

Faseroptische Beleuchtungssysteme

R. Baer, Berlin

Faseroptische Beleuchtungssysteme haben sich einen festen Platz in der Allgemeinbeleuchtung erobert, da sie in bestimmten Anwendungsfällen technisch und wirtschaftlich günstige Beleuchtungslösungen ermöglichen. Der Beitrag beschreibt die Funktionsweise und die optisch-technischen Grundlagen sowie die Anwendungsmöglichkeiten dieser Systeme.

1 Anwendungen

Das Prinzip der faseroptischen Beleuchtungssysteme ist die Übertragung des Lichts durch ein Lichtleiterbündel. Dabei wird das optische Gesetz der Totalreflexion genutzt. Der Lichtstrom einer Lampe wird in das Lichtleiterbündel eingekoppelt, der Lichtaustritt erfolgt am Ende des Lichtleiters (Endlichtanwendung) oder kontinuierlich über dessen Länge (Seitenlichtanwendung). Bei der Endlichtanwendung erzeugen verschiedene lichtoptische Abschlüsselemente beim Lichtaustritt unterschiedliche Ausstrahlungscharakteristiken. Der Lichtaustritt kann auch auf einzelne Faserbündel aufgeteilt werden (Bild 1).

Der Lichtaustritt kann von der Lampe weit entfernt sein. Die Lichtaustrittsebene ist durch die Beweglichkeit der Lichtfasern von der Eintrittsebene unabhängig. Somit ist das Licht einer Lampe für die Beleuchtung verschiedener Flächen und Ebenen nutzbar. Bei der Seitenlichtanwendung wird ein Lichtband, auch mit unterschiedlichen geometrischen Formen, erzeugt. Das Licht lässt sich im Strahlengang durch Filterung beeinflussen: Ultraviolett-(UV-) und Wärmeschutz-(IR-)Filter, Farbfilter und Lichtschwächungsfilter werden verwendet.

Die faseroptischen Beleuchtungssysteme können schon wegen ihres erreichbaren Beleuchtungswirkungsgrades von < 30 % nicht die Beleuchtungssysteme der Allgemeinbeleuchtung ersetzen. Durch die räumliche Trennung von Lampe und Lichtaustritt kann ihre Anwendung bei folgenden Beleuchtungssituationen vorteilhaft sein:

- UV- und IR-freie Beleuchtung in Museen, Galerien und in Verkaufsräumen. Die nicht gewünschte Strahlung wird einfach im Faseroptiksystem ausgefiltert.
- Farblich variable Beleuchtung durch Einsatz von Farbfiltern im Strahlengang des Faseroptiksystems.
- Dekorative Beleuchtung mit vielen

Lichtaustrittspunkten, auch unterschiedlicher Ausstrahlungscharakteristik, mit nur einer Lampe.

- Beleuchtung von Räumen mit besonderer Gefährdung durch die elektrische Installation (Gefahr durch elektrischen Schlag oder elektrische Felder). Eine oder mehrere Lampen können außerhalb dieser Räume installiert werden, die Lichtleiter und deren Lichtaustrittsstellen sind nicht spannungsführend.
- Beleuchtung von Räumen und Objekten mit besonderen Umgebungsbedingungen (Feuchtigkeit, Temperatur, Radioaktivität).
- Beleuchtung von Räumen oder Anordnung von Werbeanlagen, bei denen ein Lampenwechsel mit erheblichem Aufwand verbunden wäre. Durch die Anordnung des Lichtprojektors an leicht zugänglicher Stelle ist eine günstige Wartung möglich.
- Notwendige punktförmige Beleuchtung mit besonders hoher Beleuchtungsstärke bei geringer Strahlungsbelastung.

Natürlich kann auch eine Allgemeinbeleuchtung über die aufgeführten Anwendungsfälle hinaus mit einem faseroptischen Beleuchtungssystem realisiert werden. Hierfür sollte jedoch im Planungsstadium eine Kosten-/Nutzenanalyse durchgeführt werden.

2 Optische Grundlagen

Die Einspeisung und Übertragung des Lichts in einer Lichtfaser erfolgt unter Ausnutzung des optischen Gesetzes der Totalreflexion.

Beim Übergang eines Lichtstrahles von

einem optisch dichteren Medium (n_1) in ein optisch dünneres Medium (n_2) wird dieser mit einem größeren Winkel (ε_1') als der Einstrahlwinkel (ε_1) in Bezug auf die optische Achse gebrochen.

