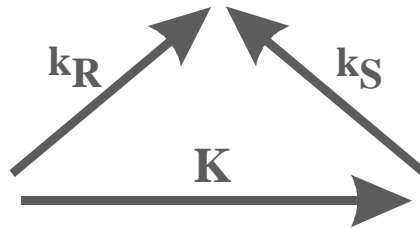


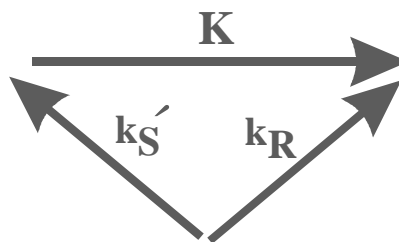
## Multiplexing Verfahren

Für das Erreichen von großen Datendichten ist bei der holographischen Datenspeicherung das Multiplexing entscheidend, das heißt, das Aufzeichnen von mehreren Bitmustern im gleichen Speichermedium. Zum Beispiel werden mit dem Ortsmultiplexing verschiedene Bitmuster an verschiedenen Orten des Speichermediums aufgezeichnet. Eine charakteristische Eigenschaft der holographischen Speichertechnik ist die Überlagerung von verschiedenen Bitmustern im gleichen Volumenelement des Speichermediums. Hier sind eine Reihe von Multiplexingtechniken bekannt. Auf der Basis der Schärfe der Bragg-Bedingung können das Winkel- und Ortsmultiplexing einfach abgeleitet werden.

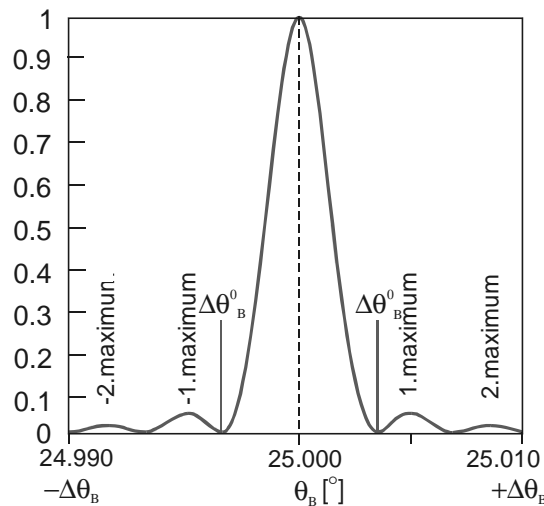
Das Schreiben eines Hologramms kann im reziproken Raum über die Wellenvektoren dargestellt werden. Im einfachsten Fall überlagern zwei ebene Wellen  $\mathbf{k}_R$  und  $\mathbf{k}_S$ , die Referenz- und Signalwelle, zu einer sinusförmigen Intensitätsmodulation, die über den photorefraktiven Effekt in eine Brechwertmodulation übersetzt wird. Diesem eigenschriebenen Gitter kann ebenfalls ein Wellenvektor  $\mathbf{K}$  zugeordnet werden, so dass der Zusammenhang  $\mathbf{K} = \mathbf{k}_R - \mathbf{k}_S$  besteht, der physikalisch die Impulserhaltung beschreibt (Bragg Bedingung).



Die Rekonstruktion der Signalwelle, der Leseprozess kann in diesem Bild ebenfalls dargestellt werden. Eine abgebeugte Welle  $\mathbf{k}'_S$  entsteht, wenn die Referenzwelle und der Wellenvektor des eingeschriebenen Beugungsgitters die Bedingung  $\mathbf{k}'_S = \mathbf{k}_R - \mathbf{K}$  erfüllen.

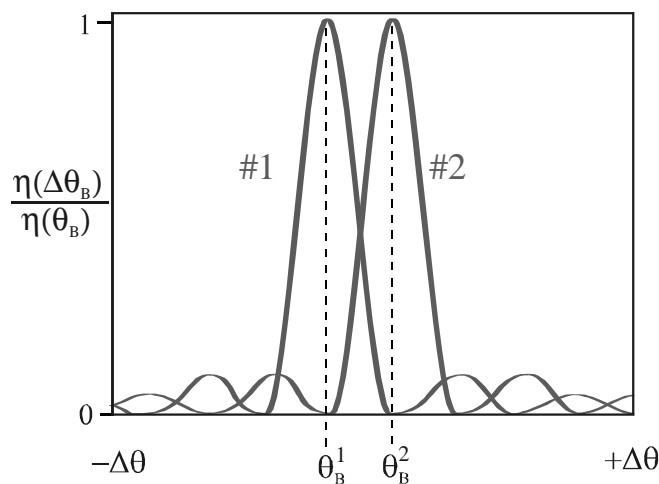


Um diese Bedingung zu erfüllen müssen Wellenlänge und Winkel der Referenzwelle beim Auslesen mit denen beim Einschreiben übereinstimmen. Abweichungen von dem Schreibwinkel oder – wellenlänge führen zu einer Verletzung der Bragg Bedingung und damit nicht zur Rekonstruktion der Signalwelle. Für sehr kleine Abweichungen von der Bragg Bedingung kann die Rekonstruktion allerdings noch erfolgen. Die folgende Abbildung zeigt den Beugungswirkungsgrad als Funktion der Winkelabweichung für ein elementares Hologramm, das unter dem Braggwinkel  $\theta_B$  aufgezeichnet wurde.



