

***Holographie, Quantenoptik,  
Nichtlineare Optik und  
Röntgenoptik***

# Minitest 1

- 2 Quantum Dots strahlen als fluoreszierende Lichtquellen. Einer der Dots ist 5 nm Gross und der andere ist 30 nm Gross. Im Mikroskop erscheinen zwei leuchtende Punkte. Der eine ist grösser als der andere abgebildet im Mikroskop. Zu welchem Quantum Dot gehört welcher Bildpunkt?

# Lösung

- Quantum Dots erzeugen ein Beugungsscheibchen das einer Ringblende gleicher Größe erzeugt.
- Grösse eines Beugungsscheibchens:

$$d = 2 \cdot 1,22 \lambda \frac{f}{D}$$

mit  $\lambda$  = Wellenlänge des Lichtes,  $f$  = Brennweite der abbildenden Linse,  $D$  = Durchmesser der Ringblende

# Holographie

Das Prinzip der Holografie wurde 1948 von dem ungarisch-britischen Physiker Dennis Gábor (1900-1979) entdeckt, der dafür 1971 den Nobelpreis für Physik erhielt.

Bekannt sind vor allem Verfahren, die neben den bildlichen auch räumliche Eigenschaften eines abgelichteten Objekts in der Reproduktion sichtbar machen. Mittels Laserlicht wird dabei das gesamte Wellenfeld auf eine geeignete Fotoplatte abgebildet. Da das direkte Laserlicht mit dem vom Objekt reflektierten Laserlicht (auch) auf der Bildplatte überlagert wird und interferiert, enthält die holografische Bildplatte Informationen über Amplitude und Phase des vom Objekt kommenden Wellenfeldes und damit die Rauminformation über das Objekt - ein Hologramm ist entstanden.

Im Gegensatz zur Stereografie, welche nur Amplitudeninformationen speichert, (Aufzeichnung von räumlichen Bildern mit konventioneller Fotografie) wird dabei kohärentes Laserlicht verwendet, um die Interferenzmuster, die ein Objekt im Strahlengang erzeugt, auf einem fotografischen Film abzubilden.

Durchleuchtet man diese Bildplatte wieder mit monochromatischem Laserlicht der gleichen Wellenlänge, die bei der Aufnahme gewählt wurde, wird die ursprüngliche Wellenfront rekonstruiert. So erscheint nicht ein perspektivisches, sondern ein echtes dreidimensionales Bild des aufgezeichneten Objektes, da die gespeicherte Phaseninformation an einem jedem Bildpunkt Rückschlüsse auf die Laufzeit des Lichtes auf dem Weg vom Objekt zur Fotoplatte und damit die Oberflächenstruktur des Objekts ermöglicht.

