



Eberhard Schweda

Mit Taschenfalter

Jander / Blasius
**Anorganische
Chemie II**

Quantitative Analyse
und Präparate

17. AUFLAGE



Hirzel Verlag

Periodensystem der Elemente

Gruppen ▶ 1 2 3 4 5 6 7 8 9

1. Periode
1,00794
 $1s^1$
 -1, 0, 1
 0,000 (1)
 2,20 -259,34
 0,0899 -252,87
1 H
 Wasserstoff

2. Periode
6,941 **9,012182**
 $[He] 2s^1$ $[He] 2s^2$
 1 2
 -3,040 (1) -1,847 (2)
 0,98 180,54 1,57 1287
 0,534 1342 1,848 2471
3 Li **4 Be**
 Lithium Beryllium

3. Periode
22,989768 **24,3050**
 $[Ne] 3s^1$ $[Ne] 3s^2$
 1 2
 -2,714 (1) -2,372 (2)
 0,93 97,80 1,31 649,50
 0,968 883 1,738 1090
11 Na **12 Mg**
 Natrium Magnesium

4. Periode
39,0983 **40,078**
 $[Ar] 4s^1$ $[Ar] 4s^2$
 1 2
 -2,931 (1) -2,868 (2)
 0,82 63,38 1,00 842
 0,856 759 1,55 1484
19 K **20 Ca**
 Kalium Calcium

5. Periode
85,4678 **87,62**
 $[Kr] 5s^1$ $[Kr] 5s^2$
 1 2
 -2,98 (1) -2,899 (2)
 0,82 39,31 0,95 777
 1,532 688 2,63 1382
37 Rb **38 Sr**
 Rubidium Strontium

6. Periode
132,90543 **137,327**
 $[Xe] 6s^1$ $[Xe] 6s^2$
 1 2
 -3,026 (1) -2,912 (2)
 0,79 28,44 0,89 727
 1,90 671 3,62 1897
55 Cs **56 Ba**
 Caesium Barium

7. Periode
223,0197 **226,0254**
 $[Rn] 7s^1$ $[Rn] 7s^2$
 1 2
 -2,92 (1) -2,916 (2)
 0,70 27,0 0,90 700
 677 1737
87 Fr **88 Ra**
 Francium Radium

Relative Atommasse
35,4527

Elektronenkonfiguration
 $[Ne] 3s^2 3p^5$

Oxidationszahlen –
wichtigste in Verbindung
 -1, 1, 3, 5, 7
 +1, 3, 5 (1)

Elektronegativität
 nach Pauling
 3,16 -101,50
 2,90 -34,04

Dichte in g/cm³ bei 0°C
 (gasförmige Elemente
 in g/dm³ bei 1013 mbar)
17

Reduktionspotenzial
 E_0 in V mit Anzahl (n) der Elektronen für:
 $E^{n+} + ne^- \rightleftharpoons E(f) \text{ (Metalle)}$
 $E + ne^- \rightleftharpoons E^{n-}$
 $EO_{n/2} + nH^+ + ne^- \rightleftharpoons E(f) + n/2 H_2O$
 $1/2 O_2(g) + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2O(f)$

Schmelzpunkt
Siedepunkt (in °C)

Elementsymbol
Li feste Elemente
Br flüssige Elemente (20°C)
Cl gasförmige Elemente
Po radioaktive Elemente
Rf künstliche Elemente

Ordnungszahl
Cl
 Chlor

4. Periode
44,955910 **47,867** **50,9415** **51,9961** **54,938049** **55,845** **58,93320**
 $[Ar] 3d^1 4s^2$ $[Ar] 3d^2 4s^2$ $[Ar] 3d^3 4s^2$ $[Ar] 3d^5 4s^1$ $[Ar] 3d^5 4s^2$ $[Ar] 3d^6 4s^2$ $[Ar] 3d^7 4s^2$
 3 3 2, 3, 4, 5 2, 3, 6 -1,0, 1, 2, 3, 4, 6, 7 2, 3, 6 -1, 0, 2, 3
 -2,077 (3) -1,63 (2) -1,175 (2) -0,744 (3) -1,185 (2) -0,447 (2)
 1,36 1541 1,63 1910 1,66 1907 1,55 1246 1,83 1538
 2,985 2830 4,50 3287 6,11 3407 7,14 2671 7,43 2061 7,874 2861 8,90 2927
21 Sc **22 Ti** **23 V** **24 Cr** **25 Mn** **26 Fe** **27 Co**
 Scandium Titan Vanadium Chrom Mangan Eisen Cobalt

5. Periode
88,90585 **91,224** **92,90638** **95,94** **98,9072** **101,07** **102,90550**
 $[Kr] 4d^1 5s^2$ $[Kr] 4d^2 5s^2$ $[Kr] 4d^4 5s^1$ $[Kr] 4d^5 5s^1$ $[Kr] 4d^6 5s^1$ $[Kr] 4d^7 5s^1$ $[Kr] 4d^8 5s^1$
 3 4, 2 3, 5 -1,099 (3) 2, 3, 4, 5, 6 -0,200 (3) 7 -2,0, 2, 3, 4, 6, 8
 -2,372 (3) -1,553 (4) 1,60 2477 2,16 2623 +0,272 (4) +0,455 (2) -2,0, 2, 3, 4, 6, 8
 1,22 1855 6,501 4409 8,57 4744 10,28 4639 11,49 4265 12,37 4150 12,38 3695
39 Y **40 Zr** **41 Nb** **42 Mo** **43 Tc** **44 Ru** **45 Rh**
 Yttrium Zirkon Niob Molybdän Technetium Ruthenium Rhodium

Lanthanoide
57 bis 71 La – Lu

6. Periode
178,49 **180,9479** **183,84** **186,207** **190,23** **192,217**
 $[Xe] 4f^{14} 5d^2 6s^2$ $[Xe] 4f^{14} 5d^3 6s^2$ $[Xe] 4f^{14} 5d^4 6s^2$ $[Xe] 4f^{14} 5d^5 6s^2$ $[Xe] 4f^{14} 5d^6 6s^2$ $[Xe] 4f^{14} 5d^7 6s^2$
 4 3, 5 -0,750 (5) 0, 2, 3, 4, 5, 6 -1,074 (4) -0,251 (4) +0,85 (8) -2,0, 2, 3, 4, 6, 8
 1,30 2233 1,50 3017 2,36 3422 1,90 3186 2,20 ca. 3130 +0,85 (8)
 13,28 4603 16,65 5458 19,26 5555 21,03 5596 22,59 ca. 5000 2,20 2334 2,28 2334 2,20 2334
72 Hf **73 Ta** **74 W** **75 Re** **76 Os** **77 Ir**
 Hafnium Tantal Wolfram Rhenium Osmium Iridium

Actinoide
89 bis 103 Ac – Lr

6. Periode
261,1087 **262,1138** **263,1182** **262,1229** **265** **268**
 $[Rn] 5f^{14} 6d^2 7s^2$ $[Rn] 5f^{14} 6d^3 7s^2$ $[Rn] 5f^{14} 6d^4 7s^2$ $[Rn] 5f^{14} 6d^5 7s^2$ $[Rn] 5f^{14} 6d^6 7s^2$ $[Rn] 5f^{14} 6d^7 7s^2$

7. Periode
104 Rf **105 Db** **106 Sg** **107 Bh** **108 Hs** **109 Mt**
 Rutherfordium Dubnium Seaborgium Bohrium Hassium Meitnerium

7. Periode
138,9055 **140,115** **140,90765** **144,24** **144,9127** **150,36** **151,965**
 $[Xe] 5d^1 6s^2$ $[Xe] 4f^2 6s^2$ $[Xe] 4f^3 6s^2$ $[Xe] 4f^6 6s^2$ $[Xe] 4f^5 6s^2$ $[Xe] 4f^6 6s^2$ $[Xe] 4f^7 6s^2$
 3 3, 4 3, 4 3, 4 -2,38 (3) 2, 3 -2,38 (3) 2, 3 -2,29 (3) -2,30 (3) -2,30 (3) -2,407 (3)
 1,10 920 1,12 798 1,13 935 1,14 1024 1,17 1100 1,17 1072 1,17 1072
 6,17 3464 6,773 3364 6,475 3290 7,003 3100 7,220 3000 7,536 1803 7,536 1803 5,245 1527
57 La **58 Ce** **59 Pr** **60 Nd** **61 Pm** **62 Sm** **63 Eu**
 Lanthan Cer Praseodym Neodym Promethium Samarium Europium

7. Periode
227,0278 **232,0381** **231,03588** **238,0289** **237,0482** **244,0642** **243,06138**
 $[Rn] 6d^1 7s^2$ $[Rn] 6d^2 7s^2$ $[Rn] 5f^2 6d^1 7s^2$ $[Rn] 5f^3 6d^1 7s^2$ $[Rn] 5f^4 6d^1 7s^2$ $[Rn] 5f^6 7s^2$ $[Rn] 5f^7 7s^2$
 3 4 4, 5 3, 4, 5, 6 -1,798 (3) 3, 4, 5, 6 -1,856 (3) 3, 4, 5, 6 -2,031 (3) 2, 3, 4, 5, 6 -2,070 (3)
 -2,13 (3) -1,899 (4) -1,49 (3) -1,38 1135 1,36 639 1,38 639 1,28 639,4 1,30 1176
 10,07 3300 11,724 4788 15,37 1568 19,16 4131 20,45 3902 19,816 3230 13,67 2607
89 Ac **90 Th** **91 Pa** **92 U** **93 Np** **94 Pu** **95 Am**
 Actinium Thorium Protactinium Uran Neptunium Plutonium Americium

