Development of a Laser-based Emittance Monitor for Negative Hydrogen Beams

Entwicklung eines Laser-basierten Messgeräts zur Ermittlung der Emittanz von Negativen Wasserstoffionenstrahlen

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Doktorgrades

Doktor-Ingenieur

vorgelegt von

Thomas Hofmann

aus Kitzingen

Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: :	19. Juli 2017
Vorsitzender des Promotionsorgans :	Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch
Gutachter :	Prof. Dr.-Ing. Bernhard Schmauß Dr. Stephen Gibson

Optische Hochfrequenztechnik und Photonik

Thomas Hofmann

Development of a Laser-based Emittance Monitor for Negative Hydrogen Beams

Entwicklung eines Laser-basierten Messgeräts zur Ermittlung der Emittanz von Negativen Wasserstoffionenstrahlen

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2017

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5457-6
ISSN 1866-6043

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Abstract

High energy particle accelerators are designed to collide charged particle beams and thus study the collision products. Maximising the collision rate, to generate sufficient statistics for precise measurements of rare processes, is one of the key parameters for optimising the overall collider performance.

The CERN Large Hadron Collider (LHC) Injectors Upgrade (LIU) includes the construction of LINAC4, a completely new machine working as a first linear acceleration stage for the LHC beam. By accelerating a negative hydrogen beam (H^-) instead of protons, it aims to double the beam brightness via a more efficient transfer to the first circular accelerator and subsequently boost the LHC collision rate. To achieve this, a precise knowledge of the transverse beam characteristics in terms of beam emittance is essential.

This thesis work covers the development of a laser-based monitor meant to measure non-destructively the LINAC4 beam transverse profile and emittance. This included the implementation of different prototypes that were successfully tested at various beam energies during the LINAC4 commissioning and the design of the final system to be installed at the LINAC4 top energy.

The laser emittance meter is based on the photo-detachment effect which describes the liberation of an electron from a negative hydrogen ion. By scanning a focused laser-beam through the H^- beam, the profile can be reconstructed by counting the amount of the detached electrons. The transverse emittance can be obtained by separating the H^0 from the H^- beam by a dipole magnet and recording the H^0 profiles downstream the dipole for each laser position.

The thesis work introduces the basic principles of transverse beam dynamics and the techniques typically used to determine the transverse beam characteristics. Hereafter a bibliographic research is presented about the state of the art in the field of beam diagnostics based on photo-detachment.

Then, an extensive simulation campaign of the photo-detachment process led to the conclusion that the laser-system can be based on a low-power laser-source and a fibre-optic transfer of the laser beam to the interaction point with the H^- beam. To distinguish the H^0 created by the laser interaction from background radiation, a fast, sensitive and radiation-hard diamond strip-detector

was implemented. First tests of a prototype were conducted at a 3 MeV and 12 MeV H^- beam and the results were compared with conventional techniques, which resulted to agree within $\pm 3\%$ in terms of emittance.

In the following LINAC4 beam commissioning periods at 50, 80 and 107 MeV a second prototype of the instrument based on monitoring the detached electrons has been validated. The setup, consisting of a laser system with 73 m long fibre-optic transfer line, electron deflector magnet and single-crystal diamond detector, has been fully characterised and the obtained profiles were compared with conventional techniques, where an agreement within $\pm 2\%$ has been found.

All these prototype tests were essential for the design of permanent installations at the LINAC4 top energy of 160 MeV in the transfer-line towards the injection into the successive machine (PS-Booster). The design combines electron and H^0 detection and provides a simultaneous emittance and profile measurement in the horizontal and vertical planes, with an expected resolution of < 75 µm and < 100 µrad. The instruments shall be routinely operated for automated on-line monitoring of the transverse beam parameters to optimise the PS-Booster injection and subsequently avoid losses and the consequent activation of the environment. Due to the non-destructive measurement method, the instrument can gather an extensive amount of beam characteristics data without leading to downtimes of the machine.

Zusammenfassung

In Hochenergie-Teilchenbeschleunigern wie dem Large Hadron Collider (LHC) prallen geladene Teilchenstrahlen aufeinander, wodurch eine Analyse der Kollisionsprodukte ermöglicht wird. Um sehr seltene Prozesse mit hinlänglicher statistischer Signifikanz zu beobachten ist die Kollisionsrate des Teilchenbeschleunigers entscheidend.

Im Rahmen von CERNs LHC Injectors Upgrade (LIU) soll der neue Linearbeschleuniger LINAC4 negative Wasserstoff Ionen (H^-) auf 160 MeV beschleunigen. Durch eine effiziente Einspeisung in den nachfolgenden Kreisbeschleuniger soll die Leuchtdichte des Teilchenstrahls verdoppelt werden und somit die Kollisionsrate des LHCs gesteigert werden. Um dies zu erreichen ist die präzise Kenntnis der transversalen Strahlcharakteristik in Sinne der Strahl-Emittanz essenziell.

Die vorliegende Arbeit behandelt die Entwicklung eines laser-basierten Messgeräts zur zerstörungsfreien Erfassung des transversalen Strahlprofils und der transversalen Emittanz. Dafür wurden verschiedene Prototpen bei unterschiedlichen Teilchenstrahl-Energien während der Inbetriebnahme getestet. Anschließend wurde ein finales Messgerät entwickelt welches langfristig im Hochenergiebereich des LINAC4 integriert werden wird.

