

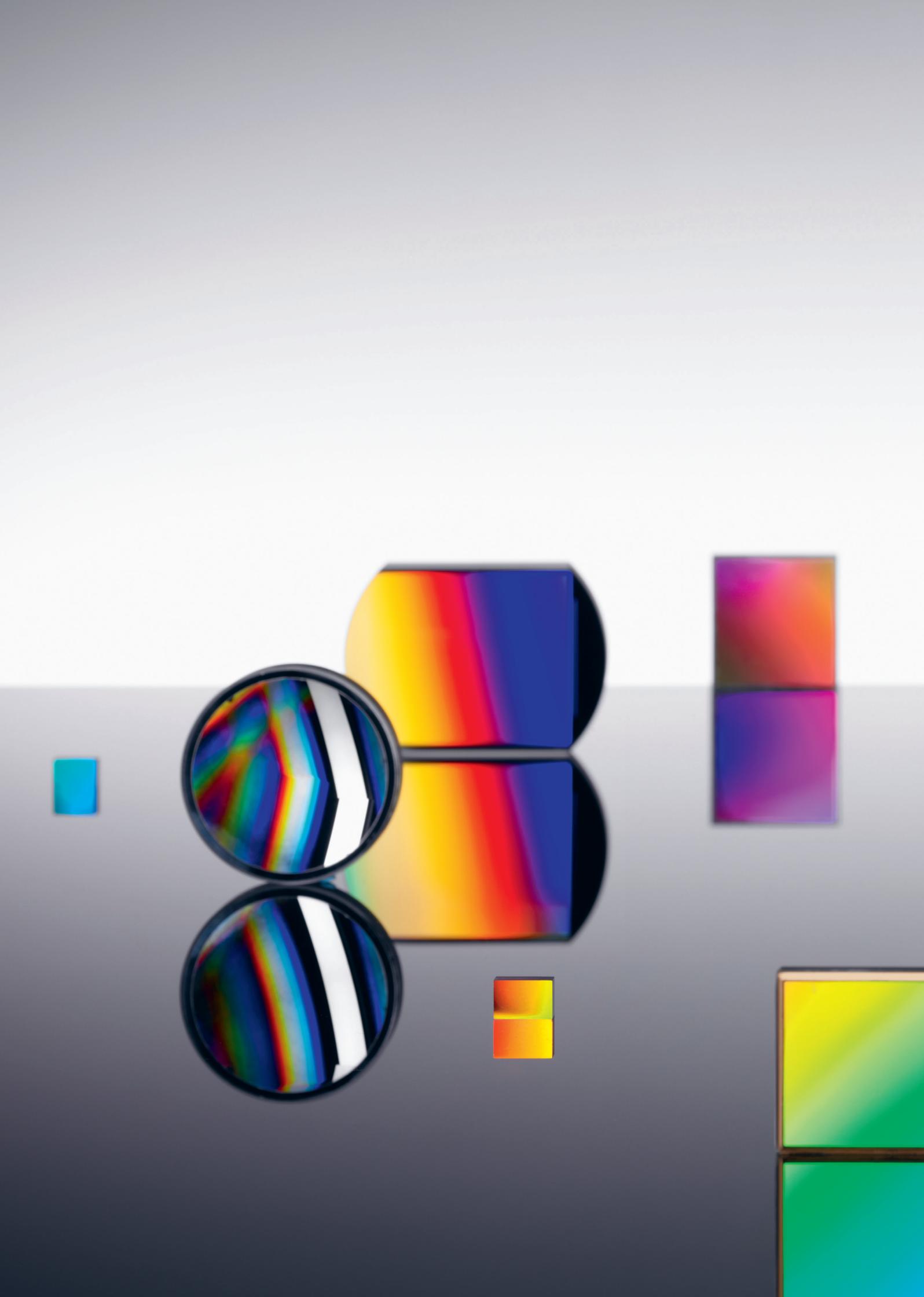
Optische Gitter

Kompodium Grundlagen, Herstellung,
Produkte und Anwendungen



Inhalt

Optische Gitter – ganz ZEISS	05
Optische Gitter – ganz natürlich	10
Grundlagen optischer Gitter	18
Gitterherstellung	26
Gitterprüfung	33
Gitterarten	38
Anwendungen optischer Gitter	44





Optische Gitter – ganz ZEISS

1821 führte Josef Fraunhofer (1787–1826) als erster Experimente zur Beugung von Licht an optischen Gittern durch, die er dafür quasi wiederentdeckte. Denn bereits 1785 hatte der amerikanische Astronom David Rittenhouse (1732–1796) das erste Gitter in Vierspaltenanordnung hergestellt.

Die ausschließlich mechanisch hergestellten Gitter (Fraunhofer selbst verwendete Drähte) wurden 1882 entscheidend durch H.A. Rowland (1848–1901) in ihrer Präzision verbessert. Neben den physikalisch-theoretischen Entdeckungen dieser Zeit stieß er so auch eine zunehmend anwendungsorientierte Entwicklung an. Die Herstellung mechanisch geteilter Originalgitter ist allerdings bis heute mit hohem Zeit- und Kostenaufwand verbunden und stellt höchste Anforderungen an das feinmechanische Können.

Wahrscheinlich noch vor 1925 wurde die erste Gitterteilmaschine für 30 x 30 mm Gitter in einem Konstruktionsbüro bei Carl Zeiss in Jena aufgestellt. Die erste nachweisbare Aufzeichnung über ein bei Carl Zeiss geteiltes Gitter stammt vom 18. Januar 1938. An diesem Tag erfolgte die 101. Teilung durch die Gitterteilmaschine eines modifizierten Rowlandtyps. Nach 1945 und der Spaltung von Carl Zeiss gab es bei vielen Produkten eine Parallelentwicklung in den zwei ZEISS-Unternehmen in Ost und West. Das sollte auch für die Gitterherstellung in den nächsten Jahrzehnten gelten. So begann man in den Fünfzigerjahren in Jena und Oberkochen die Fertigung von Gittern neu aufzubauen, da die erste Gitterteilmaschine nicht mehr verfügbar war.

In Jena wurde 1951 eine neue Gitterteilmaschine (GTM I-Rowlandtyp) entwickelt. Diese GTM I konnte

mit zwei Weltneuheiten aufwarten: Die beweglichen Schlitten wurden von einer Öldrucklagerung getragen und im Schrittschaltwerk wurde anstelle eines Zahnrads eine glatte Schrittschaltzscheibe benutzt. Ende 1955 war der relative unpolarisierte Beugungswirkungsgrad der von ihr geteilten Gitter mit 651 L/mm im Maximum $\geq 70\%$ reproduzierbar, wobei die beugende Fläche 70 x 64 mm² groß war.

Auch in Oberkochen begann man 1955 mit dem Wiederaufbau der Teilungstechnik und dem Bau von Teilmaschinen für Beugungsgitter mit einer Teillänge von 75 mm.

Das Potenzial zur Fertigung von mechanischen Originalgittern wurde in den Sechziger- und Siebzigerjahren in beiden ZEISS-Firmen durch weitere Gitterteilmaschinen ausgebaut. Die Verbesserungen und Neuerungen der in Jena gebauten Teilmaschinen erlaubten das parallele Teilen von bis zu vier Gittern, die Fertigung von Gittern mit kleiner Linienzahl für den Infrarotbereich und von Gitterprismen (GRISMs). Die gefertigten Gitter besaßen einen maximalen Beugungswirkungsgrad von nahe 90 %. Die Erschütterungsempfindlichkeit der letzten Generation der Teilmaschinen war so gering, dass sie keinen Beitrag mehr zum Streulicht leistete.

Mit den in Oberkochen aufgebauten Gitterteilmaschinen war es möglich, die geteilte Gitterfläche weiter zu vergrößern. Hier kamen auch die ersten interferometrischen Steuerungen des Teilungsarms zum Einsatz, die einen hochgenauen Gitterlinienabstand zur Minimierung des Falschlichts durch „Gittergeister“ ermöglichten. Die beiden heute eingesetzten Gitterteilmaschinen produzieren

mechanisch geteilte Gitter, die beispielhaft für das feinmechanische Know-how von Carl Zeiss stehen und die Spitze in der industriellen Fertigung markieren.

Nach 1950 entstand ein immer größerer Bedarf an Plangittern für Monochromatoren. Carl Zeiss begann deshalb, parallel zur Entwicklung der Gitterteilmaschinen die Replikationstechnologie für Gitter zu entwickeln. Diese erlaubt es, Präzisions-Gitterkopien ohne Effizienzverluste zu fertigen, die sehr streulichtarm sind und die Ebenheit der Mastergitter reproduzieren. Carl Zeiss gehört auch hier zu den Qualitätsanbietern.

Mit der hauseigenen Entwicklung von Ionengaslasern in den Siebzigerjahren in Jena ging die Entwicklung interferenzoptisch hergestellter Gitter, sogenannter Hologitter einher. Von Anfang an wurden wissenschaftliche Forschung und ingenieurtechnische Arbeit auf den Kundenbedarf fokussiert. Diese Zusammenarbeit trieb die Entwicklung rasant voran und führte zu äußerst effektiven Lösungen. Mitte der Siebzigerjahre begannen die Arbeiten zur Herstellung holografischer Blazegitter und die Entwicklung patentierter Replikationsverfahren. Seit 1980 werden Blazegitterkopien und Weitbereichsgitter in Serie gefertigt.

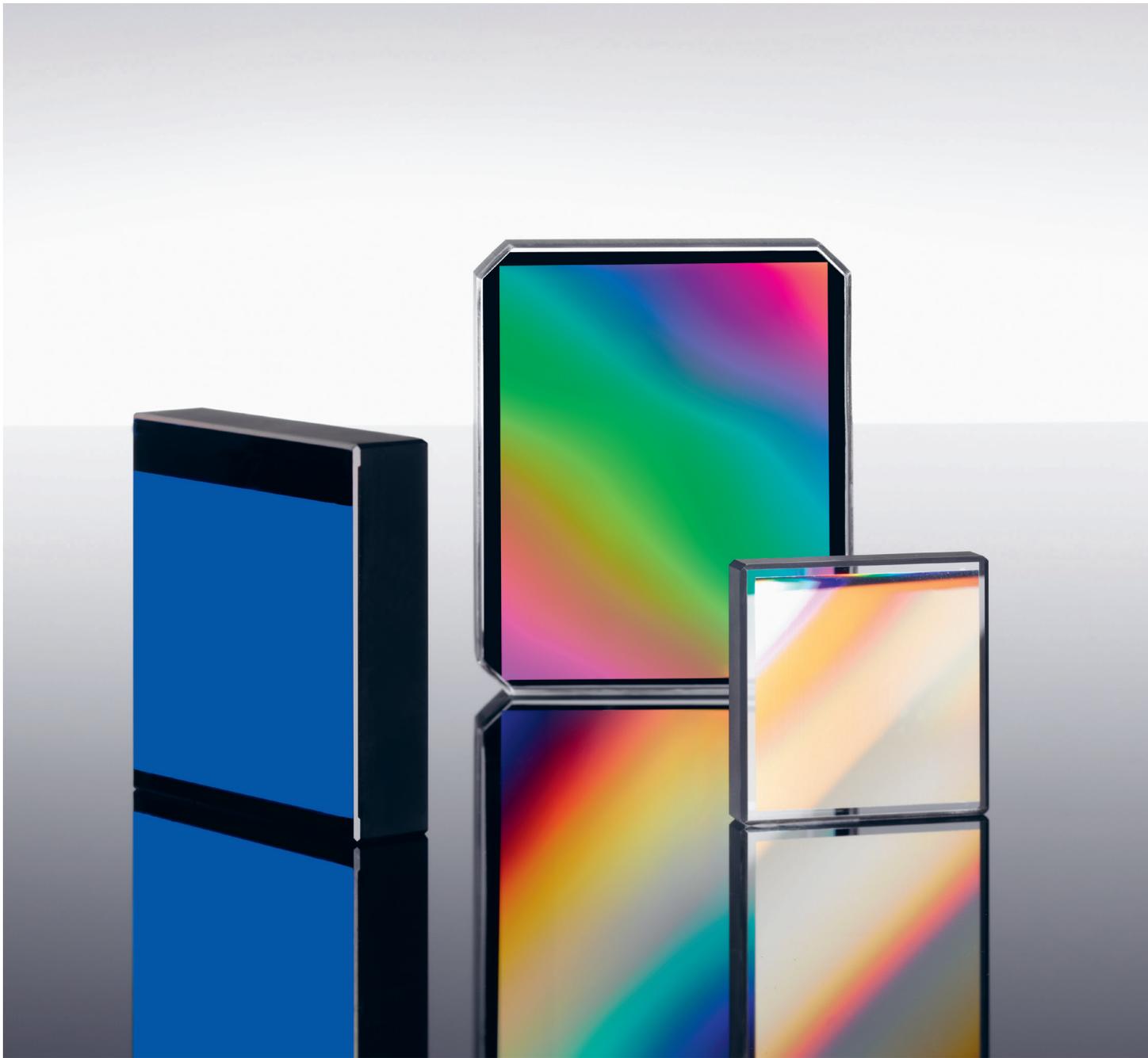
Das in Oberkochen zu Beginn der achtziger Jahre für die Gitterherstellung eingesetzte Trockenätzverfahren ermöglichte die Herstellung äußerst streulichtarmer Gitter. Die Achtzigerjahre standen zunehmend im Zeichen der Entwicklung holografischer Konkavgitter.

Nach der Wiedervereinigung der ZEISS-Werke in Oberkochen und Jena wurde das Know-how in den

Neunzigerjahren schrittweise zusammengeführt. Die Fertigung von industriellen Gitterkopien erfolgt seit Anfang 2000 ausschließlich in Jena. In Oberkochen und Jena bestanden bis 2011 unabhängige Mastergitterfertigungen, wobei in Oberkochen die Spezialgitter für Synchrotron- und Weltraumanwendungen hergestellt wurden. Diese Aktivitäten gipfelten darin, dass in Oberkochen zum Beispiel die Gitter für das James Webb Space Telescope hergestellt wurden.

Heute bietet Carl Zeiss mechanisch geteilte Plangitter und holografisch hergestellte Plan- und Konkavgitter auf höchstem Qualitätsniveau an. Im Standardprogramm werden Präzisionskopien hergestellt, im Rahmen von Sonderfertigungen auch Originalgitter.

Allen Kunden bietet Carl Zeiss die partnerschaftliche Zusammenarbeit bei der Entwicklung spezifischer Gitterlösungen an. Dafür steht das gesamte, im Verlauf von Jahrzehnten wissenschaftlicher und ingenieurtechnischer Arbeit erworbene Know-how von Carl Zeiss zur Verfügung.





Der Moment, der Ihnen beweist, dass nur
Partnerschaft zu überzeugenden Lösungen führt.
Für diesen Moment arbeiten wir.

// OPTISCHE GITTER
MADE BY CARL ZEISS



Optische Gitter – ganz natürlich



Bild 1

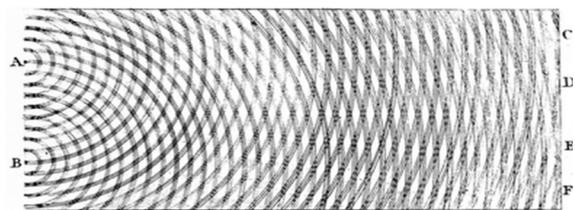


Bild 2

Jeder ist schon einmal mit optischen Gittern in Berührung gekommen. Einige haben sogar täglich damit zu tun, ohne zu bemerken, dass sie in gewisser Hinsicht völlig natürlich sind.

