

<p style="text-align: center;">Technische Richtlinie der öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten in der Bundesrepublik Deutschland</p>	<p style="text-align: center;">Richtlinie Nr. 8/1.1</p>
<p style="text-align: center;">Bearbeiter dieses Heftes: Fernsehbetriebsleiter-Konferenz Herausgeber: Institut für Rundfunktechnik</p>	<p style="text-align: center;">1. Auflage</p>
	<p style="text-align: center;">65 Seiten</p>
	<p style="text-align: center;">Datum: März 2001</p>
<p style="text-align: center;">Beschreibung und Messung fernsehtechnischer Systeme (Fortführung von Pflichtenheft Nr. 8/1.1: Richtlinien für die Messung der Pflichtenheftsbedingungen an Videogeräten)</p> <p style="text-align: center;">Kapitel 3: Messtechnik für optische Übertragungssysteme</p>	

Schutzrechte - Hinweis:

Es kann nicht gewährleistet werden, dass alle in dieser Richtlinie enthaltenen Forderungen, Vorschriften, Richtlinien, Spezifikationen und Normen frei von Schutzrechten Dritter sind.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Zitierfreiheit des Urheberrechtsgesetzes ist ohne vorherige schriftliche Zustimmung des IRT nicht zulässig.

Inhaltsverzeichnis

3.1	Einleitung.....	3
3.2	Grundlagen der LWL-Übertragung.....	4
3.2.1	Elektro-optische Wandler (Sendeseite).....	5
3.2.1.1	Optische Sender mit Lumineszenzdiolen (LEDs).....	6
3.2.1.2	Optische Sender mit Laserdiolen.....	7
3.2.2	Lichtwellenleiter-Kabel und Glasfasern.....	11
3.2.2.1	Aufbau und Abmessungen von Glasfasern.....	11
3.2.2.2	Aufbau von LWL-Kabeln.....	15
3.2.3	Lichtausbreitung in Glasfasern.....	16
3.2.3.1	Leitungsmoden in den verschiedenen Glasfasern.....	16
3.2.3.2	Modenwandlung.....	18
3.2.3.3	Wellenlängen- Multiplex.....	18
3.2.3.4	Qualitätsmerkmale von Glasfasern.....	18
3.2.3.4.1	Numerische Apertur.....	19
3.2.3.4.2	Dispersion.....	19
3.2.3.4.3	Gruppenbrechzahl.....	20
3.2.3.4.4	Bandbreiten-Längenprodukt.....	20
3.2.3.4.5	Dämpfung.....	21
3.2.4	Opto-elektrische Wandler (Empfangsseite).....	22
3.3	Verbindung von LWL-Fasern.....	25
3.3.1	Allgemeines.....	25
3.3.2	Kenngößen einer LWL-Verbindungsstelle / Koppelverluste.....	26
3.3.3	Verbindungstechniken.....	28
3.3.3.1	Lösbare Verbindungen (LWL-Steckverbinder).....	28
3.3.3.2	Bedingt lösbare Verbindungen (Fingerspleiße).....	31
3.3.3.3	Nicht lösbare Verbindungen (Spleiße).....	32
3.3.4	Praktischer Umgang mit LWL-Steckverbindern und -Kabeln.....	33
3.3.5	Reinigen von LWL-Komponenten.....	34
3.4	Technische Spezifikationen.....	38
3.4.1	ITU-Empfehlungen.....	38
3.4.2	SMPTE-Spezifikationen.....	40
3.4.3	Sicherheitsfestlegungen (Augenschutz).....	40
3.5	Messungen an LWL-Systemen.....	43
3.5.1	Elektro-optische Wandler (Sendeseite).....	43
3.5.1.1	Augendiagramm.....	43
3.5.1.2	Extinction ratio.....	45
3.5.1.3	Jitter.....	46
3.5.1.4	Spektrum und Leistung des Sendesignals.....	46
3.5.1.5	Temperatur- und Einlaufverhalten.....	47
3.5.2	LWL-Kabel und Glasfasern.....	47
3.5.2.1	Messungen mit dem OTDR.....	49
3.5.3	Opto-elektrische Wandler (Empfangsseite).....	52
3.6	LWL-Systeme in der Fernsehproduktionstechnik.....	55
3.7	Messgeräte und Messhilfsmittel.....	57
3.7.1	Optoelektrische Wandler.....	57
3.7.2	Lichtquellen (Leistungssender).....	57
3.7.3	Pegel-, Dämpfungs- und Reflexionsmesser.....	57
3.7.4	Reflektometer (Optical Time Domain Reflectometer, OTDR).....	58
3.7.5	WDM/DWDM-Messgeräte.....	58
3.7.6	Sonstige Hilfsmittel.....	58
3.8	Literaturhinweise / Quellenangaben.....	61
3.9	Glossar.....	62

3. Optische Übertragungssysteme mit Lichtwellenleitern (LWL)

3.1 Einleitung

Seit Anfang der Siebzigerjahre werden Lichtwellenleiter-Systeme (LWL-Systeme) zur Informationsübertragung eingesetzt. Dies geschah zunächst in analoger, später zunehmend in digitaler Technik. Insbesondere wegen der hohen Datenraten der heutigen digitalen Fernsehsignale im Studio bieten LWL-Systeme zunehmend Vorteile gegenüber der konventionellen Kupferverkabelung. Weitere Vorteile der LWL-Technik sind :

- sehr geringe Signaldämpfung
- Potenzialtrennung
- EMV-Festigkeit der Glasfaser
- Unempfindlichkeit gegen Übersprechen
- geringes Volumen und Gewicht.

Speziell bei längeren Übertragungstrecken ergeben sich auch wirtschaftliche Vorteile.

Beim heutigen Stand der Technik sind als Nachteile der LWL-Technik gegenüber der konventionellen Kupferverkabelung zu nennen:

- teure und komplizierte Verbindungstechnik
- geringe mechanische Belastbarkeit
- erhöhte Sicherheitsanforderungen (Augenschutz).

Der zunehmende Einsatz der LWL-Technik bei den Rundfunkanstalten erfordert eine messtechnische Erfassung und Beurteilung dieser Systeme. Da die Glasfasertechnik sich wesentlich von der bisher verwendeten Übertragungstechnik unterscheidet, werden im folgenden zunächst die Grundlagen der LWL-Übertragung erläutert, soweit dies für das Verständnis der System- und Messtechnik notwendig ist.

3.2 Grundlagen der LWL-Übertragung

Für den Menschen sichtbares Licht ist elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 400 und etwa 800 Nanometern (nm). Der für die LWL-Übertragung genutzte Wellenlängenbereich liegt bei der derzeitigen Glasfasertechnologie zwischen 800 und 1650 nm und damit im Bereich der unsichtbaren Infrarotstrahlung (Bild 2.1).

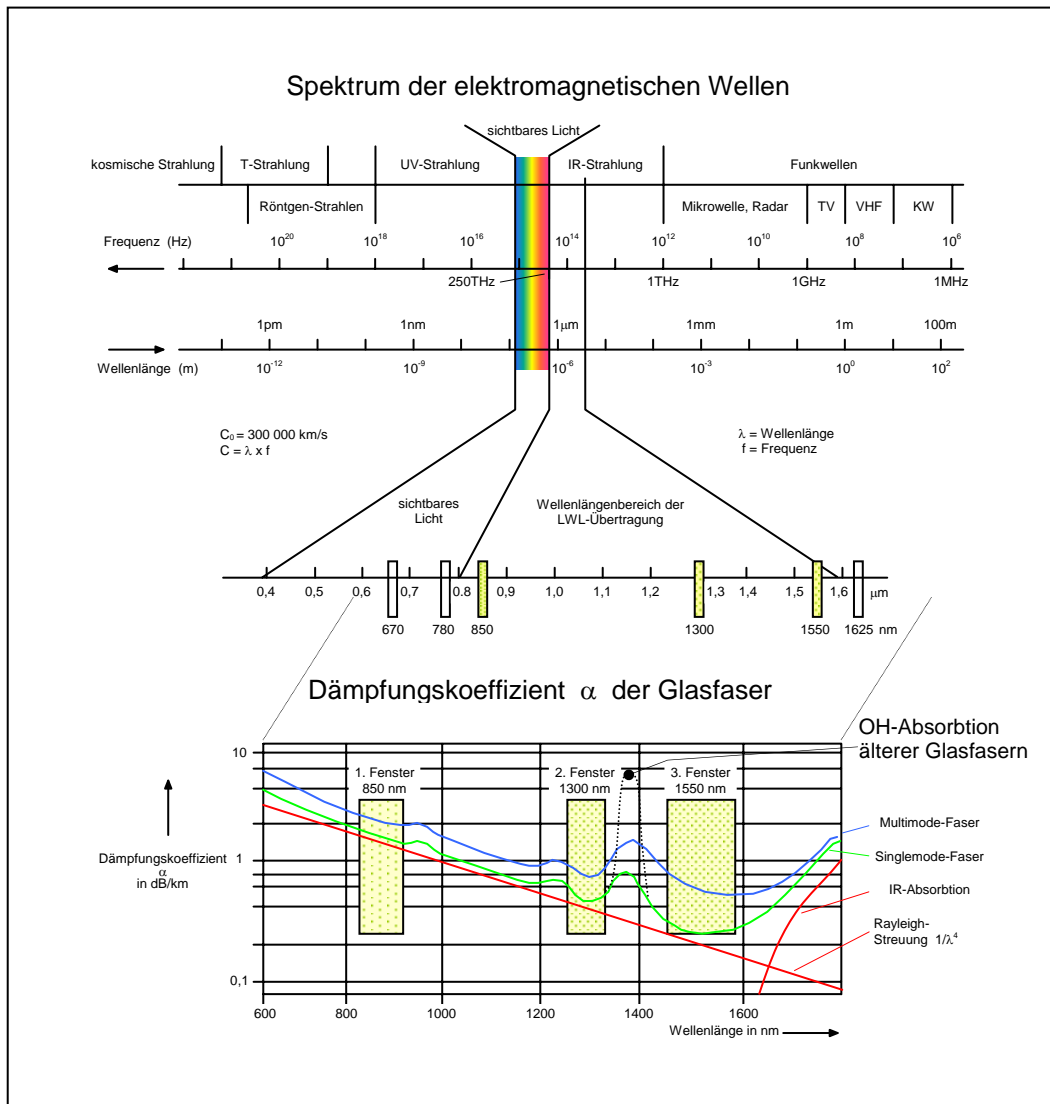


Bild 2.1: Bereich des sichtbaren Lichtes und der LWL-Übertragung im elektromagnetischen Spektrum

Wegen des wellenlängenabhängigen Dämpfungsverlaufes von Glasfasern erfolgt die LWL-Übertragung in der Praxis in sogenannten optischen Fenstern, die derzeit bei 850, 1300 und 1550 nm liegen (Bild 2.1). Weitere optische Fenster sind bei 670, 780 und 1625 nm.

Anmerkung: Durch neue Fertigungstechnologien ist es bei einigen Glasfasertypen gelungen, das Dämpfungsmaximum bei 1380 nm vollständig zu beseitigen. Damit ist bei derartigen Fasern ein Wellenlängenbereich von 1250 bis 1650 nm durchgehend nutzbar.

Insbesondere wegen der Unsichtbarkeit der Strahlung in den verwendeten Wellenlängenbereichen ist die Beachtung einschlägiger Sicherheitsbestimmungen (siehe Abschnitt 3.4.3) zwingend erforderlich.

3.2.1 Elektro-optische Wandler (Sendeseite)

Auf der Sendeseite eines optischen Übertragungssystems werden mittels eines elektro-optischen Wandlers elektrische in optische Signale umgewandelt. Als Wandler werden LEDs (Light Emitting Diodes) oder Laserdioden verwendet.

Die Bandbreite des von LEDs abgestrahlten Lichtes ist im Verhältnis zu Laserdioden sehr groß. Das nachfolgende Bild 2.2 zeigt die unterschiedlichen Spektren des gesendeten Lichtes (0 dBm entsprechen 1 mW Lichtleistung).

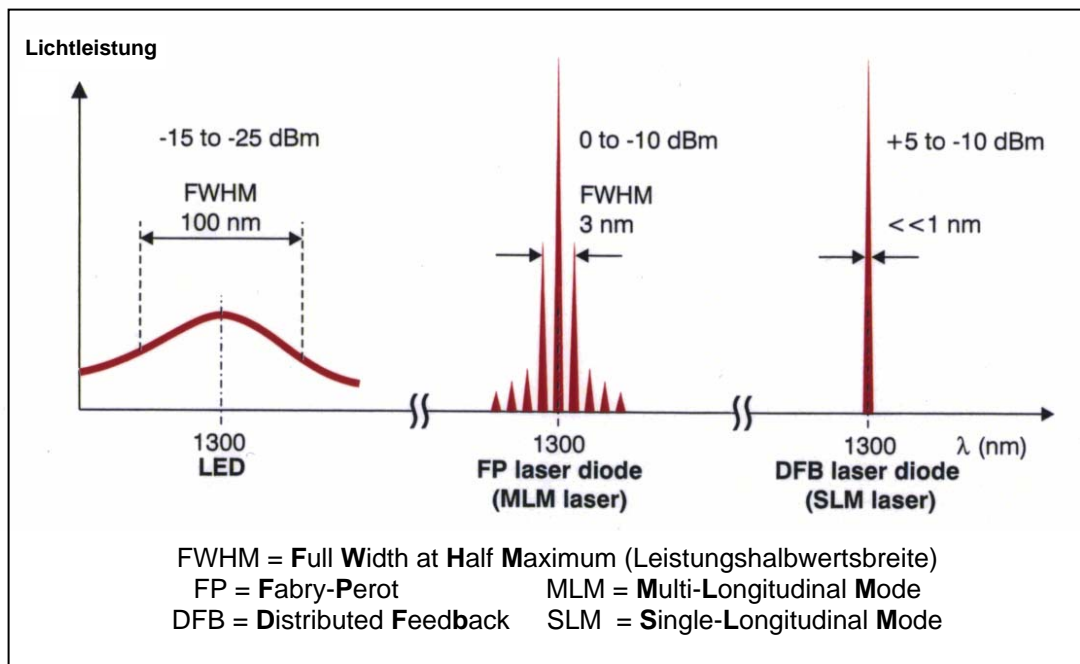


Bild 2.2: Spektrale Verteilung der Strahlung von LEDs und Laserdioden

3.2.1.1 Optische Sender mit Lumineszenzdioden (LEDs)

Für kleine bis mittlere Entfernungen werden LEDs eingesetzt. Sie sind preiswerter als Laserdioden, haben jedoch nicht deren Strahlungsleistung. Außerdem lassen sich LEDs nur mit Signalen bis ca. 200 MHz Bandbreite in der Intensität ihrer Strahlung modulieren.

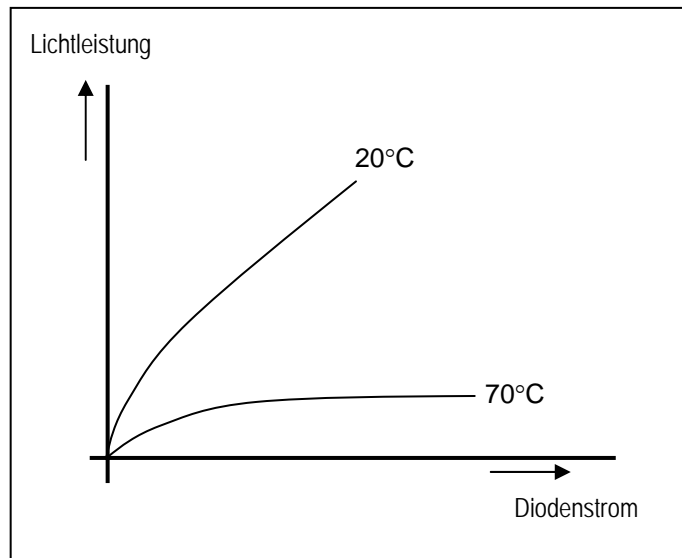


Bild 2.3: Temperaturabhängigkeit der Lumineszenzdiode

Wegen ihres nahezu linearen Zusammenhanges von Lichtstärke und Durchlassstrom (Bild 2.3) sind sie auch für analoge Signalübertragungen und für Multiplexbetrieb geeignet. Ihren Temperaturgang (Bild 2.4) kann man elektronisch kompensieren.

LEDs arbeiten im 1. oder 2. optischen Fenster bei 850 nm bzw. 1300 nm (Bild 2.1) mit einer spektralen Halbwertsbreite (FWHM) von ca. 100 nm und einer Sendeleistung bis zu einigen mW. Damit ist sie geeignet für Entfernungen von wenigen Kilometern. Die Strahlung von Lumineszenzdioden ist in der

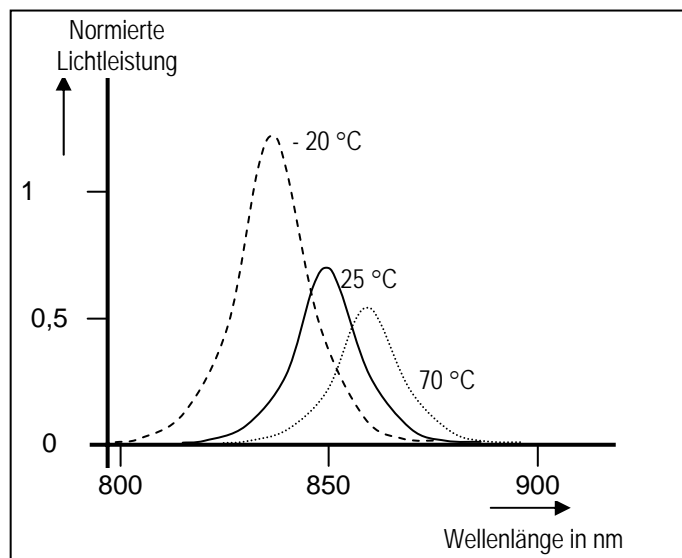


Bild 2.4: Temperaturabhängigkeit des LED-Spektrums

Regel ungerichtet (Lambertstrahler, Bild 2.5, oben). LEDs sind aber auch als sogenannte Kantenemit-

ter verfügbar (Bild 2.5, unten) und erreichen durch die keulenförmige Abstrahlung eine bessere Einkopplung der Strahlung in den Lichtwellenleiter.

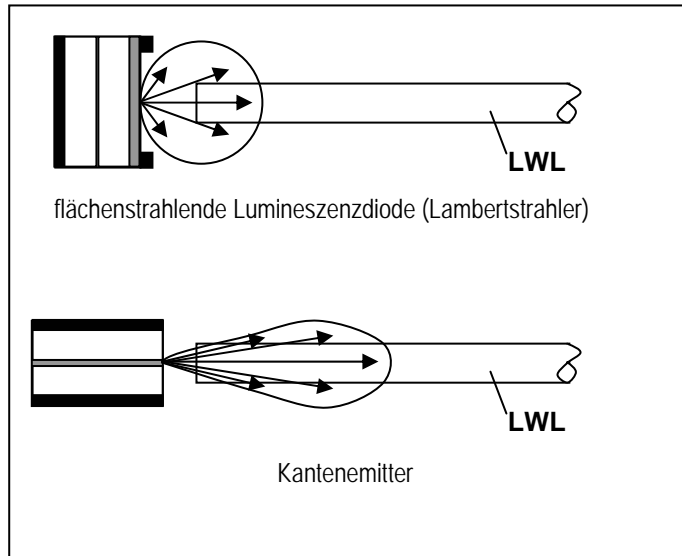


Bild 2.5: Abstrahlcharakteristik verschiedener Lichtemitter

Bild 2.6 zeigt das Blockschaltbild eines optischen Senders, der eine LED als lichtemittierendes Element verwendet.

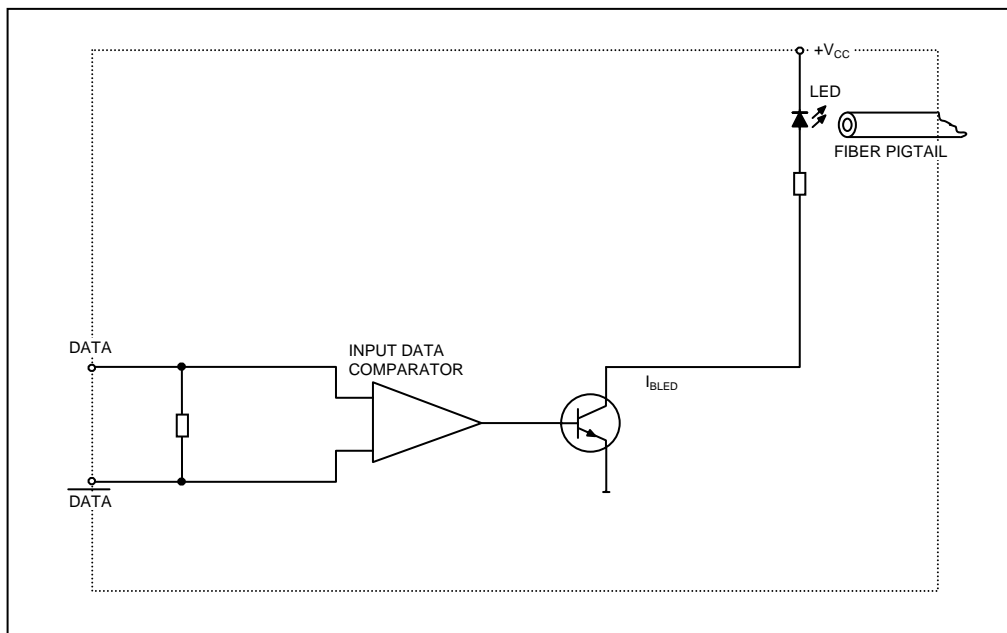


Bild 2.6: Blockschaltbild eines optischen Senders mit LED

Für digitale Videoanwendungen werden kaum noch optische Sender mit LEDs eingesetzt. Ihr Anwendungsbereich liegt bei analogen Videoverbindungen und bei LANs. Auch VGA-Verlängerungen arbeiten mit dieser Technik.

3.2.1.2 Optische Sender mit Laserdioden

Der Begriff Laser bedeutet: Light amplification by stimulated emission of radiation. Die Laserdiode sendet im Gegensatz zur LED oberhalb des sogenannten Schwellstromes kohärentes Licht aus (kohärent = wellenlängen- und phasengleich). Aus diesem Grund lässt sich die Strahlung einer Laserdiode sehr effektiv in einen LWL einkoppeln. Wegen ihrer geringen Abmessungen, der höheren Leistung und hohen Lebensdauer wird sie gegenüber der LED heute bevorzugt eingesetzt. In der optischen Weitverkehrstechnik werden ausschließlich Laser verwendet. Das Halbleitermaterial des Lasers ist in der Regel Galliumarsenid (GaAs).

Für die Glasfaserübertragung variieren die Wellenlängen von Laserdioden zwischen 650 nm (rot) bis 1550 nm (infrarot). Ihr Spektrum besteht aus einer (DFB-Laser) oder wenigen (FP-Laser) Spektrallinien (Linienbreite ca. 1 nm, Linienabstand ca. 2-3 nm, Bild 2.2). Eine Weiterentwicklung stellt die VCSEL-Laserdiode (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) dar. Ihr Vorteil ist ein annähernd runder Strahlaustritt mit weniger Divergenz.

Laserdioden können mit sehr breitbandigen Signalen moduliert werden (GHz-Bereich). Eine Gegenüberstellung der wichtigsten Kenngrößen im Vergleich zu LEDs zeigt die Tabelle 2.1.

	LED	Laserdiode
spektrale Breite	30 – 100 nm	\ll 1 nm – 10 nm
optische Leistung	bis einige mW	> 5 mW
Bandbreite	200 MHz	> 1000 MHz
Abstrahlfläche	(50 – 100 μ m)	< 5 μ m
Strahlwinkel	(40 – 90 Grad)	
Bemerkungen	kostengünstig für kurze Entfernungen	aufwendige Ansteuerung, Temperaturabhängigkeit, empfindlich gegen Rückstreuung

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung LED/Laserdiode als optischer Sender

Die Eigenschaften von Laserdioden ändern sich stark in Abhängigkeit von Temperatur und Lebensdauer. Dies muss durch geeignete Kompensationsmaßnahmen ausgeglichen werden. Im allgemeinen befindet sich die vollständige Treiber- und Kompensationselektronik zusammen mit dem Laser in einem kleinen geschlossenen Modul (z.B. DIL-Gehäuse, Bild 2.7). Der optische Anschluss kann über Steckverbinder oder „Pigtail“ erfolgen. Laser können bei z.B. 5mW Leistung und 30 Grad Umgebungstemperatur weit mehr als 10000 Betriebsstunden erreichen.

