

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
2.	Definition.....	2
3.	Anwendungen der Seitenlichtfaser.....	4
4.	Grundlage.....	7
4.1	Optische Fasern.....	7
4.2	Modengleichverteilung und Modegleichgewichtverteilung.....	9
5	Methoden um Seitenlicht zu erzeugen.....	11
5.1	Ändern der Faser während der Herstellung.....	11
5.2	Behandlung der Faser nach der Herstellung.....	13
6	Messungen.....	19
6.1	Aufteilung der Strahlungsleistung.....	20
6.1.1	Die Lichtquelle.....	21
6.1.2	Die Strahlaufweitung.....	25
6.2	Referenzmessung.....	26
6.3	Die Einkoppeloptik.....	29
6.4	Messung des Seitenlichts und des geführten Lichts.....	30
6.4.1	Beschreibung der Ulbrichtkugel.....	30
6.4.2	Messung des Seitenlichts.....	31
6.4.3	Messung des geführten Lichts.....	33
6.5	Kalibrierung der Ulbrichtkugel.....	35
6.5.1	Untersuchte Methoden zur Kalibrierung.....	35
6.5.2	Grundkalibrierung.....	38
6.5.3	Kalibrierung für das geführt Licht.....	39
6.5.4	Messgeräte.....	42
6.6	Anisotropie der Faser.....	43
6.7	Messaufbau.....	45
7	Studie der Abstrahlungscharakteristiken.....	49
7.1	Charakterisierung des Seitenlichts.....	50
7.2	Charakterisierung des geführten Lichts.....	60
7.3	Charakterisierung der Absorption.....	63
7.4	Anisotropie.....	66

8	Abschluss .....	72
9	Bild- und Tabellenverzeichnis .....	76
9.1	Bildverzeichnis .....	76
9.2	Tabellenverzeichnis .....	79
10	Literaturverzeichnis .....	80
11	Anhang.....	83
11.1	Ergebnisse Seitenlicht.....	83
11.2	Ergebnisse geführtes Licht.....	87

## Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Heinheit	Bedeutung
$\gamma_{\max}$	[°]	Grenzwinkel des Strahls für totale Reflexion
$\Phi_{e_A}$	[W]	Absorbierte Strahlungsleistung
$\Phi_{e_E}$	[W]	Strahlungsleistung am Eingang der Faser
$\Phi_{e_G}$	[W]	Strahlungsleistung des geführten Lichts
$\Phi_{e_K}$	[W]	Seitenstrahlungsleistung am Eingang des Faserkerns
$\Phi_{e_M}$	[W]	Seitenstrahlungsleistung am Eingang des Fasermantels
$\Phi_{e_S}$	[W]	Seitenstrahlungsleistung der Faser
$\theta$	[°]	Anregungswinkel
$\theta_{\max}$	[°]	Maximale Anregungswinkel
$d$	[m]	Länge der Faser
$D$	[mm]	Durchmesser
EMD		Modengleichverteilung
$f_1, f_2, f_3$	[mm]	Linsebrennweiten
$H_2, H_3$		Hauptebene
$k$	[m <sup>-1</sup> ]	Lichtverlustkoeffizient der Faser
$k_K$	[m <sup>-1</sup> ]	Lichtverlustkoeffizient des Faserkerns
$k_M$	[m <sup>-1</sup> ]	Lichtverlustkoeffizient des Fasermantels
$korr_1, korr_2$		Korrekturfaktoren
$l_1, l_2, l_3$	[mm]	Abstände
$L_1, L_2, L_3$		Linsen
NA		Numerische Apertur
$n_{Mantel}$		Brechzahl der Mantel
$n_{Kern}$		Brechzahl de Kern
$P$		Prozentsatz der Strahlungsleistung, die als Seitenlicht abgestrahlt wird
$P_a$		Prozentsatz der Absorption einer Faser

POF		Polymer Optische Faser
$R$		Reflexionsfaktor am Ende der Faser
UMD		Modegleichgewichtverteilung
$W_{\text{kleine Röhren}}$	[nA]	Messergebnis der Kalibrierung mit kleinen Röhren
$W_{\text{Sensor}}$	[nA]	Messergebnis der Kalibrierung mit dem Detektor
$W_{\text{Ulbrichtkugel}}$	[nA]	Messergebnis der Kalibrierung mit der Ulbrichtkugel in Hauptzustand
$x$	[m]	Position
$x_1, x_2, x_3$	[mm]	Linsepositionen
$x_{H2}$	[mm]	Position der Hauptebene

## 1. Einleitung

Die Entwicklung der Beleuchtungstechniken ist immer auf die Verbesserung bestimmter wesentlicher Eigenschaften ausgerichtet, vor allem unter dem Aspekt der Sicherheit, der Lichtausbeute und der Flexibilität beim Einsatz. Obwohl die optischen Fasern ursprünglich für die Signalübertragung entwickelt wurden, erlaubt die Ableitung ihrer Hauptanwendung, dank Behandlungen, ein fast optimales Beleuchtungsmittel zu schaffen, welches den oben erwähnten Zielsetzungen entspricht.

Diese sogenannten „Seitenlichtfasern“ sind ziemlich neu, und daher besitzt jeder Hersteller seine individuellen Produktionstechniken. Die Anzahl der Typen von Seitenlichtfasern ist ziemlich hoch und alle besitzen Vor- und Nachteile. Die Zielsetzung dieser Diplomarbeit ist, diese Fasern, sowie ihre Anwendungen zu definieren. Anschliessend werden die verschiedenen Verfahren zur Abstrahlung des Seitenlichts klassifiziert, die benutzten Methoden erklärt, sowie die Strahlungseigenschaften und Verteilung des Lichtes gemessen. Abschliessend wird eine Studie dieser Ergebnisse durchgeführt.

Die derzeitigen Hauptanwendungen dieser Fasern beschränken sich fast ausschließlich auf das Design. In der Tat erfordert dieses Gebiet nicht, die präzisen Eigenschaften der Strahlung der Fasern zu kennen. Die Studie und die Charakterisierung der Strahlung erlaubt andererseits den Unternehmen, die sie herstellen, Vergleichskriterien zu bekommen und die Wahl künftiger Verbesserungen zu vereinfachen. Eine bessere Kenntnis der Eigenschaften erlaubt auch den Anwendern, die ihren Bedürfnissen am besten angepasste Fasern zu wählen.

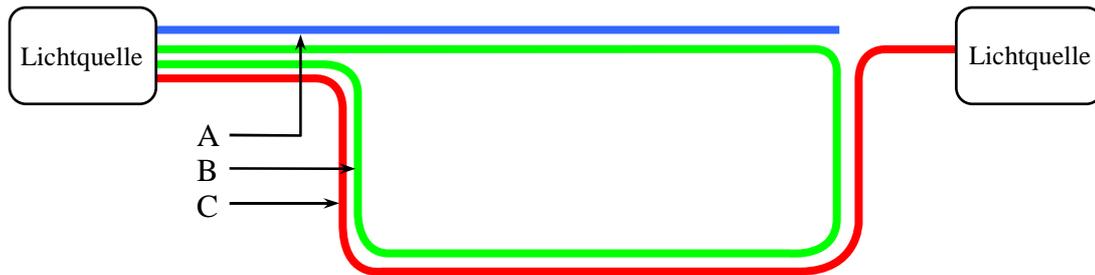
## 2. Definition

Die Seitenlichtfaser ist eine optische Faser, die durch verschiedene Herstellungsverfahren, Licht auf ihrer Seite emittiert.

Die Faser selbst ist keine Lichtquelle, sie kann nur das eingekoppelte Licht führen und abstrahlen. Der Vorteil der Faser besteht darin, dass sie keine Wärme und Elektrizität überträgt. Sie kann ohne Gefahr in Flüssigkeiten oder explosionsgefährdeten Umgebung eingesetzt oder beschädigt werden, was mit elektrischen Beleuchtungsmitteln nicht möglich ist. Da diese Faser aus Kunststoff bestehen, sind sie mechanisch auch sehr stabil, was bei normalen Leuchtmitteln nicht der Fall ist.

Die Seitenlichtfasern haben noch mehrere andere Trümpfe im Vergleich mit linearförmiger Lichtquelle wie z.B. Leuchtstoffröhren. Sie sind flexibel, diese Eigenschaft ist mehr oder weniger gemäß den benutzten Materialien und dem Herstellungsverfahren ausgeprägt.

Drei unterschiedliche Kopplungsmethoden der Lichtquellen zur Beleuchtung der Seitenlichtfasern werden eingesetzt [10]. Die Erste besteht darin, nur eine Lichtquelle an einem Ende der Faser zu benutzen (Siehe Abb. 2.1 A). Das Problem dieser Methode ist, dass die Veränderung der Strahlungsleistung der Faser auf ihrer Länge ziemlich sichtbar ist, ausgenommen wenn sie eine Behandlung bekommen hat, die ihren Seitenlichtverlustkoeffizienten variieren lässt. Die zweite Methode benutzt nur eine Lichtquelle für die zwei Enden der Faser (Siehe Abb. 2.1 B). In diesem Fall hat die Faser eine viel konstantere Abstrahlung, aber muss zwingend eine „Konfiguration in Schleife“ haben. Die letzte Methode besteht darin, eine Lichtquelle pro Fasernende zu benutzen (Siehe Abb. 2.1 C). Das erlaubt, eine Abstrahlung auf längerem Abstand mit einer scheinbar fast konstanten Beleuchtung zu erreichen, ohne eine Rückkehr der Faser zu ihrem Ausgangspunkt zu erzwingen. Diese Lösung erlaubt auch, Licht unterschiedlicher Farbe an jedem Ende der Faser einzusetzen, um Lichtspiele realisieren zu können.



**Abb. 2.1 :** Mögliche Einkopplungen der Seitenlichtfasern (A: Einzel Einkopplung, B: Einkopplung in Schleife, C: Doppelte Einkopplung)

Da die Seitenlichtfasern nur das Licht übermitteln, können die Lichtquellen in einem separaten Geräteraum einfach zugänglich und geschützt aufgebaut werden. Obwohl die Lebensdauer der Seitenlichtfasern noch nicht sehr gut bekannt ist, ist es trotzdem sicher, dass sie im Durchschnitt deutlich länger ist als die von Leuchtstoffröhren. Die Übertragung des Lichtes zwischen der Quelle und der Seitenlichtfaser kann von normalen Fasern übernommen werden, um nur ein Minimum des Lichtes zu verlieren. Diese Methode erlaubt eine einfache und billige Wartung der Lichtquellen.

### 3. Anwendungen der Seitenlichtfaser

Wie vorher erwähnt, kann die Seitenlichtfasern auf Grund ihrer besonderen Eigenschaften (keine Stromleitung, keine Wärmeleitung, Flexibilität), für eine Vielzahl von Anwendungen verwendet werden. Die folgende Liste stellt pro Gebiet die von verschiedenen Herstellern vorgeschlagenen Anwendungen vor:

#### Sicherheitsbeleuchtung für:

- Gefährliche oder explosive Bereiche
- Gefahrenzonen im Straßenbau
- Unfall- und Notschilder
- Jachthafenanlegeplätze
- Gefrier- und Kühlräume
- Hubschrauberlandeplätze und Flughafenzufahrten
- Notausgänge oder -wege
- Industriegebiete
- Verkehrs- und Richtungssignale
- Bootsbeleuchtung
- Stufen- und Korridormarkierungen



Abb. 3.1 : Stufenmarkierungen mit Seitenlichtfasern [16]

#### Dekorations- u. Designbeleuchtung für:

- Einkaufszentren und -passagen
- Casinos
- Treppe und Rolltreppen
- Telefonzelle und Bushaltestellen
- Aquarien
- Eisskulpturen und Kunstmarke
- Kronleuchter
- Kostbare Kunstproduktbeleuchtung
- Automobile, Busse und LKWs
- Hervorhebung von Gebäudecharakteristiken
- Discos und Nachtclubs
- Gebäude-Foyers und -flure
- Kleidungen
- Schilder
- Weihnachtsausstellungen
- Messen und Ausstellungen
- Kabinette und dekorative Möbel
- Schaufenster

- Landschaftsgestaltung entlang von Straßen und Gärten



**Abb. 3.2 :** Dekorations- u. Designbeleuchtung für Kleidungen [17] Turm [18]  
 Drahtseilbahnkabine [19] mit Seitenlichtfasern

### Inspektionsbeleuchtung für:

- Installateur
- Gefrier- und Klimaanlage-techniker
- Elektroniker und Leiterplattentechniker
- Medizinische und zahnmedizinische Fachleute
- Liebhaber - wie Vogel- und Pflanzenzüchter
- Automechaniker
- Juweliere und Uhrmacher

### Beleuchtung für gefährdete Bereiche:

- Minenschächte und -tunnels
- Schweiß- und Lackierbereiche
- Straßenbaustellen
- Schwimmbäder und Whirlpool
- Munitionsbunker
- Getreideaufzüge



**Abb. 3.3 :** Beleuchtung einer Whirlpool mit Seitenlichtfasern [16]

**Alternative Beleuchtung oder Anwendungen für:**

- Tageslichtbeleuchtung
- Herkömmliche Beleuchtung
- Sensoren



**Abb. 3.4 :** Tageslichtbeleuchtung mit Seitenlichtfasern [20]

## 4. Grundlage

### 4.1 Optische Fasern

Die Seitenlichtfasern basieren auf der normalen optische Fasern. Deswegen stellt dieses Kapitel die verschiedenen Arten der optischen Faser dar. Eine optische Faser ist ein zylinderförmiger dielektrischer Wellenleiter, der das Licht entlang seiner Achse, durch den Prozess der Totalreflexion überträgt. Die Faser besteht aus einem Kern, der durch einen Mantel umgeben wird. Um das optische Signal im Kern zu begrenzen, muss die Brechzahl des Kernes größer als die des Mantels sein. Es gibt 3 Hauptarten Fasern:

- Multimode Stufenindex Faser
- Multimode Gradientenindex Faser
- Singlemode Faser

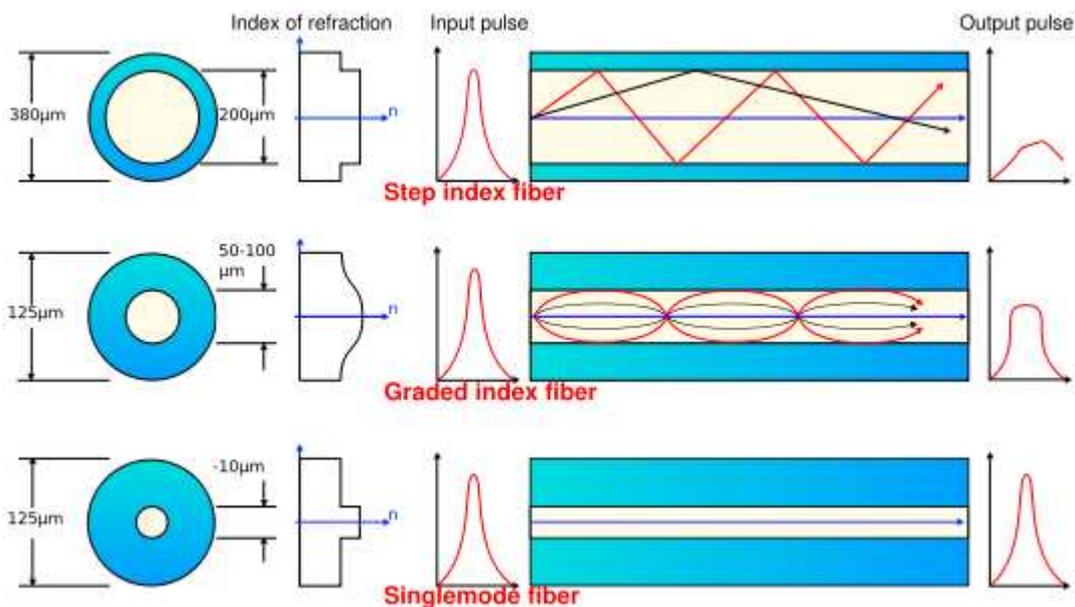
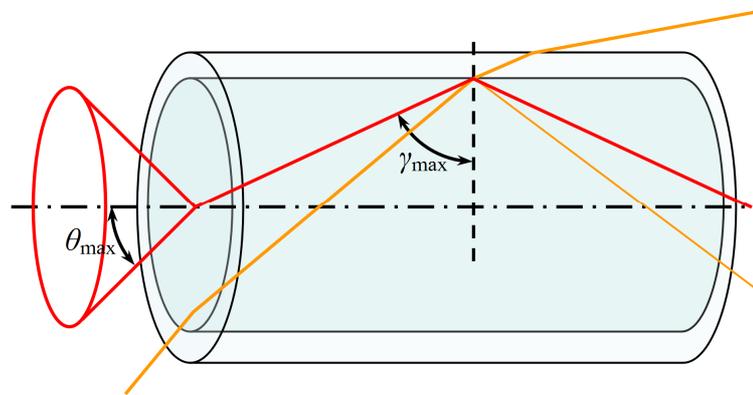


Abb. 4.1 : Optische Fasertypen [11]

Es ist wichtig zu erwähnen, dass je mehr die Fasercharakteristiken zur Signalübertragung angepasst werden, desto schlechter ist die Eignung zur Seitenbeleuchtung. In der Tat, benötigt Seitenlichtfaser einen großen Kern, um eine maximale Strahlungsleistung an den Faserenden einkoppeln zu können. Da Gradientenindex Faser und Singlemode Faser Grund ihrer kleinen

Kerndurchmesser zur Beleuchtung kaum geeignet sind, werden sie nicht weiter dargestellt.

In einer Multimode Stufenindex Faser werden Strahlen des Lichtes entlang des Kerns durch Totalreflexion geführt. Wenn die Strahlen die Kern-Mantel Grenzfläche in einem hohen Winkel treffen (gemessen im Verhältnis zur Flächennormal) die für diese Grenze größer als der kritische Winkel ist, werden sie vollständig reflektiert. Der kritische Winkel ist der minimale Winkel für die Totalreflexion. Er wird durch den Unterschied bezüglich der Brechzahl zwischen dem Kern und den Mantel bestimmt.



**Abb. 4.2 :** Zur Definition des Akzeptanzwinkels

Grenzwinkel des Strahls für totale Reflexion: 
$$\gamma_{\max} = \arcsin\left(\frac{n_{\text{Mantel}}}{n_{\text{Kern}}}\right) \text{ [}^\circ\text{]} \quad (1)$$

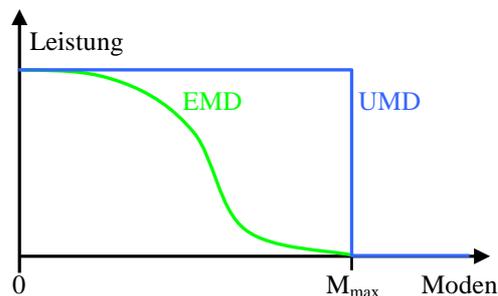
Strahlen, die die Grenze in einem kleinen Winkel treffen, werden vom Kern in den Mantel gebrochen und keine Licht entlang der Faser geführt. Der kritische Winkel bestimmt den Akzeptanzwinkel der Faser, häufig bezeichnet als numerische Apertur (NA).

Numerische Apertur: 
$$NA = \sin(\theta_{\max}) = \sqrt{n_{\text{Kern}}^2 - n_{\text{Mantel}}^2} \quad (2)$$

Je größer die numerische Apertur ist, desto größer ist der möglich Einkoppelwinkel. Da die Seitenlichtfasern in der Regel aus Polymer hergestellt werden, liegt die numerische Apertur im Allgemeinen im Bereich zwischen 0.3 und 0.7.

## 4.2 Modengleichverteilung und Modegleichgewichtsverteilung

Um das Verständnis des Kapitels „Studie der Abstrahlungscharakteristiken“ zu vereinfachen ist es wichtig, die Grundkenntnisse zum Thema UMD und EMD vorzustellen. Die Modengleichverteilung (UMD: Uniform Mode Distribution) entspricht einer konstanten Intensitätsverteilung über die Moden (mögliche Ausbreitungswege des Lichts innerhalb der Faser). Dieser Fall kann durch ein Graph dargestellt werden, der die Strahlungsleistung abhängig von der Moden darstellt.



**Abb. 4.3 :** Strahlungsleistung abhängig von der Moden

Die Polymer optische Fasern (POF), zu deren Ausnahmen Seitenlichtfasern gehören, haben einen Dämpfung, sei es durch Seitenlicht oder Absorption, die Modeabhängig ist. Solange die Verteilung der Moden in der Faser nicht stabil ist, variiert der Lichtverlust auf der Länge der Faser. Wenn eine stabile Verteilung der Moden erreicht wird, wird diese als Modengleichgewichtsverteilung bezeichnet (EMD: Equilibrium Mode Distribution). Der Lichtverlust wird konstant und folgt die Formel:

$$\Phi_{e_G}(x) = \Phi_{e_E} \cdot e^{-k \cdot x} \quad (3)$$

Mit

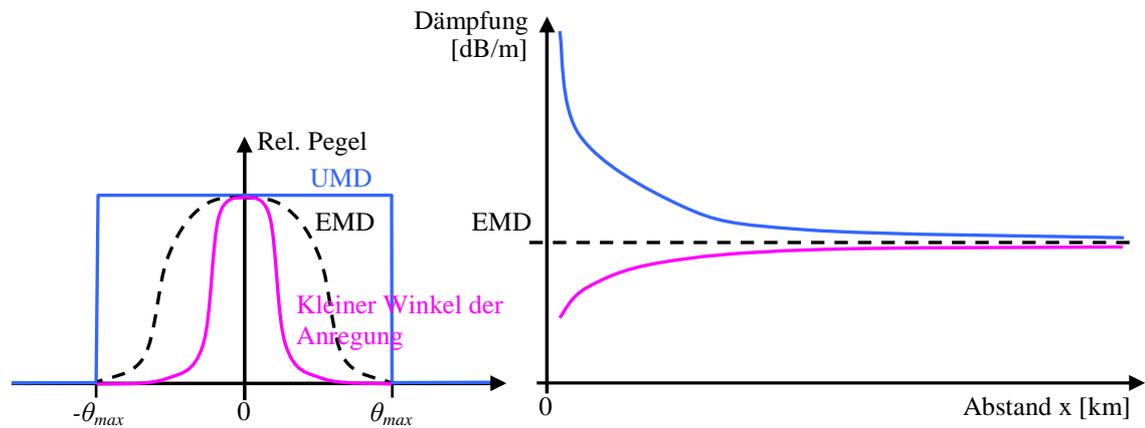
$\Phi_{e_G}$  [W] : Strahlungsleistung des geführtes Lichts

$\Phi_{e_E}$  [W] : Strahlungsleistung am Eingang der Faser

$k$  [ $m^{-1}$ ] : Lichtverlustkoeffizient der Faser

$x$  [m] : Position

Es ist möglich, diese Lage mit zwei Graphen darzustellen.



**Abb. 4.4 :** Einfluss der Modenverteilung auf die längeabhängige Dämpfung

## 5 Methoden um Seitenlicht zu erzeugen

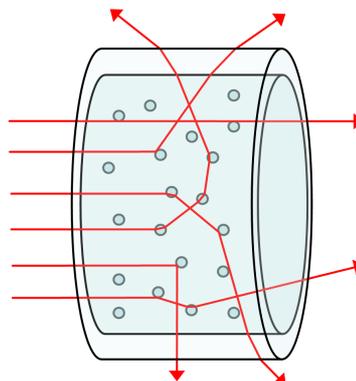
Im Gegensatz zu allgemeinen optischen Fasern, die das Licht im Kern leiten soll, bekommen die Seitenlichtfasern eine Behandlung um ein Teil des Lichts nach außen zu emittieren. Diese Änderungen der Faser können auf dem Mantel oder dem Kern, während oder nach der Herstellung der Faser durchgeführt werden. Nach diesen Änderungseigenschaften ist es möglich, die verschiedenen Arten von Behandlungen in zwei Hauptkategorien zu klassifizieren, die im Allgemeinen von Firmen benutzt wurden:

- Ändern der Faser während der Herstellung
- Behandlung der Faser nach der Herstellung

### 5.1 Ändern der Faser während der Herstellung

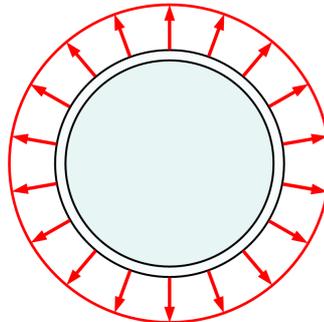
Die einzige Möglichkeit, während der Herstellung, die Fasern zu ändern ist eine Dotierung des Kern oder/und des Mantel durchzuführen. Jeder Hersteller benutzt sein eigenes Produkt um die Fasern zu dotieren. Diese Materialien sind im allgemeinen aktinisch-empfindliche Färbungen, kristalline oder andere lichtzerstreuende Materialien [7]. Ungeachtet des Materials, das für die Dotierung benutzt wird, ist die Wirkung gleich.

Wenn die Dotierung im Kern ist, werden die Strahlen durch die Dotierungspartikel umgelenkt und erhöhen den Winkel der Strahlen hinsichtlich der Faserachse. Wenn dieser Winkel grösser als der Grenzwinkel der Totalreflexion zwischen Kern und Mantel wird, so können die Strahlen die Faser als Seitenlicht verlassen.



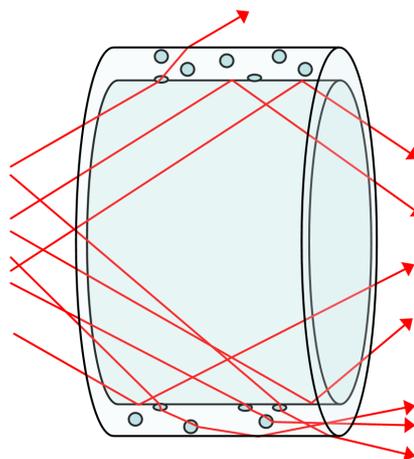
**Abb. 5.1 :** Seitenabstrahlung durch Dotierung des Kerns

Diese Methode hat den Vorteil, einen ziemlich hohen Seitenlichtverlust zu besitzen, auch dann, wenn die Seitenlichtfaser mit kollimiertem Licht beleuchtet wird. Die Abstrahlung hat keinen punktuellen Lichteffekte (siehe Kap. 5.2), und eine gleichmäßige radiale Abstrahlung.



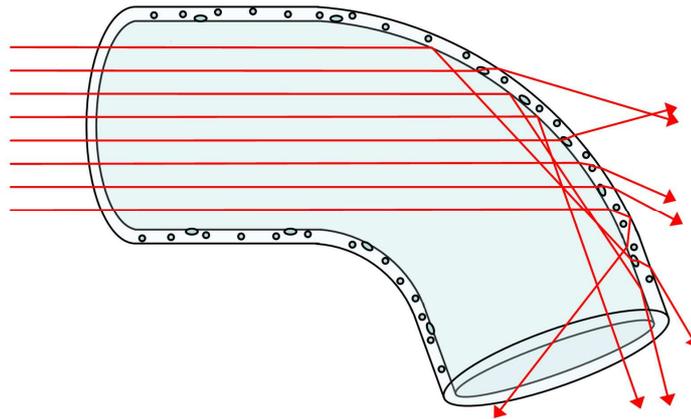
**Abb. 5.2 :** Radiale Abstrahlung einer dotierten Seitenlichtfaser

Wenn die Dotierung im Mantel ist, kann sie nur einen Effekt haben, wenn die Dotierungspartikel sich an der Grenzfläche zwischen Kern und Mantel befindet. Die Brechzahl des Dotierungsmaterials muss in diesen Fall größer als vom Kern sein. Der Strahl wird dann zwischen Kern und Partikel keine Totalreflexion haben und kann die Faser verlassen.



**Abb. 5.3 :** Seitenabstrahlung durch Dotierung des Mantels

Die Nachteile dieser Methode sind, dass sie viel Dotierung benötigt um einen Effekt zu erzielen und die seitliche Lichtauskopplung stark vom Einkoppelwinkel der Lichtquelle abhängt, wird zum Beispiel mit kollimierten Licht in die Faser gestrahlt, so wird theoretisch Seitenlicht nur an Biegungen abgestrahlt.



**Abb. 5.4 :** Theoretisch Seitenabstrahlung durch Dotierung des Mantels mit kollimiertem Licht in die Seitenlichtfaser gestrahlt

Diese Art der Dotierung ist jedoch sehr selten und wird fast nie eingesetzt. Keine der in dieser Arbeit untersuchten Seitenlichtfasern besitzt einen dotierten Mantel.

Die Dotierung hat den Nachteil, dass sie immer in etwa konstant bleibt. Es ist zu kompliziert und deshalb zu teuer, zum Beispiel eine logarithmische Dotierung entlang der Faser herzustellen.

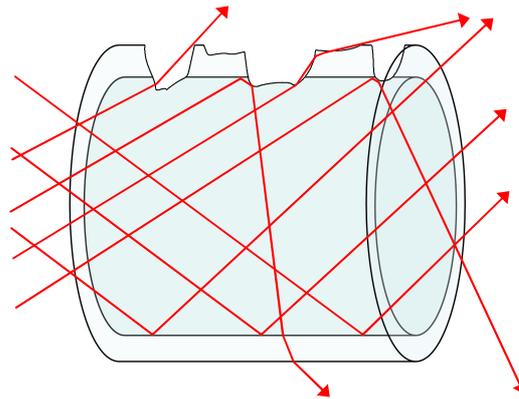
## **5.2 Behandlung der Faser nach der Herstellung**

Diese Behandlungstechniken werden im Augenblick sehr gerne benutzt, weil dadurch normale POF eingesetzt werden kann. Da, für einige Firmen, Seitenlichtfasern nur einen sehr kleinen Prozentsatz der gesamten Faserproduktion darstellen, ist diese Methode billiger. Sie erlauben auch verschiedene Lichteffekte zu erzeugen, was in vielen Fällen interessant ist und für Designbeleuchtung benutzt werden kann.

Vier Behandlungsmethoden sind in diese Kategorie klassifiziert:

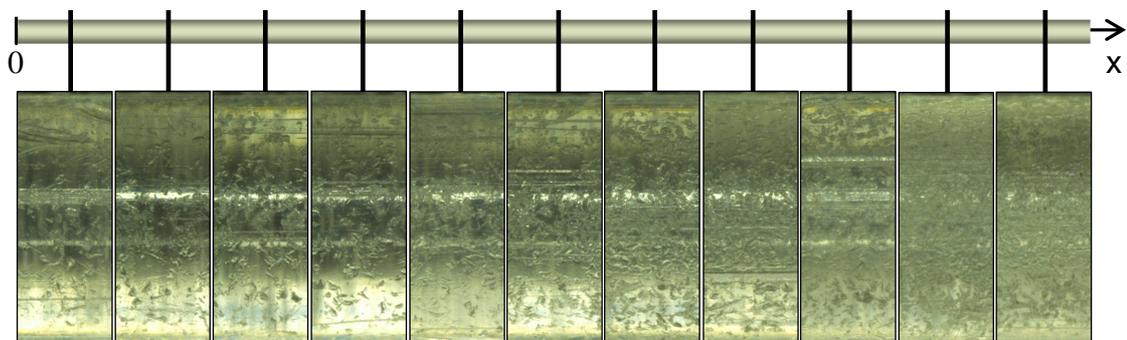
- Mechanisches Abtragen
- Abtragen durch Laser
- Chemisches Ätzen
- Verdrehung der Fasern (Kabeln)

Das mechanische Abtragen berücksichtigt alle Abrasionsmethoden, sei es durch Sandstrahlen, Bürsten oder Abschneiden. Abreiben durch Sandstrahlen besteht darin, die Faser mit einem Pulver abhängig der Härte des Mantels abzustrahlen. Wenn Sand auf einem Teil der Faser den Mantel entfernt und die Oberfläche des Kerns aufräut, werden Strahlen auf diesem Teil nicht mehr total reflektiert. Die Faser emittiert dadurch Licht auf dieser Zone.



**Abb. 5.5 :** Seitenabstrahlung durch mechanische Abtragen

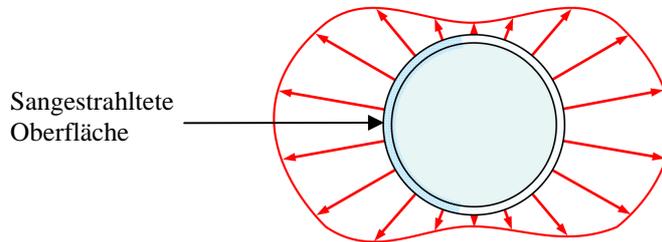
Diese Technik ist auf fast alle Fasern anwendbar, da sie relativ einfach und präzise zu gebrauchen ist. Die Methode ermöglicht auch einen variablen Seitenverlustkoeffizienten (siehe Kap. 7.1), um eine konstante Abstrahlung entlang der Faser mit nur einer Lichtquelle an einem Faserende zu erreichen. Das folgende Bild zeigt eine Seitenlichtfaser, die diese spezielle Behandlung bekommen hat, um eine konstante Strahlungsleistung entlang der Faser zu bekommen.



