

GRUNDWISSEN FÜR ZAHNTECHNIKER

Reinhold Ströbel  
**Die Metalle**

**dental**  
labor

Grundwissen für Zahntechniker

## Die Metalle

***Werkstoffkunde mit ihren chemischen  
und physikalischen Grundlagen***

21. überarbeitete Auflage

Dipl.-Ingenieur (FH) Reinhold Ströbel

Verlag Neuer Merkur GmbH, 81206 München

Bibliografische Informationen Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

© 2013 Verlag Neuer Merkur GmbH

Verlagsort: Postfach 60 06 62, D-81206 München

Alle Urheberrechte vorbehalten. Vervielfältigungen bedürfen der besonderen Genehmigung.

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 insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmung und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Alle in dieser Veröffentlichung enthaltenen Angaben, Ergebnisse usw. wurden vom Autor nach bestem Wissen erstellt und von ihnen und dem Verlag mit größtmöglicher Sorgfalt überprüft. Gleichwohl sind inhaltliche Fehler nicht vollständig auszuschließen. Daher erfolgen alle Angaben ohne jegliche Verpflichtung oder Garantie des Verlages oder des Autors. Sie garantieren oder haften nicht für etwaige inhaltliche Unrichtigkeiten (Produkthaftungsausschluss). Im Text sind Warennamen, die patent- oder urheberrechtlich geschützt sind, nicht unbedingt als solche gekennzeichnet. Aus dem Fehlen eines besonderen Hinweises oder des Zeichens ® darf nicht geschlossen werden, es bestehe kein Warenschutz.

Grundwissen für Zahntechniker Band I

Reinhold Ströbel

Die Metalle

21. Auflage 2013 – ISBN 978-3-9-95409-010-5

Titelgestaltung: Peter Hänssler

Layout: Dagmar Papic/Peter Hänssler

Druck: Triltsch Print und digitale Medien, Ochsenfurt-Hohestadt

# Vorwort

Die erste Auflage dieses Buches erschien im März 1930 als „Materialienkunde der Zahntechnik, Teil II: Metallkunde“. Autor war Franz Knischewski. Seit 1959 hat Günter Rau an der Bearbeitung dieses Buches mitgewirkt und es nach Wunsch Knischewskis seit 1970 allein bearbeitet. Später hat Herr Rau mich einbezogen und wir haben das Buch gemeinsam weitergeführt.

Der Tradition folgend hat Herr Rau die Bearbeitung des Buches an mich weitergegeben.

## Vorwort zur 21. Auflage

Der besondere Dank gilt Herrn Fredy Schmidli von der Universität Basel WTB.

Die Werkstoffbilder, die Herr Schmidli zur Verfügung gestellt hat, machen diese Überarbeitung möglich und tragen sehr zur Veranschaulichung der Legierungsproblematik bei.

Die elektronenmikroskopischen Aufnahmen erweitern das Verständnis des Verhaltens der Strukturen nicht nur im Idealfall, sondern auch bei Fehlbelastungen und bei Verarbeitungsfehlern.

Nürnberg, im Oktober 2012  
Reinhold Ströbel

# Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1	Der Werkstoff Metall		3.2.2.2	Mechanische Spannungen	39
1.1	Der Qualitätskreislauf	12	3.2.2.2.1	Eigenspannungen	40
1.2	Der Aufbau der Materie	12	3.2.2.2.2	Oberflächenspannungen	40
1.2.1	Atombau	13	3.2.2.2.3	Belastungsspannungen	41
1.2.1.1	Atommasse	13	3.2.2.2.4	Druckdefinition	42
1.2.1.2	Atomradius	13	3.2.2.2.5	Widerstand gegen Belastung	42
1.2.1.3	Elektronenkonfiguration	13	3.2.2.3	Dehnung	42
1.3	Das Periodensystem der Elemente	14	3.2.2.4	Elastizitätsmodul	43
1.4	Metalle und Nichtmetalle	15	3.2.2.4.1	Schub-, Scher-, Torsions- oder Gleitmodul	44
1.5	Der Metallcharakter der Elemente im PSE	16	3.2.2.5	Festigkeit	45
1.6	Die metallische Bindung	17	3.2.2.6	Das Spannungs-/ Dehnungs-Diagramm	45
1.7	Kennzeichen der Metalle	18	3.2.2.7	Verformbarkeit	49
1.8	Kristalle und Kristallite	19	3.2.2.8	Weitere zerstörende Prüfverfahren	51
1.9	Kristallgitter	20	3.2.2.9	Beziehungen der mechanischen Eigenschaften zueinander	51
1.10	Allotropie	24	3.2.2.10	Ermüdungsbruch, Risskeim	51
Kapitel 2			3.2.3	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung	52
Metalle und Legierungen		25	3.3	Werkstoffkennwerte für spezielle Metalleigenschaften	53
2.1	Metallvorkommen	26	3.3.1	Wärmeleitfähigkeit	53
2.2	Gewinnung der Metalle	26	3.3.2	Elektrische Leitfähigkeit und elektrischer Widerstand	53
2.2.1	Hüttenmännische Gewinnung	26	3.3.3	Thermoelektrizität	55
2.2.2	Elektrolytische Gewinnung	26			
2.3	Einkristalle	26	Kapitel 4	Produktions-Verfahren (Qualitätskreis)	57
2.4	Allgemeines über Legierungen	27	4.1	Urformen	58
2.5	Metallschliffe	28	4.1.1	Galvanoformung	58
Kapitel 3			4.1.1.1	Elektrolyt	58
Werkstoffeigenschaften		31	4.1.1.2	Elektronegativität	59
3.1	Werkstoffeigenschaften	32	4.1.1.3	Protolyse	59
3.2	Werkstoffprüfverfahren	32	4.1.1.4	Dissoziation und Hydratation	59
3.2.1	Zerstörungsarme Werkstoffprüfung	32	4.1.1.5	Wirkung von Elektrolyten	61
3.2.1.1	Dichte	32	4.1.1.6	pH-Wert	62
3.2.1.2	Härte	34	4.1.1.7	Elektrolyse	63
3.2.1.2.1	Härteprüfung nach Mohs	34	4.1.1.8	Gesetze von Faraday	63
3.2.1.2.2	Härteprüfung nach Brinell	35	4.1.2	Galvanische Formteilherstellung	64
3.2.1.2.3	Härteprüfung nach Vickers	36	4.1.2.1	Praktischer Ablauf	64
3.2.1.2.4	Härteprüfung nach Rockwell	37			
3.2.1.3	Härte der metallischen Werkstoffe	37			
3.2.2	Zerstörende Werkstoffprüfung	38			
3.2.2.1	Elastizitätsbegriff	38			