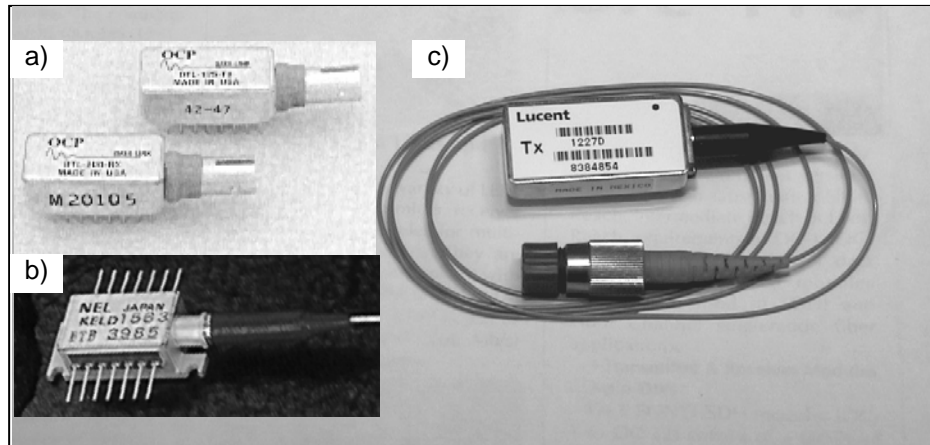


Bild 2.7: Ausführungsformen von optischen Sendern mit Laserdioden
 a: DIL-Gehäuse mit optischer Steckverbindung
 b: „Butterfly“-Gehäuse mit „Pigtail“
 c: DIL-Gehäuse mit „Pigtail“

Das im Bild 2.8 wiedergegebene Blockschaltbild verwendet eine Laserdiode als lichtemittierendes Element.

Aus dem Vergleich der Bilder 2.6 und 2.8 ist zu erkennen, dass der Schaltungsaufwand für einen Sen-

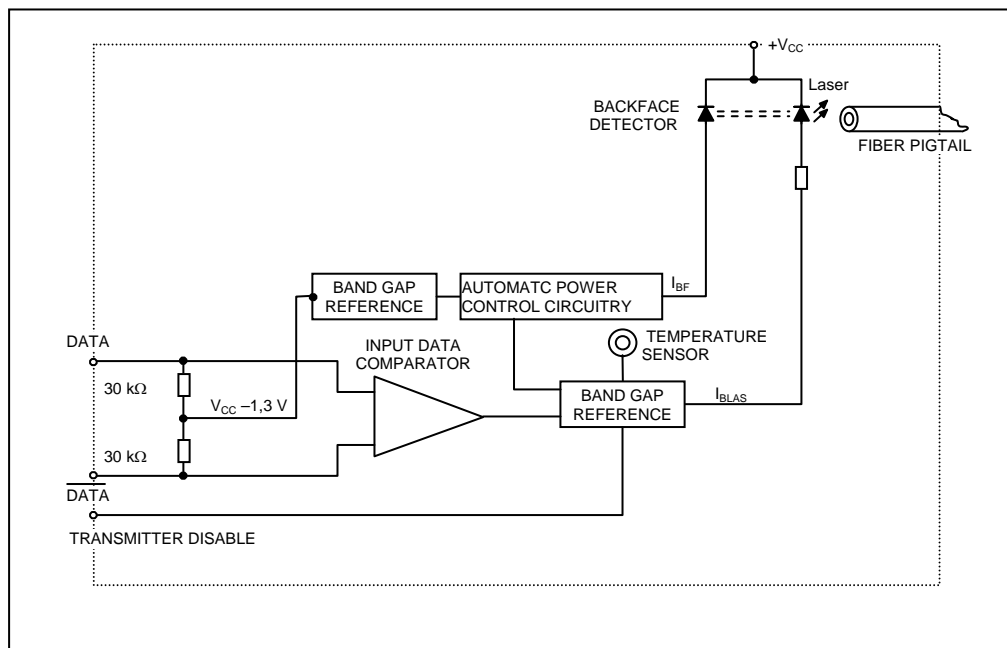


Bild 2.8: Blockschaltbild eines optischen Senders mit einer Laserdiode

der mit Laserdiode erheblich größer ist. Die Sendeleistung, die Frequenzstabilität und die spektrale Reinheit des optischen Signals einer Laserdiode sind sehr temperatur-, arbeitspunkt- und alterungsabhängig. Auch das digitale Eingangssignal beeinflusst mit seinem Verhältnis von „Einsen“ und „Nullen“ (Laserleistung hoch zu Laserleistung niedrig) über die Erwärmung der Laserdiode die Stabilität. Die notwendige Stabilität des Arbeitspunktes der Laserdiode kann nur mit erheblichen Regelaufwand unter Berücksichtigung des Eingangssignals sichergestellt werden. Als Führungsgröße der Regelschaltung wird häufig die mittlere optische Sendeleistung gewählt. Bei einer längeren Folge von logischen „Einsen“, die den Laser „hell“ schalten (z.B. beim SDI-Checkfield), wird der Laser bei ungeeigneter Regelzeitkonstante zurückgeregelt, was beim nächstfolgenden „Dunkel“-Zustand des Lasers zu seinem vollständigen Abschalten führt. Da die Laserdiode ein Resonanzgebilde darstellt, ist das anschließende Einschalten des Lasers zeitlich nicht genau definiert, was Jitter zur Folge hat und außerdem die spektrale Reinheit des abgegebenen Lichtes während dieser Einschaltphase beeinträchtigt. Außerdem kann während des Anschlagvorgangs eine „Spontanemission“ auftreten, die einen nicht vorhandenen „Ein“-Zustand des Lasers vortäuscht. Aus diesen Gründen muß die Laserdiode immer im linearen Bereich ihrer Kennlinie betrieben werden (siehe Bild 2.9).

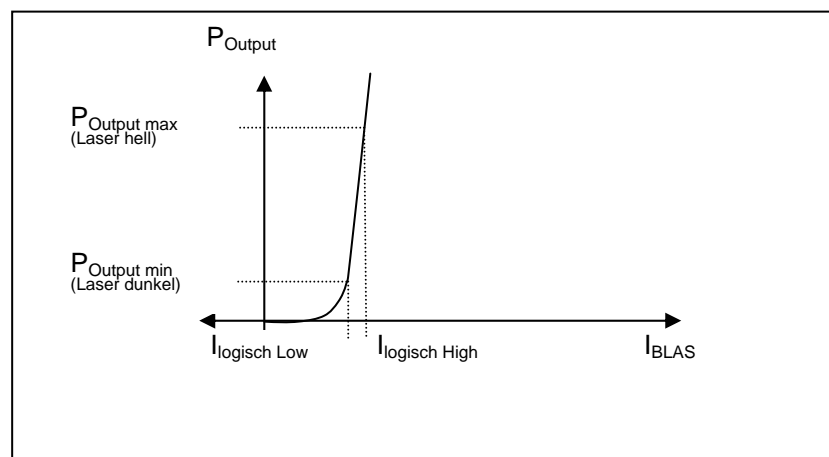


Bild 2.9: Kennlinie einer Laserdiode mit Arbeitspunkten im linearen Bereich

Um zu vermeiden, dass die Laserdiode außerhalb des linearen Bereichs ihrer Kennlinie betrieben wird, muss die Regelzeitkonstante so gewählt werden, dass auch die längste Folge von logischen „Einsen“, die den Laser „hell“ schalten, noch zu keiner wesentlichen Änderung der Regelspannung führt. Da in der Weitverkehrstechnik die Anzahl der aufeinanderfolgenden gleichbleibenden logischen „Einsen“ oder „Nullen“ durch spezielle „Scrambling“-Techniken möglichst klein gehalten wird (max. 5), werden die dafür gebauten Laser entsprechend kurze Regelzeitkonstanten aufweisen. Wegen des anderen „Scrambling“-Verfahrens kann das SDI-Signal bis zu maximal 47 aufeinanderfolgende logisch gleiche Zustände aufweisen (siehe auch Kapitel 1 Absatz 5.3 „Pathologische“ Signale), was bei ungeeigneter Regelzeitkonstante zu den oben beschriebenen Problemen führt.

Das Verhältnis von maximaler zu minimaler Ausgangsleistung des Lasers wird als „Extinction ratio“ bezeichnet:

$$\text{Extinction ratio} = \frac{P_{\text{Output max}}}{P_{\text{Output min}}}$$

Ein hohes „Extinction ratio“ ist wünschenswert, weil es eine große „Augenöffnung“ des optischen Datensignals und damit eine hohe Hysterese und Datensicherheit im optischen Empfänger zur Folge hat.

Einer Erhöhung der maximalen optischen Sendeleistung ($P_{\text{Output max}}$) werden durch die entsprechenden Schutzklassen (siehe Abschnitt 4.3) und durch thermische Belastung Grenzen gesetzt. Aus diesem Grund versuchen die Gerätehersteller, die minimale Laserleistung ($P_{\text{Output min}}$) möglichst niedrig zu halten. Dies darf jedoch nicht dazu führen, dass der lineare Kennlinienbereich (stimulierte Emission) verlassen wird.

Gemäß Empfehlung ITU-R BT.1367 (und SMPTE 259M) ist ein minimaler Wert von 5:1 bei Multimodefasern und Monomodefasern sowie ein maximaler Wert von 30:1 nur bei Monomodefasern vorgesehen.

3.2.2 Lichtwellenleiter-Kabel und Glasfasern

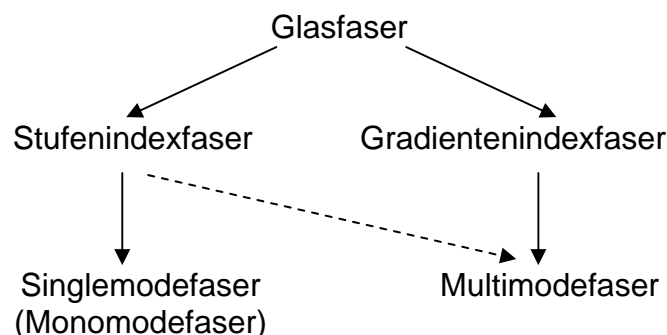
Aus der Physik ist bekannt, dass sich Licht in dünnen Glasfasern durch Totalreflexion auf nahezu beliebig gekrümmten Wegen führen lässt. Lange Zeit waren aber die Lichtverluste der verfügbaren Gläser so groß, dass man nur Strecken von wenigen Metern überbrücken konnte. Inzwischen ist es möglich, Glasfasern herzustellen, die zur optischen Nachrichtenübertragung über viele Kilometer Entfernung geeignet sind. Von diesen Fasern – zum mechanischen Schutz und zur bequemen Handhabung in Kunststoffkabel eingebettet und mit Steckern versehen – werden vor allem gute Lichtführung, geringe Lichtverluste und große Übertragungsbandbreite verlangt.

Neben Glasfasern werden auch Kunststofffasern verwendet. Diese eignen sich wegen ihrer hohen Dämpfung und geringen Bandbreite derzeit nur bedingt für den Einsatz in der Fernsehtechnik.

3.2.2.1 Aufbau und Abmessungen von Glasfasern

Bei Glasfasern unterscheidet man Stufenindexfasern und Gradientenindexfasern. Diese Bezeichnungen kennzeichnen den radialen Verlauf des Brechungsindex der Fasern. Der Brechungsindex oder die Brechzahl n kennzeichnet die Dichte eines optischen Mediums und ist definiert als das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit c_0 im Vakuum zur Lichtgeschwindigkeit c_1 in einem anderen Medium:

$$n = c_0/c_1$$



Eine als Multimodefaser ausgeführte Stufenindexfaser hat heute keine praktische Bedeutung mehr.

3.2.2.1.1 Stufenindexfaser

Um die zuvor erwähnte Totalreflexion auf einfache Weise zu realisieren, wird der Brechungsindex der Glasfaser in radialer Richtung sprunghaft geändert. Dadurch wird eine Reflexion der nach außen gerichteten Lichtstrahlen erreicht und damit das Licht im Faserkern gehalten (Bild 2.10).

Typische Werte für den Brechungsindex sind für das Kernglas $n_K = 1,48$ und für das Mantelglas $n_M = 1,46$.

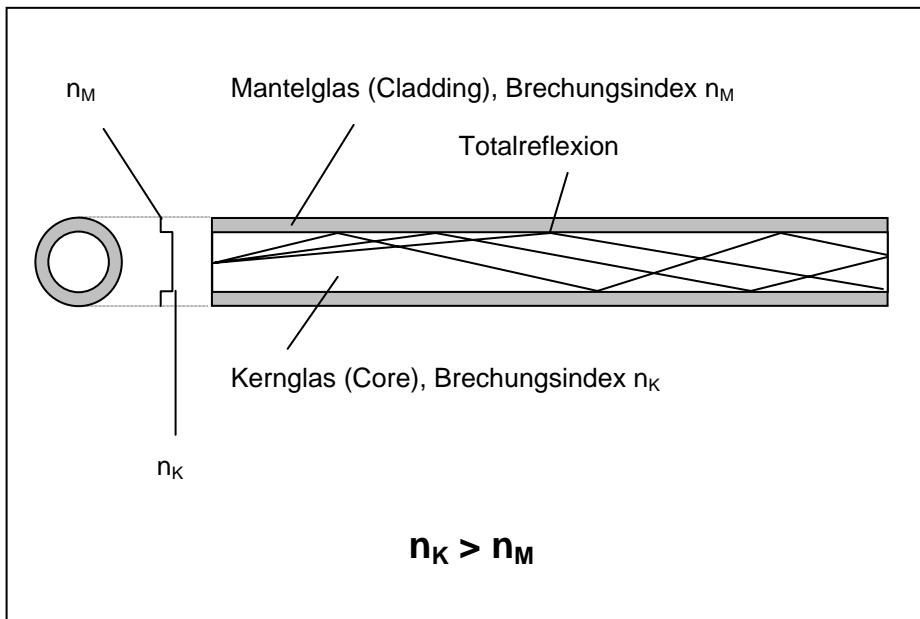


Bild 2.10: Totalreflexion in der Stufenindexfaser

Stufenindexfasern werden je nach Kerndurchmesser in Singlemode- oder Multimodefasern eingeteilt (Bild 2.11). Singlemodefasern werden auch als Monomodefasern bezeichnet. Zu der Lichtausbreitung in Single- und Multimodefasern siehe Abschnitt 2.3.

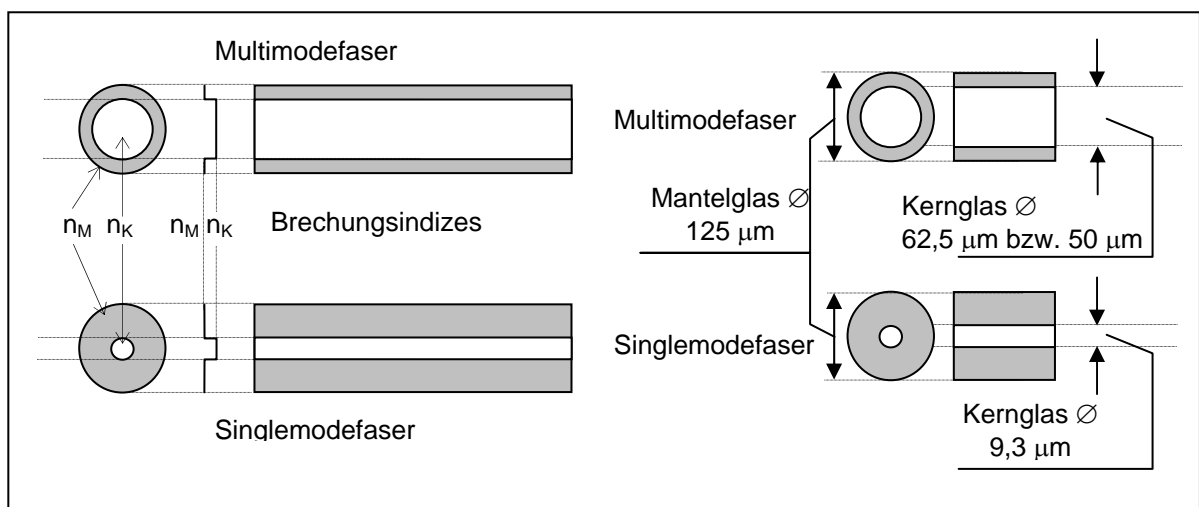


Bild 2.11 Stufenindexfaser als Multimodefaser (oben) und als Singlemodefaser (unten)

3.2.2.1.2 Gradientenindexfaser

Im Gegensatz zur Stufenindexfaser, bei welcher der Brechungsindex im Kern konstant bleibt und nur der Mantel einen anderen Brechungsindex aufweist, ändert sich der Brechungsindex in der Gradientenindexfaser kontinuierlich. Der Vorteil dieser Art des Faseraufbaues ist, dass man mit einem ent-

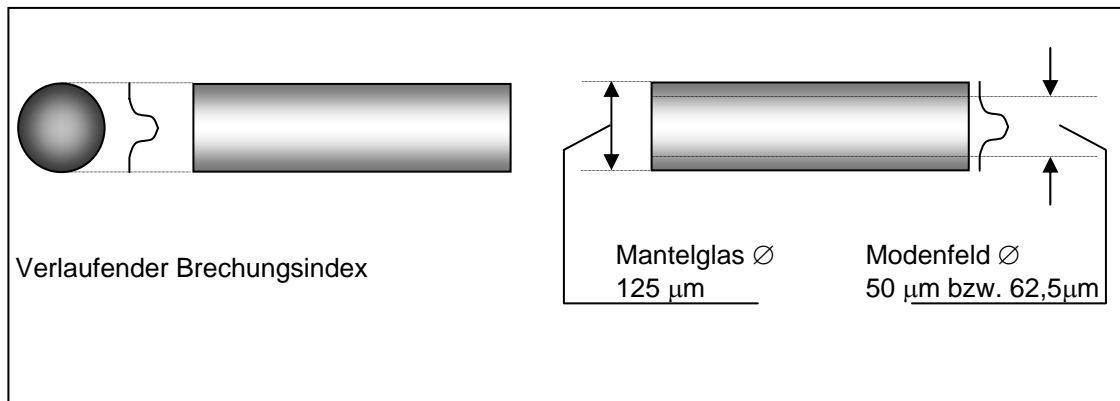


Bild 2.12 Gradientenindexfaser

sprechend gewählten radialen Verlauf des Brechungsindex erreichen kann, dass die Laufzeiten sämtlicher Leitungsmoden (siehe Abschnitt 2.3) annähernd konstant sind. Damit erhöht sich die Übertragungsbandbreite der Faser wesentlich. Sie hängt von der Länge der Faser und der Lichtwellenlänge ab und ist auf eine Wellenlänge hin optimiert (siehe Bild 2.17).

In Tabelle 2.2 sind beispielhaft die wichtigsten Parameter von Stufen- und Gradientenindexfaserkabeln dargestellt.

		Stufenindexfaser	Gradientenindexfaser	
		Typ E 9...10/125 (Monomode)	Typ G 50/125	Typ G 62,5/125
		(Multimode)		
Kerndurchmesser		9,3 ± 3 μm	50 ± 3 μm	62,5 ± 3 μm
Numerische Apertur		0,100 ± 0,015	0,200 ± 0,015	0,275 ± 0,015
Fasermanteldurchmesser		125 ± 2 μm		
Beschichtungsdurchmesser		245 ± 10 μm		
Kern-Unrundheit		< 5%		
Versatz Kern zu Fasermantel		[0,8 μm	< 3,0 μm	
Fasermantel-Unrundheit		< 1,0%	< 2,0%	
Gruppen- Brechungsindex	850 nm		1,4897	1,45014
	1300 nm	1,4675	1,4856	1,4966
	1550 nm	1,4681		
Typ. Dämpfung	850 nm		2,7 dB / km	2,8 dB / km
	1300 nm	0,38 dB / km	0,7 dB / km	0,8 dB / km
	1550 nm	0,25 dB / km		
Dispersion	1285-1330 nm	< 3,5 ps / (nm x km)		
	1550 nm	< 19 ps / (nm x km)		
Bandbreitenlängen- produkt	850 nm		< 400 MHz x km	< 200 MHz x km
	1300 nm		< 800 MHz x km	< 500 MHz x km

Tabelle 2.2: Beispiele für Spezifikationen von Stufen- und Gradientenindexfaserkabeln

3.2.2.2 Aufbau von LWL-Kabeln

Das Einzelfaser-LWL-Kabel weist den in Bild 2.13 dargestellten Aufbau auf. Wie aus diesem Bild zu ersehen ist, besteht eine einzelne Glasfaser aus dem Kernglas bzw. dem Modenfeld, dem Mantelglas und einer ersten Kunststoffschicht (Primärcoating). Die Aufgabe der Kunststoffschicht ist es, den sehr zerbrechlichen Glaskern mechanisch zu stabilisieren. Die Aufgabe des Mantelglases ist es, das zu

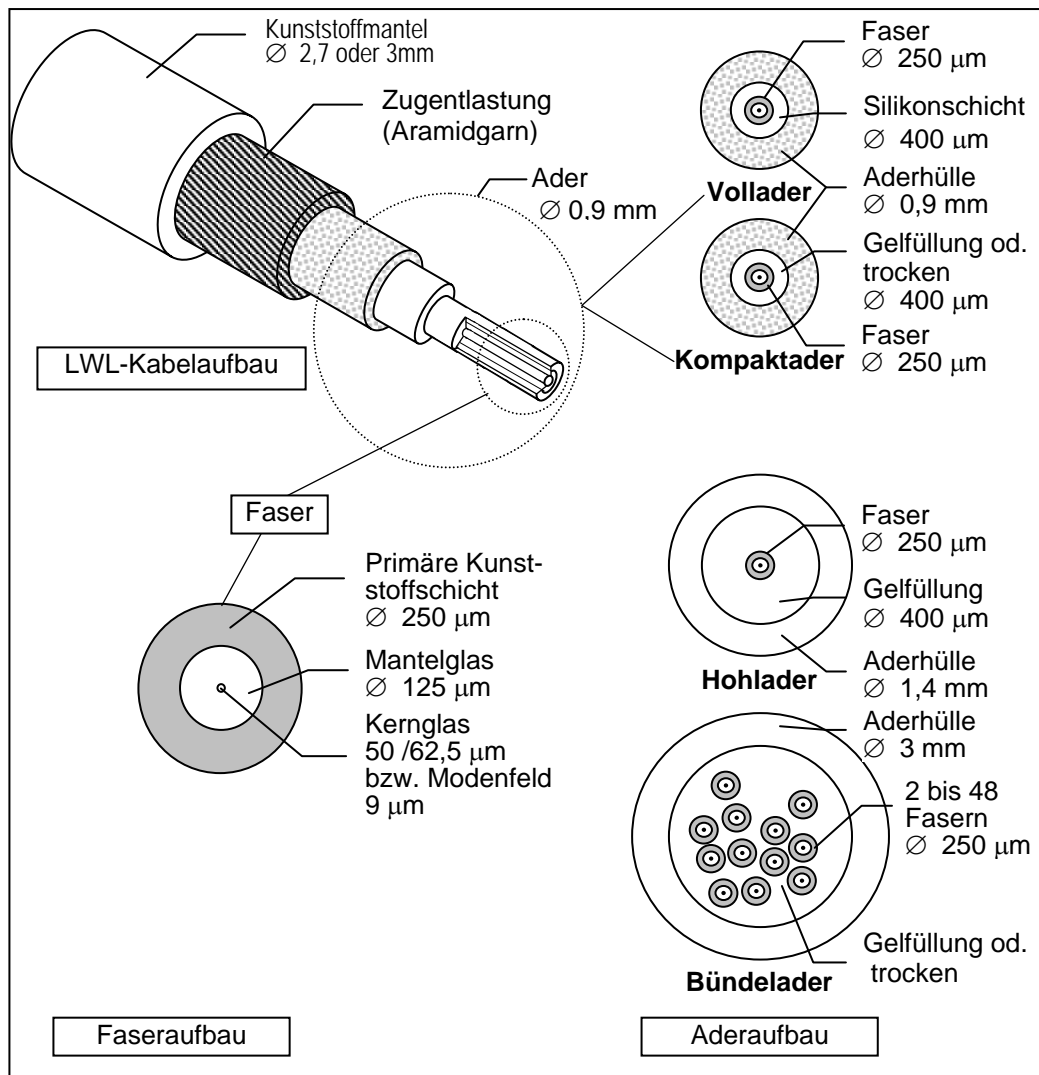


Bild 2.13: Aufbau einer Einzelfaser, Voll-, Kompakt-, Hohl- und Bündelader

übertragende Licht im Kernglas bzw. im Modenfeld zu halten (siehe 2.3). Da diese Faser trotz Kunststoffschicht immer noch relativ empfindlich gegen mechanische Belastungen ist, muß diese durch die weiteren Ummantelungen geschützt werden. Der weitere Aufbau von der Faser zur Ader ist im unteren Teil des Bildes 2.13 zu sehen. Die bedeutendste mechanische Entlastung der Faser wird durch das Aramidgarn erreicht.

Vollader und Kompaktader unterscheiden sich durch die Art der Füllung zwischen der Faser und der Aderhülle (Silikonschicht oder Gelfüllung bzw. trocken). Die Hohlader wird heute nur noch selten verwendet und unterscheidet sich nur durch die mechanische Abmessungen von der Kompaktader. Bei

einer Bündelader sind mehrere (2 bis 48) **Fasern** in einer Aderhülle geführt, die mit Gel gefüllt ist oder auch trocken sein kann.

Das nachfolgende Bild 2.14 zeigt den Kabelaufbau, wenn mehrere **Adern** zusammengefasst werden, am Beispiel einer Doppelader. Entsprechend gestaltet sich der Aufbau von bis zu 12 Adern.