**Abb. 5.6 :** Logarithmische Sandstrahlung auf eine Faser um konstante Seitenabstrahlung zu erzeugen

Die Besonderheit dieser Behandlung ist, dass das Licht fast nur in der Zone, in der kein Mantel mehr vorhanden ist, austreten kann. Bei einer Betrachtung der Faser aus einer kürzeren Entfernung, bis zu einigen Metern, kann das aus den

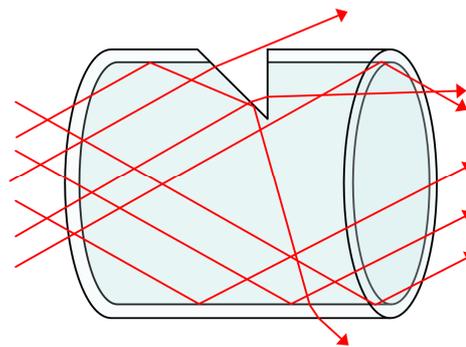
Fehlstellen austretende Licht punktuell sichtbar sein. Außerdem, wenn sie die Sandstrahlung nur auf einer Seite erhalten haben, wie es der Fall für diesen getesteten Fasertyp ist, hat sie keine gleichmäßige radiale Abstrahlung.



**Abb. 5.7 :** Radiale Abstrahlung einer sandgestrahlten Seitenlichtfaser

Wenn die Faser einen großen Durchmesser hat, kann sie auch gebürstet werden. In diesem Fall werden mit einer Bürste Kratzer auf die Oberfläche der Faser aufgebracht, womit verschiedene Lichteffekte erzeugt werden können, indem man parallel oder gekreuzt bürstet. Jedoch kann diese Methode auf Grund des hohen Aufwandes und folglich des hohen Preises nur in Ausnahmen angewendet werden.

Das letzte mechanische Abtragverfahren ist das Einschneiden der Faser. In definierten Abständen werden mit einem Messer der Mantel und eine Teile des Kerns abgeschnitten. Die Faser emittiert dann fast nur Licht in diesem Bereich.



**Abb. 5.8 :** Seitenabstrahlung durch das Einschneiden der Faser

Diese Methode wird ziemlich oft benutzt, da sie einfach hergestellt werden kann und ein einfaches Designelement ist. Sie erlaubt mit mehreren neben einander gestellten gleichen Fasern einen Sternenhimmelleffekt zu schaffen.

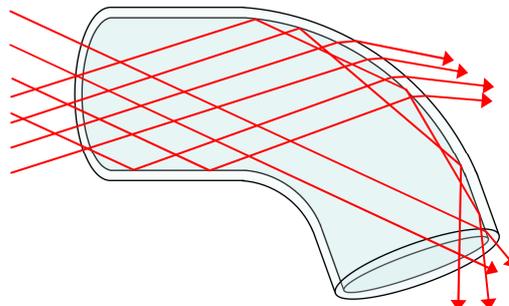


**Abb. 5.9 :** Sternenhimmelleffekt durch das Einschneiden der Faser [21]

Das Abtragen durch Laser nimmt dieselben Grundsätze wieder auf wie das mechanische Abtragen. Anstatt den Mantel abzutragen und den Kern aufzurauen oder einem Teil der Faser mithilfe einer Bürste, Messer oder Sandes zu bearbeiten, realisiert der Laser das Abtragen durch thermische Erosion. Diese Methode wird selten benutzt, da sie die gleichen Effekte wie das mechanische Abtragen erzielt, aber wesentlich teurer ist.

Das chemische Ätzen kann mit optischen Fasern nur dann benutzt werden, wenn die Umhüllung mit dem Lösungsmittel reagiert, um damit seine Oberfläche zu ändern. Die Abschleifwirkung ist jener ähnlich, die durch das Sandstrahlen erhalten werden kann. Da der Mantel der Seitenlichtfaser oft sehrwiderstandsfähig gegen Ätzmitteln ist, wird diese Methode auch nur sehr selten eingesetzt.

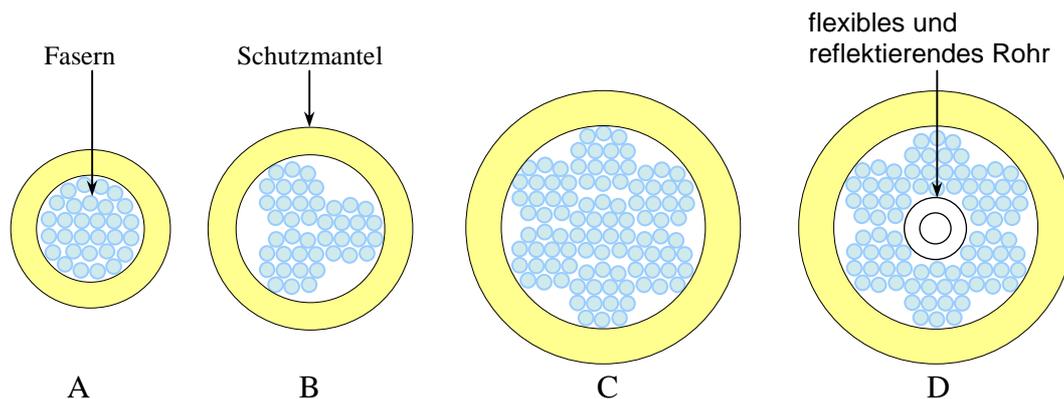
Die letzte Möglichkeit um Seitenlicht zu bekommen ist die Verdrehung der Fasern. Wenn der Biegeradius einer Faser zu klein wird, wird ein Teil des geführten Lichts nicht mehr total reflektiert und verlässt die Faser.



**Abb. 5.10 :** Seitenabstrahlung durch Verdrehung der Fasern

Diese Methode wird nur für Seitenlichtfasern als Kabel benutzt. Die Biegung wird durch verdrehen der Fasern erzielt. Deswegen ist der Durchmesser dieser Kabel in der Nähe von 10 mm oder sogar dicker. Die Kabel haben gegenüber Fasern gleichen Durchmessers den Vorteil kleinere Biegeradien zu erlauben.

Es gibt vier Methoden, um die Fasern zu verdrillen.



**Abb. 5.11** : Verschiedene Möglichkeiten um Fasern zu verdrillen

Die Erste besteht einfach darin, die Fasern um sich selbst in einem Block zusammenzudrehen (siehe Abb. 5.11 A). Die Zweite wird für im Allgemeinen dickere Kabel benutzt (siehe Abb. 5.11 B). Die Fasern werden in Gruppen zusammen verdreht. Diese Fasergruppen werden anschließend wieder verdreht, um das Hauptkabel zu bekommen. Wenn der Durchmesser des Kabels größer als 10 mm wird, werden einige dünne Außenkabel um das Mittenkabel verdrillt (siehe Abb. 5.11 C). In diesem Fall stellt sich das Problem, dass die Mittenkabel nie direkt zur Außenseite des Kabels Licht strahlen können. Ein Teil des Lichts des Mittenkabels geht durch Absorption verloren. Außerdem absorbiert das Mittenkabel auch ein Teil des Lichts, das von den Außenkabeln in Richtung der Mitte abgestrahlt wird.

Deswegen gibt es eine weitere Möglichkeit, die für die dicksten Kabel benutzt wird (siehe Abb. 5.11 D). Wie für die zweite Methode, werden die Fasern zuerst in Gruppen zusammen verdreht. Anschließend werden Sie dagegen um ein flexibles und reflektierendes Rohr, zum Beispiel ein weißes PVC Rohr verdrillen. Mit dieser Technik wird das Seitenlicht, das in Richtung des Zentrums des Kabels gestrahlt wird, in Richtung der Außenseite gespiegelt, um

die Absorption zu reduzieren. Diese Lösung hat dennoch einen Nachteil, da die benutzten Lichtquellen einen Großteil ihrer Strahlungsleistung in das Zentrum der Faser strahlen. Wenn ein solches Kabel einfach vor eine Lichtquelle gestellt wird, wird das Licht, das in Richtung der Kabelmitte strahlt, komplett absorbiert. Ein optisches System ist also notwendig, um das Licht vom Zentrum des Kabels in den Randbereich umzuleiten. Nur damit erreicht man wirklich ein Vorteil mit dieser Methode.

Die vorgestellten Methoden werden meistens einzeln auf die Seitenlichtfaser angewendet. Es ist aber auch möglich mehrere Methoden zu kombinieren. Die Mehrzahl der Seitenlichtfasern wird heutzutage dotiert und erhält danach eine mechanische Behandlung oder wird zu Kabel verdrillt.

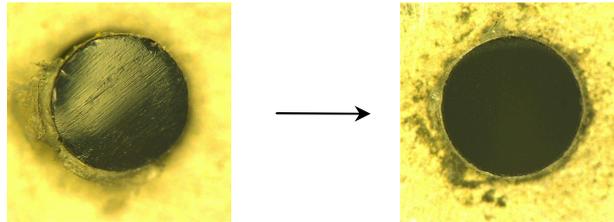
## 6 Messungen

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden zehn Seitenlichtfasern untersucht. Jede unter ihnen weist andere Eigenschaften auf, sei es im Durchmesser oder in den benutzten Methoden, um Seitenabstrahlung zu erhalten. Die folgende Tabelle stellt diese verschiedenen Fasern dar.

Faser	Durchmesser [mm]	Typ	Besonderheit
A	0.75	Sandstrahlung	Logarithmische Sandstrahlung
B	1	Sandstrahlung	
C	1.5	Sandstrahlung	
D	2	Sandstrahlung	
E	3	Dotierung	Ohne Mantel
F	3	Dotierung	
G	9	Kabel	
H	10	Dotierung	
I	11	Kabel	
J	15	Kabel	Weiß PVC Mitterohr

**Tabelle 6.1 :** Aufstellung aller getesteter Seitenlichtfasern

Die Abstrahlungscharakteristiken dieser Seitenlichtfasern werden mit zwei verschiedene Art von Messmethoden untersucht. Die erste Messmethode untersucht, wie sich das in die Faser eingekoppelte Licht der Faserlänge verteilt. Die zweite Messmethode untersucht das Abstrahlverhalten der Seitenlichtfaser. Um Endreflexion zu reduzieren und richtigere Messungen zu gewährleisten, werden alle Enden der Fasern poliert.



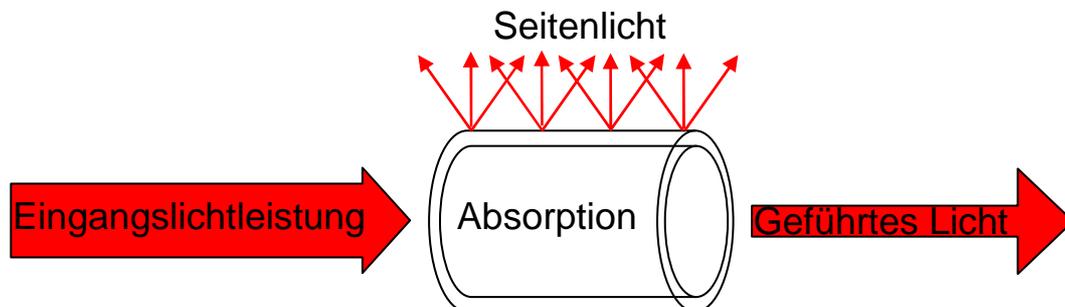
**Abb. 6.1 :** Beispiel der Oberfläche einer Faser vor und nach Polieren

Es ist auch wichtig festzustellen, dass alle Aufbauten später von schwarzen Stoffen überdeckt werden, um sie vor Licht zu schützen. Alle weiteren Lichtquellen des Laboratoriums werden während den Messungen ausgeschaltet, um jede Störung der Detektoren zu vermeiden.

### 6.1 Aufteilung der Strahlungsleistung

Das Licht kann für jeden Bereich der Faser, in drei verschiedene Arten unterteilt werden:

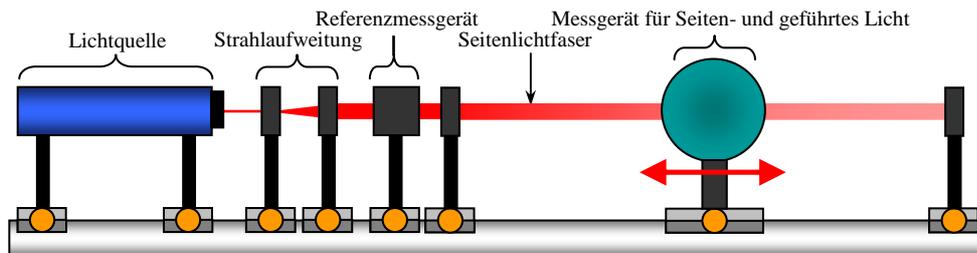
- Das Seitenlicht
- Das geführte Licht
- Die Absorption



**Abb. 6.2 :** Aufteilung der Strahlungsleistung in einer Seitenlichtfaser

Die Absorption kann nicht direkt gemessen werden. Aber, da diese drei Verteilungen voneinander abhängig sind, reicht es aus, dass Seiten- und geführte Licht zu vermessen, um die Faser völlig charakterisieren zu können. Die Konzeption eines Messaufbaus, der erlaubt die Seiten- und Achsenabstrahlung zu messen, teilt sich in fünf Bereiche auf.

- Die Lichtquelle
- Die Strahlaufweitung
- Der Referenzdetektor
- Die Einkopplung
- Der Detektor um das Seiten- und das geführte Licht zu messen



**Abb. 6.3 :** Aufstellung der notwendigen Elemente für die Messung der Seitenlicht und geführtes Licht

## 6.1.1 Die Lichtquelle

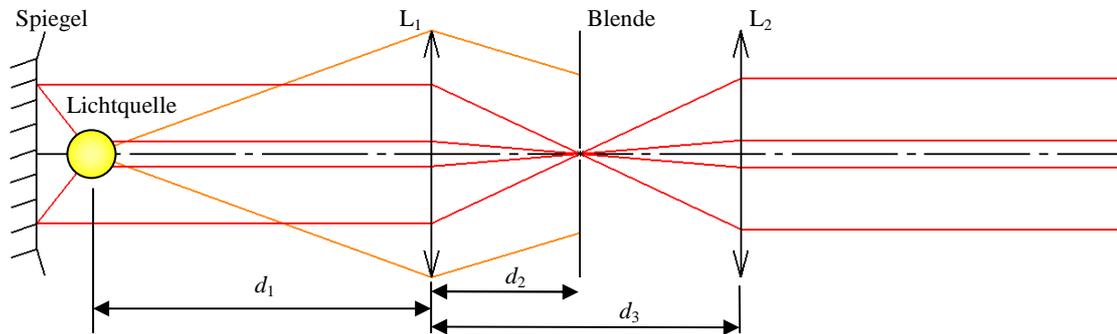
Die Lichtquelle soll ermöglichen, die Faser über das ganze sichtbare Spektrum zu prüfen. Um zu vermeiden, die Lichtquelle zu oft ändern zu müssen, sollte diese ein möglichst breites Spektrum aufweisen. Außerdem ist es praktisch, um die Entwicklung des Verlustkoeffizienten der Faser  $k$  abhängig vom Einkoppelwinkel des Lichts zu testen, eine Quelle zu haben, deren Strahlen kollimiert sind. Der Einkoppelwinkel kann so durch eine Linse oder eine Streufolie variiert werden. Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass unter den verfügbaren Lichtquellen ein perfekt kollimiertes Lichtbündel nur in der Theorie erreicht werden kann. Die Lichtquellen, die von Interesse wären, sind das Halogenlampen, LED und Laser.

### 6.1.1.1 Halogenlampe

Die Halogenlampe hat den großen Vorteil, dass sie ein sehr breites Spektrum besitzt. Dadurch kann das ganze sichtbare Spektrum auf einmal untersucht werden. Allerdings handelt es sich bei Halogenlampen um Kugelstrahler, welche in alle Raumrichtungen abstrahlen. Dadurch kann nur ein geringer Teil der Strahlungsleistung für die Messung genutzt werden.

Im Folgenden werden zwei mögliche optische Systeme vorgestellt, welche ermöglichen ein Maximum der Strahlungsleistung unter definierten Winkel in die Faser einzukoppeln. Das erste erzeugt ein paralleles Lichtbündel. Mit einer

Linse oder einer Streufolie kann dann der Einkoppelwinkel eingestellt werden. Das nächste Bild zeigt dieses System.



**Abb. 6.4 :** Erste möglichste optische System um ein paralleles Lichtbündel zu erzeugen

$$d_1 = 2 \cdot f_1 \quad (4)$$

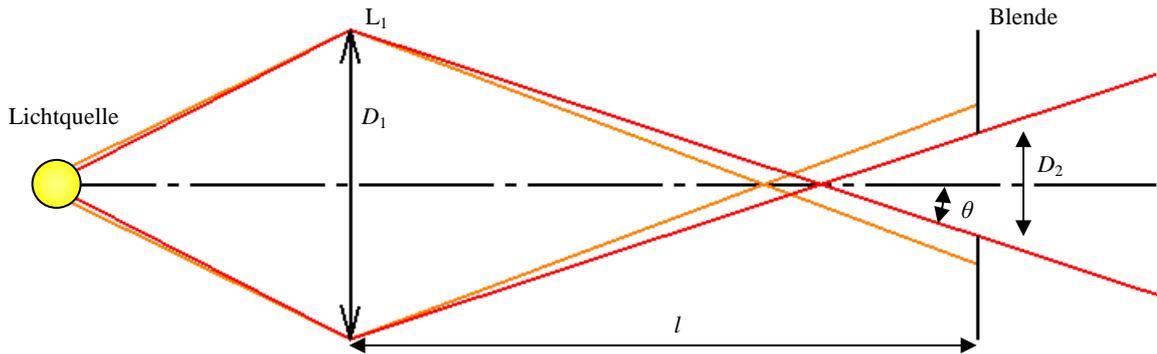
In der Theorie sollte  $d_1$  so lang wie möglich sein, um nur die parallele Strahlen auszuwählen. In der Praxis, gibt der gegebene Abstand sehr gute Ergebnisse für eine optimale Strahlungsleistung am Ende des Systems.

$$d_2 = f_1 \quad (5)$$

Je kleiner die Öffnung der Blende ist, desto mehr unkollierte Strahlen werden abgeschattet.

$$d_3 = f_1 + f_2 \quad (6)$$

Die andere Möglichkeit ist, ein optisches System mit nur einer angepassten großen Linse und einer Blende. Die Vorteile sind, dass die Anzahl der Reflexionen an Linsenoberflächen reduziert wird, und die Lichtsammel-eigenschaft einer Linse mit großem Durchmesser und kurzer Brennweite besser ist. Dadurch erreicht geringe Verluste und bekommt den maximale Strahlungsleistung. Die Blende erlaubt eine präzise Begrenzung des höchstmöglichen Einkoppelwinkels und vermeidet die Einführung von Licht in den Mantel der Faser. Die normalerweise eingesetzten Lichtquellen für Seitenlichtfaser strahlen fast immer Licht in dem Fasermantel. Für die Charakterisierung der Faser ist es wichtig, dieser Effekt nicht zu haben, denn das in den Fasermantel eingekoppelte Licht führt zu einer Verfälschung der gemessene Seitenverlust.



**Abb. 6.5 :** Zweite möglichste optische System um direkt Licht in der Faser einzukoppeln

$$\tan(\theta) = \frac{D_1 + D_2}{2 \cdot l} \quad (7)$$

Obwohl die Halogenlampe die beste Möglichkeit wäre, um die Seitenlichtfaser zu charakterisieren, war die stärkste zur Verfügung stehende Lampe mit einer Leistung von 150 [W] nicht leistungsstark genug um den Seitenlichtstrom mit einem Spektrometer messen zu können. Die schwächste benutzbare Lampe für solche Messungen wäre ungefähr 500 [W]. In solchem Fall ist es auch wichtig ein Infrarotfilter zu benutzen, um eine zu große Wärmeentwicklung am Anfang der Faser zu vermeiden.

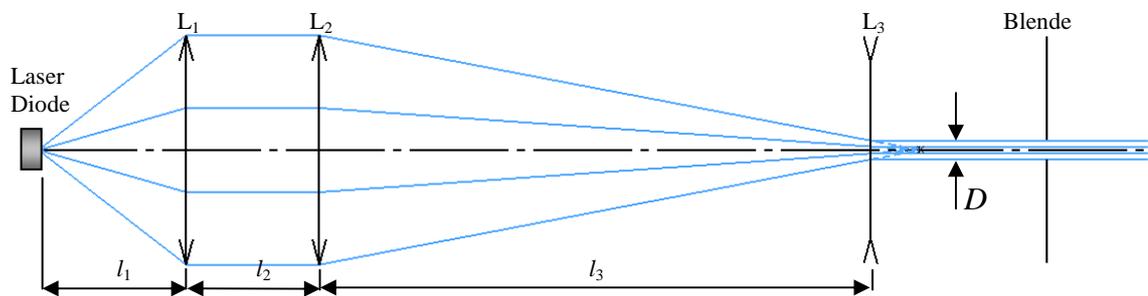
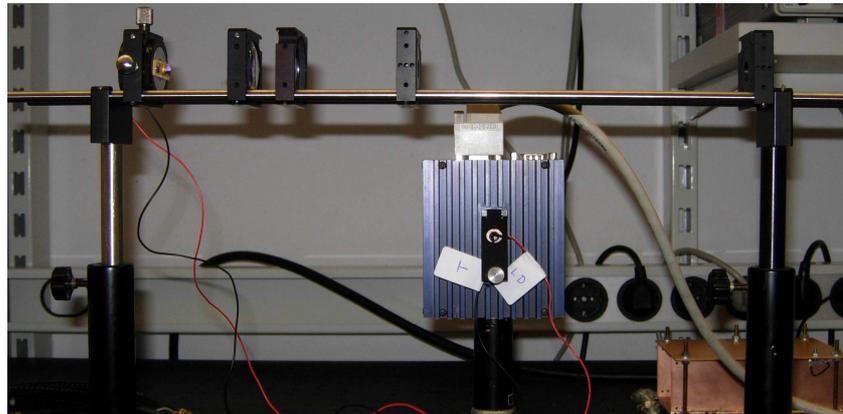
### 6.1.1.2 LED

LED besitzen kein breites Spektrum, aber es gibt heute verschiedene Typen, die unterschiedliche Spektralebereiche abdecken, und so erlauben, das ganze sichtbare Spektrum zu testen. Das Problem ist, dass es also notwendig ist, eine große Anzahl von LED zu benutzen, um das ganze sichtbare Spektrum zu testen. Was einen großen Zeitverlust darstellt. Außerdem strahlt die LED, wie die Halogenlampe, nicht kollimiert ab, daher muss ein optisches System eingesetzt werden, was erneut Leistungsverlusten führt.

### 6.1.1.3 Laser

Die Laser haben in diesem Fall den Nachteil monochromatisch zu sein. Andererseits haben diese ein fast vollkommen kollimiertes Licht mit hoher Intensität und einen geringen Durchmesser. Die Beleuchtung von Fasern wird oft mithilfe von RGB-Quellen realisiert. Aus diesem Grund werden Messungen mit den Wellenlängen 405 [nm] (blau), 543 [nm] (grün) und 632.8 [nm] (rot) durchgeführt. Da kein blaues Lasermodul zur Verfügung stand, muss erst mit

einer Laserdiode gearbeitet werden. Der Aufbau mit der Laserdiode wird im nächsten Bild gezeigt.



**Abb. 6.6 :** Aufbau des blauen Lasers mit optische Schema

Brennweite der Linse 1:	$f_1 = 50$	[mm]
Brennweite der Linse 2:	$f_2 = 60$	[mm]
Brennweite der Linse 3:	$f_3 = -10$	[mm]
Abstand 1:	$l_1 = 43$	[mm]
Abstand 2:	$l_2 = 25$	[mm]
Abstand 3:	$l_3 = 90$	[mm]
Durchmesser der kollimierten Strahlen:	$D = 0.6$	[mm]

Eine Übersicht über die für die Messungen benutzen Lichtquellen ist in Tabelle 6.2 dargestellt.

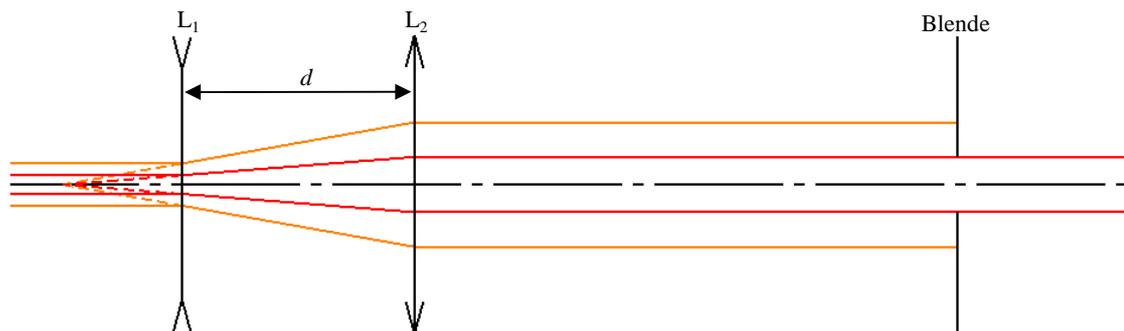
Typ	Wellenlänge [nm]	Farbe	Leistung [mW]	Hersteller
HeNe Laser	632.8	Rot	10	MELLES GRIOT
HeNe Laser	543	Grün	0.5	MEILING-Lasertechnik
Laser Diode	405	Blau	10	Röithner Lasertechnik GmbH

**Tabelle 6.2 :** Übersicht über die eingesetzten Lichtquellen

### 6.1.2 Die Strahlaufweitung

Für die dickeren Seitenlichtfasern, muss das kollimierte Licht, bevor es in die Faser eingekoppelt wird, aufgeweitet werden. Das Ziel ist, die Verteilung des Lichts auf der Oberfläche des Kerns zu optimieren. Eine gleichmäßige Verteilung ist für die Kabel besonders wichtig, um gleiche Strahlungsleistung auf allen Einzelfasern zu erhalten. Zwei ausgewählte Methoden werden vorgestellt.

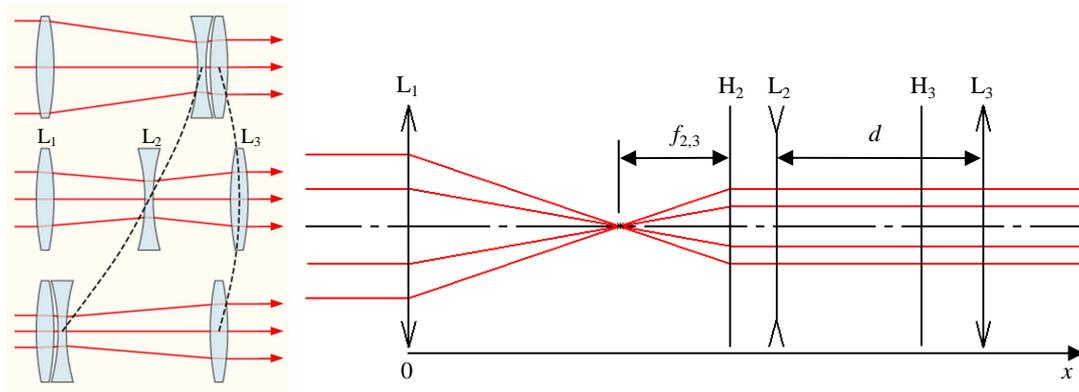
Die erste Methode verwendet zwei Linsen, eine konvexe und eine konkave, und ein Blende. Bei diesem Aufbau bleiben die Positionen der zwei Linsen fest. Nur die Öffnung der Blende kann modifiziert werden, um den Durchmesser des Lichtstrahls variieren zu können. Deswegen ist diese Methode sehr einfach anzuwenden. Der Nachteil dieses Systems ist, dass beim verkleinern des Durchmessers die Lichtverluste steigen.



**Abb. 6.7 :** Erste mögliche Strahlaufweitung

$$d = f_1 + f_2 \quad (8)$$

Die zweite Methode greift den Grundsatz des Teleobjektivs mit einem afokalen System auf. Dieses Prinzip funktioniert mit drei Linsen, zwei konvexen und einer konkaven. Sie hat den großen Vorteil, den Durchmesser des Lichtstrahls zu modifizieren ohne die Strahlungsleistung zu reduzieren. Wie auf dem nächsten Bild gezeigt wird, müssen zwei Linsen bewegt werden, um den Durchmesser des Lichtstrahls variieren zu können. Diese Methode ist relativ schwierig manuell um zu setzen, jedoch wäre es interessant den Ansatz mit einem elektrischen oder mechanischen Regelungsaufbau zu realisieren.



**Abb. 6.8 :** Zweite Strahlaufweitung mit den Grundsatz des Teleobjektivs mit einem afokalen System [12]

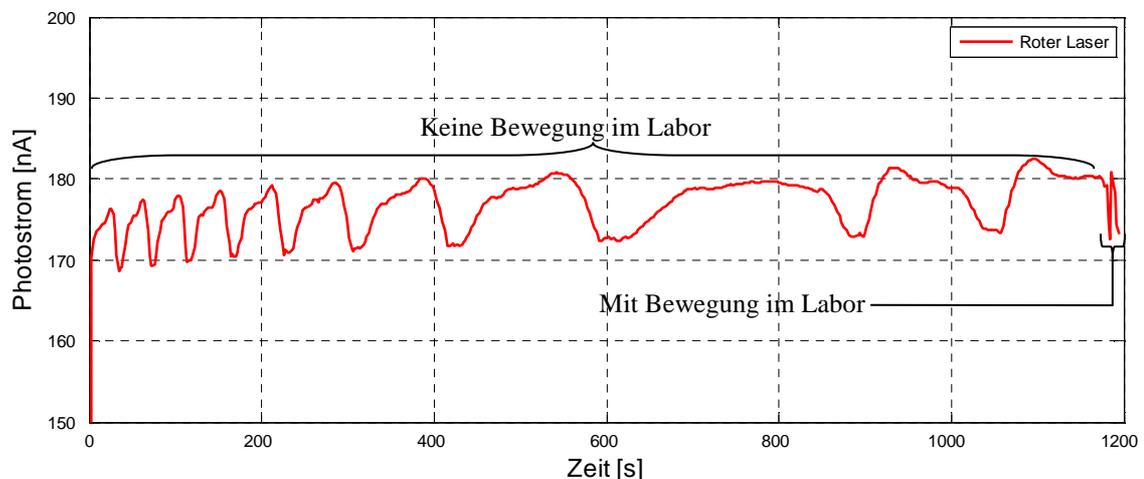
$$\frac{1}{f_{2,3}} = \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} - \frac{d}{f_2 \cdot f_3} \quad \Rightarrow \quad d = \frac{f_{2,3} \cdot (f_2 + f_3) - f_2 \cdot f_3}{f_{2,3}} \quad (9)$$

$$x_{H2} = x_2 + \frac{f_{2,3} \cdot d}{f_3} = f_1 + f_{2,3} \quad \Rightarrow \quad x_2(f_{2,3}) = f_1 + f_{2,3} \cdot (1 - f_2 + f_3) - f_2 \cdot f_3 \quad (10)$$

$$x_3 = x_2 + d \quad \Rightarrow \quad x_3(f_{2,3}) = f_{2,3} \cdot (1 - f_2 + f_3) + f_1 + f_2 + f_3 - f_2 \cdot f_3 - \frac{f_2 \cdot f_3}{f_{2,3}} \quad (11)$$

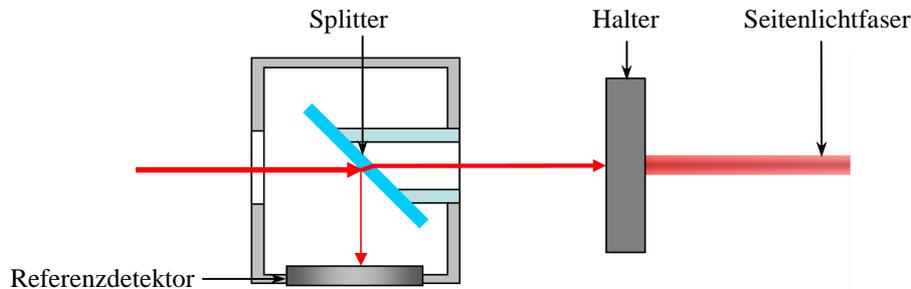
## 6.2 Referenzmessung

Außer bei einigen Ausnahmen, variieren alle Lichtquellen wegen Temperaturänderungen, dem Alter der Lichtquelle und anderen störenden Faktoren, im Laufe der Zeit ihre Strahlungsleistung. Das nächste Bild zeigt die Leistungsschwankungen eines roten Lasers über einen Zeitraum von 20 Minuten.



