



Ralph Stelzer (Hrsg.)

# ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN 2016

Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung  
und Konstruktionstechnik



Ralph Stelzer (Hrsg.) **ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN** 2016  
Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik



Ralph Stelzer (Hrsg.)

# **ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN** 2016

Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung  
und Konstruktionstechnik

Dresden · 30. Juni – 1. Juli 2016

## **Programmkomitee Virtuelle Produktentwicklung und Konstruktionstechnik**

Prof. Dr. Ralph Stelzer, TU Dresden

Prof. Dr. Michael Abramovici, Ruhr-Universität Bochum

Prof. Dr. Reiner Anderl, TU Darmstadt

Prof. Dr. Martin Eigner, Universität Kaiserslautern

Prof. Dr. Detlef Gerhard, TU Wien

Prof. Dr. Jivka Ovtcharova, KIT Karlsruhe

Prof. Dr. Rainer Stark, TU Berlin

Prof. Dr. Sandor Vajna, Universität Magdeburg

Prof. Dr. Sandro Wartzack, Universität Erlangen

Entwickeln – Entwerfen – Erleben 2016.  
Beiträge zur Virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik  
Herausgeber: Ralph Stelzer

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind  
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek  
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche  
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the  
Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 978-3-95908-062-0

© 2016 w.e.b. Universitätsverlag & Buchhandel  
Eckhard Richter & Co. OHG  
Bergstr. 70 | D-01069 Dresden  
Tel.: 0351/47 96 97 20 | Fax: 0351/47 96 08 19  
<http://www.tudpress.de>

TUDpress ist ein Imprint von w.e.b.

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.  
Layout und Satz: Technische Universität Dresden.  
Umschlaggestaltung: TU Dresden, Illustration © 2016 TU Dresden  
Printed in Germany.

Erscheint zugleich auf QUCOSA der SLUB Dresden  
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-203878>





# KOMPLEXITÄT DREHT SICH IMMER NUR IM KREIS.



# EINFACH TRIFFT ENTSCHEIDUNGEN.

Komplexität bremst Ihr Business aus. Denn je gewaltiger die Informationsflut, desto schwieriger die Entscheidungsfindung. SAP arbeitet daran, Dinge zu vereinfachen. Damit aus Daten Wissen und aus Wissen fundierte Entscheidungen werden, die Ihr Unternehmen weiterbringen. Finden Sie heraus, wie gemeinsam einfach möglich wird auf [sap.de/runsimple](https://www.sap.de/runsimple)

# Entwicklung kompakter, gepulster Elektro-Dipolmagnete für die laserbasierte Protonentherapie

Michael Schürer · Thomas Herrmannsdörfer · Leonhard Karsch ·  
Florian Kroll · Umar Masood · Jörg Pawelke

## Hintergrund

Die strahlentherapeutische Behandlung von Krebserkrankungen erfolgt zurzeit hauptsächlich durch eine Bestrahlung mit hochenergetischen Photonen und Elektronen aus kompakten Therapie-Linearbeschleunigern. Selten werden auch Protonenstrahlen eingesetzt. Diese besitzen gegenüber Photonen und Elektronen vorteilhaftere physikalische und strahlenbiologische Eigenschaften, die besonders bei der Bestrahlung von tiefliegenden Tumoren in der Nähe von lebenswichtigen, strahlenempfindlichen Organen von Bedeutung sind. Die Behandlung mit Protonen erfordert jedoch sehr große und teure Bestrahlungsanlagen, weshalb es weltweit bisher nur ca. 50 solcher Anlagen an großen Zentren gibt.

In den letzten Jahren wurde das völlig neuartige Prinzip der Teilchenbeschleunigung durch Hochleistungslaser soweit entwickelt, dass eine medizinische Anwendung zur Krebstherapie vorstellbar ist. Die laserbasierte Teilchenbeschleunigung verspricht deutlich kompaktere und kostengünstigere Protonenbeschleuniger, erzeugt jedoch im Unterschied zu herkömmlichen Beschleunigern sehr kurze ( $\sim$ ps) hochintensive Protonenpulse mit großer Strahldivergenz und breitem Energiespektrum. Im Rahmen des Verbundprojektes onCOOPtics wird die klinische Anwendbarkeit derartiger laserbeschleunigter Protonenstrahlen untersucht, was nicht nur die Entwicklung des notwendigen Laser-Teilchen-Beschleunigers, sondern auch die Entwicklung eines geeigneten Strahlführungssystems beinhaltet.

