

Der tatsächliche Einfluß der chromatischen Dispersion, ebenso wie der Modendispersion in verschiedenen Polymer- und Glasfasern auf die Bandbreite des Systems wird in einem der nächsten Kapitel gezeigt, in denen detailliert auf Materialien und Fasertypen eingegangen wird.

2.2 Indexprofile und Fasertypen

Nach den theoretischen Beschreibungen der Eigenschaften optischer Fasern im Abschnitt über die Grundlagen der Lichtausbreitung und den oben gezeigten Überlegungen zur Modenausbreitung und wesentlichen Eigenschaften von Fasern wird sich der nun folgende Abschnitt mit konkreten verfügbaren Fasern befassen. Zunächst werden die verschiedenen Indexprofile, wie sie in 1.1.6 schon kurz eingeführt wurden, an Beispielen eingeführt. Der nächste Abschnitt zeigt die historische Entwicklung speziell der verschiedenen POF-Varianten. Anschließend werden die wichtigen Eigenschaften Dämpfung und Bandbreite mit einer Reihe von experimentellen Ergebnissen gezeigt.

Für die tatsächlichen Eigenschaften optischer Fasern sind drei Parameter grundlegend verantwortlich. Die verwendeten Kern- und Mantelmaterialien bestimmen Dämpfung und chromatische Dispersion, der Brechzahlverlauf bestimmt die Modendispersion und der Kerndurchmesser ist für die Zahl der Moden mitverantwortlich. Vor allem das Kernmaterial und das Indexprofil sind zumeist schon aus den Namen der Faser zu erkennen, hier im Buch wird diese Bezeichnungweise weitgehend verwendet.

Im folgenden Abschnitt wird die historische Entwicklung der verschiedenen Polymerfasertypen zusammengefaßt. Die POF werden dabei bezüglich der verschiedenen Indexprofile behandelt. Anschließend werden auch verschiedene Hybrid- und Glasfasern für die Kurzstrecken-Datenübertragung vorgestellt. Das folgende Kapitel geht speziell auf die Bandbreite dicker optischer Faser ein, da diese Eigenschaft einerseits besonders wichtig ist, andererseits aber auch die größten Anforderungen an die Meßtechnik stellt.

2.2.1 Stufenindexprofilfasern (SI)

Wie auch bei der Quarzglasfaser waren die ersten Polymerfasern reine Stufenindexprofilfasern (SI-POF). Das bedeutet, daß ein homogener Kern von einem einfachen optischen Mantel umgeben ist. Um diesen herum ist im Kabel immer ein Schutzmaterial angeordnet. Abbildung 2.39 zeigt den Brechungsindexverlauf.

Wie bereits oben gezeigt wurde, bestimmt der Brechungsindexsprung die Numerische Apertur (NA) und damit den Akzeptanzwinkel. Tabelle 2.1 gibt einige typische Werte wieder. Als Brechzahl des Kerns wurde dabei immer 1,5 angenommen, der Mantel hat einen entsprechend kleineren Brechungsindex. Die letzte Zeile gilt für Wellenleitung gegen Luft ($n = 1$). Hier gilt ein Akzeptanzwinkel von 90° , da die NA den Wert 1 überschreitet.

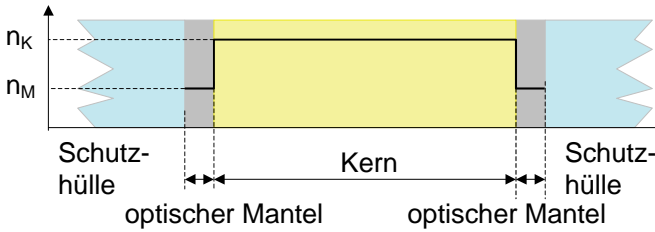


Abb. 2.39: Aufbau einer Stufenindexprofilfaser

Tabelle 2.1: Zusammenhang zwischen der relativen Brechungsindexdifferenz und der Numerischen Apertur (Kernbrechzahl = 1,50)

relative Brechungsindex-Differenz	Index des Mantels	Numerische Apertur	Akzeptanzwinkel der Faser
0,22 %	1,497	0,10	6°
0,4 %	1,494	0,13	8°
0,8 %	1,488	0,19	11°
1,0 %	1,485	0,21	12°
1,5 %	1,478	0,26	15°
2,0 %	1,470	0,30	17°
2,7 %	1,460	0,35	20°
4,0 %	1,440	0,42	25°
5,8 %	1,413	0,50	30°
8,0 %	1,380	0,59	36°
12,0 %	1,320	0,71	45°
20,0 %	1,200	0,90	64°
33,3%	1,000	1,12	90°

Ein größerer Akzeptanzwinkel der Faser vereinfacht die Einkopplung von Licht, z.B. aus einer Halbleiterquelle. Weiterhin verringert eine hohe NA die Verluste an Faserbiegungen, wie schematisch in Abb. 2.40 gezeigt wird.

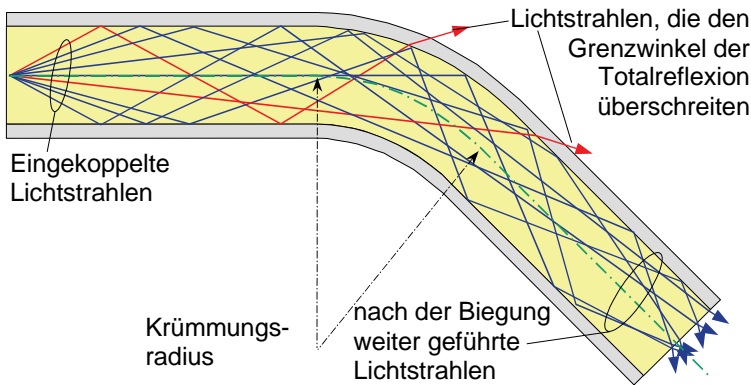


Abb. 2.40: Abstrahlverluste an Faserkrümmungen

Durch die Krümmung verändert sich die Ausbreitungsrichtung jedes einzelnen Strahls relativ zur Faserachse. Bei Multimodefasern wird dabei grundsätzlich ein Teil der Strahlen ausgekoppelt, da sie an der Grenzfläche zwischen Kern und Mantel den Grenzwinkel der Totalreflexion überschreiten. Bei Fasern mit großer NA ist für eine gegebene Krümmung der Einfluß der Winkeländerung nicht so bedeutend, so daß die Biegeverluste sinken. Auch bei der Kopplung von Fasern untereinander (an Steckern) ist der Verlust durch Winkelfehler bei großer NA weniger entscheidend.

