

Physik der Teilchen- beschleuniger und Synchrotron- strahlungsquellen

Eine Einführung

Von Prof. Dr. rer. nat. Klaus Wille
Universität Dortmund



B.G.Teubner Stuttgart 1992

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Bedeutung hoher Teilchenenergien	1
1.2	Kräfte zur Beschleunigung von Teilchen	3
1.3	Entwicklung der Beschleuniger	5
1.3.1	Prinzip der Gleichspannungsbeschleuniger	5
1.3.2	Der Cockroft-Walton-Kaskadengenerator	7
1.3.3	Der Marx-Generator	9
1.3.4	Der Van de Graaff-Beschleuniger	10
1.3.5	Der Linearbeschleuniger	12
1.3.6	Das Zyklotron	15
1.3.7	Das Microtron	18
1.3.8	Das Betatron	20
1.3.9	Das Synchrotron	23
1.4	kollidierenden Strahlen	25
1.4.1	Physik der Teilchenkollision	25
1.4.2	Der Speicherring	29
1.4.3	Der "Lineare Collider"	32
2	Synchrotronstrahlung	35
2.1	Strahlung beschleunigter relativistischer Teilchen	36
2.1.1	Lineare Beschleunigung	36
2.1.2	Kreisbeschleunigung	37
2.2	Winkelverteilung der Synchrotronstrahlung	40
2.3	Zeitstruktur und Strahlungsspektrum	42
2.4	Speicherringe für Synchrotronstrahlung	46
3	Lineare Strahloptik	51
3.1	Bewegung geladener Teilchen im magnetischen Feld	52
3.2	Bewegungsgleichung im mitbewegten Koordinatensystem	54
3.3	Strahlführungsmagnete	58
3.3.1	Berechnung von Magnetfeldern zur Strahlführung	59
3.3.2	Konventionelle Eisenmagnete	61
3.3.3	Supraleitende Magnete	67

3.4	Teilchenbahnen und Transformationsmatrizen	75
3.5	Teilchenbahnen durch ein System aus vielen Magneten	82
3.6	Dispersion und Momentum-Compaction-Faktor	84
3.7	Betafunktion und Betatronschwingung	88
3.8	Phasenellipse und Liouville'scher Satz	91
3.9	Strahlquerschnitt und Emittanz	92
3.10	Transformation der Betafunktion durch die Magnetstruktur	95
3.10.1	Methode 1	95
3.10.2	Methode 2	98
3.11	Bestimmung der Transformationsmatrix aus den Betafunktionen	100
3.12	Anpassung der Strahloptik	102
3.12.1	Der eindimensionale Fall	103
3.12.2	Der n-dimensionale Fall	104
3.13	Periodizitätsbedingungen bei Ringbeschleunigern	106
3.13.1	Die periodische Lösung	107
3.13.2	Die symmetrische Lösung	108
3.13.3	Beispieloptik: Kreisbeschleuniger mit FODO-Struktur	110
3.14	Arbeitspunkt und optische Resonanzen	115
3.14.1	Periodische Lösung der Hill'schen Differentialgleichung	115
3.14.2	Floquet'sche Transformation	117
3.14.3	Optische Resonanzen	119
3.15	Einfluß von Magnetfeldfehlern auf die Strahloptik	127
3.15.1	Wirkung von störenden Dipolfeldern	127
3.15.2	Wirkung von störenden Quadrupolfeldern	130
3.16	Chromatizität der Strahloptik und ihre Kompensation	135
3.17	Einschränkung der dynamischen Apertur durch Sextupole	138
3.18	Lokale Orbitbeulen	143
3.18.1	Beispiele für lokale Orbitbeulen	148
4	Injektion und Ejektion	153
4.1	Aufgabe der Injektion und Ejektion	153
4.2	Teilchenquellen	154
4.3	Grundproblem der Injektion	159
4.4	Injektion hoher Protonen- und Ionenströme durch "Stacking"	160
4.5	Injektion von Protonenstrahlen durch "Stripping"-Folie	163
4.6	Injektion in einen Elektronenspeicherring	164
4.7	Kicker- und Septummagnete	166
5	Hochfrequenzsysteme zur Teilchenbeschleunigung	173
5.1	Hohlleiter und ihre Eigenschaften	173
5.1.1	Rechteckhohlleiter	175
5.1.2	Runde Hohlleiter	178

5.2	Hohlraumresonatoren (Cavities)	179
5.2.1	Hohlraumresonatoren aus Rechteckhohlleitern	180
5.2.2	Kreiszyklindrische Resonatoren	181
5.3	Beschleunigungsstrukturen für Linacs	185
5.4	Klystrons als Leistungstreiber für Beschleuniger	192
5.5	Klystronmodulator	195
5.6	Phasenfokussierung und Synchrotronfrequenz	201
5.7	Phasenstabiler Bereich (Separatrix)	205
6	Strahlungseffekte	211
6.1	Dämpfung der Synchrotronschwingung	211
6.2	Dämpfung der Betatronschwingung	214
6.3	Das Robinsontheorem	217
6.4	Die Strahlemittanz	218
6.4.1	Entstehung der natürlichen Strahlemittanz	220
6.4.2	Unterste Grenze der Strahlemittanz	225
7	Luminosität	231
7.1	Strombegrenzung durch Raumladungseffekt	234
7.2	Das "Mini-Beta-Prinzip"	244
8	Wiggler und Undulatoren	249
8.1	Das Wiggler- oder Undulatorfeld	249
8.2	Bewegungsgleichung im Wiggler oder Undulator	255
8.3	Undulatorstrahlung	259
9	Der "Free-Electron-Laser" (FEL)	267
9.1	Bedingung für die Energieübertragung im FEL	269
9.2	Bewegungsgleichung der Elektronen im FEL	272
9.3	Verstärkung des FEL	277
9.4	Das Madey-Theorem	282
9.5	FEL-Verstärkung im High-Gain-Bereich	284
9.6	FEL-Verstärker und FEL-Oszillator	287
9.7	Das Optische Klystron	289
9.8	Zeitstruktur der FEL-Strahlung	292
A	Maxwellgleichungen	297
B	Wichtige Relationen der speziellen Relativitätstheorie	299
C	Allgemeine Gleichung einer Phasenellipse	303