

## Spektroskopie mit Lichtleitern

(von Roland Bücke, Hamburg)

So verlockend und simpel der Einsatz von Lichtleitern zur Übertragung des Sternlichts vom Teleskop zum Spektrometer auf den ersten Blick erscheinen mag, gestaltet sich eine erfolversprechende Realisierung im Detail doch recht anspruchsvoll. Der Gedanke zu diesem Beitrag reifte auf der diesjährigen Jahrestagung der Fachgruppe in Heppenheim, da am Rande des Tagungsprogramms oft Fragen zum Lichtleitereinsatz berührt wurden.

Das Thema wurde naturgemäß kontrovers diskutiert. In der Tat bietet der LWL (Abkürzung für die ebenfalls übliche Bezeichnung Lichtwellenleiter) nur in speziellen Fällen Vorteile oder kann u.U. unverzichtbar sein. Ein Beispiel hierfür lieferte Herr Goretzki eindrucksvoll in seinem Vortrag zum Thema „Sonnenspektroskopie“.

Mit dem nachfolgenden Beitrag möchte ich denjenigen, die ernsthaft die Nutzung der LWL-Technik erwägen, meine eigenen praktischen Erfahrungen an die Hand geben. Die geschilderte Bearbeitungstechnik von Fasern ist nicht die einzig mögliche, wurde von mir aber mehrfach erfolgreich angewandt. Theoretische Grundlagen werden nur kurz angesprochen, um vor allem die für den praktischen Einsatz wesentlichen Eigenschaften zu erläutern.

Als Nachweis, dass auch mit einfachen Mitteln ohne Spezialwerkzeuge tatsächlich brauchbare Ergebnisse zu erzielen sind, ist in Abb. 1 die H $\alpha$ -Emission des Be-Sterns  $\gamma$  Cas dargestellt. Das Aufnahmeinstrument war mein 20 cm Dobson; das Spektrometer hat eine Dispersion von 0,56 Angström/Pixel, die Auflösung beträgt 1,5 Angström. Teleskop und Spektrometer sind mit einer 200  $\mu$ m Faser miteinander verbunden.

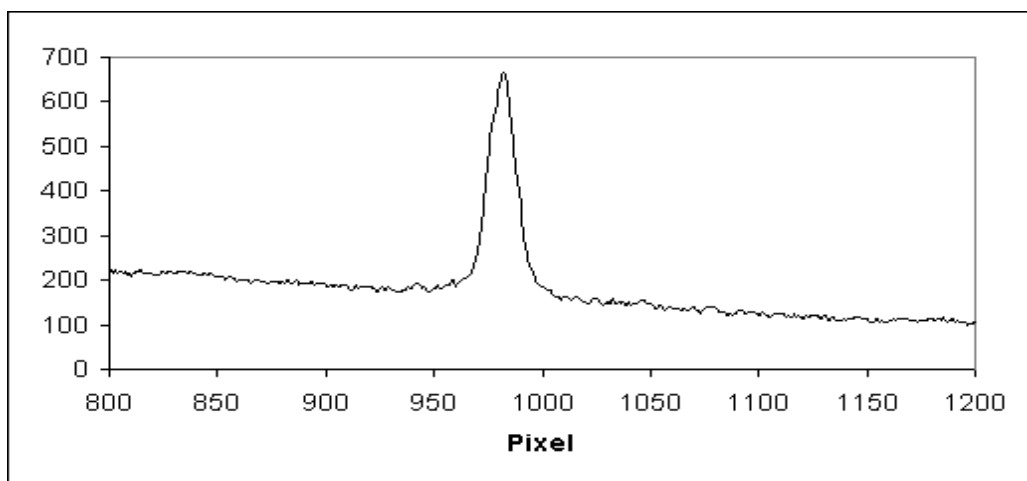


Abb. 1: H $\alpha$ -Emission von  $\gamma$  Cas

Wann also empfiehlt sich der Einsatz von LWL ?

- Wenn die Montierung des zur Verfügung stehenden Teleskops zu schwach für die direkte Ankopplung des Spektrometers ist. Die hohen Anforderungen an eine präzise Nachführung des Teleskops bleiben allerdings bestehen.

