

# X-ray grating interferometry for imaging and metrology

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Rutishauser, Simon

**Publication date:**

2013

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-009753051>

**Rights / license:**

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

Diss. ETH N°. 20939

# X-ray grating interferometry for imaging and metrology

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

SIMON RUTISHAUSER  
MSc en Microtechnique EPFL  
born 10<sup>th</sup> of March 1985  
citizen of Bottighofen, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Marco Stampanoni, examiner  
Dr. Christian David, co-examiner  
Prof. Dr. Christian Schroer, co-examiner  
Prof. Dr. Henry Chapman, co-examiner

2013

# Summary

Due to their ability to penetrate matter, X-rays are widely used to image the inner structure of solid objects in applications such as security screening at airports, industrial testing and medical imaging. Conventional imaging techniques illuminate an object with X-rays and observe the intensity distribution of the X-rays that have propagated through the object. That is, they typically rely on the different attenuation of X-rays in different regions of the sample to generate image contrast. This mechanism enables good contrast between strongly absorbing heavy elements with high electron-density, such as calcium in bones, and light elements such as carbon or water in soft tissue. This is seen prominently in a typical medical X-ray image. However, there is little contrast in such an image in regions consisting solely of soft tissue, as it consists predominantly of light elements.

Imaging techniques that instead rely on the phase shift of radiation in the sample as a contrast mechanism promise to deliver better contrast and provide additional information that is not accessible with attenuation based imaging. Hard X-ray grating interferometry is one such technique that has found widespread application since its development ten years ago. This technique can be used both at synchrotron sources as well as in laboratory X-ray setups using conventional X-ray tubes sources. In addition to the conventional attenuation image, grating interferometry provides both a differential phase image and a dark-field image which is related to small-angle scattering and can provide information on structures that are smaller than the detector resolution.

A typical grating interferometer consists of a phase grating made of micrometer-sized line structures, that modulates the phase of the incident X-ray beam. As the beam propagates, a line patterned intensity modulation emerges. This intensity modulation is locally distorted, depending on the refraction in the sample, which is placed upstream of the phase grating. Superimposing an absorbing analyzer grating with the intensity pattern, the distortions can be analyzed by a camera with a pixel size that is much larger than the grating period. The advancement and application of grating interferometry are the subject of this PhD thesis.

Traditionally, grating interferometry uses line grating structures. In consequence, the interferometer is only sensitive to refraction in one direction, perpendicular to the grating lines. A technique capable of recording the refraction angle in two perpendicular directions, which is equivalent to retrieving the full wavefront phase gradient vector, could provide additional information and lead to improvements in image quality.

Two different approaches to recording this information have been developed as part of this thesis in collaborations especially with I. Zanette and T. Donath, as described in Chapter 4. For radiography applications, we describe the development and implementation of a grating interferometer using two-dimensional grating structures, that enables the simultaneous measurement of the refraction angle in two perpendicular directions, as well as recording a directional dark-field signal. For tomography, we have developed a tilted

grating interferometer configuration. It is based on one-dimensional gratings, but can retrieve the full wavefront phase gradient vector field. Both approaches, each suited to a different type of application, reveal previously inaccessible information and can lead to an improved image quality.

Grating fabrication techniques to create two-dimensional grating structures have been developed as well. They are equally well suited for the fabrication of one-dimensional diffraction gratings of high aspect ratio, as described in Chapter 3.

Due to its outstanding sensitivity to refraction angles, hard X-ray grating interferometry is not only of interest in imaging. It is also well suited for characterizing the wavefront produced by an X-ray source and the distortions induced by X-ray optical elements. This is the subject of Chapter 5, which also benefits directly from the two-dimensional grating interferometer developed and described in the preceding chapter. Here, we investigate the quality of and wavefront distortions induced by various X-ray optical elements, such as a refractive beryllium focusing lens, a silicon double crystal monochromator in Bragg configuration under heat load and a diamond crystal used as monochromator in Laue configuration.

