

## NEUE GITTER FÜR LASERANWENDUNGEN

## NOVEL GRATINGS FOR LASER APPLICATIONS

Auch heute, knapp 200 Jahre nach den wegweisenden Experimenten von Joseph von Fraunhofer [1], haben optische Gitter nicht an Attraktivität verloren. Immer noch werden bei Gittern interessante Phänomene neu entdeckt und untersucht. Der Anwendungsbereich optischer Gitter ist daher äußerst breit und erstreckt sich von der Spektroskopie, über Strahlteiler bis hin zur Manipulation ultrakurzer Laserpulse. Beugungsgitter sind heute in einer Vielzahl industrieller Anwendungen vertreten. Triebfeder dieser anhaltenden Entwicklung ist die stetige Optimierung der Herstellungs- und Design-Möglichkeiten.

Die Entwicklung der modernen Elektronenstrahlithographie, besonders in Bezug auf Auflösung und Genauigkeit, ermöglicht heute den Einsatz effektiver Medien in Gittern für reale Anwendungen. Ein gutes Beispiel hierfür liefert das im Rahmen des EU-Projekts SMARTIEHS [2] realisierte Gitter (Abb. 1). Es dient der Lichteinkopplung in ein integriertes Laserinterferometer, wofür der einfallende Strahl definiert abgelenkt werden muss. Zur Erfüllung der Effizienzvorgaben ist ein Blaze der Gitterstruktur notwendig, welcher durch Anpassung des effektiven Brechungsindex einer binären Sub-Wellenlängen-Struktur realisiert wurde.

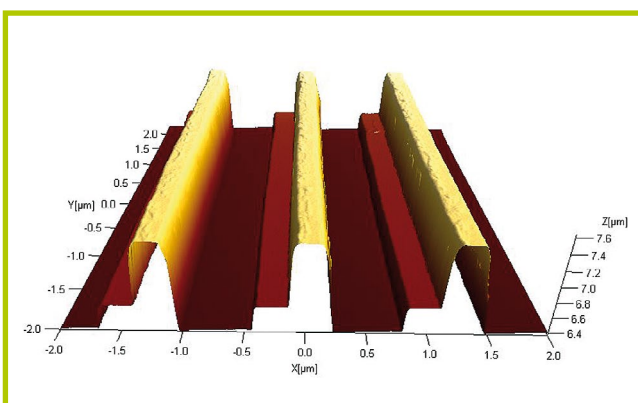
Almost 200 years after the pioneering experiments by Joseph von Fraunhofer, [1] optical gratings have not lost any of their attraction. Even today, exciting grating effects are being discovered and investigated. The field of grating applications stretches from dispersing elements in spectrometers via beam-splitting elements to pulse-compression gratings for the manipulation of ultrashort laser pulses. As a result, nowadays optical gratings can be found in a huge number of industrial applications. The ongoing development of this field is driven by the steady improvement of fabrication and design capabilities.

The developments in modern lithographic technologies, especially those concerning resolution and accuracy, paved the way for the use of effective media and their combination with gratings in real applications. This is readily demonstrated by the grating realized in the framework of the EU project SMARTIEHS [2], shown in Fig. 1. The grating serves as incoupling grating for an integrated laser interferometer for which the incident beam must be deflected by a specified angle. To meet the efficiency requirements, the grating structure requires a blaze which is realized by tailoring the effective refractive index by the use of binary sub-wavelength structures.

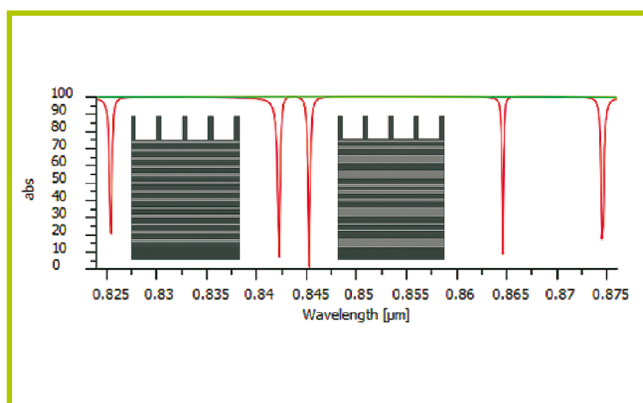
**1** Gitterstruktur und REM-Aufnahme des SMARTHIES-Einkoppelgitters. Zur Optimierung der Effizienz wurde ein Blaze mittels binärer Sub-Wellenlängen-Strukturen realisiert. | Grating structure and SEM picture of the incoupling SMARTHIES grating. For optimal efficiency a blaze was realized by the use of binary sub-wavelength structures.