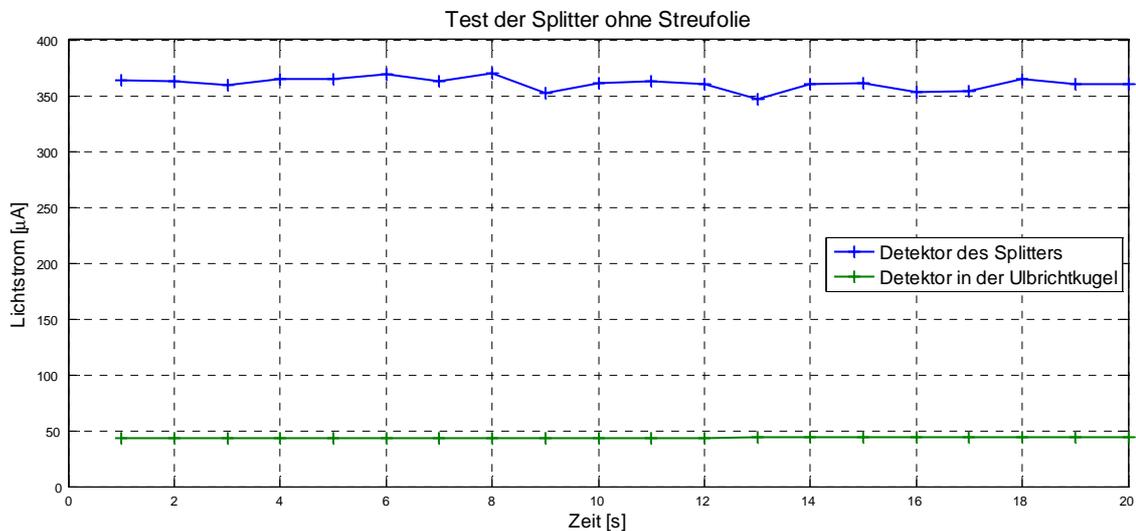
**Abb. 6.9 :** Schwankungen einen roten Laser durch Zeit

Jede Messungen muss daher mit einem Referenzwerten korrigiert werden. Die Absolutleistung der Referenzwerte ist für den Vergleich mit den Messwerten nicht wichtig, da mit diesen Werten nur ein Korrekturfaktor berechnet wird. Mit einem Splitter wird ca. 10% der ausgehenden Strahlungsleistung um 90° auf einen Detektor umgeleitet.



**Abb. 6.10** : Verteilung des Lichts mit einem Splitter auf einen Referenzdetektor

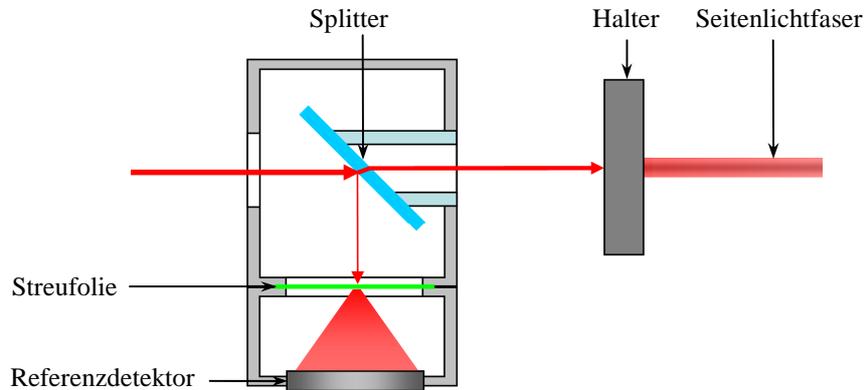
Für einen ersten Test, wird mit dem Referenzdetektor das reflektierte Licht aus dem Splitter gemessen. Ein zweiter Detektor, der in einer Ulbrichtkugel liegt, misst das Seitenlicht der Faser. Beide Sensoren messen mit dem gleichen Intervall von 20 Messungen während 20 Sekunden.



**Abb. 6.11** : Schwankungen der Photostrom des Referenzdetektor vergleicht mit Detektor in der Ulbrichtkugel

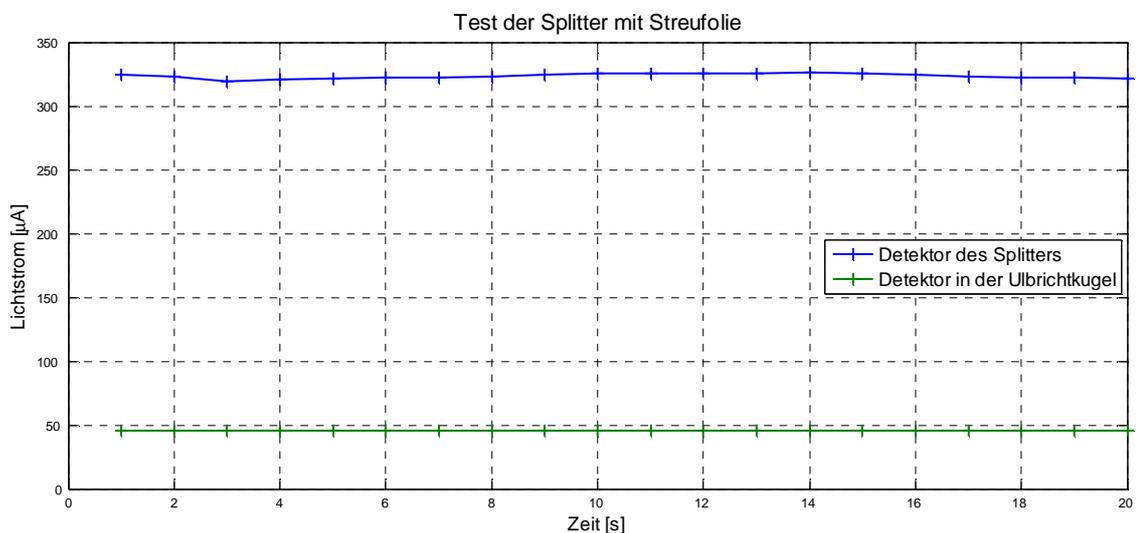
Es zeigt sich, dass die Referenzwerte größere Schwankungen haben als die, vom Detektor in der Ulbrichtkugel. Diese Schwankungen sind vielleicht das Ergebnis einer lokalen Übersteuerung des Referenzdetektors. Deswegen wird

eine Streufolie eingesetzt, um das Licht auf eine größere Fläche des Detektors zu verteilen.



**Abb. 6.12** : Splitter mit Streufolie

Die Ergebnisse, die durch eine zweite Messung der gleichen Art erzielt wurden, wie die Erste, aber mit der Streufolie zeigen, dass die Schwankungen zwischen dem Referenzdetektor und dem andere Detektor sich jetzt besser folgen. Diese letzte Messung erlaubt aber nicht zu sagen, ob der Detektor das erste Mal übersteuert war. Die Verteilung des Lichts ermöglicht jedoch die Referenzwerte zu verbessern.



**Abb. 6.13** : Test der Splitter mit Streufolie

Wie vorher in Bild VV dargestellt, wird der Strahl leicht durch die Strahlteilerplatt des Splitters versetzt. Außerdem ist der Strahlengang der Einkoppeloptik auf Grund ihrer Länge nicht vollkommen exakt auf der optischen Achse. Daher wird

die Einkoppelposition mit Hilfe eines verstellbaren Faserhalters genau auf die Endfläche der Faser justiert.

### 6.3 Die Einkoppeloptik

Das an der Seitenlichtfaser ankommende Licht ist noch kollimiert. Um die anregungsabhängigen Effekte untersuchen zu können, muss eine Methode gefunden werden, um den Winkel  $\theta$  der Anregung einfach zu modifizieren. Eine erste Möglichkeit ist, der Einsatz von Linsen mit verschiedenen Brennweiten. Da der Durchmesser des Lichtstrahls nach Strahlaufweitung bekannt ist und der Strahl nahezu kollimiert ist, wird dieser auf den Brennpunkt fokussiert. Damit kann der Winkel  $\theta$  mit Hilfe der Brennweite und des Strahldurchmessers einfach berechnet werden.

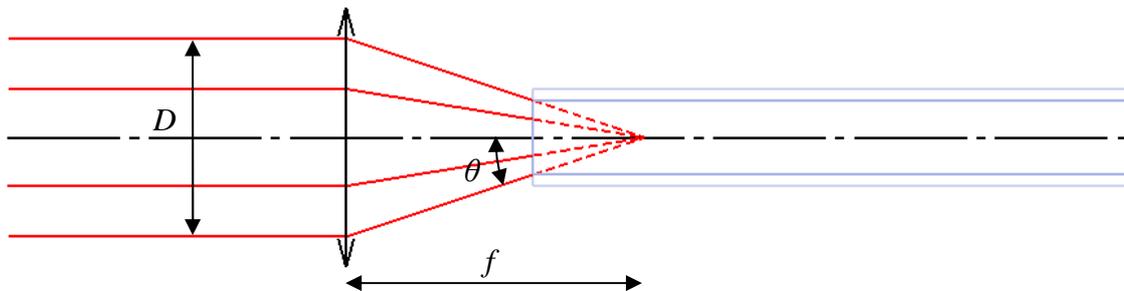


Abb. 6.14 : Änderung der Anregungswinkel mit einer Linse

$$\tan(\theta) = \frac{D/2}{f} \quad \Rightarrow \quad f = \frac{D}{2 \cdot \tan(\theta)} \quad (12)$$

Diese Methode hat allerdings, mehrere Nachteile. Da die der Winkel der Einkopplung  $\theta$  vom Durchmesser des Lichtstrahls abhängt, ist es schwer große Winkel zu erreichen und mit dünner Faser die Kopplung richtig zu regeln. Die Kabel stellen dabei auch Probleme dar. Das Ziel ist es, auf ihre ganze Eingangsfläche den gewünschten Winkel  $\theta$  zu haben, so dass, alle Einzelfasern ungefähr die gleiche Anregungs-Winkel  $\theta$  bekommen. Aber mit einer Linse werden die Einzelfasern mit unterschiedlichem Winkel angeregt.

Deswegen werden spezielle Streufolien eingesetzt. Diese Folien streuen das kollimierte Licht um eine diffuse Strahlung mit einem bekannten maximalen Winkel zu bekommen. Sie sind auch sehr dünn und können einfach direkt vor

die Faserendfläche gestellt werden. Vier Streufohlen sind für die Messungen verfügbar:

- POC 05 ( $\theta = \pm 2.5^\circ$ )
- POC 10 ( $\theta = \pm 5^\circ$ )
- POC 20 ( $\theta = \pm 10^\circ$ )
- POC 60 ( $\theta = \pm 30^\circ$ )

## **6.4 Messung des Seitenlichts und des geführten Lichts**

Da das Ziel ist, nicht nur die relative Verteilung des Seitenlicht und der geführte Strahlungsleistung entlang der Faser zu messen, sondern auch die Absorption zu berechnen, ist es notwendig die absolute Strahlungsleistung, die auf jeder Sektion der Faser abgestrahlt wird zu messen. Deswegen können solche Werte nur mit einem Ulbrichtkugel gemessen werden. Dieses Bauelement hat den Vorteil, dass das Licht, das drin strahlt, diffus zu reflektieren und zu mischen. Die reflektierte Strahlungsleistung von der Oberfläche der Ulbrichtkugel ist an jeder Stelle gleich, so lange die Lichtstrahlen nicht direkt auf den Detektor treffen. Die größt mögliche Abweichung der Werte zueinander liegt im Promille Bereich. Um mögliche Fehler zu begrenzen, wird die gleiche Ulbrichtkugel für die Messung des Seitenlicht und des geführte Licht eingesetzt.

### **6.4.1 Beschreibung der Ulbrichtkugel**

Für die Messung des Seitenlichts muss die Ulbrichtkugel zwei gegenüber liegende Öffnungen haben, um die Faser durch die Kugel durchführen zu können. Die Ulbrichtkugel muss genügend klein sein, um genug Licht auf den Detektor zu bringen. Gleichzeitig gilt, je kleiner die Ulbrichtkugel ist, desto größer wird der Einfluss der Bauelemente, die sich innerhalb befinden. Deswegen ist es besser eine Lichtquelle mit großer Strahlungsleistung zu verwenden, um eine möglichst große Ulbrichtkugel einsetzen zu können. Für diese Diplomarbeit stand nur eine Ulbrichtkugel mit gegenüberliegenden Öffnungen zur Verfügung, was die Wahl stark begrenzte. Die folgende Tabelle gibt die verschiedenen Charakteristiken der gewählten Ulbrichtkugel an.



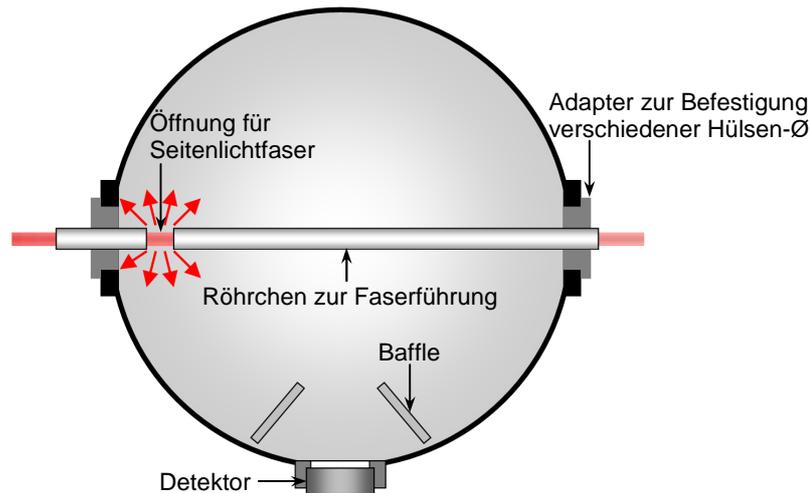
Abb. 6.15 : Verschiedene Ansicht der Ulbrichtkugel

Durchmesser der Ulbrichtkugel	15	[cm]
Öffnung 1	Eingang für Seitenlichtfaser	
Öffnung 2	Für Kalibrierung	
Öffnung 3	Ausgang für Seitenlichtfaser	
Öffnung 4	Nicht verwendet	
Öffnung 5	Nicht verwendet	
Öffnung 6	Einbaustelle des Detektors	
Öffnung 7	Beobachtungsöffnung	

Tabelle 6.3 : Übersicht der Ulbrichtkugel

### 6.4.2 Messung des Seitenlichts

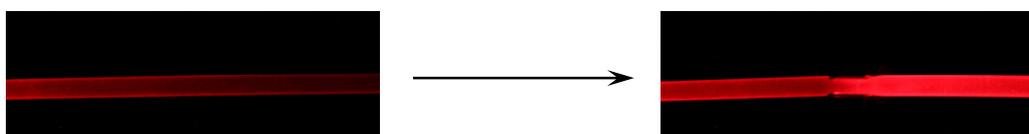
Das Seitenlicht wird auf einem Bereich von 10 mm alle 100 mm oder 200 mm gemessen. Deswegen wurde für diese Messungen ein Aufbau mit zwei Röhrcchen realisiert, die die Seitenlichtfaser durch die Ulbrichtkugel führen und diese nur auf einem Bereich von 10 mm abstrahlen lassen.



**Abb. 6.16** : Innerer Aufbau der Ulbrichtkugel zum Messen des Seitenlichts

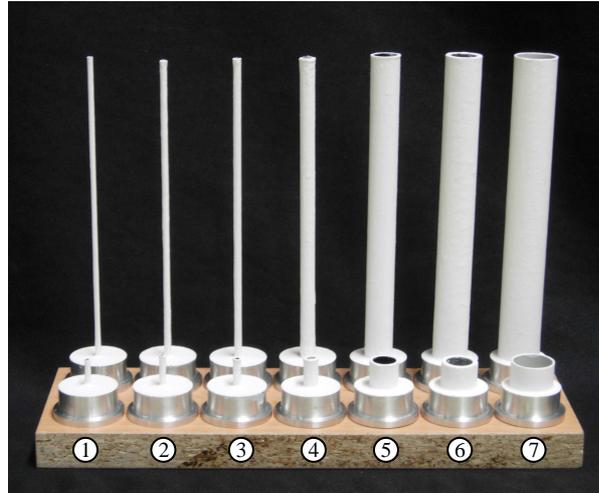
Um die Störungseffekte in der Ulbrichtkugel zu minimieren, sollten die Röhrchen möglichst dünn sein. Die Öffnung für die Seitenlichtfaser muss aus in Wandnähe angebracht sein, damit der Detektor keinen direkten Lichteinfall von der Seitenlichtfaser erhält. Die Öffnung wird so nahe wie möglich an die Wandung der Ulbrichtkugel gelegt, ohne die Integrationseigenschaften der Ulbrichtkugel zu stark zu verschlechtern. Die gesamte äußere Oberfläche der kleinen Röhren wird mit mehreren weißen Farbschicht und einer Bariumsulfatschicht bemalt, um eine optimale und diffus Reflexion des Lichts zu erhalten. Dadurch wird ein möglicher Effekten der Röhrchen auf die Eigenschaften der Ulbrichtkugel reduziert.

Wie sich zeigte, sind die Seitenlichtfasern mehr oder weniger druckempfindlich. Das bedeutet, dass wenn Druck auf die Seitenlichtfaser ausgeübt wird, sich die Abstrahlcharakteristik und die abgestrahlte Strahlungsleistung, im Bereich nach dem Druckpunkt, ändert. Da der Durchmesser der Seitenlichtfasern entlang ihrer Länge nicht konstant ist, kann sich diese in einem zu klein gewählten Röhrchen verklemmen. Deshalb ist es wichtig, Röhrchen zu benutzen die über die gesamte Faserlänge immer etwas spiel haben.



**Abb. 6.17** : Effekt der Druck auf eine Faser

Die folgende Tabelle führt die verschiedenen Röhrrchen auf, die für die getesteten Seitenlichtfasern verwendet wurden.



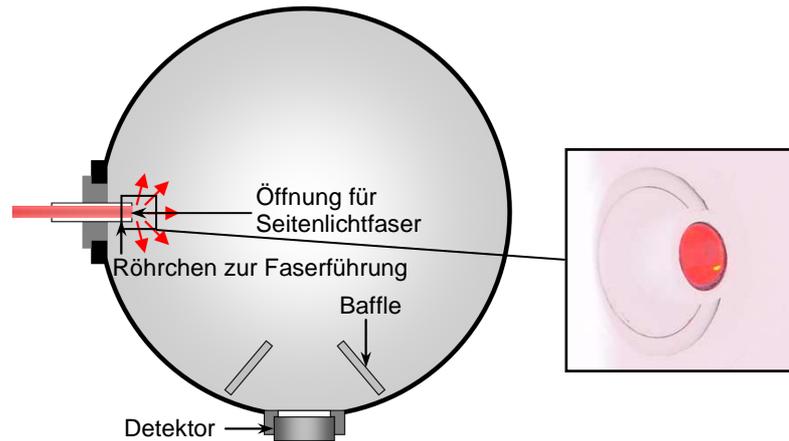
**Abb. 6.18** : Innerer Aufbau der Ulbrichtkugel zum Messen des Seitenlichts

Numer	Innere Durchmesser [mm]	Außer Durchmesser [mm]	Material	Zweckbestimmte Seitenlichtfasern
1	1	2	Carbon	A
2	1.5	2.5	Carbon	B
3	2	3	Carbon	C
4	3.4	4.5	Carbon	D, E, F
5	10	11	Carbon	G
6	11	14	Aluminium	H, I
7	15	16	Kunststoff	J

**Tabelle 6.4** : Aufstellung aller eingesetzter Röhrrchen

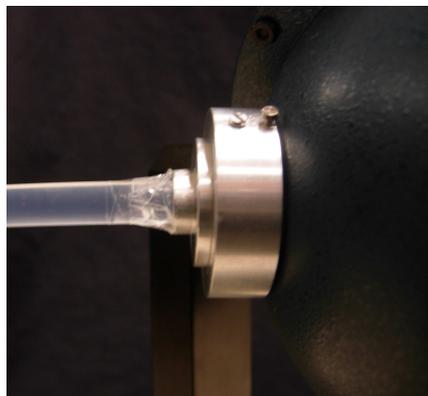
### 6.4.3 Messung des geführten Lichts

Um das geführte Licht auf dieselbe Art und Weise wie das Seitenlicht zu messen, wird das Ende der Faser durch das kleine Röhrrchen geführt. Wenn die Seitenlichtfaser durch ein Röhrrchen geht, wird ein Teil ihres Seitenlicht reflektiert und zurück in der Faser abgestrahlt. Auf den Bereich des Röhrrchens bezogen, bedeutet das, dass der Seitenlichtverlustkoeffizient kleiner wird. Nach diesem Bereich wird der Seitenlichtkoeffizient wieder höher. Auf die Messungen wirkt sich dieser Effekt aus, als wenn die Lichtquelle eine höhere Strahlungsleistung hätte. Wenn für eine Faser das gleiche Röhrrchen für die Seitenlichtmessung und die Messung des geführten Lichts benutzt wird, werden sie auf dieselbe Art und Weise kompensiert und erlauben somit eine richtige Berechnung der Absorption.



**Abb. 6.19** : Inner Aufbau der Ulbrichtkugel zum Messen des geführten Lichts

Das Problem ist, dass die Faser keinen Druck erhalten darf, aber trotzdem präzise geführt werden muss. Ein normaler Klemmstecker kann nicht eingesetzt werden, da dieser Druck auf die Faser ausübt. Ein Klebestecker hat den Nachteil, dass dieser nur einmal eingesetzt werden kann und das Kleben sehr Zeitaufwendig ist. Deswegen ist die beste gefundene Methode, transparentes Klebeband zu benutzen, welches zwischen dem Röhrchen und die Faser geklebt wird, siehe Abb. 6.20.



**Abb. 6.20** : Klebeband zwischen Faser und Röhrchen

Für die dickeren Fasern mit Mantel wurden Mikrobankunterstützungen eingesetzt, die das Gewicht der Faser tragen und somit die Spannung auf dem Klebeband reduzieren, ohne jedoch einen Druck auf die Faser auszuüben.



**Abb. 6.21** : Unterstützung Für dickere Fasern mit Mantel

## **6.5 Kalibrierung der Ulbrichtkugel**

Auf den Detektor in der Ulbrichtkugel trifft ein kleiner Teil der gesamten Strahlungsleistung. Außerdem ändern die verschiedenen Aufbaukonfigurationen in der Ulbrichtkugel noch den Anteil der Strahlungsleistung, die auf den Detektor ankommt. Es ist also notwendig, Korrekturfaktoren zu ermitteln, die erlauben die korrekte Strahlungsleistung zu bestimmen, die aus der Seitenlichtfaser für jede Aufbaukonfiguration abgestrahlt wird.

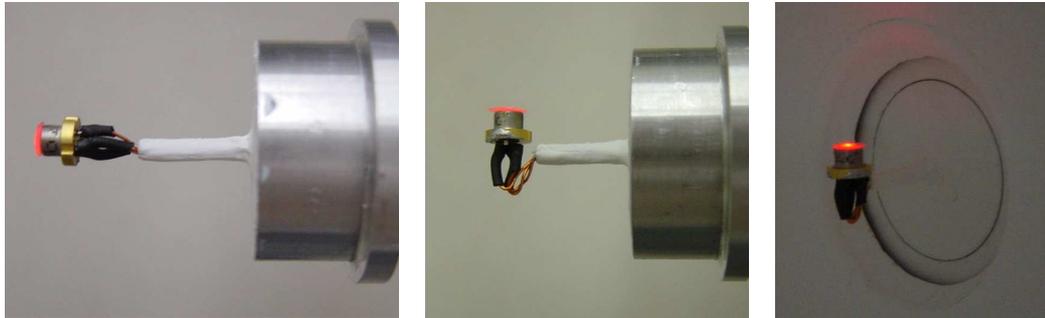
Mehrere Methoden zur Kalibrierung wurden versucht. Bevor die eingesetzte Lösung für die Kalibrierung der Ulbrichtkugel erklärt wird, werden die anderen untersuchten Methoden vorgestellt.

### **6.5.1 Untersuchte Methoden zur Kalibrierung**

Drei Methoden wurden untersucht, bevor die endgültige Lösung gefunden wurde. Die erste Methode besteht darin, mit einem Laserstrahl verschiedene Teile der Ulbrichtkugel zu beleuchten, ohne das die Auftreffpunkte des Lichtstrahls durch den Detektor direkt sichtbar sind. Der Vorgang wird für jeden Einbau wiederholt, um die Korrekturfaktoren zu ermitteln. Diese Methode erlaubt jedoch keine Kalibrierung. Die Anzahl der möglichen Auftreffpunkte sind begrenzt, außerdem stellt die Art der Beleuchtung nicht das Abstrahlverhalten einer Seitenlichtfaser nach.

Die zweite Methode benutzt LED und Laser Dioden. Der Vorteil ist, dass ein so genanntes „X4“ Messsystem mit kalibrierter Ulbrichtkugel zur Messung von LED verfügbar ist. Sie können daher sehr genau vermessen werden und dazu

benutzt werden, um die Abstrahlung vom Seitenlicht und vom geführten Licht der Fasern zu simulieren, wie im Abb. 6.22 dargestellt.

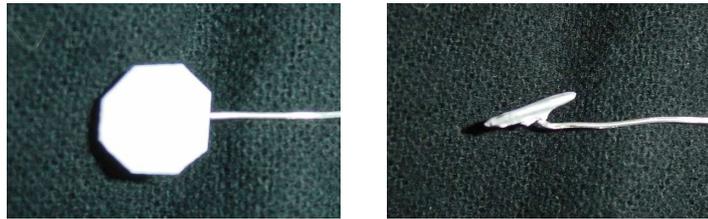


**Abb. 6.22** : Simulation des geführten Lichts und Seitenlichts mit LED

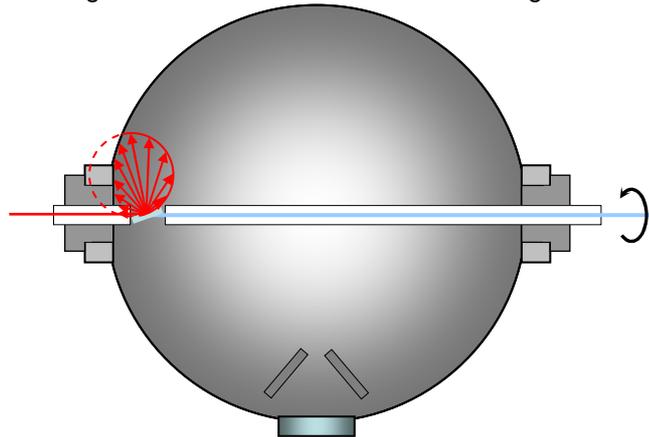
Wie in Abbildung 6.22 leicht zu erkennen ist, ist der Einfluss der LED beim Einsatz von dünne Röhrrchen größer als die der Einbauten. Für die großen Röhrrchen stellt sich die Frage, wo die LED zu positionieren ist, um die Strahlung der Fasern so gut wie möglich zu simulieren. Ein anderer Fehler ist, dass die LED nicht dasselbe Lichtspektrum wie die Laser haben. Wenn das eine Rolle spielt, verschlechtert sich die Genauigkeit der Kalibrierung. Ein Problem bei dieser Methode ist die filigrane Befestigung der LED am Ende des Röhrrchens. Da die Befestigung der LED und die Lötkontakte bei Änderung der LED Position leicht zu beschädigen waren, wurden Zahlreiche LED durch Kurzschlüsse zerstört.

Die letzte versuchte Methode wird mit einem kleinen Plättchen, welches an einem dünnen Stab befestigt ist durchgeführt. Das kleine achteckige Plättchen wird mit Bariumsulfat angemahlt um eine möglichst lambertartige Reflexion zu bekommen (siehe Abbildung 6.23). Der am Plättchen befestigte Stab wird durch das lange Röhrrchen gesteckt und das Plättchen schräg vor dem kurzen Röhrrchen positioniert. Durch das kurze Röhrrchen wird das Plättchen mit einem Laserstahl beleuchtet. Das Plättchen strahlt dann mit Lambert-Charakteristik in die Ulbrichtkugel ab. Um eine möglichst genaue Kalibrierung zu erreichen, darf nur ein sehr kleiner Anteil der vom Plättchen reflektierten Strahlungsleistung in das kleine Röhrrchen gelangen. Um das zu erreichen, muss das Plättchen sehr stark geneigt werden (siehe Abbildung 6.24). Zur Kalibrierung der Ulbrichtkugel,

wird das beleuchtete Plättchen in der Ulbrichtkugel gedreht und für einige Positionen der Detektorstrom gemessen.



**Abb. 6.23** : kleine achteckige Plättchen wird mit Bariumsulfat angemahlt



**Abb. 6.24** : Beschreibung der Kalibrierungsmethode mit kleiner achteckigen Plättchen

Das Problem dabei ist, dass das stark geneigte Plättchen ziemlich schwierig mit dem Laserstrahl zu treffen ist. Diese Methode hat den Vorteil, dass die gleichen Laser wie bei der Messung als Lichtquelle eingesetzt werden können. Die Positionierung des geneigten Plättches und die Justage des Laserstrahls erwiesen sich als so komplex, dass diese Methode aufgegeben wurde.

Die entgültig gewählte Kalibrierung der Ulbrichtkugel hat die Vorteile, relativ einfach realisiert zu werden, und die Abstrahlung der Seitenlichtfaser viel besser zu simulieren, da für die Seitenlichtkalibrierung Probe von Seitenlichtfasern benutzt werden. Das ist für die Fasern besonders wichtig, welche eine Sandstrahlung erhalten haben, da sie eine veränderliche radiale Strahlung besitzen. Deswegen, sind diese Seitenlichtfaser für die Messungen und Kalibrierung immer mit der behandelten Seite in der gleichen Richtung in der Ulbrichtkugel positioniert worden. Die Kalibrierung der Ulbrichtkugel ist in drei schritte unterteilt:

- Grundkalibrierung
- Kalibrierung für das geführten Licht
- Kalibrierung für das Seitenlicht

## 6.5.2 Grundkalibrierung

Die Grundkalibrierung besteht darin, den Korrekturfaktor zu messen, der erlaubt die Gesamtstrahlungsleistung einer Lichtquelle zu bestimmen, die in der Ulbrichtkugel strahlt, wenn diese keine Einbauten enthält. Die Kalibrierung erfolgt mit Hilfe eines Lasers und eines kalibrierten Detektors. Der Durchmesser des Laserstrahls wird mit Hilfe eines optischen Systems vergrößert um den Detektor nicht lokal zu übersteuern. Der Strahl geht anschließend durch einen Splitter, wobei ein Teil des Lichts auf einen Referenzdetektor trifft, um Schwankungen der Laserleistung ermitteln zu können.

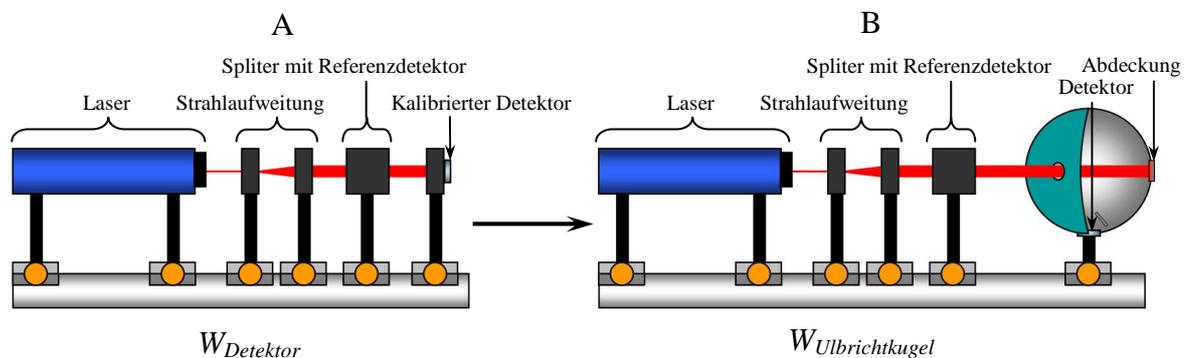


Abb. 6.25 : Schritten für Grundkalibrierung

Als erstes wird die Strahlungsleistung des Strahls mit einem kalibrierten Detektor gemessen, auf dem der Strahl ausgerichtet ist (siehe Abb. 6.25 A).

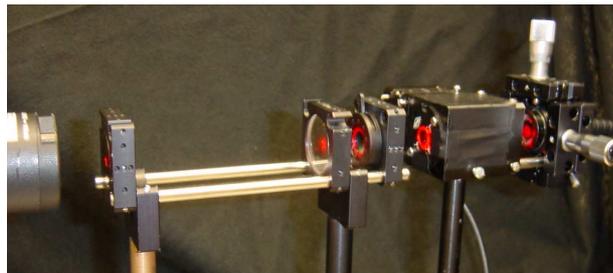
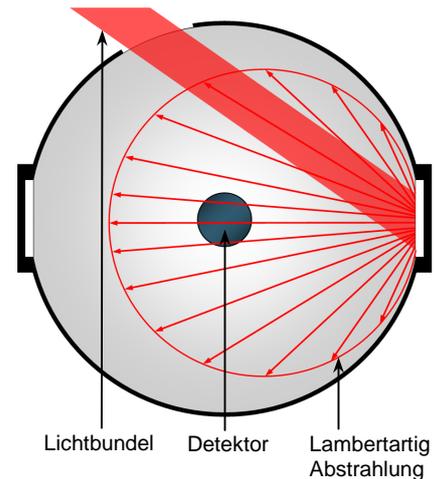
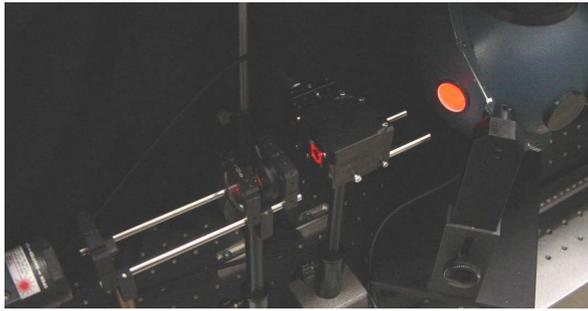


Abb. 6.26 : Lage A der Grundkalibrierung

Als zweites wird der Lichtstrahl durch eine Öffnung (Öffnung 2, siehe Abb. 6.15) in die Ulbrichtkugel eingestrahlt. Der Auftreffpunkt des Lichtstrahls befindet sich auf der Abdeckung (Öffnung 1, siehe Abb. 6.15), eines Ports der nicht gegenüber liegt, siehe Bild 6.26. Diese Öffnung wird dann für alle Messungen der Seitenlichtfaser benutzt.



