
Inhaltsverzeichnis

Symbole und physikalische Konstanten	1
1 Einleitung	5
1.1 Motivation und Zielsetzung bei der Entwicklung von Beschleunigern	5
1.2 Kurzer Überblick über die Geschichte der Beschleuniger	9
1.3 Relativistische Kinematik	16
1.4 Kräfte zur Ablenkung und Beschleunigung von Teilchen	23
Übungsaufgaben	27
2 Elementarer Überblick über die verschiedenen Beschleunigertypen	29
2.1 Cockcroft-Walton-Beschleuniger	29
2.2 Dynamitron-Beschleuniger	31
2.3 Van de Graaff-Beschleuniger	33
2.3.1 Van de Graaff-Hochspannungsgenerator	33
2.3.2 Tandem-Van de Graaff-Beschleuniger	37
2.4 Linearbeschleuniger	39
2.4.1 Wideröe-Struktur	43
2.4.2 RFQ-Struktur	43
2.4.3 Einzelresonator	44
2.4.4 Alvarez-Struktur	45
2.4.5 Linearbeschleuniger zur Beschleunigung von Elektronen	45
2.5 Zyklotron	48
2.5.1 Klassisches Zyklotron	48
2.5.2 Synchrozyklotron	52
2.5.3 Isochronzyklotron	53
2.6 Betatron	56
2.6.1 Das Prinzip des Betatrons	56
2.6.2 Größe und Kenndaten	60

2.7	Synchrotron	61
2.7.1	CG-Synchrotron.....	62
2.7.2	AG-Synchrotron.....	63
2.8	Mikrotron	68
2.8.1	Klassisches Mikrotron.....	68
2.8.2	Rennbahn-Mikrotron	70
2.8.3	Strahlqualität, Kenndaten und Anwendungen des Mikrotrons	72
2.9	Speicherringe, Collider	72
2.10	Neue Entwicklungen zur Teilchenbeschleunigung.....	76
2.10.1	Supraleitende HF-Technologie.....	76
2.10.2	Plasma-Beschleuniger	79
2.10.3	Laser-Beschleunigung von Ionen	80
	Übungsaufgaben	81
3	Bauelemente im Beschleunigerbau	83
3.1	Elektromagnete	83
3.1.1	Ablenkmagnete	84
3.1.2	Quadrupolmagnete	87
3.1.3	Sextupolmagnete	89
3.1.4	Effektive Länge eines Magneten	90
3.1.5	Multipolentwicklung	91
3.1.6	Magnete mit supraleitenden Spulen.....	93
3.2	Hochfrequenzsysteme zur Teilchenbeschleunigung.....	94
3.2.1	Hohlleiter	94
3.2.2	Hohlleiter mit Irisblenden	98
3.2.3	Hohlraumresonatoren	100
3.3	Ionenquellen	104
3.3.1	Positive Ionen.....	104
3.3.2	Negative Ionen	105
3.3.3	HF-Ionenquelle.....	106
3.3.4	Penning-Ionenquelle	106
3.3.5	Duoplasmatron-Ionenquelle	107
3.3.6	ECR-Ionenquelle	108
3.3.7	Ionenquellen für negative Ionen	110
3.3.8	Elektronenkanone	110
3.3.9	Extraktion und Strahlformung eines Ionenstrahls	111
3.3.10	Perveanz, Emittanz und Brillanz	111
	Übungsaufgaben	115
4	Ionoptik mit Magneten	117
4.1	Koordinatensystem	117
4.2	Vorbemerkungen zum Matrixformalismus.....	123
4.3	Bewegungsgleichung in linearer Näherung.....	126
4.4	Lösung der linearen Bewegungsgleichungen	130

