

Kompakte

Teilchenbeschleuniger der Zukunft

Plasmawakefeldbeschleunigung stellt einen vielversprechenden Ansatz für zukünftige Teilchenbeschleuniger dar. Das Forschungsfeld befindet sich gerade in einer sehr dynamischen Phase. Das liegt vor allem an der rasant fortschreitenden Lasertechnologie, die bereits Hochleistungspulse sehr kurzer Dauer für entsprechende Experimente zur Verfügung stellt. In diesem Artikel werden die Grundlagen der Plasmawakefeldbeschleunigung erläutert; der aktuelle Forschungsstand wird beschrieben sowie die Zukunftsperspektiven diskutiert.

► Compact Particle Accelerators for the Future

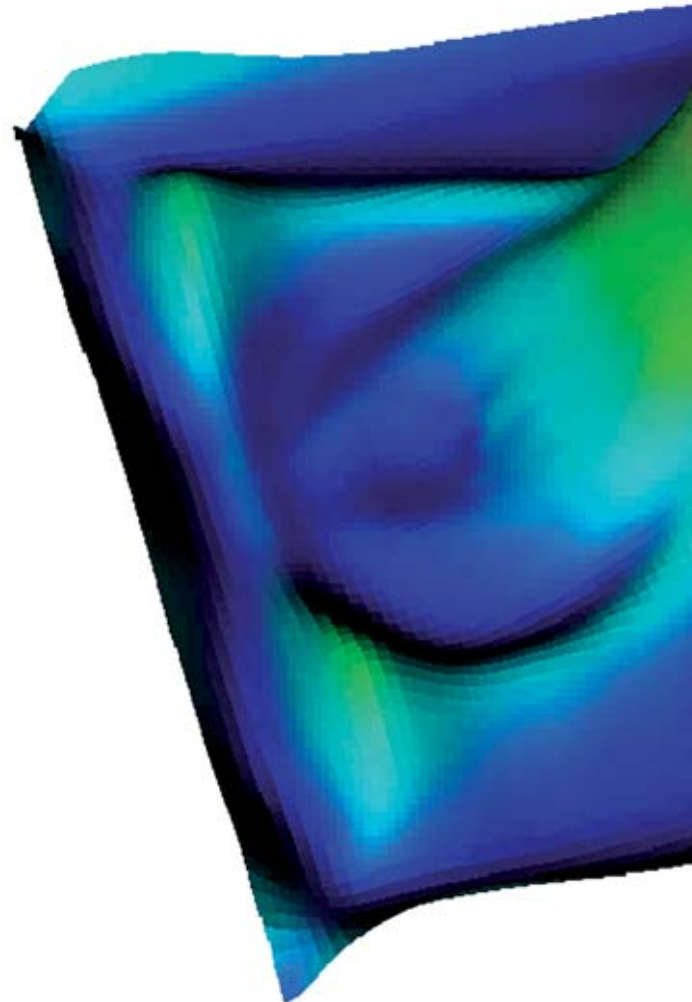
Plasma Wakefield Acceleration is a very promising approach for future particle accelerators. The field is presently undergoing major developments. This is mainly due to the rapidly advancing laser technology, which provides high-power pulses of very short duration for this kind of experiments. In this paper the basics of Plasma Wakefield Acceleration are explained. Furthermore, the state-of-the-art and future perspectives of this technology are discussed.