Nachteilig an Fasern mit großer NA ist die größere Laufzeitdifferenz zwischen den unterschiedlichen Lichtwegen, und damit eine größere Modendispersion. Das schränkt die Bandbreite ein. Außerdem wächst der Verlust an Koppelstellen, falls zwischen den Stirnflächen ein Abstand besteht. Einige Vorteile von großer oder kleiner numerischer Apertur sind in Tabelle 2.2 zusammengefaßt.

Tabelle 2.2: Einfluß größerer NA für verschiedene Faserparameter

Fasereigenschaft	Verhalten mit steigender NA
Biegeempfindlichkeit	nimmt ab
Eingekoppelte Lichtleistung	nimmt zu
Verluste an Steckern bei Winkelfehler	nehmen ab
Verluste an Steckern bei Abstand	nehmen zu
Verluste an Steckern bei seitlichem Versatz	nehmen zu
Bandbreite	nimmt ab

Glas-Multimodefasern haben üblicherweise eine NA im Bereich um 0,20. Glasfasern mit Polymerummantelung (PCS) besitzen eine NA im Bereich 0,30 bis 0,50. Der große Brechungsindexunterschied zwischen den Materialien, die für Kern und Mantel von Polymerfasern verwendet werden, erlaubt wesentlich höhere NA-Werte. Die Mehrzahl der zuerst hergestellten SI-POF besaß eine NA von 0,50 (z.B. [Asa96], [Esk97], [LC95]). SI-POF mit einer NA um diesen Wert bezeichnet man inzwischen zumeist als Standard-NA-POF oder kurz Standard-POF. Die Bandbreite solcher Fasern liegt bei ca. 40 MHz für eine 100 m lange Strecke (angegeben als Bandbreite-Länge-Produkt 40 MHz·100 m). Das war viele Jahre für die meisten Anwendungen völlig ausreichend.

2.2.2 Die Stufenindexprofilfaser mit verringerter NA (Low-NA)

Mit dem Ziel, die Polymerfaser anstelle von Kupferkabeln für die Übertragung von ATM-Datenraten von 155 Mbit/s (ATM: Asynchronous Transfer Mode) über 50 m einzusetzen, ergab sich die Forderung nach POF mit höherer Bandbreite. Mitte der 90er Jahre entwickelten alle drei wichtigen Hersteller die sogenannte Low-NA-POF.

Bei der POF mit verringerter numerischer Apertur (Low-NA-POF) ergibt sich durch die auf ca. 0,30 verringerte NA ein auf ca. 100 MHz·100 m vergrößertes

Bandbreite-Längen-Produkt. Die erste Low-NA-POF wurde 1995 von Mitsubishi Rayon vorgestellt ([Koi98]). Abbildung 2.41 zeigt, daß der Faseraufbau der Standard-POF entspricht, mit dem Unterschied, daß die relative Brechungsindexdifferenz kleiner ist (ca. 2 %). Üblicherweise werden dabei das gleiche Kernmaterial und eine veränderte Zusammensetzung des Mantelmaterials verwendet.

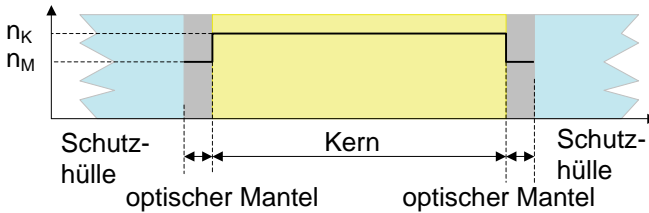


Abb. 2.41: Aufbau einer Low-NA-Stufenindexprofilfaser

Leider erwies sich in praktischen Versuchen, daß diese Faser zwar die Anforderungen des ATM-Forums ([ATM96b]) bzgl. der Bandbreite genügt, nicht aber den Anforderungen an die Biegeempfindlichkeit. Für eine max. 50 m lange POF-Strecke sollen die Verluste durch max. 10 Biegungen um 90° bei mindestens 25 mm Biegeradius höchstens 0,5 dB betragen. Um beide Forderungen gleichzeitig erfüllen zu können, war eine neue Struktur notwendig.

2.2.3 Die Doppelstufenindexprofilfaser (DSI)

Bei der Doppelstufenindexprofil-POF befinden sich auf dem Kern zwei Mäntel mit jeweils sinkendem Brechungsindex (Abb. 2.42x). Bei gerade verlegten Strecken erfolgt die Lichtführung im wesentlichen durch die Totalreflexion an der Grenzfläche zwischen Kern und innerem Mantel. Diese Indexdifferenz ergibt eine NA um 0,30, entsprechend den Werten der ursprünglichen Low-NA-POF.