4.4.1	Die allgemeine Lösung	130
4.4.2	Die charakteristischen Lösungen der transversalen Bewegung	131
4.4.3	Die charakteristischen Lösungen der longitudinalen Bewegung	133
4.5	Die Transfermatrix	134
4.5.1	Driftstrecke	135
4.5.2	Quadrupol	136
4.5.3	Homogener Ablenkmagnet (Dipolmagnet, Sektormagnet)	137
4.5.4	Schwach fokussierender Ablenkmagnet	137
4.5.5	Stark fokussierender Ablenkmagnet (Synchrotronmagnet)	138
4.5.6	Kantenfokussierung	139
4.5.7	Rotation des transversalen Koordinatensystems	142
4.5.8	Solenoid	144
4.6	Geometrische Optik	146
4.7	Phasenellipse	150
4.7.1	Definition der Phasenellipse	150
4.7.2	Dichteverteilung im Phasenraum	153
4.7.3	Strahlprofil	155
4.7.4	Strahlenveloppen	157
4.7.5	Transformation der Phasenellipsen	157
4.7.6	Strahltaile bei einer Punkt-zu-Punkt-Abbildung	161
4.8	Phasenraumellipsoid	162
4.8.1	Definition des Phasenraumellipsoids	162
4.8.2	Transformation des Phasenraumellipsoids	164
4.8.3	Dichteverteilung im sechsdimensionalen Phasenraum	164
4.8.4	Strahlschwerpunkt	165
4.8.5	Zusammenhang zwischen Phasenraumellipsoid und Phasenellipse	166
4.8.6	Dispersive Aufweitung der Phasenellipse	167
4.8.7	Messung von Phasenellipsen und Emittanzen	169
4.8.8	Typische Werte der Emittanz	171
4.9	Entwicklung des Magnetfeldes bis zur zweiten Ordnung	173
4.10	Die Bewegungsgleichungen bis zur zweiten Ordnung	175
4.11	Die Transfermatrix zweiter Ordnung	178
4.12	Phasenraumellipsoid in zweiter Ordnung	180
4.13	Ionenoptische Systeme	180
4.13.1	Quadrupolsinglett	180
4.13.2	Quadrupoldublett	181
4.13.3	Quadrupoltriplett	184
4.13.4	Teleskopische Abbildungen	186
4.13.5	Systeme mit Ablenkmagneten	192
4.13.6	Symmetrische Systeme	198

4.14	Systematische Korrektur von Aberrationen	203
4.14.1	Dispersive Analysiersysteme	203
4.14.2	Achromatische Systeme	205
	Übungsaufgaben	209
5	Ionenoptik mit elektrostatischen Linsen	211
5.1	Vorbemerkung	211
5.2	Koordinatensystem, Matrixformalismus	212
5.3	Die paraxiale Strahlengleichung	213
5.4	Lösung der paraxialen Strahlengleichung	217
5.5	Die allgemeinen Lösungen in Matrixdarstellung	220
5.5.1	Driftstrecke	220
5.5.2	Beschleunigungsstrecke	220
5.5.3	Rohrlinse	221
5.5.4	Aperturlinse	223
5.5.5	Einzellinse	224
5.6	Geometrische Optik	225
5.6.1	Brennweiten, Hauptebenen und Knotenpunkte	225
5.6.2	Teleskopische Systeme	226
5.7	Die Transformation der longitudinalen Koordinaten	228
5.8	Elektrostatische Linsen und Deflektoren mit Mittlebenensymmetrie	231
5.8.1	Elektrostatische Quadrupole	231
5.8.2	Elektrostatische Deflektoren	232
5.9	Kartesische Koordinaten und Phasenellipsen	234
	Übungsaufgaben	237
6	Transversale Bahndynamik in Kreisbeschleunigern	239
6.1	Gleichgewichtsbahn und Koordinatensystem	239
6.2	Hill'sche Differenzialgleichung	240
6.3	Twiss-Matrix und Stabilitätskriterium	242
6.4	Lösung der Hill'schen Differenzialgleichung	244
6.5	Courant-Snyder-Invariante und Maschinenellipse	249
6.5.1	Courant-Snyder-Invariante	249
6.5.2	Floquet'sche Transformation, Kreisdiagramm	253
6.5.3	Eigenellipse, Eigenellipsoid und Anpassung	255
6.6	Die optischen Funktionen $\alpha(s)$, $\beta(s)$ und $\gamma(s)$	259
6.6.1	Die Betatronfunktion $\beta(s)$	260
6.6.2	Transformation der Twiss-Parameter α , β und γ	262
6.6.3	Zusammenhang zwischen der Transfermatrix $R(s)$ und den optischen Funktionen $\alpha(s)$, $\beta(s)$, $\gamma(s)$ und $\psi(s)$	263
6.7	Dispersion in einem Kreisbeschleuniger	263
6.7.1	Die periodische Dispersion $D(s)$	264
6.7.2	Die Größen η , α_p und γ_{tr}	267