## Methode

Mittels Simulation und theoretischer Modellierung wurde das Konzept einer kompakten magnetischen Protonenstrahlführung erstellt, welches die sich aus den spezifischen Eigenschaften laserbeschleunigter Strahlen ergeb-

den Anforderungen erfüllt und einen effizienten Transport der Protonenpulse vom Beschleunigungsort zum Patienten ermöglicht (siehe Abbildung 1) [Masood 2014]. Am Anfang der Strahlführung bündelt ein Solenoidmagnet den durch den hochintensiven Laserpuls in einer dünnen Folie (Target) erzeugten, divergenten Protonenstrahl. Im weiteren Verlauf lenken Dipolmagnete den Protonenstrahl ab und Quadrupolmagnete formen das Strahlprofil. Alle Magnete sind als Elektromagnete für einen gepulsten Betrieb konzipiert, wobei Dauer ( $\sim 1$  ms) und Frequenz ( $\leq 10$  Hz) der Magnetfelder auf die durch den Laser erzeugten Protonenpulse abgestimmt sind. Gepulste, Magnete ermöglichen besonders hohe Feldstärken und somit eine sehr kompakte Bauform der Strahlführung.

Dem Strahlführungskonzept liegen  $45^\circ$ -Elektro-Dipolmagnete mit einer maximalen magnetischen Feldstärke von 12 T zugrunde. Diese Feldstärke erfordert eine Stromstärke von bis zu 20 kA und ermöglicht die Ablenkung eines Protonenstrahles mit der für die Therapie erforderlichen Maximalenergie von 220 MeV um 45 Grad bei einem Biegeradius von  $r = 200$  mm. Aufgrund des gepulsten Betriebs und der hohen Feldstärken ist der Einsatz eines Eisenkerns, der bei konventionellen Elektromagneten zur Magnetfeldformung dient, nicht möglich. Das gewünschte homogene Magnetfeld entlang des gebogenen Protonenstrahlpfades durch den Dipolmagneten muss deshalb durch die Geometrie des Stromleiters realisiert werden. Durch Simulationsrechnungen zur Magnetfeldverteilung unter Berücksichtigung von Streufeldern wurde eine zu realisierende komplexe 3D Geometrie des elektrischen Leiters von 80 spiralförmigen Windungen, die über 12 Ebenen verteilt sind, bestimmt. Die hohe Stromstärke von bis zu 20 kA in Verbindung mit dem durch die kompakte Bauform begrenzten Leiterquerschnitt führt zu hohen Ohmschen Verlusten und einer starken Erwärmung des Dipols. Durch eine aktive Kühlung muss die Erwärmung ausreichend reduziert werden. Ein Zwischenraum zwischen benachbarten Windungen ist zur elektrischen Isolation und mechanischen Festigkeit erforderlich, sollte aber für eine kompakte Bauform auf das Mindeste beschränkt werden. Für eine hohe Zerstörungsfestigkeit muss hierbei auf metallische Materialien im Spulenumfeld verzichtet werden.