**Abb. 6.27 :** Lage B der Grundkalibrierung

Da die Reflexion Lambertartig ist, befindet sich die ausgewählte Öffnung nicht direkt gegenüber vom Auftreffpunkt, sondern seitlich versetzt, um den Prozentsatz des Lichtes zu reduzieren, welches in Richtung des Eingangs des Lichtstrahls reflektiert wird. Dadurch wird erreicht, dass kein direktes Licht auf den Detektor gelangt und die Art des Strahls ähnlich zu den der anderen Messungen ist. Nach dieser Messung kann der Kalibrierungsfaktor  $korr_1$  berechnet werden.

$$W_{Sensor} = korr_1 \cdot W_{Ulbrichtkugel} \quad \Rightarrow \quad korr_1 = \frac{W_{Sensor}}{W_{Ulbrichtkugel}} \quad (13)$$

Die Ulbrichtkugel ist jetzt im Grundzustand kalibriert. Die durch die verschiedenen Röhrchen verursachten Veränderungen innerhalb der Ulbrichtkugel, sei es durch die Messung des geführten Lichts oder des Seitenlichts der Fasern, müssen noch gemessen werden, um einen weiteren Korrekturfaktor ermitteln zu können.

### 6.5.3 Kalibrierung für das geführt Licht

Die Zielsetzung dieses Abschnitts besteht darin, den notwendigen Korrekturfaktor bei den Messungen mit dem kleinen Röhrchen zu definieren. Zwei verschiedene Messungen werden durchgeführt. Zunächst wird jeder Laser durch eine Streufolie POC60 in die Ulbrichtkugel gestrahlt. Diese Messung entspricht der Kalibrierung im Grundzustand, das heißt es kann derselbe Korrekturfaktor angenommen werden. In einer zweiten Stufe werden der Laserstrahl durch die gleiche Streufolie gestrahlt, jetzt befindet sich diese am ende der kleinen Röhrchen.



Abb. 6.28 : Abdeckung und kleine Röhren mit Streufolie

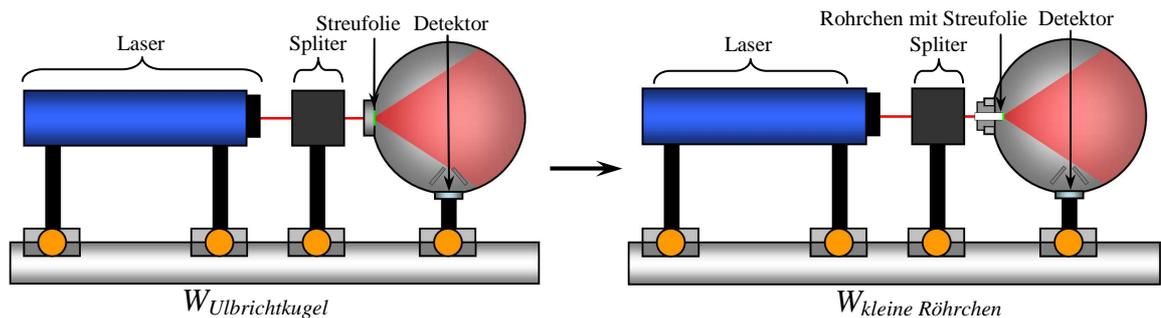


Abb. 6.29 : Zwei Messungen für geführte Licht Kalibrierung

$$W_{Ulbrichtkugel} = korr_2 \cdot W_{kleine Röhren} \quad \Rightarrow \quad korr_2 = \frac{W_{Ulbrichtkugel}}{W_{kleine Röhren}} \quad (14)$$

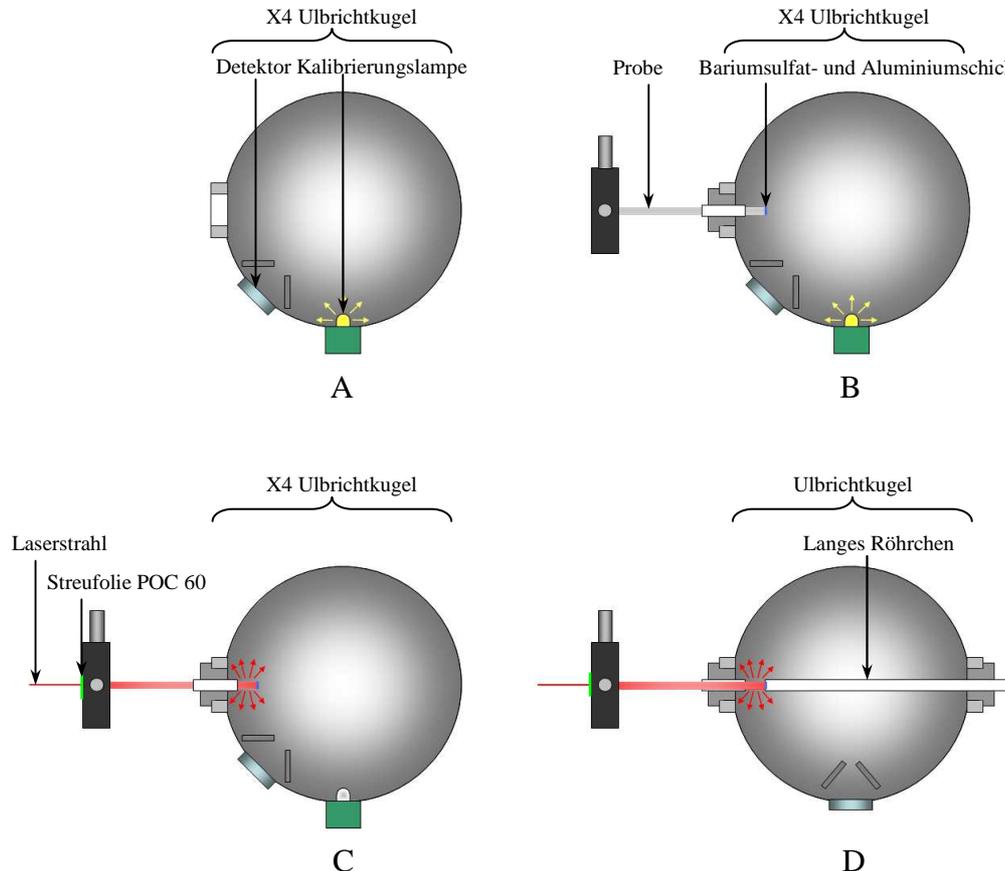
### 6.5.3.1 Kalibrierung des Seitenlichts

Die letzte Kalibrierung erlaubt den Einfluss der größten Röhren zu messen. Für diesen Fall werden kleine Proben von Seitenlichtfasern benutzen. Jede Probe ist ca. 100 mm lang und wird durch die kleinen Röhren geschoben bis sie vorne 10 mm überstehen. Das Ende der Probe wird mit mehreren Schichten von Bariumsulfat und Aluminium bedeckt, um ausschließlich Seitenlicht zu bekommen.



Abb. 6.30 : Beispiel von Bedeckung der Probe mit Schichten von Bariumsulfat und Aluminium

Jede Probe wird mit den verschiedenen Lichtquellen bestrahlt und die Absolutleistung des Lichtes auf den herausstehenden 10 mm mit Hilfe der kalibrierten so genannte „X4“ Ulbrichtkugel gemessen. Diese X4 Ulbrichtkugel hat nur eine Öffnung, was für eine optimale Mischung des Lichts sorgt, und eine eingebaute Kalibrierungslampe, die erlaubt ein Korrekturfaktor zu messen.



**Abb. 6.31** : Die vier verschiedenen Schritte für Kalibrierung des Seitenlichts

Das Kalibrierungsprinzip dieser X4 Ulbrichtkugel ist ungefähr das gleiche wie die Grundkalibrierung der ersten Ulbrichtkugel. Die Intensität einer Referenzlampe wird zuerst gemessen, wenn die Ulbrichtkugel sich in Grundzustand, ohne innere Aufbauten, befindet. Diese Intensität wird wieder, aber jetzt mit jedem Aufbau, gemessen, und das Programm berechnet ein Korrekturfaktor für jeden Durchmesser der kleinen Röhren und Seitenlichtfasern. Bei diesen zweiten Messungen gibt es selbstverständlich noch keinen Laser, der die Probe beleuchtet. Deswegen, haben die Aufbau keinen oder nur einen unbedeutenden Einfluss. Diese Korrekturfaktoren dürfen nicht für die erste Ulbrichtkugel benutzen werden, da sie verschiedene Durchmesser und Grundzustandscharakteristiken haben.

Nur nach dieser Kalibrierung können die Proben gemessen werden. Für jeden Laser wird die Wellenlänge angegeben, und das Programm korrigiert automatisch die vom Detektor ermittelten Werte um eine korrekte Leistung zu bekommen. Die Proben können dann in die erste Ulbrichtkugel zusammen mit dem langen Röhrchen montiert werden und mit alle Laser gemessen werden. Diese Werte werden danach mit den ersten verglichen und ein neuer Korrekturfaktor berechnet.

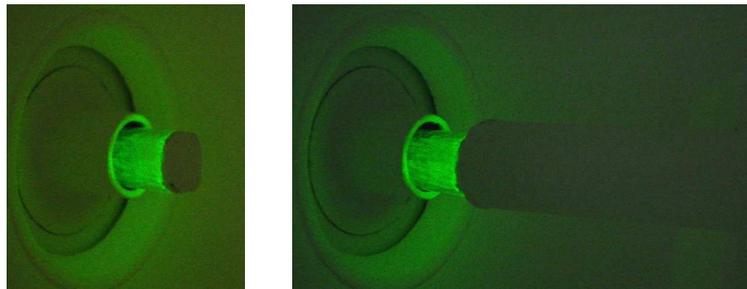


Abb. 6.32 : Probe in der Ulbrichtkugel

#### 6.5.4 Messgeräte

Die Photoströme des Referenzdetektors und des Hauptdetektors, der in der Ulbrichtkugel eingebaut ist, werden durch das Messgerät „S390 UNIVERSAL OPTOMETER“ gemessen. Es erlaubt einen Strombereich von einigen Pico- bis zu einigen Milliampere zu messen.

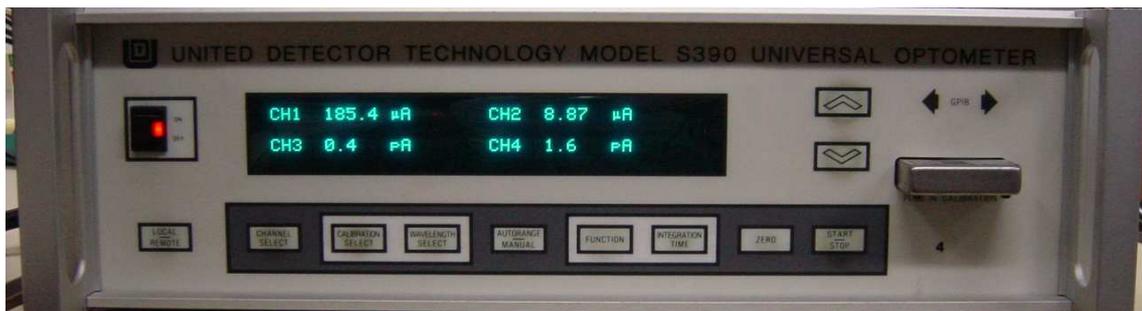


Abb. 6.33 : S390 UNIVERSAL OPTOMETER

Die Einstellungen seiner Parameter und die Daten, die es misst, werden durch das Programm „5-Achsen“ über einen Rechner verwaltet. Zunächst werden die Integrationszeiten für die zwei Detektoren auf 1 Sekunde eingestellt, um die Schwankungen während des Zurücksetzens auf 0 pA zu reduzieren. Keine Lichtquelle darf während dieser Periode eingeschaltet werden. Die Referenz- und Hauptmessungen müssten gleichzeitig durchgeführt werden, was aber

nicht möglich ist, da das S390 UNIVERSAL OPTOMETER nur einen Wert nach dem anderen an den Rechner sendet. Nachdem der Offset der zwei Detektoren eingestellt wurde, wird die Integrationszeit auf 10 ms reduziert, um das Intervall zwischen den Messungen jedes Detektors zu minimieren. Für jede Positionierung der Ulbrichtkugel hinsichtlich der Seitenlichtfaser werden 20 Messungen pro Detektor über einen Zeitbereich von ungefähr 20 Sekunden durchgeführt. Danach wird für jede Gruppe dieser 20 Messungen ein Mittelwert berechnet.

## 6.6 Anisotropie der Faser

Die zweite Eigenschaft der Seitenlichtfaser ist ihre Anisotropie. Es ist in der Tat ziemlich einfach festzustellen, dass die Intensität der Abstrahlung vom Beobachtungswinkel abhängig ist. Ein einfaches Experiment wird vorgeschlagen, um die Anisotropie zu beobachten. Eine Seitenlichtfaser wird an jedem ihrer Enden mit einer LED anderer Farbe beleuchtet. Hier eine grüne und eine rote LED. In diesem Fall leuchtet die Seitenlichtfaser abhängig von der Beobachtungsrichtung voll rot, grün oder mit einem Farbverlauf. Es ist auch interessant festzustellen, dass die Spiegelungen auf dem Faserhalter von der Farbe ist, die der sichtbaren Farbe der Faser entgegengesetzt ist.

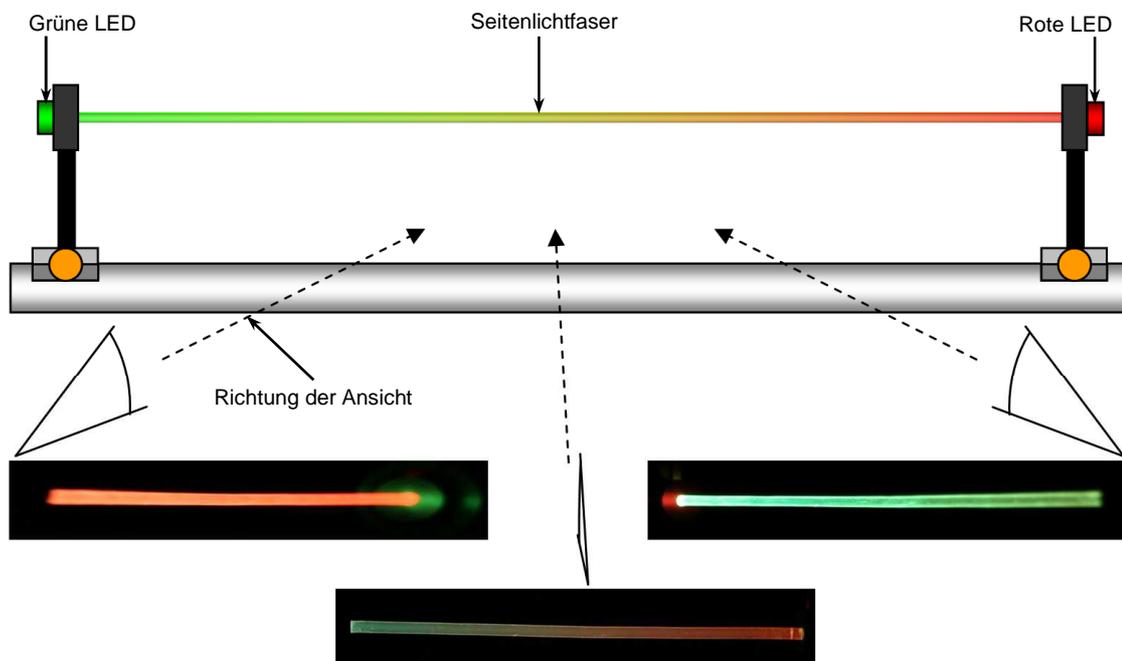
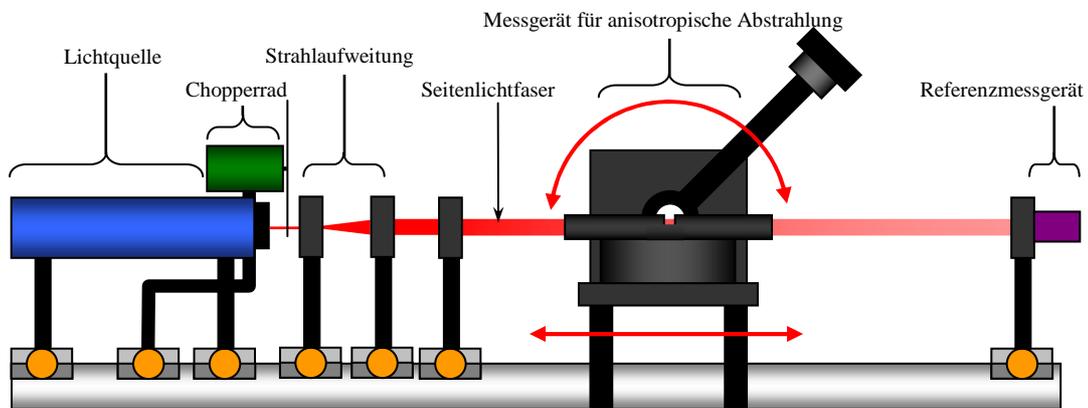


Abb. 6.34 : Experiment um die Anisotropie zu beobachten

Die benutzte Methode für die Messung der Anisotropie besteht darin, die Strahlung von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  von Punkten der Oberfläche einer Faser zu messen. Diese Messung wird entlang der Faser alle 20 cm durchgeführt. Für jeden Punkt wird eine Messung mit verschiedenen Anregungsbedingungen, nämlich  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  und  $60^\circ$  durchgeführt. Die Konzeption eines Messplatzes der Anisotropie teilt sich in vier Bereiche auf, nämlich:

- Die Lichtquelle
- Die Strahlaufweitung
- Das Einkoppelsystem
- Die Messvorrichtung



**Abb. 6.35** : Aufstellung der notwendigen Elemente für die Messung der Anisotropie

Mehrere Elemente dieses Messplatzes sind identisch mit den der vorhergehenden Messungen. Deshalb werden sie nur kurz in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Element	Beschreibung
Lichtquelle	Roter HeNe Laser 633 [nm] 0.5 [mW]
Strahlaufweitung	1 konvexe Linse 1 konkave Linse 1 Blende
Art der Anregung	POC 05 POC 10 POC 20 POC 60

**Tabelle 6.5** : Aufstellung aller wieder eingesetzter Elemente

## 6.7 Messaufbau

Entstanden ist dieser Messaufbau im Rahmen einer Diplomarbeit von Marcus Strauss im WS 97/98. Dabei handelt es sich um ein so genanntes „Pendel-Goniometer“ mit dessen Hilfe die Abstrahlcharakteristik optischer Strahler rechnergestützt gemessen werden kann.

Das Pendel-Goniometer besteht aus einem Drehtisch, der erlaubt die zu messende Lichtquelle zu drehen. Dieser Drehtisch kann dank eines Motors programmiert gedreht werden. Für die Messung der Anisotropie hat er jedoch keinen Nutzen. Ein mit einem Detektor ausgestatteter Messarm, dessen Drehachse durch das Zentrum des Drehtisches geht, erlaubt die Strahlungsleistung in Abhängigkeit des Abstrahlwinkels in einem Bereich von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  zu messen. Über dem Messarm auf der Drehachse des Drehtisches ist ein zweiter Detektor angebracht. Dieser erlaubt die Intensität der Lichtquelle als Referenz zu messen um die Intensitätsschwankungen der Lichtquelle zu kompensieren.

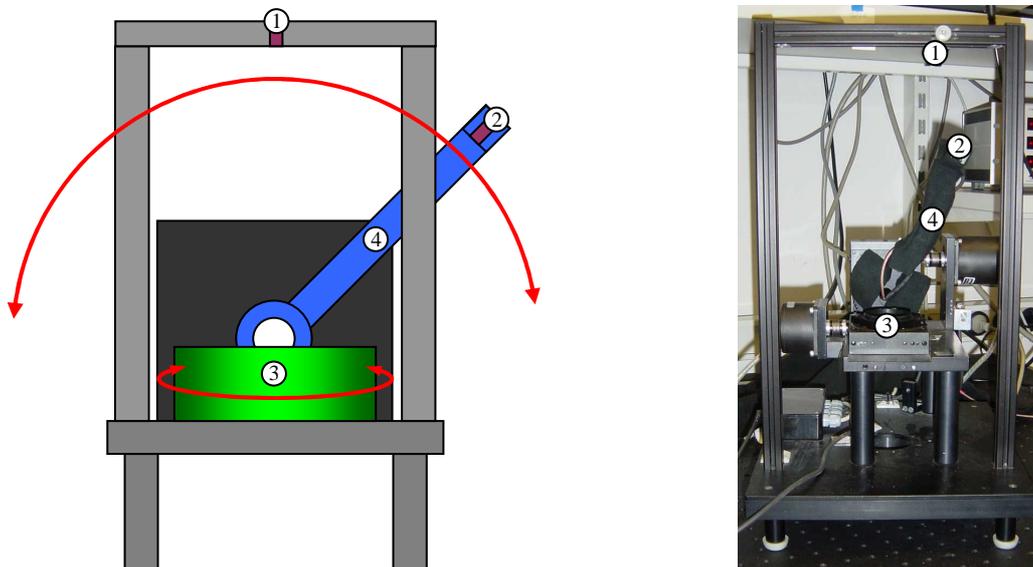


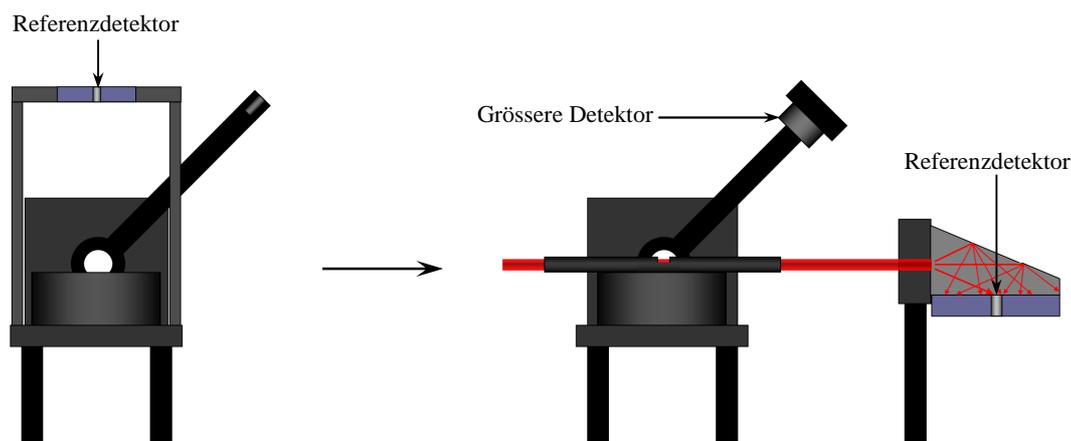
Abb. 6.36 : Pendel-Goniometer

Numer	Beschreibung
1	Referenzdetektor
2	Hauptdetektor
3	Drehtisch
4	Messarm

Tabelle 6.6 : Aufstellung des Pendel-Goniometers

Dieser Messaufbau ist nicht vollkommen an die gewünschten Messungen angepasst. Einige Änderungen müssen noch durchgeführt werden. Der Ort des Referenzdetektors ist ungeeignet, und seine Empfindlichkeit ist nicht ausreichend. Der Referenzdetektor wird am Ende der zu messenden Seitenlichtfaser angebracht. Dieser Aufbau erlaubt, einen höheren Anteil des Lichtes zu bekommen, was das Rauschen begrenzt.

Wegen der Kleinheit der Öffnung im Röhrchen ist die abgestrahlte Intensität des Lichtes sehr schwach. Deswegen ist der Hauptdetektor auf dem Arm der Pendel-Goniometer nicht empfindlich genug. Als Hauptdetektor wird der gleiche Detektortyp wie im vorherigen Messaufbau verwendet. Da die Strahlungsleistung immer noch zu schwach ist und der eingesetzte Lock-In Verstärker ein Spannungssignal benötigt, wird der Detektor mit einem I/U-Verstärker versehen.



**Abb. 6.37** : Optimierung der Pendel-Goniometer

Die Detektorenspannungen werden dann von einem Lock-In Verstärker der Firma Stanford Research Systems gemessen. Da die Messungen des Hauptdetektor und des Referenzdetektor zeitlich versetzt durchgeführt werden, und der Zeitunterschied zwischen den Messungen, auf Grund der automatischen Einstellung des Messbereichs vom Spannungsunterschied zwischen den Detektoren abhängt, ist der Nutzen der Referenzmessung stark reduziert. Deswegen ist der Referenzdetektor nicht direkt am Ende der Faser befestigt sondern wird das Licht über ein schwarzes Papier auf den Detektor reflektiert, (siehe Abb. 6.37). Dadurch wird die Strahlungsleistung auf dem Referenzdetektor stark reduziert und befindet sich auf einem ähnlichen

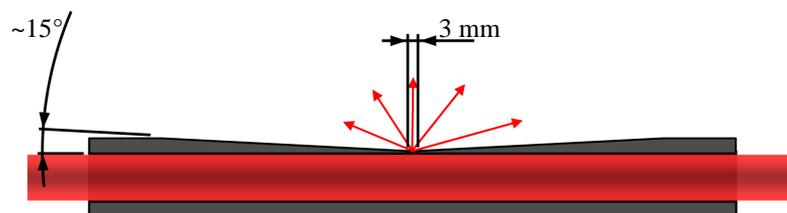
Spannungslevel wie der des Hauptdetektor. Mit dieser Maßnahme wird die Zeitdifferenz zwischen den Messungen reduziert.



**Abb. 6.38** : SR830 DSP Lock-In Verstärker der Firma Stanford Research Systems

Die Idee, ein Splitter zu benutzen, ist mir bei der Konstruktion des Messsystem zur Aufteilung der Strahlungsleistung gekommen, das im Anschluss auf gebaut wurden. Diese letzte Lösung sollte in der Zukunft für diese Messungen eingesetzt werde, da sie unabhängig vom Fasertyp sowie ihrer Konfiguration (Biegung, Druck) ist.

Um die Abstrahlung nur auf einem Punkt der Seitenlichtfaser zu messen, wird eine Röhre benutzt in die ein Loch von Durchmesser 3 mm gebohrt ist. Die Schwierigkeit besteht darin, die Dicke der Rohrwände um das Loch herum maximal zu reduzieren, ohne die Röhre zu beschädigen oder das Loch zu vergrößern. Das Ziel ist es, den messbaren Winkelbereich grösstmöglich zu erhöhen. Der Werkstoff des Rohrs ist sehr wichtig, da er auch an der dünnsten Stelle eine maximale Absorption haben muss, um eine Änderung der Strahlungseigenschaften am Öffnungspunkt zu vermeiden.



**Abb. 6.39** : Röhre mit Loch von 3 mm

Eine mögliche Optimierung wäre, die Seitenlichtfaser nicht mehr durch ein Rohr abzuschirmen, sondern eine sehr dünne schwarze Platte zu benutzen. Das hätte den Vorteil, die Kontaktfläche zwischen Faser und Abschirmung zu Reduzieren und so die Störungen der Strahlung zum Öffnungspunkt der Röhre zu minimieren. Um eine genau Führung der Faser zu ermöglichen wäre es gut

das Pendel-Goniometer auf einer Schiene entlang der Faserachse verschieben zu können.

Da das Signal der Detektoren mit einem Lock-in-Verstärker verstärkt werden muss, muss das Licht moduliert werden. Ein Chopperrad wird dafür eingesetzt. Seine drehende Lochblende schaltet den Lichtstrahl in schneller Folge ein und aus und erzeugt dadurch eine Modulationsfrequenz. Der Lock-In-Verstärker wird nur diese Frequenz verstärken und andere unterdrücken. So lange die Modulationsfrequenz nicht ein Vielfaches von 100 Hz beträgt (die Frequenz der Leuchtstofflampen in der Fachhochschule), kann die Messungen auch mit eingeschalteten Leuchtstofflampen ausgeführt werden. Allerdings sind die gemessenen Detektorsignale so klein, dass um die Empfindlichkeit weiter zu verbessern, im Dunklen gemessen wird. Um den Einfluss von Streulicht wie z.B. von Monitoren und Anzeigen von Messgeräten zu reduzieren wird außerdem der Messplatz mit schwarzen Stoff abgedeckt.



**Abb. 6.40** : Chopperrad

## 7 Studie der Abstrahlungscharakteristiken

Die Auswertung der Messergebnisse fängt mit den Grundkenntnissen von optischen Fasern an. Für normale optische Faser verteilt sich das Licht auf zwei Arten. Auf jeder Sektion der Faser wird ein Teil des Lichtes geführt, und der andere Teil geht durch Dämpfung verloren. Wenn diese Verteilung während der Faser regelmäßig ist, wird die Gleichung der geführten Strahlungsleistung der Faser, abhängig von der Faserlänge  $x$  [m], wie folgt ausgedrückt:

$$\Phi_{e_G}(x) = \Phi_{e_E} \cdot e^{-k \cdot x} \quad (15)$$

Mit

$\Phi_{e_G}$  [W] : Strahlungsleistung des geführtes Lichts

$\Phi_{e_E}$  [W] : Strahlungsleistung am Eingang der Faser

$k$  [ $m^{-1}$ ] : Lichtverlustkoeffizient der Faser

Es ist wichtig anzumerken, dass diese Gleichung nur richtig ist wenn die Modengleichgewichtsverteilung (EMD) erreicht ist. Für Seitenlichtfaser wird die Dämpfung noch in zwei Teile unterteilt, das Seitenlicht und die Absorption, mit der folgenden Beziehung:

$$\Phi_{e_E} = \Phi_{e_G}(x) + \int_0^x (\Phi_{e_S}(x) + \Phi_{e_A}(x)) dx \quad (16)$$

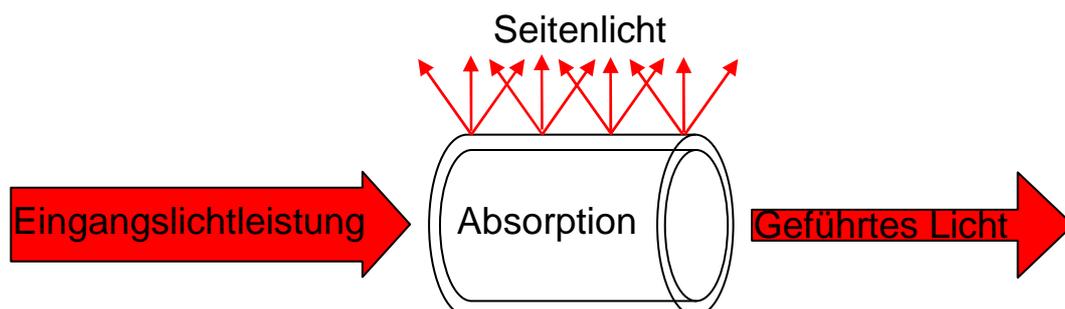
Mit

$\Phi_{e_E}$  [W] : Strahlungsleistung am Eingang der Faser

$\Phi_{e_G}$  [W] : Strahlungsleistung des geführtes Lichts

$\Phi_{e_A}$  [W] : Absorbierte Strahlungsleistung

$\Phi_{e_S}$  [W] : Seitenstrahlungsleistung



**Abb. 7.1** : Aufteilung der Strahlungsleistung in einer Seitenlichtfaser

Wenn EMD erreicht wird, für Faser mit konstanter Behandlung z.B. konstanter Dotierung, sollen die Gleichungen des Seitenlichts, des geführten Lichts, und der Absorption abhängig vom Abstand mit dem gleichen Lichtverlustkoeffizient  $k$  variieren. Dieser Koeffizient  $k$  kann von vielen verschiedenen Faktoren abhängig sein, wie:

- Biegeradius der Faser
- Wellenlänge des Lichts
- Eingangswinkel der Lichtstrahlen
- Reinheit der Faser
- Spannungen in der Faser
- Temperatur

Im Rahmen dieses Projekts werden nur die Veränderungen von  $k$  abhängig von dem Winkel und der Wellenlänge getestet.

### 7.1 Charakterisierung des Seitenlichts

Zunächst werden die Ergebnisse der Seitenlichtmessungen untersucht. Die Seitenlichtfaser H wird als Referenz benutzt. Die drei folgenden Graphen zeigen die Variation des Seitenlichts auf der Länge der Faser abhängig von der Wellenlänge des Lichts und des Einkopplungswinkels.