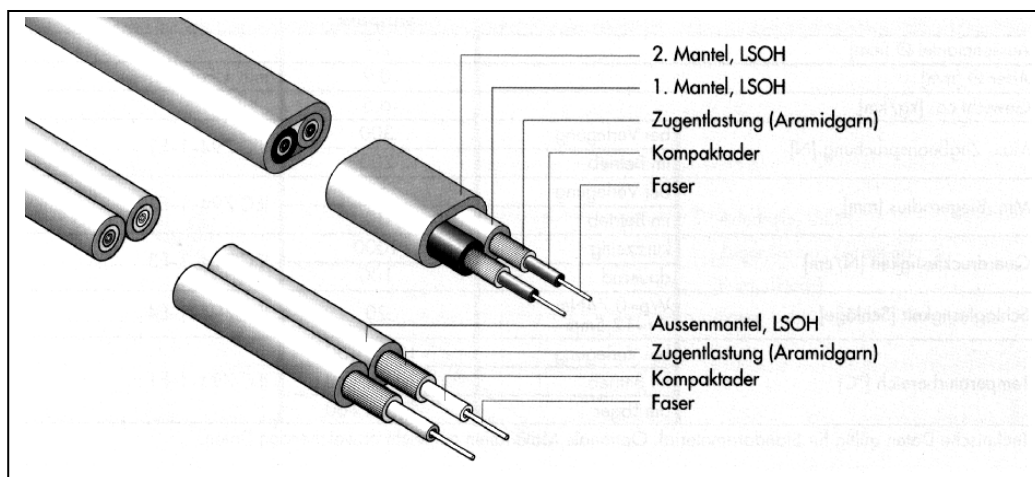


Bild 2.14: Aufbau einer Doppelader

3.2.3 Lichtausbreitung in Glasfasern

3.2.3.1 Leitungsmoden in den verschiedenen Glasfasern

Je nach Faserart und Kerndurchmesser kann sich das Licht in verschiedenen „Moden“ ausbreiten. Mit dem Begriff „Moden“ kennzeichnet man die Lichtstrahlen, die sich im Lichtwellenleiter ausbreiten können. Ihre Zahl ist beschränkt und hängt von der Wellenlänge des eingekoppelten Lichts sowie vom Kerndurchmesser und der numerischen Apertur ab (siehe Abschnitt 2.3.4). Wird Licht in eine Glasfaser eingekoppelt, breitet es sich abhängig vom Eintrittswinkel entweder geradlinig in der Mitte des Lichtwellenleiters aus oder wird an der Grenzfläche zwischen Kernglas und Mantelglas reflektiert. Sind beide Ausbreitungsarten in einer Faser gleichzeitig vorhanden, spricht man von einer **Multi-modefaser**. Ist der Faserdurchmesser so klein, dass sich keine Reflexion des Lichtes an der Grenzfläche zwischen Kernglas und Mantelglas mehr ergibt, so kann sich nur noch der direkte Lichtstrahl ausbreiten, und es wird von einer **Singlemodefaser** (Bild 2.15) gesprochen.

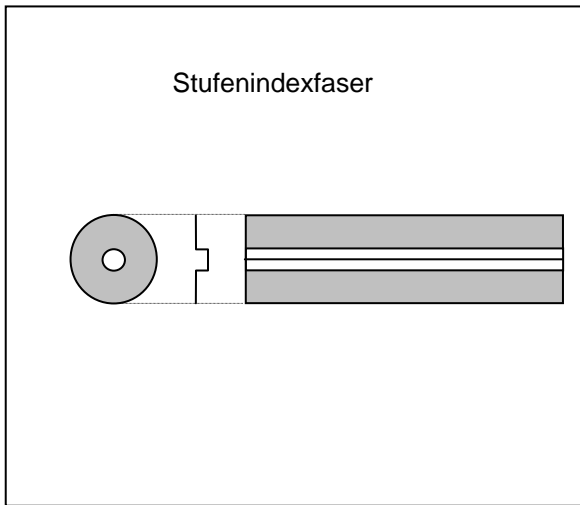


Bild 2.15: Singlemodefaser

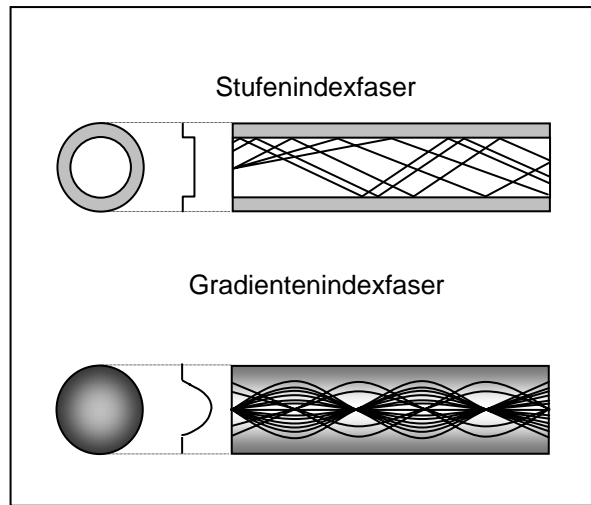


Bild 2.16: Multimodefasern

Bei Multimodefasern (Bild 2.16) unterscheidet man Stufenindexfasern und Gradientenindexfasern. In der Stufenindexfaser erfahren die unterschiedlichen Moden je nach Eintrittswinkel unterschiedliche Laufzeiten. Bei der Gradientenindexfaser ist der radiale Verlauf des Brechungsindexes so gewählt, dass die verschiedenen Moden annähernd gleiche Laufzeiten haben. Die kontinuierliche Änderung der Brechzahl hat zur Folge, dass die Lichtstrahlen im Gegensatz zur Stufenindexfaser ebenfalls kontinuierlich gebrochen werden.

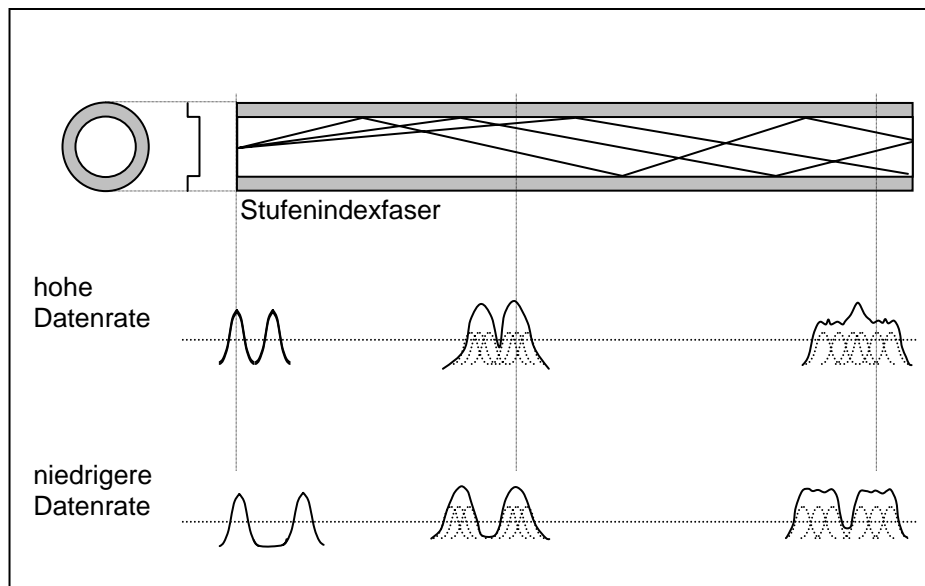


Bild 2.17: Impulsverzerrung durch unterschiedliche Modenlaufzeiten am Beispiel einer Stufenindexfaser

Unterschiedlichen Signallaufzeiten der verschiedenen Leitungsmoden haben zur Folge, dass in eine Multimodefaser eingespeiste Lichtpulse in Abhängigkeit von der Länge der Faser verzerrt werden. Das Bild 2.17 soll dieses verdeutlichen. Während bei der Stufenindexfaser die Impulsverzerrung im wesentlichen durch die unterschiedlichen Weglängen der Lichtstrahlen hervorgerufen wird, ist dies bei der Gradientenindexfaser nur auf die Abweichungen des Brechungsindexverlaufes vom theoretisch

exakten Wert zurückzuführen. Deshalb ist die sich ergebende Impulsverzerrung bei einer Gradientenindexfaser deutlich geringer ausgeprägt als bei einer Stufenindexfaser. Aus diesem Grunde werden Multimodefasern heute nur noch als Gradientenindexfasern ausgeführt.

Da in der Singlemodefaser die genannte Impulsverzerrung nicht auftritt, ist diese besonders für höhere Datenraten und größere Strecken (Weitverkehrstechnik) geeignet.

Mantelmoden sind Lichtstrahlen, die sich im Mantel ausbreiten. Sie werden durch die häufigen Übergänge Mantel-Kern stärker gedämpft als die Kernmoden und sind nach wenigen Metern nicht mehr messbar. Durch Steckverbinder oder andere Koppelstellen werden sie schlechter übertragen als die Kernmoden (höhere Dämpfung für Mantelmoden). Wird eine Primärbeschichtung mit großer Brechzahl verwendet, werden die Mantelmoden sehr schnell im Coating absorbiert.

3.2.3.2 Modenwandlung

Singlemode in Multimode

In der Praxis genügt im allgemeinen die Einspeisung des Singlemodesignals in eine Multimodefaser. (Die Wandlung eines Singlemodesignals in ein Multimodesignal erfolgt in der optischen Ebene physikalisch korrekt nur bei einer ausreichend langen Multimodefaser.) Der Wandlungsprozess ist auch durch den Übergang in die elektrische Ebene und zurück ausführbar. Diese Modenwandlung war für ältere Empfängerdiode aus Germanium notwendig, um den sehr kleinflächigen Lichtkegel der Singlemodefaser auf die gesamte Fläche der Empfängerdiode gleichmäßig zu verteilen.

Multimode in Singlemode

Da die Singlemodefaser im Durchmesser wesentlich kleiner ist als die Multimodefaser, hat eine Einkopplung des Multimodesignals in eine Singlemodefaser ohne zusätzliche Maßnahmen eine sehr hohe Dämpfung zur Folge. Um dies zu vermeiden, kann als einfachste Maßnahme eine Sammellinse in der optischen Ebene eingesetzt werden, die das Licht auf den kleineren Durchmesser der Singlemodefaser bündelt und es dabei geringfügig dämpft. Aufwendiger ist die Wandlung von der optischen Ebene in die elektrische und zurück. Da bei dieser Methode auch eine Signalregenerierung erfolgt, sollte die Wandlung eines Multimodesignals in ein Singlemodesignal vorzugsweise über die elektrische Ebene vorgenommen werden.

3.2.3.3 Wellenlängen- Multiplex

Beim Wellenlängen-Multiplex (engl. **W**avelengths **D**ivision **M**ultiplex (WDM)) werden über eine Glasfaser optische Signale unterschiedlicher Wellenlängen (z.B. 1310 nm und 1550 nm) übertragen. Auf diese Weise kann beispielsweise die Übertragungskapazität bereits vorhandener LWL um ein Vielfaches erhöht werden. Mit steigender Stabilität und spektraler Reinheit der optischen Sender konnte nämlich mit Hilfe des **D**ense **W**avelengths **D**ivision **M**ultiplex (DWDM) die Anzahl der auf einem LWL übertragbaren optischen Signale derzeit auf über 100 erhöht werden. Für solche Systeme werden in der Regel spezielle DFB-Laser verwendet.

3.2.3.4 Qualitätsmerkmale von Glasfasern

Die wichtigsten Kenngrößen einer Faser sind:

- Numerische Apertur
- Dispersion
- Gruppenbrechzahl
- Bandbreiten-Längenprodukt
- Dämpfung.

Diese Werte werden unter anderem bei den Spezifikationen eines LWL angegeben (siehe Tabelle 2.2). Die Parameter Dispersion, Gruppenbrechzahl und Bandbreiten-Längenprodukt haben im Grunde die gleichen physikalischen Ursachen und hängen somit sehr stark voneinander ab. Je nach Fasertyp und Messbarkeit werden in den Spezifikationen unterschiedliche Parameter genannt.

3.2.3.4.1 Numerische Apertur

Der Verlauf eines Lichtstrahls, der in die Stirnfläche einer Glasfaser eingespeist wird, ist abhängig vom Einstrahlwinkel gemessen zur Glasfaserachse. Der maximale Einstrahlwinkel, bei dem ein Lichtstrahl durch Totalreflexion noch in der Glasfaser geführt wird, heißt Akzeptanzwinkel und ist somit ein Maß für das Lichtaufnahmevermögen der Faser. Der Sinus des Akzeptanzwinkels wird numerische Apertur genannt.

Im Falle einer Stufenindexfaser errechnet sich die numerische Apertur A_N zu

$$A_N = \sqrt{n_K^2 - n_M^2}$$

n_K : Kernbrechzahl

n_M : Mantelbrechzahl

Typische Werte für A_N sind 0,1 bis 0,3 entsprechend einem Akzeptanzwinkel von ca. 6° bis 17°. Je größer die numerische Apertur, umso größer ist die einkoppelbare Leistung.

3.2.3.4.2 Dispersion

Dispersion ist die Streuung der Signallaufzeit in einem LWL. Ein schmaler, in den LWL eingekoppelter Lichtimpuls wird beim Durchlaufen immer breiter. Bei einer hochfrequenten Folge von schmalen Impulsen entsteht eine "Verschmierung" der Impulse (Bild 2.17), so dass sie von der Empfängerschaltung nicht mehr unterschieden werden können. Die Dispersion schränkt somit die nutzbare Übertragungsbandbreite bzw. Bitrate ein.

Die Dispersion setzt sich aus verschiedenen Anteilen zusammen:

- Modendispersion
- Materialdispersion
- Wellenleiterdispersion.

Modendispersion ist die Dispersion aufgrund der verschiedenen Laufzeiten einzelner Moden bei gleicher Wellenlänge. Bei einer Stufenindexfaser legen Strahlen parallel zur Faserachse den kürzesten Weg zurück; den längsten Weg Strahlen, die gerade noch durch Totalreflexion geführt werden.

Diesen Effekt versucht man bei der Gradientenindexfaser durch einen optimal gewählten Verlauf des Brechzahlprofils zu kompensieren, was unterschiedliche Geschwindigkeiten der Moden zur Folge hat. Auf diese Weise wird erreicht, dass die verschiedenen Moden trotz unterschiedlicher Weglängen gleiche Laufzeit haben.

Bei der Singlemodefaser kann sich nur eine Mode ausbreiten; demzufolge gibt es hier keine Modendispersion.

Materialdispersion entsteht durch die Wellenlängenabhängigkeit der Kernbrechzahl eines LWL. Somit ist die Laufzeit eines Impulses auch abhängig von Lichtspektrum des Senders. Die Materialdispersion kann durch möglichst schmalbandige Lichtquellen (Laser) minimiert werden.

Wellenleiterdispersion

Aus der Theorie der elektromagnetischen Wellen folgt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im LWL abhängig vom Verhältnis Kernradius zu Lichtwellenlänge ist. Die Auswirkung dieser Wellenleiterdispersion ist im Vergleich zur Material- und Modendispersion gering.

Die Material- und Wellenleiterdispersion werden oft zusammengefasst zur chromatischen Dispersion. Die Maßeinheit für den "Dispersionskoeffizienten" ist ps/nm·km. Die Effekte der Material- und Wellenleiterdispersion können sich in ihrer Auswirkung auch gegenseitig aufheben. Für die optische Übertragungstechnik ist es interessant, dass die chromatische Dispersion für ca. 1300 nm (zweites optisches Fenster) bei Quarzglas verschwindet. Im ersten optischen Fenster dominiert die Materialdispersion, die um den Faktor 10 größer ist als die Wellenleiterdispersion.

3.2.3.4.3 Gruppenbrechzahl

Ein Lichtimpuls in einem Lichtwellenleiter besteht in der Praxis aus einer Überlagerung von Lichtwellen verschiedener Wellenlänge (Spektrum des Sendeelementes), die durch Dispersionseffekte in ihrer Laufzeit beeinflusst werden. Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Lichtimpulses ist deshalb statt der Brechzahl n in der Praxis die - meist etwas größere - Gruppenbrechzahl (auch Gruppenbrechungsindex genannt) maßgebend.

3.2.3.4.4 Bandbreiten-Längenprodukt

Das Bandbreiten-Längenprodukt $B \times L$ stellt ebenfalls ein Maß für das Dispersionsverhalten eines Lichtwellenleiters dar. Unter der Bandbreite B wird die 3-dB-Grenzfrequenz der Modulationsfrequenz bei der Länge L verstanden. Der Kabelhersteller gibt damit an, welche Entfernung - in Abhängigkeit von der Datenrate - mit der betreffenden Faser übertragen werden kann. Üblich ist eine Angabe in MHz x km, GHz x km oder Mbit/s x km. Da der Wert von der Wellenlänge abhängig ist, ist die Angabe

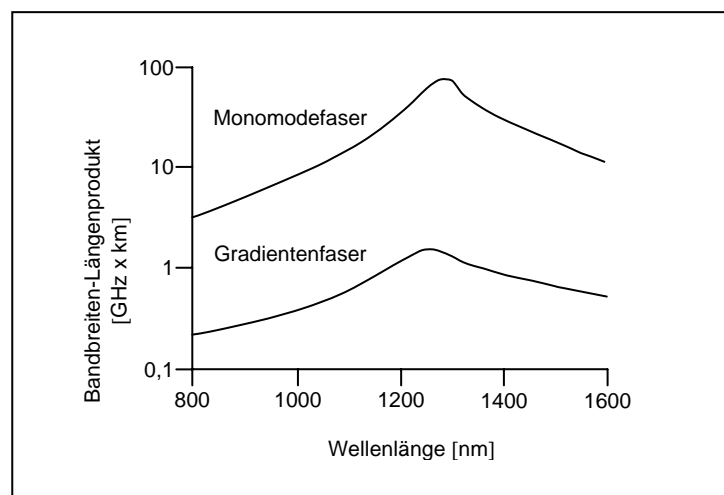


Bild 2.18: Bandbreiten-Längenprodukt in Abhängigkeit von der Wellenlänge

der zugehörigen Wellenlänge erforderlich (siehe Bild 2.18).

So bedeutet ein Bandbreitenlängen-Produkt von 400 MHz x km bei 850 nm, dass mit Licht dieser Wellenlänge Frequenzen bis zu 400 MHz über 1 km oder z.B. Frequenzen bis zu 100 MHz über 4 km übertragen werden können.

Bei hohen Übertragungsraten schränkt meist das Bandbreiten-Längenprodukt die Reichweite ein und nicht die im Folgenden beschriebene Dämpfung.

3.2.3.4.5 Dämpfung

Neben der Dispersion ist die Dämpfung ein weiterer wichtiger Parameter zur Kennzeichnung der Übertragungseigenschaften eines LWL. Unter Dämpfung versteht man die Verminderung der optischen Signalleistung, verursacht vorwiegend durch Streuung und Absorption. (Verluste in Steck- und Spleißverbindungen werden in Abschnitt 3.3 näher betrachtet.)

Die Dämpfung wird in der Einheit Dezibel (dB) angegeben. Der Dämpfungskoeffizient α ist die auf seine Länge bezogene Dämpfung eines gleichförmigen LWL; Einheit dB/km.

Streuung ist die hauptsächliche Ursache für die Dämpfung eines LWL. Sie entsteht an Fehlstellen bzw. Verunreinigungen des Materials und lenkt einen Teil des Lichtes so ab, dass es den Lichtwellenleiter verlässt. Auch bei einem völlig homogenen Material entstehen durch mikroskopische Veränderungen der Dichte Streuverluste, die sogenannte Rayleigh-Streuung. Diese Verluste sind vom Material und der Wellenlänge abhängig und nehmen mit steigender Wellenlänge ab (Bild 2.19).

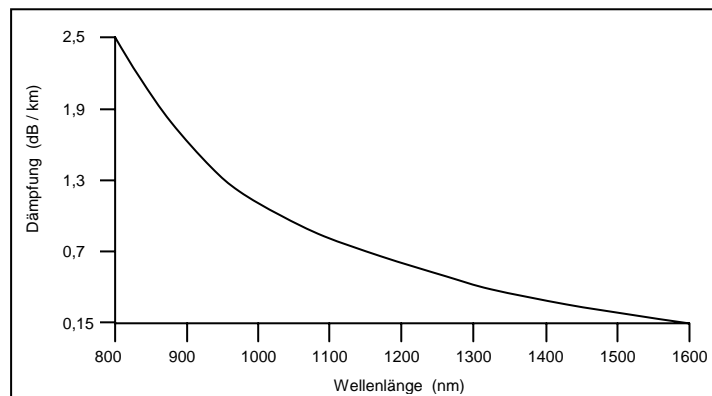


Bild 2.19: Rayleigh-Streuung

Absorption entsteht hauptsächlich durch Einlagerungen von Fremdatomen im LWL und wirkt sich nur bei bestimmten Wellenlängen aus. Verantwortlich für die Absorption sind Verunreinigungen beim Herstellungsprozeß durch Metallionen und OH-Ionen, die durch einfallendes Licht in Schwingungen versetzt werden, sodass die Lichtenergie im LWL in Wärme umgesetzt wird. Die Stärke der Dämpfung hängt von der verwendeten Glassorte und von der Konzentration der Ionen ab.

Der schon in Abschnitt 3.2 (Bild 2.1) gezeigte typische Dämpfungsverlauf eines Lichtwellenleiters macht deutlich, dass insbesondere bei den Wellenlängen 1300 nm und 1550 nm die niedrigsten Dämpfungswerte liegen. Bei einer Wellenlänge von ca. 1300 nm liegt zugleich das Minimum der Dispersion. Der Betrieb von LWL-Kabeln bei dieser Wellenlänge ist also besonders vorteilhaft.

Bei einer Wellenlänge über 1550 nm steigt die Dämpfung wieder stetig an, da in diesem Bereich Schwingungsanregungen im Molekülbereich auftreten.

3.2.4 Opto-elektrische Wandler (Empfangsseite)

Aufgabe des opto-elektrischen Wandlers ist es, die über den LWL übertragenen optischen Signale wieder in elektrische Signale umzuwandeln. Dies geschieht mit Hilfe von Lichtdetektoren. Dabei werden durch Absorption von Lichtquanten Ladungsträger generiert, welche zur Erhöhung der Leitfähigkeit von halbleitendem Material führen.

Gebräuchlich sind Fotodioden, die mit in Sperrrichtung vorgespanntem PN-Übergang arbeiten. Für die Anwendung in der LWL-Technik sind im wesentlichen die PIN-Diode (**P**-Intrinsic-**N**- Schicht) und die APD (**A**valanche **P**hotodiode) im Einsatz.

Als Halbleitermaterial kommt **Silizium** (Si), **Indium-Galliumarsenid** (InGaAs) und InP-InGaAsP zur Anwendung, wobei letztere im langwelligen Bereich (bis 1500 nm) gut geeignet sind, Si-Dioden kommen im Bereich bis 900 nm Wellenlänge (Bild 2.20) zur Anwendung. Auch Germanium wird als Halbleitermaterial verwendet. Derartige Fotodioden erzeugen jedoch ein höheres Grundrauschen.

Das Bild 2.20 zeigt die Ansprechempfindlichkeit r (responsivity) verschiedener Materialien von Fotodetektoren in Abhängigkeit der Lichtwellenlänge. Sie ist das Verhältnis vom generierten Fotostrom (A) zur absorbierten optischen Leistung (W).

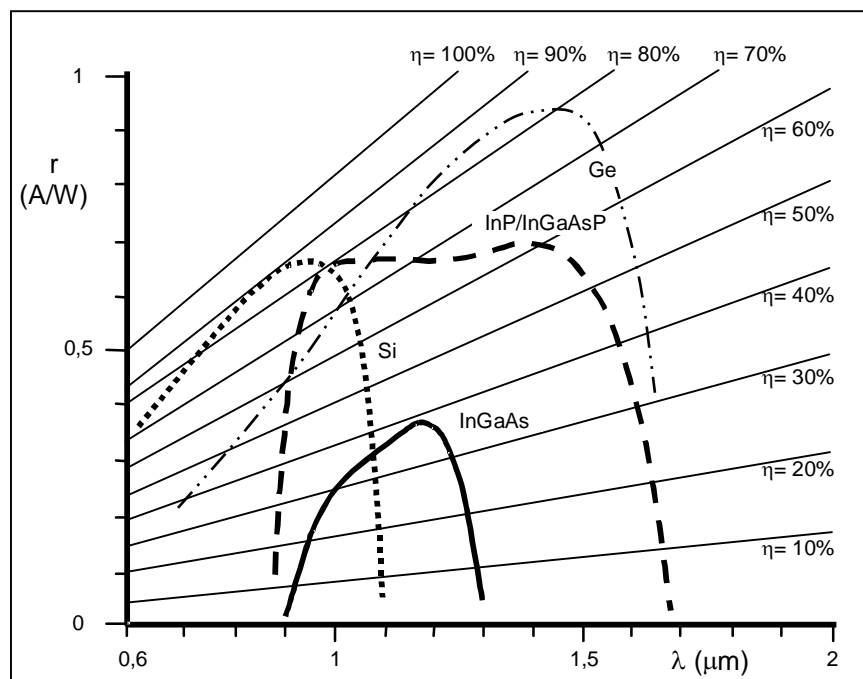


Bild 2.20: Ansprechempfindlichkeit r und Quantenwirkungsgrad η verschiedener Foto-Detektoren in Abhängigkeit von der Lichtwellenlänge λ

Die Ausbeute an Elektronen pro Photon kann durch den Quantenwirkungsgrad η gekennzeichnet werden.

$$\eta = \frac{\text{Anzahl der Elektronen}}{\text{Anzahl der Photonen}}$$

Typ	Anstiegszeit (s)	Wellenlänge λ (nm)	Kosten
PN	10^{-6}	400-750	sehr gering
PIN	10^{-9}	300-900	gering
APD	10^{-9}	300-900	hoch
InGaAs PIN	$\ll 10^{-9}$	< 1500	sehr hoch

Tabelle 2.3: Eigenschaften von Fotodetektoren

In Tabelle 2.3 sind die Eigenschaften der verschiedenen Lichtdetektoren zusammengestellt.