Erion Gjonaj, Thomas Weiland • Teilchenbeschleuniger sind ein wichtiges Instrument der Grundlagenforschung. Sie finden ihre Anwendung längst auch in anderen Gebieten wie beispielsweise zur Erzeugung kurzweiliger Laserstrahlen, zur Tumorbehandlung in der Medizin und in der materialverarbeitenden Industrie. Der derzeit leistungsfähigste Beschleuniger ist der Large Hadron Collider am Europäischen Forschungslabor CERN. Dort werden Protonenstrahlen in ringförmigen Bahnen auf Energien von bis zu 3.5 TeV gebracht. Ein weiteres Großprojekt, das sich gegenwärtig in der Entwurfsphase befindet, ist der International Linear Collider (ILC). Dabei handelt es sich um einen 27 km langen Linearbeschleuniger für Elektronen und Positronen mit einer Endenergie von 0.5 TeV bis etwa 1 TeV. Der Kern des ILC besteht aus ca. 16.000 supraleitenden Hochfrequenzresonatoren, die Beschleunigungsfeldstärken von über 30 Millionen Volt pro Meter (MV/m) ermöglichen sollen. Gleichwohl ist die Entwicklung, Fertigung und Pflege derartiger Anlagen mit erheblichen Kosten verbunden. Bezeichnend dafür sind die voraussichtlichen Kosten des ILC. Diese sollen sich auf mindestens 10 Milliarden US Dollar belaufen. Daher wird seit vielen Jahren und immer

wieder versucht, vollkommen neue Wege zur Teilchenbeschleunigung zu gehen. Die Plasmawakefeldbeschleunigung (PWFA) steht als letzte in der langen Reihe früherer Bemühungen, kompaktere und kostengünstigere Beschleunigeranlagen zu ermöglichen.

Prinzip der PWFA

Wird ein zunächst ruhendes Plasmamedium durch einen elektromagnetischen Puls angeregt, so werden vorzugsweise die leichten Elektronen in Bewegung gesetzt. Es kommt im Bereich des Pulses zur

