

# Physik

für Studierende der Medizin, Zahnmedizin,  
Biochemie, Biologie und Pharmazie

**Prof. Dr. Jürgen Arnhold**

Institut für Medizinische Physik und Biophysik  
an der Medizinischen Fakultät der Universität Leipzig  
Institutsdirektor: Prof. Dr. Daniel Huster

## Inhaltsverzeichnis

<b>0.</b>	<b>Physikalische Größen und Einheiten.....</b>	<b>11</b>
0.1	Messen heißt vergleichen!.....	11
0.2	Internationale Einheitensystem .....	11
0.3	Arbeiten mit Messgrößen .....	12
0.4	Skalare und vektorielle Größen.....	12
0.5	Naturkonstanten.....	13
<b>1.</b>	<b>Mechanik: Bewegung von Körpern.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Einfache Bewegungen .....</b>	<b>15</b>
1.1.1	Grundtypen der Bewegung .....	15
1.1.2	Geradlinige gleichförmige Bewegung .....	15
1.1.3	Gleichmäßig beschleunigte Bewegung, freier Fall .....	16
1.1.4	Diagramme und Gesetze (Translation) .....	17
1.1.5	Gleichförmige Kreisbewegung .....	17
1.1.6	Ungleichförmige Kreisbewegung .....	19
<b>1.2</b>	<b>Kräfte .....</b>	<b>19</b>
1.2.1	Newtonsche Axiome .....	19
1.2.2	Schwerkraft als Sonderform der Gravitationskraft .....	19
1.2.3	Auftrieb .....	20
1.2.4	Reibung .....	21
1.2.5	Sedimentation .....	22
1.2.6	Zentrifugalkraft als Trägheitskraft .....	23
1.2.7	Zentrifugation .....	24
1.2.8	Drehmoment .....	25
1.2.9	Drehmomentengleichgewichte .....	26
<b>1.3</b>	<b>Erhaltungsgrößen der Mechanik .....</b>	<b>27</b>
1.3.1	Arbeit und Energie .....	27
1.3.2	Leistung .....	29
1.3.3	Energieerhaltungssatz .....	29
1.3.4	Impuls, Impulserhaltungssatz .....	29
1.3.5	Elastischer und inelastischer Stoß .....	30
1.3.6	Drehimpuls, Drehimpulserhaltungssatz .....	31
<b>1.4</b>	<b>Übersicht Translation vs. Rotation.....</b>	<b>32</b>
<b>2.</b>	<b>Mechanik: Deformation von Körpern .....</b>	<b>33</b>
<b>2.1</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>33</b>
2.1.1	Elastische versus plastische Deformation .....	33
2.1.2	Feder als elastisches Element .....	33
<b>2.2</b>	<b>Grundtypen der elastischen Verformung .....</b>	<b>34</b>
2.2.1	Dehnung und Stauchung .....	34
2.2.2	Allseitige Kompression .....	35

