

wikimedia: Lohmer Porsche

BESCHLEUNIGERPHYSIK

Energier recycling für Beschleuniger

Elektronenstrahlen in modernen Beschleunigern tragen große Energiemengen, sodass die Rückgewinnung lohnt.

Kurt Aulenbacher

Bremst ein Auto bis zum Stillstand ab, wandelt sich seine kinetische Energie über die Reibung der Bremsen in Wärme um – und geht für die weitere Fahrt verloren. Ähnliches passiert, wenn ein Elektronenstrahl im „Beamdump“ einer Beschleunigeranlage gestoppt wird. Lässt sich die Energie auch weiter nutzen?

In Deutschland waren zu Beginn des letzten Jahres fast 240 000 PKW mit einem Hybridantrieb registriert. Der Zuspruch für diese Technik, bei der die kinetische Energie des Fahrzeugs beim Bremsen in elektrische Ener-

gie zurückgewandelt werden kann, hat sich aber erst in den letzten Jahren entwickelt, seit der Kraftstoffverbrauch beim Autofahren vermehrt im Fokus steht. Dabei gab es schon zu Beginn des automobilen Zeitalters die ersten Prototypen für Hybrid-PKW (Abb. oben). Zu einer ähnlichen Situation kommt es derzeit auch in der Beschleunigerphysik: Obwohl Maury Tigner bereits 1965 das Prinzip eines „Energy-Recovery Linac“ (ERL) vorgeschlagen hat [1], gingen Prototypen erst vor knapp 20 Jahren in Betrieb [2]. Ein Grund für die Renaissance der Idee ist der Wunsch nach immer höheren Intensitäten bei beschleunigergestützten Experimenten.

- ◀ Ein Hybrid-PKW, wie der Lohner-Porsche „Rennwagen“ von 1901, kann kinetische Energie beim Bremsen wieder in elektrische Energie umwandeln.

Spektakuläre Ergebnisse wie die Entdeckung des Higgs-Bosons am Large Hadron Collider des CERN [3, 4] sind häufig erst möglich, wenn an einer durch die Energie der beschleunigten Strahlen gesetzten Grenze, der „Energy frontier“, gearbeitet wird. Um diese Energiegrenze weiter nach oben zu verschieben – und beispielsweise nach Physik jenseits des Standardmodells zu suchen – sind Beschleuniger mit immer höheren Energien notwendig. Diese werden immer größer und sind nur noch durch eine weltweit koordinierte Anstrengung vieler Länder zu errichten, wobei Planung und Aufbau mehr als zehn Jahre benötigen. Auch der Betrieb dieser Anlagen ist aufwändig und teuer – und nicht dauerhaft von einer einzelnen Institution zu tragen.

Ökologisch und günstig beschleunigen

Vielleicht lässt sich die Physik jenseits des Standardmodells aber auch durch kleine Abweichungen seiner Vorhersagen nachweisen. Dazu wären Präzisionsexperimente bei eher niedrigen Energien nötig, die auf bisher nicht erreichten Teilchenströmen beruhen und an der „Intensity frontier“ arbeiten. Bereits vergleichsweise kompakte Beschleuniger ermöglichen Experimente dieser Art, bergen aber ein anderes Problem: Das Beschleunigen größerer Ströme benötigt mehr elektrische Leistung, die an Beschleunigern in der Regel durchgängig zur Verfügung stehen muss. Dabei beträgt der Leistungsbedarf mehrere Megawatt bei heutigen Beschleunigern mittlerer Größe, wie dem Mainzer Mikrotron (MAMI). Um die Stromkosten und den ökologischen Fußabdruck dieser Art Grundlagenforschung in vernünftigen Grenzen zu halten, sollte dieser Wert nicht allzu weit überschritten werden.

Bei Experimenten in Elektronen-Ionen-Collidern (EIC) treffen Elektronenstrahlen frontal mit Ionenstrahlen zusammen, sodass bei der Kollision eine hohe Schwerpunktsenergie vorliegt. Auch hier sind hohe Teilchenströme für eine ausreichende Anzahl von Kollisionen nötig. In

China und den USA [5] laufen die Planungen für EICs mit Hochdruck. Der Large Hadron Collider am CERN lässt sich durch die Erweiterung um einen ERL zu einem solchen Collider (LHeC) aufrüsten [6]. Bei diesen Projekten betragen die geplanten Strahlleistungen mehrere hundert Megawatt, sodass eine energieeffiziente Technik bei ihrer Umsetzung zwingend notwendig ist.