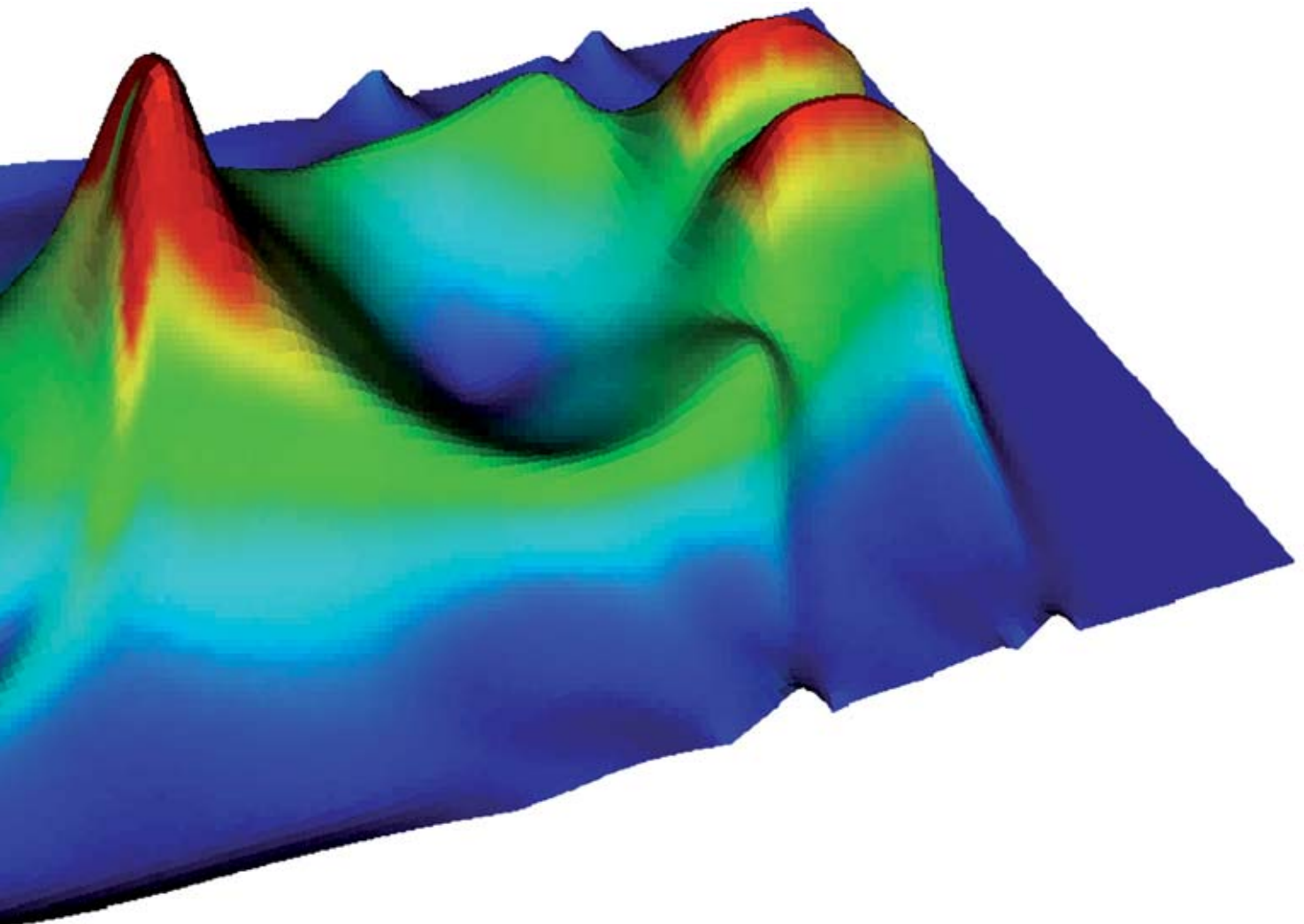


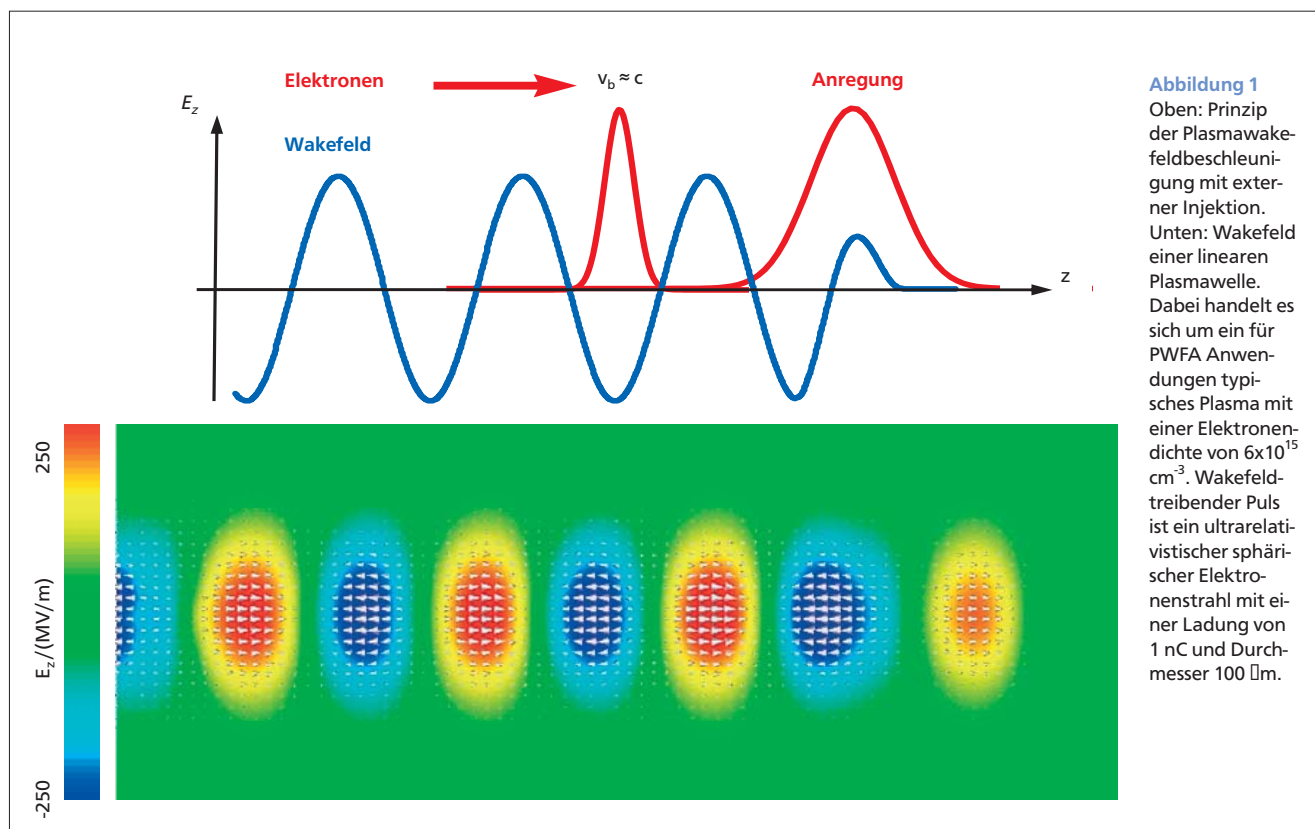
Ladungstrennung zwischen den beweglichen Elektronen und den, aufgrund ihrer größeren Masse, im Hintergrund weitgehend statisch verbleibenden positiv geladenen Ionen. Die Plasmaelektronen werden von den Ionen zurückgezogen und beginnen somit eine Schwingbewegung um ihre ursprünglichen Positionen herum. Die so entstandene Modulation der Plasmadichte zeichnet sich durch ein starkes elektromagnetisches Feld aus, das sich hinter dem treibenden Puls wellenartig ausbreitet. In der Literatur hat sich für dieses Feld die anschauliche Analogie mit der Welle am Kielwasser eines