2.2.3	Biegung .....	35
2.2.4	Scherung.....	36
2.2.5	Verdrillung .....	37
<b>2.3</b>	<b>Plastische Deformation .....</b>	<b>37</b>
2.3.1	Definitionen .....	37
2.3.2	Elastisches und viskoses Verhalten als Grenzfälle .....	38
2.3.3	Viskoelastizität .....	39
<b>2.4</b>	<b>Materialeigenschaften und Schutzstrategien gegenüber Deformationen .....</b>	<b>39</b>
2.4.1	Hohlzylinder .....	39
2.4.2	Innere Struktur von Röhrenknochen .....	39
2.4.3	Viskoelastische Elemente der Gelenke.....	40
2.4.4	Das System Hyaluronsäure-Wasser als effizienter Stoßdämpfer .....	40
2.4.5	Plastische Materialien in der Zahnheilkunde .....	40
<b>3.</b>	<b>Mechanik: Drücke und Strömungen .....</b>	<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>Druck als mechanische Größe .....</b>	<b>41</b>
3.1.1	Molekulares Bild des Druckes.....	41
3.1.2	Luftdruck und barometrische Höhenformel .....	41
3.1.3	Luft als Gasgemisch .....	42
3.1.4	Schweredruck .....	42
3.1.5	Stempeldruck .....	43
3.1.6	Druckmessung .....	43
<b>3.2</b>	<b>Strömungen .....</b>	<b>44</b>
3.2.1	Grundgesetz der Hydrodynamik .....	44
3.2.2	Kontinuitätsgleichung .....	45
3.2.3	Laminare und turbulente Strömung .....	45
3.2.4	Gesetz von Hagen-Poiseuille .....	46
3.2.5	Strömungswiderstand in parallel geschalteten Gefäßen .....	46
3.2.6	Gleichung von Bernouilli .....	47
<b>3.3</b>	<b>Blutkreislauf .....</b>	<b>48</b>
3.3.1	Herz als Pumpe.....	48
3.3.2	Windkesselfunktion .....	48
3.3.3	Auftreten von Turbulenzen .....	49
3.3.4	Durchblutung von Organen und Geweben .....	49
3.3.5	Blut als nicht-newtonsche Flüssigkeit .....	50
3.3.6	Stenosen und Aneurysmen .....	50
<b>3.4</b>	<b>Weitere Anwendungen der Strömungsgesetze .....</b>	<b>50</b>
3.4.1	Funktion von Ventilen und Klappen .....	50
3.4.2	Ausströmphänomene .....	51
3.4.3	Erzeugung von Unterdruck .....	51
3.4.4	Dynamischer Auftrieb .....	52

<b>4.</b>	<b>Mechanik: Grenzflächenphänomene .....</b>	<b>53</b>
<b>4.1</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>53</b>
4.1.1	Grenzflächen .....	53
4.1.2	Kohäsion versus Adhäsion, Benetzung .....	53
4.1.3	Oberflächenenergie .....	54
4.1.4	Kohäsionsdruck .....	54
<b>4.2</b>	<b>Verfahren zur Bestimmung der Oberflächenspannung .....</b>	<b>55</b>
4.2.1	Spreizung von Flüssigkeitslamellen .....	55
4.2.2	Abreißmethode .....	55
4.2.3	Tropfengröße .....	56
4.2.4	Kapillare Steighöhe .....	56
<b>4.3</b>	<b>Anwendungen .....</b>	<b>57</b>
4.3.1	Oberflächenaktive Substanzen .....	57
4.3.2	Wasserabweisende Beschichtung .....	57
4.3.3	Strukturbildung durch amphiphile Stoffe in biologischen Systemen .....	58
<b>5.</b>	<b>Elektrik: Elektrische Felder .....</b>	<b>59</b>
<b>5.1</b>	<b>Kenngößen eines elektrischen Feldes .....</b>	<b>59</b>
5.1.1	Elektrische Ladung .....	59
5.1.2	Elektrische Kraft .....	59
5.1.3	Homogene und inhomogene elektrische Felder .....	59
5.1.4	Ladungen im elektrischen Feld .....	60
<b>5.2</b>	<b>Elektrischer Dipol .....</b>	<b>61</b>
5.2.1	Dipolmoment .....	61
5.2.2	Elektrisches Feld eines Dipols .....	62
5.2.3	Elektrokardiogramm (EKG) .....	62
5.2.4	Dipol-Dipol-Wechselwirkungen .....	63
<b>6.</b>	<b>Elektrik: Elektrische Ströme .....</b>	<b>65</b>
<b>6.1</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>65</b>
6.1.1	Ohmsche Gesetz .....	65
6.1.2	Elektrischer Widerstand und Leitwert .....	65
6.1.3	Stromfluss und Wirkungen des elektrischen Stromes .....	66
<b>6.2</b>	<b>Ionen und geladene Teilchen in Lösung .....</b>	<b>66</b>
6.2.1	Elektrolytische Leitfähigkeit .....	66
6.2.2	Kolloidale Teilchen im elektrischen Feld .....	66
6.2.3	Elektrophorese .....	67
<b>6.3</b>	<b>Gleichstromkreis .....</b>	<b>68</b>
6.3.1	Elektrische Energie und Leistung .....	68
6.3.2	Kirchhoffsche Regeln .....	69
6.3.3	Reihen- und Parallelschaltung elektrischer Widerstände .....	69
6.3.4	Widerstandsmessung .....	70
6.3.5	Innenwiderstand einer Spannungsquelle .....	71
6.3.6	Plattenkondensator .....	72