PIN-Dioden

PIN-Siliziumdioden lassen sich für viele LWL-Anwendungen mit kleineren Übertragungsentfernungen vorteilhaft einsetzen. Sie sind robust und preiswert und wegen ihres linearen Zusammenhangs zwischen Lichtstärke und Fotostrom auch für die Übertragung analoger Signale geeignet. Die Quantenausbeute geht bis 90 % und die Nutzbandbreite bis ca. 500 MHz.

Avalanche-Photodiode (APD)

APDs werden im Grenzbereich der Durchbruchspannung betrieben, wozu Sperrspannungen bis zu 200 V erforderlich sein können. Dadurch entsteht eine hohe Beschleunigung der generierten Elektronen, sodass eine Ladungsträgermultiplikation auftritt (Lawineneffekt). Die APD hat eine zur PIN-Diode gleich gute Nutzfrequenz, ist jedoch wegen ihrer nichtlinearen Licht/Strom-Kennlinie nicht für analoge Anwendungen geeignet. Durch ihren wesentlich höheren Multiplikationsfaktor (bis 1000) hat sie eine hohe Lichtempfindlichkeit.

Als Nachteile der APD sind die Temperaturabhängigkeit und der erhöhte Schaltungsaufwand neben dem höheren Preis zu nennen.

Für extrem schnelle Anwendungen (>1 GHz) im optischen Bereich bis 1500 nm kommen wiederum InGaAs-PIN-Dioden zum Einsatz (Tabelle 2.3).

Bild 2.21 zeigt das Prinzipschaltbild eines optischen Empfängers für SDI-Signale. Der opto-elektrische Wandler liefert am Ausgang elektrische Signale mit TTL- oder ECL-Pegel, die dann an die SDI-Schnittstelle angepasst werden.

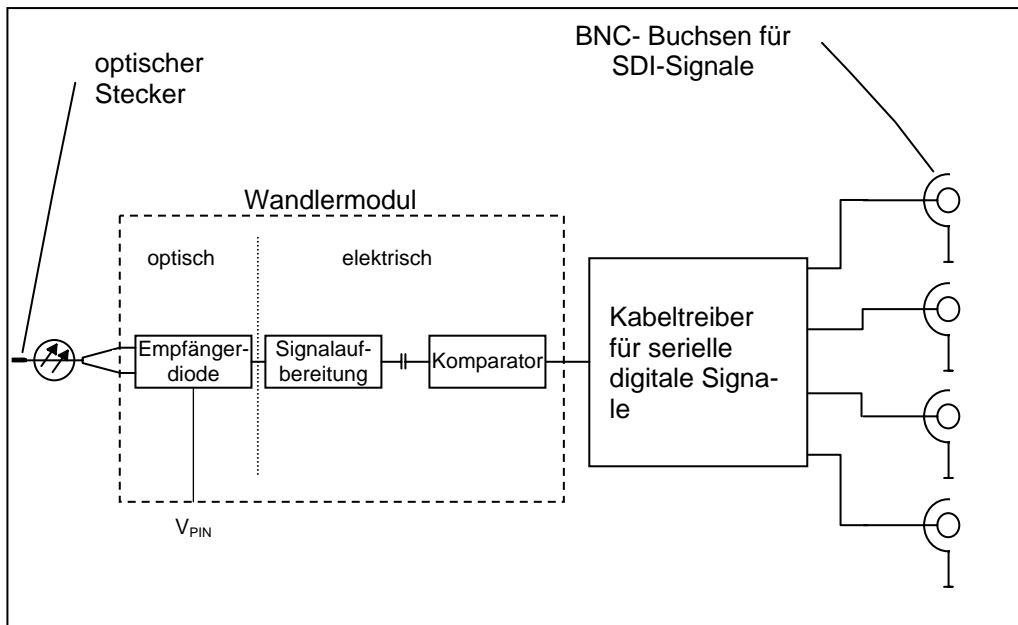


Bild 2.21: Blockschaubild eines optischen Empfängers mit Treiber für SDI-Signale

3.3 Verbindung von LWL-Fasern

3.3.1 Allgemeines

Verbindungen in optischen Übertragungswegen dienen dazu, zwei LWL-Komponenten auf einfache und reproduzierbare Weise dämpfungsarm und im Bedarfsfall auch leicht trennbar miteinander zu koppeln. Wegen der mechanischen Eigenschaften der Glasfasern ist die Verbindungstechnik aufwendiger als bei Kupferleitern.

Die Kopplung von LWL-Komponenten untereinander wird an verschiedenen Stellen eines Übertragungssystems notwendig. Je nach Anwendungsfall unterscheidet man:

- lösbare Verbindungen
- bedingt lösbare Verbindungen und
- nicht lösbare Verbindungen.

Die Entscheidung, welche Verbindungsart zur Anwendung kommt, lässt sich mit Hilfe der typischen Kenngrößen recht einfach treffen (Tabelle 3.1).

Kenngröße	Verbindung		
	lösbar	bedingt lösbar	nicht lösbar
Einfügungsdämpfung	> 0,1 dB bis 1 dB	> 0,1 dB bis 0,5 dB	> 0,1 dB
Rückflussdämpfung	< 45 dB für Singlemodefaser < 35 dB für Gradientenfaser	< 40 dB	< 60 dB
Feldmontage	geeignet	geeignet	geeignet
wiederholtes Trennen und Verbinden	sehr einfach, kein qualifiziertes Personal und keine Ausrüstung erforderlich	einfach, qualifiziertes Personal und einfache Ausrüstung erforderlich	aufwendig, qualifiziertes Personal und hochwertige Ausrüstung erforderlich
Zuverlässigkeit	gering	keine	sehr hoch
Lebensdauer	gering	gesicherte Aussage möglich	sehr hoch
Kosten der Erstmontage	hoch	hoch	gering
Kosten für wiederholtes Trennen und Verbinden	sehr gering	gering	hoch
Kosten für die Montageausrüstung	mittel	niedrig	hoch

Tabelle 3.1: Kenngrößen von LWL-Verbindungen

Es ist jedoch notwendig, alle Fügeverfahren nach einheitlichen Kriterien zu beurteilen. Erreicht werden muss eine:

- geringe Dämpfung
- geringe Signalverzerrung
- gute mechanische Stabilität
- hohe Lebensdauer und hohe Klimabeständigkeit
- schnelle und kostengünstige Herstellung.

Eine Übersicht der technologischen Möglichkeiten der einzelnen Verbindungstechniken zeigt Bild 3.1. Die im Bild stärker hervorgehobenen Fügeverfahren sind in der Praxis von besonderer Bedeutung und nachfolgend näher beschrieben.

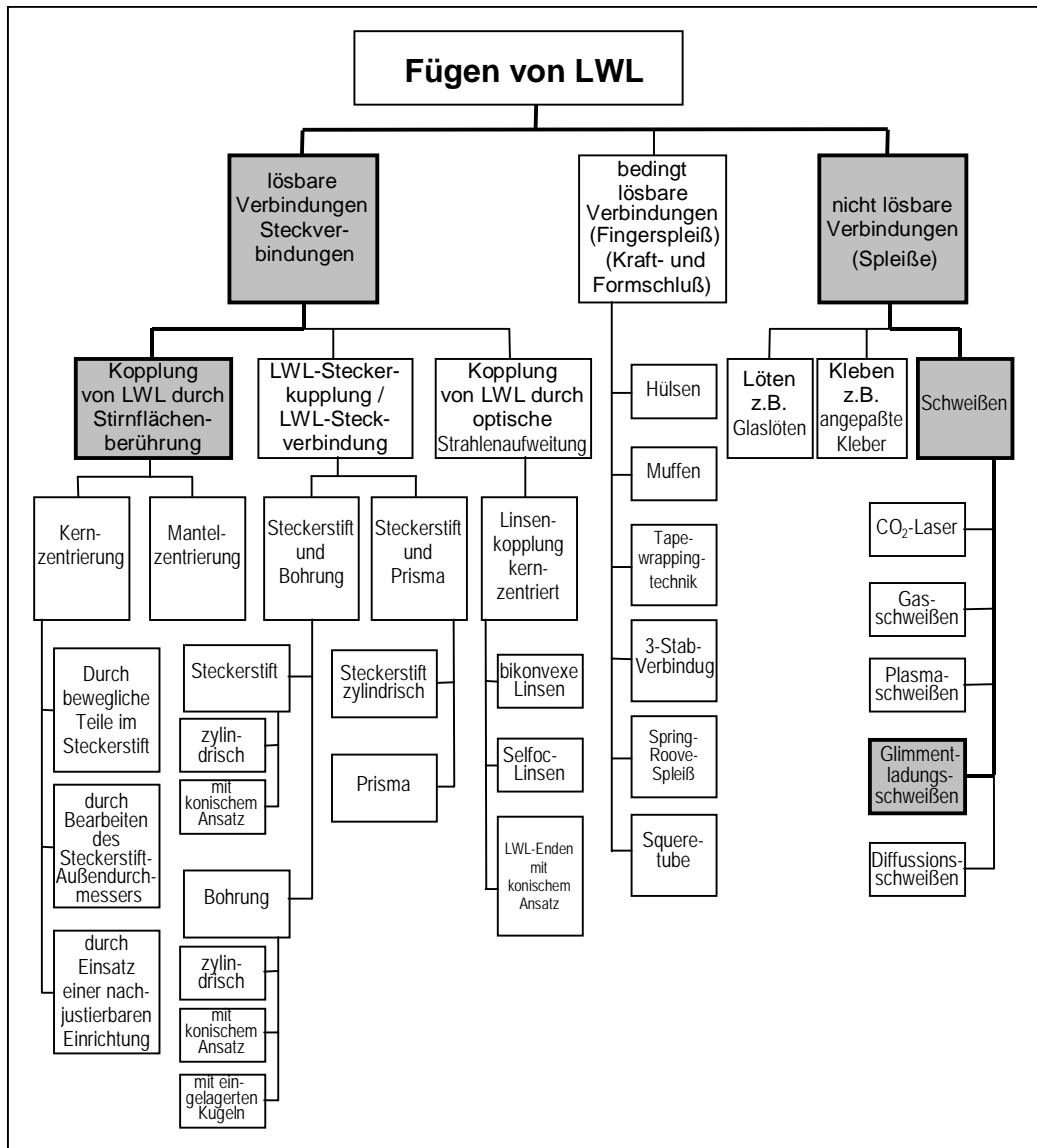


Bild 3.1: Fügeverfahren für die LWL-LWL-Kopplung (Übersicht)

3.3.2 Kenngrößen einer LWL-Verbindungsstelle / Koppelverluste

Die Koppelstelle stellt eine Störung im Leitungszug des LWL dar, an der Lichtverluste durch Reflexion und Abstrahlung auftreten können. Im Kern kommt es darüber hinaus zu einer Mischung der geführten Moden und damit zu einer Änderung ihrer Leistungsverteilung.

Zur Beschreibung der optischen Parameter werden Einfügungsdämpfung (Insertion loss) I_L und Reflexionsdämpfung (Return loss) R_L angegeben. Die Ursachen für diese Koppelverluste können unterteilt werden in intrinsische Verluste, bedingt durch Abweichungen der Kennwerte der zu verbindenden LWL, und in extrinsische Verluste, bedingt durch nicht ideale Verbindungsherstellung. Bild 3.2 zeigt eine Klassifizierung der Koppelverluste, unterteilt nach intrinsischen und extrinsischen Verlusten.

Die Ursachen der intrinsischen Verluste sind in nicht abgestimmten Faserparametern begründet. Neuere LWL-Fasern sind jedoch sehr genau spezifiziert, sodass bei diesen der intrinsische Dämpfungsanteil erfahrungsgemäß gering ist.

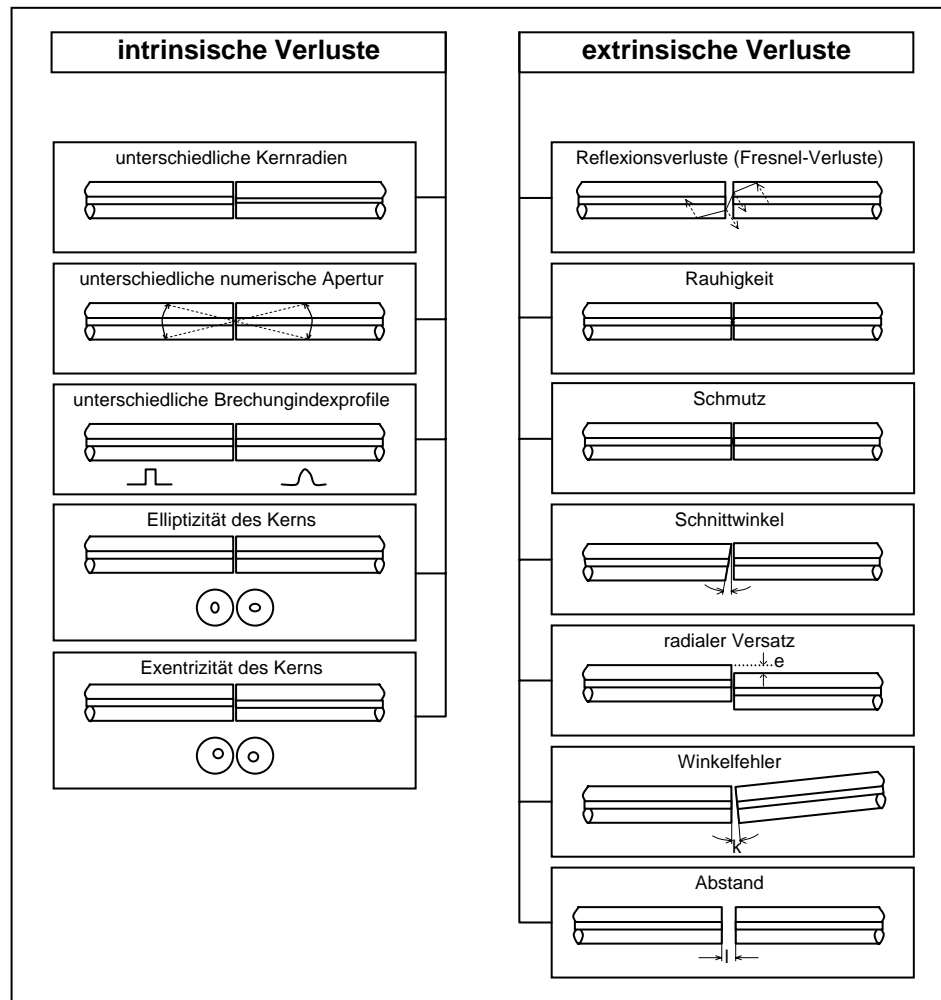


Bild 3.2: Klassifizierung der Koppelverluste

Die extrinsischen Verluste der Koppelstelle werden durch Arbeitsschritte bei der Verbindungsherstellung beeinflusst. Die Minimierung von radialem Versatz und Winkelfehlern ist durch die Auswahl einer geeigneten Konfektionierungstechnologie erreichbar. Der radiale Versatz entsteht durch Toleranzen, die bei der Herstellung von Steckern sowie Glasfasern auftreten. Die optimale Steckverbindung, bei der sich die Kernbereiche der beiden Fasern möglichst deckungsgleich gegenüberstehen, erfordert erhöhten Aufwand.

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten der Bearbeitung der Stirnflächen (eben, konvex, schräg und schräg-konvex), die dann die Kopeleigenschaften verbessern. Des weiteren gibt es unterschiedliche Möglichkeiten der LWL-Kopplung durch unterschiedliche Zwischenmedien.

Die Tabelle 3.2 zeigt Möglichkeiten, Einfügungsdämpfung (I_L) und Reflexionsdämpfung (R_L) durch geeignete Stirnflächengestaltung zu beeinflussen, sowie die damit erreichbaren optischen Werte.

In der Praxis haben sich Steckverbindungen durchgesetzt, bei denen die Fasern durch Konvexschliff in physikalischem Kontakt sind. Bei diesen Verbindungen treten keine Reflexionsverluste (Fresnel-Verluste, ca. 0,3 dB bei Glas-Luft-Glas-Übergang) auf, und es sind reproduzierbare Parameter erreichbar.

Stirnfläche	Zwischenmedium	Kontakt	I_L [dB]	R_L [dB]
eben	Luft	nein	0,7	12
eben	-	unsicher	0,5	12
konvex	-	ja	0,1	35
eben	Index-Matching-Gel	ja	0,2	35
eben	Anti-Reflex-Coating	nein	0,6	40
schräg	Luft	nein	0,7	55
schräg-konvex	-	ja	0,1	80

Tabelle 3.2: Einflüsse von Stirnflächenbeschaffenheit und Zwischenmedium auf Einführungs- (I_L) und Reflexionsdämpfung (R_L)

3.3.3 Verbindungstechniken

3.3.3.1 Lösbare Verbindungen (LWL-Steckverbinder)

Die in der optischen Übertragungstechnik verwendeten lösbaren Verbindungen unterscheiden sich in der Art der Verbindung von dem Prinzip der elektrischen Steckverbindungen. Während die herkömmlichen elektrischen Steckverbindungen meist das Stecker-Buchse-Prinzip verwenden, wird in der LWL-Technik immer Stecker auf Stecker mittels Kupplungsstück gesteckt. Da in der LWL-Technik wegen des geringen Durchmessers der Glasfaser eine sehr hohe mechanische Präzision gefordert wird, muss die mechanische Führung der Glasfaser möglichst genau sein. Dies wird von den lösbaren Steckverbindern durch eine sogenannte Ferrule auf der Steckerseite an der Faser und durch ein geschlitztes Keramikrohr (bzw. aus Berilium oder Phosphorbronze) in dem Kupplungsstück gewährleistet.

Das Herzstück einer LWL-Steckverbindung mit einer Ferrule und einem geschlitzten Keramikrohr ist in Bild 3.3 zu sehen.

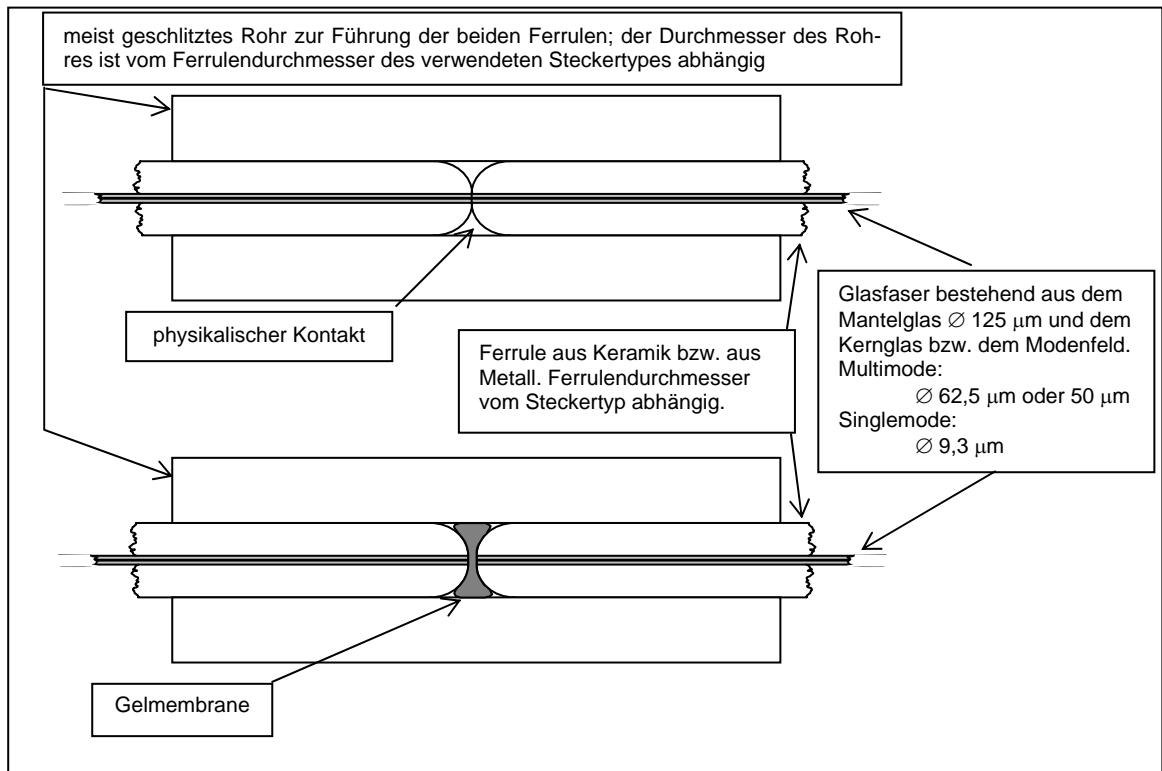


Bild 3.3: prinzipieller Aufbau einer lösbaren LWL-Steckverbindung mit physikalischem Kontakt (oben) bzw. Gelmembrane (unten)

Die verschiedenen LWL-Steckverbindungen verwenden unterschiedliche Arten der „Kontaktierung“. Die LWL-Steckverbindungen setzen entweder den physikalischen Kontakt ein oder übertragen das Licht über eine Gelmembrane zum anderen Stecker, um Reflexionsverluste zu vermeiden, die beim Übergang des optischen Strahles von der Faser in die Luft und wieder in die Faser zurück entstehen.

Für hochwertige LWL-Anwendungen spielt neben der Einfügedämpfung zunehmend die Rückflussdämpfung eine Rolle. Reflexionen treten immer dann auf, wenn Licht aus einem LWL austritt oder in diesen eingestrahlt wird.

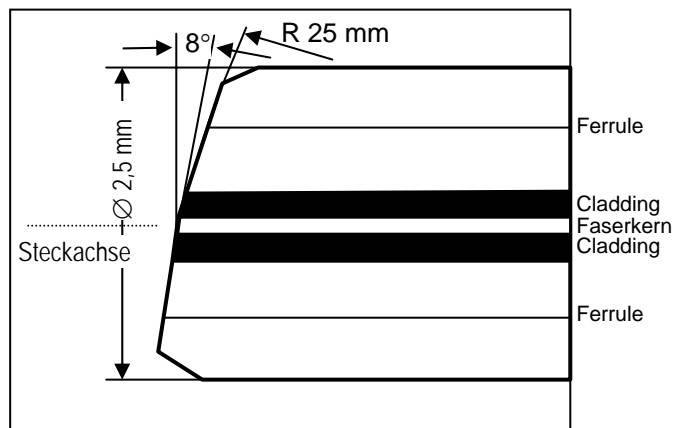


Bild 3.4: schrägkonvex geschliffene Ferrule

Zur Vermeidung dieser störenden Reflexionen werden die Faserstirnflächen schrägkonvex geschliffen. Die zurückgeworfenen Lichtanteile treffen so auf die Stirnfläche, dass diese in den Mantel gebrochen werden. Bild 3.4 zeigt den Aufbau einer Stirnfläche für eine reflexionsarme „Angle Physical Contact“-Verbindung (APC). So sind Verbindungen mit Einfügungsdämpfungen von $I_L < 0,1$ dB und Rückflussdämpfungen von $R_L > 70$ dB erreichbar.

Eine weitere Variante für eine neue Bauform eines LWL-Steckverbinders stellt der „Optoclip II“ dar. Bild 3.5 zeigt den Verbindungsaufbau. Dazu wird eine Klemmeinrichtung ähnlich einer Spannzange geöffnet und die Glasfaser aus dem Steckerteil gezogen. Der Innenraum ist mit einer „Index-Matching“-Flüssigkeit gefüllt; die Faseroberfläche ist um 8° geneigt. Dies wird durch eine spezielle Vorrichtung zum Brechen der Faser erreicht. Die Faseroberflächen müssen nicht geschliffen werden. Da bei der Steckerversion die Faser jedoch ca. 4mm freitragend - lediglich durch einen beweglichen Schutzkörper geschützt - ist, muss die Fähigkeit als lösbarer Steckverbinder für viele Steckzyklen im betrieblichen Alltag noch gezeigt werden. Für Patchfelder scheint diese Steckverbindung ungeeignet zu sein.