Das Gitter besteht somit aus zwei Stegen unterschiedlicher Breite innerhalb der Periode von 1  $\mu\text{m}$ . Der dünnere Steg ist dabei nur 90 nm breit, was in Kombination mit der erforderlichen Gittertiefe eine signifikante Herausforderung für die Fertigungstechnologie darstellt. Dank der am »Center for Advanced Micro- and Nano-Optics« (CMN-Optics) [3] zur Verfügung stehenden Technologien und Erfahrungen konnte das beschriebene Element erfolgreich mit einer Effizienz von 63 %, nur knapp unter der theoretischen Vorhersage von 65 %, realisiert werden.

The grating therefore consists of two ridges of different width within a 1  $\mu\text{m}$  period. The optimal depth of the grating is about 1  $\mu\text{m}$ , which – in combination with a width of only 90nm for the thinnest ridge – is very challenging from the technological point of view due to the very high aspect ratio of around 11. Thanks to the facilities and experiences combined at the "Center for Advanced Micro- and Nano-Optics" (CMN-Optics), [3] the element was successfully realized with an efficiency of about 63 %, approaching the theoretical estimate of 65 %.



**2** AFM-Aufnahme eines mittels des am CMN-Optics entwickelten Prozesses zur Mehrfachstrukturierung realisierten Multilevel-Gitters. Das im Design angestrebte Profil wird nahezu perfekt reproduziert. | AFM scan of a blazed three-level grating manufactured using the modified multistep binary fabrication technology. The designed profile is almost perfectly reproduced.



**3** Beugungseffizienzen der Gitter mit periodischem (rote Kurve) und aperiodischem Reflektordesign. In der Abbildung der Gitterstruktur symbolisieren hellgraue Bereiche  $\text{SiO}_2$ , dunkelgraue Bereiche  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ -Schichten. | Diffraction efficiencies of the gratings with periodic (red) and optimized aperiodic reflector stack (green). In the insets light gray coloring indicates  $\text{SiO}_2$ , dark gray coloring  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  layers.

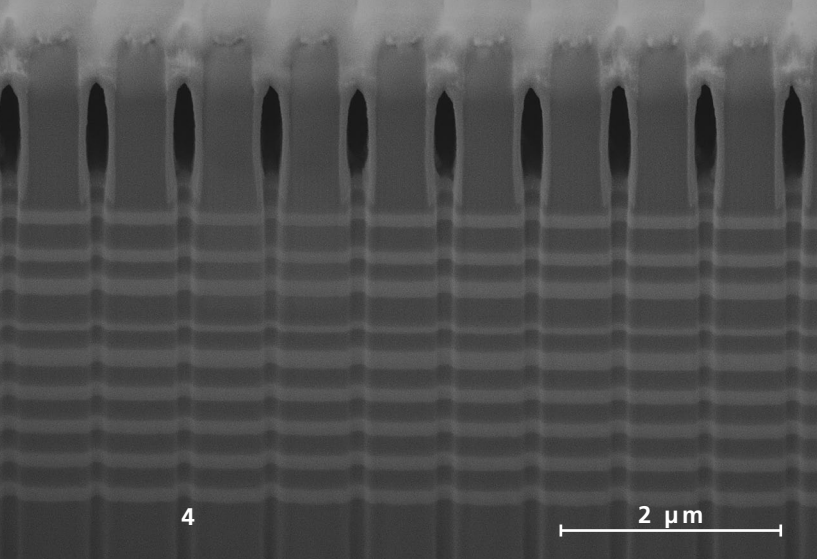


Abbildung 2 zeigt ein Blaze-Gitter mit drei Höhenstufen. Mit Hilfe eines am CMN-Optics entwickelten Ansatzes konnte das bei der Herstellung derartiger Multilevel-Strukturen auftretende Problem mangelnder Überdeckungsgenauigkeit der in zwei unabhängigen Strukturierungsschritten erzeugten Ebenen gelöst werden. Die vermessenen Beugungseffizienzen stimmen daher nahezu perfekt mit den Simulationen überein [4].