Dieser Artikel stellt zunächst dar, wie das etablierte Konzept der Teilchenbeschleunigung mit elektromagnetischen Wellen zu modifizieren ist, um eine Rückgewinnung der Energie zu ermöglichen. In einfacher Form kommen dafür nur extrem relativistische Teilchenstrahlen infrage – leichte Teilchen also, die sich bereits bei relativ geringen kinetischen Energien mit annähernd Lichtgeschwindigkeit bewegen. Zurzeit arbeiten alle laufenden und geplanten ERLs mit dem leichtesten geladenen Teilchen, dem Elektron. Das Konzept konkurriert sowohl für Colliderexperimente als auch bei der Anwendung als Quelle für Synchrotronstrahlung mit den Speicherringen. Die heutigen Prototypen dienen vor allem dazu, die Vorteile des Prinzips zu demonstrieren. Eine Ausnahme bildet der „Mainz Energy-recovering Superconducting Accelerator“ (MESA), der auch für Experimente der Teilchenphysik zur Verfügung stehen wird.

Hochfrequent beschleunigen

Heute verwenden Beschleuniger in der Regel Hochfrequenztechnik (HF), um geladene Teilchen auf hohe kinetische Energien zu beschleunigen. Dabei übertragen elektromagnetische Wechselfelder Energie auf die Teilchen. Die Beschleunigung findet in Kavitäten statt (**Abb. 1**). Diese bestehen aus einer Kette von Hohlraumresonatoren, die bei modernen Anlagen wie dem European XFEL aus supraleitendem Niob gefertigt sind, um hohe Feldstärken zu ermöglichen. Zum Beschleunigen von Elektronen regt ein HF-Sender typischerweise Mikrowellen mit Frequenzen von 1 bis 3 GHz an, arbeitet also bei Wellenlängen von 10 bis 33 Zentimetern im Vakuum. In den einzelnen Resonatoren bilden sich stehende Wellen aus. Die Resonatoren sind durch Öffnungen auf der Symmetrieachse miteinander gekoppelt, die auch dazu dienen, den Strahl durchtreten zu lassen. Die Randbedingungen für die Felder an den metallischen Oberflächen erzeugen elek-



Research Instruments GmbH, Bergisch Gladbach

Abb. 1 Die elliptischen Hohlräume einer Niob-Kavität vom TESLA-Typ, die beim Mainz Energy-recovering Superconducting Accelerator zum Einsatz kommen, arbeiten bei einer Eigenfrequenz von 1300 MHz. Die neun Resonatoren sind zusammen etwa einen Meter lang.

trische Felder in Richtung der Kavitätsachse, sodass eine Beschleunigung in dieser Richtung stattfinden kann. Eine vorteilhafte Schwingungsmoden ist die π -Mode, bei der die Schwingungen in den einzelnen Hohlräumen um 180 Grad phasenverschoben sind (Abb. 2a). Ein effektives Beschleunigen durch die gesamte Kavität erfolgt, wenn die Teilchen den ersten Resonator erreichen, sobald das Feld beginnt, beschleunigend zu wirken und die Laufzeit der Teilchen zwischen benachbarten Resonatoren genau die Hälfte der Schwingungsperiode T_{HF} beträgt. Bei einem Mittelwert \bar{F} des Feldes während der Passage gewinnen Elektronen in einer Kavität der Länge L eine Energie von $e\bar{F}L$. Weil sich der Wert der kinetischen Energie aus der Multiplikation der Elektronenladung mit der insgesamt durchlaufenen Potentialdifferenz ergibt, spricht man beispielsweise für eine Million Volt von einem Strahl mit 1 MeV Energie.

Da die Resonatoren alle gleich lang sind, funktioniert das Prinzip nur dann effizient, wenn sich die Teilchen beim Erreichen der ersten Kavität bereits annähernd mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Nur unter der Bedingung $v \approx c$ verändert die Energieerhöhung die Geschwindigkeit v praktisch nicht mehr. Das Durchlaufen eines Vorbeschleunigers ist also zwingend nötig, um bei Resonatoren der Länge $c \cdot T_{HF}/2$ die Laufzeitbedingung zu erfüllen. Für die typische Frequenz von 1300 MHz = $1/T_{HF}$ folgt eine Resonatorlänge von etwa 13 Zentimetern. Damit alle Teilchen annähernd gleich viel Energie gewinnen, dürfen die Elektronenpakete nur ein sehr kleines Zeitintervall innerhalb der vollen Schwingungsperiode von 770 Pikosekunden bei 1300 MHz einnehmen. Daraus ergeben sich Pulslängen von wenigen Pikosekunden, die möglichst noch vor dem Vorbeschleuniger aufgeprägt werden, beispielsweise indem entsprechend kurze Laserpulse die Photoquellen

