

Technische Universität München

Lehrstuhl für Hydrogeologie, Hydrochemie und Umweltanalytik

**Entwicklung, Bau und Anwendung der Lichtwellenleiter-Multiplexer  
für faseroptisch geführte analytische Sensorsysteme**

Larissa Beier

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Weuster-Botz

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat., Dr. rer. nat. habil. R. Nießner
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Heinzl
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Peukert

Die Dissertation wurde am 21. Mai 2001 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen  
am 26. September 2001 angenommen

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Angestellte am Lehrstuhl für Hydrogeologie, Hydrochemie und Umweltanalytik der Technischen Universität München unter der Leitung von Herrn o. Univ.-Prof. Dr. Reinhard Nießner in der Zeit von September 1996 bis September 2000.

Für die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit, das interessante Promotionsthema und nicht zuletzt für die eingeräumten finanziellen Mittel zur Durchführung dieser Promotion sowie die guten Arbeitsbedingungen danke ich Herrn Prof. Dr. Reinhard Nießner ganz herzlich.

Herrn o. Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Heinzl und Herrn o. Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Peukert danke ich für die freundliche Übernahme der Prüfung meiner Dissertation.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. A. Gahr für seine Anleitung und Unterstützung meiner Arbeit.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dr. G. Spanner und Frau Dr. A. Beenen für die interessanten Fragestellungen und Anregungen zum Promotionsthema zu Beginn meiner Arbeit bedanken.

Den Feinwerkmechanikern der Institutswerkstatt Herrn G. Dollinger und Herrn R. Schneider danke ich herzlich für die präzise Anfertigung der Bauteile und der Konstruktionselemente zu den beiden entwickelten LWL-Multiplexern und der Durchflußzelle.

Meinem Kollegen Herrn Dipl.-Chem. Thomas Schmid danke ich für die gute und erfolgreiche Zusammenarbeit bei Durchführung der Messungen im photoakustischen Sensorsystem.

Danken möchte ich auch Herrn Dr. M. Weller für seine umfassende und freundliche Beratung bei allen entstandenen Fragen und bei der Lösung besonderer Computerprobleme. Bei Herrn Dr. U. Panne bedanke ich mich für sein aufmerksames Korrekturlesen des Manuskriptes meines Artikels und für die Bereitstellung der technischen Einrichtungen und Geräte des Laserlabors zur Vorbereitung und Durchführung der Experimente.

Für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre, die vielseitige Unterstützung sowie Hilfs- und Diskussionsbereitschaft danke ich herzlich allen Mitarbeitern am Institut: Herrn akad. Oberrat Dr. Knopp, dem Sekretariat Frau Lang und Frau Glunz, den Kolleginnen und Kollegen A. Zeck, H. Prestl, B. Fall, A. Exner, T. Franze, C. Wersching, M. Diemer und allen anderen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

München, im Mai 2001

Larissa Beier (geb. Kazarian)

Teile der Arbeiten zur vorliegenden Dissertation wurden bereits veröffentlicht oder sind im Druck:

1. L. Kasarian, R. Nießner: *A New Optical Fiber Multiplexer for Distortion-free Light Transfer in Multichannel Fiber Optic Sensor Systems*, Sensors and Actuators 84, 2000, 250-258.
2. T. Schmid, L. Kazarian, U. Panne, R. Nießner: „*Depth-resolved Analysis of Biofilms by Photoacoustic Spectroscopy*“, Analytical Sciences, 2000, im Druck.
3. L. Kazarian, R. Nießner: „*Verfahren zum optischen Schalten und Drehschalter*“, Patentschrift DE 197 20 619 A1, Deutsches Patentamt, Tag der Anmeldung 16.05.1997, Erteilung am 01.03.2001.
4. L. Kazarian, R. Nießner: „*Drehschalter für Lichtwellenleiter*“, Gebrauchsmuster DE 299 18 972 U1, Deutsches Patentamt, Tag der Anmeldung 18.10.1999, Eintragung am 23.03.2000.
5. L. Kazarian, R. Nießner: „*Verfahren zum Schalten von übertragenen Lichtsignalen und Drehschalter*“, Offenlegungsschrift DE 199 51 992 A1, Deutsches Patentamt, Anmeldetag 28.10.1999, Offenlegungstag 3.5.2001.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>KONZEPT FÜR AUFBAU DER LICHTWELLENLEITER-MULTIPLEXER FÜR FASEROPTISCHE SENSORSYSTEME</b> .....	<b>4</b>
	2.1 Problem- und Aufgabenstellung .....	4
	2.2 Funktionsprinzip .....	5
<b>3</b>	<b>ENTWICKLUNG EINES EINKANAL-LWL-MULTIPLEXERS FÜR EIN MEßSYSTEM MIT FASEROPTISCH GEFÜHRTEN PHOTOAKUSTISCHEN SONSOREN</b> .....	<b>11</b>
	3.1 Anforderungen an einen LWL-Multiplexer in einem Meßsystem für tiefenauflöste photoakustische Spektroskopie .....	11
	3.2 Aufbau und Funktionsweise des Einkanal-LWL-Multiplexers .....	13
	3.3 Dimensionierung, Auslegung von Kontruktionselementen und Baugruppen....	15
	3.4 Ansteuerung .....	19
	3.5 Steuerungssoftware .....	21
<b>4</b>	<b>ENTWICKLUNG EINES ZWEIKANAL-LICHTWELLENLEITER-MULTIPLEXERS FÜR DIE ZEITAUFGELÖSTE LASERINDUZIERTE FLUORESZENZSPEKTROSKOPIE</b>	<b>23</b>
	4.1 Anforderungen an einen LWL-Multiplexer in einem Meßsystem zur zeitaufgelösten Fluoreszenzspektroskopie .....	23
	4.2 Aufbau und Funktionsweise des Zweikanal-LWL-Multiplexers .....	25
	4.3 Dimensionierung, Auslegung der Konstruktionselemente und Baugruppen....	28
	4.4 Ansteuerung.....	30
<b>5</b>	<b>CHARAKTERISTISIERUNG STATISCHER UND DYNAMISCHER EIGENSCHAFTEN DER ENTWICKELTEN EIN- UND ZWEIKANAL-LWL-MULTIPLEXER</b> .....	<b>33</b>
	5.1 STATISCHE ÜBERTRAGUNGSEIGENSCHAFTEN .....	33
	5.2 DYNAMISCHE ÜBERTRAGUNGSEIGENSCHAFTEN .....	37
	5.3 EINFLUß DER POSITIONIERUNGSGENAUIGKEIT IN DEN LWL-MULTIPLEXERN AUF DIE ÜBERTRAGUNGSEIGENSCHAFTEN.....	42
	5.3.1 Einfluß des Winkelversatzes auf die Signalübertragung .....	42
	5.3.2 Einfluß des Abstandes zwischen den Faserenden auf die Intensitätsverteilung und die Übertragungseffizienz .....	45
<b>6</b>	<b>MATHEMATISCHES MODELL DER ENTWICKLTEN LWL-MULTIPLEXER</b> .....	<b>48</b>
	6.1 Theoretische Funktionsbeschreibung .....	48

6.2	Mathematisches Modell des Funktionsgesetzes .....	50
6.3	Automatische Fehlerkorrektur aufgrund des mathematischen Modells .....	54
<b>7</b>	<b>BERECHNUNG DER ÜBERTRAGUNGSEFFIZIENZ DER ENTWICKELTEN LWL-MULTIPLEXER .....</b>	<b>57</b>
7.1	Übertragungs- und Verlustmechanismen an optischen Verbindungsstellen.....	57
7.2	Berechnung der Übertragungseffizienz .....	58
<b>8</b>	<b>EINSATZ UND FUNKTION DES EINKANAL-LWL-MULTIPLEXERS IM MEßSYSTEM FÜR DIE TIEFENAUFGELÖSTE PHOTOAKUSTISCHE SPEKTROSKOPIE.....</b>	<b>60</b>
8.1	AUFBAU DES MULTIPLEXER-SYSTEMS MIT FASEROPTISCH GEFÜHRTEN PHOTOAKUSTISCHEN SENSOREN.....	60
8.2	CHARAKTERISIERUNG DES BETRIEBSVERHALTENS DES EINKANAL-LWL- MULTIPLEXERS IM PHOTOAKUSTISCHEN MEßSYSTEM .....	62
8.2.1	Einfluß der Lichtübertragung durch den LWL-Multiplexer auf die Struktur des PA-Signals .....	62
8.2.2	Einfluß des Winkelvesatzes im LWL-Multiplexer auf das photoakustische Meßsignal .....	69
8.2.3	Automatische Meßfehlerkorrektur im Multiplexer-System mit photoakustischen Sensoren .....	70
<b>9</b>	<b>AUFBAU EINES AUTOMATISIERTEN MULTIPLEXER-SYSTEMS MIT FASEROPTISCH GEFÜHRTEN SENSOREN FÜR ON-LINE ÜBERWACHUNG UND STEUERUNG DER UV/OZON-ANLAGE .....</b>	<b>73</b>
9.1	Strukturkonzept für das Multiplexer-System mit faseroptischen Sensoren.....	74
9.1.1	Systemkonfiguration für automatische Transmissionsmessungen .....	75
9.1.2	Systemkonfiguration für zeitaufgelöste Fluoreszenzmessungen .....	76
9.1.3	Systemkonfiguration für Fluoreszenz- und turbidimetrische Messungen.....	78
9.2	Entwicklung der Durchflußzelle für kombinierte on-line Transmissions- und Fluoreszenz-Analyse .....	79
9.3	Signaldetektion und Meßdatenaufbereitung .....	84
9.4	Ansteuerung des Multiplexer-Systems und Meßdatenerfassung .....	86
9.5	Chrakterisierung des aufgebauten Multiplexer-Systems bei automatischen Transmissions- und Fluoreszenzmessungen .....	88

9.5.1 Automatische Meßfehlerkorrektur beim on-line-Meßbetrieb .....	93
9.5.2 Automatische Meßfehlerkorrektur mittels Festwertregelung der Anregungsenergie durch den LWL-Multiplexer .....	95
<b>10 OPTIMIERUNG DER KONTRUKTION UND DER ANSTEUERUNG DER LWL-MULTIPLEXER .....</b>	<b>97</b>
10.1 Fehleranalyse in den entwickelten LWL-Multiplexern .....	97
10.2 Einfluß von Fertigungstoleranzen auf Übertragungseffizienz und Übertragungsfunktion .....	98
10.3 Optimierung der Konstruktion der LWL-Multiplexer.....	100
<b>11 AUTOMATISCHE JUSTIERUNG DER EIN- UND ZWEIKANAL LWL-MULTIPLEXER IN VERSCHIEDENEN FASEROPTISCHEN SENSORSYSTEMEN .....</b>	<b>102</b>
11.1 Konzept für den Systemaufbau.....	102
11.2 Funktionsprinzip .....	104
11.3 Automatische Justierung des Einkanal-LWL-Multiplexers im Meßsystem mit faseroptisch geführten photoakustischen Sensoren .....	105
11.4 Automatische Justierung der LWL-Multiplexer in Meßsystemen mit faseroptisch geführten Transmissions-Sensoren bei einer CW- und einer gepulsten Anregung .....	107
11.5 Automatische Justierung des Zweikanal-LWL-Multiplexers im Meßsystem für die zeitaufgelöste Fluoreszenzspektroskopie .....	109
11.6 Meßergebnisse und Schlußfolgerungen.....	112
<b>12 ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>113</b>
<b>13 LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>116</b>
 <b>ANHANG:</b>	
Konstruktive Zeichnungen zu Ein- und Zweikanal-LWL-Multiplexer.....	123
Konstruktive Zeichnungen zur Durchflußzelle.....	126
Konstruktive Zeichnungen zum Detektionsmodul.....	127

# 1 Einleitung

Faseroptisch geführte Sensoren und Meßsysteme ermöglichen on-line und In-Situ-Messungen verschiedener Größen wie z. B. Temperatur, Druck, Strömung, Polarisation der Strahlung oder Stoffkonzentrationen [1-13], insbesondere für vielfältige Automatisierungssysteme [14-16].

Durch die Verwendung mehrerer faseroptisch geführter Sensoren in einem Meßsystem werden größere Informationsgehalte für die Meß- und Regelungstechnik gewonnen. Faseroptisch geführte Sensoren können in Meßsystemen nach vier grundsätzlichen Basisstrukturen konfiguriert werden: serielle, Stern-, Leiter- und Baumtopologien [17,18]. Adressierung und der Betrieb einzelner Sensoren in einem Meßsystem können aufgrund unterschiedlicher Multiplex-Verfahren erfolgen, denen die jeweiligen Systemtopologien angepaßt werden. Die in der optischen Meßtechnik zumeist verwendeten Multiplex-Verfahren sind: Zeitmultiplex (*Time-division-multiplexing-TDM*), Frequenzmultiplex (*Frequency-division multiplexing: FDM*), Wellenlängenmultiplex (*Wavelength-division multiplexing: WDM*), Codemultiplex (*Code-Division Multiplexing: CDM*), Kohärenz- (*Coherence Multiplexing*) und Polarisationsmultiplex (*Polarization division multiplexing*) [17-20]. Diese Verfahren basieren auf Modulation und Differenzierung verschiedener Parameter des zu den Sensoren geleiteten Lichtes bei entsprechender Detektion der Sensorsignale. In solchen Multiplexer-Systemen wird entweder die Leistung der Lichtquelle zwischen mehreren Sensoren durch entsprechende optische Elemente -sog. Verzweiger- verteilt, oder das Sensorsystem enthält mehrere separat modellierte Lichtquellen und entsprechende Empfänger.

Einleitend zur vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Aufbaukonzepte eines LWL-Multiplexer-Systems betrachtet und analysiert hinsichtlich seiner Übertragungseigenschaften, Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit. Die Auswahl der geeigneten Multiplextechnik und der jeweiligen optimalen Systemkonfiguration wird vor allem durch die Art und Funktionsweise von Sensoren und konkreten meßtechnischen Anforderungen, ausgehend von den Systemvoraussetzungen, bestimmt. Zu den wichtigen meßtechnischen Anforderungen gehören eine ausreichende Sensorempfindlichkeit, geeignete Frequenz-Bandbreite und Signal-Rausch-Verhältnis. Auch ist eine verzerrungsfreie Lichtübertragung für Meßsysteme mit bestimmten faseroptischen Sensoren notwendig. Somit muß beim Systementwurf zunächst die Leistungsbilanz für das gesamte Multiplexer-System, bestehend aus sämtlichen optischen Systemverlusten wie der Kopplungsverluste am Laser und am Empfänger, der Dämpfung der optischen Übertragungselemente und der Übertragungsstrecken einerseits und der Leistung der zu den Messungen benötigten Lichtquelle andererseits unter Berücksichtigung einer Systemreserve berechnet werden [21]. Auch die Ausbaumöglichkeit des Sensorsystems soll bei der Auswahl des Multiplex-Verfahrens berücksichtigt werden.

Die Anwendung der obengenannten Multiplex-Verfahren und der entsprechenden Topologien ist durch die Dämpfung der verwendeten optischen Elemente und die Dispersion in den Lichtwellenleitern beschränkt, da ihre Realisierung den Einsatz mehrerer verlustbehafteter optischer Leistungsteiler zur Aufteilung und zum Zusammenfügen des Lichts sowie weiterer Systemelemente voraussetzt, die erhebliche, sich in jedem Meßkanal summierende Lichtverluste und Übertragungsfehler verursachen. So beträgt z.B. für die Sterntopologie mit  $N$  Sensoren die zu jedem einzelnen Sensor übertragene Lichtleistung  $1/N$  der Ausgangsleistung der Lichtquelle  $P_0$ . Bei der Leitertopologie ergibt sich bei entsprechender Anpassung der Koppelverhältnisse einzelner Richtkoppler ebenso die über jedes Sensorelement transmittierte Leistung  $P_j = P_0/N^2$  [17]. Optische Übertragungsverluste verringern folglich die Empfindlichkeit des Meßsystems, die jedoch bei Messungen insbesondere analytischer Größen möglichst hoch sein muß. Deshalb stellt die Anzahl der Sensoren in solchen Multiplexer-Systemen eine Einschränkung dar.

Die zu o.g. Multiplex-Verfahren benötigte Systemtechnik ist meistens anspruchsvoll und der erforderliche Betriebsaufwand erheblich. So wird z.B. beim Wellenlängenmultiplex jedem Übertragungskanal eine eigene Trägerwellenlänge zugeordnet, weshalb das Multiplexer-System mit mehreren separat modulierten Lichtquellen und mehreren Detektoren sowie mit einem optischen Wellenlängen-Multiplexer und -Demultiplexer ausgerüstet werden muß. Beim Zeitmultiplex sind neben den Leistungsteilern und den Verzögerungsstrecken auch externe Modulatoren zusammen mit Treiberschaltungen notwendig.

Eine weitere Überlegung bei der Auswahl des Systemkonzepts bestand im Aufbau eines  $1 \times N$  - LWL-Multiplexers ohne bewegliche mechanische Teile durch Verwendung von elektrooptischen oder optoakustischen Deflektoren zur Ablenkung des Laserstrahls, die durch an ihre Elektroden angelegte Spannung bzw. Frequenzänderungen der akustischen Querwelle durch einen Frequenzgenerator angesteuert werden können [22].

Allerdings wiesen die für diesen Aufbau notwendigen, auf dem Markt erhältlichen Deflektoren nur einen kleinen Ablenkungswinkel (typisch  $2^\circ$  bis  $3^\circ$ ) auf. Deswegen konnte die erforderliche Auflösung nur bei ziemlich großen Abmessungen des Gerätes erreicht werden. Andere Nachteile sind polarisiertes Licht und große optische Verluste.

Aufgrund obengenannter Ausführungen war für die robuste Lichtleistungs- sowie Signalübertragung in ausgewählten Sensorsystemen der Umweltmeßtechnik (Fluoreszenz- und photoakustische sowie Absorptionsspektroskopie) bei erforderlicher hoher Meßempfindlichkeit ein mechanisches Multiplexverfahren konzeptionell vorgesehen.

Mittels eines LWL-Multiplexers kann das Licht eines Lasers durch Schalten nacheinander mehreren Sensoren zugeführt und das optische Signal von mehreren Sensoren in eine Detektionseinheit eingekoppelt und weiterbearbeitet werden. Ein LWL-Multiplexer erweitert damit die Funktions- und Leistungsfähigkeit eines Meßsystems durch die Möglichkeit, mehrere Sensoren mit einer Sende- und einer Detektionseinheit zu betreiben und bietet hierdurch wesentliche meßtechnische Vorteile.

Ein weiterer Vorteil des Einsatzes eines mechanischen Multiplexers im Vergleich zu den oben erwähnten Multiplex-Verfahren ist eine wesentlich größere Übertragungseffizienz, da das Licht nicht verteilt, sondern umgeschaltet wird. Jeder Meßkanal enthält dabei den gleichen Übertragungskanal des Multiplexers als Dämpfungselement, dessen Einfluß auf die Signalübertragung und die Übertragungseffizienz für alle Meßkanäle annähernd gleich ist. Außerdem wird die Frequenz- sowie spektrale Bandbreite der Signalübertragung mechanischer LWL-Multiplexer im wesentlichen nur von der Bandbreite der verwendeten Übertragungsfaser begrenzt.

Meßsysteme mit mechanischen LWL-Multiplexern mit verschiedenen faseroptisch geführten Sensoren sind z.B. in [23, 24] beschrieben. In [23] ist ein Meßsystem mit Single-Fiber-Fluoreszenzsensoren für Konzentrationsmessungen verschiedener Komponenten im Grundwasser vorgestellt. Die Glasfasern, über die gleichzeitig Laserlicht zur Probe und Fluoreszenzlicht zum Detektor geleitet wird, werden dabei von einem PC-gesteuerten Positionierer durch entsprechende Verschiebung umgeschaltet. In [24] ist ein faseroptisches Multiplexer-System für Temperaturmessungen an mehreren Meßstellen beschrieben. Das System enthält einen mechanischen Lichtwellenleiter-Multiplexer, an den mehrere faseroptisch geführte Temperatursensoren angeschlossen sind, die nacheinander abgefragt werden.

Vielfältige mechanische LWL-Multiplexer sind in [25-38] beschrieben. Ein Nachteil der meisten oben beschriebenen LWL-Multiplexer, mit denen ein optischer Eingang beliebig mit einem der mehreren optischen Ausgängen verbunden werden kann ist, daß aufgrund ihrer Konstruktion auf einen schaltbaren Übertragungslichtwellenleiter bei den Schaltvorgängen dynamische Biege- oder Torsionsmomente [35-38] wirken. Die dadurch entstehende dynamische Deformation des Lichtwellenleiters verursacht zusätzliche optische Verluste sowie räumliche und zeitliche Strukturänderungen der übertragenen Lichtpulse. Für fehlerfreie Messungen mit bestimmten optischen Sensoren ist aber eine unveränderte Struktur des übertragenen Leserpulses erforderlich.

**Ziel der vorliegenden Entwicklung war, die oben beschriebenen Nachteile zu vermeiden und eine effiziente und rauscharme Lichtleistungs- und Signalübertragung in faseroptisch geführten Sensorsystemen zu gewährleisten.**

## 2 Konzept für den Aufbau der Lichtwellenleiter-Multiplexer für faseroptische Sensorsysteme

### 2.1 Problem- und Aufgabenstellung

Das Funktionsprinzip der meisten industriell hergestellten LWL-Multiplexer basiert auf Lichtübertragung von einem optischen Eingang zu einem der mehreren optischen Ausgänge durch einen schaltbaren Lichtwellenleiter [35-38]. Das Einkoppelende des schaltbaren Lichtwellenleiters ist unbeweglich befestigt, während sein Auskoppelende mittels einer Dreh- [35,36] oder Translationsbewegung [37,38] dem ausgewählten optischen Ausgang gegenübergestellt wird. Da ein Koppelende des schaltbaren Lichtwellenleiters unbeweglich an einer Stelle fixiert ist, während sein anderes Koppelende entweder gedreht oder verschoben wird, wird die Lage von je zwei Punkten des schaltbaren Lichtwellenleiters zueinander bei jedem Schaltvorgang ständig verändert. Auf den Lichtwellenleiter wirken damit dynamische Biege- oder Torsionsmomente ein. Da Lichtwellenleiter nur eine begrenzte Flexibilität aufweisen, führt das zu zunehmender Materialermüdung und kann eine Beschädigung des schaltbaren Lichtwellenleiters zur Folge haben. Eine dynamische Deformation des Lichtwellenleiters kann außerdem zusätzliche optische Verluste verursachen und die Struktur eines Laserpulses ändern [1,19,39-41]. Die durch die Krümmung der optischen Achse der schaltbaren Lichtwellenleiter bei den Schaltvorgängen entstehenden optischen Einfügungsverluste können gemäß [39] berechnet werden:

$$\frac{\Delta P}{P_E} = \frac{2rn_M^2}{R_b(n_K^2 - n_M^2)}, \quad (2.1)$$

wobei  $P_E$  und  $\Delta P$  die eingekoppelte Leistung bzw. der Leistungsverlust,  $r$  der Kernradius der Glasfaser,  $R_b$  der Biegeradius und  $n_K$  und  $n_M$  die Brechungszahlen des Faserkerns bzw. des Fasermantels sind.

Der durch die Krümmung erzeugte Absorptionskoeffizient  $\alpha_K$  ergibt sich dabei laut [40] mit den Materialkonstanten  $c_1$  und  $c_2$  aus der Gleichung

$$\alpha_K = \frac{c_1}{\sqrt{rR_b}} \exp\left(-\frac{R_b}{c_2}\right). \quad (2.2)$$

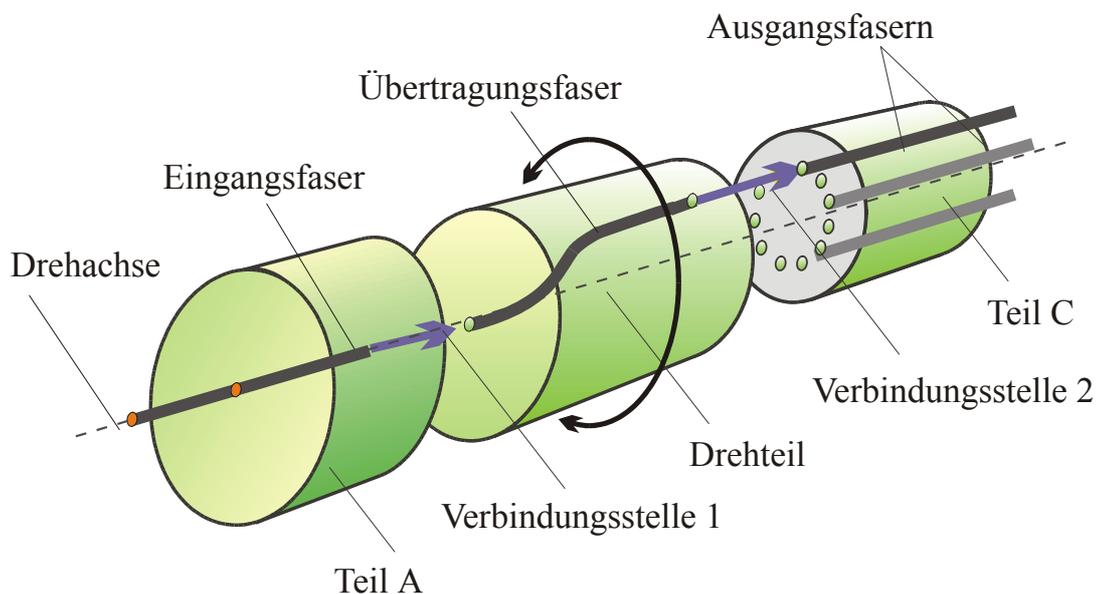
Da bei der oben beschriebenen Funktionsweise der Biegeradius  $R_b$  bei den Schaltvorgängen laufend verändert wird, ändern sich auch gemäß (2.1) und (2.2) die entsprechenden Einfüge- und

Dämpfungsverluste von einem Schaltvorgang zu einem anderen unterschiedlich. Das senkt unter anderem die Reproduzierbarkeit der Lichtleistungs- und Signalübertragung.

Eine dynamische Krümmung verursacht aufgrund von Feldstörungen starke Profilstörungen im Lichtwellenleiter. Die Feldverschiebung ändert sich dabei mit Änderung des Biegeradius in jedem Schaltvorgang. Dadurch können die räumlichen und zeitlichen Strukturänderungen des Laserpulses verursacht werden. Für Messungen mit bestimmten optischen Sensoren ist aber eine unveränderte Struktur des übertragenen Leserpulses erforderlich.

## 2.2 Funktionsprinzip

Grundidee bei der Entwicklung des Aufbaukonzeptes war die mechanische Entlastung der Lichtwellenleiter bei den Schaltvorgängen, um Profilstörungen des Laserpulses auszuschließen, und die Minimierung der optischen Verbindungsstellen, um optische Verluste zu reduzieren [108, 109]. Beide Ziele wurden durch eine besondere geometrische Anordnung und Funktionsweise erreicht, die in Abb. 2.1 schematisch dargestellt ist.



**Abb.2.1: Funktionsprinzip der dynamischen Entlastung der Lichtwellenleiter am Beispiel eines Einkanal-LWL-Multiplexers**

Bei dieser Anordnung ist ein Übertragungslichtwellenleiter zur Verbindung der eingehenden und ausgehenden Lichtwellenleiter in einem Drehteil integriert und wird bei den Schaltvorgängen als Ganzes, ohne dynamische Deformation, um eine Drehachse gedreht. Das Koppelende des eingehenden Lichtwellenleiters liegt dabei in der Drehachse. Die Koppelenden der ausgehenden Lichtwellenleiter sind auf einem Kreis mit Zentrum in der Drehachse angeordnet. Der

Übertragungslichtwellenleiter muß so in ein Drehteil integriert werden, daß in sein Einkoppelende das Licht in jeder Drehposition unter gleichen Bedingungen eingekoppelt wird, während sein Auskoppelende bei der Drehung des Drehteils jedem optischen Ausgang fluchtend gegenübergestellt werden kann. Dies wird dadurch erreicht, daß ein Ende des Übertragungslichtwellenleiters in der Drehachse dem Auskoppelende des eingehenden Lichtwellenleiters gegenüber angeordnet ist. Diese Anordnung bildet eine spezielle Faserverbindungsstelle 1, bei der gleiche Kopplungsbedingungen in jeder Drehposition bei vollständiger mechanischer Entlastung der Lichtwellenleiter gewährleistet sind. Das andere Ende des Übertragungslichtwellenleiters ist entsprechend der Anordnung der optischen Ausgänge so positioniert, daß es mit seiner optischen Achse in der gleichen geometrischen Fläche, z.B. einer Zylinderfläche, Kegelfläche oder Ebene, mit den optischen Achsen der ausgehenden Lichtwellenleiter liegt. Damit kann dieses Koppelende des Übertragungslichtwellenleiters durch Rotation des Drehteils jedem optischen Ausgang fluchtend gegenübergestellt werden (Abb.2.1).

An der Verbindungsstelle 1 wird das Licht vom Eingangslightwellenleiter in den Übertragungslichtwellenleiter eingekoppelt. Dieser leitet das Licht zum entsprechenden Ausgangslightwellenleiter über die Verbindungsstelle 2 weiter.

Da der Übertragungslichtwellenleiter bei den Schaltvorgängen als Ganzes gedreht wird, bleibt die Lage von je zwei seiner Punkte gegeneinander unverändert. Auf den Lichtwellenleiter wirken somit keine dynamischen Biege- oder Torsionsmomente ein. Das bedeutet eine mechanische Entlastung der Lichtwellenleiter bei den Schaltvorgängen.

Durch diese technische Lösung werden die mit den Gleichungen (2.1) und (2.2) beschriebenen dynamischen Krümmungsverluste sowie dynamische Profilstörungen der Übertragungslichtwellenleiter ausgeschlossen. Das ermöglicht eine effiziente und reproduzierbare Übertragung der Laserleistung bei unverändertem Puls- und Strahlenprofil.

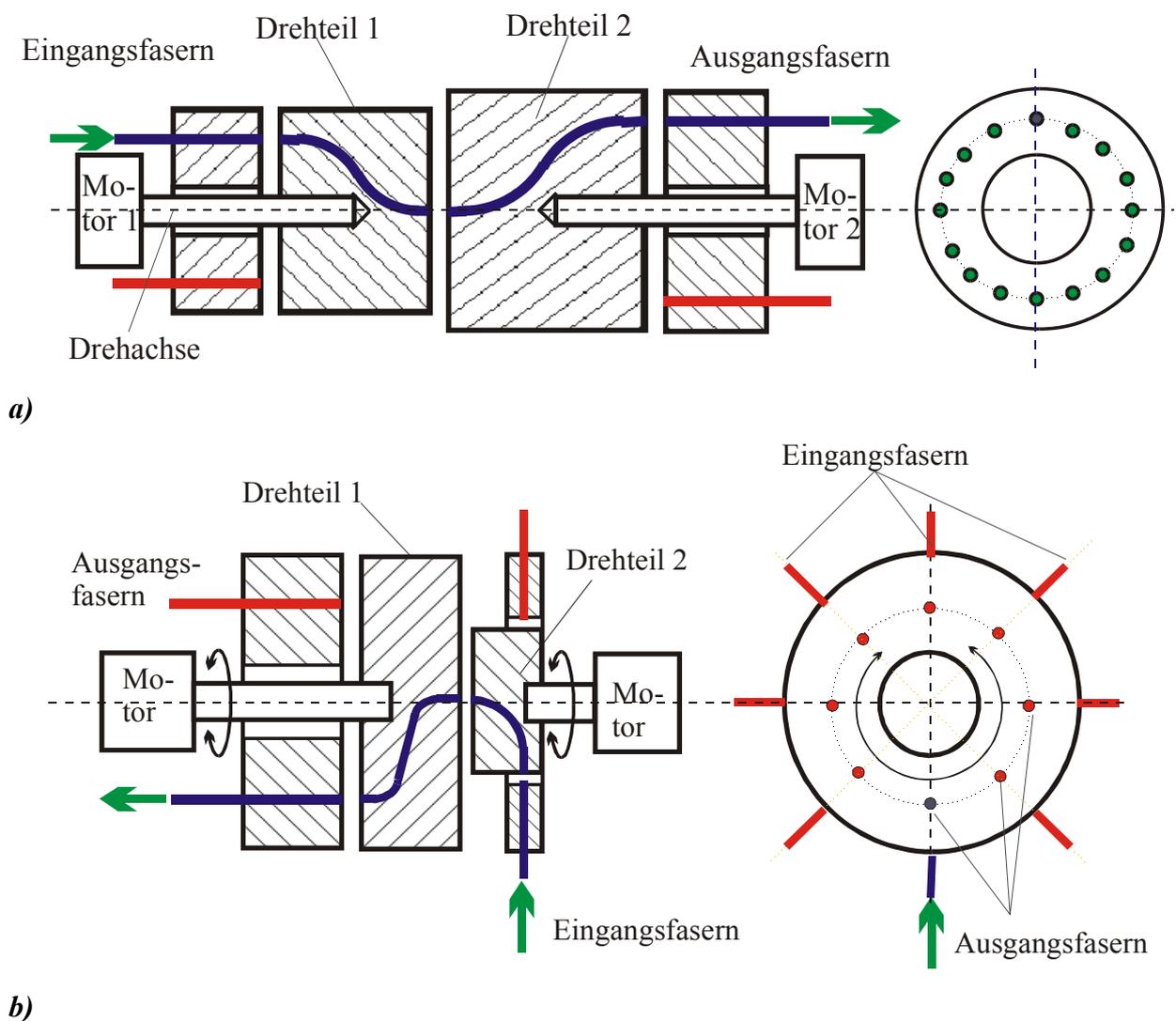
Das beschriebene Aufbauprinzip ermöglicht verschiedene Konstruktionen und Ausführungsformen der LWL-Multiplexer für jede konkrete Anwendung.

Allgemein können die optischen Achsen der ausgehenden Lichtwellenleiter und dementsprechend das Auskoppelende des Übertragungslichtwellenleiters unter einem beliebigen Winkel zur Drehachse geneigt, parallel oder senkrecht zu ihr angeordnet werden.

Eine gewinkelte Anordnung der Lichtwellenleiter hat den Vorteil, daß die Übertragungslichtwellenleiter beim Einlegen in das Drehteil weniger stark gebogen werden. Das erlaubt einen sehr kompakten Aufbau des LWL-Multiplexers, was besonders bei den mehreren Ein- und Ausgangsgruppen relevant sein kann. Nachteil einer gewinkelten Anordnung ist, daß

eine Justierung des Abstandes zwischen den Stirnflächen der zu koppelnden Fasern separat durch Verschiebung der Ausgangslichtwellenleiter jeder Ausgangsgruppe entlang ihrer optischen Achsen erfolgen muß.

Zur Lichtübertragung von mehreren  $n$  eingehenden zu mehreren  $m$  ausgehenden Lichtwellenleiter wird der LWL-Multiplexer mit zwei in der gemeinsamen Drehachse symmetrisch zueinander liegenden und unabhängig voneinander gelagerten Drehteilen ausgerüstet (Abb.2.2). In jedem Drehteil ist dabei jeweils ein entsprechend angeordneter Übertragungslichtwellenleiter integriert. Damit können die Lichtsignale von einer der mehreren Lichtquellen beliebig zu einem der mehreren Lichtempfänger übertragen werden.



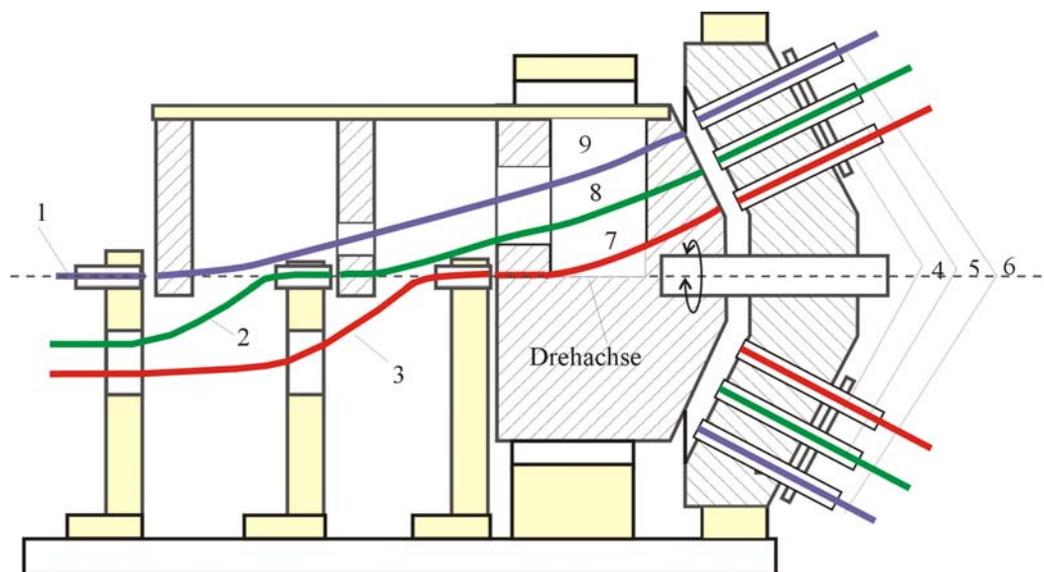
**Abb. 2.2: Einkanal-LWL-Multiplexer mit  $n$  optischen Eingängen und  $m$  optischen Ausgängen bei unterschiedlicher Anordnung der optischen Achsen der ein- und ausgehenden Lichtwellenleiter a) parallel und b) senkrecht zur Drehachse**

Es besteht auch die Möglichkeit, mehrere in verschiedenen Ebenen befindliche Ein- und Ausgänge mit einem Übertragungslichtwellenleiter durch besondere Konstruktion des Drehteils

und entsprechender Anordnung des Übertragungslichtwellenleiters sequentiell miteinander zu verbinden. Das Drehteil muß dabei in verschiedenen Ebenen um mehrere, z.B. zueinander senkrechte Drehachsen drehbar gelagert werden.

Nach dem beschriebenen Konzept können auch LWL-Multiplexer mit mehreren Übertragungskanälen aufgebaut werden. Zu diesem Zweck werden in ein Drehteil zwei oder mehrere Übertragungslichtwellenleiter integriert, so daß sie durch Rotation des Drehteils gleichzeitig eine Gruppe eingehender mit einer der mehreren Gruppen ausgehender Lichtwellenleiter verbinden. Eine solche Anordnung bildet einen Mehrkanal-LWL-Multiplexer.

Aufbauprinzip und Funktionsweise eines Mehrkanal-LWL-Multiplexers sind in Abb. 2.3 schematisch dargestellt, in der als Beispiel ein Dreikanal-LWL-Multiplexer mit drei optischen Eingängen (Glasfasern 1, 2 und 3) und drei Gruppen optischer Ausgänge (4, 5, 6) gezeigt ist. Jede Ausgangsgruppe enthält dabei mehrere optische Ausgänge.



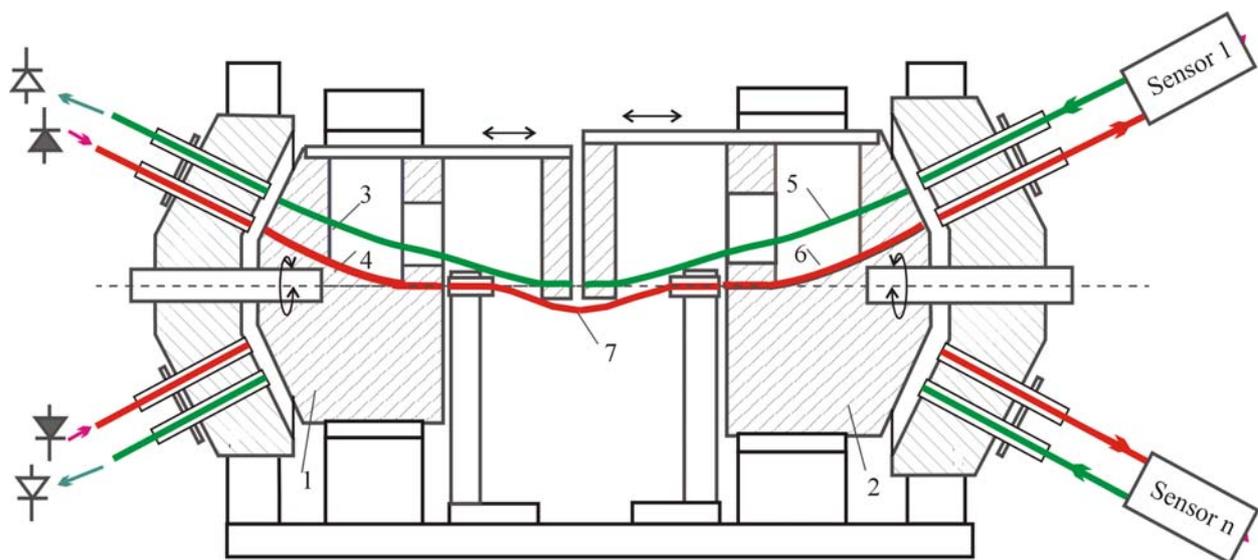
**Abb. 2.3: Ein Dreikanal-LWL-Multiplexer mit 3 optischen Eingängen und  $3 \times n$  optischen Ausgängen bei gewinkelter Anordnung der Lichtwellenleiter**

Die Koppelenden der eingehenden Lichtwellenleiter sind mit ihren optischen Achsen in der Drehachse des LWL-Multiplexers angeordnet. Die Koppelenden der ausgehenden Lichtwellenleiter jeder Ausgangsgruppe sind jeweils auf einem Kreis mit Zentrum in der Drehachse angeordnet. Zur Verbindung der ein- und ausgehenden Lichtwellenleiter sind in einem Drehteil zwei, drei oder mehrere Übertragungslichtwellenleiter (7, 8, 9) entsprechend der Anzahl der optischen Eingänge bzw. Ausgangsgruppen integriert. Jeder Übertragungslichtwellenleiter ist im Drehteil so angeordnet, daß eines seiner Koppelenden mit seiner optischen Achse in der Drehachse des LWL-Multiplexers liegt. Das andere Koppelende

jeden Übertragungslichtwellenleiters ist im Drehteil allgemein entsprechend der Anordnung der Ausgangsfasern so angeordnet, daß es mit seiner optischen Achse in derselben geometrischen Fläche mit den Ausgangsfasern der entsprechenden Ausgangsgruppe liegt. Zum Schalten werden alle im Drehteil integrierten Übertragungslichtwellenleiter gemeinsam als Ganzes um die Drehachse gedreht.

Durch diese technische Lösung können die Lichtsignale zwischen mehreren Lichtquellen und mehreren Gruppen der Lichtempfänger gleichzeitig und unabhängig voneinander in beide Richtungen übertragen werden. Dabei werden sowohl eine Krümmung als auch die Torsionsbelastung der Lichtleiter völlig vermieden.

Durch den Einsatz von zwei symmetrisch zueinander angeordneten und unabhängig voneinander gelagerten Drehteilen, in denen jeweils zwei oder mehrere Übertragungslichtwellenleiter integriert sind, kann ein Mehrkanal-LWL-Multiplexer, z.B. mit  $k$  Übertragungskanälen für die Lichtübertragung von mehreren Gruppen eingehender ( $k \times n$ ) zu mehreren Gruppen ausgehender ( $k \times m$ ) Lichtwellenleiter aufgebaut werden (Abb. 2.4).



**Abb. 2.4: Prinzipieller Aufbau eines Zweikanal-Multiplexers mit  $2 \times n$  optischen Eingängen und  $2 \times m$  optischen Ausgängen. Hier sind 1 und 2 – Drehteile, 3, 4, 5 und 6 – Übertragungsfasern**

Ein solcher LWL-Multiplexer kann z.B. für ein Sensorarray bei einer spektroskopischen Analyse mit mehreren verschiedenen Lichtquellen und entsprechenden verschiedenen optischen Detektoren, z.B. bei unterschiedlichen Lichtwellenlängen, verwendet werden.

Zusammengefasst hat das entwickelte Aufbauprinzip der LWL-Multiplexer folgende Vorteile im Unterschied zu anderen technischen Lösungen:

- Volle dynamische Torsions- und Biegeentlastung der Lichtwellenleiter bei den Schaltvorgängen;
- nur zwei optische Verbindungsstellen für jeden Übertragungskanal statt üblicher drei, und deswegen wesentlich kleinere optische Verluste und entsprechend höhere Übertragungseffizienz;
- gleichzeitiges Umschalten zweier, dreier oder mehrerer Lichtwellenleiter zu mehreren Gruppen optischer Ausgänge, wobei in allen Übertragungskanälen Licht unabhängig voneinander und in verschiedenen Richtungen übertragen werden kann;
- wesentliche Reduzierung des Platzbedarfes und die Möglichkeit zum schnellen und gleichzeitigen Schalten einer großen Zahl optischer Ein- und Ausgänge bei kleinen Abmessungen des LWL-Multiplexers;
- erhöhte Positionierungsgenauigkeit, denn aufgrund der kleinen Drehradien der Übertragungslichtwellenleiter verursacht der gleiche auftretende Schritt- oder Winkelfehler des antreibenden Motors einen wesentlich kleineren Achsenversatz der zu koppelnden Lichtwellenleiter an der beweglichen Verbindungsstelle 2, was den Übertragungsfehler reduziert und die Reproduzierbarkeit der Signalübertragung steigert;
- für einen Mehrkanal-LWL-Multiplexer die Erweiterungsmöglichkeit durch den Einbau zusätzlicher Übertragungslichtwellenleiter in das Drehteil und entsprechender Halterungskonstruktionen, und
- Vielfalt der Aufbaumöglichkeiten für verschiedene Sensorsysteme, z.B. mit mehreren optischen Ein- und Ausgängen, mit einem oder mehreren Übertragungskanälen bei verschiedenen Konstruktionen des Drehteils und der Halteelemente zur Fixierung der eingehenden bzw. ausgehenden Lichtwellenleiter.

Die Anordnung der optischen Achsen der zu koppelnden Lichtwellenleiter parallel zur Drehachse ergibt zusätzliche Vorteile:

- Aufgrund geometrischer Anordnung befinden sich die Stirnflächen der zu koppelnden Lichtwellenleiter sowohl im geschalteten Zustand als auch bei den Schaltvorgängen in parallelen Ebenen, was einen sehr geringen Abstand zwischen den zu koppelnden Lichtwellenleitern und eine entsprechend hohe Kopplungseffizienz ermöglicht, und
- geringe Positionierungsverluste, da auch infolge eines möglicherweise auftretenden Antriebsfehlers kein Kippwinkel zwischen den optischen Achsen der zu koppelnden Lichtwellenleiter entstehen kann.

## **3 Entwicklung eines Einkanal-LWL-Multiplexers für ein Meßsystem mit faseroptisch geführten photoakustischen Sensoren**

### **3.1 Anforderungen an einen LWL-Multiplexer in einem Meßsystem für tiefenaufgelöste photoakustische Spektroskopie**

Ein Multiplexer-Meßsystem mit faseroptisch geführten photoakustischen Sensoren sollte als Teil eines Meß- und Steuerungssystems an einem Bioreaktor aufgebaut werden. Im Rahmen eines SFB-Teilprojektes wurde am Institut für Wasserchemie [42-45] ein optimierter photoakustischer Sensorkopf nach den in [46-48] beschriebenen Grundsätzen entwickelt. Ein LWL-Multiplexer ermöglicht den Betrieb mehrerer faseroptisch geführter Sensoren mit einer Laserquelle und einer Detektionseinheit, so daß das Licht eines Lasers nacheinander mehreren an der Reaktorwandung angebrachten PA-Sensoren zur Anregung photoakustischer Wellen zugeführt werden kann. Die photoakustischen Signale werden in den PA-Sensorköpfen mit den darin enthaltenen Piezoelementen aufgenommen, als elektrische Signale zur Detektionseinheit übertragen und entsprechend erfaßt.

Die Anforderungen an optisches Multiplexen bei photoakustischen Messungen sind durch das Funktionsprinzip und den Aufbau der photoakustischen Sensoren vorgegeben.

Die photoakustische Signalerzeugung [50-55] basiert auf Absorption der in die Probe eingestrahlten Laserenergie durch die Probenmoleküle. Die absorbierte Energie wird durch strahlungslose Relaxationsprozesse in thermische Energie konvertiert. Die thermische Expansion der Probe verursacht die Ausbildung einer thermischen und einer akustischen Welle, die sich mit verschiedenen Geschwindigkeiten in der Probe ausbreiten. Bei der modulierten Anregung überwiegt der Anteil der thermischen Welle. Die Ausbreitung einer thermischen Welle führt zur Expansion des angrenzenden Mittlergases an der Probenoberfläche und zur Induktion einer Druckwelle im Gas, die mit einem Mikrofon detektiert wird [53-55]. Bei einer gepulsten Anregung dominiert die akustische Welle, die direkt an der Probenoberfläche mit einem piezoelektrischen Druckaufnehmer detektiert wird.

Das PA-Signal ist die Spannung, die durch den piezoelektrischen Effekt generiert und von den Elektroden der PVDF-Folie abgenommen wird. Es stellt einen zeitlich abklingenden Verlauf dar

und ist der Ableitung des Druckverlaufes proportional. Deswegen erfolgt die Berechnung des Druckverlaufes  $p(\tau)$  durch zeitliche Integration des aufgenommenen PA-Signals.

Die eine akustische Welle beschreibende Wellengleichung enthält einen Quellterm  $\nabla S$ , durch den die Charakteristiken des Anregungslichtes berücksichtigt werden [46]:

$$\nabla S = -\mu_a I_0 e^{-\mu_a z} f(t). \quad (3.1)$$

Hier sind  $\mu_a$  der Absorptionskoeffizient der Probe,  $z$  die Strahlachse,  $I_0$  die Intensität des Anregungslichts und  $f(t)$  das normierte zeitliche Intensitätsprofil des Laserpulses. Dementsprechend kann nach [46] die allgemeine Lösung der Wellengleichung, die den Druckverlauf in der Probe beschreibt, als Faltung zwischen dem Intensitätsprofil  $f(t)$  des Anregungsstrahls und einer Transferfunktion  $K(t)$  dargestellt werden:

$$p(\tau) = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau - t) f(t) dt \quad (3.2)$$

mit dem Zeitfaktor  $\tau = t_0 + z/c$  und Schallgeschwindigkeit  $c$ . Die Transferfunktion  $K(t)$  wird für konkrete Meßbedingungen bestimmt. Für eine indirekte Sensorgeometrie, die in den verwendeten PA-Sensoren [43] eingesetzt wurde, kann der dem PA-Signal entsprechende Druckverlauf einer inhomogenen Probe nach [47] berechnet werden:

$$p(\tau) = p_A \exp\left(-\int_0^{c\tau} \mu_a(\xi) d\xi\right) \theta(\tau), \quad (3.3)$$

$$\text{mit der photoakustischen Signalamplitude } p_A = \Lambda \beta \frac{c^2}{C_p} \Phi(0) \mu_a(c\tau). \quad (3.4)$$

Hierbei stellt  $\mu_a(c\tau)$  - der tiefenabhängige Absorptionskoeffizient der Probe - die Meßgröße dar,  $\xi$  ist die Tiefenkoordinate,  $\Phi(0)$  die Energiedichte an der Probenoberfläche,  $\theta(\tau)$  die Heaviside Stufenfunktion,  $\beta$  der thermische Volumenexpansionskoeffizient und  $C_p$  die Wärmekapazität bei konstantem Druck; die Proportionalitätskonstante  $\Lambda$  berücksichtigt thermische und optische Eigenschaften der Probe. Durch die zeitaufgelöste Detektion des PA-Signals werden die tiefenaufgelösten Informationen über den Absorptionskoeffizient der Probe gewonnen. Umrechnungsfaktor zwischen der Zeit  $t$  und der Tiefenkoordinate  $z^*$  ist dabei die Schallgeschwindigkeit  $c$  im Medium  $z^* = tc$ .