Deutlich zu erkennen ist das Maximum des Beugungswirkungsgrades (normiert auf 1), der bei Verletzung der Bragg Bedingung, durch Verdrehung der Referenzwelle um  $+\Delta\theta_B$  bzw.  $+\Delta\theta_B$  stark abnimmt. Charakteristisch und für das Multiplexing im weiteren bedeutend sind die Winkelabweichungen  $+\Delta\theta_B^0$  und  $-\Delta\theta_B^0$  bei denen der Beugungswirkungsgrad 0 wird. Weitere Nebenmaxima und Nullstellen treten bei größeren Winkelabweichungen auf. Zu beachten ist die Halbwertsbreite dieser sogenannten Rockingkurve bzw. die Dimension der Winkelwerte von wenigen 100stel Grad, in denen dieses Verhalten beobachtet wird.

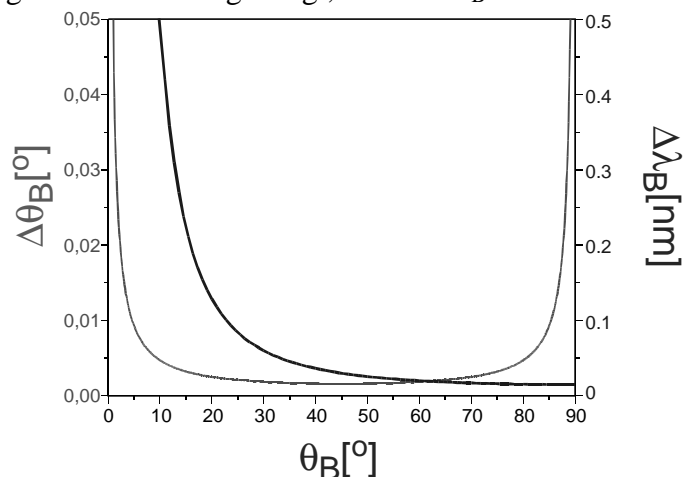
Diese charakteristische Eigenschaft führt zum Winkelmultiplexing. Bei diesem Verfahren wird ein zweites Hologramm #2 im gleichen Volumenelement aufgezeichnet, allerdings unter einem anderen Schreibwinkel als Hologramm #1. Der Schreibwinkel wird dabei in Bezug auf #1 so gewählt, dass der Beugungswirkungsgrad des ersten Hologrammes 0 wird, d.h. es wird zum Beispiel #2 bei der Winkelstellung  $\theta_B + \Delta\theta_B^0$  geschrieben.



Damit können die beiden Hologramme unabhängig voneinander unter den Winkelstellungen  $\theta_B$  bzw.  $\theta_B + \Delta\theta_B^0$  ausgelesen werden, die wir nun als  $\theta_B^1$  bzw.  $\theta_B^2$  bezeichnen wollen. Für beide Hologramme gilt, dass unter Einhaltung der jeweiligen Bragg Bedingung das andere Hologramm nicht ausgelesen wird. Ein Übersprechen zwischen den Hologrammen ergibt sich damit nicht.

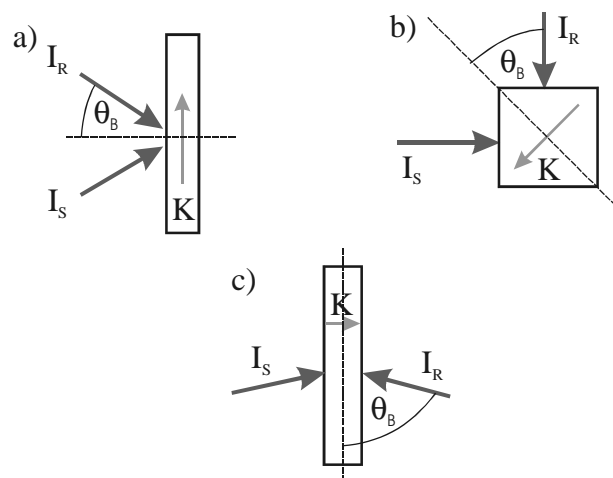
Mit diesem Verfahren können bei  $\Delta\theta_B^0$  von ca.  $0.01^\circ$  in einem Winkelbereich von 10 Grad 1000 Hologramme eingeschrieben werden. Um eine möglichst hohe Volumenspeicherdichte mit diesem Verfahren erzielen zu können ist ein möglichst kleiner Abstand  $\Delta\theta_B^0$  zwischen zwei Hologrammen gefordert. Die Breite der Rockingkurve hängt wesentlich von der

verwendeten Schreibgeometrie ab, also vom Winkel zwischen der Referenz- und der Signalwelle. Die folgende Abbildung zeigt, dass  $\Delta\theta_B^0$  beim Winkelmultiplexing mit