4.1.2.2	Passgenauigkeit und Weiterverarbeitung	65	4.1.9.13	Intermetallische Phasen	89
4.1.3	Galvanische Zellen	65	4.1.9.14	Intermetallische Verbindungen	89
4.1.3.1	Halbelement	65	4.1.9.15	Kristallgemische	90
4.1.3.2	Lösungsdruck	66	4.1.9.16	Gefüge in Legierungssystemen mit Mischungslücken	90
4.1.3.3	Osmotischer Druck	66	4.1.10	Das Schmelzen eines reinen Metalls	91
4.1.3.4	Elektrostatische Doppelschicht	66	4.1.11	Das Erstarren eines reinen Metalls	92
4.1.3.5	Elektrolytische Spannungsreihe	66	4.1.12	Das Schmelzen von Legierungen	93
4.1.3.6	Elektrolytische Fällung	67	4.1.13	Das Erstarren von Legierungen	93
4.1.3.7	Normalpotenziale	67	4.1.14	Die Korngröße des Gussgefüges	94
4.1.4	Elektrolytische Gleichstromquelle	68	4.1.15	Strukturänderungen im festheißen Zustand	94
4.1.5	Korrosion	68	4.1.16	Gießverfahren	95
4.1.5.1	Ursachen der Korrosion	69	4.1.17	Formgenauigkeit	101
4.1.5.2	Korrosionsschutz	69	4.1.18	Passgenauigkeit	103
4.1.6	Chemische Angriffe	69	4.1.19	Oberflächenbeschaffenheit	104
4.1.6.1	Oxidation	69	4.1.20	Korngröße	105
4.1.6.2	Sulfidbildung	69	4.1.21	Eigenschaften des Gussgefüges	107
4.1.7	Elektrochemische Vorgänge im Mund	70	4.1.22	Texturen im Gefüge	107
4.1.7.1	Ionenlöslichkeit	70	4.1.23	Gefügedichte	107
4.1.7.2	Kontaktelemente	70	4.1.24	Lunker	108
4.1.7.3	Belüftungselemente	72	4.1.25	Gasblasen	111
4.1.7.4	Konzentrationselemente	73	4.1.26	Gefügereinheit	112
4.1.7.5	Ursachen für Elementbildungen im Mund	74	4.1.27	Gussspannungen	114
4.1.7.6	Polarisation und Passivierung	74	4.1.28	Modellguss-Technik	115
4.1.7.7	Durchbruchspotenzial	75	4.1.29	Spezialgießverfahren von Sekundärteilen	116
4.1.8	Korrosionsarten	76	4.1.30	Gießen von Titan	117
4.1.8.1	Oberflächenkorrosion	76	4.1.31	Sintern	119
4.1.8.2	Auswahlangriff	78	4.2	Umformen	122
4.1.8.3	Korngrenzenangriff	78	4.2.1	Kaltverformung	122
4.1.8.4	Punktförmiger Angriff und Spaltkorrosion	78	4.2.2	Einfluss der Kaltverformung auf das Gefüge	122
4.1.9	Gießereitechnik	78	4.2.3	Einfluss der Kaltverformung auf die Eigenschaften	124
4.1.9.1	Aggregatzustände	78	4.2.4	Die Verformbarkeit metallischer Werkstoffe	126
4.1.9.2	Wärmeausdehnung	78	4.3	Fügen	127
4.1.9.3	Thermische Kontraktion	80	4.3.1	Verbindungsarten	127
4.1.9.4	Spezifische Wärmekapazität	81	4.3.1.1	Schrauben	127
4.1.9.5	Die Schmelzwärme	82	4.3.1.2	Verriegeln	127
4.1.9.6	Schmelz- und Siedepunkte der Metalle	83	4.3.1.3	Nieten	128
4.1.9.7	Löslichkeit der Metalle im flüssigen Zustand	83	4.3.1.4	Löten	128
4.1.9.8	Löslichkeit der Metalle im festen Zustand	85	4.3.1.5	Schweißen	134
4.1.9.9	Feste Lösung	85			
4.1.9.10	Totale Entmischung	85			
4.1.9.11	Mischungslücke	86			
4.1.9.12	Gefüge fester Lösungen	86			

4.3.1.5.1	Kaltpressschweißen	134	5.2	Oberflächenbeschichtungen	155
4.3.1.5.2	Widerstandsschweißen	134	5.2.1	Galvanotechnisches Erzeugen von Metallüberzügen	157
4.3.1.5.3	Flammenschweißen	135	5.2.2	Deckgoldbeschichtungen	159
4.3.1.5.4	Lichtbogen-Plasma- Schweißen	135	5.2.3	Aufsprühen von Metallpartikeln	160
4.3.1.5.5	Laserschweißen	136	5.2.4	PVD-Beschichtungen	161
4.3.1.5.6	Vorteile des Schweißens gegenüber dem Löten	139	5.2.5	Adhäsivschichten	162
4.3.1.5.7	Angießen	139	Kapitel 6		
4.3.1.6	Kleben	140	Anforderungen an		
4.3.1.6.1	Lötfestes (feuerfestes) Kleben	141	das zahntechnische Produkt		165
4.4	Trennen	141	6.1	Konformitätsbewertung	166
4.4.1	Zerteilen	142	6.2	Konformitätserklärung	167
4.4.2	Abtragen	142	Kapitel 7		
4.4.2.1	Elektrisches Abtragen	142	Einfluss von Metallen auf den menschlichen Körper		169
4.4.2.2	Elektrochemisches Abtragen	144	7.1	Metallprothesen im Mund	170
4.4.3	Übergang zur Politur	144	7.2	Aufnahme von Metallen in den menschlichen Körper	171
Kapitel 5			7.3	Biokompatibilität der Metalle	171
Besondere			7.3.1	Metalle als Gift	172
Fertigungsverfahren		147	7.3.2	Allergische Wirkungen von Metallen	174
5.1	Wärmebehandlungen	148	7.3.3	Verfärbung von Metallen im Mund	175
5.1.1	Weichglühen	148	7.3.4	Verfärbungen von Zahnfleischrändern	176
5.1.1.1	Rekristallisieren	148	Kapitel 8 Recycling		179
5.1.1.2	Korngröße nach dem Rekristallisieren	148	8.1	Verhalten der Metalle gegenüber Gasen	180
5.1.1.2.1	Gefüge vor der Kaltverformung	148	8.1.1	Verhalten der Metalle gegenüber Sauerstoff	180
5.1.1.2.2	Verformungsgrad	148	8.1.2	Verhalten gegenüber Schwefelwasserstoff	182
5.1.1.2.3	Rekristallisations- temperatur	149	8.1.3	Verhalten der Metalle gegenüber Säuren	182
5.1.1.2.4	Erhitzungsgeschwindigkeit	149	8.2	Abfallverwertung im Labor	183
5.1.1.2.5	Erwärmungsdauer	149	8.2.1	Scheidgut	183
5.1.1.3	Weichglühen in der Zahntechnik	149	8.2.2	Gekrätz	183
5.1.1.4	Abkühlen metallischer Werkstoffe nach Wärmebehandlungen	150	Kapitel 9 Die reinen Metalle		185
5.1.2	Einflüsse auf das Legierungsgefüge	150	9.1	Gold, Aurum, Au	186
5.1.2.1	Interkristalline Seigerung	150	9.2	Platin, Pt	186
5.1.2.2	Homogenisieren dentaler Legierungen	151	9.3	Palladium, Pd	187
5.1.3	Aushärtung	152	9.4	Iridium, Ir	187
5.1.3.1	Gefügeänderungen bei der Aushärtung	152	9.5	Osmium, Os	188
5.1.3.2	Ausscheidungshärtung	152	9.6	Rhodium, Rh	188
5.1.3.3	Umwandlungshärtung	154	9.7	Ruthenium, Ru	188
5.1.3.4	Aushärten dentaler Edelmetall-Legierungen	154	9.8	Silber, Argentum, Ag	189