Welche Vorteile sind durch den Einsatz von LWL zu erwarten ?

- Größe und Gewicht des Spektrometers sind nicht mehr durch die Teleskopmontierung limitiert
- Nachführfehler führen nicht zur Verschlechterung der Auflösung
- Die Wellenlängenkalibrierung kann direkt mit einer Spektrallampe (z.B. Neon-Glimmlampe) vorgenommen werden.
- Himmelshintergrundlicht wird vernachlässigbar

Nachteile ?

- Zusätzlicher Lichtverlust
- Mechanischer Aufbau komplizierter und aufwändiger
- Überwachung der Einkopplung bei Langzeitbelichtungen

## Grundlagen

Die Lichtleitung in Fasern beruht auf dem physikalischen Effekt der Totalreflexion an einer Grenzfläche zwischen Materialien unterschiedlicher optischer Dichte. Lichtleitfasern haben also im lichtführenden „Kernbereich“ einen geringfügig höheren Brechungsindex als im umgebenden Mantelbereich. Abb. 2 zeigt den strahlenoptischen Weg in der so genannten Multimode-Stufenindexfaser. Die anderen zwei Lichtleitertypen, die Monomode-Stufenindex- und Multimode-Gradientenfaser, wurden speziell für hohe Übertragungskapazitäten über große Distanzen in der Nachrichtentechnik entwickelt. Da beide Kriterien für unsere Anwendung irrelevant sind, sollen sie hier nicht weiter betrachtet werden.

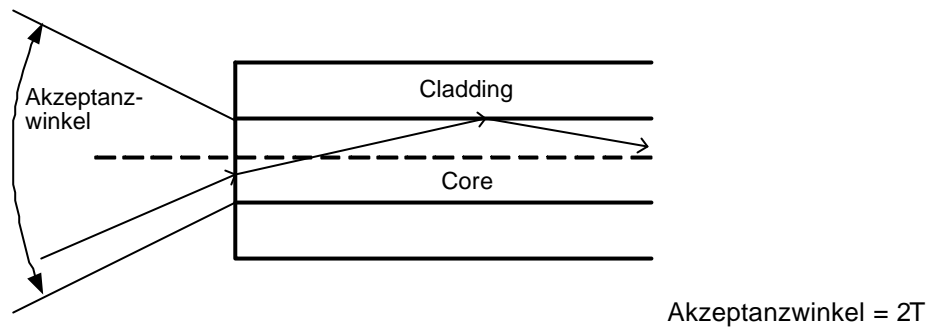


Abb.2: Strahlengang in einer Multimode-Stufenindexfaser

Die physikalischen Eigenschaften eines LWL sind sehr komplex. Deshalb möchte ich nur die wesentlichen Fachbegriffe und Zusammenhänge kurz erläutern, die in die Auslegung der gesamten Messanordnung Teleskop-LWL-Spektrometer direkt eingehen bzw. weniger einflussreiche Größen nur kurz erwähnen:

Numerische Apertur ( $A_N$ ):

Maximaler Winkel  $T$ , unter dem Licht in die Faser eingekoppelt wird.

$$A_N = \sin \Theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1)$$

$n_1$  und  $n_2$  sind die Brechungsindizes für das Kern- und Mantelmaterial.

Die Numerische Apertur muss bei der Dimensionierung der Gesamtapparatur berücksichtigt werden.

Optische Dämpfung:

Unter Dämpfung  $A$  versteht man die Verluste des durchgehenden Lichts. Ausgedrückt wird sie als zehnfacher Logarithmus des Verhältnisses der optischen Leistung am Eingang  $I_e$  und Ausgang  $I_a$  der Faser in der Einheit dB.

$$A = -10 \log \frac{I_a}{I_e} \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

Die Dämpfung eines LWL pro km Länge wird als Dämpfungsbelag  $a$  bezeichnet.

