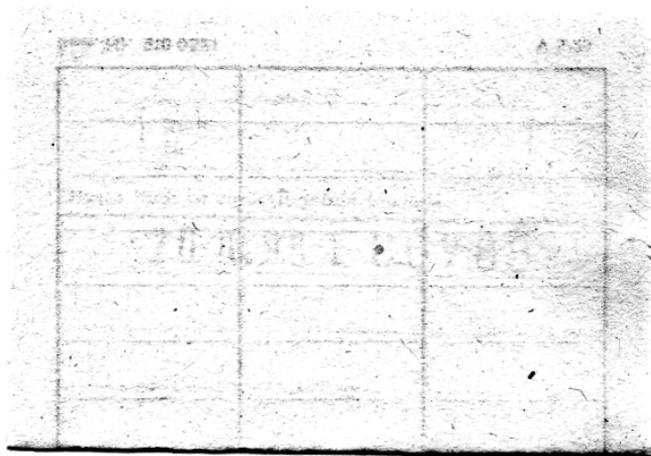


Beschleuniger

Von Dr. rer. nat. H. Daniel
o. Professor an der Techn. Universität München

1974. Mit 76 Abbildungen



B. G. Teubner Stuttgart

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	13
1.1. Teilchenbeschleunigung	13
1.1.1. Beschleunigung und Multipolmomente	13
1.1.2. Beschleunigung instabiler Teilchen	15
1.2. Teilchenerzeugung	18
1.3. Prinzipien der Teilchenbeschleunigung und Teilchenführung	21
1.3.1. Elektrische Felder, Magnetfelder	21
1.3.2. Geradeausbeschleuniger, Zirkular- beschleuniger	22
1.3.3. Individualbeschleuniger, Kollektiv- beschleuniger	23
1.3.4. Beschleunigung erster Ordnung, Beschleunigung zweiter Ordnung	23
1.4. Haupttypen der bisher realisierten Beschleuniger	24
1.4.1. Potentialbeschleuniger	24
1.4.2. Zyklotron	24
1.4.3. Mikrotron (Elektronenzyklotron)	25
1.4.4. Betatron	26
1.4.5. Synchrotron	27
1.4.6. Speicherringe	27
1.4.7. Linearbeschleuniger	28
1.4.8. Stochastischer Beschleuniger	28
1.4.9. Colliding-beam-Beschleuniger	28
1.4.10. Elektronenring-Beschleuniger (Smokatron)	29
1.5. Haupttypen von vorgeschlagenen Beschleunigern	29
1.5.1. Hochenergie-Beschleuniger mit Elektronenring-Führungsfeld	29
1.5.2. Supraleitender Linearbeschleuniger	29
1.5.3. Ladungsänderungsbeschleuniger	30
1.5.4. Phasenfreier Wechselfeldbeschleuniger	30

2. Historie	31
2.1. Vorläufer	31
2.2. Erste Beschleuniger	31
2.3. Neuere Beschleuniger	36
3. Elektromagnetische Felder	37
3.1. Maxwellsche Gleichungen	37
3.2. Statik und stationäre Vorgänge	38
3.3. Statische Magnetfelder mit gewissen Symmetrien	40
3.4. Wellen und Wellenleiter	43
3.5. Lorentz-Transformationen	47
4. Teilchen in elektromagnetischen Feldern (Korpuskularoptik)	48
4.1. Kräfte und Prinzipien	48
4.1.1. Kräfte	48
4.1.2. Lagrange-Funktion	49
4.1.3. Fermatsches Prinzip	50
4.1.4. Ionenoptischer Brechungsindex	52
4.1.5. Zahlenwerte für Energie und Impuls	54
4.2. Teilchenbahnen in transversalen azimutunabhängigen Magnetfeldern	55
4.2.1. Vorbemerkungen	55
4.2.2. Bewegungsgleichungen erster Ordnung	56
4.2.3. Bahngleichungen erster Ordnung	59
4.2.4. Bahngleichungen zweiter Ordnung	61
4.2.5. Anschauliche Deutung der axialen Fokussierungsbedingung	62
4.3. Teilchenbahnen in transversalen azimutabhängigen Magnetfeldern bei stationärer Kreisbahn	63
4.4. Impulsänderungen für Teilchen in transversalen Magnetfeldern	64
4.4.1. Plötzliche Änderung, Feld zeitlich konstant	64