Aus den Gleichungen (3.2) und (3.4) ist ersichtlich, daß das PA-Signal sowohl von der Zeitfunktion  $f(t)$  als auch von der Energiedichte  $\Phi(0)$  des durch den LWL-Multiplexer übertragenen Anregungslichtes abhängt.

Deswegen ergeben sich aufgrund der oben erwähnten physikalischen Zusammenhänge zur photoakustischen Signalerzeugung die Anforderungen an den LWL-Multiplexer in einem Meßsystem mit photoakustischen Sensoren:

- Da das photoakustische Meßsignal ein elektrisches Signal darstellt, ist nur ein Übertragungskanal des LWL-Multiplexers zur Übertragung des Anregungslichtes zum PA-Sensorkopf erforderlich.
- Da die Amplitude des PA-Signals  $p_A$  nach (3.4) bei einer bestimmten Sensorgeometrie sowohl zum Absorptionskoeffizienten der Probe  $\mu_a$  als auch zur Energie des Anregungsstrahls  $\Phi(0)$  proportional ist, sind für photoakustische Messungen mit ausreichender Empfindlichkeit und Genauigkeit eine hohe Effizienz und Reproduzierbarkeit der Lichtleistungsübertragung erforderlich.
- Da das gemessene PA-Signal und der entsprechende Druckverlauf nach (3.2) vom zeitlichen Intensitätsprofil sowie nach (3.4) von der räumlichen Intensitätsverteilung im Anregungsstrahl abhängen, stellt das unveränderte Puls- und Strahlprofil der übertragenen Laserpulse eine weitere Anforderung dar.
- Anforderungen an die Bandbreite des LWL-Multiplexers folgen aus den erforderlichen Detektionsbedingungen für die eingesetzten PA-Sensorköpfe. Eine verzerrungsfreie Übertragung der kurzen Laserpulse von 3 - 4 ns, entsprechend der Pulsdauer  $\tau \leq 1/(\mu_a c)$ , erfordert eine Übertragungsbandbreite von über 10 GHz.

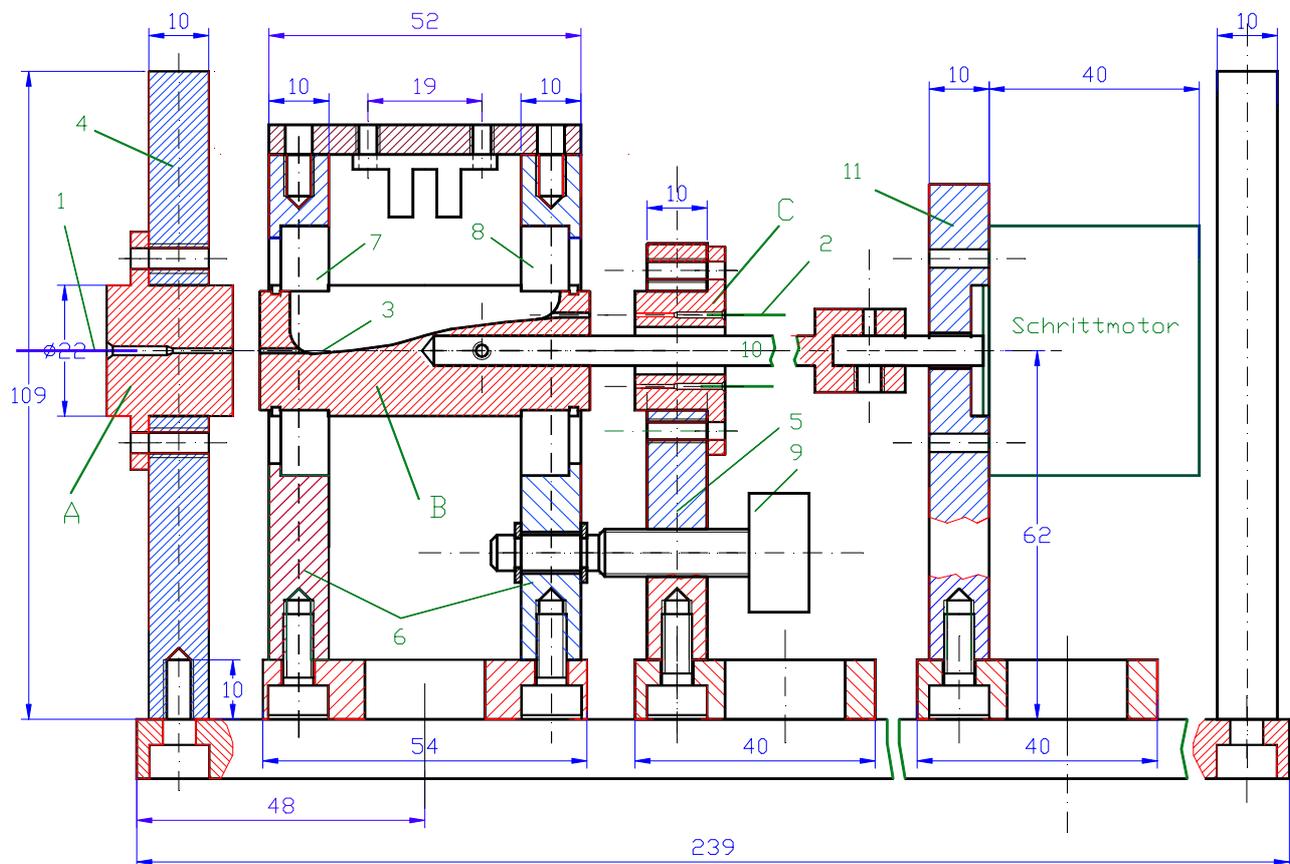
Ausgehend von den oben beschriebenen Anforderungen wurde ein Einkanal-LWL-Multiplexer zur verzerrungsfreien Lichtleistungsübertragung im Meßsystem mit faseroptisch geführten photoakustischen Sensoren entwickelt und gebaut, der im folgenden vorgestellt wird.

### 3.2 Aufbau und Funktionsweise des Einkanal-LWL-Multiplexers

Nach dem beschriebenen Aufbaukonzept wurde der Einkanal-LWL-Multiplexer mit einem optischen Eingang und 10 optischen Ausgängen für ein Meßsystem mit faseroptisch geführten photoakustischen Sensoren konstruiert und gebaut [108]. Er ist in der Abb.3.1 vorgestellt.

Der Einkanal-Multiplexer weist zwei entlang einer Drehachse angeordnete feste Teile A und C, dies sind die Halterungen zur Fixierung der Eingangs- 1 bzw. der Ausgangsfasern 2, sowie ein zwischen den beiden festen Teilen angeordnetes und in der Drehachse gelagertes Drehteil B auf, in dem eine Übertragungsfaser 3 integriert ist. Die Eingangsfaser 1 ist im Teil A entlang der Drehachse fixiert. Die Übertragungsfaser 3 ist im Drehteil B in einem eingefrästen Schlitz so

verlegt, daß ihr Einkoppelende dem Auskoppelende der Eingangsfaser 1 gegenüber in der Drehachse liegt, während ihr Auskoppelende parallel zur Drehachse in einem bestimmten, dem Radius seiner Kreisbahn entsprechenden Abstand zu ihr angeordnet ist. Die Ausgangsfasern 2 sind im Teil C so befestigt, daß ihre Einkoppelenden auf einem Kreis mit dem Drehradius und mit Zentrum in der Drehachse in einer zur Drehachse senkrechten Ebene angeordnet sind. Ihre optischen Achsen liegen dabei parallel zur Drehachse. Durch Rotation des Drehteils wird die Übertragungsfaser als Ganzes gedreht, so daß ihr Auskoppelende den Einkoppelenden aller Ausgangsfasern nacheinander fluchtend gegenübergestellt werden kann.



**Abb. 3.1 : Einkanal-LWL-Multiplexer bei direktem Motorantrieb**

Das Teil A (das Halteelement zur Fixierung der Eingangsfaser) ist an der Frontplatte 4 des LWL-Multiplexers und das Teil C (Halteelement zur Fixierung der Ausgangsfasern) am verschiebbaren Stützaufbau 5 durch entsprechende Flanschverschraubungen befestigt. Das Drehteil B ist in einem weiteren Stützaufbau 6 mit zwei Kugellagern 7 und 8 um die Drehachse des LWL-Multiplexers drehbar gelagert. Zur Einstellung des Abstandes zwischen den zu koppelnden Faserenden an der Verbindungsstelle 2 wurde eine Justiermöglichkeit des Stützaufbaus 5 durch zwei Führungsschienen entlang der Drehachse vorgesehen. Dazu wurde in

die Stützaufbauten 5 und 6 der Teile C bzw. B parallel zur Drehachse eine mikrometrische Stellschraube 9 eingefügt, bei deren Drehung der Abstand zwischen den Stützaufbauten variiert werden kann.

Zur besseren Positionierungsgenauigkeit und zur Vermeidung möglicher Getriebefehler wurde beim ersten Aufbau ein Motorantrieb ohne zusätzliches Getriebe bevorzugt. Das Drehteil wurde direkt auf die verlängerte Welle 10 des Schrittmotors aufgesetzt. Der Schrittmotor wurde dabei in der Drehachse des LWL-Multiplexers hinter dem Teil C im Stützaufbau 11 angeordnet.

Vorteil dieses Aufbaus ist der Ausschluß von Getriebefehlern und demzufolge eine höhere Positionierungsgenauigkeit. Nachteile liegen im größeren Platzbedarf und einer aufwendigen Faserführung. Zur Miniaturisierung der Konstruktion und für eine bessere Handlichkeit beim Faseranschluß wurde bei Weiterentwicklung der Antrieb durch eine geänderte Anordnung des Schrittmotors und den Einbau eines Zahnradgetriebes optimiert. Zur Drehmomentübertragung wurde hierzu ein Zahnradgetriebe mit Stirnzahnrädern (Teildurchmesser 50 mm, Eingriffswinkel  $20^\circ$ ) bei der Übersetzung 1 eingesetzt. Der Schrittmotor wurde dabei an der Frontplatte des LWL-Multiplexers befestigt, so daß seine Achse parallel zur Drehachse angeordnet ist. Vorteile eines solchen Antriebs sind eine verbesserte Handlichkeit beim Faseranschluß und bei der Montage der Bauteile sowie ein noch kleinerer Platzbedarf.

Beim Entwurf des ersten Prototyps lag der Schwerpunkt vorrangig in der Funktionalität und einem kompakten Aufbau der Konstruktion [56,57]. Nach mehreren durchgeführten Messungen mit dem gefertigten Einkanal-LWL-Multiplexer wurde eine Optimierung für mehr Handlichkeit, Robustheit und Zuverlässigkeit bei automatischem Dauerbetrieb in einem Sensorsystem vorgenommen. So wurden insbesondere o.g. Antriebsänderungen durchgeführt sowie die optimierten Teile A und C konstruiert und gefertigt. Ergänzend wurde eine Optimierung der optischen Verbindungsstellen vorgenommen, die im Abschnitt 10 beschrieben ist.

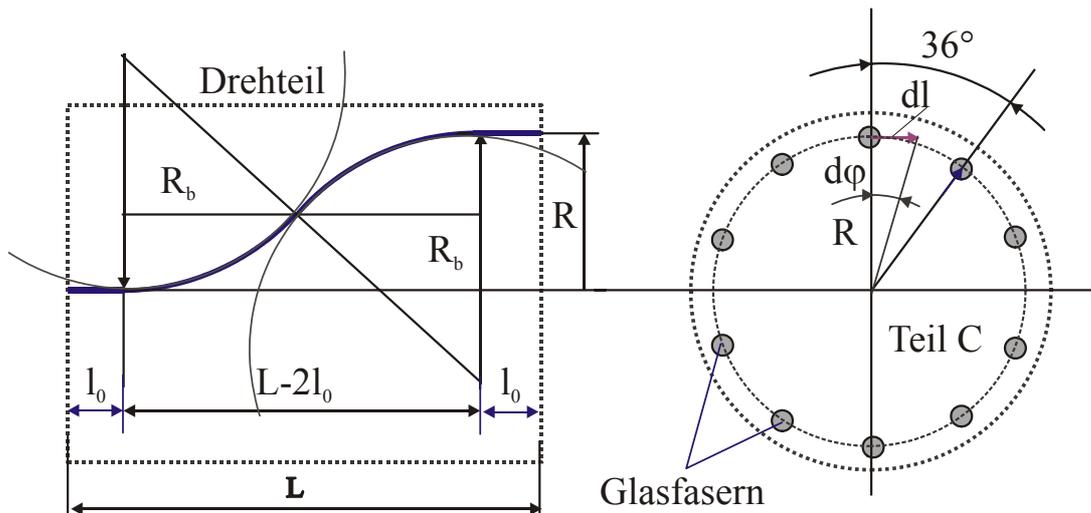
Konstruktive Zeichnungen aller Bauteile des LWL-Multiplexers sind im Anhang beigefügt.

### **3.3 Dimensionierung, Auslegung der Konstruktionselemente und Baugruppen**

Die Dimensionierung des LWL-Multiplexers sowie seiner einzelnen Bauteile, Konstruktionselemente und Baugruppen wird hauptsächlich durch den im Meßsystem verwendeten Fasertyp einerseits und durch die erforderliche Anzahl optischer Ausgänge andererseits festgelegt. Dabei müssen auch die Art der im Sensorsystem benutzten Faseranschlüsse [59] und die Abmessungen der eingesetzten Funktionselemente wie Schrittmotor, Kugellager und Getriebe berücksichtigt werden.

Ausgangspunkt bei der Dimensionierung des LWL-Multiplexers war eine möglichst geringe mechanische Beanspruchung der Übertragungsfaser durch Biegung bei ihrer Integration im Drehteil [58]. Der minimal zulässige Biegeradius  $R_b$  bestimmt unter Berücksichtigung vorgegebener Konstruktionsparameter den Radius  $R$  der Kreisbahn des Auskoppelendes der Übertragungsfaser und damit die Geometrie des Drehteils sowie die grundlegenden Maße des Teils C.

Das Drehteil B ist als ein zylindrisches Teil mit einem radial eingefrästen Schlitz zur Aufnahme der Übertragungsfaser ausgeführt. Die Form des Schlitzes ist durch den für den verwendeten Fasertyp minimal zulässigen Biegeradius  $R_b$  festgelegt, wie es in Abb. 3.2 schematisch gezeigt ist. Zur Befestigung der Übertragungsfaser im Drehteil ist eine axiale und eine achsenparallele Bohrung vorgesehen, so daß ein Koppelende der Übertragungsfaser in der Mittelachse an einer der Stirnflächen des Drehteils und ihr anderes Koppelende an der gegenüberliegenden Stirnfläche in dem Abstand  $R$  zur Mittelachse angeordnet ist.



**Abb. 3.2:** Berechnung des Verlaufs der Übertragungsfaser zur Dimensionierung des Drehteils B.

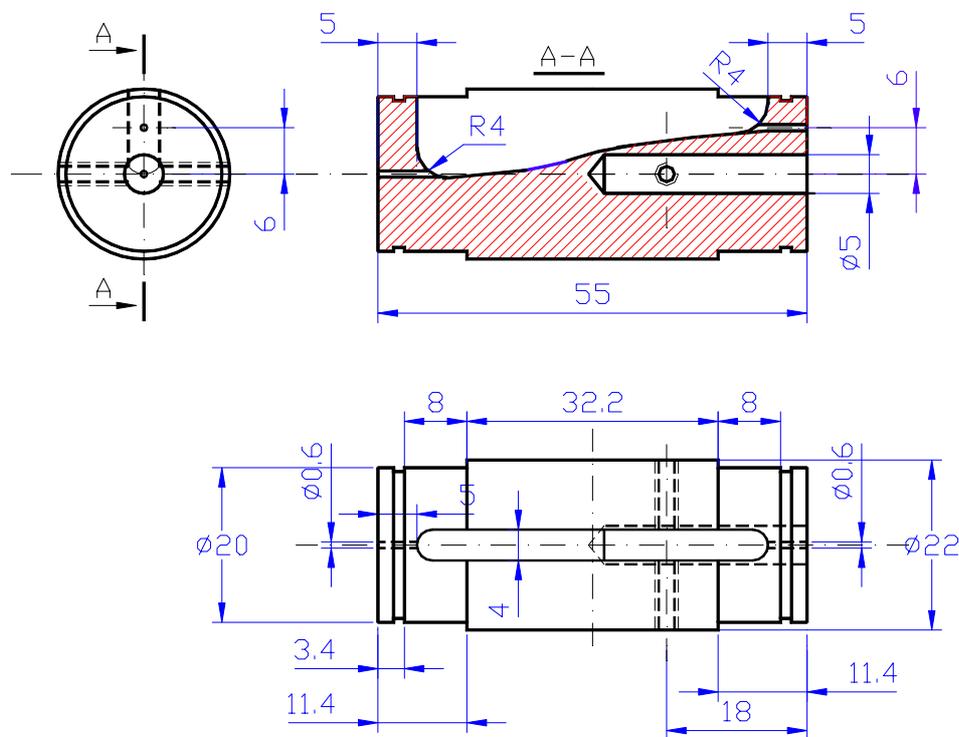
Wie aus Abb. 3.2 ersichtlich, kann der Drehradius  $R$  der Übertragungsfaser als zweifache Höhe des Segmentes des Kreises, dessen Radius dem minimalen Biegeradius  $R_b$  entspricht, und ausgehend von der bevorzugten Gesamtlänge des Drehteils  $L$  berechnet werden:

$$R = 2 \left( R_b - \sqrt{R_b^2 - \frac{(L - 2l_0)^2}{4}} \right). \quad (3.5)$$

Hier ist  $l_0$  die Länge der Führungsbohrungen, in denen die Ein- bzw. Auskoppelenden der Übertragungsfaser fixiert sind. Bei dem für die verwendete monomodale Stufenindex-Quarz-Quarz-Faser HCG-550 minimal zulässigen Biegeradius  $R_b = 94$  mm, der Gesamtlänge des

Drehteils  $L = 55$  mm und der Länge der Führungsbohrungen von jeweils  $l_0 = 5$  mm, beträgt der gemäß (3.5) berechnete Drehradius  $R$  des Auskoppelendes der Übertragungsfaser 6 mm. Daraus ergeben sich eine optimale Geometrie und Abmessungen des Drehteils und dementsprechend der Teile A und C sowie der jeweiligen Stützkonstruktionen. Der Drehradius  $R$  bestimmt auch die Funktionsempfindlichkeit sowie die Ansprechgrenze des LWL-Multiplexers, wie es in Abschnitt 5.1 gezeigt wurde.

Die radialen Außenmaße des Drehteils (Abb. 3.3) entsprechen dem Innendurchmesser und der Breite der ausgewählten Kugellager. Für die Lagerung des Drehteils wurden Rillenkugellager ( $d = 20$  mm,  $D = 42$  mm, Breite  $B = 8$  mm, radiale Lagerluft 5 bis 20  $\mu\text{m}$ , *Fa. Altmann*) verwendet.



**Abb. 3.3 : Das Drehteil des Einkanal-LWL-Multiplexers**

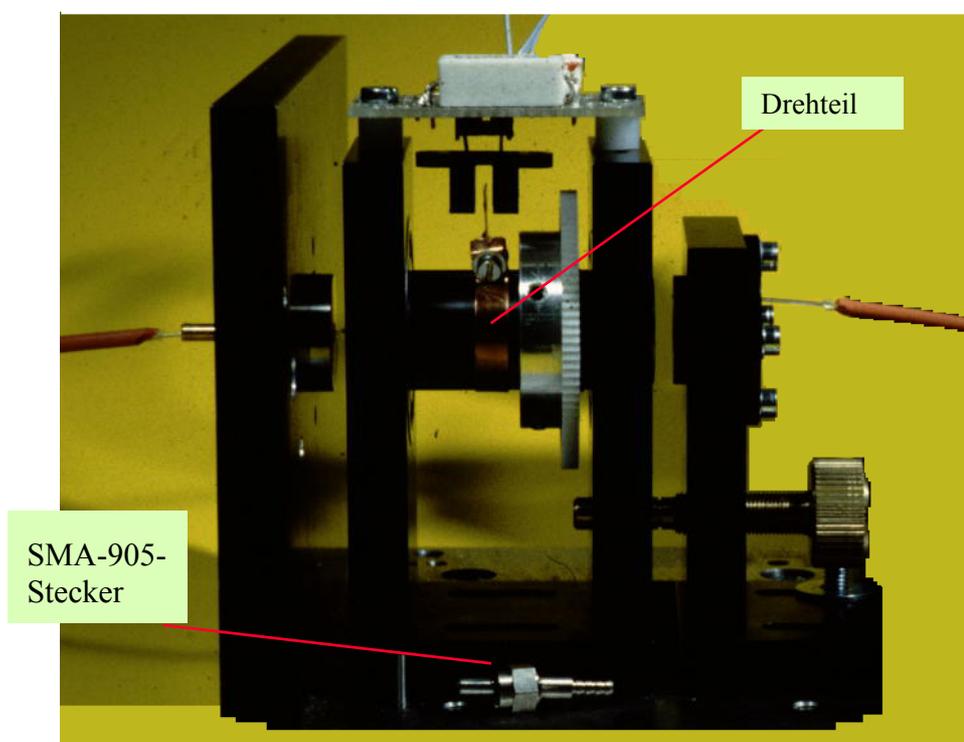
Der nächste Anhaltspunkt bei Auslegung der Konstruktion ist die erforderliche Anzahl der optischen Ausgänge  $n$  entsprechend der Anzahl der Meßkanäle im Sensorsystem. Daraus ergibt sich für das Teil C des LWL-Multiplexers, die Halterung für die Ausgangsfasern, der Winkelabstand zwischen den benachbarten Ausgangspositionen  $\Delta\varphi = \frac{360^\circ}{n}$ . Im gefertigten

Prototyp mit 10 optischen Ausgängen beträgt sie  $36^\circ$ . Die Schrittauflösung des ausgewählten Schrittmotors  $A_M$  muß dabei zur vollständigen Ausführung des Winkelabstandes  $\Delta\varphi$  berücksichtigt werden.

Entsprechend der Bauart des Drehteils ist das Halteelement für die ausgehenden Lichtwellenleiter als ein zylindrisches Teil ausgeführt, in dem auf einem Kreis mit dem Drehradius  $R = 6$  mm und Zentrum in der Mittelachse zehn achsenparallele, durchgehende Bohrungen zur Fixierung der Ausgangsfasern angeordnet sind.

Ausgehend vom minimal zulässigen Biegeradius  $R_b = 94$  mm, dem berechneten Drehradius  $R = 6$  mm und einer Länge 55 mm hat sich somit der Durchmesser des Drehteils von 20 mm bei 10 optischen Ausgängen ergeben.

Durchmesser und Länge der Teile A und B sind für den weiteren Platzanspruch entscheidend, da hierdurch die Abmessungen der Halterungsplatten und der entsprechenden Baugruppen bestimmt werden. Der gefertigte Einkanal-LWL-Multiplexer ist in Abb. 3.4 vorgestellt.



**Abb. 3.4: Der Einkanal-LWL-Multiplexer mit einem optischen Eingang und 10 optischen Ausgängen. Abmessungen des Drehteils: Durchmesser 20 mm, Länge 55 mm. Zum Größenvergleich ist ein SMA-905-Faserstecker im Vordergrund.**

Zur Ergänzung der Konstruktion wurde ein modifiziertes Halteelement für die Ausgangsfasern (Teil C) mit acht achsenparallelen Bohrungen und dem Durchmesser von 3,2 mm bei einem Winkelabstand  $\Delta\varphi = 45^\circ$  konstruiert, das den Abschluß von Fasersteckern mit Standarddurchmesser erlaubt. Alle Bauteile des LWL-Multiplexers sind aus schwarz eloxiertem Aluminium gefertigt.

### 3.4 Ansteuerung des LWL-Multiplexers

Als Antrieb wurde im LWL-Multiplexer ein Schrittmotor eingesetzt, der zu einer digitalen Steuerung und Regelung mit einem PC ideal geeignet ist [60,64,65]. Dieser Motortyp wird als Stellantrieb mit Quantisierung oder als elektromechanischer Energiewandler mit digitaler Informationsverarbeitung bezeichnet und wandelt elektrische Spannungspulse in diskrete Winkelverschiebungen um. Dadurch wird der D/A-Wandler bei der Ansteuerung des LWL-Multiplexers eingespart.

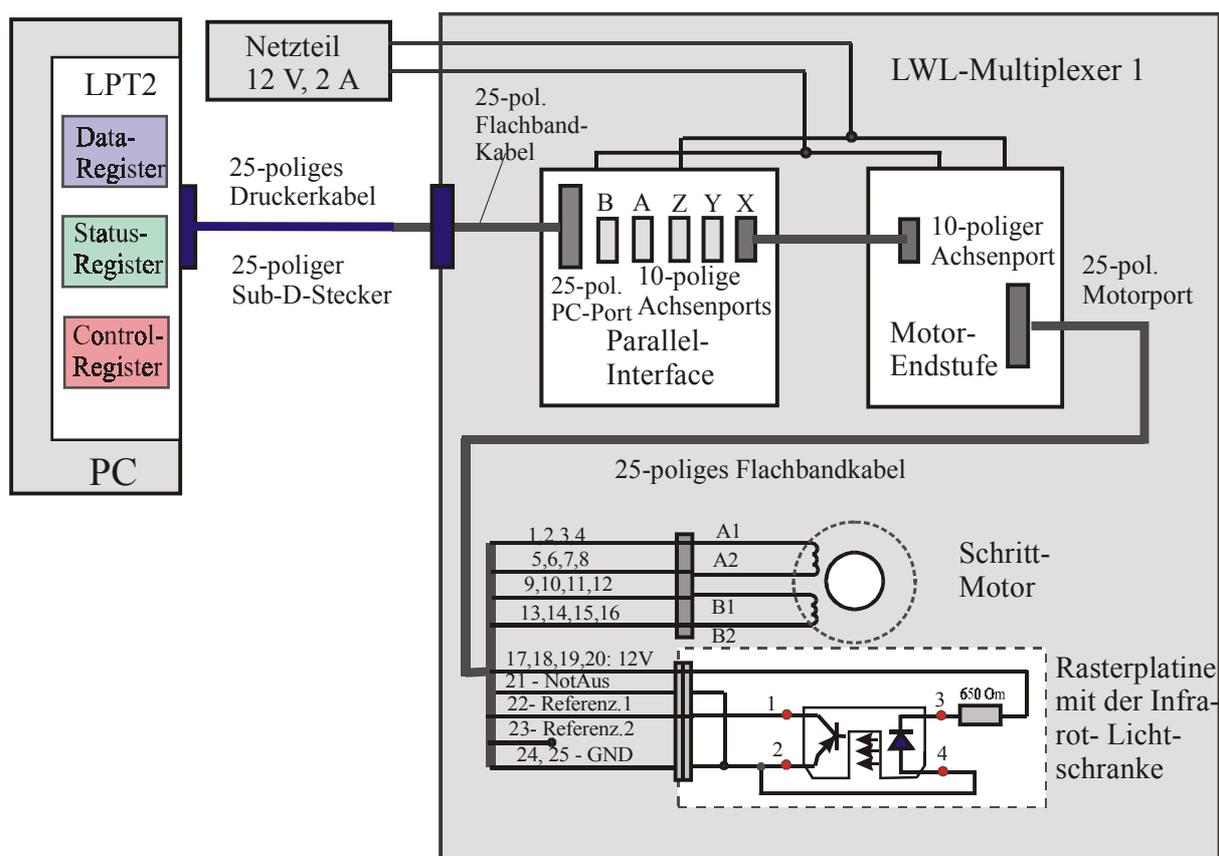


Abb. 3.5: Ansteuerung des Einkanal-LWL-Multiplexers

Die wichtigsten Parameter, die bei Auswahl des Schrittmotors herangezogen wurden, sind das elektromagnetische Drehmoment, das dem Widerstandsmoment unter Berücksichtigung aller Reibungskräfte entsprechen soll, die Schrittauflösung  $A_M$ , die Schrittzahl und die Grenzfrequenz der Steuerpulse, bei welcher der Motor keine Schrittlverluste aufweist [64]. Die Schrittzahl oder die Schrittfrequenz des verwendeten Schrittmotors bestimmt die maximale Schaltgeschwindigkeit des LWL-Multiplexers. Bei Auswahl des Schrittmotors für den LWL-Multiplexer soll deswegen ein Kompromiß zwischen dem Drehmoment und der Drehzahl, abhängig vom Widerstandsmoment der Motorwelle einerseits und den Anforderungen an das

Multiplexer-System andererseits gefunden werden. Die Positionierungsgenauigkeit eines Schrittmotors gibt die Toleranz der Schritte an. Dieser Fehler liegt typisch bei 5 bis 10% eines Schrittwinkels.

Der Drehwinkel eines Schrittmotors ist direkt proportional zur Anzahl der Steuerpulse  $M$  und der Schrittauflösung  $A_M$ , die einen Winkelbetrag der minimalen Läuferverschiebung darstellt:  $\varphi = MA_M$ . Die rechteckigen Steuerpulse werden im PC vom Steuerprogramm generiert, über eine parallele Schnittstelle zur Steuerungselektronik übertragen und steuern über einen Pulsverteiler nach entsprechender Verstärkung eine Kommutierungsschaltung, die durch Leistungstransistoren die Aussteuerwicklungen des Motors schaltet.

Der LWL-Multiplexer (Abb. 3.5) wird von einem zweiphasen Schrittmotor (VEXTA, Model PK 245M-02B) angetrieben und von einem PC über ein paralleles RS-232-Interface gesteuert. Die Steuerungselektronik besteht aus dem Parallelinterface (PARInt 300) und der bipolaren Motorendstufe (Kompaktmodul mit integriertem Kühlkörper und Temperaturkontrolle  $\mu$ Step2 System3000E), die auf zwei elektrischen Platinen untergebracht und miteinander über 10-polige Achsenports und ein entsprechendes Flachbandkabel verbunden sind.

Die Positionsbestimmung der Motorachse erfolgt durch Erkennung der Nullposition. Dazu ist im LWL-Multiplexer als Endschalter eine Infrarot-Gabellichtschranke eingebaut. Sie ist an einer über dem Drehteil angeordneten Rasterplatine mit entsprechenden elektronischen Bausteinen in einem IC-Sockel lösbar befestigt. Am Drehteil ist dementsprechend eine Fahne (10x3x1,5 mm) einstellbar angebracht, die bei Rotation des Drehteils den Raum zwischen dem Lichtsender und dem Lichtempfänger der Gabellichtschranke erreicht und den Infrarotstrahl unterbricht. Bei Unterbrechung des Infrarotstrahls ändert sich entsprechend das Status-Bit im Status-Register des Parallelinterfaces, das mit dem Steuerprogramm in den Steuer-PC eingelesen wird.

Zur Positionsbestimmung der Motorachse kann statt der Suche der Nullposition mit einem Endschalter auch ein Winkelsensor [61-63,88] verwendet werden, der ein Signal über die Lage des Drehteils in jeder Drehposition dem Steuerprogramm liefert. Beide Varianten der Positionsbestimmung haben Vor- und Nachteile, die im folgenden kurz geschildert werden.

Beim Vergleich verschiedener Winkelaufnehmer zur Positionsbestimmung der Motorachse kamen nur kontaktlose Meßverfahren in Frage. Der Nachteil einer inkrementalen Messung der Winkelposition besteht z.B. in fehlenden Informationen über die aktuelle Bezugsposition bei Inbetriebnahme des LWL-Multiplexers, weshalb zuerst eine Referenzposition angefahren werden müßte. Bei absoluten kodierten Winkelaufnehmern, z. B. mit lichtelektrischer Abtastung, ist dagegen jeder Winkelposition ein bestimmtes, durch eine Codescheibe kodiertes digitales Signal zugeordnet. Der Vorteil der Winkelkodierer als digitaler Meßfühler liegt darin, daß als

Meßsignal ein Digitalcode in paralleler Form vorliegt, der ohne A/D-Umsetzung direkt in den Steuerrechner eingelesen und weiterverarbeitet werden kann. Der Nachteil der Winkelkodierer besteht darin, daß sowohl Quantisierungsfehler durch Digitalisierung als auch Abtastfehler beim Abfragen der Spuren der Codescheibe an den Übergangsstellen entstehen können. Winkelkodierer, z.B. mit redundanten Abtasteinrichtungen, können jedoch zur Bestimmung der Drehposition verwendet werden. Aus zwei Gründen wurde aber zu Gunsten der Positionsbestimmung mit einer Lichtschranke entschieden: Zum einen wäre zum Einlesen des Parallelcodes von einem Winkelkodierer eine zusätzliche Schnittstelle des Steuer-PC notwendig, und zum anderen erforderte die Platzierung des Winkelkodierers im Multiplexer einen zusätzlichen Konstruktionsaufwand.

Der Vorteil der Lichtschranke ist dagegen, daß die binäre Information über nur eine elektrische Leitung zur Motorendstufe übertragen und über das Statusregister des Parallelports als TTL-kompatibles Signal in den PC eingelesen wird.

Im Einkanal-LWL-Multiplexer sind die Steuerungsplatinen auf der gleichen Grundplatte mit dem Schrittmotor und dem mechanischen Teil des Multiplexers montiert. Durch die Motorsteuerung kann per Jumper ein Voll-, 1/2, 1/4 - und 1/8 - Schrittbetrieb eingestellt werden, was der Schrittauflösung von 0,9; 0,45; 0,225 und 0,1125 Grad entspricht.

Alle elektronischen Komponenten wurden in den entwickelten LWL-Multiplexern nach dem modularen Prinzip aufgebaut. Die elektrischen Verbindungen sind lösbar ausgeführt, so daß alle Module wie der Schrittmotor, die Lichtschranke, die Lichtschrankenelektronik sowie das Motor-Parallelinterface und die Motorendstufe leicht ausgesteckt und einzeln ausgetauscht werden können.

### **3.5 Steuerungssoftware**

Für die Ansteuerung der entwickelten LWL-Multiplexer wurden verschiedene Steuerungsprogramme in PASCAL und LabView erstellt, im Laufe mehrerer Experimente optimiert und zum on-line Betrieb bei automatischen Messungen bei Dauerbetrieb in verschiedenen Sensorsystemen angepaßt.

Beim Starten des Steuerungsprogramms muß über die Tastatur die Nummer des umzuschaltenden optischen Ausgangs, bei wiederholten Messungen auch die Anzahl der Umschaltungen sowie die Schaltreihenfolge und Schaltgeschwindigkeit eingegeben werden.

Gemäß dem Steuerungsprogramm erfolgt bei jedem Schaltvorgang zuerst die Suche der Nullposition der Motorachse. Der Motor wird dabei in einer Richtung so lange gedreht, bis die Nullposition erreicht wird. Die Änderung des Status-Bits im Register des Parallelinterfaces bei

Erreichen der Nullposition wird vom Steuerungsprogramm in den Rechner eingelesen. Der Motor wird gestoppt, und von der gefundenen Nullposition aus wird die vorgegebene Anzahl der Schritte vom Motor ausgeführt. Die Suche der Nullposition und die Ausführung der Schritte erfolgt in verschiedenen Drehrichtungen, um mögliche Ungenauigkeiten der Nullpositionseinstellung z.B. durch den Versatz der Fahne gegenüber der Übermittlungsfaser infolge von Vibrationen des Schrittmotors bei Dauerbetrieb auszugleichen.

Um die Schaltzeit und den Schaltaufwand zu minimieren, wird im Steuerungsprogramm auch die Nummer der Ausgangsposition berücksichtigt. Abhängig von der umzuschaltenden Ausgangsposition (0 bis 5 oder 6 bis 9) wird die Drehrichtung vom Steuerungsprogramm automatisch ausgewählt und eingestellt.

Die Schaltgeschwindigkeit ist in einem breiten Bereich vom Steuerungsprogramm aus durch DELAY- Befehle und Warteschleifen einstellbar. Durch die direkte Zugriffsmöglichkeit auf Register der Parallelschnittstelle über PORT-Befehle können hohe Taktraten erzielt werden.

Bei der eingeführten Rückkopplung wird das übertragene Lichtsignal am Ausgang des LWL-Multiplexers gemessen, das Meßergebnis vom Steuerungsprogramm durch A/D-Wandlerkarte in den Steuer-PC eingelesen und entsprechend der Vorgabe dargestellt: Entweder On-Line als „laufende Linie“ auf dem Bildschirm nach Oszilloskop-Darstellung, als Tabelle der Meßergebnisse oder als ASCII-Datei.

Neben dem Steuerungsprogramm, nach dem eine vorgerechnete Anzahl von Schritten zur vorgegebenen Ausgangsposition ausgeführt wird, wurden auch Programme zur automatischen Justierung des LWL-Multiplexers sowie zur Festwertregelung der übertragenen Lichtintensität erstellt. Diese sind ausführlich in den Abschnitten 9.5.2 bzw. 11.2 beschrieben.

Für die Experimente auf Reproduzierbarkeit des LWL-Multiplexers im vollautomatischen Dauerbetrieb wurde ein spezielles Steuerungsprogramm erstellt. Nach diesem Programm wird der Schrittmotor zum Vergleich mit und ohne automatischer Justierung angesteuert. Dabei werden nacheinander zwei Fotodetektoren - vor der Einkopplung des Lichtes in den LWL-Multiplexer und am Ausgang des LWL-Multiplexers - abgefragt und alle Meßergebnisse automatisch in eine ASCII-Datei zur Auswertung im PC eingespeichert.

## **4 Entwicklung eines Zweikanal-LWL-Multiplexers für die zeitaufgelöste laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie**

### **4.1 Anforderungen an einen LWL-Multiplexer zur zeitaufgelösten Fluoreszenzspektroskopie**

Der weitere Teilbereich der Arbeit bestand in der Entwicklung eines Zweikanal-LWL-Multiplexers für ein Meßsystem zur zeitaufgelösten Fluoreszenzspektroskopie. Auf Basis des Zweikanal-LWL-Multiplexers sollte ein Multiplexer-System mit mehreren faseroptisch geführten Fluoreszenzsensoren aufgebaut werden. Das Multiplexer-System sollte sowohl für die on-line Prozeßüberwachung und -steuerung an der UV/Ozon-Anlage [66] als auch für verschiedene hydrogeologische und elektrochemische Messungen einsetzbar sein.

Das Meßprinzip des Sensorsystems basiert auf der zeitaufgelösten laserinduzierten Fluoreszenzspektroskopie, bei der dreidimensionale Fluoreszenzspektren der zu analysierenden Stoffe aufgenommen werden. Die Fluoreszenzspektroskopie ist eine hochempfindliche analytische Methode, die auf der Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit Molekülen beruht [67-70]. Durch die Absorption der in die Probe eingestrahlten Photonenenergie werden die Probenmoleküle in einen angeregten Zustand versetzt. Bei strahlender Relaxation der angeregten Moleküle in den Grundzustand wird die Energie durch die Lichtemission abgegeben. Das in einem bestimmten Wellenlängenbereich emittierte Fluoreszenzlicht enthält Informationen über die qualitative und quantitative Zusammensetzung der Probe und wird detektiert. Bei einer gepulsten Anregung wird als dritte Dimension die Fluoreszenz-Abklingzeit aufgenommen. Durch zeitaufgelöste Messungen werden zusätzliche analytische Informationen gewonnen [71-76].

In den meisten faseroptisch geführten Fluoreszenzsensoren wird das Anregungslicht durch eine Anregungsfaser der Probe zugeführt. Das emittierte Fluoreszenzlicht wird in eine Detektionsfaser eingekoppelt und über sie zu einer Detektionseinheit geleitet. Die allgemeine Anforderung an optisches Multiplexen in einem optisch/spektroskopischen sowie photometrischen Meßsystem ist folglich dadurch bedingt, daß jeder Fluoreszenz-, sowie Transmissions-Sensorkopf, mindestens zwei Lichtwellenleiter - eine Anregungsfaser und eine Detektionsfaser - aufweist, die gleichzeitig umgeschaltet werden müssen. Da das Meßsignal in solchen Sensorsystemen ein optisches Signal ist, dessen Detektion praktisch gleichzeitig mit der Anregung erfolgt, soll dementsprechend der LWL-Multiplexer zwei Übertragungskanäle

aufweisen: Den ersten zur Übertragung des Anregungslichtes zum Sensorkopf und den zweiten zur Übertragung des Lichtsignals vom Sensorkopf zum Fotodetektor.

Die weiteren Anforderungen an den LWL-Multiplexer sind durch das Meßprinzip der Signalerzeugung bei zeitaufgelöster Fluoreszenzspektroskopie zur quantitativen Analyse festgelegt.

Die abklingende Fluoreszenzintensität bei einer gepulsten Anregung kann durch eine Exponentialfunktion beschrieben werden [75]:

$$I(\lambda, t) = \frac{A(\lambda)}{\tau} \exp(-t/\tau), \quad (4.1)$$

wobei die analytische Information in den Amplituden  $A(\lambda)$  zum Zeitpunkt  $t = 0$  und den Zeitkonstanten  $\tau$  enthalten ist. Die Zeitkonstante  $\tau$  zeigt, nach welcher Zeit die Intensität  $I$  auf das  $1/e$  des Anfangssignals bei  $t = 0$  abgefallen ist.

Bei einer Messung in einem realen Meßsystem stellt das Fluoreszenz-Meßsignal  $I_{Fl}(\lambda, t)$  die Faltung des Abklingverlaufs der Fluoreszenz  $I(t, \lambda)$  mit der Impulsantwort  $E(t)$  des Meßsystems dar [76]:

$$I_{Fl}(\lambda, t) = \int_0^t E(t') I(\lambda, t - t') dt' = \int_0^t E(t') \frac{A(\lambda)}{\tau} \exp(-(t - t')/\tau) dt'. \quad (4.2)$$

Hier berücksichtigt die Impulsantwort  $E(t)$  das Zeitverhalten des gesamten Übertragungs- und Detektionssystems, d.h. des Lasers, des LWL-Multiplexers, des Photodetektors und des Oszilloskops.

Somit ergibt sich aus (4.2) als weitere Anforderung an den LWL-Multiplexer in einem Meßsystem für zeitaufgelöste Fluoreszenzspektroskopie ein unverändertes Zeitprofil der übertragenen Laserpulse und Fluoreszenz-Abklingkurven im Nanosekundenbereich (bei einer Pulshalbwertbreite von 3 - 4 ns).

Das Meßsignal - die Fluoreszenzintensität  $I_{Fl}$  - ist direkt proportional der Intensität des in die Probe eingekoppelten Anregungslichts  $I_0$ , der Konzentration  $C$ , dem Absorptionskoeffizient  $\mu_a$  und der Quantenausbeute  $q$  des Analyten und wird generell von der Meßgeometrie, insbesondere von der Schichtdicke  $d$ , beeinflusst [77 ]:

$$I_{Fl} \propto I_0 C q \mu_a d. \quad (4.3)$$

Deswegen ist für hochempfindliche und genaue Fluoreszenzmessungen eine hohe Übertragungseffizienz und Reproduzierbarkeit der Lichtleistungs- und Signalübertragung durch den LWL-Multiplexer erforderlich.

So können die wesentlichen Anforderungen an einen LWL-Multiplexer in einem Meßsystem für zeitaufgelöste Fluoreszenzspektroskopie zusammengefaßt werden: Gleichzeitiges Umschalten der Anregungs- und Detektionsfasern zu jedem Sensorkopf, verzerrungsfreie Übertragung der Laserpulse und Fluoreszenzsignale bei unverändertem Zeitprofil, hohe Effizienz und Reproduzierbarkeit der Lichtleistungs- und Signalübertragung.

Erforderliche Betriebseigenschaften bei der Funktion in einem Automatisierungssystem sind dabei kurze Umschaltzeiten, geringe mechanische Beanspruchung der Glasfasern, gute Handlichkeit und Zuverlässigkeit.

Auf Grundlage der oben beschriebenen Anforderungen wurde der Zweikanal-LWL-Multiplexer entwickelt und gebaut [109], der in den folgenden Abschnitten präsentiert wird.

## **4.2 Aufbau und Funktionsweise des Zweikanal-LWL-Multiplexers**

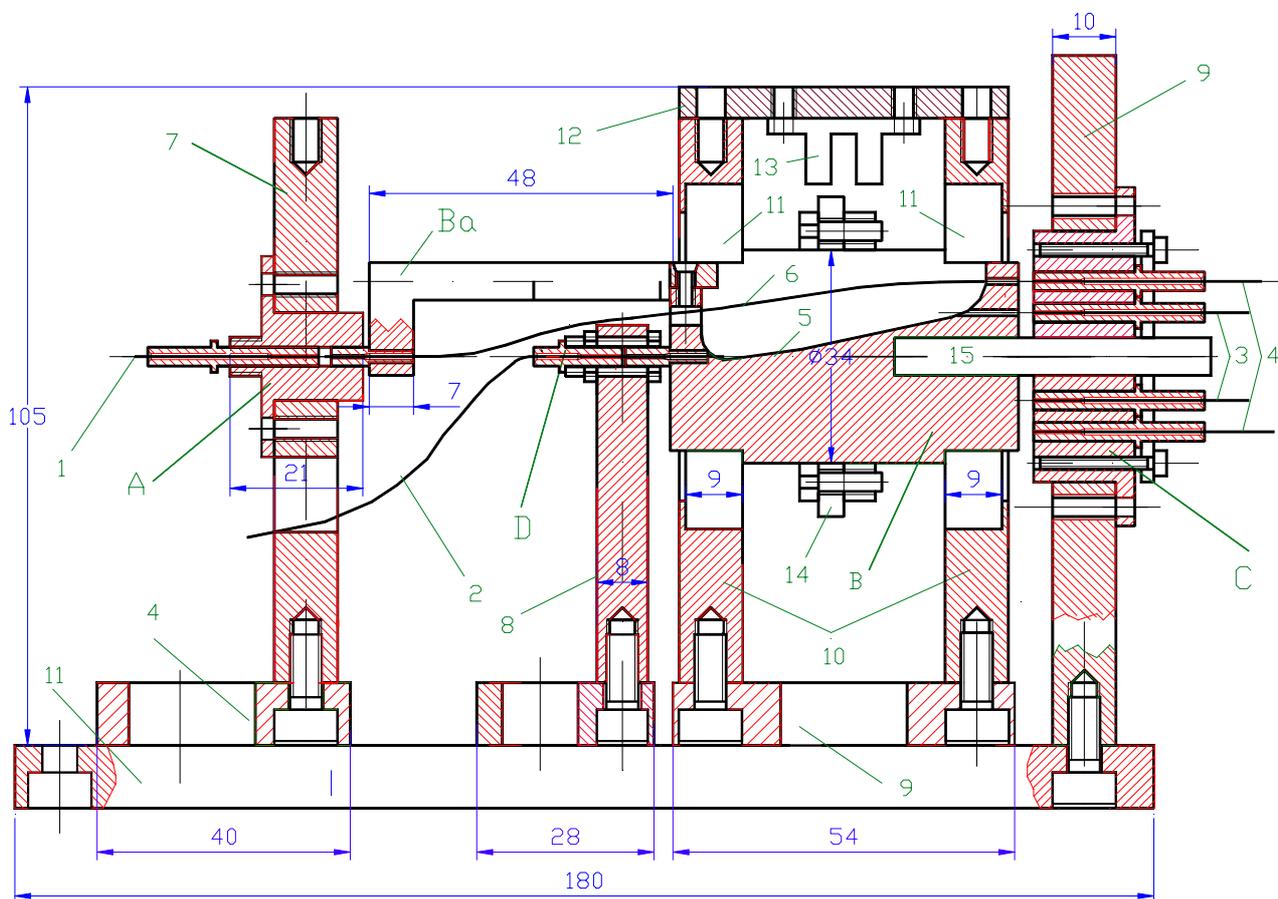
Ausgehend von den oben beschriebenen Anforderungen wurden verschiedene Konfigurationsmöglichkeiten eines Multiplexer-Systems und entsprechende Aufbauformen des LWL-Multiplexers für die laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie betrachtet.

So konnte der LWL-Multiplexer entweder in die Kopplungseinheit des verwendeten Lasermoduls eingebaut, damit das Laserlicht direkt in die Übertragungsfaser eingekoppelt wird, oder als einzelnes Gerät konzipiert werden. Vorteile der ersten Variante liegen darin, daß mindestens zwei Verbindungsstellen der Glasfasern eingespart werden, was entsprechende Lichtverluste für das Gesamtsystem minimiert und eine höhere Meßempfindlichkeit bei einer eingeschränkten Laserleistung ermöglicht. Vorteil der zweiten Variante ist, daß der LWL-Multiplexer konstruktiv als universelles Gerät ausgeführt wird und somit in jedem spektrometrischen oder photometrischen Sensorsystem eingesetzt werden kann. Weitere Aufbaumöglichkeiten sind dementsprechend mit einem oder mit zwei unterschiedlich angeordneten Drehteilen, die von einem oder von zwei Motoren angetrieben werden.

Aufgrund des Vergleichs verschiedener Aufbaumöglichkeiten nach dem oben beschriebenen Konzept wurde ein Zweikanal-LWL-Multiplexer für die laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie mit zwei optischen Eingängen und  $2 \times n$  optischen Ausgängen entwickelt, der in Abb. 4.1 vorgestellt ist. Mit diesem LWL-Multiplexer werden gleichzeitig zwei eingehende Glasfasern mit den zwei Gruppen ausgehender Glasfasern paarweise verbunden. Dadurch können zu jedem Sensorkopf gleichzeitig zwei Glasfasern - eine Anregungs- und eine Detektionsfaser - geschaltet werden. Über die Anregungsfaser wird jedem Sensorkopf Laserlicht zugeführt und gleichzeitig über die Detektionsfaser zu detektierendes, z.B. Fluoreszenzlicht, zum Fotodetektor zurückgeleitet.

Abb. 4.1 zeigt die Frontansicht des entwickelten Zweikanal-LWL-Multiplexers mit zwei optischen Eingängen und 2 x 7 optischen Ausgängen mit bereits optimierter Konstruktion durch die zusätzlich eingeführten Zentrierzylinder für die Übertragungsfasern und die Zentrierwelle für das Drehteil B zur besseren Zentrierung an den beiden optischen Verbindungsstellen für die zwei Übertragungskanäle bei „schwimmender Lagerung“ der entsprechenden Teile. Die Grundsätze der durchgeführten Optimierung der optischen Verbindungsstellen zur Steigerung der Übertragungseffizienz sind in Abschnitt 10 beschrieben.

Der Zweikanal-LWL-Multiplexer weist drei entlang einer gemeinsamen zentralen Drehachse angeordnete feste Teile A, C und D, das sind die Haltelemente zur Fixierung der eingehenden 1 und 2 bzw. zweier Gruppen 3 und 4 ausgehender Glasfasern, sowie ein Drehteil B auf, in dem zwei Übertragungsfasern 5 und 6 integriert sind.



**Abb.4.1: Zweikanal-LWL-Multiplexer mit 2 optischen Eingängen und 2 x 7 optischen Ausgängen, Frontansicht**

Die Koppelenden der eingehenden Glasfasern 1 und 2 sind in den Haltelementen A und D hintereinander in der Drehachse fixiert. Die ausgehenden Glasfasern zweier Ausgangsgruppen 3 und 4 sind im Teil C so befestigt, daß ihre Koppelenden auf zwei konzentrischen Kreisen mit dem Zentrum in der Drehachse angeordnet sind.

