

Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

Frank Hinterberger

Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik

mit 149 Abbildungen, durchgerechneten Beispielen
und 99 Übungsaufgaben mit vollständigen Lösungen



Springer

Professor Dr. F. Hinterberger
Institut für Strahlen- und Kernphysik
Universität Bonn
Nußallee 14–16
D-53115 Bonn
e-mail: fh@iskp.uni-bonn.de

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Hinterberger, Frank:

Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik : mit zahlreichen Übungsaufgaben und vollständigen Lösungen / Frank Hinterberger. – Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Budapest ; Hongkong ; London ; Mailand ; Paris ; Santa Clara ; Singapur ; Tokio : Springer, 1997

ISBN 978-3-662-09313-9 ISBN 978-3-662-09312-2 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-09312-2

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1997

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1997.

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1997

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Satz: Reproduktionsfertige Vorlage vom Autor

Einbandgestaltung: *design & production* GmbH, Heidelberg

SPIN: 10426915 56/3144 - 5 4 3 2 1 0 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

Vorwort

Das Ziel des vorliegenden Buches ist eine grundlegende Einführung in die Physik der Teilchenbeschleuniger und in die Ionenoptik. Nach einem elementaren Überblick über die verschiedenen Beschleunigertypen und einer kurzen Schilderung der wichtigsten Bauelemente folgt eine relativ breite Darstellung der Magnetionenoptik und eine kürzere Darstellung der Ionenoptik mit elektrostatischen Linsen. Aufbauend auf den Begriffen und Methoden der Ionenoptik behandeln wir die transversale Bahndynamik der Kreisbeschleuniger im Rahmen des Courant-Snyder-Formalismus und betrachten die Analyse und Korrektur von Störungen durch Feldfehler, Chromatizitäten und Resonanzen. Phasenfokussierung, Synchrotronschwingungen und longitudinale Ionenoptik sind Schwerpunkte der longitudinalen Bahndynamik. Das Thema Kreisbeschleuniger wird durch ein Kapitel über die Methoden zur Injektion und Extraktion abgerundet. Zum Abschluß betrachten wir das Liouvillesche Theorem, die Strahlkühlung durch Abstrahlung von Synchrotronlicht, die stochastische Strahlkühlung und die Strahlkühlung mit Hilfe „kalter“ Elektronen.

Das Buch wendet sich an Studierende der Physik, an Physikerinnen und Physiker, Ingenieurinnen und Ingenieure und an alle, die mit Teilchenbeschleunigern arbeiten. Nicht nur bei der Planung und dem Bau von Strahlführungssystemen und Beschleunigeranlagen, sondern auch bei der Planung und Durchführung von Experimenten mit Teilchenstrahlen ist ein tieferes Verständnis der Ionenoptik und Bahndynamik von großem Vorteil. Das Buch kann sowohl zur Einführung in das Gebiet wie zur Weiterführung und Vertiefung bestimmter Fragen benutzt werden. Der Formalismus ist bewußt einfach gehalten. Die Bahn eines einzelnen Teilchens wird mit Hilfe einer Transfermatrix beschrieben, die Gesamtheit aller Teilchen wird mit Hilfe einer Strahlmatrix beschrieben. Zahlreiche Beispiele und Übungen mit Lösungen sollen den Zugang zu dem Formalismus erleichtern und zu einem spielerischen Umgang mit den Gleichungen verlocken. Damit besteht die Möglichkeit, auch komplexe Zusammenhänge quantitativ nachzuvollziehen. Die besonders wichtigen Gleichungen sind umrandet hervorgehoben.