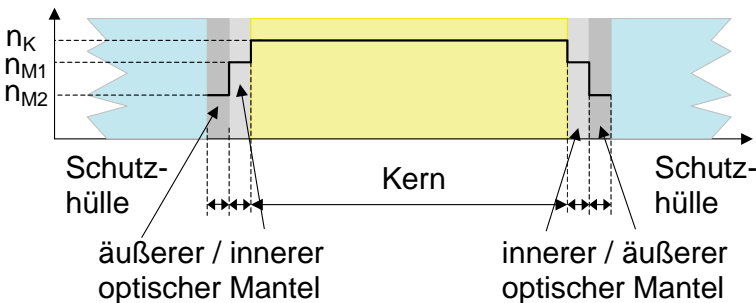


Abb. 2.42: Aufbau einer Doppelstufenindexprofilfaser

Bei Faserkrümmungen wird ein Teil des Lichtes von dieser inneren Grenzfläche nicht mehr geführt. An der zweiten Grenzfläche zwischen innerem und äußerem Mantel kann ein Teil des so ausgekoppelten Lichtes aber wieder in Richtung Kern zurückreflektiert werden. An weiteren Krümmungen kann dieses Licht wiederum so umgelenkt werden, daß es in den Akzeptanzbereich des inneren Mantels eintritt. Der innere Mantel weist eine wesentlich höhere Dämpfung als der Kern auf. Licht, welches sich über längere Strecken im inneren Mantel ausbreitet, wird so stark abgeschwächt, daß es nicht mehr zur Impulsaufweitung beiträgt. Über kürzere Strecken kann sich das Licht durch den inneren Mantel ausbreiten, ohne daß die Dispersion zu groß wird. Abbildung 2.43 zeigt den Vorgang schematisch.

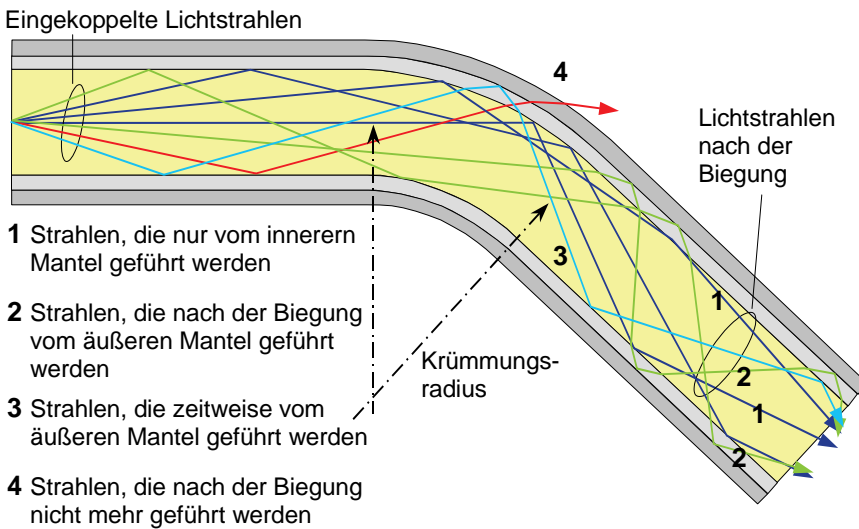


Abb. 2.43: Verhalten einer Doppelstufenindexprofilfaser bei Krümmungen

Die erste Generation der DSI-POF diente vor allem der Vergrößerung der Bandbreite für 1 mm-Fasern von 40 MHz·100 m auf 100 MHz·100 m bei einem unveränderten Minimalbiegeradius von 25 mm. Die Anwendungen dafür lagen im LAN- und Heimnetzwerkbereich.

Die Faserhersteller bieten diese Fasern unter den gleichen Typenbezeichnungen wie die ursprünglichen „echten“ Low-NA-Fasern an. In der Standardisierung hat sich durchgesetzt, die Fasern als Low-NA zu bezeichnen und als Indexprofil DSI anzugeben.

Aktuell wird ein weiteres Ziel verfolgt. Für Anwendungen in Fahrzeugnetzen ist die Bandbreite der Standard-POF ausreichend, aber der Biegeradius sollte verkleinert werden. In der Diskussion sind POF, deren Indexsprünge zum inneren und äußeren Mantel einer NA von 0,50 bzw. 0,65 entsprechen. Der Biegeradius kann damit in etwa halbiert werden.

2.2.4 Die Vielkern-Stufenindexprofilfaser (MC)

Wie oben beschrieben wurde, lassen sich die Forderungen von hoher Bandbreite und geringer Biegeempfindlichkeit mit einer 1 mm-Durchmesser-Faser nur schwer gleichzeitig erfüllen. Fasern mit kleinerem Kerndurchmesser könnten dieses Problem lösen, da bei gleichem absoluten Biegeradius das Verhältnis zum Faserradius größer wird. Allerdings widerspricht dies den Forderungen nach einfacher Handhabbarkeit und Lichteinkopplung. Eine PCS mit 200 μm Kerndurchmesser und $A_N = 0,37$ gestattet beispielsweise einen Biegeradius von 5 mm bei sehr geringen Biegeverlusten.

Als Kompromiß zu Fasern mit kleinem Kerndurchmesser wurde von Asahi eine Vielkernfaser (Multi-Core, MC-POF) entwickelt (siehe [Mun94], [Mun96] und [Koi96c]). Dabei werden viele Kerne (19 bis über 600) bei der Herstellung so miteinander zusammengelegt, daß sie zusammen einen runden Querschnitt von 1 mm Durchmesser ausfüllen.

Zunächst sind die Einzelfasern alle exakt rund und haben jeweils einen eigenen optischen Mantel. Vom Gesamtquerschnitt des Bündels kann also nur ein bestimmter Anteil auf die lichtführenden Kerne entfallen, da die Mantelbereiche und die Faserzwischenräume abzurechnen sind. Abbildung 2.44 zeigt die Parameter, die dabei den Prozentsatz der ausgefüllten Fläche kennzeichnen. Die Zahl N soll hier angeben, wie viele Fasern über einem Durchmesser nebeneinander liegen, während n die gesamte Faserzahl angibt.

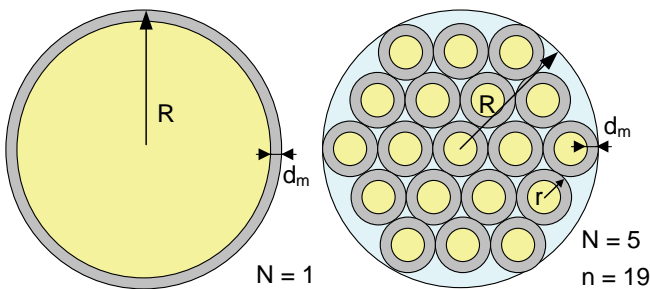


Abb. 2.44: Schematische Anordnung von Kernen in einer MC-Faser

Im Bild bezeichnet R den Radius der kompletten Faser (typisch 0,5 mm) und d_m die Dicke des optischen Mantels (z.B. 5 μm). Es soll zunächst angenommen werden, daß die einzelnen Kerne in hexagonaler Form angeordnet sind, wobei sich $N = 2z + 1$ Kerne nebeneinander befinden.

