Art der Wechsel- wirkung
ISS	A	ion scattering spectroscopy	I→I
XES	A	X-ray energy spectroscopy	e→x
XRF	A	X-ray fluorescence spectroscopy	x→x
WDX	A	wavelength dispersive X-ray spectroscopy	e→x
EDX	A	energy dispersive X-ray spectroscopy	e→x
EELS	A	electron energy loss spectroscopy	e→e
AES	A	Auger electron spectroscopy	e→e
SIMS	A	secondary ion mass spectroscopy	I→I
ESCA	A	electron spectroscopic chemical analysis	x→e
IIX	A	ion induced X-ray emission spectroscopy	I→x
RBS	A	Rutherford backscattering spectroscopy	I→I
EXAFS	A	extended X-ray absorption fine structure spectroscopy	x→x
EMPA	A	Electron Micro Probe Analysis	e→e
FIMS	A	Field Ion Mass Spectroscopy	→I
ESAD	P	electron selected area diffraction	b e→e
LEED	P	low energy electron diffraction	s e→e
ECP	P	electron channelling pattern	b e→e
EBSP	P	electron beam scattering pattern (KIKUCHI)	b e→e
XD	P	X-ray diffraction	b x→x
HEED	P	high energy electron diffraction	b e→e
SAD	P	selected area diffraction	b e→e
CBED	P	convergent beam electron diffraction	b e→e
TEM	G	transmission electron microscopy	b e→e
HVTEM	G	high-voltage transmission electron microscopy	b e→e
SEM	G	scanning electron microscopy	b e→e
STEM	G	scanning transmission electron microscopy	b e→e
XT	G	X-ray topography	b x→x
FIM	G	field ion microscopy	s I→I
SAXS	G	small-angle X-ray scattering	b x→x
LAXS	G	large-angle X-ray scattering	b x→x
HRTEM	G	high resolution transmission electron microscopy	b e→e
STM	G	scanning tunnelling microscopy	s →e
SEI	G	secondary electron image	s e→e
BSI	G	back scattered electron image	s e→e

A Atomart, P Phase, G Gefüge, s Oberfläche (surface), b Inneres (bulk),  
e Elektron, I Ion, x Röntgenstrahlung

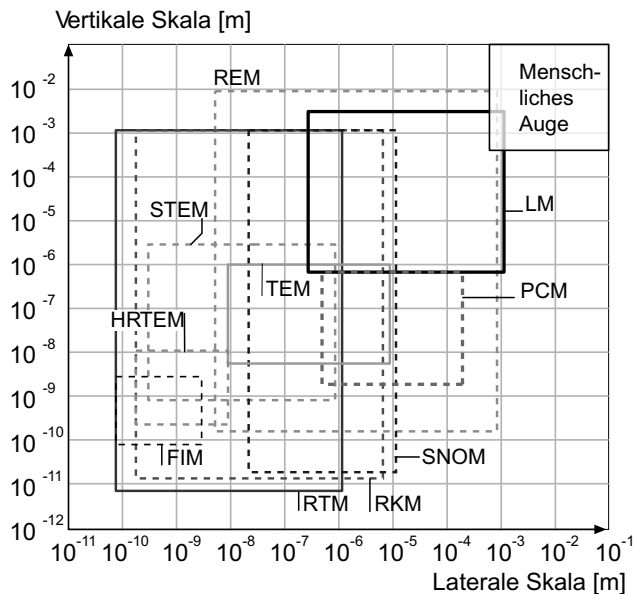
**Tabelle 1.4:** Auflösungsvermögen optischer Verfahren der Werkstoffprüfung (siehe auch Kap. 12.1)

Gerät	Auflösungsvermögen [nm]
Lichtmikroskopie, Auflicht und Durchlicht	300
Elektronenstrahl-Mikrosonde	200
Rasterelektronenmikroskop (Sekundärelektronen)	< 1
Emissionselektronenmikroskop	15
Optische Nahfeldmikroskopie	> 10
Durchstrahlungselektronenmikroskop	
a) Replikamethode	5
b) Direkte Durchstrahlung	> 0,1
Rasterkraftmikroskopie	~ 0,2
Raster-Transmissions-Elektronenmikroskopie (STEM)	< 0,2
Feldionenmikroskop	< 0,1
Rastertunnelmikroskop	< 0,1

