

SPEKTROMETERGITTER FÜR DIE GAIA-WELTRAUMMISSION

SPECTROMETER GRATING FOR THE GAIA SPACE MISSION

Spektrometergitter werden für verschiedene wissenschaftliche Weltraummissionen oder die Erdbeobachtung eingesetzt.

Die hohen technischen Ansprüche, die an die in den Weltraum zu bringenden Instrumente gestellt werden, spiegeln sich auch in den Anforderungen für die Herstellung dieser Gitter wieder.

Ein solches Instrument ist das Radial Velocity Spectrometer (RVS) der Astrometriemission Gaia der ESA ^{1/}. Das RVS soll dabei der Vermessung von Sternentfernungen dienen, die an Hand der Rotverschiebung einer Spektrallinie des Elements Kalzium des beobachteten Objekts im Wellenlängenbereich zwischen 847 nm und 874 nm durchgeführt wird. Zentrales Bauteil des Spektrometers ist ein geblaztes Transmissionsgitter mit einer Gitterperiode von 3,1 µm. Dessen charakteristische Parameter, wie die laterale Größe von 205 mm x 155 mm, die Abbildungsqualität mit einem Wellenfrontfehler < 8 nm RMS sowie die geforderte Beugungseffizienz von >70 % machen dieses Gitter zu einem äußerst anspruchsvollen Element.

Die Gesamtheit dieser Forderungen ist nur äußerst schwer mit Gittern erfüllbar, die mit konventionellen Herstellungsmethoden, wie Ritzen oder Interferenzlithographie, erzeugt werden.

Different earth-observation and scientific space missions require special spectrometer gratings. As satellite instruments typically operate close to technological limits, the realization of the respective gratings is also extremely demanding. One such instrument is the Radial Velocity Spectrometer (RVS) of the ESA astrometry mission Gaia ^{1/}. The RVS is dedicated to the measurement of star distances by deriving the red shift of a measured object by a spectral signature of the element calcium in the spectral range between 847 nm and 874 nm. The heart of this spectrometer is a blazed transmission grating with a grating period of 3.1 µm. Its characteristic parameters, like the lateral dimensions of 205 mm x 155 mm, imaging performance (wave front error < 8nm RMS), and a required diffraction efficiency of > 70 %, make it an extremely demanding element. Furthermore, it must be qualified for application in a space environment. The entirety of all these parameters makes it difficult to fulfill them with gratings built by conventional methods like ruling or interference lithography.

¹ REM-Aufnahme der Gitterstruktur. Die kontinuierliche Phasenfunktion innerhalb einer Gitterperiode ist durch eine binäre Subwellenlängenstruktur erzeugt.

¹ SEM-image of the grating structure. The continuous phase shift within one grating period is realized by a binary sub-wavelength pattern – a so-called effective medium structure.

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie, die im Auftrag der ESA im Jahr 2008 am IOF durchgeführt wurde, sollte daher eine alternative Herstellungstechnologie für das RVS-Gitter gefunden werden. Auf der Basis langjähriger Erfahrungen in der mikro- und nanostrukturierten Optik /2/ konnte eine spezielle Gitterstruktur mit einer effektiven Brechungsindexvariation entwickelt werden, die sowohl die geforderte optische Funktion als auch die Randbedingungen des Herstellungsprozesses erfüllt. Die Struktur eines solchen effektiven Mediums besteht aus binären Substrukturen innerhalb einer Gitterperiode, deren laterale Dimension unterhalb der Wellenlänge der Anwendung liegt. Dadurch spürt das Licht die Struktur nur in Form eines gemittelten Brechungsindex. Der lokale Brechungsindex ist dann eine Funktion des ortsabhängigen Füllfaktors der Struktur. Abbildung 1 zeigt eine REM-Aufnahme des Gittermusters, welches für das RVS-Gitter entwickelt wurde. Deutlich wird der Aufbau der Gitterperiode aus den Subwellenlängenstrukturen mit der Variation des lokalen Füllfaktors. Das Oberflächenprofil des Gitters hat lediglich zwei Höhenstufen, wodurch dieser Ansatz einen mehrstufigen lithographischen Herstellungsprozess umgeht. Dadurch werden auch die negativen Auswirkungen von Überdeckungsfehlern zwischen verschiedenen Lithographieebenen, wie die Verringerung von Beugungseffizienz und Abbildungsqualität, vermieden.

Das Gitter wurde am »Center for Advanced Micro- and Nano-Optics« /3/ des Fraunhofer IOF mittels hochauflösender Elektronenstrahlolithographie und reaktiven Ionenätzprozessen in einem Kieselglassubstrat hergestellt. Mit diesem Element findet das Prinzip der effektiven Medien erstmalig eine reale Anwendung außerhalb reiner Reflexminderung.