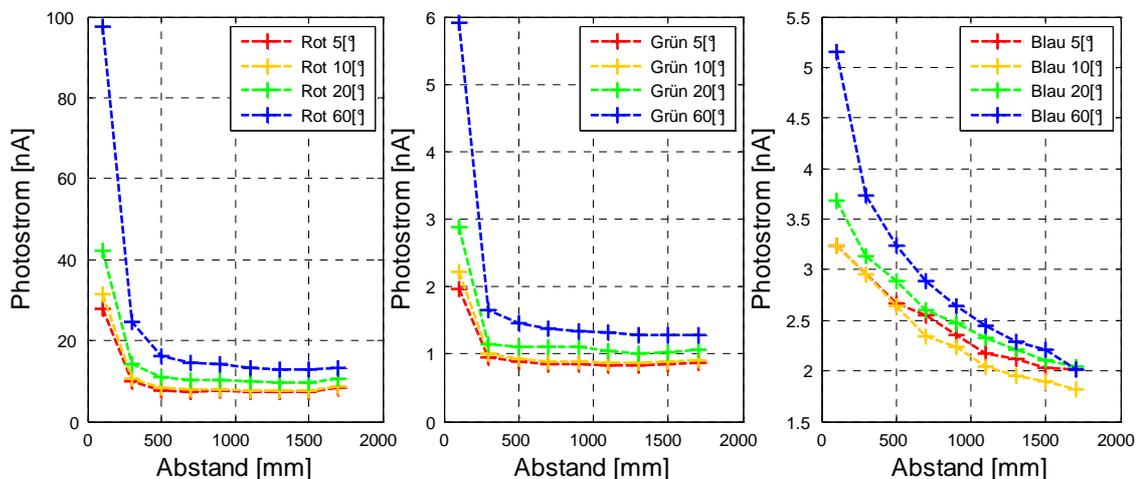
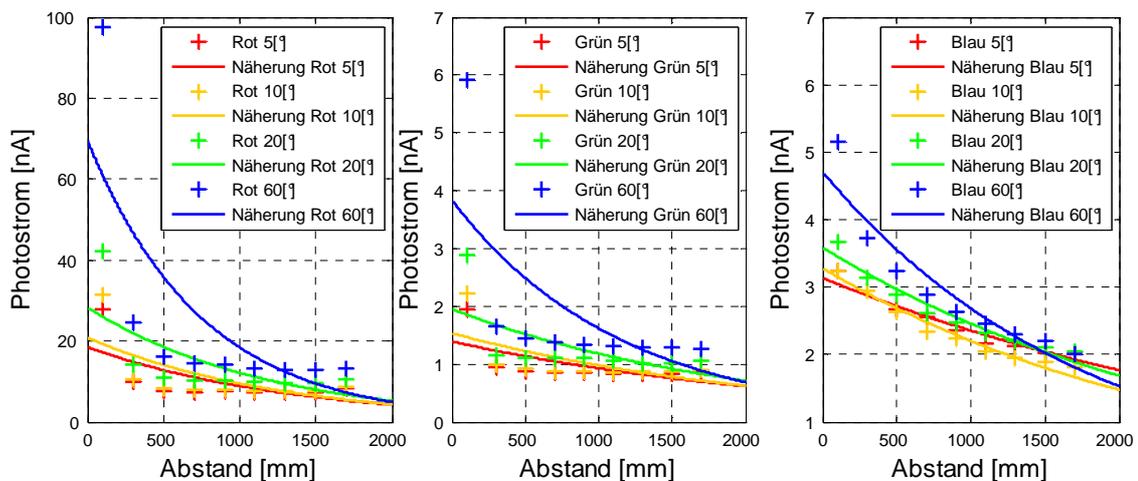


Abb. 7.2 : Ergebnisse des Photostroms des Seitenlichts für Faser H

Der Abfall der Strahlungsleistung ist in alle Fälle bis 300 mm sehr hoch. Die einzige Möglichkeit, um eine gute Näherungsfunktion mit nur einer Exponentialfunktion, wäre mit einer Gleichung des Typs:

$$f(x) = A \cdot e^{-k \cdot x} + B \quad (17)$$

Da die Fasern in kompletter Dunkelheit liegen, muss die Funktion  $f(x)$  gegen Null streben wenn der Abstand  $x$  gegen Plus unendlich strebt. Deswegen muss  $B$  gleich Null sein. Die folgenden Graphen zeigen die Annäherung der Messergebnisse durch die Funktion (1).



**Abb. 7.3 :** Näherungsfunktion des Photostroms des Seitenlichts mit 1 Exponentialfunktion für Faser H

Die Näherung mit dieser Funktion zeigt keine gute Übereinstimmung. Die Kurve hat einen Exponentialverlauf, aber setzt sich wahrscheinlich aus mehreren Kurven zusammen. Um sie hervorzuheben, besteht eine gute Lösung darin, die lineare Skalierung der Y-Achse, welche die Intensität zeigt, auf eine logarithmischen Skalierung zu ändern. Die erhaltene Kurve ist dann eine Gerade, deren Steigung abhängig vom Lichtverlustkoeffizient  $k$  variiert.

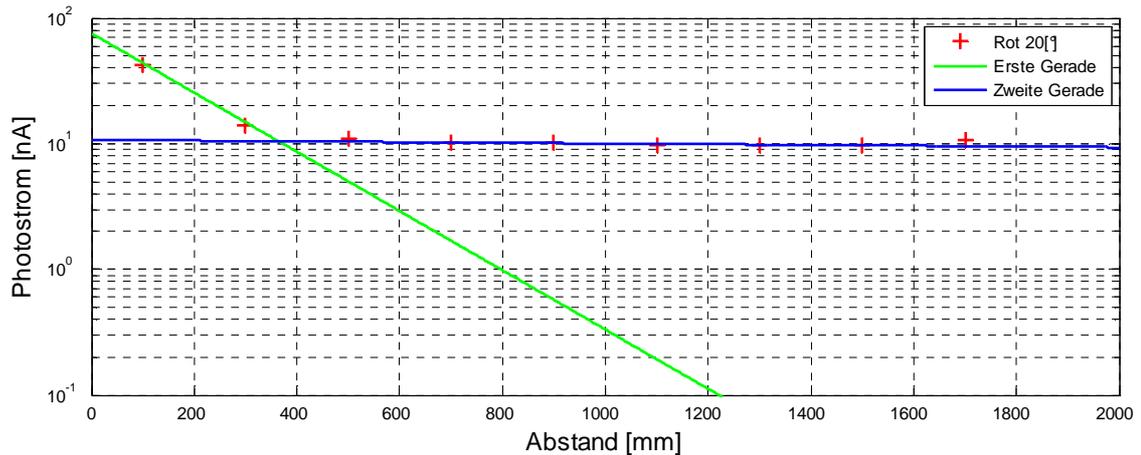


Abb. 7.4 : Photostrom des Seitenlichts für Faser H mit log-Masstab

Man kann erkennen, dass mit zwei Geraden die Messwerte sehr gut angenähert werden. Deswegen wird die Funktion (17) durch eine weitere Exponentialfunktion der folgenden Form erweitert:

$$f(x) = A \cdot e^{-k_1 \cdot x} + B \cdot e^{-k_2 \cdot x} \quad (18)$$

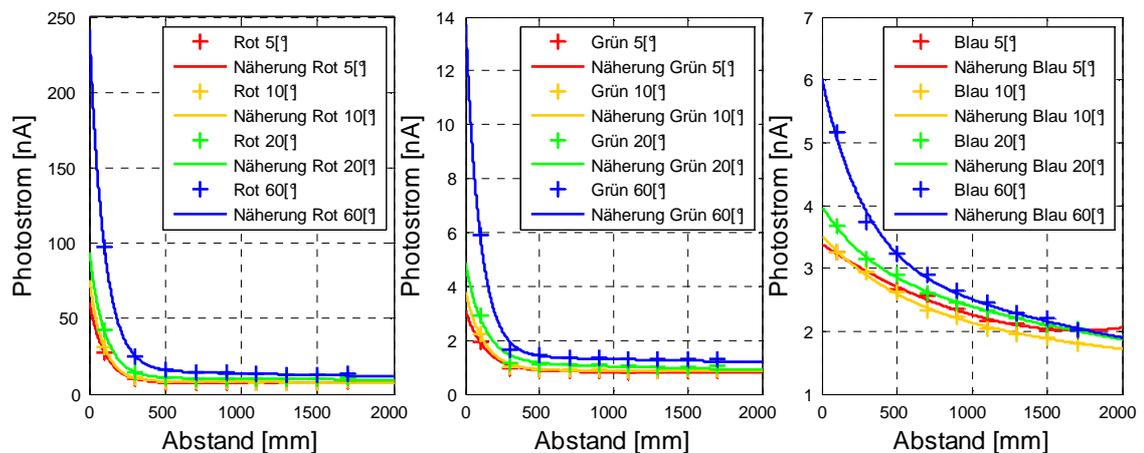
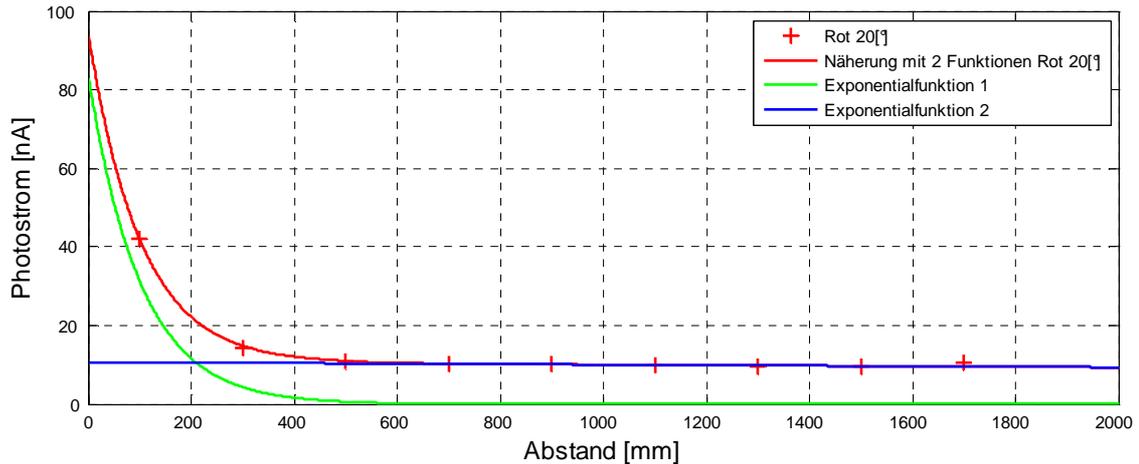


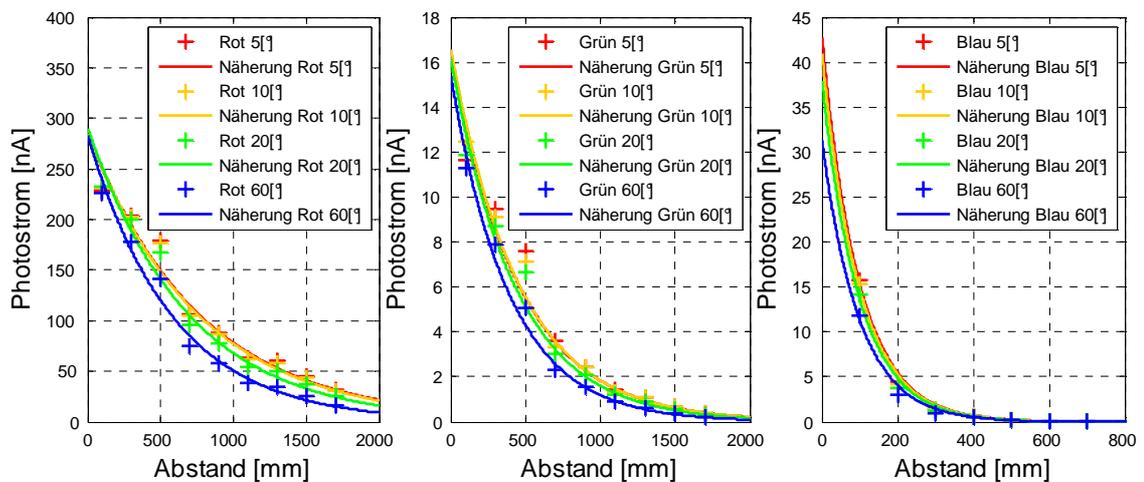
Abb. 7.5 : Ergebnisse mit Näherungsfunktion des Photostroms des Seitenlichts für Faser H

Diese neue Funktion erlaubt eine fast vollkommene Näherung der Messergebnisse. Es muss nun geklärt werden, woher die zwei Exponentialfunktionen kommen. Wie die Abbildung 7.6 zeigt, hat die erste Funktion einen sehr hohen Lichtverlustkoeffizient. Bereits nach nur ungefähr vierzig Zentimeter ist ihr Lichtstrom niedriger als 5%. Die Zweite Funktion hat einen deutlich geringeren Lichtverlustkoeffizient und erlaubt dadurch Licht über lange Distanz abzustrahlen. Man kann somit sagen, dass diese letzte Exponentialfunktion die Hauptfunktion der Faser ist.



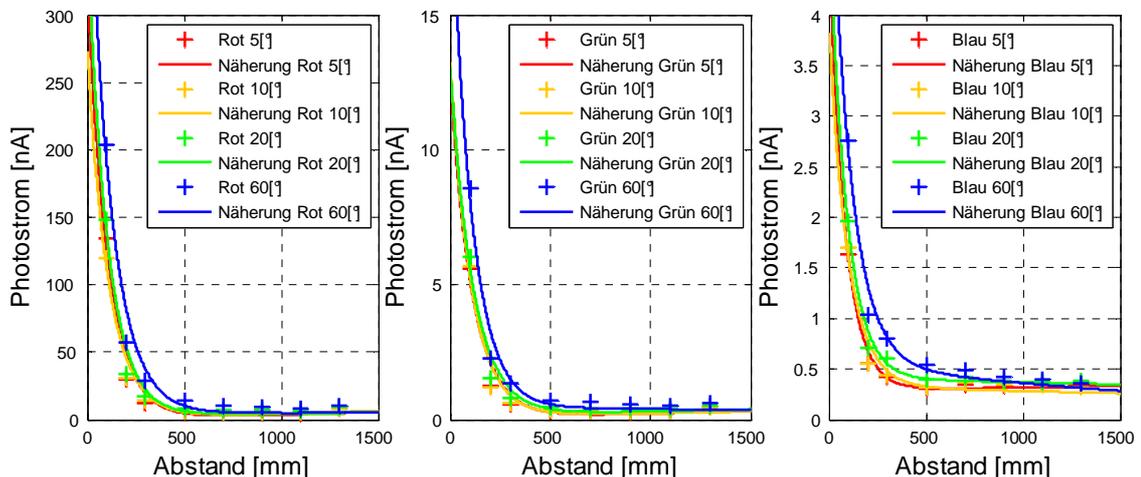
**Abb. 7.6 :** Näherungsfunktion des Photostroms des Seitenlichts mit 2 Exponentialfunktionen für Faser **H** und ihre Zerlegung

Weiter wird eine Erklärung für die Funktion mit hohem Lichtverlust gesucht. Zwei Lösungen sind dafür denkbar. Das Licht in der Seitenlichtfaser könnte noch nicht das Modengleichgewicht (EMD) erreicht haben und der Überschuss von Licht mit größeren Winkeln strahlt längsseitig in den ersten Zentimetern der Faser ab. Ein weiterer Lösungsansatz ist, dass diese übermäßige Abstrahlung aus dem Licht, das direkt im Mantel der Faser eingekoppelt wurde stammt. Wenn die Exponentialfunktion vom Licht verursacht wird, das direkt in dem Mantel eingekoppelt wird, sollte die Näherungsfunktion des Messergebnisses der Faser **E** mit einer normalen Exponentialfunktion eine gute Übereinstimmung liefern, da diese Seitenlichtfaser keine Mantel hat.



**Abb. 7.7 :** Näherungsfunktion des Photostroms des Seitenlichts mit 1 Exponentialfunktion für Faser **E**

Die Abbildung 7.7 zeigt, dass die Messergebnisse sehr gut mit einer Exponentialfunktion angenähert werden, was die Hypothese bestätigt, dass die Exponentialfunktion mit hohem Lichtverlustkoeffizient das Ergebnis des Lichtes ist, das direkt in den Mantel der Seitenlichtfaser eingekoppelt wird. Außerdem beobachtet man auf diesen Graphen, dass die verschiedenen Kurven praktisch unabhängig vom Winkel der Anregung übereinanderliegen. Das Modengleichgewicht ist demnach schon am Anfang der Faser ungefähr erreicht. Diese Seitenlichtfaser ist extrem dotiert, was erklärt kann, dass EMD so schnell erreicht wird. Die Dotierung lenkt nämlich die Strahlen ab und beschleunigt ihre Mischung. Für dotierte Seitenlichtfasern und Seitenlichtkabel wird daher die Modengleichgewichtsverteilung sehr schnell erreicht, und kann als unbedeutend angesehen werden. Dies ist nur für diese Fasern gültig, für Fasern die mit anderen Methoden zur Erzeugung von Seitenlicht hergestellt werden, muss es noch bewiesen werden. Diese Letzten erlauben wahrscheinlich ein schwächeres Mischen der Strahlen, da nur die, die in Kontakt mit der aufgerauten Oberfläche des Kerns kommen, umgeleitet werden. Deswegen sind die Strahlen weniger regelmäßig auf der Fläche des Kerns aufgeteilt.



**Abb. 7.8 :** Ergebnisse mit Näherungsfunktion des Photostroms des Seitenlichts für Faser I

Die Abbildung 7.8 zeigt die Messergebnisse der Seitenlichtkabel I. Die fast vollkommene Überlagerung der Kurven zeigt, dass schon ab Anfang die Modengleichgewichtsverteilung erreicht wird, was die vorhergehende Theorie bestätigt.

Es gibt noch ein Punkt über Seitenlichtfasern zu erklären die mit konstanten Methoden behandelt werden, um Seitenlicht zu erzeugen. In Fast alle Fälle kann man beobachten, dass die letzten Messergebnisse einen höheren Wert haben, als die im mittleren Bereich der Faser. Anders gesagt, die Strahlungsleistung steigt an, wenn es zum Ende der Faser gelangt. Dieses Phänomen erklärt sich durch die Reflexion an der Faserendfläche. Wenn das Licht das Ende der Faser erreicht, gibt es eine minimale Reflexion von 4% bedingt durch die Fresnel-Reflexion, die aus dem Brechzahlunterschied zwischen Luft und PMMA kommt. Da es schwer ist, bei dicken Fasern eine vollkommene polierte Endfläche zu bekommen, kann die Reflexion auch noch ein bisschen höher werden. Dieses reflektierte Licht, wird in Richtung der Lichtquelle zurückstrahlen und wieder als Seitenlicht abstrahlen, wie die Hauptexponentialfunktion. Die neue Annäherungsfunktion wird dann so berechnet:

$$\Phi_{e_S}(x) = \Phi_{e_K} \cdot e^{-k_K \cdot x} + \Phi_{e_M} \cdot e^{-k_M \cdot x} + \Phi_{e_R} \cdot e^{-k_K \cdot (d-x)} \quad (19)$$

Mit

$\Phi_{e_S}$  [W] : Seitenstrahlungsleistung der Faser

$\Phi_{e_K}$  [W] : Seitenstrahlungsleistung am Eingang des Faserkerns

$\Phi_{e_M}$  [W] : Seitenstrahlungsleistung am Eingang des Fasermantels

$\Phi_{e_R}$  [W] : Reflektierte Seitenstrahlungsleistung am Ende der Kern

$k_K$  [m<sup>-1</sup>] : Lichtverlustkoeffizient des Faserkerns

$k_M$  [m<sup>-1</sup>] : Lichtverlustkoeffizient des Fasermantels

$x$  [m] : Position  $x=[0;d]$

$d$  [m] : Länge der Faser

Man weiß, dass die Seitenstrahlungsleistung am Anfang des Faserkerns ein Prozentsatz der eingekoppelte Strahlungsleistung darstellt. Die reflektierte Seitenstrahlungsleistung stellt den gleichen Prozentsatz der reflektierten Strahlungsleistung in den Faserkern. Deswegen kann man schreiben:

$$\begin{aligned} \Phi_{e_K}(0) = \Phi_{e_E} \cdot P & \Rightarrow \Phi_{e_K}(d) = \Phi_{e_E} \cdot P \cdot e^{-k_K \cdot d} = \Phi_{e_K}(0) \cdot e^{-k_K \cdot d} \\ \Phi_{e_R}(d) = \Phi_{e_E} \cdot e^{-k_K \cdot d} \cdot P \cdot R & \Rightarrow \Phi_{e_R}(d) = \Phi_{e_K}(d) \cdot R = \Phi_{e_K}(0) \cdot e^{-k_K \cdot d} \cdot R \end{aligned} \quad (20)$$

Mit

$\Phi_{e_K}$  [W] : Seitenstrahlungsleistung am Eingang des Faserkerns

$k_K$  [ $m^{-1}$ ] : Lichtverlustkoeffizient des Faserkerns

$R$  : Reflexionsfaktor am Ende der Faser

$P$  : Prozentsatz der Strahlungsleistung,  
die als Seitenlicht abgestrahlt wird

$d$  [m] : Länge der Faser

Die Gleichung 19 kann dann mit weniger unbekanntem neu geschrieben werden:

$$\Phi_{e_S}(x) = \Phi_{e_K} \cdot e^{-k_K \cdot x} + \Phi_{e_M} \cdot e^{-k_M \cdot x} + (R \cdot \Phi_{e_K} \cdot e^{-k_K \cdot d}) \cdot \Phi_{e_K} \cdot e^{-k_K \cdot (d-x)} \quad (21)$$

Mit

$\Phi_{e_S}$  [W] : Seitenstrahlungsleistung der Faser

$\Phi_{e_K}$  [W] : Seitenstrahlungsleistung am Eingang des Faserkerns

$\Phi_{e_M}$  [W] : Seitenstrahlungsleistung am Eingang des Fasermantels

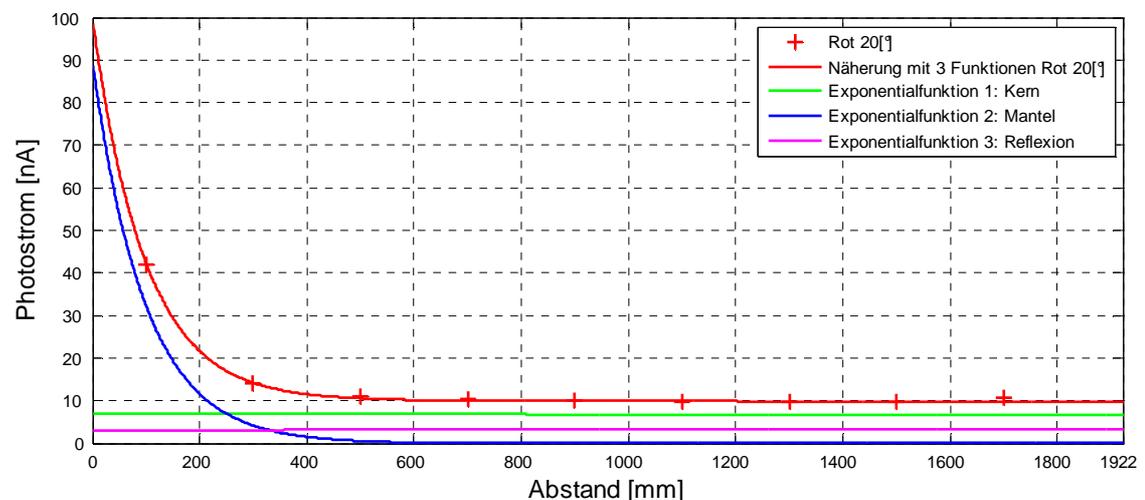
$k_K$  [ $m^{-1}$ ] : Lichtverlustkoeffizient des Faserkerns

$k_M$  [ $m^{-1}$ ] : Lichtverlustkoeffizient des Fasermantels

$R$  : Reflexionsfaktor am Ende der Faser

$x$  [m] : Position  $x=[0;d]$

$d$  [m] : Länge der Faser

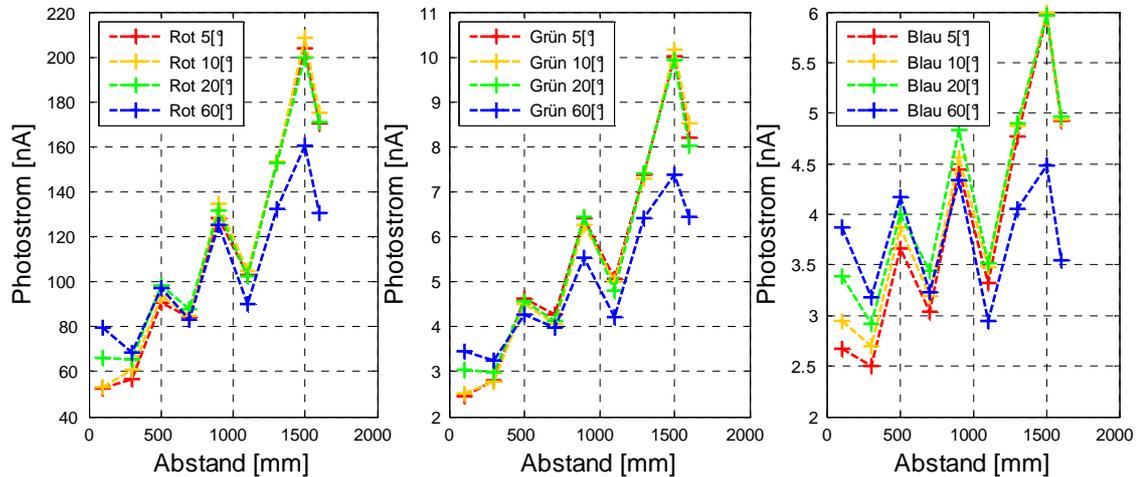


**Abb. 7.9 :** Näherungsfunktion des Photostroms des Seitenlichts mit 3 Exponentialfunktionen für Faser H und ihre Zerlegung

Dieser letzte Graph zeigt, dass wenn mit eine dritte Exponentialfunktion die Messergebnisse sehr gut annähern werden, der angenäherte Reflexionsfactor  $R$  von 50% viel zu hoch ist. Es ist wichtig zu bemerken, dass die Kurve der Reflexionsfunktion nie die gesamte Seitenlichtkurve steigen lassen kann, da sie den gleiche Lichtverlustkoeffizient wie die Hauptkurve hat. Die einzige Möglichkeit um eine Kurve zu erhalten die am Ende steigen kann, ist ein Prozentsatz der Reflexion von über 100%, was nicht möglich ist. Man kann daher denken, dass im Rahmen dieses Beispiels dieser letzte höhere Wert das Ergebnis aus einer Ungenauigkeit der Messung entsteht. Die Reflexion hat also nur den Effekt den Abfall der Kurve zu vermindern. In den wenigen Fällen, für die, die der Wert der letzten Messung höher ist, ist die Hauptkurve ziemlich flach, was auf eine Ungenauigkeit der Messungen hindeuten kann. Mit dieser Annäherungsfunktion ergeben sich mehrere Probleme. Die verschiedenen unbekanntenen Werte  $I_K$ ,  $I_M$ ,  $k_K$ ,  $k_M$  und  $R$  sind voneinander abhängig. Alle Werte erlauben zusammen Variationen von bis zu 20% um die Messergebnisse mit einem Vertrauensbereich von 95% anzunähern.

Zwei Lösungen können erwogen werden, die Kurve so gut wie möglich anzunähern. Die Erste besteht darin zu sagen, dass der Effekt der Reflexion, da dieser ca. 4% der Messungen nicht überschreiten sollte, niedriger als die Toleranz der Messungen ist, und daher für die Annäherung unbedeutend ist. Die zweite Möglichkeit besteht darin, den letzten Wert, der für jede Faser gemessen wurde zu löschen oder bei zukünftigen Messungen den Abstand zwischen dem letzten Messpunkt und der Faserendfläche möglichst groß zu halten. In diesem Fall sind die Effekte der Reflexion unbedeutend, aber der gemessene Bereich sehr kurz. Dadurch steigt die Ungenauigkeit der Annäherung, wegen der Abhängigkeit zwischen den zwei Exponentialfunktionen, stark an. Letztendlich wurde es sich dafür entschieden die Reflexion zu vernachlässigen. Man muss also berücksichtigen, dass die künftigen berechneten Lichtverlustkoeffizienten wahrscheinlich leicht höher als in der Wirklichkeit sind. Eine ideale Möglichkeit für zukünftige Messungen wäre ein Lichtsumpf am Ende der Faser zu benutzen, um das reflektierte Licht zu absorbieren.

Die Seitenabstrahlung der Fasern **A**, **B**, **C**, und **D**, die dank einer besonderen Behandlung konstant auf der ganzen Länge sein soll, wird jetzt studiert. Die Graphen 7.10 zeigen die typische Messergebnisse dieser Fasern.

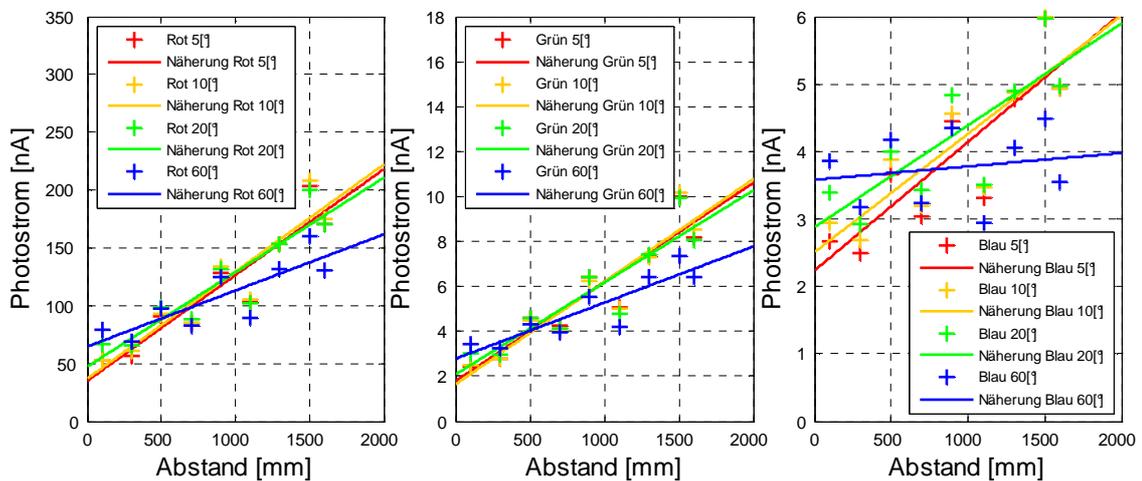


**Abb. 7.10** : Ergebnisse des Photostroms des Seitenlichts für Faser **C**

Mehrere Effekte können beobachtet werden. Die Gleichmäßigkeit des Seitenlichtes hängt von der Wellenlänge und vom Anregungswinkel des Lichts ab. Unabhängig von der Wellenlänge des Lichtes ist die Behandlung so durchgeführt worden, damit die Gleichmäßigkeit für den maximalen zulässigen Anregungswinkel optimal ist. In der Tat sind die Lichtquellen, die im Allgemeinen für die Beleuchtung der Fasern benutzt wurden, nicht in ihrem Winkel begrenzt. Das Ende der Faser wird also bis zur maximale numerische Apertur der Faser beleuchtet. Es ist daher normal, dass je kleiner der Anregungswinkel ist, die Strahlungsleistung des Seitenlichts mit größer werdender Distanz ansteigt. Es zeigt sich auch, dass entgegen den vorher gesehenen Seitenlichtfasern, die Modengleichgewichtsverteilung tatsächlich langsamer für die Fasern erreicht wird, die mit Sandstrahlung behandelt werden.

Als letzter Punkt ist noch zu nennen, dass die Veränderungen der Messergebnisse auch zeigen, dass diese Technik wenig präzise ist. Das Problem kommt davon, dass die Fasern keinen konstanten Durchmesser haben, sei es wegen der Variation des Kerndurchmessers oder der Dicke des Mantels. Abhängig von diesen Veränderungen werden die eingesetzten Pulver

beim Sandstrahlen die Oberfläche des Kerns mehr oder weniger stark einreißen, was eine erste Variation des Seitenlichts entlang der Faser ergibt. Die zweite kommt wahrscheinlich aus der Methode der Sandstrahlung, die ziemlich schwierig regelmäßig durch zu führen ist, besonders dann wenn die Sandstrahlung mit verschiedenen Pulver in abhängig von der Distanz auf der Faser durchgeführt wird. Allerdings sind die Augen nicht sehr Lichtvariationsempfindlich. Diese Variationen sind daher nicht besonders problematisch. Um die Seitenabstrahlung dieser Faser zu definieren, ist es eine bessere Methode, diese Kurven mit Geraden anzunähern, da eine konstante Abstrahlung die Zielsetzung dieser Behandlung ist. Für jede Faser werden die Steigung der Geraden und die Fehler für die Messergebnisse angegeben.