Die Übertragungsfasern 5 und 6 sind im Drehteil B so integriert, daß bei jeder Übertragungsfasern eines ihrer Enden in der Drehachse liegt, während ihr anderes Ende mit seiner optischen Achse in derselben Zylinderfläche mit den optischen Achsen der ausgehenden Glasfasern der entsprechenden Ausgangsgruppe angeordnet ist. Zum Einlegen des Einkoppelendes der zweiten Übertragungsfasern 6 ist das Drehteil B mit einer Haltekonstruktion, dem Schwenkarm B(a) versehen. Somit liegen im Drehteil B die Einkoppelenden der Übertragungsfasern 5 und 6 in der Drehachse den Koppelenden der entsprechenden Eingangsfasern 1 und 2 gegenüber, und ihre Auskoppelenden sowie die optischen Achsen der Ausgangsfasern 3 und 4 im Teil C liegen parallel zur Drehachse in einem Abstand von ihr, der dem jeweiligen Drehradius entspricht. Durch diese Anordnung werden die Auskoppelenden jeder Übertragungsfasern bei Rotation des Drehteils den Koppelenden der entsprechenden Ausgangsfasern gegenübergestellt. Durch diese technische Lösung werden bei jedem Schaltvorgang gleichzeitig zwei optische Eingänge zu den entsprechenden zwei optischen Ausgängen durchgeschaltet.

Die Halteelemente A und D zur Fixierung der Eingangsfasern 1 und 2 sind jeweils in einem Stützaufbau 7 bzw. 8 befestigt. Das Teil C ist an der Frontplatte 9 des LWL-Multiplexers angebracht, was den einfachen Anschluß der Faserstecker ermöglicht. Das Drehteil B ist in einem weiteren Stützaufbau 10 mit den Lagern 11 drehbar gelagert. Auf dem Stützaufbau 10 ist die Rasterplatine 12 mit der Lichtschranke 13 montiert. Die Stützaufbauten 7, 8 und 10 bestehen aus vertikalen Platten, an denen die Teile A, D und C mittels jeweils einer Flanschverschraubung fixiert sind, und entsprechenden horizontalen Platten. Am Drehteil sind das Zahnrad sowie ein Ring mit der Fahne zur Positionsbestimmung aufgesetzt. Der Schrittmotor ist in einem entsprechenden Stützaufbau parallel zur Drehachse angeordnet.

Vorteile dieser technischen Lösung sind unter anderem gleichzeitiges Umschalten beider Glasfasern zu jedem Sensorkopf bei vollständiger mechanischer Entlastung, ein kompakter Aufbau und leichte Handhabung durch den einfachen Anschluß von Sensorköpfen an den LWL-Multiplexer.

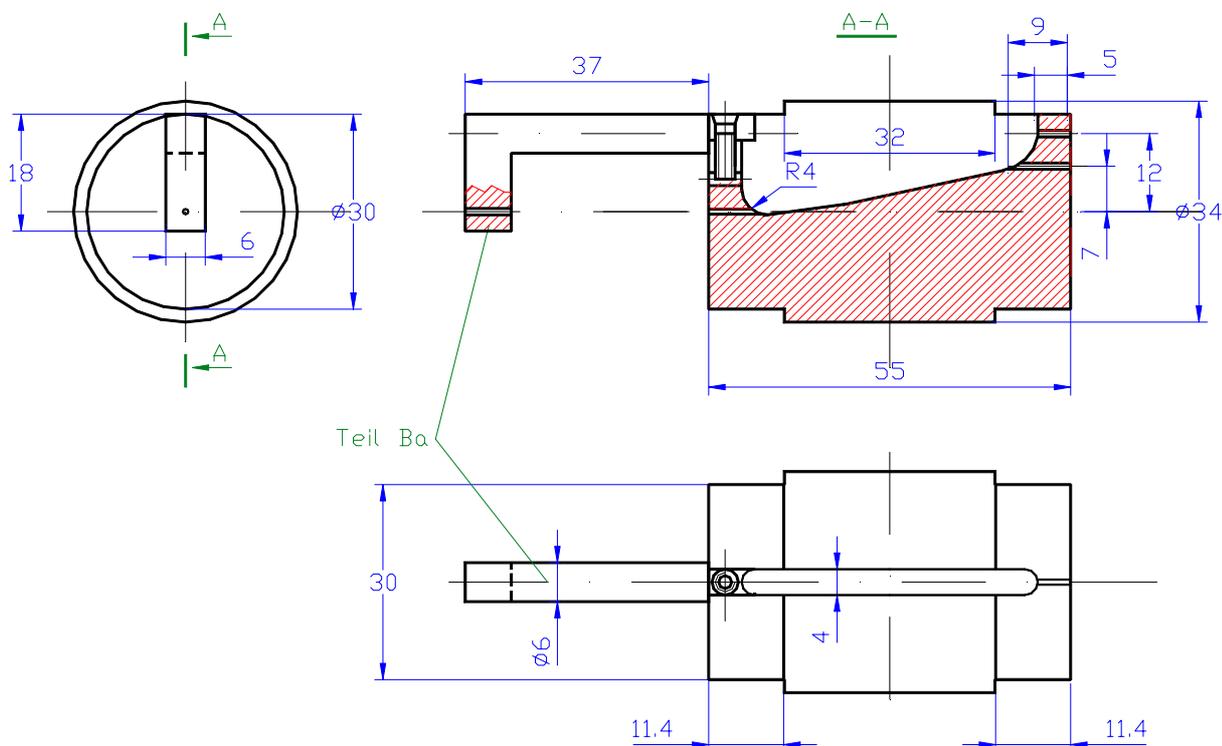
Während beim Entwurf des ersten Prototyps vorrangig technische Funktionskriterien zur verzerrungsfreien Lichtübertragung gemäß oben beschriebenen Anforderungen zu den Übertragungsbedingungen der optischen Signale herangezogen wurden, wurde bei den Weiterentwicklungen sowie beim Entwurf des Zweikanal-Multiplexers daneben grösserer Wert auf bedienungsfreundliche Gestaltung und Handlichkeit gelegt.

Bei der Auswahl der Bauform und Auslegung der Konstruktionselemente wurde auch ein minimierter Fertigungsaufwand berücksichtigt.

### 4.3 Dimensionierung, Auslegung der Konstruktionselemente und Baugruppen

Die Auslegung der Bauteile und der Konstruktionselemente des Zweikanal-LWL-Multiplexers wurde ausgehend vom verwendeten Typ der Glasfasern unter Berücksichtigung oben genannter Anforderungen, der benötigten Anzahl der optischen Ausgänge sowie einer ausreichenden mechanischen Stabilität durchgeführt.

Entsprechend dem Einkanal-LWL-Multiplexer bestimmt im wesentlichen die Gestaltung des Drehteils mit den zwei integrierten Übertragungsfasern als Hauptelement der Konstruktion die Abmessungen anderer Bauteile und Baugruppen. Aufgrund des minimal zulässigen Biegeradius für die verwendete Glasfaser  $R_b$  werden die Drehradien  $R_1$  und  $R_2$  der ersten und der zweiten Übertragungsfasern, d.h. die Radien ihrer Kreisbahnen bei Ausführung der Schaltvorgänge gemäß (3.5) berechnet. Für die verwendeten Quarz-Quarz-Glasfasern HCG-550 mit einem Kerndurchmesser von  $550 \mu\text{m}$  und einem minimal zulässigen Biegeradius von  $94 \text{ mm}$  betragen die Drehradien der ersten und zweiten Übermittlungsfaser  $7 \text{ mm}$  bzw.  $12 \text{ mm}$ . Durch die Drehradien der Übertragungsfasern werden weitere konstruktive Abmessungen des Drehteils sowie entsprechende Maße des Teile C festgelegt.

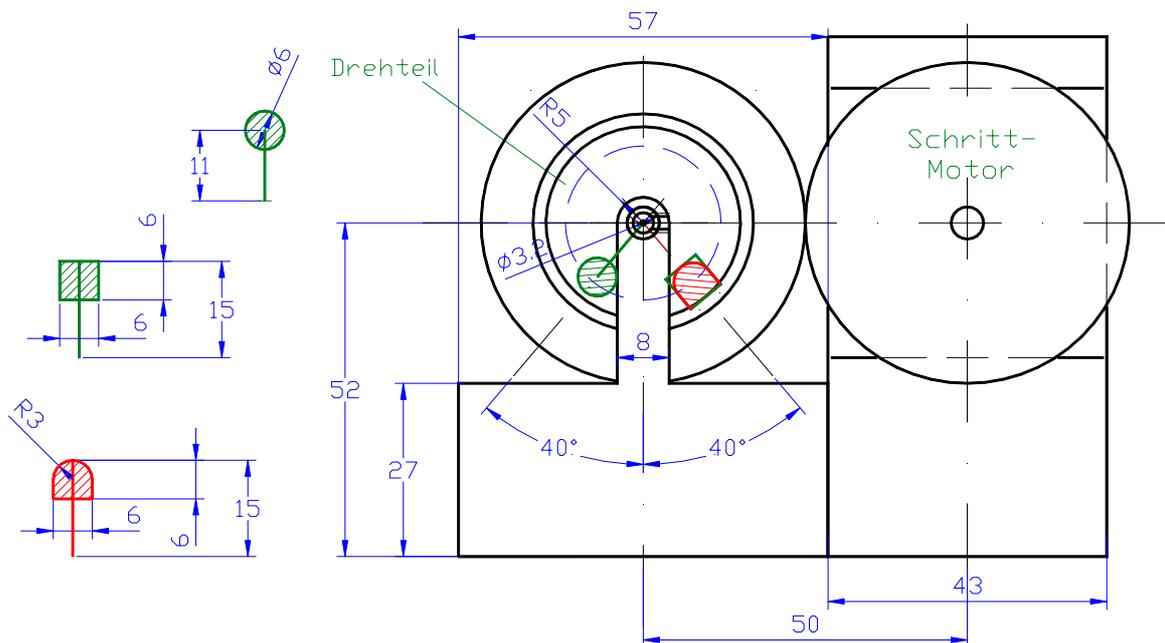


**Abb. 4.2 : Drehteil mit dem Schwenkarm und mit zwei Übertragungskanälen**

Das Drehteil B ist als ein zylindrisches Teil ausgeführt (Abb. 4.2). Es ist mit einem radial eingefrästen Schlitz und vier entsprechend angeordneten Führungsbohrungen zum Verlegen der ersten und der zweiten Übertragungsfasern versehen. Die erste Übertragungsfasern wird in den

eingefrästen Schlitz und die entsprechenden Führungsbohrungen eingelegt. Das Schlitzprofil ist analog zum Einkanal-LWL-Multiplexer berechnet. Der Schwenkarm zur Fixierung der zweiten Übermittlungsfaser 6 ist mit dem Drehteil durch eine präzise Nutverbindung verschraubt und kann für verschiedene Einsatzzwecke ausgetauscht werden. Er ist mit einer Bohrung zum Einlegen des Einkoppelendes der zweiten Übermittlungsfaser versehen. Durch diese Konstruktion liegen die Einkoppelenden zweier Übertragungsfasern 5 und 6 hintereinander in der gemeinsamen Drehachse. Die Auskoppelenden der beiden Übermittlungsfasern liegen dabei an der gegenüberliegenden Stirnseite des Drehteils B radial übereinander. Dazu sind im Drehteil zwei achsenparallele Bohrungen mit einer Länge von 5 mm und 7 mm vorgesehen.

Im gefertigten Zweikanal-LWL-Multiplexer mit 2 optischen Eingängen und 2 x 7 optischen Ausgängen hat das Drehteil einen Durchmesser von 34 mm und eine Länge von 55 mm. Die austauschbaren Schwenkarme sind mit den Längen 37 und 50 mm gefertigt. Generell muß bei der Auslegung des Schwenkarms die mechanische Stabilität, insbesondere im Zusammenspiel mit den anderen Baugruppen, berücksichtigt werden. Zur Berechnung des optimalen Querschnittsprofils über die Länge wurde die Bahn des Schwenkarmes bei der Drehbewegung des Drehteils modelliert, wie es in Abb. 4.3 gezeigt ist.

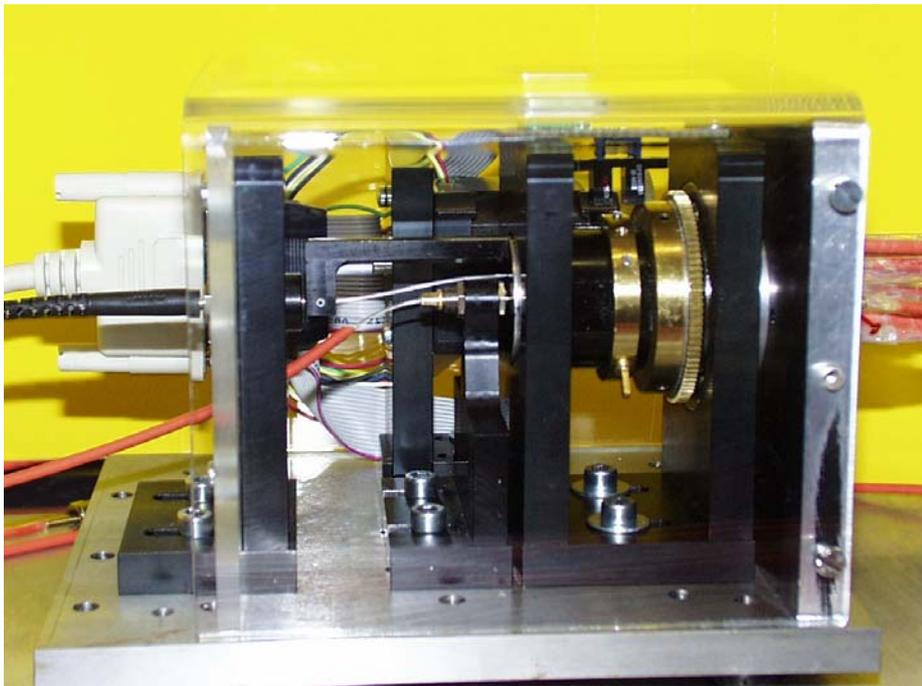


**Abb. 4.3 : Modellierung des Bahnverlaufs zur Dimensionierung des Schwenkarms**

Zur Berechnung des Profils des Schwenkarms mußte ein Kompromiß zwischen der mechanischen Stabilität einerseits und dem maximalen Ausschlag des Drehteils andererseits gefunden werden.

Die Halteelemente A und D für die Eingangsfasern sind jeweils als eine Hülse mit einer axialen durchgehenden Bohrung zum Einlegen der Eingangsfasern ausgeführt. Das Halteelement C für die Ausgangsfasern ist ebenfalls als zylindrisches Teil gefertigt und weist zwei Gruppen der auf

zwei konzentrischen Kreisen angeordneten achsenparallelen, durchgehenden Bohrungen zur Aufnahme der Ausgangsfasern auf. Der Winkelabstand zwischen benachbarten Ausgangspositionen beträgt  $45^\circ$ , was der Schrittauflösung des eingesetzten Schrittmotors mit  $0,9^\circ$  entspricht. Der Durchmesser der Bohrungen ist zum Einsatz der Standardstecker mit dem Durchmesser 3,2 mm ausgelegt. Zur besseren Handlichkeit werden die Ausgangsfasern in den Fasersteckern geführt. Die Bohrungen für die zu einem Sensorkopf führenden Glasfasern sind dabei auf einer radialen Linie angeordnet, was den Anschluß von Sensoren erleichtert. Eine Verschraubung der Faserstecker am Teil C ist vorgesehen.



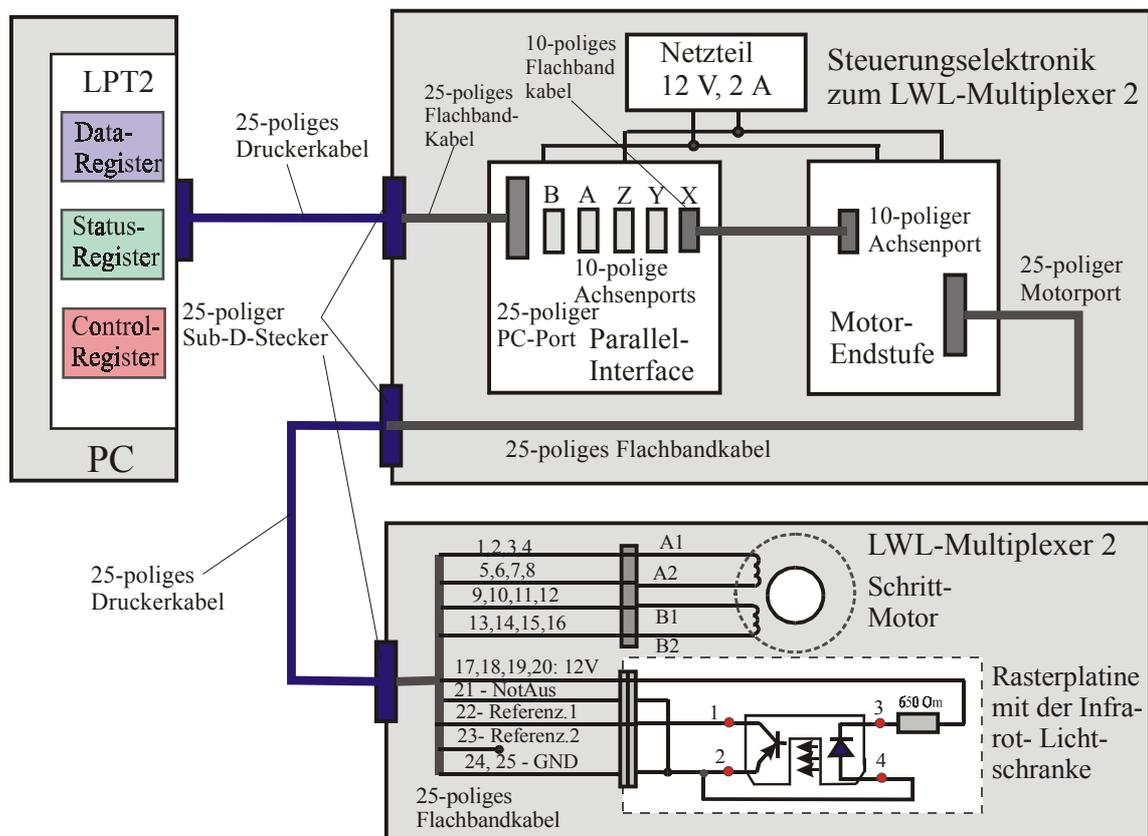
**Abb. 4.4:** Der Zweikanal-LWL-Multiplexer mit zwei optischen Eingängen und 2 x 7 optischen Ausgängen. Abmessungen des Drehteils: Durchmesser 34 mm, Länge 55 mm

Die Abb. 4.4 zeigt den gebauten Zweikanal-LWL-Multiplexer in einem 200x130x120 mm Plexiglasgehäuse. Die konstruktive Zeichnungen aller Bauteile und Baugruppen sind in Anhang aufgeführt.

#### 4.4 Ansteuerung

Der Zweikanal-LWL-Multiplexer wird von einem Zweiphasen-Schrittmotor angetrieben und durch einen PC über ein paralleles RS-232-Interface gesteuert. Als Antrieb wurde der Zweiphasen-Schrittmotor mit Vollschrittauflösung von 0,9 Grad der Firma VEXTA, Modell PK 245M-01B, verwendet.

Zum Zweikanal-LWL-Multiplexer wurde eine Steuerungseinheit, bestehend aus zwei elektronischen Platinen, Motor-Parallelinterface, Motorendstufe und dem Netzteil (12V, 2A) in einem extra Gehäuse gebaut. Über zwei an der Frontplatte des Gehäuses eingebaute 25-polige SUB-D-Stecker und entsprechende Druckerkabel ist die Steuerungseinheit mit dem PC und mit dem mechanischen Teil des LWL-Multiplexers verbunden (Abb. 4.5). Dementsprechend ist an der Rückwand des Zweikanal-LWL-Multiplexers ein 25-poliger SUB-D-Stecker montiert, über den die Verbindung zwischen dem Schrittmotor und der Lichtschranke einerseits und der Steuerungseinheit andererseits vorgenommen wird.



**Abb. 4.5:** Ansteuerung des Zweikanal-LWL-Multiplexers

Die Positionsbestimmung der Motorachse erfolgt durch Erkennung der Nullposition mit einer über dem Drehteil angeordneten Infrarot-Gabellichtschranke. Die Funktionsweise ist in Abschnitt 3.4 zum Einkanal-LWL-Multiplexer ausgeführt.

Durch die in Pascal und LabView erstellte Software werden auch beim Zweikanal-LWL-Multiplexer die Nummer der umzuschaltenden Ausgangsposition, bei wiederholten Messungen auch die Anzahl der Umschaltungen sowie die Schaltreihenfolge und die Schaltgeschwindigkeit im Steuerungsprogramm eingestellt bzw. vorgegeben.

Besonderheiten der Motorsteuerung bei dem Zweikanal-LWL-Multiplexer sind dadurch verursacht, daß sein Drehteil durch Anschlag des Schwenkarms am Teil D keine volle Umdrehung ausführen kann. Deswegen wird die Motorachse bei der Suche der Nullposition in eine Richtung und bei anschließender Ausführung der Schritte in die andere Richtung gedreht.

Analog zum Aufbau des Einkanal-LWL-Multiplexers sind alle elektronischen Komponenten im Zweikanal-LWL-Multiplexer nach modularem Prinzip ausgeführt. Durch lösbare elektrische Verbindungen können alle Module wie der Schrittmotor, die Lichtschranke und die Steuerungsplatinen, z. B. zur Funktionsprüfung oder bei der Montage, leicht ausgetauscht werden. Durch die Rückkopplung kann bei jedem Schaltvorgang die On-Line Detektion und Anzeige des Ausgangssignals des LWL-Multiplexers in jeder Drehposition auf dem PC-Bildschirm erfolgen.

## 5 Charakterisierung statischer und dynamischer Eigenschaften der entwickelten Ein- und Zweikanal-LWL-Multiplexer

Ein LWL-Multiplexer in einem Sensorsystem kann als Übertragungselement charakterisiert werden, wobei seine Eigenschaften sowohl bezogen auf das übertragene Lichtsignal als auch bezogen auf das Steuerungssignal des Motorantriebs analysiert werden können. Bei Betrachtung des LWL-Multiplexers als Element eines optischen Übertragungssystems ist Eingangsgröße die Intensität des eingekoppelten Lichtes  $I_E(t)$  und Ausgangsgröße die Intensität des übertragenen Lichtes  $I_U(t)$ . Bei Betrachtung des LWL-Multiplexers hingegen als Element eines Steuerungs- oder Regelungssystems wird als Eingangsgröße das auf den Schrittmotor wirkende Steuerungssignal bzw. die einstellbare Winkelposition  $\varphi$  des Motorantriebs und als Ausgangsgröße die übertragene Lichtintensität  $I_U(\varphi)$  bzw. Übertragungseffizienz  $F(\varphi)$  angenommen.

Die erste Betrachtungsweise wurde zur Analyse der dynamischen Eigenschaften des Multiplexers bei Signalübertragung in optischen Sensorsystemen im Abschnitt 5.2 angewandt. Zur Charakterisierung statischer Eigenschaften des LWL-Multiplexers, z.B. seiner Übertragungseffizienz und Positionierungsgenauigkeit sowie beim Aufbau verschiedener Steuerungs- und Regelungssysteme, z.B. bei der automatischen Justierung des LWL-Multiplexers ist die zweite Betrachtungsweise zweckmäßig. Sie wurde in Abschnitt 5.1 sowie den Kapiteln 6 und 11 den Berechnungen zugrunde gelegt.

Zur Charakterisierung der gebauten LWL-Multiplexer hinsichtlich ihrer statischen und dynamischen Übertragungseigenschaften erfolgten die Messungen mit einem He-Ne- ( $\lambda = 632,8$  nm) und mit einem gepulsten  $N_2$ - Laser ( $\lambda = 337,1$  nm) in entsprechend aufgebauten Meßsystemen.

Die folgenden gezeigten Meßergebnisse (Abb. 5.2 und Abb. 5.3) betreffen einen noch nicht optimierten ersten Prototypen und dienen zur Erläuterung der Übertragungseinflüsse.

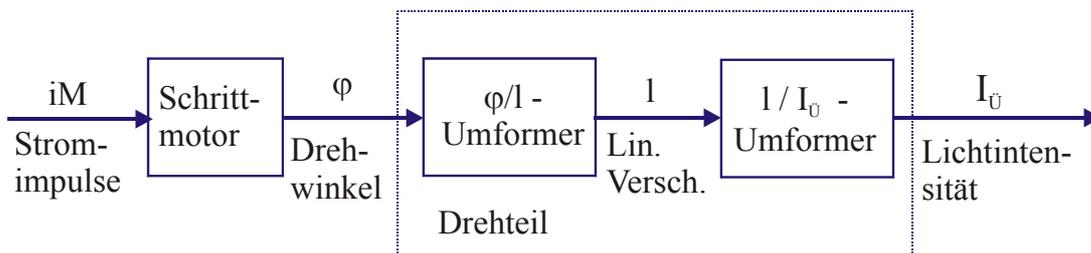
### 5.1 Statische Übertragungseigenschaften

Zu den wichtigsten statischen Eigenschaften eines LWL-Multiplexers gehören die Übertragungseffizienz und Positionierungsgenauigkeit sowie der Zusammenhang zwischen der Drehposition des Motorantriebs und der Übertragungseffizienz  $F(\varphi)$ .

Der Zusammenhang zwischen Drehwinkel und Übertragungseffizienz  $F(\varphi)$  kann als das Funktionsgesetz des LWL-Multiplexers [56] bezeichnet werden und ist in Kapitel 6 hergeleitet.

Die Berechnung der Übertragungseffizienz unter Berücksichtigung der auftretenden intrinsischen und extrinsischen optischen Verluste an den Faserverbindungsstellen ist in Kapitel 7 ausgeführt. Zur experimentellen Bestimmung der Übertragungseffizienz der gefertigten Prototypen wurden außerdem Messungen durchgeführt, die in Abschnitt 5.2 beschrieben sind. Da die beiden gebauten LWL-Multiplexer hauptsächlich für den Betrieb in Meßsystemen mit einer gepulsten Laserquelle vorgesehen sind, wurde die Übertragungseffizienz auch in einem Meßsystem mit gepulstem  $N_2$ -Laser bestimmt (Abb. 5.4). Auf Grundlage der summierten Abklingkurven (Abb. 5.5) und der Kalibrationsergebnisse konnte die Übertragungseffizienz des LWL-Multiplexers berechnet werden. Im durchgeführten Experiment beträgt sie 43 % für den Meßkanal 3, was auch dem Flächenverhältnis der Impulse nach (5.6) entspricht.

Der LWL-Multiplexer als Übertragungsglied kann als eine Funktionskette einzelner Funktionselemente strukturiert werden, wie es in Abb. 5.1 schematisch dargestellt ist.



**Abb. 5.1: Signalflußkette im LWL-Multiplexer nach Steuerungssignal**

Die Empfindlichkeit  $E_M$  des Schrittmotors charakterisiert den Winkel, um den die Motorachse bei einem Stromimpuls gedreht wird, und entspricht der Schrittauflösung  $A_M$ . Die Empfindlichkeit der Umformung zwischen dem Drehwinkel  $\varphi$  und linearer Verschiebung  $l$  der optischen Achse des Auskoppelendes der Übertragungsfaser im Drehteil kann aus geometrischen Zusammenhängen (Abb. 3.2) berechnet werden:

$$E_{\varphi/l} = \frac{dl}{d\varphi} = \frac{R \tan A_M}{A_M}$$

Sie wird bei der Dimensionierung des LWL-Multiplexers festgelegt und beträgt bei der Schrittauflösung  $A_M = 0,9^\circ$  und dem Drehradius  $R = 6 \text{ mm}$   $E_{\varphi/l} = 105 \text{ } \mu\text{m}/^\circ$ . Die

Empfindlichkeit  $E_{l/I_U} = \frac{dI_U}{dl}$  wird durch den Zusammenhang zwischen der übertragenen

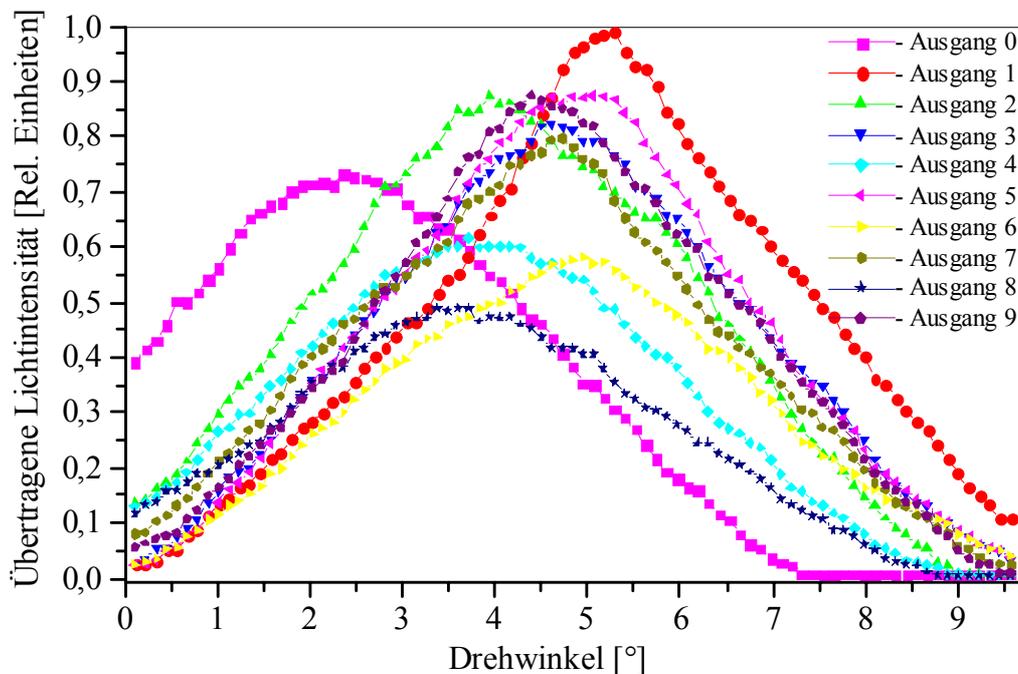
Lichtintensität  $I_{\tilde{U}}$  und der durch die Drehung verursachten linearen Verschiebung der optischen Achse der Übertragungsfaser  $l$  bestimmt. Die resultierende Funktionsempfindlichkeit des LWL-Multiplexers nach dem Steuersignal, bezogen auf übertragene Lichtintensität, ergibt sich aus den Funktionsempfindlichkeiten einzelner Strukturelemente und stellt eine nichtlineare Funktion dar:

$$E_{\varphi/I} = E_M E_{\varphi/l} E_{l/I} = R \tan A_M \frac{dI_{\tilde{U}}}{dl} = E_M E_{\varphi/I_{\tilde{U}}}$$

Das Verhältnis der Änderung der Übertragungseffizienz des Multiplexers  $F(\varphi)$  als Ausgangsgröße zum Winkelinkrement  $\Delta\varphi$  als Eingangsgröße charakterisiert ebenso die

Empfindlichkeit des LWL-Multiplexers gegenüber dem Steuersignal:  $E_{\varphi/F} = \frac{\Delta F(\varphi)}{\Delta\varphi}$  und kann

aus den unten vorgestellten Diagrammen abgelesen werden.

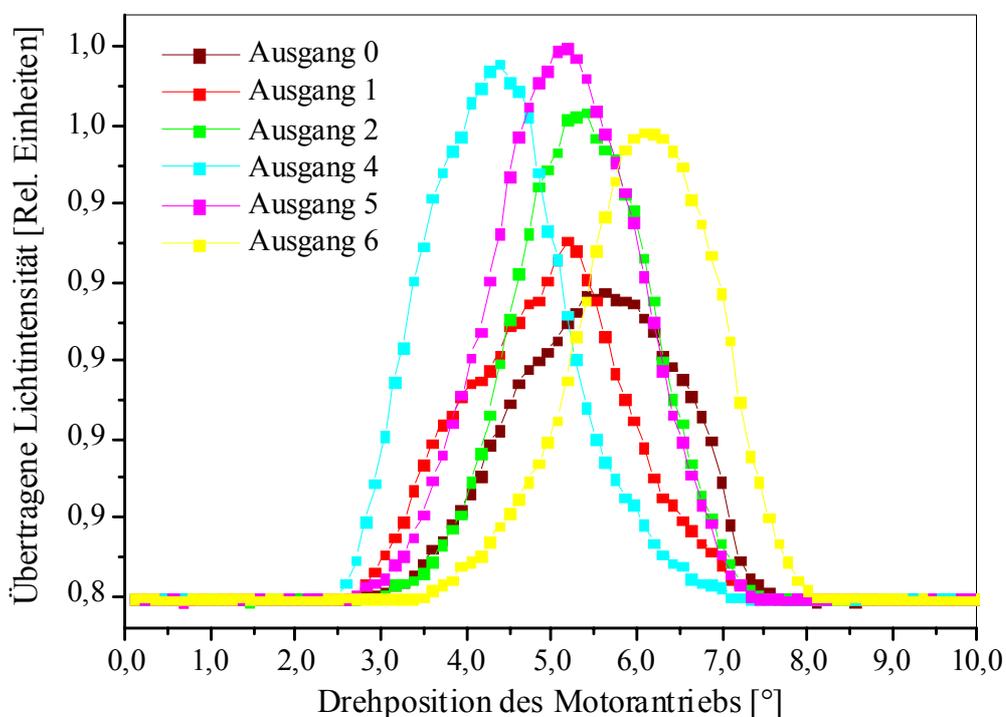


**Abb. 5.2:** Normierte Diagramme der Intensitätsverteilung für die optischen Ausgänge 0 bis 9 des Einkanal-LWL-Multiplexers bei  $0,1125^\circ$  Schrittauflösung, Drehradius 6 mm

Zur Untersuchung der Kopplungs- und Positionierungsmechanismen sowie des Einflusses von Fertigungstoleranzen auf die Übertragungseffizienz wurden Diagramme der Verteilung der Lichtintensität an jedem optischen Ausgang der Ein- und Zweikanal-LWL-Multiplexer beim Abfahren eines Bogenrasters durch den Schrittmotor in einem vorgegebenen Winkelbereich in der Umgebung des jeweiligen optischen Ausganges aufgenommen.

Dies entspricht der Nahfeldabtastung der Übertragungsfaser im Bogenraster und gibt alle extrinsischen [21,78] optischen Verluste an der Verbindungsstelle 2 wieder.

In Abb. 5.2 sind die Diagramme der Verteilung der Lichtintensität und dementsprechend der Übertragungseffizienz für alle zehn optischen Ausgänge, d.h. die Meßkanäle 0 bis 9 des Einkanal-LWL-Multiplexers, in Abhängigkeit vom Drehwinkel  $\varphi$  bei Ausführung der Rasterschritte von  $0,1125^\circ$  durch den Schrittmotor im Winkelbereich von  $9,5625^\circ$  vorgestellt. In Abb. 5.3 sind unter den gleichen Bedingungen aufgenommene Diagramme der Intensitätsverteilung an optischen Ausgängen des Zweikanal-Multiplexers für den zweiten Übertragungskanal gezeigt. Die Diagramme wurden mit der an die IC-Karte (ME-26 *Meilhaus Elektronik GmbH*) angeschlossenen Fotodiode (TSL-250 *Fa. Texas Instruments*) bei konstanter, in den LWL-Multiplexer eingekoppelter Lichtleistung des He-Ne-Lasers (1 mW) vom Steuerungsprogramm aufgenommen.



**Abb. 5.3: Normierte Diagramme der Intensitätsverteilung an optischen Ausgängen des Zweikanal-LWL-Multiplexers für den zweiten Übertragungskanal, bei  $0,1125^\circ$  Schrittauflösung, Drehradius 12 mm**

Aus diesen Diagrammen kann die Übertragungseffizienz des jeweiligen LWL-Multiplexers und ihre Änderung für jede Drehposition des Motorantriebs entnommen werden. So verursacht z. B. ein Winkelversatz von  $0,1125^\circ$  für die Ausgangsposition 1 eine Senkung der Übertragungseffizienz um 1,7 % ihres maximalen Wertes (Abb. 5.2). Wie den Diagrammen weiter entnommen werden kann, ist die Empfindlichkeit  $E_{\varphi/F}$  gegenüber dem Steuerungssignal nichtlinear und hängt vom Arbeitspunkt ab.

In den Verteilungsdiagrammen (Abb. 5.2 und 5.3) ist daneben auch der Einfluß von Fertigungstoleranzen auf die Übertragungseffizienz ersichtlich. Verschiedene Verteilungen der Lichtintensität bzw. der Übertragungseffizienz für verschiedene Ausgangspositionen sind durch die geometrische Anordnung der Faserenden an der Verbindungsstelle 2 durch die Auswirkung von Fertigungstoleranzen verursacht, wie es aus Abb. 6.1 sowie 10.2 erkennbar ist.

Die Größenunterschiede der Verteilungsdiagramme (Abb. 5.2 und 5.3) für verschiedene Ausgangspositionen werden vorwiegend durch die jeweiligen vertikalen Achsenversätze der zu koppelnden Glasfasern  $\delta_{vi}$  an der zweiten Verbindungsstelle verursacht. Die Verschiebung der Maxima der Verteilungsdiagramme gegeneinander in der  $\varphi$ -Achse ist durch den horizontalen Achsenversatz der zu koppelnden Glasfasern  $\delta_{Hi}$  bedingt.

Die unterschiedlichen Breiten der Verteilungsdiagramme für den ersten und zweiten Übertragungskanal des Zweikanal-LWL-Multiplexers sind aufgrund der Geometrie durch verschiedene Drehradien  $R_1$  und  $R_2$  der zwei Übertragungsfasern, das sind 7 mm für den ersten und 12 mm für den zweiten Übertragungskanal, zu erklären. Hierzu kann auch das mathematische Modell gemäß den Gleichungen (6.5) und (6.10) herangezogen werden, mit dem die Verläufe nach Abb. 5.2 und Abb. 5.3 in Abhängigkeit von den geometrischen Parametern des LWL-Multiplexers einerseits und vorkommenden Fertigungstoleranzen andererseits modelliert werden können.

## 5.2 Dynamische Übertragungseigenschaften

Dynamische Übertragungseigenschaften der LWL-Multiplexer können über die Sprungantwort, Impulsantwort oder im Frequenzbereich experimentell charakterisiert werden. Letzteres erschien im Hinblick auf die Pulsübertragung als besonders zweckmäßig.

Der übertragene Laserpuls kann durch seine zeitliche und räumliche Struktur, d.h. das zeitliche Intensitätsprofil  $I_{\varnothing}(t)$  und die Intensitätsverteilung  $I_{\varnothing}(r, z)$  charakterisiert werden. Zu den charakteristischen Parametern des Laserpulses gehören deswegen, neben der Pulsenergie und Wellenlänge, die Pulsdauer  $\tau_L$  und der Strahlradius  $\sigma_r$ , bei dem die Lichtintensität im Gaußstrahl auf 1/e ihres maximalen Wertes abfällt. Im folgenden Abschnitt wird der Einfluß der Pulsübertragung durch den LWL-Multiplexer auf das zeitliche Intensitätsprofil des Laserpulses untersucht. Der Einfluß der LWL-Multiplexer auf die räumliche Struktur des übertragenen Lichtes ist in Abschnitt 8.2.1 angeführt.

Bei Übertragung der Laserpulse  $I_E(t)$  mit einer Frequenz  $f$  durch den LWL-Multiplexer können die Zeitvorgänge durch entsprechende Spektralfunktionen  $S_{E,\bar{U}}(\omega)$  charakterisiert werden [41], die Fouriertransformierte jeweiliger Zeitfunktionen der eingekoppelten und der übertragenen Laserpulse  $I_{E,\bar{U}}(t)$  darstellen:

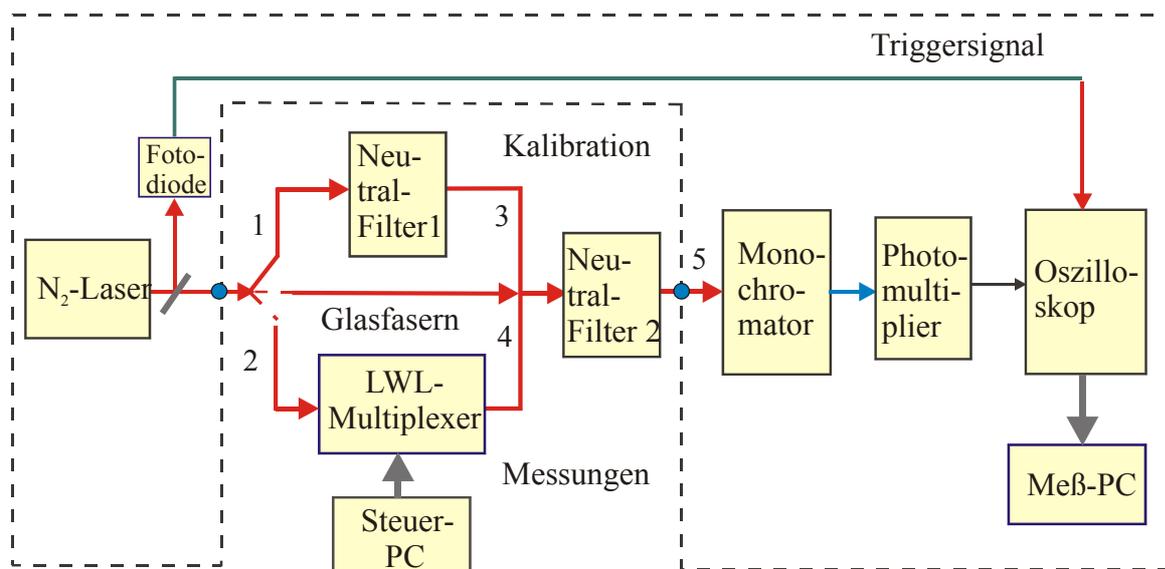
$$S_{E,\bar{U}}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} I_{E,\bar{U}}(t) \exp(-j\omega t) d\omega \quad (5.1)$$

und vollständige Informationen über die Gestalt der Laserpulse enthalten. Die Indizes  $E$  und  $\bar{U}$  weisen hier auf eingekoppeltes und übertragenes Licht hin. Die Kreisfrequenz ist hierbei  $\omega = 2\pi f$ .

Dementsprechend läßt sich die frequenzabhängige Übertragungsfunktion des LWL-Multiplexers  $H(\omega)$  als Übertragungselement als Quotient der Spektralfunktionen der übertragenen Lichtintensität als Ausgangsgröße  $S_{\bar{U}}(\omega)$  und der eingekoppelten Lichtintensität als Eingangsgröße  $S_E(\omega)$  definieren:

$$H(\omega) = \frac{S_{\bar{U}}(\omega)}{S_E(\omega)}. \quad (5.2)$$

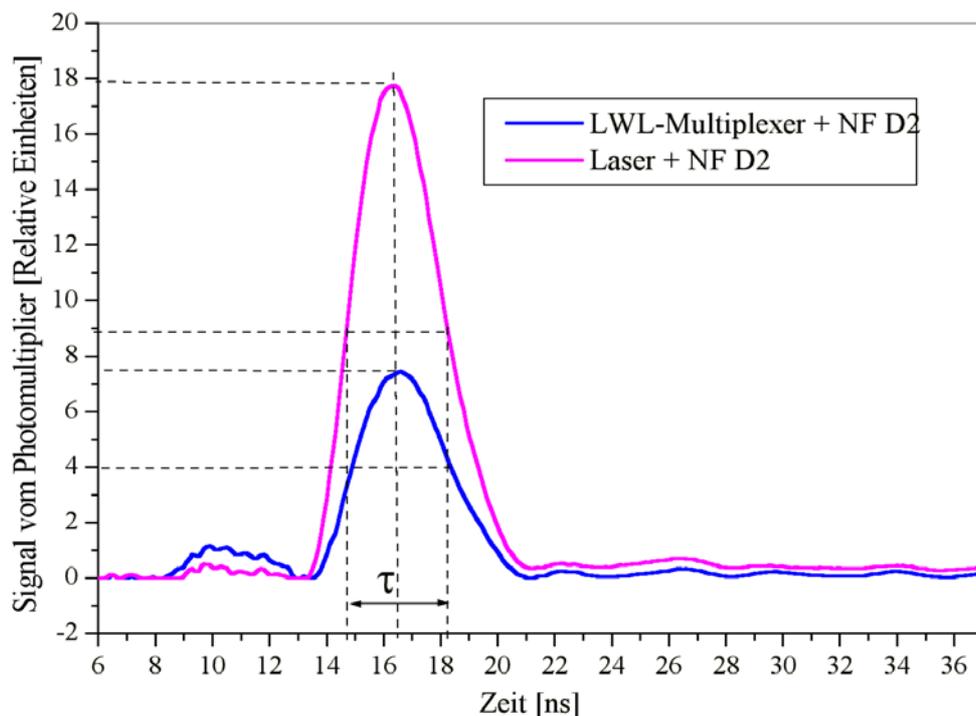
Bei den durchgeführten Experimenten zur Pulsübertragung wurden in den LWL-Multiplexer die Laserpulse  $I_E(t)$  endlicher Dauer eingekoppelt und die übertragenen Pulse  $I_{\bar{U}}(t)$  detektiert.



**Abb. 5.4:** *Meßanordnung zur Untersuchung dynamischer Übertragungseigenschaften des LWL-Multiplexers, 1-5-Glasfasern*

Messungen zur Charakterisierung dynamischer Eigenschaften des LWL-Multiplexers wurden im Meßsystem mit einem gepulsten  $N_2$ -Laser (Wellenlänge 337.1 nm, Pulsdauer 2 - 3 ns, Repetitionsrate 20 Hz) durchgeführt. Die Meßanordnung ist in Abb. 5.4 vorgestellt.

Die durch eine Glasfaser geführten Laserpulse wurden vor Einkopplung und nach Übertragung durch den LWL-Multiplexer aufgenommen. Der Monochromator wurde dabei auf die Laserwellenlänge 337,1 nm eingestellt. Die Signaldetektion erfolgte mit dem Photomultiplier (*H5773, Fa. Hamamatsu*), der zuvor im erforderlichen dynamischen Bereich für die Detektionswellenlänge  $\lambda = 337,1$  nm mit Neutralfiltern kalibriert wurde. Der Photomultiplier lieferte das Meßsignal an ein digitales Speicheroszilloskop (*TDS 620A, Fa. Tektronix*). Die aufgenommenen Laserpulse wurden nach Mittelung durch das Oszilloskop an den Meß-PC übertragen und weiter verarbeitet.



**Abb. 5.5:** Die im Meßsystem Abb. 5.4 aufgenommenen Laserpulse des  $N_2$ -Lasers vor Einkopplung und nach Übertragung durch den LWL-Multiplexer

Das Meßergebnis für die Ausgangsposition 3 bei einer Lichtabschwächung mittels Neutralfilter D2 (Lichttransmission 1%) ist in der Abb. 5.5 vorgestellt. Hier sind die vor Einkopplung und nach Übertragung durch den LWL-Multiplexer aufgenommenen Laserpulse aufgezeigt.

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, daß sich die zeitliche Struktur des Laserpulses nach Übertragung durch den LWL-Multiplexer nicht ändert.

Aus (5.2) folgt, daß die Zeitfunktion des übertragenen Pulses  $I_{\dot{U}}(t)$  als Faltungsprodukt des Eingangsimpulses mit der Impulsantwort  $h(t)$  berechnet werden kann:

$$I_{\dot{U}}(t) = I_{Ein}(t) * h(t).$$

Daraus ergibt sich: Wenn in den LWL-Multiplexer ein Laserpuls mit Gauß'scher Zeitfunktion

$$I_E(t) = \frac{A_E}{\sigma_E \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{t-t_E}{\sigma_E}\right)^2\right) \quad (5.3)$$

mit der Pulsfläche  $A_E$ , der Amplitude  $A_E/\sigma_E\sqrt{2\pi}$  und dem Zeitschwerpunkt  $t_E$  eingekoppelt ist, besitzt der übertragene Laserpuls ebenfalls die Zeitfunktion eines Gaußpulses  $I_{\dot{U}}(t)$  mit entsprechend der Dämpfung kleinerer Pulsfläche  $A_{\dot{U}}$  bzw. Amplitude  $A_{\dot{U}}/\sigma_{\dot{U}}\sqrt{2\pi}$  und dem Zeitschwerpunkt  $t_{\dot{U}}$ . Die Zeitschwerpunkte  $t_E$  und  $t_{\dot{U}}$  bestimmen die Pulsmitte, d.h. den Zeitpunkt, bei dem die jeweiligen Zeitfunktionen  $I_E(t)$  und  $I_{\dot{U}}(t)$  ihr Maximum erreichen; der Parameter  $\sigma_{E,\dot{U}}$  charakterisiert die Pulsbreite der eingekoppelten bzw. der übertragenen Laserpulse. Da sowohl der eingekoppelte wie auch der übertragene Laserpuls ein Gaußpuls im Zeitbereich gemäß (5.3) ist, stellen ihre Spektralfunktionen auch Gauß'sche Funktionen im Frequenzbereich dar:

$$S_{E,\dot{U}}(\omega) = A_{E,\dot{U}} \exp\left(-j\omega t_{E,\dot{U}} - \frac{1}{2}(\omega\sigma_{E,\dot{U}})^2\right). \quad (5.4)$$

Bei Signalübertragung durch einen Lichtwellenleiter verursacht allgemein die Dispersion der Gruppenlaufzeit eine Impulsaufweitung und beschränkt damit die Bandbreite der Übertragungsfunktion in analogen Sensorsystemen [79,80,81]. In den entwickelten LWL-Multiplexern ist aber bei einer Länge der Übertragungsfasern von 55 mm für den ersten und 70 mm für den zweiten Übertragungskanal die Auswirkung der Gruppenlaufzeitdispersion vernachlässigbar, was auch alle durchgeführten Experimente bestätigen.

Aus dem Diagramm Abb. 5.5 können die Zeitparameter  $\sigma_{E,\dot{U}}$  und  $\tau_{E,\dot{U}}$  der eingekoppelten und übertragenen Laserpulse bestimmt werden. Die experimentellen Ergebnisse (Abb. 5.5) zeigen, daß die zeitliche Struktur des Laserpulses bei Übertragung durch den Multiplexer unverändert bleibt, d.h., daß  $\sigma_E = \sigma_{\dot{U}}$  ist. Die Pulsdauer wird dabei nach  $\tau = \sigma\sqrt{2\pi}$  berechnet und bleibt ebenso unverändert. Deswegen kann beim Einsetzen des Ausdrucks (5.4) in (5.2) und unter

Berücksichtigung, daß  $\sigma_E = \sigma_U = \sigma$  ist, die Übertragungsfunktion des LWL-Multiplexers berechnet werden:

$$H(\omega) = \frac{S_U(\omega)}{S_E(\omega)} = \frac{A_U}{A_E} \exp(-j\omega(t_U - t_E)). \quad (5.5)$$

Die Laufzeit eines Lichtsignals durch den LWL-Multiplexer wird durch die Länge der Übertragungsfaser  $L_{1,2}$  und die Lichtgeschwindigkeit in der Glasfaser ( $c_n = 200000$  km/s) festgelegt. Die Schwerpunktlaufzeit, d.h. der Zeitabstand zwischen den Schwerpunkten der eingekoppelten und übertragenen Laserpulse  $\Delta t = t_U - t_E = L_{1,2}/c_n$ , beträgt bei oben genannter Faserlänge für den ersten bzw. zweiten Übertragungskanal 0,25 bis 0,3 ns. Deswegen kann der Exponentialterm im Ausdruck (5.5) im Frequenzbereich der Signalübertragung in den betrachteten Sensorsystemen ( $\leq 1$  KHz) als gleich 1 angenommen werden:  $\exp(-j\omega(t_U - t_E)) = 1$ . Somit ergibt sich aus (5.5) die Übertragungsfunktion des LWL-Multiplexers nach übertragenem Lichtsignal:

$$H(\omega) = \frac{S_U(\omega)}{S_E(\omega)} = \frac{A_U}{A_E} = K_U, \quad (5.6)$$

wobei hier  $K_U$  der Übertragungseffizienz des LWL-Multiplexers bei konstantem Drehwinkel entspricht und über das Verhältnis der Impulsflächen  $A_U$  und  $A_E$  die gesamten Lichtverluste charakterisiert.