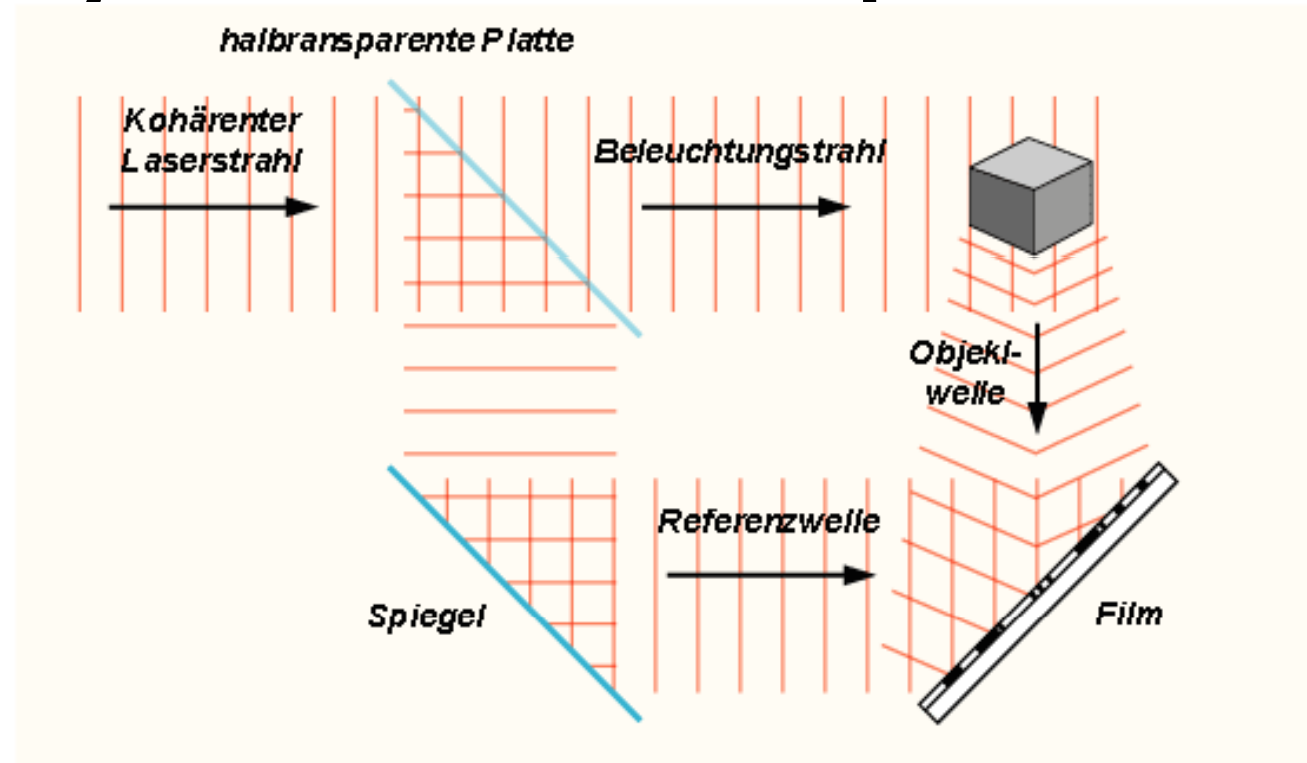
Während bei einem herkömmlichen Bild ein einzelner Punkt auf dem Bild einen Punkt des abgeleuchteten Objekts wiedergibt, ist es bei der holografischen Platte so, dass jeder Punkt der holografischen Platte Informationen über das Objekt enthält. Schneidet man eine holografische Platte in zwei Stücke, so kann man in jeder der beiden Hälften (je nach Blickwinkel) noch das gesamte Objekt betrachten, lediglich der Winkelbereich, unter dem das Objekt betrachtet werden kann, nimmt ab. (Vergleich: Durch eine Hälfte eines doppelflügligen Fensters kann man immer noch die gesamte Außenansicht betrachten.)

Bei der normalen Fotografie wird lediglich die Intensität des einfallenden Lichtes auf dem Film gespeichert. Bei der Farbfotografie nimmt man zusätzlich noch die Farbe, also die Frequenz des Lichtes auf.

Bei der Holografie wird nun die Phase und die Intensität gespeichert. Dies geschieht mit Hilfe der Interferenz. Um präzise Interferenzmuster zu erzeugen, verwendet man kohärentes Licht, in der Regel einen Laserstrahl, der mittels Streulinsen aufgeweitet wurde.

