

# 1. Einleitung

Im Telekommunikationsbereich gibt es einen ständig wachsenden Bedarf an Bandbreite. Dieser Bedarf kann nur mit modernen Sendern, Übertragungsmedien und Empfängern realisiert werden. Als Sender kommen zum Beispiel Laserdioden (LD) oder Light Emitting Diodes (LED's) zum Einsatz. Für die Übertragung werden mittlerweile hauptsächlich Glasfaserkabel verwendet. Fotodioden eignen sich hervorragend für den Empfang optischer Signale. All diese Komponenten müssen auf einander abgestimmt sein, wie z. B. bei der verwendeten Wellenlänge. So ist zum Beispiel die Kenntnis der Modenfeldweite und des Abstrahlverhaltens eines optischen Bauteils von entscheidender Bedeutung, wenn es um die Kopplung des Bauteils mit anderen Komponenten geht. Die Kenntnisse sind erforderlich um einen hohen Wirkungsgrad z. B. einer Faser-Chip-Kopplung zu erreichen. Nur dann können die verwendeten Bauteile optimal eingesetzt werden, ohne große Verluste durch Streuung, Reflexion oder Dämpfung.

Die Herstellerfirmen haben sich bei der Produktion von optischen Bauelementen an sehr genaue Vorgaben zu halten. Diese werden entweder vom Gesetzgeber gefordert, wie z. B. die Forderungen der ITU-T Recommendations, oder sie werden vom Kunden gefordert, der spezielle Wünsche an die optischen Komponenten stellt. Die Einhaltung dieser Vorgaben ist ein wichtiges Anliegen der Qualitätssicherung im Herstellungsprozess und wird zum Teil bereits während der Produktion überprüft. Daher ist es ein Anliegen der Herstellerfirmen, die Bestimmung der Parameter eines optischen Bauteils in kürzester Zeit, mit einfachen Mitteln und möglichst vollautomatisch zu erreichen.

In der vorliegenden Diplomarbeit wird eine neuartige Medianfeldmessmethode entwickelt, mit der die Modenfeldweite optischer Bauteile ermittelt werden kann. Es handelt sich dabei um eine Fernfeld-Methode, die das Feld planar erfasst und nicht zirkular wie die klassische Fernfeld-Methode.

Dazu wird die entsprechende Theorie entwickelt und dargestellt. Des Weiteren werden Messungen dargestellt, die mit dieser Methode an Bauteilen mit normierten Abstrahlverhalten durchgeführt wurden.



## 2. Grundlagen

In der optischen Nachrichtentechnik spielt Licht und dessen Übertragung eine entscheidende Rolle. In den folgenden Kapiteln sollen die Grundlagen vermittelt werden, die zum Verständnis der vorliegenden Arbeit wichtig sind. Für ein tiefergehendes Verständnis der Theorie der Lichtwellenleitung zum Zwecke der optischen Übertragungstechnik sei auf die Werke von Agrawal [Agra92] und Geckeler [Geck90] verwiesen.

### 2.1 Licht im Wellenleiter

Licht ist eine elektromagnetische Welle, die sich in einem lichtdurchlässigen Stoff, dem optischen Medium, ausbreitet [MaGö98]. Die Auslenkung  $a$  einer sich in  $z$ -Richtung ausbreitenden Welle kann mit folgender Gleichung dargestellt werden :

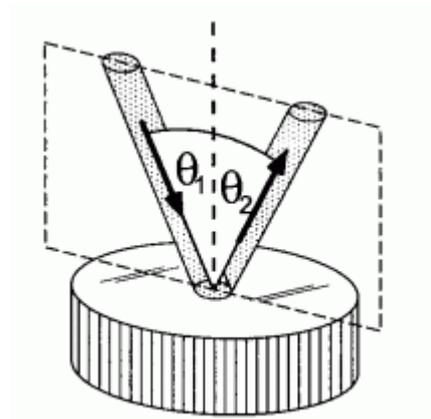
$$a = A * \sin(\omega t - kz) = A * \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{z}{\lambda} \right), \text{ mit} \quad (1)$$

- A Amplitude
- t Zeit in s
- $\omega$  Kreisfrequenz in 1/s
- k Wellenzahl in 1/m
- T Schwingungsdauer in s
- z Länge in  $z$ -Richtung in m
- $\lambda$  Wellenlänge in m.