„Betrachten Sie die Sonne durch eine Feder oder ein schwarzes Seidenband, indem Sie es dicht ans Auge halten. Sie werden verschiedene Streifen in Regenbogenfarben erkennen.“ Der schottische Mathematiker und Astronom James Gregory (1638–1675) entdeckte mit dieser Methode im Jahr 1673 die Aufteilung des Sonnenlichts in seine Farbkomponenten. Er nutzte die parallel verlaufenden Stege der Fahne einer Feder (Bild 1) als optisches Transmissionsgitter.

Diffraction (Beugung)

Der Begriff „Diffraction“ wurde von dem italienischen Physiker Francesco Maria Grimaldi (1618–1663) geprägt. Er entdeckte als erster, dass Licht nicht mehr gerade einfällt, sobald es auf ein Hindernis trifft. Während er sich in einem dunklen Raum aufhielt, richtete Grimaldi einen Stab in den einfallenden Lichtstrahl und erkannte, dass der Schattenwurf des Stabes auf einer weißen Fläche breiter war, als man aufgrund seiner geometrischen Form erwarten konnte.

Außerdem zeigten sich am Rand ein-, zwei- und manchmal auch dreifarbiges Bänder. Dieser Effekt lässt sich mit dem lateinischen Wort „diffringere“ bezeichnen, was so viel wie zerbrechen, zerschlagen, brechen bedeutet. Später lieferte Thomas Young (1773–1829) die wellenoptische Erklärung für Grimaldis Beobachtungen (Bild 2). Vor diesem Hintergrund gelang 1785 die Umsetzung von Gittern mit einer Anordnung multipler Schlitze durch David Rittenhouse als fundamentaler Schritt zum Nachweis der Ausbreitung des Lichts in Wellen.

Optische Beugungsgitter in der Theorie

Ein Beugungsgitter stellt eine sich wiederholende Abfolge von Beugungselementen in regelmäßigen Abständen dar, den Lücken und den Stegen, die in festem Wechsel die Phase oder Amplitude des einfallenden Lichts oder beide beeinflussen. Je nach Einfallswinkel des Lichts lassen sich dann regenbogenfarbene Muster auf einer Projektionsfläche hinter einem Transmissions- oder Reflexionsgitter erkennen. Die farbigen Muster werden als optisches Spektrum bezeichnet.

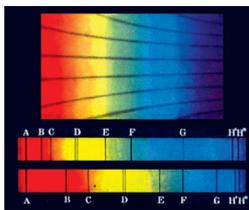


Bild 3

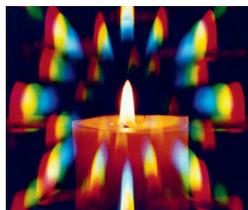


Bild 4

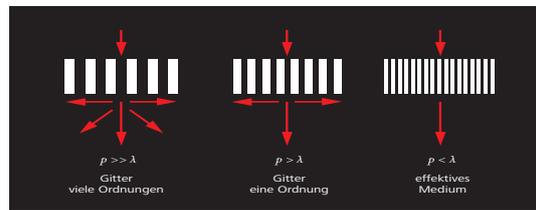


Bild 5

Bild 3 und 4 zeigen Beispiele für optische Spektren. In Bild 3 sind Interferenzstreifen in einem Spektrum und Fraunhoferlinien in einem Prisma- sowie einem Gitterspektrum zu sehen. Bild 4 zeigt eine Kerzenflamme, die von mehreren Spektren umgeben ist, welche durch ein sich mehrfach überkreuzendes Gitter entstehen.

Optische Spektren können beobachtet werden, weil der Beugungswinkel von der Wellenlänge des Lichts abhängt. Bei einem gegebenen Gitter weist Licht mit größerer Wellenlänge einen größeren Beugungswinkel auf. Genauer gesagt, eine einzelne Wellenlänge kann gleichzeitig mehrere separate Beugungswinkel aufweisen, was als Diffraktionsgrad (Beugungsordnung) bezeichnet wird. Das heißt, ein Gitter zerlegt einen eintreffenden polychromatischen Strahl in seine Wellenlängenkomponenten, es ist dispersiv. Der Diffraktionsgrad ist eine dimensionslose Zahl, die von der Position des Nullstrahls aus die Menge der gebrochenen Unterstrahlen zählt.

Auf Bild 4 sieht man, dass aufeinanderfolgende höhere Grade (Ordnungen) sich überschneiden können: Je höher der Spektralgrad, desto größer ist die Überschneidung mit dem nächsten Grad.

Die Überschneidung von Grad ergibt, dass die Spektrallinie des ersten Grades exakt die gleiche Position aufweist wie die Spektrallinie des zweiten Grades mit der halben Wellenlänge. Die sich nicht überschneidenden Bereiche der Wellenlänge jedes Grades bestimmen die Gittereigenschaften des freien Spektralbereichs. Die Korrelation zwischen Gitterkonstante p und der Menge der Diffraktionsgrade ist in Bild 5 dargestellt.

Synonym für die Gitterkonstante werden auch häufig die Begriffe Furchen- und Liniendichte verwendet. Der Linienbegriff stammt aus der linearen Messung in der Präzisionsmechanik und wird verwendet, um eine beliebige Auflösung in der Einheit Linie pro Millimeter darzustellen. Als Messung für Druckpunktabstände oder Bildwiedergabe ist auch die Punktdichte in der Einheit dpi (dots per inch) bekannt.

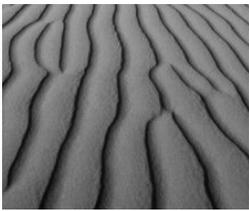


Bild 6

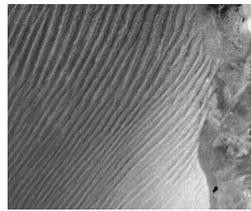


Bild 7

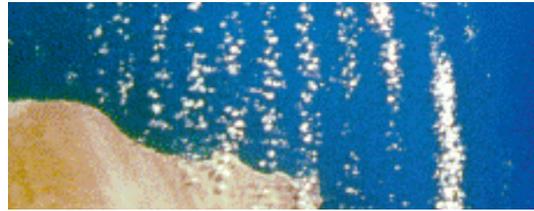


Bild 8

Parallele Linien

Bei einer Linie handelt es sich um eine geometrische Figur, die von einem Punkt ausgeht und sich in einer festen Richtung von diesem wegbewegt. Linien und Anordnungen parallel verlaufender Linien können auch als Urform der Struktur bezeichnet werden. Anordnungen regelmäßiger Linien kommen in der anorganischen und organischen Natur vor. Abgesehen von den dreidimensionalen Kristallgittern in der anorganischen Natur ziehen zunächst grob bemessene Gitter die Aufmerksamkeit auf sich.

Bild 6 zeigt Furchen an einem Sandstrand. Es handelt sich um Wellenformen auf Schichtungsflächen. Man kann hier anschaulich erkennen, wie die Natur eigenständig zu einer Ordnung findet, da sich die Linien an zwei Punkten gabelförmig aufteilen. Der Furchenabstand bewegt sich im Bereich von ungefähr zehn Zentimetern. In Bild 7 sind die großen Sanddünen Saudi-Arabiens dargestellt. Sie können mehr als 100 km lang sein, wobei der Furchenabstand zwischen zehn Metern und mehreren Kilometern variieren kann.

Auch am Himmel können regelmäßige Linienstrukturen ausgemacht werden. Diese dünnen

Wolkenreihen oder „Wolkenbänder“ wurden als geografisches Merkmal von verschiedenen Space-Shuttle-Mannschaften erkannt. Diese einzigartige Zirkuswolkenformation an der Küste von Oman (Bild 8) ist zu bestimmten Jahreszeiten im wahrsten Sinne konstant. Die „Gitterkonstante“ liegt bei ungefähr zehn Kilometern.

In Reihen angeordnete Elemente lassen sich jedoch nicht nur im großen Maßstab, sondern auch im Nanobereich der organischen Natur finden. Bereits vor Millionen Jahren nutzte die Natur Strukturen im Nanobereich, um faszinierende optische Effekte zu erzeugen. Die kristallartigen Strukturen von Insekten wurden bereits intensiv erforscht. Als Beispiel sollen hier die farbige Erscheinung des Laufkäfers (Bild 9, obere Abbildung, Aufnahme mit dem Elektronenmikroskop) und die Stridulationsorgane einer Ameisenwespe (Bild 10, obere Abbildung, Aufnahme mit dem Elektronenmikroskop) dienen, die ursächlich mit den Abständen rechtwinkliger Laminarprofile verbunden sind. Die Gitterkonstante des Stridulationsorgans beträgt ca. $2,5 \mu\text{m}$. Damit steht fest, dass es sogar kriechende und fliegende Diffraktionsgitter gibt.

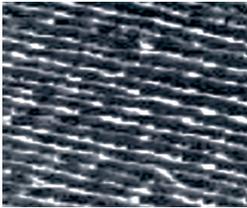


Bild 9



Bild 10

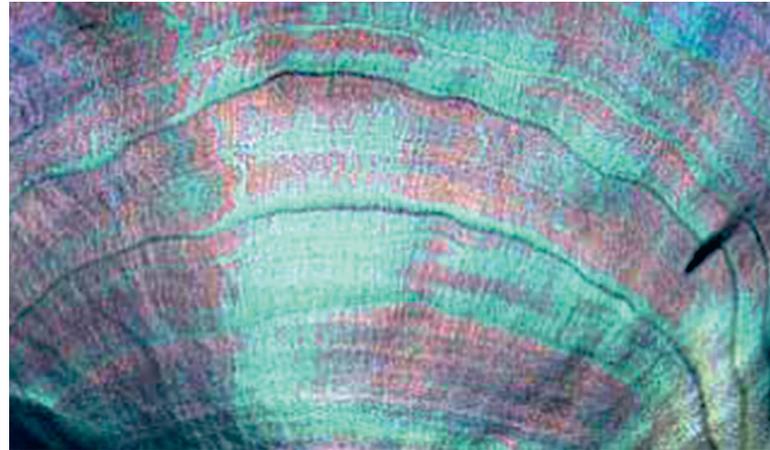
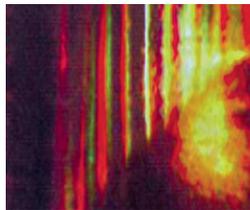


Bild 11

Neben der Gitterkonstante wird ein Gitter vor allem durch sein Furchenprofil definiert. Gegenwärtig werden für Beugungsgitter fünf unterschiedliche Formen verwendet. Zählt man die Halbsinus- und die Ronchi- und Dammannprofile (spezielle rechtwinklige Profile) hinzu, sind es sogar acht. Geeignete Furchenprofile können die Diffraktionseffizienz optimieren und definite Diffraktionsgrade lassen sich ausschließen. Es scheint, dass natürlich vorkommende anorganische Linienanordnungen durchweg sinusförmige Furchenprofile aufweisen, wohingegen in biologischen Systemen ausschließlich lamellenförmige Profile vorkommen.

Der Begriff Diffraktionseffizienz (Beugungseffizienz) bezeichnet eine zusätzliche funktionsbestimmende Gittereigenschaft. Der Wert drückt den Umfang aus, mit dem Energie aus gebeugtem Licht im Verhältnis zur Energie aus dem eintreffenden Licht gewonnen werden kann. Die Diffraktionseffizienz hängt vom Einfallswinkel des eintreffenden Lichts, von der Furchendichte, der Profilform und der Gleichmäßigkeit des Furchenprofils ab. Diese Abhängigkeit lässt sich in der Natur am Irisieren einer Perlmuttermuschel (Bild 11) zeigen. Die Stärke des Irisierens kann sowohl mit der Furchendichte des Diffraktionsgitters

der Muschel als auch mit den Oberflächeneigenschaften der Furchen selbst in Verbindung gebracht werden. Eine Muschel mit 296 Linien/mm irisiert stark, eine Muschel mit 87 Linien/mm bricht das Licht dagegen nur schwach. Bei Perlen existiert dieses Phänomen ebenfalls, allerdings nicht so stark.

Bei den Vögeln fallen Kolibri und Pfau durch ein irisierendes Federkleid auf. Hier gehen Diffraktion und Interferenz Hand in Hand. Derlei komplexe Systeme zur Erzeugung von Farben und Mustern können biogenetisch sehr alt sein, wie der fossile Prachtkäfer aus dem Ölschiefer der Grube Messel beweist. Er lebte bereits vor 47 Millionen Jahren.



Bild 12

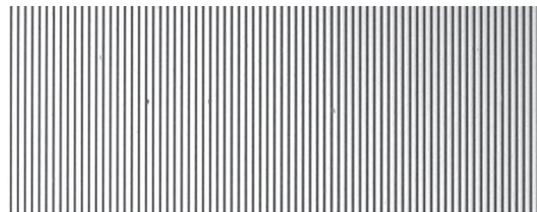
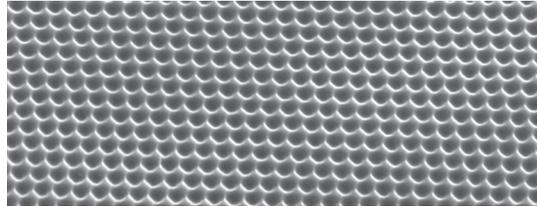


Bild 13

Mensch und Linie

Regelmäßige Linien haben eine große Bedeutung in der menschlichen Lebenswelt. Die Eigenschaft der Direktionalität könnte der Grund dafür sein, dass einzelne Linien und parallele Linienanordnungen zu den grundlegenden kognitiven Struktureinheiten des Menschen zählen. Das Wort stammt vom lateinischen „linea“ bzw. „linum“ und bedeutete „gerade gezogener Strich oder Faden“. Für Aristoteles waren Symmetrie und Ordnung die extremen Formen der Schönheit. Das Studium von Gittern, ob als Anordnung natürlicher oder technischer Linien, könnte also sogar ein harmonisches Gefühl vermitteln. Der türkische Dichter Nazim Hikmet nutzte das Bild eines Weinbergs (Bild 12), um die Schönheit zu veranschaulichen, die er in der Musik von Bach hört.

*Herbstlicher Morgen im Weinberg.
Reihe um Reihe, Weinstock um Weinstock
wiederholen die Reben sich
und die Trauben an den Reben
und die Beeren in den Trauben,
und das Licht auf jeder Beere wiederholt sich ...*

*Das Wunder der Wiederholung, Liebste,
ist das Unwiederholbare der Wiederholung.*

Linienanordnungen stehen also für Ordnung genauso wie für Schönheit, d.h. sie werden sowohl in funktionalen als auch in ästhetischen Kategorien verwendet. So findet man Raster wie auf Bild 13 (Liniengitter eines Scans in 3.000-facher Vergrößerung) als netzförmige Systeme parallel verlaufender Linien bei technischen Anwendungen aus der Telekommunikation und der Messtechnik ebenso wie in der Kunst. Bereits seit dem 15. Jahrhundert werden beispielsweise im westlichen Kunstraum Schraffuren und Kreuzschraffuren in der Drucktechnik eingesetzt, um Hell-Dunkel-Effekte bzw. Schatten zu erzeugen.