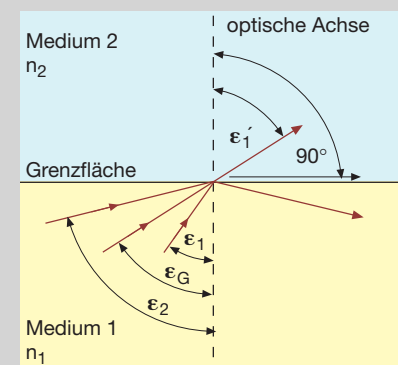
Ab einem bestimmten Einfallswinkel wird der Ausfallswinkel 90° , dieser Winkel wird als Grenzwinkel ε_G definiert. Lichtstrahlen, die unter einem größeren Winkel als dem Grenzwinkel ε_G auf die optische Grenzfläche fallen (z. B. ε_2 in Bild 2), werden an der Grenzfläche in das Medium 1 zurückreflektiert. Die Größe des Grenzwinkels wird von den Brechungsindizes n_1 und n_2 bestimmt. Nach dem Brechungsgesetz von Snellius gilt:

$$\frac{\sin \varepsilon}{\sin \varepsilon'} = \frac{n_2}{n_1}$$

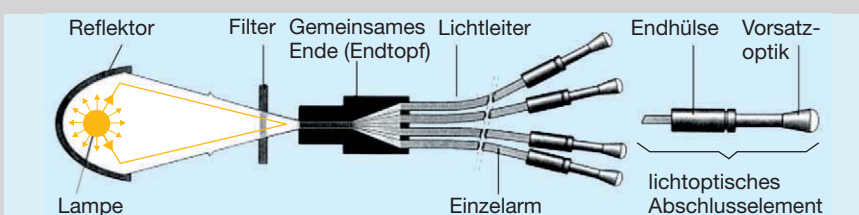
Der Grenzwinkel ε_G ergibt sich bei $\varepsilon' = 90^\circ$ und kann, da $\sin 90^\circ = 1$ ist, berechnet werden nach:

$$\varepsilon_G = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

Eine Lichtfaser besteht aus einem Faserkern (ca. $50 \mu\text{m}$ bis $70 \mu\text{m}$) mit einem Brechungsindex n_1 und einer Ummantelung (Stärke $> 2 \mu\text{m}$) mit dem Brechungsindex n_2 . Für die Lichtübertragung in der Faser sind nur die Lichtstrahlen relevant, die innerhalb des Grenzwinkels eingestrahlt werden (Bild 3). Dabei ist zu beachten, dass die Lichtstrahlen an der Stirnseite der Faser gebrochen werden, was eine Verringerung des Grenzwinkels bewirkt. Wirksam wird der halbe Öffnungswinkel α . Dieser Winkel ist abhängig von den Brechungsindizes n_1 und n_2 und wird bestimmt durch die numerische Apertur (NA):



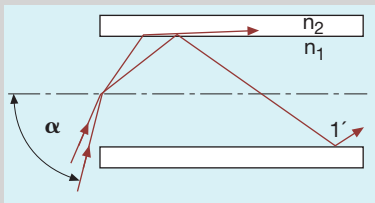
2 Erklärung zur Totalreflexion



1 Prinzip eines faseroptischen Beleuchtungssystems

Autor

Dipl.-Ing. Roland Baer ist freier Fachjournalist im Bereich Lichttechnik.