# Physikalisches Prinzip

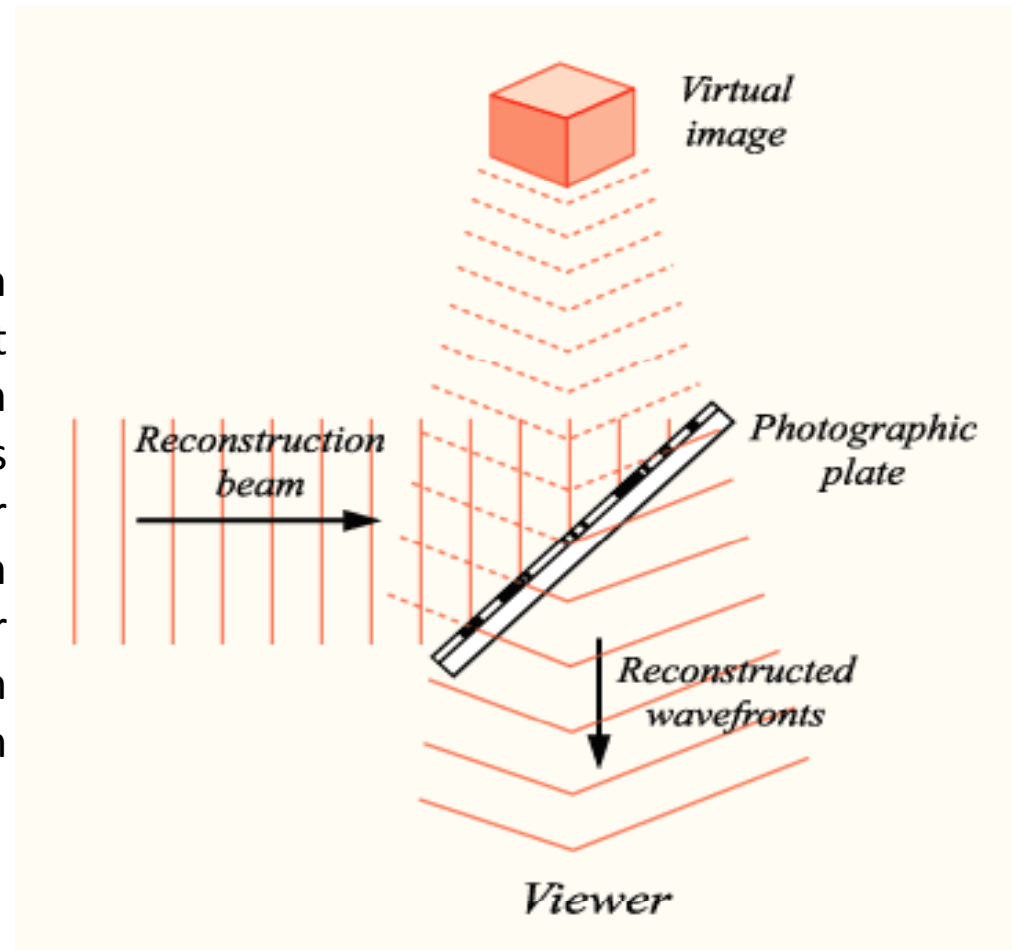
Aufnahme:



Beleuchtet man mit kohärentem Licht ein beliebiges Objekt, wird dieses reflektiert und gestreut. Es entsteht ein Wellenfeld, das wir mit unseren Augen wahrnehmen. Dieses Wellenfeld wird Objektwelle genannt. Die Objektwelle überlagert sich mit dem einfallenden, ungestreuten Licht (der so genannten Referenzwelle) desselben Lasers, d. h. die Wellenfronten interferieren miteinander. Die entstehenden Interferenzmuster treffen auf eine Glasplatte oder einen Film, auf der sich eine lichtempfindliche Schicht befindet. Die Schicht reagiert nur auf die Intensität des Lichtes, durch die Interferenz der Wellenfronten wird aber die relative Phase (zwischen Objekt- und Referenzwelle) aufgezeichnet.

## Rekonstruktion:

Entwickelt man nun den Film, so werden die belichteten Stellen schwarz, es gibt also ein Interferenzmuster von schwarzen Linien, dazwischen ist nichts aufgezeichnet, es ist also nur der durchsichtige Film zu sehen. Die Linien sind sehr nahe beieinander, ein normaler Fotofilm wäre nicht in der Lage, solch feine Strukturen aufzuzeichnen. Vom Auge sind sie nicht zu erkennen.



Bei der Rekonstruktion beleuchtet man die holografische Fotoplatte mit einer Welle, die mit der Referenzwelle identisch ist. Dabei wird das Licht am Interferenzmuster gebeugt und es entsteht die exakte Wellenfront der Objektwelle. Hinter dem Hologramm sieht man also den abgebildeten Gegenstand wie durch ein Fenster. Daher nennt man solche Hologramme auch **Transmissions-** oder **Durchlichthologramme**, weil Laser und Betrachter auf verschiedenen Seiten stehen.