Das vorliegende Buch ist aus einer Vorlesung über Teilchenbeschleuniger entstanden, die ich seit 1984 in regelmäßigen Abständen gehalten habe. Das grundlegende Interesse an diesem Thema basiert auf einer lebenslan-

gen Beschäftigung mit Teilchenbeschleunigern und Ionenoptik. Dieses Engagement ergab sich aus dem Wunsch des Experimentators nach höchster Strahlqualität und Energieauflösung beim Experimentieren mit geladenen Teilchenstrahlen. Zur Entwicklung der Beschleunigerphysik und Ionenoptik haben sehr viele Menschen beigetragen. Leider ist es nicht möglich, alle Arbeiten oder auch nur alle wichtigen Arbeiten auf diesem Gebiet zu zitieren. Das Literaturverzeichnis ist als Anregung gedacht, Originalveröffentlichungen zu finden und zu lesen. Es enthält auch einige neuere Arbeiten auf diesem Gebiet. Zu den in diesem Buch behandelten Themen haben viele Kollegen durch Diskussionen und Anregungen beigetragen. Stellvertretend möchte ich Herrn Dr. Karl Brown vom Stanford Linear Accelerator Center nennen, dem ich für viele wertvolle Anregungen und Einsichten danken möchte. Für die sorgfältige Durchsicht des Manuskriptes möchte ich mich bei den Herren Dipl.-Phys. M. Gentner, Prof. Dr. J. Ernst und Prof. Dr. Dirk Husmann von der Universität Bonn und Herrn Dr. Rudolf Maier vom Forschungszentrum Jülich bedanken. Herr Gentner gestaltete auch mehrere Abbildungen. Aus der CERN Accelerator School CERN 85-19 entnahm ich drei Abbildungen mit freundlicher Genehmigung des CERN-Generaldirektors. Bei Herrn Prof. Dr. P. Schmüser vom Deutschen Elektronensynchrotron DESY möchte ich mich ebenfalls für eine Abbildung des supraleitenden HERA-Dipolmagneten bedanken. Die Fertigstellung dieses Buches wäre ohne die tatkräftige Hilfe von Herrn Dipl.-Phys. Volker Schwarz bei der Erstellung des \LaTeX -Files nicht möglich gewesen. Er gestaltete auch den größten Teil der Abbildungen. Ich möchte ihm hierfür ganz besonders herzlich danken.

Bonn, im Mai 1997

Frank Hinterberger

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung bei der Entwicklung von Beschleunigern	1
1.2 Kurzer Überblick über die Geschichte der Beschleuniger	5
1.3 Relativistische Kinematik	12
1.4 Kräfte zur Ablenkung und Beschleunigung von Teilchen	19
Übungsaufgaben	22
2. Elementarer Überblick über die verschiedenen Beschleunigertypen	25
2.1 Cockcroft-Walton-Beschleuniger	25
2.2 Van de Graaff-Beschleuniger	27
2.2.1 Van de Graaff-Hochspannungsgenerator	27
2.2.2 Tandem-Van de Graaff-Beschleuniger	30
2.3 Linearbeschleuniger	32
2.3.1 Wideröe-Struktur	35
2.3.2 RFQ-Struktur	36
2.3.3 Einzelresonator	37
2.3.4 Alvarez-Struktur	37
2.3.5 Linearbeschleuniger zur Beschleunigung von Elektronen	38
2.4 Zyklotron	40
2.4.1 Klassisches Zyklotron	41
2.4.2 Synchrozyklotron	44
2.4.3 Isochronzyklotron	45
2.5 Betatron	49
2.5.1 Das Prinzip des Betatrons	49
2.5.2 Größe und Kenndaten	53
2.6 Synchrotron	53
2.6.1 CG-Synchrotron	54
2.6.2 AG-Synchrotron	55
2.7 Mikrotron	60
2.7.1 Klassisches Mikrotron	60
2.7.2 Rennbahn-Mikrotron	62

