

**Accelerating cavity and higher order mode
coupler design for the Future Circular Collider**

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik
der Universität Rostock

vorgelegt von

Shahnam Gorgi Zadeh, geboren am 11.09.1986 in Shiraz
aus Rostock

Eingereicht: Rostock, 05. November 2020

Verteidigt:

Zusammenfassung

Die Designstudie des Future Circular Collider umfasst einen Hadron-Collider (FCC-hh), einen Elektron-Positron-Collider (FCC-ee) und einen Hadron-Lepton-Collider (FCC-he). Der FCC-hh wurde aufgenommen, um nach neuer Physik jenseits des Standardmodells zu suchen, indem Protonen bei einer noch nie dagewesenen Schwerpunktsenergie in der Größenordnung von 100 TeV zur Kollision gebracht werden. Der FCC-ee soll bei verschiedenen Strahlenergien zwischen 45,6 GeV und 182,5 GeV arbeiten, um präzise Messungen an den Z-, W- und H-Bosonen und dem Top-Quark durchzuführen. Herausforderungen für das Design der supraleitenden Hochfrequenz (SRF)-Kavitäten für den FCC-ee ergeben sich aus dem Betrieb bei verschiedenen Hochfrequenz (HF)-Spannungen und Strahlströmen. Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Erstellung eines detaillierten Designs für das große und teure HF-System des FCC-ee einzuleiten. Dazu gehört die Bestimmung eines geeigneten HF-Basisdesigns für die FCC-ee-Kavitäten, wie z.B. der HF-Frequenz und der Anzahl der Zellen pro Kavität, unter Berücksichtigung der Effizienz und der Kosten des HF-Systems. Auf Basis der berücksichtigten grundlegenden Lösungen werden mehrzellige Kavitäten für den Betrieb bei den Energien des W-, H- und $t\bar{t}$ -Betriebs und eine einzellige Kavität für den Betrieb bei der Z-Energie ausgelegt. Die Mittel- und Endzellen der Kavitäten werden separat optimiert, wobei unterschiedliche Zielfunktionen berücksichtigt werden. Bei der Optimierung der Kavitäten wird das Verhalten der Grundmode und einiger gefährlicher Moden höherer Ordnung (engl. higher order modes - HOMs) berücksichtigt. Mehrere Koppler für die Moden höherer Ordnung, darunter koaxiale HOM-Koppler und Hohlleiter-HOM-Koppler, werden dann parametrisiert und optimiert, um die gefährlichen HOMs der entworfenen Kavitäten zu dämpfen. Darüber hinaus wird ein Quad-Ridged-Hohlleiter als modifizierte Version des konventionellen Rechteckhohlleiter-HOM-Kopplers eingeführt, um die Grenzfrequenz des Hohlleiters zu senken und damit sein Dämpfungsvermögen zu verbessern. Die optimierten Kavitäten und HOM-Koppler werden dann kombiniert, und mehrere Dämpfungsschemata werden mit Hilfe von verschiedenen numerischen Methoden untersucht. Die für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Kavitäten erforderlichen numerischen Verfahren werden vorgestellt. Das Verhalten der HOM-gedämpften Kavitäten wird für ein Einkavitäten- und ein Vierkavitätenmodul untersucht. Die gesamte HOM-Leistung und die HOM-Leistung, die sich in jedem Hohlleitertor ausbreitet, werden mittels Zeitbereichs- und Eigenmodenanalyse berechnet. Darüber hinaus werden die HOM-gedämpften Kavitäten hinsichtlich ihrer Strahlkopplungsimpedanz verglichen und für jeden der Fälle ein geeignetes Dämpfungsschema vorgeschlagen.

Abstract

The design study of the future circular collider includes a hadron collider (FCC-hh), an electron-positron collider (FCC-ee), and a hadron-lepton collider (FCC-he). The FCC-hh has been included in order to search for new physics beyond the standard model by colliding protons at unprecedented center-of-mass energy in the order of 100 TeV. The FCC-ee is planned to operate at different beam energies ranging from 45.6 GeV to 182.5 GeV to conduct precise measurements on the Z, W, H bosons and the top quark. Challenges for the superconducting radio frequency (SRF) cavity design for the FCC-ee result from operating at different RF voltages and beam currents. The objective of this thesis is to initiate the process of making a detailed design for the large and expensive RF system of the FCC-ee. This includes the determination of a suitable RF baseline for the FCC-ee cavities such as the RF frequency and the number of cells per cavity, taking into account the efficiency and cost of the RF system. Based on the considered baselines, multi-cell cavities are designed for operation at the W, H, and $t\bar{t}$ energies and a single-cell cavity to be operated at the Z energy. The middle cells and the end cells of the cavities are optimized separately, taking into account different objective functions. In the optimization of the cavities, the behavior of the fundamental mode and some dangerous higher order modes (HOM) are taken into account. Several higher order mode couplers, including coaxial HOM couplers and waveguide HOM couplers, are then parameterized and optimized to damp the dangerous HOMs of the designed cavities. In addition, a quad-ridged waveguide is introduced as a modified version of the conventional rectangular waveguide HOM coupler to lower the cutoff frequency of the waveguide, and thus improve its damping capability. The optimized cavities and HOM couplers are then combined, and several damping schemes are studied using different numerical methods. The numerical techniques required for the assessment of the performance of the cavities are presented. The behavior of the HOM damped cavities are studied for a single-cavity and for a four-cavity module. The total HOM power and the HOM power that propagates into each waveguide port are calculated from the time domain calculation and also from the eigenmode analysis. In addition, the HOM damped cavities are compared in terms of their beam impedance, and a suitable damping scheme is proposed for each case.