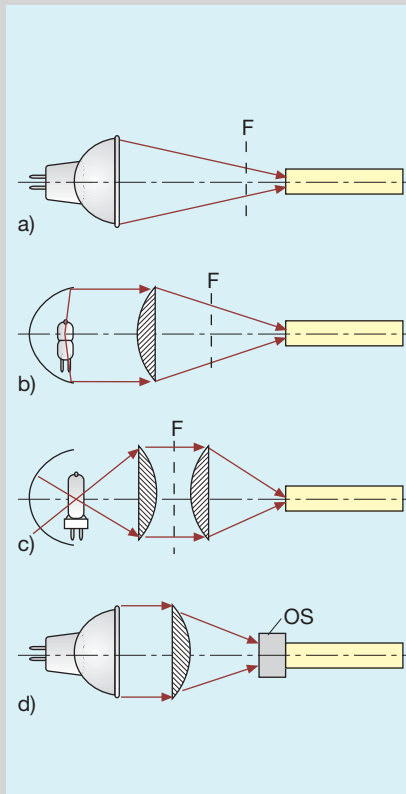


③ Winkelverhältnisse bei der Lichteinkopplung in eine Lichtleitfaser

④ Gebräuchliche Fokussierungssysteme

- Elliptischer Lampenspiegel:** Abbildung des Leuchtfeldes der Lampe auf die Einspeisungsebene der Faser, die sich im zweiten Brennpunkt befindet, angewendet für Halogen-Glühlampen von 35 W bis 150 W und Halogen-Metall dampflampen von 100 W bis 150 W in Kaltlichtspiegelausführung.
- Parabolspiegel in Verbindung mit einer Plankonvexlinse,** angewendet für Halogen-Glühlampen.
- Sphärischer Spiegel in Kombination mit einer Sammellinse,** angewendet für Halogen-Metall dampflampen.
- Ellipsoidspegel in Verbindung mit einer Fokussierlinse und einer optischen Schnittstelle (OS),** welche auch die Funktion des Wärmeschutzes wahrnimmt, angewendet für D2-Lampe 100 W.

F optisch günstige Position eines Filters



⑤ Lichtprojektor Lite-Gen mit Halogen-Metall dampflampe 150 W. Der Betrieb an einem EVG ermöglicht die hohe Lampenlebensdauer von 9000 h, eine um 20% geringere Systemleistungsaufnahme und flimmerfreies Licht.

(Foto: OSRAM)



$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Für die Praxis bedeutet das, dass für einen hohen Wirkungsgrad der Übertragung die numerische Apertur NA möglichst groß sein muss. Das wird erreicht durch einen geringen Brechungsindex n_2 der Faserummantelung. Der Öffnungswinkel 2α bestimmt den einkoppelfähigen Lichtanteil des Projektors.

Die Einspeisung eines hohen Anteils des Lichtstromes der Lampen in das Lichtfaser-system bedingt eine konzentrierte Lichtstromaussendung in eine Richtung, welches nur mit einem Licht-Projektionssystem wirkungsvoll erreicht werden kann. Dieses Projektionssystem kann sowohl mit Reflektoren als auch mit optischen Linsen oder mit einer Kombination von beiden realisiert werden. Der maximal mögliche Lichtstromanteil ν für die Einspeisung wird festgelegt durch

$$\nu = \frac{A_F}{A_L} \cdot \sin^2 \alpha$$

A_F Aperturfläche des Lichtfaserbündels;
 A_L leuchtende Fläche der Lampe;
 α halber Öffnungswinkel.

Aus der Formel ergibt sich, dass die Verwendung von Lampen mit kleinem Leuchtfeld und hoher Leuchtdichte vorteilhaft ist. Diese Lampen haben auch die beste Effizienz in einem optischen Projektionssystem. Mit entsprechenden elliptischen Reflektoren bei optimaler Lampenfokussierung lässt sich ein wirksamer Lichtstromanteil von bis zu 85 % erzielen.

3 Bauelemente für faseroptische Beleuchtungssysteme

Faseroptische Beleuchtungssysteme bestehen aus folgenden Gerätekomponten:

- Lichtprojektoren,
- Lichtfaserkabel,
- lichtoptische Abschlusselemente beim Lichtaustritt.

3.1 Lichtprojektoren

Wie schon erläutert sind bei faseroptischen Beleuchtungen Projektionssysteme zur Optimierung der Einkopplung des Lichts notwendig. Sie sollen einen möglichst hohen Lichtanteil in das Faserbündel einspei-

sen. Für diese Lichtprojektoren kommen nur punktförmige Lampen mit hoher Leuchtdichte in Betracht. Dabei kann die zwangsläufig mit eingekoppelte Wärmestrahlung kritisch für die Temperaturbelastung der Fasern an der Eintrittsfläche werden. So ist es notwendig, Lampen mit geringem Infrarot-Anteil einzusetzen oder die IR-Strahlung durch Kaltlichtspiegel oder Wärmeschutzfilter, positioniert an geeigneter Stelle im Projektionsstrahlengang, drastisch zu reduzieren. Sehr wichtig ist eine exakte Fokussierung der Lampe zu den optischen Bauelementen. Günstig ist hierbei, vor allem auch für den Lampenwechsel, der Einsatz von vorjustierten Lampen-Spiegelsystemen als Baueinheit, wie z. B. Kaltlichtspiegellampen mit fokussierendem dichroitischen Reflektor. Je nach Anwendungsfall werden folgende Lampengruppen eingesetzt:

- Halogen-Glühlampen mit Kaltlichtspiegel 35 W bis 150 W;
- Halogen-Metall dampflampen in Kurzbogenausführung 100 W bis 400 W, teilweise mit Kaltlichtspiegel;
- Mikro-Xenon-Halogen-Metall dampflampen 100 W (Version der Autoscheinwerferlampe D2) mit integriertem Spiegel.

