

Experimentelle Physik IIIa

Einführung in die Medizinphysik II
Diagnostische Bildgebung
WS 2014

Dieter Suter

2. Februar 2015

Inhaltsverzeichnis

10 Diagnostische Bildgebung	11
10.1 Bildgebende Methoden	11
10.1.1 Allgemeines	11
10.1.2 Kernspintomographie (MRI)	12
10.1.3 Projektionsröntgen	12
10.1.4 Computer-Tomographie (CT)	13
10.1.5 Nuklearmedizin	13
10.1.6 SPECT und PET	14
10.1.7 Ultraschall	15
10.1.8 Weitere Verfahren	15
10.1.9 Methodenvergleich	16
10.2 Endoskopie	16
10.2.1 Linsen-Endoskope	16
10.2.2 Faser-Endoskope	17
10.2.3 Anwendungen	18
10.2.4 Historische Entwicklung	19
10.3 Thermographie	19
10.3.1 Grundlagen und Definitionen	19
10.3.2 Schwarze Körper	20
10.3.3 Graue und farbige Körper	21
10.3.4 Körper als Wärmestrahler	22
10.3.5 Kameratechnik	22
10.3.6 Mikrobolometer	23
10.3.7 Anwendungen	24
10.4 Bilddarstellung	25
10.4.1 Farbdarstellung	25
10.4.2 3D Objekte	26
10.4.3 Projektionen	27
10.5 Bildqualität	28
10.5.1 Auflösung, Point Spread Funktion	28
10.5.2 Transferfunktion	28
10.5.3 Abtastung	29
10.5.4 Faltung	30
10.5.5 Dynamik	31
10.5.6 Skalierung von Helligkeitswerten	32
10.5.7 Helligkeits-Fenster	33
10.5.8 Falschfarben-Darstellung	34
10.5.9 Kontrast	34
10.5.10 Rauschen	35

10.6	Bildverarbeitung	36
10.6.1	Digitale Filterung	36
10.6.2	Beispiele	37
10.6.3	Hoch- und Tiefpassfilter	38
10.6.4	Fourier-Zerlegung	39
10.6.5	Geometrische Transformationen	40
10.6.6	Warping	40
10.7	Tomographie	41
10.7.1	Prinzip	41
10.7.2	Iterative Rekonstruktion	42
10.7.3	Radon-Transformation	43
10.7.4	Zentralschnitt-Theorem	43
10.7.5	Gefilterte Rückprojektion	44
10.8	Analyse und Interpretation	44
10.8.1	Verarbeitung und Wertung	44
10.8.2	Automatische Bildanalysen	45
10.8.3	Qualität und Interpretation	46
10.9	Molekulare Bildgebung	47
10.9.1	Konzept	47
10.9.2	Molekulare Marker	47
10.9.3	Magnetic particle imaging	48
11	Radioaktivität und ionisierende Strahlung	50
11.1	Übersicht	50
11.1.1	Radioaktivität	50
11.1.2	Ionisierende Strahlung	50
11.1.3	Medizinische Anwendungen	51
11.1.4	Wechselwirkung mit Materie	52
11.2	Zerfallsprozesse im Atomkern	52
11.2.1	Atomkerne	52
11.2.2	Bindungsenergie und Massendefekt	53
11.2.3	Radioaktive Prozesse	54
11.2.4	Alpha-Zerfall	55
11.2.5	Reichweite	56
11.2.6	Energie der α -Teilchen	57
11.2.7	β -Zerfall	57
11.2.8	γ -Zerfall	58
11.2.9	Vergleich	59
11.3	Zeitabhängigkeit	60
11.3.1	Bewegungsgleichungen	60
11.3.2	Zerfallsketten	61
11.3.3	Aktivität	61
11.3.4	Statistik	62
11.3.5	Natürliche Radioaktivität im Körper	62
11.4	Wechselwirkung hochenergetischer Photonen	63
11.4.1	Phänomenologie	63
11.4.2	Absorption und Streuung	64