$$a = \frac{A}{x} \quad (3)$$

In Gl. 3 ist  $x$  die Faserlänge in km. Durch Einsetzen von (3) in (2) und Umstellen erhält man eine Gleichung zur Berechnung des Lichtverlustes auf der Länge  $x$  einer Faser:

$$\frac{I_a}{I_e} = 10^{\left(\frac{a \cdot x}{-10}\right)} \quad (4)$$

Die wesentlichen Verlustmechanismen sind die der Absorption im Material selbst sowie der Streuung an Materialinhomogenitäten. Da die Dämpfung eine reine Materialgröße darstellt, werden hier Streuverluste bei der Ein- und Auskopplung des Lichts nicht berücksichtigt! Die Dämpfung führt zu einem exponentiellen Abklingen der Lichtintensität über die Faserlänge. Sie ist stark wellenlängenabhängig und nimmt im kurzwelligen Bereich unter 500 nm materialabhängig mehr oder weniger stark zu (Abb. 3).

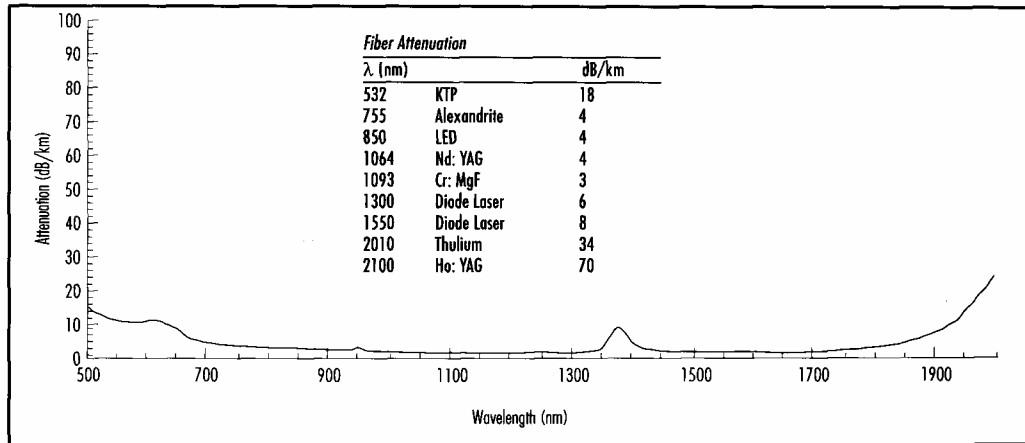


Abb. 3: Spektrale Dämpfung einer Quarz-Quarz Faser (aus: Katalog SpecTran der Firma Laser Components GmbH)

Signaldispersion:

laufzeitbedingte Verzerrungen (Verbreiterungen) von Signalen. Spielt bei der Sternspektroskopie keine Rolle, da wir es mit „Gleichlichtsignalen“ zu tun haben.

Biegungen:

Der primäre Grund für den Einsatz von Lichtleitern ist deren Flexibilität: Die Faser lässt sich ähnlich einem Elektrokabel verbiegen und passt sich damit den räumlichen Gegebenheiten an. Man kann Fasern ohne Bruch bis zu einem Biegeradius von einigen Millimetern krümmen. Allerdings verursacht eine starke mechanische Deformation erhebliche Verluste, weshalb Lichtleiter nicht unnötig gekrümmt werden sollten. Licht, das in einem größeren Winkel eingekoppelt wurde, überschreitet im Biegebereich den Grenzwinkel der Totalreflexion, wird ausgekoppelt und geht damit verloren.

Des Weiteren kommt es mit kleiner werdendem Krümmungsradius zu einem Dämpfungsanstieg, weil das elektromagnetische Feld weiter nach außen in den Mantel hineinreicht.

#### Aufbau von LWL und LWL-Kabeln

Lichtleiter sind generell aus dem lichtführenden Kern (Core), dem Mantelbereich (Cladding) und der optisch inaktiven Kunststoffschicht (Coating / Buffer) als Schutz vor mechanischen Einflüssen aufgebaut (Abb. 4). Der Kern besteht aufgrund der guten optischen Transmissionseigenschaften über einen großen Wellenlängenbereich (UV-NIR) überwiegend aus Quarzglas, der Mantelbereich aus einem Quarzglas mit niedrigerem Brechungsindex oder auch aus Kunststoff (HCS-Fasern). HCS-Fasern haben eine wesentlich größere numerische Apertur (0,29 – 0,48 !) als Quarz/Quarz-Fasern (0,22). Die Kerndurchmesser reichen von ca. 50  $\mu\text{m}$  bis 1 mm.

