

TEILCHENPHYSIK

Teilchen beim Wellenreiten

Teilchenbeschleunigung im Plasma ermöglicht kompaktere und kostengünstigere Beschleuniger.

Allen Caldwell

In der Teilchenphysik sind bei Kollisionen immer höhere Energien notwendig, um immer neue Strukturen und Prozesse aufklären zu können. Dies erfordert größere und damit auch teurere Beschleunigeranlagen. Daher gilt es, alternative Methoden zu entwickeln. Die Plasmabeschleunigung ist in diesem Zusammenhang ein vielversprechendes Verfahren, an dem viele Forschungsgruppen arbeiten.

Wenn Teilchen miteinander kollidieren, machen solche mit höherer Energie physikalische Prozesse und Strukturen auf kleineren Entfernungsskalen sichtbar. Teilchenbeschleuniger waren das wichtigste Instrument bei der Entwicklung des Standardmodells der Teilchenphysik, wie zuletzt die Entdeckung des Higgs-Bosons mit dem Large Hadron Collider (LHC) am CERN im Jahr 2012 eindrucksvoll belegte.

Neben der Kollision von hochenergetischen Protonen wie beim LHC sind auch Kollisionen hochenergetischer Elektronen mit anderen Teilchen, etwa Positronen (Antiteilchen der Elektronen) oder Protonen, von großem Interesse. Im Gegensatz zu Protonen, die eine komplexe innere Struktur aufweisen, sind Elektronen als Elementarteilchen besonders attraktiv, um neue physikalische Phänomene zu erforschen. Da sie nicht weiter zerfallen, vereinfacht sich die Situation. Zudem ist die gesamte Energie an der Interaktion beteiligt – bei Protonen ist es nur ein Bruchteil. Da

Elektronen leicht sind, lassen sie sich in Kreisbeschleunigern nicht auf sehr hohe Energien bringen, da sie auf ihrer gekrümmten Bahn ihre Energie schnell wieder als Synchrotronstrahlung abgeben. Bei Protonen ist dieser Effekt aufgrund ihrer wesentlich größeren Masse viel geringer, wodurch sie sich mit Energieschüben erfolgreich auf sehr hohe Energien beschleunigen lassen. Für den LHC sind 7 TeV oder 7 Billionen Elektronenvolt vorgesehen. Zum Vergleich: Die maximale Energie, die sich in demselben kreisförmigen Tunnel mit Elektronen und Positronen erreichen ließe, beträgt etwa 100 GeV, also 100 Milliarden Elektronenvolt.

Die Energiebegrenzung für Protonen in Kreisbeschleunigern liegt in der Biegefestigkeit der heutigen supraleitenden Magnete begründet. Bei zu großer Energie reicht die Biegefestigkeit nicht mehr aus, um die Protonen auf ihrer Kreisbahn zu halten. Der LHC beschleunigt Protonen in einem 27 Kilometer langen Ring. Künftige Beschleunigerkomplexe sollen voraussichtlich noch größer sein, was ihre Realisierung aufgrund der Größe und Kosten ungewiss macht. Um Elektronen und Positronen auf hohe Energien zu beschleunigen, gibt es Vorschläge für sehr lange Linearbeschleuniger. In diesem Fall liegt die Hauptbegrenzung in den maximal erreichbaren elektrischen Feldern. Eine der wichtigsten Aufgaben der modernen Teilchenphysik besteht daher darin, neue Beschleunigungsmethoden zu entwickeln, um effizient höhere Energien zu erreichen.

◀ **Abb. 1** Ein Plasma ist eine Ansammlung freier positiver Ladungen (Ionen, blau) und negativer Ladungen (Elektronen, gelb). Die Elektronen sind viel leichter und beweglicher als die Ionen.