#### 2.1.1 Reflexion, Brechung und Totalreflexion

Die Reflexion kann an glatten metallischen Flächen, aber auch an Glasscheiben und anderen dielektrischen Grenzflächen beobachtet werden [Mesc99]. Dabei ist der Einfallswinkel  $\theta_1$  gleich dem Ausfallwinkel  $\theta_2$  (siehe Bild 2-1).

$$\theta_1 = \theta_2 \quad (2)$$

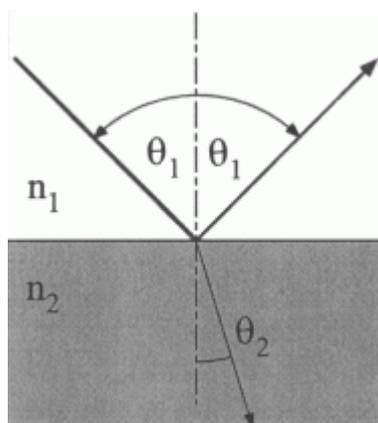


**Bild 2-1 : Reflexion [Mesc99]**

Bei einer Glasscheibe oder an dielektrischen Grenzflächen gibt es gleichzeitig Reflexion und Transmission. Der transmittierte Teil des Lichtstrahls wird dabei in seiner Richtung geändert, er wird „gebrochen“. Wie stark der Strahl gebrochen wird, hängt von einer physikalischen Größe ab, den Brechungsindizes  $n$  der Medien. Dabei gilt, dass je „optisch dichter“ ein Medium ist, desto größer ist sein Brechungsindex. Der Index von Luft  $n_L$  ist praktisch gleich dem des Vakuums  $n_C$  und ist  $n_L \approx n_C = 1$ . Bei optisch dichteren Medien ist  $n_{\text{Medium}} > 1$ , bei Wasser z. B.  $n_{\text{Wasser}} = 1,333$ .

Bei dem Übergang des Lichtstrahls von einem Medium mit Brechungsindex  $n_1$  in ein Medium mit dem Brechungsindex  $n_2$  (siehe Bild 2-2.) gilt:

$$n_1 \cdot \sin(\theta_2) = n_2 \cdot \sin(\theta_1) \quad (3)$$

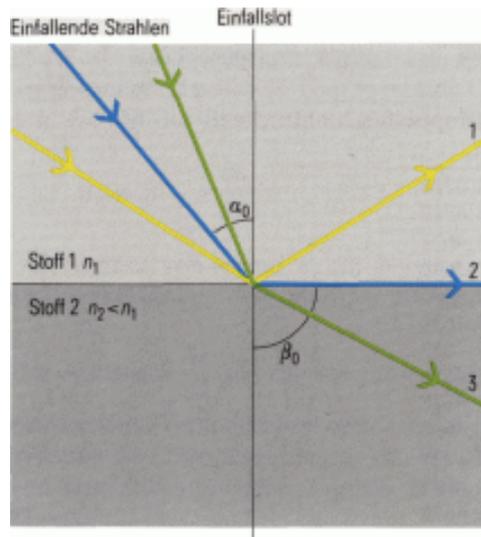


**Bild 2-2 : Reflexion und Brechung [Mesc99]**

Trifft der Lichtstrahl immer flacher auf den Übergang von einem optisch dichteren (Brechungsindex  $n_1$ ) zu einem optisch dünneren Medium (Brechungsindex  $n_2$ ) so kommt es ab einem bestimmten Grenzwinkel nicht mehr zur Brechung, sondern