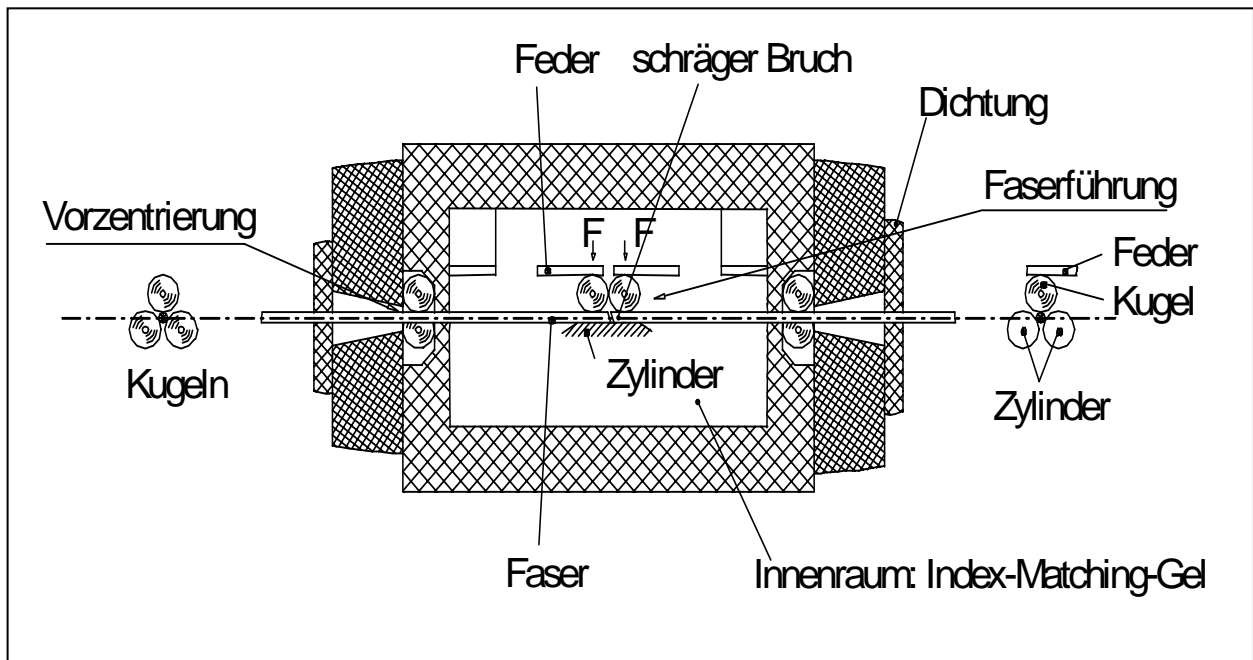


Bild 3.5: LWL-Verbindung mit Optoclip II

Aufgrund der ständigen Weiterentwicklung und Normung von Steckverbindungen ist eine Vielfalt von Steckverbindern mit unterschiedlichsten Eigenschaften auf dem Markt vorhanden. Die Entscheidung, welcher Typ verwendet wird, liegt oftmals schon beim Hersteller von Geräten bzw. hängt vom Einsatzgebiet, Einsatzort und der entsprechenden Norm ab. Im IRT wurden Steckverbinder für den Einsatz in der Studiotechnik untersucht („Gelber“ Technischer Bericht Nr. G 141/98 des IRT). Tabelle 3.3 zeigt eine Zusammenstellung der wichtigsten Parameter dieser Steckverbinder.

3.3.3.2 Bedingt lösbare Verbindungen (Fingerspleiße)







Steckerbild	Steckerbezeichnung [Norm]	Einfügungsdämpfung gemäß Datenblatt	Rückflussdämpfung gemäß Datenblatt	Bemerkungen
	DIN-LSA DIN-LSA HRL (grüne Knickschutz- tülle) [CECC 86130] [CECC 86180] [CECC 78000]	typ. < 0,2 dB typ. < 0,2 dB	typ. 45 dB mind. 70 dB	Robuster metallener Stecker, weitverbreitet bei der Deutschen Telekom, Verschraubung / Push-Pull-Option. Ferrule: Ø 2,5 mm
	E 2000 E 2000 HRL (grüne Knickschutz- tülle) [CECC 86275] [EN 186270-801]	typ. < 0,2 dB typ. < 0,2 dB	typ. 42 dB mind. 70 dB	Selbstschließender Push-Pull-Stecker, lokale Netze, vorteilhaft für schnelles/häufiges Rangieren. Ferrule: Ø 2,5 mm
	EC [CECC 86210] [EN 186210] [CECC 86215-801] [IEC 874-13]	typ. < 0,25 dB	mind. 60 dB	Matching-Gel im Kupplungsstück, „Kugel/Konus“-Zentrierung, Push-Pull-Stecker. Ferrule: Ø 3,9 mm
	FC / PC FC / APC (grüne Knickschutz- tülle) [CECC 86115-801] [IEC 874-7]	typ. < 0,2 dB typ. < 0,2 dB	typ. 45 dB mind. 70 dB	Robuster metallener Stecker, weitverbreitet in der Messgerätechnik, Verschraubung M8. Ferrule: Ø 2,5 mm
	SC / PC SC / APC [CECC 86260] [EN 50173]	typ. < 0,2 dB typ. < 0,2 dB	typ. 45 dB min. 70 dB	Push-Pull-Stecker, verbreitet in Computernetzen (FDDI-Ringe). Ferrule: Ø 2,5 mm
	ST [CECC 86120] [IEC 874-10]	typ. < 0,2 dB	typ. 45 dB min. 70 dB	Bajonett-Stecker, verbreitet in Nordamerika u. in Computernetzen. Ferrule: Ø 2,5 mm

Tabelle 3.3: Übersicht über LWL-Steckverbinder / Standards und Charakteristika

Bedingt lösbare Verbindungen, auch Fingerspleiße genannt, finden im Bereich der Labormesstechnik breite Anwendung. Auch im Studiobereich ist der Einsatz bei Reparatur oder schneller Konfektion

bzw. Installation denkbar. Hierbei kommt besonders der Vorteil der einfachen Herstellung zum Tragen (vgl. Bild 3.1).

Zur Herstellung eines Fingerspleißes werden an den abgesetzten LWL-Fasern auf einem Trenngerät senkrecht gebrochene Endflächen erzeugt. Zur Verbindung werden beide Faserenden in eine gemeinsame V-Führung geschoben und mit Federn oder Klemmrings gehalten.

In der Verbindungsebene wird eine Anpassung der Brechungsindizes durchgeführt („Index-Matching“ mit Hilfe von speziellem Gel), um Fresnelverluste zu vermindern, die beim Übergang des optischen Strahles von der Faser in die Luft und wieder in die Faser zurück entstehen. Die so erreichbaren Dämpfungswerte liegen im Bereich von 0,3 dB pro Verbindung. Anwendbar ist diese Technologie sowohl für Multimode- als auch für Singlmodefasern.

Einer weiten Verbreitung dieser Technologie steht im wesentlichen die geringe Stabilität gegenüber Umgebungseinflüssen entgegen. Besonders Zugkräfte und Vibrationen führen zur Veränderung bzw. Unterbrechung der Verbindung.

Das Index-Matching-Gel schränkt den Temperaturbereich stark ein und unterliegt außerdem Alterungserscheinungen.

3.3.3.3 Nicht lösbare Verbindungen (Spleiße)

Die nicht lösbaren Verbindungen von LWL-Fasern werden vorrangig im Langstreckenbereich eingesetzt. Trotz der Möglichkeit, Endloskabel zu produzieren, müssen aus Transport- und Verlegungsgründen einzelne Kabelstücke miteinander verbunden werden. Eine Vielzahl von nicht lösbaren Verbindungen, Spleiße genannt, entstehen längs eines Übertragungsweges und sind danach oft nicht mehr zugänglich. Die Forderungen nach einer hohen Langzeitstabilität und geringen Verlusten sind bei diesen Verbindungen besonders hoch.

Ein weiteres Einsatzgebiet für Spleiße stellt die sogenannte Spleißbox am Ende eines Glasfaserkabels bzw. Bündels dar. Hier werden an den Enden der Fasern des Kabels sogenannten „Pigtails“ angespleißt. „Pigtails“ sind vorkonfektionierte LWL-Verbindungskabel, die an einem Ende einen LWL-Steckverbinder qualitativ hochwertig konfektioniert haben und am anderen Ende mit der Faser in der Spleißbox fest gespleißt werden. Somit entsteht ein mechanisch sicherer Übergang.

Man unterscheidet bei den Spleißverbindungen zwischen Klebespleiß und Schmelzspleiß (Schweißen). Für die Klebetechnik wird ein transparenter Kleber verwendet, sodass der Geräteaufwand für diese Verbindungstechnik gering ist. Dieses Verfahren eignet sich besonders bei Kunststofffasern mit größerem Durchmesser (Multimodefasern).

Von allen entwickelten Spleißverfahren (vgl. Bild 3.1) hat sich im „Feld“ das Glimmentladungsspleißen durchgesetzt. Die Technologien des Spleißens werden in der Praxis auch bei Monomode-LWL gut beherrscht. Auf dem Markt werden sowohl manuell bedienbare als auch vollautomatische Spleißgeräte angeboten. In Bild 3.6 ist schematisch die Herstellung einer Spleißverbindung nach dem Glimmentladungsverfahren gezeigt.

Bei Singlmodefasern werden Spleißverluste von $< 0,1$ dB erreicht. Auch bei Multimodefasern kommt man auf Werte von ca. 0,1 dB.

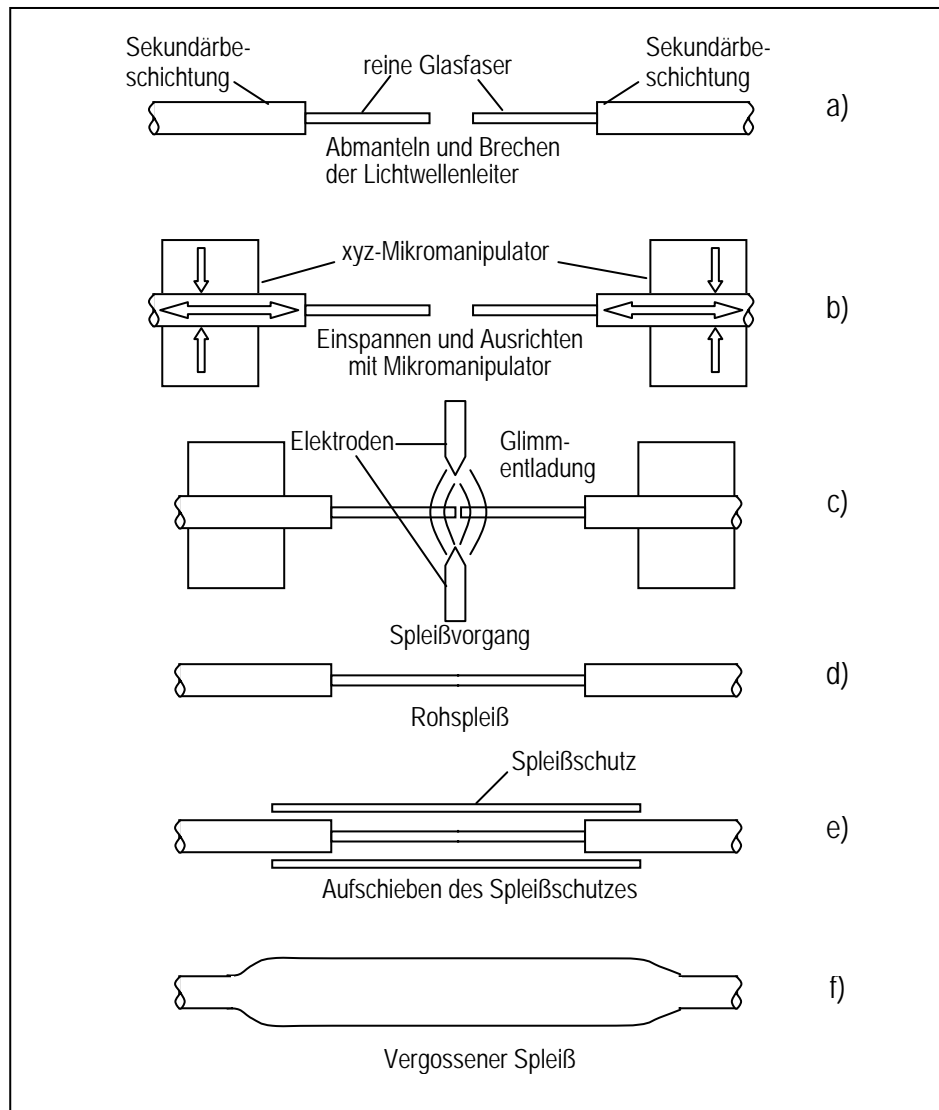


Bild 3.6: Glimmentladungsspleißen

Die Verluste der Verbindung werden in entscheidendem Maße von der Geometrie der Fasern beeinflusst (Zentrierung des Faserkerns). Schwankender Mantelradius, Kernexzentrizitäten sowie Faserunrundheit führen zu breiter Streuung der sich ergebenden Dämpfungswerte. Allgemein kann gesagt werden, dass die Einengung der Fasertoleranzen bei der Herstellung eine durchgreifende Verbesserung gebracht hat.

3.3.4 Praktischer Umgang mit LWL-Steckverbindern und -Kabeln

Aufgrund der sehr kleinen Durchmesser des lichtführenden Faserteiles (9 µm bei Singlemode- und 50 µm bzw. 62,5 µm bei Multimodefasern) muß mit LWL-Komponenten sehr sorgfältig und gewissenhaft umgegangen werden. Schmutz kann sehr schnell eine LWL-Übertragungsstrecke beeinträchtigen. Bei Beachtung gewisser Regeln können aber viele Steckzyklen erreicht werden.

Bei LWL-Steckverbindern mit freiliegender und herausragender Ferrule (z.B. ST, DIN, SMA, FC/PC) ist darauf zu achten, dass die Ferrule nicht verschmutzt oder verkratzt wird. Die dazugehörigen Schutzkappen sollten immer sofort beim freiliegenden Stecker angebracht werden. Auch die Schutz-

kappen müssen immer vor Schmutz geschützt werden, da sonst dieser Schmutz auf die Ferrule übertragen werden kann. Eine häufige Erneuerung der Schutzkappen ist empfehlenswert.

Beim Einstecken von LWL-Steckern in die Kupplungshülsen ist auf eine exakte Führung zu achten, damit die Ferrule nicht an der Buchse verkratzt wird. Steckverbinder mit Verriegelungskappe (z.B. E2000) sind absolut unkritisch.

LWL-Kabel dürfen nicht zu sehr gebogen oder gar geknickt werden. Dies kann zu einer Beschädigung der Faser bzw. zu einem Austreten des Lichtstrahles aus dem Faserkern in den Mantel führen, was eine starke Erhöhung der Dämpfung zur Folge hat. Auch sollten die Zugkräfte möglichst gering gehalten werden.

Bei der Verlegung von LWL-Kabeln in Trassen und Gestellen im Studiobereich muss darauf geachtet werden, dass auch hier keine zu geringen Radien entstehen. Auch die Einbindung und Entlastung durch Kabelbinder usw. in den Geräteschränken darf nicht zu einer Quetschung der LWL-Kabel führen.

3.3.5 Reinigen von LWL-Komponenten

Sollten LWL-Strecken Probleme bereiten, so ist oftmals eine Verschmutzung der Ferrulen oder der Kupplungshülsen die Ursache. Die Stirnfläche kann am besten mit einem speziellen Handmikroskop begutachtet werden. Hier ist auch eine Auflichtbeleuchtungsmöglichkeit vorhanden. Bild 3.7 zeigt beispielhaft Aufnahmen von Ferrulen. In Bild 3.8 sind die Qualitätskriterien einer Faserstirnfläche dargestellt.

Sollte eine Reinigung erforderlich sein, so ist unbedingt zu beachten, dass immer der Gegenstecker bei Direktkontaktierung mit gereinigt werden muss. Es besteht sonst die Gefahr, dass der Schmutz von einem Stecker zum anderen (schon gereinigten) Stecker übertragen wird.

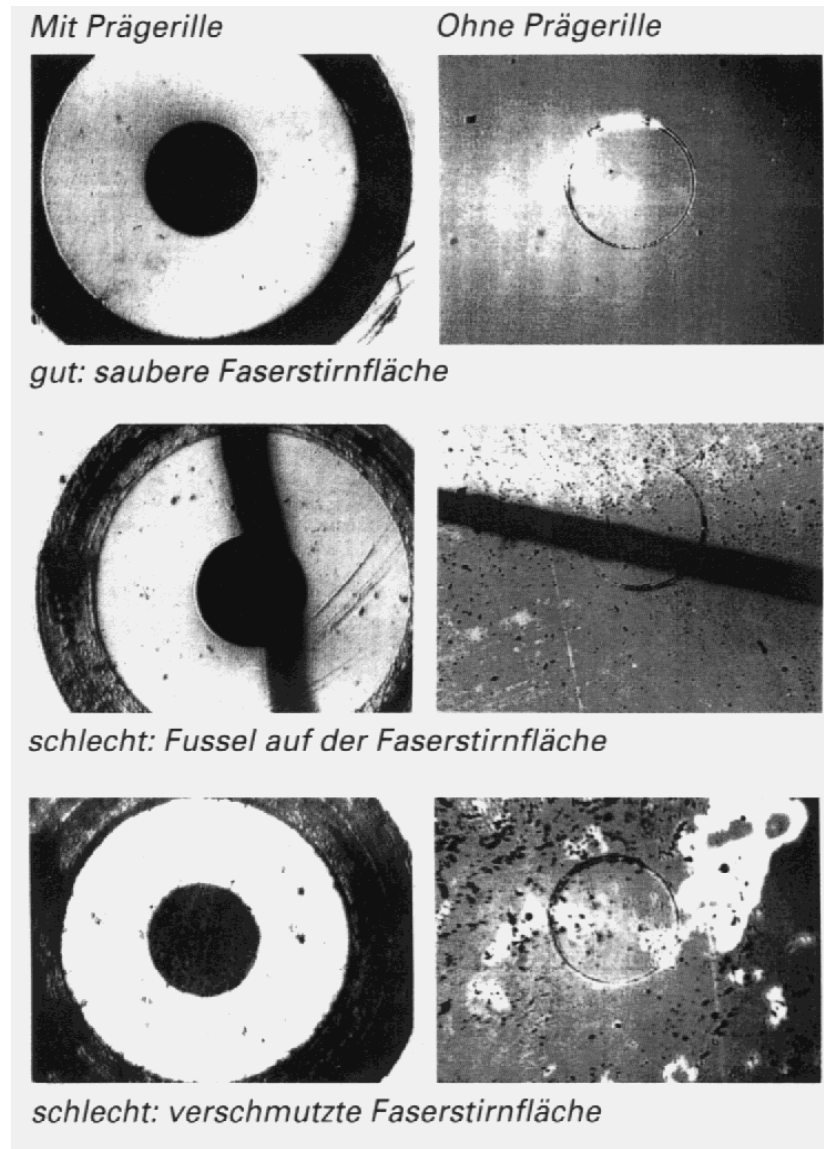


Bild 3.7: Aufnahmen von Faserstirnflächen

Anmerkung: Es gibt ein Präge- bzw. Nachprägeverfahren, bei dem die Ferrule im Außenbereich aus Hartmetall oder Keramik (hochpräzise geschliffen) und der innere, verformbare Bereich aus Neusilber besteht. Bei der Steckerkonfektion wird die Faser abisoliert und mit Epoxy-Kleber in die Ferrule eingebracht. Bevor der Kleber aushärtet, wird die Neusilberlegierung mittels eines Werkzeuges präzise um die Faser herum geprägt und somit von 1 bis 2 μm zentriert (mantelzentriert). Das Prägewerkzeug weist einen hochpräzisen, ringförmigen Keil auf, der in das Neusilber eindringt und das Metall in Richtung Faser fließen lässt. Durch diesen Vorgang wird eine exakt auf den jeweiligen Faserdurchmesser abgestimmte Bohrung mit einer Exzentrizität von höchstens 1,5 μm erreicht. Dies ist bei einer Multimodefaser ausreichend. Bei einer Singlemodefaser wird mit einem optischen Messverfahren und einem weiteren Nachprägen mit Hilfe eines 120-Grad-Keiles die Faser noch

exakter zentriert (kernzentriert). Es wird so eine Exzentrizität von kleiner als $0,25\ \mu\text{m}$ erreicht.

Als Reinigungsmittel dienen Ethanol oder Propanol (mind. 99 %ig), trockene Druckluft und absolut fusselne Reinigungstücher. Vorteilhaft sind kompletten Reinigungssets.

Bei einem negativen Ergebnis kann der Reinigungsvorgang wiederholt werden. Ist danach keine Verbesserung feststellbar, sollte von besonders geschultem Personal im Ausnahmefall eine Nachpolierung der Faserfläche erfolgen.

Die Kupplungshülsen dürfen nur gereinigt werden, wenn keine Stecker mehr angekuppelt sind. Kupplungshülsen ohne Membran werden mit einer Nylonbürste mehrmals durchstoßen und danach beidseitig mit der Druckluftdose ausgeblasen.

Kupplungshülsen mit einer Gelmembran können mit Isopropanol und Druckluft gereinigt werden (nicht durchstoßen!). Sinnvoller ist jedoch meistens der Austausch.

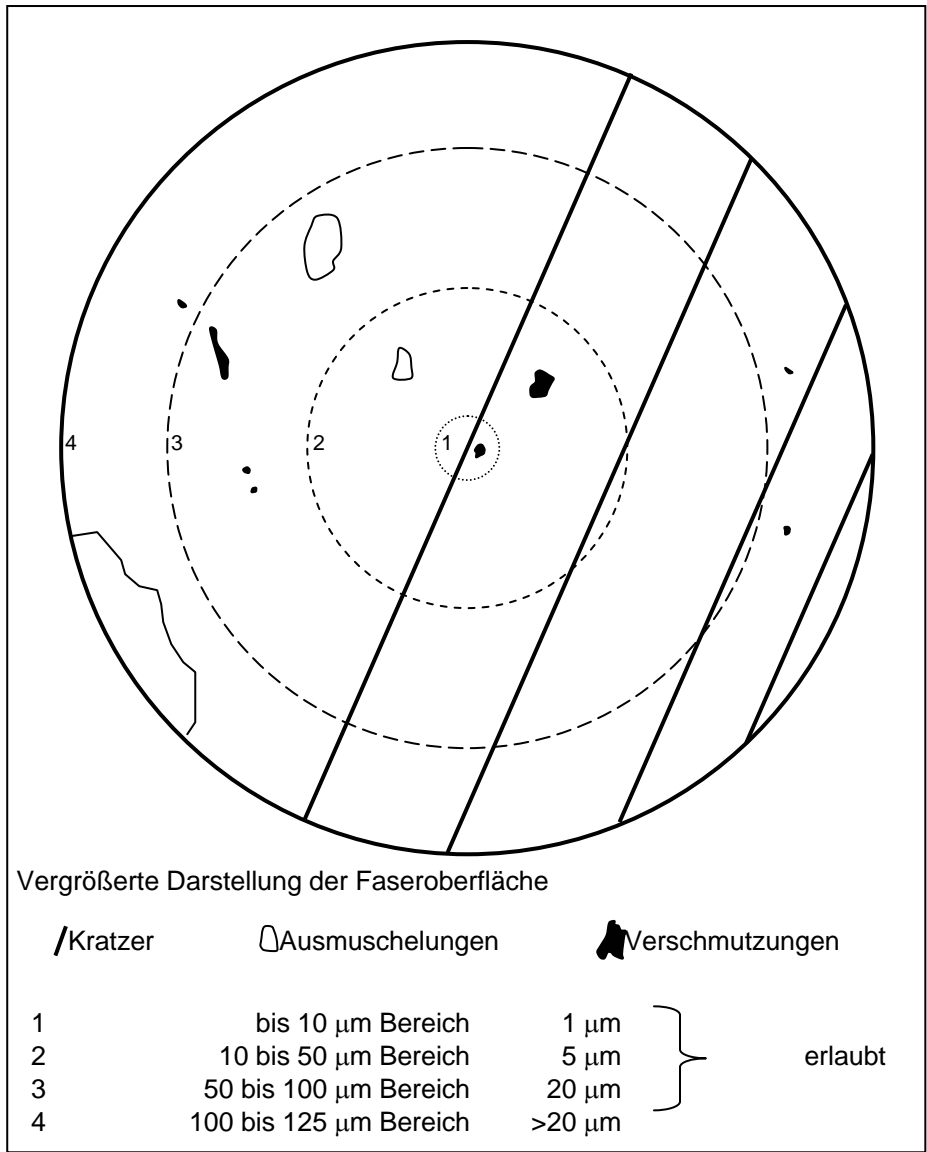


Bild 3.8: Qualitätskriterien für die Sichtprüfung der Faserstirnfläche mit einem Mikroskop

Werden Stecker oder Kupplungshülsen nach der Reinigung und Begutachtung nicht umgehend gesteckt, sind sie umgehend mit den entsprechenden Staubschutzkappen zu versehen.