Bei Textilien werden diese Effekte oft durch kontrastierende Fäden erzeugt. Der Nadelstreifenanzug mit seinem Linienmuster ist dafür ein Paradebeispiel. Abgeleitet aus dem textilen Bereich (lat. „textura“ Gewebe) bezeichnet der Begriff Textur übergreifend die Eigenschaften und das Erscheinungsbild von Oberflächen. In der Materialwissenschaft werden damit sämtliche Orientierungen von Kristalliten in polykristallinen Festkörpern bezeichnet.



Bild 14

Die feine Riffelung des natürlichen Quarzsteins (Bild 14) ist ein Beispiel für die Textur von Mineralien und die Kristallbeschaffenheit. Sie entsteht während des Kristallwachstums, wenn die Bedingungen für ihre Kristallisierung in konstanten Zeitabständen wechseln.

Von Stoff über Kristall und Insektenflügel bis zu Metall oder Glas gibt es offensichtlich Gitter aus sehr unterschiedlichen Trägermaterialien. Deshalb gehört zu einer vollständigen Gitterspezifikation zwingend auch die Angabe des Parameters Substratmaterial.

Am Beginn dieser Einführung standen Experimente aus dem 17. Jahrhundert, für die natürliche Gitterstrukturen genutzt wurden. Ein künstliches Gitter unserer Zeit hatte praktisch jeder schon einmal in der Hand – die CD. Eine Compact Disc (Bild 15) weist lange, linienförmige Gruben auf, die konzentrisch auf der Platte angeordnet sind. Die Einkerbungen dieser spiralförmigen Spur sind 0,8 bis 3,1 μm lang und 0,5 μm breit. Wenn man eine CD vom äußeren zum inneren Rand betrachtet, lässt sich die Abfolge parallel verlaufender Linien in gleichem Abstand deutlich erkennen. Die Linie hat eine Gesamtlänge von sechs Kilometern und bildet in regelmäßiger



Bild 15

Anordnung die große Anzahl an Linien des CD-Diffraktionsgitters. Die Gitterkonstante würde 1,6 μm betragen. Fällt weißes Licht auf eine CD, wird es reflektiert und die eng aneinanderliegenden Spuren der lesbaren CD-Oberfläche brechen das Licht in ein vollständig sichtbares Farbspektrum.





GRUNDLAGEN OPTISCHER GITTER

Optische Strukturen haben die Evolution des Menschen wesentlich beeinflusst, auch ohne dass wir die Prinzipien ihrer Wirkungsweise kannten. Um wie viel leistungsfähiger sind wir jetzt, da wir sie kennen.

Grundlagen optischer Gitter

Definition von Größen und Symbolen

Länge des Bereichs mit Furchen, Teilungsbreite	L
Gitterkonstante	$g = 1/d$
Abstand der Furchenmitten	$d = 1/g$
Gesamtzahl der Furchen eines Gitters, Furchenzahl	$N = L/g$
Neigungswinkel-Facette	θ
Einfallswinkel und Beugungswinkel	α und β
Einfallswinkel und Beugungswinkel (relativ zur Gitterfacette)	α' und β'
Beugungsordnung	m
Lichtwellenlänge	λ

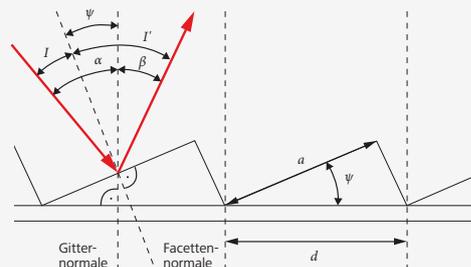


Bild 16

Als Beugungsgitter werden regelmäßige Anordnungen von Elementen bezeichnet, die das Licht entweder absorbieren oder die optische Weglänge und damit die Phase verändern. Dadurch kommt es zu Beugung und Interferenz, was zu einer wellenlängenabhängigen Ablenkung des Lichts führt. Damit ist es möglich, die spektrale Zusammensetzung von Licht zu untersuchen. Im Folgenden wird auf einige Eigenschaften von Gittern und damit zusammenhängende physikalische Grundlagen eingegangen.

Gittergleichung

Im einfachsten Fall besteht ein Gitter aus einer periodischen Anordnung paralleler Furchen. Fällt Licht auf eine solche periodische Anordnung, so werden die Furchen durch Beugung effektiv zu einer linearen Anordnung von Punktquellen reflektierten oder transmittierten Lichts. Das Besondere an Beugungsgittern ist nun, dass es für eine feste Wellenlänge nur diskrete Richtungen gibt, bei denen die gebeugten Wellen aller Furchen in Phase sind und somit konstruktiv interferieren können. Damit gibt es für eine Wellenlänge nur diskrete Richtungen mit einer von null verschiedenen Intensität, die als Beugungsordnungen bezeichnet und durchgezählt werden.

Die in Bild 17 gezeigte Abbildung veranschaulicht, dass für konstruktive Interferenz $\sin(\beta) + \sin(\alpha) = m \cdot \lambda \cdot g$ gelten muss. Diese Gleichung wird auch als Gittergleichung bezeichnet. Dabei ist zu beachten, dass die Winkel üblicherweise gegen den Uhrzeigersinn gemessen werden. In der dargestellten Skizze hätte β also ein negatives Vorzeichen.

Wegen $|\sin(\beta) + \sin(\alpha)| \leq 2$ können nur diejenigen Ordnungen existieren, für die $m \cdot \lambda \cdot g < 2$ erfüllt ist.

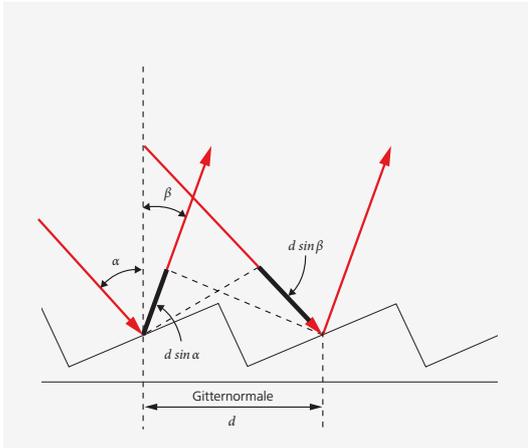


Bild 17 Gittergleichung

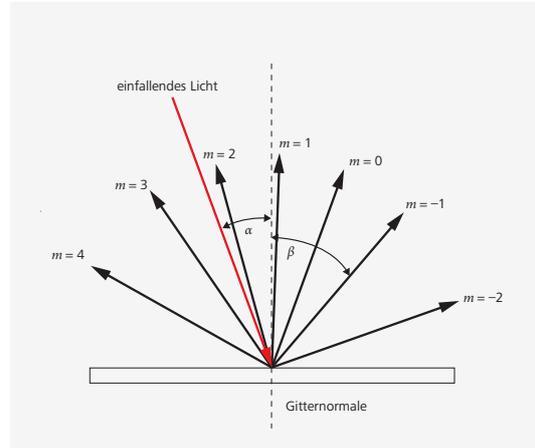


Bild 18 Beugungsordnung

Die nullte Ordnung ($m = 0$) entspricht dabei der Reflexion, wie sie bei einem Spiegel stattfindet. Die übliche Konvention für die Nummerierung der nullten und der weiteren Ordnungen ist in Bild 18 dargestellt.

Auflösungsvermögen

Das Auflösungsvermögen $R = \lambda / \Delta\lambda$ eines Gitters ist ein dimensionsloses Maß für seine Fähigkeit, die Maxima zweier benachbarter Spektrallinien mit Abstand $\Delta\lambda$ messbar voneinander zu trennen.

Für die Messbarkeit eines spektralen Abstands $\Delta\lambda$ wird zumeist entsprechend der DIN das Rayleigh-Kriterium verwendet: Zwei benachbarte Spektrallinien können als getrennte Linien aufgelöst werden, wenn zwischen ihnen eine Einsattelung der Intensität von mindestens 19 % gemessen werden kann.

Bei flachen Beugungsgittern kann das theoretische Auflösungsvermögen mit dem Rayleigh-Kriterium zu $R = |m| \times N$ bestimmt werden. Zu beachten ist dabei jedoch, dass m und N nicht losgelöst voneinander zu betrachten sind.

Eine deutlich anschaulichere Form kann über die Gittergleichung bestimmt werden:

$$\frac{Md}{\lambda} |\sin(\beta) + \sin(\alpha)| = \frac{L}{\lambda} |\sin(\beta) + \sin(\alpha)|$$

Ob dieser theoretische Wert allerdings wirklich zu erreichen ist, hängt von einer Vielzahl an Eigenschaften des Gitters ab. So spielen neben der optischen Qualität der Gitteroberfläche und der Präzision der Furchenlage auch die Qualität der weiteren verwendeten Optiken im System sowie die Größen von Eintritts- und Austrittsspalt eine entscheidende Rolle.

Dispersion

Bei der Dispersion von Beugungsgittern ist zwischen Winkeldispersion und linearer Dispersion zu unterscheiden. Die Winkeldispersion D_β ist einfach die Ableitung des Beugungswinkels nach der Wellenlänge:

$$D_\beta = \frac{\partial\beta}{\partial\lambda} = \frac{m}{d \cos\beta}$$

Die lineare Dispersion D_L hängt mit der effektiven Fokallänge f' der abbildenden Optik eines Instruments über $D_L = f' \cdot D_\beta$ zusammen.

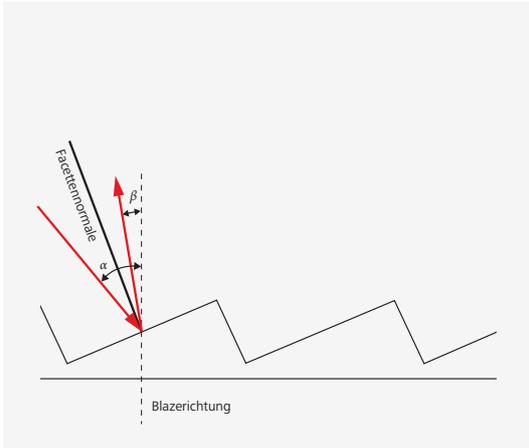


Bild 19 Spektralbereich

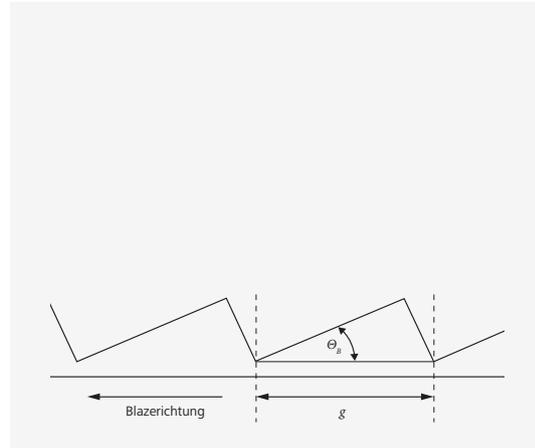


Bild 20 Echelettegitter; Gitterkonstante $g=1/d$; Blazewinkel Θ_B

Freier Spektralbereich

Als freien Spektralbereich $\Delta\lambda$ bezeichnet man den Wellenlängenbereich einer Beugungsordnung, der sich nicht mit dem Spektrum der nächsten Beugungsordnung überlagert. Daraus folgt die mathematische Definition $m(\lambda + \Delta\lambda) = (m + 1)\lambda$. Damit ist der freie Spektralbereich $\Delta\lambda = \lambda / m$.

Beugungseffizienz

Eine der meistdiskutierten Größen bei Beugungsgittern ist die Beugungseffizienz E . Die absolute Beugungseffizienz E_{abs} gibt an, welcher Anteil des eingestrahnten Lichts I_{Ein} einer Wellenlänge λ in eine bestimmte Beugungsordnung gebeugt wird:

$$E_{\text{abs}} = \frac{I_m(\lambda)}{I_{\text{Ein}}(\lambda)}$$

Analog gibt die häufiger verwendete relative Beugungseffizienz E_{rel} die Intensität einer bestimmten Ordnung im Vergleich zur Reflexion einer identischen Beschichtung an:

$$E_{\text{rel}} = \frac{I_m(\lambda)}{I_{\text{ref}}(\lambda)}$$

Die Beugungseffizienz eines Gitters wird hauptsächlich durch die Form der Furchen, also sein Profil

bestimmt. Die höchste Beugungseffizienz wird üblicherweise in Autokollimation erzielt. Abweichungen von dieser auch als Littrow-Anordnung bezeichneten Konfiguration führen meistens zu geringerer Beugungseffizienz. Dies wird zumeist aber erst bei sehr großen Winkeln signifikant. Theoretische Vorhersagen der Beugungseffizienz sind aufwendig, doch bei bekanntem Profil mit numerischen Methoden recht genau möglich. Um die tatsächliche Beugungseffizienz eines vorliegenden Beugungsgitters zu bestimmen, sind jedoch Messungen ungebogener und gebeugter Intensitäten notwendig.

Furchenprofile

Das Profil der Furchen eines Gitters kann je nach Bedarf und Fertigungsmethode unterschiedliche Formen haben. Die häufigsten Profilformen sind Sägezahn- und Sinusprofil. Dabei werden Gitter mit Sägezahnprofil auch als Blaze- oder Echelettegitter bezeichnet. Auch andere Gitterprofile kommen gelegentlich zum Einsatz, zum Beispiel laminaire Profile.

Blaze- oder Echelettegitter (Sägezahnprofil)

Ein typisches Sägezahnprofil, wie es bei Gittern auftreten kann, ist in Bild 20 dargestellt.

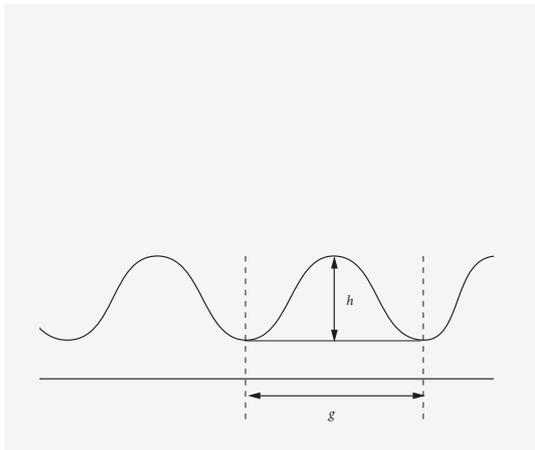


Bild 21 Sinusgitter; Gitterkonstante $g=1/d$; Profiltiefe h

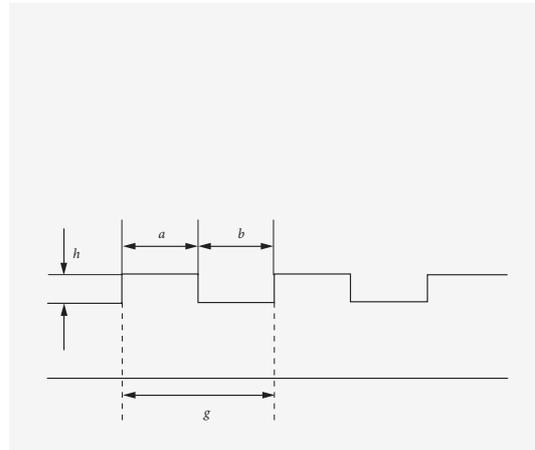


Bild 22 Laminargitter; Gitterkonstante $g=1/d$; Profiltiefe h ; Steg-Lücke-Verhältnis $V = a/b$

Ein Blazegitter ist dann besonders effektiv, wenn die Gittergleichung für das Gitter und die Reflexionsbedingungen für die Furchenflanken erfüllt sind. Die Wellenlänge, bei der das Gitter die höchste Beugungseffizienz aufzeigt, wird auch als Blazewellenlänge λ_B bezeichnet. Diese Blazewellenlänge wird durch den Neigungswinkel der Furchen und die Strichzahl bestimmt. In Autokollimation gilt: $\lambda_B = 2 d \sin(\theta)$. Blazegitter können sowohl durch mechanische Teilung als auch durch holografische Belichtung hergestellt werden.