<b>6.4</b>	<b>Magnetische Wirkung elektrischer Ströme .....</b>	<b>73</b>
6.4.1	Magnetfelder (elektrische Leiter, Spule) .....	73
6.4.2	Magnetfelder (Erde, Permanentmagnet) .....	74
6.4.3	Lorentzkraft .....	75
6.4.4	Magnetische Flussdichte und magnetischer Fluss .....	76
6.4.5	Dia-, Para- und Ferromagnetismus .....	76
6.4.6	Selbstinduktion .....	77
<b>6.5</b>	<b>Wechselstromkreis .....</b>	<b>77</b>
6.5.1	Kenngrößen einer sinusförmigen Wechselspannung .....	77
6.5.2	Ohmscher und kapazitiver Widerstand im Wechselstromkreis .....	78
6.5.3	Kombination von ohmschen und kapazitiven Widerstand .....	79
6.5.4	Induktiver Widerstand im Wechselstromkreis .....	79
6.5.5	Elektrische Leistung im Wechselstromkreis .....	80
6.5.6	Schwingkreise .....	80
6.5.7	Elektromagnetische Induktion .....	81
<b>6.6</b>	<b>Anwendungen von Wechselströmen .....</b>	<b>82</b>
6.6.1	Elektrische Eigenschaften von Geweben .....	82
6.6.2	Niederfrequente elektrische Ströme .....	82
6.6.3	Hochfrequenztherapie und -anwendungen .....	83
<b>6.7</b>	<b>Komplexe periodische Signale .....</b>	<b>84</b>
6.7.1	Fourier-Analyse anharmonischer Schwingungen .....	84
6.7.2	Grundlagen der Registrierung von Signalen .....	85
6.7.3	Oszilloskop .....	85
<b>7.</b>	<b>Magnetische Kernresonanz .....</b>	<b>87</b>
<b>7.1</b>	<b>Kernspin und Magnetfelder .....</b>	<b>87</b>
7.1.1	Interaktion magnetischer Dipole mit starken Magnetfeldern .....	87
7.1.2	Kernresonanz .....	88
7.1.3	Technische Anforderungen .....	89
<b>7.2</b>	<b>Kernresonanzspektroskopie .....</b>	<b>90</b>
7.2.1	Eindimensionale Kernresonanzspektroskopie .....	90
7.2.2	Zwei- und mehrdimensionale Kernresonanzspektroskopie .....	90
<b>7.3</b>	<b>Kernspintomographie .....</b>	<b>90</b>
7.3.1	Ortsauflösung .....	90
7.3.2	Impulstechniken zur Kontrastverbesserung .....	91
7.3.3	Darstellungsarten .....	92
<b>8.</b>	<b>Wärmelehre .....</b>	<b>93</b>
<b>8.1</b>	<b>Wärme als Energieform .....</b>	<b>93</b>
8.1.1	Absolute Temperatur .....	93
8.1.2	Temperaturskalen .....	93
8.1.3	Grundgleichung der Kalorik .....	94
8.1.4	Phasenübergänge .....	94
8.1.5	Wärmeausgleichsprozesse .....	95