In der nächsten Abb. 2.45 wird gezeigt, wie sich die Anordnung der Fasern für $z = 1$ bis 5 ändert. Während sich zunächst die Zahl der Fasern, die überhaupt innerhalb eines Kreises angeordnet werden können, durch diese Skizzen eindeutig beschreiben läßt, gibt es für immer kleiner werdende Einzelkerne kompliziertere Möglichkeiten. Die Anordnung unten links weicht entsprechend davon ab. Für die ersten fünf Anordnungen gilt für die Zahl der Einzelfasern:

$$n = 3z^2 + 3z + 1.$$

Der Einzelkernradius r ist entsprechend:

$$r = R/N = R/(2z + 1).$$

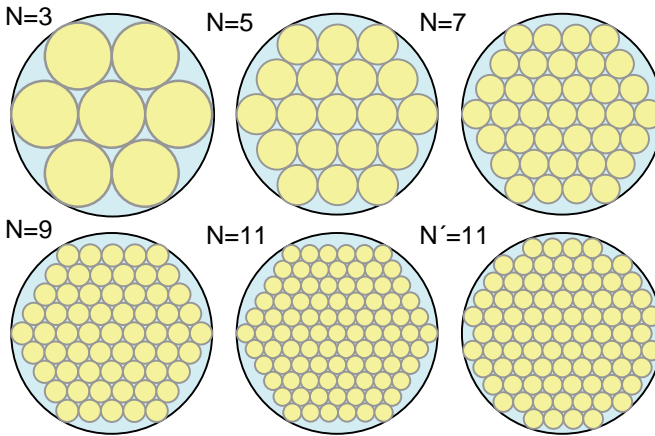


Abb. 2.45: Mögliche kreisförmige Anordnung von Einzelfasern

In Tabelle 2.3 wird der Grad der Ausnutzung der Kreisfläche in den gezeigten Fällen berechnet. Aus z wird zunächst die Zahl der Einzelkerne ermittelt. Der Radius r ergibt sich aus dem Gesamtradius der Faser (hier immer $500 \mu\text{m}$). Der Parameter t_a gibt an, wieviel Prozent der gesamten Kreisfläche von den Einzelkreisen ausgenutzt werden (bei hexagonaler Anordnung unendlich vieler Kreise können max. 90,69 % der Fläche belegt werden). Für die Berechnung des Parameters t_b wird berücksichtigt, daß noch ein Teil des Querschnitts für die optischen Mäntel verloren geht (hier einheitlich $5 \mu\text{m}$ dick).

Tabelle 2.3: Querschnittsanteil von MC-Fasern

z :	N :	n :	r :	t_a :	t_b :
0	1	1	$500 \mu\text{m}$	100,00 %	98,01 %
1	3	7	$167 \mu\text{m}$	77,78 %	73,18 %
2	5	19	$100 \mu\text{m}$	76,00 %	68,59 %
3	7	37	$71,4 \mu\text{m}$	75,51 %	65,31 %
4	9	61	$55,6 \mu\text{m}$	75,31 %	62,36 %
5	11	91	$45,5 \mu\text{m}$	75,21 %	59,57 %
	11'	85	$49,3 \mu\text{m}$	82,47 %	66,57 %
6	13	127	$38,5 \mu\text{m}$	75,15 %	56,88 %
7	15	169	$33,3 \mu\text{m}$	75,11 %	54,27 %
8	17	217	$29,4 \mu\text{m}$	75,09 %	51,73 %
14	29	631	$17,2 \mu\text{m}$	75,03 %	37,82 %
∞	-	-	-	90,69 %	-

In Abb. 2.46 wird der Kernflächenanteil t_b in Abhängigkeit der Kern-Anzahl für vier unterschiedliche Dicken des optischen Mantels gezeigt.

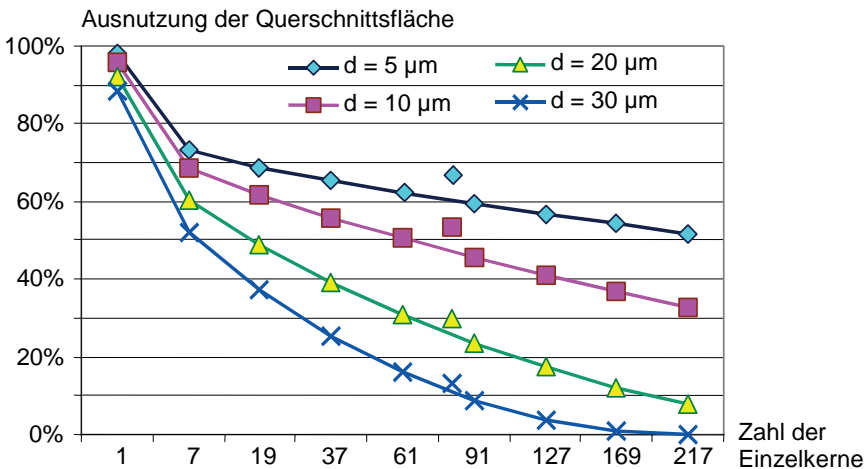


Abb. 2.46: Ausnutzung der Querschnittsfläche bei verschiedenen Manteldicken

Wie zu erwarten, sinkt der Anteil der insgesamt genutzten Fläche mit steigender Kernzahl, da der Anteil der Mantelbereiche immer größer wird. Eine gewisse Mindestdicke des Mantels ist erforderlich, damit er seine Funktion erfüllen kann und technologisch noch beherrschbar bleibt. Die 4 einzelnen Datenpunkte zeigen den Fall der optimierten Faseranordnung mit 85 Einzelkernen nach Abb. 2.45.