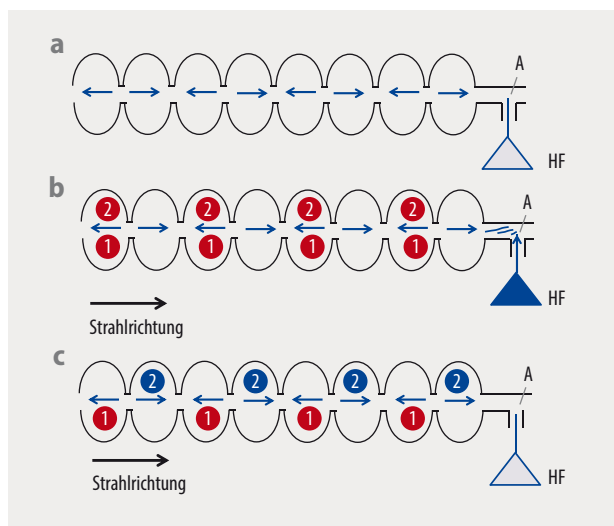


Abb. 2 Ein Hochfrequenz-Sender (HF) regt die Schwingungen der elektrischen Felder (blau) in der Kavität über eine Antenne (A) an. In der π -Mode ist die Phase benachbarter Resonatoren um 180 Grad verschoben (a). Bei einem rezirkulierenden Elektronenstrahl passiert jedes Elektron (b, rot) die Kavität zweimal bei gleicher Phasenlage, und der Energiegewinn speist sich aus der Leistung, die der Sender bereitstellt (blau). Um die Energie beim zweiten Durchlauf zurückzugewinnen (c), müssen die Elektronen eine halbe Wellenlänge später eintreffen (Energy-Recovery Linac).

der Elektronen anregen. Eine weitere Anforderung ist das kontinuierliche Arbeiten der HF-Sender. Produziert die Elektronenquelle in jeder HF-Periode einen Elektronenpuls, den die Kavitäten beschleunigen, so treffen die Pulse mit der entsprechenden Frequenz am Experiment ein. Solche „Continuous Wave“- oder CW-Strahlen eignen sich besonders für Präzisionsexperimente, weil die Detektoren die zeitliche Struktur des Strahls nicht auflösen können und somit gleichmäßig verteilt Daten nehmen.

Mit einer Kavität mehrmals beschleunigen

Grundsätzlich ist jede gewünschte Energie möglich, indem ausreichend viele Kavitäten in einer Linie hintereinander aufgereiht und durchlaufen werden. Ein solcher „Linear Accelerator“ (Linac, Abb. 3a) benötigt aber entsprechend viele teure, energieintensive HF-Systeme. Ein N -fach rezirkulierender Linac reduziert diesen Aufwand erheblich (Abb. 3b). Damit die Teilchenpakete bei jedem Umlauf Energie gewinnen, muss ihre Laufzeit T_{Umlauf} für eine Rezirkulation einem ganzzahligen Vielfachen M der Hochfrequenzperiode entsprechen: $T_{Umlauf} = MT_{HF}$, wobei M für die einzelnen Umläufe verschiedene Werte annehmen kann. Dann erreichen die Teilchen nach der Rezirkulation die Kavitäten zur gleichen Schwingungsphase wie beim ersten Eintritt und werden nochmals beschleunigt (Abb. 2b). Im stationären CW-Betrieb überlagern sich ständig Elektronenpakete, die zum ersten, zweiten, ..., $(N + 1)$ -ten Mal die Beschleunigungsstrecke passieren. Um die Pakete aus verschiedenen Umläufen zu trennen, durchlaufen alle Teilchen daher nach dem Austritt aus der Reihe der Kavitäten einen magnetischen „Spreader“. Die Trennung beruht auf der Lorentz-Kraft in den Magneten, die proportional zum Impuls und damit nach jedem Umlauf verschieden ist. Ein System von richtungsändernden Dipolmagneten und fokussierenden Quadrupolen führt die Pakete zurück zum Linac. Am Ende dieser Strecke sorgt ein „Kombiner“ dafür, dass sich die frisch eingespeisten und die rezirkulierten Teilchen wieder auf dem gleichen Orbit in den Kavitäten befinden. Spreader und Kombiner sind identisch aufgebaut, werden aber in entgegengesetzter Richtung passiert.