The second part of Chapter 5 describes the first experiments at a hard X-ray free electron laser, the Linac Coherent Light Source (LCLS) in Stanford, that has been delivering hard X-ray laser pulses to user experiments since fall 2010. The newly developed X-ray lasers provide an unprecedented flux density, spatial coherence and an extremely short pulse duration. These properties have spurred many new and innovative experiments in various branches of science, including as biology, chemistry and physics. Many of these experiments rely fundamentally on a clean, well-defined and if possible stable wavefront. Using a grating interferometer, we have studied the wavefront of the X-ray pulses emitted by LCLS. We have analyzed the wavefront distortions induced by the various optical elements such as the hard X-ray offset mirrors and monochromators, as well as the shot-to-shot fluctuations of the source position in the 130 m-long undulator. The offset mirrors were found to be horizontally collimating the radiation, their higher order shape errors are consistent with ex-situ measurements. The source position was found to fluctuate from shot to shot by about  $20\ \mu\text{m}$  perpendicular to the optical axis, and by  $6\ \mu\text{m}$  along the optical axis. This type of experiment can lead to a better understanding of the source and to an improved performance and stability of free electron lasers sources – grating interferometry is therefore expected to become a widely used technique for metrology purposes both at synchrotron and free electron laser sources.

# Zusammenfassung

Dank ihrer Fähigkeit Materie zu durchdringen und damit deren innere Struktur sichtbar zu machen, werden Röntgenstrahlen heutzutage in vielen verschiedenen Anwendungsgebieten benutzt, wie zum Beispiel zum Untersuchen von Gepäckstücken am Flughafen, der Überprüfung von Bauteilen in der Industrie oder in der Medizin. Konventionelle Röntgenabbildungstechniken beleuchten ein Objekt mit Röntgenstrahlen und zeichnen die Intensitätsverteilung der Röntgenstrahlen auf, nachdem sie ein Objekt durchdrungen haben. Der dabei erzeugte Kontrast entsteht durch unterschiedlich starke Abschwächung der Röntgenstrahlen in verschiedenen Teilen des zu untersuchenden Objekts. Dies ermöglicht einen starken Kontrast zwischen schweren Elementen wie Kalzium in Knochen und leichten Elementen wie Kohlenstoff und Wasser in Weichgewebe. Allerdings entsteht dabei kaum Kontrast innerhalb des Gewebes selbst, da dessen verschiedene Bestandteile allesamt hauptsächlich aus leichten Elementen bestehen, die für die Röntgenstrahlung quasi durchsichtig sind.

Röntgenabbildungstechniken, die sich stattdessen der Phasenschiebung der Strahlung im Untersuchungsobjekt bedienen um Kontrast zu erzeugen, können so zusätzliche Informationen gewinnen. Die Gitterinterferometrie für harte Röntgenstrahlen ist eine derartige Technik, die seit ihrer Entwicklung vor zehn Jahren eine grosse Verbreitung gefunden hat. Sie kann sowohl an Synchrotronlichtquellen als auch im Labor an konventionellen Röntgenröhren benutzt werden. Zusätzlich zum traditionell verfügbaren Abschwächungsbild können mittels Gitterinterferometrie auch ein differentielles Phasenkontrastbild und ein Dunkelfeldbild erzeugt werden. Letzteres entsteht durch Kleinwinkelstreuung von Strukturen die kleiner sind als die Detektorauflösung.

Ein typisches Gitterinterferometer besteht aus zwei Gittern, welche aus mikrometergrossen Linienstrukturen bestehen. Das erste moduliert die Phase der Röntgenstrahlen. Durch Propagation verwandelt sich diese Phasenmodulation in ein linienförmiges Intensitätsmuster. Als Folge der Brechung im Untersuchungsobjekt, das vor das Phasengitter gestellt wurde, wird dieses Intensitätsmuster verzerrt. Seine Periode ist typischerweise viel kleiner als die Detektorauflösung, die Verzerrungen können aber trotzdem beobachtet werden, wenn das Intensitätsmuster mit einem Absorptionsgitter überlagert wird. Dadurch entsteht ein Moirébild, welches mit einem Detektor aufgezeichnet und analysiert werden kann. Die Weiterentwicklung und Anwendung der Gitterinterferometrie sind das Thema dieser Dissertation.

Ein herkömmliches Gitterinterferometer benutzt linienförmige Phasen- und Absorptionsgitter. Infolgedessen reagiert das Interferometer nur auf Brechungswinkel in einer Richtung, rechtwinklig zu den Gitterlinien. Eine Technik die den Brechungswinkel gleichzeitig in zwei Richtungen aufzeichnen könnte, was einer Beobachtung des Gradientenfelds der Phase der Wellenfront entspricht, kann im Vergleich dazu zusätzliche Informationen gewinnen, die

auch zur Verbesserung der Qualität der gewonnenen Bilddaten genutzt werden kann.