Die laser-basierte Emittanzmessung beruht auf dem Photo-Detachment Effekt, der die Ablösung eines Elektrons von einem negativen Wasserstoff-Ion beschreibt. Wird ein fokussierter Laserstrahl durch den H^- Strahl gescannt, werden freie Elektronen erzeugt, mithilfe derer das H^- Strahlprofil rekonstruiert werden kann. Die generierten H^0 Teichen können durch einen Dipol-Magneten vom H^- Hauptstrahl separiert werden. Mittels Messung der H^0 Winkelverteilung kann somit die transversale Emittanz bestimmt werden.

In der Dissertation werden zu Beginn die Grundlagen der transversalen Strahldynamik behandelt und klassische Techniken zur Bestimmung der transversalen Strahlparameter erläutert. Der Stand der Technik für laser-basierte Verfahren zur Strahlprofil- und Emittanz-Messung wird mittels einer Literaturrecherche zusammengefasst.

Daraufhin werden umfassende Simulationen des Photo-Detachment Prozesses beschrieben, die zum Ergebnis führen, dass eine Laserquelle mit vergleichsweise niedriger Puls-Spitzenleistung im Kilowattbereich und ein faseroptischer Strahltransport zum Interaktionspunkt die Systemanforderungen erfüllen. Um die vom Laserstrahl erzeugten H^0 von Hintergrundstrahlung zu unterscheiden, wurde ein schneller, empfindlicher und strahlungsfester Diamant-Detektor implementiert. Erste Prototypentests wurden auf einer H^- Strahlenergie von 3 MeV und 12 MeV durchgeführt und mit konventionellen Messmethoden verglichen. Die Emittanzmessungen stimmen mit einer Genauigkeit von $\pm 3\%$ überein.

In der darauffolgenden LINAC4 Inbetriebnahmephase mit Strahlenergien von 50, 80 und 107 MeV wurde ein zweiter Prototyp getestet, welcher durch Detektion der freigesetzten Elektronen das Strahlprofil rekonstruierte. Dieser Aufbau bestand aus einem Laser-System, einem 73 m langen faseroptischem Transfer des Laserstrahls, einem Elektron-Ablenkmagneten und einem Einkristall-Diamantdetektor. In der Testkampagne wurden diese Subsysteme eingehend charakterisiert und die erhaltenen Strahlprofile mit konventionellen Messmethoden verglichen. Dabei wurde eine Übereinstimmung von $\pm 2\%$ festgestellt.

Die beschriebenen Prototypentests waren essenziell, um Messsysteme für permanente Installationen im Hochenergie-Bereich (160 MeV) des LINAC4 zu entwickeln. Profil- und Emittanz-Messungen in horizontaler und vertikaler Ebene mit einer Auflösung von $< 75\,\mu m$ und $< 100\,\mu rad$ werden durch kombinierte Detektion von Elektronen und H^0 ermöglicht. Die Messgeräte sollen routinemäßig für automatisierte Messungen der transversalen Strahlparameter eingesetzt werden, um die Einspeisung in den nachfolgenden Beschleuniger PS-Booster zu optimieren und somit Verluste und damit einhergehende Radioaktivität zu vermeiden. Da es sich um eine zerstörungsfreie Methode handelt, können die Geräte permanent Strahlcharakteristik-Daten aufnehmen, ohne Ausfallzeiten des Beschleunigers zu verursachen.

Acknowledgements

I am very grateful that I have had the opportunity to do this doctorate so I would like to thank for the financial support, from the EU and CERN which made all of this possible. The Marie Curie network LA3NET (funded by the EU under Grand No 289191) provided not just funding but also the enriching experience to be part of a network of international researchers. The follow-up funding from CERN's Beams department allows us to install the final instrument permanently at LINAC4. Many great people have contributed to the success of this work, such that I want to say thank-you for their support. Special thanks go to:

- Dr. Federico Roncarolo, supervising at CERN the project patiently on a day to day basis who always had an open ear for discussions about accelerator physics, instrumentation or even how to make babies fall asleep...
- Prof. Bernhard Schmauss, my doctoral supervisor at the Friedrich-Alexander University Erlangen-Nürnberg, who gave me the chance to do this thesis and especially for the very helpful discussions with him and Rainer Engelbrecht, which contributed to the fibre-optics section of this work.
- Dr. Stephen Gibson, Gary Boorman and Dr. Alessio Bosco, supervising and supporting me from the Royal Holloway University of London and setting up the fruitful collaboration between RHUL and CERN. Furthermore for many discussions about laser optics, electronics, LABVIEW debugging and some late night installation periods in the accelerator tunnel, which allowed this work to move on quickly.
- Many colleagues form the BE-BI group, which provided a great work atmosphere and supported the project with electronics design (Gerrit, Jean, Michel), doing reference measurements with slit/grid (Uli, Francesca), being always available for any kind of questions (Madeleine and many others) and finally even teaching me the little French, I have been absorbing.
- Dr. Erich Griesmayer from CIVIDEC, for sharing his large expertise in particle detection and signal processing and for producing excellent diamond detectors which contributed strongly to the success of this work.

- The LINAC4 team, for giving us the opportunity to install and test our instrument during the busy commissioning periods and the FETS group for their collaboration and lending us their laser.
- My brother Markus and Dr. Uli Raich, for their commitment to review and comment this thesis in its final stage.

Finally I want to express my gratitude towards parents who allowed me to aim high and go my own way, and especially to my wife Ines who gave me the motivation and the support to enable me to finish this work.

Contents