9.9	Kupfer, Cuprum, Cu	189
9.10	Zinn, Stannum, Sn	190
9.11	Zink, Zn	191
9.12	Indium, In	192
9.13	Rhenium, Re	192
9.14	Gallium, Ga	193
9.15	Germanium, Ge	193
9.16	Eisen, Ferrum, Fe	193
9.17	Nickel, Ni	194
9.18	Kobalt, Co	194
9.19	Chrom, Cr	195
9.20	Molybdän, Mo	195
9.21	Wolfram, W	196
9.22	Mangan, Mn	196
9.23	Tantal, Ta	196
9.24	Niob, Nb	197
9.25	Titan, Ti	197
9.26	Vanadin, Vanadium, V	198
9.27	Cer, Cerium, Zer, Ce	198
9.28	Aluminium, Al	198
9.29	Beryllium, Be	199
9.30	Kadmium, Cd	199
9.31	Blei, Plumbum, Pb	200
9.32	Magnesium, Mg	201
9.33	Quecksilber, Hydrargyrum, Hg	201

Kapitel 10

Dentale Edelmetalllegierungen		203
10.1	Geschichtliches über Dentallegierungen	204

Kapitel 11

Zustandsdiagramme binärer und ternärer Legierungssysteme		207
11.1	Allgemeines über Zustandsdiagramme binärer Systeme	208
11.2	Systeme mit völliger Löslichkeit im festen Zustand	209
11.3	Systeme mit völliger Unlöslichkeit im festen Zustand	212
11.4	Systeme mit beschränkter Löslichkeit im festen Zustand	213
11.5	Systeme mit intermetallischen Verbindungen	215
11.6	Systeme mit Eutektoiden	216
11.7	Systeme mit Polymorphie	217
11.8	Zustandsdiagramme ternärer Legierungssysteme	217

Kapitel 12

Edelmetall-Legierungsgruppen		221
12.1	Hochedelmetallhaltige Legierungen	222
12.1.1	Weiche Gusslegierungen	224
12.1.2	Mittelharte Gusslegierungen	224
12.1.3	Harte Gusslegierungen	225
12.1.4	Extraharte Gusslegierungen	225
12.1.5	Kupferfreie Gusslegierungen	225
12.1.5.1	Weiche kupferfreie Gusslegierungen	225
12.1.5.2	Mittelharte kupferfreie Gusslegierungen	226
12.1.5.3	Harte kupferfreie Gusslegierungen	226
12.1.5.4	Extraharte kupferfreie Gusslegierungen	226
12.1.6	Blechlegierungen	226
12.1.7	Drahtlegierungen	227
12.1.8	Angussfähige Legierungen	227
12.1.8.1	Weiche Blech- und Drahtlegierungen	227
12.1.8.2	Extraharte Drahtlegierungen	227
12.1.8.3	Wurzelstiftlegierungen	228
12.1.8.4	Hochschmelzende Legierungen	228
12.2	Edelmetallhaltige Legierungen	228
12.2.1	Goldlegierungen	228
12.2.1.1	Harte, gelbe Gusslegierungen	229
12.2.1.2	Harte, hellgelbe Gusslegierungen	229
12.2.1.3	Extraharte, gelbe Gusslegierungen	229
12.2.1.4	Extraharte, hellgelbe Gusslegierungen	229
12.2.1.5	Kupferfreie Gusslegierungen	230
12.2.1.5.1	Harte, gelbe und hellgelbe, kupferfreie Legierungen	230
12.2.1.5.2	Extraharte, gelbe, kupferfreie Legierungen	230
12.2.1.5.3	Extraharte, hellgelbe, kupferfreie Legierungen	230





# Kapitel 1

## Der Werkstoff Metall

### Der Inhalt auf einen Blick

1.1	Der Qualitätskreislauf	12
1.2	Der Aufbau der Materie	12
1.2.1	Atombau	13
1.2.1.1	Atommasse	13
1.2.1.2	Atomradius (Van der Waals)	13
1.2.1.3	Elektronenkonfiguration	13
1.3	Das Periodensystem der Elemente	14
1.4	Metalle und Nichtmetalle	15
1.5	Der Metallcharakter der Elemente im PSE	16
1.6	Die metallische Bindung	17
1.7	Kennzeichen der Metalle	18
1.8	Kristalle und Kristallite	19
1.9	Kristallgitter	20
1.10	Allotropie	24

## 1.1 Der Qualitätskreislauf

Obwohl die Verwendung von Metallen sich 6.000 Jahre zurückverfolgen lässt, war es nicht möglich, eine einheitliche Verarbeitungsmethodik zu entwickeln. Es war die Kunst einzelner Gießer oder Schmiede, die in Sagen und Legenden überlebte.

Im Zug der industriellen Revolution wurden immer bessere wissenschaftliche Grundlagen entwickelt, die das Wissen über die Metalle und ihre Verarbeitungsmöglichkeiten erweiterten.