Wenn die Teilchen nach N Umläufen aus dem Beschleuniger austreten, haben sie die Beschleunigungsstrecke $(N + 1)$ -mal durchlaufen und besitzen eine Energie von $E_{max} = E_{inj} + (N + 1) e\bar{F}L$, wobei L der Gesamtlänge aller Kavitäten entspricht. Im Vergleich zu einem reinen Linac sinken die Kosten für eine vorgegebene Energie um einen beträchtlichen Faktor, der allerdings wegen des Aufwands für die Rezirkulationen nicht ganz den Wert $(N + 1)$ erreicht. Typischerweise bleibt die Anzahl der Rezirkulationen klein, weil die Überlagerung der Teilchenpakete auf der Symmetrieachse des Linacs ab einer gewissen Stromstärke zu Instabilitäten führt: Die Teilchen gleicher Ladung stoßen sich gegenseitig ab. Daher stellt die normalleitende Mikrotronkaskade MAMI an der Universität Mainz mit $N = 90$ nach fast 30 Jahren Betrieb noch immer ein Extremum dar, um Elektronen mit 1,5 GeV Energie zu erzeugen.

Heute kommen dafür meist supraleitende Kavitäten zum Einsatz, die bei einer Temperatur von 2 K arbeiten und im

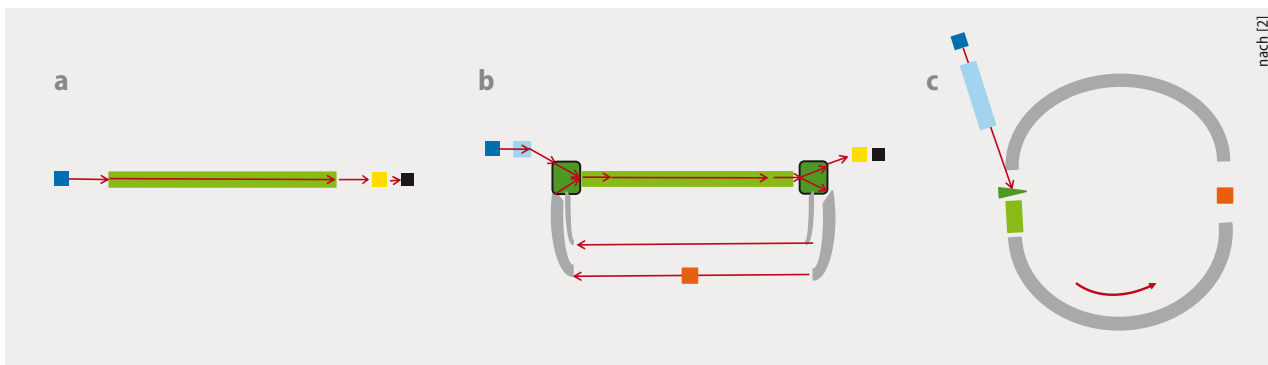


Abb. 3 Ein Linearbeschleuniger besteht aus Teilchenquelle (a, blau) und Beschleunigungsstrecke (grün). Vor dem Beamdump (schwarz) befindet sich ein externes Experiment (gelb). Ein Vorbeschleuniger (b, hellblau), Kombiner und Spreader (dunkelgrün) sowie Rezipulationsmagnete (grau) ergänzen den Aufbau bei einem rezirkulierenden Linearbeschleuniger. Hier sind auch interne Experimente (orange) möglich. Ein Kicker (c, dunkelgrün) bringt im Speicherring den Strahl auf einen Orbit, um ein internes Experiment mehrfach zu durchlaufen.

CW-Betrieb Feldstärken von $\bar{F} = 10 \text{ MV/m}$ und mehr erreichen. Die hohe Feldstärke reduziert die Baugröße des Linacs und die Anzahl der notwendigen extrem teuren Kavitäten. Allerdings wächst der Leistungsbedarf mit steigender Feldstärke quadratisch an, weil durch Oberflächenströme in den Wänden der Kavitäten große Mengen des Kühlmittels (flüssiges Helium) verdampfen. Ein Vergleich der Leistung, die aufgrund des Bedarfs der Kälteanlage zum Erzeugen der Beschleunigungsfelder gebraucht wird, mit der Leistung, die für das Beschleunigen der Elektronen notwendig wäre („beam loading“), zeigt, dass typischerweise ab 1 mA Strahlstrom der zweite Beitrag dominiert. Steigt die Stromstärke derart, dass weitere Verbraucher vernachlässigbar sind, kann sich eine Energierückgewinnung lohnen.