4.4.2.	Adiabatische Änderung, Feld zeitlich nicht konstant	66
4.5.	Magnetische Quadrupollinsen	69
4.5.1.	Aufbau, Feld und Kräfte	69
4.5.2.	Ionenbahnen	71
4.6.	Elektrische Quadrupollinsen	72
4.6.1.	Aufbau, Feld und Kräfte	72
4.6.2.	Ionenbahnen	73
4.7.	Matrix-Methode	74
4.8.	Brennweiten einer Quadrupol-Einzellinse	76
4.9.	Fokussierung in Quadrupollinsenpaaren	78
4.9.1.	Erste Linse Zerstreuungslinse, zweite Linse Sammellinse	78
4.9.2.	Erste Linse Sammellinse, zweite Linse Zerstreuungslinse	79
4.10.	Diskussion von Quadrupollinsen	79
4.10.1.	Einzellinse	79
4.10.2.	Linsenpaar	80
4.11.	Starke Fokussierung und ihre Veranschaulichung	82
4.12.	Geschlossene Bahnen in Magnetfeldern	84
4.12.1.	Vorbemerkungen	84
4.12.2.	Notwendige Bedingung	84
4.12.3.	Hinreichende Bedingung	85
4.12.4.	Beispiele	85
4.13.	Magnetfeld auf geschlossener Bahn	87
4.14.	Kleine Abweichungen von geschlossenen Bahnen	90
4.14.1.	Koordinaten und Feldkomponenten	90
4.14.2.	Bahngleichungen	92
4.15.	Stabilitätsuntersuchungen mit der Matrixmethode	95
4.15.1.	Matrizen und Eigenvektoren	95
4.15.2.	Bahngleichungen in Matrixform	96
4.15.3.	Nähere Bestimmung der Eigenwerte	97
4.15.4.	Entkopplung von x- und z-Bewegung	99
4.15.5.	Veranschaulichung und Beispiele	101
4.16.	Stabilitätsbereiche bei ebenen Bahnen in Spezialfällen	102

4.16.1.	Harmonische Variation	102
4.16.2.	Stufenweise Variation	102
4.16.3.	Gleichzeitige x- und z-Stabilität bei stufenweiser Variation	103
4.17.	Betatronschwingungen in periodischen Magnet- systemen	104
4.17.1.	Floquetsche Lösungen	104
4.17.2.	Bahnumhüllende	106
4.18.	Mittelung nach Bogolyubov-Krylov	107
4.19.	Im Mittel adiabatische Parameteränderung	107
4.20.	Resonanzen	109
4.20.1.	Definition und Veranschaulichung	109
4.20.2.	Mathematische Behandlung	109
4.20.3.	Klassifizierung und Besprechung von Spezialfällen	111
5.	Plasma	113
5.1.	Allgemeine Gleichungen	113
5.2.	Ruhendes Plasma	115
5.3.	Unendlich gut leitendes Plasma	115
6.	Liouvillescher Satz	116
6.1.	Typische Fragestellungen	116
6.2.	Formulierung und Beweis des Liouvilleschen Satzes	117
7.	Potentialbeschleuniger	122
7.1.	Allgemeine Charakteristika	122
7.1.1.	Vorbemerkungen	122
7.1.2.	Entladungsrohr	123
7.1.3.	Terminal	125
7.1.4.	Ströme im elektrostatischen Be- schleuniger	126
7.2.	Kaskadengeneratoren	127
7.2.1.	Marx-Generator	127