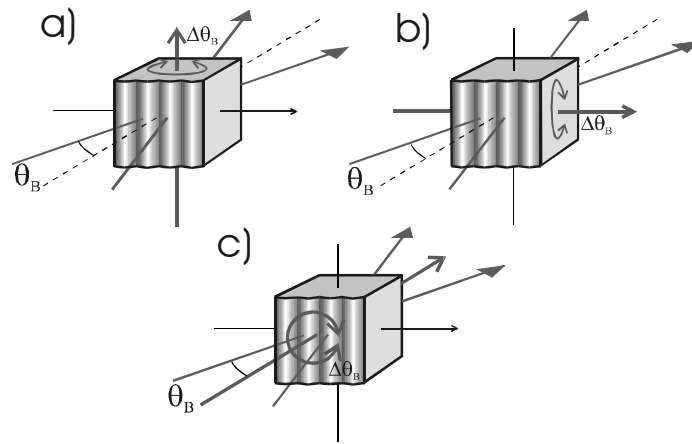


zunehmendem Schreibwinkel klein wird und bei einem Braggwinkel von 45 Grad (= halber Winkel zwischen beiden Wellen) minimal wird. Im Gegensatz dazu steht das Wellenlängenmultiplexing, das analog zum Winkelmultiplexing behandelt werden kann. Hier muss die Wellenlänge für das Schreiben eines weiteren Hologrammes um den Betrag  $\Delta\lambda_B^0$  verstimmt werden, so dass ein Übersprechen zwischen beiden Hologrammen entfällt. Hier wird ein Minimum für einen Braggwinkel von 90 Grad erzielt.

Der Einsatz von Multiplexingverfahren erzwingt dementsprechend die Schreibgeometrie bei der holographischen Datenspeicherung.

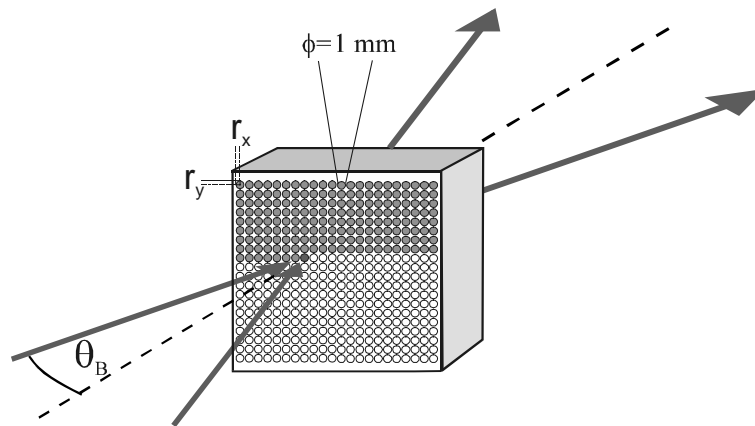


Bisher hatten wir das Aufzeichnen von Hologrammen in der Transmissionsgeometrie nach a) betrachtet. Für das Winkelmultiplexing ist hingegen ein Braggwinkel von 45 Grad ideal für das Aufzeichnen von vielen Hologrammen, so dass hierfür die sogenannte 90-Grad-Geometrie nach b) gewählt werden muss. Hierbei fallen die Schreibstrahlen von unterschiedlichen zueinander rechtwinkligen Seiten auf das Speichermedium ein. Für das Wellenlängenmultiplexing ist hingegen die Reflexionsgeometrie nach c) zu wählen, bei der die beiden Schreibwellen aus entgegengesetzter Richtung auf das Speichermedium einfallen. Beim Winkelmultiplexing gibt es zudem die Möglichkeit die Winkelabweichung nicht über eine Variation des Schreibwinkels einzustellen, sondern anstatt dessen das Speichermedium zu verdrehen. Dies hat technologische Vorteile, da somit der Verlauf der Lichtwellen im Aufbau unverändert bleiben kann. Hierbei gibt es verschiedene Ansätze: a) „in-plane“, b) „out-of-plane“ und c) „peristrophic“.



Die vorangegangenen Darstellung bezogen sich auf a), da hier die größte Winkelschärfe der Rockingkurve erreicht wird.

Analog zur Speicherung auf der CD oder DVD wird bei der holographischen Datenspeicherung auch das Ortsmultiplexing eingesetzt. Hier werden verschiedenen Volumenelemente zum Aufzeichnen der Bitmuster eingesetzt. Zu beachten ist, dass verschiedene Kombinationen der Multiplexingverfahren möglich sind. Am bekanntesten ist die Kombination von Winkel- und Ortsmultiplexing in der Transmissionsgeometrie.



Mit diesen Verfahren kann die Speicherkapazität drastisch erhöht werden. Dabei werden die einzelnen Verfahren multipliziert. Die Verwendung von Orts- und Winkelmultiplexing kann zum Beispiel eine Vervielfachung um einen Faktor  $625 \times 1000$  erbringen, wenn 1000 Hologramme in matrixförmig angeordneten Volumenelementen von 25 (Zeile) und 25 (Spalte) aufgezeichnet werden.