Teilchenbeschleunigung in Plasma wurde in den vergangenen Jahren zunehmend untersucht und könnte ein Weg zu kompakteren und kostengünstigeren Beschleunigern sein. Plasmabeschleuniger sind jedoch nicht nur für die Teilchenphysik interessant. Bei niedrigeren Energien könnten sie als effiziente Beschleuniger dienen, um Materie zu erforschen und neuartige Materialien zu entwickeln. So ist etwa der Einsatz plasmagestützter Beschleuniger für medizinische Zwecke angedacht. Daher treibt heute eine Vielzahl von Forschungsgruppen die Erforschung der Plasmabeschleunigung voran – von kleinen Universitätsgruppen, die sich mit laserbasierter Beschleunigung beschäftigen, bis hin zu großen Kollaborationen, die Teilchenstrahlen in nationalen oder internationalen Laboratorien einsetzen.

Dieser Artikel beschreibt die wichtigsten Konzepte plasmagestützter Beschleuniger und den aktuellen Stand der Forschung, mit einem Fokus auf Anwendungen in Hochenergie- und Teilchenphysik.

Beschleunigung im Kielfeld

Plasma ist eine Ansammlung elektrisch geladener Teilchen, die als Ganzes betrachtet elektrisch neutral ist. Es entsteht, wenn neutrale Atome ionisiert werden, wobei ein oder

mehrere negativ geladene Elektronen die Atome verlassen und positiv geladene Ionen zurückbleiben (**Abb. 1**). Tatsächlich liegt der größte Teil der Materie in unserem Universum in Form eines Plasmas vor. Die Sterne, einschließlich unserer Sonne, bestehen hauptsächlich aus Plasma sowie ein Großteil des interstellaren Mediums. Interessant ist, dass es durch Manipulation der Ladungen im Plasma möglich ist, Bereiche mit großer positiver oder negativer Nettoladung zu erzeugen. Zwischen diesen Bereichen herrschen sehr starke elektrische Felder, die bei ausreichender Kontrolle dazu dienen können, elektrisch geladene Teilchen auf hohe Energien zu beschleunigen.

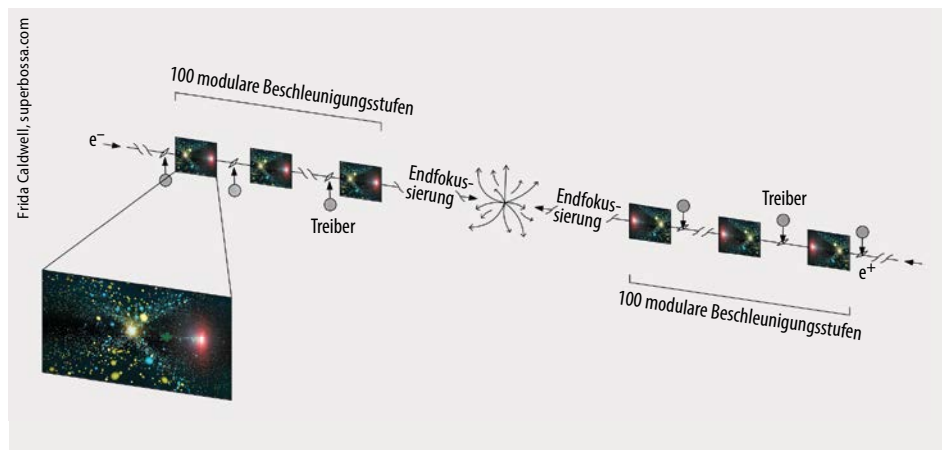
Die ersten Ideen [1] für die Nutzung von Plasma als Medium zur Beschleunigung von Teilchen basierten auf dem Einsatz von Lasern, sowohl zur Ionisierung der neutralen Atome, die ein Plasma bilden, als auch zum Initiieren einer „Plasmawelle“, auf der die zu beschleunigenden Teilchen „surfen“ können. Bei diesem Ansatz gibt ein intensiver, kurzer Laserpuls den in den Atomen gebundenen Elektronen einen starken Stoß, sodass sie sich vom Atom lösen und ein Plasma entsteht. Da die Ionen viel schwerer sind als die Elektronen, bewegen sie sich kaum. Daher verursacht die Bewegung der Elektronen den größten Teil der Wirkung.

