

## Mehr Schub mit Plasmawellen

Mit der Wakefield-Beschleunigung lassen sich Elektronen mit Energien im GeV-Bereich erzeugen. Das könnte in Zukunft die Größe von Beschleunigeranlagen erheblich verringern.

Florian Grüner

Die Plasma-Wakefield-Beschleunigung verspricht Beschleunigeranlagen, die wenig Platz brauchen und dennoch Energien erreichen, die wir heute nur von großen Ring- oder Linearbeschleunigern kennen. Die erstmals 1979 vorgeschlagene Methode beruht darauf, eine kollektive Bewegung von Plasmaelektronen zu erzeugen – das „Wakefield“, das im Inneren ein sehr starkes Beschleunigungsfeld besitzt [1]. Dessen Amplitude ist im Gegensatz zu herkömmlichen Techniken mit Hochfrequenzpulsen unbegrenzt. Mit der Wakefield-Beschleunigung lassen sich hohe Energien auf kleinen Distanzen erreichen, was zu deutlich kleineren und kostengünstigeren Anlagen als bisher führen kann. Verschiedene Methoden können zu Wakefields führen, bei zwei davon gelangen kürzlich signifikante Fortschritte. Lasergetriebene Wakefields erzeugten Elektronen mit einer Energie von 8 GeV – das ist doppelt so viel wie der bisherige Rekord [2]. Protonenstrahlen beschleunigten Elektronen auf bis zu 2 GeV [3 – 5].

Um zu verstehen, wie ein Plasma-Wakefield funktioniert, hilft ein Kondensator als Analogie. Dessen parallele Platten sind gegensätzlich geladen, sodass das elektrische Feld Partikel von einer Platte zur anderen beschleunigt. In einem Gas kann ein ähnliches Feld entstehen, wenn ein „Treiber“ negativ geladene Elektronen von den positiv geladenen Ionen trennt und sich das Wakefield aufbaut. Damit dieses stabil bleibt, muss die Länge des Treibers geringer als die Plasmawellenlänge sein. Letztere gibt die räumliche Skala für eine kohärente „Antwort“ des Plasmas auf eine Störung an. Innerhalb des Wakefields kann das elektrische Feld – ausgedrückt als Spannungsgradient –  $10^{12}$  Volt pro Meter (1 TV/m) erreichen. Herkömmliche Beschleuniger sind auf 100 MV/m



Wie ein Wellenreiter, der beim Wakesurfen die Heckwelle eines Bootes nutzt, um voran zu kommen, lassen sich Elektronen im Plasma mit einem Wakefield beschleunigen.

limitiert, um nicht durch elektrische Entladungen beschädigt zu werden.

Grundsätzlich ermöglicht die Wakefield-Beschleunigung also „Table-top“-Anlagen. Doch es gibt ein Problem: Ist der Treiber ein Laserpuls, reduziert sich dessen Geschwindigkeit in einem Plasma, entspricht also nicht mehr Vakuum-Lichtgeschwindigkeit. Ab einem bestimmten Punkt sind die Elektronen dem beschleunigenden Teil des Wakefields voraus („Dephasing“) – vergleichbar mit einem Wellenreiter, der schneller ist als die Welle selbst. Das limitiert den maximal erreichbaren Energiezuwachs für eine Beschleunigungsstufe. Für Laser mit einer Spitzenleistung von 1 PW liegt diese Grenze im Bereich von etwa 10 GeV [6]. Will man also für die Hochenergiephysik typische Energien von 1 TeV erreichen, sind hundert Stufen hintereinander zu schalten. Jede davon braucht einen eigenen Petawatt-Laser, und alle Laser müssen miteinander synchronisiert arbeiten. Doch zunächst gilt es, den Zuwachs von 10 GeV mit einer

Stufe zu realisieren. 2004 gelang es, die ersten laserbeschleunigten Elektronen mit einem nichtthermischen Energiespektrum von etwa 100 MeV zu erzeugen [7]. Zwei Jahre später lag die Spitzenenergie mit 1 GeV bereits eine Größenordnung höher [8]. Nun haben Anthony Gonsalves vom Lawrence Berkeley National Laboratory in Kalifornien und seine Kollegen es geschafft, Elektronen mit Lasern auf 8 GeV zu beschleunigen [2].

