Einleitung

Ein Teilchenbeschleuniger ist ein Gerät, in dem elektrisch geladene Teilchen (z. B. Elementarteilchen, Atomkerne, ionisierte Atome oder Moleküle) durch elektrische Felder auf große Geschwindigkeiten beschleunigt werden. Im Innenraum des Beschleunigers muss Vakuum herrschen. Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten und Funktionsweisen eines Teilchenbeschleunigers beschreibt die Beschleunigerphysik.[1]

Je nach Teilchenart und Beschleunigertyp können die beschleunigten Teilchen annähernd Lichtgeschwindigkeit erreichen. Ihre Bewegungsenergie (kinetische Energie) beträgt dann ein Vielfaches ihrer eigenen Ruheenergie. In diesen Fällen ist die Grundlage zur Beschreibung der Teilchenbewegung die Spezielle Relativitätstheorie.[2]

Die größten Beschleunigeranlagen werden in der Grundlagenforschung (bspw. in der Hochenergiephysik) eingesetzt, um mit den hochenergetischen Teilchen die fundamentalen Wechselwirkungen von Materie zu untersuchen und allerkleinste Strukturen zu erforschen. Daneben haben Teilchenbeschleuniger aber auch eine immer größere Bedeutung in der Medizin sowie für viele industrielle Anwendungen.[3]

Großbeschleuniger werden im Fachjargon oft, aber etwas irreführend, als „Maschinen“ bezeichnet.

Geschichte der Entwicklung zu immer höheren Energien

Es folgt eine Darstellung der geschichtlichen Entwicklung, die ich im Wesentlichen dem Buch XYZ entnommen habe.

Bis etwa 1950: der MeV-Bereich

Die ersten Teilchenbeschleuniger waren Gleichspannungsbeschleuniger,[4] bei denen mit einem Van-de-Graaff-Generator oder einem Cockcroft-Walton-Generator erzeugte Hochspannungen benutzt wurden. Damit konnten Teilchenenergien von einigen MeV (Megaelektronenvolt) erzielt werden. John Cockcroft und Ernest Walton gelang mit so beschleunigten Teilchen 1932 die erste Auslösung von Kernreaktionen an leichten, mit beschleunigten Protonen beschossenen Atomkernen, damals „Kernzertrümmerung“ genannt.

Um höhere Energien zu erreichen, schlug Rolf Wideröe 1929 vor, hochfrequente Wechselfelder zwischen Zylinderelektroden zu nutzen, die hintereinander auf einer gemeinsamen Achse angeordnet sind. Die Längen der Zylinder (anwachsend entsprechend der zunehmenden Geschwindigkeit der Teilchen) und die Frequenz sind so abgestimmt, dass die Teilchen jeweils zwischen den Elektroden beschleunigt werden.

Fast gleichzeitig entwickelte Ernest Lawrence das Zyklotron. Das erste Zyklotron wurde ab 1930 in Berkeley in Zusammenarbeit mit M. Stanley Livingston gebaut. In ihm bewegen sich die geladenen Teilchen in einem Magnetfeld auf spiralförmiger Bahn von der Mitte nach außen und werden regelmäßig beim Passieren des Spalts zwischen zwei D-förmigen Elektroden beschleunigt. Heutige Zyklotrone erreichen Teilchenenergien bis zu einigen 100 MeV.

Ein anderer, nur für leichte Teilchen wie Elektronen geeigneter Typ eines Umlaufbeschleunigers mit Spiralbahn war das Betatron (Wideröe, Kerst, Max Steenbeck). Es hatte keine Elektroden, sondern das zur Beschleunigung nötige elektrische Feld wurde durch zeitliche Änderung des Magnetfeldes induziert. Um 1950 wurden mit Betratronen Elektronen bis auf 300 MeV beschleunigt.