Schiffes (engl. wake) etabliert – daher auch die Bezeichnung „Wakefeld“.

Wakefelder in Plasmen besitzen, ähnlich wie die HF-Felder in herkömmlichen Beschleunigerresonatoren, eine ausgeprägte longitudinale elektrische Komponente. Damit können diese im Prinzip Energie auf geladene Teilchen übertragen. Das kann beispielsweise geschehen, indem ein Teilchenpaket von außen in das Plasma injiziert wird (siehe Abbildung 1). Wird der Zeitpunkt der Injektion genau mit einer beschleunigenden Phase des Wakefeldes abgestimmt, so kann das Teilchenpaket Energie ge-

Blasenförmiges Wakefeld (elektrische Feldstärke) eines Elektronenstrahls im Plasma.





winnen. Es handelt sich hierbei um das sog. PWFA mit externer Injektion. Dieses Beschleunigungsschema wurde bereits früh von Tajima (1979) vorgeschlagen [1], wobei als Anregungspuls ein Laserpuls dienen sollte. Plasmawakefelder können alternativ auch mithilfe eines hochenergetischen Teilchenstrahls angeregt werden, der zuvor in ei-

nem herkömmlichen Beschleuniger erzeugt wurde (Chen, 1985) [2].

Abbildung 1 zeigt das Beispiel eines Plasmawakefeldes. Die Ähnlichkeit mit den stehenden Wellen in herkömmlichen Beschleunigerresonatoren ist nahezu vollkommen. Die Feldstärke im Plasma liegt allerdings um ca. sechs Mal höher als die Feldstärken, die in supraleitenden Kavitäten jemals erzeugt werden konnten. Die Länge eines PWFA-Beschleunigers würde dementsprechend nur ein Sechstel eines HF-Beschleunigers betragen müssen, um die gleiche Teilchenenergie zu erzielen.

Die Anwendung von PWFA mit externer Injektion unterliegt allerdings grundsätzlichen Einschränkungen. Da Plasmawakefelder mit einer niedrigeren Phasengeschwindigkeit als die Lichtgeschwindigkeit in Vakuum propagieren, kann das Teilchenpaket nach kurzer Zeit die beschleunigende Phase ver-

Institut für Theorie Elektromagnetischer Felder

Erion Gjonaj

Tel. 06151/16-2561

E-Mail: gjonaj@temf.tu-darmstadt.de

Thomas Weiland

Tel. 06151/16-2161

E-Mail: thomas.weiland@temf.tu-darmstadt.de

www.temf.de

lassen. Ähnlich verhält es sich mit der Stärke des Anregungspulses. Dieser, ob Laser oder Teilchenstrahl, verliert nach kurzer Strecke an Intensität und ist somit nicht in der Lage, weiterhin das Wakefeld zu tragen. Damit darf die effektive Beschleunigungstrecke nur wenige Zentimeter betragen. Aus diesen Gründen erwies sich das Verfahren mit externer Injektion im Hinblick auf die Anforderungen moderner Teilchenbeschleuniger bis heute als ungeeignet.