Jander / Blasius · Anorganische Chemie

| 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|--|--|--|--|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|--|--|--|--|--|--|--|-----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|-------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|---------------------------------|--|--|--|---|--|---|---|---|--|--|--|--|-------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|---|------------------------------------|--|--|--|--------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|--|--|--|--|--|---|---|--|---|--|--|--|--|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|--|--|--|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|---|--|---|--|---|--|---|--|--|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--|--|---|---|--|---|--|---|--|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---|---|---|--|--|--|--|---|---|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--|---|--|---|--|---|---|---|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|---|--|---|--|--|--|---|-------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 15%;"> <p>Metalle</p> <p>Halbmetalle</p> <p>Nichtmetalle</p> <p>Edelgase</p> </div> <div style="width: 85%;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: #e0e0e0; text-align: center;">10</td> <td style="background-color: #e0e0e0; text-align: center;">11</td> <td style="background-color: #e0e0e0; text-align: center;">12</td> <td style="background-color: #e0e0e0; text-align: center;">13</td> <td style="background-color: #e0e0e0; text-align: center;">14</td> <td style="background-color: #e0e0e0; text-align: center;">15</td> <td style="background-color: #e0e0e0; text-align: center;">16</td> <td style="background-color: #e0e0e0; text-align: center;">17</td> <td style="background-color: #e0e0e0; text-align: center;">18</td> </tr> <tr> <td colspan="8"></td> <td style="text-align: center;">4,002602 1s²</td> </tr> <tr> <td colspan="8"></td> <td style="text-align: center;">2,20 -272,2 0,1785 -268,93</td> </tr> <tr> <td colspan="8"></td> <td style="text-align: center;">2 He Helium</td> </tr> <tr> <td colspan="3"></td> <td style="text-align: center;">10,811 [He] 2s² 2p¹ 3</td> <td style="text-align: center;">12,011 [He] 2s² 2p² -4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4</td> <td style="text-align: center;">14,00674 [He] 2s² 2p³ -3,-2,-1,1,2,3,4,5</td> <td style="text-align: center;">15,9994 [He] 2s² 2p⁴ -2,-1,1,2 +1,229 (4)</td> <td style="text-align: center;">18,998403 [He] 2s² 2p⁵ -1 +2,87 (1)</td> <td style="text-align: center;">20,1797 [He] 2s² 2p⁶</td> </tr> <tr> <td colspan="3"></td> <td style="text-align: center;">2,04 2075 2,460 3927</td> <td style="text-align: center;">2,55 3642 (Subl.) 3,51</td> <td style="text-align: center;">3,04 -210,01 1,25 -195,81</td> <td style="text-align: center;">3,04 -218,79 1,429 -182,95</td> <td style="text-align: center;">3,44 -219,62 4,00 -219,62 1,6965 -188,12</td> <td style="text-align: center;">4,00 -248,59 0,90 -246,08</td> </tr> <tr> <td colspan="3"></td> <td style="text-align: center;">5 B Bor</td> <td style="text-align: center;">6 C Kohlenstoff</td> <td style="text-align: center;">7 N Stickstoff</td> <td style="text-align: center;">8 O Sauerstoff</td> <td style="text-align: center;">9 F Fluor</td> <td style="text-align: center;">10 Ne Neon</td> </tr> <tr> <td colspan="3"></td> <td style="text-align: center;">26,981539 [Ne] 3s² 3p¹ 3</td> <td style="text-align: center;">28,0855 [Ne] 3s² 3p² -4, (2), 4</td> <td style="text-align: center;">30,973762 [Ne] 3s² 3p³ -3,-2,1,3,5</td> <td style="text-align: center;">32,066 [Ne] 3s² 3p⁴ -2,-1,0,2,3,4,5,6 -0,48 (2)</td> <td style="text-align: center;">35,4527 [Ne] 3s² 3p⁵ -1,1,3,5,7 +1,358 (1)</td> <td style="text-align: center;">39,948 [Ne] 3s² 3p⁶</td> </tr> <tr> <td colspan="3"></td> <td style="text-align: center;">-1,662 (3) 1,61 660,32 2,70 2519</td> <td style="text-align: center;">1,90 1410 2,336 2355</td> <td style="text-align: center;">2,19 44,1 1,82 281</td> <td style="text-align: center;">2,58 115,21 2,07 444,62</td> <td style="text-align: center;">3,16 -101,50 2,90 -34,04</td> <td style="text-align: center;">-189,3 1,784 -185,8</td> </tr> <tr> <td colspan="3"></td> <td style="text-align: center;">13 Al Aluminium</td> <td style="text-align: center;">14 Si Silicium</td> <td style="text-align: center;">15 P Phosphor</td> <td style="text-align: center;">16 S Schwefel</td> <td style="text-align: center;">17 Cl Chlor</td> <td style="text-align: center;">18 Ar Argon</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">58,6934 [Ar] 3d⁸ 4s² 2, 3 -0,257 (2) 1,91 1455 8,908 2913</td> <td style="text-align: center;">63,546 [Ar] 3d¹⁰ 4s¹ 1, 2 +0,349 (2)</td> <td style="text-align: center;">65,39 [Ar] 3d¹⁰ 4s² 2 -0,7618 (2)</td> <td style="text-align: center;">69,723 [Ar] 3d¹⁰ 4s² 4p¹ 3 -0,549 (3)</td> <td style="text-align: center;">72,61 [Ar] 3d¹⁰ 4s² 4p² 2, 4 -0,150 (4)</td> <td style="text-align: center;">74,92159 [Ar] 3d¹⁰ 4s² 4p³ -3, 3, 5 +0,560 (3)</td> <td style="text-align: center;">78,96 [Ar] 3d¹⁰ 4s² 4p⁴ -2, 4, 6 -0,924 (2)</td> <td style="text-align: center;">79,904 [Ar] 3d¹⁰ 4s² 4p⁵ -1,1,3,5,7 +1,065 (1)</td> <td style="text-align: center;">83,798 [Ar] 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">28 Ni Nickel</td> <td style="text-align: center;">29 Cu Kupfer</td> <td style="text-align: center;">30 Zn Zink</td> <td style="text-align: center;">31 Ga Gallium</td> <td style="text-align: center;">32 Ge Germanium</td> <td style="text-align: center;">33 As Arsen</td> <td style="text-align: center;">34 Se Selen</td> <td style="text-align: center;">35 Br Brom</td> <td style="text-align: center;">36 Kr Krypton</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1,91 1455 8,908 2913</td> <td style="text-align: center;">1,90 1084,62 8,92 2962</td> <td style="text-align: center;">1,65 419,53 7,14 907</td> <td style="text-align: center;">1,81 29,77 5,904 2204</td> <td style="text-align: center;">2,01 938,25 5,323 2833</td> <td style="text-align: center;">2,18 817 (36bar) 5,72 603 (Subl.)</td> <td style="text-align: center;">2,55 220,5 4,819 684,9</td> <td style="text-align: center;">2,96 -7,25 3,12 58,8</td> <td style="text-align: center;">3,0 -157,36 3,7491 -153,22</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">106,42 [Kr] 4d¹⁰ 5s⁰ 0, 2, 4 +0,951 (2) 2,20 1554,9 11,99 2963</td> <td style="text-align: center;">107,8682 [Kr] 4d¹⁰ 5s¹ 1, 2, 3 +0,7996 (1)</td> <td style="text-align: center;">112,411 [Kr] 4d¹⁰ 5s² 2 -0,4030 (2)</td> <td style="text-align: center;">114,818 [Kr] 4d¹⁰ 5s² 5p¹ 1, 2, 3 -0,3382 (3)</td> <td style="text-align: center;">118,710 [Kr] 4d¹⁰ 5s² 5p² 2, 4 -0,1375 (2)</td> <td style="text-align: center;">121,757 [Kr] 4d¹⁰ 5s² 5p³ -3, 3, 5 +0,152 (3)</td> <td style="text-align: center;">127,60 [Kr] 4d¹⁰ 5s² 5p⁴ -2, 4, 6 -1,143 (2)</td> <td style="text-align: center;">126,90447 [Kr] 4d¹⁰ 5s² 5p⁵ -1,1,3,5,7 +0,536 (2)</td> <td style="text-align: center;">131,293 [Kr] 4d¹⁰ 5s² 5p⁶ 2, 4, 6</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">46 Pd Palladium</td> <td style="text-align: center;">47 Ag Silber</td> <td style="text-align: center;">48 Cd Cadmium</td> <td style="text-align: center;">49 In Indium</td> <td style="text-align: center;">50 Sn Zinn</td> <td style="text-align: center;">51 Sb Antimon</td> <td style="text-align: center;">52 Te Tellur</td> <td style="text-align: center;">53 I Iod</td> <td style="text-align: center;">54 Xe Xenon</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2,28 1768,4 21,45 3825</td> <td style="text-align: center;">2,54 1064,18 19,32 2856</td> <td style="text-align: center;">2,00 -38,84 13,5459 356,73</td> <td style="text-align: center;">1,62 304 11,85 1473</td> <td style="text-align: center;">2,33 327,5 11,342 1749</td> <td style="text-align: center;">2,02 271,4 9,78 1564</td> <td style="text-align: center;">2,10 449,51 6,24 988</td> <td style="text-align: center;">2,66 113,60 4,94 184,35</td> <td style="text-align: center;">2,6 -111,7 5,8982 -108,0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">195,084 [Xe] 4f¹⁴ 5d⁹ 6s¹ 2, 4 +1,118 (2)</td> <td style="text-align: center;">196,96654 [Xe] 4f¹⁴ 5d¹⁰ 6s¹ -1, 0, 1, 2, 3, 5 +1,498 (3)</td> <td style="text-align: center;">200,59 [Xe] 4f¹⁴ 5d¹⁰ 6s² 1, 2, 4 +0,8535 (2)</td> <td style="text-align: center;">204,3833 [Xe] 4f¹⁴ 5d¹⁰ 6s² 6p¹ 1, 3 -0,3363 (1)</td> <td style="text-align: center;">207,20 [Xe] 4f¹⁴ 5d¹⁰ 6s² 6p² 2, 4 -0,1262 (2)</td> <td style="text-align: center;">208,98037 [Xe] 4f¹⁴ 5d¹⁰ 6s² 6p³ 3, 5 +0,317 (3)</td> <td style="text-align: center;">209,982 [Xe] 4f¹⁴ 5d¹⁰ 6s² 6p⁴ 2, 4, 6 +0,37 (2)</td> <td style="text-align: center;">209,9871 [Xe] 4f¹⁴ 5d¹⁰ 6s² 6p⁵ -1,1,3,5,7</td> <td style="text-align: center;">222,0176 [Xe] 4f¹⁴ 5d¹⁰ 6s² 6p⁶ 2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">78 Pt Platin</td> <td style="text-align: center;">79 Au Gold</td> <td style="text-align: center;">80 Hg Quecksilber</td> <td style="text-align: center;">81 Tl Thallium</td> <td style="text-align: center;">82 Pb Blei</td> <td style="text-align: center;">83 Bi Bismut</td> <td style="text-align: center;">84 Po Polonium</td> <td style="text-align: center;">85 At Astat</td> <td style="text-align: center;">86 Rn Radon</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2,28 1768,4 21,45 3825</td> <td style="text-align: center;">2,54 1064,18 19,32 2856</td> <td style="text-align: center;">2,00 -38,84 13,5459 356,73</td> <td style="text-align: center;">1,62 304 11,85 1473</td> <td style="text-align: center;">2,33 327,5 11,342 1749</td> <td style="text-align: center;">2,02 271,4 9,78 1564</td> <td style="text-align: center;">2,10 449,51 6,24 988</td> <td style="text-align: center;">2,20 302 9,196 962</td> <td style="text-align: center;">2,2 -71,0 9,73 -61,8</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">281 [Rn] 5f¹⁴ 6d⁸ 7s²</td> <td style="text-align: center;">280 [Rn] 5f¹⁴ 6d¹⁰ 7s¹</td> <td style="text-align: center;">277 [Rn] 5f¹⁴ 6d¹⁰ 7s²</td> <td style="text-align: center;">287 [Rn] 5f¹⁴ 6d¹⁰ 7s² 7p¹</td> <td style="text-align: center;">289 [Rn] 5f¹⁴ 6d¹⁰ 7s² 7p²</td> <td style="text-align: center;">288 [Rn] 5f¹⁴ 6d¹⁰ 7s² 7p³</td> <td style="text-align: center;">293 [Rn] 5f¹⁴ 6d¹⁰ 7s² 7p⁴</td> <td style="text-align: center;">292 [Rn] 5f¹⁴ 6d¹⁰ 7s² 7p⁵</td> <td style="text-align: center;">294 [Rn] 5f¹⁴ 6d¹⁰ 7s² 7p⁶</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">110 Ds Darmstadtium</td> <td style="text-align: center;">111 Rg Röntgenium</td> <td style="text-align: center;">112 Cn Copernicium</td> <td style="text-align: center;">113 Nh Nihonium</td> <td style="text-align: center;">114 Fl Flerovium</td> <td style="text-align: center;">115 Mc Moscovium</td> <td style="text-align: center;">116 Lv Livermorium</td> <td style="text-align: center;">117 Ts Tennessine</td> <td style="text-align: center;">118 Og Oganesson</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">157,25 [Xe] 4f⁷ 5d¹ 6s² 2, 3 -2,29 (3)</td> <td style="text-align: center;">158,92534 [Xe] 4f⁹ 6s² 3, 4 -2,30 (3)</td> <td style="text-align: center;">162,50 [Xe] 4f¹⁰ 6s² 3 -2,29 (3)</td> <td style="text-align: center;">164,93032 [Xe] 4f¹¹ 6s² 3 -2,33 (3)</td> <td style="text-align: center;">167,26 [Xe] 4f¹² 6s² 3 -2,31 (3)</td> <td style="text-align: center;">168,93421 [Xe] 4f¹³ 6s² 2, 3, 4 -2,31 (3)</td> <td style="text-align: center;">173,04 [Xe] 4f¹⁴ 6s² 2, 3 -2,22 (3)</td> <td style="text-align: center;">174,967 [Xe] 4f¹⁴ 5d¹ 6s² 3 -2,30 (3)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">64 Gd Gadolinium</td> <td style="text-align: center;">65 Tb Terbium</td> <td style="text-align: center;">66 Dy Dysprosium</td> <td style="text-align: center;">67 Ho Holmium</td> <td style="text-align: center;">68 Er Erbium</td> <td style="text-align: center;">69 Tm Thulium</td> <td style="text-align: center;">70 Yb Ytterbium</td> <td style="text-align: center;">71 Lu Lutetium</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1,20 1312 7,886 3250</td> <td style="text-align: center;">1,22 1407 8,253 3230</td> <td style="text-align: center;">1,22 1407 8,559 2567</td> <td style="text-align: center;">1,23 1461 8,78 2720</td> <td style="text-align: center;">1,24 1529 9,045 2868</td> <td style="text-align: center;">1,25 1545 9,318 1950</td> <td style="text-align: center;">1,25 1545 6,973 1196</td> <td style="text-align: center;">1,27 1652 9,84 3402</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">247,0703 [Rn] 5f⁷ 6d¹ 7s² 3, 4 -2,060 (3)</td> <td style="text-align: center;">247,0703 [Rn] 5f⁹ 7s² 3, 4 -1,970 (3)</td> <td style="text-align: center;">251,0796 [Rn] 5f¹⁰ 7s² 3, 4 -2,010 (3)</td> <td style="text-align: center;">252,0829 [Rn] 5f¹¹ 7s² 2, 3 -1,98 (3)</td> <td style="text-align: center;">257,0915 [Rn] 5f¹² 7s² 2, 3 -1,950 (3)</td> <td style="text-align: center;">258,0986 [Rn] 5f¹³ 7s² 2, 3 -1,660 (3)</td> <td style="text-align: center;">259,1009 [Rn] 5f¹⁴ 7s² 2, 3 -1,780 (3)</td> <td style="text-align: center;">260,1053 [Rn] 5f¹⁴ 6d¹ 7s² 3 -2,060 (3)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">96 Cm Curium</td> <td style="text-align: center;">97 Bk Berkelium</td> <td style="text-align: center;">98 Cf Californium</td> <td style="text-align: center;">99 Es Einsteinium</td> <td style="text-align: center;">100 Fm Fermium</td> <td style="text-align: center;">101 Md Mendelevium</td> <td style="text-align: center;">102 No Nobelium</td> <td style="text-align: center;">103 Lr Lawrencium</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1,30 1340 13,51 3110</td> <td style="text-align: center;">1,30 1340 14,78 986</td> <td style="text-align: center;">1,30 1340 15,1 900</td> <td style="text-align: center;">1,3 860 8,84 996</td> </tr> </table></div></div> | | | | | | | | | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | | | | | | | | | 4,002602 1s ² | | | | | | | | | 2,20 -272,2 0,1785 -268,93 | | | | | | | | | 2 He Helium | | | | 10,811 [He] 2s ² 2p ¹ 3 | 12,011 [He] 2s ² 2p ² -4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4 | 14,00674 [He] 2s ² 2p ³ -3,-2,-1,1,2,3,4,5 | 15,9994 [He] 2s ² 2p ⁴ -2,-1,1,2 +1,229 (4) | 18,998403 [He] 2s ² 2p ⁵ -1 +2,87 (1) | 20,1797 [He] 2s ² 2p ⁶ | | | | 2,04 2075 2,460 3927 | 2,55 3642 (Subl.) 3,51 | 3,04 -210,01 1,25 -195,81 | 3,04 -218,79 1,429 -182,95 | 3,44 -219,62 4,00 -219,62 1,6965 -188,12 | 4,00 -248,59 0,90 -246,08 | | | | 5 B Bor | 6 C Kohlenstoff | 7 N Stickstoff | 8 O Sauerstoff | 9 F Fluor | 10 Ne Neon | | | | 26,981539 [Ne] 3s ² 3p ¹ 3 | 28,0855 [Ne] 3s ² 3p ² -4, (2), 4 | 30,973762 [Ne] 3s ² 3p ³ -3,-2,1,3,5 | 32,066 [Ne] 3s ² 3p ⁴ -2,-1,0,2,3,4,5,6 -0,48 (2) | 35,4527 [Ne] 3s ² 3p ⁵ -1,1,3,5,7 +1,358 (1) | 39,948 [Ne] 3s ² 3p ⁶ | | | | -1,662 (3) 1,61 660,32 2,70 2519 | 1,90 1410 2,336 2355 | 2,19 44,1 1,82 281 | 2,58 115,21 2,07 444,62 | 3,16 -101,50 2,90 -34,04 | -189,3 1,784 -185,8 | | | | 13 Al Aluminium | 14 Si Silicium | 15 P Phosphor | 16 S Schwefel | 17 Cl Chlor | 18 Ar Argon | 58,6934 [Ar] 3d ⁸ 4s ² 2, 3 -0,257 (2) 1,91 1455 8,908 2913 | 63,546 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ¹ 1, 2 +0,349 (2) | 65,39 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 2 -0,7618 (2) | 69,723 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹ 3 -0,549 (3) | 72,61 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ² 2, 4 -0,150 (4) | 74,92159 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ³ -3, 3, 5 +0,560 (3) | 78,96 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴ -2, 4, 6 -0,924 (2) | 79,904 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁵ -1,1,3,5,7 +1,065 (1) | 83,798 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 2 | 28 Ni Nickel | 29 Cu Kupfer | 30 Zn Zink | 31 Ga Gallium | 32 Ge Germanium | 33 As Arsen | 34 Se Selen | 35 Br Brom | 36 Kr Krypton | 1,91 1455 8,908 2913 | 1,90 1084,62 8,92 2962 | 1,65 419,53 7,14 907 | 1,81 29,77 5,904 2204 | 2,01 938,25 5,323 2833 | 2,18 817 (36bar) 5,72 603 (Subl.) | 2,55 220,5 4,819 684,9 | 2,96 -7,25 3,12 58,8 | 3,0 -157,36 3,7491 -153,22 | 106,42 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ⁰ 0, 2, 4 +0,951 (2) 2,20 1554,9 11,99 2963 | 107,8682 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ¹ 1, 2, 3 +0,7996 (1) | 112,411 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 2 -0,4030 (2) | 114,818 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ¹ 1, 2, 3 -0,3382 (3) | 118,710 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ² 2, 4 -0,1375 (2) | 121,757 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ³ -3, 3, 5 +0,152 (3) | 127,60 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁴ -2, 4, 6 -1,143 (2) | 126,90447 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵ -1,1,3,5,7 +0,536 (2) | 131,293 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶ 2, 4, 6 | 46 Pd Palladium | 47 Ag Silber | 48 Cd Cadmium | 49 In Indium | 50 Sn Zinn | 51 Sb Antimon | 52 Te Tellur | 53 I Iod | 54 Xe Xenon | 2,28 1768,4 21,45 3825 | 2,54 1064,18 19,32 2856 | 2,00 -38,84 13,5459 356,73 | 1,62 304 11,85 1473 | 2,33 327,5 11,342 1749 | 2,02 271,4 9,78 1564 | 2,10 449,51 6,24 988 | 2,66 113,60 4,94 184,35 | 2,6 -111,7 5,8982 -108,0 | 195,084 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁹ 6s ¹ 2, 4 +1,118 (2) | 196,96654 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ¹ -1, 0, 1, 2, 3, 5 +1,498 (3) | 200,59 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 1, 2, 4 +0,8535 (2) | 204,3833 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ¹ 1, 3 -0,3363 (1) | 207,20 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ² 2, 4 -0,1262 (2) | 208,98037 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ³ 3, 5 +0,317 (3) | 209,982 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁴ 2, 4, 6 +0,37 (2) | 209,9871 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁵ -1,1,3,5,7 | 222,0176 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶ 2 | 78 Pt Platin | 79 Au Gold | 80 Hg Quecksilber | 81 Tl Thallium | 82 Pb Blei | 83 Bi Bismut | 84 Po Polonium | 85 At Astat | 86 Rn Radon | 2,28 1768,4 21,45 3825 | 2,54 1064,18 19,32 2856 | 2,00 -38,84 13,5459 356,73 | 1,62 304 11,85 1473 | 2,33 327,5 11,342 1749 | 2,02 271,4 9,78 1564 | 2,10 449,51 6,24 988 | 2,20 302 9,196 962 | 2,2 -71,0 9,73 -61,8 | 281 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ⁸ 7s ² | 280 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ¹ | 277 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² | 287 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ¹ | 289 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ² | 288 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ³ | 293 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁴ | 292 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁵ | 294 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁶ | 110 Ds Darmstadtium | 111 Rg Röntgenium | 112 Cn Copernicium | 113 Nh Nihonium | 114 Fl Flerovium | 115 Mc Moscovium | 116 Lv Livermorium | 117 Ts Tennessine | 118 Og Oganesson | 157,25 [Xe] 4f ⁷ 5d ¹ 6s ² 2, 3 -2,29 (3) | 158,92534 [Xe] 4f ⁹ 6s ² 3, 4 -2,30 (3) | 162,50 [Xe] 4f ¹⁰ 6s ² 3 -2,29 (3) | 164,93032 [Xe] 4f ¹¹ 6s ² 3 -2,33 (3) | 167,26 [Xe] 4f ¹² 6s ² 3 -2,31 (3) | 168,93421 [Xe] 4f ¹³ 6s ² 2, 3, 4 -2,31 (3) | 173,04 [Xe] 4f ¹⁴ 6s ² 2, 3 -2,22 (3) | 174,967 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ² 3 -2,30 (3) | 64 Gd Gadolinium | 65 Tb Terbium | 66 Dy Dysprosium | 67 Ho Holmium | 68 Er Erbium | 69 Tm Thulium | 70 Yb Ytterbium | 71 Lu Lutetium | 1,20 1312 7,886 3250 | 1,22 1407 8,253 3230 | 1,22 1407 8,559 2567 | 1,23 1461 8,78 2720 | 1,24 1529 9,045 2868 | 1,25 1545 9,318 1950 | 1,25 1545 6,973 1196 | 1,27 1652 9,84 3402 | 247,0703 [Rn] 5f ⁷ 6d ¹ 7s ² 3, 4 -2,060 (3) | 247,0703 [Rn] 5f ⁹ 7s ² 3, 4 -1,970 (3) | 251,0796 [Rn] 5f ¹⁰ 7s ² 3, 4 -2,010 (3) | 252,0829 [Rn] 5f ¹¹ 7s ² 2, 3 -1,98 (3) | 257,0915 [Rn] 5f ¹² 7s ² 2, 3 -1,950 (3) | 258,0986 [Rn] 5f ¹³ 7s ² 2, 3 -1,660 (3) | 259,1009 [Rn] 5f ¹⁴ 7s ² 2, 3 -1,780 (3) | 260,1053 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹ 7s ² 3 -2,060 (3) | 96 Cm Curium | 97 Bk Berkelium | 98 Cf Californium | 99 Es Einsteinium | 100 Fm Fermium | 101 Md Mendelevium | 102 No Nobelium | 103 Lr Lawrencium | 1,30 1340 13,51 3110 | 1,30 1340 14,78 986 | 1,30 1340 15,1 900 | 1,3 860 8,84 996 |
| 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 4,002602 1s ² | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 2,20 -272,2 0,1785 -268,93 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 2 He Helium | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 10,811 [He] 2s ² 2p ¹ 3 | 12,011 [He] 2s ² 2p ² -4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4 | 14,00674 [He] 2s ² 2p ³ -3,-2,-1,1,2,3,4,5 | 15,9994 [He] 2s ² 2p ⁴ -2,-1,1,2 +1,229 (4) | 18,998403 [He] 2s ² 2p ⁵ -1 +2,87 (1) | 20,1797 [He] 2s ² 2p ⁶ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 2,04 2075 2,460 3927 | 2,55 3642 (Subl.) 3,51 | 3,04 -210,01 1,25 -195,81 | 3,04 -218,79 1,429 -182,95 | 3,44 -219,62 4,00 -219,62 1,6965 -188,12 | 4,00 -248,59 0,90 -246,08 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 5 B Bor | 6 C Kohlenstoff | 7 N Stickstoff | 8 O Sauerstoff | 9 F Fluor | 10 Ne Neon | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 26,981539 [Ne] 3s ² 3p ¹ 3 | 28,0855 [Ne] 3s ² 3p ² -4, (2), 4 | 30,973762 [Ne] 3s ² 3p ³ -3,-2,1,3,5 | 32,066 [Ne] 3s ² 3p ⁴ -2,-1,0,2,3,4,5,6 -0,48 (2) | 35,4527 [Ne] 3s ² 3p ⁵ -1,1,3,5,7 +1,358 (1) | 39,948 [Ne] 3s ² 3p ⁶ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | -1,662 (3) 1,61 660,32 2,70 2519 | 1,90 1410 2,336 2355 | 2,19 44,1 1,82 281 | 2,58 115,21 2,07 444,62 | 3,16 -101,50 2,90 -34,04 | -189,3 1,784 -185,8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 13 Al Aluminium | 14 Si Silicium | 15 P Phosphor | 16 S Schwefel | 17 Cl Chlor | 18 Ar Argon | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 58,6934 [Ar] 3d ⁸ 4s ² 2, 3 -0,257 (2) 1,91 1455 8,908 2913 | 63,546 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ¹ 1, 2 +0,349 (2) | 65,39 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 2 -0,7618 (2) | 69,723 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹ 3 -0,549 (3) | 72,61 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ² 2, 4 -0,150 (4) | 74,92159 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ³ -3, 3, 5 +0,560 (3) | 78,96 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴ -2, 4, 6 -0,924 (2) | 79,904 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁵ -1,1,3,5,7 +1,065 (1) | 83,798 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 Ni Nickel | 29 Cu Kupfer | 30 Zn Zink | 31 Ga Gallium | 32 Ge Germanium | 33 As Arsen | 34 Se Selen | 35 Br Brom | 36 Kr Krypton | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1,91 1455 8,908 2913 | 1,90 1084,62 8,92 2962 | 1,65 419,53 7,14 907 | 1,81 29,77 5,904 2204 | 2,01 938,25 5,323 2833 | 2,18 817 (36bar) 5,72 603 (Subl.) | 2,55 220,5 4,819 684,9 | 2,96 -7,25 3,12 58,8 | 3,0 -157,36 3,7491 -153,22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 106,42 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ⁰ 0, 2, 4 +0,951 (2) 2,20 1554,9 11,99 2963 | 107,8682 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ¹ 1, 2, 3 +0,7996 (1) | 112,411 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 2 -0,4030 (2) | 114,818 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ¹ 1, 2, 3 -0,3382 (3) | 118,710 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ² 2, 4 -0,1375 (2) | 121,757 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ³ -3, 3, 5 +0,152 (3) | 127,60 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁴ -2, 4, 6 -1,143 (2) | 126,90447 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵ -1,1,3,5,7 +0,536 (2) | 131,293 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶ 2, 4, 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 46 Pd Palladium | 47 Ag Silber | 48 Cd Cadmium | 49 In Indium | 50 Sn Zinn | 51 Sb Antimon | 52 Te Tellur | 53 I Iod | 54 Xe Xenon | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2,28 1768,4 21,45 3825 | 2,54 1064,18 19,32 2856 | 2,00 -38,84 13,5459 356,73 | 1,62 304 11,85 1473 | 2,33 327,5 11,342 1749 | 2,02 271,4 9,78 1564 | 2,10 449,51 6,24 988 | 2,66 113,60 4,94 184,35 | 2,6 -111,7 5,8982 -108,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 195,084 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁹ 6s ¹ 2, 4 +1,118 (2) | 196,96654 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ¹ -1, 0, 1, 2, 3, 5 +1,498 (3) | 200,59 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 1, 2, 4 +0,8535 (2) | 204,3833 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ¹ 1, 3 -0,3363 (1) | 207,20 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ² 2, 4 -0,1262 (2) | 208,98037 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ³ 3, 5 +0,317 (3) | 209,982 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁴ 2, 4, 6 +0,37 (2) | 209,9871 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁵ -1,1,3,5,7 | 222,0176 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶ 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 78 Pt Platin | 79 Au Gold | 80 Hg Quecksilber | 81 Tl Thallium | 82 Pb Blei | 83 Bi Bismut | 84 Po Polonium | 85 At Astat | 86 Rn Radon | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2,28 1768,4 21,45 3825 | 2,54 1064,18 19,32 2856 | 2,00 -38,84 13,5459 356,73 | 1,62 304 11,85 1473 | 2,33 327,5 11,342 1749 | 2,02 271,4 9,78 1564 | 2,10 449,51 6,24 988 | 2,20 302 9,196 962 | 2,2 -71,0 9,73 -61,8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 281 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ⁸ 7s ² | 280 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ¹ | 277 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² | 287 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ¹ | 289 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ² | 288 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ³ | 293 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁴ | 292 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁵ | 294 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁶ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 110 Ds Darmstadtium | 111 Rg Röntgenium | 112 Cn Copernicium | 113 Nh Nihonium | 114 Fl Flerovium | 115 Mc Moscovium | 116 Lv Livermorium | 117 Ts Tennessine | 118 Og Oganesson | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 157,25 [Xe] 4f ⁷ 5d ¹ 6s ² 2, 3 -2,29 (3) | 158,92534 [Xe] 4f ⁹ 6s ² 3, 4 -2,30 (3) | 162,50 [Xe] 4f ¹⁰ 6s ² 3 -2,29 (3) | 164,93032 [Xe] 4f ¹¹ 6s ² 3 -2,33 (3) | 167,26 [Xe] 4f ¹² 6s ² 3 -2,31 (3) | 168,93421 [Xe] 4f ¹³ 6s ² 2, 3, 4 -2,31 (3) | 173,04 [Xe] 4f ¹⁴ 6s ² 2, 3 -2,22 (3) | 174,967 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ² 3 -2,30 (3) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 64 Gd Gadolinium | 65 Tb Terbium | 66 Dy Dysprosium | 67 Ho Holmium | 68 Er Erbium | 69 Tm Thulium | 70 Yb Ytterbium | 71 Lu Lutetium | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1,20 1312 7,886 3250 | 1,22 1407 8,253 3230 | 1,22 1407 8,559 2567 | 1,23 1461 8,78 2720 | 1,24 1529 9,045 2868 | 1,25 1545 9,318 1950 | 1,25 1545 6,973 1196 | 1,27 1652 9,84 3402 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 247,0703 [Rn] 5f ⁷ 6d ¹ 7s ² 3, 4 -2,060 (3) | 247,0703 [Rn] 5f ⁹ 7s ² 3, 4 -1,970 (3) | 251,0796 [Rn] 5f ¹⁰ 7s ² 3, 4 -2,010 (3) | 252,0829 [Rn] 5f ¹¹ 7s ² 2, 3 -1,98 (3) | 257,0915 [Rn] 5f ¹² 7s ² 2, 3 -1,950 (3) | 258,0986 [Rn] 5f ¹³ 7s ² 2, 3 -1,660 (3) | 259,1009 [Rn] 5f ¹⁴ 7s ² 2, 3 -1,780 (3) | 260,1053 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹ 7s ² 3 -2,060 (3) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 96 Cm Curium | 97 Bk Berkelium | 98 Cf Californium | 99 Es Einsteinium | 100 Fm Fermium | 101 Md Mendelevium | 102 No Nobelium | 103 Lr Lawrencium | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1,30 1340 13,51 3110 | 1,30 1340 14,78 986 | 1,30 1340 15,1 900 | 1,3 860 8,84 996 | 1,3 860 8,84 996 | 1,3 860 8,84 996 | 1,3 860 8,84 996 | 1,3 860 8,84 996 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Eberhard Schweda
Jander / Blasius
Anorganische Chemie II