11.4.3	Relevante Prozesse	64
11.4.4	Kohärente Streuung	65
11.4.5	Rayleigh- und Thomson-Streuung	66
11.4.6	Photoeffekt	67
11.4.7	Verteilung des Energieüberschusses	68
11.5	Compton-Streuung	68
11.5.1	Phänomenologie	68
11.5.2	Stoßprozess	69
11.5.3	Energieübertrag	70
11.5.4	Verteilung der Energie	71
11.6	Gesamtüberblick	72
11.6.1	Paarbildung	72
11.6.2	Gesamte Energieabhängigkeit	73
12	Röntgendiagnostik	74
12.1	Grundlagen der Röntgendiagnostik	74
12.1.1	Historische Entwicklung	74
12.1.2	Begriffe	74
12.1.3	Projektionsradiographie	75
12.1.4	Absorptionsquerschnitt und Eindringtiefe	75
12.2	Röntgenquellen	76
12.2.1	Aufbau einer Röntgenröhre	76
12.2.2	Elektrodenmaterial	77
12.2.3	Strahlung	78
12.2.4	Spektrum der Bremsstrahlung	78
12.2.5	Charakteristische Strahlung	79
12.2.6	Drehanode	81
12.2.7	Filter und Blenden	82
12.3	Kontrast und Streustrahlung	82
12.3.1	Kontrast	82
12.3.2	Informationsindex	83
12.3.3	Einige Konsequenzen für Bildgebung mit Photonen	84
12.3.4	Wahl der Wellenlänge	84
12.3.5	Streustrahlung	85
12.3.6	Streustrahlunterdrückung	86
12.3.7	Streustrahlenraster	87
12.3.8	Abbildungsqualität	88
12.4	Bildwandler	88
12.4.1	Röntgenfilm	89
12.4.2	Kontrast und Kennlinie	89
12.4.3	Film-Folien-System	90
12.4.4	Bildschärfe	91
12.4.5	Speicherfolien	92
12.4.6	Selen-Filme	93
12.4.7	Festkörper-Detektoren	93
12.4.8	Röntgenbildverstärker	94
12.5	Spezialanwendungen	95

12.5.1	Fluoroskopie	95
12.5.2	Mammographie	96
12.5.3	Angiographie	97
12.5.4	Energieabhängige Differenzbilder	97
12.6	Computer-Tomographie	98
12.6.1	Schnittbilder und Tomographie	98
12.6.2	Prinzip der CT	99
12.6.3	Schwächungskoeffizienten	100
12.6.4	CT-Scanner 1. Generation	100
12.6.5	2. Generation	101
12.6.6	3. Generation	101
12.6.7	4. Generation	102
12.6.8	5.-7. Generation	103
12.6.9	Röntgendetektoren in der CT	104
12.6.10	Auflösung	104
12.6.11	Rekonstruktion	105
12.6.12	Artefakte	105
12.7	Nicht-klinische Spezialverfahren	106
12.7.1	Mikrotomographie	106
12.7.2	Phasenkontrast	106
12.7.3	Röntgen-Interferometrie	107
12.7.4	Anwendung: Nervengewebe	108
12.7.5	Vergleich Phasenkontrast - Amplitudenkontrast	108
12.7.6	Talbot-Interferometrie	109
12.7.7	Dunkelfeld-Bildgebung	110
13	Nukleardiagnostik	112
13.1	Grundlagen der Nuklearmedizin	112
13.1.1	Prinzip	112
13.1.2	Eigenschaften von Radionukliden	113
13.1.3	Herstellung von Radionukliden	114
13.1.4	Zyklotron	115
13.1.5	Isotopenherstellung mit Zyklotrons	115
13.1.6	Radionuklid-Generatoren	116
13.1.7	Zeitabhängigkeit der Tc-Aktivität	117
13.1.8	Radiopharmaka	117
13.1.9	Lebensdauer	118
13.1.10	Anwendungsbeispiele	119
13.2	Messtechnik	120
13.2.1	Grundlagen	120
13.2.2	Detektoren: Anforderungen	120
13.2.3	Szintillationsdetektoren	121
13.2.4	Elektronik	122
13.2.5	Effizienz und Totzeit	123
13.2.6	Diskrimination	123
13.2.7	Kollimatoren	124
13.2.8	γ -Kamera	126