Ausdruck (5.6) bedeutet, daß der entwickelte LWL-Multiplexer, betrachtet als Lichtübertragungselement, als ein verzögerungsfreies Glied klassifiziert werden kann, da das Ausgangssignal  $I_U(t)$  dem Eingangssignal  $I_E(t)$  folgt und ihm proportional ist:

$$I_U(t) = K_U I_E(t). \quad (5.7)$$

Aufgrund der nach (5.6) ermittelten Übertragungsfunktion  $H(\omega)$  kann auch die Übergangsfunktion  $I_U(t) = K_U \sigma(t)$  sowie die Amplitudengangfunktion  $A(\omega) = K_U = const$  und die Phasengangfunktion  $\varphi(\omega) = 0$  des LWL-Multiplexers berechnet werden. Dabei ist die Impulsantwort  $h(t)$  die Fouriertransformierte der Übertragungsfunktion  $H(\omega)$ .

Das Frequenzverhalten des LWL-Multiplexers als ein Übertragungsglied wird hauptsächlich durch die dynamischen Eigenschaften der verwendeten Übertragungsfasern festgelegt, die sich bei der Signalübertragung als Tiefpaß verhalten. So entspricht die Frequenzbandbreite des LWL-Multiplexers der Bandbreite der verwendeten Übertragungsfaser und liegt im GHz-Bereich.

### 5.3 Einfluß der Positionierungsgenauigkeit in den LWL-Multiplexern auf die Übertragungseigenschaften

Der Einfluß des LWL-Multiplexers auf die Lichtübertragung, insbesondere auf die Übertragungseffizienz sowie die zeitliche und räumliche Struktur des übertragenen Lichtes ist eine wichtige Charakteristik des LWL-Multiplexers und ist bei seinem Betrieb in verschiedenen Sensorsystemen von großer Bedeutung. Deswegen wurde das Übertragungsverhalten der entwickelten Ein- und Zweikanal-LWL-Multiplexer bei verschiedenen Einstellungen und unter verschiedenen Arbeitsbedingungen untersucht. Insbesondere wurde der Einfluß des Winkelversatzes auf die Übertragungseffizienz und die Übertragungsfunktion sowie der Einfluß des Abstandes zwischen den Faserenden auf die Intensitätsverteilung analysiert.

#### 5.3.1 Einfluß des Winkelversatzes auf die Signalübertragung

Der Zusammenhang zwischen der Übertragungseffizienz und dem Drehwinkel sowie die Abhängigkeit der Übertragungsfunktion von der Positionierungsgenauigkeit ist deswegen von Interesse, weil ein solcher Winkelversatz der Drehachse entweder infolge eines Positionierungsfehlers auftreten oder durch Regelung eingestellt werden kann.

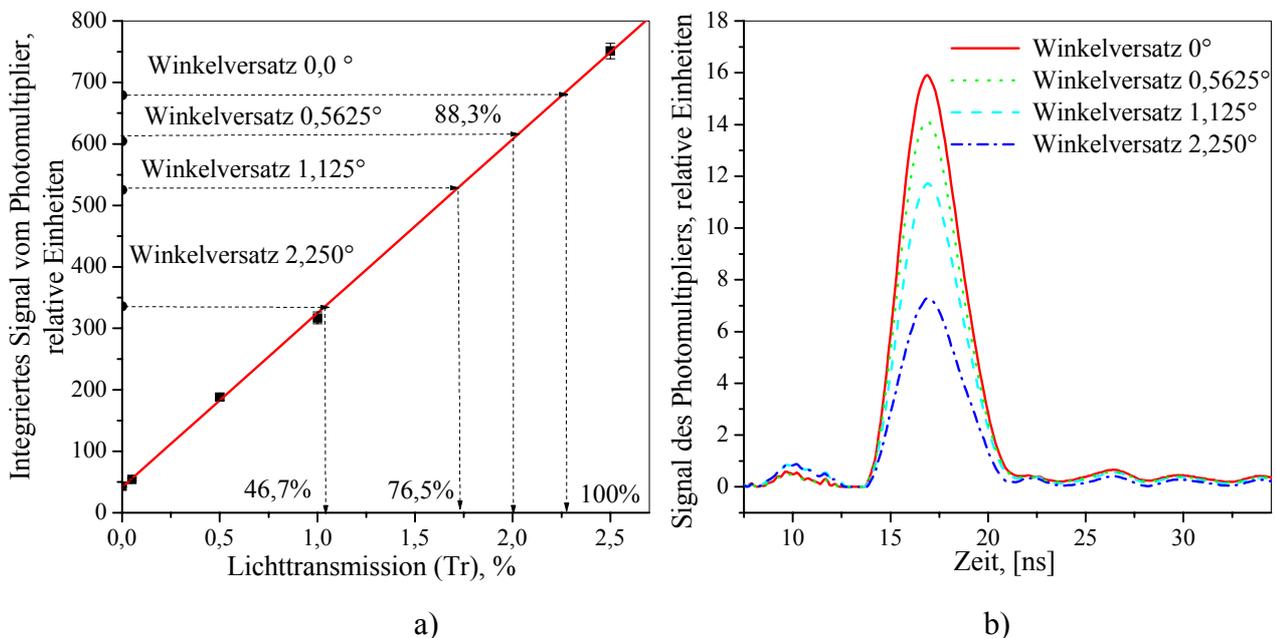
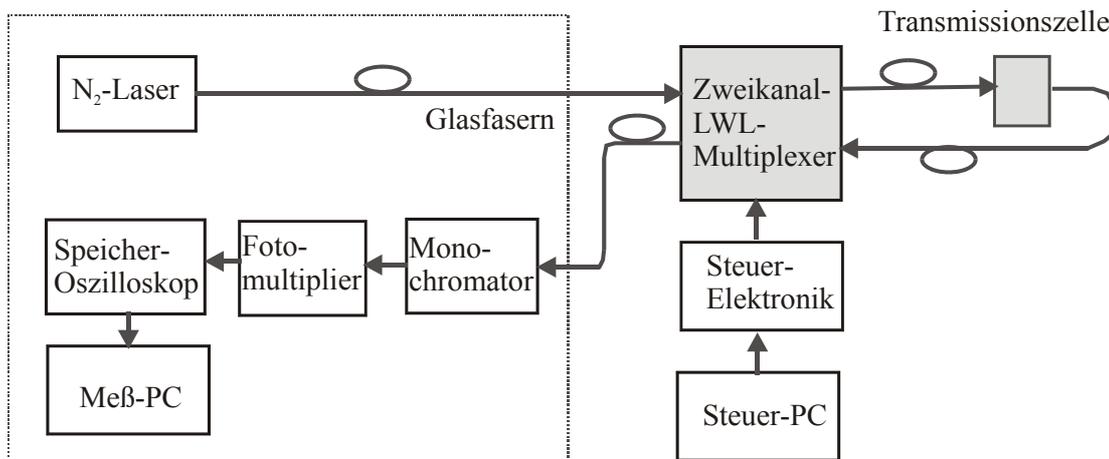


Abb. 5.6: Zur Bestimmung des Einflusses des Winkelversatzes auf die Übertragungseffizienz. a) Kalibrationsgerade des Photomultipliers b) Über den Einkanal-LWL-Multiplexer-1 übertragene Laserpulse bei verschiedenen Winkelversätzen der Motorachse für die Ausgangsposition 1

Um den Einfluß der Winkelposition  $\varphi$  bzw. des Winkelversatzes  $\Delta\varphi$  des Motorantriebs auf die Übertragungsfunktion des LWL-Multiplexers zu untersuchen, wurden beim Meßaufbau laut Abb. 5.4 durch die Motorsteuerung verschiedene Winkelversätze  $\Delta\varphi$  der Motorachse gegenüber der Drehposition mit maximaler Lichtübertragung  $\varphi_{\max}$  eingestellt und die entsprechenden Ausgangssignale, d.h. die Laserpulse nach Durchlauf durch die LWL-Multiplexer aufgenommen. Die Meß- und Auswertungsergebnisse für den Ausgang 1 des Einkanal-LWL-Multiplexers sind in den Abb. 5.6 a und b vorgestellt. In Abb. 5.6 b sind die vom Einkanal-LWL-Multiplexer übermittelten und bei entsprechender Abschwächung durch Neutralfilter detektierten Laserpulse bei verschiedenen vorgegebenen Winkelversätzen der Motorachse aufgezeigt. In Abb. 5.6 a ist die Kalibrationsgerade des Photomultipliers für  $\lambda = 337,1 \text{ nm}$  vorgestellt. Jeder Punkt der Kalibrationsgerade entspricht einer summierten Abklingkurve. Aufgrund der summierten Abklingkurven (Abb. 5.6.b) und der Kalibrationsergebnisse (Abb. 5.6.a) wurde die Übertragungseffizienz des LWL-Multiplexers bei verschiedenen Winkelversätzen bestimmt.

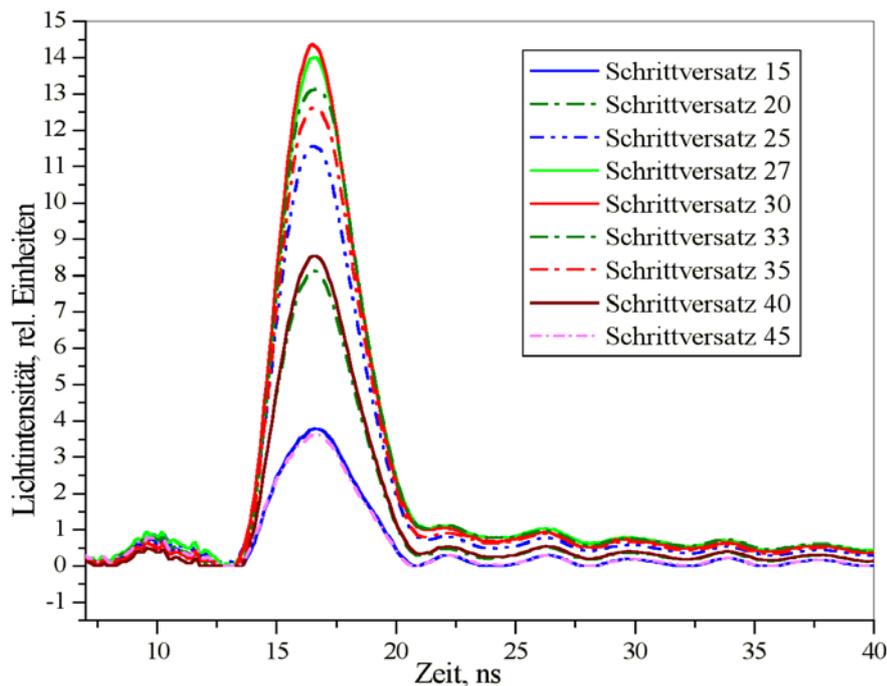


**Abb. 5.7: Meßanordnung zur Untersuchung des Einflusses des Winkelversatzes auf die Pulsübertragung durch den Zweikanal-LWL-Multiplexer**

Aus den Diagrammen Abb. 5.6 a und b ist ersichtlich, daß im Winkelbereich von  $0$  bis  $1,125^\circ$  ( $10 \frac{1}{8}$ -Motorschritte) die zeitliche Struktur des Laserpulses durch den Winkelversatz  $\Delta\varphi$  bzw. den entsprechenden Achsenversatz  $\delta$  praktisch nicht beeinflusst wird. Die Übertragungseffizienz des LWL-Multiplexers sinkt im diesen Winkelbereich proportional zum Winkelversatz. Das entspricht dem Diagramm der Intensitätsverteilung für die jeweilige Ausgangsposition 1 des Einkanal-LWL-Multiplexers (Abb. 5.2). Wie aus dem Vergleich der Abb. 5.2 und Abb. 5.6 zu

ersehen ist, stimmen die Meßergebnisse bei den Messungen mit He-Ne und N<sub>2</sub>-Lasern gut überein.

Aus dem Diagramm 5.6 b ist außerdem ersichtlich, daß im oben genannten Winkelbereich die Modellfunktion  $F(\varphi)$  linearisiert werden kann, was zur meß- und regelungstechnischen Betrachtung verwertbar ist. Die am Einkanal-LWL-Multiplexer durchgeführten Experimente zur Pulsübertragung sind in [110] beschrieben.



**Abb. 5.8:** Die durch die zwei Übertragungskanäle des Zweikanal-LWL-Multiplexers übertragenen Laserpulse bei verschiedenen eingestellten Winkelversätzen für die Ausgangsposition 3

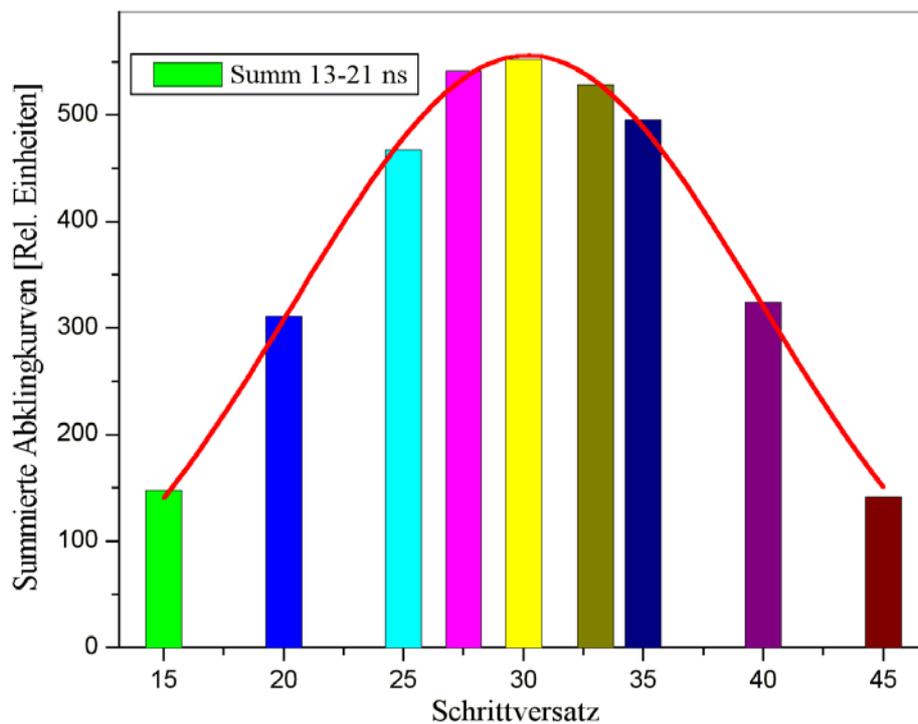
Analog dazu wurden Experimente zur Pulsübertragung mit dem Zweikanal-LWL-Multiplexer im aufgebauten Multiplexer-Meßsystem an der UV/Ozon-Anlage durchgeführt, wie in Abb. 5.7 dargestellt.

Die Meß- und Auswertungsergebnisse sind in Abb. 5.8 und 5.9 dargestellt. Abb. 5.8 zeigt die durch die beiden Kanäle des Zweikanal-LWL-Multiplexers übertragenen Laserpulse. Abb. 5.9 zeigt die summierten Abklingkurven bei verschiedenen Winkelversätzen der Motorachse.

Aus Abbildung 5.9 ist ersichtlich, daß im Winkelbereich von 0° bis 1,6875° der Zusammenhang zwischen dem Winkelversatz und der Übertragungseffizienz als linear betrachtet werden kann.

Die mit dem Zweikanal-LWL-Multiplexer durchgeführten Experimente zeigen ebenso, daß ein Winkelversatz die Zeitstruktur der übertragenen Laserpulse nicht beeinflusst. Ebenfalls bleibt die

räumliche Struktur der übertragenen Laserpulse bei den Winkelversätzen unverändert, was in Abschnitt 8.2.2 erläutert wird.



**Abb. 5.9: Summierte Laserpulse im Zeitintervall 13 ns bis 21 ns nach Übertragung durch den Zweikanal LWL-Multiplexer in Abhängigkeit von der Winkelposition**

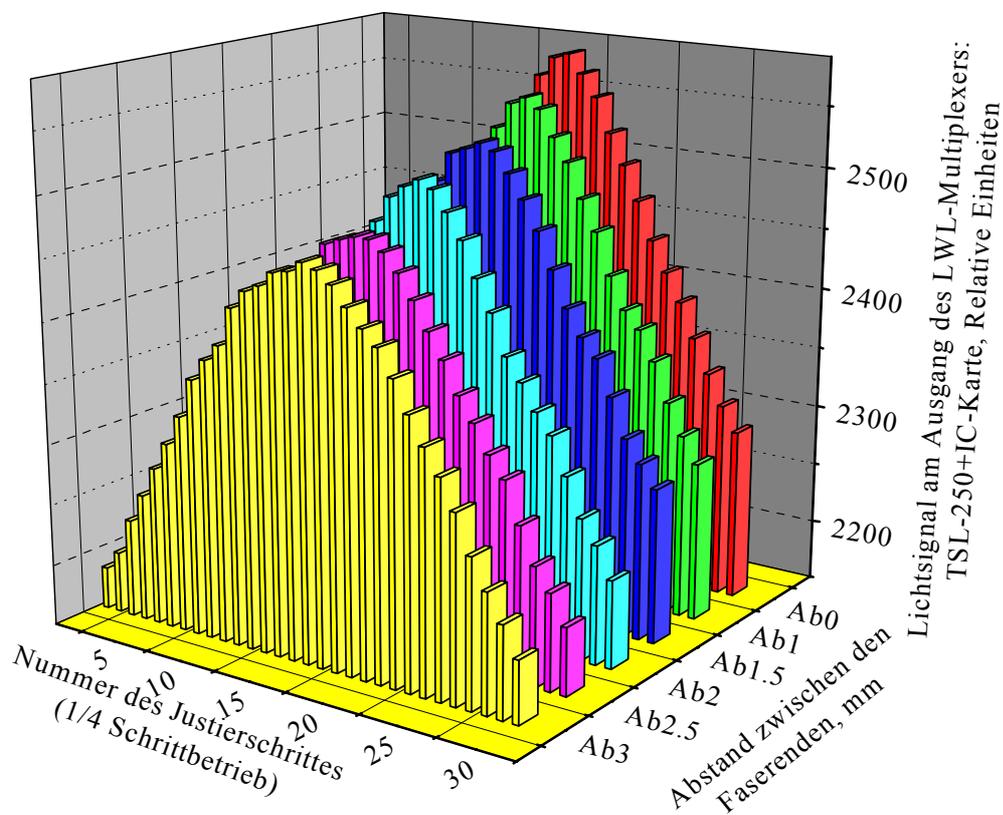
Im Gegensatz dazu wird die räumliche Intensitätsverteilung im übertragenen Strahl  $I_U(r, z)$  durch den Abstand zwischen den Faserenden beeinflusst. Experimente zur Untersuchung des Einflusses des Abstandes zwischen den Stirnflächen der zu koppelnden Fasern an der Verbindungsstelle 2 sind im Abschnitt 5.3.2 und die theoretische Analyse dazu im Abschnitt 8.2.1 beschrieben.

Aus den Diagrammen kann der lineare Bereich entnommen werden, d.h. der Winkelbereich, in dem die Übertragungseffizienz direkt proportional dem Winkelversatz sinkt.

### **5.3.2 Einfluß des Abstandes zwischen den Faserenden auf die Intensitätsverteilung und die Übertragungseffizienz**

Zur Untersuchung des Übertragungsverhaltens der LWL-Multiplexers bei verschiedenen Betriebsbedingungen wurden bei Variation des Abstandes zwischen den Stirnflächen der zu koppelnden Glasfasern an der Verbindungsstelle 2 durch die Mikrometerschraube die Diagramme der Lichtintensitätsverteilung bei Abtasten des vorgegebenen Winkelbereiches für alle Ausgangspositionen aufgenommen. Die Messungen wurden mit dem He-Ne-Laser bei den

in Abschnitt 5.1 beschriebenen Meßbedingungen durchgeführt. Die Meßergebnisse für die Ausgangsposition 3 des Einkanal-Multiplexers sind in Abb. 5.10 vorgestellt.



**Abb. 5.10: Intensitätsverteilung beim Abtasten des Bogenrasters in Abhängigkeit von dem Abstand zwischen den Faserenden für die Ausgangsposition 3 des Einkanal-LWL-Multiplexers**

Wie aus den Diagrammen ersichtlich, ändert sich die Form der räumlichen Intensitätsverteilung abhängig vom Abstand. Die Verteilungsdiagramme verlaufen gleichmäßiger und flacher bei Vergrößerung des Abstandes zwischen den Faserenden an der Verbindungsstelle 2. Dies ist durch Veränderung der Kopplungsbedingungen zwischen den Übertragungs- und Ausgangsfasern zu erklären. Außerdem verschiebt sich, neben der Senkung der Signalamplitude, mit zunehmendem Abstand das Maximum des Verteilungsdiagramms. Das kann damit erklärt werden, daß bei kleineren Abständen die Auswirkung verschiedener Fehlerquellen, wie z.B. die Fertigungstoleranzen oder die Oberflächenqualität der Glasfasern, auf die Übertragungsfunktion stärker ist. Deswegen muß für eine optimale Signalübertragung der Abstand zwischen den zu koppelnden Faserenden an der Verbindungsstelle 2 abhängig von der verwendeten Steuerung eingestellt werden.

Die ermittelte Modellfunktion  $F(\varphi)$  rekonstruiert quantitativ den Einfluß des Abstandes zwischen den Faserenden auf die Lichtübertragung durch entsprechende Funktionsparameter und -koeffizienten, wie im Kapitel 6 gezeigt wird.

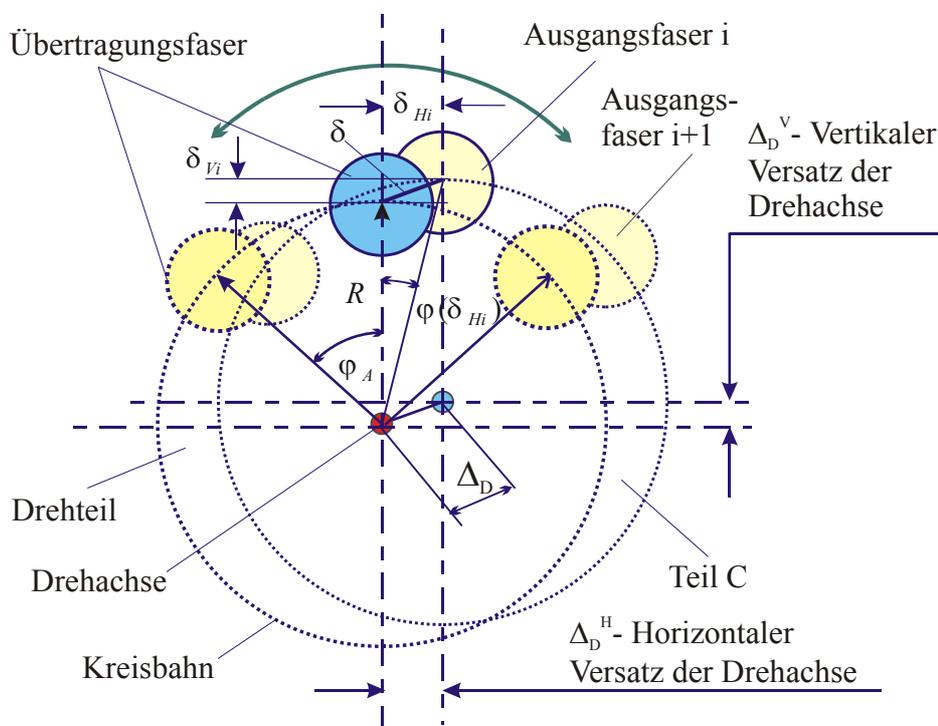
Die theoretische Analyse des Einflusses des Abstandes zwischen den Faserenden an den Verbindungsstellen des LWL-Multiplexers auf die Signalübertragung bei den tiefenaufgelösten photoakustischen Messungen ist in Abschnitt 8.2.1 ausgeführt. Wie aus dem Vergleich ersichtlich ist, entsprechen die experimentell aufgenommenen Diagramme (Abb.5.10) den Simulationsergebnissen der Intensitätsverteilung nach Abb. 8.6.

## 6 Mathematisches Modell der entwickelten LWL-Multiplexer

Zur Charakterisierung der Übertragungsmechanismen in den gebauten LWL-Multiplexern bei verschiedenen Einflußparametern sowie zur formalisierten Beschreibung des Multiplexers als Element eines Übertragungs-, Meß- oder Steuerungssystems wurde ein mathematisches Modell für den Ein- und Zweikanal-LWL-Multiplexer hergeleitet, das im folgenden vorgestellt wird.

### 6.1 Theoretische Funktionsbeschreibung

Das entwickelte mathematische Modell stellt den Zusammenhang zwischen dem systemtheoretisch als Eingangsgröße betrachteten Drehwinkel  $\varphi$  (oder Schrittnummer  $N$ ) des Motorantriebs einerseits, und der Übertragungseffizienz  $F^i(\varphi)$  bzw. Lichtintensität  $I^i(\varphi)$  am jeweiligen optischen Ausgang  $i$  des LWL-Multiplexers andererseits, dar und kann als Funktionsgesetz oder statische Kennlinie des LWL-Multiplexers bezeichnet werden. Damit kann für jeden Übertragungskanal des LWL-Multiplexers und für jede vorgegebene Drehposition des Motorantriebs die entsprechende Übertragungseffizienz und das Ausgangssignal berechnet werden.



**Abb. 6.1 : Anordnung der Stirnflächen der zu koppelnden Glasfasern an der Verbindungsstelle 2 unter Berücksichtigung von Fertigungstoleranzen**

Die Lichtintensität am Ausgang  $i$  des LWL-Multiplexers  $I^i(\varphi)$  kann als Produkt der eingekoppelten Lichtintensität  $I_{Ein}$  und der drehwinkelabhängigen Übertragungseffizienz  $F^i(\varphi)$  des LWL-Multiplexers für den entsprechenden Übertragungskanal dargestellt werden:

$$I^i(\varphi) = I_{Ein} F^i(\varphi). \quad (6.1)$$

Der Zusammenhang  $F^i(\varphi)$  kann aufgrund der Lichtübertragung einzelner Verbindungsstellen in den entsprechenden Übertragungskanälen hergeleitet werden. So kann z.B. die von der Übertragungsfaser in die Ausgangsfaser an der Verbindungsstelle 2 überkoppelte Lichtleistung  $P_U$  durch Integrieren der Strahldichte  $L(\Omega_U, A_U)$  des von der Übertragungsfaser abgestrahlten Lichtes über den Raumwinkel  $\Omega_A$  und die Stirnfläche  $A_A$  der Ausgangsfaser [21] berechnet werden:

$$P_U = \int_{\Omega_A} \int_{A_A} L(\Omega_U, A_U) dA_A d\Omega_A, \quad (6.2)$$

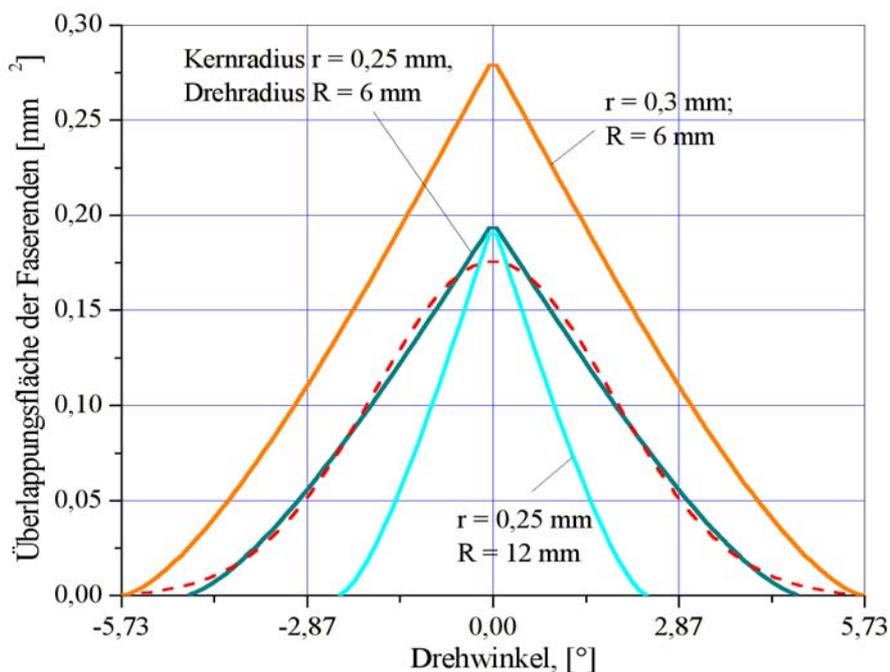
wobei der Raumwinkel  $\Omega_{A,U}$  mit dem Akzeptanzwinkel der entsprechenden Faser  $\Theta_c$  laut  $\Omega_{A,U} \approx \pi \sin^2 \Theta_c$  verbunden ist. Dabei ist  $A_{A,U} = \pi r^2$ . Die Berechnung der Leistungsübertragung einzelner Faserverbindungen nach Gleichung (6.2) ist komplex und berücksichtigt die Charakteristika der verwendeten Lichtwellenleiter (Durchmesser, Akzeptanzwinkel und Brechzahlprofil), des übertragenen Lichtes sowie der Geometrie der Verbindungsstelle (Achsenversätze, Kippwinkel und Abstand zwischen den Faserstirnflächen).

In Abb. 6.1 ist die Anordnung der Stirnflächen der zu koppelnden Glasfasern an der beweglichen Verbindungsstelle 2 unter Berücksichtigung der meistens auftretenden Fertigungstoleranzen schematisch dargestellt. Vereinfacht kann aufgrund geometrischer Zusammenhänge der Verlauf der Überlappungsfläche  $S_U(\varphi)$  zweier aneinander stoßender Faserenden gleichen Durchmessers laut Abb. 6.1 über den Flächeninhalt der Kreisabschnitte beim Abfahren des Kreisbogens durch eine der Fasern in Abhängigkeit von dem Drehwinkel  $\varphi$  bei Versatz der Drehachse  $\Delta_D = 0$  berechnet werden. Wie aus o.a. Abbildung weiter ersichtlich, ist der Zentriwinkel  $\alpha_z$  mit der Winkelposition  $\varphi$  des Drehteils durch  $\cos(\alpha_z/2) = \frac{R}{r} \sin(\varphi/2)$  verbunden. Daraus ergibt sich:

$$S_U(\varphi) = r^2 \left[ 2a \cos \left( \frac{R}{r} \sin \left( \frac{abs(\varphi)}{2} \right) \right) - \sin \left( 2a \cos \left( \frac{R}{r} \sin \left( \frac{abs(\varphi)}{2} \right) \right) \right) \right]. \quad (6.3)$$

Hier sind  $r$  der Kernradius der Fasern und  $R$  der Drehradius, auf dem die Übertragungsfaser gedreht wird. Die Funktion  $S_U(\varphi)$  nach Gleichung (6.3) gibt grundsätzlich den Winkelverlauf der

Kopplungseffizienz an der beweglichen Verbindungsstelle 2 bei dem Abstand  $z = 0$  zwischen den Stirnflächen der zu koppelnden Glasfasern wieder. Der nach (6.3) berechnete Verlauf  $S_{\nu}(\varphi)$  ist in Abb. 6.2 bei verschiedenen Durchmessern bzw. Kernradien  $r$  der zu koppelnden Fasern und Drehradien  $R$  der Kreisbahnen vorgestellt. Die gestrichelte Linie auf dem Diagramm Abb. 6.2 zeigt das Approximationsergebnis der Funktion  $S_{\nu}(\varphi)$  nach (6.3) mit der Gauß'schen Funktion, das mit den experimentell aufgenommenen Diagrammen der Intensitätsverteilung weitestgehend im gleichen Winkelbereich übereinstimmt. Die Abweichungen sind dadurch verursacht, daß der Ausdruck (6.3) die physikalischen Zusammenhänge für die Ausbreitung und Überkopplung des Lichtes an der Verbindungsstelle 2 nicht berücksichtigt.



**Abb. 6.2:** Der nach Gl. (6.3) berechnete Winkelverlauf der Überlappungsfläche zweier Glasfasern an der Verbindungsstelle 2 bei verschiedenen Drehradien  $R$  und Kernradien  $r$

Um die gesamten Kopplungsbedingungen an der beweglichen Verbindungsstelle bei der Einwirkung aller Einflußparameter zu berücksichtigen, wurde der Zusammenhang  $F^i(\varphi)$  aufgrund der experimentell aufgenommenen Diagramme der Intensitätsverteilung berechnet, die in der Abb. 5.2 für den Einkanal-Multiplexer und in der Abb. 5.3 für den Zweikanal-Multiplexer abgebildet sind.

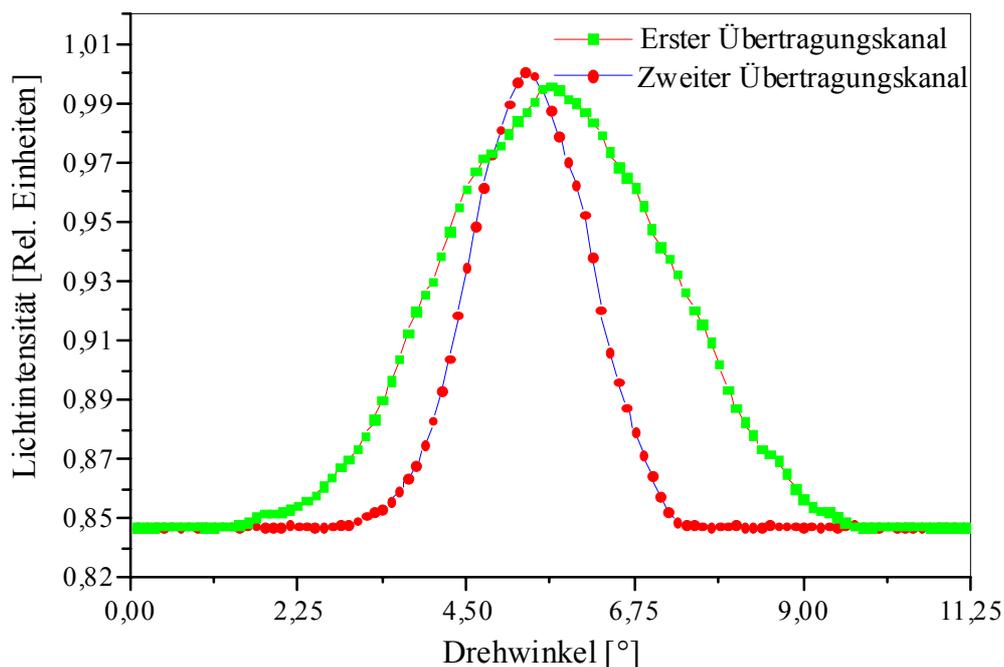
## 6.2 Mathematisches Modell des Funktionsgesetzes

Abb. 6.3 zeigt als Beispiel die aufgenommenen Diagramme der Intensitätsverteilung für den ersten und den zweiten Kanal des Zweikanal-LWL-Multiplexers für die Position 2.

Die drehwinkelabhängige Übertragungseffizienz  $F^i(\varphi)$  als Funktionsgesetz des LWL-Multiplexers wurde mit einer modifizierten Gauß'schen Funktion der Winkelposition des Motorantriebs  $\varphi$  approximiert:

$$F^i(\varphi) = \frac{K}{\sigma \sqrt{\pi/2}} \exp\left(-\frac{((\varphi - \varphi_A)\gamma \frac{R}{r})^2}{\sigma^2}\right). \quad (6.4)$$

Hier berücksichtigt der Koeffizient  $K$  den Kopplungswirkungsgrad der Verbindungsstelle 1; der vorgegebene Winkel  $\varphi_A$  bestimmt die untere Grenze des Winkelabstastbereiches und damit die Position des Maximums des Verteilungsdiagramms, d.h. bei  $\varphi = \varphi_A$  ist  $F^i(\varphi) = F_{\max}^i \cdot \varphi_A$  wird durch Vorgabe der Position des Anfangs der Justierung festgelegt.  $\sigma$  charakterisiert die Breite des Verteilungsdiagramms und wird durch die konstruktiven Parameter bei der Dimensionierung des LWL-Multiplexers festgelegt. Parameter  $\gamma$  berücksichtigt die numerischen Aperturen der zu koppelnden Fasern.



**Abb. 6.3:** Diagramme der Verteilung der Lichtintensitäts für Ausgangsposition 2 für zwei Übertragungskanäle des Zweikanal-LWL-Multiplexers.

In der Gleichung (6.4) ist der Einfluß von Fertigungstoleranzen auf die Funktion  $F(\varphi)$  nicht berücksichtigt. Wie in Abb. 6.1 gezeigt ist, wird der drehpositionsabhängige resultierende Achsenversatz der zu koppelnden Glasfasern  $\delta_i$  hauptsächlich durch den Versatz  $\Delta_D$  der Drehachse gegenüber der Teile A und C verursacht und kann als Vektorsumme zweier

Komponenten, des vertikalen  $\delta_{Vi}$  und des horizontalen  $\delta_{Hi}$  Achsenversatzes, dargestellt werden. Im präzisierten mathematischen Modell werden als Funktionsparameter die meistens auftretenden Fertigungstoleranzen, d.h. obengenannter vertikaler Achsenversatz  $\delta_{Vi}$  und horizontaler Achsenversatz  $\delta_{Hi}$  der optischen Achsen der zu koppelnden Glasfasern (Abb. 6.1), der Abstand zwischen den Faserenden  $z_i$  an der Verbindungsstelle 2 sowie durch entsprechende Koeffizienten Typ, Durchmesser und numerische Aperturen der verwendeten Glasfasern berücksichtigt. Unter Einbeziehung oben beschriebener Fertigungstoleranzen in der Gleichung (6.4) bekommt man den vollständigen Ausdruck für die statische Übertragungsfunktion des LWL-Multiplexers:

$$F^i(\varphi, \delta_{Vi}, \delta_{Hi}, z) = \frac{K}{\sigma \sqrt{\pi/2}} f_1(z) \exp \left[ - \frac{((\varphi - \varphi_A) f_3(z) \gamma \frac{R}{r} \pm k_3 \varphi(\delta_{Hi}))^2}{\sigma^2} - k_2 f_2(z) \delta_{Vi}^2 \right]. \quad (6.5)$$

Hier wird  $\varphi(\delta_{Hi})$  gemäß Abb. 6.1 durch den horizontalen Achsenversatz  $\delta_{Hi}$  und den Radius des Drehkreises  $R$  der Übertragungsfaser berechnet:

$$\varphi(\delta_{Hi}) \approx \arctan \frac{\delta_{Hi}}{R}; \quad (6.6)$$

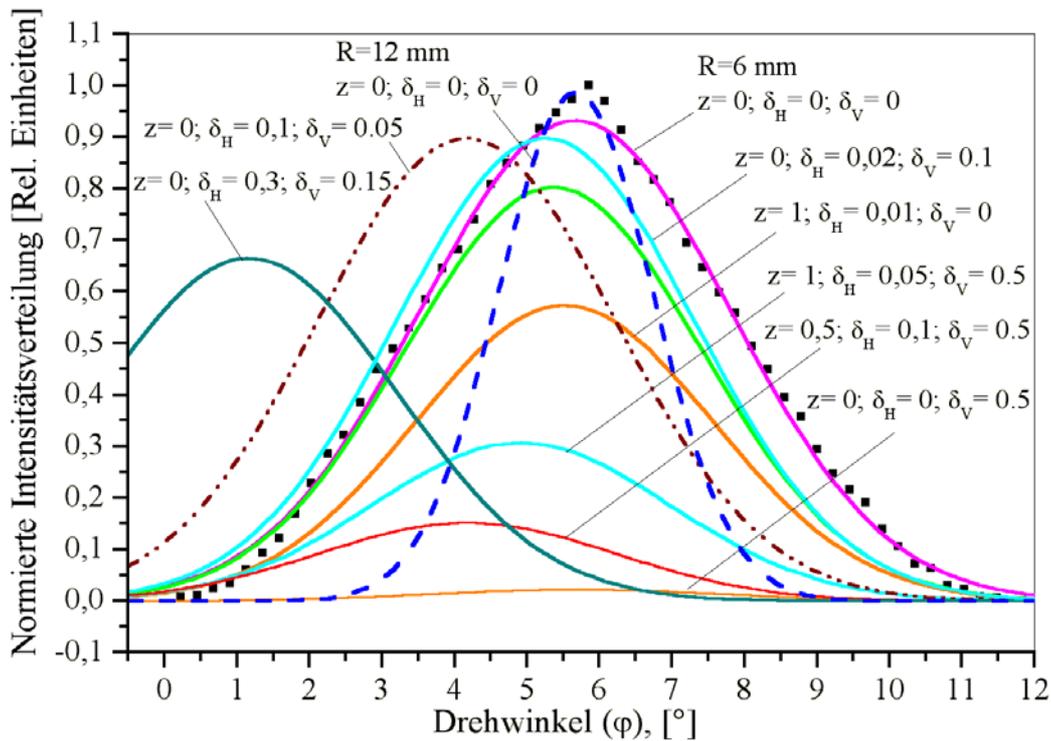
und verursacht die Verschiebung des Maximums des Verteilungsdiagramms auf der  $\varphi$ -Achse. Die Funktionen  $f_1(z)$ ;  $f_2(z)$  und  $f_3(z)$  berücksichtigen den Einfluß des Abstandes  $z$  zwischen den Stirnflächen der Übertragungsfaser und der entsprechenden Ausgangsfaser an der Verbindungsstelle 2 auf die Übertragungseffizienz:

$$f_1(z) = \frac{k_{11}}{k_{11} + k_{12} z_i^2}, \quad (6.7)$$

$$f_2(z) = \frac{k_{21}}{k_{21} + k_{22} z_i^2} \quad (6.8)$$

und 
$$f_3(z) = \gamma \frac{k_{31}}{k_{31} + k_{33} z^2}. \quad (6.9)$$

Die Koeffizienten  $k_{11}$ ,  $k_{12}$ ,  $k_2$ ,  $k_{21}$ ,  $k_{22}$ ,  $k_3$ ,  $k_{31}$  und  $k_{33}$  bestimmen den Auswirkungsgrad der jeweiligen Funktionsparameter  $\delta_{Vi}$ ,  $\delta_{Hi}$  und  $z_i$  auf die Übertragungseffizienz und Intensitätsverteilung  $I^i(\varphi)$ . Sie hängen von den Durchmessern, numerischen Aperturen, Brechzahlen bzw. Brechzahlprofilen der verwendeten Glasfasern sowie von der Lichtwellenlänge ab. Durch diese Funktionsparameter und Koeffizienten kann die Auswirkung von Fertigungstoleranzen auf das Meßsignal für alle Ausgangspositionen des LWL-Multiplexers und entsprechende Übertragungskanäle quantifiziert werden.



**Abb. 6.4:** Ergebnisse der Computersimulation der statischen Kennlinie des LWL-Multiplexers aufgrund des mathematischen Modells (6.5) bei Variation der Parameter  $\delta_H$ ,  $\delta_V$  und  $z$ :  $\sigma = 2,9$ ;  $\gamma = 0,04$

Wie aus (6.1) und (6.5) folgt, ist die Intensitätsverteilung  $I(\varphi)$  am Ausgang des LWL-Multiplexers für die Ausgangsposition  $i$  in Abhängigkeit von dem Drehwinkel  $\varphi$ :

$$I^i(\varphi) = \frac{I_{Ein} K}{\sigma \sqrt{\pi/2}} f_1(z) \exp \left( - \frac{((\varphi - \varphi_A) f_3(z) \gamma \frac{R}{r} \pm k_3 \varphi (\delta_{Hi}))^2}{\sigma^2} - k_2 f_2(z) \delta_{Vi}^2 \right). \quad (6.10)$$

Die Gleichungen (6.5) und (6.10) geben grundsätzliche physikalische Zusammenhänge in den Ein- und Zweikanal-LWL-Multiplexern wieder und können für die Simulation und Analyse der Übertragungsvorgänge eingesetzt werden.

In Abb. 6.4 sind die Simulationsergebnisse nach dem mathematischen Modell (6.5) und (6.10) dargestellt. Die Abbildung zeigt die nach dem mathematischen Modell (6.10) berechneten normierten Diagramme der Intensitätsverteilung in Abhängigkeit vom Drehwinkel bei der Variation der vertikalen  $\delta_{Vi}$  und horizontalen  $\delta_{Hi}$  Achsenversätze sowie des Abstandes zwischen den Faserenden  $z_i$  bei empirisch ermittelten Koeffizienten  $K$ ,  $k_{11}$ ,  $k_{12}$ ,  $k_2$ ,  $k_{22}$  und  $k_3$  bei verschiedenen Drehradien  $R = 6 \text{ mm}$  und  $R = 12 \text{ mm}$ , was dem ersten und dem zweiten

Übertragungskanal entspricht. Der Drehwinkel  $\varphi$  wurde dabei im Winkelbereich 0 bis 11,25 Grad mit der Schrittauflösung 0,1125 geändert. Punkte auf dem Diagramm entsprechen dem experimentell aufgenommenen Verteilungsdiagramm für Ausgang 1 gemäß Abb.5.2.

In allen vorgestellten Gleichungen ist der Drehwinkel  $\varphi$  bei einer Schrittauflösung des Motorantriebs  $A_M$  mit der Schrittnummer  $N$  über das Verhältnis  $\varphi = NA_M$  verbunden.

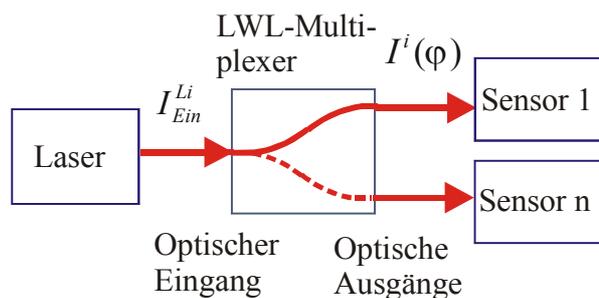
Wie aus den Diagrammen (Abb. 6.4) ersichtlich ist, stimmen die Simulationsergebnisse nach Gl. (6.10) mit den experimentell aufgenommenen Verteilungsdiagrammen für den Ein- und Zweikanal-LWL-Multiplexer (Abb. 6.3 sowie Abb. 5.2 und 5.3) gut überein.

Die nichtlineare Modellfunktion  $F(\varphi)$  beschreibt das statische Verhalten des LWL-Multiplexers und kann zu Steuerungs- oder Regelungszwecken um einen Betriebspunkt linearisiert werden, wie es in Abschnitt 5.3.1 gezeigt wurde.

### 6.3 Automatische Fehlerkorrektur aufgrund des mathematischen Modells

Das entwickelte mathematische Modell ermöglicht beim Betrieb des LWL-Multiplexers in einem Sensorsystem eine genaue Auswertung der Meßergebnisse sowie die automatische Korrektur verschiedener auftretender Übertragungs-, Steuerungs- oder Meßfehler.

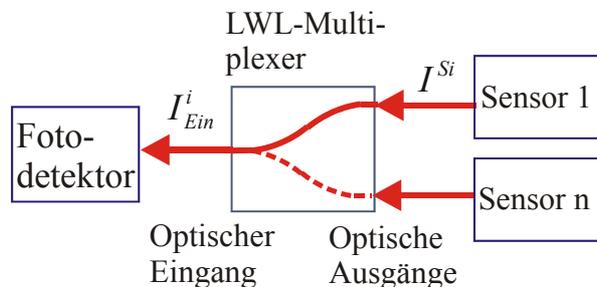
Allgemein kann aufgrund des mathematischen Modells ausgehend von der durch den LWL-Multiplexer übertragenen und gemessenen Lichtintensität die entsprechende eingekoppelte Lichtintensität zurückgerechnet werden.



**Abb. 6.5: Signalfluß in einem Multiplexer-System bei Übertragung des Laserlichtes zu faseroptisch geführten Sensoren.**

Bei der Übertragung des Anregungslichtes durch den LWL-Multiplexer bzw. über einen seiner Übertragungskänale von einer Lichtquelle zu Sensoren (Abb. 6.5) kann aufgrund der berechneten Übertragungsfunktion  $F^i(\varphi, \delta_V, \delta_H, z)$ , und ausgehend von der bekannten am optischen Eingang eingekoppelten Lichtintensität der Lichtquelle  $I_{Ein}^L$ , die entsprechende übertragene Lichtintensität  $I^i(\varphi)$  an einem optischen Ausgang des LWL-Multiplexers nach

(6.10) berechnet und die maximale Lichtintensität  $I_{\max}$  durch den entsprechenden Winkel  $\varphi_{\max}$  eingestellt werden. Diese Lichtleistung wird in die Sensorköpfe als Anregungslicht eingekoppelt und muß für die Auswertung des Sensorsignals bei den Messungen sowohl mit den optischen, als auch mit photoakustischen Sensoren berücksichtigt werden.



**Abb. 6.6: Signalfluß in einem Multiplexer-System bei Übertragung des Sensorsignals zur Detektionseinheit.**

Bei Übertragung der Meßsignale von mehreren Sensoren durch den LWL-Multiplexer zu einer Detektionseinheit (Abb. 6.6), wie z. B. im aufgebauten Meßsystem mit dem Zweikanal-LWL-Multiplexer und mit Transmissionszellen, kann aufgrund der berechneten Übertragungsfunktion  $F^i(\varphi, \delta_V, \delta_H, z)$ , ausgehend von der am optischen Eingang des Multiplexers gemessenen übertragenen Lichtintensität  $I_{E1}^i$ , die entsprechende am optischen Ausgang  $i$  eingekoppelte Lichtintensität  $I^{Si}$  berechnet werden (Abb. 6.6). Wie aus Gleichung (6.1) folgt, ist:

$$I^{Si} = I_{E1}^i(\varphi_x) F^i(\varphi_x). \quad (6.11)$$

Die Lichtintensität  $I^{Si}$  entspricht dem Meßsignal vom Sensor und stellt die zu bestimmende Größe dar. Als Störeinfluß wird dabei ein möglicherweise auftretender Antriebs- oder Übertragungsfehler des Schrittmotors gesehen. Deswegen stellt der Ist-Drehwinkel  $\varphi_x$  die zweite Unbekannte dar. Die zwei Unbekannten - das in den LWL-Multiplexer am optischen Ausgang  $i$  eingekoppelte Sensorsignal  $I^{Si}$  und der Ist-Drehwinkel  $\varphi_x$  - können durch die Lösung eines Gleichungssystems ermittelt werden. Die zweite Gleichung wird dabei durch die zweite Messung der übertragenen Lichtintensität am optischen Eingang des Multiplexers  $I_{E2}^i$  bei der Inkrementierung des Drehwinkels  $\varphi_x$  um einen vorgegebenen Winkelinkrement  $\Delta\varphi$  gewonnen:

$$I^{Si} = I_{E2}^i(\varphi_x + \Delta\varphi) F^i(\varphi_x + \Delta\varphi). \quad (6.12)$$

In den Gleichungen (6.11) und (6.12) sind  $I_{E1}^i = I_{Ein}^i(\varphi_x)$  und  $I_{E2}^i = I_{Ein}^i(\varphi_x + \Delta\varphi)$  die durch den LWL-Multiplexer übertragenen Lichtintensitäten, die unmittelbar mit der Detektionseinheit gemessen werden, während  $\varphi_x$  und  $I^{Si}$  ermittelt werden müssen. Durch die Lösung des

Gleichungssystem aus den oben genannten Gleichungen (6.11) und (6.12) und unter der Annahme der statischen Übertragungsfunktion  $F^i(\varphi)$  gemäß dem mathematischen Modell (6.4) kann die Winkelposition  $\varphi_x$  berechnet werden:

$$\varphi_x = \frac{1}{2\Delta\varphi} \left[ 2\Delta\varphi\varphi_A - \Delta\varphi^2 - \left( \gamma \frac{r}{R} \right)^2 \sigma^2 (\ln I_{Ein1}^i - \ln I_{Ein2}^i) \right]. \quad (6.13)$$

Index  $i$  bezeichnet die entsprechende Ausgangsposition des LWL-Multiplexers bzw. den entsprechenden Meßkanal. Mit dem nach (6.13) ermitteltem Ist-Drehwinkel  $\varphi_x$  wird die eingekoppelte Laserleistung nach (6.11) berechnet.