Eberhard Schweda

Jander / Blasius Anorganische Chemie II

Quantitative Analyse und Präparate

17., völlig neu bearbeitete Auflage

Mit 125 Abbildungen, 196 Formeln und 57 Tabellen
und Poster „Taschenfalter“



Hirzel Verlag

Zuschriften an

lektorat@dav-medien.de

Anschrift des Autors

Prof. Dr. Eberhard Schweda
Institut für Anorganische Chemie
Eberhard-Karls-Universität
Auf der Morgenstelle 18
72076 Tübingen

Alle Angaben in diesem Werk wurden sorgfältig geprüft.

Dennoch können Autor und Verlag keine Gewähr für deren Richtigkeit übernehmen.

Ein Markenzeichen kann markenrechtlich geschützt sein, auch wenn ein Hinweis auf etwa bestehende Schutzrechte fehlt. Patentrechtliche Einschränkungen sind zu beachten.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Jede Verwertung des Werkes außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Übersetzungen, Nachdrucke, Mikroverfilmungen oder vergleichbare Verfahren sowie für die Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen.

Die Auflagen 1–15 dieses Buches erschienen unter dem Titel „Jander/Blasius: Einführung in das anorganisch-chemische Praktikum“.

17., völlig neu bearbeitete Auflage
ISBN 978-3-7776-2498-3 (Print)
ISBN 978-3-7776-2568-3 (E-Book, PDF)

© 2016 S. Hirzel Verlag
Birkenwaldstraße 44, 70191 Stuttgart
www.hirzel.de

Printed in Germany

Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig
Druck & Bindung: Firmengruppe APPL, Wemding
Umschlaggestaltung: deblik, Berlin
Umschlagabbildung: © cassis/fotolia

Vorwort

Nun erscheint die *Anorganische Chemie II* schon in der 17. Auflage, und Autor und Verlag haben die Gelegenheit wieder genutzt, um das Buch moderner zu gestalten und strukturell sowie inhaltlich den sich ständig verändernden Anforderungen anzupassen.

