

# Development of a novel low-energy, high-brightness $\mu\#$ beam line

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Eggenberger, Andreas

**Publication date:**

2016

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010783467>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH No. 23756

# Development of a novel low-energy, high-brightness $\mu^+$ beam line

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

**Andreas Eggenberger**

MSc ETH Physics

born on 03.06.1988

citizen of Buchs SG

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Klaus Kirch, examiner  
Prof. Dr. Christoph Grab, co-examiner

2016

# *Abstract*

## **Development of a novel low-energy, high-brightness $\mu^+$ beam line**

by Andreas EGGENBERGER

Low-energy muon ( $\mu^+$ ) beams possess a relatively poor phase space quality. Improving the beam brightness is of great benefit for various precision experiments in the field of particle physics, atomic physics, and for solid state investigations using  $\mu$ SR techniques. This thesis reports on the ongoing developments at ETH Zurich and PSI for realizing a new  $\mu^+$  beam cooling scheme. With this scheme, the phase space of a standard surface muon beam will be reduced by  $\mathcal{O}(10^{10})$ , with an efficiency above  $\mathcal{O}(10^{-3})$ , which results in an increase of brightness of seven orders of magnitude.

The principle of this scheme is to stop and manipulate muons in cryogenic helium gas. The muon swarm, which stops in a sizable volume, is successively compressed into a small, "point-like" volume by making use of E- and B-fields and gas density gradients. Then, the compressed muon swarm is extracted into vacuum through a small orifice, and delivered to the experiments.

Phase space compression is achieved in three consecutive stages: Transverse compression (perpendicular to the incoming beam axis), longitudinal compression (along the beam axis), and extraction into vacuum. In an initial phase of the development, these stages can be tested separately. This thesis reports on the separate tests of the longitudinal and transverse compression stages.

The construction of the transverse compression target has been achieved meeting several challenging requirements. The target is at cryogenic temperatures with a stable vertical gas density gradient. Inside the gas, high electric fields compress the stopped muon swarm in vertical direction. Efficient transverse compression was observed in 2015, and data analysis is ongoing.

In 2014 and 2015, longitudinal compression was measured to occur with a high efficiency of  $(90 \pm 13)\%$  within  $2.5 \mu\text{s}$ . Additionally, in 2015, we also demonstrated that the muons can be moved from stage to stage. The measured data agree well with preliminary simulations, demonstrating that no unknown effect hinders the realization of the complete beam line.

# Zusammenfassung

## Development of a novel low-energy, high-brightness $\mu^+$ beam line

von Andreas EGGENBERGER

Niederenergetische Myonstrahlen ( $\mu^+$ ) haben eine relativ schlechte Phasenraumqualität. Eine verbesserte Strahlbrillanz ist von grossem Nutzen für verschiedene Präzisionsexperimente im Gebiet der Teilchen- und Atomphysik, sowie auch für Festkörperuntersuchungen basierend auf der  $\mu$ SR-Technik. Die vorliegende Arbeit berichtet über die laufenden Entwicklungen an der ETH Zürich und am PSI, wo eine neue Methode zur Myonstrahlkühlung realisiert wird. Mithilfe dieser Methode wird der Phasenraum eines herkömmlichen Myonstrahls (surface muons) um  $\mathcal{O}(10^{10})$  reduziert. Dies geschieht mit einer Effizienz grösser als  $\mathcal{O}(10^{-3})$ , und führt somit zu einer Verbesserung der Strahlbrillanz von sieben Grössenordnungen.

Das Prinzip der Methode basiert darauf, die Myonen in kryogenischem Heliumgas zu stoppen und zu steuern. Der Myonschwarm, welcher in einem beträchtlichen Volumen stoppt, wird danach mittels E- und B-Felder, sowie eines Dichtegradienten im Gas, in ein kleines, "punktförmiges" Volumen komprimiert. Dann wird der komprimierte Myonschwarm durch eine kleine Öffnung ins Vakuum extrahiert und von dort zu anderen Experimenten gebracht.

Unsere Methode zur Phasenraumkompression besteht aus den drei aufeinanderfolgenden Stufen transverse Kompression (senkrecht zur Strahlachse), longitudinale Kompression (entlang der Strahlachse), und Extraktion ins Vakuum. In einem ersten Schritt können diese Stufen getrennt getestet werden. Die separaten Tests der longitudinalen und transversen Kompressionsstufen werden in dieser Arbeit beschrieben.

Die anspruchsvolle Konstruktion des transversen Kompressionstargets wurde erreicht. Im Target konnte bei kryogenen Temperaturen ein vertikaler Dichtegradient im Gas aufrecht erhalten werden. Hohe elektrische Felder innerhalb des Gases komprimierten den gestoppten Myonschwarm in vertikale Richtung. In 2015 wurde effiziente transverse Kompression beobachtet, wobei die Datenauswertung noch nicht abgeschlossen ist.

In 2014 und 2015 wurde gemessen, dass die longitudinale Kompression mit einer grossen Effizienz von  $(90 \pm 13)\%$  innerhalb von  $2.5 \mu\text{s}$  erreicht wird. Zusätzlich konnten wir 2015 zeigen, dass die Myonen von einer Stufe zur nächsten gebracht werden können. Die gemessenen Daten stimmen gut mit vorläufigen Simulationen überein, was beweist, dass keine unbekannteten Effekte der Realisierung der kompletten Strahllinie im Wege stehen.