13.2.9	Qualitätsmerkmale	127
13.3	Szintigraphie	128
13.3.1	Planare Szintigraphie	128
13.3.2	Anwendungsbeispiele	129
13.3.3	SPECT	129
13.3.4	Artefakte	130
13.3.5	Rekonstruktion	131
13.3.6	Anwendungen	132
13.4	PET	133
13.4.1	Übersicht	133
13.4.2	Koinzidenzmessung	134
13.4.3	Auflösung	134
13.4.4	Effizienz und Empfindlichkeit	135
13.4.5	Bildrekonstruktion	136
13.4.6	Artefakte	136
13.4.7	Gerätetechnik	137
13.4.8	Weiterentwicklungen	138
13.4.9	Anwendungen	138
14	Ultraschall	141
14.1	Grundlagen	141
14.1.1	Definition und Motivation	141
14.1.2	Historische Entwicklung	142
14.2	Schallausbreitung	142
14.2.1	Schallwellen	142
14.2.2	Schallimpedanz	143
14.2.3	Reflexion	144
14.2.4	Brechung	145
14.2.5	Optische Elemente	145
14.2.6	Streuung	146
14.2.7	Dämpfung	147
14.3	Technik	148
14.3.1	Piezoelektrischer Effekt	148
14.3.2	Ultraschallwandler	149
14.3.3	Phasenverzögerung in einem Multielement-Wandler	150
14.3.4	Mehrdimensionale Wandler	151
14.3.5	Schallfeld	151
14.3.6	Axiale Auflösung	152
14.3.7	Laterale Auflösung	153
14.3.8	Signalaufnahme	154
14.3.9	Verstärkung	155
14.4	Bildaufnahme-Methoden	156
14.4.1	A-Modus	156
14.4.2	Mehrdimensionale Darstellungen	156
14.4.3	Bildfehler	158
14.4.4	Doppler-Ultraschall	158
14.4.5	CW Doppler-US	159

14.4.6	Puls-Doppler US	160
14.4.7	Transmissionsmessungen	161
14.4.8	Kontrastmittel	162
14.5	Mechanische und thermische Effekte	162
14.5.1	Schallstrahlungsdruck und Kavitation	163
14.5.2	Thermische Wirkung	163
14.5.3	Therapeutische Anwendungen	164
14.5.4	Sicherheit	165
15	Kernspintomographie (MRI)	166
15.1	Einführung	166
15.1.1	Prinzip	166
15.1.2	Motivation und Anwendungen	166
15.1.3	Historische Anfänge	167
15.1.4	Weiterentwicklung	168
15.2	Grundlagen der NMR	169
15.2.1	Zeeman-Wechselwirkung	169
15.2.2	Resonante Anregung	169
15.2.3	Chemische Verschiebung	170
15.2.4	Larmorpräzession	171
15.2.5	Resonante Anregung	172
15.2.6	Nachweis	173
15.2.7	Longitudinale Relaxation	174
15.2.8	Transversale Relaxation	174
15.2.9	Die Bloch'sche Gleichung	175
15.2.10	Relaxation und Bildkontrast	175
15.3	Pulsexperimente	176
15.3.1	Einzel puls	176
15.3.2	Spin-Echos	177
15.4	Ortsaufgelöste NMR	178
15.4.1	Ortskodierung	178
15.4.2	Projektionsbild	179
15.4.3	Schichtselektion	179
15.4.4	Dephasierung im Gradienten	180
15.4.5	Frequenzkodierung	181
15.4.6	Phasenkodierung	182
15.4.7	Zweidimensionale Ortskodierung	183
15.4.8	Spin-Echo Bildgebung	183
15.5	MRI Gerätetechnik	184
15.5.1	Aufbau eines MR-Tomographen	184
15.5.2	Gradienten	185
15.5.3	Nichtideale Gradienten	186
15.5.4	Radiofrequenz Technik	187
15.5.5	Sicherheit	188
15.6	Kontrast und Bildqualität	189
15.6.1	Grundlagen	189
15.6.2	Gewichtung	189