Der vorliegende Band II – der „Blaue Jander/Blasius“ – enthält Anleitungen für die Quantitative Analyse und einen Präparativen Teil für die Synthese von Verbindungen, wogegen Band I – der „Rote Jander/Blasius“ – neben dem Basiswissen der Allgemeinen und Anorganischen Chemie die im Rahmen eines Grundpraktikums in Qualitativer Analyse durchzuführenden Experimente behandelt.

Teil A in Band II umfasst die Versuche des Quantitativen Praktikums, wie sie in die meisten Bachelor-Studiengänge eingebunden sind. Es werden die Grundlagen der Gravimetrie, der Titration und der elektroanalytischen und optischen Methoden besprochen, ebenso wie die quantitative Bestimmung von Gasen sowie verschiedene Trennmethoden.

Der Teil B „Präparative Chemie“ zielt auf das Fortgeschrittenen-Praktikum eines Bachelor-Studiengangs, in dem es meist um die Synthese anorganischer Verbindungen geht. Diese sind zum Teil luft- und feuchtigkeitsempfindlich, weshalb dieser Abschnitt durch ein Kapitel „Arbeiten unter Schutzgas“ erweitert wurde. Neu sind Synthesevorschriften für einige metallorganische Verbindungen sowie Sol-Gel-basierte Synthesen von Oxiden und einigen Nanomaterialien.

Abbildungen und Formeln wurden modernisiert und neu gestaltet. Die Auflage wurde ebenfalls nach den in der REACH- und CLP-Verordnung geltenden Kennzeichnungen für Gefahrstoffe aktualisiert. Für weiterführende Tabellenwerke, etwa der H- und P-Sätze zur Gefahrstoffkennzeichnung, sind Internetquellen angegeben. Für die „Erste Hilfe bei Unfällen“ sei auf die in jedem Praktikum ausliegenden Poster und Schriftsätze der Unfallversicherer hingewiesen.

Sehr herzlich danke ich meinen Leserinnen und Lesern für Hinweise auf Fehler und Unstimmigkeiten, die mich nach dem Erscheinen der 16. Auflage erreicht haben.

Großer Dank gebührt auch Frau Dr. Gabriele Lauser für die Modernisierung der Sprache und die notwendigen Bearbeitungen und Korrekturen in dieser Auflage. Extra erwähnt werden muss die vorbildliche Zusammenarbeit mit dem Verlag, insbesondere mit Herrn Dr. Tim Kerseboom, der für die Neugestaltung und Umstrukturierung sowie für die Erstellung neuer Abbildungen die notwendigen Voraussetzungen schuf.

Autor und Verlag hoffen, dass das Werk in seiner neuen, klaren Gliederung für alle Studierenden ein hilfreicher Begleiter durch die naturwissenschaftlichen Studiengänge ist.

Tübingen, im Herbst 2016

Eberhard Schweda

Zur Geschichte des „Jander/Blasius“

Die Erstauflagen beider Lehrbücher unter diesem Namen wurden von Prof. Dr. Gerhart Jander und Dr. Hildegard Wendt herausgegeben.

Die „*Einführung in das anorganisch-chemische Praktikum*“ (1949) war von den Autoren vor allem für die praktische Ausbildung der Studenten des Lehramts mit Chemie als Haupt- oder Nebenfach sowie für Studenten naturwissenschaftlicher Fächer konzipiert. Sie umfasste von Anfang an neben einigen theoretischen Grundlagen die qualitative und die quantitative Analyse sowie Vorschriften für das präparative Arbeiten und entwickelte sich sehr schnell zu einem Standardwerk für die praktische Ausbildung, das in der Folge auch an den Fachhochschulen benutzt wurde.

1951 ergänzten die Autoren die blaue „*Einführung*“ durch ein rotes „*Lehrbuch der analytischen und präparativen Chemie*“, das sich an Studenten des Diplomstudiengangs Chemie wandte und dementsprechend einen umfangreicheren Teil über die theoretischen Grundlagen enthielt.

Aufgrund seines Todes im Dezember 1961 konnte Prof. Jander die 6./7. Auflage der „*Einführung*“ nicht mehr fertigstellen. Sie wurde von Prof. Dr. Ewald Blasius und seinen Mitarbeitern übernommen und erschien 1965. Frau Dr. Wendt war zu diesem Zeitpunkt aufgrund anderweitiger Verpflichtungen aus dem Autorenteam ausgeschieden. Prof. Blasius hat die „*Einführung*“ in den folgenden Jahren mehrfach überarbeitet und ergänzt. So wurden beispielsweise elektroanalytische Methoden und die quantitative Analyse technischer Produkte sowie neu entwickelte Titrations- und Gaschromatographie neu aufgenommen.

Während der deutschen Teilung wurde der „*Jander/Blasius*“ auch am Ort des Stammhauses des unter staatlicher Verwaltung stehenden Hirzel Verlags Leipzig gedruckt und gelangte über vielfältige Kanäle, meistens von Buchhandlungen in der Tschechoslowakei, als Schmuggelware in den Westen. Nach der deutschen Wiedervereinigung wurden der Leipziger und der Stuttgarter Verlag wieder zusammengeführt, und so blieb die 13. Auflage die letzte mit einem unterschiedlichen Ost-West-Erscheinungsbild.

Mitten in der Neubearbeitung eben dieser 13. Auflage des Lehrbuchs starb überraschend Prof. Blasius im August 1987. Die Autorenschaft wurde dann ab der 14. Auflage von Prof. Dr. Dr. Joachim Strähle und Prof. Dr. Eberhard Schweda (Anorganisch-chemisches Institut der Universität Tübingen) übernommen.

In der Folgezeit änderte sich die Wahrnehmung der Chemie innerhalb der Gesellschaft und in den Chemiepraktika richtete sich der Fokus darauf, Reaktionen auch unter Umweltgesichtspunkten zu sehen und noch stärker auf giftige oder umweltbelastende Konzentrationen der Stoffe hinzuweisen. Diese Sichtweise wurde auch bei den Neuauflagen des „*Jander/Blasius*“ berücksichtigt und entsprechende Verbindungen durch Gefahrstoffsymbole gekennzeichnet.

Beide Bände wurden im Laufe ihrer 60-jährigen Geschichte ständig aktualisiert, ergänzt und erweitert. Die Wissenschaft Chemie hat in diesen Jahrzehnten bahnbrechende Fortschritte gemacht, welche natürlich stetig in die Neubearbeitungen beider Bücher eingeflossen sind.

Nach mehr als 20 Jahren unter der Leitung von Herrn Prof. Strähle, der 2008 verstarb, gilt der „*Jander/Blasius*“ als Standardwerk für die Ausbildung in chemischen Praktika an Hochschulen.

Abkürzungsverzeichnis

| | | | |
|---------|---------------------------|---------|--|
| A. | Ethylalkohol, Ethanol | Nachw. | Nachweis |
| Abb. | Abbildung | nasc. | nascierend (z. B. H _{nasc.} für atomaren Wasserstoff) |
| absol. | absolut | Nd. | Niederschlag |
| App. | Apparat, Apparatur | OT | Objektträger |
| bes. | besonders | p. a. | pro analysi |
| Best. | Bestimmung | Prod. | Produkt |
| Bldg. | Bildung | Red. | Reduktion |
| Darst. | Darstellung | red. | reduzieren, reduziert |
| Dest. | Destillation | Rk. | Reaktion |
| dest. | destillieren, destilliert | s | Sekunde(n) |
| E. | Ether | SA. | Sodauszug |
| Einfl. | Einfluss | Sbp. | Sublimationspunkt |
| Einw. | Einwirkung | Sdp. | Siedepunkt |
| Entw. | Entwicklung | Smp. | Schmelzpunkt |
| F. | Filtrat, Zentrifugat | Tr. | Tropfen |
| Fl. | Flüssigkeit | u. | und |
| fl. | flüssig | Unters. | Untersuchung |
| frakt. | fraktioniert | V. | Vergrößerung |
| gesätt. | gesättigt | Verb. | Verbindung |
| Ggw. | Gegenwart | verd. | verdünnt |
| Gew. | Gewicht | Verf. | Verfahren |
| h | Stunde(n) | Vers. | Versuch |
| Herst. | Herstellung | Vol. | Volumen |
| Konz. | Konzentration | vorst. | vorstehend |
| konz. | konzentriert | W | Wasser |
| krist. | kristallisiert | wäss. | wässrig |
| lösl. | löslich | Z. | Zentrifugat |
| Meth. | Methode | Zers. | Zersetzung, Zerstörung |
| min | Minute(n) | | |
| nachst. | nachstehend | | |

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Vorwort | V |
| Zur Geschichte des „Jander/Blasius“ | VI |
| Abkürzungsverzeichnis | VII |

TEIL A Analytische Chemie, Quantitative Analyse

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einführung in die Analytische Chemie und in die Quantitative Analyse | 3 |
| 1.1 | Arbeitsabläufe in der Quantitativen Analyse | 3 |
| 1.2 | Bewertung von Ergebnissen | 5 |
| 1.3 | Physikalische und chemische Trennmethoden | 7 |
| 1.4 | Bestimmungsverfahren | 8 |
| 2 | Arbeitsgeräte für die Quantitative Analyse | 11 |
| 2.1 | Analytische Waagen | 11 |
| 2.2 | Messgefäße | 12 |
| 2.3 | Weitere Grundgeräte | 14 |
| 3 | Gravimetrische Verfahren | 17 |
| 3.1 | Einführung in die Gravimetrie | 17 |
| 3.1.1 | Durchführung der Fällungsanalysen | 18 |
| 3.2 | Einzelbestimmung von Anionen | 22 |
| 3.3 | Einzelbestimmung von Kationen | 27 |
| 4 | Titrimetrische Verfahren | 43 |
| 4.1 | Einführung in die Titrimetrie | 43 |
| 4.2 | Neutralisationsverfahren | 49 |
| 4.2.1 | Definition von Säuren und Basen nach <i>Brønsted</i> | 49 |
| 4.2.2 | Einführung in die Neutralisationsanalyse | 50 |
| 4.2.3 | Maßlösungen und Titerstellung | 58 |
| 4.2.4 | Titrationen mit Laugen | 61 |
| 4.2.5 | Titrationen mit Säuren | 63 |
| 4.2.6 | Titrationen nach Ionenaustausch | 65 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 4.3 | Redoxverfahren | 68 |
| 4.3.1 | Einführung in Redoxreaktionen | 68 |
| 4.3.2 | Wertigkeit und Oxidationsstufe | 69 |
| 4.3.3 | Periodensystem und Oxidationsstufen | 70 |
| 4.3.4 | Einführung in die Redoxtitration | 71 |
| 4.3.5 | Permanganometrie | 75 |
| 4.3.6 | Iodometrie | 79 |
| 4.3.7 | Bromatometrie | 82 |
| 4.3.8 | Dichromatometrie | 83 |
| 4.3.9 | Cerimetrie | 85 |
| 4.3.10 | Ferrometrie | 85 |
| 4.4 | Fällungsverfahren | 87 |
| 4.4.1 | Einführung in die Fällungsanalyse | 87 |
| 4.4.2 | Argentometrie | 89 |
| 4.4.3 | Hydrolytische Fällungsverfahren | 92 |
| 4.5 | Komplexbildungstitrationen | 93 |
| 4.5.1 | Einführung in die Komplexchemie | 93 |
| 4.5.2 | Einführung in die Komplexometrie | 97 |
| 4.5.3 | EDTA-Komplexe | 98 |
| 4.5.4 | Carbamato-Komplexe | 106 |
| 5 | Quantitative Trennungen von Ionengemischen | 107 |
| 5.1 | Trennung durch Fällung | 107 |
| 5.1.1 | Abtrennung als Hydroxide | 107 |
| 5.1.2 | Abtrennung als organische Komplexe | 109 |
| 5.1.3 | Abtrennung als Sulfide | 110 |
| 5.2 | Trennung durch Extraktion | 112 |
| 5.3 | Trennung durch Maskierung | 114 |
| 5.4 | Trennung über die Gasphase | 117 |
| 5.5 | Trennung durch Ionenaustauschchromatographie | 121 |
| 6 | Elektroanalytische Methoden | 123 |
| 6.1 | Einführung in die Elektroanalytik | 123 |
| 6.1.1 | Elektrochemische Gesetze und Einheiten | 123 |
| 6.1.2 | Potenzialbildung, Spannungsreihe und Nernst'sches Gesetz | 125 |
| 6.2 | Potenziometrie | 130 |
| 6.2.1 | Indikator- und Bezugselektroden | 130 |
| 6.2.2 | Messanordnung in der Potenziometrie | 133 |
| 6.2.3 | Titrationen mit potenziometrischer Endpunktsanzeige | 134 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 6.3 | Elektrogravimetrie | 136 |
| 6.3.1 | Theoretische Grundlagen der Elektrogravimetrie | 137 |
| 6.3.2 | Durchführung der Elektrogravimetrie | 141 |
| 6.3.3 | Elektrogravimetrische Bestimmungen | 143 |
| 6.4 | Polarographie | 146 |
| 6.4.1 | Theoretische Grundlagen der Polarographie | 146 |
| 6.4.2 | Messanordnung in der Polarographie | 148 |
| 6.4.3 | Polarographische Bestimmungen | 149 |
| 6.5 | Konduktometrie | 150 |
| 6.5.1 | Leitfähigkeit von Elektrolytlösungen | 151 |
| 6.5.2 | Verlauf von Titrationskurven | 152 |
| 6.5.3 | Messanordnung in der Konduktometrie | 154 |
| 6.5.4 | Titration mit konduktometrischer Endpunktsanzeige | 155 |
| 7 | Optische Methoden | 157 |
| 7.1 | Kolorimetrie und Photometrie | 157 |
| 7.1.1 | Grundbegriffe und Grundgesetze | 157 |
| 7.1.2 | Geräte für die Kolorimetrie und Photometrie | 159 |
| 7.2 | Photometrische Bestimmungen | 164 |
| 7.3 | Atomemissionsspektroskopie und Flammenphotometrie | 166 |
| 7.4 | Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) | 167 |
| 8 | Gasanalyse | 171 |
| 8.1 | Einführung in die Gasanalyse | 171 |
| 8.1.1 | Gasgesetze | 171 |
| 8.1.2 | Geräte für die Gasanalyse | 173 |
| 8.2 | Chemische Methoden der Gasanalyse | 176 |
| 8.2.1 | Qualitativer Nachweis | 176 |
| 8.2.2 | Absorptiometrie | 177 |
| 8.2.3 | Verbrennungsanalyse | 178 |
| 8.2.4 | Gasvolumetrie | 181 |
| 8.2.5 | Gastitrimetrie | 183 |
| 8.2.6 | Gasgravimetrie | 184 |
| 8.3 | Physikalisch-chemische Methoden der Gasanalyse | 185 |
| 8.3.1 | Wärmeleitfähigkeitsmethode | 185 |
| 8.3.2 | Weitere Methoden | 186 |
| 9 | Chemische Materialkontrolle technischer Produkte | 189 |
| 9.1 | Praktische Vorbemerkungen | 189 |
| 9.2 | Wasseranalyse | 190 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 9.3 | Mineralanalyse | 192 |
| 9.3.1 | Analyse von Dolomit | 193 |
| 9.3.2 | Analyse von Ultramarin | 195 |
| 9.3.3 | Analyse von Kupferkies | 197 |
| 9.4 | Glasanalyse (Anorganische Gläser) | 199 |
| 9.5 | Legierungsanalyse | 203 |
| 9.5.1 | Analyse von Messing | 205 |
| 9.5.2 | Analyse von Bronze | 207 |
| 9.5.3 | Analyse von Leichtmetallen | 208 |
| 9.5.4 | Analyse von Stahl | 212 |
| 9.6 | Analyse technischer Gase | 218 |
| 9.6.1 | Leuchtgasanalyse nach <i>Orsat</i> | 218 |
| 9.6.2 | Rauchgasanalyse nach <i>Orsat</i> | 220 |