Je nach Lampenart und Konstruktionsaufbau des Projektors werden die Fokussierungssysteme entsprechend Bild ④ angewandt. In Bild ⑤ wird der Aufbau eines Projektors mit einer Halogen-Metall dampflampe 150 W mit integriertem Reflektor, betrieben an einem elektronischem Vorschaltgerät (EVG), gezeigt.

Bei der Auswahl der Projektoren für eine faseroptische Beleuchtungsanlage sollten folgende Kriterien hinterfragt werden:

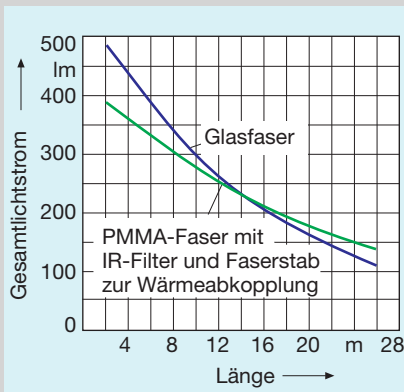
Art der Anlage. Dabei ist grundsätzlich zwischen der Endlicht- und der Seitenlichtanwendung zu unterscheiden.

Für **Endlichtanwendungen** gibt es noch Unterschiede hinsichtlich des Beleuchtungszwecks. Bei dekorativen Anlagen stehen folgende Fragen im Vordergrund: Wie viele Lichtpunkte sollen bei welcher Faserlänge mit einem Projektor gespeist werden? Welche Lichtstärke sollen die Faserenden aufweisen?

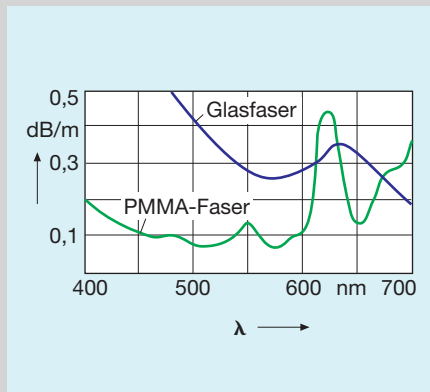
Bei funktionellen Anlagen ist zu klären: Welche Flächengröße soll mit welcher Beleuchtungsstärke beleuchtet werden?

Bei **Seitenlichtanwendungen** sind folgende Gesichtspunkte wichtig: Auf welcher Länge und mit welcher Leuchtdichte soll das Licht aus der Faser austreten? Erfolgt eine Lichteinspeisung an einer oder an beiden Seiten des Lichtfaserkabels?

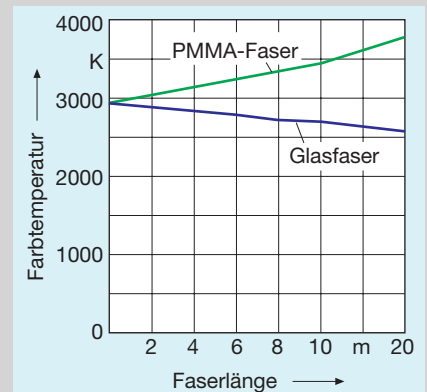
Lichtfarbe und Farbwiedergabe. Die Anforderungen an die Lichtfarbe (Farbtemperatur T_F) und die Farbwiedergabe (Farb-



⑥ Lichtstromverlauf für Glasfasern und PMMA-Fasern über der Faserlänge



⑦ Dämpfungsverlauf in Abhängigkeit der Wellenlänge λ im sichtbaren Spektralbereich für Glasfasern und PMMA-Fasern



⑧ Änderung der Farbtemperatur in Abhängigkeit von der Faserlänge, bezogen auf den Lichtaustritt

wiedergabestufe R_a) entscheiden über das Leuchtmittel. Die Werte betragen bei:

- Halogen-Glühlampen: T_F im Bereich von 2800 K bis 3200 K, $R_a = 100$ und
- Halogen-Metallampfen: T_F von 3000 K bis 8500 K, $R_a = 60$ bis 85.

Bei der Lampenwahl ist zu berücksichtigen, dass bei Anwendung von Glas- und Kunststofffasern unterschiedliche Farbverschiebungen auftreten.

Betriebsbedingungen. Beim Einschalten und Wiedereinschalten ist zu beachten, dass Halogen-Metallampfen eine Anlaufzeit von etwa zehn Minuten benötigen und nach dem Ausschalten nicht sofort wieder einschaltfähig sind (Ausnahme: Betrieb an speziellem EVG).