Da auch das ganze Wellenfeld vor und hinter dem aufgezeichneten Objekt rekonstruiert wird, können unsere Augen das Abbild jeweils aus leicht verschiedenen Richtungen (Augenabstand) sehen. Das Gehirn ist dadurch in der Lage, einen räumlichen Eindruck herzustellen. Dieser wird dadurch weiter verstärkt, dass man sich sogar im Wellenfeld hin- und herbewegen und so den Gegenstand aus verschiedenen Richtungen und, in begrenztem Ausmaß, auch um ihn herum sehen kann.



Grundsätzlich werden alle Hologramme, die mit einer weißen Lichtquelle rekonstruiert werden können, „Weißlichthologramme“ genannt. Weißlichthologramme fallen immer unter den Begriff der Reflexionsholografie, da nur durch dieses Prinzip ein Hologramm durch weißes Licht rekonstruiert werden kann. Dabei treffen Objekt- und Referenzstrahl von unterschiedlichen Seiten auf die Hologrammplatte. Das Objekt steht im Strahlengang nach der Hologrammplatte und reflektiert das Licht zurück auf die durchstrahlte Hologrammplatte. Dabei bilden sich stehende Wellen aus, an deren Knotenpunkten die Feldstärke der oszillierenden elektromagnetischen Wellen gleich null ist. Durch die Aufzeichnung dieser stehenden Wellen nicht nur als zweidimensionale Intensitätsverteilung auf der Fläche der Hologrammplatte, sondern auch als dreidimensionale Abfolge von Gittern, bildet sich eine laminare Struktur mit einem „Lamellenabstand“ von einer halben Wellenlänge aus. Der Blick wird von der Seite auf das Hologramm gerichtet, von der zuvor die Referenzwelle auftraf. Dabei wirken die einzelnen Schichten bzw. Ebenen in der Tiefe der entwickelten Schicht, die hier ähnlich wie ein Kristallgitter funktionieren, wie ein Interferenzfilter in Reflexion. Das bedeutet in weiterer Folge, dass, entsprechend der Bragg-Bedingung, von der Hologrammplatte näherungsweise monochromatisches Licht zurückgeworfen wird. Betrachtet man nun das Hologramm unter weißem Licht, so wird genau die Wellenlänge zurückgeworfen, bzw. das Hologramm erscheint in der Farbe, deren Wellenlänge bei dem Abstand der einzelnen Lamellen konstruktiv interferiert.

## Verformungsmessung

Beim holografischen Echtzeitverfahren nimmt man zuerst ein Hologramm des Objektes im Ausgangszustand auf. Dann wird das Objekt einer Belastung ausgesetzt, z. B. einer Erwärmung oder mechanischem Druck. Durch die Überlagerung des Originalhologramms mit dem Bild des veränderten Objektes entstehen Interferenzstreifen. Diese lassen sich auch quantitativ auswerten und geben somit Aufschluss über geringste Deformationen, in der Größenordnung der verwendeten Lichtwellenlänge (beim Laser meistens 633 nm oder 532 nm). So lassen sich zum Beispiel geringste thermische Ausdehnungen oder Vibrationen in mechanischen Systemen genauestens ausmessen. Anwendungen sind beispielsweise die Geräuschreduzierung bei PKW-Motoren.

# Quantenoptik

Das Photon (von Griechisch  $\phi\omega\varsigma$  *phōs*, Gen.  $\phi\omega\tau\acute{o}\varsigma$  *phōtos* „Licht“) ist die elementare Anregung (Quant) des quantisierten elektromagnetischen Feldes. In der Physik ist es eines der Studienobjekte der Quantenelektrodynamik, des ältesten Teils des Standardmodells der Teilchenphysik. Anschaulich gesprochen sind Photonen die „Bausteine“ elektromagnetischer Strahlung, so etwas wie „Lichtteilchen“. Allerdings darf dabei nicht vergessen werden, dass alle bewegten (Elementar-) Teilchen einschließlich der Photonen auch Welleneigenschaften besitzen, dies nennt man Welle-Teilchen-Dualismus. Photonen gehören zur Gruppe der Bosonen.