Nachdem der kurze Laserpuls das Plasma passiert hat, kommt es zu einer Ladungstrennung innerhalb des Plasmas, wobei sich die Elektronen von der Richtung des Laserstrahls wegbewegen und die Ionen zurückbleiben (**Abb. 2**). Die Elektronen sind der elektrischen Anziehungskraft der Ionen ausgesetzt, die nahe ihrer ursprünglichen Position verbleiben. Dies bremst die Elektronen ab. An einem bestimmten Punkt kehren sie um und werden wieder in



Abb. 2 Breitet sich ein kurzer Laserpuls (rot) durch das Plasma nach rechts aus, werden die Elektronen des Plasmas (gelb) radial nach außen geschleudert, während sich die Ionen (blau) kaum bewegen. Nach dem Passieren des Laserpulses spüren die Elektronen die Anziehungskraft der positiv geladenen Ionen und eilen zurück in Richtung der Ausbreitungsachse des Laserpulses. Dadurch entsteht eine blasenartige Region hinter dem Laserpuls, die weitgehend frei von Elektronen ist. Hinter dieser Blase ist die Elektronendichte dagegen hoch.

Abb. 3 In diesem laserbasierten Beschleunigungskonzept kollidieren hochenergetische Elektronen (e^-) und Positronen (e^+). Die 100 Beschleunigungsschritte liefern jeweils 10 GeV an Energie. Jeder Schritt erfordert einen neuen Laserpuls (Treiber), der die Energie liefert. Nach der Beschleunigung werden die Teilchenbündel fokussiert und zur Kollision gebracht.



Richtung der Ionen beschleunigt. Wenn sie in den Bereich gelangen, den hauptsächlich die Ionen bevölkern, erreichen sie eine so hohe Geschwindigkeit, dass sie über ihr ursprüngliches Ziel hinausschießen und auf die andere Seite der Ionensäule gelangen. Schließlich verlangsamen sie sich und ändern erneut ihre Richtung. Die Bewegung wiederholt sich, sodass die Plasmaelektronen durch die Ionensäule hin und her oszillieren. Die Frequenz dieser Oszillation hängt von der Dichte des Plasmas ab und ist umso höher, je höher die Plasmadichte ist.

Der zeitliche Abstand zum Laserpuls bestimmt die Phase dieser Oszillation. Die entstehende blasenartige Struktur bewegt sich mit der Geschwindigkeit des Laserpulses nach rechts in Richtung des Laserpulses (**Abb. 2**). Dahinter bildet sich ein Bereich mit einer hohen Dichte von Plasmaelektronen aus, wenn die vom Laserpuls herausgeschleuderten Elektronen zur Achse zurückkehren. Der Abstand, in dem dies geschieht, ist wohldefiniert: Das Plasma hat eine Schwingungsfrequenz, die durch

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_p e^2}{\epsilon_0 m}}$$

gegeben ist, wobei n_p die Dichte der Plasmaelektronen ist, e die Elektronenladung, m die Elektronenmasse und ϵ_0 die Dielektrizitätskonstante des freien Raums. Da sich der Laserpuls mit nahezu Lichtgeschwindigkeit bewegt, gibt diese feste Frequenz einen genau definierten Abstand Δ zwischen dem Laserpuls und dem Bereich mit hoher Elektronendichte im Plasma vor. Für Plasmadichten in der Größenordnung von 10^{15} pro Kubikzentimeter beträgt dieser Abstand etwa ein Millimeter. Im Plasma entstehen also nahezu kugelförmige, millimetergroße Bereiche („Blasen“), in denen die Plasmaelektronendichte erheblich reduziert ist, gefolgt von einer Region mit hoher Plasmaelektronendichte. Die Ladungstrennung im Plasma führt zu sehr starken elektrischen Feldern, die bei dieser Plasmadichte bis zu 10 Gigavolt pro Meter betragen und damit um drei Größenordnungen stärker sind als die Felder in den heutigen Beschleunigern. Die Richtungen dieser Felder hängen von der Position innerhalb der Blase ab. In einem Bereich, der etwa ein Viertel des Durchmessers der Blase ausmacht, wirken die Felder sowohl beschleunigend als auch fokussierend auf die Elektronen. Die Möglichkeit, diese starken Felder derart zu nutzen, macht das Plasma als Beschleunigungsmedium so attraktiv.