Sinusgitter

Sinusgitter besitzen ein symmetrisches, sinusförmiges Furchenprofil, wie es in Bild 21 dargestellt ist.

Aufgrund der Symmetrie der Furchen beugen Sinusgitter bei orthogonalem Lichteinfall mit gleicher Intensität in die jeweils positive und negative Beugungsordnung. Daher sind sie zum Beispiel sehr gut als symmetrische Strahlteiler geeignet. Der Verlauf der Beugungseffizienz wird bei gegebener Strichzahl durch die Profiltiefe bestimmt, die daher auf den Spektralbereich optimiert werden kann, in dem das Gitter eingesetzt werden soll. Da das Verhalten der Beugungseffizienz je nach Polarisation

relativ zu den Gitterfurchen stark unterschiedlich ist, werden für unpolarisiertes Licht im allgemeinen geringere Beugungseffizienzen erreicht als für Blazegitter. Wird jedoch mit polarisiertem Licht gearbeitet, lassen sich extrem hohe Beugungseffizienzen erreichen. Dadurch und durch das breite Spektrum an möglichen Strichzahlen ist es möglich, Sinusgitter für eine hohe Bandbreite an Anwendungen zu entwickeln, vom VUV- bis zum IR-Bereich.

Laminargitter

Ein weiteres mögliches Gitterprofil, das mit dem Sinusgitter verwandt ist, ist das Laminarprofil, wie in Bild 22 dargestellt.

Laminargitter definieren sich nicht nur durch Furchenabstand und Profiltiefe, sondern auch durch das Steg-zu-Lücke-Verhältnis. Ein Unterschied zu Sinus- und Blazegittern besteht darin, dass manche Beugungsordnungen unterdrückt werden können. Dies kann durch Optimierung des Steg-zu-Lücke-Verhältnisses erreicht werden und zu sehr hohen Beugungseffizienzen führen. Insbesondere verschwindet bei gleicher Steg- und Lückenbreite die nullte Ordnung, wenn die Stufenhöhe $h = \lambda/4$ beträgt. Damit folgt maximale Intensität in der ersten



ZEISS ist in der Lage, Gitter mit extrem niedrigem Streulicht zu fertigen.

Ordnung für die Blazewellenlänge $\lambda = 4h$. Zusätzlich verursacht ein Laminargitter zumeist deutlich weniger Streulicht als Sinus- oder Echelettegitter. Beides macht Laminargitter besonders geeignet für Wellenlängen im UV-Bereich und darunter.

Falschlicht

Beim Einsatz von Gittern kann auf verschiedene Arten Licht an Stellen erscheinen, an denen es nicht erwünscht ist. Dieses Licht wird als Falschlicht oder Streulicht bezeichnet, auch wenn es nicht explizit durch Streuung erzeugt wird. Tatsächlich gibt es eine Vielzahl möglicher Quellen für unerwünschtes Licht, zum Beispiel diffuses Streulicht vom Gitter, Gittergeister, in einer Anwendung auftretende Reflexe oder diffuse Streuung höherer Beugungsordnungen.

Höhere Ordnungen

Höhere Beugungsordnungen stellen insbesondere ein Problem dar, wenn Gitter für sehr große Wellenlängenbereiche eingesetzt werden sollen, die deutlich größer als der freie Spektralbereich sind. So müssen zum Beispiel bei Polychromatoren und Monochromatoren fast immer Filter eingesetzt werden, um die höheren Beugungsordnungen kürzerer Wellenlängen von Sensor oder Austrittsspalt fernzu-

halten. Zusätzlich muss zumeist die nullte Ordnung beim Design berücksichtigt werden, die ansonsten zu starkem Falschlicht in einem Gerät führen kann.

Gittergeister

Bei mechanischer Gitterteilung treten periodische Teilungsfehler auf, die technologisch nicht vermieden, sondern nur minimiert werden können. Diese wirken wie ein zusätzliches Gitter und führen zu einer unerwünschten Überlagerung mit zusätzlichen Spektren sehr geringer Intensität. Diese Linien werden als Geister bezeichnet.

Zum einen treten solche Fehler bei der Furchenposition mit sehr langen Perioden auf, was zu Geistern nahe den tatsächlichen Spektrallinien führen und diese zum Teil sogar überdecken können. Diese Geister werden auch als Rowlandgeister bezeichnet. Zum anderen treten Furchenpositionsfehler mit sehr kurzen Perioden von zum Beispiel nur zwei Furchen auf. Dies führt zu Linien, die mit großen Abständen im Spektrum verteilt sind und als Lymangeister bezeichnet werden. Da für holografisch gefertigte Gitter die Interferenz zweier Laserstrahlen die Furchenlage bestimmt, treten bei solchen Gittern fertigungsbedingt keine Gittergeister auf.



Streulicht

Alle Beugungsgitter weisen zwischen den Beugungsordnungen diffuses Streulicht auf. Dieses Streulicht kann durch statistische Furchenlagenfehler mechanisch geteilter Gitter, durch Mikrorauheit der Reflexionsschicht und durch möglicherweise vorhandenes Falschlicht bei holografischer Belichtung auftreten. Bei Carl Zeiss wird diffuses Streulicht extrem niedrig gehalten, indem bei der Masterfertigung geeignete Bedingungen geschaffen und optimierte Prozesse verwendet werden.

Die hervorragenden Eigenschaften des Mastergitters können nur durch die höchstmögliche Qualität des Kopiervorgangs auf die Replikat übertragen werden. So ist Carl Zeiss in der Lage, Gitter mit extrem niedrigem Streulicht zu fertigen.

Transport, Lagerung und Reinigung

Beugungsgitter von Carl Zeiss werden in angemessener Verpackung ausgeliefert, die auch für den Versand in tropische Länder geeignet ist. Die Lagerung der Gitter kann bei normalem Raumklima erfolgen. Die Gitter sollten dabei jedoch vor Staub und anderen Verunreinigungen geschützt werden. Ungeeignete Bedingungen sind hohe Luftfeuchtigkeit, extreme Temperaturschwankungen und

Kontakt mit Öl- und Lösungsmitteldämpfen. Insbesondere in tropischen Ländern und Gebieten mit hoher Luftfeuchtigkeit ist die Lagerung unter Luftabschluss zu empfehlen, um die Wahrscheinlichkeit eines Pilzbefalls zu minimieren.

Grundsätzlich darf die Gitterfläche keiner mechanischen Belastung ausgesetzt werden, da sich die Gitterfurchen wegen der im Vergleich zu Glas oder Metall geringen Härte des Replikationsharzes bleibend verformen können. Außerdem ist auch Anhauchen der Gitterfläche sowie „über die Gitterfläche sprechen“ in jedem Fall zu vermeiden, da dies zu signifikanter Verunreinigung führen kann. Von der Verwendung flüssiger Reinigungsmittel ist in jedem Fall abzuraten. Einzig ein Abblasen mit trockener Luft oder trockenem Stickstoff mit einem maximalen Druck von 3.000 hPa, zum Beispiel mit einem Gummiball, kann empfohlen werden. Gelegentlich führt Abspülen eines Gitters unter fließendem Reinstwasser zu guten Resultaten.





GITTERHERSTELLUNG UND GITTERPRÜFUNG

Wer heute über die Herstellung optischer
Gitter auf höchstem Niveau spricht,
verbindet dies mit dem Namen ZEISS.

Gitterherstellung



Bild 23 Herstellung mechanisch geteilter Gitter

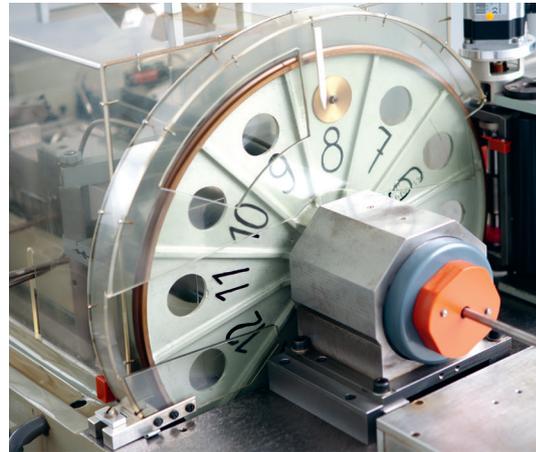


Bild 24 Gitterteilmaschine

Bei Carl Zeiss erfolgt die Herstellung von Gittern entweder durch mechanische Teilung oder durch holografische Belichtung.

Mechanische Teilung

Carl Zeiss kann mechanisch geteilte Gitter für den Spektralbereich zwischen 150 nm und 40 μm mit Furchendichten von 3 mm^{-1} bis 2.600 mm^{-1} herstellen. Die Furchenlänge ist dabei für die bestehenden Maschinen auf 110 mm begrenzt, die Teilungsbreite auf 120 mm.

Verfahren

Für die mechanische Teilung von Beugungsgittern stehen zwei Gitterteilmaschinen vom Rowlandtyp zur Verfügung. Sie sind in klimatisierten Kabinen schwingungsgedämpft aufgestellt, um äußere Störungen beim Teilungsprozess zu minimieren.

Der Arbeitsgang des Teilens beinhaltet, dass mit einem Diamanten parallele, äquidistante Furchen (Striche, Linien) in ein ebenes Substrat gebracht werden. Die Folge der Furchen wird erreicht, indem der Diamant eine Furche zieht und dann das Substrat um eine Gitterkonstante senkrecht zur Furchenrichtung weiterbewegt wird. Ob dabei spanend

geschnitten oder umformend gedrückt wird, hängt von der Strichzahl und dem Material, in dem geteilt wird, ab. Als Substrat werden bevorzugt Gläser verwendet, die mit einer metallischen Spiegelschicht versehen wurden, zum Beispiel Aluminium, Gold oder Kupfer. Seit Jahren werden aber auch mono- und polykristalline Schichten geteilt. Damit lassen sich kristalline Gitterprismen herstellen.

Da die Intensität des am Gitter gebeugten Lichts von der Furchenform abhängt, muss für die Teilung ein Diamant mit geeigneter Form gewählt werden. Diese muss je nach Strichzahl, Blazewinkel, Teilungsmaterial gewählt werden, um abhängig davon, ob geschnitten oder gedrückt wird, glatte Furchenflanken und damit geringes Streulicht zu erreichen.

Die Einrichtung einer Maschine und die anschließende Teilung eines Originals kann mehr als eine Woche beanspruchen. Daher macht erst die Möglichkeit der Herstellung hochwertiger Gitterkopien diesen Prozess wirtschaftlich interessant.

Vorteile

Mechanisch geteilte Gitter sind besonders für Systeme geeignet, die eine hohe Auflösung erfordern.



Bild 25 Gitterteilmaschine

Die mechanisch geteilten ZEISS-Gitter zeichnen sich aus durch:

- Gleichmäßige Strichfolge: Diese führt zu geringem Streulicht. Damit können Spektrometer gebaut werden, die eine sehr große Nachweisempfindlichkeit bei Signalen niedriger Intensität sowie eine hohe Messgenauigkeit im visuellen und infraroten Spektralbereich bieten.
- Wenige Gittergeister: Gittergeister sind die Folge periodischer Unterstrukturen im Gitter. Sie können durch Ungleichmäßigkeiten im Ablauf der Gitterteilmaschine verursacht werden.
- Niedriges Streulicht: Diffuses Streulicht entsteht durch statistische Furchenlagefehler oder durch örtliche Abweichung von der idealen Profilform, zum Beispiel durch Rauheit. Diffuses Streulicht wird durch geeignete Wahl der Teilungsschicht, günstige Herstellungsbedingungen, exakte Einstellung des Teilungsvorgangs, optimale Wahl des Teilungsdiamanten und durch die hohe Qualität des Kopiervorgangs extrem niedrig gehalten.
- Hohes Auflösungsvermögen: Das theoretisch erreichbare Auflösungsvermögen eines Gitters ist bestimmt durch das Produkt der Gesamt-

furchenzahl mit der Beugungsordnung. Es wird annähernd erreicht, wenn die Abweichungen der durch das Gitter gebeugten Wellenfront klein gegen die Gebrauchswellenlänge sind. Voraussetzungen sind eine hohe Ebenheit der Gitterfläche und ausreichende Freiheit von systematischen, periodischen und statistischen Abweichungen der Gitterkonstante.

Holografische Belichtung

Carl Zeiss kann Plan- und Konkavgitter für den Spektralbereich zwischen 110 nm und 4 μm mit Furchenzahlen zwischen 40 mm^{-1} und 6.400 mm^{-1} fertigen.

Verfahren

Beim holografischen oder interferenzlithographischen Verfahren wird ein Gitter durch reliefartiges Aufzeichnen eines feinen Laser-Interferenzfelds in einer Fotolackschicht erzeugt. Die Idee, Licht selbst zur Herstellung von Beugungsgittern zu verwenden, ist nicht neu. Albert A. Michelson (1852–1931) veröffentlichte dazu bereits 1915 Vorschläge. Hochwertige spektroskopische Gitter lassen sich jedoch erst herstellen, seitdem hochauflösende Fotolacke und Laser mit kurzwelliger Strahlung zur Verfügung stehen.

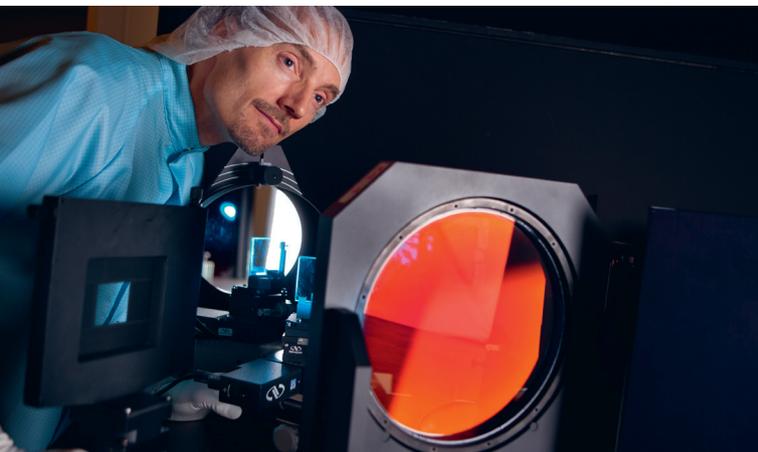
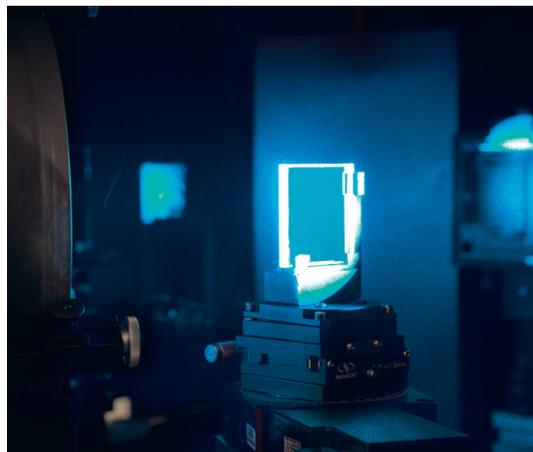


Bild 26 Herstellung holografisch korrigierter Konkavgitter



Auf dieser Basis hat Carl Zeiss neue Fertigungstechnologien entwickelt und stellt holografische Gitter für einen breiten Anwendungsbereich her.