Jegliche elektromagnetische Strahlung, von Radiowellen bis zur Gammastrahlung, ist in Photonen quantisiert. Das bedeutet, die kleinste Menge an elektromagnetischer Strahlung beliebiger Frequenz ist ein Photon. Photonen haben eine unendliche natürliche Lebensdauer, können aber bei einer Vielzahl physikalischer Prozesse erzeugt oder vernichtet werden. Ein Photon befindet sich nie in Ruhe, sondern bewegt sich immer mit Lichtgeschwindigkeit. Daraus folgt, dass es keine Ruhemasse besitzen kann. In optischen Medien ist die effektive Lichtgeschwindigkeit im Vergleich zur Vakuumlichtgeschwindigkeit aufgrund der Wechselwirkung der Photonen mit der Materie verringert. Da Photonen Energie besitzen, wechselwirken sie gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie mit der Gravitation.

# Masse

Die Ruhemasse eines Photons wird zu Null angenommen. Dies ergibt sich zum einen aus der Art des elektromagnetischen Potentials und zum anderen aus der Lichtgeschwindigkeit, mit der Photonen im Vakuum unterwegs sind.

- Wären Photonen massebehaftet, so wäre das elektrische Potential kein Coulomb-Potential, sondern ein Yukawa-Potential. Das Potential einer elektrischen Ladung wäre also mit einem zusätzlichen exponentiellen Dämpfungsterm abgeschwächt. Weiterhin würde eine Photonmasse das Verhalten von Magnetfeldern ändern. Solche Abweichungen konnten bislang nicht experimentell nachgewiesen werden, woraus sich die momentan (Stand 2007) bestehenden Obergrenzen für die Photonmasse ergeben.
- Die spezielle Relativitätstheorie verbietet nicht nur das Erreichen der Lichtgeschwindigkeit  $c$  für jedes Objekt, dessen Ruhemasse  $m_0$  größer als Null ist, sondern liefert auch den direkten mathematischen Nachweis, dass sich masselose Teilchen mit Lichtgeschwindigkeit bewegen.

relativistische Gesamtenergie (Hamiltonfunktion)  
eines Teilchens:

$$H = \sqrt{(m_0c^2)^2 + (pc)^2}$$

$$v = \frac{dH}{dp} = \frac{pc^2}{\sqrt{(m_0c^2)^2 + (pc)^2}} = c$$

Diese Gleichung ist jedoch nur dann erfüllt, wenn  $m_0 = 0$  ist.

$$E = h\nu \qquad p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

# Spin

Während etwa der Elektronenspin parallel oder antiparallel zu einer *beliebig* vorgegebenen Richtung ist, kann der Photonenspin wegen fehlender Ruhemasse *nur* zirkular, also parallel oder antiparallel zur *Flugrichtung* orientiert sein. Dennoch kann auch ein einzelnes Photon *linearpolarisiert* werden, indem zwei entgegengesetzt *zirkularpolarisierte* Zustände überlagert werden. Photonen sind Spin-1 Teilchen und somit Bosonen. Es können also beliebig viele Photonen denselben quantenmechanischen Zustand besetzen, was zum Beispiel in einem Laser realisiert wird.

# Experimente der Quantenoptik

Viele der Experimente in der Quantenoptik beschreiben Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie. Als nahezu ideale Lichtquelle für Experimente hat sich hierbei der Laser herausgestellt, da dieser äußerst monochromatisch und kohärent ist. Besondere Aufmerksamkeit fand die Quantenoptik auch ab den 1990er Jahren in Zusammenhang mit Experimenten über die Grundlagen der Quantenmechanik und zu Quantencomputern. Stichworte sind unter anderem:

- Laserkühlung
- Atomfallen
- Bose-Einstein-Kondensat
- Atominterferometrie
- Photonenstatistik
- Interferenz eines einzelnen Photons mit sich selbst
- Laserspektroskopie
- Quantencomputer
- Quantenkryptografie
- Biophotonik

# ***Nichtlineare Optik***

Die **nichtlineare Optik** (NLO) beschäftigt sich mit den Eigenschaften und Anwendung von Materialien, bei denen der Zusammenhang zwischen elektrischem Feld  $E$  und Polarisation  $P$  nicht linear ist.