Für einige Anwendungen ermöglichen Reflexionsgitter als Kombination von Beugungsgitter und reflektierendem Element die Ausnutzung zusätzlicher Freiheitsgrade. Für eine möglichst hohe Beugungseffizienz sind dielektrische Spiegelschichtsysteme als Reflektor präferiert, da sie ohne nennenswerte Absorption gestaltet werden können. Nahe dem Littrow-Winkel können mit einem derartigen Aufbau Beugungseffizienzen von annähernd 100 % erreicht und zudem eine spektrale Bandbreite von einigen 10 nm zusammen mit einer von der Eingangspolarisation unabhängigen Funktion garantiert werden. Als problematisch erweist sich jedoch das Auftreten sogenannter guided-mode Resonanzen, welche sich, wie in Abb. 3 dargestellt, in Form scharfer Einbrüche der Effizienz an bestimmten Wellenlängen bemerkbar machen. Derartige Resonanzen können zwar zuverlässig durch eine signifikante Reduktion der Gitterperiode verhindert werden, allerdings ist dies oft nicht mit der Anwendung vereinbar. Als alternativen Ansatz nutzen wir daher die strukturellen Freiheitsgrade des Reflexionsschichtsystems aus und optimieren Gitter und Schichtstapel gemeinsam, wobei das Schichtsystem von der üblicherweise genutzten Struktur periodischer Doppelschichten abweichen darf.

Another example of a blazed nanostructure is the three-level grating shown in Fig. 2. For its fabrication, the standard process, i. e. multistep binary technology, has been modified in order to achieve greater accuracy in the final profile. The diffraction measurements are in perfect agreement with the simulation, i. e. the efficiency in the first order is about 86 %, [4] which is remarkable given the normal incidence and a wavelength to period ratio in the resonance domain.

Additional freedom for the design can be exploited by using the reflected diffraction orders generated by a grating-mirror combination. For the sake of efficiency, dielectric mirrors (Fig. 3) are preferred due to their low losses. Using such a setup, almost 100 % diffraction efficiency, a spectral bandwidth of several 10nm, and polarization-independent performance can be achieved. However, the design and application of multilayer dielectric gratings (MDG) are challenged by the occurrence of guided mode resonances (GMR) which become noticeable as singular drops in the diffraction efficiency (Fig. 3). While GMRs can be removed by a significant reduction of the grating period, such an approach is often incompatible with the application requirements. As a different approach, we therefore exploit all structural degrees of freedom by a combined optimization of grating and layer stack, going beyond the common design of stacked double layers.

Figure 3 shows the performance of the optimized MDG. Clearly, no GMR dips are present in the spectral range of interest, and a diffraction efficiency of more than 98 % is achieved independent of the incident polarization.

4 Querschnitt eines Reflexionsgitters mit aperiodischem Reflektordesign. Für die Präparation des Querschnitts mit Hilfe eines fokussierten Ionenstrahls wurde das Gitter mit Platin bedeckt. | Cross-section of a reflection grating with aperiodic reflector-stack layout. The grating was covered with platinum in order to prepare the cut using a focused ion beam.

Abbildung 3 demonstriert den Erfolg des gewählten Ansatzes, mit dessen Hilfe – unter Beibehaltung einer polarisations-unempfindlichen Beugungseffizienz von mehr als 98 % – die Resonanzen vollständig aus dem für die Anwendung relevanten Spektralbereich entfernt werden konnten. Abbildung 4 zeigt den Querschnitt eines Reflexionsgitters mit aperiodischem Reflektordesign. Vergleichbare Gitter wurden mit führenden Industriepartnern für verschiedene Anwendungen erfolgreich realisiert.

Figure 4 shows a cross-section of a reflection grating with aperiodic reflector-stack layout, prepared by a focused ion beam. Similar gratings have been successfully realized with various industrial partners for different applications.

#### Literatur/References

- [1] Fraunhofer, J.: Kurtzer Bericht von den Resultaten neuerer Versuche über die Gesetze des Lichtes, und die Theorie derselben. Ann. Phys. 74, 337–378 (1823).
- [2] Zeitner, U. D.; et al.: Nano-optical grating interferometer for SMART InspEction system High Speed and multifunctional testing of MEMS and MOEMS (SMARTIEHS), EOS Annual Meeting 2010 (EOSAM 2010).
- [3] [www.cmn-optics.org](http://www.cmn-optics.org).
- [4] Oliva, M.; et al.: Highly efficient three-level blazed grating in the resonance domain. Optics Letters 35, 2774 (2010).

## AUTHORS

*Frank Fuchs*  
*Maria Oliva*  
*Torsten Harzendorf*  
*Tino Benkenstein*  
*André Matthes*  
*Dirk Michaelis*  
*Ernst-Bernhard Kley<sup>1</sup>*  
*Uwe Detlef Zeitner*

<sup>1</sup> *Institut für Angewandte Physik,  
Friedrich-Schiller-Universität Jena;  
Fraunhofer IOF*

## CONTACT

*Dr. Frank Fuchs*  
*Phone +49 3641 807-434*  
*frank.fuchs@iof.fraunhofer.de*

*Dr. habil. Uwe Detlef Zeitner*  
*Phone +49 3641 807-403*  
*uwe.zeitner@iof.fraunhofer.de*