TEIL B Präparative Anorganische Chemie

| | | |
|-------------|--|------------|
| 10 | Geräte und Arbeitstechniken | 223 |
| 10.1 | Glasgeräte | 223 |
| 10.1.1 | Reinigen von Glasgeräten | 223 |
| 10.1.2 | Glasbearbeitung | 224 |
| 10.2 | Platingeräte | 226 |
| 10.3 | Grundarbeitstechniken | 227 |
| 10.3.1 | Erhitzen und Kühlen | 227 |
| 10.3.2 | Trennung durch Kristallisation oder Niederschlagsbildung | 229 |
| 10.3.3 | Destillieren, Sublimieren, Extrahieren und Eindampfen | 231 |
| 10.4 | Arbeiten unter Schutzgas | 234 |
| 10.4.1 | Trocknen von Festsubstanzen | 234 |
| 10.4.2 | Trocknen bzw. Absolutieren von Flüssigkeiten | 236 |
| 10.4.3 | Gasreinigungsanlage | 238 |
| 10.4.4 | Hochvakuumapparatur | 239 |
| 10.4.5 | Schlenktechniken | 241 |
| 10.4.6 | Einsatz der Handschuhbox (Glovebox) | 247 |
| 10.5 | Chromatographische Methoden | 248 |
| 10.5.1 | Dünnschichtchromatographie | 249 |
| 10.5.2 | Papierchromatographie | 249 |
| 10.5.3 | Säulenchromatographie | 250 |
| 10.5.4 | Ionenchromatographie | 251 |
| 10.5.5 | Gaschromatographie | 253 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 11 | Synthesevorschriften von Präparaten | 255 |
| 11.1 | Gase | 255 |
| 11.2 | Alkali- und Erdalkalimetalle | 263 |
| 11.3 | Darstellung von Metallen aus ihren Oxiden – Chrom, Mangan, Silicium, Bor (Aluminothermische Verfahren) | 265 |
| 11.4 | Darstellung von Metallen aus ihren Sulfiden – Blei, Antimon ... | 267 |
| 11.5 | Aufarbeitung von Rückständen | 268 |
| 11.6 | Oxide, Peroxoverbindungen, Sulfide, Nitride und verwandte Verbindungen | 271 |
| 11.7 | Säuren und Basen | 274 |
| 11.8 | Salze | 279 |
| 11.9 | Kovalente Verbindungen | 290 |
| 11.9.1 | Halogenide der Elemente der 6. Hauptgruppe des PSE | 290 |
| 11.9.2 | Halogenide der Elemente der 5. Hauptgruppe des PSE | 295 |
| 11.9.3 | Halogenide der Elemente der 4. Hauptgruppe des PSE | 300 |
| 11.9.4 | Halogenide der Elemente der 3. Hauptgruppe des PSE | 301 |
| 11.9.5 | Halogenide der Elemente der Nebengruppen des PSE | 303 |
| 11.10 | Ester, Alkohole, Ether, Carbocyclen | 305 |
| 11.11 | Komplexverbindungen | 306 |
| 11.12 | Metallorganische Verbindungen | 313 |
| 11.13 | Kolloide und Nanomaterialien | 315 |
| 11.13.1 | Synthesen mittels Sol-Gel-Prozess | 316 |

Anhang

| | | |
|-----------|---|------------|
| 12 | Gefährliche Stoffe | 323 |
| 12.1 | Umgang mit gefährlichen Stoffen | 323 |
| 12.1.1 | Einstufung von Chemikalien | 324 |
| 12.1.2 | Kennzeichnung und Verpackung | 324 |
| 12.2 | Technische Regeln für Gefahrstoffe | 328 |
| 12.2.1 | Arbeitsplatzgrenzwerte TRGS 900 | 328 |
| 12.2.2 | Betriebsanweisung und Information der Beschäftigten TRGS 555 .. | 329 |
| 12.3 | Entsorgung von Laborabfällen | 329 |
| 12.3.1 | Hinweise auf besondere Entsorgungsmaßnahmen | 329 |
| 13 | Tabellen | 333 |

| | |
|--|------------|
| Verzeichnis der Zeichen und Symbole | 345 |
| Literaturverzeichnis | 349 |
| Sachregister | 351 |
| Personenverzeichnis | 357 |
| Der Autor | 359 |

Teil A

Analytische Chemie, Quantitative Analyse

| | |
|--|-----|
| 1 Einführung in die Analytische Chemie und in die Quantitative Analyse | 3 |
| 2 Arbeitsgeräte für die Quantitative Analyse | 11 |
| 3 Gravimetrische Verfahren | 17 |
| 4 Titrimetrische Verfahren | 43 |
| 5 Quantitative Trennungen von Ionengemischen | 107 |
| 6 Elektroanalytische Methoden | 123 |
| 7 Optische Methoden | 157 |
| 8 Gasanalyse | 171 |
| 9 Chemische Materialkontrolle technischer Produkte | 189 |

1 Einführung in die Analytische Chemie und in die Quantitative Analyse

Arbeitsabläufe in der Quantitativen Analyse ... 3 | Bewertung von Ergebnissen ... 5 | Physikalische und chemische Trennmethode ... 7 | Bestimmungsverfahren ... 8

1

Die vollständige Beurteilung einer Substanz ist nur bei Kenntnis von Art und Menge der in ihr enthaltenen Einzelkomponenten möglich. Die zahlreichen Untersuchungsmethoden der analytischen Chemie geben Antworten auf die Fragen: Was liegt vor? – Qualitative Analyse, Wie viel liegt vor? – Quantitative Analyse, Wie liegt etwas vor? – Strukturanalyse.

Insbesondere die quantitative Analyse bildet eine wesentliche Grundlage der Stoffbeurteilung, sodass ihr Anwendungsbereich in Wissenschaft und Technik keinesfalls auf nur chemisch orientierte Forschungsgebiete oder Industriezweige beschränkt ist. Grundlagen und praktische Anwendungen der wichtigsten quantitativen Analysenverfahren sollen im Folgenden behandelt werden. Viele der hier angegebenen klassischen, chemischen Analysemethoden sind heute durch moderne instrumentalanalytische Verfahren ersetzt worden. Aus didaktischen Gründen werden sie jedoch in diesem Lehrbuch weiterhin aufgeführt, da sie wesentliche Grundlagen und Gesetzmäßigkeiten vermitteln, die für die Ausbildung der Studierenden wichtig sind.

Die theoretischen Vorbemerkungen umfassen die Arbeitsabschnitte: Bewertungsgrundlagen, Trennmethode und Bestimmungsverfahren und stellen eine Zusammenfassung aus der Sicht des Analytikers dar. Anfänger ohne analytische Vorkenntnisse werden sich in der Regel zuerst mit den Grundlagen (► Kap. 2 usw.) bekannt machen.

1.1 Arbeitsabläufe in der Quantitativen Analyse

Bei der Durchführung einer quantitativen Untersuchung können die aufeinanderfolgenden Arbeitsabschnitte

- Probenahme
 - Probevorbehandlung (Auflösen oder Aufschluss, Teilung, Trennung)
 - Bestimmung
 - Berechnung und Interpretation des Analyseergebnisses
- unterschieden werden.

Eine fehlerhafte Probenahme kann auch die sorgfältigste weitere Arbeit entwerten. Die teilweise komplizierte Probenahme kann wegen ihres Umfangs hier nicht behandelt werden, zumal sie bei wertvollen Produkten ohnehin durch speziell geschulte und oft sogar

▣ **Tab. 1.1** Dolomit: Bestimmung des Ca- und Mg-Gehalts

| | |
|------------------------------|--|
| Löseprozess: | $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 + 4 \text{H}^+ \longrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{CO}_2$ 1 mmol Dolomit erfordert 4 mmol HCl, für 4 mmol also: $n(\text{HCl}) = 4 \cdot 4 \text{ mmol} = 16 \text{ mmol}$, das sind 8 mL 2 mol/L HCl oder 3,2 mL 5 mol/L HCl. |
| Lösung in 100-mL-Messkolben: | Säurekonzentration soll $c(\text{HCl}) = 0,2 \text{ mol/L}$ sein, d. h., es werden zusätzlich 0,2 mmol/mL · 100 mL = 20 mmol HCl benötigt, das sind 10 mL 2 mol/L HCl oder 4 mL 5 mol/L HCl Überschuss. |
| Praktische Auflösung: | Einwaage in 18 mL 2 mol/L HCl oder 7,2 mL 5 mol/L HCl direkt im Messkolben lösen und mit Wasser auf 100,0 mL auffüllen. |
| Neutralisation: | Ein aliquoter Anteil dieser Lösung, z. B. von 25,0 mL enthält $0,2 \text{ mmol} \cdot \text{mL}^{-1} \cdot 25 \text{ mL} = 5,0 \text{ mmol H}^+$ und wird durch 2,5 mL 2 mol/L NaOH neutralisiert. |

vereidigte Probennehmer erfolgt. Es sollte aber beachtet werden, dass das Zerkleinern und Mischen sowie die Einwaage oder das Abmessen von Volumina bereits einfache Arbeitsvorgänge der Probenahme sind.

Sieht man von speziellen Untersuchungsmethoden wie etwa der direkten Spektralanalyse von Metallproben ab, so muss die Analysesubstanz im nächsten Arbeitsabschnitt mit einem geeigneten Lösemittel verdünnt werden. In der anorganischen Analyse wird als Grundkomponente aller Lösungen Wasser verwendet, dessen Eigenschaft durch Zusätze von bestimmten Stoffen ergänzt wird. So steigern Säurezusätze bis zu 2 mol/L HCl, H₂SO₄ oder HNO₃ vor allem die Acidität. Bei 5 mol/L zeigen sich neben einer weiter erhöhten Konzentration der Wasserstoffionen komplexbildende (HCl) oder oxidierende Eigenschaften (HNO₃; HClO₄; H₂SO₄). Eine oft wesentliche Verstärkung des Auflösungsvermögens erzielt man durch Zugabe von typischen Komplexbildnern wie Tartrat, Citrat, Oxalat und Fluorid. Neben den sauren kommen in einigen Fällen auch alkalische Lösemittel wie 2 oder 5 mol/L NH₃ bzw. NaOH in Betracht, die zu Ammin- oder Hydroxokomplexen führen können. Ganz allgemein sollte beim Auflösen beachtet werden, dass es zwangsläufig mit einer „Verunreinigung“ der ursprünglichen Probe durch Fremdstoffe einhergeht. Zur Vermeidung unkontrollierbarer Störungen der nachfolgenden Arbeitsoperationen ist daher eine dosierte Zugabe der Lösemittel wesentliche Voraussetzung für eine schnelle und zuverlässige Arbeitsweise. Dosierung und kontrolliertes Arbeiten gestalten sich besonders einfach, wenn die erforderlichen Stoffmengen n_i auf der Basis der Äquivalenzbeziehung abgeschätzt werden:

$$n(\text{X}) = c_1 \cdot V_1 = c_2 \cdot V_2 \quad \text{erfordert} \quad n(\text{R}) = c_3 \cdot V_3 = c_4 \cdot V_4 = \dots$$

Als Einheit wählt man zweckmäßig mmol für die Stoffmenge, mmol/mL für die Konzentration, mL für das Volumen.

Zur Erläuterung soll folgendes Beispiel (▣ Tab. 1.1) dienen: In Dolomit mit der mittleren molaren Masse $m(\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3) = 184,401 \text{ g/mol}$ soll der Ca- und Mg-Gehalt in Gew.-% bestimmt werden; Einwaage von $730 \pm 30 \text{ mg}$ (ca. 4 mmol) Dolomit.

Einige Substanzen werden von den Lösemitteln nur sehr langsam oder gar nicht angegriffen. Sie müssen vor der eigentlichen Auflösung durch einen Aufschluss in eine lösliche

Form überführt werden. Bei den Aufschlüssen liegen die Temperaturen über 200 oder sogar 300 °C. Neben hochsiedenden Flüssigkeiten wie H_2SO_4 und H_3PO_4 verwendet man Salzschmelzen mit oxidierendem, reduzierendem oder sulfidierendem sowie saurem oder alkalischem Charakter.

Dosierung und somit Kenntnis der Gesamtmenge und des Überschusses an Aufschlussmitteln sind neben Temperatur, Zeitdauer und Aufschlussgerät von entscheidender Bedeutung für den Erfolg. Auch der sich anschließende Löseprozess verlangt die Einhaltung bestimmter Versuchsbedingungen.

Wird eine Bestimmung durch Art und Menge der Begleitsubstanzen in einer Analysenprobe gestört, so muss zwischen dem Auflösen und der Bestimmung eine Trennung eingeschaltet werden. Zahlreiche prinzipiell mögliche Trennmethode werden in ► Kap. 1.3 aufgeführt. Der letzte Arbeitsabschnitt einer quantitativen Analyse ist die Bestimmung mit anschließender Berechnung, bei der aus einer Messgröße W die gesuchte Masse m oder die Konzentration c ermittelt wird. Hierzu bringt ► Kap. 1.4 die allgemeinen Grundlagen.

1.2 Bewertung von Ergebnissen

1

Vergleich, Auswahl und Bewertung verschiedener Analysenverfahren oder der dabei benutzten Bestimmungsverfahren sowie die richtige Beurteilung der Ergebnisse sind nur bei einer allgemeinen Festlegung der folgenden maßgebenden Begriffe möglich, von denen jedoch nur die ersten 4 näher behandelt werden sollen:

- Arbeitsbereiche,
- Selektivität,
- Fehler,
- Probemenge und Gehalt,
- Schwierigkeitsgrad,
- apparativer Aufwand,
- Zeitbedarf,
- Kosten.