In einem Lichtleiterkabel sind eine oder mehrere Lichtleitfasern untergebracht. Kabel erfüllen erweiterte Schutzfunktionen gegenüber vielfältigen Umwelteinflüssen. Beispielhaft seien genannt: mechanische und thermische Belastungen, Eindiffundieren von Wasserstoff und Wasser, Vermeidung von kleinen Krümmungsradien.

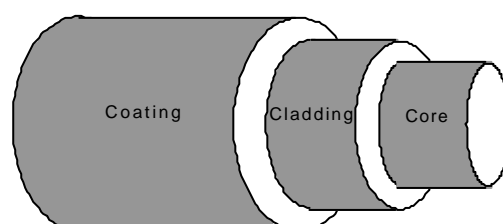


Abb. 4: Aufbau von Lichtleitern

## Praktische Gesichtspunkte zum Einsatz von Lichtleitern als Bindeglied zwischen Teleskop und Spektrometer

Zwei Gründe sprechen hauptsächlich gegen den Lichtleiter:

Einerseits die zusätzlichen Lichtverluste, andererseits die schwierige zuverlässige Einkopplung des Sternlichts in die Faser und der damit erhöhte mechanische Aufwand.

Wodurch entstehen die Verluste und wie können sie möglichst klein gehalten werden?

1. unvermeidliche Verluste durch die Faser selbst. Dies sind die Dämpfung und die Rückreflexion an den Faserendflächen. Der Anteil dieser Verluste wird oftmals überbewertet. Die Reflexion an den Endflächen hat jeweils den typischen Wert für Glas/Luft-Übergänge von ca. 4 – 5%. Dies setzt allerdings eine hohe optische Qualität dieser Glasflächen voraus. Hier dürfte häufig die eigentliche Ursache für sehr große Lichtverluste zu finden sein, die aber bei richtiger Bearbeitung der Faserenden vermeidbar sind! Man sollte sich einmal verdeutlichen, dass das gesamte vom Teleskopobjektiv gesammelte Licht auf die winzig kleine Fläche einer Faser konzentriert wird. Um wie viel stärker müssen sich da mikroskopisch kleine Defekte wie Muschelbrüche an den Kanten, Kratzer und Absplitterungen gegenüber einem Kratzer auf dem Teleskopspiegel auswirken! Jeder Oberflächenfehler erzeugt Streulicht, das nicht von der Faser geführt wird.

**Die sorgfältige Politur der Faserendflächen ist die wichtigste Voraussetzung für die Vermeidung hoher Lichtverluste.**

Für eine 20 m lange Faser mit einer typischen Dämpfung (Dämpfungsbelag) von max. 15 dB/km im Wellenlängenbereich von 500 nm bis 800 nm ergibt sich nach Gleichung 4 ein Lichtverlust von ca. 7%. Der gesamte unvermeidliche Lichtverlust durch den Lichtleiter liegt bei diesem Beispiel also bei 15 bis 20 %.

2. Die Fokussierung des Sterns auf die Faser ist vor allem bei längeren Belichtungszeiten schwierig. Erstens bedarf die Positionierung einer geeigneten visuellen Einrichtung und zweitens muss dann das Teleskop exakt nachgeführt werden, was ebenfalls mehr oder weniger häufig visuell kontrolliert werden muss. Ich selbst habe dies realisiert, indem ein Teil des Lichts an einem dünnen Glasplättchen (Deckglas aus der Mikroskopie) unmittelbar vor der Faser im rechten Winkel herausgelenkt wird und mit einem Okular die Position des Sterns observiert werden kann (siehe Abb. 5a). Ich muss aber darauf hinweisen, dass ich damit nur eine grobe Positionierung vornehme, bis der Stern von der optoelektronischen Nachführung erfasst wird, wie ich dies in meinem Beitrag im Fachgruppen-Rundbrief „Spektrum“ Nr. 25 bereits beschrieben habe.