Bei der holografischen Gitterbelichtung werden die Gitterträger zunächst durch Aufschleudern mit einer Fotolackschicht zwischen $0,1\ \mu\text{m}$ und $3,0\ \mu\text{m}$ Dicke versehen. Diese Lackschicht wird nun mit dem Interferenzfeld zweier Laserlichtbündel belichtet. Dafür werden extrem gleichmäßige Interferenzfelder genutzt, um Gitter mit einer Ebenheit zu erzeugen, die $< \lambda/4$ ist. Interferometrische Kontrollen sichern zusätzlich, dass die Wellenfront-Aberration stets $< \lambda/4$ ist. Nach der Entwicklung des Lacks entsteht durch Auswaschen der belichteten Teile (Positivlack) das Oberflächenrelief. Dieses wird anschließend mit einer Reflexionsschicht (zum Beispiel Aluminium oder Gold) und gelegentlich auch mit einer Schutzschicht versehen.

Durch die Verwendung von nichtlinear reagierenden Fotolacken sowie Vorbelichtungen, stehenden Wellen usw. kann eine breite Palette an Furchenprofilen erzeugt werden.

Dazu gehören unter anderem:

- Sinus
- Halbsinus
- Laminar/Binär
- Blaze/Echelette

Die interferierenden Wellen können durch Wellenfront- oder Amplitudenteilung kohärenter Laserstrahlen erzeugt werden. Die Achsen dieser interferierenden Laserstrahlen werden auf den Scheitelpunkt oder die Mitte eines Gitterträgers ausgerichtet. Das Interferenzmuster kann dann je nach vorgesehenen Gittereigenschaften mit zwei kollimierten Strahlen, zwei mit Objektiven erzeugten Punktquellen, oder einem kollimierten Strahl und einer Punktquelle erzeugt werden. Die verwendeten Lichtquellen sind dafür zumeist Ar- oder HeCd-Laser im Ein-Mode-Betrieb.

An die mechanische Stabilität eines solchen Interferenzaufbaus werden die höchsten Anforderungen gestellt. Daher wird bei Carl Zeiss das Interferenzbild über interferometrische Kontrollen und piezokeramische Steuerung während der Belichtung zusätzlich stabilisiert.

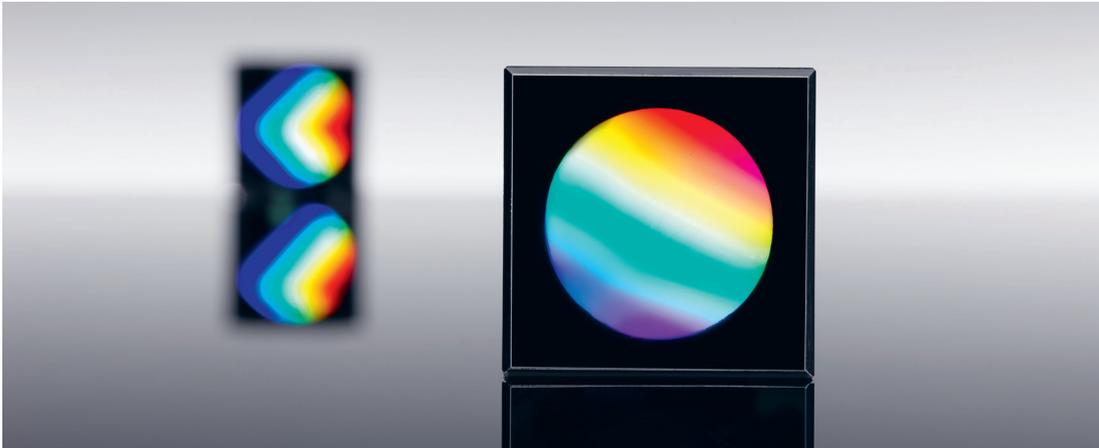


Bild 27 Konkavgitter

Konkavgitter

Konkave Beugungsgitter besitzen dispergierende und abbildende Eigenschaften zugleich. Damit sind sie ideal für moderne spektroskopische Systeme. Die Grundform abbildender Gitter ist das Rowlandkreisgitter. Bei Konkavgittern von Carl Zeiss handelt es sich immer um holografisch gefertigte Gitter. Die Radien sind in einem weiten Bereich wählbar. Dadurch können Öffnungsverhältnisse bis 1:1 erreicht werden. Durch die Verwendung konkaver Gitter sind Systeme mit einer geringen Anzahl optischer Komponenten möglich. Dementsprechend reduziert sich das Falschlicht trotz erhöhter Lichtstärke.

Holografisch korrigierte Konkavgitter

Durch holografische Korrekturen beim Herstellen konkaver Gitter können mit der Optimierung der Fokalfläche gleichzeitig auch Abbildungsfehler wie Astigmatismus, sphärische Aberration und Koma in einem weiten Spektralbereich minimiert werden.

Solche abbildungskorrigierten Gitter weisen, im Gegensatz zu Rowlandkreisgittern, Furchen mit variablen Abständen und Krümmungen auf. Mit diesem holografischen Design können die Abbildungseigenschaften eines Gitters den spezifischen Anforderun-

gen an das Spektralgerät optimal angepasst werden. Bei geeigneter Auslegung entstehen so Gitter, deren Abbildungseigenschaften die verfügbare Lichtenergie über einen weiten Spektralbereich wirkungsvoll auf dem Empfänger konzentrieren. Holografisch korrigierte Gitter eignen sich sehr gut dazu, das Spektrum auf einer Diodenzeile oder einem CCD-Sensor abzubilden. Mit vertretbarem Aufwand können so moderne und kompakte Spektrometer und miniaturisierte Spektrometermodule mit hoher Auflösung realisiert werden.

Im Gegensatz zu klassischen Konkavgittern lässt sich bei holografischen Gittern mit Korrekturwirkung die Lage der Fokallinien in weiten Grenzen verändern. Dadurch ergeben sich neue, einfachere Wege beim Entwurf dispersiver optischer Systeme:

- Monochromator-Anordnungen, die lediglich aus einem festen Ein- und Austrittsspalt und aus einem um seine Achse drehbaren Gitter bestehen
- Spektrometer vom Polychromatortyp ohne bewegliche Teile, mit festem Gitter und einem ebenen Diodenarray, das alle interessierenden Wellenlängen erfasst

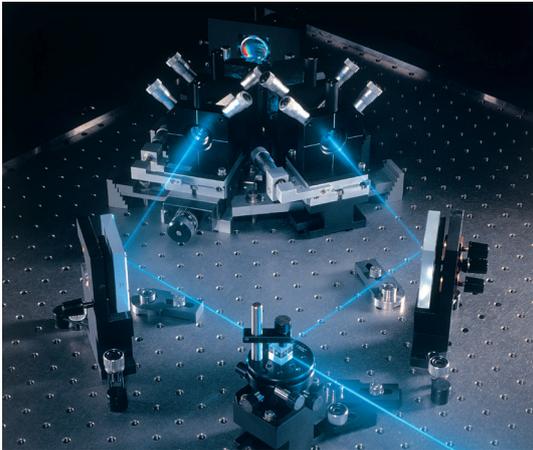


Bild 28 Herstellung holografisch korrigierter Konkavgitter

- Spektrographen mit festem Eintrittsspalt, festem Gitter und zum Beispiel einer Foto- oder CCD-Kamera mit weit verringerter astigmatischer Deformation der Spektrallinien
- Auch für klassische Anordnungen, zum Beispiel mit Ein- und Austrittsöffnungen auf dem Rowlandkreis, lassen sich Gitter mit Korrektoreigenschaften vorteilhaft verwenden

Herstellung holografisch korrigierter Konkavgitter

Konkavgitter mit Korrektoreigenschaften werden in einer Interferometeranordnung gefertigt, die dem späteren Verwendungszweck bereits angepasst ist. Dadurch erhält man, wie bei einem Hologramm, aberrationsfreie Abbildungen für die jeweilige Herstellungswellenlänge. Der Astigmatismus ist bei diesen Gittern für bestimmte Wellenlängen vollständig kompensiert und zusätzlich über einen breiten Wellenlängenbereich wesentlich verringert. Dadurch wird der Einsatz von Gittern mit hoher Öffnung und großem Beugungswinkel erst möglich und führt zu besonders leistungsfähigen dispersiven Systemen. Bei der Herstellung holografisch korrigierter Gitter werden im Gegensatz zur konventionellen Belichtung mit ebenen Wellen in der Photoresistschicht



des Gitterträgers zwei Kugelwellen, zum Teil mit gezielt vorgenommener asphärischer Verzerrung, zur Interferenz gebracht. Dabei kommen hauptsächlich folgende Konfigurationen zum Einsatz:

Symmetrische Profile (Bild 29)

Nach diesem Prinzip werden Gitter mit symmetrischem Furchenprofil (Sinus-, Laminargitter) hergestellt. Diese Gitter bieten in einem breiten Wellenlängenbereich einen guten Wirkungsgrad bei der spektralen Zerlegung des Lichts.

Blazepofile (Bild 30)

Nach diesem Prinzip werden Gitter mit sägezahnartigem Furchenprofil (Echeletgitter, Blazegitter) hergestellt. Sie haben in einem bestimmten Wellenlängenbereich einen besonders hohen Wirkungsgrad. Dazu lässt man die beiden interferierenden Wellen gegenläufig in die Fotolackschicht fallen. Dabei entstehen im Fotolack stark geneigte Knoten und Bauebenen des Interferenzfelds. Beim Entwickeln schreitet die Abtragung entlang der Bauebenen voran, Knotenebenen wirken als Barrieren. Nach einer bestimmten Entwicklungszeit erreicht das Furchenprofil die angestrebte Sägezahnform. Zur Vermeidung von Gittergeistern und Streulicht ent-

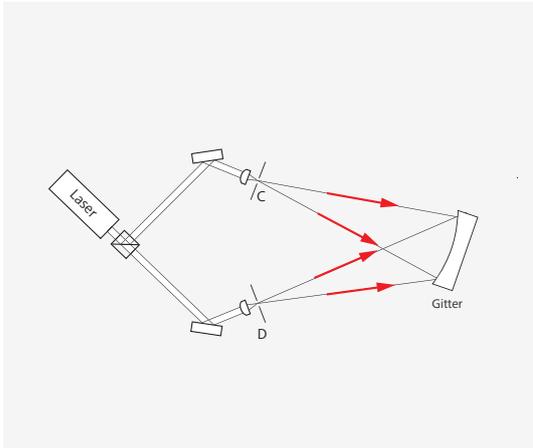


Bild 29 Symmetrisches Profil

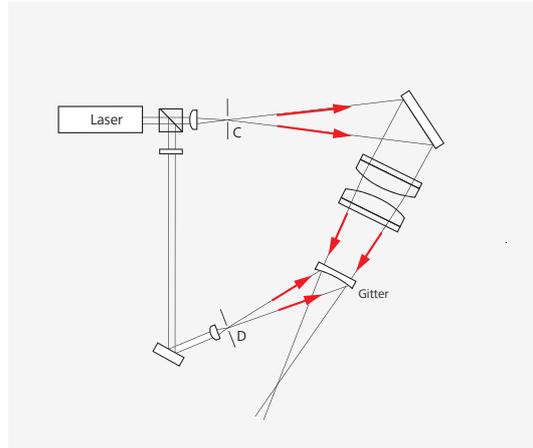


Bild 30 Blazeprofil

spiegelt man die Rückfläche des Gitterträgers, durch die bei der Belichtung die konvergente Welle einfällt.

Vorteile

Holografische Gitter zeichnen sich durch ein um den Faktor 10 geringeres Streulicht und vollkommene Freiheit von Teilungsfehlern (Gittergeistern) gegenüber mechanisch geteilten Gittern aus. Mit ihnen lassen sich besondere optische Abbildungseigenschaften erzielen, die mechanisch nicht erreichbar sind. So können zum Beispiel Abbildungsfehler bei Konkavgittern in einem hohem Maß korrigiert werden. Ihre Herstellungszeit ist kürzer und selbst bei großen Gitterformaten und hohen Furchendichten immer noch verhältnismäßig einfach.

Bei Carl Zeiss ist es gelungen, das Furchenprofil holografischer Gitter so zu optimieren, dass auch die nullte Ordnung weitgehend unterdrückt wird. Diese Gitter weisen deshalb einen ungewöhnlich hohen Wirkungsgrad auf, der dem von geteilten Echelettegittern gleichwertig ist bzw. ihn bei Verwendung von polarisiertem Licht deutlich übertrifft. Da extreme Streulichtfreiheit nicht immer erforderlich ist und eine gute Kopiertechnik die Art der Herstellung in den Hintergrund treten lässt, werden

mechanisch geteilte und interferentiell hergestellte Gitter nebeneinander eingesetzt. Die Erzeugung langer gerader Blazeflanken für Echelettegitter mit zum Beispiel 60 Linien pro mm (L/mm) ist rein interferentiell außerordentlich schwierig und sollte den mechanischen Teilmaschinen vorbehalten bleiben. Mit Teilungsfrequenzen oberhalb von 200 L/mm sind bereits verschiedenste Profilformen hergestellt worden und kommerziell verfügbar.

Ionenstrahlätzen

Wird eine Festkörperoberfläche mit Edelgasatomen geringer Energie bestrahlt, so schlagen diese einzelne Atome aus der Festkörperoberfläche heraus. Häufig werden dazu Argon-Ionen mit einer Energie von 1 keV verwendet. Dabei ist die Implantationsrate vernachlässigbar. Ein großer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass im Gegensatz zur Laserbearbeitung oder mechanischem Polieren keine mechanische Spannung im Material induziert wird. Außerdem wird die Mikrorauheit des so bearbeiteten Materials im Allgemeinen nicht beeinflusst. Beim Ionenstrahlätzen von Beugungsgittern werden zumeist Sauerstoff-Ionen verwendet, um das Furchenprofil aus dem Fotolack in das Substratmaterial zu übertragen. Zum einen gewinnen die Originalgitter damit

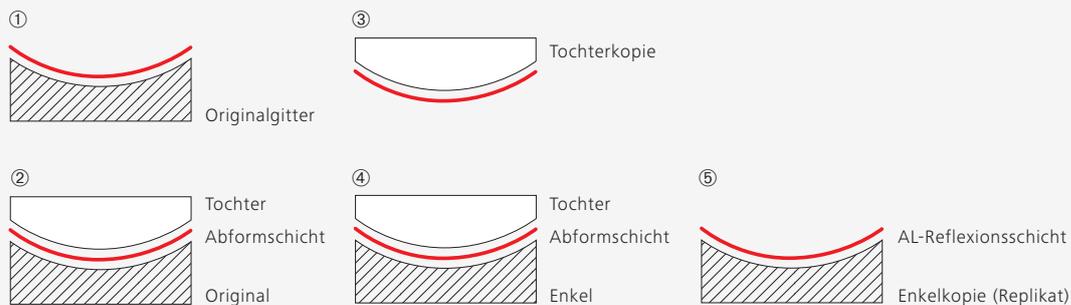


Bild 31 Replikationsverfahren

deutlich an thermischer und mechanischer Stabilität. Zum anderen besteht neben formtreuer Übertragung die Möglichkeit, das Profil beim Übertragen gezielt zu manipulieren. Ungeätzte holografisch geblazete Originalgitter haben im Allgemeinen eine Blazewellenlänge von etwa 230 nm.