Ab etwa 1950: der GeV-Bereich

Technische Grenzen

Die Größe der nötigen Vakuumkammer und der Magnete begrenzt die Baumöglichkeit von Zyklotronen. Der nächste Schritt auf dem Weg zu immer höherer Teilchenenergie war daher die Beschleunigung auf einer trotz wachsender Energie gleichbleibenden Bahn, entweder in gerader Anordnung (Linearbeschleuniger) oder als Umlaufbahn in Ringbeschleunigern mit regelmäßig angeordneten einzelnen Ablenkmagneten. Für die Beschleunigung kam wieder das ursprüngliche Prinzip von Wideröe zum Einsatz, jedoch erfolgt sie statt zwischen Zylinderelektroden in besonders geformten Hohlraumresonatoren. Diese werden in modernen Anlagen wegen der Energieersparnis möglichst supraleitend ausgeführt. Auch für die Magnetspulen wird teilweise Supraleitung eingesetzt.

Linearbeschleuniger

Linearbeschleuniger haben den Vorteil, dass die Teilchen keine Energieverluste durch Synchrotronstrahlung erleiden, wie sie bei Ringbeschleunigern unvermeidlich sind. (Es gibt allerdings auch Nutzungen der Synchrotronstrahlung und deshalb speziell zu ihrer Gewinnung betriebene Elektronensynchrotrone, siehe unten.) Ringbeschleuniger haben dagegen den Vorteil, dass bei jedem Umlauf des Teilchenpakets dieselben Beschleunigungseinheiten wiedergenutzt werden, und sind insofern wirtschaftlicher.

Ringbeschleuniger

Solche Ringbeschleuniger, bei denen Beschleunigung und Ablenkung der nahezu auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigten Teilchen synchronisiert waren (Synchrotron), wurden nach Ideen von Wladimir Iossifowitsch Weksler (vom Lebedew-Institut) und von Edwin McMillan (in Berkeley) aus der Mitte der 1940er Jahre nach dem Zweiten Weltkrieg projektiert, das Bevatron von Lawrence in Berkeley (1954) und das Cosmotron in Brookhaven (1952 unter Leitung von Livingston). Mit dem Bevatron wurden Protonen bis auf etwa 6 GeV (Gigaelektronenvolt) beschleunigt.

Ein wichtiger Fortschritt war Anfang der 1950er Jahre die Erfindung der „starken Fokussierung“. Die Ablenkmagnete wurden mit abwechselnd nach beiden Seiten angeschrägten Polschuhen versehen, so dass die Magnetfelder quer zur Teilchen-Flugrichtung Gradienten mit wechselnder Richtung haben. Dies ergibt eine Stabilisierung (Fokussierung) der Teilchenbahnen. Auf die Ablenkung eines Teilchens in der Querrichtung bezogen entspricht es anschaulich der Hintereinanderanordnung von Sammel- und Zerstreuungslinsen für Licht, mit einer Fokussierung als Nettoeffekt. Die Idee stammte von Ernest Courant, Livingston und Hartland Snyder in den USA (und unabhängig vorher von Nicholas Christofilos). Damit gelang am CERN (Proton Synchrotron, PS, 1960) und in Brookhaven (Alternating Gradient Synchrotron, AGS, 1960) der Bau von Protonen-Synchrotronen im 30-GeV-Bereich. Die heute (2013) größte Synchrotronanlage Large Hadron Collider hat Protonen bis auf 4 TeV beschleunigt.

Hochenergie-Beschleuniger für Elektronen traten erst in den 1960er Jahren in den Vordergrund des Interesses. Beispiele sind der Linearbeschleuniger SLAC und das Synchrotron DESY. Der in weltweiter Zusammenarbeit geplante International Linear Collider ILC soll 30 km Gesamtlänge haben und Elektron-Positron-Stöße mit 500 GeV oder mehr ermöglichen. Der als Beschleunigungselement dafür entwickelte, abgebildete Hohlraumresonator besteht aus neun elliptisch geformten Zellen (Rotationsellipsoiden). Die Länge einer einzelnen Zelle ist so gewählt, dass sich das elektrische Feld der Welle gerade umkehrt, wenn ein Teilchen in die nächste Zelle eintritt.[5] Bei typischen Betriebstemperaturen um 2 K ist die Niob-Kavität supraleitend und benötigt weniger Energie zum Betrieb als herkömmliche Kavitäten aus Kupfer. Mit diesem Resonatortyp ist ein Energiegewinn von mehr als 40 MeV pro Meter erreicht worden.