3.4 Technische Spezifikationen

3.4.1 ITU-Empfehlungen

In der Empfehlung ITU-R BT.1367 „Serial digital fibre transmission system for signals conforming to ITU-R BT.656, ITU-R BT.799 and ITU-R BT.1120“ wird das für den Rundfunkbereich empfohlene optische Übertragungssystem beschrieben und spezifiziert. Die Norm schreibt für den optischen Sender den SC/PC-Steckertyp vor und ebenso ein Singlemode-Pigtail zwischen dem Anschlussstecker und der Lichtquelle, wenn beide nicht in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht sind. Ein Multimode-Pigtail darf nur verwendet werden, wenn der optische Sender ausschließlich für Multimode-Anwendungen eingesetzt wird. Der Sender setzt die am Eingang anliegenden elektrischen Signale in eine Intensitätsmodulation des optischen Ausgangssignal um, wobei die elektrischen Signale konform mit einer der Empfehlungen ITU-R BT.656, 799, 1120¹ sein müssen. Für den optischen Empfänger muss ebenfalls der SC/PC-Steckertyp verwendet werden. Wenn die Empfängerdiode und der Anschlussstecker nicht in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht sind, ist das kurze Glasfaserstück zwischen beiden als Multimode-Pigtail auszuführen. Die folgende Tabelle zeigt die Spezifikationen für den optischen Sender:

Glasfasertyp	Singlemode (multimode optional)	Multimode (62,5/125 µm) ¹
Typ der Lichtquelle	Laser	Laser oder LED ^{2,3}
Optische Wellenlänge	1310 nm ± 40nm	1310 nm ± 40nm
Maximale Halbwertsbreite der Spektrallinien (FWHM)	10 nm	30 nm
Maximale Ausgangsleistung	- 7,5 dBm ⁴	- 7,5 dBm ⁴
Minimale Ausgangsleistung	- 12 dBm ⁴	- 12 dBm ⁴
Extinction ratio	5:1 min., 30:1 max.	5:1 min.
Steig- und Fallzeit	siehe Anmerkung 5	siehe Anmerkung 5
Jitter	siehe Anmerkung 5	siehe Anmerkung 5
Maximal reflektierte Leistung	4 %	4 %
Übertragungsfunktion Elektrisch ->Optisch	Logisch 1 entspricht maximaler Lichtintensität Logisch 0 entspricht minimaler Lichtintensität	
Anmerkung 1: Es kann auch eine bereits vorhandene 50/125-µm-Multimode-Faser benutzt werden. Das führt aber zu einen um 3 dB reduzierten Leistungsbudget gegenüber der 62,5/125-µm Faser.		
Anmerkung 2: LEDs arbeiten nicht mehr ausreichend gut bei Bitraten, die höher sind, als in ITU-R BT.656/799 spezifiziert.		
Anmerkung 3: Sender, die nur für Multimode-Übertragung geeignet sind, müssen gekennzeichnet sein.		
Anmerkung 4: 0 dBm entsprechen 1 mW Lichtleistung		
Anmerkung 5: Die Steig- und Fallzeiten sowie der Jitter sind in der elektrischen Ebene spezifiziert.		

Tabelle 4.1: Spezifikationen für den optischen Sender entsprechend Empfehlung I-TU-R BT.1367

¹ **ITU-R BT.656/799:** „Interfaces for digital component video signals in 525-line and 625-line television systems operating at the 4:2:2 (BT.656) / 4:4:4 (BT.799) level of Recommendation ITU-R BT.601 (Part A)“

ITU-R BT.1120: „Digital interfaces for 1125/60/2:1 and 1250/50/2:1 HDTV studio signals“

Die zur Übertragung verwendeten Glasfasern müssen dem Standard ANSI/EIA/TIA-492 entsprechen. Für HDTV-Studiosignale gemäß ITU-R BT.1120 dürfen nur Singlemodedfasern verwendet werden.

Der Empfänger muss gemäß der ITU-Festlegung folgende in der Tabelle 4.2 angegebenen Werte erfüllen.

Glasfasertyp	Singlemode	Multimode
Maximale Eingangsleistung	- 7,5 dBm	- 7,5 dBm
Minimale Eingangsleistung	- 20 dBm	- 20 dBm
Zerstörungsgrenze der Empfängerdiode	Mindestens + 1 dBm	Mindestens - 4 dBm
Jitter	Der Jitter ist in der elektrischen Ebene spezifiziert	

Tabelle 4.2: Spezifikationen für den optischen Empfänger entsprechend Empfehlung I-TU-R BT.1367

ITU-T legt Standards für den Telekommunikationsbereich fest. In den Empfehlungen der G-Serie „Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks“ findet man unter anderem Spezifikationen und Testmethoden von LWL-Systemen für den Weitverkehrsbereich.

3.4.2 SMPTE-Spezifikationen

Für die optische Übertragung von seriellen digitalen Videosignalen wurde der SMPTE-Standard ANSI/SMPTE 297M „Serial Digital Fiber Transmission System for ANSI/SMPTE 259M Signals“ erarbeitet. Die in diesem Standard niedergelegten Spezifikationen übernahm die ITU zum großen Teil: Die Spezifikationen des optischen Empfängers sind identisch, während die des optischen Senders bei den Parametern „Steig- und Fallzeit“ ($< 1,5$ ns (20% zu 80%), Differenz $< 0,5$ ns) sowie „Jitter“ (maximal 0,135 unit intervals) auch in der optischen Ebene beschrieben werden.

3.4.3 Sicherheitsfestlegungen (Augenschutz)

Die Laserstrahlung ist extrem gut gebündelt und gleichzeitig sehr energiereich. Deshalb kann von Lasergeräten eine große Gefahr für das menschliche Auge (und auch für die Haut) ausgehen. Die für das menschliche Auge maximal zulässige Laserleistung ist abhängig von der Wellenlänge und beträgt 0,44 mW für 850 nm, 8,85 mW für 1300 nm und 10 mW für 1550 nm. Diese Wellenlängen liegen im unsichtbaren Bereich, und deshalb ist ein Blick in die Faser bei zu hoher Lichtleistung besonders gefährlich.

Nach vielen Experimenten wurden deshalb auf der ersten Konferenz für Lasersicherheit (Cincinnati 1968) Grenzwerte maximal zulässiger Bestrahlung (MZB-Werte) festgelegt. Die MZB-Werte wurden erstmalig in einer ANSI-Norm (American National Standards Institute) veröffentlicht. Seit 1984 gibt es die internationale Norm IEC 60825, in der zusätzlich zu den MZB-Werten auch die Grenzwerte der Laserklassen spezifiziert sind. Seither wurden die Grenzwerte mehrfach verfeinert und korrigiert. Die MZB-Werte wurden auch in die Unfallverhütungsvorschrift VBG 93 übernommen.

Anmerkung: Für das Jahr 2001 ist eine Revision der Norm IEC 60825 angekündigt.

Die mögliche Gefährdung an jeder beliebigen zugänglichen Stelle innerhalb eines LWL-Übertragungssystems wird als **Gefährungsgrad** bezeichnet. Er beruht auf dem Pegel an optischer Strahlung, der unter vernünftigerweise vorhersehbaren Umständen, z. B. ein Lichtwellenleiterbruch, zugänglich werden könnte. Er steht in engem Zusammenhang mit der Laser-Klassifikation nach IEC 60825 (EN 60825).

Laser werden je nach Gefährungsgrad in 5 verschiedene Klassen eingeteilt:

- Klasse 1: Unter vernünftigerweise vorhersehbaren Umständen sicher
- Klasse 2: Sichtbare Laser, Sicherheit durch Lidschlussreflex.
- Klasse 3A: Sicherheit wie in den Klassen 1 und 2.
Benutzung optischer Instrumente kann gefährlich sein.
- Klasse 3B: Gefährdung durch direkten und reflektierten Strahl
- Klasse 4: Gefährdung durch direkten, reflektierten und gestreuten Strahl

Hersteller von LWL-Übertragungssystemen sind verantwortlich für die Festlegung des Gefährungsgrades des verwendeten optischen Strahlungssystems und der dafür erforderlichen Kennzeichnungen.

Je nach Verwendungsort und Gefährungsgrad müssen LWL-Übertragungssysteme unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Dabei sind folgende Verwendungsorte zu unterscheiden:

- Uneingeschränkter Zugang:
z.B. Wohnung, öffentliche Bereiche
- Eingeschränkter Zugang:
z.B. Büros, Industriegelände, Studiobereiche

- Kontrollierter Zugang:
z.B. Kabelkanäle, Erdkabel, Unterwasserkabel, Verteilergehäuse.
Gekennzeichnet durch Warnschilder und Gefährdungsgrad.
Zutritt nur für ausgebildetes Personal.

Die nachfolgende Tabelle 4.3 gibt abhängig vom Gefährdungsgrad (Schutzklasse) Auskunft über die

Gefährdungsgrad	Art des Verwendungsorts		
	Uneingeschränkt	Eingeschränkt	Kontrolliert
1	keine Anforderung	keine Anforderung	keine Anforderung
2	Beschilderung	Beschilderung	Beschilderung
3A	Beschilderung und Klasse 1 am Stecker oder Werkzeug	Beschilderung	Beschilderung
k x 3A	nicht zulässig	Beschilderung, gesch. Kabel und 3 A oder Werkzeug	Beschilderung und geschütztes Kabel
3B	nicht zulässig	nicht zulässig	Beschilderung; k x 3 A oder Werkzeug
4	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
<u>Anmerkung:</u> Der Gefährdungsgrad k x 3A wurde eingeführt, um die Gefährdung durch einen Blick auf den Lichtwellenleiter realistischer zu beschreiben. Der Ausdruck k x 3A wird verwendet, um anzuzeigen, dass der Gefährdungsgrad von k x 3A größer ist als der von 3A. Zu Einzelheiten siehe EN 60825.			

Tabelle 4.3: Erforderliche Maßnahmen zur Kennzeichnung bzw. Zulässigkeit des Einsatzes von LWL-Übertragungssystemen in Abhängigkeit vom Gefährdungsgrad

erforderlichen Maßnahmen zur Kennzeichnung bzw. Zulässigkeit des Einsatzes von LWL-Übertragungssystemen.

Kennzeichnung:

Lichtwellenleiter müssen entsprechend gekennzeichnet sein, um sie von anderen Kabeln unterscheiden zu können.

An jeden optischen Verbinder ist eine Hülse, ein Anhänger oder Band anzubringen, wenn die zugängliche Strahlung an diesem Verwendungsort über dem der Gefährdungsklasse 1 liegt. Die Hülse, der Anhänger oder das Band müssen gelb sein und mit dem Warnzeichen nach Bild 14 der IEC 60825-1 und dem Gefährdungsgrad entsprechend der erklärenden Beschriftung nach Bild 15 der IEC 60825-1 versehen sein. (Bild 4.1)



Bild 4.1: Warnzeichen und Beschriftung für den Gefährdungsgrad

Gruppen von Kabelverbindern, wie beispielsweise Steckerfelder, dürfen als Gruppen mit nur einem einzigen, deutlich sichtbaren Warnschild entsprechend der örtlichen Gefährdung beschildert sein anstelle der getrennten Beschilderung jedes einzelnen Kabelverbinders. Wenn eine Gruppe von Kabelverbindern in einem geschlossenen Gehäuse untergebracht ist, muss das Warnschild sowohl vor als auch nach Öffnen einer Abdeckung deutlich sichtbar sein. Dies kann ein weiteres Warnschild erforderlich machen.

3.5 Messungen an LWL-Systemen

Bei Messungen an LWL-Systemen ist immer **große Vorsicht** geboten. Entsprechend Empfehlung ITU-R BT.1367 beträgt die Ausgangsleistung (Mittelwert) von Sendesystemen in der Videotechnik max. -7,5 dBm. Dies entspricht einer Ausgangsleistung von ca. 180 μ W. Die Laserdioden für die Übertragung von optischen Signalen arbeiten fast ausschließlich in den optischen Fenstern 850 nm, 1300 nm und 1550 nm. Damit ist diese Laserstrahlung **unsichtbar**. Im Gegensatz zur Nahverkehrstechnik (Netzwerke oder LWL im Studio) werden in der Weitverkehrstechnik Laserdioden mit bis zu 500 mW optischer Ausgangsleistung eingesetzt, die ebenfalls unsichtbare Strahlung abgeben. In diesem Fall würde die Laserstrahlung beim Einfall in das menschliche Auge die Netzhaut zerstören.

Beim Umgang mit LWL-Systemen sollte daher nie direkt in eine Faser hineingesehen werden. Es empfiehlt sich, bei Messungen an Lichtwellenleitersystemen einen einfachen optischen Signalindikator (oder auch ein Leistungsmessgerät) zu verwenden, womit sofort nachgewiesen werden kann, ob Strahlung emittiert wird.

3.5.1 Elektro-optische Wandler (Sendeseite)

Für die Übertragung von Videosignalen über Glasfaser werden Konverter verwendet, die SDI-Signale in die optische Ebene und wieder zurück in die elektrische Ebene wandeln. Die Messungen an den Konvertern gliedern sich daher in einen elektrischen und einen optischen Bereich.

Für die Messungen der elektrischen Ein- und Ausgänge der Konverter gelten die Festlegungen, die in diesem Handbuch in Kapitel 1: Messtechnik für digitale Videosignale beschrieben sind.

3.5.1.1 Augendiagramm

Auch im optischen Bereich können viele Messungen anhand des Augendiagramms durchgeführt werden. Dies ist vergleichbar mit dem Augendiagramm des SDI-Signals in der elektrischen Ebene. Im Bild 5.1 ist ein optisches Augendiagramm zusammen mit den zulässigen Bereichen der Laserausgangsleistung entsprechend Empfehlung ITU-R BT.1367 dargestellt. Das Augendiagramm gilt beispielhaft für eine mittlere optische Ausgangsleistung von -12 dBm und ein Extinction ratio von 5:1. Die im Bild 5.1 grau unterlegten Felder zeigen die zulässigen Bereiche - bei Extinction ratios zwischen 5:1 und 30:1 - für logisch „High“ und „Low“ in Abhängigkeit von der mittleren optischen Ausgangsleistung. Diese darf nach Empfehlung ITU-R BT.1367 zwischen -12 dBm und -7,5 dBm liegen.

Zur Darstellung des optischen Augendiagramms auf einem Oszilloskop müssen die optischen Signale ohne Regenerierung direkt in elektrische Signale umgewandelt werden.

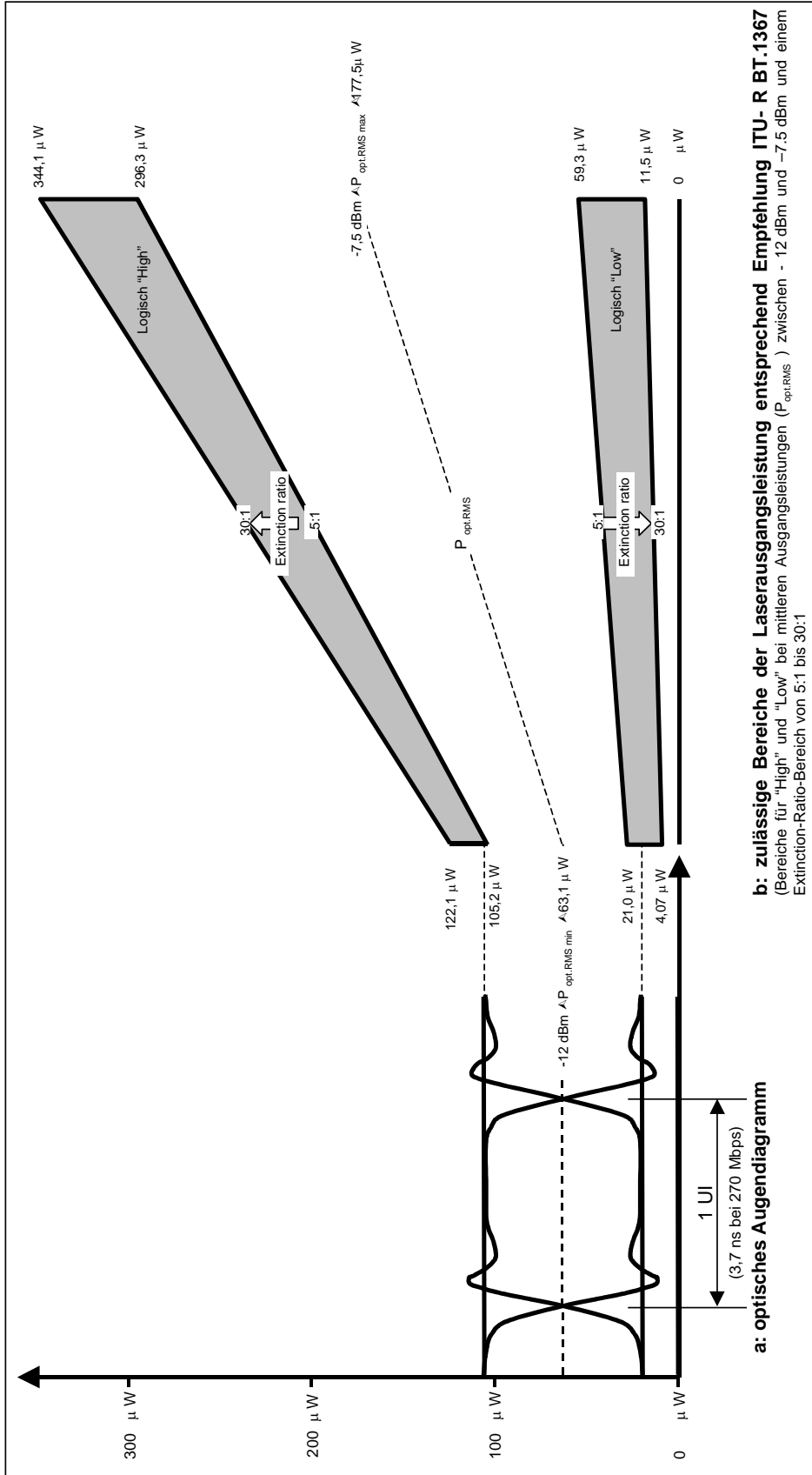


Bild 5.1: „Optisches“ Augendiagramm (a) und zulässige Bereiche (b) für die Ausgangsleistung eines Lasers entsprechend Empfehlung ITU-R BT.1367

Im Augendiagramm können folgende Kenngrößen gemessen werden:

- Spannungswerte für logisch „High“ und „Low“ (zur Berechnung des Extinction ratio)
- Größe der Über- und Unterschwinger.

Die Messung des optischen Augendiagramms erfolgt mit Hilfe eines besonderen Tastkopfes, in dem eine Empfängerdiode zur opto-elektrischen Wandlung eingebaut ist. Bei der Verwendung dieser Messköpfe ist darauf zu achten, dass der DC-Anteil vom Messkopf nicht ausgekoppelt wird, da in diesem Fall eine Messung des Extinction ratio und Leistungsmessungen anhand des Augendiagramms nicht möglich sind. Jeder aktive Messkopf besitzt eine eigene wellenlängenabhängige Kennlinie (Bild 5.2), die bei der Umrechnung der gemessenen Spannungen in optische Leistungen berücksichtigt werden muss.

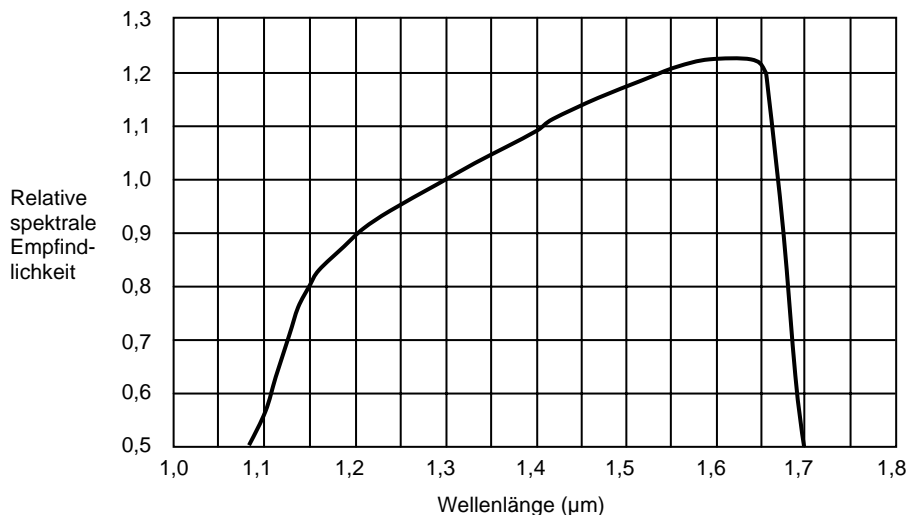


Bild 5.2: Wellenlängenabhängige Kennlinie eines Messkopfes zur opto-elektrischen Wandlung

Für die Berechnung der optischen Ausgangsleistungen eines Senders müssen die jeweils ermittelten Spannungswerte mit dem Umrechnungsfaktor des Tastkopfes in entsprechende Leistungswerte P_{opt} umgerechnet werden. Die optische Ausgangsleistung in dBm ($L_{dBm_{opt}}$) berechnet sich aus der ermittelten optischen Ausgangsleistung P_{opt} , wie folgt:

$$L_{dBm_{opt}} = 10 * \log \frac{P_{opt}}{1 \text{ mW}}$$

(P_{opt} in mW)

Da die übertragenen SDI-Signale ein Tastverhältnis von annähernd 1:1 aufweisen, kann die Berechnung der mittleren optischen Ausgangsleistung P_{optRMS} über den Mittelwert der gemessenen Spannungen erfolgen.

3.5.1.2 Extinction ratio

Das Auslöschungsverhältnis („Extinction ratio“) beschreibt das Verhältnis von maximaler zu minimaler optischer Leistung. Laser werden oberhalb eines Schwellstromes betrieben, um schnelle Schaltzeiten und gute Linearität zu erzielen (siehe Abschnitt 2.1.2). Durch den Arbeitspunkt oberhalb des Schwellwertes emittiert der Laser auch bei einem logischen „Low“-Signal ein optisches Signal. Auch LEDs können diesen Effekt zeigen, wenn sie mit einem Vorstrom betrieben werden. Diese optische Grundleistung kann die Empfindlichkeit des Empfängers einschränken und ist daher zu begrenzen. Je nach Fasertyp wird in der Videotechnik ein „Extinction ratio“ von 5:1 bis 30:1 vorgeschrieben. Das hat zur Folge, dass die optische Grundleistung zwischen 4 μW und 59 μW liegen kann (siehe Bild 5.1).

Mehrfachflanken im Augendiagramm können ihre Ursache in einem zu geringen „Extinction ratio“ haben. In diesem Fall wird die Laserdiode im unteren Grenzbereich betrieben.

Im Zusammenhang mit dem „Extinction ratio“ sollte die optische Übertragungstrecke auch mittels pathologischer Signale überprüft werden. Siehe dazu auch Abschnitt 3.2.1.2 „Optische Sender mit Laserdioden“.

3.5.1.3 Jitter

Der Jitter wird auch in optischen Übertragungssystemen durch Jitteramplitude und Jitterfrequenz beschrieben. Der Ausgang von elektro-optischen Wandlern ist in der Regel mit Jitter behaftet. Bei einer Kaskadierung der Systeme akkumuliert sich dieser Jitter. Besonders in der Weitverkehrstechnik, wo z.B. kaskadierte Repeater notwendig sind, ist das Verhältnis von Eingangs- zu Ausgangsjitter (Jitterübertragungsfunktion) von großer Bedeutung. Im Bereich lokaler Netze ist der durch die optische Wandlung hervorgerufene Jitter im allgemeinen vernachlässigbar gegenüber dem „elektrischen“ Jitter.

Der absolute Jitterwert des digitalen Videosignals nach der elektro-optischen Wandlung kann nach einer Rückwandlung beispielsweise mit einem digitalen Videoanalysator gemessen werden. Dazu siehe Kapitel 1: Messtechnik für digitale Videosignale, Abschnitt 1.5.2.2)

3.5.1.4 Spektrum und Leistung des Sendesignals

Neben der Auswertung des Augendiagramms ist bei optischen Sendern das Spektrum von großer Bedeutung. Das Spektrum von LWL-Sendern kann mit einem optischen Spektrumanalysator gemessen werden und wird vor allem durch zwei Parameter beschrieben: Betriebswellenlänge (center wavelength) und spektrale Breite (spectral width). Die Ausgangsleistung ergibt sich aus der Integration der Spektralanteile und wird vom optischen Spektrumanalysator angezeigt.

Bild 5.3 zeigt das Spektrum eines optischen Senders. Gemessen und angegeben werden:

- Verlauf des Spektrums
- Betriebswellenlänge
- Leistungshalbwertsbreite (FWHM)
- Ausgangsleistung

Betriebswellenlänge und optische Ausgangsleistung sind im allgemeinen temperaturabhängig (siehe Bild 2.4). Aus diesem Grund ist die Umgebungstemperatur bei den Messungen anzugeben.

Die spektrale Analyse der Sendesysteme ist insbesondere dann wichtig, wenn diese im Wellenlängenmultiplex betrieben werden. Beim DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) unterscheiden sich die Wellenlängen der verwendeten Laser teilweise um weniger als 1 nm, sodass es bei falscher Abstimmung der Laser zu Übertragungsstörungen kommt.