zur vollständigen Reflexion des Lichts. Man spricht dann von Totalreflexion, siehe Bild 2-3. Der grüne Strahl (3) wird dort noch gebrochen, der blaue Strahl (2) stellt den Grenzfall dar, während der gelbe Lichtstrahl (1) totalreflektiert wird. Der Grenzwinkel  $\alpha_0$  bestimmt sich zu :

$$\alpha_0 = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (4)$$

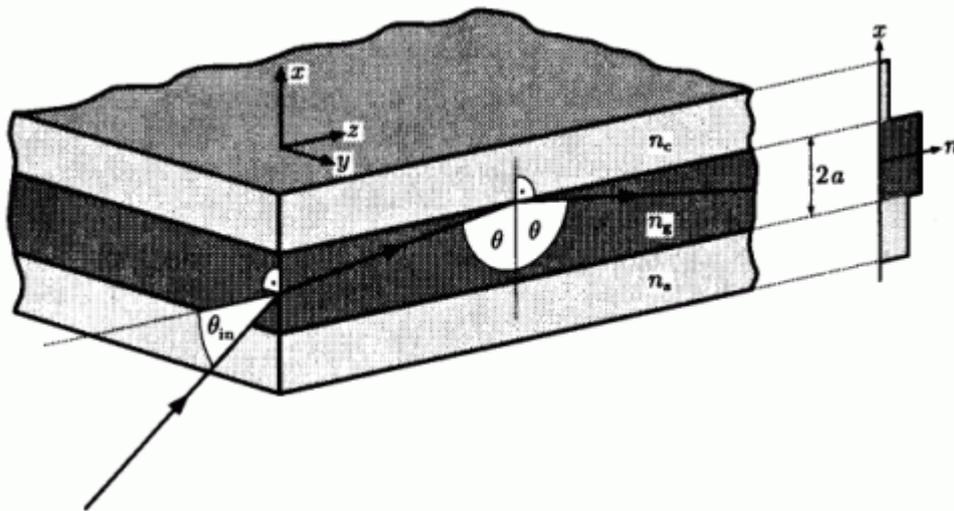


**Bild 2-3 : Brechung und Totalreflexion [MaGö98]**

Der Grenzwinkel hängt somit nur vom Verhältnis der Brechzahlen ab.

### 2.1.2 Lichtausbreitung und Numerische Apertur

Im Folgenden soll die Ausbreitung in einem Schichtwellenleiter betrachtet werden. Im einfachsten Fall besteht ein planarer optischer Wellenleiter aus einer dielektrischen Schicht mit dem Brechungsindex  $n_g$  zwischen zwei dielektrischen Grenzschichten, dem Substrat (Brechungsindex  $n_s$ ) und dem *cladding* („Deckschicht“ mit Brechungsindex  $n_c$ ), siehe Bild 2-4.



**Bild 2-4 : Planare Wellenleiterstruktur [Reid97]**

Dabei gilt, das  $n_g > n_s \geq n_c$  sein soll, damit es innerhalb des Wellenleiters zur Totalreflexion kommt. Nur dann wird das Licht verlustfrei (ohne Abstrahlung in die Grenzschichten) übertragen. Der Einfallswinkel  $\theta$  muss größer sein als der kritische Winkel der Totalreflexion an den beiden Grenzflächen (siehe auch Gl. (4)) :

$$\sin \theta > \sin \theta_{crit} = \frac{n_s}{n_g}$$

Über eine Stirnfläche des Wellenleiters wird das Licht eingestrahlt. Um innerhalb des Wellenleiters die Bedingung der Totalreflexion zu erfüllen, muss der Einfallswinkel  $\theta_{in}$  kleiner sein als :

$$\theta_{in} < n_g * \cos \theta_{crit} \quad (5)$$

mit  $\cos^2 \theta_{crit} = 1 - \sin^2 \theta_{crit}$  und  $\sin \theta_{in} \approx \theta_{in}$  ergibt sich (5) zu:

$$\theta_{in} < n_g \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{crit}} = \sqrt{n_g^2 - n_s^2} = NA \quad (6)$$