2.7.3	Strahlqualität, Kenndaten und Anwendungen des Mikrotrons	64
2.8	Speicherringe, Collider	64
	Übungsaufgaben	68
3.	Bauelemente im Beschleunigerbau	71
3.1	Elektromagnete	71
3.1.1	Ablenkmagnete	72
3.1.2	Quadrupolmagnete	74
3.1.3	Sextupolmagnete	76
3.1.4	Effektive Länge eines Magneten	78
3.1.5	Multipolentwicklung	79
3.1.6	Magnete mit supraleitenden Spulen	81
3.2	Hochfrequenzsysteme zur Teilchenbeschleunigung	83
3.2.1	Hohlleiter	83
3.2.2	Hohlleiter mit Irisblenden	86
3.2.3	Hohlraumresonatoren	88
3.3	Ionenquellen	92
3.3.1	HF-Ionenquelle	93
3.3.2	Penning-Ionenquelle	94
3.3.3	Duoplasmatron-Ionenquelle	95
3.3.4	ECR-Ionenquelle	96
3.3.5	Ionenquellen für negative Ionen	97
3.3.6	Elektronenkanone	98
3.3.7	Perveanz, Emittanz und Brillanz	99
	Übungsaufgaben	103
4.	Ionoptik mit Magneten	105
4.1	Koordinatensystem	105
4.2	Vorbemerkungen zum Matrixformalismus	110
4.3	Bewegungsgleichung in linearer Näherung	113
4.4	Lösung der linearen Bewegungsgleichungen	117
4.4.1	Die allgemeine Lösung	117
4.4.2	Die charakteristischen Lösungen der transversalen Bewegung	120
4.4.3	Die charakteristischen Lösungen der longitudinalen Bewegung	121
4.5	Die Transfermatrix	122
4.5.1	Driftstrecke	123
4.5.2	Quadrupol	124
4.5.3	Homogener Ablenkmagnet (Dipolmagnet, Sektormagnet)	125
4.5.4	Schwach fokussierender Ablenkmagnet	125
4.5.5	Stark fokussierender Ablenkmagnet (Synchrotronmagnet)	126

4.5.6	Kantenfokussierung	127
4.5.7	Rotation des transversalen Koordinatensystems	130
4.5.8	Solenoid	131
4.6	Geometrische Optik	134
4.7	Phasenellipse	138
4.7.1	Definition der Phasenellipse	138
4.7.2	Dichteverteilung im Phasenraum	141
4.7.3	Strahlprofil	143
4.7.4	Strahlenveloppen	144
4.7.5	Transformation der Phasenellipsen	144
4.7.6	Strahltaile bei einer Punkt-zu-Punkt-Abbildung	148
4.8	Phasenraumellipsoid	149
4.8.1	Definition des Phasenraumellipsoids	149
4.8.2	Transformation des Phasenraumellipsoids	151
4.8.3	Dichteverteilung im sechsdimensionalen Phasenraum	151
4.8.4	Zusammenhang zwischen Phasenraumellipsoid und Phasenellipse	152
4.8.5	Dispersive Aufweitung der Phasenellipse	153
4.8.6	Messung von Phasenellipsen und Emittanzen	155
4.8.7	Typische Werte der Emittanz	157
4.9	Entwicklung des Magnetfeldes bis zur zweiten Ordnung	159
4.10	Die Bewegungsgleichungen bis zur zweiten Ordnung	160
4.11	Die Transfermatrix zweiter Ordnung	163
4.12	Ionenoptische Systeme	165
4.12.1	Quadrupolsinglett	165
4.12.2	Quadrupoldublett	166
4.12.3	Quadrupoltriplett	169
4.12.4	Teleskopische Abbildungen	171
4.12.5	Systeme mit Ablenkmagneten	176
4.12.6	Symmetrische Systeme	182
4.13	Systematische Korrektur von Aberrationen	188
4.13.1	Dispersive Analysiersysteme	188
4.13.2	Achromatische Systeme	190
	Übungsaufgaben	194
5.	Ionenoptik mit elektrostatischen Linsen	197
5.1	Vorbemerkung	197
5.2	Koordinatensystem, Matrixformalismus	197
5.3	Die paraxiale Strahlengleichung	199
5.4	Lösung der paraxialen Strahlengleichung	202
5.5	Die allgemeinen Lösungen in Matrixdarstellung	206
5.5.1	Driftstrecke	206
5.5.2	Beschleunigungsstrecke	206
5.5.3	Rohrlinse	206
5.5.4	Aperturlinse	208