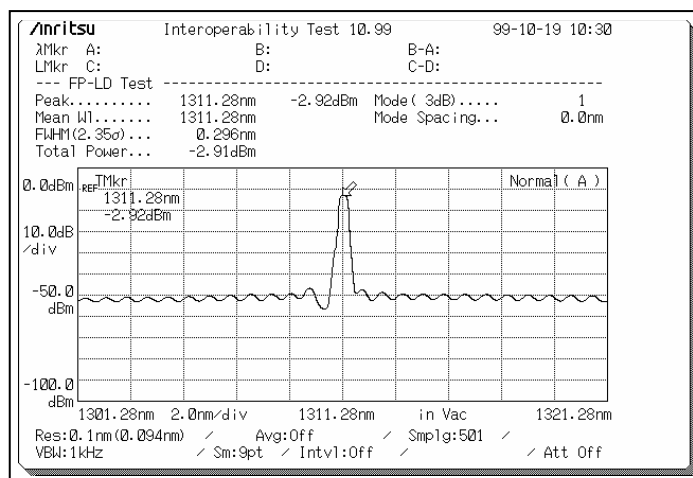


Bild 5.3: Gemessenes Spektrum eines optischen Senders (DFB-Laser)

3.5.1.5 Temperatur- und Einlaufverhalten

Wie in Abschnitt 3.2.1.2 erläutert, sind die Sendeleistung, die Frequenz und der spektrale Verlauf des optischen Signals einer Laserdiode sehr temperaturabhängig. Aus diesem Grund sollte auch das Temperaturverhalten des Wandlers auf die Einhaltung der Angaben aus den Spezifikationen überprüft werden.

Da optische Sender zum Teil so ausgelegt sind, dass der elektro-optische Wandler bei fehlendem Eingangssignal abschaltet, sollte ebenso das Einlaufverhalten bei kurzzeitigen Ausfällen des Videosignals oder der Netzspannung unter Berücksichtigung der Systemanforderungen geprüft werden.

3.5.2 LWL-Kabel und Glasfasern

Bei der Messung einer Lichtwellenleiterstrecke interessiert in erster Linie die Streckendämpfung. Diese Messung ist die Basis für die Bestimmung aller Verluste einer optischen Übertragungsstrecke. Außerdem sind die Lage und die Auswirkung von Störungen - z.B. Faserbrüche, Spleiße aber auch Steckverbindungen - von Interesse.

Für die Ermittlung der Streckendämpfung kann ein optischer Leistungsmesser verwendet werden: Am Beginn der Faser wird eine definierte Lichtleistung eingespeist und am Ende der Faser der Ausgangspegel gemessen. Dafür gibt es batteriebetriebene Sender und Empfänger für die üblichen Wellenlängen 850, 1300, 1310 und 1550 nm. Da neben Kopplungsfehlern auch Wellenlängenkalibrierungsfehler auftreten, liefern diese Messungen keine exakten Ergebnisse.

Insbesondere bei Langstreckenmessungen mit mehreren Kopplungen sollte die Dämpfungsmessung mit einem Rückstreuungsmessgerät (OTDR: **O**ptical **T**ime **D**omain **R**eflectometer) durchgeführt werden. Im Gegensatz zu den reinen Durchgangs- und Dämpfungsmessgeräten kann man mit einem OTDR die Länge und den Dämpfungsverlauf einer LWL-Strecke messen, sowie die örtliche Lage von Störstellen ermitteln.

Im OTDR sendet eine Laserdiode einen Lichtimpuls über einen Strahlenteiler mit Einkoppeloptik in die LWL-Strecke (Bild 5.4). Das durch Rayleigh-Streuung und andere Faktoren zurückkommende Licht wird im OTDR über den Strahlenteiler auf einen Detektor umgelenkt. Nach der Signalverarbeitung wird ein neuer Lichtimpuls ausgesendet.

Das OTDR rechnet die Intensität des zurückkommenden Lichtes über die Zeit in einen Rückstreuverlauf längs der LWL-Strecke um. Aus dem Rückstreuverlauf kann man den Dämpfungsverlauf sowie Ort und Größe von Störstellen erkennen. Für eine möglichst genaue Ortsbestimmung muss dem OTDR der exakte Brechungsindex der Faser bekannt sein.

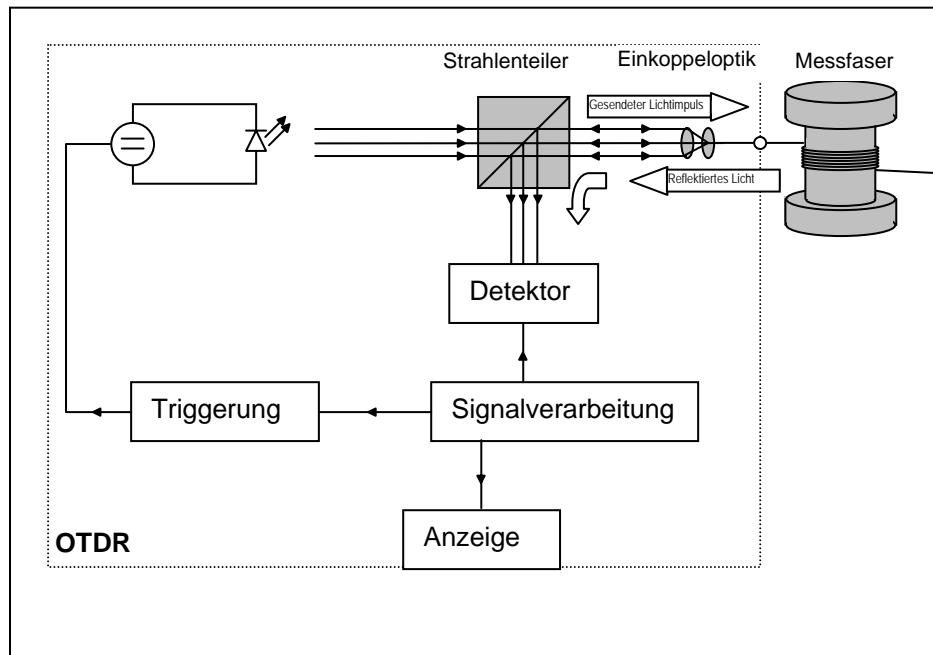


Bild 5.4: Blockschaltbild eines optischen Reflexionsmessgerätes (OTDR – Optical Time Domain Reflectometer)

Da die Streuung in heutigen Fasern stetig reduziert wird, muss ein OTDR mit sehr geringen Rückstreupegeln arbeiten.

3.5.2.1 Messungen mit dem OTDR

Bei der OTDR-Messung muss zwischen der Messung von Multimode- und Singlemodedfasern unterschieden werden, da die Multimodefaser gegenüber der Singlemodefaser eine größere numerische Apertur hat. Aus diesem Grund haben universelle OTDRs zwei verschiedene Sendesysteme und Empfangssysteme.

Um die LWL-Strecke vollständig zu erfassen, also einschließlich der Verbindungselemente am Anfang und Ende der Übertragungsstrecke, müssen sogenannte Vor- und Nachlauf Fasern eingefügt werden.

In Bild 5.5 wird eine Nachlauf faser mit einem schräggeliffenen Stecker als „Sumpff“ verwendet, damit Reflexionen am Ende der Nachlauf faser möglichst vermieden werden. Der Sumpff kann durch eine abgeschrägte Stirnfläche der Nachlauf faser erzielt werden, da hier das Licht zum Mantel hin abgelenkt wird.

Bei der Messung einer LWL-Strecke mit einem OTDR erhält man Informationen über

- reflektierende Ereignisse
- nichtreflektierende Ereignisse
- Dämpfungsverlauf
- Faserlängen.

Reflektierende Ereignisse

Reflektierende Ereignisse werden vom OTDR durch einen steilen Impuls verbunden mit einem Pegelsprung der Rückstreuung dargestellt und durch die örtliche Lage, Dämpfung sowie Größe der Reflexion beschrieben. Reflektierende Ereignisse führen in Lichtwellenleitern zu Überlagerungen mit dem Nutzsignal, was zu einer Erhöhung der Bitfehlerrate führen kann.

Ursache für Reflexionen in Lichtwellenleitersystemen sind die Abweichungen der Brechungsindizes längs der LWL-Strecke. Dies tritt vor allem in Steckverbindern und Spleißen auf.

Bei der Messung eines reflektierenden Ereignisses kommt es kurzzeitig zu einer Übersteuerung des OTDR-Empfängers. Für diesen Moment ist der Empfänger durch die starke Reflexion „blind“. In dieser „Totzeit“ werden nichtreflektierende Ereignisse vom OTDR nicht wahrgenommen, weil die Reflexion diese verdeckt. Einige OTDRs verfügen aber über ein optisches „Masking“, d.h. bei einer weiteren Messung wird das reflektierende Ereignis unterdrückt. Damit kann die Totzeit verkürzt werden, so dass ein Ereignis direkt hinter einer Reflexion wieder sichtbar wird.

Nichtreflektierende Ereignisse

Nichtreflektierende Ereignisse führen in der OTDR-Darstellung nur zu einer Dämpfung der Rückstreuung. Typisch für ein nichtreflektierendes Ereignis sind Spleiße, spezielle Steckverbindungen und starke Biegungen des LWL.

Die Unterscheidung von Spleiß- und Biegeverlusten kann nur mit der Messung bei zwei unterschiedlichen Wellenlängen erfolgen. Bei 1550nm ist die Dämpfung an einer Biegung größer als bei 1310nm, während sich Spleißverluste gegensätzlich verhalten.

Problematisch ist die exakte Lokalisierung nichtreflektierender Ereignisse. Je länger die zu messende Faser ist, desto ungenauer werden die Messergebnisse, da sich das Signal/Rausch-Verhältnis zunehmend verschlechtert. Aus diesem Grund verfügen OTDRs in der Regel über eine Tiefpassfilterung zur Rauschreduzierung, um die Dynamik des Messgerätes zu erhöhen.

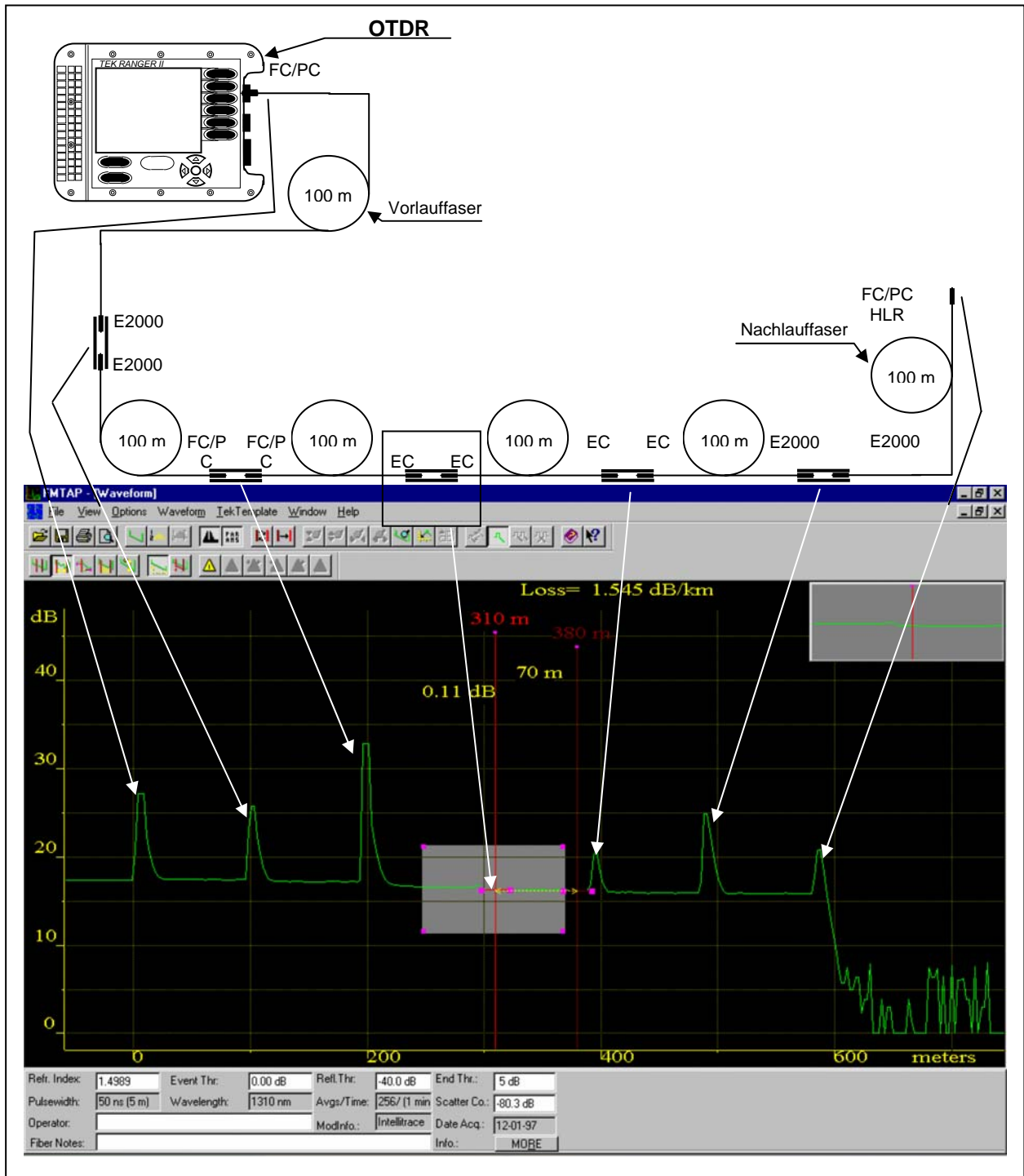


Bild 5.5: Beispiel einer LWL-Strecke mit dazwischenliegenden Steckverbindungen (oben) und dazugehörigem OTDR-Diagramm (unten)

Eine weitere Möglichkeit zur Dynamikerweiterung ist die Vergrößerung der Breite des gesendeten Lichtimpulses. Dadurch wird die Lichtenergie erhöht und das Signal/Rausch-Verhältnis verbessert. Nachteilig ist jedoch die Verlängerung der „Totzeit“ des OTDR.

Eine zusätzliche Möglichkeit zur Erhöhung der Dynamik ist die Mittelwertbildung. Dabei wird über mehrere Messungen mit gleicher Impulsbreite gemittelt. Um beispielsweise die Empfindlichkeit von 10 dB auf 15 dB zu erhöhen, muss bei der Mittelwertbildung die Anzahl der Messungen von 100 auf 10.000 erhöht werden.

Dämpfungsverlauf

Das OTDR zeigt neben besonderen Ereignissen auch den Dämpfungsverlauf der gesamten LWL-Strecke. Um den Dämpfungsverlauf der LWL-Strecke definiert zu bestimmen, wird eine Vor- und Nachlaufaser verwendet. Mit Hilfe der Cursor kann in der OTDR Darstellung die Streckendämpfung ermittelt werden. Außerdem berechnet das OTDR aus der Neigung des Dämpfungsverlaufes den Dämpfungskoeffizienten (dB/km) der Faser.

Zeigt der Dämpfungsverlauf unterschiedliche Neigungen, deutet dies auf unterschiedliche Fasertypen längs der gemessenen LWL-Verbindung hin.

Eine typische Dämpfung für heutige LWL-Fasern (Singlemode) beträgt 0,35 dB/km bei einer Wellenlänge von 1310 nm oder 0,25 dB/km bei 1550 nm.

Faserlängen

Die Distanzmessung der LWL-Strecke beruht auf der Umrechnung der Laufzeit des Lichtes in Verbindung mit dem Brechungsindex der Faser. Die Länge der LWL-Strecke wird ähnlich wie bei der Dämpfungsmessung mittels der Cursor des OTDR abgelesen. Für definierte Start- und Endpunkte dienen die Übergänge zur Vor- bzw. Nachlaufaser.

Damit das OTDR die Faserlänge genau ermitteln kann, muss der Brechungsindex der Faser bei der vom OTDR verwendeten Wellenlänge bekannt sein und am Gerät eingestellt werden.

Die Ermittlung des Brechungsindex bei der verwendeten Wellenlänge kann durch die Messung des gleichen Fasertyps definierter Länge erfolgen.

Messfehler des OTDRs

Mit zunehmender Entfernung (> 5 km) eines zu messenden Ereignisses steigt der Messfehler des OTDRs, weil sich das Signal/Rausch-Verhältnis verschlechtert. Zeigt die OTDR-Darstellung, dass das zu messende Ereignis in der zweiten Hälfte der LWL-Strecke liegt, empfiehlt sich eine weitere Messung von der anderen Seite, um den Messfehler zu minimieren.

Jedes reflektierende Ereignis führt prinzipiell zu Mehrfachreflexionen (Echos), die in der OTDR-Darstellung sichtbar werden können. Durch eine weitere Messung von der anderen Seite der LWL-Strecke können diese Reflexionen eindeutig erkannt werden.

Bei der Messung von Dämpfungen wird die Messgenauigkeit durch die vorgegebene Amplitudenauflösung (Quantisierung) des OTDR begrenzt. Liegt ein nichtreflektierendes Ereignis in der Größenordnung einer Quantisierungsstufe (z.B. bei weit entfernten Ereignissen), so wird dieses Ereignis durch das Quantisierungsrauschen verdeckt.

3.5.3 Opto-elektrische Wandler (Empfangsseite)

Die exakte Ermittlung der optischen Eigenschaften des opto-elektrischen Wandlers kann nur mit einem optischen Sender unter Auswertung der elektrischen Signale am Ausgang des optischen Empfängers erfolgen. Dabei müssen die Eigenschaften des optischen Senders genau bekannt sein.

Eingangsempfindlichkeit

Um die Eingangsempfindlichkeit des optischen Empfängers ermitteln zu können, müssen sowohl die optische Sendeleistung des Senders als auch dessen Wellenlänge bekannt sein.

Am Markt werden derzeit verschiedene durchstimmbare optische Sender angeboten, die sich für die Messung der Eingangsempfindlichkeit prinzipiell eignen. Wegen der relativen Breitbandigkeit der meisten optischen Empfängererelemente (siehe auch Bild 2.20) und der nachfolgenden elektrischen Treiberschaltungen, die für die Übertragung von seriellen digitalen Videosignalen ausgelegt sind, ist der Aufwand eines derartigen durchstimmbaren optischen Senders im allgemeinen nicht vertretbar.

Als Alternative bietet sich die Messung mit einem in der Praxis verwendeten Sender an. Dabei wird zunächst dessen optische Ausgangsleistung mit einem Leistungsmessgerät oder besser mit einem optischen Spektrumsanalysator gemessen. Zur Ermittlung der Empfängerempfindlichkeit wird die Sendeleistung mit optischen Dämpfungsgliedern so stark bedämpft, bis der optische Empfänger das Eingangssignal gerade noch fehlerfrei verarbeiten kann. Die optische Empfindlichkeit (bei der Senderwellenlänge) ergibt sich aus der Ausgangsleistung des verwendeten optischen Senders, reduziert um die eingeschleifte Dämpfung.

Als Eingangssignale werden für diese Messung SDI-Testsignale (SDI-Checkfield, Farbbalken u.ä.) benutzt und am Ausgang des optischen Empfängers mit entsprechenden Messgeräten überprüft (siehe Bild 5.6).

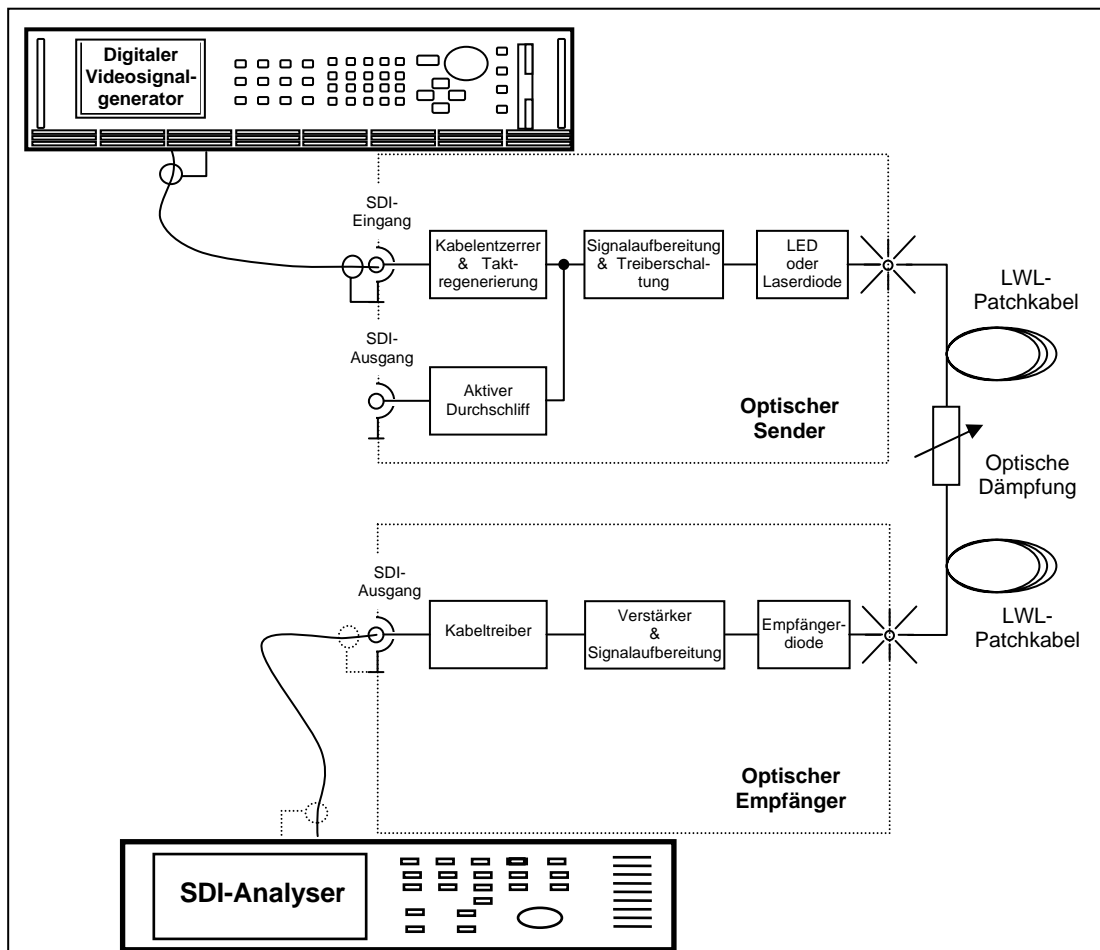


Bild 5.6: Blockschaftbild für die Messung der Eingangsempfindlichkeit von optischen Empfängern

Spektrale Empfindlichkeit

Die spektrale Empfindlichkeit (wichtig bei Wellenlängenmultiplextechnik) kann mit dem bereits erwähnten durchstimmbaren optischen Sender ermittelt werden. Analog zu dem vorher beschriebenen Verfahren wird dazu bei verschiedenen Wellenlängen gemessen.

Übersteuerbarkeit

Die Messung der Übersteuerbarkeit erfolgt ähnlich wie die Überprüfung der Eingangsempfindlichkeit. Voraussetzung ist eine ausreichend hohe Ausgangsleistung des Senders, die durch das optische Dämpfungsglied entsprechend bedämpft wird. Die Dämpfung wird schrittweise verringert bis der optische Empfänger das Eingangssignal gerade noch fehlerfrei verarbeiten kann. In jedem Fall ist darauf zu achten, dass die vom Hersteller angegebene maximale optische Eingangsleistung, die zur Zerstörung des optischen Eingangelementes führen kann, nicht überschritten wird.

Elektrische Ausgangsparameter

Da bei den optischen Empfängern nur der optische Eingang und elektrische Ausgänge zur Verfügung stehen, können nur noch die aufbereiteten elektrischen Signale analysiert werden.

Handbuch der Fernsehsystemtechnik

Fernsehsystemtechnik

Ausgabe vom März 2001

3.5

Blatt 12

Dienen diese LWL-Systeme zur Übertragung von SDI-Signalen, kann nach der opto-elektrischen Wandlung nur noch in der SDI-Ebene gemessen werden. Die Parameter müssen den SDI-Spezifikationen entsprechen und sind gemäß Kapitel 1 „Messtechnik für digitale Videosignale“ zu ermitteln.

3.6 LWL-Systeme in der Fernsehproduktionstechnik

Die derzeitige Fernsehstudioteknik ist in den unterschiedlichsten Technologien ausgeführt. In der Videosignalverarbeitung findet man sowohl noch die analoge Form (PAL, RGB, Y/Cb/Cr), als auch die digitale Technologie SDI (Seriell digitales Interface) auch DSC (Digitale Serielle Komponenten) genannt. Weiterhin wird zukünftig noch die SDTI-Technik (Seriell digitales Transport-Interface) Einzug halten, die in der physikalischen Form mit der SDI-Technik kompatibel ist.

In der Audiosignalverarbeitung wird, wie in der Videotechnik, mit analogen wie auch mit digitalen Signalen (nach dem AES/EBU-Standard) gearbeitet. Digitale Audiosignale lassen sich zeitkomprimiert als Datenpakete auch in ein SDI-Signal eintasten („Embedded Audio“).

In Studios werden derzeit fast ausschließlich Kupferkabel verwendet. Für einige Anwendungen bietet die LWL-Technik jedoch Vorteile. Die Hauptvorteile liegen in der großen Übertragungsbandbreite (Datenraten bis zu 10 Gbit/s), der geringen Dämpfung bei langen Strecken, der Potenzialtrennung und der absoluten Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen. Der geringe Platzbedarf und das niedrige Gewicht der LWL-Verkabelung können für einige Anwendungen zusätzlich von großem Vorteil sein.