Die neuere technische Entwicklung machte es erforderlich, ein Qualitätsnormensystem zu erstellen, welches möglichst breitbandig einsetzbar ist. Dieses ist als Qualitätsmanagement in den ISO 9000-Schriften zu finden.

Aus **Abbildung 1.1** ist ersichtlich, dass die Qualität der Werkstoffe die Startbasis für ein hochqualitatives Produkt liefert. Die Produktfertigung muss so ausgelegt sein, dass während der Be- und Verarbeitung keine Verschlechterung der Werkstoffeigenschaften auftritt.

Damit dies gewährleistet ist, bedarf es entsprechender Rückkopplungen. So eröffnet z. B. das Gespräch mit der Laborleitung (Audit lat. = Anhörung) über festgestellte Fehler am Produkt den Weg für den Einsatz

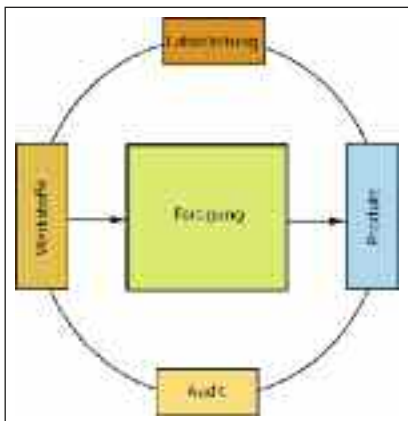


Abb. 1.1 Der Qualitätskreislauf

anderer Werkstoffe oder führt zur Verbesserung der Fertigungsverfahren.

Material- und Verarbeitungsfehler können nur dann erkannt und beseitigt werden, wenn ein entsprechendes naturwissenschaftlich-technisches Grundwissen vorhanden ist.

## 1.2 Der Aufbau der Materie

**Materie** (latein.: materia) ist der Sammelbegriff für die Stoffe der Erde und des Universums. Die Materie kann in verschiedenen äußeren Formen, die man Körper nennt, auftreten. Unsere **Werkstoffe (Materialien)** sind also Materie.

Um Zahnprothesen herstellen zu können, benötigen wir verschiedene Werkstoffe, z. B. Kunststoffe, Keramikmassen und Metalle. Wir verarbeiten Werkstoffe zu Werkstücken, wie z. B. Kronen, Brücken, Klammern, Bügel und Basisplatten. Diese Produkte sind Prothesen als funktioneller Ersatz für natürliche Zähne. Zahnprothetische Produkte aus Metallen, Kunststoffen oder Keramik unterscheiden sich bei gleicher Form durch die Farbe, die Härte, die Festigkeit, das Verhalten gegenüber dem Speichel usw. voneinander.

Es gibt Reinstoffe und Gemenge (Gemische).

**Reinstoffe** haben durchgehend gleiche Materialeigenschaften. So weist z. B. ein Galvanokäppchen im gesamten Volumen die gleiche Farbe und die gleiche Härte auf.

**Gemenge** haben dagegen Mischeigenschaften.

Bei uneinheitlichem Gemenge, wie z. B. der Gesteinsart Granit, erkennt man die unterschiedlichen Bestandteile an den Farben. Graue Farbe für Quarz, schwarze für Glimmer und weiße für Feldspat.

Einheitliches Gemenge, wie z. B. Zuckerwasser, ist einfarbig, flüssig und süß. Beide Bestandteile kann man aber leicht wieder (physikalisch) voneinander trennen, indem man das Wasser verdampfen lässt.

Reinstoffe sind entweder chemische Grundstoffe (Elemente = Urstoffe) oder chemische Verbindungen.

**Chemische Elemente** lassen sich durch chemische Verfahren nicht zersetzen.

**Chemische Verbindungen** bestehen aus zwei oder mehreren Elementen und können in ihre Bestandteile zerlegt werden.

Wir kennen mehr als 115 chemische Grundstoffe. Davon kommen 90 in der Natur vor. Die übrigen werden in Laborversuchen hergestellt und existieren nur kurzzeitig.

### 1.2.1 Atombau

Die kleinsten Bausteine der Elemente nennt man **Atome** (griech.: atomos = unteilbar). Sie besitzen noch alle Eigenschaften des betreffenden Elements. Demnach unterscheiden sich die einzelnen Elemente durch den Bau ihrer Atome. Um die Vorgänge im atomaren Bereich verstehen zu können, hat man Modelle vom Atombau entwickelt. Im Gegensatz zu den Modellen in der Zahntechnik sind Atommodelle keine naturgetreuen Abbilder der Wirklichkeit, sondern es sind Gedankenmodelle, die aufgrund naturwissenschaftlicher Erkenntnisse gewonnen wurden. Die zur Zeit geltenden **Atommodelle** gehen alle davon aus, dass ein Atom kein kompakter Körper ist, sondern dass es aus den kleinsten Teilchen der Materie zusammengesetzt ist. Die Atombausteine nennt man Elementarteilchen. Von den über dreißig bekannten **Elementarteilchen** sind nur drei beständig, nämlich **Protonen**, **Neutronen** und **Elektronen**. Die Elementarteilchen sind sehr klein.

#### 1.2.1.1 Atommasse

Die Atome chemischer Elemente können in ihrer Atommasse (engl.: atomic mass) bestimmt werden (mass unit). Es wird zwischen relativer und absoluter Atommasse unterschieden, angegeben in kg, g oder u ( $u = \text{amu} = \text{atomic-mass-unit}$ ).

#### 1.2.1.2 Atomradius (Van der Waals)

Van der Waals bezeichnet den **Radius einer gedachten harten Kugel**, welche als Modell für das Verhalten eines Atoms genommen wird, als **Atomradius**. Ermittelt wird dieser Radius aus den Abständen nichtverbundener Atompaare in Kristallen.

#### 1.2.1.3 Elektronenkonfiguration

Bei der Elektronenkonfiguration wird die Verteilung der Hüllenelektronen der Atome innerhalb der verschiedenen Energiezustände angegeben. Oft ist der Begriff Energiezustand auch unter dem Namen Aufenthaltsbereich oder auch Orbital bekannt. Es muss sich mindestens eine der Quantenzahlen von den zwei Elektronen unterscheiden, wobei die Hauptquantenzahl  $n$  die Hauptenergiestufe (Schale) bestimmt. Die **äußerste Schale** bestimmt hierbei die **Periode** des Elements im Periodensystem. Die Schalen werden entweder von innen nach außen von 1 bis 7 durchnummeriert oder mit den großen Buchstaben K, L, M, N, O, P, Q bezeichnet.