Durch die gezielte Änderung des Furchenprofils beim Ionenstrahlätzen kann diese Blazewellenlänge zu kürzeren oder längeren Wellenlängen verschoben werden. Damit ist es bei Carl Zeiss möglich, aberrationskorrigierte Blazegitter für Spektralbereiche von weicher Röntgenstrahlung bis zum infraroten Bereich zu fertigen.

Laminargitter mit rechteckigen Furchenprofilen weisen nach dem Ionenstrahlätzen ein extrem niedriges Streulicht auf. Die geringe Mikrorauheit der Trägeroberfläche beim Herstellungsprozess auf den Furchenflächen bleibt erhalten.

Replikation

Fast alle Plan- und Konkavgitter sind Kopien höherer Generation, die jedoch in ihren Eigenschaften den Originalen weitestgehend entsprechen.

Verfahren

Die Kopiertechnik ermöglicht die kostengünstige Herstellung großer Stückzahlen von Gittern mit hoher Qualität. Mit dem bei Carl Zeiss entwickelten Kopierverfahren können von jedem Gitteroriginal, das nach einer der zuvor genannten Methoden erzeugt wurde, zahlreiche Kopien hergestellt werden, die sowohl in ihren Eigenschaften, als auch in ihrer Qualität dem Original gleichwertig sind. Beim Kopieren werden folgende Schritte ausgeführt:

- Ausgangspunkt ist ein Mastergitter, zum Beispiel ein holografisches, konkaves Gitter mit sägezahnförmigem Furchenprofil.
- Durch das Aufbringen einer Abformschicht und eines konvexen Trägers wird die Struktur auf eine Tochter umkopiert.
- Die Tochter mit der negativen Struktur steht nun als Kopierwerkzeug zur Verfügung.
- Durch ein nochmaliges Umkopieren in die Abformschicht eines konkaven Trägers entsteht der Gitterenkel.
- Nach der Beschichtung des Enkels mit einer Reflexionsschicht (zum Beispiel Aluminium) steht eine nahezu identische Kopie – ein Replikat – des Originalgitters zur Verfügung.

Gitterprüfung



Bild 32 Konkave Beugungsgitter werden mit einer zum eingesetzten Spektralbereich passenden Reflexionsschicht versehen.

Um kontinuierlich hohe Qualität zu sichern, ist nicht nur die Endprüfung des Gitters, sondern bereits die Kontrolle während der Herstellung von entscheidender Bedeutung. In der Regel gibt es viele einzelne Eigenschaften, die für die Funktionsfähigkeit eines Gitters von Bedeutung sind. Daher werden schon bei den Gitterträgern, die für den Replikationsprozess zum Einsatz kommen, folgende Kenngrößen geprüft:

- Material
- Abmessungen
- Krümmungsradius
- Flächengüte/Passe/Sauberkeit

Für das vollständige Gitter können noch eine Reihe weiterer Parameter spezifiziert werden. Im Folgenden sind die Wichtigsten davon erläutert. Für kritische Größen kann bei Bedarf auch ein spezielles Prüfverfahren vereinbart werden.

Abmessung der Gitterfläche

Länge und Breite oder Durchmesser der beugenden Fläche sowie ihre Lage auf dem Gitterträger können anhand vereinbarter Spezifikationen geprüft werden.

Strichzahl und Furchenabstand

Die Furchenabstände können nur bei sehr groben Gittern mit hoher Genauigkeit direkt gemessen werden. Daher werden zumeist die Beugungswinkel eines Laserstrahls gemessen und daraus wird die Strichzahl bestimmt. Damit lassen sich relative Genauigkeiten von bis zu 0,02 % erreichen. Aufgrund des kleinen Strahldurchmessers der verwendeten Laser, können sowohl flache als auch gekrümmte Gitter geprüft werden.

Furchenprofil

Die Qualität des Furchenprofils wird üblicherweise über die Messung der optischen Eigenschaften des Gitters bewertet. Natürlich ist auch die direkte Messung des Furchenprofils, zum Beispiel durch Rasterkraftmikroskopie, taktile oder optische Profilometer möglich und kann auf Wunsch des Kunden durchgeführt werden.

Reflektierender Belag

Die Höhe der absoluten Beugungseffizienz von Reflexionsgittern wird entscheidend vom Reflexionsvermögen der Gitteroberfläche bestimmt. Daher werden Gitter mit einer zum eingesetzten Spektralbereich passenden Reflexionsschicht versehen.



ZEISS ist es gelungen, das Furchenprofil holografischer Gitter so zu optimieren, dass auch die nullte Ordnung weitgehend unterdrückt wird.

Für den UV-, VIS- und NIR-Bereich ist das Aluminium, für den IR-Bereich ist es Gold. Im Allgemeinen ist keine über die Gittereffizienzmessung hinausgehende Prüfung des reflektierenden Belags notwendig, kann aber auf Kundenwunsch erfolgen. Insbesondere, wenn Schutzbeschichtungen wie SiO_2 oder MgF_2 notwendig sind, kann eine solche Prüfung sinnvoll sein. Dies ist allerdings in den seltensten Fällen, zum Beispiel bei sehr hohen Laserleistungen notwendig. Zur Sicherheit werden bei jedem Beschichtungsprozess Probengläschen mitbeschichtet, so dass die Qualität gegebenenfalls an diesen geprüft werden kann.

Beugungseffizienz

Zumeist wird der Wirkungsgrad unter Littrowbedingung bzw. Autokollimation spezifiziert. Da in dieser Konfiguration nicht gemessen werden kann, erfolgt die Messung üblicherweise mit einem endlichen Ablenkungswinkel. Unter welchem Winkel gemessen wird, hängt dabei vom jeweiligen Gitter ab. Natürlich sind auch Messbedingungen möglich, die von den Standardbedingungen abweichen. Die Beugungseffizienz lässt sich dann durch Multiplikation der relativen Beugungseffizienz mit dem Reflexionsgrad der Reflexionsschicht bestimmen.

Sauberkeit und Qualität der Gitterfläche

Das Auftreten kosmetischer Fehler in der Gitterstruktur lässt sich bei der Gitterreplikation nie völlig vermeiden. Ihr Einfluss auf die Funktionsfähigkeit des Gitters ist jedoch höchstens so groß wie ihr Anteil an der gesamten beugenden Fläche. Auch wenn ihr Einfluss auf die Leistung des Gitters meistens vernachlässigbar ist, werden alle Gitter durch unsere Qualitätssicherung visuell auf kosmetische Defekte und Sauberkeit anhand von Vergleichsmustern geprüft und nur nach deren Bestehen ausgeliefert.

Streulicht

Um diffuses Streulicht von Gittern zu spezifizieren, werden hauptsächlich der monochromatische Streulichtkoeffizient und das integrale Streulicht verwendet. Beim monochromatischen Streulicht wird ein Aufbau ähnlich dem zur Messung der Beugungseffizienz verwendet. Dort wird ein Gitter monochromatisch beleuchtet und die Lichtintensität zwischen den Beugungsordnungen wird gemessen. Diese wird dann normiert auf die Intensität der Nutzordnung (meistens die erste) und den Raumwinkel, unter dem das Gitter vom Ausgangsspalt aus gesehen wird. Zur Bestimmung des integralen Streulichts wird das Gitter mit einer kontinuierlichen



Lichtquelle beleuchtet und das gebeugte Spektrum mit und ohne Filter gemessen. Dieser Filter absorbiert einen definierten Teil des Spektrums, weswegen bei einem idealen Gitter in diesem Spektralbereich keine Intensität mehr gemessen werden sollte. Als Wert wird üblicherweise die minimale Intensität in einem passend zum Filter gewählten Spektralbereich verwendet, angegeben in Absorptionseinheiten relativ zur Messung ohne Filter. Da hier die Umgebung des Aufbaus (zum Beispiel ein Gehäuse), die verwendeten Filter sowie die verwendete Lichtquelle eine extrem wichtige Rolle spielen, müssen diese bei der Spezifizierung integralen Streulichts immer mitdefiniert werden.

Abbildungseigenschaften

Die Abbildungseigenschaften konkaver Gitter zeigen sich in Ort und Form der monochromatischen Abbildungen des Eingangsspalts bei festem Abstand und Winkel des Eingangsspalts zum Gitter. Aufgrund astigmatischer Bildfehler gibt es für die Spaltbilder einen tangentialen und einen sagittalen Fokus oder Bildabstand. Für eine optimale Auflösung sollte der Spalt oder Detektor im Tangentialfokus positioniert werden. Zusätzlich werden noch sphärische Aberration und Koma auftreten. Zur Prüfung, ob sich diese

Fehler in spezifizierten Grenzen befinden, muss das Gitter in eine geometrische Anordnung gebracht werden, die der des Geräts entspricht, in dem das Gitter später eingebaut werden soll.

Spektrales Auflösungsvermögen und Wellenfront

Das spektrale Auflösungsvermögen eines abbildenden Gitters wird üblicherweise durch Angabe einer spektralen Bandbreite angegeben, wie zum Beispiel der Halbwerts- oder der Zehntelwertsbreite. Diese hängt neben den Abbildungseigenschaften auch von gegebenenfalls auftretenden Lage- und Formfehlern der Furchen und den zusätzlich eingesetzten Optiken ab. Daher müssen für eine Prüfung stets mit dem Anwendungsfall identische Optiken und Anordnungen gemessen werden. Durch interferometrische Messungen kann bei Plangittern auf indirekte Art das Auflösungsvermögen geprüft werden. Wellenfrontaberrationen sind dabei ein Maß für Teilungs- oder Ebenheitsfehler. Die Prüfung kann in nullter Ordnung (Ebenheitsprüfung), im Blaze (Anwendungsaufstellung) und in einer höheren negativen Ordnung erfolgen. Letzteres ist bei mechanisch geteilten Gittern interessant, da so gegebenenfalls aufgetretene Teilungsfehler besser nachgewiesen werden können.



GITTERARTEN

Auch wenn sie unterschiedliche Eigenschaften haben, gleichen sich optische Gitter von ZEISS in einer Sache: Sie sind von höchster Qualität.



Gitterarten



Bild 33 Plangitter

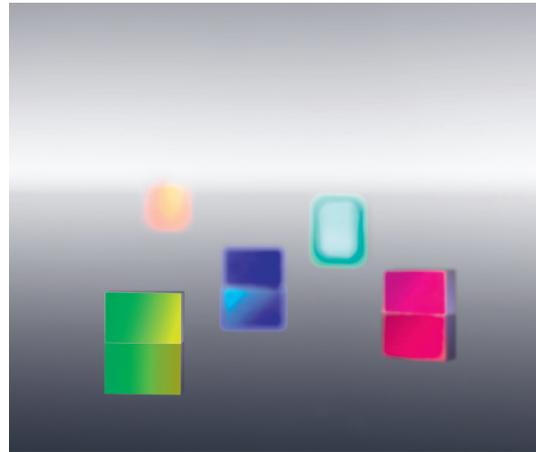


Bild 34 Lasergitter

Plangitter

Als Plangitter werden flache Beugungsgitter bezeichnet. Sie haben von allen Beugungsgittern das breiteste Anwendungsspektrum:

- Monochromatoren
- Polychromatoren
- Lasertechnik
- Strahlteilung
- Weltraumtechnik
- Reflexionsnormale

Plangitter von Carl Zeiss sind für Spektralbereiche zwischen 100 nm und 50 μm optimiert. Dazu werden die Gitter mechanisch geteilt oder holografisch belichtet, je nachdem welche Methode das bessere Ergebnis verspricht. Die möglichen Gitterprofile sind:

- Echelette oder Blaze
- Sinus
- Laminar

Lasergitter

In der Lasertechnik werden sowohl ebene als auch abbildende Gitter innerhalb wie außerhalb des Resonators eingesetzt. Sie dienen dabei im Allgemeinen zur:

- Wellenlängenselektion
- Strahlteilung
- Strahlformung
- Polarisierung

Lasergitter von Carl Zeiss sind für Spektralbereiche zwischen 200 nm bis 12 μm optimiert. Die funktionsbestimmenden Parameter sind:

- Liniendichte
- Furchenprofil
- die daraus resultierende Beugungseffizienz
- Wellenfrontgenauigkeit
- Auflösungsvermögen
- Abbildungseigenschaften
- Trägermaterial
- die damit verbundene Strahlungsbeständigkeit

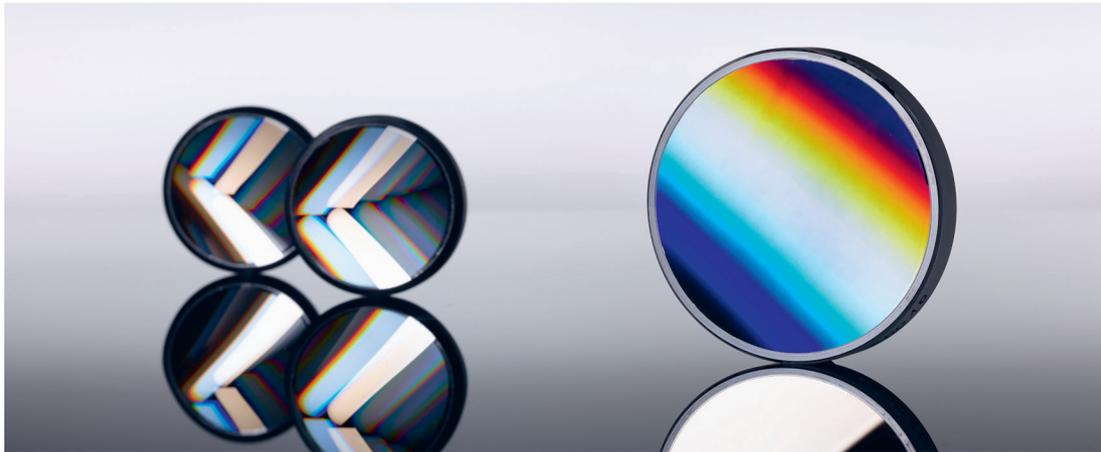


Bild 35 Konkavgitter

Bei der Beugungseffizienz ist mehr als bei den meisten anderen Anwendungen der absolute Wert relevant. Um möglichst hohe Effizienzen zu erzielen, wird ihre Polarisationsabhängigkeit gezielt ausgenutzt. Allerdings wird für Laseranwendungen nicht immer eine möglichst hohe Beugungseffizienz benötigt. Gelegentlich kann eine mittlere bis geringe Beugungseffizienz nicht nur ausreichend, sondern sogar gewünscht sein.