PWFA Forschung heute

In den späten 90er Jahren versuchte man kurze Laserpulse hoher Intensität in PWFA Experimente einzusetzen. Die Hoffnung war, Feldstärken von mehreren Hunderten GV/m anzuregen, um dadurch die notwendige Beschleunigungstrecke zu verkürzen. Diese Entwicklung war nicht zuletzt einer neuen Generation von ultrastarken Lasern zu verdanken, die es ermöglichten, Laserpulse von wenigen 10 fs Dauer und Leistungen von mehreren PW zu erzeugen. Es waren jedoch nicht die Laborversuche, sondern numerische Simulationen, die den Durchbruch schafften. Pukhov (2002) [3] entdeckte in aufwendigen Simulationen einen hoch nicht-linearen aber stabilen Plasmavorgang. Ist der Anregungspuls stark genug, so werden fast alle Plasmaelektronen aus seiner Umgebung verdrängt. Es entsteht ein blasenförmiges elektronenfreies Gebiet „bubble“, das sich synchron mit der Anregung bewegt und durch besonders starke Wakefelder gekennzeichnet ist (vgl. Abbildung 2). Die wichtigste Beobachtung dabei ist, dass einige Plasmaelektronen in der Blase gefangen werden können, und dass das so gebildete Elektronenbündel sich automatisch in der Beschleunigungsphase des Wakefeldes befindet. Somit gewinnt es stets Energie und kann als neuer hochenergetischer Elektronenstrahl aus dem Plasma extrahiert werden.

Der Selbstinjektionsmechanismus wurde im Jahr 2004 von drei Gruppen in Großbritannien, den USA und Frankreich unabhängig voneinander experimentell bestätigt [4,5,6]. Dabei konnten Elektronenstrahlen mit einer Energie von bis zu 170 MeV erzeugt werden. Ein weiterer Meilenstein der Forschung zeichnete sich 2006 ab. Lehmanns et al. gelang es, einen Elektronenstrahl in einem durch Kapillarentladung präpariertem Plasmakanal auf 1 GeV zu beschleunigen [7]. Die Energieabweichung

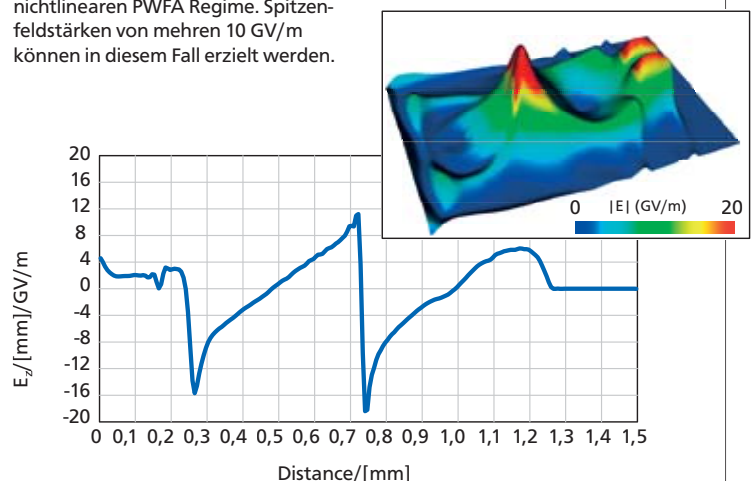
des Elektronenstrahls betrug dabei weniger als 5%. Im Jahre 2008 berichtete eine Gruppe aus Jena erstmalig über einen Freien-Elektronen-Laser, der durch einen PWFA-Beschleuniger betrieben wurde (engl. table-top FEL) [8]. Damit ist eine der wichtigsten Anwendungen der klassischen Beschleunigertechnik in Reichweite der PWFA gerückt. Wichtiges Ziel der aktuellen Forschung ist die Erzeugung von Teilchenstrahlen mit hoher Qualität – d. h. mit schmaler Energieverteilung und niedriger