Eine solche automatische Fehlerkorrektur kann vor allem bei den Messungen mit verschiedenen optischen Transmissions- oder Fluoreszenzsensoren für die fehlerarme Auswertung der Meßergebnisse unter der Berücksichtigung der Dämpfung jeden Meßkanals durchgeführt werden.

## 7 Berechnung der Übertragungseffizienz der LWL-Multiplexer

### 7.1 Übertragungs- und Verlustmechanismen an den optischen Verbindungsstellen

Die Übertragungseffizienz eines LWL-Multiplexers wird als Verhältnis der übertragenen  $P_{\bar{U}}$  zur eingekoppelten Lichtleistung  $P_E$  definiert. Sie wird im wesentlichen durch die Konstruktion sowie die Parameter der verwendeten Glasfasern festgelegt und von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Der Aufbau und die Funktionsweise des LWL-Multiplexers bestimmen grundsätzlich die Art und Höhe der entstehenden optischen Verluste. Zu den wichtigen Parametern und Einflußfaktoren gehören vor allem Durchmesser, Typ, Brechzahl bzw. Brechzahlprofile, numerische Aperturen und die Oberflächenqualität der verwendeten Glasfasern sowie auftretende Fertigungstoleranzen, wie es in Kapitel 6 gezeigt wurde.

Der Kopplungswirkungsgrad einer Faserverbindung  $\eta$  an einer Verbindungsstelle  $j$  kann allgemein durch Raumwinkelelemente  $d\Omega_{1,2}$ , Flächenelemente  $dA_{1,2}$  und Strahldichte  $L(\Omega, A)$  gemäß [21,41,40] berechnet werden. So ist z. B. für die Verbindungsstelle 2:

$$\eta^j = \frac{P_A^j}{P_{\bar{U}}^j} = \frac{\iint L(\Omega_{\bar{U}}, A_{\bar{U}}) d\Omega_{\bar{U}} dA_{\bar{U}}}{\iint L(\Omega_{\bar{U}}, A_{\bar{U}}) d\Omega_{\bar{U}} dA_{\bar{U}}} \quad (7.1)$$

Die Indizes  $\bar{U}$  und  $A$  verweisen hier auf die Übertragungs- bzw. Ausgangsfaser. Aufgrund der Kopplungswirkungsgrade einzelner Faserverbindungen  $\eta^j$  kann die Übertragungseffizienz des LWL-Multiplexers berechnet werden, die die gesamten optischen Verluste charakterisiert.

Die meistens in einem LWL-Multiplexer auftretenden Verlustmechanismen sind allgemein: Dynamische Krümmungen der optischen Achse der Übertragungsfaser bei den Schaltvorgängen, Achsenversatz und Kippwinkel der zu koppelnden Glasfasern gegeneinander, der Abstand zwischen den Faserenden an den Verbindungsstellen und die Rückstreuung an den Grenzflächen sowie Abweichungen numerischer Aperturen, Brechzahlverläufe und Geometrien der verwendeten Glasfasern.

Diese Verlustmechanismen verursachen entsprechende extrinsische und intrinsische optische Verluste und können durch die jeweiligen Kopplungswirkungsgrade beschrieben werden [40]. So ist z.B. für Kopplung zweier Monomodenfaser mit gleichem Feldradius  $\omega_0$  bei gleichen Durchmessern, numerischen Aperturen und Brechzahlen bzw. Brechzahlprofilen der verwendeten

Glasfasern der Kopplungswirkungsgrad an einer Verbindungsstelle zweier Fasern bei dem Achsenversatz  $\delta$  [21,41,83]:

$$\eta(\delta) = \exp\left(-\frac{\delta^2}{\omega_0^2}\right), \quad (7.2)$$

bei einem Kippwinkel  $\beta$  zwischen den optischen Achsen der zu koppelnden Glasfasern gegeneinander:

$$\eta(\beta) = \exp\left(-\left(\frac{\pi n \omega_0}{\lambda} \sin \beta\right)^2\right) \quad (7.3)$$

und beim Abstand  $z$  zwischen den Faserstirnflächen:

$$\eta(z) = \frac{4\omega_0^4}{4\omega_0^4 + \left(\frac{\lambda z}{\pi n}\right)^2}, \quad (7.4)$$

wobei  $n$  die Brechzahl des optischen Mediums zwischen den Faserenden für (Luft  $n=1$ ) und  $\lambda$  die Lichtwellenlänge ist.

Analog dazu können die o.g. intrinsischen optischen Verluste und entsprechende Kopplungswirkungsgrade an der Verbindungsstelle zweier Fasern, z. B. bei verschiedenen Durchmessern, numerischen Aperturen oder Brechzahlen bzw. Brechzahlprofilen berechnet werden [21,78,85].

An einer Faserverbindungsstelle wirken alle oben beschriebenen Verlustmechanismen gleichzeitig, und der resultierende Kopplungswirkungsgrad muß dementsprechend ermittelt werden.

## 7.2 Berechnung der Übertragungseffizienz

In der Praxis wird der Kopplungswirkungsgrad  $\eta$  einer Faserverbindung durch den Dämpfungskoeffizient bestimmt, was weitere mathematische Berechnungen wesentlich vereinfacht:

$$a^j = -10 \text{dB} \lg \eta^j = -10 \text{dB} \lg \frac{P_U^j}{P_E^j}. \quad (7.5)$$

So kann die Übertragungseffizienz des LWL-Multiplexers über den resultierenden Dämpfungskoeffizient  $a_{\text{Res}}$  charakterisiert werden.

Der resultierende Dämpfungskoeffizient  $a_{\text{Res}}$  an einer beweglichen Verbindungsstelle setzt sich allgemein aus allen oben beschriebenen Komponenten zusammen: Dämpfung infolge der Rückstreuung  $a_{\text{Rü}}$ , aufgrund des Achsenversatzes  $\delta$ , Kippwinkels  $\beta$ , Abstandes  $z$  zwischen den Stirnflächen der zu koppelnden Glasfasern und den gesamten Krümmungsverlusten  $a'_K$  entsprechend den Gleichungen (2.1) und (2.2) in Kapitel 2.

Wie aus [40,83-86] folgt, gilt für Monomodfasern gleicher Feldradien  $\omega_0$  bei der Lichtwellenlänge  $\lambda$  :

$$a_{\text{Res}}^{V2} = 4,34 \left( \frac{\delta}{\omega_0} \right)^2 + 4,34 \left( \frac{\pi n \omega_0 \sin \beta}{\lambda} \right)^2 - 10 \lg \left( \frac{1}{1 + (\lambda z / 2\pi n \omega_0^2)^2} \right) + a'_K + a_{\text{Rü}}. \quad (7.6)$$

Die Verbindung zweier gleicher Multimodenfasern mit dem Kernradius  $r$  kann vereinfacht berechnet werden:

$$a_{\text{Res}}^{V2} = -10 \left[ \lg \left( 1 - \frac{8\delta}{3\pi r} \right) + \lg \left( 1 - \frac{16 \sin(\beta/2)}{3\pi \sin \Theta_c} \right) + \lg \left( 1 - \frac{z \tan \Theta_c}{2r} \right) \right] + a'_K + a_{\text{Rü}}, \quad (7.7)$$

wobei  $\Theta_c$  der Akzeptanzwinkel der verwendeten Glasfasern ist.

Die gesamten Krümmungsverluste entsprechend  $a'_K$  setzen sich aus der Einfüge- und der Absorptionsdämpfung zusammen und können laut Gl. (2.1) und (2.2) für einen bestimmten Modus [40] bei einer Länge der Übertragungsfaser  $l$  berechnet werden:

$$a_K = a_{\text{Ein}} + a_{\alpha_k} = - \left[ 10 \lg \left( 1 - \frac{2rn_M^2}{R_b(n_K^2 - n_M^2)} \right) + 4,34l\alpha_K \right]. \quad (7.8)$$

In beiden Formeln ist der Dämpfungskoeffizient infolge der Rückstreuung  $a_{\text{Rü}}$  nicht ausgeschrieben. Nach [41] hängt  $a_{\text{Rü}}$  bei monomod Glasfasern nicht nur von den Brechzahlen der Glasfasern und des Mediums ab, sondern auch von dem Abstand zwischen den Faserenden.

Im entwickelten LWL-Multiplexer sind im Unterschied zu anderen optischen Multiplexern [35-38] sowohl die dynamischen Krümmungsverluste  $a'_K$  als auch der Kippwinkel  $\beta$  bei der Positionierung durch die Konstruktion und Funktionsweise ausgeschlossen. Deswegen entfallen der zweite und der vierte Summand in den Gleichungen (7.6) und (7.7), was die Senkung der optischen Verluste um ca. 0,5 bis 1 dB bedeutet.

Der Dämpfungskoeffizient eines Übertragungskanals des LWL-Multiplexers setzt sich aus den Dämpfungskoeffizienten aller vorhandener Verbindungsstellen zusammen:

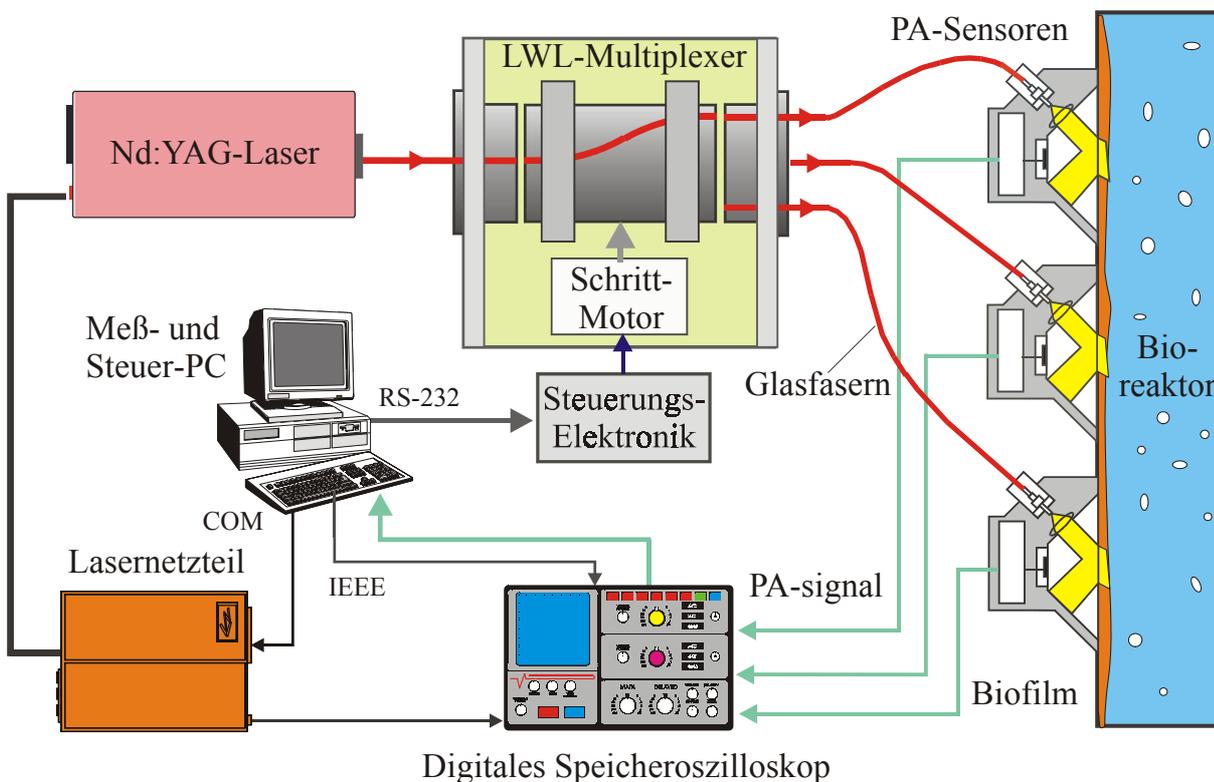
$$a_{j.\text{Kan}} = a_{\text{jres}}^{V1} + a_{\text{jres}}^{V2}. \quad (7.9)$$

Zusammengefaßt kann aufgrund der Einsparung einer Verbindungsstelle infolge dynamischer Entlastung der Übertragungsfaser bei den Schaltvorgängen, der Minimierung des Abstandes  $z$  zwischen den Faserenden und dem Ausschließen des Kippwinkels bei der Positionierung die Steigerung der Übertragungseffizienz um ca. 20 bis 40 % für jeden Übertragungskanal im Vergleich zum Stand der Technik erreicht werden.

## 8. Einsatz und Funktion des Einkanal-LWL-Multiplexers im Meßsystem für die tiefenaufgelöste photoakustische Spektroskopie

### 8.1 Aufbau des Multiplexer-Systems mit faseroptisch geführten photoakustischen Sensoren

Auf Basis des Einkanal-LWL-Multiplexers und der am Institut entwickelten photoakustischen Sensorköpfe [43-45] wurde als Teil eines Meß- und Steuerungssystems des in Entwicklung befindlichen Bioreaktors ein Multiplexer-Meßsystem mit faseroptisch geführten photoakustischen Sensoren aufgebaut. Ein solches Sensorsystem ermöglicht automatische zeit- und ortsaufgelöste Messungen der Effektivität des Bioreaktors durch die Aufnahme dreidimensionaler Absorptionsprofile des Biofilms mit mehreren an der Reaktorwandung angebrachten photoakustischen Sensoren.



**Abb. 8.1: Multiplexer-System mit faseroptisch geführten photoakustischen Sensoren**

Durch den entwickelten Einkanal-LWL-Multiplexer wird der Betrieb mehrerer faseroptisch geführter Sensoren mit einer Anregungs- und einer Detektionseinheit realisiert. Das aufgebaute Multiplexer-System mit den PA-Sensoren ist in Abb. 8.1 vorgestellt.

Als Laserquelle im Multiplexer-System wurde ein Nd:YAG-Laser verwendet, der die Lichtpulse mit einer Breite des halben Maximums von ca. 4 ns und einer Energie im Bereich von 0,5 bis 1 mJ bei einer Wellenlänge 532 nm generiert. Im System sowie im LWL-Multiplexer wurden die Quarz-Quarz-Fasern HCG-550T-10 mit einem Durchmesser von 550  $\mu\text{m}$  eingesetzt. Das durch eine optische Faser geleitete Laserlicht wird in den Einkanal-LWL-Multiplexer eingekoppelt, im LWL-Multiplexer von einem optischen Eingang zum ausgewählten optischen Ausgang geschaltet und durch die entsprechende Glasfaser zum jeweiligen PA-Sensorkopf zur Anregung der analytischen Probenmoleküle übertragen.

Mit der in LabView entwickelten Steuerungssoftware werden alle Schalt- und Meßvorgänge im aufgebauten Multiplexer-System voll automatisiert durchgeführt. Alle Einheiten im Meßsystem werden von einem Meß- und Steuer-PC durch das erstellte Programm angesteuert (Abb. 8.1): Der LWL-Multiplexer durch eine parallele Schnittstelle RS232, der Laser durch eine serielle Schnittstelle COM-2 und das digitale Speicheroszilloskop durch die IEEE-488-Schnittstelle. Im Steuerprogramm werden die Nummern und die Anzahl der abzufragenden Meßkanäle bzw. Sensorköpfe, die Schaltgeschwindigkeit, die Abtastfrequenz sowie bei wiederholten Messungen auch die Anzahl und Folge der Schaltvorgänge vorgegeben.

Das Steuerprogramm triggert den Laser mit dem Speicheroszilloskop und steuert den LWL-Multiplexer durch den Schrittmotor, so daß alle Sensorköpfe mit vorgegebener Reihenfolge und Frequenz abgefragt werden. Im aktuell geschalteten PA-Sensorkopf [43] wird die durch das eingekoppelte Laserlicht angeregte akustische Welle mit einer piezoelektrischen Polymerfolie detektiert. Das von den Elektroden der PVDF-Folie abgenommene PA-Signal wird durch einen direkt am jeweiligen Sensorkopf angeschlossenen Vorverstärker verstärkt und durch ein mehrkanaliges digitales Speicheroszilloskop (Textronik TDS-620) in einem Zeitfenster von 1 bis 4  $\mu\text{s}$  aufgezeichnet. Das zeitaufgelöste PA-Signal wird im Oszilloskop gemittelt und über die IEEE-488-Schnittstelle in den Steuer-PC zur Datenverarbeitung eingelesen. Die Übertragung des PA-Signals zwischen Vorverstärker, Oszilloskop und PC erfolgt durch BNC-Kabel. Das PA-Signal stellt ein Spannungssignal mit der Bandbreite der laserinduzierten Drucktransienten von einigen 10 MHz dar, das der zeitlichen Ableitung des Druckverlaufs  $p(\tau)$  direkt proportional ist. Im PC werden die aufgenommenen zeitaufgelösten PA-Signale aller abgefragten Sensorköpfe vom Steuerprogramm in eine entsprechende ASCII-Datei gespeichert. Bei mehreren wiederholten Messungen sowie bei der automatischen Justierung werden die ersten Amplituden der aufgenommenen zeitaufgelösten PA-Signale jeden Sensorkopfes ebenso bestimmt und als Zeitfolge aufgezeichnet. Dies erlaubt die Kontrolle und Analyse zeitabhängiger Prozesse in einem Bioreaktor, wie z.B. den Substanztransport im Biofilm.

Der Übertragungskanal des LWL-Multiplexers bildet gemeinsam mit den an die optischen Ein- und Ausgänge angeschlossenen Glasfasern und den entsprechenden PA-Sensorköpfen die Meßkanäle des Multiplexer-Systems. Im aufgebauten Multiplexer-System kann die Anzahl der Meßkanäle entsprechend der Anzahl der optischen Ausgänge des LWL-Multiplexers bis zu zehn erreichen; sie kann aber bei Bedarf durch entsprechende Dimensionierung des LWL-Multiplexers problemlos erweitert werden.

Das aufgebaute Multiplexer-System mit drei PA-Sensorköpfen wurde zur Untersuchung von Biofilmen in einem Fließkanal und später auch in einem Laborröhrenreaktor eingesetzt. Auf Basis dieser Modellsysteme konnte der Einfluß verschiedener Prozeßparameter auf die Struktur und die mechanische Stabilität der Biofilme untersucht werden [111].

## **8.2 Charakterisierung des Betriebsverhaltens des Einkanal-LWL-Multiplexers im photoakustischen Meßsystem**

Zur Analyse des Betriebsverhaltens des LWL-Multiplexers im Meßsystem mit faseroptisch geführten photoakustischen Sensoren wurden verschiedene Experimente zur Bestimmung des Einflusses der Lichtübertragung durch den LWL-Multiplexer auf das PA-Signal durchgeführt und deren Ergebnisse interpretiert. Dazu gehörten Untersuchungen der Auswirkung des Abstandes zwischen den zu koppelnden Faserenden und des durch den Motorantrieb eingestellten Winkelversatzes auf den Zeitverlauf des PA-Signals.

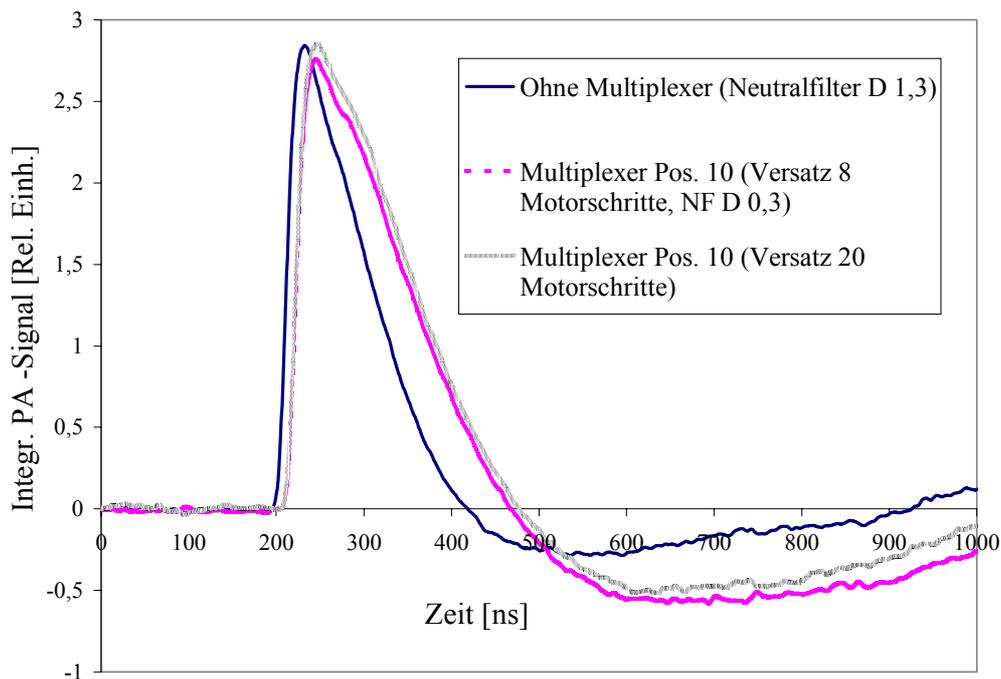
### **8.2.1 Einfluß des LWL-Multiplexers auf die Struktur des PA-Signals**

Der Einfluß der Übertragung der Anregungslichtes durch den LWL-Multiplexer auf das photoakustische Signal wurde durch Experimente im aufgebauten Sensorsystem laut Abb. 8.1 bei den oben beschriebenen Meßbedingungen untersucht.

Hierzu wurde zunächst das Laserlicht zu einem der PA-Sensorköpfe durch den LWL-Multiplexer übertragen und das photoakustische Signal bei einer konstanten Probe (Farbstoff in der Agar/Agar-Schicht) aufgenommen. Anschließend wurde das Laserlicht unmittelbar über eine ununterbrochene Glasfaser bei entsprechender Lichtabschwächung durch Neutralfilter zum gleichen PA-Sensorkopf durchgeleitet und das entsprechende photoakustische Signal aufgezeichnet. In Abb. 8.2 sind die bei den zwei Meßanordnungen aufgenommenen PA-Signale vorgestellt. Beim Vergleich beider Meßsignale wurde festgestellt, daß sich die Form des Zeitverlaufes des PA-Signals bei Übertragung durch den LWL-Multiplexer ändert, und zwar

werden das PA-Signal und der entsprechende Druckverlauf  $p(\tau)$  flacher, wie aus Diagramm ersichtlich ist.

Die festgestellte Aufweitung des PA-Signals bei Übertragung des Anregungslichtes durch den LWL-Multiplexer verursacht jedoch keinen Meßfehler bei der Auswertung der Meßergebnisse zur Bestimmung der tiefenaufgelösten Absorptionsprofile  $\mu_a(z^*)$ , da die Berechnung nach dem semiempirischen Inversionsalgorithmus [44] erfolgt.



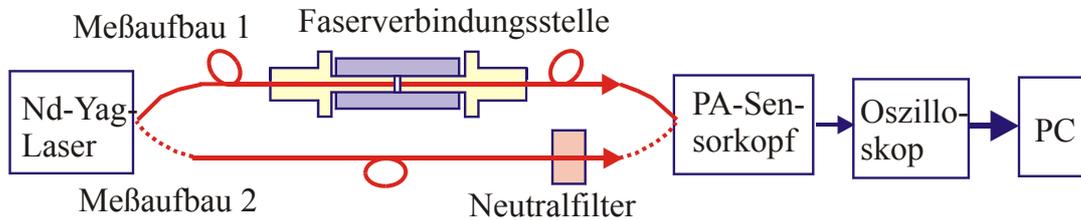
**Abb. 8.2: Integrierte PA-Signale (Druckverläufe) bei Übertragung des Anregungslichtes zum Sensorkopf über eine ununterbrochene Faser und über den LWL-Multiplexer**

Diese Methode basiert auf der Approximation und Zerlegung einer gemessenen Drucktransiente mit experimentell ermittelten Referenzsignalen, die durch Messung homogener Proben im aufgebauten Multiplexer-System erhalten wurden. Somit sind alle Einflüsse auf den Druckverlauf sowohl durch die Signal-Detektion als auch durch die Übertragung des Anregungslichtes durch den LWL-Multiplexer bereits in den Referenzprofilen enthalten.

Der Mechanismus der Entstehung der festgestellten Strukturänderung ist aber zur vollständigen Charakterisierung des LWL-Multiplexers bei seiner Funktion im photoakustischen Sensorsystem von Interesse und wurde deswegen im folgenden analysiert.

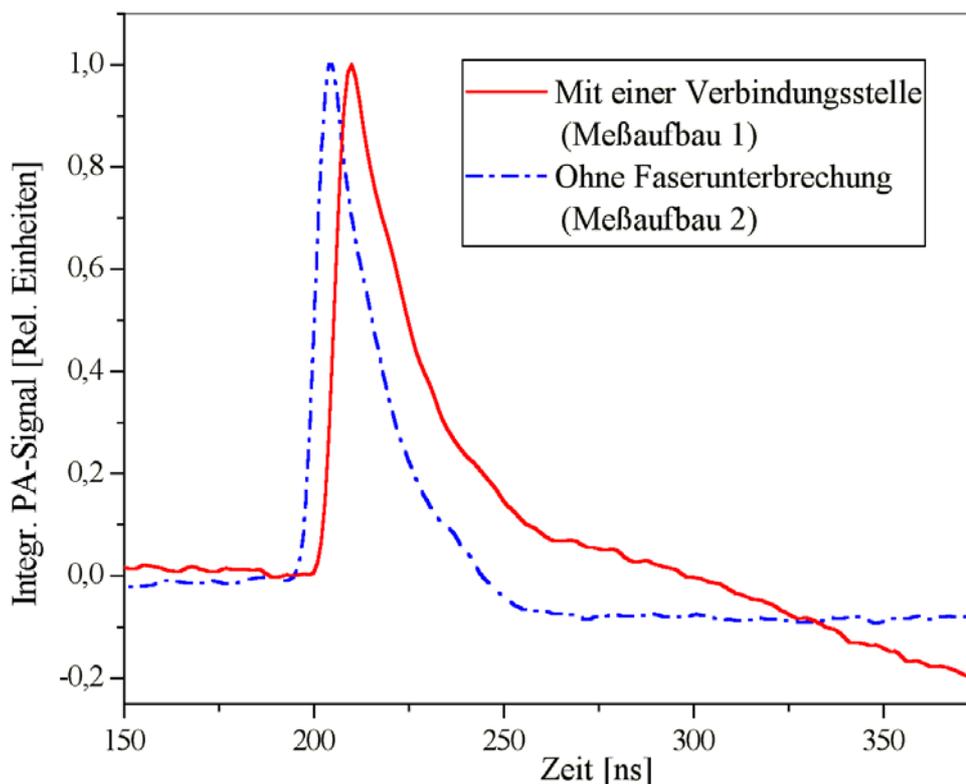
Zur Untersuchung dieses Mechanismus wurde ein Experiment durchgeführt, bei dem die Kopplungsbedingungen an einer der Verbindungsstellen des LWL-Multiplexers durch zwei mittels gemeinsamer Führung in einer Adapterhülse zentrierten SMA-905-Stecker reproduziert wurden. Das PA-Signal wurde zuerst bei Übertragung des Anregungslichtes zum Sensorkopf

durch eine Verbindungsstelle zweier Fasern (Meßaufbau 1) und dann bei Übertragung des Anregungslichtes über eine ununterbrochene Glasfaser mit entsprechender Abschwächung durch Neutralfilter zum Amplitudenausgleich (Meßaufbau 2) gemessen.



**Abb. 8.3:** *Meßanordnungen für die Experimente auf Pulsübertragung zur Reproduktion der Kopplungsbedingungen an der Verbindungsstelle zweier Fasern*

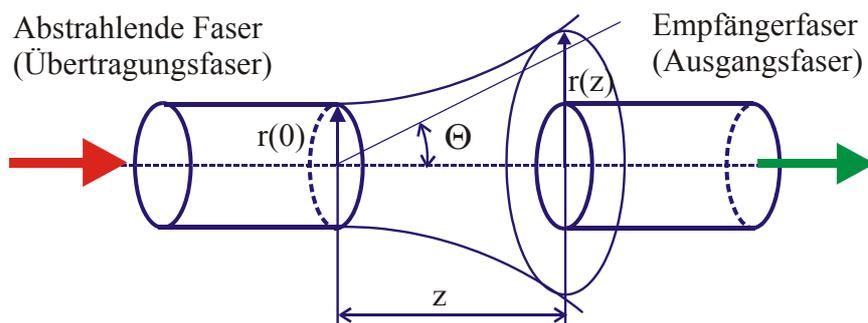
Das Meßergebnis ist in Abb. 8.4 vorgestellt und zeigt, das sich bei Übertragung des Anregungslichtes zum PA-Sensorkopf durch eine Verbindungsstelle zweier Fasern die Form des PA-Signals ebenso wie bei den Messungen mit dem LWL-Multiplexer ändert, d.h. es liegt eine Aufweitung des zeitlichen Druckverlaufs  $p(\tau)$  vor.



**Abb. 8.4:** *Die Druckverläufe als integrierte PA-Signale bei Übertragung des Anregungslichtes zum PA-Sensorkopf über eine ununterbrochene Glasfaser bzw. über eine Faserverbindungsstelle*

Da das Druckprofil  $p(\tau)$  nach Gleichung (3.2) im Zeitbereich eine Faltung zwischen dem zeitlichen Intensitätsprofil des Lasers und einer von der konkreten Sensorgeometrie abhängigen

Drucktransiente  $K(t)$  darstellt, beeinflußt die zeitliche Struktur der übertragenen Anregungspulse den Zeitverlauf des PA-Signals und über die Transformation  $z^* = ct$  auch den Ortsverlauf der Druckwelle in der Probe. Bei Übertragung durch den LWL-Multiplexer bleibt aber die zeitliche Struktur des Laserpulses unverändert, was auch alle experimentellen Ergebnisse (Kapitel 5) bestätigen. Damit ist die Ausdehnung des PA-Signals und somit des entsprechenden Druckverlaufs durch die Änderung der räumlichen Intensitätsverteilung des durch die Verbindungsstelle zweier Fasern übertragenen Anregungsstrahls zu erklären.



**Abb. 8.5: Kopplung eines Gaußstrahls an einer Verbindungsstelle zweier Fasern.**

Die Änderung der Intensitätsverteilung  $I_{\nu}(r)$  im Querschnitt eines durch die Verbindungsstelle zweier Fasern übertragenen Laserstrahls kann aufgrund der Theorie der Ausbreitung begrenzter ebener Wellen bei ihrer Überkopplung zwischen den zwei Lichtwellenleitern erklärt werden und wird in Abb. 8.5 illustriert.

Ein Gaußstrahl divergiert beim Austreten aus einem Lichtwellenleiter, d.h. sein Durchmesser nimmt mit dem Abstand  $z$  zu. Damit entsteht ein Strahlungskegel mit einem Öffnungs- oder Divergenzwinkel gegen der Faserachse  $\Theta$ . Bei einem Gauß'schen Laserstrahl ist die Strahldichte an der Faserstirnfläche (bei  $z = 0$ ) laut [41]:

$$L(r, \Theta, 0) = \frac{4P_0}{\lambda^2} \exp \left[ - \left( \frac{r}{\sigma_r(0)} \right)^2 - \left( \frac{\sin \Theta}{\sin \Theta_e} \right)^2 \right]. \quad (8.1)$$

Hier ist  $r$  die radiale Koordinate;  $P_0 = \int_0^{\infty} I_{\nu}(r) 2\pi r dr$  die gesamte Laserleistung des Gaußstrahls;

$\sigma_r(0)$  der Radius, bei dem die Intensität im Nahfeld  $I_{\nu}(r)$  auf das 1/e-fache ihres Maximalwertes  $I_{\nu}(0)$  bei  $r = 0$  abfällt; er bestimmt die radiale Ausdehnung des Gauß'schen Strahls bei  $z = 0$  und  $\Theta_e$  ist der Winkel, bei dem die Strahlstärke auf das 1/e-fache ihres Maximalwertes an der  $z$ -Achse, bei  $r = 0$ , abfällt.

Der Radius  $\sigma_r^*(z)$ , bei dem die Strahldichte im Gaußstrahl auf das 1/e-fache ihres Wertes an der  $z$ -Achse (bei  $r = 0$ ) abfällt, kann nach [87] in Abhängigkeit des Abstandes  $z$  zur Faserstirnfläche berechnet werden:

$$\sigma_r^2(z) = \sigma_r^2(0) \left( 1 + \left( \frac{\lambda z}{2\pi\sigma_r^2(0)} \right)^2 \right). \quad (8.2)$$

Beim Einsetzen von  $\sigma_r(z)$  laut (8.2) in die Gleichung (8.1) ergibt sich die Verteilung der Strahldichte im Gaußstrahl in Abhängigkeit vom Abstand  $z$  zur Stirnfläche der abstrahlenden Faser:

$$L(r, \Theta, z) = \frac{4P_0}{\lambda^2} \exp \left[ -\frac{4\pi^2\sigma_r^2(0)}{4\pi^2\sigma_r^4(0) + \lambda^2 z^2} r^2 - \left( \frac{\sin \Theta}{\sin \Theta_e} \right)^2 \right] \quad (8.3)$$

Aus Gleichung (8.3) kann die entsprechende Intensitätsverteilung im Nahfeld  $I_U(r, z) = \int_{\Omega} L(r, \Theta, 0) d\Omega$  unter Annahme  $\Omega \approx \pi \sin^2 \Theta$  und  $\sin \Theta_e = \lambda / (2\pi\sigma_r)$  berechnet werden:

$$I_U(r, z) = \frac{P_0 4\pi\sigma_r^2(0)}{4\pi^2\sigma_r^4(0) + \lambda^2 z^2} \exp \left( -\frac{4\pi^2\sigma_r^2(0)}{4\pi^2\sigma_r^4(0) + \lambda^2 z^2} r^2 \right). \quad (8.4)$$

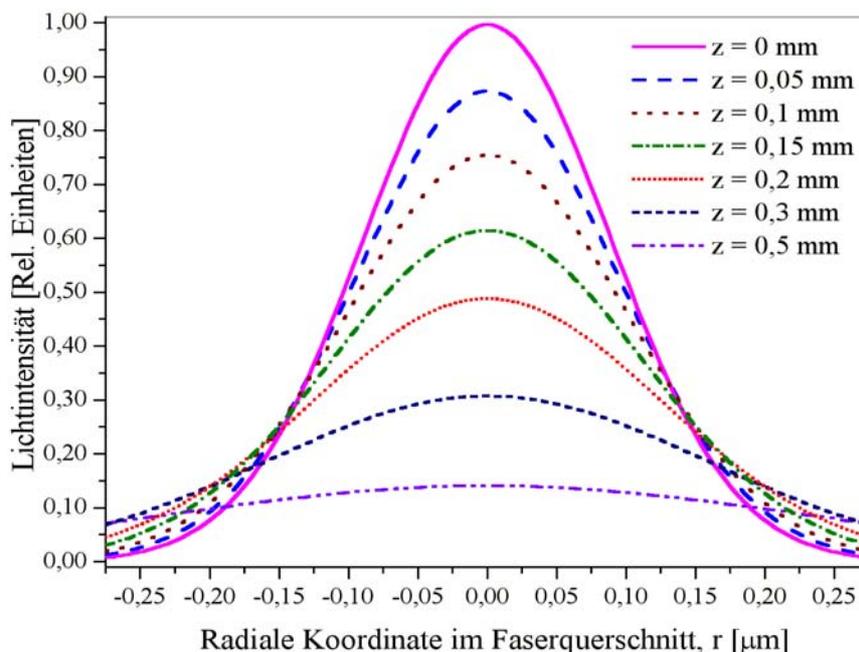
Dementsprechend ändert sich gemäß (8.3) und (8.4), abhängig vom Abstand  $z$  zur Stirnfläche der abstrahlenden Faser, die Verteilung der Strahldichte  $L(r, \Theta, z)$  und der Intensität  $I_U(r, z)$  im Querschnitt des Strahls.

Die Ergebnisse der Computersimulation der normierten Intensitätsverteilungen  $I_U(r, z)$  nach Gleichung (8.4) bei verschiedenen Abständen  $z$  sind in der Abb. 8.6 dargestellt.

Wenn in der Funktion  $I_U(r, z)$  nach Gleichung (8.4) die radiale Koordinate  $r$  konstant gehalten wird, während Abstand  $z$  als Variable eingesetzt ist, erhält man die Intensitätsverteilung entlang der  $z$ -Achse, die mit den Meßergebnissen laut Abb. 5.10 übereinstimmt und bei der Berechnung der Energieverteilung in der bestrahlten Probe und bei der Auswertung des PA-Signals berücksichtigt werden kann.

Die Gleichung (8.4) sowie das Diagramm Abb. 8.6 zeigen, daß sich die Intensitätsverteilung  $I_U(r, z)$  im Gaußstrahl entlang der Strahlachse mit dem Abstand zur Stirnfläche der abstrahlenden Faser ändert. An der Verbindungsstelle zweier Fasern (Abb. 8.5) führt die Änderung der Intensitätsverteilung auch zur Änderung der in die Ausgangsfaser überkoppelten Leistung. Der durch diese Faser zum PA-Sensorkopf übertragene Laserstrahl behält die bei der Überkopplung geänderte radiale Intensitätsverteilung  $I_U(r, z)$ , die den photoakustischen Signalverlauf entsprechend beeinflusst.

Die in der Abb. 8.6 dargestellten Simulationsergebnisse der Intensitätsverteilung nach Gl. (8.4) stimmen mit den experimentell aufgenommenen Diagrammen der Intensitätsverteilung an den optischen Ausgängen des LWL-Multiplexers bei den Abstandsänderungen zwischen den Faserenden an der Verbindungsstelle 2 laut Abb. 8.5 überein.



**Abb. 8.6:** Nach Gl. (8.4) berechnete normierte Intensitätsverteilungen im Strahlquerschnitt bei der Variation des Abstandes zur Faserstirnfläche bei  $P_0 = 1 \text{ J}$ ,  $\sigma_r = 0,13 \text{ mm}$ ,  $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ , zum Einfluß des Abstandes auf Intensitätsverteilung im übertragenen Strahl

Bei konstanten optischen Eigenschaften der Probe bestimmt die Intensitätsverteilung im Querschnitt des Anregungsstrahls die räumliche Verteilung der absorbierten Energie und damit die Geometrie des schallerzeugenden Zentrums [46]. Dies beeinflusst die Form der angeregten photoakustischen Welle und dadurch den entsprechenden Zeitverlauf des PA-Signals.

Somit wird als nächstes der Zusammenhang zwischen der räumlichen Intensitätsverteilung  $I_V(r, z)$  im durch die Verbindungsstelle zweier Faser übertragenen Anregungsstrahl und dem Zeitverlauf des PA-Signals  $p(\tau)$  analysiert.

Unter Berücksichtigung der Beugung bei indirekter Sensorgeometrie und unter Annahme einer ebenen akustischen Welle, Gauß'scher Intensitätsverteilung im Anregungsstrahl und kurzen Laserpulsen (bei einer Pulsdauer von  $\tau_L \leq 1/(\mu_a c)$ ) kann der Druckverlauf und damit das PA-Signal nach [47] vereinfacht berechnet werden:

$$p(\tau) = p_A \frac{\exp(-\omega_a \tau) - D \exp(-\omega_D \tau)}{1 - D} \theta(\tau). \quad (8.5)$$

Hier ist  $p_A$  die photoakustische Signalamplitude, die nach Gl. (3.4) bestimmt wird,  $D = \omega_D / \omega_a$  ein dimensionsloser Beugungsparameter,  $\omega_a = \mu_a c$  die charakteristische Frequenz der akustischen Welle und  $\omega_D$  die charakteristische Beugungsfrequenz  $\omega_D = D\omega_a$ . Gemäß [47] steht  $\omega_D$  mit dem Strahlradius  $\sigma_r(z)$  im folgenden Zusammenhang:

$$\omega_D = D\omega_a = \frac{2cz^*}{\sigma_r^2(z)}. \quad (8.6)$$

Hier ist  $z^*$  die Schichttiefe der Probe, die mit der Strahlachse  $z$  unter Berücksichtigung des Einstrahlwinkels  $\varphi_0$  im PA-Sensorkopf gemäß  $z^* = z \cos \varphi_0$  verbunden ist.

Bei Änderung der Intensitätsverteilung  $I_U(r, z)$  gemäß (8.4) in dem durch eine Verbindungsstelle zweier Faser übertragenen Anregungsstrahl ändert sich dementsprechend die Energiedichte an der Probenoberfläche  $\Phi(0)$  und der 1/e-Strahlradius  $\sigma_r(z)$ . Beim Einsetzen von (8.6) in (8.5) ergibt sich der Ausdruck für den Druckverlauf unter Berücksichtigung des radialen Strahlprofils:

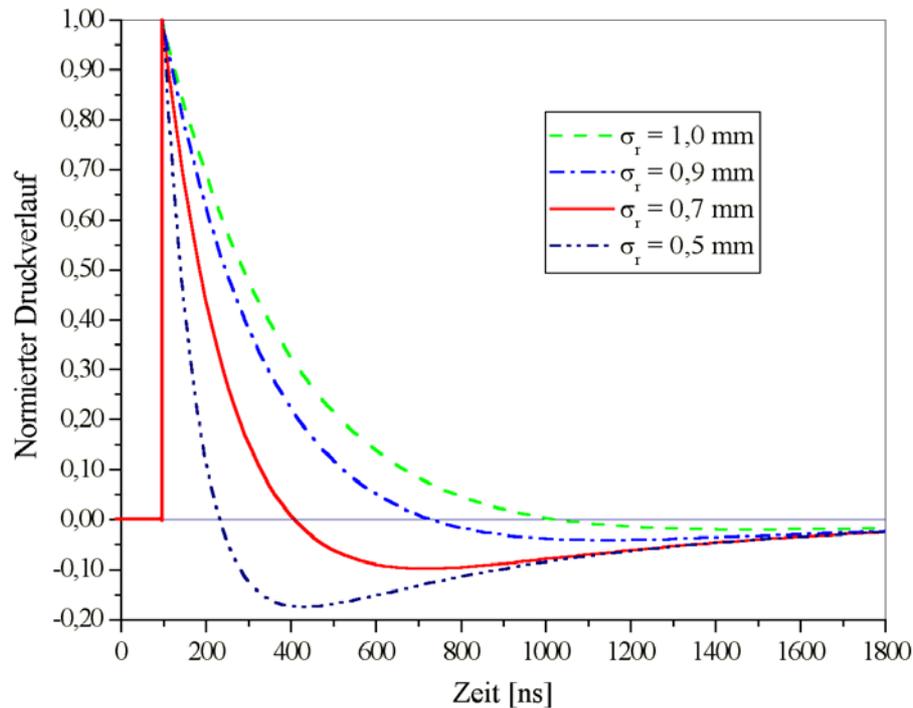
$$p(\tau) = \Lambda\beta \frac{c^2}{C_p} \mu_a \Phi(0) \frac{\exp(-\omega_a \tau) - D \exp\left(-\frac{2cz^*}{\sigma_r^2(z)} \tau\right)}{1 - D} \theta(\tau). \quad (8.7)$$

Die Gleichung (8.7) zeigt die Änderung des zeitlichen und räumlichen Druckverlaufes  $p(\tau)$  in Abhängigkeit von der radialen Intensitätsverteilung im Querschnitt des Anregungsstrahls  $I_U(r, z)$ , die durch  $\sigma_r(z)$  charakterisiert wird. Da Umrechnungsfaktor zwischen Zeit und Tiefenkoordinate die Schallgeschwindigkeit  $z = tc$  ist, führt die radiale Aufweitung des  $\sigma_r(z)$  aufgrund der Änderung der Intensitätsverteilung  $I_U(r, z)$  im übertragenen Anregungsstrahl durch eine Verbindungsstelle zweier Fasern zur entsprechenden Änderung des zeitlichen Verlaufs des PA-Signals  $p(\tau)$ .

Die in Abb.8.7 vorgestellten Simulationsergebnisse des Druckverlaufs  $p(\tau)$  nach Gl. (8.7) bei Variation von  $\sigma_r(z)$  stimmen mit den experimentellen Ergebnissen gemäß Abb. 8.2 und 8.4 überein. Es wird daraus ersichtlich, daß die abfallende Flanke des Druckverlaufs mit Zunahme des 1/e-Strahlradius  $\sigma_r(z)$  flacher wird.

Aus den oben beschriebenen Zusammenhängen ergibt sich folgende Schlußfolgerung: Jede Faserverbindungsstelle verursacht gemäß (8.4) eine Änderung der räumlichen Intensitätsverteilung  $I_U(r, z)$  im übertragenen Lichtstrahl. Deswegen bringt die Minimierung der Anzahl der optischen Verbindungsstellen in den entwickelten LWL-Multiplexern neben der

Verringerung der optischen Verluste auch eine entsprechende Verbesserung der Lichtübertragung bezüglich der räumlichen Struktur der übertragenen Laserpulse im Vergleich zu konventionellen LWL-Multiplexern.

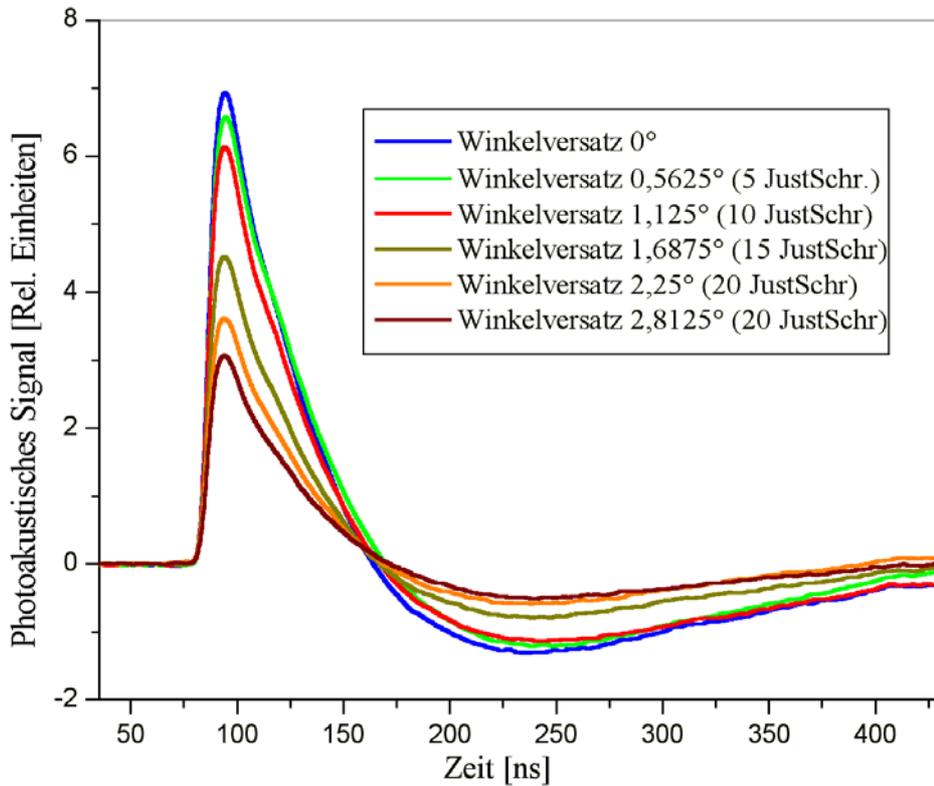


**Abb. 8.7:** Nach Gl. (8.7) berechnete normierte Verläufe des photoakustischen Signals  $p(\tau)$  bei verschiedenen Strahlradien  $\sigma_r(z)$ , ( $\mu_a = 10 \text{ cm}^{-1}$ ,  $c = 1500 \text{ m/s}$ ,  $D=4$ ,  $t_0 = 100 \text{ ns}$ ,  $z=1 \text{ mm}$ )

### 8.2.2 Einfluß des Winkelversatzes im LWL-Multiplexer auf das photoakustische Meßsignal

Zur Untersuchung des Einflusses der Positionierungsgenauigkeit des LWL-Multiplexers auf das PA-Signal wurden im oben beschriebenen Multiplexer-System laut Abb. 8.1 verschiedene Winkelversätze  $\Delta\varphi$  der zu koppelnden Faser an der Verbindungsstelle 2 durch den Motorantrieb eingestellt und entsprechende PA-Signale gemessen. Die Meßergebnisse sind in der Abb. 8.8 vorgestellt.

Wie aus dieser Abbildung ersichtlich ist, beeinflußt der Winkelversatz nicht die Form des PA-Signals. Das stimmt mit der oben beschriebenen Theorie gut überein, weil bei einem Winkelversatz sich lediglich die Überlappungsfläche der zu koppelnden Fasern an der Verbindungsstelle 2 ändert, während die Intensitäts- bzw. Energieverteilung im durch den LWL-Multiplexer übertragenen Anregungsstrahl dabei konstant bleiben.



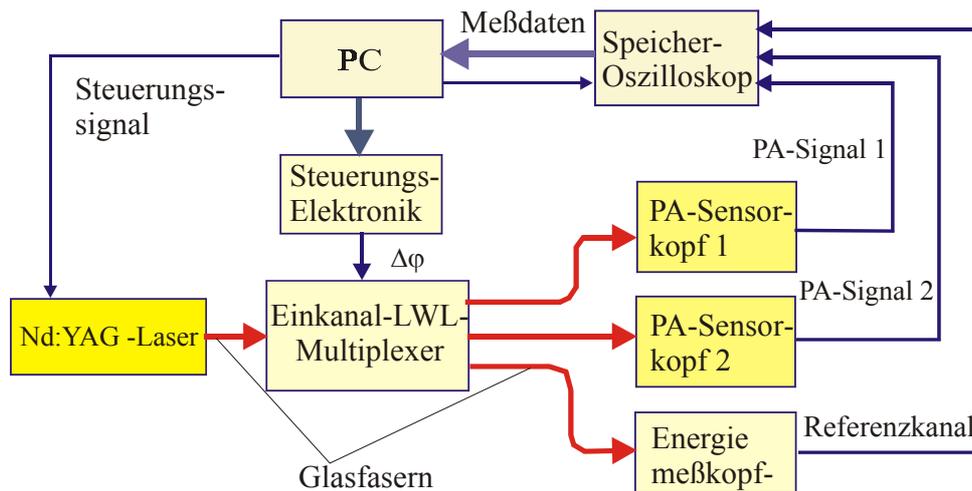
**Abb. 8.8:** Integrierte PA-Signale bei verschiedenen voreingestellten Winkelversätzen im LWL-Multiplexer

### 8.2.3 Automatische Meßfehlerkorrektur im Multiplexer-System mit photoakustischen Sensoren

Die Meßgröße bei den photoakustischen Messungen ist der tiefenabhängige Absorptionskoeffizient der Probe  $\mu(z^*)$ , der nach Gl. (3.3), (3.4) bzw. (8.5) und (8.7) über den gemessenen zeitlichen Druckverlauf akustischer Wellen  $p(\tau)$  bestimmt wird. Für eine fehlerfreie Berechnung des photoakustischen Signals bzw. des Druckverlaufs ist eine Berücksichtigung aller Parameter des übertragenen Laserpulses und der Probe erforderlich. Wie aus den o.g. Gleichungen ersichtlich ist, sollen für die fehlerfreie Bestimmung der Absorptionskoeffizienten alle anderen, das PA-Signal beeinflussende Parameter nach dem Prinzip der Störgrößenabschirmung [77,82] konstant gehalten bzw. ihr Einfluß ausgeschlossen werden. Da letzteres bei realen Meßbedingungen im Multiplexer-System mit PA-Sensoren wegen Schwankungen der Laserenergie oder Änderungen der Probeneigenschaften, z.B. aufgrund ihrer Temperaturabhängigkeit, nicht realisierbar ist, müssen bei der Auswertung der gemessenen PA-Signale nach dem Prinzip der Fehlerkompensation alle Einflüsse erfaßt und differenziert berechnet werden.