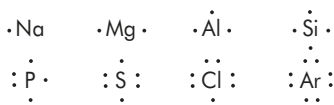
Eigenschaften der Elementarteilchen			
Teilchen	Proton	Neutron	Elektron
Symbol	p	n	e
Masse	1,007 u $1,673 \cdot 10^{-24}$ g	1,009 u $1,675 \cdot 10^{-24}$ g	$5,486 \cdot 10^{-4}$ u $9,11 \cdot 10^{-28}$ g
Elektr. Ladung	+ 1 e	keine	- 1 e

Tabelle 1.1

Als Gesetzmäßigkeit gilt, dass sich in den einzelnen Schalen nur bestimmte Mengen von Elektronen aufhalten können. Die innere Schale ist mit zwei Elektronen voll besetzt. In der jeweils **äußeren Schale** können **höchstens acht Elektronen** kreisen.

Die Elektronen der äußeren Schale sind für das chemische Verhalten der Atome maßgebend. Sie werden gesondert als **Außen-elektronen** oder als **Valenzelektronen** bezeichnet (latein.: valere = wert sein). Den Rest des Atoms (Atomkern und die übrigen Elektronenschalen) nennt man Atomrumpf.

Für die Beschreibung chemischer Vorgänge ist nur die Darstellung der Valenzelektronen von Bedeutung. Man stellt sie als Punkte dar, die um das Symbol eines Elements angeordnet sind. Das Symbol selbst kennzeichnet den **Atomrumpf**.



Ein Elektronenpaar kann auch durch einen Strich symbolisiert werden.



Alle Atome eines Elements besitzen gleich viele Protonen und Elektronen. Um das Element zu kennzeichnen, gibt man die **Anzahl seiner Protonen als Kernladungszahl** an. Atome mit gleicher Kernladungszahl haben gleiche chemische Eigenschaften.

Die Gesamtzahl der Nukleonen eines Atomkerns (Zahl der Protonen und Neutronen) ergibt seine Nukleonen oder Massenzahl. Aus der Massenzahl und der Kernladungszahl kann man die Zahl der im Kern vorhandenen Neutronen nach folgender Formel errechnen:

$$\begin{aligned}
 \text{Massenzahl} - \text{Kernladungszahl} \\
 = \text{Neutronenzahl}
 \end{aligned}$$

Alle Atomkerne eines Elements bestehen aus gleich vielen Protonen. Die Zahl der Neutronen kann dagegen verschieden sein. So können die Atome eines Elements bei

gleicher Kernladungszahl verschiedene Massenzahlen haben. Solche Atome werden als **Isotope** bezeichnet (griech.: isos = gleich, topos = Ort). Die meisten Elemente sind Gemische verschiedener Isotope. Man kennt z. B. beim Zinn zehn stabile Isotope, beim Palladium sechs, beim Platin fünf, beim Eisen vier und beim Silber zwei.

### 1.3 Das Periodensystem der Elemente (PSE)

Im PSE findet man eine Übersicht über die chemischen Elemente unter Berücksichtigung ihres Aufbaus und ihrer Eigenschaften.

Die Elemente sind nach ihrer Kernladungszahl durchnummeriert. An erster Stelle steht Wasserstoff mit der Kernladungszahl 1. Die Reihenfolge ergibt sich aus der Vermehrung der Protonen und Elektronen (immer ein Proton und ein Elektron mehr). Da die **Kernladungszahl** die Stellung eines Elements im PSE bestimmt, wird sie auch als **Ordnungszahl** bezeichnet. In der Regel wird auch die Massenzahl des Atoms angegeben. Sie weicht von der Massenzahl des Atomkerns geringfügig ab, weil sie die Isotope und die Elektronen mit erfasst.

Wenn man die Elemente ihrer Kernladungszahl entsprechend ordnet, stellt man fest, dass in bestimmten Abständen immer wieder Elemente mit ähnlichen Eigenschaften zu finden sind. Man bezeichnet sie als **Elementgruppen** und schreibt sie in senkrechten Spalten untereinander. Die Gruppen werden mit römischen Ziffern von **I bis VIII** bezeichnet.

In den waagerechten Zeilen folgen Elemente mit verschiedenen Eigenschaften aufeinander. Da sich die Eigenschaftsabweichungen der Gruppenzugehörigkeit entsprechend regelmäßig wiederholen, nennt man die **Elemente in den waagerechten Zeilen** auch **Perioden**. Die Perioden beginnen mit einem reaktionsfreudigen Metall und enden mit einem reaktionsträgen Nichtmetall (Edelgas).

Die Perioden werden von oben nach unten von 1 bis 7 durchgezählt. Die **Periodennum-**

Die Hauptgruppe des PSE								
Periode	Gruppen							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1 (K)	1 H							2 He
2 (L)	3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3 (M)	11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4 (N)	19 K	20 Ca	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5 (O)	37 Rb	38 Sr	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 J	54 Xe
6 (P)	55 Cs	56 Ba	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7 (Q)	87 Fr	88 Ra						

Tabelle 1.2 Die dunkelblauen Felder geben Metalle an, die hellblauen Felder Halbmetalle und die weißen Felder Nichtmetalle. An der ↓ bezeichneten Stelle fehlen die Nebengruppen.

mer gibt an, wie viele **Elektronenschalen** die Elemente dieser Periode haben.

Bei 44 Elementen tritt die periodische Änderung der Eigenschaften besonders deutlich auf. Diese Elemente bilden die Hauptgruppen des PSE. Die Gruppennummer entspricht der Anzahl von Elektronen auf der Außenschale des Atoms.

## 1.4 Metalle und Nichtmetalle

In der Gruppe VIII findet man die **Edelgase**. Sie sind außerordentlich reaktionsträge und gehen praktisch keine Verbindung mit anderen Elementen ein. Sie besitzen in ihrer **Außenschale acht Elektronen**, das sogenannte Elektronenoktett (griech.: okto = acht). Dieses Oktett der Valenzelektronen ist sehr stabil und Ursache für die Beständigkeit der Edelgase. Eine Ausnahme bildet das Helium. Es hat nur zwei Elektronen und kann nur eine Schale haben. Diese einzige Schale ist schon mit zwei Elektronen besetzt und stabil.

Alle Atome sind bestrebt, in ihrer Außenschale das stabile Elektronenoktett auszubilden. Die Atome der Elemente mit ein bis drei Valenzelektronen erreichen diesen Zu-

stand am leichtesten, wenn sie ihre wenigen Außenelektronen abgeben. Das restliche Atom erscheint dann nach außen nicht mehr elektrisch neutral, sondern **elektropositiv**, weil es nun mehr Protonen als Elektronen besitzt. Ein elektrisch geladenes Atom nennt man **Ion** (griech.: ion = Wanderer), weil es zu einem entgegengesetzt geladenen Pol hinwandert. Elemente, die sich wie vorstehend beschrieben verhalten, werden als **Metalle** bezeichnet.