Dimmen: Halogen-Glühlampen sind mit elektrischen und optischen Mitteln, Halogen-Metallampfen nur mit optischen Mitteln dimmbar.

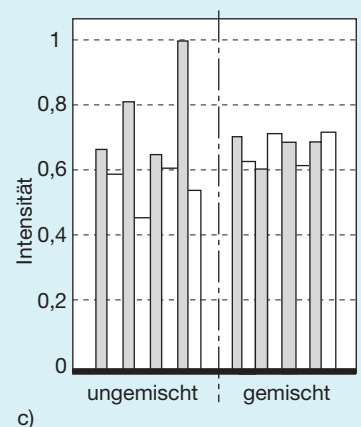
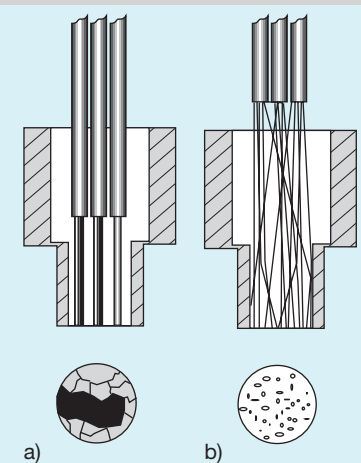
Wirtschaftlichkeit. Ein wesentlicher Einflussfaktor für die Wirtschaftlichkeit von faseroptischen Beleuchtungssystemen ist die Lampenlebensdauer. Hier sind die Halogen-Metallampfen mit Lebensdauerwerten von 6000 h bis 9000 h den Halogen-Glühlampen mit 2000 h bis 4000 h deutlich überlegen. Allerdings gibt es auch Lampenformen mit abweichenden Werten: Halogen-Glühlampen mit höherer Lebensdauer und niedrigerem Lichtstrom, Halogen-Metallampfen mit besonders hoher Leuchtdichte und deutlich geringerer Lebensdauer.

Umgebungsbedingungen. Die Auswahl ist nach Innenraum- oder Außenanwendung zu treffen. Wichtig ist die Einhaltung der notwendigen Schutzart für das Gehäuse (IP 40 oder IP 54). Die meisten Projektoren, insbesondere die mit hoher Leistungsaufnahme, müssen die im Gehäuse auftretende Wärme mittels Zwangslüftung abführen. Hier ist der Geräuschpegel der eingebauten Lüfter insbesondere in ruhigen Innenräumen zu berücksichtigen: Geräuschpegel: 25 bis 31 dB(A).

Viele Lichtprojektoren sind zwecks Erzeugung spezieller Licht- und Farbeffekte mit motorgetriebenen Farbrädern oder Glitzereffekträdern ausgerüstet.

3.2 Lichtfaserkabel

Glasfasern haben einen Durchmesser von 50 μm bis 150 μm . Eine große Anzahl dieser Fasern (bis zu 100.000) können zu einem biegsamen Bündel mit einer Dicke bis zu 20 mm zusammengefasst werden. Kunststofffasern weisen ähnliche Durchmesser auf. Das Faserbündel kann aber auch nur aus einer Faser entsprechenden Durchmessers bestehen. Die Faserbündel werden umhüllt; diese Umhüllung erfolgt mit einer Mantelschicht aus lichtundurchlässigem und halogenfreiem Kunststoff. Mehrere Faserbündel werden am Einspeisungsende in einem Endtopf konzentriert. Die Faserbündelanzahl, die von einem Lichtprojektor gespeist wird, richtet sich nach der möglichen Aperturöffnung. Zur Verbesserung des Wirkungsgrades der Einspeisung werden die Faserbündel am Lichteintrittsende verdichtet; der Lichtaustritt des Projektors und die optische Fasereinspeisung müssen gut aufeinander abgestimmt sein. Das Material der Einzelfasern kann Glas oder Kunststoff (PMMA – Polymethylmetacrylat) sein. Bei der Einspeisung führt der notwendige Wärmeschutz bei Kunststofffasern zu höheren Lichtverlusten gegenüber Glasfasern. Dafür ist bei den Kunststofffasern der auf die Länge bezogene Dämpfungswert geringer: 0,1 dB/m bis 0,4 dB/m gegenüber 0,2 dB/m bis 0,6 dB/m bei Glasfasern. Typisch ist der in Bild ⑥ dargestellte Lichtstromverlauf. Bei guten Kunststofffasern kann man von einer Dämpfung von 0,13 dB/m ausgehen. Das bedeutet ein Lichtstromrückgang von 2,2 % pro Meter. Beide Fasermaterialien haben einen unterschiedlichen spektralen Dämpfungsverlauf im sichtbaren Bereich (Bild ⑦), was zu einer deutlichen Änderung der Farbtemperatur mit zunehmender Faserlänge führt (Bild ⑧). Bei der Planung muss dieses unbedingt dort beachtet werden, wo die Lichtfarbe am beleuchteten Objekt eine wesentliche Rol-