Insbesondere muß für die Auswertung gemessener Signalverläufe die Übertragungseffizienz des LWL-Multiplexers für den entsprechenden Meßkanal berücksichtigt werden.

Gemäß (3.3), (3.4) und (8.7) muß das PA-Signal in Bezug auf die Energiedichte und die Intensitätsverteilung der Anregungsstrahlung korrigiert werden. Dazu ist es notwendig, bei jeder PA-Messung die Anregungsenergie zur Berechnung des Absorptionskoeffizienten nach (8.5) zu messen.

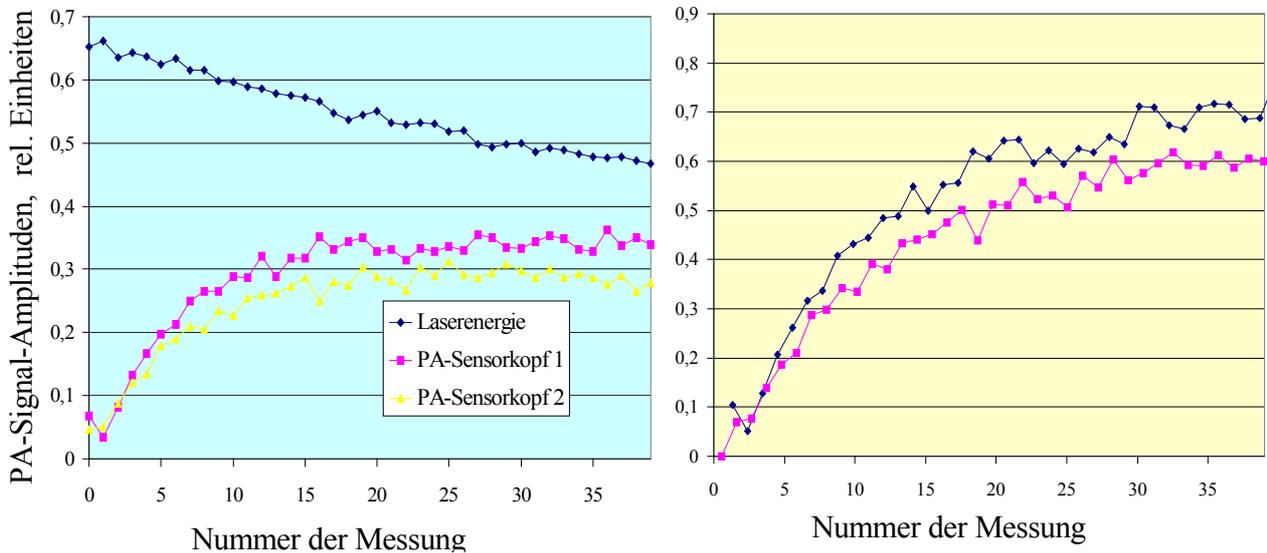


**Abb. 8.9: Automatische Korrektur des photoakustischen Meßsignals im Multiplexer-System**

Der Einkanal-LWL-Multiplexer ermöglicht eine entsprechende on-line Korrektur des photoakustischen Meßsignals durch parallele Messung der Laserenergie bei jedem Meßvorgang. Dies wird dadurch erreicht, daß ein Meßkanal des Multiplexer-Systems als Referenzkanal benutzt wird. Dazu wird an den entsprechenden optischen Ausgang des LWL-Multiplexers ein Energiemeßkopf (*Pyroelectric/Silicon Energy Meter Rj-7100*) angeschlossen und beim Abtasten aller Sensorköpfe ebenso abgefragt (Abb. 8.9). Das Meßsignal des Energiemeßkopfes wird mit dem mehrkanaligen Speicheroszilloskop aufgezeichnet und in den Meß- und Steuer-PC eingelesen. Bei jedem Meßzyklus wird das Laserlicht zum Energiemeßkopf durch den Referenzkanal des LWL-Multiplexers geschaltet und seine Energie gemessen. Nach diesem Wert wird das entsprechende PA-Signal normiert.

Als ein Beispiel sind in Abb. 8.10 die Meßergebnisse der durchgeführten Experimente zu Diffusionsuntersuchungen in einer Probeschicht bei der oben beschriebenen automatischen Meßfehlerkorrektur gezeigt. Nach den durch den Referenzkanal gemessenen Energien wird das PA-Signal berechnet. Damit wird die automatische Korrektur des Meßsignals nach dem Prinzip der Fehlerkompensation [77,82] zum Ausgleich von Schwankungen oder Driften der Laserenergie realisiert.

In einem Multiplexer-System können auch mehrere Referenzkanäle eingeführt werden, in denen die Auswirkungen entsprechender Einflußparameter, z.B. aufgrund der Temperaturabhängigkeit vom  $\beta$  und anderer Größen, bestimmt und kompensiert werden können.



**Abb. 8.10:** Automatische Meßfehlerkorrektur im aufgebauten Multiplexer-System durch den Referenzkanal des LWL-Multiplexers beim Abfragen zweier PA-Sensorköpfe und eines Energiemeßkopfes: a) unkorrigierte, b) auf gemessene Energie normierte Diffusionsverläufe

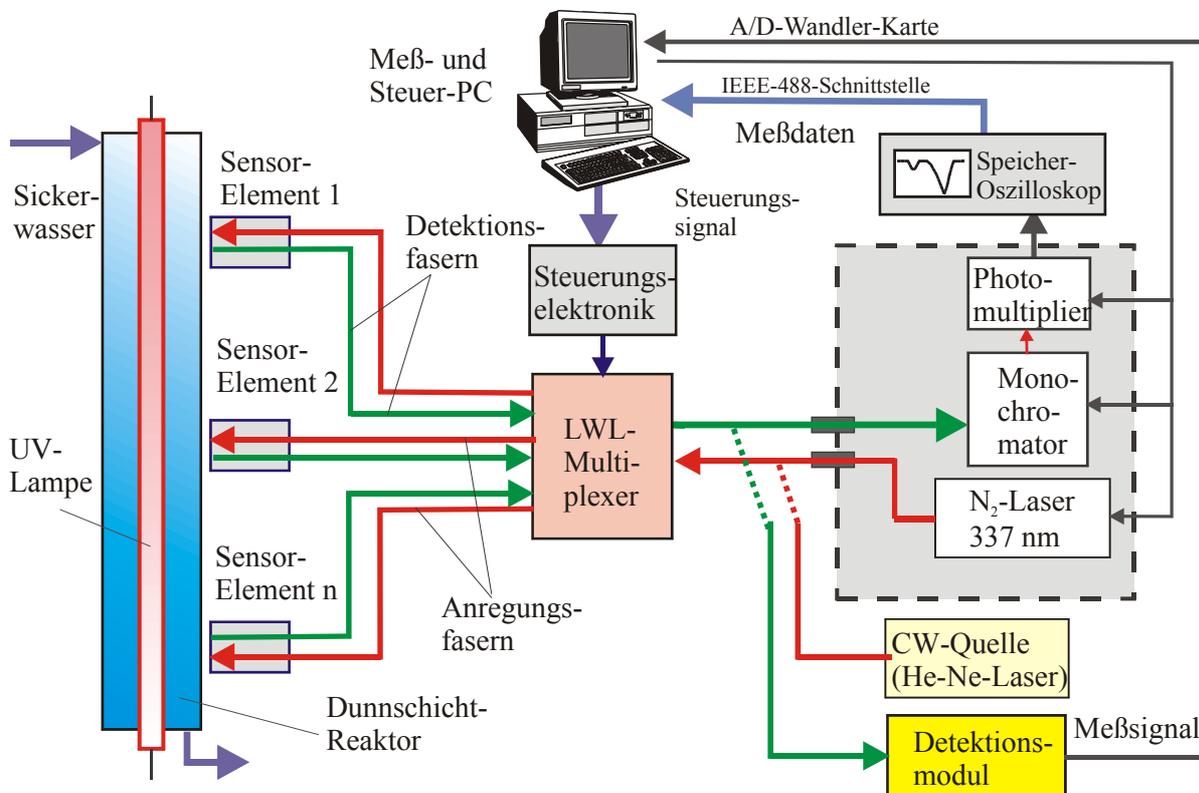
Im oben beschriebenen Multiplexer-System mit den faseroptisch geführten PA-Sensoren wurde auch eine automatische Justierung des LWL-Multiplexers vorgenommen, die in Abschnitt 11.3 beschrieben ist.

## 9 Aufbau eines automatisierten Multiplexer-Systems mit faseroptisch geführten Sensoren für on-line Überwachung und Steuerung einer UV/Ozon-Anlage zur Wasserbehandlung

Im Rahmen der Doktorarbeit wurde auf Basis des entwickelten Zweikanal-LWL-Multiplexers ein automatisiertes Meßsystem für on-line Messungen mit verschiedenen optischen Sensoren aufgebaut und für on-line Prozeß-Monitoring an der UV-Ozon-Anlage eingesetzt. Der Aufbau des unten vorgestellten Multiplexer-Systems umfaßt:

- Ausarbeitung des Strukturkonzeptes;
- Konstruktion und Bau der Durchflußzellen für kombinierte on-line Transmissions- und Fluoreszenzanalyse;
- Integration der Systemkomponenten und Aufbau des Detektionsmoduls sowie
- Ansteuerung des Gesamtsystems und Meßdatenerfassung.

Der prinzipielle Aufbau des Multiplexer-Systems mit faseroptisch geführten Sensoren ist in Abb. 9.1 dargestellt.



**Abb. 9.1:** Das Multiplexer-System für automatische Messungen mit faseroptisch geführten Fluoreszenz- und Transmissions-Sensoren zur on-line Überwachung und Steuerung der UV/Ozon-Anlage

Die UV/Ozon-Anlage dient zur Reinigung des Sickerwassers unter Wirkung des Ozons und der UV-Strahlung [66]. Im Dünnschichtreaktor wird das mit Ozon angereicherte und auf der Fallfilmfläche ablaufende Sickerwasser mit UV-Licht bestrahlt und in die Blasensäule zurückgefördert. Für die Überwachung der Abbaueffektivität der UV/Ozon-Anlage sind Informationen über den Gehalt verschiedener Bestandteile im Sickerwasser erforderlich. Diese Informationen können durch verschiedene optische Messungen, abhängig von der Zusammensetzung des zu analysierenden Wassers, gewonnen werden.

Deswegen wurde sowohl im Systemaufbau als auch bei der Konstruktion der Durchflußzellen die Möglichkeit vorgesehen, verschiedene optischen Messungen im Multiplex-Betrieb durchzuführen. Dabei ist der Betrieb des Meßsystems sowohl mit einem CW-, als auch mit einem gepulsten Laser vorgesehen.

### **9.1 Strukturkonzept für das Multiplexer-System mit faseroptischen Sensoren; Systemkonfiguration und Systemkomponenten**

Das optische Multiplexer-System wurde auf dem Prinzip einer flexiblen, erweiterbaren Struktur aufgebaut, um eine optimale Anpassungsfähigkeit an konkrete meßtechnische Anforderungen zu gewährleisten. Im Strukturkonzept des Multiplexer-Systems sind drei grundsätzliche Systemkonfigurationen vorgesehen, die eine komplexe automatische Überwachung der UV/Ozon-Anlage mit verschiedenen faseroptischen Sensoren ermöglichen und durch den Anschluß zusätzlicher Sensoren einfach erweitert und miteinander kombiniert werden können:

- Systemkonfiguration für automatische Transmissionsmessungen mit einer CW-Lichtquelle;
- Systemkonfiguration für zeitaufgelöste Fluoreszenzmessungen mit einer Zwillingsfaseranordnung mit einem gepulsten Laser und
- Systemkonfiguration für Fluoreszenz- und turbidimetrische Messungen bei der 90°-Faseranordnung sowohl bei einer CW-, als auch bei einer gepulsten Anregung.

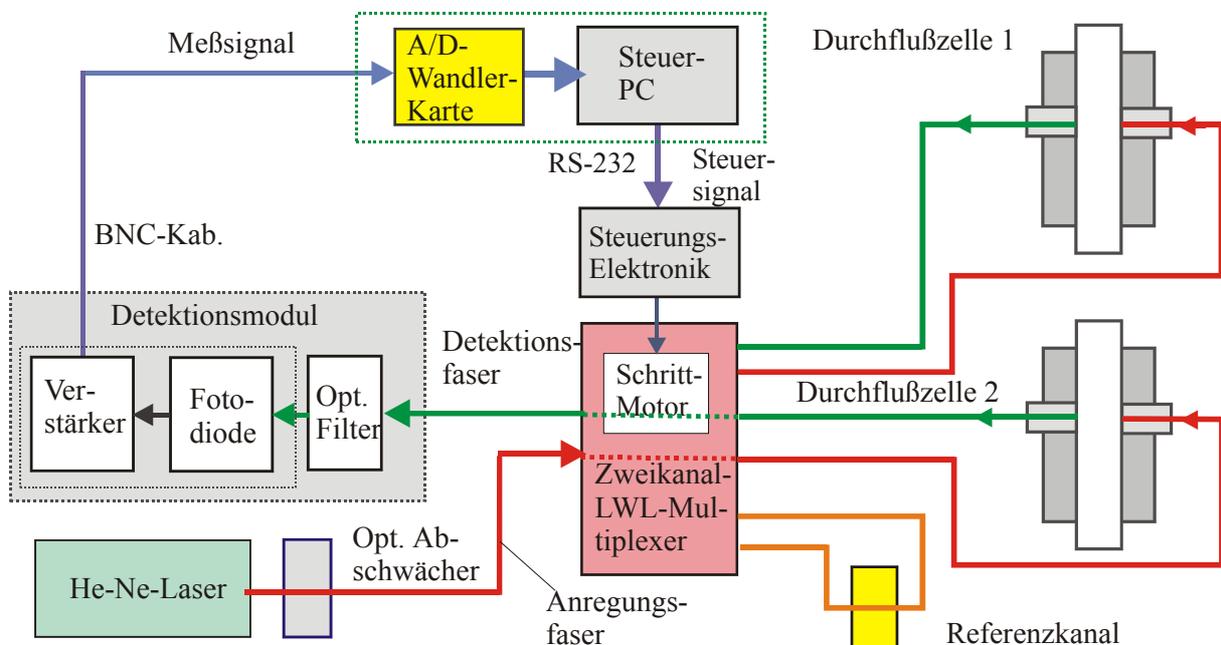
Kernelemente des aufgebauten Multiplexer-Systems sind der Zweikanal-LWL-Multiplexer und die Durchflußzellen, die in Abschnitt 9.2 beschrieben sind. Jede Durchflußzelle beinhaltet drei verschiedene Sensorelemente, zu denen jeweils eine Anregungs- und eine Detektionsfaser führt. Diese Fasern sind an entsprechende optische Ausgänge des Zweikanal-LWL-Multiplexers angeschlossen, so daß jedem Sensorelement in der jeweiligen Schaltposition das Laserlicht über den ersten Übertragungskanal zugeführt und gleichzeitig das Detektionslicht durch den zweiten Übertragungskanal zur Detektionseinheit zurückgeleitet wird.

Unterschiede zwischen den Systemkonfigurationen sind durch den Betrieb bzw. Einsatz verschiedener Sensorelemente der Durchflußzellen, Lichtquellen sowie der entsprechenden Detektionseinheiten festgelegt.

### 9.1.1 Systemkonfiguration für automatische Transmissionsmessungen

Die erste Systemkonfiguration ist für automatische Transmissionsmessungen der durch die Durchflußzellen fließenden Substanzen mit einer monochromatischen CW-Lichtquelle in einem Spektralbereich von 220 bis 1100 nm konzipiert.

Das Laserlicht wird über eine Glasfaser zum Zweikanal-LWL-Multiplexer geleitet (Abb. 9.2). Über den ersten Übertragungskanal des Multiplexers wird das Laserlicht zur ausgewählten Transmissions-Anregungsfaser durchgeschaltet und zum Transmission-Sensorelement der abgefragten Durchflußzelle übertragen. In der Durchflußzelle wird das Laserlicht teilweise von der zu analysierenden Substanz absorbiert und teilweise gestreut. Das durch das Meßzellenvolumen transmittierte Licht wird in die Transmissions-Detektionsfaser eingekoppelt und zum Zweikanal-LWL-Multiplexer zurückgeleitet. Durch den zweiten Übertragungskanal des LWL-Multiplexers wird das Lichtsignal zum Detektionsmodul übertragen und detektiert, wie in Abschnitt 9.3 beschrieben.



**Abb. 9.2: Konfiguration des Multiplexer-Meßsystems für automatische Transmissionsmessungen**

Bei on-line Transmissionsmessungen werden alle Schalt- und Meßvorgänge von einem Steuer-PC gesteuert und laufen durch die entwickelte Software vollautomatisch ab. Die Sensorelemente

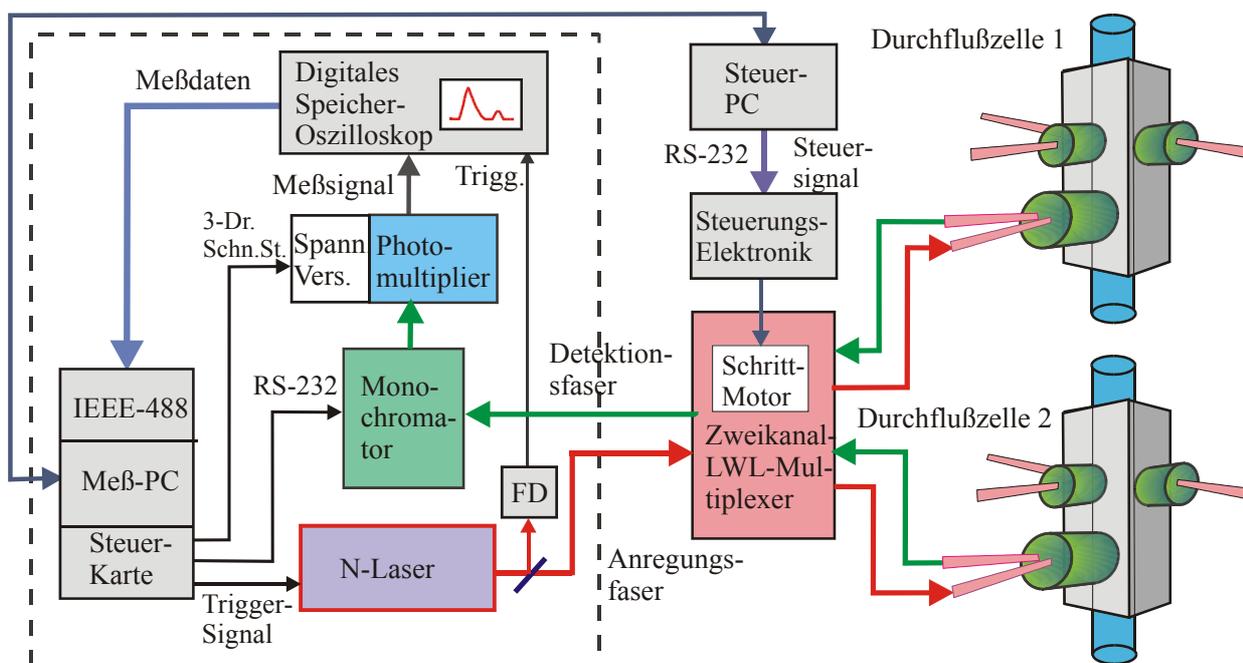
der Durchflußzellen werden dabei in einer vorgegebenen Reihenfolge abgefragt. Die erfaßten Meßdaten werden digitalisiert in den PC eingelesen und entsprechend weiterverarbeitet, wie in Abschnitt 9.4 beschrieben. Auf Grundlage dieser Meßdaten und der Ergebnisse der zuvor durchgeführten Kalibration der Durchflußzellen werden die Konzentrationen der durch die Durchflußzellen fließenden Substanzen und hierdurch die Abbaueffektivität des UV-Reaktors bestimmt.

Der Wellenlängenbereich im aufgebauten Meßsystem kann durch die Auswahl der Lichtquelle und der entsprechenden Einstellung des Detektionsmoduls optimal der jeweiligen Aufgabenstellung angepaßt werden. Die Empfindlichkeit des Meßsystems kann sowohl durch die Laserenergie als auch durch die Empfindlichkeit des Detektionsmoduls eingestellt werden.

Die Ausrüstung des Multiplexer-Systems mit einer geeigneten polychromatischen Lichtquelle und einem entsprechend angesteuerten Monochromator ermöglicht bei der ersten Systemkonfiguration auch on-line dispersive spektroskopische Absorptionsmessungen.

### 9.1.2 Systemkonfiguration für zeitaufgelöste Fluoreszenzmessungen

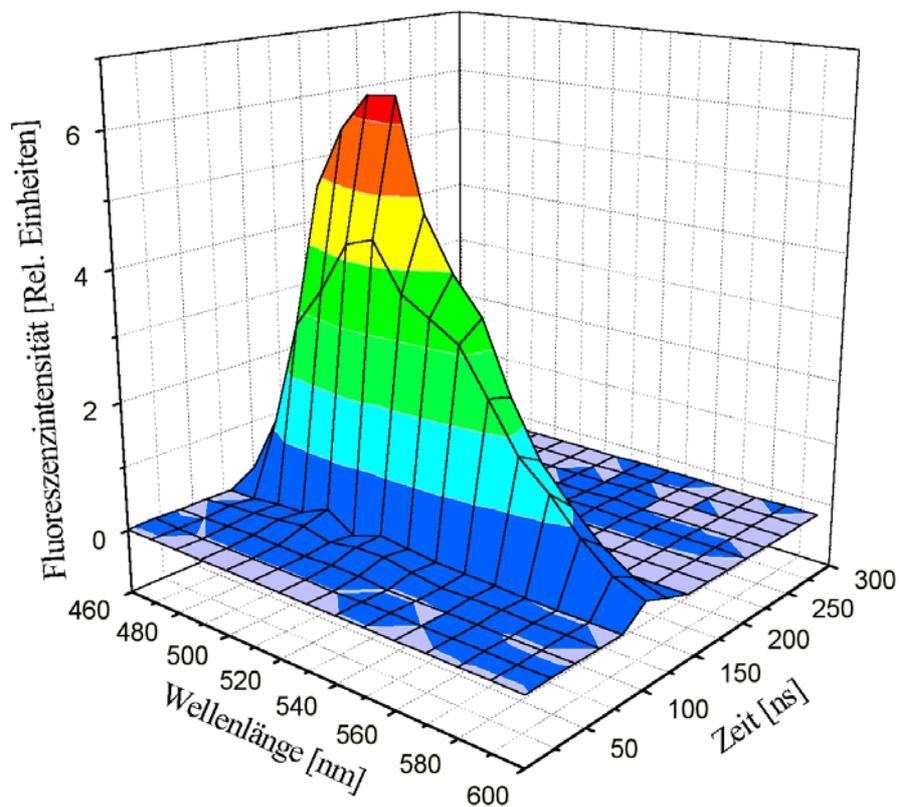
Die zweite Systemkonfiguration ist für zeitaufgelöste spektroskopische Fluoreszenzmessungen bei einer gepulsten Anregung vorgesehen und ist in Abb. 9.3 dargestellt.



**Abb. 9.3: Konfiguration des Multiplexer-Meßsystems für zeitaufgelöste Fluoreszenzmessungen**

In dieser Systemkonfiguration wurde als Kombination eines gepulsten N<sub>2</sub>-Lasers mit der entsprechenden Detektionseinheit der von der Firma *Cosmos Meßtechnik GmbH* gebaute Fluoreszenzsensor [71,72,75] eingesetzt.

Die Detektionseinheit des Fluoreszenzmeßsystems besteht aus dem Monochromator (SP 150-M), dem Photodetektor und dem Oszilloskop. Die Pulsbreite des N<sub>2</sub> - Lasers (VSI-337i der Firma Starna GmbH) beträgt 3 - 4 ns bei einer Repetitionsrate von 10 Hz. Dementsprechend wurden zur schnellen Fluoreszenz-Detektion und Aufnahme der Abklingkurven aufgrund der erforderlichen hohen Zeitauflösung eine Photomultiplier-Röhre mit steuerbarer Empfindlichkeit (H5773, Fa. Hamamatsu) und das digitale Speicheroszilloskop (TDS-620A, Fa. Textronik) verwendet.



**Abb. 9.4:** Das mit dem aufgebauten Multiplexer-System und den Durchflußzellen aufgenommene zeitaufgelöste Fluoreszenzspektrum von Uranin (50 mg/l)

Im Monochromator wird das polychromatische Fluoreszenzlicht spektral zerlegt. Die einzelnen spektralen Anteile werden vom Photomultiplier in einem vorgegebenen Wellenlängenbereich nacheinander detektiert. Das Speicheroszilloskop nimmt die Fluoreszenzabklingkurven auf, mittelt diese und überträgt sie dem Meß-PC. Die einzelnen Abklingkurven werden im Meß-PC zum zeitaufgelösten Fluoreszenzspektrum zusammengesetzt.

Das digitale Speicheroszilloskop wird durch eine IEEE-448-Steckkarte, der Monochromator, der Photomultiplier sowie der  $N_2$ -Laser von der Multifunktionskarte vom Industrie-Meß-PC aus und der LWL-Multiplexer von einem Steuer-PC gesteuert.

Der Spektralbereich und die Wellenlängenauflösung werden durch die Ansteuerung des Monochromators vorgegeben. Die Einstellung des erforderlichen Meßbereichs erfolgt durch Steuerung der Verstärkung des Photomultipliers.

Mit dem aufgebauten Multiplexer-System wurden zeitaufgelöste Fluoreszenz-Messungen durchgeführt. In Abb. 9.4 ist als Beispiel das mit dem aufgebauten Multiplexer-System laut Abb. 9.3 und dem optimierten Fluoreszenzsensor Kopf der Durchflußzelle aufgenommene zeitaufgelöste Fluoreszenzspektrum von der Substanz Uranin gezeigt. Bei dieser Systemkonfiguration wurden auch die im Abschnitt 9.5 beschriebenen Fluoreszenz-Messungen zur Untersuchung des Einflusses der Positionierungsgenauigkeit des LWL-Multiplexers auf das Fluoreszenzsignal durchgeführt.

### 9.1.3 Systemkonfiguration für Fluoreszenz- und turbidimetrische Messungen

Die dritte Systemkonfiguration ist für Fluoreszenzmessungen bei Anordnung der Detektions- und Anregungsfasern unter  $90^\circ$  zueinander mit verschiedenen Lichtquellen vorgesehen. Sie unterscheidet sich bei einer gepulsten Anregung von der zweiten Systemkonfiguration nur durch den Einsatz des entsprechenden Sensorelementes der Durchflußzellen.

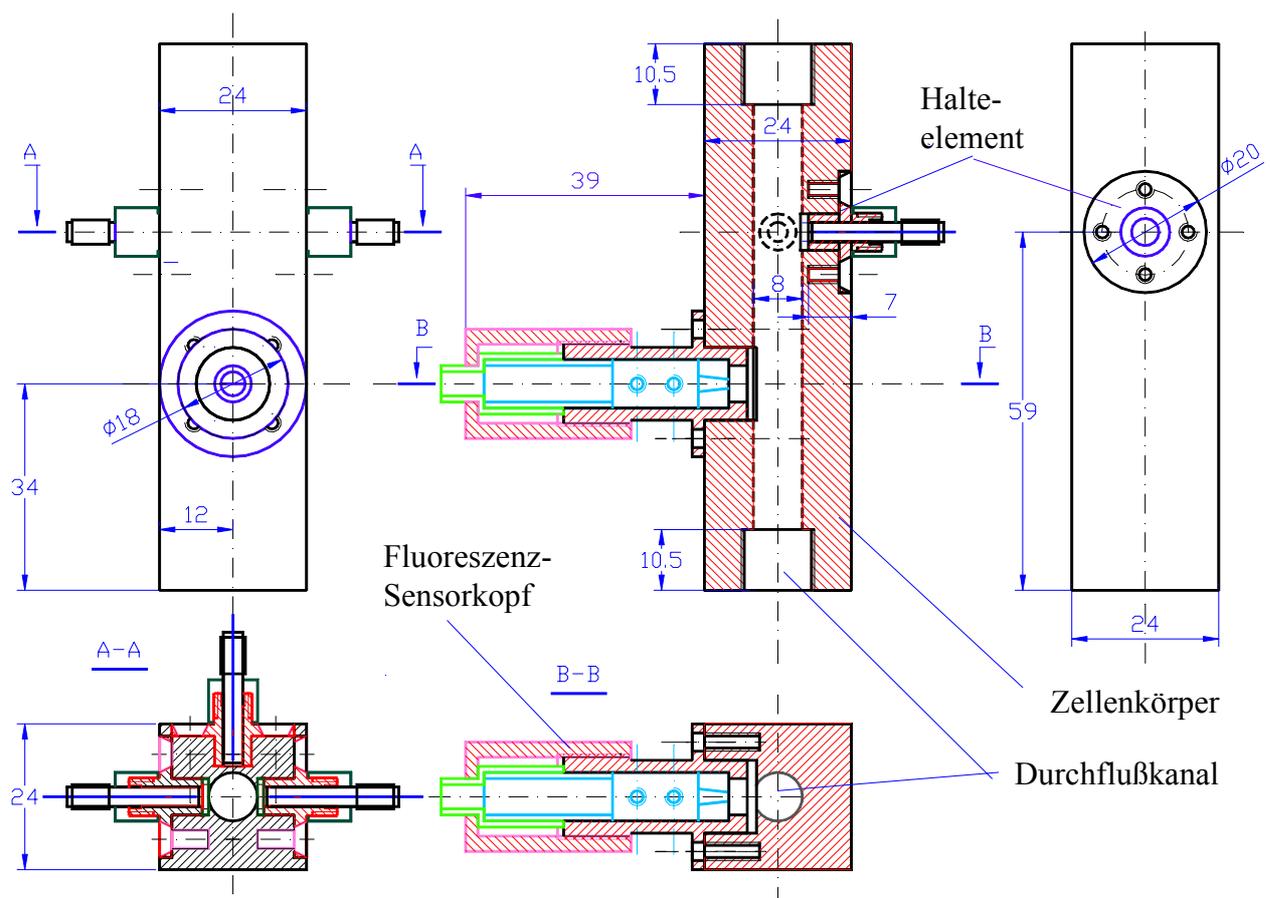
Bei einer CW-Anregung z.B. mit einer UV-Lampe kann das gebaute Detektionsmodul bei entsprechender Anpassung zur Fluoreszenzdetektion unter Berücksichtigung der spektralen Empfindlichkeit des eingesetzten Photodetektors verwendet werden. Bei dieser Systemkonfiguration mit einer CW-Lichtquelle und dem aufgebauten Detektionsmodul können auch automatische turbidimetrische Messungen mit dem dritten Sensorelement der Durchflußzellen bei der Faseranordnung unter  $90^\circ$  durchgeführt werden. Dies ermöglicht die Bestimmung nicht nur des absorbierten, sondern auch des von den strömenden Hydrokolloiden gestreuten Anteils des in die Probe eingestrahlt Lichtes und damit eine entsprechende Prozeßkontrolle.

Die Auswahl der Systemkonfiguration für jede Anwendung hängt von der konkreten meßtechnischen Aufgabe ab. Verschiedene Systemkonfigurationen können miteinander kombiniert werden. So können z. B. bei der zweiten Systemkonfiguration mit einer gepulsten Anregung auch Transmissions-, sowie parallel Transmissions- und Fluoreszenz-Messungen im Multiplex-Betrieb durchgeführt werden.

## 9.2 Entwicklung der Durchflußzelle für kombinierte on-line Transmissions- und Fluoreszenz-Analyse

Im Rahmen des Systemaufbaus wurden Meßzellen für on-line automatische Fluoreszenz- und Transmissionsmessungen im Durchfluß konstruiert, gebaut und charakterisiert.

Aufbau und Konstruktion der Durchflußzellen sind zur Ausführung mindestens dreier Arten optischer Messungen vorgesehen: Transmissionsmessungen im durchgehenden Licht bei einer Schichtdicke von 8 mm, Fluoreszenzmessungen bei Anordnung der Anregungs- und Detektionsfasern unter  $14^\circ$  und Fluoreszenzmessungen bei Anordnung der Anregungs- und Detektionsfasern unter  $90^\circ$  zueinander (s. Anhang). Bei der zuletzt genannten Anordnung können außerdem automatische turbidimetrische Messungen durchgeführt werden. Jede Durchflußzelle enthält dementsprechend drei Sensorelemente, zu denen jeweils eine Anregungs- und eine Detektionsfaser führt.



**Abb. 9.5: Durchflußzelle für kombiniert Transmissions- und Fluoreszenzmessungen**

Die Durchflußzelle ist als vierkantiger Zellenkörper mit einem zylindrischen Durchflußkanal mit dem Durchmesser  $d_{Zell} = 8$  mm und drei Sensorelementen konzipiert (Abb.9.5). Der

Durchflußkanal ist von den Sensorelementen durch zylindrische Fensterscheiben aus Quarzglas getrennt.

Das Meßvolumen (3,47 ml) bestimmt im wesentlichen das dynamische Verhalten der Durchflußzelle, was besonders bei Integration der analytischen Meßstellen in einen Regelkreis zur Prozeßsteuerung aus verfahrenstechnischer Sicht berücksichtigt werden muß.

Im Zellenkörper sind drei Sensorelemente integriert. In einer zur Achse des Durchflußkanals senkrechten Ebene sind die optischen Achsen dreier Glasfasern angeordnet: In einer Linie liegender Anregungs- und Detektionsfasern für Transmissionsmessungen und unter 90° zu ihnen angeordneter Detektionsfaser für Fluoreszenz- oder turbidimetrische Messungen (Schnitt A-A). Diese Anordnung bildet das erste und dritte Sensorelement.

Die Faserkopplungen sind durch Steckverbindungen mit SMA-905-Steckern ausgeführt. Das bestimmt im wesentlichen die Geometrie und die Abmessungen der ganzen Durchflußzelle und einzelner Konstruktionsbestandteile wie z. B. der Halteelemente zum Anschluß der Faserstecker. Zur Wasserdichtheit unter Hochdruckbedingungen im Dünnfilmreaktor und in der Systemarmatur ist die zuverlässige Befestigung dieser Halteelemente im Zellenkörper durch entsprechende Flanschverschraubungen vorgesehen.

Das Meßprinzip der Absorptionsphotometrie basiert auf indirekter Bestimmung der von der Probe absorbierten Lichtenergie. Die durch die Probenschicht mit einem molaren wellenlängenspezifischen Extinktionskoeffizient  $\varepsilon_\lambda$  und der Konzentration  $C$  transmittierte Lichtintensität  $I_T$  ist nach Lambert-Beer'schem Gesetz [68,77]:

$$I_T = I_0 \exp(-C\varepsilon_\lambda d). \quad (9.1)$$

Hier ist das Produkt  $D(\lambda) = C\varepsilon_\lambda d$  die Extinktion oder die optische Dichte der Probe und  $d = d_{\text{Zell}}$  die Weglänge des Lichtstrahls im Durchflußkanal. Die Meßgröße stellt der Extinktionskoeffizient  $\mu_{\text{ext}} = \varepsilon_\lambda C$  oder die Konzentration  $C$  dar. In den meisten Spektralphotometern wird die optische Dichte  $D(\lambda)$  aus der Gleichung (9.1) beim Abfahren des vorgegebenen Wellenlängenbereiches ermittelt. Zur Bestimmung der Konzentration  $C_x$  muß eine zusätzliche Transmissionsmessung der Standardprobe mit einer bekannten Konzentration  $C_{S_t}$  durchgeführt werden. Die Transmissionsmessungen der Standard- und der zu analysierenden Probe erfolgen im Einstrahlphotometer nacheinander und im Zweistrahlphotometer gleichzeitig [91]. Aufgrund der gemessenen Extinktion der Standardprobe  $D_{S_t}$  kann aus der Gleichung (9.1) die Konzentration  $C_x$  berechnet werden:

$$C_x = \frac{D_x C_{St}}{D_{St}} = \frac{\ln I_0 - \ln I_x}{\ln I_0 - \ln I_{St}} C_{St} . \quad (9.2)$$

Die automatische Konzentrationsbestimmung kann auch aufgrund des Kompensationsprinzips bei verschiedenen Kompensationsarten erfolgen, wie es in [92,93] beschrieben ist. Der Vorteil des Kompensationsmeßverfahrens ist, daß das Meßsignal direkt der zu bestimmenden Konzentration proportional ist.

Bei den automatischen Transmissionsmessungen im aufgebauten Multiplexer-System kann die Konzentration der Standardprobe sowohl in einem Referenzkanal als auch aufgrund der vorher durchgeführten Kalibration - der Kalibrierkurve des Meßkanals - ermittelt werden.

Das zweite Sensorelement der Durchflußzelle ist für Fluoreszenzmessungen bei Anordnung der Anregungs- und Detektionsfasern unter  $14^\circ$  zueinander vorgesehen und stellt einen an die Kopplungsbedingungen in der Durchflußzelle optimierten Fluoreszenz-Sensorkopf dar.

Bei verschiedenen Ausführungen der Fluoreszenz-Sensorköpfe kann die Anregung und Detektion entweder mit einer einzigen (single-fiber-fluorometric sensors), mit zwei (double-fiber-fluorometric sensors) oder mit mehreren getrennten Fasern erfolgen, wobei die Fasern entweder parallel (parallel-fiber sensors) oder unter einem bestimmten Winkel zueinander (convergent-fiber sensors) angeordnet werden können. Konstruktive Gestaltungen verschiedener Fluoreszenz-Sensorköpfe sowie die entsprechenden mathematischen Modelle sind in [94-99] beschrieben.

Aufgrund der Vergleichsanalyse verschiedener Sensordesigns wurde als Grundlage die in [76] beschriebene gewinkelte Anordnung herangezogen, die sich bei allen durchgeführten Messungen gut bewährt hat. Der Standard-Sensorkopf wurde jedoch vorwiegend zum Eintauchen in eine flüssige Probe konzipiert und ist deswegen, durch Verlust des nützlichen Probenvolumens, für die Meßbedingungen in der Durchflußzelle nicht ideal geeignet. Deswegen wurde zur Verbesserung der Meßeigenschaften des Sensorkopfes hinsichtlich Störanfälligkeit und Handlichkeit sowie zur Erhöhung seiner Empfindlichkeit eine Optimierung der Konstruktion vorgenommen. Ausgehend vom vorhandenen Standard-Sensorkopf wurde ein für die Meßbedingungen in der Durchflußzelle optimierter Fluoreszenz-Sensorkopf konstruiert.

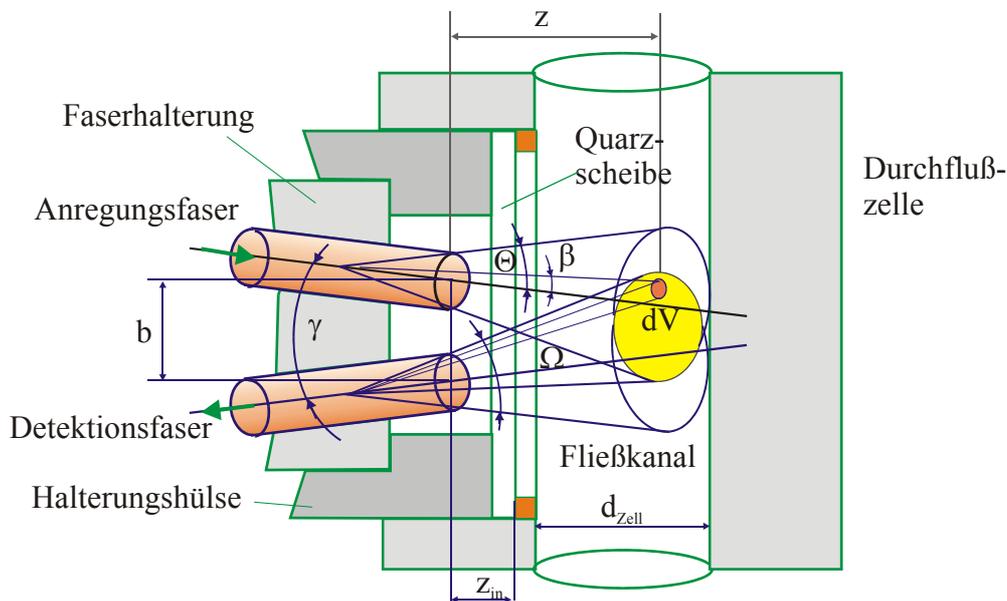
In der Abb. 9.6 ist die Anordnung der Anregungs- und Detektionsfasern in der Durchflußzelle schematisch dargestellt. Die Empfindlichkeit der Fluoreszenzmessungen in der Durchflußzelle wird im wesentlichen durch die Geometrie des Sensorkopfes und damit durch die Kopplungseffizienz des Anregungs- und Detektions-Lichtes festgelegt. Zu den wichtigen geometrischen Parametern gehören der Winkel  $\gamma$  zwischen den optischen Achsen der Anregungs- und Detektionsfaser, der Abstand  $b$  zwischen den Faserenden und der Durchmesser

des Durchflußkanals  $d_{zell}$ , da diese Parameter die Größe des Überlappungsvolumens der Strahlkegel sowie die Länge der inaktiven Zone  $z_{in}$  bestimmen.

Das Fluoreszenzsignal von einem Volumenelement  $dV = dSdz$  mit einer Dicke  $dz$  bei konstanten Eigenschaften der Probe ist durch die Intensitätsverteilung im Anregungsstrahl  $I_0(z, \beta)$  und den Raumwinkel der Detektionsfaser  $\Omega(z, \beta)$  bestimmt [95]:

$$dF(z, \beta) = K_F I_0(z, \beta) \Omega(z, \beta) dSdz . \quad (9.3)$$

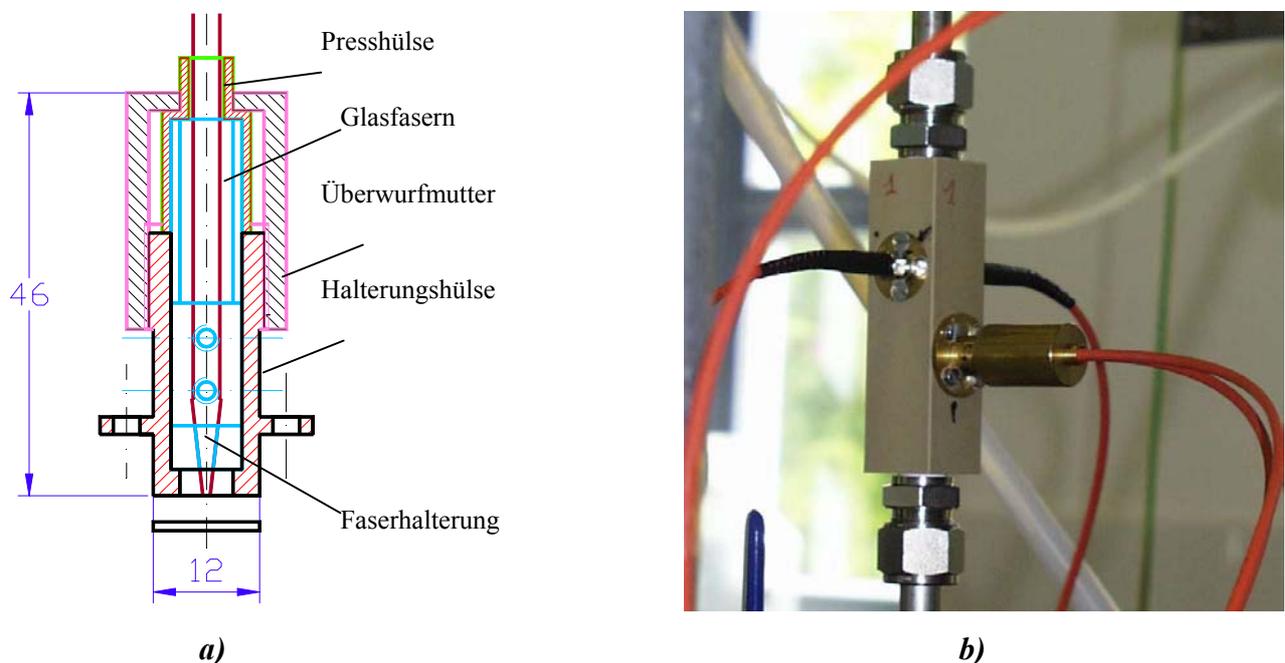
Hier charakterisiert  $K_F = q\mu_a C$  mit der Quantenausbeute  $q$ , der Konzentration  $C$  und dem Absorptionskoeffizient  $\mu_a$  die optischen Eigenschaften der Probe und stellt die Meßgröße dar;  $\beta$  ist der Winkel zwischen der optischen Achse der Anregungsfaser und der Position des Volumenelementes. Die Intensitätsverteilung im Anregungsstrahl  $I_0(z, \beta)$  wird unter anderem durch die Übertragungseigenschaften des LWL-Multiplexers beeinflusst, wie es in Abschnitt 8.2.1 gezeigt wurde. Zur Berechnung des vollständigen Fluoreszenz-Signals muß  $dF(z, \beta)$  nach  $z$  und  $\beta$  über das gesamte Überlappungsvolumen integriert werden.



**Abb. 9.6: Anordnung der Glasfasern im optimierten Fluoreszenz-Sensorkopf in der Durchflußzelle**

Wie aus Gleichung (9.3) und Abb. 9.6 ersichtlich ist, wirken sich konstruktive Parameter des Sensorkopfes und der Durchflußzelle ( $b$ ,  $\gamma$  und  $d_{zell}$ ) durch den Raumwinkel  $\Omega$  und das Überlappungsvolumen der Strahlkegel  $V$  auf die Kopplungseffizienz des Fluoreszenzlichtes und somit auf die Meßempfindlichkeit aus.

Für zwei parallel zueinander angeordnete Fasern kann die Tiefe der inaktiven Zone  $z_{in}$  ausgehend vom Öffnungswinkel der Strahlkegel  $\Theta$  und dem Abstand  $b$  zwischen den Faserenden berechnet werden:  $z_{in} = \frac{b}{2 \tan \Theta}$ . Bei der gewinkelten Anordnung verkürzt sich der Abstand  $z_{in}$  bei gleichzeitiger Änderung des Überlappungsvolumens. Durch Variation des Abstandes zwischen den Stirnflächen der Anregungs- und Detektionsfasern kann die Länge der inaktiven Zone  $z_{in}$  so abgekürzt werden, daß sich die Strahlkegel im Durchflußkanal vollständig überlappen.



**Abb. 9.7:** a) Der optimierte Fluoreszenz-Sensorkopf und b) die gebaute Durchflußzelle für on-line Transmissions- und Fluoreszenzanalyse

Zur Umsetzung der oben genannten Konstruktionsmerkmale ist das Hauptelement des Fluoreszenz-Sensorkopfes - die Faserhalterung - als ein zylindrisches Teil mit zwei unter  $14^\circ$  zueinander geneigten Bohrungen zum Einlegen der Anregungs- und Detektionsfaser ausgeführt, wobei der Abstand zwischen den Faserenden so berechnet ist, daß optimale Kopplungsbedingungen geschaffen werden (Abb. 9.7). Zur Zugentlastung der Glasfasern ist eine auf die Faserhalterung aufgesetzte Presshülse vorgesehen, die mögliche Positionsänderungen der Glasfasern unter mechanischer Belastung ausschließt und damit die Störanfälligkeit des Sensorkopfes bei den Messungen wesentlich verringert.

Der Sensorkopf wird in die Halterungshülse eingesteckt und mittels einer Überwurfmutter angeschraubt. Die Halterungshülse ist in einer zum Durchflußkanal senkrechten Bohrung

geführt und durch Flanschverschraubung im Zellenkörper befestigt. Der Abstand von 25 mm zwischen dem ersten und zweiten Sensorelement schließt die Überlagerung der Strahlkegel aus, was gleichzeitige Messungen mit allen drei Sensorelementen erlaubt. Die Dimensionierung der Halterungshülse ermöglicht den Betrieb der konstruierten Durchflußzelle nicht nur mit dem oben beschriebenen optimierten Fluoreszenz-Sensorkopf, sondern auch mit den vorhandenen Standard-Sensorköpfen. Die Durchflußzellen werden mit einer Industrierverschraubung an der Reaktorarmatur angeschraubt. Der Zellenkörper ist aus dem Kunststoff PEEK hergestellt, was den Betrieb unter Einwirkung von Ozon und aggressiven Medien ermöglicht. Die Bauteile der Sensorelemente sind aus Messing gefertigt. Als Lichtfenster wurden zylindrische Fensterscheiben aus Quarzglas Suprasil® (mit dem Durchmesser 3 und 6 mm bei einer Stärke von 1,25 mm verwendet).

Optische Eigenschaften der Durchflußzellen wie Kopplungsbedingungen, Streuung und Reflexionen des Lichtes an den Grenzflächen und der gesamte Strahlengang wurden beim Konstruktionsentwurf mit den zu diesem Zwecke aufgebauten faseroptisch geführten Sensorzellen aus Mikrobank-Elementen modelliert.

### **9.3 Signaldetektion und Meßdatenaufbereitung**

Struktur und Eigenschaften der in einem spektrometrischen Meßsystem integrierten Detektionseinheit werden sowohl durch die spektrale und zeitliche Charakteristiken der verwendeten Lichtquellen als auch durch die Art der durchzuführenden Messungen festgelegt.

Bei optisch/spektroskopischen Messungen besteht die Detektionseinheit allgemein aus einem Monochromator oder einem Spektrograph zur spektralen Zerlegung der Strahlung, einem Photodetektor als Photomultiplier, Photodiode, Diodenarray oder CCD-Kamera mit entsprechendem Meßverstärker und einem Meßgerät zur Aufnahme des Meßsignals. Je nach erforderlichem Spektralbereich, Frequenzverhalten und Empfindlichkeit wird eine optimale Kombination dieser Komponenten zusammengestellt.

Bei zeitaufgelösten Fluoreszenzmessungen wird im Monochromator das polychromatische Fluoreszenzlicht in seine einzelnen spektralen Anteile zerlegt, die dann mit dem Photomultiplier detektiert und mit dem Oszilloskop aufgenommen werden, wie es in Abschnitt 9.1.2 beschrieben ist.

Bei dispersiven [91] Absorptionsmessungen mit einer polychromatischen Lichtquelle wird durch den Monochromator die Detektionswellenlänge entsprechend der Anregungswellenlänge eingestellt.

Bei nichtdispersiven Transmissions- sowie turbidimetrischen Messungen mit einer monochromatischen Lichtquelle stellt dagegen das zu detektierende Lichtsignal auch monochromatisches Licht dar, das direkt nach entsprechender optischer Anpassung detektiert werden kann. Um eine weitgehende Einstellungsmöglichkeit für automatische Transmissionsmessungen mit einer CW-Lichtquelle in einem breiten Spektralbereich und im erforderlichen Meßbereich zu gewährleisten, wurde zur on-line Prozeßkontrolle das optimierte Detektionsmodul gebaut (Anhang 5).