Im Allgemeinen nimmt man (näherungsweise) an, dass die optischen Eigenschaften unabhängig von der Intensität des eingestrahlten Lichtes sind (lineare Optik); dabei ist die elektrische Suszeptibilität  $\chi$  eine Materialkonstante eines optischen Mediums. In diesem Bereich zeigen unterschiedliche Lichtstrahlen in Materie keine Wechselwirkung miteinander. Im nichtlinearen Bereich können sich Lichtstrahlen in Materie gegenseitig beeinflussen, sie sind unter anderem abhängig von der lokalen elektrischen Feldstärke bzw. Intensität des Lichts. Dies beeinflusst die optischen Eigenschaften des Materials in reversibler Weise. Entsprechende Lichtintensitäten liegen im Bereich von  $10^2$  bis  $10^6$  W/cm<sup>2</sup> (mit Lasern erreichbar) und sind sowohl material- als auch wellenlängenabhängig.

Zwei wichtige Prinzipien der linearen Optik sind in der nichtlinearen Optik verletzt: das Superpositionsprinzip und die Frequenzerhaltung. Jedes Medium ist nichtlinear, kann aber in guter Näherung als linear betrachtet werden, solange die auftretenden Feldstärken klein sind. Große Feldstärken werden z. B. von fokussierter Laserstrahlung erzeugt, insbesondere bei gepulsten Lasern, bei denen die Energie in sehr kurzer Zeit abgestrahlt wird.



Auch in Lichtwellenleitern sind nichtlineare Effekte zu berücksichtigen. Es treten z. B. folgende nichtlineare optische Effekte auf:

- Frequenzverdopplung, Frequenzvervielfachung, Erzeugung der Summen- und Differenzfrequenz Die Erzeugung einer Lichtwelle doppelter Frequenz in einem nichtlinearen Medium ist der einfachste nichtlineare optische Effekt. Frequenzverdopplung tritt nur an Oberflächen oder in bestimmten Kristallen, in denen die räumliche Inversionssymmetrie gebrochen ist, auf. Aus Gründen der Kristallsymmetrie kann in den meisten kristallinen Medien sowie in isotropen Medien wie Flüssigkeiten und Gasen nicht die doppelte, sondern nur die dreifache Frequenz erzeugt werden. In Kristallen, die für Frequenzverdopplung eingesetzt werden, wird durch „Mischen“ von Licht unterschiedlicher Frequenzen auch die Summe und Differenz der Frequenzen erzeugt.
- Frequenzsplitting Frequenzteilung auch Abwärtskonversion genannt z. B. mit einem OPO (Optisch Parametrischen Oszillator). Der Prozess ist im Prinzip dem der Frequenzverdopplung inverse Prozess.
- Selbstfokussierung Bei hohen Lichtintensitäten können Laserstrahlen durch den Kerr-Effekt ihre eigene Ausbreitung derart beeinflussen, dass der Strahl immer kleiner und die Intensität immer größer wird.
- Selbstphasenmodulation (SPM), Kreuzphasenmodulation (XPM), Vier-Wellen-Mischung (FWM) Nichtlineare Überlagerung verschiedener Kanäle.

# Röntgenoptik

Die **Röntgenoptik** beschäftigt sich mit der Ausbreitung von Röntgenstrahlung und deren Wechselwirkung mit Materie. Sie findet nicht nur im Wellenlängenbereich der eigentlichen Röntgenstrahlung (0,1 pm bis 10 nm) Anwendung, sondern auch bei Wellenlängen bis hin zu 100 nm (VUV-Strahlung).

In der Röntgenoptik unterscheidet man zwischen weicher und harter Röntgenstrahlung. Als weiche Röntgenstrahlung wird der Bereich bezeichnet, in dem die Wellenlänge der Strahlung länger ist, als der Abstand der Atome im Festkörper (0,1 nm bis 0,5 nm). Hier wird der Festkörper als homogenes Medium angesehen. Harte Röntgenstrahlung hingegen ist der Bereich, in dem die Wellenlänge kürzer als der Abstand der Atome im Festkörper ist. Hier kommt die atomare Struktur des Festkörpers zur Geltung.