**Metalle sind Elektronendonatoren** (latein.: donator = Geber, Spender). Sie sind bestrebt, ihre Valenzelektronen abzugeben und **positive Ionen** zu bilden.

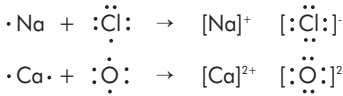
Die Atome der Nichtmetalle besitzen fünf bis sieben Valenzelektronen (Edelgase ausgenommen). Sie erreichen das Elektronenoktett durch Aufnahme zusätzlicher Elektronen in ihrer Außenschale. Dadurch wird das Gleichgewicht zwischen elektrischen Ladungsträgern aufgehoben und die Atome erhalten nach außen eine negative Ladung.

**Nichtmetalle sind Elektronenakzeptoren** (latein.: acceptor = Empfänger). Sie sind bestrebt, Elektronen in ihre Außenschalen aufzunehmen und **negative Ionen** zu bilden.

Eine Ausnahme ist Wasserstoff. Wasserstoffatome besitzen lediglich ein Elektron. Sie

geben dieses leicht ab und bilden so positive Ionen.

Die Ionenbildung kann man sich durch Elektronenformeln veranschaulichen, z. B.



Wenn man im PSE der Hauptgruppen eine Diagonale von links oben nach rechts unten zieht, dann findet man unterhalb dieser Linie die Metalle und oberhalb der Linie die Nichtmetalle. Die in der **Tabelle 1.3** hellblau gekennzeichneten Elemente haben Eigenschaften beider Stoffgruppen und werden daher Halbmetalle genannt.

Die nicht in den Hauptgruppen aufgeführten Elemente bilden Nebengruppen mit Untergruppen (Lanthanoide und Actinoide). Die Atome dieser Gruppen haben auf ihrer Außenschale ein bis zwei Valenzelektronen. Bei beiden Gruppen werden bei zunehmender Protonen- und Elektronenzahl weiter innen liegende Schalen aufgefüllt. Da alle Atome dieser Elementgruppen nur ein oder zwei Valenzelektronen aufweisen und daher positive Ionen bilden, handelt es sich hier um Metalle.

Die Elemente der Nebengruppen sind überwiegend technisch wichtige Schwermetalle. Die Leichtmetalle findet man vorwiegend in den Hauptgruppen. Die Metalle in den Lanthanoid- und Actinoid-Untergruppen werden in der Technik kaum genutzt.

## 1.5 Der Metallcharakter der Elemente im PSE

Innerhalb der Gruppen nimmt die Atomgröße von oben nach unten zu, weil jedes weiter unten stehende Atom eine Elektronenschale mehr aufweist als sein Vorgängerelement.

Innerhalb einer Periode nimmt die Atomgröße von links nach rechts ab, weil jedes weiter rechts stehende Atom mehr Protonen und Elektronen hat als sein Vorgänger. Mehr Ladungsträger im Atom ergeben verstärkte Anziehungskräfte zwischen Kern und Hülle, dadurch kommt es zu einer Verringerung des Abstands zwischen diesen Atomteilen: der Atomdurchmesser wird kleiner (**Abb. 1.2**).

Die Elektronen besitzen neben ihrer Bewegungsenergie auch die sogenannte Lageenergie. Deren Größe hängt vom Abstand des Elektrons zum Kern ab. Je geringer der Abstand zum Kern ist, desto stärker wirkt die Kraft zwischen den elektrischen Ladungsträgern und desto größer ist die Energie des Elektrons. Die Energie ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands. Verringert sich z. B. der Abstand eines Elektrons zum Kern um die Hälfte, so steigt seine Energie auf den vierfachen Wert an. Diese Energie muss überwunden werden, wenn man ein Valenzelektron aus dem Atom entfernen will. Da hierdurch das Atom zum Ion wird, nennt man sie **Ionisierungsenergie**.

Ist aus einem Atom ein Valenzelektron abgegeben worden, dann sind die elektropositiven Kräfte des Kerns stärker als die verminderten elektronegativen Kräfte der Hülle.

Die Nebengruppen des PSE									
III	IV	V	VI	VII	VIII	VIII	VIII	I	II
21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn
39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd
57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg
89 Ac									

Tabelle 1.3 An der mit  $\updownarrow$  bezeichneten Stelle fehlen die Untergruppen.

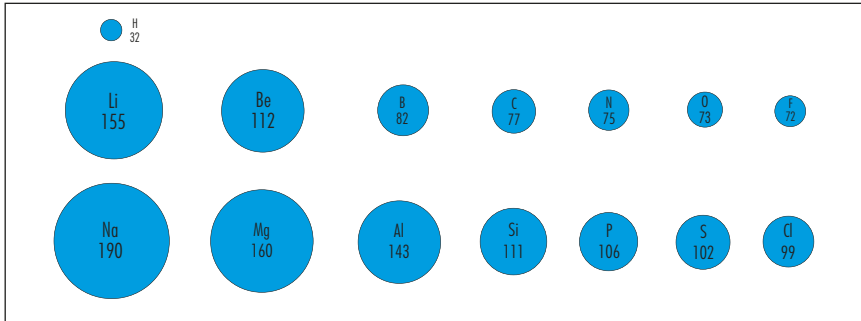


Abb. 1.2 Änderung der Atomradien in den Perioden und Gruppen. Angaben der Radien in  $10^{-12}$  m (Pikometer).

Die Elektronen werden näher an den Kern herangezogen und dadurch wird der Atomdurchmesser kleiner. Durch den kleineren Durchmesser ergibt sich für die verbliebenen Elektronen eine größere Ionisierungsenergie. Zum Abspalten eines weiteren Valenzelektrons ist also eine größere Energie als bei seinem Vorgänger erforderlich. Die Ionisierungsenergie ist der Maßstab für den Metallcharakter eines Elements.

**Je kleiner die Ionisierungsenergie** der Valenzelektronen eines Atoms ist, desto leichter werden die Elektronen abgegeben und **desto stärker** ist sein **Metallcharakter**.