Die angestellten Überlegungen zeigen, daß eine Mindestdicke des optischen Mantels zwischen 5 μm und 10 μm vorausgesetzt, eine maximale Zahl von einigen 100 Einzelkernen verwendet werden sollte, wobei der Anteil der nutzbaren Kernfläche kaum 70 % übersteigen wird. Es ist leicht einzusehen, daß ein kleinerer Anteil nutzbarer Kernfläche die Verluste bei der Ankopplung von Sendern und der Kopplung der Fasern untereinander vergrößern wird.

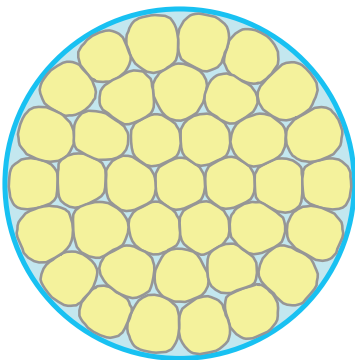


Abb. 2.47: 37-Kern-POF mit verformten Einzelkernen (schematisch)

In der Praxis zeigt sich, daß eine bessere Flächenausnutzung erreichbar ist. Die Fasern werden noch im Herstellungsprozeß bei höheren Temperaturen zusammengefaßt, wobei sie verformt werden und so die Lücken zwischen den Fasern verkleinert werden. Die dabei auftretenden Abweichungen von der ideal runden Form spielen offenbar für die Lichtausbreitung keine entscheidende Rolle (die Ursachen dafür sind noch nicht völlig klar, Hinweise können aus dem Kapitel über Lichtausbreitung in POF entnommen werden). Abbildung 2.47 zeigt schematisch den Querschnitt einer Faser mit 37 Kernen, wie z.B. in [Tesh98] erkennbar. Daten von verfügbaren MC-POF und -GOF werden später zusammengestellt.

In Abb. 2.48 wird der Brechungsindexverlauf einer MC-POF als Schnitt über den Durchmesser der Faser dargestellt. Die Indexsprünge entsprechen dem der Standard-NA-POF.

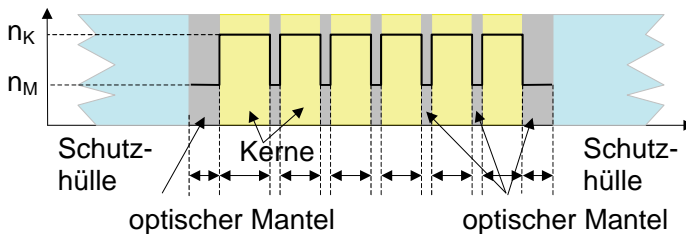


Abb. 2.48: Aufbau einer Vielkern-Stufenindexprofilfaser

Da die Bandbreite der SI-Fasern nur von der NA abhängig ist, sollten vergleichbare Werte zur Standard-POF meßbar sein. Daß die tatsächlich ermittelten Werte deutlich höher liegen, wurde in Abschnitt 2.1.5.2 bei der Betrachtung modenselektiver Dämpfungsmechanismen verständlich.

Auch Glasfasern werden für viele verschiedene Bereiche als Faserbündel hergestellt. In der Beleuchtungstechnik sind Glasfaserbündel mit großer NA weit verbreitet (bekannt ist die Beleuchtung des Scheinwerferaußenrings bei BMW über ein solches Faserbündel). Auch für Datenkommunikation sind inzwischen derartige Fasern verfügbar ([Lub04b]).

2.2.5 Die Doppelstufenindexprofil-Vielkernfaser (DSI-MC)

Auch bei der MC-POF wurde eine Vergrößerung der Bandbreite durch Verringerung des Indexunterschiedes erzielt. Dank des kleineren Kerndurchmessers konnte dennoch eine Erhöhung der Biegeempfindlichkeit vermieden werden.

Noch bessere Werte wurden mit Einzelkernen erzielt, die einen zweistufigen optischen Mantel aufweisen, wie in Abb. 2.49 dargestellt. Das Prinzip entspricht dem der Doppelstufenindexprofil-POF mit Einzelkernen. Dabei wird bei der Herstellung ein Bündel mit einfachem Mantel mit einem zweiten Mantelmaterial komplett umgeben („sea/islands“-Struktur).

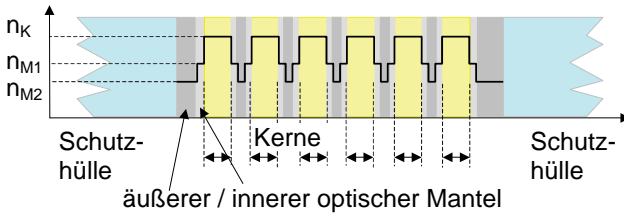


Abb. 2.49: Aufbau einer Vielkern-POF mit Doppelstufenindexprofil

2.2.6 Die Gradientenindexprofilfaser (GI)

Eine noch weitere Vergrößerung der Bandbreite ist mit der Verwendung von Gradientenindexprofilen (GI) möglich. Dabei wird der Brechungsindex von der Faserachse beginnend kontinuierlich (als Gradient) bis zum Mantel verringert. Besonders interessant sind dabei Profile, die einem Potenzgesetz folgen.

$$\text{Brechungsindex} \quad n = n_{\text{Faserachse}} \cdot \left[1 - \Delta \cdot \left(\frac{\text{Abstand zur Faserachse}}{\text{Kernradius}} \right)^g \right]$$

Der Parameter g (oft auch α) wird als Profilexponent bezeichnet. Bei $g = 2$ spricht man von einem parabolischen Profil. Der Grenzfall der Stufenindexprofilfaser entspricht $g = \infty$. Der Parameter Δ gibt die relative Brechungsindexdifferenz zwischen dem maximalen Kern- und dem Mantelbrechungsindex an. Abbildung 2.50 zeigt einen parabolischen Indexverlauf.