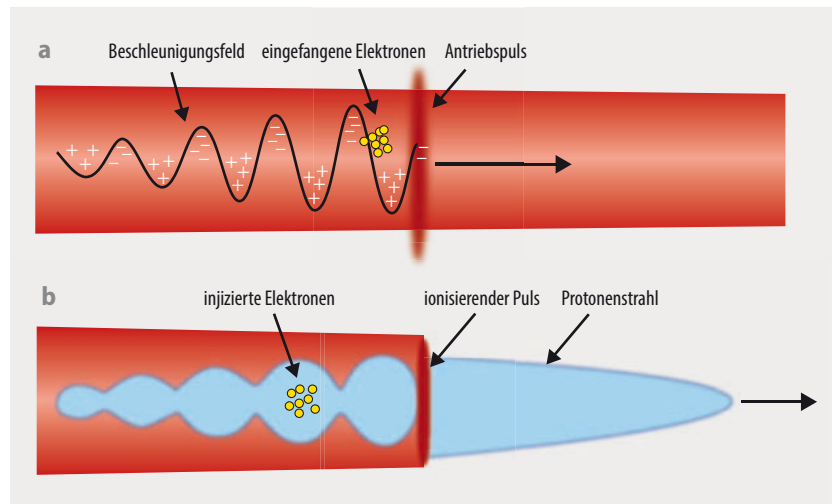
Die Elektronenenergie so deutlich zu steigern, erfordert immer komplexere Aufbauten. Die ersten Experimente arbeiteten nur mit einem Laser, der sowohl das Plasma durch Gasionisation als auch das Wakefield erzeugte. Bei der nächsten Generation fand die Ionisation in einer Entladungskapillare statt. Dieser Gasbehälter besteht meist aus Glas und besitzt einen Innendurchmesser, der kleiner ist als der eines menschlichen Haares. Eine hohe Spannung an der Kapillare ionisiert durch Entladung das Gas und erzeugt ein Plasma, dessen Dichte auf der Kapillarenachse am niedrigsten

ist, da die Wände am schnellsten abkühlen (Abb. 1a). Dieser transversale Dichtegradient hilft, den Laserimpuls über Beschleunigungslängen von etwa 10 cm zu führen. Nun verbessert erstmals ein zweites Lasersystem das Design: Dieses wirkt wie eine zusätzliche Heizung und erhöht den transversalen Plasmadichtegradienten weiter – eine Voraussetzung, um Elektronen mit 8 GeV Energie zu erzeugen [2].

Eine Alternative zum Umgehen des „Dephasing“-Problems stellen hochenergetische Protonenstrahlen als Treiber dar, deren Geschwindigkeit im Plasma deutlich näher an der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit liegt. Hier gibt es ein anderes Problem. Der Protonenstrahl ist meist viel ausgehnter als die Plasmawellenlänge, sodass kein stabiles Wakefield entstehen kann. Durch Wechselwirkungen der Protonen mit dem Plasma kann es zu einer spontanen Dichtemodulation entlang des Strahls kommen. Dabei variiert der Durchmesser des Strahls periodisch mit der Plasmawellenlänge, sodass zwischen diesen „Mikropaketen“ stabile Wakefields entstehen (Abb. 1b). Eine laserinduzierte Ionisierungsfront hilft als „Initialzündung“, diese spontane Selbstmodulation auszulösen.

Anfang 2018 demonstrierte das Advanced Wakefield Experiment (AWAKE) am Super Proton Synchrotron des CERN, dass ein Beschleunigen von Elektronen mit 400-GeV-Protonenstrahlen möglich ist [3]. Die Energie der Elektronen stieg nach der Injektion in den Protonenstrahl um 2 GeV an. Weitere Untersuchungen bestätigten, dass die etwa zehn Zentimeter langen Protonenpakete eine Dichtemodulation entlang des Strahls mit einer Periode von zwei Millimetern aufbauen, genau wie für Selbstmodulation vorhergesagt [4, 5]. Die Beschleunigung der Elektronen erfolgte auf zehn Meter Länge, was etwa einem Faktor 100 im Vergleich zur lasergetriebenen Wakefield-Beschleunigung entspricht. Grund dafür ist die viel geringere Plasmadichte und damit ein schwächerer elektrischer Feldgradient bei der Protonenbeschleunigung.