Für Röntgenstrahlung ist die Brechzahl von Materie ungefähr 1. Der Realteil der Brechzahl, der die Phasengeschwindigkeit bestimmt, ist sogar kleiner als 1. Der Grund für diese Brechzahl liegt darin, dass die Schwingungsfrequenz von elektromagnetischer Strahlung im Röntgenbereich größer ist als die Oszillationsfrequenz der äußeren Elektronen der beleuchteten Atome, die im elektrischen Feld der Röntgenstrahlung erzwungene Schwingungen oberhalb ihrer Resonanzfrequenz vollführen. Diese Eigenschaft kann zur Definition von Röntgenstrahlung genutzt werden. Im Röntgenbereich ist Vakuum daher das optisch dichtere Medium. Die Folge: eine einfache Grenzfläche reflektiert nur dann gut, wenn sie unter streifendem Einfall beleuchtet wird, so dass Totalreflexion an der Grenzfläche auftritt.

## **Weiche Röntgenstrahlen**

Die Ausbreitungsrichtung von elektromagnetischer Strahlung lässt sich prinzipiell durch Ausnutzung von Refraktion, Reflexion und Beugung ändern, beispielsweise fokussieren. Für Röntgenwellenlängen – also insbesondere für Wellenlängen, die kürzer als 100 nm sind – gibt es keine ganz strahlungsdurchlässigen („transparenten“) Medien. Dies hat zur Folge, dass Röntgenlinsen möglichst dünn sein müssen. Die einfacheren Möglichkeiten, Röntgenlicht zu bündeln, sind Spiegel und Fresnel-Zonenplatten. Röntgenspiegel müssen eine sehr viel planere Oberfläche aufweisen als Spiegel für sichtbares Licht. Für Röntgenstrahlung, die sehr kleine Wellenlängen hat, sind Oberflächen, die im sichtbaren Licht absolut eben aussehen, häufig sehr rau.

## **Harte Röntgenstrahlen**

Röntgenspiegel sind nur im streifenden Einfall oder aber bei größeren Einfallswinkeln durch Vielfachreflexion als sogenannte *Multilayer-Spiegel* realisierbar.

## Röntgenspiegel

Um die niedrige Reflektivität im Röntgenbereich zu kompensieren, benutzt man im wesentlichen drei unterschiedliche Verfahren:

- **Streifender Einfall**

Die Reflektivität von Oberflächen nimmt mit flacher werdendem Einfallswinkel zu. Bei einer Brechzahl, die kleiner als 1 ist, kann es bei sehr flachen Einfallswinkeln sogar zu einer Totalreflexion kommen. Deshalb werden in der Röntgenoptik häufig Spiegel unter streifenden Einfall benutzt.

- **Vielschichtsysteme**

Wenn man Spiegel braucht, die bei steilen Einfallswinkeln eine hohe Reflektivität liefern und nur bei einer Wellenlänge arbeiten müssen, werden häufig Spiegel aus Vielschichtsystemen eingesetzt.

- **Braggreflexion**

Bei harter Röntgenstrahlung kann die durch die Bragg-Gleichung beschriebene konstruktive Interferenz der Wellen am Kristallgitter ausgenutzt werden. So kann ein Kristall unter einem bestimmten Winkel und einer bestimmten Wellenlänge wie ein Spiegel wirken

# Röntgendiffraktometer

Ein **Röntgendiffraktometer** (von Diffraktion, lat. für Beugung) ist ein Gerät, das Beugungsphänomene von Röntgenstrahlung misst. Dieses Gerät wird in der Kristallographie zur Aufklärung von Strukturen eingesetzt. Dabei macht man sich zunutze, dass die Wellenlänge der Röntgenstrahlung im Bereich eines Atomabstandes liegt. Gemäß Bragg'scher Gleichung wird ein Röntgenstrahl, der auf einen Kristall trifft, so gebeugt, dass Reflexe an diskreten Orten im Raum auftreten. Das Diffraktometer detektiert nun Ort und Intensität der auftretenden Reflexe.