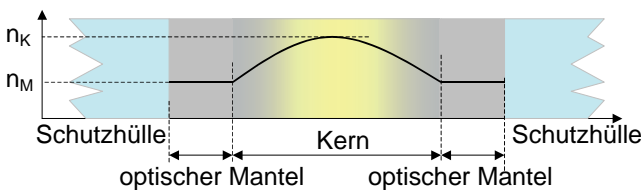


Abb. 2.50: Aufbau einer Gradientenindexprofilfaser

Bedingt durch den sich stetig ändernden Brechungsindex breiten sich Lichtstrahlen in einer GI-Faser nicht geradlinig aus, sondern werden ständig zur Faserachse hin gebrochen. Lichtstrahlen, die im Zentrum der Faser eingekoppelt werden, und einen bestimmten Winkel nicht überschreiten, werden vollständig am Verlassen des Kernbereiches gehindert, ohne daß Reflexionen an der Grenzfläche auftreten. Dieses Verhalten ist in Abb. 2.51 schematisch dargestellt. Der geometrische Weg der achsenparallelen Strahlen ist immer noch deutlich kleiner, als der Weg der Strahlen, die mit einem größeren Winkel eingekoppelt wurden. Allerdings ist in den kernfernen Regionen der Index, wie gezeigt, kleiner. Das bedeutet eine größere Ausbreitungsgeschwindigkeit. Bei idealer Wahl der Parameter können sich durch die unterschiedlichen Weglängen und die verschiedenen Ausbrei-

tungsgeschwindigkeiten die Laufzeitdifferenzen praktisch komplett aufheben, so daß die Modendispersion verschwindet. In der Realität ist dies nur annähernd möglich, allerdings können die Bandbreiten um zwei bis drei Größenordnungen gegenüber der SI-Faser gesteigert werden.

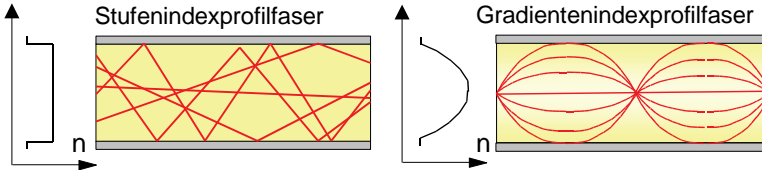


Abb. 2.51: Vergleich Stufen- und Gradientenindexprofil (siehe auch Abschn. 2.1.1)

Berücksichtigt man neben der reinen Modenausbreitung auch die chromatische Dispersion, also die Abhängigkeit der Brechzahl von der Wellenlänge und die spektrale Breite der Quelle, ergibt sich ein optimaler Indexkoeffizient g , der von 2 abweicht. Umfangreiche Untersuchungen dazu wurden von der Gruppe um Prof. Koike durchgeführt ([Koi96a], [Koi96b], [Ish00], [Koi97a], [Koi96c], [Koi98] und [Ish98]). In [Ish00a] und [Koi00] wird die Bedeutung dieses Effektes besonders hervorgehoben (siehe auch Kapitel 2.9). Aufgrund der kleineren chromatischen Dispersion von fluoriertem Polymer im Vergleich zu Quarzglas ist die theoretisch erreichbare Bandbreite der GI-POF deutlich über der von Multimode-GI-Glasfasern. Vor allem läßt sich diese Bandbreite über einen wesentlich größeren Wellenlängenbereich realisieren. Das macht die PF-GI-POF interessant für Wellenlängenmultiplexsysteme. Dabei muß aber das Indexprofil sehr genau eingehalten werden, wofür derzeit noch keine technische Lösung existiert.

Ein weiterer Faktor für die Bandbreite der GI-POF ist die im Vergleich zu Glasfasern große modenabhängige Dämpfung ([Yab00a]). Dabei werden Moden mit großem Ausbreitungswinkel unterdrückt, resultierend in einer größeren Bandbreite. Als Beispiel wird in [Yab00a] simuliert, daß bei Berücksichtigung der Dämpfung höherer Moden die Bandbreite einer 200 m langen PMMA-GI-POF von 1 GHz auf über 4 GHz anwächst. Dies bestätigt sich auch in praktischen Experimenten. Die Modenkopplung ist für GI-Fasern weniger bedeutend als für SI-Fasern, da die Reflexionen an der Kern-Mantel-Grenzfläche entfallen.

2.2.7 Die Vielstufenindexprofilfaser (MSI)

Nach den vielfältigen technologischen Problemen, die sich bei der Herstellung von Gradientenindexprofilfasern mit optimalem und über die Lebensdauer stabilem Indexprofil ergeben haben, wurde eine Annäherung an die gewünschten Eigenschaften durch die Vielstufenindexprofilfaser (MSI-POF) versucht. Dabei besteht der Kern aus vielen Schichten (z.B. 4 bis 7), die sich stufenförmig an einen parabolischen Verlauf annähern. Ein "Verschmieren" der einzelnen Stufen während der Herstellung kann dabei sogar erwünscht sein. Abbildung 2.52 zeigt schematisch den Aufbau.

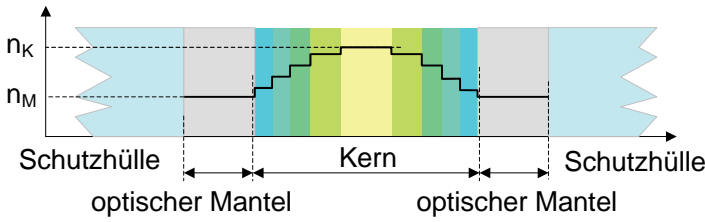


Abb. 2.52: Aufbau einer Vielstufenindexprofilfaser

Die Lichtstrahlen breiten sich hier nicht wie in der GI-POF auf kontinuierlich gebogenen, sondern auf mehrfach gebrochenen Bahnen aus, wie Abb. 2.53 demonstriert. Der Unterschied zum idealen GI-Profil ist aber bei ausreichender Zahl von Stufen relativ klein, so daß dennoch große Bandbreiten erreicht werden können. MSI-POF wurden 1999 von einem russischen Institut (Tver bei Moskau, [Lev99]) und von Mitsubishi (ESKA-MIU, siehe [Shi99]) vorgestellt. Inzwischen stellen weitere Firmen solche Fasern her, oft werden diese auch als GI-Fasern bezeichnet, und auch in den Standards werden GI- und MSI-Fasern in die gleiche Klasse eingeordnet (z.B. A4e).