15.6.3	Weitere Gewichtungen	190
15.6.4	Spin-Präparationsverfahren	191
15.6.5	Fett-Unterdrückung	191
15.6.6	Kontrastmittel	192
15.6.7	Anwendungen	193
15.7	Bildaufnahme und Verarbeitung	194
15.7.1	k-Raum und Messsignal	194
15.7.2	Datenaufnahme	194
15.7.3	Informationsgehalt und k-Raum	195
15.7.4	Prozessierung	196
15.7.5	Artefakte	196
15.7.6	Chemische Verschiebungs-Artefakte	197
15.7.7	Partialvolumen- und Überlapp-Artefakte	197
15.7.8	Phasenabtastungs-Artefakte	198
15.7.9	Metall-Artefakte, Suszeptibilitäts-Artefakte	199
15.8	Pulssequenzen	199
15.8.1	Spin-Echo-Sequenz	199
15.8.2	Gradientenecho	200
15.8.3	Optimaler Flipwinkel	200
15.8.4	Schnelle Bildgebung	201
15.8.5	Single-Shot Sequenzen	201
15.9	Anwendungen	202
15.9.1	Diffusion	202
15.9.2	Diffusionsanisotropie	203
15.9.3	Fluss-Bildgebung	204
15.9.4	Angiographie	204
15.9.5	Schlaganfall und Mammographie	205
15.9.6	Funktionelle Bildgebung (fMRI)	205
15.9.7	In Vivo Spektroskopie	206
15.9.8	Heterokerne	207
15.9.9	Hyperpolarisierte Edelgase	208
15.9.10	Nichtmedizinische Anwendungen	208
16	Elektrische und magnetische Felder	210
16.1	Quellen	210
16.1.1	Elektrische Felder im Organismus	210
16.1.2	Feldquellen	210
16.1.3	Biomagnetische Signale	211
16.1.4	Quellenmodelle	212
16.2	Anwendungsbeispiele	213
16.2.1	Übersicht	213
16.2.2	Elektroenzephalogramm (EEG)	214
16.2.3	Magneto-Encephalogramm	215
16.2.4	Magneto-Kardiologie	216
16.2.5	Messung	216
16.2.6	Evozierte Potenziale	217
16.2.7	Vektorkardiographie	218

16.3	Impedanz-Tomographie	219
16.3.1	Prinzip	219
16.3.2	Dielektrische Eigenschaften von Geweben	219
16.3.3	Messprinzip	220
16.3.4	Datenaufnahme	221
16.3.5	Datenanalyse	221
16.3.6	Lead fields	222
16.3.7	Reziprozitätstheorem	222
16.3.8	Auswertung bioelektrischer Daten	223
16.4	Magnetometrie	224
16.4.1	Supraleiter	224
16.4.2	Josephson-Effekt	225
16.4.3	SQUID	226
16.4.4	Alternative Magnetometer	227
17	Laser	228
17.1	Laser: Grundlagen	228
17.1.1	Eigenschaften von Laserlicht	228
17.1.2	Interferenz	229
17.1.3	Absorption und Emission	229
17.1.4	Inversion und Verstärkung	231
17.1.5	Die Lasergleichung	232
17.1.6	Resonator	232
17.2	Puls-Laser	233
17.2.1	Erzeugung von Pulsen	233
17.2.2	Rubinlaser	233
17.2.3	Güteschaltung	234
17.2.4	Modenkopplung	235
17.2.5	Attosekunden-Pulse	236
17.3	Lasermedien	237
17.3.1	CO ₂ -Laser	237
17.3.2	Excimer-Laser	238
17.3.3	Festkörperlaser	238
17.3.4	Halbleiterlaser	239
17.3.5	Historische Entwicklung	240
17.4	Licht-Materie Wechselwirkung	241
17.4.1	Fluoreszenz	241
17.4.2	Anwendungsbeispiele	242
17.4.3	Fluoreszenztransfer	243
17.4.4	Fluoreszenz-Messung der Calcium-Konzentration	243
17.4.5	Optische Pinzetten	244
17.4.6	Eigenschaften von Zellen	245
17.5	Mikroskopie	246
17.5.1	Messung der Sehschärfe	246
17.5.2	Konfokale Mikroskopie	247
17.5.3	Bewegung einzelner Partikel	248
17.5.4	Nichtlineare Mikroskopie	248

17.6	Optische Tomographie	249
17.6.1	Optische Eigenschaften von Körpergewebe	249
17.6.2	Diffuse optische Tomographie	250
17.6.3	Optische Kohärenztomographie	251
17.6.4	Photoakustische Bildgebung	252
17.7	Therapie	253
17.7.1	Absorption und Streuung im Gewebe	253
17.7.2	Energiedeposition	254
17.7.3	Photodynamische Therapie	255
17.7.4	Gewebeveränderung durch Wärme	256
17.7.5	Wärmeleitung	256
17.7.6	Wärmeleitung im Gewebe	257
17.7.7	Gewebeabtrag	258
17.7.8	Photoablation	259
17.7.9	Hornhautkorrektur	260
17.7.10	Operationen im Auge	261
17.7.11	Weitere Anwendungen	261
Literaturverzeichnis		263