Eine andere Möglichkeit ist in Abb. 5b dargestellt, die ohne weitere Lichtverluste auskommt. Die Faser ist leicht schräg angeschliffen und übernimmt damit selbst das Herauslenken eines Teils des Sternlichts. Bei hellen Objekten, worauf die Spektroskopie ohnehin beschränkt bleibt, genügt die Rückreflexion einer unverspiegelten Glasfläche. Bei dieser Variante muss also die Faser in einer Glaskapillare eingeklebt sein, wie weiter unten noch genauer beschrieben wird. Ein weiterer Vorteil dieser Variante besteht darin, dass durch den Himmelshintergrund die Glasfläche sowie auch der Kern des Lichtleiters leicht erhellt erscheint, während die Klebezone zwischen Faser und Kapillare dunkel bleibt und damit die Positionierung unterstützt.

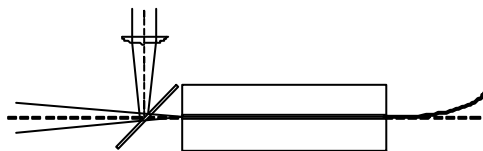


Abb. 5a



Abb. 5b

Es sei noch auf die Möglichkeit hingewiesen, mit einem Klappspiegel am Faserausgang entsprechend der Nachführgenauigkeit in Abständen die Positionierung anhand der Aufhellung der Faseraustrittsfläche zu kontrollieren.

3. Faserbiegungen führen - wie oben schon erwähnt - zu Verlusten. Deshalb sollten kleine Biegeadien möglichst vermieden werden. Des Weiteren kann man den Einfluss der Lichtleiterführung dadurch reduzieren, indem der Winkel des Lichtkegels klein gegenüber der numerischen Apertur gewählt wird. Mit ausreichender Genauigkeit ist

$$\frac{D}{2f} \approx A_N \quad (5) \quad \text{mit der Teleskopöffnung } D \text{ und der Brennweite } f.$$

- Da der lichtführende Kern des Faserendes den Eintrittsspalt des Spektrographen bildet, korreliert die Auflösung direkt mit dessen Durchmesser. Zur Erhöhung der Auflösung kann man das Faserende mit einem engeren Spalt abblenden, wobei man dann die entsprechenden Lichtverluste in Kauf nehmen muss.

#### Hinweise zur Bearbeitung von Lichtleitern

Wer sich die Bearbeitung der Faserendflächen ersparen möchte, kann auf fertig konfektionierte Lichtleiter zurückgreifen bzw. diese in der gewünschten Länge fertigen lassen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Fasern selbst zu konfektionieren, wobei man die Auswahl aus einer Vielzahl von verschiedenen Steckerbauformen hat. Für jeden üblichen Faserquerschnitt gibt es passende Stecker (Abb. 6).



Abb. 6: Faser in Standardstecker eingeklebt

Die Präparation der Endflächen kann durch zwei Methoden erfolgen: das Brechen mit einem Spezialwerkzeug oder das Einkleben mit Epoxydharz mit anschließender Politur. An dieser Stelle möchte ich vor allem meine eigenen Erfahrungen mit der zweiten Methode weitergeben, für die keinerlei Spezialwerkzeuge nötig sind und mit denen sich Endflächen hoher Qualität herstellen lassen:

Man benötigt ein Schleiftool, dessen Teile auf einer Drehbank einfach herzustellen sind (Abb. 7). Dass es auch „primitiver“ funktioniert, zeigt Abb. 8. Dieses Tool habe ich aus einem Stück Alu-Blech, einem Stück Rundmaterial sowie Winkelprofil hergestellt und damit alle Faserflächen erfolgreich bearbeitet. Weiterhin werden eine dickere Glasplatte (ca. 10mm) als Arbeitsfläche, eine Prospekthülle (aus etwas kräftigerem Kunststoff mit leicht angerauter Oberfläche) als Polierfolie, etwas Schleifpulver sehr feiner Körnung (Körnung 600 und feiner) und Poliermittel benötigt. Diese Pulver sind in kleinen Mengen bei der Materialzentrale des VdS erhältlich. Alternativ kann man auch fertige Polierfolien kaufen. Ich persönlich arbeite lieber mit Pulvern. Unabdingbar ist die ständige Kontrolle des Fortgangs der Arbeiten mit einem einfachen Mikroskop.