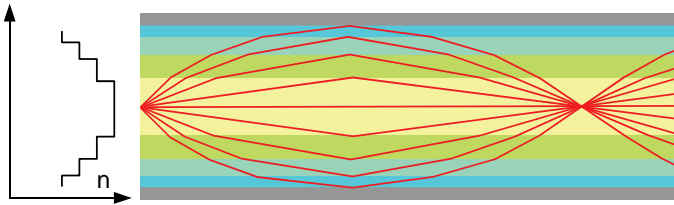


Abb. 2.53: Lichtausbreitung in der MSI-POF

2.2.8 Die Semi-Gradientenindexprofil-Faser (Semi-GI)

Eine relativ neue Variante von Indexprofilen sind Fasern, die über den Kernquerschnitt einen Gradienten mit geringer Indexvariation haben, dann aber einen optischen Mantel mit großem Indexsprung besitzen, wie Abb. 2.54 zeigt ([Sum00], [Sum03], [Ziem05f] und [Ziem06i]).

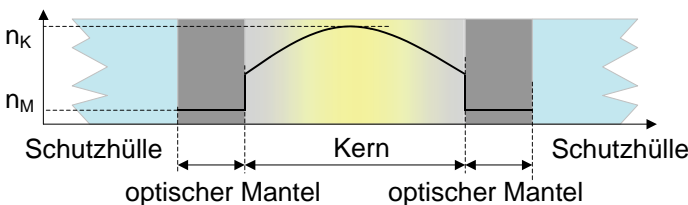


Abb. 2.54: Aufbau einer Semi-Gradientenindexprofilfaser

Auf den ersten Blick hat diese Faservariante enorme Vorteile. Licht, welches sich innerhalb des Gradienten ausbreitet, unterliegt nur einer sehr kleinen Modendispersion. Hat ein Lichtstrahl, z.B. nach einer Biegung dann aber größere Ausbreitungswinkel, wird er weiter durch Totalreflexion an der Kern-Mantel-Grenzfläche geführt. Allerdings haben diese Strahlen dann auch eine sehr große Modendispersion. Abbildung 2.55 zeigt, wie sich Licht theoretisch ausbreitet, und welche Konsequenz dies für die Impulsantwort hat.

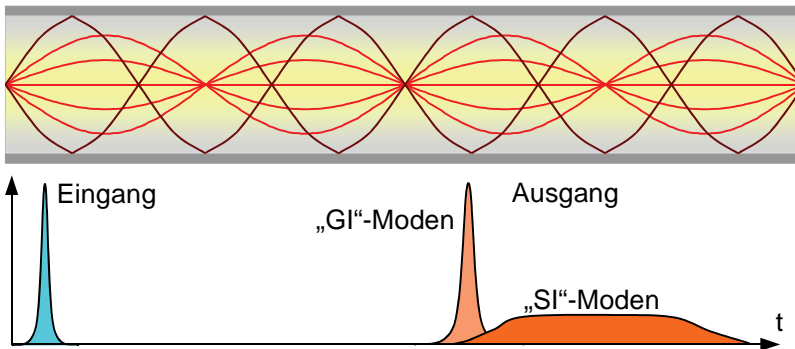


Abb. 2.55: Theoretische Lichtausbreitung in Semi-Gradientenindexprofilfasern

Im Bild sind im Prinzip zwei unterschiedliche Modengruppen zu sehen. Die als GI-Moden bezeichneten Wege berühren den Mantel nicht und weisen nur sehr geringe Laufzeitdifferenzen auf. Die mit SI-Moden bezeichneten Anteile werden an der Kern-Mantel-Grenzfläche total reflektiert. Auch diese Lichtwege sind im Kern gebogen, allerdings kann nun der sehr viel längere Lichtweg nicht mehr durch die geringere Brechzahl in den Außenbereichen kompensiert werden. Bei sehr hohen Datenraten ist aber die zweite Modengruppe so breit gezogen, daß sie sich im Augendiagramm nur als eine Art DC-Offset präsentiert. Mit einem PRBS-Signal wurde am POF-AC eine Datenrate von 1 Gbit/s über 500 m einer Semi-GI-PCS-Faser übertragen ([Vin05a]). Mit einem kleinflächigen APD-Empfänger konnten auch schon Datenraten bis 3 Gbit/s erreicht werden ([Kos95]). Um dem komplexen Verhalten der Semi-GI-POF gerecht zu werden, sollten entsprechende Modulationsformate gewählt werden.

2.2.9 Indexprofile im Überblick

Die Abb. 2.56 bis 2.58 zeigen noch einmal alle beschriebenen Indexprofile im Überblick. Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten der Polymerchemie sind sicherlich weitere Entwicklungen zu erwarten. Denkbar sind z.B. Vielkern-Gradientenfasern, Fasern mit speziellen Mänteln zur Reduktion der Verluste an der Kern-Mantel-Grenzfläche oder zur Vergrößerung der Bandbreite oder auch Vielkernfasern mit unterschiedlichen Einzelkernen. In den Abbildungen werden jeweils für POF-Varianten typische Parameter genannt).

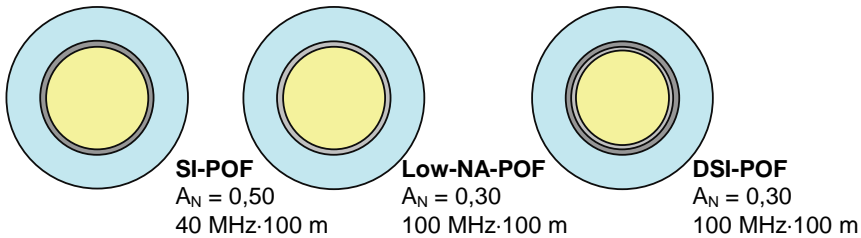


Abb. 2.56: POF mit Einzelkern und Stufenindexprofil

Einzelkernpolymerfasern (SI und DSI) mit Durchmessern zwischen $250\ \mu\text{m}$ und $3\ \text{mm}$ sind von verschiedenen Herstellern preiswert und in konstanter Qualität verfügbar. Sie stellen den überwiegenden Anteil der praktisch verwendeten Polymerfasern.