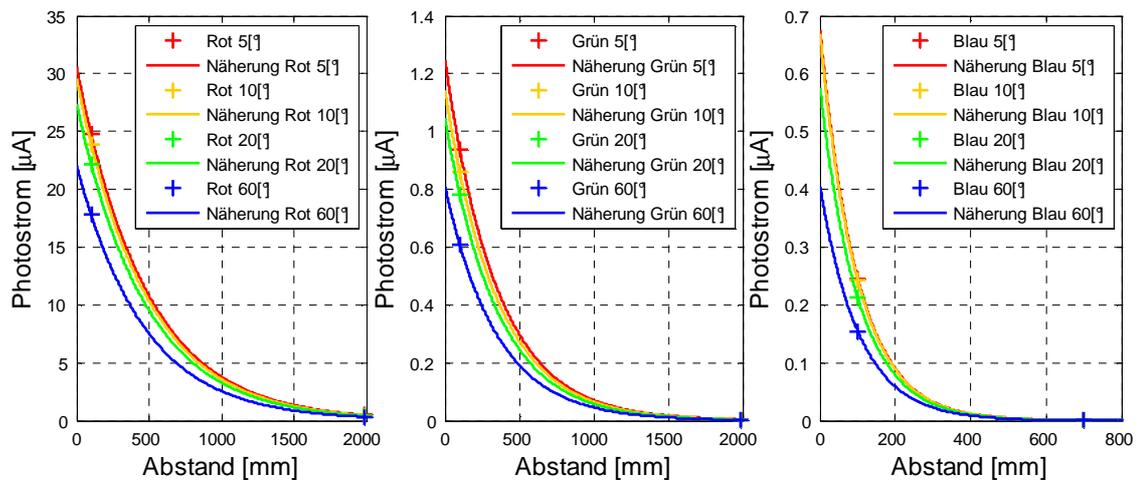
**Abb. 7.11** : Ergebnisse mit Näherungsfunktion des Photostroms des Seitenlichts für Faser C

Faser	Anregungswinkel	632.8 (Rot) Steigung [nA/m]	543 (Grün) Steigung [nA/m]	405 (Blau) Steigung [nA/m]
A	5°	49.8	2.75	1.63
	10°	47.7	2.75	1.56
	20°	43.5	2.66	1.48
	60°	22.4	1.44	0.361
B	5°	56.5	2.8	2.98
	10°	47.2	2.65	2.4
	20°	35.6	2.12	2.05
	60°	-0.174	0.316	-0.174
C	5°	91.5	4.41	1.91
	10°	92.6	4.57	1.75
	20°	81.7	4.09	1.51
	60°	48.5	0.25	0.199
D	5°	20.4	0.677	0.792
	10°	10.8	0.389	0.379
	20°	4.08	0.173	0.169
	60°	1.23	0.0571	0.055

**Tabelle 7.1** : Angenäherte Steigungen der Fasern A,B,C und D

## 7.2 Charakterisierung des geführten Lichts

Wie am Anfang des Kapitels erklärt wird, ist das Licht auf jedem Teil der Seitenlichtfaser zwischen Seitenlicht, geführtes Licht und Absorption aufgeteilt. Die Aufteilung ist dabei über die gesamte Faserlänge konstant. Man kann so erwarten, dass die Näherung der Messergebnisse für das geführte Licht mit dem gleichen Lichtverlustkoeffizient variiert. Es ist allerdings wichtig zu realisieren, dass die Näherung sich wieder aus zwei Exponentialfunktionen zusammensetzen muss, wenn Licht auch in den Mantel eingekoppelt wird. Die beste Möglichkeit ist den Lichtverlustkoeffizient der Faser **E** zu messen da diese keinen Mantel hat. Außerdem, wenn diese Faser mit dem blauen Laser beleuchtet wird, ist seine Lichtverlustkoeffizient hoch genug, damit sie kein Licht mehr enthält, bevor sie ihr Ende erreicht. Die Messung seiner Seitenabstrahlung besitzen daher keine Reflexionseffekte, was für einen Vergleich mit dem geführten Licht ideal ist.



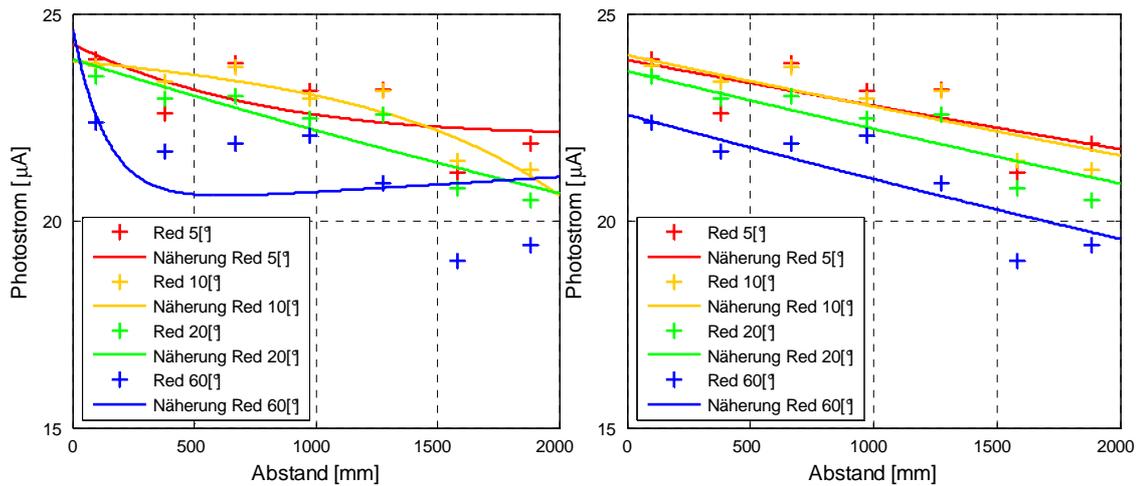
**Abb. 7.12 :** Ergebnisse der Näherung des Photostroms des geführten Lichts für Faser **E**

Wellenlänge	Anregungswinkel	Lichtverlustkoeffizient des geführtes Licht [m <sup>-1</sup> ]	Lichtverlustkoeffizient des Seitenlicht [m <sup>-1</sup> ]	Mittelwert + Toleranz
632.8 (Rot)	5°	2.084	1.288	1.686 ±23.6%
	10°	2.104	1.304	1.704 ±23.5%
	20°	2.117	1.447	1.782 ±18.8%
	60°	2.155	1.717	1.936 ±11.3%
543 (Grün)	5°	2.861	2.181	2.521 ±13.5%
	10°	2.851	2.194	2.523 ±13%
	20°	2.887	2.302	2.595 ±11.3%
	60°	2.881	2.553	2.717 ±6%
408 (Blau)	5°	10.11	10.30	10.205 ±0.9%
	10°	10.13	10.27	10.2 ±0.7%
	20°	9.983	10.29	10.137 ±1.5%
	60°	9.646	10.22	9.933 ±2.9%

**Tabelle 7.2 :** Angenäherte Lichtverlustkoeffizienten der Kern für Faser E

Die erhaltene Messergebnisse mit dem blauen Laser, die wie zuvor erklären wurde, der Vergleichsidealfall ist, erlaubt zu beweisen, dass der Lichtverlustkoeffizient für das geführtes Licht und das Seitenlicht identisch sind. Für die andere Messergebnisse hingegen gilt, je höher die Intensität des geführten Lichts am Ende der Faser, desto kleiner ist der angenäherte Lichtverlustkoeffizient des Seitenlichts verglichen mit dem Lichtverlustkoeffizienten des geführten Lichts. Die erhaltene maximale Toleranz beträgt dabei ±23.6%, was für die spätere Berechnung der Absorption schon problematisch ist.

Eine zweite Untersuchung wird mit einer Faser mit Mantel durchgeführt. Dieses Mal wird das geführte Licht der Seitenlichtfaser H auf verschiedene Abstände gemessen, indem jedes Mal ihre Länge reduziert wird.



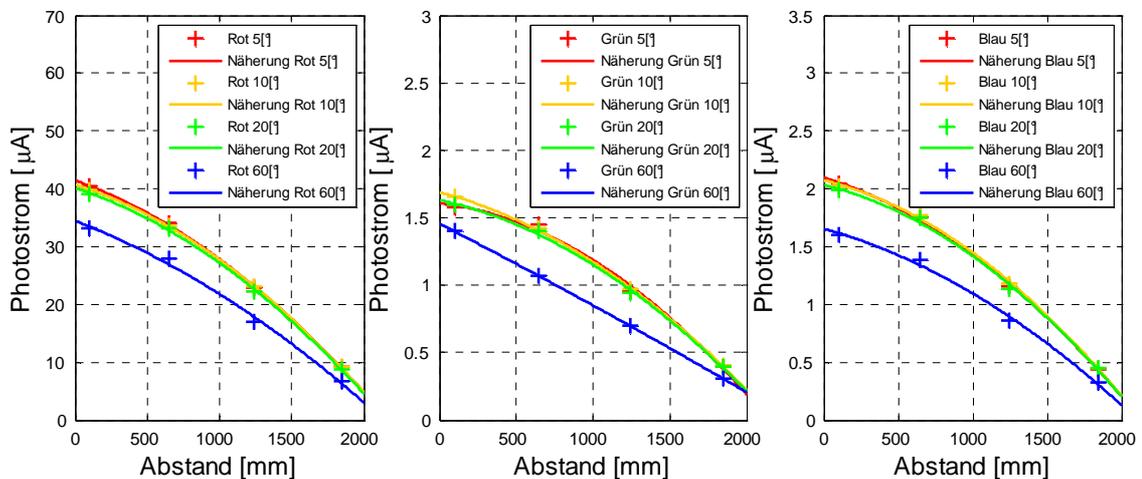
**Abb. 7.13 :** Ergebnisse mit Näherung mit zwei Exponentialfunktionen und eine Exponentialfunktion des Photostroms des geführten Licht für Faser **H**

Wellenlänge	Anregungswinkel	Lichtverlustkoeffizient des geführtes Licht [m <sup>-1</sup> ]	Lichtverlustkoeffizient des Seitenlicht [m <sup>-1</sup> ]	Mittelwert + Toleranz
632.8 (Rot)	5°	0.04732	0.0117	0.02951 ±60.4%
	10°	0.05322	0.0503	0.05176 ±2.8%
	20°	0.06114	0.0684	0.06477 ±5.6%
	60°	0.07139	0.156	0.113695 ±37.2%

**Tabelle 7.3 :** Angenäherte Lichtverlustkoeffizienten der Kerne für Faser **H**

Was die Messkurve betrifft, stellt man fest, dass eine Näherung mit zwei Exponentialfunktionen nicht funktioniert. Die Näherung mit einer Exponentialfunktion führt zu einem besseren Ergebnis. Man kann also annehmen, dass die Quantität des Lichtes, das im Mantel eingekoppelt wurde, in diesem Fall stark reduziert wird. Die Werte für die Toleranz für die Anregungswinkel 10° und 20°, siehe Tabelle XX, sind niedrig, was auf korrekte Ergebnisse hin deutet. Für die Anregungswinkel 5° und 60° sind die Werte für die Toleranzen viel zu hoch, was auf einen Näherungsfehler schließen lässt. Die Lichtverlustkoeffizienten des geführten Licht sehen viel logischer und regelmäßiger aus als die vom Seitenlicht. Deswegen kann man annehmen, dass die Lichtverlustkoeffizienten des Seitenlichts mit Anregungswinkel 5° und 60° nicht gut angenähert sind. Das geführte Licht aller Fasern wird nach 10cm Faserlänge und am Ende der Maximallänge gemessen. Die Faser **J** wurde wegen Schwierigkeit bei der Lichteinkopplung nicht gemessen.

Das geführte Licht der Fasern **A**, **B**, **C**, und **D** wird jetzt studiert. Wegen der Gleichung 16 (Siehe Kap. 7) sollte die Kurve des geführtes Lichts die gleiche Form wie das Integral der Kurve des Seitenlichts haben. Die Annäherung des geführten Lichtes, müsste daher eine Gerade mit einer negativen Steigung sein, wenn die Seitenabstrahlung vollkommen konstant wäre. Wie vorher dargestellt, kann das Seitenlicht mit einer Geradengleichung mit einer Steigung ungleich null angenähert werden. Deswegen kann man als Kurve für das geführte Licht eine Funktion 2. Grades erwarten. Die Abbildung 7.14 zeigt die typische Messergebnisse dieser Fasern.



**Abb. 7.14** : Ergebnisse der Näherung des Photostroms des geführten Lichts für Faser **C**

### 7.3 Charakterisierung der Absorption

Die Absorption einer Faser ist kein direkt messbarer Wert, sie kann nur aus dem geführten und dem Seitenlicht berechnet werden. Das Problem ist, dass das Ergebnis dieser Berechnung nicht nur von der Genauigkeit des Kalibrierens der Ulbrichtkugel, sondern auch von den vorhergehenden Ergebnissen abhängt. Man kann daher annehmen, dass in Anbetracht der vorhergehenden Ergebnisse die Genauigkeit der berechneten Werte nicht sehr hoch sein wird. Deswegen liegt die Zielsetzung dieses Kapitels mehr darin, den Weg zur Berechnung der Absorption aufzuzeigen.

Ein erster Schritt besteht darin, die verschiedenen Korrekturfaktoren aufzustellen, welche ermöglichen die mit der Ulbrichtkugel gemessenen Photoströme auf absolute Größe umzurechnen. Dann kann jeder Wert mit

seinem Faktor multipliziert werden, um korrigiert zu werden. Es jetzt noch eine weitere Korrektur für Seitenlichtmessergebnisse notwendig, da nicht an einem Punkt sondern auf einem Bereich von 1 cm gemessen wird. Man kennt also den Wert des Integrals zwischen zwei Punkten, und man muss die Strahlungsleistung am Eingang der Kern berechnen. Die zu lösende Berechnung ist folgende:

$$W = \int_a^{a+0.01} \Phi_{e_K} \cdot e^{-k_K \cdot x} dx \quad (22)$$

$$W = -\frac{\Phi_{e_K}}{k_K} \cdot e^{-k_K \cdot (a+0.01)} - \left( -\frac{\Phi_{e_K}}{k_K} \cdot e^{-k_K \cdot a} \right) = \frac{\Phi_{e_K}}{k_K} \cdot e^{-k_K \cdot a} \cdot (1 - e^{-0.01 \cdot k_K})$$

$$\Phi_{e_K} = \frac{e^{k_K \cdot a}}{1 - e^{-0.01 \cdot k_K}} k_K \cdot W \quad (23)$$

Mit

$\Phi_{e_K}$  [W] : Strahlungsleistung am Eingang des Faserkerns

$k_K$  [ $m^{-1}$ ] : Lichtverlustkoeffizient des Kerns

$W$  : Ein gemessener Wert des Seitenlichts

$a$  [m] : Position der Messung

$x$  [m] : Position

Die Zielsetzung ist die Absorption des Lichtes zu berechnen, das im Kern eingekoppelt wurde, deshalb muss nur die Funktion des vom Kern abgestrahlten Seitenlicht berücksichtigt werden. Es ist also wichtig, dass  $W$  ein Wert ist, der nicht unter dem Einfluss der Kurve der Mantelabstrahlung steht und auch nicht von der Reflexion am Faserende beeinflusst wird. Die beste Methode ist eine Kurve der Seitenabstrahlung an die des Kerns möglichst genau anzunähern. Die angenäherte Kurve für den Kern wird durch die Korrekturfaktoren der Ulbrichtkugel korrigiert. Anschließend nimmt man einem Punkt von dieser Kurve und kann mit diesem den genauen Wert von  $I_K$  berechnen.

Die Kurve des geführten Lichts muss noch zusätzlich zu den Ulbrichtkugelfaktoren korrigiert werden. Für jede dieser Messungen weiß man, dass es 4% Reflexion gibt, die normalerweise geführt werden, aber die nicht gemessen werden können. Man muss daher noch die Kurve des geführten

Lichts mit 1.0417 multiplizieren. Nach diesen Korrekturen, kann die Absorption schließlich dank der folgenden Funktion berechnet werden:

$$\Phi_{e_G} - \Phi_{e_G} \cdot e^{-k_k \cdot x} = \int_0^x (\Phi_{e_S} \cdot e^{-k_k \cdot x} + \Phi_{e_A} \cdot e^{-k_k \cdot x}) dx \quad (24)$$

$$\Phi_{e_G} \cdot (1 - e^{-k_k \cdot x}) = (\Phi_{e_S} + \Phi_{e_A}) \int_0^x e^{-k_k \cdot x} dx = (\Phi_{e_S} + \Phi_{e_A}) \cdot \left( -\frac{1}{k} e^{-k_k \cdot x} + \frac{1}{k} \right) = \frac{\Phi_{e_S} + \Phi_{e_A}}{k} \cdot (1 - e^{-k_k \cdot x})$$

$$k \cdot \Phi_{e_G} = \Phi_{e_S} + \Phi_{e_A}$$

$$\boxed{\Phi_{e_A} = k \cdot \Phi_{e_G} - \Phi_{e_S}} \quad (25)$$

Zu bestimmen wie viel Prozent die Absorption beträgt, kann man letztendlich schreiben:

$$\boxed{P_A = \frac{\Phi_{e_A}}{\Phi_{e_A} + \Phi_{e_S}} = \frac{\Phi_{e_A}}{k \cdot \Phi_{e_G}} = 1 - \frac{\Phi_{e_S}}{k \cdot \Phi_{e_G}}} \quad (26)$$

## 7.4 Anisotropie

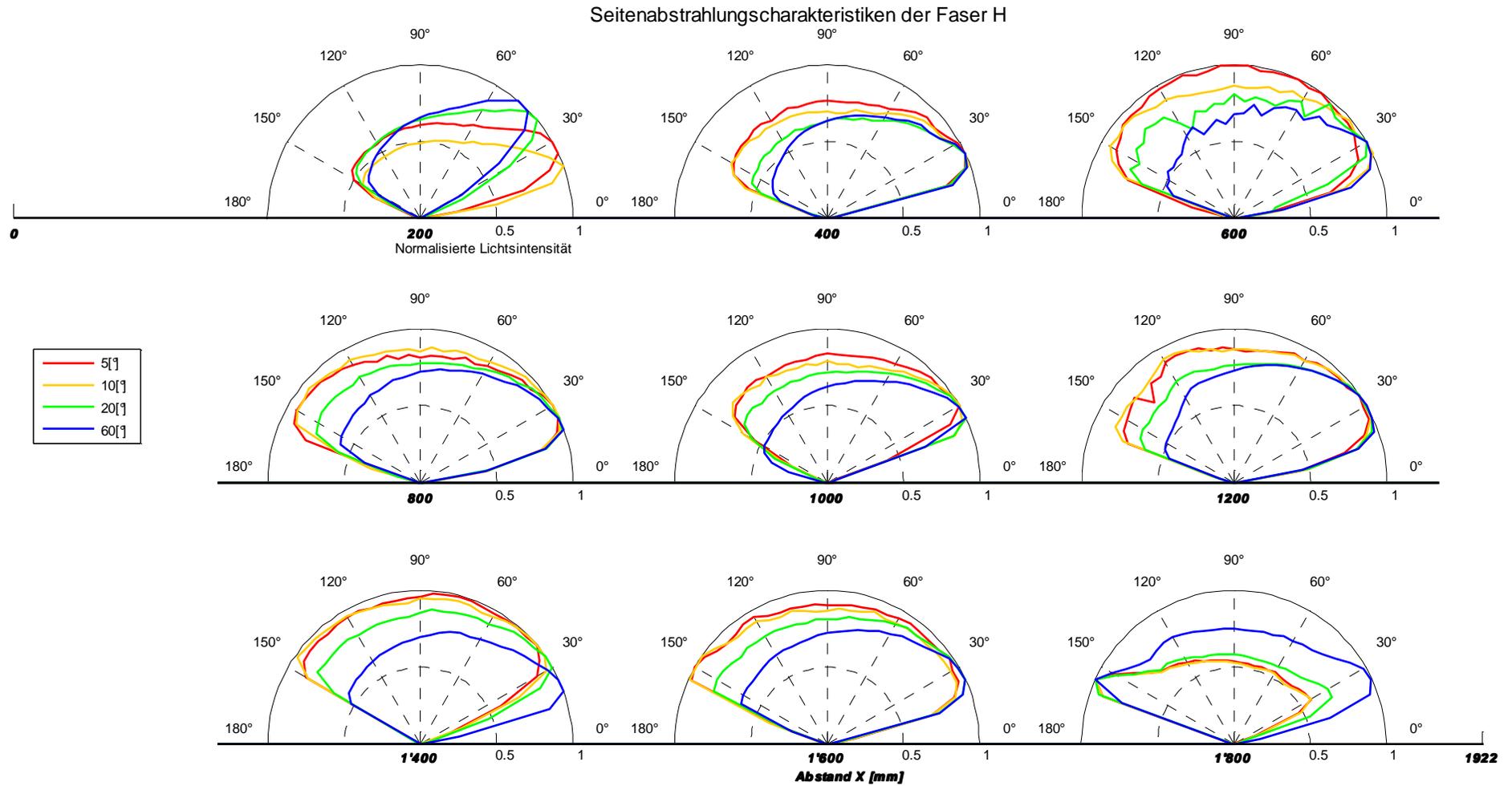
Dieses letzte Kapitel widmet sich nur der Charakterisierung der Seitenabstrahlung der Faser auf verschiedenen Punkten. Das Ziel ist zu verstehen, wie und warum die Intensität des Lichtes einer Seitenlichtfaser abhängig von ihrem Beobachtungspunkt variiert.

Das Experiment, das am Anfang des Kapitels „Anisotropie der Faser“ zitiert wird, erlaubt schon einige Charakteristiken der Abstrahlung und der Variation der Anisotropie der Faser auf ihrer Länge zu verdeutlichen. Damit lässt sich ermitteln, ob die Messergebnisse einen Sinn haben, und es lassen sich eventuelle Messfehler leichter erkennen. Da es für diese Art von Messungen noch keine Erfahrungen gibt, und in Anbetracht der notwendigen Zeit, nur für eine Faser im Rahmen dieses Projekts durchgeführt werden konnten, mussten sich im Vorfeld Gedanken über mögliche Fehler gemacht werden.

Da die Abstrahlung dieser Seitenlichtfaser diffus ist, kann die Abstrahlung Lambertartig sein. Jedoch, da die Seitenlichtfasern anisotropisch sind, kann die Verteilung der Abstrahlungsintensität aus einem Punkt der Oberfläche nicht vollkommen kugelförmig sein. Man kann erwarten, dass die Abstrahlung für kleine Winkel ( $<90^\circ$ ) im Verhältnis zum geführten Licht stärker ist. Diese Wirkung sollte am Anfang ziemlich stark sein, und sich auf der Länge der Faser vermindern, ohne notgedrungen zu verschwinden. Selbst wenn das Mischen der Strahlen ziemlich stark ist, ist das Licht immer in die Richtung der Faserachse gerichtet. Die Wahrscheinlichkeit, dass austretende Strahlen einen Winkel unter  $90^\circ$  zur Achse der Faser behalten, ist also größer.

Diese Charakteristik ist auf den Fotos der Experiment gut sichtbar (Siehe Kapitel 6.6), da wenn der Beobachtungswinkel im Verhältnis zu der Abstrahlungsrichtung eines der zwei LEDs viel niedriger als  $90^\circ$  ist, das durch die Faser abgestrahlte Licht von derselben Farbe bleibt wie das der LED. Man weiß außerdem, dass ein ziemlich hoher Anteil des geführten Lichtes über das Ende der Faser gespiegelt wird, und man muss erwarten, dass auf den letzten Zentimetern die Abstrahlung auf höheren Winkel als  $90^\circ$  im Verhältnis zur

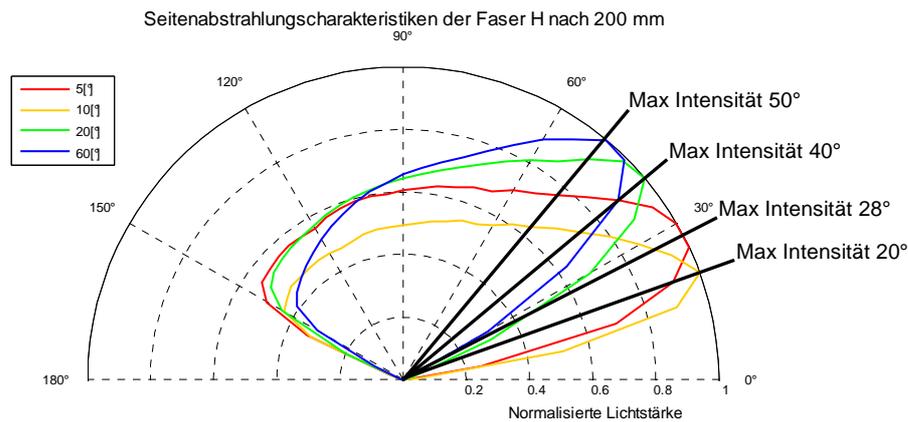
Achse der Faser größer ist. Im nächsten Graph, sind alle Messwerte der Abstrahlungscharakteristik für jeden Messpunkt entlang der Faserachse als Polardiagramme dargestellt. Um die Charakteristiken der Anisotropie besser darzustellen, sind alle Kurven normiert. Im Anhang ist es möglich, denselben Graphyp mit den originalen Messergebnissen zu sehen.



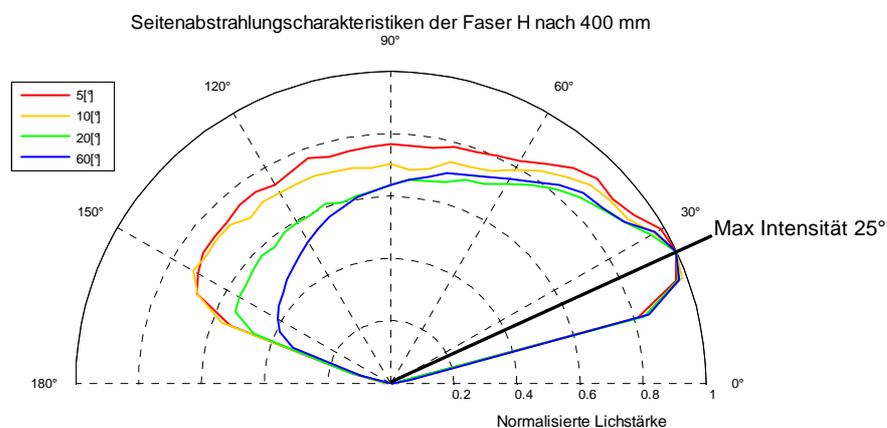
**Abb. 7.15 :** Normalisierte Seitenabstrahlungscharakteristiken der Faser H

Die Messergebnisse stellen wahrscheinlich keinen Widerspruch in Bezug auf die vorher gemachten Hypothesen da. Es ist dennoch wichtig vor der Analyse der Messergebnisse zu berücksichtigen, dass der Durchmesser des Lichtbündels, das in die Faser eingekoppelt wird, ziemlich klein war, was die Menge des in den Fasermantel eingekoppelten Lichtes belanglos macht. Außerdem ist, wie in Abb. 7.15 gezeigt, die Schräge, die das Loch des Rohres umgibt, ungefähr  $15^\circ$ . Es ist also normal, wenn die Lichtstrommenge auf allen Graphen gegen 0 abfällt, wenn der Winkel niedriger als  $15^\circ$ , oder über  $165^\circ$  ist.

Man kann feststellen, dass die Strahlung in den ersten 20 Zentimetern noch durch den Anregungswinkel beeinflusst wird. Nach 40 cm zeigt sich interessanterweise, dass unabhängig vom Anregungswinkel die Strahlen mit der höchste Intensität fast immer einen Winkel von ungefähr  $25^\circ$  besitzen (Siehe Abb. 7.17).

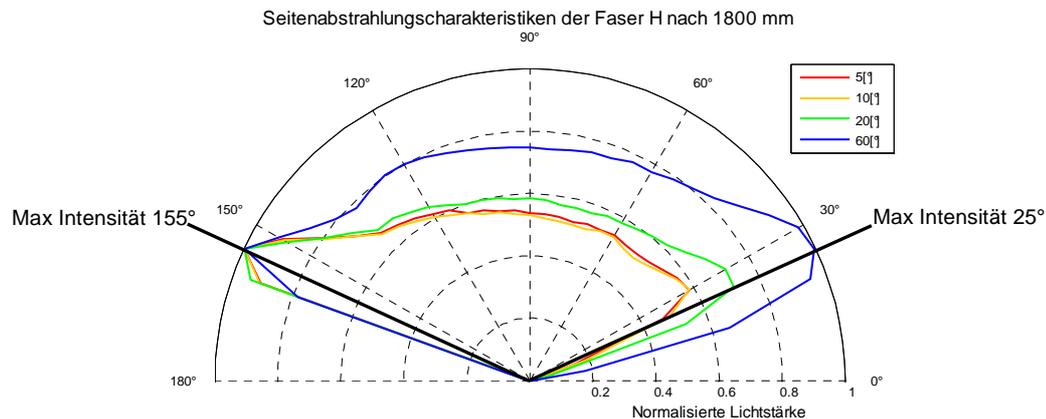


**Abb. 7.16** : Seitenabstrahlungscharakteristiken der Faser H nach 200 mm



**Abb. 7.17** : Seitenabstrahlungscharakteristiken der Faser H nach 400 mm

Dieser Effekt zeigt sich auch auf dem letzten Polardiagramm (Siehe Abb. 7.18). Allerdings bemerkt man hier, dass in allen Fällen der Winkel mit der höchsten Lichtstärke  $155^\circ$  beträgt, was dem einem gespiegelten  $25^\circ$  Winkel entspricht. Die Kurve, die den Anregungswinkel für  $60^\circ$  darstellt, zeigt sogar gleichzeitig eine maximale Intensität an den Winkeln von  $25^\circ$  und von  $155^\circ$ .



**Abb. 7.18** : Seitenabstrahlungscharakteristiken der Faser **H** nach 1800 mm

Es ist jedoch schwierig, den Grund dieses Winkels der maximalen Lichtstärke zu definieren. Da der Winkel der Strahlen bei ihrem Ausgang aus dem Kern und durch den Mantel in Anbetracht der Brechzahlunterschiede reduziert wird, erlaubt eine Berechnung den ungefähren Winkel der Strahlen an ihrem Ausgang des Kerns zu berechnen.

$$n_{\text{Kern}} \cdot \sin(\gamma_{\text{Kern}}) = n_{\text{Luft}} \cdot \sin(\gamma_{\text{Luft}}) \quad \xrightarrow{n_2=1} \quad \gamma_{\text{Kern}} = \arcsin\left(\frac{\sin(\gamma_{\text{Luft}})}{n_{\text{Kern}}}\right) \approx \arcsin\left(\frac{\sin(90^\circ - 25^\circ)}{1.492}\right) \approx 37.4^\circ$$

Winkel der Strahlen im Vergleich zu der Faserachse:

$$\alpha_{\text{Kern}} = 90^\circ - \gamma_{\text{Kern}} \approx 90^\circ - 37.4^\circ \approx 52.6^\circ$$

Dieser Winkel der Kernstrahlen ist größer als wenn den Anregungswinkel gleich  $180^\circ$  ( $\theta = \pm 90^\circ$ ) wäre, deswegen ist dieser Effekt komplett unabhängig vom Anregungswinkel. Er kommt wahrscheinlich aus den Methoden um Seitenlicht zu erzeugen. Es wäre daher interessant an anderen Fasern zu untersuchen, ob dieser Winkel von der Herstellungsmethode oder von anderen Parametern abhängt. Man kann trotzdem voraussetzen, dass für die dotierten Seitenlichtfasern der Winkel der maximale Lichtstärke abhängig von ihrer Dotierung variieren müsste. Wenn die Partikel der Dotierung transparent sind

eher niedrigere Winkel zu erwarten als für reflektive Partikel. Jedoch erlaubt die Anzahl der durchgeführten Messungen diese letzten Bemerkungen nur als Hypothesen anzusehen.

Eine andere Charakteristik, die man beobachten kann ist, dass je kleiner der Anregungswinkel ist, desto mehr strebt die Abstrahlung hin zu einer Lambertcharakteristik. Die Messergebnisse, wie in Abbildung 7.15 dargestellt, scheinen aus einer lambertartig Abstrahlungsbasis mit der vorher erwähnten Abstrahlung von ungefähr  $25^\circ$  zusammen gesetzt zu sei, daher kann man die Hypothesen aufzustellen, dass die Abstrahlung aus zwei Anteilen besteht. Der erste Anteil wäre die lambertartige Abstrahlung, die unabhängig von dem Anregungswinkel zu sein scheint. Der zweite Anteil wäre, der vorher erwähnte Effekt der Vorzugsrichtung, deren Winkel unabhängig vom Anregungswinkel ist. Die Intensität des Winkels der Vorzugsrichtung scheint dagegen vom Anregungswinkel abzuhängen.

## 8 Abschluss

Dieses Kapitel fasst alle wichtigen Eigenschaften, die die Fasern charakterisieren, sowie die Punkte der wichtigen und möglichen Verbesserung der verschiedenen Messaufbauten zusammen.

Die Methoden um Seitenlicht zu erzeugen können in zwei Gruppen unterteilt werden. Das Ändern der Faser während der Herstellung. Die Dotierung des Kerns und/oder des Mantels gehören zu dieser Gruppe. Das zweite ist das Ändern der Faser nach der Herstellung. Mechanisches Abtragen, Abtragen durch Laser, Chemisches Ätzen und Verdrehung der Fasern (Kabeln) sind die verschiedenen Methoden, die zu dieser Gruppe gehören.

Die Kabel und die dotierte Fasern geben dieselbe Art von Abstrahlung ab, sofern alle Fasern der Kabel angeregt werden. Diese zwei Seitenlichtfasertypen erreichen die Modengleichgewichtsverteilung (EMD) sehr schnell. Das hängt von der Methode der Seitenlichterzeugung ab, aber im Allgemeinen ist weniger als ein Meter notwendig, damit EMD erreicht wird. Manchmal kann die EMD Verteilung schon nach einigen Millimetern erreicht sein. Andererseits erreichen die Fasern, die eine Behandlung wie die Sandstrahlung erhalten haben die EMD-Verteilung später und haben eine im Allgemeinen ungleichmäßige Beleuchtung. Diese Ungleichmäßigkeiten sind jedoch in der Regel zu schwach, um mit Auge bemerkt zu werden.