<b>8.2</b>	<b>Temperaturmessung</b> .....	<b>95</b>
8.2.1	Ausdehnung von Festkörpern und Flüssigkeiten .....	95
8.2.2	Widerstandsthermometer .....	96
8.2.3	Thermoelement .....	97
8.2.4	Weitere Verfahren .....	97
<b>8.3</b>	<b>Gasgesetze</b> .....	<b>98</b>
8.3.1	Zustandsgleichung idealer Gase .....	98
8.3.2	Zustandsänderungen idealer Gase .....	98
8.3.3	Atmung .....	99
<b>8.4</b>	<b>Hauptsätze der Wärmelehre</b> .....	<b>100</b>
8.4.1	Erster Hauptsatz .....	100
8.4.2	Zweiter Hauptsatz .....	101
8.4.3	Grundzüge der Thermodynamik offener Systeme .....	101
<b>8.5</b>	<b>Wärmetransportmechanismen</b> .....	<b>102</b>
8.5.1	Wärmebilanz in höheren Organismen .....	102
8.5.2	Wärmeleitung .....	102
8.5.3	Konvektion .....	103
8.5.4	Verdunstung .....	103
8.5.5	Wärmestrahlung .....	103
<b>9.</b>	<b>Transportphänomene und Membranpotenziale</b> .....	<b>105</b>
<b>9.1</b>	<b>Brownsche Bewegung</b> .....	<b>105</b>
<b>9.2</b>	<b>Diffusion</b> .....	<b>106</b>
9.2.1	Diffusion als Verteilungsphänomen .....	106
9.2.2	Diffusionsgesetz .....	106
9.2.3	Diffusion von gelösten Gasen .....	107
9.2.4	Permeation von Stoffen durch biologische Membranen .....	108
9.2.5	Passiver und aktiver Transport .....	108
<b>9.3</b>	<b>Osmose</b> .....	<b>110</b>
9.3.1	Semipermeabilität .....	110
9.3.2	Pfeffersche Zelle .....	110
9.3.3	Gleichung von van't Hoff .....	111
9.3.4	Isotonie, Hypotonie und Hypertonie .....	111
9.3.5	Zellwanddruck pflanzlicher Zellen.....	112
<b>9.4</b>	<b>Membran-Potenziale</b> .....	<b>113</b>
9.4.1	Diffusionsspannung .....	113
9.4.2	Kolloidosmotischer Druck und Donnan-Potenzial .....	113
9.4.3	Ionen in Zellen .....	114
9.4.4	Ruhepotenzial .....	115
9.4.5	Aktionspotenzial .....	115

<b>10.</b>	<b>Erzeugung und Anwendung von Röntgenstrahlung .....</b>	<b>117</b>
<b>10.1</b>	<b>Röntgenstrahlen als elektromagnetische Welle .....</b>	<b>117</b>
<b>10.2</b>	<b>Erzeugung von Röntgenstrahlen .....</b>	<b>118</b>
10.2.1	Aufbau einer Röntgenröhre .....	118
10.2.2	Spektrum der Strahlung einer Röntgenröhre .....	119
<b>10.3</b>	<b>Wechselwirkung von Röntgenstrahlung mit Materie .....</b>	<b>120</b>
10.3.1	Absorption von Röntgenstrahlen .....	120
10.3.2	Mechanismen der Absorption von Röntgenstrahlen .....	121
10.3.3	Schwächung von Röntgenstrahlung im Organismus .....	122
<b>10.4</b>	<b>Durchleuchtung .....</b>	<b>123</b>
<b>10.5</b>	<b>Computertomographie .....</b>	<b>124</b>
<b>10.6</b>	<b>Röntgenkleinwinkelstreuung .....</b>	<b>125</b>
<b>11.</b>	<b>Radioaktivität .....</b>	<b>127</b>
<b>11.1</b>	<b>Atomkerne .....</b>	<b>127</b>
11.1.1	Bau der Atomkerne .....	127
11.1.2	Massendefekt .....	127
11.1.3	Kernspaltung und -fusion .....	127
11.1.4	Nuklidkarte .....	128
11.1.5	Natürliche und künstliche Radionuklide .....	129
<b>11.2</b>	<b>Zerfall instabiler Kerne .....</b>	<b>129</b>
11.2.1	$\alpha$ -Zerfall .....	129
11.2.2	$\beta^-$ -Zerfall .....	130
11.2.3	$\beta^+$ -Zerfall .....	130
11.2.4	K-Einfang .....	131
11.2.5	Zerfallsreihen.....	131
<b>11.3</b>	<b>Eigenschaften radioaktiver Strahlung .....</b>	<b>131</b>
11.3.1	$\alpha$ -Strahlung .....	131
11.3.2	$\beta$ -Strahlung .....	131
11.3.3	$\gamma$ -Strahlung .....	132
11.3.4	Metastabile Radionuklide .....	132
<b>11.4</b>	<b>Kenngößen des radioaktiven Zerfalls .....</b>	<b>132</b>
11.4.1	Aktivität eines radioaktiven Präparates .....	132
11.4.2	Zerfallsgesetz .....	133
11.4.3	Physikalische Halbwertszeit .....	133
11.4.4	Mittlere Lebensdauer .....	134
<b>11.5</b>	<b>Wichtige Nachweisverfahren für radioaktive Strahlung .....</b>	<b>134</b>
11.5.1	Autoradiographie .....	134
11.5.2	Zählrohre .....	135
11.5.3	Szintillationszähler .....	136