Die obige Beschreibung geht davon aus, dass ein Laserpuls das Plasma erzeugt und die Plasmawelle auslöst. Schnell zeigte sich jedoch, dass sich das Plasma auch durch ein kurzes Elektronenbündel [2] oder durch ein Protonenbündel [3] anregen lässt. Ein geladenes Teilchen, das sich mit relativistischer Geschwindigkeit bewegt, erzeugt elektrische Felder, die einem Laserpuls ähneln. Eine Ansammlung solcher Teilchen kann starke transversale elektrische Felder erzeugen. Damit lassen sich die für die lasergetriebene Plasmawelle entwickelten Ideen auf teilchenbündelgetriebene Wellen übertragen. Die Konzepte der laser- und teilchengetriebenen Plasmawellen wurden experimentell verifiziert – mit erreichten Beschleunigungsfeldern von 10 bis 100 GV/m. Protonengetriebene Systeme erzeugen bislang wesentlich geringere elektrische Felder (ca. 1 GV/m).

Jedes der drei Beschleunigersysteme – laser-, elektronen- oder protonengetrieben – hat seine Vor- und Nachteile. Betrachten wir als Beispiel ein Elektronenbündel mit 10^{10} Elektronen, das auf 1 TeV beschleunigt werden soll.

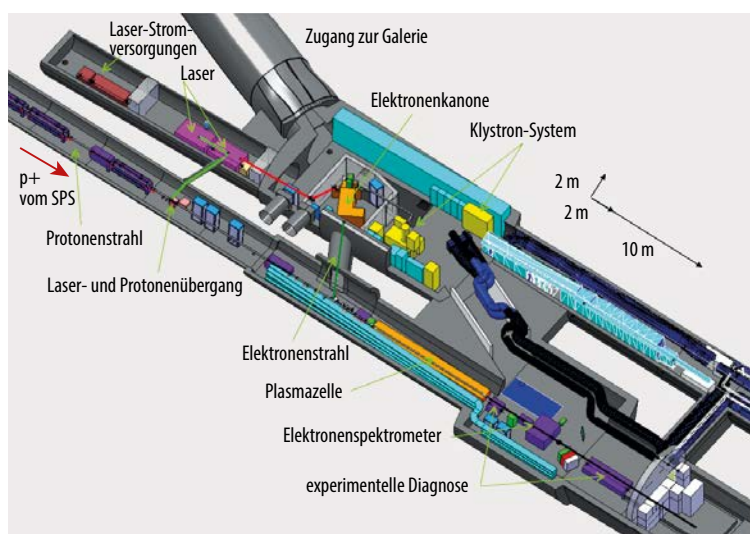


Abb. 4 Das hier gezeigte AWAKE-Experiment (Aufbau von 2022) zielt darauf ab zu zeigen, dass sich die protonengetriebene Plasma-Wakefield-Beschleunigung für Anwendungen in der Teilchenphysik eignet.

Dieses Elektronenbündel führt eine Energie von 1,5 kJ mit sich. Die Plasmabeschleunigung muss diese Energiemenge vom Treiber auf das „Zeugenbündel“ (Witness Bunch) übertragen, welches dasjenige ist, das wir beschleunigen wollen.