Ein Analysenverfahren enthält mehrere Arbeitsabschnitte (► S. 3), bei denen die Arbeitstechnik weitgehend vom Untersuchungsgegenstand abhängt. Nur das Bestimmungsverfahren selbst ist ziemlich unabhängig davon, weil durch die Probenvorbehandlung auch verschiedenartige Probenmaterialien an die genau festgelegten Arbeitsbedingungen des Bestimmungsverfahrens angepasst werden. Daher kann z. B. ein einziges spektralphotometrisches Bestimmungsverfahren für Eisen mittels Bipyridin in Analysenverfahren für Blut oder Glas oder Leichtmetall eingesetzt werden, ohne dass die Arbeitstechnik geändert werden muss.

Jedes Bestimmungsverfahren hat einen begrenzten **Arbeitsbereich**. Im oben genannten Beispiel muss eine Mindestmenge Eisen vorliegen, andererseits darf aber eine Höchstmenge Eisen nicht überschritten werden, weil im Bestimmungsverfahren nur eine genau angegebene Menge Bipyridin zur Komplexbildung vorgesehen ist. Zweckmäßig gibt man für ein Bestimmungsverfahren den Stoffmengenarbeitsbereich an, nicht den Massen-, Volumen- oder Konzentrationsarbeitsbereich. Hierbei wird zuerst die größere Stoffmenge genannt, dann die kleinere. Die obere Grenze ist wichtiger, weil sie auf keinen Fall überschritten werden darf, da sonst das Bestimmungsverfahren wegen Reagenzmangel oder dergleichen versagt. Bei Überschreiten der unteren Grenze erhöht sich dagegen nur der Fehler der Bestimmung.

▣ **Tab. 1.2** Standardarbeitsbereiche

| Benennung | Arbeitsbereich /mmol | Benennung | Arbeitsbereich / μ mol |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|
| Millimol-Verfahren 3 | 1000–100 | Mikromol-Verfahren 3 | 1000–100 |
| Millimol-Verfahren 2 | 100–10 | Mikromol-Verfahren 2 | 100–10 |
| Millimol-Verfahren 1 | 10–1 | Mikromol-Verfahren 1 | 10–1 |

Umfasst der Stoffmengenarbeitsbereich glatte Zehnerpotenzen, spricht man von Standardarbeitsbereichen (▣ Tab. 1.2).

Analoge Benennungen und Arbeitsbereiche werden für Nanomol- 10^{-9} -, Picomol- 10^{-12} -, Femtomol- 10^{-15} - und Attomol- 10^{-18} -Verfahren benutzt.

Zuverlässige analytische Aussagen setzen 2 bis 4 Einzelbestimmungen voraus. Daher muss soviel Probesubstanz vorliegen, dass darin vom zu bestimmenden Stoff mindestens das Fünffache der unteren Arbeitsbereichsgrenze enthalten ist. Nach der für eine Analyse benötigten **Probesubstanzmasse** (Einwaage m_E) teilt man grob ein in Makroanalysenverfahren mit m_E über 100 mg, Halbmikroanalysenverfahren mit m_E zwischen 100 und 10 mg und Mikroanalysenverfahren mit m_E unter 10 mg.

Legt ein Analysenverfahren neben dem Bestimmungsverfahren auch die Einwaage fest, ist damit der Gehaltsbereich, den der zu bestimmende Stoff in der Probesubstanz besitzen darf, ebenfalls gegeben. Gehalte gibt man meist als Massenanteile, bzw. bei Gasen als Volumenanteile an, oft auch als Stoffmengenkonzentration (z. B. in mmol/L) oder Massenkonzentration (z. B. in mg/m^3). Stoffe mit Anteilen über 0,1 (10 %) bezeichnet man als **Hauptbestandteile**, von 0,1 bis 0,001 (10 % bis 0,1 %) als **Nebenbestandteile**, darunter als **Spurenbestandteile**.

Jedes einzelne Ergebnis x_i einer Bestimmung bzw. Analyse weicht vom „wahren“ Wert mehr oder weniger ab. Als Ursache der Abweichung, des **Fehlers**, kommen in Betracht:

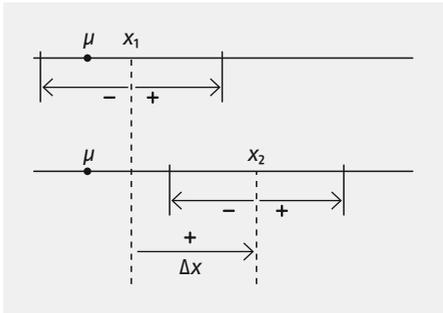
Arbeitsbedingungen: Einfluss der Änderung von Zustandsgrößen wie Druck, Temperatur, Volumen, Konzentration der Reagenzien und Fremdstoffe sowie von Wasch- und Trocknungsprozessen u. a. m.

Arbeitsgeräte: Beständigkeit des Materials, Ablesegenauigkeit, Fehler von Bauteilen und mangelnde Konstanz apparativer Größen.

Arbeitstechnik: Persönliche Fehler, deren Größe auch von Geschicklichkeit und Übung abhängig ist.

Nach der Art der Abweichung muss zwischen zufälligen Fehlern und systematischen Fehlern unterschieden werden. Bei eindeutig festgelegten Arbeitsbedingungen sind die **zufälligen Fehler** vom Willen des Beobachters unabhängige zweiseitige Abweichungen (Streuung). Der mit einem \pm -Symbol gekennzeichnete Streubereich gibt Aussagen über die Reproduzierbarkeit. **Systematische Fehler** sind einseitige Abweichungen, die im Gegensatz zur ersten Fehlergruppe vermeidbar oder zumindest eliminierbar sind. Die Ausschaltung der negativen oder positiven systematischen Fehler, d. h. von Unter- bzw. Überbefunden, ist für die Richtigkeit eines Ergebnisses von entscheidender Bedeutung. Der Aussagegehalt der Fehlerarten kann aus der ◉ Abb. 1.1 ersehen werden.

Fehler können absolut oder proportional zum Betrag des Ergebnisses auftreten, wobei absolute Fehler stets die Dimension des zugehörigen Ergebnisses (Stoffmenge, Masse, Vo-



○ **Abb. 1.1** Messergebnis x_1 „numerisch richtig“, da wahrer Wert μ im Bereich der zufälligen Fehler liegt. Messergebnis x_2 trotz gleicher Reproduzierbarkeit „numerisch falsch“, da durch systematischen Fehler Δx der wahre Wert μ nicht mehr im Bereich der zufälligen Fehler liegt.

lumen, Konzentration usw.) besitzen. Relative Fehler werden oft in Prozent angegeben und zur Vermeidung von Irrtümern ausdrücklich mit Rel.-% bezeichnet.

Typische systematische Absolutfehler sind z. B. Blindwerte (►S. 48) bei gravimetrischen und titrimetrischen Bestimmungen. Faktoren der Maßlösungen sind als Korrekturgrößen für systematische Relativfehler einzustufen. Viele Analysenverfahren besitzen „innere“ systematische Fehler, die nur durch eine Reihe von Modellanalysen oder Eichmessungen entdeckt werden und sodann bei praktischen Analysen Berücksichtigung finden müssen.

Der Einfluss von Fremdionen und Begleitsubstanzen auf das Analysergebnis wird durch den Begriff der **Selektivität** des Verfahrens beschrieben.

1.3 Physikalische und chemische Trennmethode

Besitzt ein Verfahren eine unzureichende Selektivität, so müssen die störenden Begleitstoffe vor der eigentlichen Bestimmung abgetrennt werden. Hierfür stehen zahlreiche Trennmethode zur Verfügung, unter denen eine zweckmäßige Auswahl zu treffen ist. □ Tab. 1.3 gibt einen Überblick.

Bei den **physikalischen Trennmethode** bleiben die Substanzen in chemischer Hinsicht unverändert. Unter den Methode nach dem Siebprinzip findet man die so geläufigen Arbeitsoperationen des Filtrierens, die für den Analytiker unentbehrlich sind. Als Beispiel für das Absetzprinzip seien das Dekantieren und das noch wirksamere Zentrifugieren als Ersatz für die oft langwierige Filtration genannt. Zu den thermischen Trennmethode gehören die fraktionierte Destillation und Kristallisation, ebenso das Trocknen und Glühen von Niederschlägen zur Entfernung letzter Lösemittelreste.

Bei den **physikalisch-chemischen Trennmethode** sind neben physikalischen auch chemische Vorgänge zu berücksichtigen. So treten bei der Löslichkeitstrennung Wechselwirkungen zwischen gelöstem Stoff und Lösemittel auf, die bis zu komplexähnlichen Verbindungen führen. Besondere Aufmerksamkeit verdienen Extraktionsmethode, die auf einer unterschiedlichen Stoffverteilung in zwei nicht bzw. begrenzt miteinander mischbaren Flüssigkeiten basieren. Geringer Zeitbedarf und Schwierigkeitsgrad bei großer Trennschärfe sind als wichtige Vorteile zu werten. Eine Weiterentwicklung der Extraktion findet man in den chromatographischen Methode, die besonders bei komplizierten Systemen und bei extrem kleinen Probemengen unersetzlich geworden sind. Bei den elektrochemischen Methode nutzt man die verschiedenen stoffspezifischen Abscheidungsspannungen oder die unterschiedlichen Wanderungsgeschwindigkeiten im elektrischen Feld aus.

▣ **Tab. 1.3** Überblick Trennmethoden

| | |
|---------------------------------|---|
| Physikalische Methoden | 1. Mechanische Trennung: Siebprinzip, z. B. Sieben und Filtrieren, sowie Absetzprinzip, z. B. Dekantieren, Zentrifugieren und Windsichten |
| | 2. Thermische Trennung: Trennung bei verschiedenen Siede-, Sublimations- und Schmelzpunkten |
| Physikalisch-chemische Methoden | 1. Löslichkeitstrennung: Kristallisation und Extraktion |
| | 2. Chromatographische Trennung: Gas- und Flüssigkeitschromatographie |
| | 3. Elektrophoretische Trennung: Zonenelektrophorese, Isotachophorese, Elektrophoretische Fokussierung |
| | 4. Elektrochemische Trennung: Abscheidung durch Elektrolyse |
| Chemische Methoden | 1. Trennung durch Fällung: Überführen in schwerlösliche Verbindungen |
| | 2. Trennung über die Gasphase: Bildung von leicht flüchtigen Wasserstoff- und Halogenverbindungen usw. |
| | 3. Trennung durch Ionenaustauscher: äquivalenter Ionenumtausch, Chromatographie an Ionenaustauschern |

Bei den **chemischen Methoden** geht der Trennung eine Stoffumsetzung voraus. Die klassische Trennmethode beruht auf der Erzeugung schwerlöslicher Niederschläge und anschließender Filtration. Weniger zeitraubend und störanfällig arbeitet die Maskierung. Störende Begleitsubstanzen werden hierbei durch selektiv wirkende Komplexbildner so verändert, dass die Bestimmung durch sie nicht mehr beeinflusst wird. Einige Elemente lassen sich in Form von Wasserstoffverbindungen (HCl, AsH₃ usw.) oder als Halogenide (SiF₄, AsCl₃ usw.) leicht verflüchtigen und somit abtrennen. Als eine weitere Trennmethode bietet sich die Verwendung von Ionenaustauschern an, wobei eine Trennung von Kationen und Anionen in besonders einfacher Weise durchführbar ist. Weitere Einzelheiten und praktische Beispiele zu den wichtigsten Trennmethoden werden in ► Kap. 5 vorgestellt.

1.4 Bestimmungsverfahren

Bestimmungsverfahren dienen zur quantitativen Ermittlung einer Stoffmenge $n(\text{B})$, einer Masse $m(\text{B})$ bzw. einer Konzentration c über eine Messgröße W , wobei $m(\text{B})$ und W zumeist durch den einfachen linearen Zusammenhang

$$m(\text{B}) = [\lambda] \cdot W \quad \text{bzw.} \quad c = [\omega] \cdot W$$

miteinander in Beziehung stehen. Eine Erklärung der Faktoren $[\lambda]$ und $[\omega]$ wird weiter unten gegeben. Auf Grund der prinzipiellen Unterschiede in der Arbeits-, Mess- und Auswertetechnik unterscheidet man „klassische“ und „physikalische“ Analysenverfahren.

Als klassische Verfahren sind alle Methoden einzustufen, bei denen die Messgröße W als Masse (Auswaage = W) oder als Volumen (Maßvolumen = W) erhalten wird. So gehören in diese Gruppe die **Gravimetrie** mit ihren Teilgebieten der Fällung und der elektrolytischen Abscheidung schwerlöslicher Verbindungen (Elektrogravimetrie), aber auch die **Titrimetrie** mit den verschiedenen Indikationsmöglichkeiten durch visuell erkennbare Farbumschläge, durch Leitfähigkeitsänderungen (Konduktometrie) oder Änderungen des elektrischen Potentials einer Lösung (Potenziometrie). Auch die klassische Gasanalyse misst Volumenänderungen. Bei diesen Verfahren wird stets die gesamte in die Analyse eingehende Masse $m(B)$ umgesetzt und dadurch die Messgröße W erhalten. Die Errechnung von $m(B)$ aus der Auswaage in mg oder aus dem Volumen in mL erfolgt über Umrechnungsfaktoren $[\lambda]$, die in einfacher Weise aus bekannten molaren Massen der Elemente oder Verbindungen ableitbar sind.

Im Gegensatz hierzu erfasst die Messgröße W bei den physikalischen Verfahren eine konzentrationsabhängige Eigenschaft von vorbehandelten oder unbehandelten Lösungen, aber auch von Festkörpern, Gasen und Dämpfen. Konzentration bedeutet Stoffmenge pro Volumeneinheit, und es ist ein charakteristischer Vorteil dieser Verfahren, dass W aus einem beliebigen Anteil eines definierten Gesamtvolumens bestimmt werden kann. Die jeweilige Masse $m(B)$ in mg ergibt sich aus der primär erhaltenen Stoffmengenkonzentration durch Multiplikation mit dem Faktor

$$M \cdot V_M$$

| M molare Masse in mg/mmol | V_M Volumen des verwendeten Messkolbens in mL

Als Beispiele von Messgrößen seien die Extinktion E in der Photometrie (►S. 159), die Stufenhöhe h von Stromstärke-Spannungskurven in der Polarographie (►S. 146) und die Strahlungsintensität I in der Flammenphotometrie und quantitativen Spektralanalyse genannt. Der maßgebende Umrechnungsfaktor $[\omega]$ ist in seinem numerischen Wert entscheidend von den chemischen, physikalischen und apparativen Versuchsbedingungen abhängig. Er kann nicht theoretisch abgeleitet werden, sondern muss durch sorgfältige Eichmessungen mit bekannten vorgegebenen Konzentrationen c gemäß

$$[\omega] = \frac{c}{W}$$

ermittelt werden. Als Vorteile physikalischer Verfahren sind die Erfassung sehr kleiner Arbeitsbereiche, die oft sehr viel bessere Selektivität und ein geringerer Zeitbedarf hervorzuheben. Viele dieser Methoden erreichen aber nicht die Genauigkeit gravimetrischer oder titrimetrischer Verfahren. Die Durchführung verlangt besonders große Sorgfalt, um die zahlreichen systematischen Fehlerquellen zu vermeiden, deren Ursachen vielfach nur bei gründlichen apparativen Kenntnissen zu ermitteln sind.