Das Detektionsmodul besteht aus einem Fotodetektor sowie Kopplungs- und Verstärkungseinheiten, wobei alle optischen und elektrischen Komponenten entsprechend den Meßbedingungen angepaßt bzw. ausgetauscht werden können.

Die Eingangsoptik bestimmt die räumliche Empfangscharakteristik des Detektionsmoduls sowie die Geometrie, unter der die Messung durchgeführt wird. Zur optischen Anpassung wurde ein Kopplungselement zum Anschluß der SMA-Steckers konstruiert (s. Anhang), in dem der Einsatz und Austausch verschiedener optischer Filter mit Standardfassung ( $\varnothing$  25mm) vorgesehen ist. Durch den Austausch der Filter kann sowohl der spektrale Bereich als auch die Empfindlichkeit des Detektionsmoduls eingestellt werden. Der Abstand zum Stecker kann dabei abhängig von der fotoempfindlichen Fläche der Fotodiode variiert werden.

Als Fotodetektor wurde ein Silikon-PIN-Modul (HUV-1100BQ) (fotoempfindlicher Durchmesser  $d_E = 2,5\text{mm}$ , Bandbreite 20 Hz bei  $R = 200\text{M}\Omega$ , Empfindlichkeit 24 bis 116 mV/W im Spektralbereich 250 bis 1100 nm), bestehend aus einer PIN-Photodiode mit integriertem Verstärker und externem Rückkopplungswiderstand, verwendet. Die spektrale Empfindlichkeit des Fotodetektors erlaubt den Betrieb des Meßsystems sowohl mit dem He-Ne-Laser, als auch mit einer UV-Lichtquelle.

Der Fotodetektor in einem TO-Gehäuse mit Quarzglasfenster wird durch einen IC-Sockel an der Rasterplatine mittels einer Haltekonstruktion und einer lösbaren Steckverbindung fixiert. Die Verstärkungs- und Bandbreitencharakteristik des integrierten Verstärkers wird durch ein leicht austauschbares Widerstandsmodul bestimmt. Zur flexiblen Einstellung der Empfindlichkeit und der Bandbreite des Detektionsmoduls können sowohl der Fotodetektor als auch der Rückkopplungswiderstand  $R_F$  entsprechend den meßtechnischen Anforderungen einfach ausgetauscht werden.

Der Fotodetektor wandelt die auf seine aktive Fläche fallende Lichtleistung  $P$  entsprechend seiner spektralen Empfindlichkeit  $S(\lambda)$  in Strom  $I_S$  um, welcher der Intensität des einfallenden Lichtes direkt proportional ist. Das Stromsignal wird vom Operationsverstärker verstärkt und nach  $U = R_F I_S = R_F P S(\lambda)$  in eine Spannung ( $\pm 10V$ ) umgewandelt. Das Meßsignal wird über ein BNC-Kabel zum PC übertragen, durch die A/D-Wandler-Karte digitalisiert und in den PC eingelesen.

Zusammenfassend bietet das gebaute Detektionsmodul gegenüber handelsüblichen Ausführungen den Vorteil der flexiblen Anpassungsfähigkeit, das sind z.B. die Möglichkeit zum Einsatz verschiedener Photodioden bzw. Diodenmodulen in TO-Gehäusen bei variabler Einstellbarkeit der Meßempfindlichkeit und des Spektralbereichs.

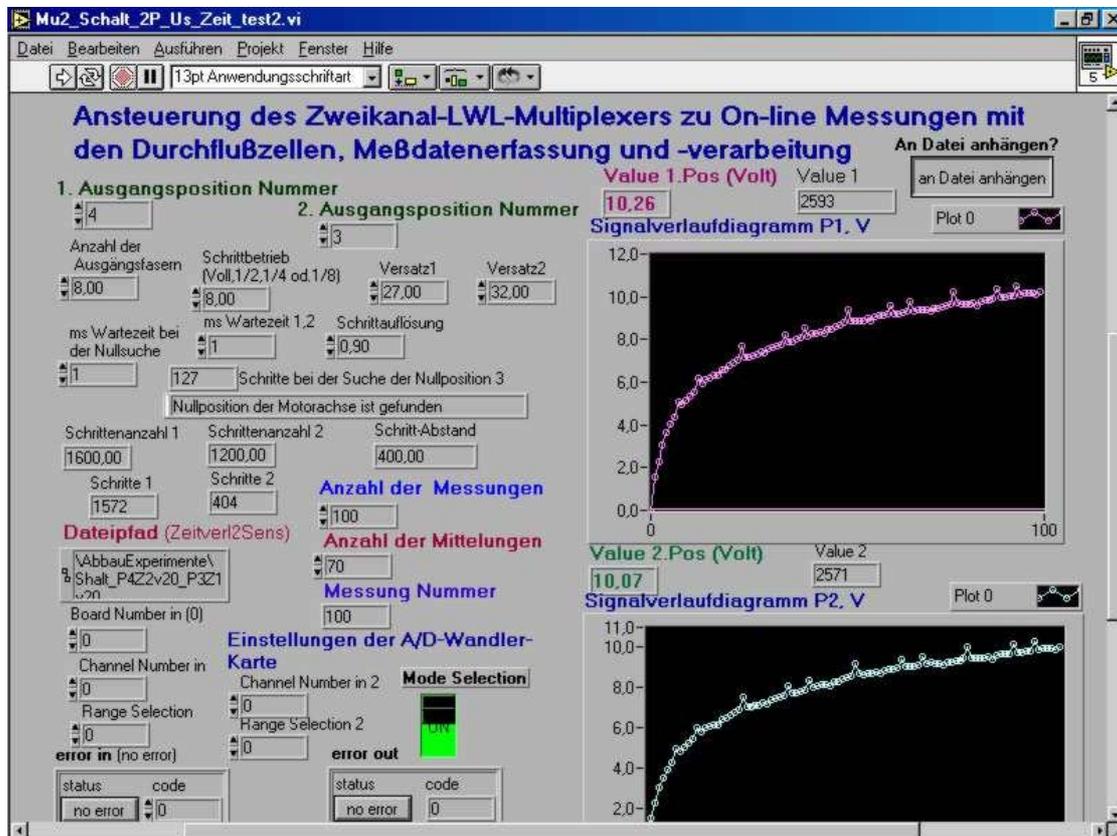
#### **9.4 Ansteuerung des Multiplexer-Systems und Meßdatenerfassung**

Zur Ansteuerung des Multiplexer-Systems und Meßdatenerfassung wurde eine umfassende Meß- und Steuerungssoftware in Pascal und LabView erstellt, mit der alle Schalt- und Meßvorgänge voll automatisiert werden konnten. Die entwickelte Software deckt alle wesentlichen Funktionen des Multiplexer-Meßsystems ab: Ansteuerung des Zweikanal-LWL-Multiplexers über den Schrittmotor (RS-232-Schnittstelle), Transmissionsmessungen und Digitalisierung des Meßsignals mit der A/D-Wandler-Karte (ME-2600 vom *Fa. MailHaus*), Erfassung, on-line Verarbeitung und meßtechnische Korrektur der Meßdaten unter MS-Dos oder Windows sowie die on-line automatische Justierung des LWL-Multiplexers. Sie kann auch applikationsspezifisch erweitert werden. Abb. 9.8 zeigt grafische Oberfläche des Steuerprogramms.

Bei den automatischen Transmissions- sowie turbidimetrischen Messungen werden alle Systemkomponenten von einem Steuer-PC angesteuert.

Durch den Zweikanal-LWL-Multiplexer werden alle Meßstellen mit einer vorgegebenen Reihenfolge und Abtastrate abgefragt, das Meßsignal mit der A/D-Wandlerkarte digitalisiert, die Meßergebnisse automatisch aufgenommen, in entsprechende ASCII-Dateien gespeichert und weiter bearbeitet. Hierzu werden die Abtastrate, die Anzahl der Wiederholungen, das Zeitintervall zwischen den Umschaltungen, die Anzahl der Messungen und Mittelungen an jeder Meßstelle, die Nummer des Meßkanals der IC-Karte, die Schaltreihenfolge und Schaltgeschwindigkeit sowie der Auswertalgorithmus vom Steuerprogramm vorgegeben bzw. eingestellt.

Zur Bestimmung der optimalen Einstellungen des Multiplexer-Systems sind verschiedene Programme für die automatische Justierung des Multiplexers sowie automatische Meßfehlerkorrekturen mit komfortabler Benutzeroberfläche erstellt.



**Abb. 9.8: Bedienungsoberfläche des Steuerprogramms bei der Abfrage zweier Meßstellen bei automatischen Transmissionsmessungen**

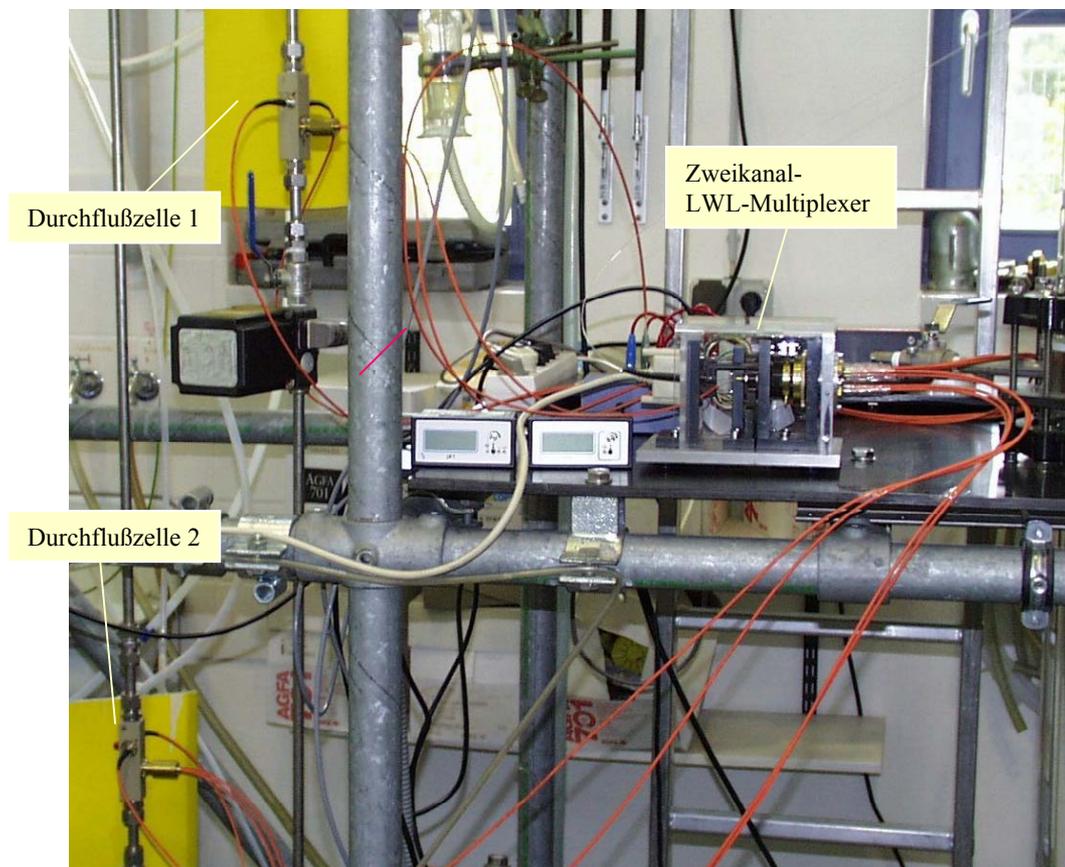
Bei der zweiten Systemkonfiguration für zeitaufgelöste Fluoreszenzmessungen erfolgt die Ansteuerung des Zweikanal-LWL-Multiplexers von einem Steuer-PC aus, während die Aufnahme und Auswertung der Meßdaten sowie die Ansteuerung des N<sub>2</sub>-Lasers, des Monochromators, des Photomultipliers und des digitalen Speicheroszilloskops laut Abb. 9.3 durch den Meß-PC vorgenommen wird. Der Meß- und der Steuer-PC sind miteinander synchronisiert, was den automatischen Ablauf des Meß- und Steuerungsprozesses ermöglicht, und bilden eine hierarchische Steuerungsstruktur.

Die Programme zur Aufnahme und Auswertung dreidimensionaler Fluoreszenzspektren wurden bei der Entwicklung des Fluoreszenz-Sensors in Matlab 4.2 für Windows erstellt [72], in die zur Ansteuerung der oben genannten Systemkomponenten C-Unterprogramme integriert wurden.

Der Einsatz des externen Steuer-PC bei der zweiten Systemkonfiguration ist dadurch bedingt, daß im Meß-PC eine speziell gebaute Multifunktionskarte zur Ansteuerung des Monochromators, N<sub>2</sub>-Lasers und Photomultipliers sowie der Versorgungsspannungverteilung eingebaut ist. Da die Ansteuerung des LWL-Multiplexers und der A/D-Wandlerkarte die Rechenkapazität des Meß-PC übersteigen würde, wurde aus Zuverlässigkeitsgründen bei automatischem Dauerbetrieb für den Einsatz eines separaten Steuer-Rechners entschieden, wie es in Abb. 9.3 gezeigt ist. Bei der weiteren Systementwicklung ist aber die Ansteuerung aller Systemkomponenten von einem Meß- und Steuer-PC aus durch ein Steuerprogramm für die zweite Systemkonfiguration möglich. Die Ansteuerung des LWL-Multiplexers kann dabei als ein Programmmodul in die gesamte Ansteuerung integriert werden.

### 9.5 Charakterisierung des aufgebauten Multiplexer-Systems bei automatischen Transmissions- und Fluoreszenzmessungen

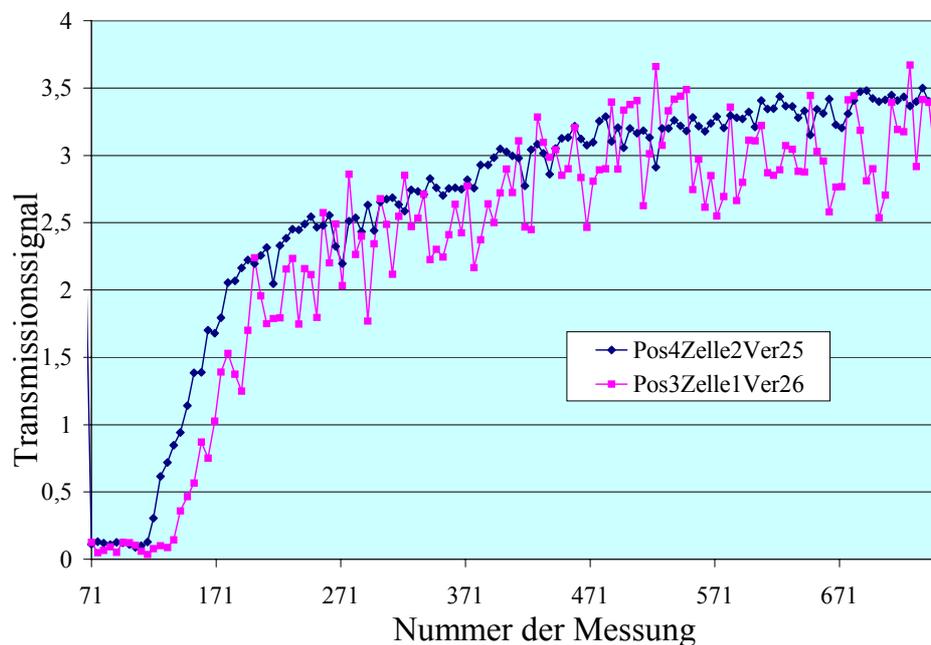
Das aufgebaute Multiplexer-System mit den faseroptisch geführten Sensoren wurde an der UV/Ozon-Anlage für on-line Prozeßmonitoring eingesetzt.



**Abb. 9.9: Multiplexer-System an der UV-Ozon Anlage mit den Durchflußzellen**

Dazu wurden die Durchflußzellen an der Armatur am Zulauf und am Ablauf des Dünnfilmreaktors installiert. Als CW-Lichtquelle wurde bei den durchgeführten automatischen Transmissionsmessungen an der UV/Ozon-Anlage ein He-Ne-Laser (Wellenlänge  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ , maximale Lichtleistung  $5 \text{ mW}$ ) eingesetzt. Zur Lichtübertragung wurden im Meßsystem die Quarz/ Quarz-Glasfasern HCG-550 verwendet.

Abb. 9.10 zeigt als Beispiel die durch das aufgebaute Multiplexer-System bei der ersten Systemkonfiguration aufgenommenen Transmissions-Signale von den zwei durch den LWL-Multiplexer abgefragten Durchflußzellen während des durchgeführten Abbauxperiments an der U/V-Ozon-Anlage (abgebaute Substanz Farbstoff, Experimentdauer 10 min):

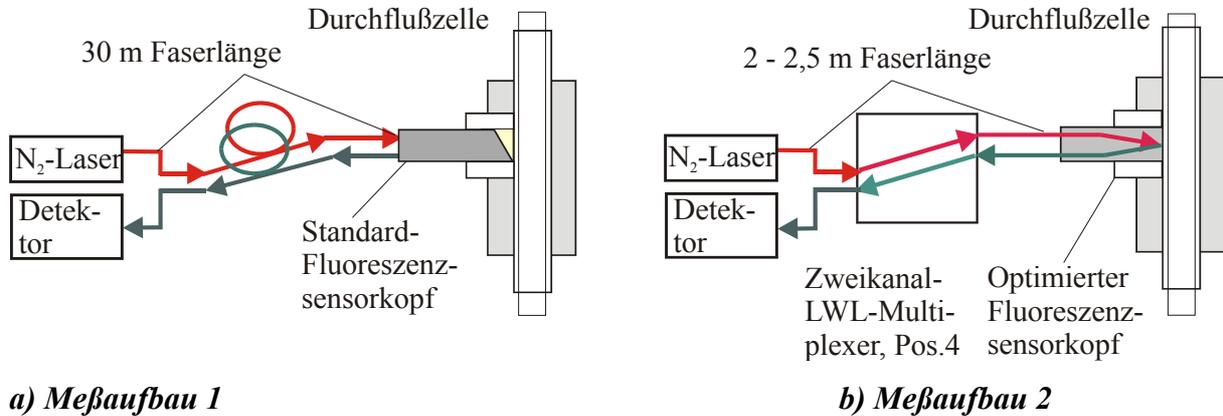


**Abb. 9.10:** Die durch das Multiplexer-System bei den automatischen Transmissionsmessungen beim Abtasten zweier Durchflußzellen aufgenommenen Meßsignale am Ab- und Zulauf des Dünnschichtreaktors

Auf den Abbaudiagrammen kann der Anstieg der transmittierten Lichtintensität von den beiden Meßstellen durch Verringerung der Extinktion des Farbstoffs bei seinem Abbau im Reaktor unter Einwirkung der UV-Strahlung verfolgt werden. Die Transmissions-signale auf dem Diagramm von der ersten und zweiten Meßstelle sind wegen verschiedener Strömungsbedingungen am Ab- und Zulauf des Reaktors unterschiedlich verrauscht. Eine optimale Meßdatenverarbeitung, z.B. zur Filterung des Rauschens oder Korrektur von Einflußeffecten, kann im Steuerungsprogramm entsprechend den Meßbedingungen eingestellt werden.

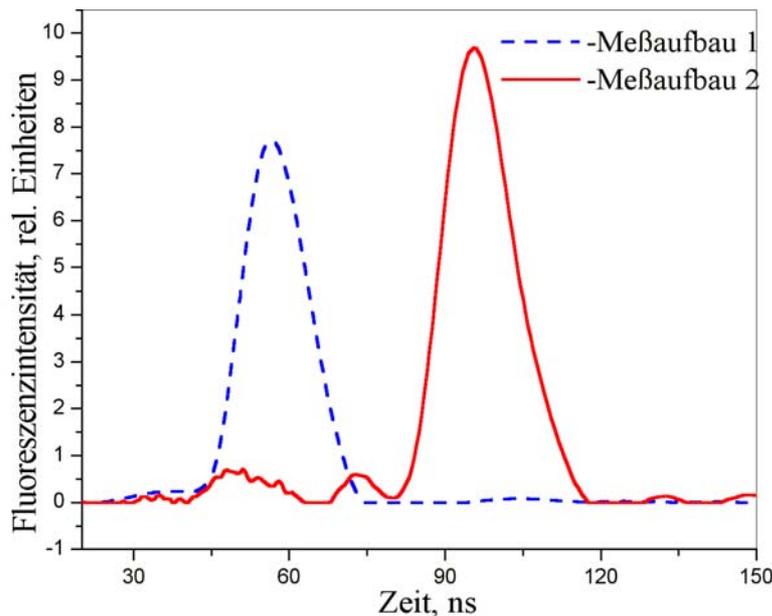
Zur Charakterisierung des aufgebauten Multiplexersystems bei der ersten Systemkonfiguration wurden automatische Transmissionsmessungen auf Reproduzierbarkeit

im Dauerbetrieb mit den Durchflußzellen durchgeführt. Zur Analyse des Multiplexer-Systems bei zeitaufgelösten Fluoreszenz-Messungen wurden Messungen unter verschiedenen Betriebsbedingungen bei der zweiten Systemkonfiguration vorgenommen und ihre Ergebnisse analysiert.



**Abb. 9.11:** a) Meßaufbau mit Standard-Sensorkopf, ohne LWL-Multiplexer (Faserlänge 30 m,  $t_{DelOsz} = 312$  ns), b) Meßkanal 4 des Multiplexer-Systems mit optimiertem Fluoreszenz-Sensorkopf (gesamte Faserlänge 6 m,  $t_{DelOsz} = 16$  ns)

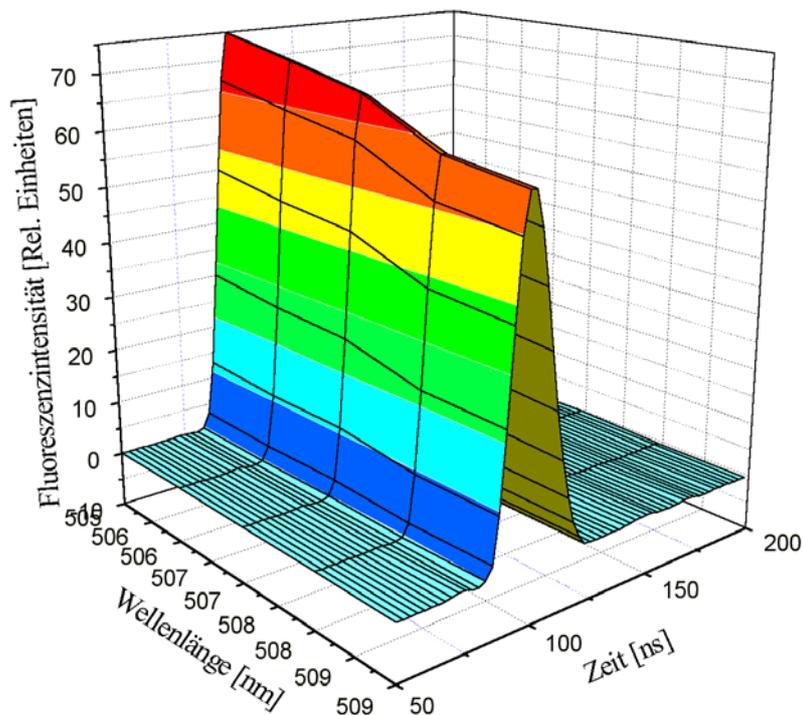
Zur Charakterisierung der Meßempfindlichkeit des aufgebauten Multiplexer-Systems sowie der gesamten optischen Verluste in jedem Meßkanal wurden die zeitaufgelösten Fluoreszenzmessungen zuerst im Multiplexer-System und dann zum Vergleich mit dem in die Durchflußzelle eingesetzten Standard-Sensorkopf und ohne LWL-Multiplexer bei den gleichen Meßbedingungen durchgeführt.



**Abb. 9.12:** Die mit dem Standard-Sensorkopf (Meßaufbau 1) und durch das aufgebaute Multiplexer-System (Meßaufbau 2) gemessene Fluoreszenz-Meßsignal bei der Detektionswellenlänge von 438 nm

Die Abb. 9.11 zeigt die entsprechenden Meßanordnungen. In Abb. 9.11 a) ist der Meßaufbau mit dem Standard-Sensorkopf und ohne LWL-Multiplexer und in Abb. 9.11 b) ein Meßkanal des aufgebauten Multiplexer-Systems, bestehend aus dem optimierten Fluoreszenz-Sensorkopf, beiden Übertragungskanälen des Zweikanal-LWL-Multiplexers und den Faserübertragungstrecken dargestellt.

Die Abb. 9.12 zeigt zum einen die mit dem Standard-Sensorkopf aufgenommenen Fluoreszenz-Abklingkurven und zum anderen die mit dem aufgebauten Multiplexer-System und optimierten Fluoreszenz-Sensorkopf aufgenommenen Abklingkurven bei der Detektionswellenlänge 438 nm. Beide Sensorköpfe wurden dabei in die gleiche Durchflußzelle eingesetzt.

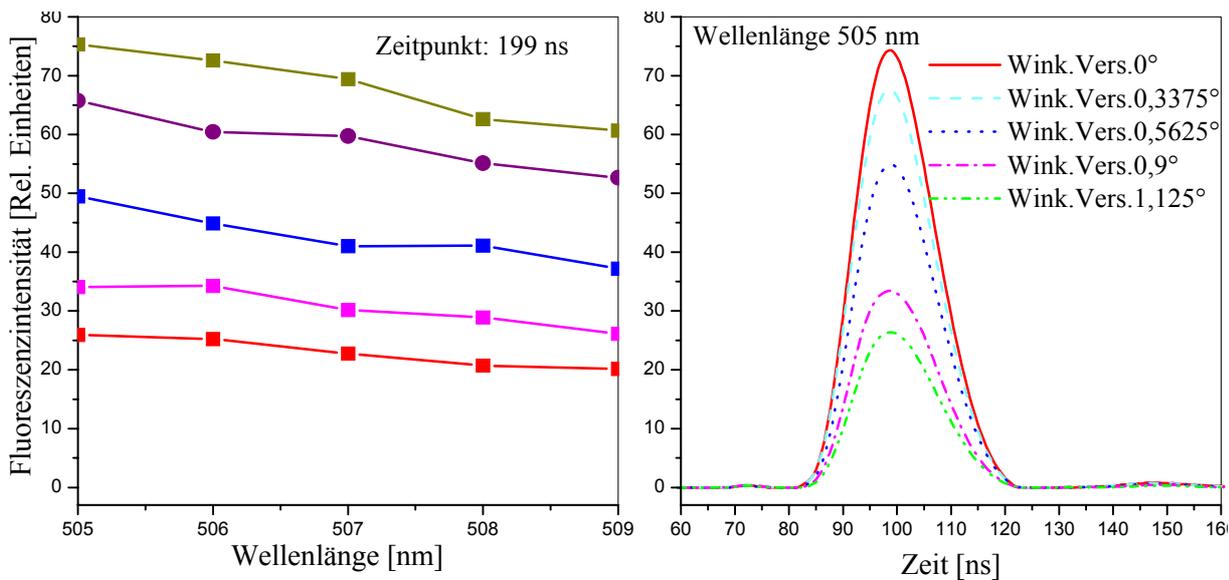


**Abb. 9.13:** *Das mit dem Multiplexer-System aufgenommene zeitaufgelöste Fluoreszenzspektrum von einer konstanten festen Probe*

Aus dem Diagramm Abb. 9.12 kann die Meßempfindlichkeit des gebauten Multiplexer-Systems im Vergleich zur Empfindlichkeit des Meßsystems mit dem Standard-Sensorkopf und ohne LWL-Multiplexer bestimmt werden, welche die resultierende relative Effizienz des gebauten Multiplexer-Systems charakterisiert. Die Meßergebnisse zeigen, daß die resultierende Empfindlichkeit des aufgebauten Multiplexer-Systems unter Berücksichtigung unterschiedlicher Längen der Übertragungsfasern um ca. 15 % höher liegt im Vergleich zum Meßsystem ohne LWL-Multiplexer, mit dem direkt an den Laser bzw. an den Monochromator angeschlossenem Standard-Sensorkopf bei seinem Einsatz in der gebauten Durchflußzelle.

Die Meßempfindlichkeit des optimierten Fluoreszenz-Sensorkopfes wurde ebenso aufgrund der durchgeführten Messungen im Vergleich zum Standard-Sensorkopf bestimmt und charakterisiert die durch die Optimierung der Konstruktion erreichte Steigung der Kopplungseffizienz des Fluoreszenzlichtes. Durch Vergleich der Fluoreszenz-Signale vom Standard-Sensorkopf bei einem unmittelbaren Kontakt mit der Probe und bei seinem Einsatz in der Durchflußzelle wurde festgestellt, daß durch die Optimierung der Konstruktion des Fluoreszenz-Sensorkopfes eine Steigung der Meßempfindlichkeit ca. um den Faktor 10 erreicht wurde. Das ist durch den Verlust des nützlichen Probenvolumens durch Abschrägung des Sensorschaftes des Standard-Sensorkopfes bei seinem Einsatz in der Durchflußzelle zu erklären.

Zur Untersuchung des Betriebsverhaltens des Zweikanal-LWL-Multiplexers im Fluoreszenz-Meßsystem wurden weiterhin Experimente zum Einfluß der Positionierungsgenauigkeit auf das zeitaufgelöste Fluoreszenzsignal durchgeführt.



**Abb. 9.14:** Zum Einfluß des Winkelversatzes auf das Fluoreszenzsignal: a) Fluoreszenz-Spektren bei dem Zeitpunkt  $t = 100 \text{ ns}$  b) Abklingkurven bei der Wellenlänge  $\lambda = 505 \text{ nm}$

Dazu wurden bei der zweiten Systemkonfiguration durch den Steuer-PC verschiedene Winkelversätze im Zweikanal-LWL-Multiplexer relativ zur optimalen Position (Maximum des Verteilungsdiagramms für den jeweiligen Meßkanal) durch den Schrittmotor eingestellt und die entsprechenden zeitaufgelösten Fluoreszenz-Spektren gemessen. In die Durchflußzelle wurde dabei eine Probe mit konstanten Eigenschaften eingebracht.

Abb. 9.13 zeigt das zeitaufgelöste Fluoreszenzspektrum im Wellenlängenbereich 505 bis 509 nm bei  $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$  und  $\Delta\phi = 0$ . Die Abb. 9.14 a) zeigt die aus dem dreidimensionalen Diagramm entnommenen Fluoreszenzspektren im Zeitpunkt  $t = 199 \text{ ns}$  bei verschiedenen voreingestellten

Winkelversätzen des Zweikanal-Multiplexers. Abb. 9.14 b) zeigt die entsprechenden Fluoreszenz-Abklingkurven bei  $\lambda = 505$  nm.

Das Auswertungsergebnis zeigt, daß die Winkelversätze der Motorachse die zeitliche Struktur der übertragenen Fluoreszenz-Abklingkurven nicht beeinflussen. Die Amplituden der Fluoreszenz-Abklingkurven verringern sich mit dem Winkelversatz laut Verteilungsdiagramm für die entsprechende Ausgangsposition des LWL-Multiplexers (Abb. 5.2 und 5.3), was dem Diagramm Abb. 9.14 a) entspricht. Die übertragene Fluoreszenzintensität sinkt im Winkelbereich von  $\pm 1,125^\circ$  direkt proportional zum Winkelversatz. Das bedeutet, daß die Funktion  $F(\varphi)$  in diesem Winkelbereich linearisiert und entsprechend behandelt werden kann.

Daraus folgt unter anderem, daß in einem Fluoreszenz-Meßsystem mit gepulstem Laser eine automatische Justierung des gesamten jeweiligen Meßkanals nach dem Fluoreszenz-Meßsignal sowie Kompensation der Schwankungen der Laserenergie durchgeführt werden kann, wie es im folgenden Abschnitt gezeigt wird.

### 9.5.1 Automatische Meßfehlerkorrektur beim on-line Meßbetrieb

Im aufgebauten Multiplexer-System stellen zwei Übertragungskanäle des Zweikanal-LWL-Multiplexers zusammen mit den entsprechenden Sensorelementen und den Faserübertragungsstrecken die jeweiligen Meßkanäle dar, wobei die maximale Anzahl der Meßkanäle bei der Dimensionierung des LWL-Multiplexers festgelegt wird. Der strukturelle meßtechnische Vorteil eines Multiplexer-Systems mit einem Zweikanal-LWL-Multiplexer bei photometrischen Messungen besteht darin, daß für alle Meßkanäle eine Lichtquelle, eine Detektionseinheit, bestehend aus Photodetektor, Vorverstärker und Meßgerät sowie derselbe Meßeingang der A/D-Wandlerkarte und die gleichen Übertragungsleitungen verwendet werden. Das bedeutet, daß sich die meisten Störeinflüsse im gleichen Maße auf alle Meßkanäle auswirken und aus dem Meßsignal durch geeignete Algorithmen berechnet werden können.

Auf Grundlage der durchgeführten automatischen Transmissions-Messungen wurde eine Analyse der Meßfehler im Multiplexer-System durchgeführt. Die meisten der möglichen Fehlerquellen, die beim automatischen Dauerbetrieb auftreten können, lassen sich in folgende Gruppen unterteilen:

- Schwankungen der Laserenergie;
- Drift oder Rauschen des Photodetektors bzw. des Meßgerätes sowie Übertragungsfehler des Meßsignals, z.B. infolge elektromagnetischer Störungen oder Instabilität der Versorgungseinheit;

- Änderungen der optischen Eigenschaften der durch die Durchflußzellen fließenden Probe, z.B. aufgrund sich ändernder Strömungs- oder Prozeßparameter, Trübungen oder Luftblasen, Ablagerungen an den Fensterscheiben u.s.w., und
- dynamische Positionierungsfehler des LWL-Multiplexers aus elektrischen oder mechanischen Gründen.

Da Meßgröße bei den durchgeführten optischen Messungen die transmittierte Lichtintensität  $I_T$  nach (9.1) bzw. Fluoreszenzintensität  $I_{Fl}$  nach (4.3) ist, müssen zur fehlerfreien Auswertung der Meßergebnisse alle oben genannten Fehlerquellen und Einflußparameter ausgeschlossen bzw. differenziert bewertet werden.

Die automatische Fehlerkorrektur der Übertragungsfehler durch den LWL-Multiplexer (Fehler der vierten Gruppe, vgl. Kapitel 10) aufgrund des mathematischen Modells ist in Abschnitt 6.3 und durch die automatische Justierung in Abschnitt 11.4 beschrieben.

Die Meßfehler der dritten Gruppe können abhängig von ihrer Natur entweder nach dem Prinzip der Störgrößenabschirmung durch konstruktive Maßnahmen an den Meßstellen oder in Sensorelementen ausgeschlossen, gefiltert, mittels entsprechenden zusätzlichen Messungen zur Fehlerkorrektur erfaßt, oder durch strukturelle Maßnahmen kompensiert werden [77,88,105].

Für die Fehler der ersten und zweiten Gruppe kann aufgrund der strukturellen Aufbaus des Multiplexer-Systems das Prinzip der Fehlerkompensation realisiert werden, nach dem die Störeinflüsse erfaßt und Meßfehler über die Berechnung des Einflusses bei der Auswertung der Meßdaten korrigiert werden.

Durch Aufbau und Funktionsweise des Zweikanal-LWL-Multiplexers ist die automatische Erfassung verschiedener Störgrößen wie z.B. Schwankungen der Laserleistung oder Detektionsrauschen und die entsprechende automatische Meßfehlerkorrektur in einem Meßsystem mit faseroptisch geführten Sensoren möglich. Zur Erfassung dieser Störgrößen kann ein Meßkanal des Multiplexer-Systems als Referenzkanal betrieben werden, in dem konstante Meßbedingungen gewährleistet sind. Dazu werden an eine Referenz-Ausgangsposition des Zweikanal-LWL-Multiplexers eine entsprechend dem Meßbereich, z.B. durch Neutralfilter unterbrochene (bei geeigneter Faserlänge) Glasfaser, angeschlossen, wie es in Abb. 9.2 gezeigt ist. Der Referenzkanal wird beim Abtasten der Meßstellen ebenso abgefragt. Da die Übertragungseffizienz des Referenzkanals konstant bleibt, erfaßt das gemessene Referenzsignal sowohl die Schwankungen der Laserenergie als auch das Detektionsrauschen getrennt von den optischen Eigenschaften der Probe. Nach diesem Referenzsignal wird das Meßergebnis normiert bzw. korrigiert.

## 9.5.2 Automatische Meßfehlerkorrektur mittels Festwertregelung der Anregungsenergie durch den LWL-Multiplexer

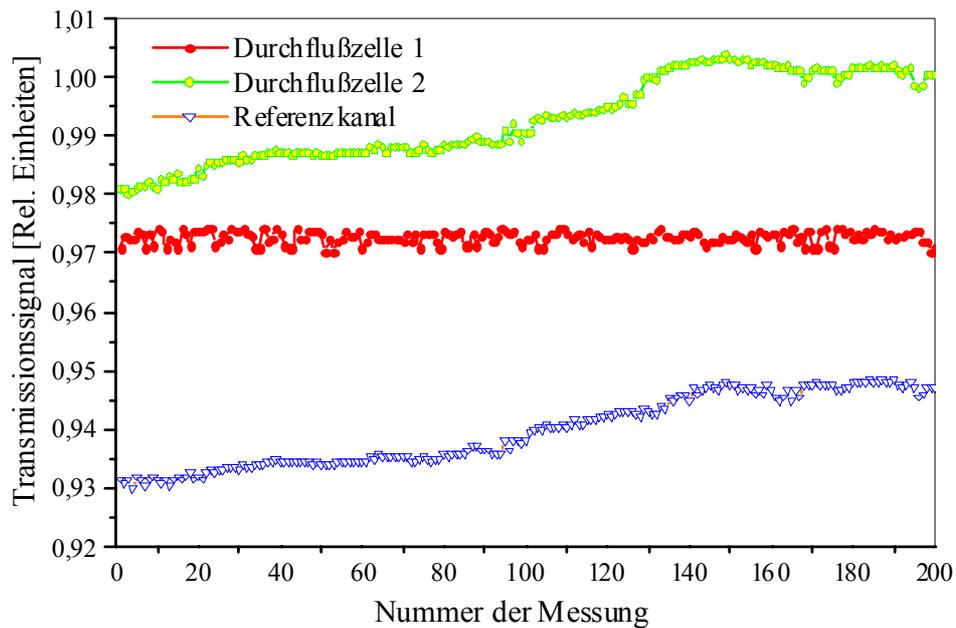
Eine andere Möglichkeit zur automatischen Meßfehlerkorrektur in einem Multiplexer-System beruht auf dem Prinzip der Rückführung [77,88] zur Eliminierung der Störeinflüsse auf das Meßsignal. Dieses Prinzip wurde durch eine Festwertregelung [102-104] am LWL-Multiplexer zum Ausgleich der Leistungsschwankungen einer CW-Lichtquelle nach einem entsprechenden Programmalgorithmus realisiert.

Sowohl beim Schalten ohne Rückkopplung, wie in Abschnitten 3.4 und 4.4 beschrieben, als auch bei der automatischen Justierung (Kapitel 11) ändert sich bei Schwankungen der Laserleistung auch proportional dazu die durch den LWL-Multiplexer übertragene Lichtintensität. Bei optischen Messungen soll aber die in die Probe eingekoppelte Lichtintensität bei allen Messungen konstant gehalten werden, damit das Meßsignal ausschließlich von der zu messenden Größe, z.B. Konzentration, auch bei Schwankungen der Laserleistung abhängt.

Nach durchgeführter Regelung werden, wie bei der automatischen Justierung, durch Rückkopplung die Drehpositionen in einer Umgebung der umzuschaltenden Ausgangsposition durchfahren und abgefragt. Dabei wird aber im Unterschied zum Justieralgorithmus nicht das Maximum der Verteilungs-Funktion  $F(\varphi)$  gesucht, sondern das Minimum der Differenz zwischen dem über die Rückkopplung gelieferten Ist-Wert der durch den LWL-Multiplexer übertragenen Lichtintensität und dem im Regelungsprogramm vorgegebenen entsprechenden Sollwert. Zu dieser bestimmten Drehposition wird der Motor zurückgedreht.

Die Regelung erfolgt mittels Einstellung eines Winkelversatzes  $\Delta\varphi$  des Drehteils zum optimalen Winkel bei maximaler Lichtübertragung in einem bestimmten Winkelbereich, in dem die Funktion  $F(\varphi)$  als linear betrachtet werden kann, da sich, wie in Abschnitten 5.3 und 9.4 gezeigt wurde, die Amplitude des übertragenen Signals im bestimmten Winkelbereich proportional zum Winkelversatz ändert. Auf diese Weise wird ein vorgegebener Wert der Lichtintensität am Ausgang des LWL-Multiplexers auch bei Schwankungen der Laserenergie konstant gehalten.

Die Regelung erfolgt durch Änderung der Überlappungsfläche beider Fasern und beeinflusst nicht die Struktur des übertragenen Lichtsignals, wie es in obigen Abschnitten gezeigt wurde. Wie aus dem Abschnitt 5.3 folgt, ist diese Regelung in einer Umgebung des Arbeitspunktes von  $\pm 1,125^\circ$  sowohl bei den Messungen mit einem kontinuierlichen als auch mit einem gepulsten Laser möglich, da die Form der übertragenen Laserpulse in diesem Winkelbereich nicht verändert wird.



**Abb. 9.15:** Die durch das Multiplexer-System gemessene Transmissionssignale beim Abfragen zweier Meßstellen mit und ohne Regelung der übertragenen Lichtintensität zum Ausgleich der Schwankungen der Laserenergie

Die mit He-Ne-Laser durchgeführten Experimente lieferten gute Ergebnisse. Abb. 9.15 zeigt die durch das Multiplexer-System bei einer konstanten Probe aufgenommenen Transmissionssignale von den zwei Durchflußzellen beim Anstieg der Laserenergie nach dem Einschalten des He-Ne-Lasers. In Meßkanal 1 (entsprechend dem Ausgang 4 des LWL-Multiplexers und der Durchflußzelle 1) wurde eine Festwertregelung der übertragenen Lichtintensität vorgenommen, Kanal 2 (entsprechend dem Ausgang 3 und der Durchflußzelle 2) wurde ohne Regelung geschaltet. Durch den Referenzkanal (Abb. 9.2) wurden die Schwankungen der Laserenergie aufgenommen. Die Regelung kann im Referenzkanal erfolgen, und die Ergebnisse können auf die anderen Meßkanäle übertragen werden.

## **10 Optimierung der Konstruktion und der Ansteuerung der LWL-Multiplexer**

Zur Charakterisierung der entwickelten und gebauten LWL-Multiplexer wurden verschiedene Verlustmechanismen an den beiden optischen Verbindungsstellen und deren Auswirkung auf den Kopplungswirkungsgrad untersucht. Insbesondere wurde der Einfluß von Fertigungstoleranzen auf die Übertragungseffizienz und Übertragungsfunktion analysiert. Aufgrund der Fehleranalyse bei verschiedenen Betriebsarten wurde eine entsprechende Optimierung der Konstruktion und der Ansteuerung vorgenommen.

### **10.1 Fehleranalyse in den entwickelten LWL-Multiplexern**

Ein wichtiger Schritt zur Charakterisierung der entwickelten und gebauten LWL-Multiplexer war die Fehleranalyse zur Reduzierung optischer Verluste und zur Optimierung der Lichtübertragung. Die Fehleranalyse erfolgte aufgrund durchgeführter Experimente mit dem Einkanal-LWL-Multiplexer in Meßsystemen mit einem He-Ne- sowie mit einem gepulsten  $N_2$ -Laser, insbesondere im automatischen Dauerbetrieb.

Die Fehlerquellen im LWL-Multiplexer, die zu optischen Verlusten führen, können in vier Gruppen unterteilt werden.

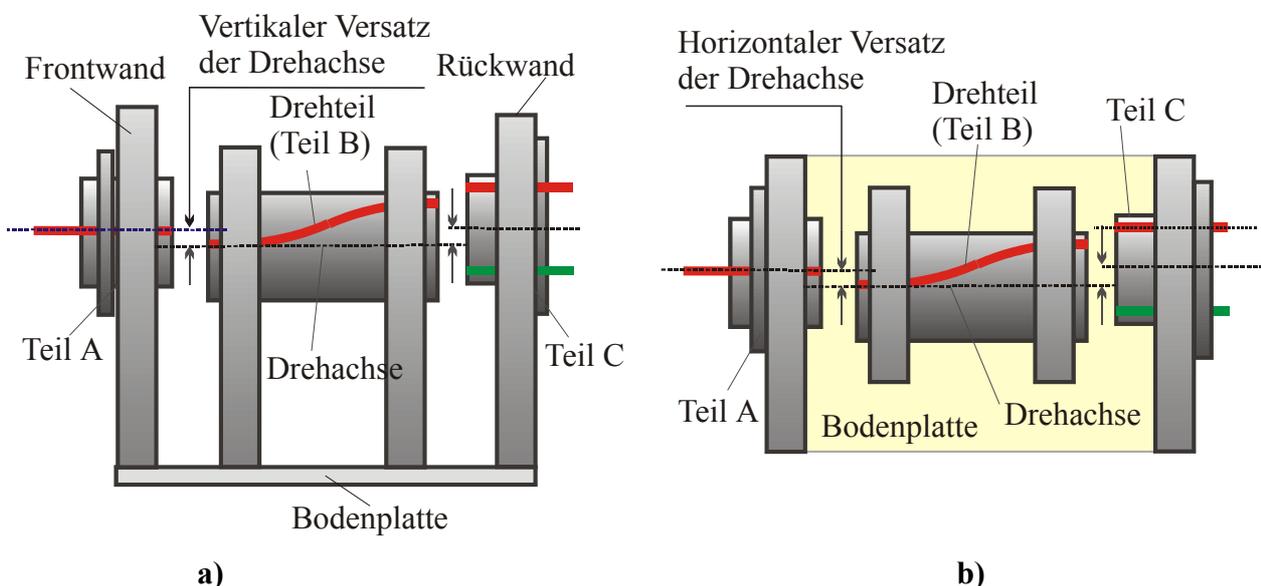
Die erste Gruppe bilden Fehler, die durch sich summierende Fertigungstoleranzen und mechanische Bauteile wie Getriebe, Kugellager usw. verursacht werden und zu extrinsischen Verlusten an den beiden Verbindungsstellen 1 und 2 führen. Dazu gehören Zentriergenauigkeit und Durchmesser-toleranzen verschiedener Bohrungen sowie Abweichungen von der Parallelität und Rechtwinkligkeit in den Halterungsplatten der Stützaufbauten, die zu entsprechenden Versätzen der Drehachse, Verkantungen und Verspannungen führen können. Dadurch können ein radialer Versatz und ein Kippwinkel zwischen den optischen Achsen der zu koppelnden Glasfasern verursacht werden. Zu dieser Fehlergruppe gehören auch radiale Lagerluft, Ungenauigkeiten des Zahnradprofils und anderer mechanischer Konstruktionselemente.

Die Fehler der zweiten Gruppe werden durch Streuung charakteristischer Parameter der zu koppelnden Glasfasern, insbesondere der im Drehteil integrierten Übertragungsfaser verursacht und führen zu intrinsischen optischen Verlusten. Zu diesen Parametern gehören Durchmesser, Brechungsindizes bzw. Brechungsindexprofile und numerische Aperturen der verwendeten Glasfasern. Die Fehlerquellen sind dabei geometrische Toleranzen, bestehende Inhomogenitäten, Mikrokrümmungen und Oberflächenqualität der angrenzenden Glasfasern.

Die dritte Fehlergruppe bilden die Einstellungsfehler, z.B. die bei der Nullpositions-Einstellung entstehende Verdrehung der Fahne gegenüber der Übermittlungsfaser, Genauigkeit der Getriebeeinstellung u.ä.

Die vierte Gruppe bilden unprognostizierbare dynamische Positionierungsfehler, die sowohl aus elektrischen als auch aus mechanischen Gründen bei den Schaltvorgängen auftreten können. Dazu gehören mögliche Elektronik-, Motor- und Mechanikfehler, die beim Ausführen der Schritte sowie bei der Positionsbestimmung der Motorachse vorkommen können. Diese Fehler können sowohl durch Übertragungsstörungen in elektrischen Leitungen oder aufgrund Instabilität der Versorgungsspannung der Steuerungselektronik als auch infolge eines erhöhten Widerstandsmomentes der Motorachse z.B. wegen der beim Dauerbetrieb entstehenden Verkantungen und Verspannungen in den Halterungen oder Lagern auftreten und das Auslassen von Schritten verursachen.

Zum Ausgleich der Einstellungsfehler der dritten Gruppe sowie der unprognostizierbaren Positionierungsfehler der vierten Gruppe wurde eine automatische Justierung der LWL-Multiplexer entwickelt, die in Kapitel 11 ausgeführt ist. Nachfolgende Abschnitte beschreiben hauptsächlich die Optimierung der Konstruktion zum Ausgleich bzw. zur Minimierung der Fehler der ersten Gruppe.

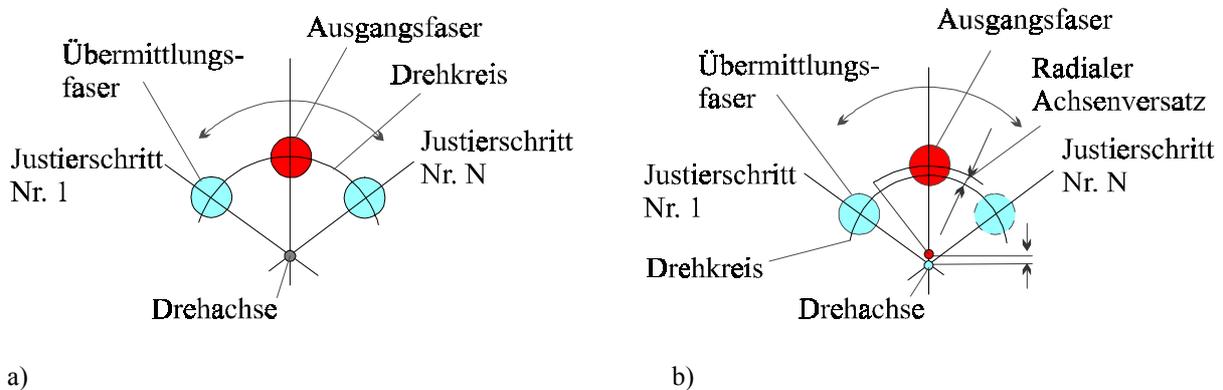


**Abb. 10.1: Entstehung der horizontalen und vertikalen Versätze der Drehachse: Seitenansicht (a) und Draufsicht (b)**

## 10.2 Einfluß von Fertigungstoleranzen auf die Übertragungseffizienz

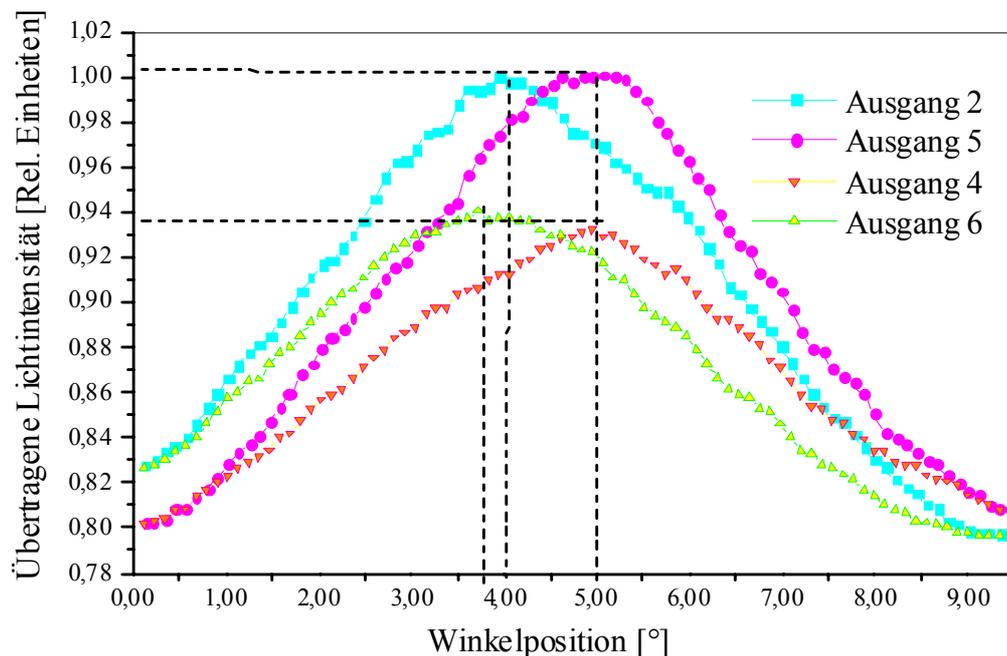
Einige der Fehler der ersten Gruppe - Fertigungstoleranzen - sind in Abb. 10.1a und b schematisch dargestellt. Diese zeigen die Entstehung radialer Versätze der optischen Achsen der

zu koppelnden Glasfasern  $\delta_i$  an der ersten und zweiten Verbindungsstelle infolge der horizontalen und vertikalen Versätze der Drehachse. Abb. 10.2 zeigt die Auswirkung des Versatzes der Drehachse für einzelne Ausgangspositionen des LWL-Multiplexers.