⑨ Prinzip der „Mischung“ der Lichtfasern im Faserbündel

- a) gemeinsames Ende ungemischt
- b) gemeinsames Ende gemischt
- c) Intensitätsverteilung für ein Lichtfaserbündel mit acht Armen

le spielt. Die Wärmebeständigkeit ist bei Glasfasern mit ca. 200 °C erheblich höher als bei PMMA-Fasern mit ca. 85 °C. Die Alterung bei Kunststofffasern liegt bei ca. 8 % nach zehn Jahren. Nach 20 Jahren ist der Alterungsprozess wesentlich stärker, weil das Material vergilbt und versprödet. Glasfasern verhalten sich günstiger.

Um die Transmissionsverluste nicht zu erhöhen, sollte der minimale Biegeradius im folgenden Bereich sein: 4- bis 6-facher Wert des Lichtfaserbündeldurchmessers bei Glasfasern, bei Kunststofffasern ist es der 8- bis 10-fache Wert.

An der gemeinsamen Lichteintrittsfläche der Lichtfasern ist die Beleuchtung je nach Projektionssystem nicht exakt gleichmäßig. Um eine gleichmäßige Lichtintensität im Faserbündel zu erreichen, ist eine „Mischung“ der Lichtfasern, wie in Bild 9 gezeigt, notwendig. Bei Glasfasern beträgt das Verhältnis 8:1, bei PMMA-Fasern 25:1 (feingemischt).

Bei der Seitenlichtanwendung sind die Fasern mit Additiven gegen UV-Strahlungsbelastung sowohl im Kern als auch im Schutzschlauch ausgestattet. Dies schützt die Fasern sowohl vor der UV-Strahlung der Hochdruck-Entladungslampen im Lichtprojektor als auch vor der Sonneneinstrahlung im Außenbereich. Zusätzlich werden noch Additive gegen Chlor, Pilze, Schimmel und Algen verwendet, um den Anforderungen für die Einsatzgebiete im Wasser und im Außenraum gerecht zu werden. Die normale Verlegung erfolgt offen im nicht geschlossenen U-Kanal (z. B. an Fassaden), um die Reinigung von Staub und Ablagerungen durch das Regenwasser zu ermöglichen.

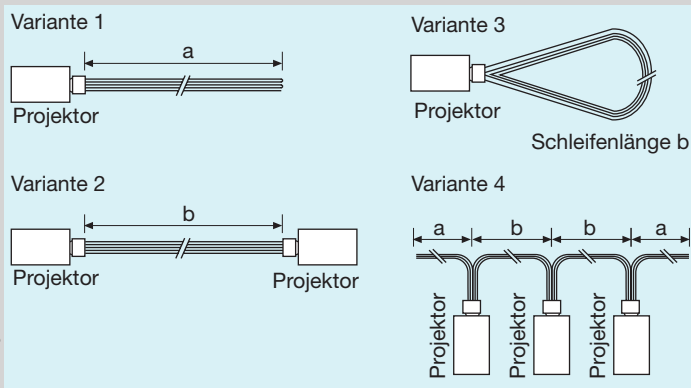
3.3 Lichtoptische Abschlusselemente

Während bei der Seitenlichtanwendung der Lichtaustritt nahezu ungebündelt und homogen über die Faserlänge erfolgt, kann er bei der Endlichtanwendung durch lichtoptische Bauelemente stark beeinflusst werden. Die Lichtaustrittsenden der Faserbündel sind entweder wie im gesamten Verlauf umhüllt oder mit einer Metallhülse ummantelt. Das Licht tritt mit einem Ausstrahlungswinkel von ca. 70° , bei polierten Kabelenden mit ca. 30° aus. Durch die lichtoptischen Elemente in Form von Vorsatzlinsen lässt sich das Licht so bündeln, dass Ausstrahlungswinkel von 6° erzielbar sind. Dadurch werden hohe Lichtstärkewerte in der Ausstrahlungsachse erreicht. Für die exakte Planung der für die Anwendung in Frage kommenden Vorsatzlinsen können die Lichtstärkeverteilungskurven der Hersteller herangezogen werden. Diese optischen Vorsatzelemente für die funktionelle Anwendung können als Linsen, Umlenkspiegel, Umlenkprismen oder Faserlinsen ausgelegt sein. Es gibt sie auch in dreh- und schwenkbarer Ausführung. Teilweise sind sie fokussierbar. Für die dekorative Anwendung können die Abschlusselemente aber auch mit verschiedenen gestalteten Glas- oder Kristallformen versehen werden. Die Abschlusselemente sind konstruktiv so ausgeführt, dass eine Einbau- oder Anbaulösung möglich ist, die Verbindung mit dem Faserbündel erfolgt durch Steckverbindung mit dem Metallhülsenabschluss.