Hochfrequent entschleunigen

Ein rezirkulierender Linac besteht bereits aus allen Komponenten für einen „Energy-Recovery Linac“ (ERL). Die Rückgewinnung der Energie findet im Hauptbeschleuniger statt und funktioniert ebenfalls nur, wenn sich die Teilchenstrahlen annähernd mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Daher lässt sich die Leistung, die der Vorbeschleuniger verbraucht, nicht zurückgewinnen. Das Konzept rentiert sich also, wenn die Strahlenergie E_{inj} beim Injizieren in den Hauptbeschleuniger wesentlich kleiner ist als die angestrebte Energie E_{max} für das interne Experiment bei der letzten Rezirkulation. Weil bei vielen dieser Experimente weniger als ein Promille der Teilchen reagiert, lässt sich die Energie der verbliebenen 99,9 Prozent durch gezieltes Entschleunigen dem HF-System wieder zuführen.

Dazu muss die Umlaufzeit bei der Rezirkulation vor dem ersten Entschleunigen ein halbzahliges Vielfaches der HF-Periode betragen: $T_{Umlauf} = (M + 1/2) T_{HF}$. Dann erreicht das Teilchenpaket die Kavität eine halbe Wellenlänge früher oder später als zuvor (**Abb. 2c**). Der elektrische Feldvektor ist damit gerade so ausgerichtet, dass kinetische Energie in Feldenergie zurückgewandelt wird und die Teilchen „abbremsen“. Nach einer Einschwingphase von einigen Mikrosekunden beschleunigen im stationären Betrieb genauso viele Teilchen wie entschleunigen. Im Idealfall entfällt der

Leistungsbedarf der Kavität für das Beschleunigen vollständig, und der Strahl verlässt nach dem Entschleunigen den Linac mit der Energie E_{inj} , die der Vorbeschleuniger bereitgestellt hat. Der gesamte Energiebedarf der Anlage ist also keineswegs Null, sondern der relative Energiebedarf R im Vergleich zum konventionellen Linac beträgt

$$R = \frac{E_{inj}}{E_{inj} + E_{max}}.$$

Die erste praktische Anwendung dieses Prinzips war der ERL am Jefferson Lab in Virginia, USA, der mit einer Injektionsenergie $E_{inj} = 8 \text{ MeV}$ und einer maximalen Energie $E_{max} = 150 \text{ MeV}$ operierte ($R = 0,054$; **Tabelle**). Damit sparte die Anlage gegenüber einem vergleichbaren Linac mehr als 94 % des Leistungsbedarfs für die Teilchenbeschleunigung ein, was sich bei den dort erreichten Strahlströmen zu mehr als einem Megawatt summierte [2].

Auch mehrere Rezirkulationen im ERL-Modus sind möglich, wenn die Phasenlage der Strahlpakete korrekt eingestellt ist, also die Umlaufdauer nach dem ersten Entschleunigen wieder einem ganzzahligen Vielfachen der HF-Periode entspricht. Weil das Experiment intern auf der letzten Rezirkulation platziert sein muss, durchläuft der Strahl zuvor den Hauptbeschleuniger N -mal, während dies bei einem externen Experiment $(N + 1)$ -mal möglich ist. Die normalleitende Beschleunigeranlage NOVOFEL in Novosibirsk lief bereits für mehrere Rezirkulationen im ERL-Modus [7]. Experimente mit supraleitender Mehrfachzirkulation könnten erstmalig am S-DALINAC ($N = 3$) an der TU Darmstadt möglich werden, wo kürzlich der einfach rezirkulierende ERL-Betrieb realisiert wurde [8]. Bei einer variablen Länge der letzten Rezirkulation ist es möglich, zwischen dem ERL-Modus und dem konventionellen rezirkulierenden Betrieb zu wechseln. Das ist für den in Mainz in Bau befindlichen MESA-Beschleuniger vorgesehen [9].

