

**Universität
Rostock**



Traditio et Innovatio



Compact Radio-frequency Quadrupoles for Industrial and Medical Applications

DISSERTATION

to attain the degree
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
of the Faculty of Computer Science and Electrical Engineering
of the University of Rostock

put forward by
Hermann W. Pommerenke
born on 25 March 1995 in Rostock, Germany
from Saint-Genis-Pouilly, France

Geneva, August 16, 2020

Abstract

The radio-frequency quadrupole (RFQ) is a crucial component of modern linear hadron accelerators. RFQs accelerate proton or ion beams at low energies and have a major impact on the overall beam quality of the accelerator. High frequencies allow for compact and economical RFQ designs that open up many possibilities of application in industry and medicine. The present thesis is motivated by the development of two compact RFQs operating at 750 MHz. Consequently, the thesis is organized into two parts:

The first part lays out radio-frequency (RF) design, measurements, and tuning of the PIXE-RFQ. The PIXE-RFQ is a one-meter long stand-alone accelerator providing 2 MeV protons for non-destructive proton-induced X-ray emission (PIXE) analysis of cultural heritage artwork. Numerical simulation and analytical techniques were used to determine optimum geometric and RF parameters of cavity, tuners, vacuum pumping ports, input power coupler, and diagnostic antennas. Thermo-mechanical and beam dynamics studies are presented to validate the design. Subsequently, RF and bead-pull measurements conducted on the PIXE-RFQ and its components are reported. The RFQ was tuned by means of movable slugs and an improved tuning algorithm, which allows for correcting both field and frequency at the same time. Very good agreement between measurements and design values was observed with regards to frequency, quality factors, and field profile.

The second part of the thesis reports the development of the Carbon-RFQ, which represents a key component of a new linear accelerator for light-ion cancer therapy, accelerating carbon ions to 5 MeV/u. The Carbon-RFQ features trapezoidal vanes. A new semi-analytic approach based on multipole expansion is used to describe the field of the trapezoidal vanes. The RFQ was split into two decoupled RF cavities, whose dipole modes were detuned by means of a novel technique based on length adjustment. The splitting is described both from the RF and the beam dynamics point of view. The Carbon-RFQ study concludes with the RF design of the full structure, including computations of the maximum surface electric field and thermal-mechanical behavior.

Kurzfassung

Der Hochfrequenzquadrupol (RFQ, engl. *radio-frequency quadrupole*) stellt eine essentielle Komponente moderner linearer Hadronenbeschleuniger dar. RFQs beschleunigen Protonen oder Ionen im niederenergetischen Bereich und bestimmen maßgeblich die Strahlqualität im gesamten Beschleuniger. Mit hohen Frequenzen können kompakte und ökonomische RFQ-Entwürfe umgesetzt werden, die viele Anwendungsmöglichkeiten in Industrie und Medizin eröffnen. In der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung zweier kompakter RFQs mit einer Frequenz von 750 MHz beschrieben. Entsprechend ist die Arbeit in zwei Teile gegliedert:

Der erste Teil beschreibt Hochfrequenzdesign (HF-Design), HF-Messungen, und HF-Abstimmung (engl. *tuning*) des PIXE-RFQ. Der PIXE-RFQ ist ein eigenständiger Beschleuniger, der über eine Länge von einem Meter 2 MeV-Protonen für zerstörungsfreie PIXE-Analyse (protoneninduzierte Röntgenemission, engl. *proton-induced X-ray emission*) historischer Kunstwerke liefert. Mithilfe numerischer Simulationen und analytischer Methoden wurden optimale Geometrie- und HF-Parameter des Hohlraumresonators und seiner Komponenten bestimmt. Thermomechanisches Verhalten sowie Strahldynamik wurden simuliert um das HF-Design zu validieren. Anschließend wurden HF- und Störkörpermessungen am PIXE-RFQ und dessen Komponenten durchgeführt. Die HF-Abstimmung des RFQ erfolgte über bewegliche Tuner und einen weiterentwickelten Tuning-Algorithmus, mit dessen Hilfe sowohl Feld als auch Frequenz gleichzeitig korrigiert werden können. Messergebnisse und Entwurfswerte stimmten bezüglich Frequenz, Gütefaktoren, und Feldverteilung mit nur geringer Abweichung überein.

Der zweite Teil der Arbeit widmet sich dem Carbon-RFQ, der Kohlenstoffionen auf 5 MeV/u beschleunigt und einen wesentlichen Teil eines vorgeschlagenen Linearbeschleunigers für Krebstherapie darstellt. Der Carbon-RFQ verfügt über trapezförmige Elektroden (engl. *trapezoidal vanes*). Das Feld der Elektroden wird mithilfe einer neuartigen semi-analytischen Methode beschrieben, die auf einer Multipolentwicklung aufbaut. Der Carbon-RFQ wurde in zwei Resonatoren geteilt, deren parasitäre Dipolmoden durch eine neuartige, auf Längen Anpassung basierende Methode verstimmt wurden. Die Aufteilung wird aus sowohl HF-technischer als auch strahldynamischer Perspektive diskutiert. Die Studie schließt mit dem HF-Design der gesamten Struktur einschließlich Berechnungen der maximalen Feldstärken und des thermomechanischen Verhaltens.