Die in (6) dargestellte Bedingung wird Numerische Apertur NA genannt. Der Einkoppelwinkel muss also kleiner sein als die Numerische Apertur des Wellenleiters. Dieser größtmögliche Einkoppelwinkel  $\theta_{max}$  wird auch Akzeptanzwinkel genannt, dessen Sinus gleich der Numerischen Apertur ist :

$$\sin \theta_{\max} = NA = \sqrt{n_g^2 - n_s^2} \quad (7)$$

## 2.2 Moden im Wellenleiter

Bei der Reflexion des Lichts an den Grenzflächen kommt es zu einer Phasenverschiebung; diese ist vom Einfallswinkel des Lichts abhängig [Reid97]. Im Wellenleiter kommt es dann zu Überlagerungen der einfallenden und der reflektierten Wellen. Dadurch bilden sich Moden, die sich entlang des Wellenleiters ausbreiten. Die Anzahl der geführten Moden ist von den Parametern des Wellenleiters und der betrachteten Wellenlänge abhängig. Um die Anzahl zu bestimmen wird der V-Faktor, auch normierte Frequenz genannt, benötigt :

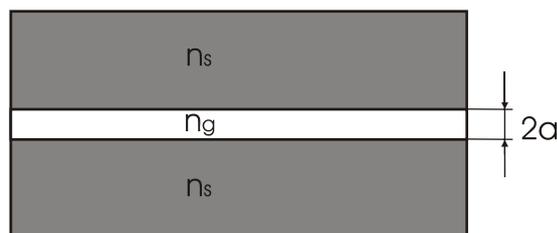
$$V = \frac{\pi * 2a}{\lambda} * \sqrt{n_g^2 - n_s^2} = \frac{\pi * 2a}{\lambda} * NA \quad (8)$$

2a Schichtdicke des Wellenleiters (siehe Bild 2-4)

$\lambda$  Wellenlänge

$n_{g,s}$  Brechzahlindizes von Kern und Substrat

Für zylindrisch geformte Wellenleiter gilt Gleichung (8) ohne Einschränkung, nur dass die Variable a dann dem Kernradius entspricht.

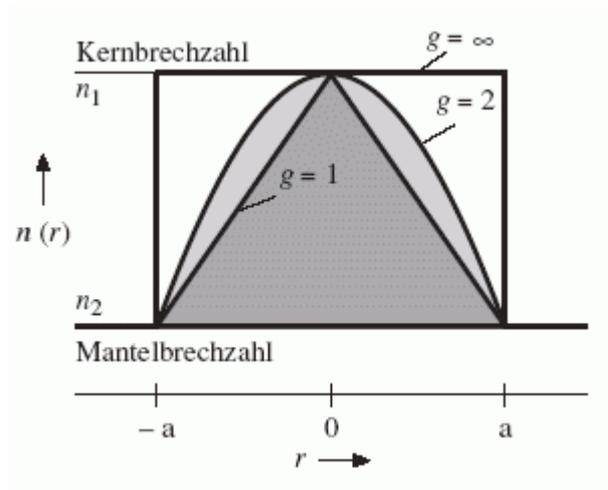


**Bild 2-5 : Zylindrisch geformter Wellenleiter**

Die Anzahl der geführten Moden ergibt sich dann zu :

$$N = \frac{V^2}{2} * \frac{g}{g+2} \quad (9)$$

wobei  $g$  Profilexponent oder auch Potenz genannt wird. Er gibt an, welchen Verlauf das Brechzahlprofil innerhalb des Wellenleiters nimmt, siehe Bild 2-6.



**Bild 2-6 : Brechzahlprofil eines Wellenleiters [MaGö98]**

Der Profilexponent einer Stufenprofilfaser ist  $g=\infty$ , während er für ein Dreiecksprofil  $g=1$  ist.