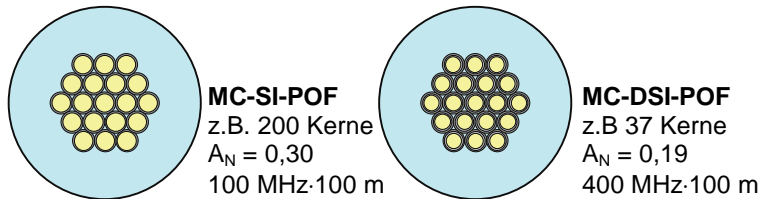


Abb. 2.57: POF mit Vielfachkern und Stufenindexprofil

Das Einsatzgebiet von Vielkernfasern reicht dabei von Übertragungssystemen mit hohen Datenraten bis hin zu optischen Bildleitern. Die Preise sind wegen der geringen hergestellten Mengen noch deutlich über den Erwartungen. Hier sind in Zukunft weitere Entwicklungen absehbar.

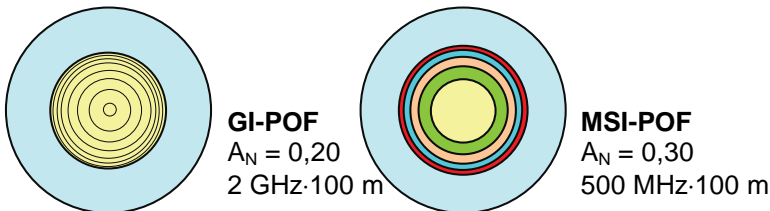


Abb. 2.58: Polymerfasern mit Gradienten- bzw. Mehrfachstufenindexprofil

Sowohl Gradientenindex- als auch Mehrstufenindexprofil-POF sind heute kommerziell verfügbar. Laborexperimente und eine Reihe praktischer Installationen in Japan und Europa (z.B. [Mös04]) zeigen das große Potential bezüglich der möglichen Bitraten. Die Markteinführung erfolgte bei Asahi Glass etwa ab 2001. Lucent Technologies (später OFS und ab 2004 unter Chromis Fiberoptics firmierend, [Whi04a], [Park05a]), hat ebenfalls die Möglichkeit angekündigt, GI-POF bei Bedarf in großen Mengen zu produzieren. In Europa werden Fasern von

Nexans in Lyon gefertigt ([Gou04]). Alle drei Fasern bestehen aus dem fluorierten Polymermaterial CYTOP[®]. Der Kerndurchmesser der Lucina[™]-Faser von Asahi Glass ist 120 μm bei einer $A_N = 0,28$. Um einen Bereich mit fluoriertem Polymer außerhalb des Kerns herum ist ein 500 μm Schutzmantel aus PMMA angeordnet. Das Duplex-Kabel hat Außenabmessungen von ca. 3 bis 5 mm. Die kleinste bisher erreichte Dämpfung ist 8 dB/km bei 1.300 nm Wellenlänge. Spezifiziert wird ein Wert von < 50 dB/km für 700 bis 1.300 nm.

Bedeutende Fortschritte gibt es auch bei der Herstellung von GI- bzw. MSI-POF auf PMMA-Basis (siehe Abschnitt 2.3.4).

2.3 Entwicklung der Polymerfasern

In den nächsten Abschnitten werden die bisher vorgestellten Polymerfasern beschrieben. Dabei wird auch speziell auf die zeitliche Reihenfolge der Entwicklungen eingegangen. Der Abschnitt 2.4 ergänzt die Betrachtungen um einige Typen von Multimode-Glasfasern, die in der ersten Auflage noch nicht betrachtet wurden.

2.3.1 Rückblick

Die ersten POF wurden bereits Ende der 60er Jahre von der Firma DuPont hergestellt. Aufgrund der unvollkommenen Reinigung der Ausgangsmaterialien lag die Dämpfung noch im Bereich von 1.000 dB/km. In den 70er Jahren konnten die Verluste nahe an die theoretischen Grenzen von ca. 125 dB/km bei 650 nm Wellenlänge reduziert werden. Zu diesem Zeitpunkt waren bereits Glasfasern mit Verlusten deutlich unter 1 dB/km bei 1.300 nm bzw. 1.550 nm in großen Mengen und zu niedrigen Preisen verfügbar. Hochbitratige digitale Übertragungssysteme wurden zu diesem Zeitpunkt fast ausschließlich im Telekommunikationsbereich für die Fernstreckenübertragung eingesetzt. Im Bereich lokaler Rechnernetze dominierten Kupferkabel (verdrihte Doppeladern oder Koaxialkabel), die für die typischen Datenraten von bis zu 10 Mbit/s völlig ausreichend waren. Ein Bedarf an einem optischen Medium für hohe Datenraten und niedrige Entfernungen bestand kaum, so daß die Entwicklung der Polymerfaser für lange Jahre verlangsamt wurde. Bezeichnend dafür ist z.B. der Ausstieg der Höchst AG aus der Polymerfaserherstellung Mitte der 90er Jahre.

In den 90er Jahren setzte, nach der vollständigen Digitalisierung der Datenkommunikation im Fernbereich, die Entwicklung digitaler Systeme für den privaten Anwender massiv ein. In einer Vielzahl von Lebensbereichen werden wir mehr und mehr mit digitalen Endgeräten konfrontiert. Der CD-Spieler hat inzwischen die analogen Tonträger (Schallplatte und Kassette) weitgehend abgelöst. Das MP3-Format führt zu einer Revolution der Musikaufzeichnung und Verbreitung. Die DVD (Digital Versatile Disk) und große Festplatten lösen derzeit den analogen Videorecorders ab. Bereits heute sind mehr digitale Fernsehprogramme als