So lassen sich z.B. analoge Videosignale oder SDI-Signale auch mit „embedded Audio“ ohne Zwischenverstärkung über Strecken von mehreren Kilometern übertragen. Die zu übertragenden SDI-Signale werden ohne Umcodierung direkt in die optische Form mittels elektro-optischen Wandlern (LED- oder Laserdiodenmodulatoren) konvertiert, auf der Glasfaser übertragen und auf der Empfangsseite über einen opto-elektrischen Wandler wieder in die elektrische Form umgesetzt (siehe Bild 6.1). Diese Signalform stellt dann bereits die digitale Schnittstelle zu den fernsehtechnischen Geräten dar. Denkbar (und schon vereinzelt realisiert) sind auch direkte optische Schnittstellen an fernsehtechnischen Geräten.

Innerhalb eines Studios kommt die LWL-Technik z.B. in Audio- Schalt- und Übertragungssystemen zum Einsatz. In einem Basisgerät werden über Eingangs-Baugruppen bis zu 256 Audiokanäle mit einem Zeitmultiplexverfahren (Time Division Multiplex TDM) auf einem Datenbus übertragen. Die Information in den 256 Zeitschlitzen des Datenbusses kann bei Bedarf mit Ausgangs-Baugruppen wieder ausgelesen werden. So kommen auch LWL-Verbindungskarten zum Einsatz, die die Signale aus den Zeitschlitzen auslesen und sie per Glasfaser an die LWL-Verbindungskarten anderer Basisgeräte übertragen. Die Basisgeräte sind über ein Duplex-LWL-Kabel verbunden und können in jede Richtung bis zu 64 Audiokanäle übertragen. Die LWL-Verbindung kann bis zu 5000 Meter lang sein.

Es existieren auch bereits Studioinstallationen, bei denen LWL-Kabeln im Wellenlängenmultiplex betrieben werden. Dabei werden in benachbarten Wellenlängenbereichen gleichzeitig digitale und/oder analoge Signale übertragen (siehe auch Abschnitt 3.2.3.3.).

Bei der Verlegung von LWL zwischen Studiokomplexen sollten aus ökonomischen Gründen jeweils Adernbündel im armierten Kabel verlegt werden um ggf. für Erweiterungen Reserven zu haben oder bei Ausfall einer Ader auf eine Ersatzader im selben Kabel umzuschalten zu können. Als Fasertyp ist die Monomodefaser wegen ihrer geringen Dämpfung am besten geeignet.

Die verwendete Steckverbindertechnik ist meistens durch die Gerätehersteller vorgegeben. Dies kann zu Konflikten führen, wenn einheitliche LWL-Stecker im gesamten Studiobereich gefordert werden (z.B. E 2000 oder SC). Eine Festlegung bzw. Normung der Steckverbindungstechnik für den Studioeinsatz wäre deshalb sinnvoll. Entsprechende Aktivitäten gibt es derzeit bei der SMPTE (siehe 3.8 Literaturhinweise).

Bei der Wahl des Lichtemitters ist aus heutiger Sicht der Laserdiode der Vorzug zu geben. Durch die Weiterentwicklung der Glasfaser steht bei Wellenlängen um 1550 nm und 1625 nm ein sehr dämpfungsarmer Bereich zur Verfügung, der mit sehr schmalbandigen Laserdioden genutzt werden kann.

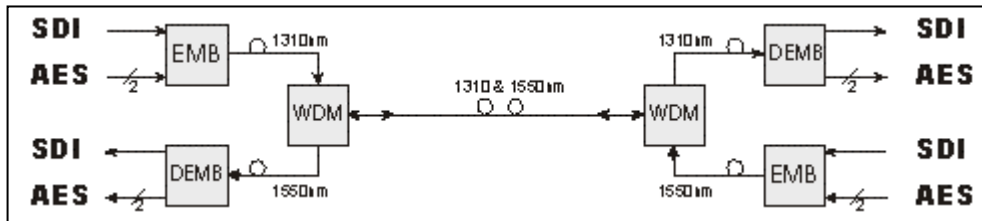


Bild 6.1: Beispiel für eine mögliche Anwendung von LWL-Systemen im Studio

3.7 Messgeräte und Messhilfsmittel

Die für die Installation, Wartung und Instandsetzung von LWL-Übertragungssystemen erforderlichen Messgeräte und Hilfsmittel unterscheiden sich unter anderem durch:

- Einsatzmöglichkeiten im Feld oder Labor (Hand-/Tischgeräte)
- Bedienphilosophie
- zu messende Fasertypen (Multimode-/Singlemodefaser)
- Anschlusssystem (Steckertypen)
- zu messende Wellenlängenbereiche
- Pegeldynamik
- Messempfindlichkeit und -genauigkeit
- Speichermöglichkeit von Messwerten
- Möglichkeit der Weiterverarbeitung der Messwerte auf einem externen PC mit entsprechender Software.

Diese Messgeräte lassen sich grundsätzlich in folgende Gruppen aufteilen:

3.7.1 Optoelektrische Wandler

Für die ausschließlich oszilloskopische Darstellung von optischen Signalen ist eine Wandlung von optischen in elektrische Signale erforderlich. Mit Hilfe einer zugehörigen normierten Kennlinie kann ein Umrechnungsfaktor ermittelt werden, der in Kombination mit einem geeigneten Oszilloskop eine direkte Ablesung von optischen Signalparametern (z.B. Leistung, Extinction ratio, Überschwinger, Jitter) am Augendiagramm ermöglicht. Optoelektrische Wandler werden ebenfalls in vielen optischen Messgeräten (OTDR, Leistungsmesser) benutzt.

3.7.2 Lichtquellen (Leistungssender)

Hierunter zählen stabilisierte LED- oder Laserlichtquellen, die als Referenz für Dämpfungsmessungen benötigt werden. Sie sind für verschiedene Wellenlängenbereiche mit festen oder auch regelbaren Ausgangsleistungen erhältlich. Wichtig ist hierbei die Stabilität gegenüber Temperaturschwankungen.

Lichtquellen werden in Verbindung mit einem Pegelmesser auch als „Dämpfungs-Test-Sets“ angeboten.

3.7.3 Pegel-, Dämpfungs- und Reflexionsmesser

Pegelmesser (Power Meter) wandeln Licht in elektrische Signale; die Anzeige der Lichtleistung erfolgt üblicherweise auf Digital-Displays.

Ein optisches **Dämpfungs-Test-Set** (Loss Test Set) besteht aus einem optischen Sender (stabilisierte Lichtquelle mit definiertem Pegel) an einem Ende des LWL und einem Empfänger (Pegelmesser) am anderen Ende des LWL. Über Referenz- und Relativmessung erhält man dann die Dämpfung der Strecke.

Eine Sonderform bilden Gerätesets, die bidirektionale **Dämpfungs- und Reflexionsmessungen** ermöglichen (Return Loss Test Set). Die Reflexionsmessung zeigt die gesamte zum Sender reflektierte Leistung an (im Gegensatz zum Messprinzip des OTDRs).

Pegelmonitore ermöglichen Pegelmessungen im laufenden Betrieb (auch mit zusätzlich einstellbarer Dämpfung) durchzuführen.

Optische Abschwächer (Optical attenuators) benutzt man, um kritische Grenzen der Dämpfung auszutesten.

3.7.4 Reflektometer (Optical Time Domain Reflectometer, OTDR)

Ein Reflektometer dient zur Entfernungs-, Dämpfungs- und Reflexionsmessung eines kompletten LWL-Kabelstranges. Das Grundprinzip ist in Abschnitt 3.5.2.1 beschrieben. Man unterscheidet preiswerte, tragbare Mini-OTDRs und größere, aufwendigere Tischgeräte oder Messsysteme in Modulteknik für Laboranwendungen.

Die erfassten Messwerte werden intern auf Datenträgern gespeichert und/oder über Schnittstellen auf externe Drucker oder Rechner zur weiteren Verarbeitung ausgegeben.

Auswahlkriterien für OTDRs sind:

- Ortsauflösung (Anzeigegenauigkeit einer Längenmessung)
- Dynamik (Sendeleistung und Empfindlichkeit)
- Bedienfreundlichkeit, übersichtliche Darstellung
- Speichermöglichkeit
- standardisierte Schnittstellen zur Übertragung der Messdaten.

3.7.5 WDM/DWDM-Messgeräte

Für die Messung an Wellenlängen-Multiplex-Systemen sind die bisher aufgeführten breitbandigen Geräte nicht oder nur bedingt anwendbar. Gegenüber einkanaligen Systemen ist es wichtig, die exakte Wellenlänge der einzelnen Nutzkanäle messen zu können, da besonders bei einer hohen Anzahl von Kanälen eine geringe Abweichung von der Sollfrequenz Nachbar Kanäle stören könnte. Andere interessierende optische Parameter sind:

- Leistungsverteilung über den gesamten genutzten Wellenlängenbereich
- Kanalabstand, Wellenlängenverschiebung
- Rauschpegel, Signal/Rauschverhältnis.

Als Messgeräte kommen hier optische Spektrumanalysatoren, Wellenlängen-Messgeräte und Kanalanalysatoren zum Einsatz.

3.7.6 Sonstige Hilfsmittel

- Kleine **Lasersender** (Laserpointer) dienen zur einfachen Durchgangsprüfung von Lichtwellenleitern mit gepulstem oder kontinuierlichem sichtbarem Licht (Wellenlänge im Bereich 635 nm).
- **Signalindikatoren** können an blanken Fasern durch Auskopplung (durch leichte Krümmung) Signale mit bestimmten Modulationen nachweisen.

- **LWL-Steckermikroskope** sind speziell für die Begutachtung von LWL-Steckverbindern entwickelt worden, um diese auf Verschmutzungen und Kratzer untersuchen zu können. Die Vergrößerung sollte mindestens 200fach sein. Videomikroskope erlauben eine Sichtkontrolle der Steckverbindungen über einen TV-Monitor.
- **Faseroptische Sprechverbindungen** dienen dazu, über eine freie Faser miteinander zu kommunizieren, wenn sonst keine andere technische Möglichkeit dazu besteht.

Eine Auflistung sämtlicher verfügbaren Messgeräte würde den Rahmen sprengen. Deshalb werden nachfolgend die bekanntesten Hersteller und Lieferanten von optischen Geräten tabellarisch aufgeführt. Besonderheiten bei einzelnen Geräten sind angemerkt.

Für tiefer gehende Informationen wird auf die Internetseiten der betreffenden Firmen verwiesen.

	ACTERNA (ehem. Wavetek Wandel Goltermann) www.acterna.com	Tektronix www.tektronix.com	RIFOCS www.rifocs.com *2) u. *4)	Noyes Fiber Systems www.fiberopticsonline.com *4)	GN Nettest www.gnnettest.com	Fluke www.fluke.com	EXFO www.exfo.com *3)	EigenLight Corporation www.eigenlight.com *2)	BEHA www.beha.de	Anritsu Wiltron www.anritsu.de	Ando Europe BV www.ando.de	Agilent Technologies (ehem. Hewlett-Packard) www.tm.agilent.com	Advantest Corp. Japan www.advantest.de *1)	
Optoelektrische Wandler		x *5)								x				
Lichtquellen		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Leistungspegelmesser		x	x	x	x	x *7)	x		x *6)	x	x	x	x	
Dämpfungsmessgeräte			x	x *8)	x	x *7)	x		x	x	x	x	x	
Inline-Pegelmonitore								x *9)						
Abschwächer				x			x	x *9)		x	x	x		
OTDR				x			x			x	x	x		
Mini-OTDR				x	x *10)		x			x	x	x		
Wellenlängen-Messger.							x			x	x	x	x	
Opt. Spektrumanalysat.							x			x	x	x	x	
Opt. Kanalanalysatoren														
Mess. Chrom. Dispersion										x				
Laser-Tester (sichtbar)										x	x			
Signalindikatoren														
Mikroskope												x		
LWL-Telefone											x			

Tabelle 7.1: Hersteller und Lieferanten optischer Messgeräte

Anmerkungen:

- *1) Vertrieb: Rohde & Schwarz, www.rsd.de
- *2) Vertrieb: Laser Components, www.lasercomponents.de
- *3) Vertrieb: Macroton, www.macroton-systems.de
- *4) Vertrieb: Laser 2000, www.laser2000.de
- *5) für breitbandige Oszilloskope, insbesondere mit TekProbe II-Schnittstelle (TEK Serien TDS, 1140X und DSA600)
- *6) 4-stelliges Multimeter zusätzlich erforderlich
- *7) als Ergänzung (Fiber Test Adapter) für Kabel-Messgeräte der DSP-Serie
- *8) zusätzlich: OTDR-ähnliches Gerät ohne Kurven-Anzeige (Fiber Hawk)
- *9) Ein Gerät mit zwei Funktionen: Pegelmonitor und Abschwächer. Messungen des Pegels im Betrieb möglich, geringe Eigendämpfung, variable Dämpfung einstellbar
- *10) zusätzlich: Verlust- und Reflexionsmessgeräteset, das bidirektional arbeitet (Turbotest 500)

3.8 Literaturhinweise / Quellenangaben

- Fibel über Lichtwellenleitertechnik, Fa. BEHA Communication GmbH; März 97
- Fiber Optic Reference Guide, Focal Press, Boston usw. 1999
- Fiber Optics Handbook, Hewlett Packard GmbH, Böblingen 1988
- Fiberoptik Übertragungstechnik; D.Gustedt/W. Wiesner, Franzis´ Verlag 1998
- Interoperabilität von optischen Übertragungssystemen, Technischer Bericht Nr. G 150/2000; IRT
- Nachrichtenübertragung mit Licht; telcom report, Siemens, April 1983
- Optical Time-Domain Reflectometry; Duwayne Anderson, Florian Bell, Tektronix 1997
- Optische Nachrichtensysteme; Eigenschaften und Projektierung, Peter Faßhauer, Hüthig Verlag
- Optische Übertragungstechnik in der Praxis; Grundlagen, Komponenten, Installation, Anwendungen. Christoph P. Wrobel, Hüthig Verlag 1998
- Seminarunterlagen "Thema: Glasfasertechnik" ,Spezialkabel München GmbH
- Seminarunterlagen der Firma TEKTRONIX: "Fiber Optic Fundamentals"
- Vergleich der gebräuchlichsten optischen Steckverbindungen; Technischer Bericht Nr. G 141/98; IRT
- Workshop der Firma DIAMOND GmbH
- Recommendation ITU-R BT.(1367) Serial digital fibre transmission system for signals conforming to ITU-R BT.656, ITU-R BT.799 and ITU-R BT.1120
- IEC 60825-1/EN 60825
- ANSI/SMPTE 304M-1998, Broadcast Cameras- Hybrid Electrical and Fiber-Optic Connector
- ANSI/EIA 492BA00-1988, Blank Detail Specification for Class IVa Dispersion, Unshifted Single-Mode Optical Waveguide Fibers
- SMPTE-Standard ANSI/SMPTE 297M (1997) „Serial Digital Fiber Transmission System for ANSI/SMPTE 259M Signals“

3.9 Glossar

- **Absorption**
ein Teil der faseroptischen Dämpfung, bei der Lichtenergie in Wärme gewandelt wird. Sie entsteht durch Störstellen und Verunreinigungen im LWL und ist wellenlängenabhängig.
- **Akzeptanzwinkel**
größtmöglicher Einkopplungswinkel für Strahlen in den LWL-Kern
- **ANSI**
American National Standards Institute
- **Ansprechempfindlichkeit**
bei Fotodetektoren Verhältnis von generiertem Fotostrom zur absorbierten optischen Leistung
- **Anti-Reflex-Coating**
reflexionsmindernde Oberflächenbeschichtung
- **APC**
Angled Physical Contact; eine durch schräggeschliffene Faserstirnflächen reflexionsarme LWL-Verbindung.
- **APD**
→Avalanche-Photo-Diode
- **ATM**
Asynchronous Transfer Modus; paketorientierte Übertragungs- und Vermittlungstechnik für Hochgeschwindigkeitsnetze.
- **Avalanche-Photo-Diode**
ein auch als Lawinen-Photodiode bezeichnetes hochempfindliches Empfangselement, bei dem die durch Photonen freigesetzten Ladungsträger lawinenartig vervielfacht werden. Der Vorteil der APD liegt bei ihrem guten Signal/Rausch-Verhältnis besonders bei höheren Bitraten. Je nach Dotierung können sehr empfindliche (> 100 Elektronen pro Photon) oder sehr schnelle Dioden (> GHz) hergestellt werden
- **Bandbreiten-Längenprodukt**
Bei der LWL-Übertragung ist die Bandbreite umgekehrt proportional zur Faserlänge. Deshalb ist das Produkt aus Übertragungsbandbreite und Länge konstant. Das Bandbreiten-Längenprodukt ist ein Qualitätsmerkmal der Faser und abhängig von der Wellenlänge. Es wird in MHz x km oder (Mbit/s) x km angegeben.
- **Brechzahl, Brechungsindex**
wellenlängenabhängige Materialkonstante (n). Sie ist definiert als Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zu der in einem Medium.
- **CECC**
CENELEC Electronic Components Committee
- **CENELEC**
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
- **Chromatische Dispersion**
Zusammenfassung der beiden Effekte →Material- und →Wellenleiterdispersion.
- **Cladding** (engl.)
Mantelglas
- **Coating** (engl.)
Beschichtung des Glasfasermantels zum Schutz der Faser
- **Core** (engl.)
Kernglas
- **Cutoff-Wellenlänge**
die Wellenlänge, oberhalb derer sich auf einer Monomodefaser nur eine Mode ausbreiten kann.
- **Dämpfung**
Verminderung der optischen Signalleistung zwischen zwei Punkten einer LWL-Übertragungsstrecke durch Verluste. Einheit dB.
- **Dämpfungsbelag**
→Dämpfungskoeffizient

- **Dämpfungskoeffizient**
ist die auf seine Länge bezogene →Dämpfung eines gleichförmigen LWL. Einheit dB/km
- **DFB-Laser**
Distributed Feedback Laser; ein Laser mit einer einzigen Spektrallinie
- **Dispersion**
beschreibt die Laufzeitunterschiede zwischen Lichtanteilen in einem LWL. Entsprechend ihren Ursachen ist sie unterteilt in →Modendispersion, →Materialdispersion und →Wellenleiterdispersion
- **DSC**
Digital Serial Components
- **Dunkelstrom**
Strom am Ausgang eines optischen Empfangselements, wenn keine Strahlung einfällt
- **DWDM**
Dense Wavelengths Division Multiplex; Übertragung zahlreicher optischer Signale unterschiedlicher, dicht beieinander liegender Wellenlängen (einige nm Unterschied) über Glasfaser
- **EIA**
Electronic Industries Association
- **Einfügungsdämpfung**
durch Einfügen eines optischen Bauelements in eine Übertragungsstrecke hervorgerufene →Dämpfung
- **EMV**
Elektromagnetische Verträglichkeit
- **EN**
Europäische Norm
- **Extinction ratio**
Verhältnis von maximaler zu minimaler Ausgangsleistung eines optischen Senders
- **Extrinsische Verluste**
Koppeldämpfung der Strahlungsleistung, verursacht durch mangelhafte Verbindung identischer Fasern
- **FDDI**
Fiber Distributed Data Interface
- **Ferrule**
Steckerstift, Führungshülse für die Faser im Stecker. Aus Keramik, Metall oder Kunststoff
- **Fingerspleiß**
bedingt lösbare Verbindung von LWL-Fasern
- **FP-Laser**
Fabry-Perot-Laser, ein Laser mit wenigen Spektrallinien im Abstand von ca. 2-3 nm
- **Fresnelsche Verluste**
entstehen durch Reflexionen an optischen Grenzflächen (Faserende). Für den Übergang LWL – Luft betragen die Fresnelschen Verluste 0,30 dB bis 0,38 dB
- **FWHM**
Full Width at Half Maximum; Leistungshalbwertsbreite
- **Gradientenindexfaser**
LWL-Faser mit einem radialen Brechzahlprofil, das stetig vom Kern zum Mantel verläuft, meist nach einer Parabelfunktion
- **Gruppenbrechzahl, Gruppenindex**
gibt an, wie die Brechzahl - und damit die Ausbreitungsgeschwindigkeit (Gruppengeschwindigkeit) des Lichts - von der Wellenlänge abhängt
- **IEC**
International Electrotechnical Commission
- **Index-Matching**
Anpassung der Brechungsindizes von LWL z.B. mit Hilfe von speziellem Gel
- **Insertion loss** (engl.)
→Einfügungsdämpfung

- **Intrinsische Verluste**
Koppeldämpfung der Strahlungsleistung, verursacht durch Fehlanpassung bei der Verbindung zweier nicht identischer Fasern
- **ITU**
International Telecommunication Union
ITU-R für Rundfunkfragen (hervorgegangen aus der CCIR)
ITU-T für den Bereich der Telekommunikation (hervorgegangen aus der CCITT)
- **Kanalanalysator**
Messgerät für die spektrale Analyse von →DWDM-Systeme
- **Kohärente Wellen**
Wellen mit gleicher Wellenlänge und zeitlich zueinander konstanter Phasendifferenz
- **LAN**
Local Area Network
- **Laser**
Light Amplification by stimulated Emission of Radiation; Lichtverstärkung durch angeregte Emission von Strahlung
- **Laserdiode**
optische Sendediode nach dem Laserprinzip, die stark gerichtetes, kohärentes Licht abstrahlt
- **LED**
Light Emitting Diode
- **Lumineszenzdiode**
optische Sendediode, die inkohärentes Licht emittiert
- **LWL**
Lichtwellenleiter
- **Mantelmoden**
Lichtstrahlen, die sich im Mantel ausbreiten
- **Materialdispersion**
entsteht durch die Wellenlängenabhängigkeit der →Brechzahl eines LWL-Kerns
- **Mode, Modus**
in einem gegebenen LWL-Kern-Querschnitt ausbreitungsfähiger Lichtstrahl
- **Modendispersion**
Dispersion aufgrund der verschiedenen Laufzeiten einzelner →Moden bei gleicher Wellenlänge (besonders ausgeprägt bei Stufenindexfasern)
- **Monomodefaser**
LWL mit kleinem Kerndurchmesser ($<10 \mu\text{m}$), in dem nur ein einziger →Modus ausbreitungsfähig ist
- **Multimodefaser**
LWL mit großem Kerndurchmesser ($>50 \mu\text{m}$), in dem mehrere →Moden ausbreitungsfähig sind
- **Numerische Apertur**
Sinus des →Akzeptanzwinkels. Je größer die numerische Apertur ist, desto mehr Lichtleistung kann in den LWL eingekoppelt werden
- **Opto-elektrischer Wandler**
wandelt optische Signale in elektrische Signale um
- **OTDR**
Optical Time Domain Reflectometer; Rückstreuemessgerät
- **Patchfeld**
Verteilfeld zum Verbinden der ankommenden mit den abgehenden Fasern
- **Pigtail**
Faserstück mit Stecker an einem Ende
- **PIN-Diode**
P-Intrinsic-N-Schicht-Diode; optisches Empfangselement
- **Quantenwirkungsgrad**
kennzeichnet bei Fotodetektoren die Ausbeute an Elektronen pro Photon

- **Rayleighstreuung**
Streuungsverluste in LWL, die durch Dichteschwankungen des Kernmaterials entstehen
- **Reflexionsverluste**
→Fresnelsche Verluste
- **Responsivity**
(für den früher benutzten Begriff Sensitivity)
→Ansprechempfindlichkeit
- **SDI**
Serial Digital Interface
- **SDTI**
Serial Digital Transport Interface; basiert auf SDI und nutzt die gleichen physikalischen Schnittstellen
- **Singlemodefaser**
→Monomodefaser
- **SONET**
Synchronous Optical Network; synchrone Übertragungstechnologie für LWL-Netze mit Mehrkanalbetrieb im Zeitmultiplex
- **Spleiß**
nicht lösbare Verbindung zweier Lichtwellenleiter; man unterscheidet dabei geklebte und geschweißte Spleiße
- **Spleißbox**
Gehäuse oder Gehäuseeinschub, der eine oder mehrere →Spleißkassetten enthält
- **Spleißkassette**
Kassette zur Aufnahme von mehreren Spleißverbindungen mit Faserreserven
- **Streuung**
hauptsächliche Ursache für die Dämpfung eines LWL. Sie entsteht an Fehlstellen bzw. Verunreinigungen des Materials und lenkt einen Teil des Lichtes so ab, dass es den LWL verlässt
- **Stufenindexfaser**
LWL-Faser mit einem radialen Brechzahlprofil, das im Idealfall durch eine konstante Brechzahl innerhalb des Kerns und einer sprunghaften Verkleinerung der Brechzahl an der Grenzfläche von Kern und Mantel charakterisiert ist
- **Totalreflexion**
vollständige Reflexion des Lichtes an der Grenzfläche von einem optisch dichteren zu einem optisch dünneren Medium, wenn der Einfallswinkel des Lichts größer als der Grenzwinkel der Totalreflexion ist
- **VGA**
Video Graphic Adapter
- **WAN**
Wide Area Network
- **WDM**
Wavelengths Division Multiplex; Übertragung optischer Signale unterschiedlicher Wellenlängen über Glasfaser jeweils in einem anderen optischen Fenster
- **Wellenleiterdispersion**
beschreibt die Abhängigkeit der Gruppengeschwindigkeit der einzelnen →Moden von den Abmessungen des LWL (Kerndurchmesser) und der Wellenlänge