

DISS. ETH NO. 21613

**Towards the treatment of moving targets
with scanned proton beams:
Experimental verification of motion
mitigation techniques with Gantry 2 at
PSI**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

ANDREAS SCHÄTTI

born on June 22, 1986

citizen of Dürnten (ZH)

accepted on the recommendation of

Prof Dr Antony Lomax (examiner)

Prof Dr Klaus Kirch (co-examiner)

Dr Christian Graeff (co-examiner)

2013

Abstract

Many cancer patients receive radiotherapy at some stage of treatment. In radiotherapy, the patient is irradiated with high-energy X-ray radiation. In the past few years, proton therapy has gained in popularity, as it is in principle able to cause the same damage to tumours as with X-ray radiation, while reducing damage to the surrounding healthy tissue. While many of the recently established proton therapy centres are equipped with the technology for providing modern, scanned proton therapy, treatment sites are still restricted to tumours with small or no motion during treatment, such as tumours in the brain, skull base and spine. Several methods have been proposed to allow treatment of mobile tumours. Extensive simulations have been run with the general conclusion that such treatments are possible. Less work has been done on the question whether these conclusions are reflected in experiments. The aim of this thesis is to provide answers to this question.

Two motion mitigation methods have been studied: *re-scanning* and *gating*. In re-scanning, motion effects are averaged by applying a treatment plan several times per fraction. The idea of gating is to suspend treatment if the tumour is too much out of its planned position. Both methods have been investigated in a homogeneous phantom. Variations in the dose distributions due to changes in the range of the proton beam are thus not incorporated.

In *discrete* scanning, dose delivery is paused while re-positioning the proton beam on a discrete grid of dose delivery positions (*spots*). By choosing the right re-scanning method, motion of up to 1 cm peak-to-peak amplitude could be mitigated. For this purpose, a scanning system with fast energy modulation is required. The performance of gating depended not only on the amplitude of the residual motion but also on the target volume and the motion trajectory. Gating was only an effective technique to alleviate motion effects for a spherical target and regular motion. However, by combining gating and re-scanning, homogeneous dose distributions could be achieved.

Since re-scanning and gating increase treatment time, a faster scanning technique, *continuous* scanning, has been investigated as well. The beam is switched off only for energy changes. It could be shown that this method delivers dose distributions comparable to discrete spot scanning. Motion mitigation by re-scanning was at least as effective as with discrete spot scanning and did not depend on the target volume.

Continuous line scanning was employed to mimic passive scattering proton therapy with a scanning system. To this end, highly re-scanned plans were applied with a collimator and compensator. Motion of up to 1 cm could be alleviated. The intent of this approach is to offer both this *simulated scattering* and scanning proton therapy with a single system. Benefits include less neutron contamination and better conformity of the dose distributions.

Zusammenfassung

Viele Krebspatienten erhalten Strahlentherapie als Teil ihrer Behandlung. Dabei wird oft hochenergetische Röntgenstrahlung eingesetzt. Die Protonentherapie hat in letzter Zeit viel an Popularität gewonnen, weil sie im Prinzip das gesunde Gewebe besser schont, während die Tumore so gut bekämpft werden können wie mit Röntgenstrahlung.

Viele der neuen Zentren für Protonentherapie sind mit moderner Technologie für gescannte Protonentherapie ausgerüstet, doch werden vor allem die traditionellen Indikationen mit wenig oder keiner Bewegung wie Gehirn, Schädelbasis oder Wirbelsäule behandelt.

Mehrere Methoden sind vorgeschlagen worden, um auch bewegliche Tumore zu bestrahlen. Umfangreiche Simulationen haben ergeben, dass dies tatsächlich möglich sei. Die Frage, ob dieser Schluss auch experimentell bestätigt werden kann, wurde noch nicht umfassend beantwortet. Die vorliegende Arbeit versucht, Antworten auf diese Frage zu geben.

Zwei Methoden zur Verringerung der Bewegungseffekte, *Rescanning* und *Gating*, wurden untersucht. Bei *Rescanning* werden Bewegungseffekte dadurch ausgeschmiert, dass das Zielvolumen mehrmals abgescannt wird. Bei *Gating* wird die Bestrahlung unterbrochen, wenn sich der Tumor zu weit von der geplanten Position befindet. Beide Methoden wurden in einer homogenen Geometrie überprüft. Daher konnten die Effekte einer variierenden Reichweite der Protonen nicht berücksichtigt werden.

Bei *diskretem* Scanning wird nicht bestrahlt, während der Protonenstrahl auf dem diskreten Gitter der Strahlpositionen (*Spots*) neu positioniert wird. Mit *Rescanning* konnte so Bewegung von bis zu 1 cm Spitze-Spitze-Amplitude kompensiert werden. Dafür ist jedoch eine schnelle Anpassung der Energie erforderlich. Die Effektivität von *Gating* hängt nicht nur von der Amplitude der verbleibenden Bewegung ab, sondern auch vom Zielvolumen und der Trajektorie der Bewegung. *Gating* war nur für ein sphärisches Volumen und eine regelmässige Bewegung effektiv. Durch die Kombination von *Gating* und *Rescanning* konnten homogene Dosisverteilungen erreicht werden.

Da die Behandlungszeit durch *Rescanning* und *Gating* verlängert wird, wurde auch eine schnellere Scantechnik untersucht, *kontinuierliches* Scanning. Dabei wird der Strahl nur für Energiewechsel unterbrochen. Es konnte gezeigt werden, dass die resultierenden Dosisverteilungen mit diskretem Scanning vergleichbar sind. Die Kompensation von Bewegungseffekten durch *Rescanning* war mindestens so effektiv wie mit diskretem Scanning und hing nicht vom Zielvolumen ab.

Kontinuierliches Scanning wurde auch dazu benutzt, herkömmliche, gestreute Protonentherapie mit einem System für Scanning zu imitieren. Dafür wurde ein Bestrahlungsplan mit hohem *Rescanning* mit Kollimator und Kompensator appliziert. Bewegung von bis zu 1 cm konnte so kompensiert werden. Der Zweck dieses Ansatzes ist es, sowohl diese *simulierte gestreute* als auch gescannte Protonentherapie mit einem einzigen System anbieten zu können. Die Vorteile sind weniger Neutronenkontamination des Strahles und bessere Konformität der Dosisverteilungen.