2 Arbeitsgeräte für die Quantitative Analyse

Analytische Waagen ... 11 | Messgefäße ... 12 | Weitere Grundgeräte ... 14

Die Arbeitsgeräte für eine quantitative Analyse sind vor allem die analytische Waage und Messgefäße, wie Messkolben, Pipette und Bürette. Heute werden vielfach auch Dosimate mit Digitalanzeige eingesetzt. Hinzu kommen für die einzelnen Arbeitsabschnitte einige allgemeine und spezielle Grundgeräte.

2.1 Analytische Waagen

Bis auf wenige Ausnahmen beginnt jede quantitative Analyse mit einer Wägung. Die Einwaage gehört zur Probenahme, deren grundsätzliche Bedeutung bereits behandelt wurde. Beherrschung der Wägetechnik und die sorgfältige Behandlung und Kontrolle der analytischen Waage sind unerlässliche Voraussetzungen einwandfreier Analysenergebnisse.

Die gebräuchlichsten Analysenwaagen sind Balkenwaagen mit Schwingungsdämpfung, beleuchteter Projektionsskala oder Ziffernanzeige und vollautomatischer Gewichtsaufgabe, oft auch mit Ausdruck der Ergebnisse. Nach der Belastbarkeit und Empfindlichkeit unterscheidet man Makro-, Halbmikro- und Mikrowaagen (▣ Tab. 2.1). Die angeführten Daten variieren geringfügig bei den einzelnen Fabrikaten. Am häufigsten werden die Typen II und III benötigt.

Man muss bei der Aufstellung der Waage auf eine horizontale, erschütterungsfreie Unterlage achten, wozu schwere Tische oder spezielle Wandkonsolen geeignet sind. Die hori-

▣ **Tab. 2.1** Eigenschaften analytischer Waagen

| Typ | Maximalbelastung /g | Empfindlichkeit /Skalenteile pro mg | Ablesegenauigkeit /mg |
|--------------------|------------------------|--|--------------------------|
| I Makrowaage | 2000 | 1–0,1 | 1–5 |
| II Makrowaage | 200 | 10 | 0,05 |
| III Halbmikrowaage | 100 | 20 | 0,01 |
| IV Mikrowaage | 20 | 200 | 0,001 |

zontale Aufstellung kann durch eine Dosenlibelle kontrolliert und durch Stellschrauben an den Füßen der Waage korrigiert werden. Häufige Erschütterungen, insbesondere Vibrationen, beschädigen Schneiden und Lager und bedingen instabile Gleichgewichtslagen und geringere Empfindlichkeiten. Für die Aufstellung sollte ein besonderes Wägezimmer und ein Schutzkasten für jede Waage vorgesehen werden, da nur so der erforderliche Schutz vor Staub, aggressiven Dämpfen und hoher Luftfeuchtigkeit gewährleistet ist. Auch Temperaturschwankungen und Zugluft sind weitgehend auszuschalten. Man sollte daher direkte Sonneneinstrahlung sowie die Nähe von Heizkörpern, Außentüren und Fenstern vermeiden. Staub wird mit einem nicht haarenden Pinsel entfernt. Zum Entfetten sind Ethanol oder Benzin und ein Leinenlappchen geeignet. Durch einen Silicageltrockenturm im Waagegehäuse wird Kondensatbildung verhindert. Grobe systematische Fehler können durch elektrostatische Aufladungen verursacht werden, die man durch Erdung sicher ausschaltet.

Die erreichbare Genauigkeit (Präzision) von Wägungen ist nicht nur von der Konstruktion und der richtigen Aufstellung abhängig, sondern wird auch vom Wägeverfahren, von der Qualität des Gewichtssatzes, vom Luftauftrieb und von der Vorbehandlung des Wägegutes beeinflusst.

Die Wägung unter wechselseitiger Vertauschung von Gewichten und Wägegut (Gauß'sche Doppelwägung) ist zwar die genaueste Methode, doch erfordert sie einen relativ großen Zeitbedarf. Moderne Waagen bevorzugen daher die direkten Methoden (Proportional- und Substitutionsmethoden) und verkürzen durch vollautomatische Gewichtsaufgabe und starke Dämpfung den Wägevorgang auf weniger als 30 Sekunden.

Die verwendeten Gewichte müssen der Empfindlichkeit und Ablesegenauigkeit der Waage angepasst sein. Die Gewichte dürfen nicht mit den Fingern angefasst werden und sind staub- und fettfrei zu halten. Bei häufigem Gebrauch können im Verlaufe der Zeit Änderungen auftreten. Ebenso wie die Waage sollten auch die Gewichtssätze daher turnusmäßig durch Fachleute überprüft werden.

Bei den üblichen Wägungen in Luft erhält man nicht die Masse, sondern nur das Tauchgewicht (Archimedisches Prinzip), das geringfügig von der Masse abweicht. Bei den ohnehin üblichen Differenzwägungen sind diese Unterschiede zu vernachlässigen.

Wesentlich ist die richtige Vorbehandlung des Wägegutes. Flüssigkeiten, hygroskopische und verwitternde Substanzen sind in geschlossenen Behältern (Wägegläsern) einzuwiegen. Sonstige Festkörper müssen nach Trocken- und Glühprozessen vor der Wägung in Exsikkatoren aufbewahrt werden, wo sie auf Raumtemperatur abkühlen. Das Gewicht des Wägegutes und das des leeren Gefäßes sollen in vernünftiger Relation zueinander stehen, deren untere Grenze etwa bei einem Gewichtsverhältnis von 1 : 200 liegt.

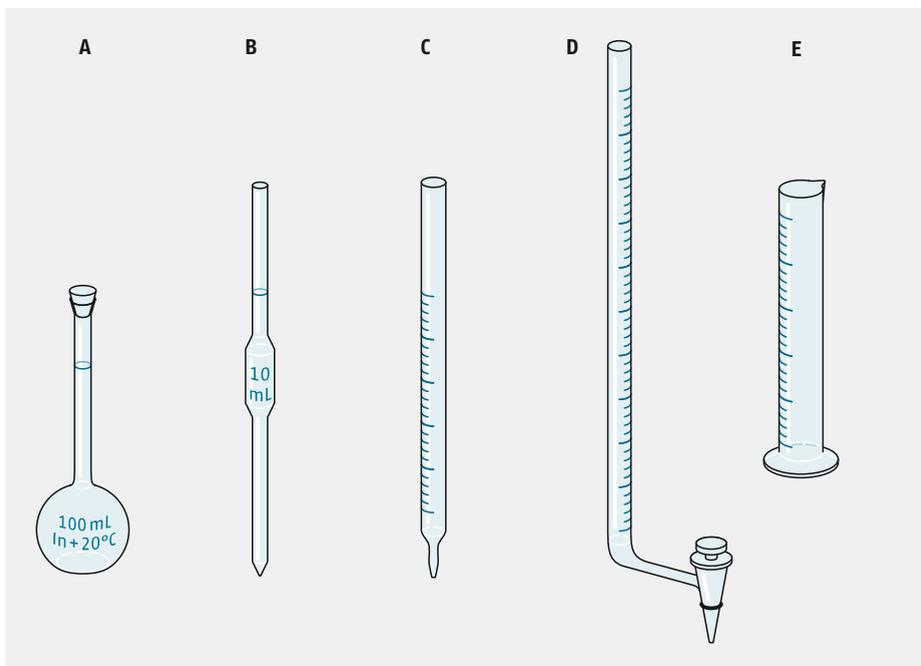
2.2 Messgefäße

Neben der analytischen Waage bilden die Volumen-Messgeräte die zweite Gruppe wichtiger Hilfsmittel, wobei Fein- und Grobgeräte zu unterscheiden sind. ▣ Tab. 2.2 und ○ Abb. 2.1 bringen eine Zusammenstellung häufig gebrauchter Geräte und ihrer Volumina. Der Inhalt der Messgefäße wird durch eingezätzte Marken in mL für eine Temperatur von 20 °C angegeben. Messkolben, Mess- und Mischzylinder sind im Allgemeinen mit Wasser auf Einguss (Kennzeichnung In, früher E), Pipetten und Büretten auf Auslauf (Kennzeichnung Ex, früher A) graduert.

Messkolben und Vollpipetten dienen der Messung eines Gesamtvolumens, während Büretten, Messpipetten sowie Mess- und Mischzylinder mit einer Graduierung versehen

▣ **Tab. 2.2** Volumenmessgefäße

| Gruppe | Gerät | Typ und Inhalt |
|--|--|--|
| Feinmessgefäße (eichfähige und amtlich geeichte) | Messkolben | Enghals und Weithals auch mit Normschliff mit 25, 50, 100, 250, 500, 1000 und 2000 mL Inhalt |
| | Zylinder | Messzylinder; Mischzylinder mit Normschliff |
| | Pipetten | Vollpipetten auf Auslauf, Messpipetten mit teilw. Ablauf, Messpipetten auf Auslauf mit 1, 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100 und 200 mL Inhalt |
| | Büretten | Normalgraduierung mit Schellbachstreifen mit 10, 25, 50 und 100 mL Inhalt |
| Grobmessgefäße (nicht eichfähig) | Wie oben, aber größere Fehlergrenzen | wie oben, außerdem alle Kunststoffausführungen sowie Saugkolbenpipetten, schnellablaufende und Ausblasvollpipetten mit 5, 10, 25, 50, 100, 250, 500, 1000 und 2000 mL Inhalt |



○ **Abb. 2.1** (A) Messkolben, (B) Vollpipette, (C) Messpipette, (D) Bürette, (E) Messzylinder

sind und beliebige Volumenanteile erfassen. Das Material der Messgeräte besteht aus resistentem Hartglas und nur in Sonderfällen aus Quarz. Daneben gibt es Messzylinder aus Kunststoff etwa zum Abmessen der Glas und Quarz angreifenden Flußsäure. Glasstopfen werden in neuerer Zeit häufig durch besser dichtende Kunststoffstopfen ersetzt. Sehr

vorteilhaft sind auch die selbstdichtenden Hahnküken aus Teflon in glatter, d. h. nicht geschliffener Glashülse für Büretten.

Eine einwandfreie Volumenmessung setzt eine völlig staub- und fettfreie Oberfläche voraus, an der Flüssigkeiten ohne Tröpfchen- und Inselbildung ablaufen. Zum Entfetten behandelt man die vorgereinigten Gefäße mit oberflächenaktiven Laborreinigungsmitteln. Für Feinmessungen sollten ausschließlich Geräte der Qualität „eichfähig“ verwendet werden. Beschädigte Geräte (angesplitterte Spitzen von Pipetten und Büretten, stark verätzte Messkolben und anderes) sollten nicht benutzt werden.

Die Volumenangaben gelten für Wasser von 20 °C. Für je 5 °C Temperaturabweichung differieren die Volumina um 0,1–0,2 Rel.-%, d. h. z. B. für einen 100-mL-Messkolben um 0,1–0,2 mL oder bei einem titrimetrischen Verbrauch von 10 mL um 0,01–0,02 mL. Dieser relative systematische Fehler ist bei hohen Genauigkeitsansprüchen zu berücksichtigen. Für den Ansatz von Standard- oder Maßlösungen ist aus gleichen Gründen ein Thermostat empfehlenswert. Zur Vermeidung irreversibler Volumenänderungen dürfen Messkolben nicht über 100 °C erhitzt werden. Kochen von Lösungen im Messkolben mit dem offenen Brenner ist auf jeden Fall zu vermeiden. Erwärmen im Wasserbad ist zulässig.

Zur definierten Entleerung der auf Auslauf justierten Vollpipetten streicht man die Spitze der ausgelaufenen Pipette nach 15 Sekunden Wartezeit unter Drehen an der Gefäßwandung ab. Die Pipette darf nicht ausgeblasen werden. Bei der Füllung von Messkolben und Entleerung von Büretten und Messpipetten muss vor dem genauen Auffüllen oder Ablesen 1–2 Minuten gewartet werden, damit letzte Flüssigkeitsreste von der Wand ablaufen können. Bei den Auslaufgeräten gibt die Volumenmessung nur für Wasser, verdünnte Lösungen und Flüssigkeiten mit wasserähnlicher Viskosität richtige Werte. Hochviskose Systeme wie konzentrierte H_2SO_4 , H_3PO_4 oder Glycerin sind nicht mehr einwandfrei pipettierbar. Soweit nicht stark gefärbte Flüssigkeiten vorliegen, wird die Marke stets auf die tiefste Meniskusstelle eingestellt. Einstellen oder Ablesen muss unter horizontaler Beobachtung erfolgen. Bei Büretten und Messpipetten kann das richtige Ablesen durch einen farbigen Streifen auf Milchglasuntergrund (Schellbachstreifen) erleichtert werden. Häufige Ursache „unerklärlicher“ Fehlresultate ist mangelhafte Übereinstimmung von Messkolben und Pipette bei Entnahme aliquoter Anteile. Dass mit einer 25-mL-Pipette stets genau ein Viertel aus einem 100-mL-Messkolben entnommen wird, ist keinesfalls selbstverständlich. Diese Voraussetzung ist nur bei sachgemäßer Arbeitsweise und sauberem, einwandfreiem Arbeitsgerät erfüllt. Auch hier ist eine praktische Überprüfung zu empfehlen.

2.3 Weitere Grundgeräte

Außer der Waage und den Messgefäßen benötigt man eine Reihe weiterer vielseitig verwendbarer Geräte und Hilfsmittel, deren ausführliche Beschreibung hier nicht erfolgen kann. Neben den wichtigsten Reagenzien-Standflaschen, bei denen Glas in neuerer Zeit oft durch Kunststoffe ersetzt wird, sind als allgemeine Geräte Stative mit verschiedenem Zubehör wie Muffen, Klemmen und Ringe sowie Dreifüße, Gummi- und Kunststoffschläuche zu nennen. Als Reaktionsgefäße verwendet man Bechergläser, Eng- und Weithals-Erlenmeyerkolben, Schalen und Tiegel und zum Abdecken geeignete Uhrgläser und Deckel. Als Material werden nicht nur Glas, sondern auch Quarz, Porzellan, Kunststoff sowie Edelmetalle (Platin, Silber) verwendet. Als Wärmeerzeuger dienen Gasbrenner, elektrische Heizplatten und Öfen, Wasserbäder und Trockenschränke. Zur Kontrolle werden

Thermometer und zur Einhaltung konstanter Temperaturen doppelwandige Gefäße oder Thermostaten benötigt.

Soweit es von Bedeutung ist, wird auf den Gebrauch und die Behandlung noch in den folgenden Beschreibungen der einzelnen Verfahren eingegangen.

Sondergeräte

Die Grundgeräte sind einfache Hilfsmittel, die in jedem analytischen Laboratorium vorhanden sind. Bestimmte Untersuchungen und Verfahren erfordern daneben spezielle Geräte, z. B. Mohr'sche Waagen und Pyknometer zur Dichtebestimmung, Extraktionsapparate, Destillierkolonnen, Gasbüretten, elektroanalytische Geräte und Ionenaustauscher.