Konkavgitter

Konkave Beugungsgitter besitzen dispergierende und abbildende Eigenschaften. Damit eignen sie sich besonders für den Bau kompakter, stabiler spektroskopischer Systeme. Bei den von Carl Zeiss angebotenen Konkavgittern handelt es sich ausschließlich um holografisch gefertigte Gitter, da sie sich auf einer sphärisch gekrümmten Fläche befinden. Bei kundenspezifischen Gittern kann der Krümmungsradius der Sphäre relativ frei gewählt werden, wobei Öffnungsverhältnisse bis zu 1:1 erreicht werden können. Der Vorteil konkaver Gitter ist die Möglichkeit, ein System mit weniger Komponenten aufzubauen, wodurch sich Falschlicht reduziert und die Lichtstärke erhöht wird. Konkavgitter werden bei Carl Zeiss üblicherweise in drei Gruppen aufgeteilt, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird.

Rowlandkreisgitter

Rowlandkreisgitter stellen die Grundform abbildender konkaver Gitter dar. In der Rowlandkreis-anordnung befinden sich Eintrittsspalt, Gitter und Detektor auf einem Kreis, dessen Durchmesser gleich dem Radius des Gitterträgers ist.

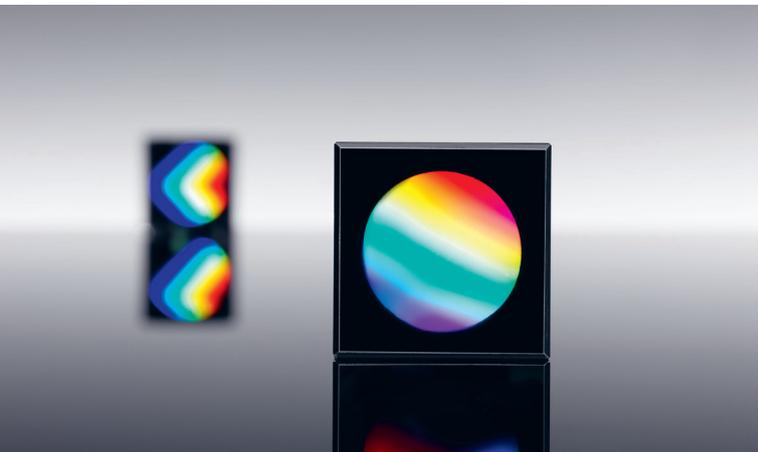


Bild 36 Konkavgitter

Durch diese Anordnung ist die Abbildung des Eintrittspalts frei von Defokussierung und primärer Koma und weist nur geringe sphärische Aberrationen auf. Zwar zeigt sich starker Astigmatismus, die dadurch verlängerten Spaltbilder reduzieren das Auflösungsvermögen jedoch nicht signifikant. Die Gitterstruktur eines Rowlandkreisgitters besteht, projiziert auf die den Scheitelpunkt tangierende Planfläche, aus äquidistanten geraden Furchen.

Abbildungskorrigierte Konkavgitter

Während Rowlandkreisgitter sowohl durch mechanische Teilung als auch durch holografische Belichtung hergestellt werden können, handelt es sich bei abbildungskorrigierten Konkavgittern immer um holografisch erzeugte Gitter. Die Furchen solcher abbildungskorrigierter Gitter haben, im Gegensatz zu Rowlandkreisgittern, variable Abstände und Krümmungen. Dadurch können gleichzeitig die Fokallfläche optimiert und Abbildungsfehler wie Astigmatismus, sphärische Aberration oder Koma für einen weiten Spektralbereich minimiert werden. Mit diesen Korrekturmöglichkeiten lassen sich die Abbildungseigenschaften eines Gitters an die Anforderungen eines Spektralgeräts optimieren und die Lage der Fokallinien kann in weiten Grenzen

verändert werden. Damit sind robuste, kompakte und hochauflösende Spektralgeräte bei einer geringen Anzahl von Bauelementen realisierbar.

Je nach Art der Optimierung wird im Allgemeinen zwischen Monochromator- und Polychromatorgittern unterschieden. Monochromatorgitter sind für einen Aufbau mit festem Eintritts- und Austrittsspalt sowie einem um eine ortsfeste Achse drehbaren Gitter optimiert. Im Gegensatz zu Rowlandkreisgittern wandert der Fokus eines Monochromatorgitters bei der Rotation nicht aus der Ebene des Austrittsspalts heraus, was zusammen mit den reduzierten Abbildungsfehlern zu einer stark verbesserten Auflösung führt.

Polychromatorgitter sind für Aufbauten mit fester Stellung von Eintrittsspalt, Gitter und planem Empfänger optimiert. Die holografische Herstellung solcher Gitter ermöglicht es, zusätzlich zur Reduzierung der Abbildungsfehler eine in guter Näherung ebene Fokallfläche zu erhalten. Damit kann das vom Gitter aufgespaltene Spektrum mit hoher Auflösung auf einen flachen Empfänger wie einen ein- oder zweidimensionalen CCD-Sensor abgebildet werden.



Bild 37 Gitterprismen

Gitterprismen (GRISMs)

Als Gitterprismen werden Prismen bezeichnet, die auf einer planen Fläche ein Transmissionsgitter besitzen. In sehr seltenen Fällen kann ein Gitterprisma auch zwei Gitter und/oder gekrümmte Flächen besitzen. Häufig wird für Gitterprismen das englische Kunstwort GRISM verwendet, das aus den Begriffen „Grating“ und „Prism“ gebildet wird.

Die meisten Gitterprismen werden für spaltlose Geradsichtspektroskopie in der Astronomie verwendet. Durch die Kombination aus Gitter und Prisma kann über die Variation von Gitterkonstante und Prismenwinkel eine nicht abgelenkte Wellenlänge, die Mittenwellenlänge oder Geradsichtwellenlänge, bezüglich des einfallenden Lichts eingestellt werden. Durch Einschwenken eines Gitterprismas in den Strahlengang einer Kamera kann um diese Mittenwellenlänge herum Spektroskopie betrieben werden; die Kamera wird zum Spektrographen.

Gitterprismen können für Anwendungen im ungefähren Bereich zwischen 115 nm und 30 μm hergestellt werden. Das Transmissionsgitter befindet sich dabei zumeist auf der Hypotenusenfläche des Prismas. Je nach Prismenmaterial wird ein solches

Gitter entweder auf das Prisma repliziert oder direkt in das Prisma geteilt. Das Furchenprofil ist üblicherweise, bei direkter Teilung ausschließlich, sägezahnförmig und der Blazewinkel entspricht zumeist dem spitzen Winkel des Prismas. Letzteres ermöglicht den geraden Lichtdurchgang mit hoher Beugungseffizienz.



ANWENDUNGEN OPTISCHER GITTER

Optische Gitter können sehr spezifisch auf ihre Anwendung zugeschnitten werden. Deshalb setzen wir bei ZEISS auf eine partnerschaftliche Zusammenarbeit als Voraussetzung für die Entwicklung von Gitterlösungen.



Anwendungen optischer Gitter

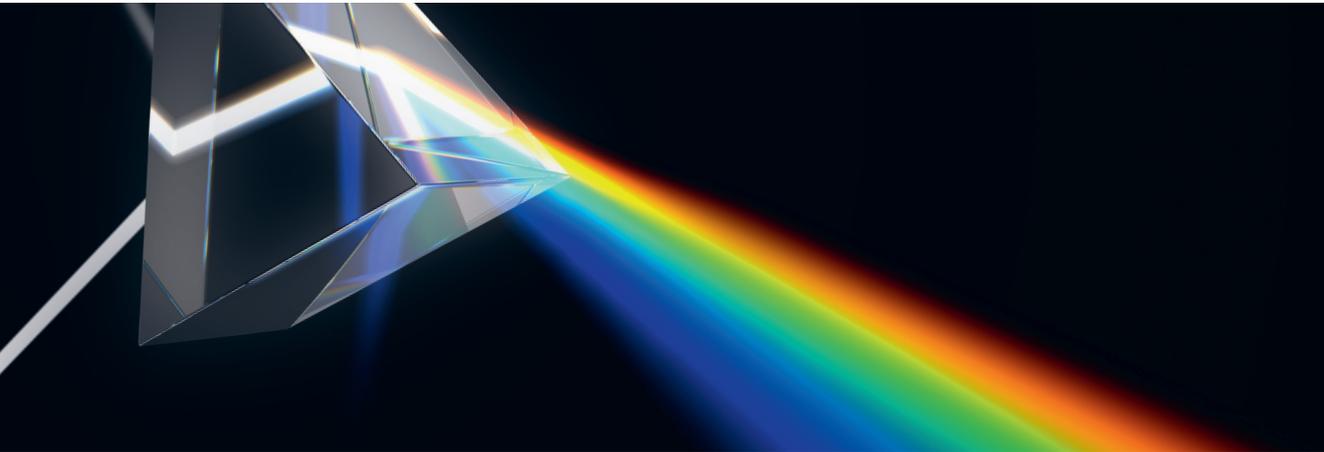


Bild 38 Lichtspaltung als Grundlage der Spektroskopie

Spektroskopische Geräte

Ganz allgemein bezeichnet Spektroskopie die Messung eines Energiespektrums. Dazu wird Strahlung nach ihrer Energie zerlegt. Anstelle der Energie E werden dabei zumeist Wellenlänge λ , Wellenzahl $\tilde{\nu}$ oder Frequenz ν angegeben. Diese Größen hängen über $E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} = h \cdot c \cdot \tilde{\nu}$ zusammen. Dabei bezeichnet h das Plancksche Wirkungsquantum und c die Vakuumlichtgeschwindigkeit.

In den meisten Anwendungen wird mit Spektroskopie die Untersuchung der Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit Materie untersucht. Das heißt, bei welchen Wellenlängen elektromagnetische Strahlung von einer Probe absorbiert, reflektiert oder emittiert werden kann. Zur Zerlegung der elektromagnetischen Strahlung über einen weiten Spektralbereich von UV bis NIR werden zumeist Gitter eingesetzt.

Geräteseitig kann bei der Spektroskopie im Allgemeinen zwischen Monochromatoren und Polychromatoren unterschieden werden. Während mit einem Monochromator einzelne Wellenlängen abgetastet werden, versucht ein Polychromator, das gesamte untersuchte Spektrum auf einmal zu erfassen.

Das Prinzip des Monochromators

Ein Monochromator (griech. „mono“ = ein + „chroma“ = Farbe) isoliert eine bestimmte Wellenlänge aus einfallender elektromagnetischer Strahlung. Diese einfallende Strahlung kann aus einem breiten Spektrum von Wellenlängen bestehen, von denen die unerwünschten absorbiert oder abgelenkt werden.

Dazu wird bei einem Monochromator das Licht abhängig von seiner Wellenlänge stufenlos aufgefächert. Dies geschieht durch ein dispersives Element, das zumeist entweder refraktiv, also brechend (zum Beispiel ein Prisma), oder diffraktiv, also beugend (zum Beispiel ein Beugungsgitter) ist. Durch eine Spaltblende wird dann ein möglichst kleiner Wellenlängenbereich, also eine Farbe, des Lichts mit der gewünschten Wellenlänge ausgewählt. Dieser Spalt kann als sekundäre Lichtquelle betrachtet werden. Die unerwünschten Wellenlängen werden von der Blende absorbiert.

Die Qualität der Wellenlängenselektion, also spektrale Breite und Intensität der den Monochromator verlassenden Strahlung, ist von mehreren Parametern abhängig. So ist bei hoher Dispersion eine geringere spektrale Breite mit geringerer Intensität möglich.

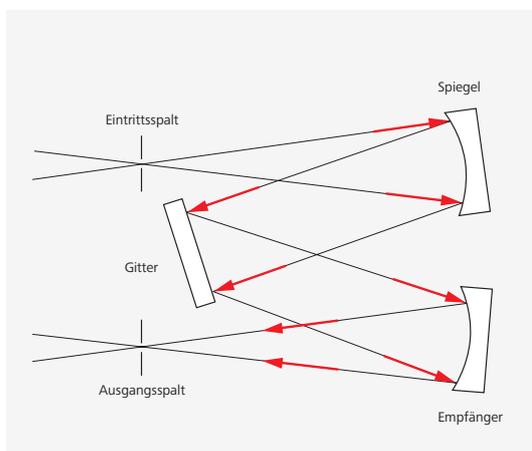


Bild 39 Czerny-Turner-Anordnung

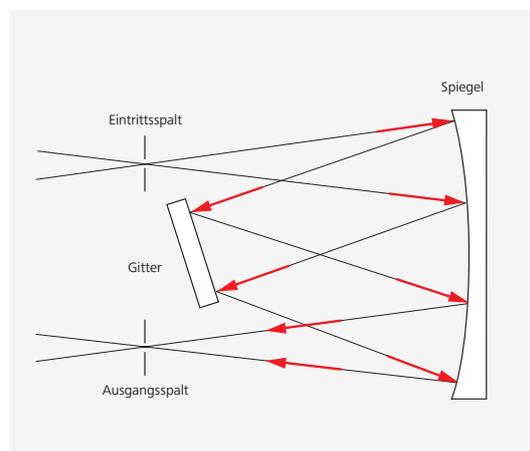


Bild 40 Ebert-Fastie-Anordnung

Große Spaltbreiten ermöglichen hohe Intensität, bedingen aber auch eine hohe spektrale Breite. Zusätzlich können durch Optimierung der Abbildung des Eingangsspalts auf den Ausgangsspalt die spektrale Breite und Intensität verbessert werden.

Ein abbildendes Monochromatorgitter kann eine gute optische Abbildung des Eingangsspalts auf den Ausgangsspalt ermöglichen. Die Qualität dieser Abbildung sollte sich dabei möglichst nicht ändern, wenn das Gitter verdreht und die Ausgangswellenlänge damit modifiziert wird.

Das Prinzip des Polychromators

Ein Polychromator (griech. „poly“ = viel + „chromos“ = Farbe) ermöglicht es, innerhalb seiner Auslegung das gesamte Wellenlängenspektrum auf einmal zu bestimmen. Im Prinzip kann man sich einen Monochromator vorstellen, bei dem sich an Stelle des Ausgangsspalts ein Linien- oder Flächen-detektor befindet. Dadurch wird eine gleichzeitige Auswertung des gesamten Spektrums möglich; ein großer Vorteil, wenn Spektren mit hoher Geschwindigkeit gewonnen werden sollen. Im Unterschied zum Monochromator muss beim Polychromator ein abbildendes Gitter den Eingangsspalt möglichst

gut, spektral aufgetrennt, auf eine Linie abbilden. Bei Polychromatoren werden keine mechanisch beweglichen Bauteile verwendet, was die Fertigung vereinfacht, Stabilität über lange Zeit ermöglicht und die mechanische Belastbarkeit erhöht.

Typische Konfigurationen

Die einfachste Konfiguration für Mono- und Polychromatoren mit einem ebenen Gitter besteht aus einem Eingangsspalt, einem sphärischen Konkavspiegel, der das Licht in ein paralleles Lichtbündel umwandelt, dem Plangitter, das das Licht beugt, und einem zweiten sphärischen Konkavspiegel, der das Licht auf den Ausgangsspalt oder den linearen Detektor fokussiert. Diese W-förmige Anordnung ist auch als Czerny-Turner-Anordnung bekannt. Eine verbreitete Variante der Czerny-Turner-Anordnung ist die Ebert-Fastie-Anordnung, bei der die beiden Konkavspiegel zu einem großen Spiegel zusammengefasst wurden.