Vergleich zur etablierten Technik

An einem rezirkulierenden Linac lässt sich ein externes Experiment betreiben. Das ermöglicht bei gleichem N höhere Energien als an einem internen Experiment im ERL-

Energy Recovery Linacs – Projekte weltweit

Projekt	Energie	Rezirkulationen	Zielsetzung	Inbetriebnahme
JLAB-ERL, Newport News, VA	150 MeV	1	FEL, infrarot bis ultraviolett	1998
NOVOFEL (BINP), Novosibirsk	42 MeV	4	FEL, infrarot	2000
S-DALINAC, Darmstadt	40 MeV (100 MeV)	1 (3)	Strahldynamik	2017
CBETA (Cornell U), Ithaca, NY	150 MeV	4	Systemstudie	2019
bERLIn Pro (HZB), Berlin	60 MeV	1	Systemstudie	2020
MESA, Mainz	105 MeV, spinpolarisiert	2	Teilchenphysik	2022
PERLE, Orsay	300 MeV (1000 MeV), spinpolarisiert	1 (3)	LHeC-Systemstudie	> 2023
eRHIC (BNL), Upton, NY	25 GeV, spinpolarisiert	7	Teilchenphysik	> 2025
LHeC, CERN	50 GeV, spinpolarisiert	3	Teilchenphysik	> 2025

Tabelle Zurzeit sind weltweit drei energierückgewinnende Linearbeschleuniger in Betrieb. In den kommenden Jahren sollen weitere hinzukommen. Die Werte in Klammern geben Optionen für einen Ausbau der Anlagen an.

Betrieb. Außerdem können die Targets extern eine beliebig hohe Flächendichte (Produkt aus Dichte und Länge) aufweisen, weil der Strahl danach in einem Beamdump abgebremst wird. Dabei stört die eventuell starke Aufstreuung des Strahls nicht. Für den ERL-Modus ist dagegen ein zeitlich und räumlich definierter Strahl unumgänglich. Das hat er mit einem Synchrotron bzw. einem Speicherring gemein (**Abb. 3c**). Hier definiert eine ringförmige Anordnung von Ablenkmagneten den Orbit des Teilchenstrahls. Ein Vorbeschleuniger liefert einen kurzen Strahlpuls. Der Kicker, ein gepulst arbeitender Magnet, extrahiert daraus ein Teilchenpaket und stößt es auf den Orbit, wo im Synchrotronbetrieb bei jedem Umlauf mit einer HF-Kavität die Energie inner-

halb einiger Sekunden erhöht wird. Nach Erreichen der Soll-Energie bleiben die Teilchen im Ring gespeichert und stehen bei konstanter Energie für interne Experimente zur Verfügung. Zu den bestehenden Vorteilen von Speicherringen gehört es, dass die Energie zum Beschleunigen nur in großen zeitlichen Abständen aufzubringen ist. Außerdem verstärkt jedes gespeicherte Teilchen den internen Strom um einen Faktor 10^5 bis 10^6 , der aus der typischen Umlauffrequenz im Ring folgt, sodass Ströme von einigen Ampère auftreten können. Während der typischen Speicherzeiten von Minuten bis Stunden trifft jedes Teilchen viele Millionen Mal auf das Experiment. Als interne Experimente mit Elektronen eignen sich Streuexperimente mit Gastargets, frontale Kollisionen mit anderen hochenergetischen Teilchenstrahlen, die Elektronenkühlung gespeicherter Ionenstrahlen mit gleicher Geschwindigkeit und das Erzeugen sekundärer Strahlung, beispielsweise von Synchrotronstrahlung in den Magnetfeldern von Wiggler oder Undulatoren beziehungsweise von Gammastrahlung durch Compton-Rückstreuung von Laserlicht. Für diese Experimente besitzt ein Beschleuniger im ERL-Betrieb Vorteile gegenüber dem Speicherring.

Im ERL durchquert jedes Teilchen das Target nur einmal, sodass eine größere Aufstreuung des Strahls tolerierbar ist als pro Umlauf im Speicherring. Daher kann die Flächendichte eines internen Gastargets deutlich höher ausfallen, sodass sich insbesondere bei weniger als einem GeV Energie höhere Ereignisraten ergeben, weil dann die Speicherzeiten im Ring sehr stark absinken. Während sich im Speicherring die Stromstärke durch Verluste und Nachfüllen ständig ändert, bietet der ERL-Betrieb zeitlich konstante Bedingungen, die für Präzisionsexperimente wichtig sind. Die Aufenthaltsdauer der Elektronen liegt für einen ERL in der Größenordnung von Mikrosekunden, sodass Strahlungseffekte die Qualität des Strahls weitaus weniger reduzieren als im Speicherring. Das ermöglicht brillantere Sekundärstrahlen und eine höhere Nutzrate in Colliderexperimenten. Immer häufiger ist es wichtig, die Polarisation des Spins der Strahlteilchen gezielt zu manipulieren. Im ERL-Modus kann der Polarisationsgrad routinemäßig