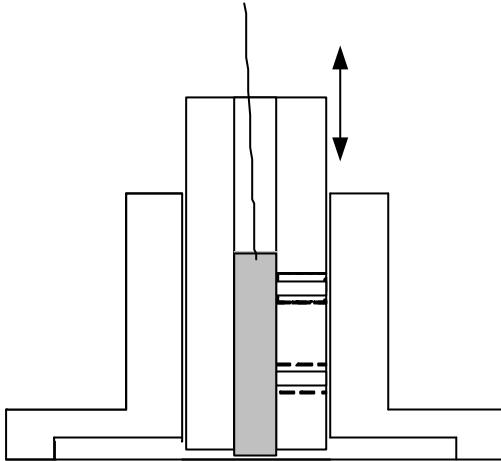


Abb. 7: Polierwerkzeug



Abb. 8: Polierwerkzeug

Hier die einzelnen Arbeitsschritte in der richtigen Reihenfolge:

- Kabel mit einer Rasierklinge (Skalpell) ein entsprechendes Stück abisolieren
- Zum Einkleben in den Stecker bzw. in eine Glaskapillare muss das Coating ebenfalls auf entsprechender Länge entfernt werden, da dieses Material sehr weich ist. Dazu ritzt man das Coating über den gesamten Umfang mit einer Rasierklinge (Skalpell) vorsichtig ein und zieht dann die Hülle zwischen zwei Fingernägeln ab. Bei Fasern mit Glascladding ist dies nicht schwierig. Beim Abisolieren von Fasern mit dem sehr dünnen Kunststoffcladding sind etwas Training und eine sehr ruhige Hand nötig, da das Material leicht angeritzt wird und an dieser „Wunde“ größere Lichtverluste auftreten. Achtung: Abisolierte Fasern sind bruchempfindlich!
- Einkleben der abisolierten Faser in den Stecker (Glaskapillare) mit Epoxydharz. Der Zweikomponentenkleber sollte eine längere Aushärtzeit (2 Stunden oder länger) aufweisen, da dieser beim Erwärmen genügend lange dünnflüssig bleibt und eine größere Endhärte erreicht. Die Bohrung des Steckers (Glaskapillare) darf nur wenig größer als der Faserdurchmesser sein. Die Faser wird senkrecht eingespannt, der Stecker aufgesteckt, so dass das Faserende leicht heraussteht, einen Tropfen Kleber auftragen und mit einem Heißlüfter oder Fön so weit erhitzen, dass dieser sehr dünnflüssig wird und auf Grund der Kapillarwirkung den Klebespalt bis in die Tiefe hinein ausfüllt.
- Nach dem vollständigen Aushärten wird das so eingefasste Faserende in den Zylinder des Poliertools mit ca. 2-3 mm Überstand eingespannt.
- Politur: Etwas Schleif- bzw. Polierpulver wird mit etwas Wasser zu einer dünnbreiigen Suspension verrührt. Die Glasunterlage wird mit Wasser angefeuchtet, die Folie möglichst luftblasenfrei aufgelegt und mit den Fingern etwas Suspension gleichmäßig aufgetragen.
- Das Poliertool aufsetzen und mit unregelmäßig kreisenden Bewegungen mit dem Polieren beginnen. Das Eigengewicht des beweglichen Zylinders reicht in der Regel, kann aber am Anfang mit mäßigem Druck etwas erhöht werden. Regelmäßig den Fortgang der Arbeiten unter dem Mikroskop verfolgen. Falls anfänglich noch viel Material (Kleber) abgetragen werden muss, kann man mit feinem Schmirgel beginnen.

Folgende Internetseiten können bei der Materialbeschaffung behilflich sein:

[www.spectra-physics.com](http://www.spectra-physics.com)  
[www.fiber-shop.de](http://www.fiber-shop.de)  
[www.fop.de](http://www.fop.de)  
[www.lasercomponents.de](http://www.lasercomponents.de)