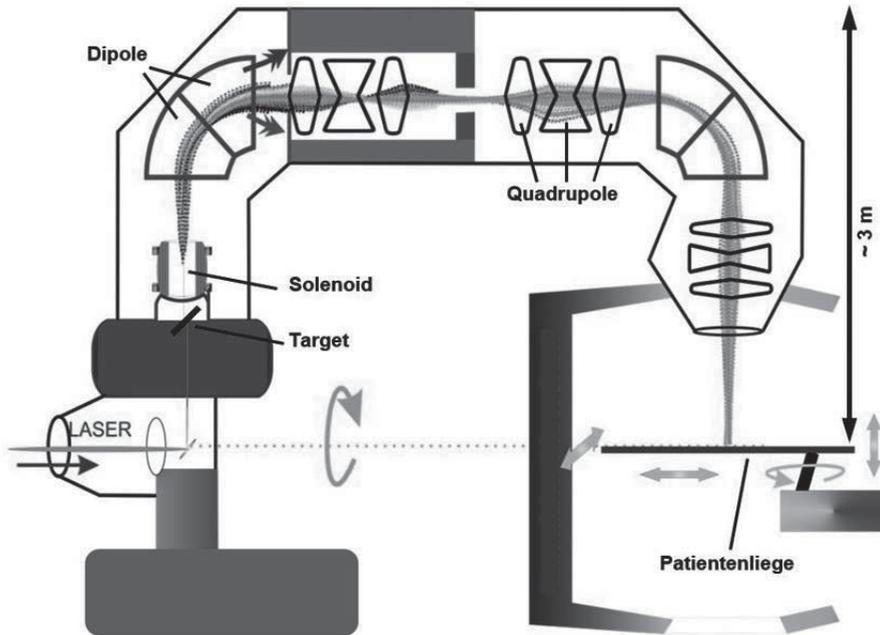


Abbildung 1: Design des magnetbasierten Strahlführungssystems. Die durch Laserpulse aus dem Target beschleunigten Protonen werden mit Hilfe von Solenoid-, Dipol- und Quadrupolmagneten zum Bestrahlungsplatz transportiert.

## Ergebnis

Für die Realisierung der komplexen Leitergeometrie wurde ein Kunststoffgrundkörper mit eingefräster Nut entwickelt (siehe Abbildung 2). Diese Nut, welche die simulierte Leitergeometrie exakt abbildet, führt eine hochflexible Cu-Litze ( $A_{\text{Cu}} = 25 \text{ mm}^2$ ) als elektrischen Leiter. Der Grundkörper setzt sich zusammen aus 12 horizontalen Platten, welche mit ihrer Nut jeweils eine Leiterebene aufnehmen, und jeweils einer vertikalen Stirnplatte an der Strahlein- und Strahlaustrittsseite des Dipols. In den beiden Stirnplatten wird die Litze der vier mittleren, horizontalen Leiterebenen um das durch die Dipolmitte verlaufende Strahlrohr herumgeführt. Bedingt durch das große Magnetfeld überträgt der elektrische Leiter auf den Grundkörper einen Druck von bis zu  $60 \text{ N/mm}^2$ . Dieser Druck muss vor allem durch die zwischen den einzelnen Nuten stehenden dünnen Stege (2,5 mm Breite) aufgenommen werden. Durch Anwendung der Zugdreieckmethode nach Mattheck [Mattheck 2006] für die Konstruktion der Nutflanken in Kombination mit FEM Simulationen und einer formschlüssigen Verbindung zwischen

den einzelnen Platten konnte die Nutgeometrie und die Kraftübertragung vom Inneren des Kunststoffgrundkörpers zu den stabilisierenden Außensegmenten optimiert werden.

Vor dem Hintergrund dieser multidirektionalen Kraftübertragung und der teilweise dünnen Materialstärken wurde als Werkstoff für den Grundkörper PET gewählt. PET besitzt eine für Kunststoffe hohe Zugfestigkeit (90 MPa) und Schlagzähigkeit ( $\geq 50 \text{ kJ/m}^2$ ) und zeigt bis  $80^\circ\text{C}$  eine gute Wärmeformbeständigkeit (HDT/A). Darüber hinaus lässt es sich gut spanend bearbeiten. Glasfaserverstärkte Kunststoffe konnten hingegen bei der vorhandenen Kräfteverteilung und insbesondere der dünnen Stege zwischen den eingefrästen Nuten die notwendige Stabilität nicht gewährleisten.

Zur Erhöhung der Festigkeit wurden die einzelnen Grundkörperelemente untereinander mit einem thixotropen Polyurethan-Klebstoff und mit der Litze mit einem niedrigviskosen Epoxidharz-Klebstoff verklebt. Die Verwendung und Handhabung der Klebstoffe für den vorliegenden PET-Werkstoff wurde im Vorfeld durch umfangreiche systematische Experimente (~250 Klebproben mit 13 Klebstoffen und mehreren Haftpromotern) erprobt.