Finding an alternative realization technology for the Gaia RVS grating was the aim of a feasibility study conducted by IOF on behalf of ESA in 2008. Based on the long term experience in micro- and nano-structured optics /2/, a very special grating structure comprising an effective refractive index variation has been developed which fulfills both the optical requirements and the constraints of the fabrication process. This so-called effective medium structure is composed of binary sub-structures within one grating period with lateral extensions well below the operation wavelength used in the application. Such structures are experienced by the illumination light only as an averaged refractive index. The local refractive index is a function of the local filling factor of the structure. Figure 1 shows an SEM image of the final grating pattern developed for the RVS grating. It can be seen that the grating period is composed of sub-wavelength structures with a variation of the local sub-structure density. The grating surface profile has only two height levels. This approach avoids the need for multiple successive lithography steps and thus, the efficiency- and wave-front-performance degrading effects of misalignment between the different lithography layers.

The grating has been fabricated at the "Center for Advanced Micro- and Nano-Optics" /3/ of the Fraunhofer IOF by high resolution electron-beam lithography on a SB350 OS (Vistec) system and successive reactive ion etching processes in a fused silica substrate. With this element, the principle of effective media is used for the first time in a real world application outside of pure reflection reduction.

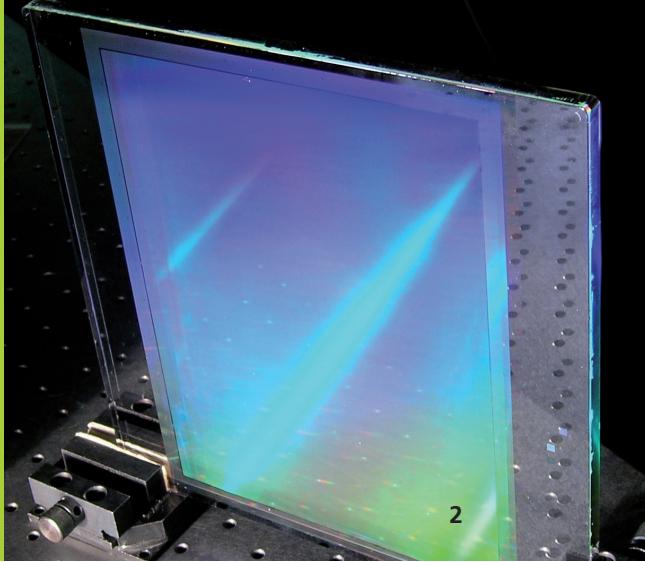


Abbildung 2 zeigt das fertige RVS-Gitter, für das die Erfüllung aller relevanten Parameter erfolgreich demonstriert werden konnte. Im Ergebnis der Machbarkeitsstudie wurde das Fraunhofer IOF im Januar 2009 als Lieferant für die Flugmuster des Gitters ausgewählt. Deren Auslieferung ist für Februar 2010 geplant. Der Gaia-Satellit, und damit auch unser Gitter, soll im Dezember 2011 in den Weltraum gestartet werden.

Danksagung

Die Herstellung der Gitter erfolgte mit einem Elektronenstrahlschreiber SB350 OS. Die Anschaffung dieser Anlage wurde durch die Europäische Union, den Freistaat Thüringen und die Fraunhofer-Gesellschaft unterstützt (FZK: B 408 – 04004).

A full-size version of the RVS grating is shown in Fig. 2. The compliance of the design and the technology to fulfill all relevant grating parameters has been demonstrated successfully. As a result, Fraunhofer IOF was selected as a supplier for Gaia RVS flight gratings in January 2009. The fabrication of these gratings is still in progress and delivery is scheduled for February 2010. The Gaia satellite, and thus our grating, is planned to be launched in December 2011.

Acknowledgments

All gratings exposures for this study were done with an e-beam writer SB350 OS. The purchase of this facility was supported by the European Union (FZK: B 408 – 04004).

2 Photographie des Spektrometergitters. Die nutzbare Gitterfläche hat eine Abmessung von 155 mm x 205 mm.

2 Photograph of the spectrometer grating. The useful grating extension is 155mm x 205mm.

Literatur/References

/1/ <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=GAIA&page=index>
<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=26>

/2/ Zeitner, U.D.; Kley, E.-B.: Advanced Lithography for Micro-Optics, Conference on Laser Beam Shaping VII, SPIE Annual Meeting, Proc. SPIE 6290, Aug. 2006.

/3/ www.cmn-optics.org

AUTHORS

Uwe Detlef Zeitner

Dirk Michaelis

Tino Benkenstein

Torsten Harzendorf

Ernst-Bernhard Kley¹

Jörg Fuchs¹

Matthias Erdmann²

¹ *Institut für Angewandte Physik,
Friedrich-Schiller-Universität Jena*

² *ESA-ESTEC, Noordwijk, Netherlands*

CONTACT

Dr. Uwe Detlef Zeitner

Phone +49 3641 807-403

uwe.zeitner@iof.fraunhofer.de

Dr. Andreas Bräuer

Phone +49 3641 807-404

andreas.braeuer@iof.fraunhofer.de