Das eingekoppelte Licht in eine Seitenlichtfaser verteilt sich in drei Teilen, das geführte Licht, das Seitenlicht und die Absorption. Diese Verteilung wird durch die folgende Gleichung gegeben:

$$\Phi_{e_E} = \Phi_{e_G}(x) + \int_0^x (\Phi_{e_S}(x) + \Phi_{e_A}(x)) dx$$

Jede dieser Verteilungen des Lichtes variiert mit demselben Lichtverlustkoeffizient  $k$ . Die Seitenabstrahlung kann bis zu drei Exponentialfunktionen zusammengesetzt werden:

$$\Phi_{e_S}(x) = \Phi_{e_K} \cdot e^{-k_K \cdot x} + \Phi_{e_M} \cdot e^{-k_M \cdot x} + (R \cdot \Phi_{e_K} \cdot e^{-k_K \cdot d}) \cdot \Phi_{e_K} \cdot e^{-k_K \cdot (d-x)}$$

Die Erste ist das Ergebnis des Lichtes, das in den Kern eingekoppelt wurde. Die Zweite ergibt sich aus dem Licht, das in den Mantel eingekoppelt wurde. Sie hat einen höheren Lichtverlustkoeffizienten als der Kern. Die Dritte ist das Ergebnis der Reflektion des Lichtes am Ende der Faser. Die Höchstintensität beträgt ungefähr 4% hinsichtlich des Lichtes, das am Faserende geführt wurde. Je nach Fall kann die Funktion der Seitenbeleuchtung weniger Exponentialfunktionen besitzen, z. B. Faser ohne Mantel oder wenn es keine Reflexion gibt. Außer wenn viel Licht im Mantel eingekoppelt wird, ist die Funktion des geführten Lichtes eine Exponentialfunktion mit demselben Lichtverlustkoeffizient, wie die durch den Kern induzierte exponentielle Seitenlichtfunktion. Die Absorption kann nicht gemessen, sondern muss berechnet werden. Es ist notwendig, korrigierte Funktionen von der Seitenabstrahlung des Kerns und des geführten Lichtes zu haben. Die Intensität der Absorption am Anfang der Faser und den Prozentsatz der Absorption können durch die folgende Gleichungen berechnet werden:

Absorption der Strahlungsleistung am Anfang der Faser :  $\Phi_{e_A} = k \cdot \Phi_{e_G} - \Phi_{e_S}$

Prozentsatz der Absorption einer Faser :

$$P_A = \frac{\Phi_{e_A}}{\Phi_{e_A} + \Phi_{e_S}} = \frac{\Phi_{e_A}}{k \cdot \Phi_{e_G}} = 1 - \frac{\Phi_{e_S}}{k \cdot \Phi_{e_G}}$$

Für die Fasern, die ein logarithmisches Sandstrahlung erhalten haben, wird EMD langsamer erreicht. Die Seitenabstrahlung kann durch Gerade mit verschiedene Steigungen abhängig von dem Anregungswinkel annähert werden. Da das geführte Licht die gleiche Form wie das Integral der Kurve des Seitenlichts darstellt, können ihre Kurven durch Funktion 2. Ordnung annähert werden.

Die Abstrahlung der Fasern ist anisotropisch. Das heißt, dass an einem Punkt auf der Faser die Intensität der Abstrahlung je nach Beobachtungsrichtung unterschiedlich sein kann. Die Messungen erlauben, die Hypothese zu stellen, dass zwei Effekte sich kumulieren. Der Erste Effekt ist eine lambertartige Abstrahlung, unabhängig vom Anregungswinkel. Der zweite Effekt zeigt eine Vorzugsrichtung in der Abstrahlung deren Höchstintensität, immer den gleichen

Abstrahlwinkel aufweist. Dieser Abstrahlwinkel hängt nicht vom Anregungswinkel ab, außer auf den ersten Zentimetern 20 bis 30 cm. Die Intensität an diesem Abstrahlwinkel hängt dagegen offensichtlich vom Anregungswinkel ab.

An den Methoden zur Messung der Charakteristiken der Verteilung des Lichtes können drei Probleme festgestellt werden. Und können einer Verbesserung bekommen. Das erste Problem ist, dass Licht sehr oft in den Fasermantel eingekoppelt wird. Dies ist häufig ziemlich schwer zu vermeiden. Dadurch entsteht eine zweite Exponentialfunktion in der Seitenlichtkurve, was die Ungenauigkeit der Annäherung der Lichtverlustkoeffizient des Kerns erhöht. Um dem abzuhelpen muss man eine minimale Faserlänge von 0.5 Meter oder besser sogar 1 Meter vor dem ersten Messpunkt vorsehen. In Anbetracht des hohen Lichtverlustkoeffizient des Mantels ist diese Faserlänge ausreichend, um den Einfluss dieses Effekts unbedeutend zu machen. Die Faser kann auf diesen Bereich sogar aufgerollt werden. Das kann von Vorteil sein, da dadurch eine sehr feste Befestigung der Faser gegeben ist. Veränderungen während der Messungen werden dadurch vermieden. Das zweite Problem ist die Reflexion am Ende der Faser. Sie erzeugt die dritte Exponentialfunktion, die auch Fehler für die Annäherung des Koeffizienten des Kerns produziert. Die beste Lösung besteht darin, einen Lichtsumpf zu benutzen. Dadurch kann ein großer Teil der Reflexion vermieden werden. Das dritte Problem betrifft die Kalibrierung der Ulbrichtkugel für die Seitenabstrahlung. Die Idee, ein kurzes Stück der Fasern als Referenz zur Kalibrierung zu nehmen, um die Tests durchzuführen scheint optimal. Das Problem dabei ist die Endfläche der Faser so zu behandeln, dass kein Licht austreten kann. Dazu werden Schichten von Bariumsulfat und Aluminium auf die Endfläche aufgebracht. Dieser Vorgang ist schwierig da die Bariumsulfatschicht zerbrechlich ist und außerdem sich die Schicht manchmal von der Endfläche ablöst. Durch Fehler oder Beschädigungen an der Endfläche kann Licht austreten, was die Kalibrierung verfälschen kann. Eine bessere Lösung wäre, ein kurzer Abschlussdeckel aus Aluminium der allerdings durch das Führungsröhrchen passen muss.

Eine weitere nicht so wichtige Optimierung wäre eine Halogenlampe zur Anregung der Faser zu benutzen. Das würde erlauben, die Faser auf alle

sichtbaren Wellenlängen testen zu können. In diesem Fall kann ein Spektrometer an der Stelle des Detektors benutzt werden. Die notwendige Leistung beträgt ungefähr 500 W. Es ist dann aber notwendig einen Infrarotfilter zu benutzen, um eine Überhitzung der Faser an der Einkopplenseite zu vermeiden.

Eine Optimierung an der Lichteinkopplung wäre der Einsatz einer Strahlaufweitung wie sie in Kapitel 6.1.2 dargestellt ist. Damit kann der Strahldurchmesser an den Faserdurchmesser optimal angepasst werden. Die Fasern dürfen während den Messungen nie komprimiert oder gespannt werden, da dies das Abstrahlverhalten verändern kann. Die Fasern, die keinen optischen Mantel besitzen, müssen mit einem Minimum an Kontaktstelle befestigt werden. Denn jede Kontaktzone verursacht Lichtverlust an Faser, was die Messungen verfälschen kann.

Der Messaufbau der Anisotropie kann auch an mehreren Punkten noch optimiert werden. Die Messungen der Referenzwerte sollten mit einem Splitter erfolgen, der vor der Einkopplung in die Faser positioniert ist. Diese Methode macht die Referenzmessung unabhängig hinsichtlich Bewegungen oder anderen Störung der Faser, was nicht der Fall ist, wenn der Referenzdetektor am Ende der Faser angebracht wird. An der Stelle einer Röhre zur Abschattung des Seitenlichts, würde die Benutzung einer sehr dünnen Platte mit einem Durchbruch an der Messstelle die Kontaktfläche mit der Seitenlichtfaser reduzieren und somit auch mögliche Störungen der Strahlung. Eine letzte mögliche Optimierung bestände darin, der „Pendel-Goniometer“ auf eine Schiene zu setzen zu können, um das Verschieben zu vereinfachen. Das für die Messungen benutzte Programm wies außerdem einige Fehler auf, was auch die Genauigkeit der Messungen negativ beeinflusste. Dieses Programm wurde in der Zwischenzeit bereits überarbeitet.

## 9 Bild- und Tabellenverzeichnis

### 9.1 Bildverzeichnis

<b>Abb. 2.1 :</b>	Mögliche Einkopplungen der Seitenlichtfasern (A: Einzel Einkopplung,.....	3
<b>Abb. 3.1 :</b>	Stufenmarkierungen mit Seitenlichtfasern [16].....	4
<b>Abb. 3.2 :</b>	Dekorations- u. Designbeleuchtung für Kleidungen [17] Turm [18] Drahtseilbahnkabine [19] mit Seitenlichtfasern .....	5
<b>Abb. 3.3 :</b>	Beleuchtung einer Whirlpool mit Seitenlichtfasern [16].....	5
<b>Abb. 3.4 :</b>	Tageslichtbeleuchtung mit Seitenlichtfasern [20].....	6
<b>Abb. 4.1 :</b>	Optische Fasertypen [11] .....	7
<b>Abb. 4.2 :</b>	Zur Definition des Akzeptanzwinkels.....	8
<b>Abb. 4.3 :</b>	Strahlungsleistung abhängig von der Moden .....	9
<b>Abb. 4.4 :</b>	Einfluss der Modenverteilung auf die längeabhängige Dämpfung.....	10
<b>Abb. 5.1 :</b>	Seitenabstrahlung durch Dotierung des Kerns .....	11
<b>Abb. 5.2 :</b>	Radiale Abstrahlung einer dotierten Seitenlichtfaseraser .....	12
<b>Abb. 5.3 :</b>	Seitenabstrahlung durch Dotierung des Mantels .....	12
<b>Abb. 5.4 :</b>	Theoretisch Seitenabstrahlung durch Dotierung des Mantels mit kollimierten Licht in die Seitenlichtfaser gestrahlt .....	13
<b>Abb. 5.5 :</b>	Seitenabstrahlung durch mechanische Abtragen .....	14
<b>Abb. 5.6 :</b>	Logarithmische Sandstrahlung auf eine Faser um konstante Seitenabstrahlung zu erzeugen.....	14
<b>Abb. 5.7 :</b>	Radiale Abstrahlung einer sandgestrahlter Seitenlichtfaser.....	15
<b>Abb. 5.8 :</b>	Seitenabstrahlung durch das Einschneiden der Faser .....	15
<b>Abb. 5.9 :</b>	Sternenhimmeleffekt durch das Einschneiden der Faser [21] .....	16
<b>Abb. 5.10 :</b>	Seitenabstrahlung durch Verdrehung der Fasern .....	16
<b>Abb. 5.11 :</b>	Verschiedene Möglichkeiten um Fasern zu verdrillen.....	17
<b>Abb. 6.1 :</b>	Beispiel der Oberfläche einer Faser vor und nach Polieren.....	20
<b>Abb. 6.2 :</b>	Aufteilung der Strahlungsleistung in einer Seitenlichtfaser .....	20
<b>Abb. 6.3 :</b>	Aufstellung der notwendige Elemente für die Messung der Seitenlicht und geführtes Licht .....	21
<b>Abb. 6.4 :</b>	Erste möglichste optische System um ein paralleles Lichtbündel zu erzeugen...	22
<b>Abb. 6.5 :</b>	Zweite möglichste optische System um direkt Licht in der Faser einzukoppeln..	23
<b>Abb. 6.6 :</b>	Aufbau des blaues Lasers mit optische Schema .....	24
<b>Abb. 6.7 :</b>	Erste möglichste Strahlaufweitung .....	25
<b>Abb. 6.8 :</b>	Zweite Strahlaufweitung mit den Grundsatz des Teleobjektivs mit einem afokalen System [12].....	26
<b>Abb. 6.9 :</b>	Schwankungen einen roten Laser durch Zeit.....	26
<b>Abb. 6.10 :</b>	Verteilung des Lichts mit einem Splitter auf einen Referenzdetektor .....	27

<b>Abb. 6.11 :</b>	Schwankungen der Photostrom des Referenzdetektor vergleicht mit Detektor in der Ulbrichtkugel.....	27
<b>Abb. 6.12 :</b>	Splitter mit Streufolie .....	28
<b>Abb. 6.13 :</b>	Test der Splitter mit Streufolie .....	28
<b>Abb. 6.14 :</b>	Änderung der Anregungswinkel mit einer Linse.....	29
<b>Abb. 6.15 :</b>	Verschiedene Ansicht der Ulbrichtkugel.....	31
<b>Abb. 6.16 :</b>	Innerer Aufbau der Ulbrichtkugel zum Messen des Seitenlichts.....	32
<b>Abb. 6.17 :</b>	Effekt der Druck auf eine Faser.....	32
<b>Abb. 6.18 :</b>	Innerer Aufbau der Ulbrichtkugel zum Messen des Seitenlichts.....	33
<b>Abb. 6.19 :</b>	Inner Aufbau der Ulbrichtkugel zum Messen des geführten Lichts.....	34
<b>Abb. 6.20 :</b>	Klebeband zwischen Faser und Röhrchen.....	34
<b>Abb. 6.21 :</b>	Unterstützung Für dickere Fasern mit Mantel .....	35
<b>Abb. 6.22 :</b>	Simulation des geführten Lichts und Seitenlichts mit LED.....	36
<b>Abb. 6.23 :</b>	kleine achteckige Plättchen wird mit Bariumsulfat angemahlt .....	37
<b>Abb. 6.24 :</b>	Beschreibung der Kalibrierungsmethode mit kleiner achteckigen Plättchen .....	37
<b>Abb. 6.25 :</b>	Schritten für Grundkalibrierung .....	38
<b>Abb. 6.26 :</b>	Lage A der Grundkalibrierung .....	38
<b>Abb. 6.27 :</b>	Lage B der Grundkalibrierung .....	39
<b>Abb. 6.28 :</b>	Abdeckung und kleine Röhrchen mit Streufolie .....	40
<b>Abb. 6.29 :</b>	Zwei Messungen für geführte Licht Kalibrierung.....	40
<b>Abb. 6.30 :</b>	Beispiel von Bedeckung der Probe mit Schichten von Bariumsulfat und Aluminium .....	40
<b>Abb. 6.31 :</b>	Die vier verschiedene Schritte für Kalibrierung des Seitenlichts.....	41
<b>Abb. 6.32 :</b>	Probe in der Ulbrichtkugel .....	42
<b>Abb. 6.33 :</b>	S390 UNIVERSAL OPTOMETER.....	42
<b>Abb. 6.34 :</b>	Experiment um die Anisotropie zu beobachten.....	43
<b>Abb. 6.35 :</b>	Aufstellung der notwendige Elemente für die Messung der Anisotropie.....	44
<b>Abb. 6.36 :</b>	Pendel-Goniometer .....	45
<b>Abb. 6.37 :</b>	Optimierung der Pendel-Gionometer .....	46
<b>Abb. 6.38 :</b>	SR830 DSP Lock-In Verstärker der Firma Stanford Research Systems .....	47
<b>Abb. 6.39 :</b>	Röhr mit Loch von 3 mm .....	47
<b>Abb. 6.40 :</b>	Chopperrad.....	48
<b>Abb. 7.1 :</b>	Aufteilung der Strahlungsleistung in einer Seitenlichtfaser .....	49
<b>Abb. 7.2 :</b>	Ergebnisse des Photostroms des Seitenlichts für Faser <b>H</b> .....	50
<b>Abb. 7.3 :</b>	Näherungsfunktion des Photostroms des Seitenlichts mit 1 Exponentialfunktion für Faser <b>H</b> .....	51
<b>Abb. 7.4 :</b>	Photostrom des Seitenlichts für Faser <b>H</b> mit log-Massstab .....	52
<b>Abb. 7.5 :</b>	Ergebnisse mit Näherungsfunktion des Photostroms des Seitenlichts für Faser <b>H</b> .....	52
<b>Abb. 7.6 :</b>	Näherungsfunktion des Photostroms des Seitenlichts mit 2 Exponentialfunktionen für Faser <b>H</b> und ihre Zerlegung .....	53

<b>Abb. 7.7 :</b>	Näherungsfunktion des Photostroms des Seitenlichts mit 1 Exponentialfunktion für Faser <b>E</b> .....	53
<b>Abb. 7.8 :</b>	Ergebnisse mit Näherungsfunktion des Photostroms des Seitenlichts für Faser <b>I</b> .....	54
<b>Abb. 7.9 :</b>	Näherungsfunktion des Photostroms des Seitenlichts mit 3 Exponentialfunktionen für Faser <b>H</b> und ihre Zerlegung .....	56
<b>Abb. 7.10 :</b>	Ergebnisse des Photostroms des Seitenlichts für Faser <b>C</b> .....	58
<b>Abb. 7.11 :</b>	Ergebnisse mit Näherungsfunktion des Photostroms des Seitenlichts für Faser <b>C</b> .....	59
<b>Abb. 7.12 :</b>	Ergebnisse der Näherung des Photostroms des geführten Lichts für Faser <b>E</b> ...	60
<b>Abb. 7.13 :</b>	Ergebnisse mit Näherung mit zwei Exponentialfunktionen und eine Exponentialfunktion des Photostroms des geführten Licht für Faser <b>H</b> .....	62
<b>Abb. 7.14 :</b>	Ergebnisse der Näherung des Photostroms des geführten Lichts für Faser <b>C</b> ...	63
<b>Abb. 7.15 :</b>	Normalisierte Seitenabstrahlungscharakteristiken der Faser <b>H</b> .....	68
<b>Abb. 7.16 :</b>	Seitenabstrahlungscharakteristiken der Faser <b>H</b> nach 200 mm .....	69
<b>Abb. 7.17 :</b>	Seitenabstrahlungscharakteristiken der Faser <b>H</b> nach 400 mm .....	69
<b>Abb. 7.18 :</b>	Seitenabstrahlungscharakteristiken der Faser <b>H</b> nach 1800 mm .....	70
<b>Abb. 11.1 :</b>	Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser <b>E</b> .....	85
<b>Abb. 11.2 :</b>	Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser <b>F</b> .....	85
<b>Abb. 11.3 :</b>	Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser <b>G</b> .....	85
<b>Abb. 11.4 :</b>	Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser <b>H</b> .....	86
<b>Abb. 11.5 :</b>	Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser <b>I</b> .....	86
<b>Abb. 11.6 :</b>	Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser <b>J</b> .....	86
<b>Abb. 11.7 :</b>	Ergebnisse mit Näherungsfunktion des Photostroms des geführten Lichts für Faser <b>A</b> .....	87
<b>Abb. 11.8 :</b>	Ergebnisse mit Näherungsfunktion des Photostroms des geführten Lichts für Faser <b>B</b> .....	87
<b>Abb. 11.9 :</b>	Ergebnisse mit Näherungsfunktion des Photostroms des geführten Lichts für Faser <b>C</b> .....	87
<b>Abb. 11.10 :</b>	Ergebnisse mit Näherungsfunktion des Photostroms des geführten Lichts für Faser <b>D</b> .....	88
<b>Abb. 11.11 :</b>	Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des geführten Licht für Faser <b>E</b> .....	88
<b>Abb. 11.12 :</b>	Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des geführten Licht für Faser <b>F</b> .....	88

**Abb. 11.13** : Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des geführten Licht für Faser **G**..... 89

**Abb. 11.14** : Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des geführten Licht für Faser **H**..... 89

**Abb. 11.15** : Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des geführten Licht für Faser **I**..... 89

## 9.2 Tabellenverzeichnis

**Tabelle 6.1** : Aufstellung aller getesteter Seitenlichtfasern ..... 19

**Tabelle 6.2** : Übersicht über die eingesetzten Lichtquellen..... 24

**Tabelle 6.3** : Übersicht der Ulbrichtkugel ..... 31

**Tabelle 6.4** : Aufstellung aller eingesetzter Röhrchen..... 33

**Tabelle 6.5** : Aufstellung aller wieder eingesetzter Elemente ..... 44

**Tabelle 6.6** : Aufstellung des Pendel-Goniometers..... 45

**Tabelle 7.1** : Angenäherte Steigungen der Fasern **A,B,C** und **D**..... 59

**Tabelle 7.2** : Angenäherte Lichtverlustkoeffizienten der Kern für Faser **E**..... 61

**Tabelle 7.3** : Angenäherte Lichtverlustkoeffizienten der Kerne für Faser **H** ..... 62

**Tabelle 11.1** :Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser **A** ..... 83

**Tabelle 11.2** :Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser **B** ..... 83

**Tabelle 11.3** :Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser **C** ..... 84

**Tabelle 11.4** :Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser **D** ..... 84

## 10 Literaturverzeichnis

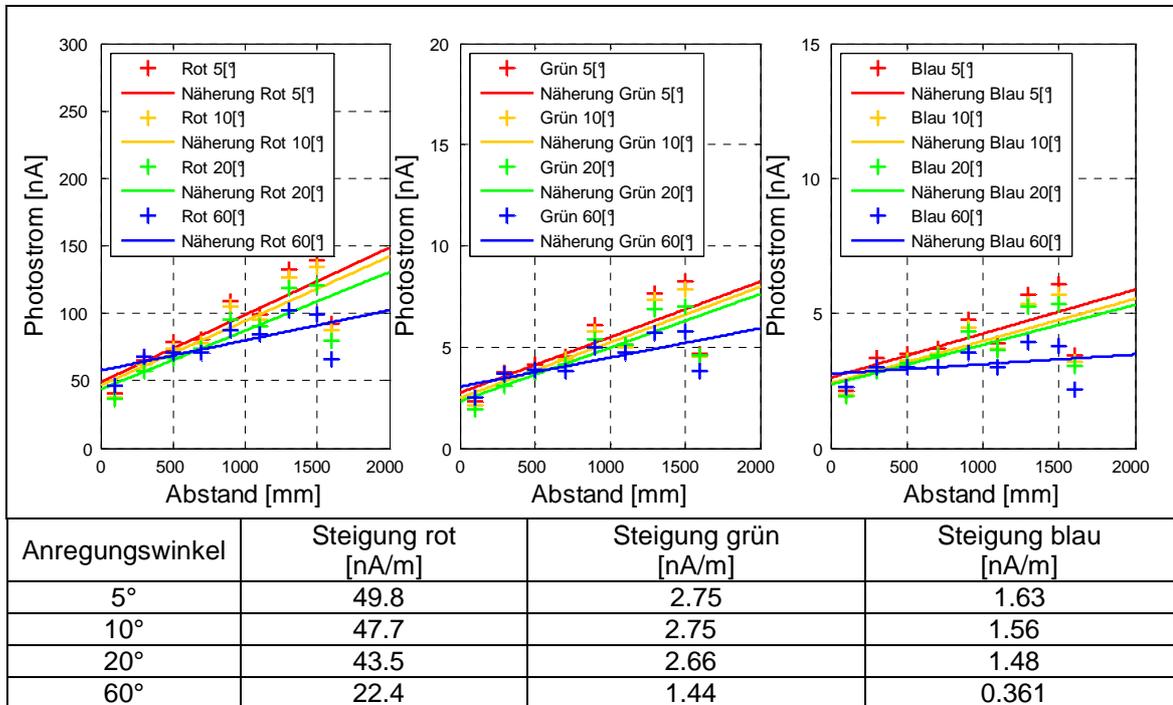
- [1] O. Ziemann, J. Krauser, P.E. Zamzow, W. Daum  
*POF-Handbuch - Optische Kurzstreckenübertragungssysteme - 2.,  
bearbeitete und ergänzte Auflage*  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001 und 2007
- [2] F. Pedrotti, L. Pedrotti, W. Bausch, H. Schmidt  
*Optik für Ingenieure - Grundlagen - 2. Auflage*  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002
- [3] Prof. Dr. L. Zago  
*Optique technique*  
Skript zur Vorlesung - Studiengang Mikrotechnik WS 07/08 SS 08  
Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud (HEIG-VD)
- [4] A. Haug  
*Universeller Messplatz zur Bestimmung der Abstrahlcharakteristik*  
Diplomarbeit SS 99  
Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg
- [5] *Lighttools - Core Module User's Guide - Version 6.0*  
Optical Research Associates
- [6] Patent (WO/1995/016877)  
*OPTICAL FIBRE WITH MULTIPLE POINT LATERAL ILLUMINATION*  
[www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?WO=1995%2F16877&IA=FR1994001475  
&DISPLAY=DESC](http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?WO=1995%2F16877&IA=FR1994001475&DISPLAY=DESC)
- [7] Patent (WO/1994/28451)  
*LATERAL ILLUMINATION FIBER OPTIC CABLE DEVICE AND  
METHODE OF MANUFACTURE*  
[www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?wo=1994028451&IA=US1994005677&DI  
SPLAY=DESC](http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?wo=1994028451&IA=US1994005677&DI<br/>SPLAY=DESC)

- [8] Patent (WO/2001/088431)  
*OPTICAL FIBRE ILLUMINATED DISPLAY SCREEN, OR THE LIKE,  
WITH INFORMATIVE OR DECORATIVE CONTENT, AND METHOD  
FOR MAKING SAME*  
[www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?IA=FR2001001562&DISPLAY=DESC](http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?IA=FR2001001562&DISPLAY=DESC)
- [9] J. Spigulis, D. Pfafrods  
*Clinical Potential of the Side-Glowing Optical Fibers*  
University of Latvia  
<http://home.lanet.lv/~spigulis/PUBLBIOS-97.htm>
- [10] Internetseite zur Novo Concept  
*CONCEPT DE L'ÉCLAIRAGE PAR FIBRE OPTIQUE*  
[www.novo-concept.fr/novo\\_fibres\\_optiques/montage\\_fibres\\_optiques.htm](http://www.novo-concept.fr/novo_fibres_optiques/montage_fibres_optiques.htm)
- [11] Internetseite zur Wikipedia  
*Optical fiber*  
[en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_fiber](http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber)
- [12] Internetseite zur Wikipedia  
*Zoom lens*  
[en.wikipedia.org/wiki/Zoom\\_lens](http://en.wikipedia.org/wiki/Zoom_lens)
- [13] Internetseite zur Excel-Ray  
[www.excel-ray.com](http://www.excel-ray.com) (Audio Images)
- [14] Internetseite zur ERO GmbH  
<http://www.ero-gmbh.com>
- [15] Internetseite zur G&G Group Lichtdekor  
[www.lichtdekor.de](http://www.lichtdekor.de)
- [16] Internetseite zur Flux Lighting (escalier, piscine)  
[www.flux-lighting.com](http://www.flux-lighting.com)
- [17] Internetseite zur LumiGram  
[www.lumigram.com](http://www.lumigram.com)
- [18] Internetseite zur Nexxus Lighting  
<http://www.nexxuslighting.com/commercial/>

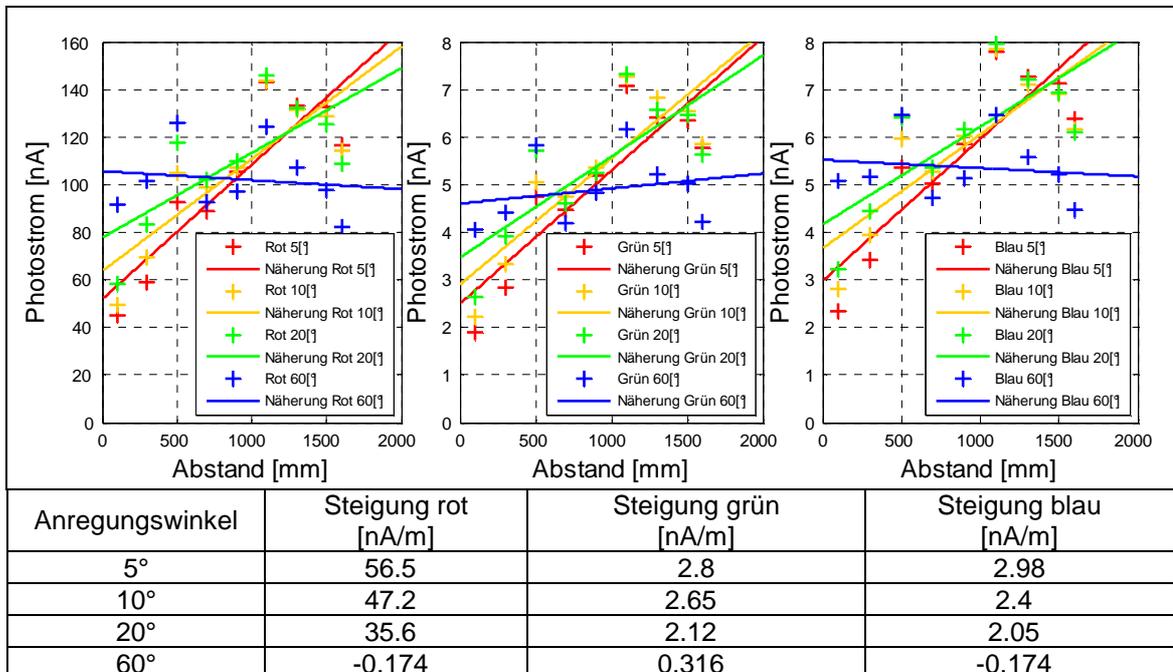
- [19] Internetseite zur Illumination India  
[www.indiamart.com/illumination/fibre-optics.html](http://www.indiamart.com/illumination/fibre-optics.html)
- [20] Internetseite zur Mondial Publishing Ltd  
*Fibre optic lighting projects*  
[www.mondiale.co.uk/mondoarc/product/fibopt05/projects.html](http://www.mondiale.co.uk/mondoarc/product/fibopt05/projects.html)
- [21] Internetseite zur Universal Fibre Optics  
[www.universal-fibre-optics.com/](http://www.universal-fibre-optics.com/)

## 11 Anhang

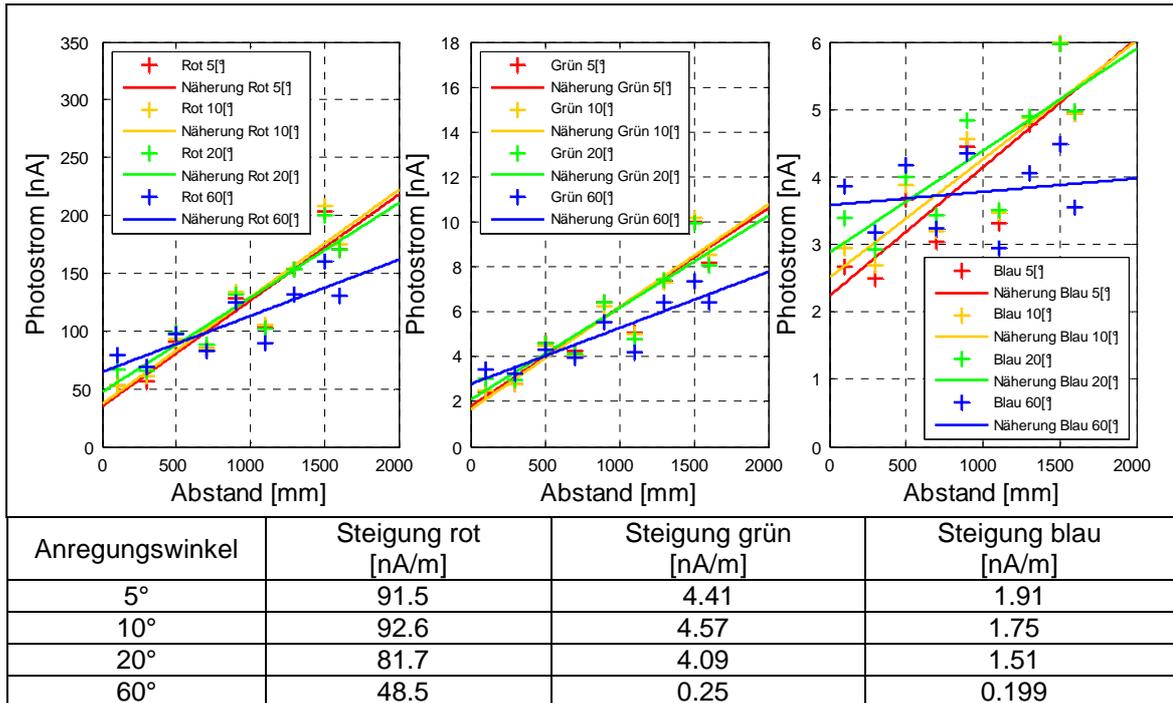
### 11.1 Ergebnisse Seitenlicht



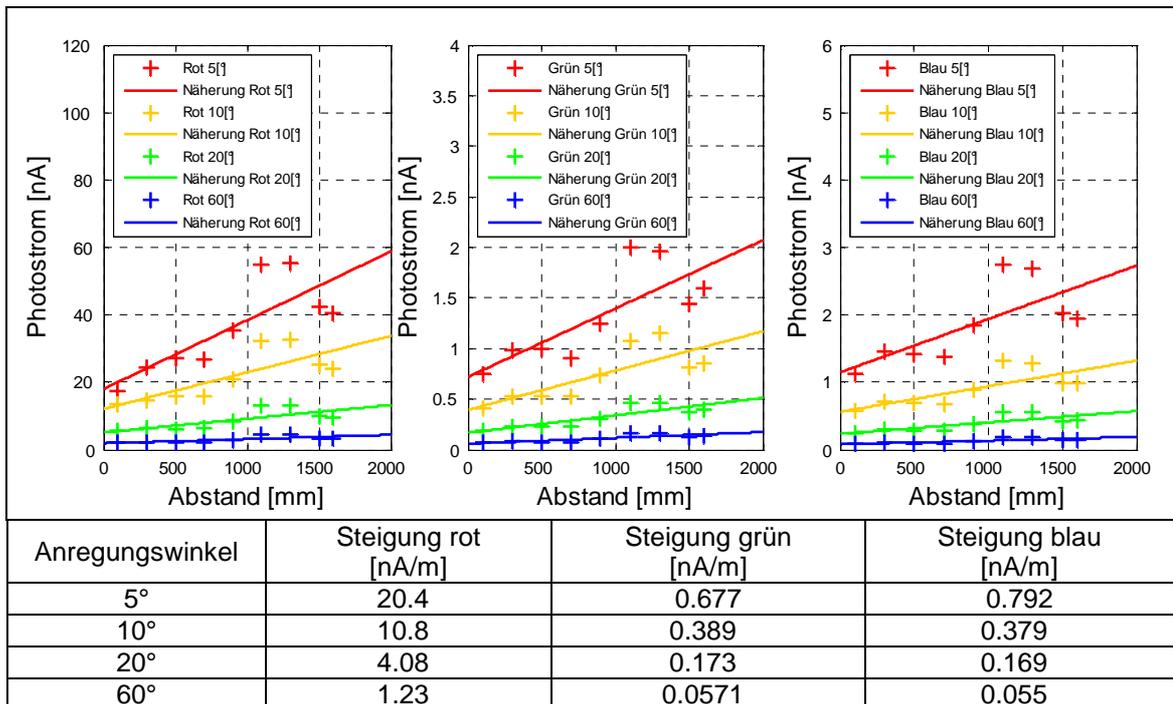
**Tabelle 11.1** :Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser **A**