Mit Lasern beschleunigt

Auf den ersten Blick scheint es vorteilhaft, eine möglichst hohe Plasmadichte zu erzeugen, um die Stärke des Beschleunigungsfeldes zu maximieren. Aber es gibt mehr zu berücksichtigen: Der Laserimpuls breitet sich aufgrund des Brechungsindex des Mediums, in dem er sich bewegt, nicht mit Lichtgeschwindigkeit aus. Daher beginnen die Elektronen im Zeugenbündel, den Laserimpuls zu überholen und sich in einen Defokussierungsbereich der Blase zu bewegen. Hier gehen sie schnell verloren. Eine abgestufte Plasmadichte kann diesen Effekt teilweise kompensieren. Ein weiteres Problem ist der Energieverlust des Laserpulses beim Durchqueren des Mediums. Herkömmliche Hochleistungslaser können einige 10 Joule Energie pro Puls liefern. Ist das Beschleunigungsmedium sehr dicht, verbraucht diese sich schnell. Die ideale Plasmadichte für Anwendungen der Hochenergiephysik hängt daher von einer Reihe konkurrierender Faktoren ab.

In einem in [4] beschriebenen Schema würde ein Plasma mit einer Dichte von etwa $n_p = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ in jeder Beschleunigungsstufe die Energie der beschleunigten Teilchen um etwa 10 GeV erhöhen. Für 1 TeV Energie wären somit 100 Beschleunigungsstufen hintereinander notwendig (Abb. 3). Dies macht die Realisierung des Beschleunigers komplizierter, da jede einzelne Sektion einen neuen Laserpuls erfordert und das zu beschleunigende Zeugenbündel in die nächste Beschleunigungssektion geleitet werden muss. Hierfür gilt es zu zeigen, dass dies effektiv möglich ist. Die Lücken zwischen den Plasmasektionen dürften vermutlich um einiges länger sein als die Beschleunigungssektionen selbst, sodass ein durchschnittlicher Beschleunigungsgradient von etwa 1 GV/m zu erwarten ist.

Die oben beschriebene Methode der Beschleunigung ist allerdings nicht direkt auf Positronen übertragbar. Diese müssten sich für die Beschleunigung zwangsläufig an einem anderen Ort aufhalten, nämlich hinter dem Bereich der hohen Plasmaelektronendichte. Nur dann kann die Plasma-welle die Positronen mit sich ziehen. Dieser Prozess ist schwieriger zu kontrollieren als die Beschleunigung von Elektronen und bislang noch nicht verifiziert.

Ein weiteres Problem, das noch zu lösen ist, um die lasergetriebene Plasma-Wakefield-Beschleunigung zu einer realistischen Alternative für die Teilchenbeschleunigung zu machen, betrifft die Laser: Sie müssen wesentlich leistungsfähiger sein, damit die Anforderungen an das Stromnetz akzeptabel bleiben. Darüber hinaus müssten die Laserpulse wesentlich besser zu reproduzieren und zu kontrollieren sein. Die Entwicklungen in der Lasertechnik schreiten rasant voran, sodass es möglich scheint, in nicht allzu ferner Zukunft tatsächlich energieeffiziente Laser zur Verfügung zu haben. Forschungsgruppen auf der ganzen Welt arbeiten daran, diese Herausforderungen zu lösen.



Maximilien Brice / CERN

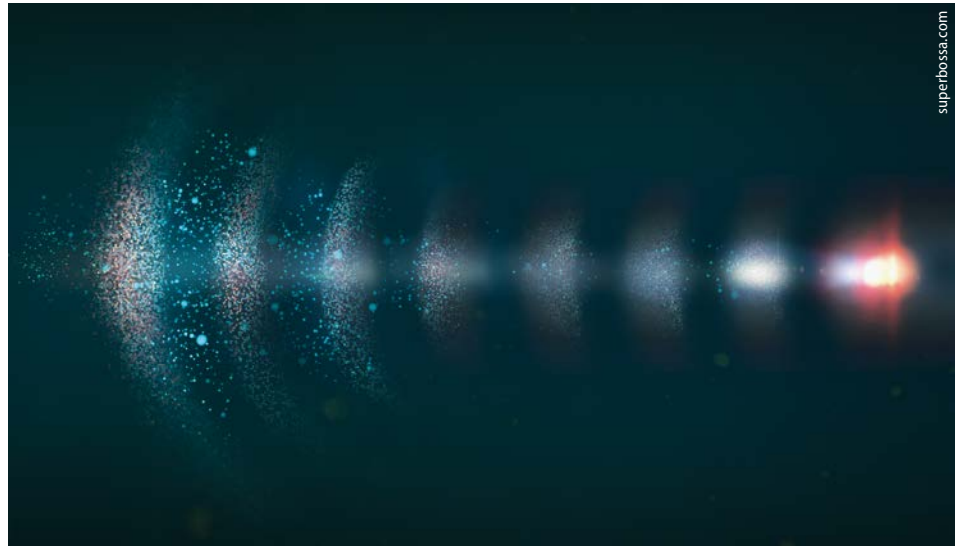
Abb. 5 Eine neuartige Plasmazellentechnologie auf Basis von Rubidiumdampf – hier die Rb-Dampfquelle im Tunnel – bildet das Kernstück des AWAKE-Experiments.