<b>11.6</b>	<b>Anwendungen radioaktiver Strahlung .....</b>	<b>137</b>
11.6.1	Markierung biologisch wichtiger Moleküle .....	137
11.6.2	Altersbestimmungen .....	137
11.6.3	Strahlentherapie .....	137
11.6.4	Szintigraphie .....	138
11.6.5	Einzelphotonen-Emissions-Computertomographie .....	139
11.6.6	Positronen-Emissions-Tomographie .....	139
<b>12.</b>	<b>Strahlenschutz und Dosimetrie .....</b>	<b>141</b>
<b>12.1</b>	<b>Generelle Maßnahmen des Strahlenschutzes .....</b>	<b>141</b>
<b>12.2</b>	<b>Dosimetrie .....</b>	<b>142</b>
12.2.1	Grundgrößen der Dosimetrie .....	142
12.2.2	Strahlungsmessgeräte .....	143
<b>12.3</b>	<b>Strahlenbelastung .....</b>	<b>143</b>
12.3.1	Natürliche und künstliche Strahlenbelastung .....	143
12.3.2	Strahlenbelastung durch medizinische Untersuchungstechniken .....	144
12.3.3	Schäden durch Strahlung, Strahlenkrankheit .....	144
<b>13.</b>	<b>Akustik .....</b>	<b>145</b>
<b>13.1</b>	<b>Schallwellen .....</b>	<b>145</b>
13.1.1	Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Schallwelle .....	145
13.1.2	Wellenlänge und Frequenz .....	145
<b>13.2</b>	<b>Schallfeldgrößen .....</b>	<b>146</b>
13.2.1	Schallwechseldruck .....	146
13.2.2	Schallschnelle .....	146
13.2.3	Schallwellenwiderstand .....	147
13.2.4	Schallintensität .....	147
<b>13.3</b>	<b>Hörschall .....</b>	<b>148</b>
13.3.1	Aufbau des menschlichen Ohres .....	148
13.3.2	Lautstärke .....	149
13.3.3	Hörfeld des Menschen .....	149
13.3.4	Erzeugung von Hörschall .....	150
<b>13.4</b>	<b>Ultraschall .....</b>	<b>151</b>
13.4.1	Erzeugung und Nachweis von Ultraschall .....	151
13.4.2	Kontinuierlicher und Impuls-Betrieb .....	151
13.4.3	Reflexion von Ultraschall .....	152
13.4.4	Absorption von Ultraschall .....	153
13.4.5	Grundlagen der Sonographie .....	153
13.4.6	Applikationsformen der Sonografie .....	154
13.4.7	Doppler-Effekt .....	154
13.4.8	Sonografische Anwendungen des Doppler-Effekts .....	155
13.4.9	Wirkungen und weitere Anwendungen von Ultraschall.....	156