**Tabelle 11.2** :Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser **B**



**Tabelle 11.3** :Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser C



**Tabelle 11.4** :Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser D

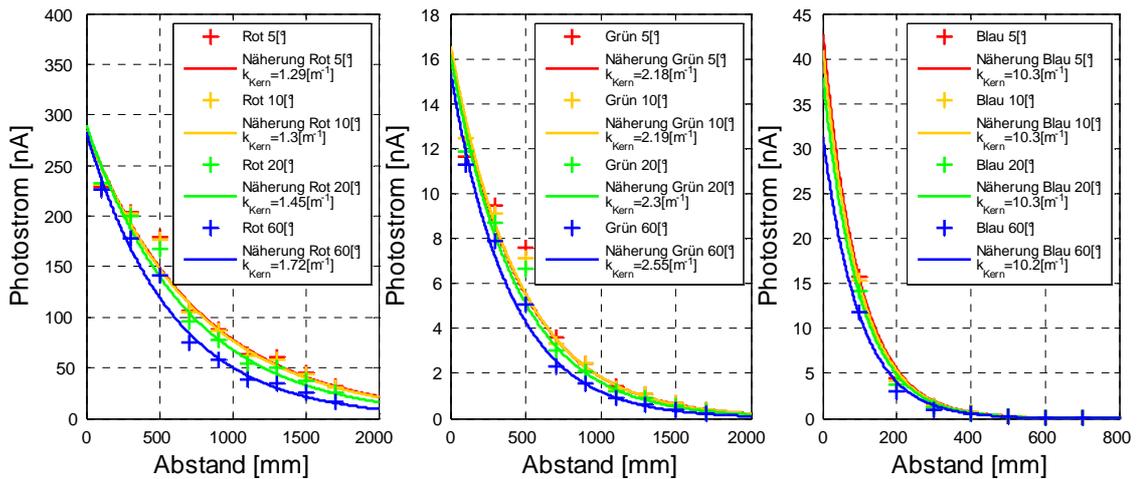


Abb. 11.1 : Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser E

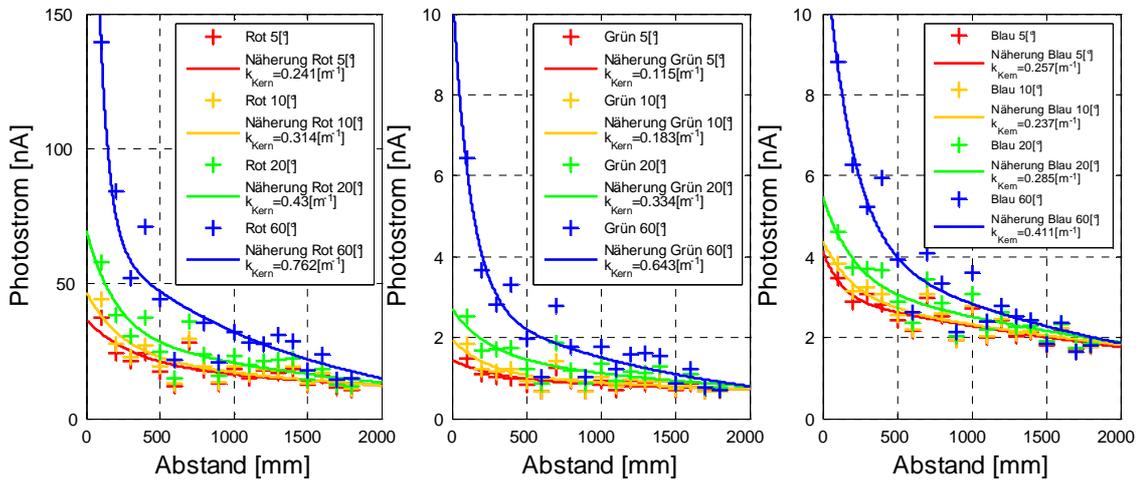


Abb. 11.2 : Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser F

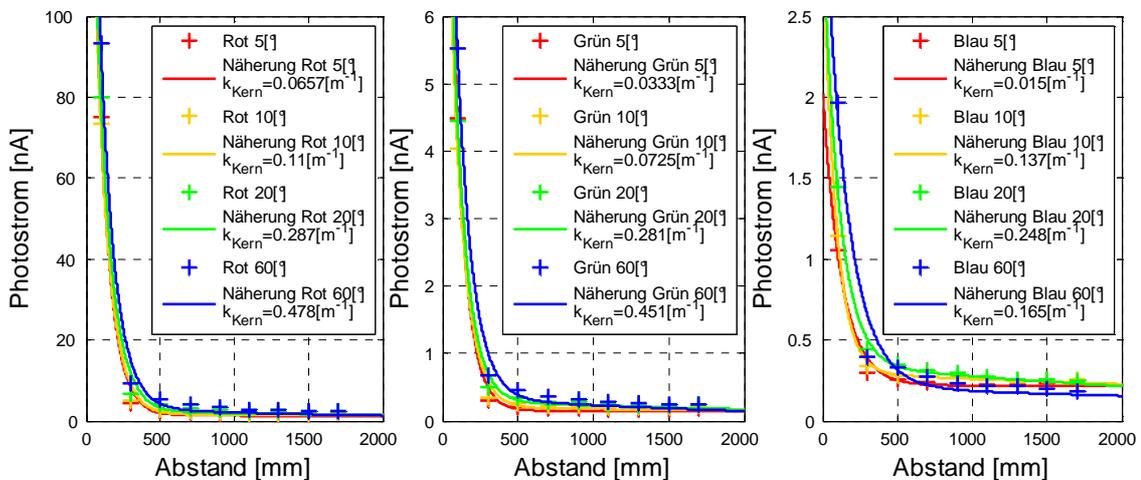


Abb. 11.3 : Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser G

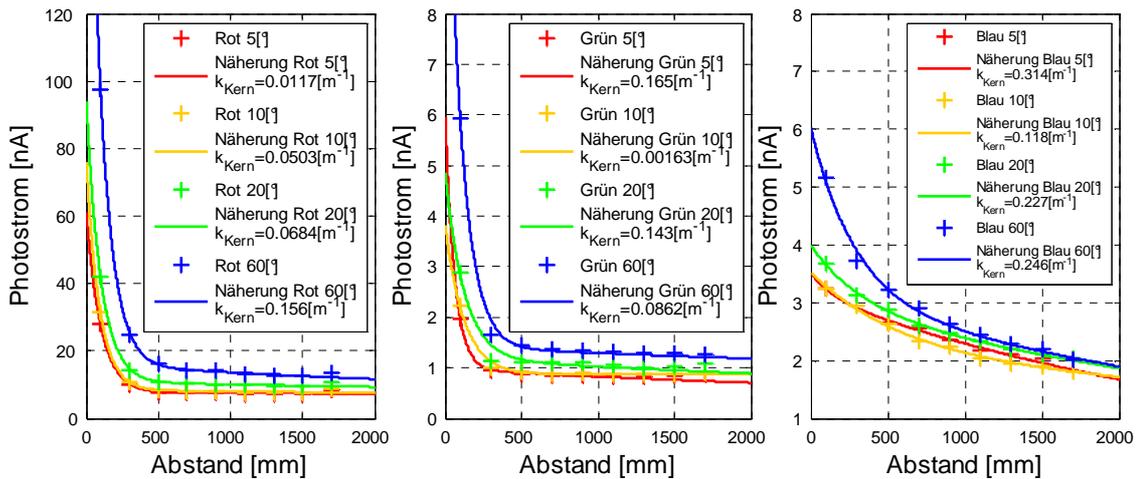


Abb. 11.4 : Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser H

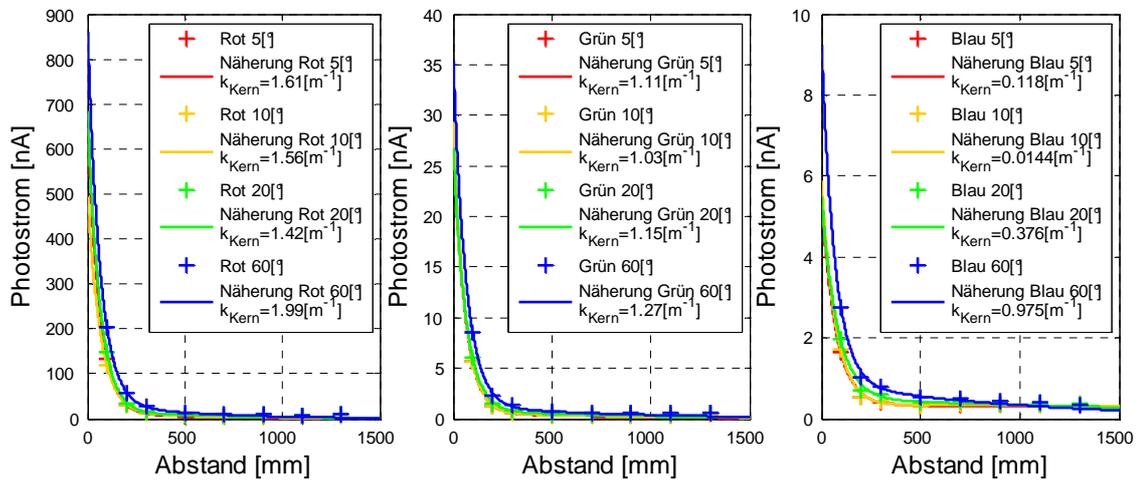


Abb. 11.5 : Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser I

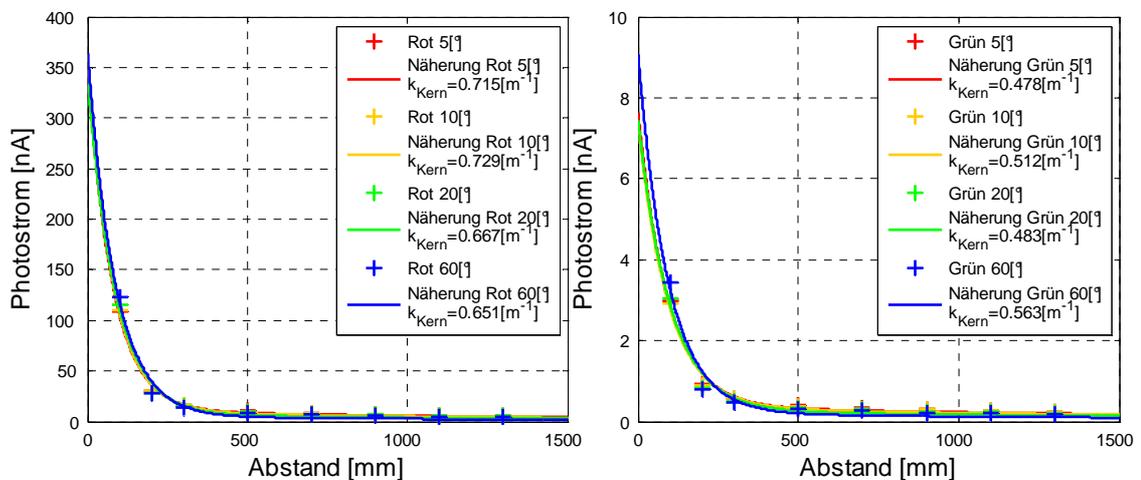


Abb. 11.6 : Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des Seitenlichts für Faser J

## 11.2 Ergebnisse geführtes Licht

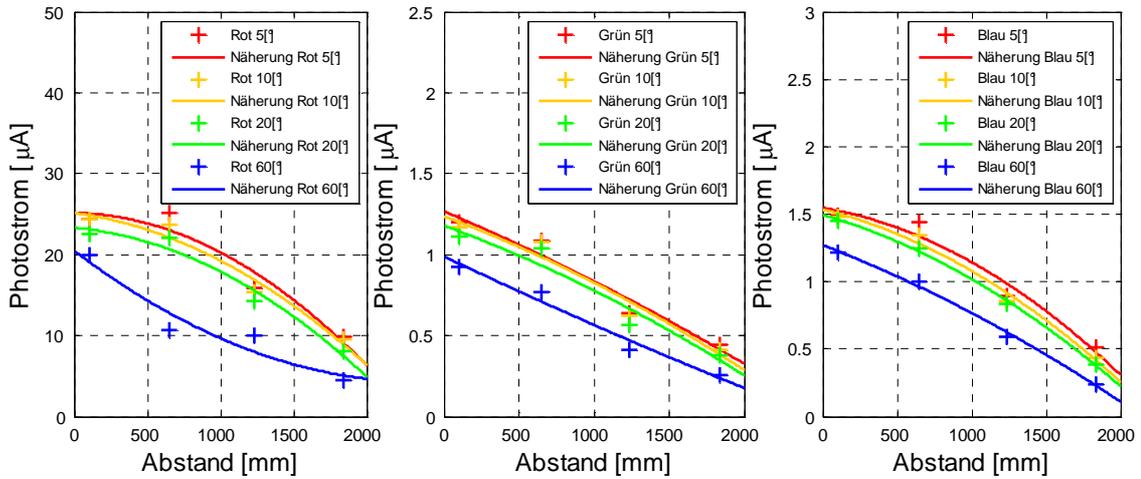


Abb. 11.7 : Ergebnisse mit Näherungsfunktion des Photostroms des geführten Lichts für Faser A

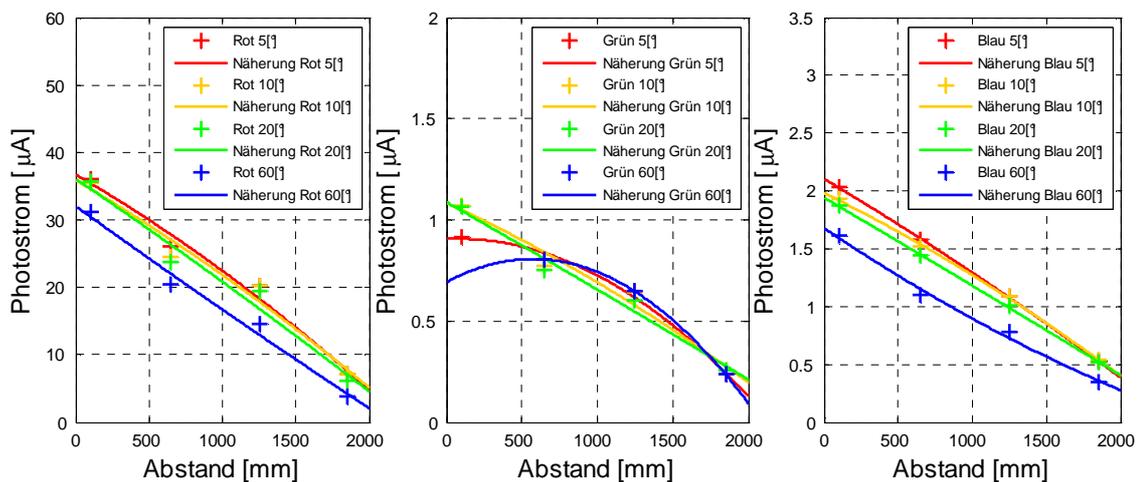


Abb. 11.8 : Ergebnisse mit Näherungsfunktion des Photostroms des geführten Lichts für Faser B

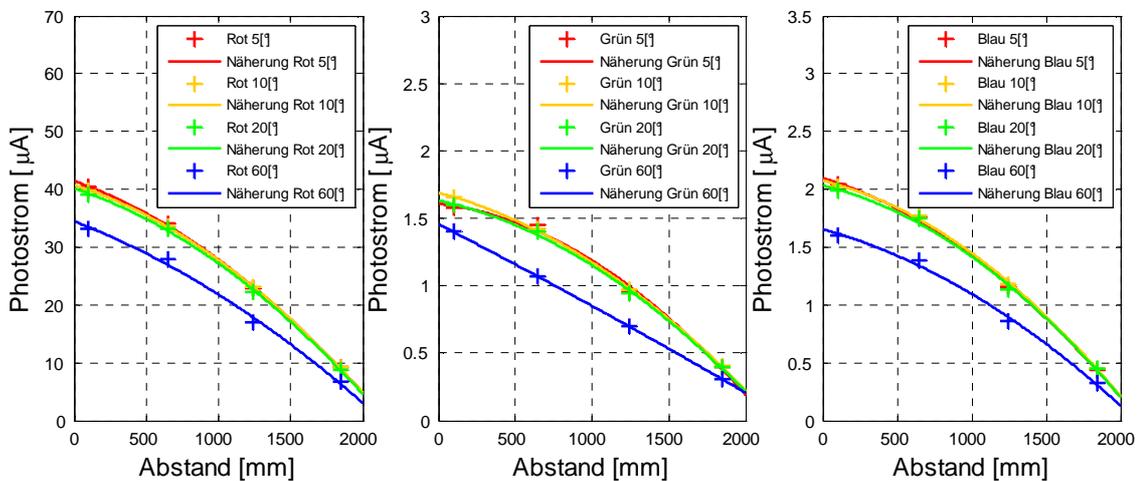


Abb. 11.9 : Ergebnisse mit Näherungsfunktion des Photostroms des geführten Lichts für Faser C

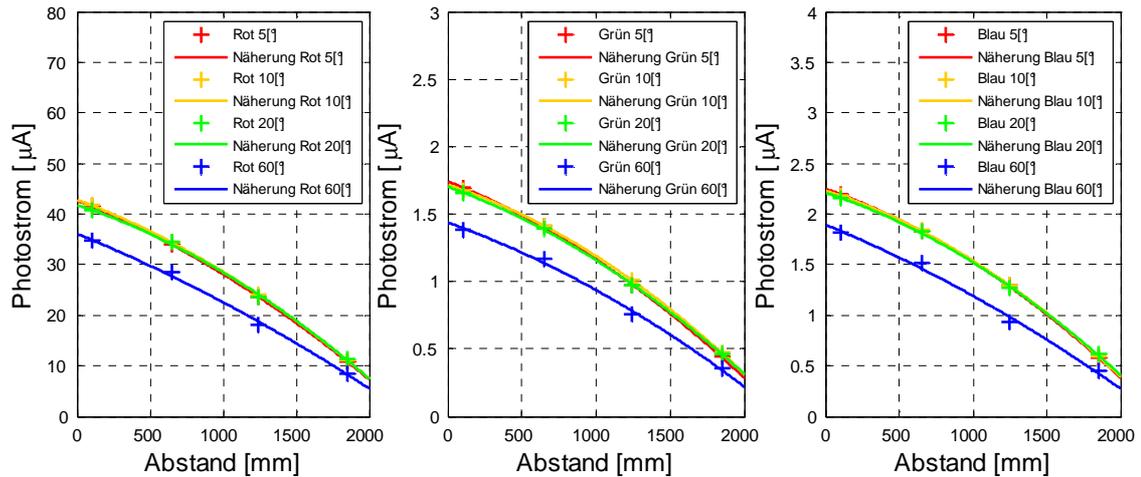


Abb. 11.10 : Ergebnisse mit Näherungsfunktion des Photostroms des geführten Lichts für Faser D

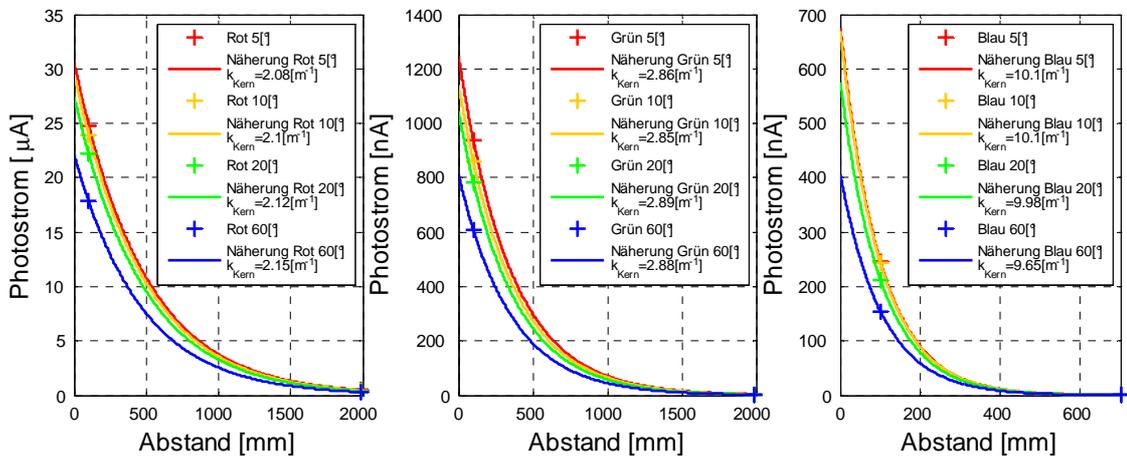


Abb. 11.11 : Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des geführten Licht für Faser E

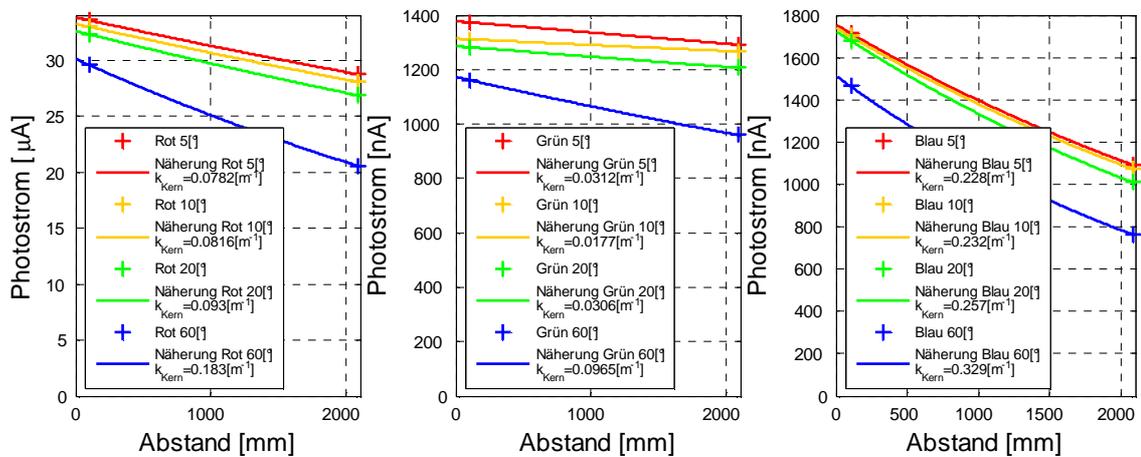


Abb. 11.12 : Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des geführten Licht für Faser F

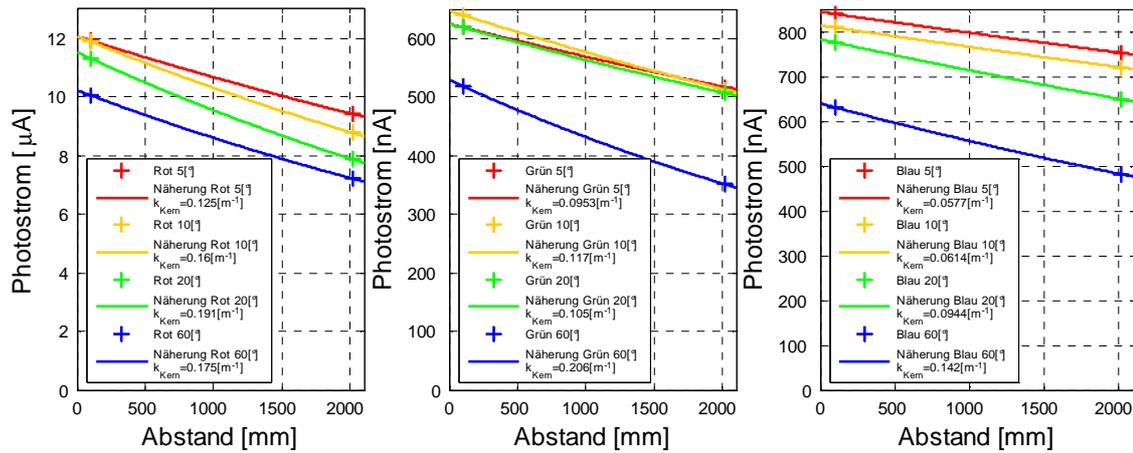


Abb. 11.13 : Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des geführten Licht für Faser G

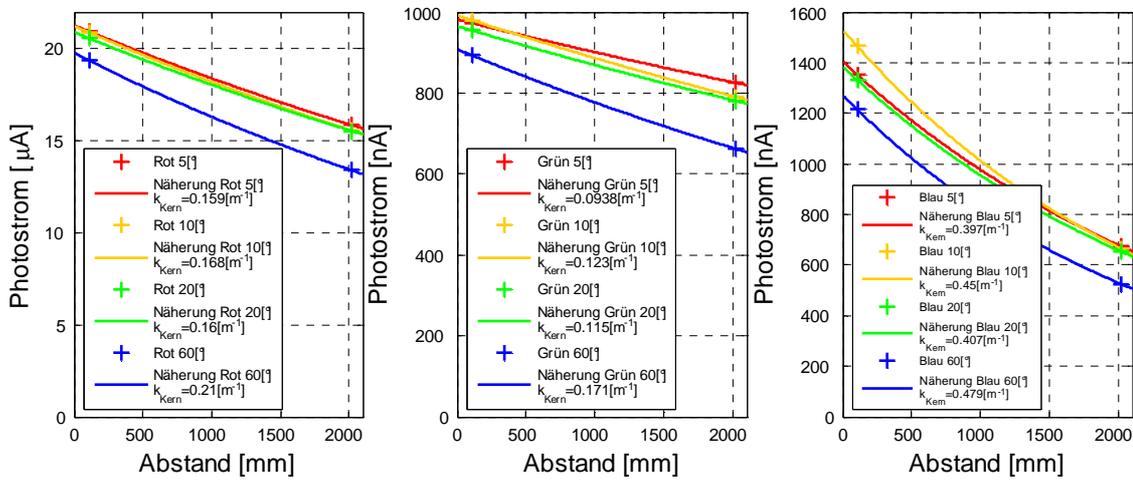


Abb. 11.14 : Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des geführten Licht für Faser H

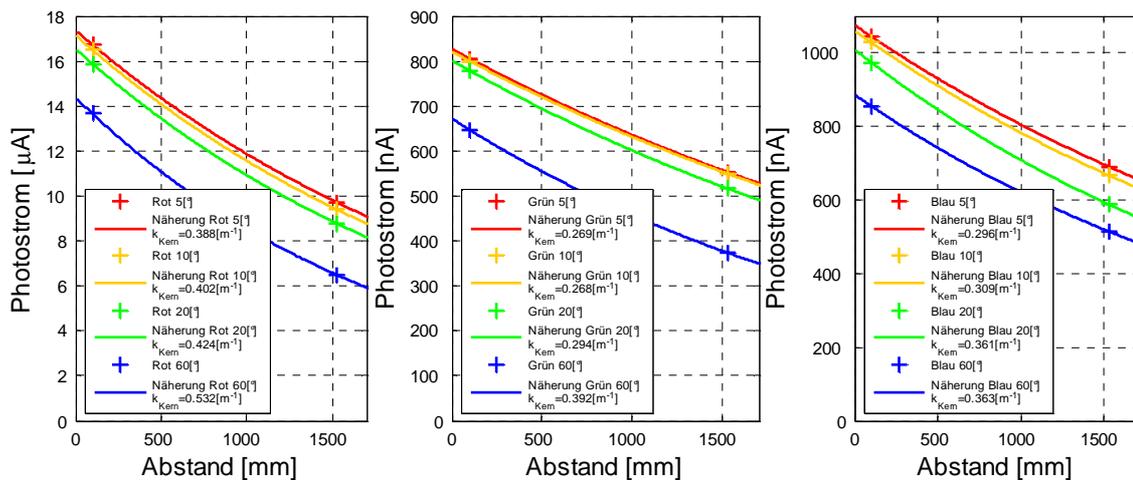
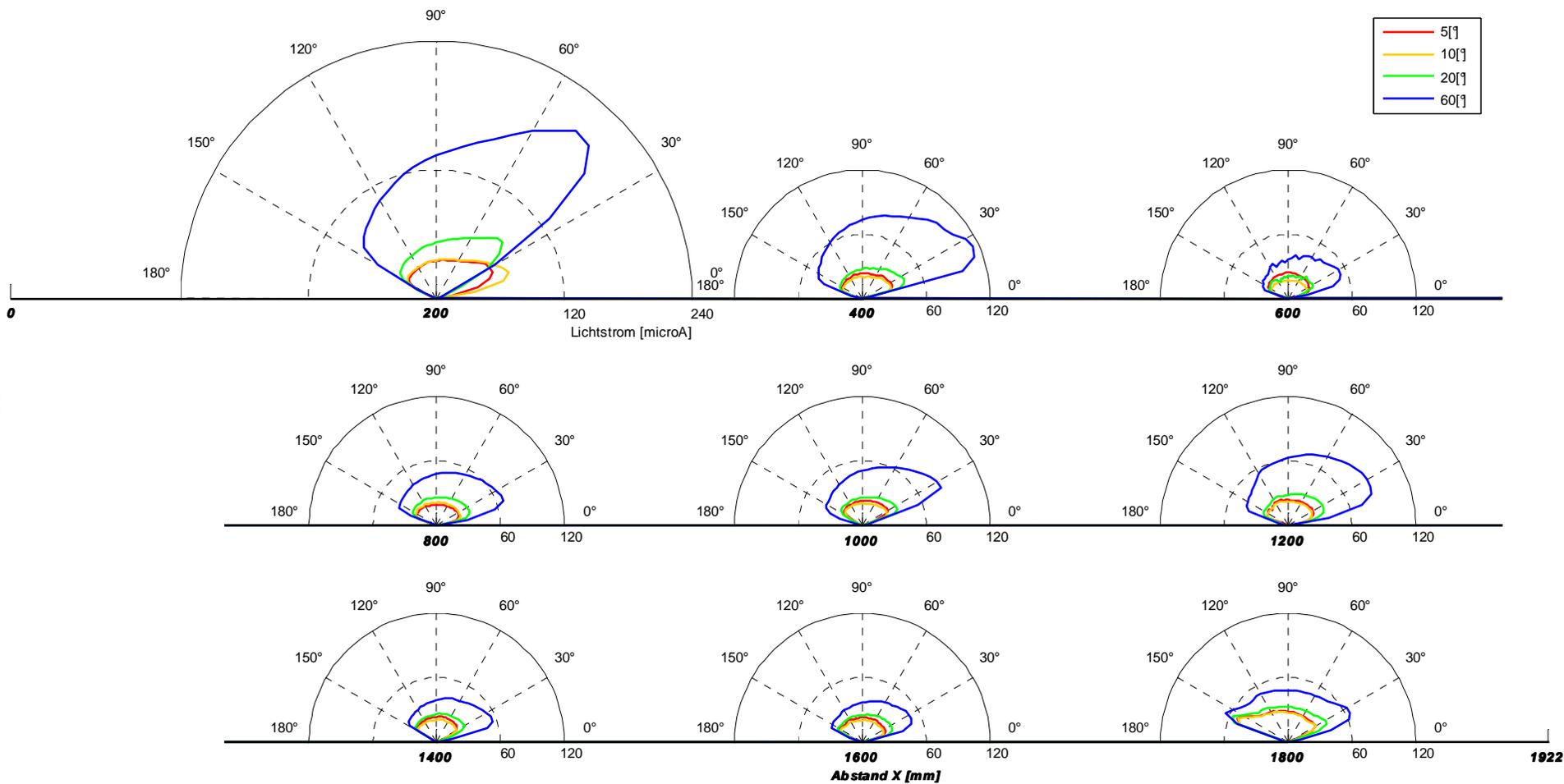


Abb. 11.15 : Ergebnisse mit Näherungsfunktion und Lichtverlustkoeffizient des Photostroms des geführten Licht für Faser I

### Seitenabstrahlungscharakteristiken der Faser H



90