Die Ionisierungsenergie ist von zwei Faktoren abhängig: Von der Anzahl der Valenzelektronen und von der Atomgröße. Die Elemente der ersten Gruppe im PSE sind die besten Elektronendonatoren. Je höher die Gruppennummer ist, desto schwieriger ist die Abgabe von Valenzelektronen. Mehr als dreifach positive Ionen werden kaum noch gebildet. Innerhalb einer Gruppe nimmt die Ionisierungsenergie von oben nach unten ab, weil der Atomdurchmesser steigt.

Je **weiter links** und je **weiter unten** ein Element **im PSE** steht, desto **ausgeprägter** ist sein **Metallcharakter**.

## 1.6 Die metallische Bindung

In festen Körpern geben die meisten Metallatome ihre Valenzelektronen ab und wer-

den zu Atomrümpfen mit einer positiven elektrischen Ladung (Ionen). Die abgespaltenen Elektronen werden nicht von anderen Atomen gebunden, sondern verbleiben ungebunden zwischen den Atomrümpfen. Sie sind daher frei beweglich und bilden das sogenannte Elektronengas. Zwischen den Atomrümpfen und dem Elektronengas wirken elektrostatische Anziehungskräfte. Diese Kräfte wirken nach allen Seiten im Raum, also nicht nur in bestimmten Richtungen.

Eine Minderzahl der Metallatome gibt die Valenzelektronen nicht ab, sondern verbindet sich über diese Elektronen direkt mit zwei oder mehreren anderen Atomen.

In einem festen Metall kommen also vor:

- positive Ionen
- freie Elektronen
- Atome

Jedes Metall hat ein spezifisches Verhältnis zwischen seiner Masse und der Anzahl der freien Elektronen. So ist es zu erklären, dass die metallischen Eigenschaften bei den verschiedenen Metallen unterschiedlich stark ausgeprägt sind.

Zum Verständnis der meisten Metalleigenschaften genügt die Vorstellung vom Aufbau der Metalle aus positiven Ionen und freien Elektronen. Da dieser Zustand typisch für den Zusammenhalt von Metallen ist, charakterisiert man ihn als metallische Bindung (**Abb. 1.3**).



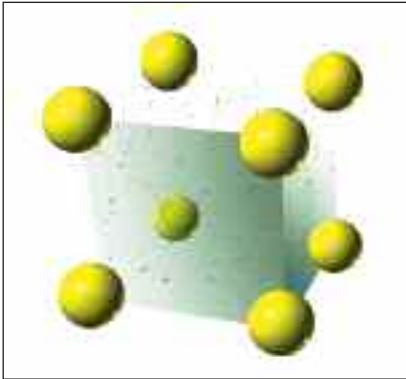


Abb. 1.3 Atomrümpfe mit freien Elektronen bilden kristalline Gefüge

## 1.7 Kennzeichen der Metalle

Die Metallbindung ist Ursache für charakteristische Eigenschaften der Metalle. Die Ausprägung des Metallcharakters hängt von der Stellung des Elements im PSE ab. Zwischen den Metallen und Nichtmetallen gibt es fließende Übergänge. Ein Grundstoff wird den Metallen zugeordnet, wenn er überwiegend metallische Eigenschaften hat. Grundstoffe, die man nicht in die Gruppe der Metalle oder Nichtmetalle einreihen kann, nennt man Halbmetalle (Metalloide). In der **Tabelle 1.2** (PSE) sind die Halbmetalle hellblau gekennzeichnet.

- **Metalle bilden positive Ionen**

Die Freigabe von Außenschalenelektronen und deren gemeinsame Verwendung (Elektronengas) bestimmt den Ionencharakter der Metalle.

- **Metalle sind bei Raumtemperatur fest** (Ausnahme: Quecksilber).

Dieser Aggregatzustand ist darauf zurückzuführen, dass zwischen den Metallionen und dem Elektronengas überall starke Anziehungskräfte bestehen, die nach allen Seiten gleichmäßig wirken. Diese starken Kräfte bewirken einen festen Zusammenhalt der Masse-

teilchen, die einen metallischen Körper aufbauen.

- **Metalle haben ein kristallines Gefüge**

Weil die Anziehungskräfte gleichmäßig nach allen Seiten wirken, haben die Metallionen eine regelmäßige Lage zueinander (**Abb. 1.3**). Feste Materie mit einer regelmäßigen Anordnung der Masseiteilchen bezeichnet man als kristallin (griech.: *krystallos* = Eis).

- **Metalle sind gute Elektrizitätsleiter**

Da in den Metallen die Elektronen frei beweglich und an keine anderen Stoffteilchen gebunden sind, können sie als kleine Ladungsträger hier schnell bewegt werden. Wir bezeichnen allgemein die Bewegung von Ladungen in Vorzugsrichtung als elektrischen Strom. Nichtmetalle besitzen in der Regel keine freien Elektronen. Sie leiten daher den elektrischen Strom nicht, sie sind Isolatoren.

- **Metalle sind gute Wärmeleiter**

Als Wärme bezeichnet man die kinetische Energie von Stoffteilchen (griech.: *kinesis* = Bewegung). Sie äußert sich unter anderem in der Bewegung von Molekülen. Bei den Metallen können die frei beweglichen Elektronen die zugeführte Wärme schnell in Bewegung umsetzen und die aufgenommene kinetische Energie auf das gesamte Elektronengas und auf die Atomrümpfe eines Körpers übertragen. Bei den Nichtmetallen werden durch die Energie Moleküle bewegt, die eine größere Masse als Elektronen haben. Um diese großen Masseiteilchen in Bewegung zu setzen, ist wesentlich mehr Energie als bei den Elektronen erforderlich. Die Wärmeleitfähigkeit der Nichtmetalle ist daher wesentlich schlechter als die der Metalle.

- **Metalle besitzen nur eine geringe Lichtdurchlässigkeit**

Sie sind bereits in ganz dünnen Schichten undurchsichtig.

- **Metalle haben im festen Zustand glänzende Oberflächen**

Sie reflektieren auffallendes Licht in hohem Maße.

- **Metalle haben eine weiße bis hellgraue Farbe** (Ausnahmen: Gold, Kupfer)

Die optischen Eigenschaften sind mit den bisher beschriebenen einfachen Modellvorstellungen vom Aufbau der Metalle nicht ausreichend zu erklären. In stark vereinfachender Weise kann man sich vorstellen, dass die Metallbindung eine dichte Packung der Masseteilchen bewirkt. Zwischen diesen dicht gepackten Teilchen verbleiben kaum Hohlräume als Durchtrittsstellen für Lichtstrahlen. Daher reflektieren Metalle auffallendes Licht bis zu 95 %. Je größer das Reflexionsvermögen eines Metalls ist, desto stärker ist sein Glanz und desto heller ist seine Farbe.