<b>14.</b>	<b>Optik: Ausbreitung und Detektion von Licht .....</b>	<b>157</b>
<b>14.1</b>	<b>Spektrale Zerlegung von Licht .....</b>	<b>157</b>
14.1.1	Licht als elektromagnetische Welle .....	157
14.1.2	Dispersion der Brechzahl .....	157
14.1.3	Erzeugung von monochromatischem Licht .....	157
<b>14.2</b>	<b>Nachweis von Licht .....</b>	<b>159</b>
<b>14.3</b>	<b>Schwächung von Licht .....</b>	<b>159</b>
14.3.1	Maße für die Schwächung von Licht .....	159
14.3.2	Lambert-Beer'sches Gesetz .....	160
14.3.3	Aufbau von Photometer und Spektrometer .....	161
<b>14.4</b>	<b>Mechanismen von Absorption und Emission von Licht .....</b>	<b>161</b>
14.4.1	Absorption .....	161
14.4.2	Lumineszenz .....	162
14.4.3	Fluoreszenz .....	162
14.4.4	Fluoreszenzlöschung .....	164
<b>14.5</b>	<b>Polarisation von Licht .....</b>	<b>165</b>
14.5.1	Erzeugung von polarisiertem Licht .....	165
14.5.2	Optische Aktivität .....	166
<b>14.6</b>	<b>Phänomene der Ausbreitung von Licht .....</b>	<b>167</b>
14.6.1	Reflexion .....	167
14.6.2	Brechung .....	167
14.6.3	Totalreflexion .....	168
14.6.4	Polarisation von Licht bei Reflexion und Brechung .....	169
14.6.5	Doppelbrechung .....	170
14.6.6	Circulardichroismus .....	170
<b>15.</b>	<b>Optik: Abbildung von Gegenständen .....</b>	<b>171</b>
<b>15.1</b>	<b>Optische Abbildung .....</b>	<b>171</b>
<b>15.2</b>	<b>Spiegel .....</b>	<b>171</b>
<b>15.3</b>	<b>Linzen .....</b>	<b>172</b>
15.3.1	Allgemeine Eigenschaften von Linzen .....	172
15.3.2	Kenngößen einer Linse .....	173
15.3.3	Brechwert einer Linse .....	174
15.3.4	Abbildungsgleichung .....	174
15.3.5	Zusammengesetzte Linsensysteme .....	175
15.3.6	Bildkonstruktion an dünnen Linzen .....	175
15.3.7	Abbildungsfehler .....	176
<b>15.4</b>	<b>Auge .....</b>	<b>178</b>
15.4.1	Brechende Systeme des Auges .....	178
15.4.2	Akkommodation .....	178
15.4.3	Modell des reduzierten Auges .....	179
15.4.4	Fehlsichtigkeiten und ihre Korrektur .....	179

15.4.5	Sinneswahrnehmung .....	180
15.4.6	Auflösungsvermögen.....	181
<b>15.5</b>	<b>Lupe .....</b>	<b>182</b>
<b>15.6</b>	<b>Mikroskop .....</b>	<b>183</b>
15.6.1	Strahlenverlauf am Mikroskop .....	183
15.6.2	Auflösungsvermögen .....	184
15.6.3	Förderliche Vergrößerung .....	185
15.4.4	Amplituden- und Phasenkontrast .....	185
<b>15.7</b>	<b>Ausgewählte Verfahren der Lichtmikroskopie .....</b>	<b>186</b>
15.7.1	Phasenkontrastmikroskopie .....	186
15.7.2	Dunkelfeldmikroskopie .....	186
15.7.3	Polarisationsmikroskopie .....	187
15.7.4	Interferenzkontrastmikroskopie .....	187
15.7.5	Fluoreszenzmikroskopie .....	188
15.7.6	Konfokale Mikroskopie .....	188
<b>15.8</b>	<b>Elektronenmikroskop .....</b>	<b>189</b>
15.8.1	Welleneigenschaften von Elektronen .....	189
15.8.2	Auflösungsvermögen .....	190
15.8.3	Transmissionselektronenmikroskopie .....	190
15.8.4	Rasterelektronenmikroskopie .....	190