7.2.2.	Cockroft-Walton-Generator	128
7.2.3.	Weitere Kaskadenschaltungen	129
7.3.	Van de Graaff (Einzelstufe)	130
7.4.	Tandem-van-de-Graaff	131
7.4.1.	Prinzip	131
7.4.2.	Beschleunigung mehrfach geladener Teilchen	132
7.5.	Ladungsänderungsbeschleuniger	134
7.5.1.	Prinzip	134
7.5.2.	Vorgeschlagene Ausführungsform	135
7.5.3.	Charakteristika des Ladungsänderungs- beschleunigers	136
8.	Zyklotrons	136
8.1.	Allgemeines	136
8.1.1.	Zyklotronfrequenz und HF-Frequenz	136
8.1.2.	Unmöglichkeit, ein Zyklotron zu bauen	137
8.2.	Standardzyklotron	138
8.2.1.	Magnetfeld	138
8.2.2.	Elektrisches Feld	138
8.2.3.	Phasenschlupf	140
8.2.4.	Betatron-Schwingungen	141
8.2.5.	Praktische Ausführung und Leistungs- daten	142
8.2.6.	Strahlauslenkung	143
8.3.	Synchrozyklotron	143
8.4.	Isochronzyklotron	144
8.4.1.	Prinzip	144
8.4.2.	Feldvariation und Fokussierung	144
8.5.	FFAG-Beschleuniger	148
8.5.1.	Prinzip	148
8.5.2.	Ausführungsformen	150
9.	Mikrotron (Elektronenzyklotron)	150

10. Betatron	152
10.1. Allgemeines	152
10.2. Standardbetatron	154
10.3. Plasma-Betatrons	155
11. Synchrotrons	156
11.1. Allgemeines	156
11.1.1. Prinzip	156
11.1.2. Teilchen- und Fokussierungsarten	157
11.1.3. Synchrotron-Schwingungen	158
11.2. Elektronensynchrotron	170
11.3. Protonensynchrotron	171
11.3.1. Allgemeine Bemerkungen	171
11.3.2. Schwach fokussierendes Protonen- synchrotron	171
11.3.3. Stark fokussierendes Protonen- synchrotron	172
11.3.4. Technische Einzelheiten	172
11.4. Supraleitendes Synchrotron	173
11.4.1. Arten des supraleitenden Synchrotrons	173
11.4.2. Supraleitende Magnete	174
12. Speicherringe	175
12.1. Allgemeines	175
12.1.1. Zweck	175
12.1.2. Teilchen	176
12.1.3. Konfigurationen	176
12.1.4. Stoßraten	176
12.1.5. Besonderheiten von colliding-beam- Experimenten	178
12.1.6. Teilchendichte	178
12.1.7. Lebensdauer	179
12.2. Elektronenspeicherringe	180
12.3. Protonenspeicherringe	180
12.3.1. ISR, Cern (p,p)	180

12.3.2. VAPP-NAPP, Nowosibirsk (p, \bar{p})	180
12.4. Andere Speicherringe	181
13. Linearbeschleuniger	182
13.1. Allgemeines	182
13.1.1. Definition und Felder	182
13.1.2. Phasenfokussierung und räumliche Fokussierung	184
13.1.3. Leistungsbedarf	185
13.2. Elektronenlinearbeschleuniger	185
13.2.1. Beschleunigungsstruktur	185
13.2.2. Betriebsweise der Beschleunigungsröhre	187
13.2.3. Positronenlinearbeschleuniger	188
13.2.4. Monster, Stanford	189
13.3. Protonenlinearbeschleuniger	189
13.3.1. Beschleunigungsstrukturen, allgemein	189
13.3.2. Wendel	189
13.3.3. Driftröhre	190
13.3.4. Alvarez-Struktur	191
13.3.5. Interdigitaler Beschleuniger	192
13.3.6. LAMPF (Los Alamos Meson Physics Facility)	192
13.4. Linearbeschleuniger für schwere Ionen	193
13.4.1. Allgemeines	193
13.4.2. Schwerionenbeschleuniger UNILAC in Darmstadt	194
13.5. Supraleitende Linearbeschleuniger	194
14. Stochastischer Beschleuniger	195
15. Kollektivbeschleuniger	197
15.1. Allgemeines	197
15.1.1. Zusammensetzung und Zusammenhalt des Kollektivs	197
15.1.2. Halbquantitative Erklärung des Zusammenhalts	197

15.1.3. Quantitative Beschreibung des Zusammenhalts	198
15.2. Elektronenring-Beschleuniger	199
15.2.1. Übersicht und Ringerzeugung	199
15.2.2. Kompression	199
15.2.3. Beschleunigung	200
15.3. Hochenergiebeschleuniger mit Elektronenring- Führungsfeld	201
16. Phasenfreie Wechselfeldbeschleunigung	202
16.1. Allgemeines	202
16.2. Laufzeitdifferenzmethode	202
16.3. Lorentzkraft-Methode	204
Literatur	207
Register	209