Trotz dieser vielversprechenden Erfolge sind die Elektronenstrahlen



**Abb. 1** Ein intensiver Laserpuls, der auf ein vorgeformtes Plasma gerichtet wird, kann zur Wakefield-Beschleunigung dienen (a). Der Laserpuls induziert die Ladungstrennung im Plasma, und das resultierende elektrische Feld kann die eingeschlossenen Elektronen beschleunigen. Alternativ kann ein weniger intensiver Laserpuls das Gas in der Mitte eines hochenergetischen Protonenstrahls ionisieren (b). Die Modulation des Strahls führt zu Mikropaketen, die eingespeiste Elektronen beschleunigen können.

aus der Wakefield-Beschleunigung bisher noch keine Konkurrenz zu denen aus konventionellen Beschleunigern. Beispielsweise fehlt es an Stabilität, weil die Hochleistungslaser nicht bei jedem „Schuss“ exakt gleiche Pulse liefern. Außerdem treten beim Einfangen und Beschleunigen der Elektronen im Wakefield statistische Prozesse auf, durch die die Strahlqualität intrinsisch schwankt. Herausforderung und Gegenstand der aktuellen Forschung ist es daher herauszufinden, welche Parameter die Strahlqualität in welcher Art beeinflussen und wie sich diese Parameter künftig steuern lassen, um Anwendungen, etwa in der Hochenergiephysik, zu ermöglichen. Das laserbasierte Verfahren eignet sich auch für kompakte Röntgenquellen, um künftig Synchrotronquellen und Freie-Elektronen-Laser ergänzen zu können. Dann könnten Universitäten solche Quellen selbst betreiben und unabhängig von den weltweit stark überbuchten Strahlungsquellen forschen. Auch eine klinische Anwendung in der medizinischen Bildgebung wäre damit denkbar.

Um die jüngsten Fortschritte zu bewerten, gilt es, einen Startpunkt für das Forschungsgebiet zu definieren. Bei der Mondlandung würde niemand sagen, dieses Projekt hätte 1865 mit Jules Verne begonnen. Ähnlich ist die

Idee der Wakefield-Beschleunigung bereits 40 Jahre alt, die erforderlichen Hochleistungslaser (Physik-Nobelpreis 2018) stehen aber erst seit etwa 20 Jahren zur Verfügung. Ich würde den Startpunkt daher im Jahr 2004 sehen, als weltweit erstmals „quasimonochromatische“ Elektronenstrahlen nach wenigen Millimetern auf 100 MeV beschleunigt wurden. Verglichen mit der konventionellen Beschleunigerphysik steckt das Gebiet also noch in den Kinderschuhen.

- [1] T. Tajima und J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett. **43**, 267 (1979)
- [2] A. J. Gonsalves et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 084801 (2019)
- [3] E. Adli et al. (AWAKE Coll.), Nature **561**, 363 (2018)
- [4] M. Turner et al. (AWAKE Coll.), Phys. Rev. Lett. **122**, 054801 (2019)
- [5] E. Adli et al. (AWAKE Coll.), Phys. Rev. Lett. **122**, 054802 (2019)
- [6] C. B. Schroeder et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **13**, 101301 (2010)
- [7] C. G. R. Geddes et al., Nature **431**, 538 (2004); S. P. D. Mangles et al., **431**, 535 (2004); J. Faure et al., **431**, 541 (2004)
- [8] W. P. Leemans et al., Nat. Phys. **2**, 696 (2006)

## Autor

**Prof. Dr. Florian Grüner**, Universität Hamburg und Center for Free-Electron Laser Science, Luruper Chaussee 149, 22761 Hamburg