Als Teil dieser Dissertation wurden, in Zusammenarbeit insbesondere mit T. Donath und I. Zanette, zwei verschiedene Ansätze entwickelt und getestet, um den Brechungswinkel gleichzeitig in zwei Richtungen zu messen, wie im Kapitel 4 beschrieben. Für Radiographieanwendungen haben wir ein Gitterinterferometer bestehend aus zweidimensionalen Gitterstrukturen entwickelt, mit dem der Brechungswinkel gleichzeitig in mehrere Richtungen gemessen werden kann, genauso wie auch das richtungsabhängige Dunkelfeldbild. Für die Tomographie wurde eine Gitterinterferometerkonfiguration mit gedrehten Gittern entwickelt und getestet. Diese benutzt eindimensionale Gitterstrukturen, ist aber trotzdem in der Lage, das volle Gradientenvektorfeld zu vermessen. Mittels beider Ansätze, die für unterschiedliche Anwendungen geeignet sind, werden zusätzliche Informationen gewonnen, die zu einer Verbesserung der Bildqualität genutzt werden können.

Für die Herstellung von zweidimensionalen Gitterstrukturen wurden passende Fabrikationsprozesse entwickelt. Diese Prozesse sind ebenfalls sehr gut geeignet, um eindimensionale Gitter mit sehr hohen Aspektverhältnissen herzustellen, wie im Kapitel 3 beschrieben.

Dank seiner ausserordentlich hohen Sensitivität ist Gitterinterferometer nicht nur zur Röntgenabbildung geeignet, sondern auch von grossem Interesse zur Vermessung der Wellenfront verschiedener Röntgenquellen und der Aberrationen von Röntgnoptiken. Dies ist das Thema des Kapitels 5, in welchem auch das im vorhergehenden Kapitel beschriebene zweidimensionale Gitterinterferometer zum Einsatz kommt. Damit haben wir die Wellenfront nach einer einzelnen, leicht fokussierenden Berylliumlinse, einem Silizium-Doppelkristallmonochromator und nach einem Diamantkristallmonochromator untersucht.

Im zweiten Teil von Kapitel 5 werden die ersten Gitterinterferometer an einem Freielektronen-Laser, der Linac Coherent Light Source (LCLS) in Stanford beschrieben. Dieser erzeugt erstmals seit Herbst 2010 Laserpulse im harten Röntgenbereich. Diese neu entwickelten Röntgenlaser erzeugen Röntgenstrahlung mit einer eine noch nie dagewesenen Intensität, hoher räumliche Kohärenz und ultrakurzer Pulsdauer. Diese Eigenschaften ermöglichen viele neue und interessante Experimente in Biologie, Chemie und Physik. Viele dieser Experimente benötigen eine saubere, wohldefinierte und wenn möglich stabile Wellenfront. Wir haben die Eigenschaften der Röntgenpulse an LCLS mittels eines Gitterinterferometers untersucht - unter anderem wurden die Qualität der verschiedenen optischen Elemente, wie der Ablenkspiegel und Monochromatoren untersucht. Zudem konnte für jeden einzelnen Puls die Quellpunktposition in der 130 m langen Undulatorquelle ermittelt werden. Es wurde festgestellt, dass die Ablenkspiegel die Röntgenpulse in horizontaler Richtung kollimieren. Die restlichen Aberrationen in guter Übereinstimmung mit ex-situ Messungen der Spiegelform. Die gemessene Quellpunktposition fluktuierte von einem Röntgenpuls zum nächsten um etwa 20  $\mu\text{m}$  rechtwinklig zur- und um etwa 6 m entlang der optischen Achse. Derartige experimentelle Daten können zu einem besseren Verständnis der Quelle führen, und damit auch zu einer besseren Leistung und Stabilität der Freielektronen-Laser. Es ist zu erwarten, dass Gitterinterferometrie sich zu einer weit verbreiteten Metrologietechnik entwickelt – sowohl an Synchrotronlichtquellen als auch an Röntgenlasern.