Energie geladener Teilchen

Die Energie geladener Teilchen beschreibt man in eV. Das ist die Energie, die eine Elektron mit der Ladung e beim Durchlaufen einer Spannung von einem Volt gewinnt. Längst sind leistungsstarke Beschleuniger gebaut worden, die Elementarteilchen auf viele GeV = Giga-Elektronen-Volt beschleunigen können. Am CERN erreicht man bald 3,5 TeV (Tera-Elektronen-Volt), was einer Spannung von 3.500.000.000.000 Volt entspricht.

Abbildung 2

Verlauf der ultra-starken Wakefelder entlang der Propagationsachse im nichtlinearen PWFA Regime. Spitzenfeldstärken von mehr als 10 GV/m können in diesem Fall erzielt werden.



Strahldivergenz. Hier die optimalen Parameter zu finden (Plasmadichte, Typ und Stärke der Anregung) ist Gegenstand der numerischen Simulation. Es handelt es sich dabei um sog. first principles Simulationen, in denen die vollständige Plasma- und Felddynamik ohne Approximation abgebildet wird. Der Rechenaufwand ist damit extrem hoch. Oft müssen die Bahnen von Hunderten von Millionen



Erion Gjonaj arbeitet als Nachwuchsgruppenleiter am Institut für Theorie Elektromagnetischer Felder der TU Darmstadt.



Thomas Weiland ist Professor für das Fach Theorie Elektromagnetischer Felder an der TU Darmstadt und forscht seit über drei Dekaden auf dem Gebiet der numerischen Berechnung elektromagnetischer Felder.

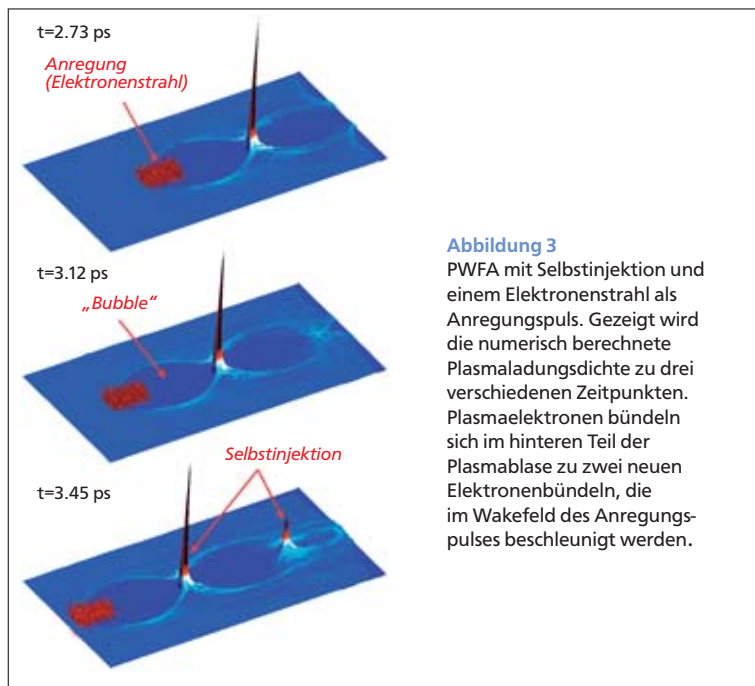


Abbildung 3
PWFA mit Selbstinjektion und einem Elektronenstrahl als Anregungspuls. Gezeigt wird die numerisch berechnete Plasmaladungsdichte zu drei verschiedenen Zeitpunkten. Plasmaelektronen bündeln sich im hinteren Teil der Plasmablase zu zwei neuen Elektronenbündeln, die im Wakefeld des Anregungspulses beschleunigt werden.

ANZEIGE



KLEINE DINGE, GROSSE WIRKUNG

Wo sich kluge Köpfe treffen, werden oft bahnbrechende Ideen geboren. Und manchmal sind es nur relativ kleine Dinge, die den Ausschlag für eine große Idee geben: Inspirierende Architektur, die perfekte Präsentationstechnik, eine Atmosphäre einfach zum Wohlfühlen.