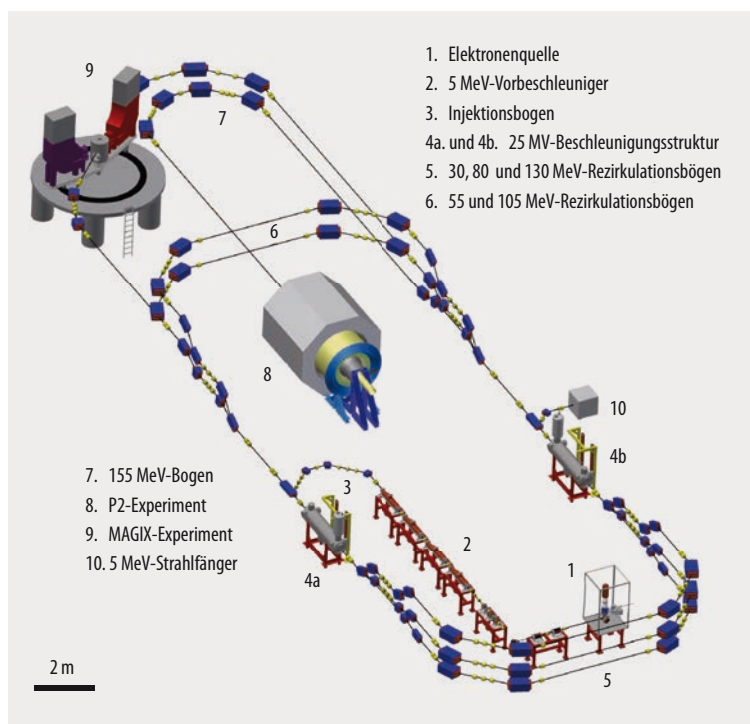


Abb. 4 Der MESA-Beschleuniger kann mit zwei Rezirkulationen durch supra-leitende Kavitäten wie ein konventioneller rezirkulierender Linearbeschleuniger arbeiten und als ERL mit dem MAGIX-Spektrometer betrieben werden.

mehr als 80 Prozent betragen und der Vektor lässt sich gezielt ausrichten, wie bei Linearbeschleunigern heute üblich [10], während dies am Speicherring vor allem bei hohen Energien sehr aufwändig ist.

Damit ein Linearbeschleuniger im ERL-Betrieb diese Vorteile ausspielen kann, muss die Stromstärke hinreichend hoch sein. Derzeit gehen Schätzungen von 10 bis 30 mA für Colliderexperimente und etwa 100 mA bei der Elektronenkühlung und als Quelle von Sekundärstrahlen aus. An der Cornell University ließ sich bereits ein Strahlstrom von 70 mA aus einer Photokathode auf die notwendige Energie für den Eintritt in einen ERL beschleunigen [11]. Die für Stromstärken von etwa 100 mA sehr effektive Energierückgewinnung sollen die im Bau befindlichen Anlagen CBETA der Cornell University [11] und bERLinPRO am Helmholtz-Zentrum Berlin [12] in naher Zukunft demonstrieren. Wichtig ist auch der Nachweis eines stabilen Betriebs mit einem ausreichend intensiven spinpolarisierten Strahl mit hoher Verfügbarkeit. Hier könnte PERLE am IPN Orsay als Vorläufer des LHeC-Projekts notwendige Forschungs- und Entwicklungsarbeit leisten [6].

Experimente mit dem MESA-Beschleuniger

Auch wenn ein ERL unterhalb von 1 GeV schon bei relativ kleinen Stromstärken einem Speicherring überlegen sein kann, muss er in jedem Fall eine Stromstärke liefern, die deutlich höher ausfällt als bei einem konventionellen Linac. Dieser Betriebsmodus soll beim MAGIX-Experiment am MESA-Beschleuniger realisiert werden (Abb. 4). Die Anlage wird derzeit am Institut für Kernphysik der Universität Mainz mit Mitteln aus dem Exzellenzcluster PRISMA errichtet. Das Produkt aus Flächendichte des Targets und Luminosität der Elektronen beträgt für MAGIX bei einer Energie von 105 MeV etwa $10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Speicherringe erreichen das nur bei wesentlich höheren Energien. MESA übertrifft mit einer Strahlstromstärke von mehr als 1 mA den Beschleuniger MAMI um mehr als das Zehnfache. Prozesse, die zum Untergrund in den Spektren beitragen, wie die Vielfachstreuung oder Streuung an Targetbehältern für Gase, bleiben unterdrückt bzw. werden durch den Einsatz eines Gastargets eliminiert. Das ermöglicht genauere Resultate als mit einem externen Target wie an der A1-Spektrometeanlage von MAMI.