Für die Anwendung im Außenbereich müssen die Abschlusselemente für die notwendige Schutzart ausgelegt und auch entsprechend mechanisch robust sein (z. B. als Bodeneinbaustrahler).

10 Lichtfaserein- speisungsvarianten bei Seiten- lichtanwendun- gen:

a) max. 10 m bei Glasfasern, max. 15 m bei Kunststofffasern;
b) max. 20 m bei Glasfasern, 30 bis 40 m bei Kunststofffasern



11 Beleuchtung in einer Wandvitrine im Museum für Völkerkunde, Wien



12 Beleuchtung des Pylons im City-Carré Berlin (Foto: LBM Lichtleit-Fasertechnik)

Unterwasserstrahler in Schwimmbecken, Brunnen und Fontänen müssen teilweise auch druckwasserdicht ausgeführt werden.

4 Lichtplanung

Bei der Lichtplanung von faseroptischen Beleuchtungsanlagen ist vom jeweiligen Anwendungsfall auszugehen. Hauptfrage-



13 Prinzip der Lichtleitfasertechnik für Verkehrszeichen (Foto: Schott)

stellung hierbei ist, ob eine Endlicht- oder Seitenlichtanordnung zur Anwendung kommen soll. Viele Hersteller von faseroptischen Beleuchtungssystemen bieten auch konfektionierte Lösungen für typische Anwendungsfälle mit darauf abgestimmten Baugruppen-Sets an.

Bei exakter Planung sollten die unterschiedlichen Eigenschaften der Lichtfaserkabel mit den Fasermaterialien Glas und PMMA unbedingt berücksichtigt werden. Die Anwendung der Glasfaser bietet Vorteile für langlebige Anlagen, in Gefahrenbereichen bei erhöhten Temperaturen, bei hoher UV-Strahlungsbelastung und Belastung durch aggressive chemische Gase in der Umgebung. Allerdings erfolgt schon bei Faserlängen ab 5 m eine merkbare Farb-

verschiebung nach Rot. Die Wahl der Lampe des Lichtprojektors sollte hierauf abgestimmt sein. Das Fasermaterial ist relativ teuer und nicht montagefreundlich, da eine Leitungsverkürzung vor Ort nicht möglich ist. Die Anwendung von PMMA-Fasern ist vorteilhaft im Nassbereich und unter Wasser. Eine Farbverschiebung nach Blau-Grün tritt erst bei größeren Kabellängen auf. Mit einem Biegeradius von 25° bis 30° sind die Fasern flexibel und leicht zu installieren, ein Zuschnitt der Faserbündel vor Ort ist möglich. Die PMMA-Fasern sind kostengünstiger als Glasfasern. Bei der Endlichtanwendung ist zu berücksichtigen, dass nach 10 m Kabellänge noch ca. 65 bis 75 % der Anfangslichtstärke vorhanden sind. Da hierbei nur eine einseitige Lichteinspeisung möglich ist, bestimmen Faserbündelanzahl und notwendige Faserlänge den zweckmäßigen Lichtprojektor.

Bei der Seitenlichtanwendung gibt es mehrere Möglichkeiten der Lichteinspeisung in das Lichtfaserbündel (Bild 10). Dadurch lassen sich auch unterschiedliche Längen mit homogener Lichtabstrahlung realisieren. Problematisch ist allerdings bei diesen Anordnungen die Definition der Leuchtdichtegleichmäßigkeit. Die Anforderungen an diese Gleichmäßigkeit bestimmen die maximale Faserbündellänge. Deshalb erfolgen auch die Längenangaben in Bild 10 für einen Wertebereich. Bei der einseitigen Einspeisung (Variante 1 in Bild 10) wird das Licht am Faserende wieder in die Faser zurückgespiegelt. Die besten Werte für die leuchtende Länge erreicht man mit Projektoren mit der D2-Lampe (bis zu 40 m bei den Varianten 2 bis 4) und mit einer verdrehten Führung der Einzelfasern (bis zu 45 m bei Einspeisung nach den Varianten 2 bis 4).