- **Metalle können Legierungen** (Mischungen) **bilden**

Dies ist möglich, weil alle Atomrümpfe positive Ionen mit einem Elektronenoktett der äußeren Schale sind. Sie können daher gegeneinander ausgetauscht werden.

- **Metalle können** (normalerweise) **im kalten Zustand plastisch verformt werden**

Bei einer Verschiebung der Atomrümpfe gegeneinander infolge einer Kaltverformung bleibt die Bindung durch das Elektronengas erhalten. Bei Salzen mit Ionenbindung ziehen sich in der Ruhelage benachbarte positive und negative Ionen an. Bei einer Kaltverformung werden die Ionen gegeneinander verschoben und dafür ist ein erheblicher Kraftaufwand erforderlich. Wenn dann gleichartige Ionen sich gegenüberliegen, kommt es zu einer Abstoßung der Ionen und damit zu einem Bruch im Gefüge. Im Gegensatz zu Metallen sind Salze daher spröde.

- **Metalldämpfe sind einatomig**

Wenn Metalle zum Sieden gebracht werden, dann wird die durch die Metallbindung bedingte Struktur zerstört. Die Atomrümpfe, die die Schmelze verlassen, nehmen ihre Valenzelektronen auf und werden so wieder zu neutralen Atomen.

## 1.8 Kristalle und Kristallite

Das erste Verfahren zur Untersuchung der Metalle mithilfe der Röntgenstrahlen ist im Jahre 1912 von Max v. Laue entwickelt worden. Heute gibt es verschiedene Abwandlungen dieser Untersuchungsmethode. Man lässt Röntgenstrahlen durch eine Bleiblenne auf ein isoliertes Metallkorn, auf Drähte oder Bleche oder auf pulverförmiges Metall, das sich in einem dünnen Glasröhrchen befindet, fallen. Dabei wird die reflektierte Röntgenstrahlung zur Erzeugung von entsprechenden Fotos genutzt (**Abb. 1.4**).



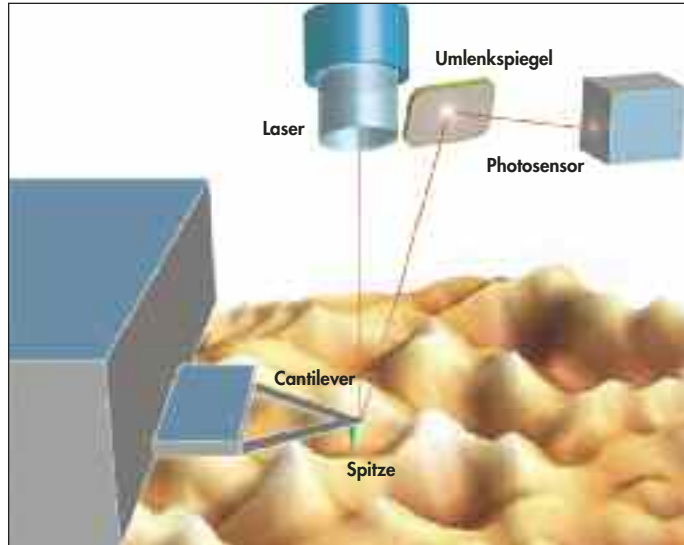
Abb. 1.4 Laue-Diagramm

Die neueste Möglichkeit der Werkstoffuntersuchung stellt die Atomkraftfeld-Mikroskopie dar. Mit dieser Methode können computeranimierte Darstellungen des dynamischen Verhaltens von Atomgittern gezeigt werden (**Abb. 1.5**).

Die kleinsten Bausteine eines Metalls sind die Atomrümpfe (Ionen) und freie Elektronen. Die Metallionen (Atomrümpfe) sind regelmäßig angeordnet, haben also einen **kristallinen Aufbau**.

Dem regelmäßigen inneren Aufbau entspricht auch die äußere Form des Kristalls. Kristalle sind Körper mit ebenen Begrenzungsflächen und geraden Kanten, die in bestimmten (für die Kristallart charakteristischen) Winkeln zueinander stehen. Zerklein-

Abb. 1.5  
Atomkraftfeld-Mikroskop



nernt man einen Kristall, hat jedes Bruchstück wieder ebene Begrenzungsflächen und gerade Begrenzungskanten.

Kristalle bilden sich in unterkühlten Schmelzen und übersättigten Lösungen (Salzkristalle). Beim Abkühlen einer Metallschmelze bilden sich bei der Erstarrungstemperatur **Kristallkeime**. An diese Keime lagern sich immer mehr Metallatome an. Man nennt dies **Kristallwachstum**.

Wird das Wachsen eines kristallinen Körpers behindert, können keine regelmäßigen Begrenzungsflächen und Kanten entstehen. Der Körper erhält eine unregelmäßige Gestalt. Man nennt ihn Kristallit.

Kristalle und Kristallite haben einen gleichartigen inneren Aufbau, aber eine unterschiedliche äußere Form.

In einem Kristall oder einem Kristalliten können beliebig viele Bausteine (Atome) vorhanden sein. Demnach kann der gleiche Stoff verschieden große Kristallite ausbilden.

Bei den Metallen bezeichnet man die **Kristallite** auch als **Körner**. Das gleiche Metall kann verschieden große und kleine Körner enthalten. Die Korngröße hat einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften des Metalls.

**Amorphe Stoffe** (griech.: morphe = Gestalt, Form), z. B. Gläser, Porzellane und Kunststoffe, haben einen anderen Aufbau als kristalline Stoffe. In ihnen haben die Atome bzw. Moleküle keine gesetzmäßige Lage zueinander. Sie sind vielmehr regellos verteilt. Nach dem Zerkleinern zeigen amorphe Stoffe unregelmäßige Bruchstellen. Bei Gläsern spricht man z. B. von einem muscheligem Bruch, weil die Bruchstellen wie Muschelschalen gewölbt sind.

## 1.9 Kristallgitter

Wir wissen, dass Metallkristallite aus Atomrümpfen und freien Elektronen aufgebaut sind. Die **Atomrümpfe** haben immer eine gesetzmäßige Lage zueinander, die typisch für Kristalle ist. Dagegen sind die **Elektronen frei beweglich**, ihre Lage ist für die Kristallstruktur ohne Bedeutung. Deshalb soll hier auch nur die Lage der Atomrümpfe erörtert werden.

Die Atomrümpfe bestehen aus einem Atomkern und Elektronenschalen, die den Kern umgeben. Diese Teile bilden eine Ein-