Daneben ist die Rowland-Kreis-Anordnung nach wie vor verbreitet. Hier besteht der Aufbau aus dem Eingangsspalt, dem Gitter und einem oder mehreren Ausgangsspalten oder Punktdetektoren. Dadurch kann das Spektrum polychromatisch,



Bild 41 Emissionsspektroskopie von Gasen im Vakuum

durch gleichzeitige Intensitätsmessung an mehreren Punkten auf dem Rowlandkreis gemessen werden. Die holografische Herstellungsmethode abbildungskorrigierter Konkavgitter ermöglicht den einfachen Aufbau mit Eingangsspalt, Beugungsgitter und Ausgangsspalt (Monochromator konstanter Umlenkung) oder Zeilendetektor (Flachfeldspektrograph).

Mit Gittern auf gekrümmten Trägern lassen sich auch abbildende Spektrographen konstruieren, die jeden Punkt des Eingangsspalts spektral aufgelöst auf einen flachen Detektor abbilden können. Eine Anordnung für solche Geräte ist der Offner-Spektrograph, der im Prinzip ein Czerny-Turner-Spektrograph mit konvexem Gitter anstelle eines planen Gitters ist. Dadurch sind hervorragende Abbildungseigenschaften realisierbar und somit hohe spektrale und räumliche Auflösungen möglich.

Optische Emissionsspektroskopie

Bei der optischen Emissionsspektroskopie wird die emittierte Strahlung angeregter Atome und Moleküle untersucht. Die Anregung kann dabei durch hohe Temperaturen oder andere Verfahren erreicht werden, die viel Energie zur Verfügung stellen. Die Wellenlängen der emittierten Strahlung geben

Auskunft über die Zusammensetzung der untersuchten Probe, während die Intensität Informationen über die zugehörigen Konzentrationen gibt.

Emissionsspektren lassen sich in drei Gruppen unterteilen:

- Kontinuumsspektren, wie sie von glühenden Festkörpern verursacht werden. Hier bilden sich keine unterscheidbaren Spektrallinien aus.
- Bandenspektren, wie sie von Molekülen verursacht werden. Dabei handelt es sich im Grunde um stark verbreiterte Spektrallinien.
- Linienspektren, wie sie von angeregten Atomen emittiert werden. Die diskreten und scharfen Linien erlauben im Allgemeinen eine eindeutige Zuordnung.

Für die Anregung werden typischerweise folgende Methoden verwendet:

- Flamme: Flammenemissionsspektroskopie (FES für „flame emission spectroscopy“)
- Plasma: induktiv gekoppeltes Plasma (ICP-OES für „inductively coupled plasma optical emission spectroscopy“) oder Mikrowellen-

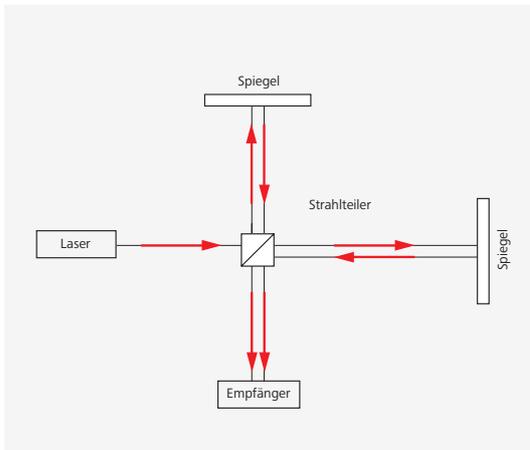


Bild 42 Michelson-Interferometer

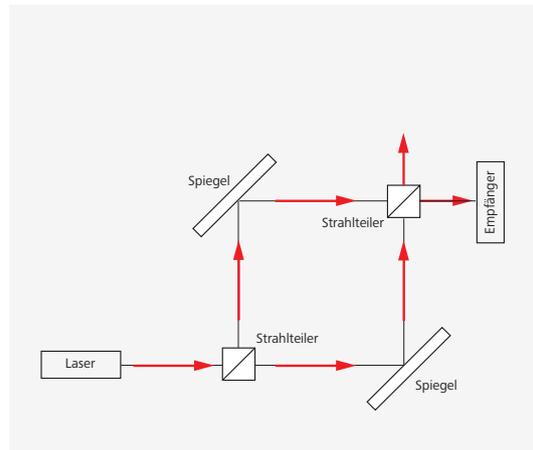


Bild 43 Mach-Zehnder-Interferometer

Plasmafackel-Emissionsspektroskopie (MPT-OES für „microwave plasma torch optical emission spectroscopy“)

- Lichtbogen/Funken: Emission aus einem Lichtbogen oder erzeugten Funken
- Belichtung: Anregung der Atome oder Moleküle durch energiereiches Licht führt zu Fluoreszenz (OFS für „optical fluorescence spectroscopy“)
- Glimmentladung: Atome und Moleküle können über eine Glimmentladung angeregt werden (GDOS für „glow discharge optical spectroscopy“)

Zur Analyse der Strahlung können sowohl Mono- als auch Polychromatoren zum Einsatz kommen.

Molekülspektroskopie

In der Molekülspektroskopie wird die Wechselwirkung zwischen Molekülen und elektromagnetischer Strahlung gemessen. Dadurch können molekulare Eigenschaften wie Bindungslängen und -stärken sowie atomare Bestandteile untersucht werden. Im Unterschied zu Atomspektren weisen Molekülspektren deutlich mehr Linien auf, die zumeist auch überlappen. Die Linien entstehen durch Elektronen-, Schwingungs- und Rotationsübergänge im Molekül, die zur Absorption oder Emission von Strahlung

führen. Entsprechend können sie durch Emissions- und Absorptionsspektroskopie untersucht werden.

Zur Molekülspektroskopie gehören folgende optische Verfahren:

- Frequenzmodulationsspektroskopie
- Fluoreszenzspektroskopie
- Schwingungsspektroskopie in Form von IR- und Ramanspektroskopie
- UV/VIS-Spektroskopie

Wie bei optischen Emissionsspektrometern kommen auch in der Molekülspektroskopie Mono- und Polychromatoren zum Einsatz. Im Laborumfeld für IR-Spektroskopie werden häufig FTIR-Spektrometer verwendet.

Nicht-optische Verfahren der Spektroskopie sind:

- Kernresonanzspektroskopie
- Elektronenspinresonanzspektroskopie
- Mikrowellenspektroskopie

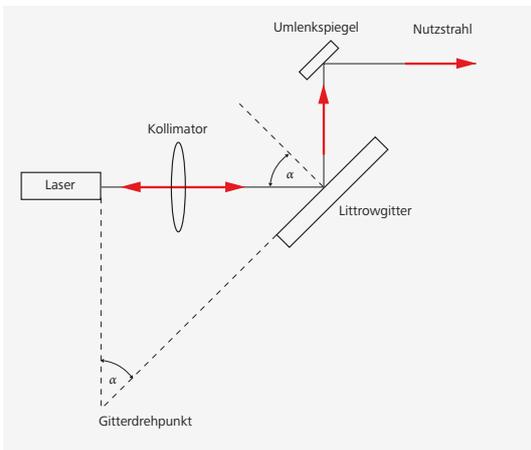


Bild 44 Littrowkonfiguration

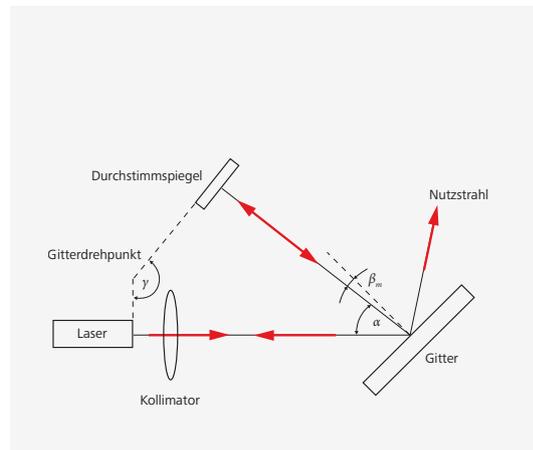


Bild 45 Littmannkonfiguration

Laserabstimmung und Laserstabilisierung

Die aktiven Medien sehr vieler Laser, zum Beispiel Laserdioden, Titan/Saphir- oder Farbstofflaser, können ein sehr breites Verstärkungsspektrum aufweisen. Dabei ist es nicht immer erwünscht, dass der Laser über die gesamte Breite des Wellenlängenbereichs arbeitet. Mit einem dispersiven Element, das in den Resonator eingebaut wird, kann die vom Laser abgestrahlte Wellenlänge eingestellt werden. Alternativ kann ein Teil der ausgekoppelten Strahlung wellenlängenselektiert wieder in den Resonator eingespeist werden. So ist es bei Laserdioden üblich, mit Gittern am Ausgang die nullte Ordnung als Nutzstrahl und die erste Ordnung für die Wellenlängenselektion zu verwenden. Man beugt entweder die erste Ordnung direkt (Littrowkonfiguration) oder über einen Spiegel und koppelt sie von dort wieder über das Gitter zurück (Littmannkonfiguration) in den Resonator. Der Vorteil der komplexeren Littmannkonfiguration ist, dass man nicht das Gitter, sondern nur den Spiegel für eine Abstimmung verstellt und sich die Richtung des Nutzstrahls so nicht ändert, wenn der Laser verstimmt wird. Damit kann die Wellenlänge eines breitbandigen Lasers ausgewählt oder ein Laser auf einer Mode seines diskreten Modenspektrums stabilisiert werden.

Für die Stabilisierung eines breitbandigen Lasers auf genau einer Mode kann gelegentlich ein weiterer, schmalbandiger Filter wie ein Fabry-Perot-Etalon notwendig sein. Da der freie Spektralbereich solcher Filter meistens ebenfalls sehr schmal ist, wird häufig ein Gitter eingesetzt, um den Spektralbereich vorzuselektieren.

Laserpulsformung

Für viele Anwendungen, zum Beispiel in den Bereichen der Medizin, Molekülspektroskopie oder Materialbearbeitung, werden Laser mit kurzen Pulsen hoher Intensität benötigt. In den meisten Fällen erzeugt man diese hochenergetischen Pulse mittels der Chirped-Puls-Amplification-Methode (CPA). Grund für deren Verwendung ist, dass in den Pulsen Leistungen im Petawattbereich ($\sim 10^{15}$ W) benötigt werden. Diese hohen Leistungen lassen sich nicht direkt erzeugen, da die meisten Verstärkermedien von Lasern zerstört würden. Die Pulse werden außerhalb des Verstärkers zeitlich (also in der Länge) gestreckt, wodurch die Energiedichte stark sinkt. Nach der Verstärkung werden die Pulse dann wieder komprimiert, wodurch die hohen Leistungsdichten entstehen, die für die jeweilige Anwendung benötigt werden. Da Pulse ein breiteres Wellen-

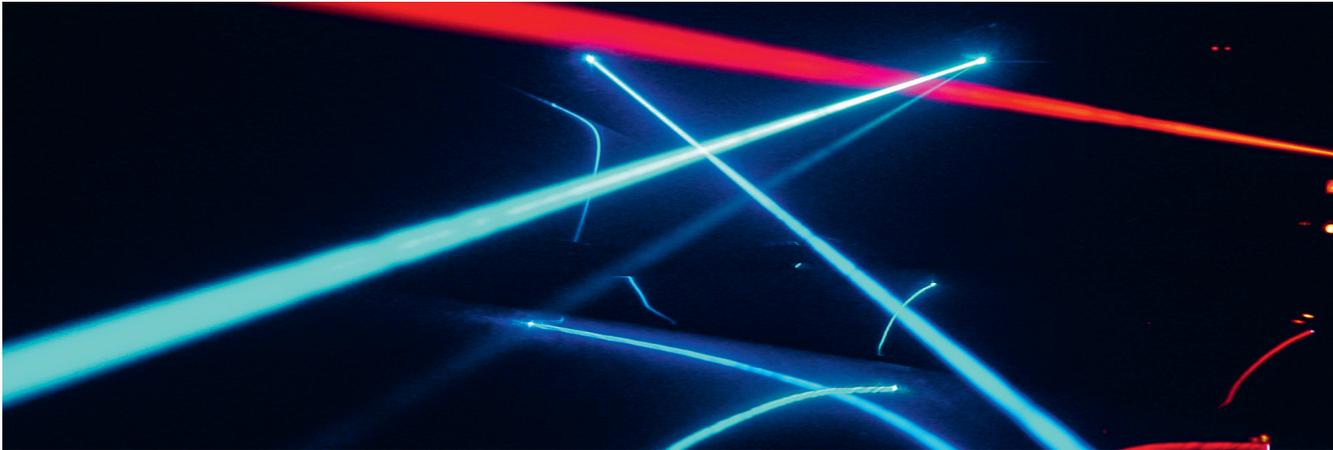


Bild 46 Laserabstimmung und Laserstabilisierung

längenspektrum aufweisen je kürzer sie sind, lassen sich sehr kurze Pulse auch gut strecken und wieder stauchen, indem verschiedene Wellenlängen unterschiedlich stark verzögert werden. Hocheffiziente Gitter eignen sich daher hervorragend dazu, Pulse für die Verstärkung zu strecken und anschließend wieder zu stauchen.

Weitere Anwendungen

Außerdem werden Gitter zur Strahlteilung und als Einstellnormale eingesetzt.

Strahlteilung

Das Aufspalten eines Lichtbündels in zwei oder mehr, üblicherweise interferenzfähige, Teilbündel wird als Strahlteilung bezeichnet. Die wohl am häufigsten verwendete Methode, Lichtstrahlen zu teilen, ist die Verwendung teilweise reflektierender Oberflächen auf einem ansonsten transparenten Träger. Diese Teilung ist üblicherweise in guter Näherung wellenlängenunabhängig und wird als Amplitudenteilung bezeichnet. Die entsprechenden Bauelemente sind teil- oder halbdurchlässige Spiegel, Teilungsplatten oder Teilungswürfel. Amplitudenteilung kann allerdings auch durch Gitter erfolgen, indem die verschiedenen Beugungsordnungen eines einfal-

lenden Lichtstrahls als geteilte Strahlen verwendet werden. Eine große Rolle spielt diese Strahlteilung bei Interferometern, die zur präzisen Bestimmung von Längen, Wellenlängen, Brechzahlen und der Form von Oberflächen verwendet werden. Die wichtigsten Grundformen solcher Interferometer sind das Michelson- und das Mach-Zehnder-Interferometer (Bild 42 und 43), bei denen Gitter als Strahlteiler zum Einsatz kommen.

Einstellnormale

Bei der Herstellung von Einstellnormalen kann die hohe Genauigkeit der Strichzahl holografisch gefertigter Gitter genutzt werden. So lassen sich ohne Probleme Abweichungen $< 0,1 \text{ nm}^{-1}$ der Strichzahl vom Sollwert erzielen. Hochfrequente Gitter können somit als Auflösungsnormale verwendet werden. Weiterhin lässt sich die Profiltiefe von Gittern zwischen 100 nm und 50 μm sehr genau einstellen. Daher eignen sich Gitter gelegentlich auch als Tiefeneinstellnormale.



Der Moment, in dem Sie feststellen, dass Erfahrung
und Know-how nicht austauschbar sind.

Für diesen Moment arbeiten wir.

// **OPTISCHE GITTER**
MADE BY CARL ZEISS



Carl Zeiss Spectroscopy GmbH

Carl-Zeiss-Promenade 10
07745 Jena, Germany

Phone: + 49 3641 64-2838

Fax: + 49 3641 64-2485

Email: info.spectroscopy@zeiss.com

www.zeiss.com/spectroscopy