Antreibende Elektronen

Bei der elektronengetriebenen Plasma-Wakefield-Beschleunigung gibt es keine Probleme mit der Geschwindigkeit des Plasmawellentreibers. Die Geschwindigkeit der Elektronen ändert sich nicht nennenswert, wenn sich die Plasmadichte oder ihre Energie erhöht. Jedoch gelten auch hier Einschränkungen für die Energie der Treiber, da die starken Felder im Plasma die Elektronen abbremsen, welche die Plasmawelle antreiben. Das Plasma kann in der Tat als Transformator gelten, der dem treibenden Bündel Energie entzieht und sie an das Zeugenbündel weitergibt. Man geht davon aus, dass die Erhöhung der Energie von Zeugenelektronen um E_0 eine Energie nahe E_0 pro Treiber-elektron erfordert. Das vorgesehene Schema, um hohe Energien zu erreichen, basiert auch hier auf der Verwendung von Beschleunigungsschritten (Abb. 3). So könnten 40 Beschleunigungsschritte mit je 25 GeV Energiegewinn die notwendigen 1 TeV Energie für die Zeugenteilchen bereitstellen. Zwischen den Beschleunigungsabschnitten wären wiederum beträchtliche Abstände nötig. Wie beim obigen Beispiel mit Laserantrieb wäre somit ein durchschnittlicher Beschleunigungsgradient von etwa 1 GV/m vorzusehen.

Die Erzeugung hervorragend kontrollierter Elektronenbündel mit Elektronenenergie von 25 GeV oder mehr ist heute mit Standardbeschleunigertechnologien möglich, sodass der für die Plasma-Wakefield-Beschleunigung erforderliche Antrieb bereits vorhanden ist. Das zum Erreichen der gewünschten hohen Energien notwendige Schema mit vielen Beschleunigungsschritten könnte die Dichte der Teilchen eines Bündels im Phasenraum erheblich verringern. Dass dies nicht der Fall ist, bleibt noch zu zeigen. Dieses schwierige Thema steht im Mittelpunkt der aktuellen Forschung. Wie beim lasergetriebenen System ist auch das Konzept für die Beschleunigung von Positronen herausfordernd. Kürzlich haben Brian Foster und Kollegen vorgeschlagen [5], einen Standardbeschleuniger für

Abb. 6 Ein langes Protonenbündel, das sich im Plasma bewegt, wird quer moduliert, was zu Regionen mit hoher Protonenbündeldichte und dazwischen liegenden Bereichen mit defokussierten Protonen führt. Die Abbildung zeigt einen Laserpuls (rot), der diesen Prozess auslöst. Die transversale Modulation komprimiert und dekomprimiert nacheinander das Protonenbündel. Der Abstand zwischen den komprimierten Regionen ist genau so groß, wie es für die kohärente Verstärkung der Plasmawelle erforderlich ist.



die Positronenbeschleunigung zu verwenden. Die Elektronen würden in einem Plasma-Wakefield-Beschleuniger auf hohe Energien beschleunigt. Damit wären die Schwerpunktsenergien erreichbar, die erforderlich sind, um Higgs-Bosonen zu erzeugen und zu untersuchen. Dies würde eines der Hauptprobleme bei der Umsetzung eines Elektron-Positron-Colliders mit plasmabasierter Beschleunigung beseitigen.