5.5.5	Einzellinse	209
5.6	Geometrische Optik	210
5.6.1	Brennweiten, Hauptebenen und Knotenebenen	210
5.6.2	Teleskopische Systeme	211
5.7	Die Transformation der longitudinalen Koordinaten	212
5.8	Kartesische Koordinaten und Phasenellipsen	213
	Übungsaufgaben	215
6.	Transversale Bahndynamik in Kreisbeschleunigern	217
6.1	Gleichgewichtsbahn und Koordinatensystem	217
6.2	Hillsche Differentialgleichung	218
6.3	Twiss-Matrix und Stabilitätskriterium	219
6.4	Lösung der Hillschen Differentialgleichung	222
6.5	Courant-Snyder-Invariante, Floquetsche Transformation und Eigenellipsen	227
6.5.1	Courant-Snyder-Invariante	227
6.5.2	Floquetsche Transformation, Kreisdiagramm	230
6.5.3	Eigenellipse, Eigenellipsoid und Anpassung	232
6.5.4	Filamentation	234
6.6	Die optischen Funktionen $\alpha(s)$, $\beta(s)$ und $\gamma(s)$	236
6.6.1	Die Betatronfunktion $\beta(s)$	237
6.6.2	Transformation der Twiss-Parameter α , β und γ	239
6.6.3	Zusammenhang zwischen der Transfermatrix $R(s)$ und den optischen Funktionen $\alpha(s)$, $\beta(s)$, $\gamma(s)$ und $\psi(s)$	239
6.7	Dispersion in einem Kreisbeschleuniger	240
6.7.1	Die periodische Dispersion $D(s)$	241
6.7.2	Die Größen η , α_p und γ_{tr}	243
6.8	Beispiele	246
6.8.1	Beschleuniger mit schwacher Fokussierung	246
6.8.2	Beschleuniger mit starker Fokussierung, FODO-Struktur	247
6.8.3	Die FODO-Struktur am Beispiel des SPS-Synchrotrons	249
6.8.4	Stabilitätsgrenzen der FODO-Struktur	253
6.8.5	Modell eines stark fokussierenden Synchrotrons	255
6.8.6	Beispiel einer Elektronen-Stretcher-Anlage	258
6.8.7	Isochronzyklotron mit separaten Sektormagneten	260
	Übungsaufgaben	264
7.	Störfelder und Resonanzen	267
7.1	Dipolfeldfehler	267
7.1.1	Gestörte Gleichgewichtsbahn	267
7.1.2	Korrektur der gestörten Gleichgewichtsbahn	270
7.2	Quadrupol- und Sextupolfeldfehler	271

7.2.1	Quadrupolfeldfehler	271
7.2.2	Stoppband zweiter Ordnung	272
7.2.3	Sextupolfeldfehler und Stoppband dritter Ordnung	274
7.3	Chromatizität	275
7.3.1	Natürliche Chromatizität und Chromatizität durch Sextupolfelder	275
7.3.2	Korrektur der Chromatizität	277
7.3.3	Dynamische Apertur	277
7.4	Resonanzen	279
7.4.1	Resonanzdiagramm	279
7.4.2	Fourieranalyse von Feldstörungen	281
	Übungsaufgaben	282
8.	Longitudinale Bahndynamik	285
8.1	Vorbemerkung	285
8.2	Phasenfokussierung und Synchrotronschwingung	285
8.3	Synchrotronschwingung mit kleiner Amplitude	289
8.4	Synchrotronschwingung mit großer Amplitude	291
8.5	Die Hamiltonfunktion der Synchrotronschwingung	294
8.6	Longitudinale Koordinaten	295
8.7	Die longitudinale Emittanz und Akzeptanz	296
8.7.1	Longitudinale Eigenellipse	298
8.7.2	Anpassung und Transformation der longitudinalen Phasenellipse	298
8.7.3	Filamentation	298
8.8	Buncher	300
8.9	Longitudinale Ionenoptik	302
	Übungsaufgaben	304
9.	Injektion und Extraktion	307
9.1	Elektrostatisches und magnetisches Septum	307
9.2	Injektion und Extraktion beim Isochronzyklotron	308
9.3	Injektion und Extraktion beim Synchrotron	309
9.3.1	Injektion	309
9.3.2	Extraktion	313
	Übungsaufgaben	314
10.	Phasenraumdichte und Strahlkühlung	317
10.1	Phasenraumdichte	317
10.1.1	Liouvillesches Theorem	317
10.1.2	Emittanz	319
10.1.3	Strahltemperatur	320
10.1.4	Strahlheizung	321
10.2	Adiabatische Dämpfung	321
10.3	Synchrotronstrahlung	323