Für die physikalischen Analysenverfahren benötigt man Geräte wie z. B. Kolorimeter oder Photometer, Polarographen, Flammenphotometer und Spektrometer. Die oft einfache Bedienung darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass Fehlresultate auf die Dauer nur bei guter Kenntnis des Funktionsprinzips der Geräte vermieden werden können.

3 Gravimetrische Verfahren

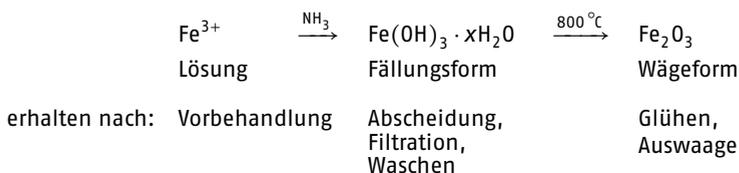
Einführung in die Gravimetrie ... 17 | Einzelbestimmung von Anionen ... 22 | Einzelbestimmung von Kationen ... 27

Die ersten wissenschaftlichen Arbeiten auf diesem Gebiet sind mit den Namen *M. H. Klaproth* (1743–1817) und *J. J. Berzelius* (1779–1848) verbunden. Letzterer befasste sich besonders mit der genauen Bestimmung der relativen Atommassen. Eine hervorragende Zusammenfassung der damaligen Ergebnisse findet sich im „Handbuch der analytischen Chemie“ (II. Band, 3. Aufl., Berlin 1834) von *Heinrich Rose* (1795–1864).

Die Gravimetrie erfordert gegenüber anderen Verfahren verhältnismäßig viel Zeit und weist einen hohen Schwierigkeitsgrad auf. Dieser Nachteil hat dazu geführt, dass gravimetrische Bestimmungen in den Betriebslaboratorien in wachsendem Maße durch schnellere titrimetrische oder physikalische Methoden ersetzt werden. Für viele wissenschaftliche Arbeiten ist die Gravimetrie wegen ihrer hohen Genauigkeit aber durchaus geschätzt, auch da sie eine Fülle notwendiger theoretischer und praktischer Kenntnisse vermittelt.

3.1 Einführung in die Gravimetrie

Bei gravimetrischen Verfahren werden die zu bestimmenden Ionen oder Moleküle unter genau festgelegten Arbeitsbedingungen in Form einer schwerlöslichen Verbindung (**Fällungsform**) abgeschieden, filtriert, gewaschen und durch Trocknen oder Glühen in eine definierte **Wägeform** überführt, z. B.:



Aus der ausgewogenen Masse $m(\text{B})$ in mg folgt nach $m(\text{B}) \cdot [\lambda] = m$, durch Multiplikation mit dem Umrechnungsfaktor $[\lambda]$ die Masse m an zu bestimmendem Element in mg, wobei

$$[\lambda] = \frac{\text{stöchiometrischer Koeffizient} \cdot \text{molare Masse der gesuchten Substanz}}{\text{molare Masse der Wägeform}}$$

Das heißt, im Beispiel ist

$$[\lambda] = \frac{2M(\text{Fe})}{M(\text{Fe}_2\text{O}_3)} = \frac{2 \cdot 55,847 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}}{159,692 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} = 0,69943$$

Der stöchiometrische Koeffizient, im obigen Beispiel gleich 2, berücksichtigt die verschiedene Anzahl der maßgebenden Atome in der Formeleinheit von gesuchter Substanz und Wägeform. Entsprechend der Genauigkeit der molaren Massen der Elemente reichen 4- oder besser 5-ziffrige numerische Werte für $[\lambda]$ aus, wobei vorstehende Nullen nicht gezählt werden. Der $[\lambda]$ -Wert ist mit dem theoretischen Massenanteil des zu bestimmenden Elements in der Wägeform identisch. Ein Massenanteil wird statt als echter Dezimalbruch oft in Prozent angegeben, z. B. $w(\text{Fe}) = 69,94\%$. Dies entspricht der früher üblichen Angabe als Gehalt $H = 69,94\%$ Massenanteil Eisen.

Zum besseren Verständnis der gravimetrischen Arbeitstechnik sollen zunächst die einzelnen Stufen theoretisch und praktisch erläutert werden.

3.1.1 Durchführung der Fällungsanalysen

Vorbehandlung

Vor Beginn der Fällung müssen die Bedingungen der Arbeitsvorschrift eingestellt und kontrolliert werden, wobei vor allem der pH-Wert, die Zusätze an Hilfsreagenzien, das Ausgangsvolumen und nicht zuletzt die richtige Oxidationsstufe des abzuscheidenden Elements von Bedeutung sind.

Abscheidung

Die Fällung erfolgt, soweit nicht ausdrücklich anders vorgeschrieben, unter Rühren aus warmer oder sogar siedender Lösung durch Zutropfen des Fällungsreagenzes. Die Reagenzugabe wird nach Auftreten einer ersten Trübung kurzzeitig (5 Minuten) unterbrochen, um den Keimen Gelegenheit zum Wachsen zu geben. Bei Eintropfen der restlichen Reagenzmenge sollen die Keime zu größeren Partikeln zusammenwachsen und diffuse Trübungen verschwinden. Keimbildungs- und Wachstumsgeschwindigkeiten können sich bei den einzelnen Fällungen beträchtlich unterscheiden, worauf auch die Unterschiede der Eigenschaften der Niederschläge wie fein- oder grobkristallin, voluminös und schleimig zurückzuführen sind. Erwünscht sind kristalline Formen mit mittlerer Partikelgröße, die einerseits schnell filtriert und andererseits wirkungsvoll gewaschen werden können. Man nähert sich dem Idealzustand oft nur durch längeres Ausrühren unter Erwärmen oder Stehenlassen über Nacht. Schleimige Niederschläge verstopfen die Filterporen, absorbieren störende Fremdstoffe (► Band I, S. 161) und gehen während des Waschprozesses allzu leicht kolloidal in Lösung. Sehr grobe Kristalle lassen sich ausgezeichnet filtrieren, schließen aber häufig durch Waschen nicht mehr entfernbare Verunreinigungen ein. Zur Erzielung ausreichend reiner Abscheidungen kommt man bisweilen nicht ohne Umfällung aus. Hierzu werden Niederschlag und Lösung durch Filtrieren oder schneller durch Zentrifugieren und Abgießen der überstehenden Lösung getrennt. Nach Auflösen ist erneut nach Vorschrift zu fällen. Sehr vorteilhaft ist die „Abscheidung aus homogener Lösung“. Es sind dies Lösungen, denen das Fällungsreagenz unter Bedingungen zugesetzt wurde, bei denen noch keine Abscheidung eintritt. Die Fällung wird etwa durch langsames Erhöhen des pH-Wertes (Fällungen mit 8-Hydroxychinolin) oder durch thermische Zersetzung von inerten Reagenzverbindungen (Hydrolysefällungen, Fällungen von Sulfiden mit Thioacetamid) eingeleitet und gesteuert. Die Endprodukte zeichnen sich durch eine kompaktere Form und größere Reinheit aus.

Die Vollständigkeit einer Abscheidung wird durch die Löslichkeit und die Reaktionsgeschwindigkeit unter den vorgegebenen Versuchsbedingungen bestimmt. Besonders schnell verlaufen Reaktionen zwischen Kationen und Anionen (z. B. $\text{Ag}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{AgCl}$). Bei anderen Partnern wie Ionen und Molekülen oder ausschließlich Molekülen wird eine Umsetzung nur durch starkes Erhitzen über einen längeren Zeitraum erzwungen. Allgemein kann die Löslichkeit unter den speziellen Fällungsbedingungen nur als ein praktisch gemessener Wert (mg/mL oder $\mu\text{g/mL}$ bzw. molar) angegeben werden. Bei einfachen schwerlöslichen Salzen ist eine Abschätzung auch theoretisch über das bereits in ►Band I, S.127 behandelte Löslichkeitsprodukt möglich; dies soll am Beispiel der Fällung von Chloridionen mit Silbernitrat gezeigt werden.

$$K_L = c(\text{Cl}^-) \cdot c(\text{Ag}^+) = 1,10 \cdot 10^{-10} \text{ mol}^2 \cdot \text{L}^{-2} \quad (20^\circ\text{C})$$

Bei einer Fällung von 0,5 mmol Cl^- (17,7 mg) mit insgesamt 2 mmol Ag^+ (10 mL 0,2 mol/L AgNO_3) in einem Endvolumen von $V_E = 150 \text{ mL}$ verbleiben rund 1,5 mmol Ag^+ in Lösung. Mit der entsprechenden Konzentration

$$c(\text{Ag}^+) = \frac{1,5 \text{ mmol}}{150 \text{ mL}} = \frac{0,0015 \text{ mol}}{0,15 \text{ L}} = 0,01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

errechnet sich die in Lösung verbleibende Stoffmenge Chloridionen nach

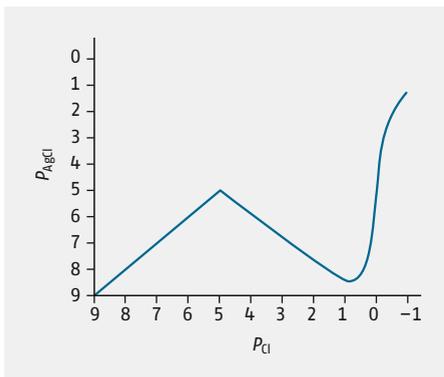
$$c(\text{Cl}^-) = \frac{K_L}{c(\text{Ag}^+)} = 1,10 \cdot 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

zu $n(\text{Cl}^-) = c(\text{Cl}^-) \cdot V_E = 1,65 \cdot 10^{-9} \text{ mol} \hat{=} m(\text{Cl}^-) = 58,497 \cdot 10^{-6} \text{ mg}$.

Wie ◉ Abb. 3.1 zeigt, liegt entsprechend dem Löslichkeitsprodukt ein Maximum der Löslichkeit von AgCl bei einer Konzentration $c(\text{Cl}^-) = 10^{-5} \text{ mol/L}$ vor. An diesem Punkt ist keines der beiden Ionen im Überschuss vorhanden, es gilt:

$$c(\text{Cl}^-) = c(\text{Ag}^+) = \sqrt{K_{L_{\text{AgCl}}}} = 1,05 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \quad (20^\circ\text{C})$$

Die tatsächlich gelöste Menge wird aber meist sehr viel größer sein, da eine zusätzliche Kolloidbildung, unvollständige Gleichgewichtseinstellung, wachsende Löslichkeit durch Komplexbildung mit überschüssigem Reagenz und Verluste durch den Waschprozess keine Berücksichtigung finden.



◉ **Abb. 3.1** Abhängigkeit der Löslichkeit des AgCl von der Cl^- -Konzentration in der Lösung

So geht z. B. bei der Fällung von Ag^+ mit Cl^- AgCl bei Konzentrationen $c(\text{Cl}^-) > 10^{-1} \text{ mol/L}$ unter Komplexbildung ($[\text{AgCl}_2]^-$) teilweise wieder in Lösung (• Abb. 3.1).

In der • Abb. 3.1 sind als Konzentrationsmaß die p_{AgCl} - bzw. p_{Cl} -Werte aufgetragen; diese sind analog dem pH-Wert als der negative dekadische Logarithmus der Konzentration definiert. Es zeigt sich, dass die vollständigste Fällung von Ag^+ als AgCl bei einer Konzentration $c(\text{Cl}^-) = 10^{-1} \text{ mol/L}$ erreicht wird. Ein größerer Cl^- -Überschuss ist nicht nur nutzlos, sondern sogar schädlich (Komplexbildung). Analoge Überlegungen gelten auch für andere Fällungsreaktionen.

Für den Fällungsprozess benötigt man sehr saubere und fettfreie Bechergläser (hohe Form), DreifüÙe mit Ceran[®]-Kochplatten und Brennern (oder elektrische Heizplatten) sowie Magnetrührer und Büretten bzw. Pipetten.

Filtration

Nach Absetzen des Niederschlages wird dieser durch dekantierende Filtration von der Lösung getrennt. Hierzu gieÙt man zuerst die überstehende Lösung bis auf einen geringen Rest durch ein geeignetes Filter und überführt nach Umschwenken anschließend weitgehend auch den Lösungsrest mit dem Niederschlag. Zur Vermeidung von Löslichkeitsverlusten ist es empfehlenswert, das klare Filtrat in einer sauberen Spritzflasche aufzufangen und in kleinen Portionen zum Ausbringen letzter im Becherglas verbliebener Niederschlagsreste zu verwenden. Man achte während der Filtration und des anschließenden Waschens darauf, dass der Niederschlag stets von einer Flüssigkeitshaut bedeckt bleibt, da andernfalls eine Verstopfung der Filterporen eintreten kann. Stark an der Gefäßwand haftende Niederschläge werden nach Bedecken mit Lösung vorsichtig durch eine Gummifahne abgestreift. Wird das Filter danach verascht, so kann man für die Überführung von Restmengen des Niederschlages auch Stückchen von quantitativen Filtern (s. unten) verwenden, mit denen man die Wand des Gefäßes abreibt und die dann dem Filtergut zugegeben werden. Bei Verwendung unsauberer Arbeitsgeräte kann Kleben und Kriechen des Niederschlages auftreten.

Das Filtriergerät besteht entweder aus Glastrichtern mit eingelegten Filterpapier oder Saugtöpfen bzw. Saugflaschen und Filtertiegeln. Entsprechende Anordnungen zeigt die • Abb. 3.2.

Quantitative Filter sind aschefrei, d. h. hinterlassen bei der stets erforderlichen Veraschung praktisch nur unwägbare Rückstände. Nach der Teilchengröße des Niederschlages richtet sich die zu verwendende Filterart. Voluminöse und grobkristalline Niederschläge werden durch weiche Filter (Schwarzband), solche mittlerer Körnung durch mittelharte (Weißband) und pulvrige bzw. feinkristalline Fällungen durch harte Sorten (Blauband) filtriert (Schwarz-, Weiß- und Blauband sind Handelsnamen von Sorten der Firma Schleicher & Schüll als Beispiel.). Mit den Abstufungen der mittleren Porengrößen 8, 6 und 2 μm wachsen die Filtrationszeiten bereits für reines Wasser etwa im Verhältnis 1 : 3 : 30. Bei einem harten Filter von 15 cm Durchmesser liegt die Zeit für 100 mL H_2O bei 5–7 Minuten. Die Wahl einer falschen Papiersorte macht die geleistete Vorarbeit wertlos und ist nur durch Wiederholung der Bestimmung zu korrigieren.

Darf das Filter auf Grund der Temperaturempfindlichkeit des Fällungsproduktes nicht verascht werden, kann aber das Fällungsprodukt durch Trocknen bis etwa 250 °C in eine definierte Wägeform gebracht werden, so lässt sich eine Filtration mit der in • Abb. 3.2 gezeigten Anordnung unter Verwendung von **Glasfiltertiegeln** einfacher und schneller durchführen. Für quantitative Arbeiten eignen sich Tiegel mit Fritten D 3 (relativ grob)