Für die Stufenprofilfaser gilt dann in guter Näherung :

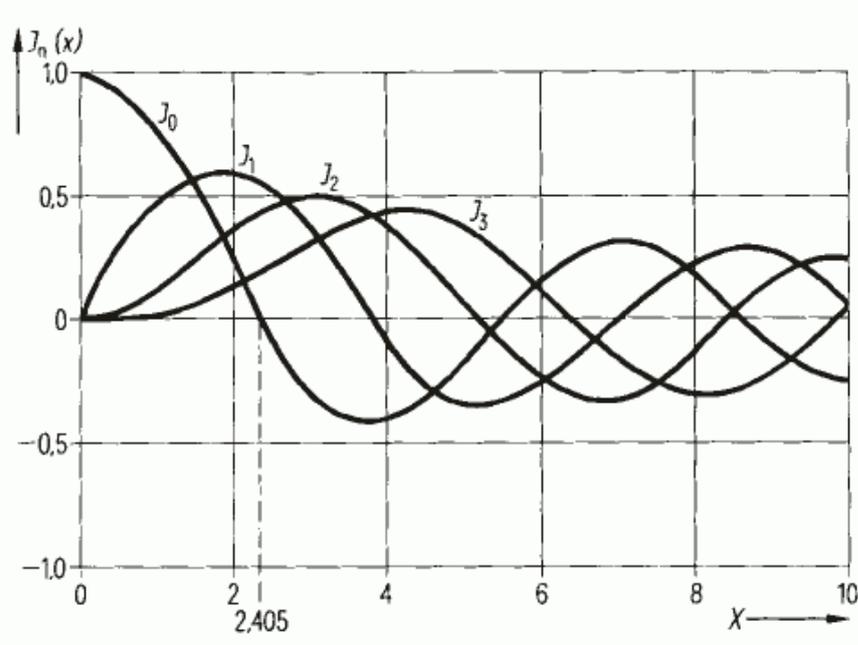
$$N \approx \frac{V^2}{2} \quad (10)$$

Dem Wert  $V_c=2,405$  kommt eine besondere Bedeutung zu, denn er stellt den Grenzwert dar, ab wann ein Wellenleiter einmodig bzw. mehrmodig ist. Von Einmodigkeit spricht man, wenn sich nur eine einzige örtliche Mode in dem Wellenleiter ausbreiten kann,  $V$  ist dann kleiner als  $V_c$ . Bei Mehrmodigkeit sind es dann mehr als eine Mode.

Einmodigkeit :  $V < V_c$ ,  $N=1$

Mehrmodigkeit :  $V \geq V_c$ ,  $N>1$

Der Wert 2,405 entspricht genau der ersten Nullstelle der Besselfunktion  $J_0(x)$  (siehe Bild 2-7). Die Besselfunktionen sehen aus wie gedämpfte Sinusschwingungen und sind typische Funktionen für zylindersymmetrische Wellenleiter [MaGö98].



**Bild 2-7 : Besselfunktionen [MaGö98]**

### 2.3 Glasfaser-Wellenleiter

Die rotationssymmetrischen Glasfaser-Wellenleiter haben im Bereich der optischen Nachrichtenübertragung eine besondere Bedeutung. Durch sie ist es möglich optisch kodierte Signale mit hoher Bandbreite ( $>10\text{Gbit/s}$ ) mit geringen Verlusten über einige 10km bis 100km ohne Signalregeneration zu übertragen [Reid97]. Sie sind zylindrisch geformte Wellenleiter, die durch eine PMMA-Schutzschicht von äußeren Umwelteinflüssen geschützt werden. Dabei wird zwischen mehrmodigen (Multi-Mode-Faser, MMF) und einmodigen (Single-Mode-Faser, SMF) Glasfaser-Wellenleitern unterschieden.

#### 2.3.1 Multi-Mode-Faser

Die Parameter der Multi-Mode-Faser sind in den Normen

- EN 188200
- VDE 0888 Teil 105
- ITU-T Recommendation G.651
- IEC Standard 60793-2

geregelt.