Das AWAKE-Experiment

Protonenbündel als Treiber der Plasmawelle unterscheiden sich erheblich von Laser oder Elektronenbündeln, da sie mit sehr viel höherer Energie auf das Plasma treffen können. Beispielsweise haben die Protonen im LHC Energien von fast 7 TeV, die Bündel tragen bis zu 300 kJ. Dadurch würden die Einschränkungen für die Energie der Treiber weitgehend wegfallen. Angesichts dieser hohen Energie wären nicht viele Beschleunigungsschritte erforderlich, was den Beschleuniger erheblich vereinfachen würde. Es gibt jedoch noch andere Überlegungen, die für die Verwendung von Protonen in Plasmabeschleunigern relevant sind. Zum einen sind die Protonenbündel mit einer Länge von etwa 10 cm recht lang und können daher nicht direkt zum Antrieb von Plasmastrukturen im Millimeterbereich dienen. Hierfür müsste der Treiber in der Größenordnung von höchstens 100 μm liegen. Laserpulse und Elektronenbündel lassen sich leicht mit dieser Anforderung in Einklang bringen, aber bei Protonenbündeln ist dies nicht so einfach.

Das AWAKE-Experiment (Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Acceleration, **Abb. 4**) soll protonengetriebene Plasma-Wakefield-Beschleunigung für Anwendungen in der Teilchenphysik demonstrieren. Der Protonenstrahl aus dem SPS am CERN kommt für Plasma-Wakefield-Studien zum Einsatz, eine spezielle Elektronenquelle für Beschleunigungsstudien. Kernstück des AWAKE-Experiments ist eine neuartige Plasmazellentechnologie auf Basis von Rubidiumdampf, die Patric Muggli am Max-Planck-Institut für Physik konzipiert und in Zusammenarbeit mit Wright Design Ltd in Großbritannien

nien realisiert hat (**Abb. 5**). Ein kurzer Laserpuls erzeugt das Plasma.

Das Plasma selbst überwindet die Einschränkung, dass Protonenbündel normalerweise zu lang sind, um Plasmastrukturen im Millimeterbereich anzutreiben. Wenn ein langes Protonenbündel das Plasma durchläuft, führen kleine Elektronenschwingungen des Plasmas dazu, dass die Protonen darin in einem Abstand Δ transversal fokussiert und defokussiert werden. Diese anfänglichen Plasmawellen lassen sich beispielsweise durch einen Laserpuls auslösen. Das sich daraus ergebende Muster aus transversaler Fokussierung und Defokussierung des Protonenbündels führt zu einer Struktur von „Mikrobündeln“. Diese Modulation verwandelt das lange Protonenbündel in eine Reihe von Mikrobündeln mit einem Abstand Δ untereinander (**Abb. 6**). Die Wirkung dieser Mikrobündel verstärkt kohärent die Plasmawelle und erzeugt nach dem Durchlaufen einer ausreichenden Anzahl von Mikrobündeln starke elektrische Plasmfelder. Das AWAKE-Experiment hat in einem ersten Schritt gezeigt, dass sich dieser Prozess tatsächlich wie erwartet entwickelt und gut kontrollieren lässt. Darauf aufbauend ist es gelungen, die Elektronenbeschleunigung in einer protonengetriebenen Plasmawelle erfolgreich umzusetzen [6].