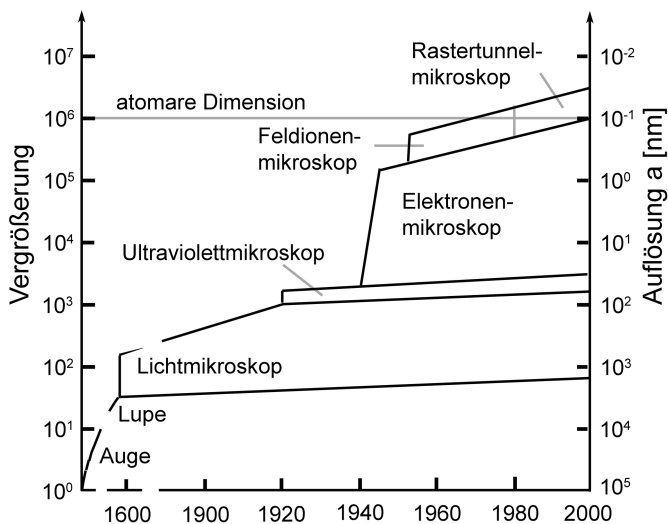
In Tabelle 1.4 ist die heute erreichbare Grenze für das Auflösungsvermögen (= kleinster noch wahrnehmbarer Abstand zweier Punkte oder Linien) einige Verfahren angegeben.

Abbildung 1.7 zeigt den Bereich, der durch die verschiedenen mikroskopischen Methoden abgedeckt wird. Mit steigendem Auflösungsvermögen steigen in der Regel die Anforderungen an die Probendicke, und die maximal untersuchbare Probengröße sinkt. Abbildung 1.8 zeigt die zeitliche Entwicklung einiger wichtiger mikroskopischen Methoden.

Bis zum Mittelalter waren die Menschen einzig auf ihre Augen angewiesen. Dann kamen in der Renaissance die ersten Lupen auf, die als Lesehilfen verwendet wurden. Die Entwicklung des ersten Lichtmikroskops ist nicht exakt belegbar, fällt aber vermutlich in das Ende des 16. Jahrhunderts. Ernst Abbe entwickelte ab 1869 dazu die theoretischen Grundlagen. Basierend auf diesen Berechnungen fertigte Carl Zeiss Mikroskopobjektive unter Verwendung von optischen Gläsern von O. Schott. Mit der Entwicklung der Elektronenmikroskopie wurden von Mitte des 20. Jahrhunderts (Ernst Ruska, Nobelpreis 1986) die Möglichkeiten hinsichtlich erreichbarer Vergrößerung und Auflösungsvermögen stark gesteigert. Diese Methode führte zu einem raschen Fortschritt im Bereich der Metallphysik, da sich erstmals die Möglichkeit der Abbildung von Objekten ergab, über die bis dahin lediglich theoretische Vermutungen existierten (z.B. Versetzungen, Nanoausscheidungen).



**Abb. 1.7:** Skalengebiete, die durch verschiedene mikroskopische Verfahren abgedeckt werden. Die untere und obere Grenze der lateralen Skala beschreiben die laterale Auflösung und die maximale Probengröße, die untersucht werden kann. Die untere und obere Grenze der vertikalen Skala geben die erforderliche Proben-"Dünnheit" sowie maximale Probendicke für die mikroskopische Untersuchung an (nach K. Maeda und H. Mizubayashi [1])



**Abb. 1.8** Die zeitliche Entwicklung, d. h. Steigerung des Auflösungsvermögens der wichtigsten Methoden der Mikroskopie (schematisch)



<http://www.springer.com/978-3-540-89945-7>

Mikro- und Nanoskopie der Werkstoffe

Hornbogen, E.; Skrotzki, B.

2009, VIII, 248 S., Softcover

ISBN: 978-3-540-89945-7