Ende der 1960er Jahre begannen Entwurf und Bau großer Beschleuniger für schwere Ionen wie dem UNILAC am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung. Er beschleunigt Ionen beliebiger Massenzahl auf etwa 11 MeV/u (Megaelektronenvolt pro atomarer Masseneinheit).

Speicherringe

Ein weiteres wichtiges Konzept, das in den 1960er Jahren entwickelt wurde, ist der Speicherring, ein Synchrotron, das die Teilchen nicht beschleunigt, sondern mit gleichbleibender Energie ansammelt und "aufbewahrt", bis eine hohe Stromstärke des Strahls erreicht ist. Die Speicherring-Idee wurde im Westen von Bruno Touschek propagiert (um 1960), nach dessen Ideen dann in Frascati 1961 der erste Speicherring gebaut wurde, gefolgt von Stanford (CBX, nach Ideen von Gerard Kitchen O’Neill) und Speicherringen in Russland, wo Budker ähnliche Ideen hatte.

Speicherringe für Elektronen dienen heute (2013) hauptsächlich als Quellen für Synchrotronstrahlung. Speicherringe für Ionen dienen der Teilchenphysik insbesondere in der Form als Collider. Dies sind Anlagen mit zwei gegensinnig umlaufenden Strahlen; Stoßprozesse (engl. collision, Zusammenstoß) dieser Teilchen ermöglichen eine fast vollständige Umsetzung der Bewegungsenergie in neue Teilchen (siehe Colliding-Beam-Experiment).

Beispiele für Speicherringe sind:

* SPEAR (Stanford Positron Electron Asymmetric Ring) am SLAC in Stanford (ab 1972, Elektron-Positron-Collider mit zweimal 4 GeV), an dem Charmonium und Tau-Lepton entdeckt wurden.
* am CERN die Intersecting Storage Rings (ISR) (Proton-Antiproton, zweimal 31 GeV, ab 1971), der SPS (ab 1981 zum Proton-Antiproton Collider ausgebaut, zweimal 450 GeV), der Large Electron-Positron Collider (LEP, 1989 bis 2000, zweimal 104 GeV in LEP II) und der heutige Large Hadron Collider (Proton-Proton Collider, seit 2009 mit derzeit zweimal 4 TeV der bisher größte Beschleuniger)
* das Tevatron am Fermilab (ab 1987, Proton-Antiproton Collider, zweimal 900 GeV, ab 2002 mit zweimal 1 TeV; 2011 stillgelegt)
* der ESR, Experimentier-Speicher-Ring am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung

Arten

Es gibt verschiedene Arten von Teilchenbeschleunigern

Geradlinige Beschleunigung

Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet.

Zyklische Beschleunigung

Zyklische Beschleunigung findet statt auf spiralartiger oder rosettenförmiger oder ringförmig geschlossener Bahn.

Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet.

Anwendungsgebiete

Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet.

Synchrotronstrahlung

Synchrotronstrahlung war ursprünglich ein „Abfallprodukt“ großer, für die physikalische Forschung gebauter Elektronenbeschleuniger (z. B. im HASYLAB beim DESY). Sie wird heute (2014) vielfältig in der Materialforschung, zur medizinischen Diagnostik und anderen Anwendungen eingesetzt und dafür in vielen eigens dafür gebauten Elektronen-Beschleunigeranlagen erzeugt.

Ein Sonderfall der Erzeugung von Synchrotronstrahlung ist der Freie-Elektronen-Laser.

Fazit

Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet.

Literatur

Daniel, Herbert: Beschleuniger. Teubner 1974

Hinterberger, Franz: Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik. 2. Auflage Springer 2008

Hellborg, Rudi: Electrostatic Accelerators. Springer 2005

Waloschek, Pedro: Die Welt der kleinsten Teilchen - Vorstoß zur Struktur der Materie. rororo 1984

Wille, Klaus: Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, 2. Auflage Teubner 1996