

## ■ Mit Terawatt zu Teilchenstrahlen

Hochleistungslaser versprechen kompakte und günstige Teilchenbeschleuniger für verschiedene Anwendungen.

Während der letzten Jahre haben sich Hochleistungslaser rasant entwickelt. Solche Lasersysteme erzeugen Pulse, die – je nach verwendetem aktivem Lasermedium – zwischen 25 und etwa 1000 Femtosekunden dauern. Innerhalb dieser kurzen Zeit transportieren sie Energien von einigen bis hin zu mehreren 100 Joule, sodass Spitzenleistungen von einigen 10 Terawatt (TW) bis hin zu 1 Petawatt möglich sind. Fokussiert auf wenige  $\mu\text{m}^2$ , entstehen so Spitzenintensitäten von  $10^{21} \text{ W/cm}^2$  und mehr. Die damit verbundenen elektrischen Felder reichen aus, um Materie im Fokus des Lasers zu ionisieren und die dabei frei werdenden Elektronen innerhalb des Bruchteils einer Schwingungsperiode des Lichts nahezu auf Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen. Die naheliegende Idee, diese immensen Felder zur Beschleunigung geladener Teilchen zu verwenden und damit deutlich kompaktere Beschleuniger als die konventionellen zu bauen, ist ein Motor für die weltweite Forschung mit diesen Lasern. Kürzlich ist es einem internationalen For-

scherteam in einem zweistufigen Prozess gelungen, erstmals brillante Neutronenstrahlen mit kinetischen Energien von bis zu 150 MeV und einem maximalen Neutronenfluss von bis zu  $10^{10}/\text{sr}$  pro Puls zu erzeugen und damit Materialien zu untersuchen [1]. Bereits zuvor hatte ein Münchener Team gezeigt, dass sich mit laserbeschleunigten Protonen von einigen MeV grundsätzlich Tumorzellen bestrahlen lassen [2].

Die Felder der Laser sind zwar um mehrere Größenordnungen höher als diejenigen in konventionellen Beschleunigern, da sie aber mit der Frequenz des Lichts  $\omega_L$  oszillieren, ändert sich die Beschleunigungsrichtung der geladenen Teilchen periodisch, sodass sich mit den Feldern nicht direkt gerichtete und kollimierte Teilchenstrahlen erzeugen lassen. Anders ist die Situation, wenn ein Laserpuls auf eine dünne Folie fällt und dabei das Material ionisiert. Die Elektrodichte des entstehenden Plasmas ist so hoch, dass das Licht nicht mehr in die Folie eindringen kann, sondern auf der Vorderseite bei Erreichen einer kritischen Dichte  $n_c$  zum Teil absorbiert oder reflektiert wird. Anschaulich kann hierbei der Lichtdruck (präziser: die ponderomotive Kraft des Laserpulses) die Elektronen in die ionisierte Targetfolie hineindrücken. Die mit der Ladungstrennung verbundenen elektrischen Felder beschleunigen dann auch die positiven Ionen.

Spezielle Folien, die nur wenige Nanometer dick sind, z. B. Diamant-ähnliche Kohlenstofffolien (DLC-Folien), haben es in der jüngsten Vergangenheit erlaubt, mit Hochleistungslasern sehr effizient Ionenstrahlen mit kinetischen Energien von 10 bis über 100 MeV zu erzeugen [1–4]. Bei so dünnen Folien ist entscheidend, dass der Kontrast des Laserpulses möglichst hoch ist, d. h. die Intensität bis zu wenigen Pikosekunden vor dem Hauptpuls möglichst niedrig bleibt. Ansonsten stören solche Vorpulse den Beschleunigungsvorgang [5].

Auf diese Weise erzeugte Ionenstrahlen wurden jetzt erfolgreich für erste Anwendungen verwendet.

Zur Erzeugung eines intensiven Neutronenstrahls hat ein internationales Team aus Forschern der TU Darmstadt sowie der National Laboratories von Los Alamos und Sandia in den USA das Lasersystem TRIDENT in Los Alamos verwendet, um zunächst Deuteronen zu beschleunigen, die aus einem Beryllium-Konverter die gewünschten Neutronen herausschlagen [1]. Fällt der 200-TW-Laserpuls auf eine wenige 100 nm dünne Folie aus deuteriertem Plastik ( $\text{CD}_2$ ), so beschleunigt er die Elektronen über die Querschnittsfläche des Laserfokus auf hochrelativistische Energien. Die relativistische Massenzunahme der Elektronen und die damit verbundene Erhöhung der kritischen Dichte  $n_c$  machen die Folie bereits im Verlauf des Laserpulses für das Laserlicht transparent, sodass der Puls über die restliche Dauer seine Energie nicht nur auf der Folienvorderseite an die Elektronen überträgt, sondern auch im Inneren. Die beschleunigten Elektronen erzeugen elektrische Felder, die wiederum die zugehörigen positiven Ionen auf Energien von mehreren 10 MeV/Nukleon beschleunigen. Auf diese Weise entstand ein Deuteronenstrahl, der auf einen Beryllium-Konverter gelenkt wurde. Niedrige Deuteronenenergien führen über  ${}^9\text{Be}(d,n)$ -Reaktionen zu einem Neutronenpuls mit isotroper Richtungsverteilung, während bei Energien über 150 MeV durch „break-up Reaktionen“ der Deuteronen der Neutronenstrahl vorwärts gerichtet ist (Abb. 1). Diese Neutronenquelle hat – aufgrund der Divergenz des Deuteronenstrahls und des Abstands zwischen Lasertarget und Konverter – einen Durchmesser von ca. 3 mm, der erzeugte Neutronenpuls aufgrund der Flugzeitdifferenzen eine Dauer von etwa 250 ps. Erste Radiographie-Aufnahmen unterschiedlicher Materialien mit diesem Neutronenpuls