Je nach verwendetem Lichtprojektor lassen sich Leuchtdichten bis zu 400 cd/m² erzielen.

Da sich die Planung mit faseroptischen Beleuchtungssystemen von der Planung herkömmlicher Beleuchtungsanlagen deutlich unterscheidet, sollten deshalb die Hersteller mit ihrem entsprechenden Know-how konsultiert werden.

5 Beispiele von Beleuchtungsanlagen

Auf die möglichen Vorteile des Einsatzes von faseroptischen Beleuchtungssystemen für bestimmte Beleuchtungsaufgaben ist schon einleitend hingewiesen worden. Die Endlichtanwendung mit faseroptischen Systemen ist u. a. mit betriebstechnischen und wirtschaftlichen Vorteilen verbunden, wenn strahlungsempfindliche Exponate, noch dazu in geschlossenen Vitrinen, zu beleuchten sind. Bild 11 zeigt eine solche Anwendung. Die „Leuchtenanordnung“ ist in-

nerhalb der Vitrine, so dass für den Betrachter störende Spiegelungen in der Vitrinenverglasung entfallen. Das Licht ist UV- und IR-frei; der Lichtgenerator befindet sich außerhalb der Vitrine, mit dem Vorteil, dass keine Wärmebelastung im Vitrineninneren vorhanden und der Lampenwechsel einfach durchführbar ist. Die auf das Ausstellungsgut bezogene Lichtgestaltung und die Lichtbetonung kann durch den Einsatz unterschiedlicher lichtoptischer Elemente optimal vorgenommen werden. In einer Vitrine können die Exponate mit kleinen Deckenstrahlern unterschiedlicher Lichtstärkeverteilung beleuchtet werden. Die Beleuchtung des Ausstellungsstückes in einer Vitrine nach Bild ⑪ erfolgt durch seitliche Direktanstrahlung und durch die variabel einstellbaren Spiegelemente im Deckenbereich. Dadurch wird die vertikale Fläche des Exponates gut beleuchtet.

Die Seitenlichtanwendung bietet u. a. Vorteile für die Lichttechnik bei linienförmiger Wegebegrenzung, einer visuellen Wegeführung und bei der Fassadenakzentuierung. Für die letztgenannte Anwendung in größeren Höhen ist vor allem die leichtere Wartung von Vorteil. Ein Beispiel hierfür ist die Pylon-Beleuchtung in Bild ⑫: Der Lichtprojektor ist unterhalb des Pylons angebracht. Das Faserbündel muss nicht gewartet werden, da es durch die Verlegung im offenen U-Kanal vom Regenwasser gereinigt wird.

5.1 Faseroptische Systeme in Verkehrszeichen

Die faseroptischen Beleuchtungssysteme lassen sich modular so abstimmen, dass sie für viele Anwendungszwecke einsetzbar sind, z. B. Endoskop- und Inspektionsbeleuchtung. Eine zweckmäßige Anwendung ist für beleuchtete Wechselverkehrszeichen mit einer großen Anzahl von Bildpunkten gegeben. Wechselverkehrszeichen werden eingesetzt in Anlagen zur Anzeige der Verkehrsbeeinflussung, für die Stauwarnung, für die Verkehrsinformation und von mobilen Baustellen.

Um den erhöhten Anforderungen an die Betriebssicherheit dieser Anlagen zu genügen, wird der Lichtprojektor mit zwei Halogen-Kaltlichtspiegellampen ausgerüstet. Die Lampen sind so justiert, dass der Strahlenverlauf hinter einem halbdurchlässigen Spiegel (Lichtteiler) für beide Lampen identisch ist (Bild ⑬). So bleibt bei Ausfall der einen und Zuschaltung der anderen Lampe die Lichtintensität und die Abstrahlcharakteristik des Signals erhalten. Die Lichtstärke und der Abstrahlwinkel können durch die lichtoptischen Elemente am Lichtaustritt des Faserbündels (Optik 6° bis 24°) auf die notwendige Erkennbarkeit eingestellt werden. Die konstruktiv mögliche Entfernung von 20 m zwischen Lichtprojektor und Verkehrszeichen ermöglicht eine problemlose Wartung ohne die Notwendigkeit der Fahrbahnspernung oder der Begehbarkeit der Schilderbrücken. ■