6.8	Beispiele	269
6.8.1	Beschleuniger mit schwacher Fokussierung	269
6.8.2	Beschleuniger mit starker Fokussierung, FODO-Struktur	270
6.8.3	Die FODO-Struktur am Beispiel des SPS-Synchrotrons	272
6.8.4	Stabilitätsgrenzen der FODO-Struktur	276
6.8.5	Modell eines stark fokussierenden Synchrotrons	278
6.8.6	Beispiel einer Elektronen-Stretcher-Anlage	281
6.8.7	Isochronzyklotron mit separaten Sektormagneten	283
	Übungsaufgaben	287
7	Störfelder und Resonanzen	289
7.1	Dipolfeldfehler	289
7.1.1	Gestörte Gleichgewichtsbahn	289
7.1.2	Korrektur der gestörten Gleichgewichtsbahn	292
7.2	Quadrupol- und Sextupolfeldfehler	293
7.2.1	Quadrupolfeldfehler	294
7.2.2	Stoppband zweiter Ordnung	294
7.2.3	Sextupolfeldfehler und Stoppband dritter Ordnung	296
7.3	Chromatizität	297
7.3.1	Natürliche Chromatizität und Chromatizität durch Sextupolfelder	297
7.3.2	Korrektur der Chromatizität	299
7.3.3	Dynamische Apertur	300
7.4	Resonanzen	301
7.4.1	Resonanzdiagramm	301
7.4.2	Fourieranalyse von Feldstörungen	304
	Übungsaufgaben	305
8	Longitudinale Bahndynamik	307
8.1	Vorbemerkung	307
8.2	Phasenfokussierung und Synchrotronschwingung	308
8.3	Synchrotronschwingung mit kleiner Amplitude	311
8.4	Synchrotronschwingung mit großer Amplitude	314
8.5	Die Hamiltonfunktion der Synchrotronschwingung	317
8.6	Longitudinale Koordinaten	319
8.7	Die longitudinale Emittanz und Akzeptanz	320
8.8	Buncher	324
8.9	Longitudinale Ionenoptik	326
	Übungsaufgaben	328
9	Injektion und Extraktion	331
9.1	Elektrostatisches und magnetisches Septum	331
9.2	Injektion und Extraktion beim Isochronzyklotron	332
9.3	Injektion und Extraktion beim Synchrotron	333

9.3.1	Injektion	333
9.3.2	Extraktion	337
	Übungsaufgaben	339
10	Phasenraumdichte und Strahlkühlung	341
10.1	Phasenraumdichte	341
10.1.1	Liouville'sches Theorem	341
10.1.2	Emittanz	343
10.1.3	Strahltemperatur	344
10.1.4	Strahlheizung	345
10.2	Adiabatische Dämpfung	345
10.3	Synchrotronstrahlung	346
10.3.1	Dämpfung von Schwingungen	349
10.3.2	Anregung von Schwingungen	351
10.4	Stochastische Kühlung	353
10.5	Elektronenkühlung	358
	Übungsaufgaben	360
11	Raumladungseffekte	363
11.1	Raumladungseffekte bei zylindrischem Strahlquerschnitt	364
11.2	KV-Enveloppengleichungen	367
11.3	Lösung der Enveloppengleichungen	369
11.4	RMS-Enveloppengleichungen	369
11.5	Diskussion der Enveloppengleichungen	374
11.5.1	Beispiel 1	375
11.5.2	Beispiel 2	377
11.6	Raumladungseffekte in Kreisbeschleunigern	378
	Übungsaufgaben	380
	Lösungen zu den Übungsaufgaben	383
	Literaturverzeichnis	401
	Weiterführende Literatur	409
	Sachverzeichnis	411