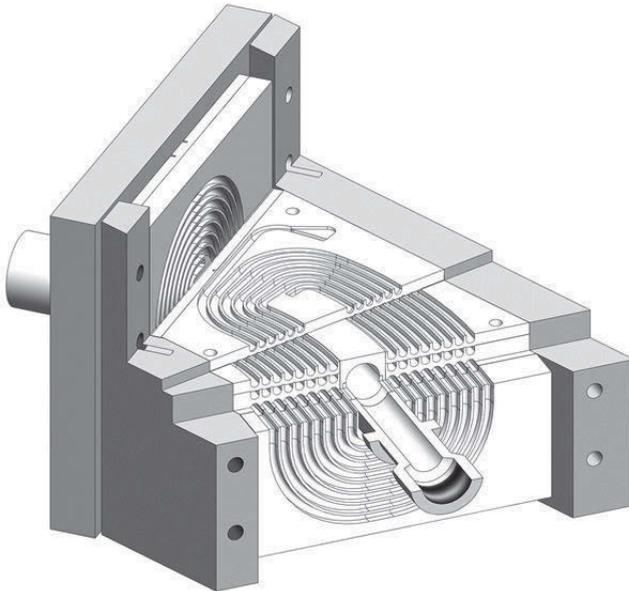


Abbildung 2: Grundkörper (weiß) des entwickelten Elektro-Dipolmagneten mit den eingefrästen Nuten für den elektrischen Leiter und den stabilisierenden Außensegmenten (grau).

Die durch die hohe Stromstärke erzeugte Wärme wird durch eine Kühlung mit deionisiertem Wasser abgeführt. Das Wasser strömt in der Nut direkt über die Litze. Durch einen parallelen Anschluss der 12 horizontalen Leiterebenen und der beiden Stirnplatten wird der Druckverlust durch den Strömungswiderstand für den insgesamt ca. 28 m langen Leiter in vertretbaren Grenzen gehalten. Der Leiter kann mit einem Kühlmittelfluss von bis zu 29 l/min gekühlt werden.

Die Größe des vorliegenden gepulsten Dipols ist im Vergleich mit einem in der Protonentherapie im Einsatz befindlichen konventionellen Elektro-Dipolmagneten auf etwa 1/3 reduziert, was die Möglichkeiten für deutlich kompaktere Strahlführungssysteme laserbasierter Therapieanlagen aufzeigt.

## **Zusammenfassung**

Die Entwicklung der laserbasierten Protonentherapie kann längerfristig zu einer kostengünstigeren Krebsbehandlung mit Protonen führen. Gepulste Dipol-Elektromagnete sind dabei neben gepulsten Solenoid- und Quadrupolmagneten entscheidende Komponenten für ein kompaktes Strahlführungssystem. Nach erfolgreich abgeschlossener Validierung der verschiedenen Magnete an der Universitäts Protonen Therapie Dresden können diese schrittweise zu einem Gesamtsystem zusammengefügt und am Laserbeschleuniger eingesetzt werden.

## **Literaturverzeichnis**

- Masood, U. et al. 2014: A compact solution for ion beam therapy with laser accelerated protons. Applied Physics B (2014) DOI:10.1007/s00340-014-5796-z (12 pages)
- Mattheck, C. 2006: Verborgene Gestaltgesetze der Natur: Karlsruher Institut für Technologie

## **Kontakt**

Dr. Michael Schürer

Dr. Leonhard Karsch

Dr. Jörg Pawelke

Umar Masood

OncoRay - National Center for Radiation Research in Oncology

Medizinische Fakultät und Universitätsklinikum Carl Gustav Carus

Technische Universität Dresden

Fetscherstraße 74

01307 Dresden

[www.oncoray.de](http://www.oncoray.de)

Dr. Thomas Herrmannsdörfer

Florian Kroll

Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf

Bautzner Landstraße 400

01328 Dresden

*Das Verbundprojekt onCOOPtics wird durch das BMBF (Nr. 03ZIK455, 03Z1N511, 03Z1O511) gefördert.*