XII Inhaltsverzeichnis

10.3.1 Dämpfung von Schwingungen	325
10.3.2 Anregung von Schwingungen	327
10.4 Stochastische Kühlung	329
10.5 Elektronenkühlung	333
Übungsaufgaben	336
Lösungen zu den Übungsaufgaben	337
Literaturverzeichnis	353
Lehrbücher und weiterführende Literatur	359
Sachverzeichnis	361

Symbole und physikalische Konstanten

Verzeichnis der wichtigsten Symbole

A	Akzeptanz
A	Fläche
\mathbf{A}	Vektorpotential
B	Brillanz
\mathbf{B}, B	Magnetische Flußdichte
$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$	Vakuumlichtgeschwindigkeit
$c_x(s), c_y(s), C(s)$	Charakteristische Lösung
C	Kapazität
C	Umfanglänge („circumference“)
$d_x(s)$	Dispersionsfunktion
$D(s)$	Periodische Dispersion
$e = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	Elementarladung
E	Gesamtenergie eines Teilchens
\mathbf{E}	Elektrische Feldstärke
f	Frequenz
\mathbf{F}	Kraft
$g = \partial B_y / \partial x = \partial B_x / \partial y$	Feldgradient
g_s	Sextupolstärke
h	Harmonischnenzahl
$h = 1/\rho_0$	Krümmung der Sollbahn
$\hbar = 6,6252 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$	Plancksches Wirkungsquantum
\mathbf{H}, H	Magnetische Feldstärke
H	Hamiltonfunktion
I	Elektrischer Strom
J_n	Besselfunktion
k_c	Grenzwellenzahl
$k_x(s), k_y(s)$	Fokussierungstärke
k_z	Wellenzahl im Hohlleiter
l	Longitudinale Ortsabweichung
l	Länge
L	Induktivität
L	Länge

XIV Symbole und physikalische Konstanten

L	Luminosität
m	Ruhemasse eines Teilchens
M	Twiss-Matrix
n	Feldindex
N	Zahl der Umläufe
$p = (p_0, p_1, p_2, p_3)$	Viererimpuls
\mathbf{p}, p	Impuls eines Teilchens
\mathbf{P}, P_i	kanonisch konjugierter Impuls
P	Leistung
q	Ladung eines Teilchens
Q	Elektrische Ladung
Q, Q_x, Q_y	Arbeitspunkt
\mathbf{r}	Ortsvektor
R	Radius
R	Transfermatrix
R_s	Shuntimpedanz
s	Wegstrecke längs der Sollbahn
$s_x(s), s_y(s), S(s)$	Charakteristische Lösung
$S(\omega/\omega_c)$	Spektralfunktion
t	Zeit
T	Kinetische Energie
T	Temperatur
T, T_0	Umlaufzeit
T_{HF}	Periodendauer der Hochfrequenz
$\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y, \mathbf{u}_s$	Einheitsvektoren
U	Elektrische Spannung
U	Energieverlust pro Umlauf
v, v	Teilchengeschwindigkeit
V	Elektrisches Potential
W	Wirkung
x	Radiale (horizontale) Ortsabweichung
x'	Radiale (horizontale) Richtungsabweichung
$x_{\text{max}}(s), y_{\text{max}}(s)$	Strahlenveloppe
y	Axiale (vertikale) Ortsabweichung
y'	Axiale (vertikale) Richtungsabweichung
α	Ablenkwinkel
α_p	Momentum-Compaction-Faktor
$\alpha(s) = -\beta'(s)/2$	Optische Funktion
$\beta = v/c$	Geschwindigkeit/Lichtgeschwindigkeit
β	Kantenwinkel
$\beta(s)$	Betatronfunktion (Betafunktion)
$\gamma = E/mc^2$	Lorentzfaktor
$\gamma(s)$	Optische Funktion
γ_{tr}	Lorentzfaktor der Übergangsenergie