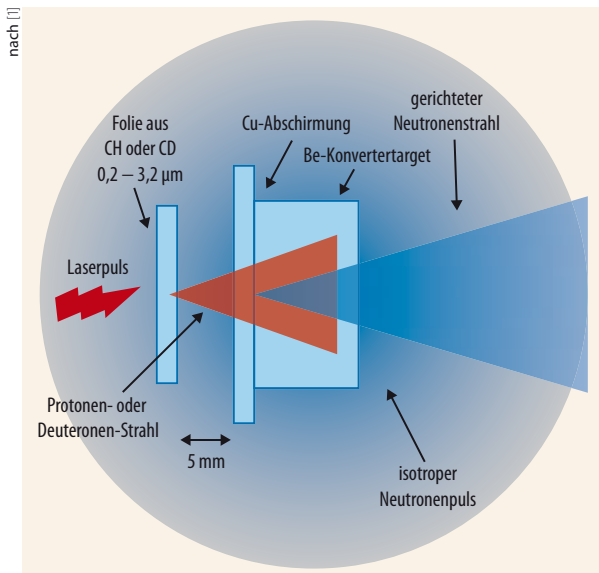


Abb. 1 Ein hochintensiver Laserpuls wird auf eine dünne Plastikfolie fokussiert und beschleunigt dort – abhängig von der Foliendicke – Protonen oder Deuteronen auf unterschiedliche kinetische Energien. In einem zweiten Be-Konverter-Target entstehen durch verschiedene Kernreaktionen Neutronen, die je nach der Energie der Ionen unterschiedliche Richtungsverteilungen aufweisen.

lassen das Anwendungspotenzial einer solchen, rein laser-basierten Neutronenquelle erahnen.

Eine weitere denkbare Anwendung Laser-beschleunigter Ionen liegt in der Tumorthherapie, bei der sich die kompaktere und damit potenziell billigere Bauart eines solchen Beschleunigers als entscheidender Vorteil erweisen könnte. Bis zu einem tatsächlichen Einsatz sind allerdings noch entscheidende Verbesserungen bei der Energieverteilung sowie der pro Laserschuss applizierbaren Dosis notwendig. Einer Münchner Gruppe mit Wissenschaftlern vom MPI für Quantenoptik, von der LMU München, der TU München sowie der Universität der Bundeswehr ist es nun mit nm-dünnen DLC-Folien gelungen, die Anzahl der Protonen mit kinetischen Energien von einigen MeV auf das Hundertfache gegenüber früheren Messungen mit ähnlichen Laserparametern [6] zu erhöhen [2]. Dadurch lässt sich schon in einem einzigen Laserschuss eine Dosis von mehreren Gray (Gy) in

die Zellen einbringen. Spezielle Protonenstrahl-optiken erlauben es dabei, die räumliche und energetische Verteilung der Protonenpulse so zu beeinflussen, dass nach der Bestrahlung genaue Aussagen über ihre biologische Wirksamkeit auf einzelne Tumorzellen möglich sind. Außerdem lassen sich durch die während der Bestrahlung gemessenen Verteilung der in die Zellen eingebrachten Dosis innerhalb nur eines einzelnen Schusses sog. Dosis-Effekt-Kurven aufnehmen, die den Bestrahlungseffekt (z. B. DNA-Doppelstrangbrüche) auf die Zellen in Abhängigkeit der applizierten Dosis darstellen. Und schließlich gelang es zum ersten Mal, die Wirkung der hohen Spitzendosisleistung, die bei dieser Art von Laser-induzierter Beschleunigung innerhalb eines Teilchenpulses möglich ist, zu beurteilen. Bei einer Protonenpulsdauer von nur 1 ns liegt diese Leistung mit  $7 \times 10^9$  Gy/s um viele Größenordnungen über der Spitzenleistung konventioneller Ionentherapieanlagen. Insgesamt

hat das Münchener Team mit diesem proof-of-principle-Experiment gezeigt, dass – ähnlich wie bei konventionell beschleunigten Protonenpulsen – die biologische Wirksamkeit Laser-beschleunigter Protonenstrahlen höher liegt als die von vergleichbarer Röntgenstrahlung. Effekte aufgrund der erhöhten Spitzendosisleistung zeigten sich hingegen nicht. Diese Messungen ebnet den Weg, um in Zukunft die Parameter der Ionenpulse weiter zu verbessern und damit das Potenzial von Laser-beschleunigten Protonenpulsen für die Radio-onkologie genauer zu beurteilen.

**Malte Kaluza**

**Prof. Dr. Malte C. Kaluza**, Institut für Optik und Quantenelektronik, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena

- [1] *M. Roth et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 044802 (2013)
- [2] *J. Bin et al.*, Appl. Phys. Lett. **101**, 243701 (2012)
- [3] *A. Henig et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 245003 (2009)
- [4] *B. Aurand et al.*, New Journal of Physics **15**, 033031 (2013)
- [5] *M. Kaluza et al.*, Phys. Rev. Lett. **93**, 045003 (2004)
- [6] *S. D. Kraft et al.*, New Journal of Physics **12**, 085003 (2012)