Natürlich lassen sich an MESA aufgrund der geringeren Strahlenergie nur entsprechend niederenergetische Prozesse untersuchen. Diese bleiben aber bei höheren Energien, wie sie MAMI zur Verfügung stellt, oft im hohen Untergrund verborgen. Daher ist ein vielfältiges Experimentierprogramm zur niederenergetischen Kernphysik an der „Intensity frontier“ eines der Forschungsfelder des im Januar angelaufenen Exzellenzclusters PRISMA⁺. Hierzu gehören die Suche nach bisher unbekanntem Eichbosonen wie den Dunklen Photonen und die Messung von Formfaktoren bei extrem kleinen Impulsüberträgen, um das Rätsel des Protonenradius zu lösen [13]. Außerdem soll MESA einen spinpolarisierten Strahl für das externe P2-Experiment bereitstellen [14], mit dem Ziel, paritätsverletzende Effekte bei niedrigen Energien präzise zu vermessen

und damit den elektroschwachen Mischungswinkel, den Weinberg-Winkel, mit großer Genauigkeit zu extrahieren. Der Vergleich von Daten bei hohen und niedrigen Impulsüberträgen könnte auch Hinweise auf Physik jenseits des Standardmodells enthüllen.

Damit bietet MESA als wenig aufwändige und energieeffiziente Anlage die Möglichkeit, neue Erkenntnisse zu den grundlegenden Naturkräften zu sammeln. Sowohl der Beschleuniger als auch die zugehörigen Experimente sollen Ende 2022 in Betrieb gehen. Darüber hinaus liefert MESA als eine der ersten Anlagen, die dauerhaft einen Elektronenstrahl für Experimente im ERL-Modus bereitstellen wird, wichtige Erkenntnisse für die weitere Entwicklung dieses zukunftssträchtigen Konzepts der Beschleunigerphysik.

*

Das DFG-Graduiertenkolleg „Accelence“, das die Universitäten in Darmstadt und Mainz gemeinsam tragen, nutzt das Umfeld beider Standorte, um junge Physikerinnen und Physiker auf die Arbeit mit anspruchsvollen Beschleunigeranlagen vorzubereiten und die benötigte Sachkompetenz aufzubauen.

Literatur

- [1] M. Tigner, *Nuovo Cim.* **37**, 1228 (1965)
- [2] L. Merminga et al., *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **53**, 387 (2003)
- [3] K. Jakobs, *Physik Journal*, August/September 2015, S. 35
- [4] T. Plehn und M. Krämer, *Physik Journal*, Dezember 2013, S. 24
- [5] US National Academy of Science (NAS), DOI: 10.17226/25171 (2018)
- [6] D. Angal-Kalinin et al., *J. Phys. G* **45**, 065003 (2018)
- [7] N. A. Vinokurov et al., *Proc. of IPAC2017, FRXBB1* (2017), DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2017-FRXBB1
- [8] *Physik Journal*, Oktober 2017, S. 7
- [9] F. Hug et al., *Proc. of LINAC2016, MOP106012* (2017), DOI: 10.18429/JACoW-LINAC2016-MOP106012
- [10] K. Aulenbacher, *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **198**, 361 (2011)
- [11] G. H. Hoffstaetter et al., arXiv:1706.04245 (2017)
- [12] M. Abo-Bakr et al., *Proc. of IPAC2017, MOPVA005* (2017), DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2017-MOPVA005
- [13] R. Pohl et al., *Nature* **466**, 213 (2010)
- [14] D. Becker et al., *Eur. Phys. J. A* **54**, 208 (2018)

Der Autor



P. Pulkowski

Kurt Aulenbacher (FV Hadronen und Kerne) ist Professor für Experimentalphysik an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz und stellvertretender Vorsitzender im Arbeitskreis Beschleunigerphysik der DPG. Sein Hauptarbeitsgebiet sind Experimente mit spinpolarisierten hochenergetischen Elektronenstrahlen und die Entwicklung der dafür notwendigen Beschleunigerkomponenten wie Elektronenquellen, Polarimeter, Elektronenkühler und der Bau des Energy-Recovery Linacs MESA.

Prof. Dr. Kurt Aulenbacher, Institut für Kernphysik, Universität Mainz, Johann-Joachim-Becher-Weg 45, 55128 Mainz