Das darmstadtium wissenschaft|kongresse –
Treffpunkt für die Macher der Märkte von morgen.




darmstadtium
wissenschaft|kongresse
www.darmstadtium.de

von Plasmatelchen „getrackt“ und ebenso viele numerische Unbekannte des elektromagnetischen Feldes berechnet werden. Abbildung 3 zeigt das Beispiel einer PWFA Simulation, die unter Einsatz eines massiv parallelen Hochleistungsrechners durchgeführt wurde [9]. Deutlich in der Abbildung zu sehen ist die Entstehung der „bubble“ sowie die Selbstinjektion; in diesem Fall zweier unabhängiger Elektronenpakete hoher Ladungsdichte.

Komplexe Experimente

Viele Ideen für zukünftige Entwicklungen zeichnen sich bereits heute ab. Eine solche Idee ist die Kaskadierung mehrerer PWFA-Beschleunigungsstufen um den Energiezuwachs zu maximieren („staging“). Denkbar ist auch die Kombination von PWFA und herkömmlicher Beschleunigertechnik, um die Vorteile beider optimal auszunutzen. Schließlich wird der numerischen Simulation auch in Zukunft eine entscheidende Rolle zum verbesserten Verständnis der nichtlinearen Plasmaprozesse in immer komplexer werdenden PWFA Experimenten zukommen.

Literatur

- [1] Tajima, T., Dawson, J.M. (1979: Laser Electron Accelerator; Phys. Rev. Lett. 43)
- [2] Chen et al., P. (1985: Acceleration of Electrons by the Interaction of a Bunched Electron Beam with a Plasma; Phys. Rev. Lett., 54)
- [3] Pukhov, A., Meyer-ter-Vehn, J. (2002: Laser wake field acceleration: the highly non-linear broken-wave regime; Appl. Phys. B 74)
- [4] Faure et al., J. (2004: A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams; Nature 431, 541-544)
- [5] Mangles et al., S.P.D. (2004: Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser-plasma interactions; Nature 431)
- [6] Geddes et al., C.G.R. (2004: High-quality electron beams from a laser wakefield accelerator using plasma-channel guiding; Nature 431)
- [7] Leemans et al., W.P. (2006: GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator, Leemans et al.; Nature Physics 2)
- [8] Schlenvoigt et al., H.-P. (2008: A compact synchrotron radiation source driven by a laser-plasma wakefield accelerator; Nature physics 4)
- [9] Gjonaj, E., Weiland, T. (2010: Particle Based PWFA Simulations using a Discontinuous Galerkin Approach; Proceedings of ICEAA 2010, Sydney, Australia)

—ANZEIGE



Creating safety.
With passion.

NewTec

System-Entwicklung und Beratung

NewTec – ein Gewinn von Anfang an.

Als einen von unseren Kunden geschätzten Technologie- und Entwicklungspartner setzt die NewTec GmbH auf Mitarbeiter, die eigenes unternehmerisches Handeln zeigen, ohne das gemeinsame Ziel aus den Augen zu verlieren.

Wir suchen Sie, für unsere Standorte

Mannheim, Pfaffenhofen, Freiburg und Friedrichshafen

Sie sind Absolvent der Fachrichtungen:

Elektro- , Nachrichtentechnik, Informatik und Medizintechnik

Dann bewerben Sie sich initiativ bei uns.

NewTec ist immer an Jungingenieuren in den Bereichen Testengineering, Hard- und Softwareentwicklung interessiert.

i Die NewTec GmbH ist seit über 25 Jahren Systemhaus für Beratung und Entwicklung sicherheitsrelevanter Systeme in den Branchen Avionik, Medizintechnik, Automotive und Verteidigungstechnik.

NewTec GmbH

System-Entwicklung und Beratung

Buchenweg 3

89284 Pfaffenhofen a. d. Roth

Tel. 07302 9611-42

svenja.notz@newtec.de

www.newtec.de