Von der Forschung zur Realisierung

Schon heute ist es möglich, Protonenbündel mit der erforderlichen Energie zu erzeugen, um Elektronen im Plasma auf hohe Energien zu beschleunigen. Auch die Steuerung der Modulation der langen Protonenbündel ist gelungen, sodass diese langen Bündel starke Plasmawellen erzeugen können. Dies ermöglicht ein Schema, bei dem ein erster Plasmaabschnitt dazu dient, die langen Protonenbündel in eine Reihe kurzer Mikrobündel zu modulieren, gefolgt von einem langen Beschleunigungsabschnitt. Die Zeugenbündel werden zwischen die beiden Plasmasektionen injiziert und in einem einzigen Schritt auf Energien nahe der Protonenenergie beschleunigt. Hierbei beträgt das elektrische Feld durchschnittlich etwa 1 GV/m. Um hohe Energien wie das

oben beschriebene Ziel von 1 TeV zu realisieren, sind lange Plasmen von hunderten von Metern mit guter Dichtegleichmäßigkeit erforderlich. Die Erzeugung solcher Plasmen ist derzeit Thema von Forschung und Entwicklung an vielen Instituten. Wenn diese Bemühungen erfolgreich sind, könnte ein Teilchenphysikprogramm, das auf der Beschleunigung von Teilchenbündeln auf hohe Energien mithilfe eines Protonentreibers beruht, Wirklichkeit werden.

In Zukunft ist es denkbar, kürzere Protonenbündel durch eine Rotation der Protonenbündel im Phasenraum zu erzeugen, da die Streuung der Protonenimpulse sehr klein ist. Eine solche Phasenraumrotation ist schwierig und wird derzeit erforscht. Sie würde es ermöglichen, die Vorteile der kurzen Laser- und Elektronenbündeltreiber mit der hohen Energie der Protonenbündel zu kombinieren. Eine so hohe Wiederholrate für die Protonenbündeltreiber zu erzeugen, ist jedoch sehr herausfordernd.

Das Potenzial der plasmabasierten Beschleunigung ist beträchtlich und hat viele Forschungsgruppen weltweit zu entsprechenden Forschungsarbeiten veranlasst, um sie Wirklichkeit werden zu lassen. Die Fortschritte sind stetig und es ist zu erwarten, dass es bald erste Anwendungen geben wird, in denen plasmabasierte Beschleunigung die herkömmliche Beschleunigung übertrifft.

*

Ich danke Emma Caldwell und Jakob Prunkl bei der Erstellung des Artikels in deutscher Sprache.

Literatur

- [1] T. Tajima und J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett. **43**, 267 (1979)
- [2] P. Chen et al., Phys. Rev. Lett. **54**, 693 (1985) und **55**, 1537 (1985)
- [3] A. Caldwell et al., Nature Phys. **5**, 363 (2009)
- [4] W. Leemans und E. Esarey, Physics Today **62**, 44 (2009)
- [5] B. Foster, R. D'Arcy und C. A. Lindstrom, New J. Phys. (2023), DOI: 10.1088/1367-2630/acf395
- [6] E. Adli et al. [AWAKE], Nature **561**, 363 (2018)

Der Autor



Allen Caldwell studierte Physik an der Rice University in Texas (USA) und an der University of Wisconsin, wo er auch promovierte. Danach forschte er 15 Jahre lang an der Columbia University (New York). Dort wurde ihm der Professoren-Titel verliehen. 1997 übernahm er die Leitung des ZEUS-Experiments am HERA-Beschleuniger bei DESY

in Hamburg. 1999 wurde er Direktor des Nevis Laboratory der Columbia University, seit 2002 ist er Mitglied des Direktoriums des Max-Planck-Instituts für Physik. Bis Ende 2022 leitete er das AWAKE-Experiment am CERN.

Prof. Dr. Allen Caldwell, Max-Planck-Institut für Physik, Föhringer Ring 6, 80805 München



Quantum Design
EUROPE

qd-europe.com

OptiCool™ - Innovatives Design mit optimiertem optischen Zugang

- 1.7 K Kryostat
- 7 Tesla Split-Coil Magnet
- Leistungsstarke Vibrationsisolierung
- 8 optische Fenster
- Installation auf optischem Tisch
- Kryogenfrei



Quantum Design Europe – Ihr Partner für Kryotechnologie
✉ appel@qd-europe.com