$\delta = \Delta p/p$	Relative Impulsabweichung
$\epsilon, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_l$	Emittanz
ϵ	Dielektrizitätskonstante
$\epsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12} \text{ Vs/Am}$	Elektrische Feldkonstante
η	Dispersion der Umlauffrequenz
$\eta(\phi)$	Floquetsche Koordinate
Θ	Radiale (horizontale) Winkelabweichung
λ	Wellenlänge
λ_c	Grenzwellenlänge
μ	Permeabilität
μ	Betatronphasenvorschub pro Umlauf
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ As/Vm}$	Magnetische Feldkonstante
ν	Frequenz
ν_{HF}	Hochfrequenz
ν_{Zyk}	Zyklotronfrequenz
ξ, ξ_x, ξ_y	Chromatizität
ρ	Krümmungsradius
$\rho(x, x')$	Dichteverteilung
σ	σ -Matrix
σ	Wirkungsquerschnitt
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_l$	Standardabweichung
$\Phi(x, y, s)$	Skalares Potential
φ	Phase eines Teilchens
φ	Axiale (vertikale) Winkelabweichung
φ_s	Phase des synchronen Teilchens
$\psi(s)$	Betatronphase
ω	Kreisfrequenz
ω_c	Kritische Kreisfrequenz

Verzeichnis physikalischer Konstanten¹

Vakuumlichtgeschwindigkeit	c	$2,997\,924\,58(0) \cdot 10^8$ m/s
Reduz. Wirkungsquantum	\hbar	$6,582\,122\,0(20) \cdot 10^{-22}$ MeV s
Konversionskonstante	$\hbar c$	197,327 053(59) MeV fm
Elementarladung	e	$1,602\,177\,33(49) \cdot 10^{-19}$ C
Magnetische Feldkonstante	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}(0)$ Tm/A
Elektrische Feldkonstante	ϵ_0	$8,854\,187\,817(0)10^{-12}$ F/m
Feinstrukturkonstante	α	1/137,035 989 5(61)
Avogadro-Konstante	N_A	$6,022\,136\,7(36) \cdot 10^{23}$ mol ⁻¹
Boltzmannkonstante	k	$8,617\,385(73) \cdot 10^{-5}$ eV/K
Elektronenmasse	m_e	0,510 999 06(15) MeV/c ²
Myonmasse	m_μ	105,658 389(34) MeV/c ²
τ -Leptonmasse	m_τ	1777,00(30) MeV/c ²
Protonenmasse	m_p	938,272 31(28) MeV/c ²
Neutronenmasse	m_n	939,565 63(28) MeV/c ²
Deuteronenmasse	m_d	1 875,613 39(57) MeV/c ²
Atomare Masseneinheit	m_u	931,494 32(28) MeV/c ²
π^\pm -Masse	m_{π^\pm}	139,569 95(35) MeV/c ²
π^0 -Masse	m_{π^0}	134,976 4(6) MeV/c ²
K^\pm -Masse	m_{K^\pm}	493,677(16) MeV/c ²
K^0 -Masse	m_{K^0}	497,672(31) MeV/c ²
Λ -Masse	m_Λ	1 115,684(6) MeV/c ²
J/Ψ -Masse	$m_{J/\Psi}$	3 096,88(4) MeV/c ²
W^\pm -Masse	m_W	80,33(15) GeV/c ²
Z^0 -Masse	m_Z	91,187(7) GeV/c ²

¹ entnommen aus Review of Particle Physics, Particle Data Group, Phys. Rev. D 54 (1996) 1