**Abb. 10.2:** Ideale Anordnung der optischen Achsen der Glasfasern an der Verbindungsstelle 2 (a) und vertikaler Achsenversatz an der Verbindungsstelle 2 (b).

Wie aus Abb. 10.1 und 6.1 ersichtlich, sind die infolge des Versatzes der Drehachse entstehenden Versätze optischer Achsen der zu koppelnder Glasfasern  $\delta_i$  zueinander an der Verbindungsstelle 2 für verschiedene Ausgangspositionen unterschiedlich.



**Abb. 10.3:** Lichtintensitätsverteilung an den Ausgangspositionen 2 und 5 bei 1/8-Schrittbetrieb und 85 Rasterschritten, entspricht der Abbildung 8 (a)

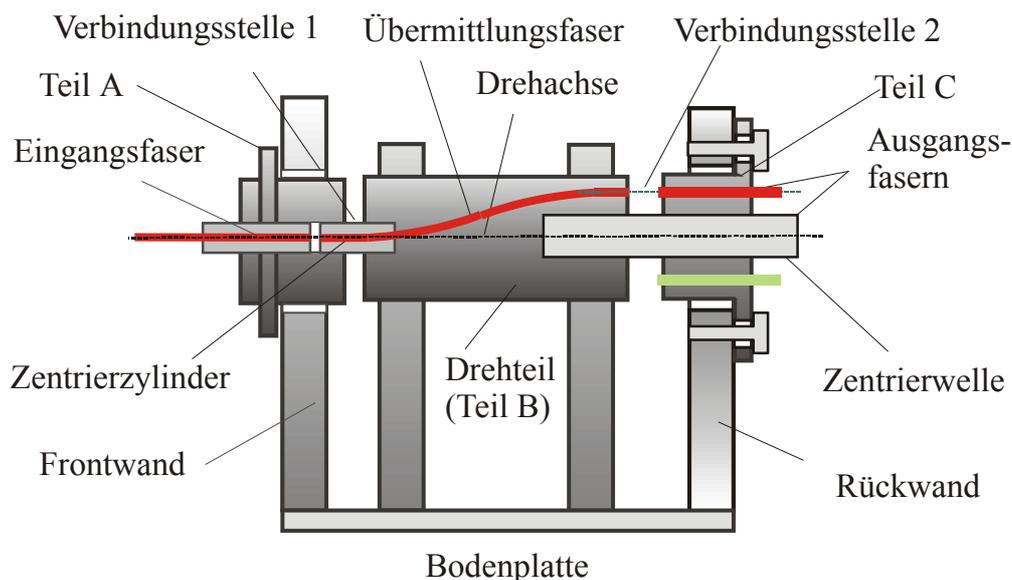
Dies verursacht verschiedene Verteilungen der Lichtintensität bzw. der Übertragungseffizienz für verschiedene Ausgangspositionen in Abhängigkeit von der Drehposition der Übertragungsfaser, die durch den Winkel bzw. die Schrittnummer definiert wird.

Aus Abb. 10.2 und 10.3 ist die Auswirkung der oben beschriebenen Fertigungstoleranzen auf Funktionsgesetz  $F(\varphi)$  ersichtlich. Abb. 10.2 zeigt als Beispiel eine ideale und eine versetzte Anordnung der zu koppelnden Glasfasern an der Verbindungsstelle 2. Das Diagramm Abb. 10.3 zeigt die Auswirkung des in Abb. 2 b) schematisch dargestellten Achsenversatzes auf die Intensitätsverteilung für den jeweiligen optischen Ausgang.

Im mathematischen Modell des LWL-Multiplexers (Kapitel 6) ist der Einfluß von Fertigungstoleranzen auf das Funktionsgesetz durch entsprechende Funktionskoeffiziente in Gleichung (6.10) quantifiziert.

### 10.3 Optimierung der Konstruktion der LWL-Multiplexer

Zur Steigerung der Übertragungseffizienz durch den Ausgleich oben beschriebener Fertigungstoleranzen wie Zentriergenauigkeit der Bohrungen, vertikaler und horizontaler Versatz der Drehachse u.ä. wurde folgende Optimierung der Konstruktion und der Fertigungsweise des LWL-Multiplexers vorgenommen, die in Abb. 10.4 schematisch dargestellt ist:



**Abb.10.4: Ausgleich von Fertigungstoleranzen durch Zentrierung an den Verbindungsstellen 1 und 2**

- Genaue Zentrierung der Ein- und Auskoppelenden der Übertragungsfaser im Drehteil B durch Einführung zylindrischer Einsätze, d.h. Zentrierzylinder.
- Optimierung der Verbindungsstelle 1 durch Reproduktion der Kopplungsbedingungen in einer Stecker-Adapter-Verbindung. Dazu werden der Stecker der Eingangsfaser und der Zentrierzylinder des Drehteils B in der entsprechenden Bohrung im Teil A zusammengeführt.

- Optimierung der Verbindungsstelle 2 durch die Einführung der Zentrierwelle zur genauen Zentrierung der Teile B und C miteinander.
- Ausgleich von Fertigungstoleranzen in den Halterungselementen bzw. den Halterungsplatten durch eine „schwimmende Lagerung“ der Teile A und C in den entsprechenden Stützaufbauten.

Mittels durchgeführter Konstruktionsoptimierung können die aufgrund von Fertigungs- und Montagetoleranzen entstehenden Versätze der Drehachse gegenüber den Halteelementen für die Eingangs- und Ausgangsfasern (Teile A und C) und damit die Achsenversätze der zu koppelnden Glasfasern zueinander minimiert bzw. ausgeglichen werden. Dadurch wurden die Fehler erster Gruppe zu großem Teil beseitigt. Durch die Optimierung der Verbindungsstellen 1 und 2 wurde eine wesentliche Erhöhung der Übertragungseffizienz um etwa 30 bis 50% für verschiedene Ausgangspositionen erreicht.

Neben der oben beschriebenen Optimierung der optischen Verbindungsstellen wurde zur Anpassung an den on-line Meßbetrieb in einem Automatisierungssystem und zur Miniaturisierung der Konstruktion des LWL-Multiplexers der Motorantrieb durch eine geänderte Positionierung des Schrittmotors und der Einführung eines Getriebes optimiert. Diese Anordnung ermöglicht u.a., den mechanischen Teil des LWL-Multiplexers getrennt vom elektrischen Steuerungsmodul unterzubringen.

Weiterhin wurden zur besseren Handlichkeit die Halteelemente -Teile A und C- zum Anschluß von Fasersteckern mit Standarddurchmesser entsprechend optimiert.

Zur besseren Kopplung des Lichts können an der beweglichen Verbindungsstelle geeignete Linsen, z.B. Gradienten eingesetzt werden. Allerdings beschränkt die Verwendung der nur für einen bestimmten Wellenlängenbereich optimierten Linsen die spektrale Bandbreite und damit den Einsatzbereich des LWL-Multiplexers. Außerdem kann der Einsatz von Linsen zur Änderung der räumlichen Intensitätsverteilung im übertragenen Laserstrahl führen, wie es in Abschnitt 8.2.1 gezeigt ist.

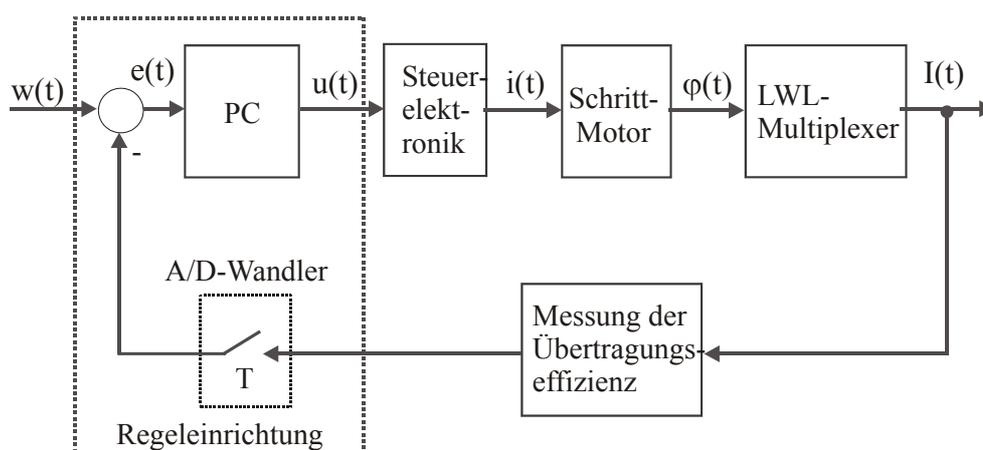
Ergänzend bestehen weitere Möglichkeiten zur Steigerung der Übertragungseffizienz und der Positionierungsgenauigkeit in der Erhöhung der Funktionsempfindlichkeit und der Minimierung der Positionierungsfehler durch Verwendung präziserer Funktions- und Bauelemente [57] wie eines hochauflösenden Schrittmotors, eines präziseren Getriebes, verbesserter Lager und beständiger Werkstoffe.

# 11 Automatische Justierung der Ein- und Zweikanal-LWL-Multiplexer in verschiedenen faseroptischen Sensorsystemen

Zum Ausgleich verschiedener zufälliger Positionierungsfehler, die bei den Schaltvorgängen unprognostizierbar auftreten können, und damit zum Erreichen einer optimalen Lichtübertragung für jeden Meßkanal wurde ein Regelungssystem für die automatische Justierung des LWL-Multiplexers entwickelt. Dafür wurde eine Rückkopplung zwischen dem LWL-Multiplexer und dem Steuerrechner eingeführt und ein durch Justierprogramme für verschiedene Sensorsysteme angepaßter Regelalgorithmus realisiert.

## 11.1 Konzepte für den Systemaufbau

Das aufgebaute Regelungssystem für die automatische Justierung stellt einen geschlossenen Regelkreis mit dem mechanischen Teil des Multiplexers als Regelstrecke und einer Meßvorrichtung als Rückführungselement dar (Abb. 11.1). Der Schrittmotor kann als Stellglied, die Steuerungselektronik als ein Umformer und der Rechner als digitaler Regler betrachtet werden [14,100]. Die Regelgröße ist dabei die Übertragungseffizienz des LWL-Multiplexers bzw. die gemessene Lichtintensität  $I^i(\varphi)$  am entsprechenden optischen Ausgang. Die Stellgröße ist die Anzahl der Schritte  $N$  bzw. der Drehwinkel  $\varphi$ .

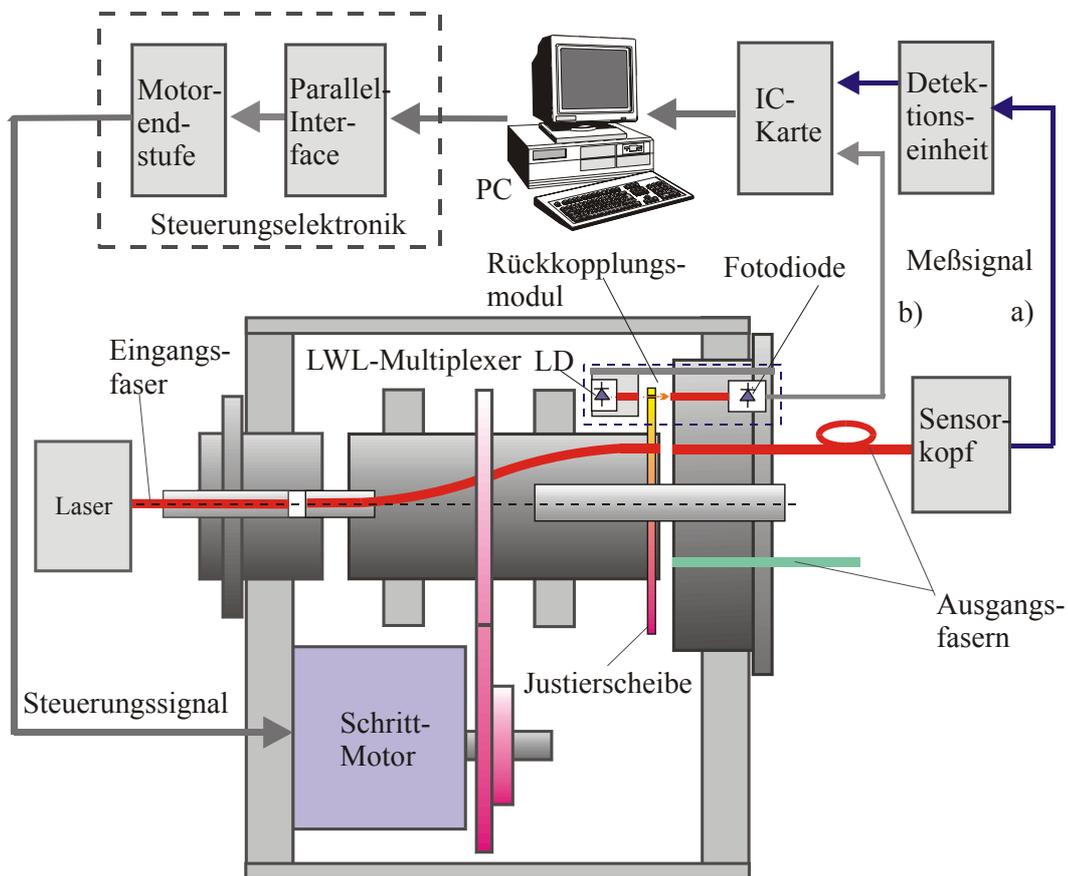


**Abb. 11.1: Regelungssystem für die automatische Justierung des LWL-Multiplexers**

Es gibt prinzipiell zwei Möglichkeiten für die automatische Justierung des LWL-Multiplexers beim Betrieb in einem Meßsystem mit angeschlossenen Sensoren, jeweils abhängig von der Art

der Rückführung. Ihre Auswahl wird durch das Sensorsystem festgelegt. Die beiden entsprechenden Systemkonfigurationen sind in der Abb. 11.2 schematisch dargestellt.

Nach dem ersten Konzept wird als Rückführungssignal das detektierte Meßsignal verwendet, das von den an den LWL-Multiplexer angeschlossenen Sensoren erzeugt wird. Das Sensorsignal kann dabei sowohl ein optisches als auch ein elektrisches Signal darstellen. Vorteil dieses Systemaufbaus ist die Möglichkeit, Informationen über die aktuell resultierende Übertragungseffizienz des LWL-Multiplexers in jeder Drehposition ohne ein extra Rückkopplungsmodul als Meßvorrichtung, d.h. ohne mechanische Elemente zu erhalten. Ein solcher Systemaufbau ist dann zweckmäßig, wenn das zu detektierende Sensorsignal der durch den LWL-Multiplexer übertragenen Lichtintensität proportional ist und ohne aufwendige Verarbeitung für die automatische Justierung als Istwert verwendet werden kann.



**Abb. 11.2:** Zwei Systemkonfigurationen für die on-line automatische Justierung des LWL-Multiplexers, die in einem Meßsystem eingesetzt wurden: a) Die erste mit Rückführung über das Sensorsignal, und b) die zweite mit eingebautem Rückkopplungsmodul.

Weitere Voraussetzung für die erste Systemkonfiguration ist, daß die gesamte Meß-, Auswertungs- und Justierzeit entsprechend kleiner ist als die durchschnittliche Periodendauer der Änderungen der zu messenden Größe, z.B. der Konzentration der Probe  $C(t)$ , damit das

Meßsignal während der Justierung eindeutig von der Übertragungseffizienz des LWL-Multiplexers abhängt.

Nach diesem Konzept wurde die automatische Justierung der Ein- und Zweikanal-LWL-Multiplexer in Meßsystemen mit faseroptisch geführten photoakustischen bzw. Transmissions-Sensoren vorgenommen, die in den Abschnitten 11.2 und 11.3 beschrieben sind.

Ein solcher Systemaufbau ist aber nicht mehr zweckmäßig, wenn das zu detektierende Sensorsignal der durch den LWL-Multiplexer übertragenen Anregungsintensität nicht direkt proportional ist oder im betrachteten Zeitintervall nicht eindeutig von der übertragenen Anregungsintensität abhängt, sondern von verschiedenen anderen Parametern beeinflusst wird. Das kann insbesondere der Fall sein, wenn die oben beschriebene Voraussetzung wegen aufwendiger Meßdatenverarbeitung nicht erfüllt wird. Das für solche Meßsysteme besser geeignete zweite Konzept des Systemaufbaus ist der Einbau eines extra Rückkopplungsmoduls in den LWL-Multiplexer. Das Rückkopplungsmodul als Meßvorrichtung liefert dem Regelungsprogramm erforderliche Informationen über die momentane Übertragungseffizienz des LWL-Multiplexers unabhängig vom Sensorsignal und läßt dadurch den ganzen Schaltvorgang automatisch kontrollieren. Ein Beispiel für einen solchen Systemaufbau ist im Abschnitt 11.3 beschrieben.

## 11.2 Funktionsprinzip

Das System für die automatische Justierung kann als ein amplituden- und zeitdiskretes Regelungssystem betrachtet und laut dem Blockschaltbild in Abb. 11.1 durch die  $z$ -Übertragungsfunktionen einzelner Elemente charakterisiert werden. Die Führungsübertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises gemäß [100]:

$$F(z) = \frac{F_R(z)F_{St}(z)F_{MU}(z)F_M(z)}{1 + F_R(z)F_{St}(z)F_{MU}(z)F_{Meß}(z)F_M(z)}. \quad (11.1)$$

Hier sind  $F_{MU}(z)$ ,  $F_M(z)$ ,  $F_{St}(z)$ ,  $F_{Meß}(z)$ ,  $F_R(z)$  - die  $z$ -Übertragungsfunktionen des LWL-Multiplexers, des Schrittmotors, der Steuerungseinheit, der Meßvorrichtung und des Reglers.

Eine solche Betrachtung ist aber aufwendig, da der LWL-Multiplexer eine nichtlineare Regelstrecke darstellt, die nur in einer Umgebung eines Betriebspunktes linearisiert werden kann. Deswegen wurde für die automatische Justierung der LWL-Multiplexer die Regelung nach einem vereinfachten nichtlinearen iterativen Algorithmus vorgenommen. Nach diesem Algorithmus wird bei jedem Schaltvorgang das Maximum der Funktion  $F(\varphi)$  verfolgt, als Führungsgröße angenommen und dementsprechend geregelt.

Zur Realisierung des Justieralgorithmus wurden für verschiedene Sensorsysteme entsprechende Justierprogramme in Pascal und LabView erstellt. Im Unterschied zum Steuerungsprogramm, bei dem eine bestimmte, vorgerechnete Anzahl der Schritte von der ermittelten Nullposition bis zur vorgegebenen Ausgangsposition ausgeführt wird, werden nach dem Justierprogramm alle Drehpositionen in einem Winkelbereich des umzuschaltenden optischen Ausgangs mit eingestellter Schrittauflösung vom Schrittmotor abgefahren und entsprechende Ausgangs- bzw. Sensorsignale gemessen. Das Meßergebnis entspricht den Verteilungsdiagrammen unter Berücksichtigung möglicher Positionierungsfehler (Abb. 5.2 und 5.3). Der Winkelbereich wird durch die Anzahl der Justierschritte sowie die Position des Anfangs des Justierbereichs  $\varphi_A$  vorgegeben (Gl. (6.4) und (6.5)). Aufgrund der Meßergebnisse sucht das Justierprogramm beim Abtasten des vorgegebenen Bogenrasters das Maximum der Verteilungsfunktion  $I_{\max}(\varphi)$  und den Drehwinkel  $\varphi_{\max}$ , bei dem die übertragene Lichtintensität bzw. Übertragungseffizienz des LWL-Multiplexers für die vorliegende Ausgangsposition  $i$  entsprechenden Meßkanal maximal ist. Die ermittelte Drehposition (Drehwinkel  $\varphi_{\max}$  bzw. Schrittnummer  $N_{\max} = A_M \varphi$ ) sowie das entsprechende maximale Ausgangssignal werden gespeichert, und zu dieser Drehposition wird der Schrittmotor nach dem Abtasten des ganzen vorgegebenen Justierbereichs zurückgedreht. Um die Fehlerwahrscheinlichkeit zu minimieren, wird dieser Prozeß iterativ in kleineren Winkelbereichen wiederholt.

Der vorgenommene Regelalgorithmus kann als eine Art der Folgeregelung [102-107] betrachtet werden, bei der die Führungsgröße aus der laufenden Analyse der Regelstrecke durch Ermittlung des Optimums des Funktionsgesetzes  $F(\varphi)$  entnommen wird.

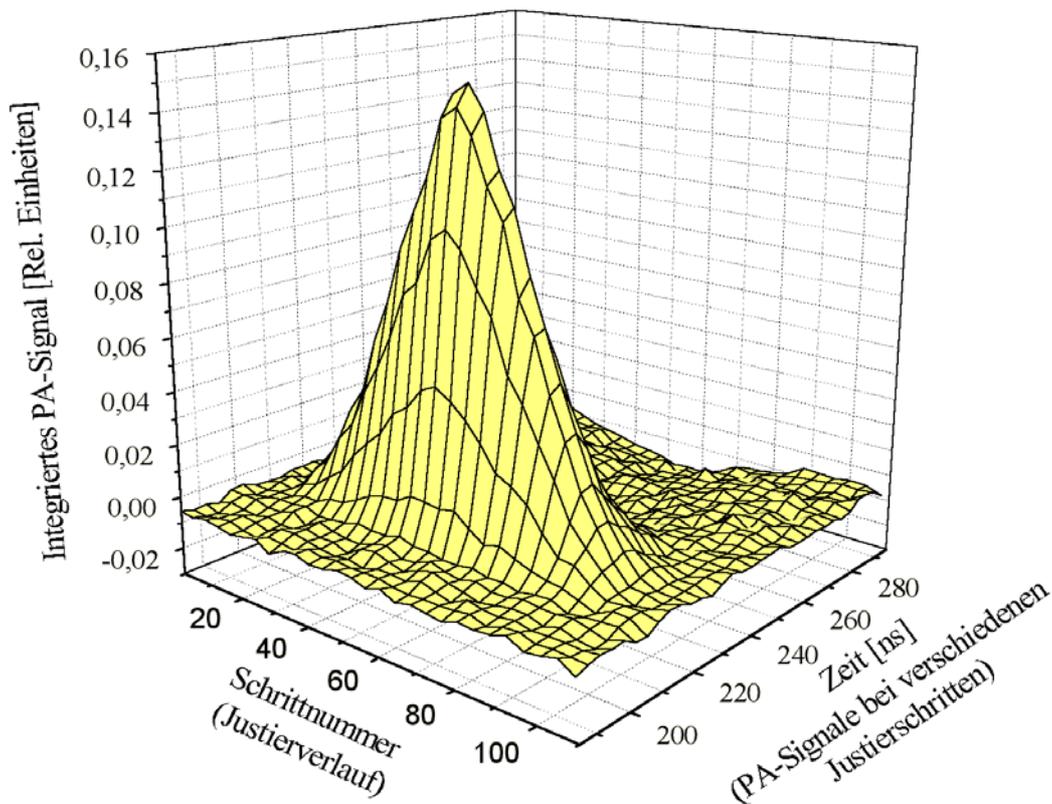
### **11.3 Automatische Justierung des Einkanal-LWL-Multiplexers im Meßsystem mit faseroptisch geführten photoakustischen Sensoren**

Nach dem ersten oben beschriebenen Konzept wurde die on-line automatische Justierung des Einkanal-LWL-Multiplexers im Meßsystem mit faseroptisch geführten photoakustischen Sensoren vorgenommen. Wie in Abschnitt 8.1 ausgeführt, wird das durch den LWL-Multiplexer zum PA-Sensorkopf übertragene Licht in die Probe zur Anregung einer Druckwelle eingekoppelt. Die angeregte Druckwelle wird mit der in den PA-Sensor eingebauten Piezofolie detektiert. Das elektrische Meßsignal wird verstärkt, übertragen, mit dem digitalen Speicher-Oszilloskop aufgenommen und in den Meß- und Steuer-PC eingelesen.

Die dem Druckverlauf  $p(\tau)$  entsprechende photoakustische Signalamplitude ist dem Absorptionskoeffizienten  $\mu_a$  und der Anregungsenergie  $E_0$  direkt proportional. Aus Gleichung (3.4) folgt für nichtstreuende Proben [47]:

$$p \propto \frac{\beta c^2}{C_p} E_0 \mu_a \quad (11.2)$$

Dies heißt, daß die Amplitude des PA-Signals bei einer bestimmten Sensorgeometrie, konstanten Absorptionskoeffizienten  $\mu_a$ , Volumenexpansionskoeffizienten  $\beta$  und der Wärmekapazität  $C_p$  im betrachteten Zeitintervall nur von der durch den LWL-Multiplexer übertragenen und in die Probe eingekoppelten Anregungsenergie abhängt. Damit ist die oben genannte Voraussetzung für die erste Systemkonfiguration erfüllt. Deswegen kann die automatische Justierung des LWL-Multiplexers im Meßsystem mit faseroptisch geführten PA-Sensoren aufgrund des gemessenen photoakustischen Signals nach den photoakustischen Signalamplituden erfolgen, wie es in der Abb. 11. 2 a) gezeigt ist.



**Abb. 11.3: Meßergebnisse der automatischen Justierung des Einkanal-LWL-Multiplexers im Meßsystem mit photoakustischen Sensoren**

Da die Änderungsgeschwindigkeit des Absorptionskoeffizienten im betrachteten Meßsystem (Biofilmwachstum) wesentlich kleiner ist als Schaltgeschwindigkeit des Multiplexers, können

die optischen Eigenschaften der Probe innerhalb des Justiervorgangs im bestimmten Justierbereich als unverändert betrachtet werden.

Das Diagramm Abb. 11.3 zeigt die Meßergebnisse der durchgeführten Justierung im in Abschnitt 8.1 beschriebenen photoakustischen Meßsystem nach dem PA-Signal bei den Messungen im Durchflußkanal [42] bei aufgetragener Agar/Agar-Schicht mit einem Farbstoff als Probe und bei einer mittleren Laserenergie von 0,9 mJ. Die Justierung erfolgte nach dem in LabView erstellten Justierprogramm, nach dem das Bogenraster im vorgegebenen Winkelbereich von z.B. 11,25° (entsprechend 100 Justierschritten) mit der eingestellten Schrittauflösung von 0,1125° abgefahren, die entsprechenden PA-Signale gemessen und deren erste Amplitude laut (11.2) ermittelt wurde. Nach den ermittelten PA-Signal-Amplituden erfolgte die automatische Justierung des Multiplexers.

#### 11.4 Automatische Justierung der LWL-Multiplexer in Meßsystemen mit faseroptisch geführten Transmissions-Sensoren bei einer CW- und einer gepulsten Anregung

Nach dem ersten oben beschriebenen Konzept kann die automatische Justierung auch in jedem photometrischen oder spektrometrischen Meßsystem durchgeführt werden, da das detektierte Meßsignal in Sensorsystemen dieser Art die durch die Probenschicht transmittierte Lichtintensität  $I$  darstellt, die der durch den Multiplexer übertragenen Anregungsintensität  $I_0$  nach Lambert-Beer'schem Gesetz direkt proportional ist:

$$I = I_0 \exp(-\mu_a d) = I_0 \exp(-C \varepsilon_{Ext} d) = I_0 \exp(-C(\varepsilon_A + \varepsilon_{St})d), \quad (11.3)$$

Hier ist  $d$  die Schichtdicke und  $\varepsilon_{Ext}$  der molare Extinktionskoeffizient der Probe, der sich allgemein aus den entsprechenden molaren Absorptions- und Streukoeffizienten  $\varepsilon_A$  und  $\varepsilon_{St}$  zusammensetzt.

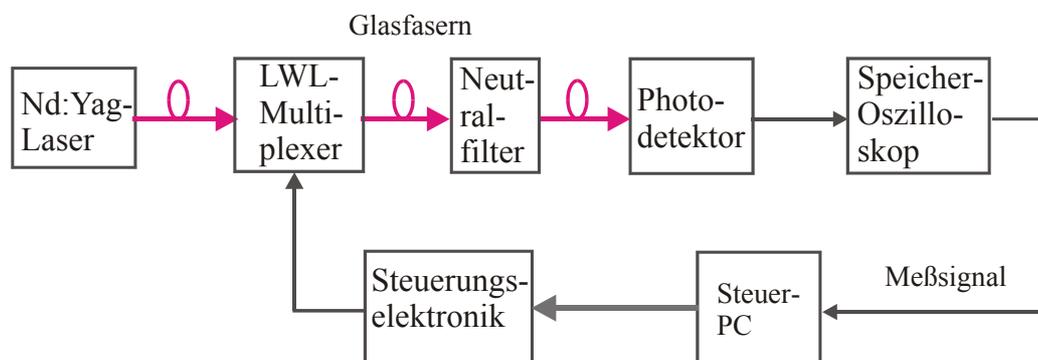
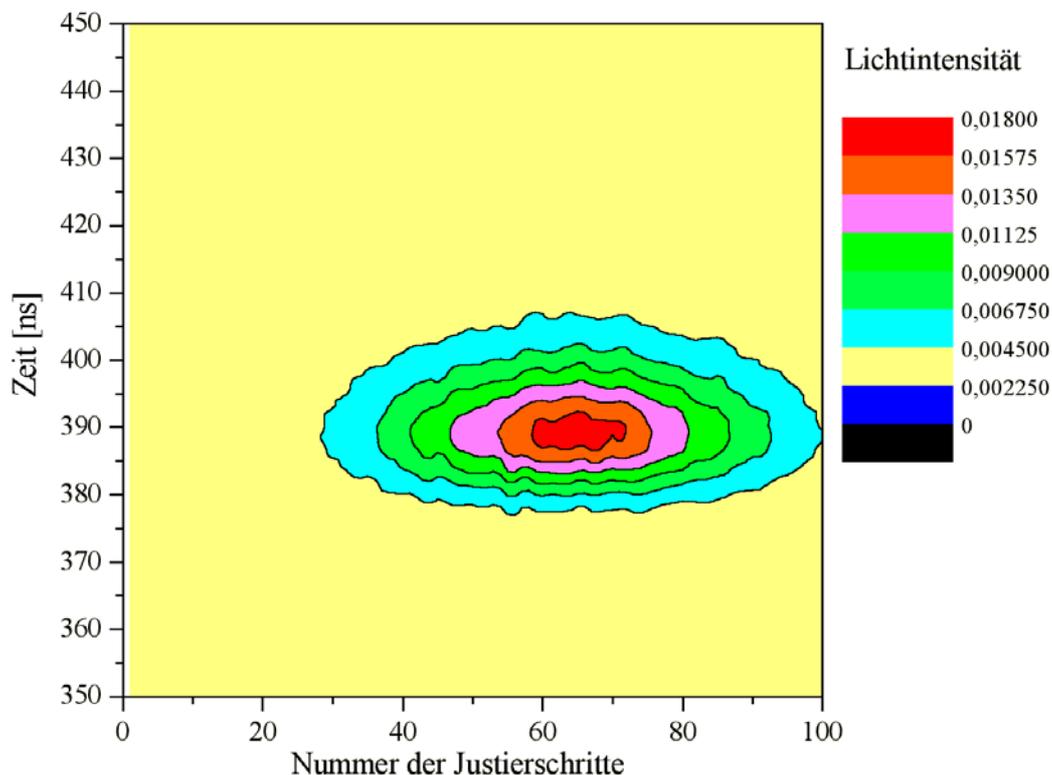


Abb. 11.4: Automatische Justierung des LWL-Multiplexers 1 nach dem optischen Signal mit einem gepulsten Laser

Bei der erfüllten Zeitvoraussetzung, d.h. wenn im betrachteten Zeitintervall die Konzentration  $C = \text{const}$  ist, kann dieses Aufbauprinzip in spektrometrischen Meßsystemen sowohl mit einer CW- als auch mit einer gepulsten Lichtquelle realisiert werden. Die Abb. 11.4 zeigt die Meßanordnung für die automatische Justierung des Einkanal-LWL-Multiplexers nach dem Meßsignal in einem Transmissions-Meßsystem mit dem gepulsten Nd:YAG-Laser. Die Justierung des Einkanal-LWL-Multiplexers erfolgte dabei nach den übertragenen Laserpulsen bei der Pulsbreite von 3 bis 4 ns. Die Probenschicht wurde bei den Experimenten durch die Neutralfilter modelliert. Die Abb. 11.5 zeigt die Meßergebnisse in dreidimensionaler Darstellung mit der durch den LWL-Multiplexer übertragenen Lichtintensität als Funktion der Zeit und der Winkelposition bzw. der Justierschrittnummer des Motorantriebs.



**Abb. 11.5: Automatische Justierung des Einkanal-LWL-Multiplexers nach dem Meßsignal in einem Transmissions-Meßsystem mit dem gepulsten Nd:YAG-Laser**

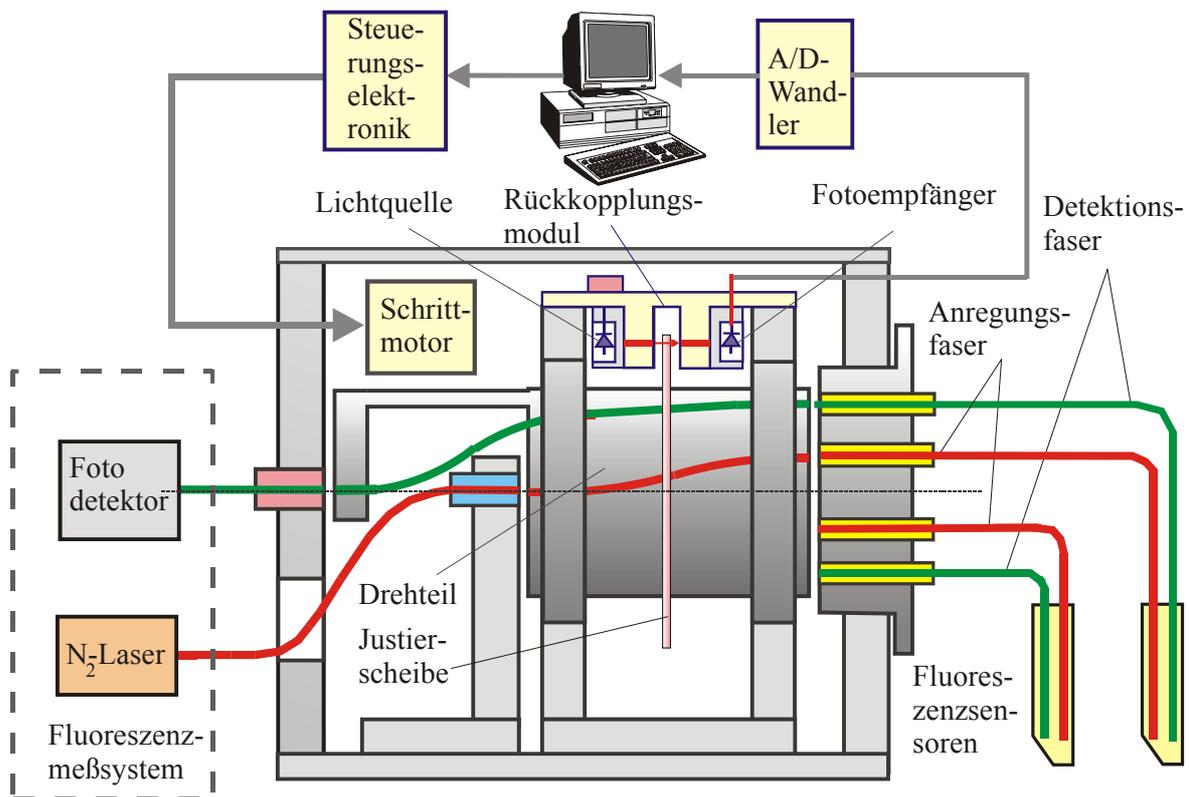
Nach dem ersten beschriebenen Konzept wurde auch die automatische Justierung des Zweikanal-LWL-Multiplexers im aufgebauten Meßsystem für Transmissionsmessungen an der UV/Ozonanlage mit dem He-Ne-Laser durchgeführt.

Bei den im betrachteten Zeitintervall konstant bleibenden optischen Eigenschaften der Probe  $\mu_a = \varepsilon_{xt} C$  ist die durch den zweiten Übertragungskanal des LWL-Multiplexers zum Photodetektor übertragene Lichtintensität als Meßsignal der durch den ersten Übertragungskanal

des Multiplexers übertragenen Anregungsintensität eindeutig proportional und berücksichtigt die gesamte Übertragungseffizienz des Zweikanal-LWL-Multiplexers. Deswegen konnte die automatische Justierung des LWL-Multiplexers in einem Transmissions-Meßsystem aufgrund des detektierten optischen Meßsignals durchgeführt werden.

### 11.5 Automatische Justierung des Zweikanal-LWL-Multiplexers im Meßsystem für die zeitaufgelöste Fluoreszenzspektroskopie

In einem Meßsystem für die zeitaufgelöste Fluoreszenzspektroskopie stellt das zu detektierende Meßsignal -Fluoreszenzlicht- die Abklingkurven auf die Anregungspulse dar, die durch den ersten Übertragungskanal des Zweikanal-LWL-Multiplexers vom Laser zum Sensorkopf übertragen werden.



**Abb. 11.6:** Automatische Justierung des LWL-Multiplexers 2 mit angeschlossenen Fluoreszenz-Sensoren

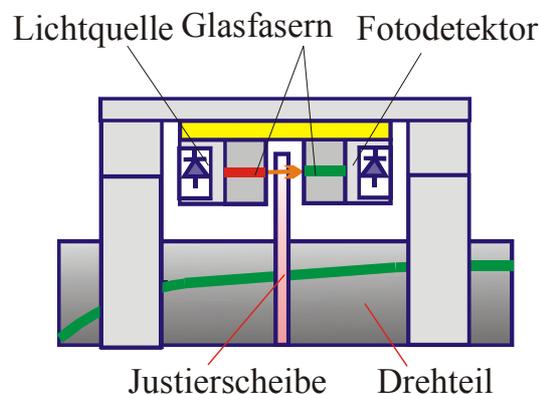
Das polychromatische Fluoreszenzlicht wird vom Fluoreszenzsensorkopf bzw. der Durchflußzelle durch den zweiten Übertragungskanal des LWL-Multiplexers zur Detektionseinheit übertragen und im Monochromator in einzelne spektrale Anteile zerlegt, die nacheinander mit dem Photomultiplier detektiert und mit einem Speicheroszilloskop

aufgenommen werden. Die notwendige Verarbeitung des Meßsignals setzt in diesem Fall einen bestimmten Zeit- und Rechenaufwand voraus.

Bei langsamen Konzentrationsänderungen der Probe kann die on-line automatische Justierung des LWL-Multiplexers auch im Fluoreszenz-Meßsystem nach dem Sensorsignal des Fluoreszenzsensors, z. B. nach dem Spektralanteil bei einer bestimmten Wellenlänge  $\lambda$  analog der im Abschnitt 11.3 beschriebenen Durchführung vorgenommen werden.

Bei schnelleren Konzentrationsänderungen ist aber der Systemaufbau nach dem zweiten Konzept zweckmäßiger. Dementsprechend soll in den LWL-Multiplexer ein Rückkopplungsmodul eingebaut werden, das dem Steuer-PC Informationen über die momentane Übertragungseffizienz unabhängig vom Sensorsignal liefert. Abb. 11.6 zeigt die automatische Justierung des Zweikanal-LWL-Multiplexers im Fluoreszenz-Meßsystem. In Abb. 11.7 ist ein Ausführungsbeispiel für ein Rückkopplungsmodul schematisch dargestellt.

Es besteht aus einer zusätzlichen Lichtquelle, z.B. einer Leucht- oder Laserdiode, einem Fotodetektor, z.B. einer Fotodiode und zwei mit ihren freien Koppelenden einander gegenüber liegenden Verbindungsglasfasern (Abb. 11.6). Die Halterung für die Verbindungsfasern kann z.B. die Form einer Gabellichtschranke besitzen, in der die Lichtquelle und der Lichtempfänger sowie zwei Glasfasern angeordnet sind.

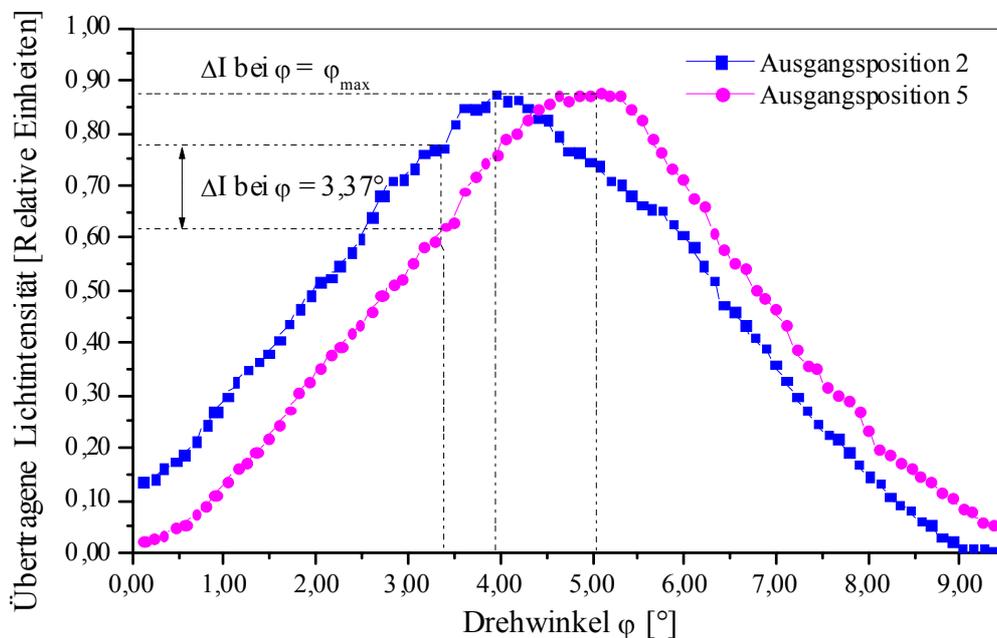


**Abb. 11.7: Rückkopplungsmodul für den Zweikanal-LWL-Multiplexer für die automatische Justierung**

Am Drehteil muß dementsprechend eine Justierscheibe mit kreisförmig angeordneten Bohrungen oder radialen Schlitzen befestigt sein. Anordnung, Anzahl, Winkelabstand und Abmessungen der Bohrungen bzw. Schlitze an der Justierscheibe müssen genau der Anordnung der Ausgangsfasern im Teil C entsprechen, so daß jede Bohrung bzw. jeder Schlitz in der Justierscheibe einem optischen Ausgang entspricht und beim Schalten genau zwischen den Koppelenden der Verbindungsglasfasern des Rückkopplungsmoduls angeordnet wird.

Im Rückkopplungsmodul wird das Licht der Lichtquelle in die erste Verbindungsglasfaser eingekoppelt, geht durch die Bohrung in der Justierscheibe hindurch und wird nach der Einkopplung in die zweite Verbindungsglasfaser zum Fotodetektor geleitet (Abb. 11.7). Der Fotodetektor des Rückkopplungsmoduls liefert dem Justierprogramm ein Rückführungssignal über die momentane Übertragungseffizienz des LWL-Multiplexers. Aufgrund dieses Signals erfolgt die automatische Justierung.

Die Anordnung der Verbindungsfaser des Rückkopplungsmoduls mit der Justierscheibe reproduziert aufgrund der Geometrie bei Drehung des Drehteils die Kopplungsbedingungen an der realen Verbindungsstelle 2, wobei die meisten bei den Schaltvorgängen auftretenden Verlustmechanismen und Positionierungsfehler wie z.B. der Auslaß von Schritten, Fehler bei der Positionsbestimmung oder Versatz der Drehachse im Rückkopplungsmodul und das Rückführungssignal abgebildet werden. Deswegen kann die automatische Justierung des LWL-Multiplexers bei jedem Schaltvorgang aufgrund der beschriebenen Anordnung mit der Justierscheibe und dem eingebauten Rückkopplungsmodul durchgeführt werden. Der mögliche Versatz der Justierscheibe gegenüber dem Drehteil kann dabei mit dem Justierprogramm einfach berücksichtigt werden.



**Abb. 11.8:** Die Signaldifferenz  $\Delta I = |I_2 - I_5|$  für die Ausgangspositionen 2 und 5 beim Schalten ohne und mit automatischer Justierung:  $\varphi_2 = \varphi_5 = \varphi_{\text{det}}$  ist der voreingestellte Drehwinkel beim Schalten ohne Justierung;  $\varphi_2^{\text{max}}, \varphi_5^{\text{max}}$  sind die durch die automatische Justierung eingestellten optimalen Drehwinkel für die Ausgangspositionen 2 und 5

## 11.6 Meßergebnisse und Schlußfolgerungen

Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen in verschiedenen Meßsystemen zeigten, daß durch die automatische Justierung vor allem verschiedene unprognostizierbare Positionierungsfehler, die bei jedem Schaltvorgang bei Dauerbetrieb auftreten können, ausgeglichen werden. Darüber hinaus werden additive Einstellungsfehler und die für jede Ausgangsposition unterschiedlichen Fertigungstoleranzen kompensiert.

Durch die automatische Justierung konnte die Lichtübertragungseffizienz abhängig von der Genauigkeit der Nullpositionseinstellung um bis zu 30% erhöht werden. Darüber hinaus steigt auch die Wiederholgenauigkeit, wodurch das Ausgangssignal im zeitlichen Verlauf stabiler wird. Durch die automatische Justierung wird die Verschiebung der Verteilungsdiagramme in der  $\varphi$ -Achse gegeneinander ausgeglichen, weshalb die Übertragungseffizienz für verschiedene Ausgangspositionen den gleichen Wert erreichen kann, wie es in Abb. 11.8 illustriert ist.

Zusammengefaßt können durch die automatische Justierung die optischen Verluste aufgrund folgender Verlustmechanismen korrigiert bzw. ausgeglichen werden:

- Dynamische Positionierungsfehler. Dazu gehören vor allem aus verschiedenen Gründen auftretende Schritt- oder Winkelfehler des Motorantriebs, z.B. der Ausfall von Schritten und Abweichungen vom Schrittwinkel. Diese Fehler können infolge entweder eines erhöhten Widerstandsmomentes der Motorachse wegen mechanischer Verkantungen und Verspannungen in den Halterungen und Lagern oder aufgrund elektromagnetischer Übertragungsstörungen vorkommen;
- Fehler der Positionsbestimmung der Motorachse. Dazu gehören z.B. Meßfehler eines Winkelsensors oder Fehler aufgrund eines beim Dauerbetrieb entstehenden Versatzes der Fahne gegenüber der Lichtschranke infolge Vibrationen des Motors;
- Einstellungsfehler, wie z.B. der Versatz der Fahne gegenüber der Übermittlungsfaser und Ungenauigkeit der Getriebeeinstellung und
- z.T. Fehler aus Fertigungstoleranzen, die sich aus mehreren Komponenten zusammensetzen und für jede Ausgangsposition unterschiedlich sind.

## 12 Zusammenfassung

Vorliegende Arbeit umfaßt die Entwicklung und Verifizierung eines Konzeptes für den Aufbau von Lichtwellenleiter-Multiplexern zur hocheffizienten und verzerrungsfreien Übertragung der Laserleistung sowie optischer Meßsignale in faseroptisch geführten Sensorsystemen. Grundprinzipien des entwickelten Konzeptes sind die mechanische Entlastung der Glasfasern bei den Schaltvorgängen, um Profilstörungen des Laserpulses auszuschließen, und die Minimierung der Anzahl der optischen Verbindungsstellen, um Leistungsverluste zu reduzieren.

Auf Grundlage des entwickelten Konzeptes wurden zwei sich nach ihren Aufbauten und Funktionen unterscheidende LWL-Multiplexer konstruiert, gebaut, charakterisiert und in realen Meßsystemen eingesetzt: Der Einkanal-LWL-Multiplexer und der Zweikanal-LWL-Multiplexer.

Der Einkanal-LWL-Multiplexer wurde für ein Meßsystem mit faseroptisch geführten photoakustischen Sensoren an einem Bioreaktor entwickelt und enthält einen optischen Übertragungskanal und mehrere optische Ausgänge, damit das Licht eines Lasers mehreren photoakustischen Sensorköpfen zur Anregung akustischer Wellen zugeführt werden kann. Das photoakustische Meßsignal wird als Druckwelle mit den in den Sensorköpfen eingebauten Druckaufnehmern jeweils einzeln detektiert und als elektrisches Signal erfasst.

Der Zweikanal-LWL-Multiplexer wurde für die zeitaufgelöste laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie sowie für weitere spektroskopische Meßsysteme entwickelt, in denen zu jedem Sensorkopf Anregungslicht, z.B. eines Lasers, zugeführt und gleichzeitig das zu detektierende optische Meßsignal zum Photodetektor zurückgeleitet werden muß. Der Zweikanal-LWL-Multiplexer weist deshalb zwei optische Übertragungskanäle, die gleichzeitig umgeschaltet werden, und zwei Gruppen optischer Ausgänge auf, was die Lichtleitung in den oben genannten Sensorsystemen ermöglicht.

Optimales Umschalten der Lichtwellenleiter ohne ihre dynamische Deformation ermöglicht eine hohe Effizienz und Reproduzierbarkeit der Lichtleistungsübertragung bei unverändertem Profil des Laserpulses, was für optische Messungen zu analytischen Zwecken besonders wichtig ist. Die Anzahl der optischen Verbindungsstellen und somit die optischen Verluste sind dabei minimiert.

Die entwickelten und gebauten Ein- und Zweikanal-LWL-Multiplexer wurden hinsichtlich ihrer Übertragungseigenschaften durch Messungen in Systemen mit gepulsten und kontinuierlichen Lasern charakterisiert.

Zur quantitativen Beschreibung der Kopplungs- und Übertragungsprozesse in den entwickelten LWL-Multiplexern wurde eine mathematische Modellierung der Lichtübertragung, abhängig vom Steuerungssignal einerseits und verschiedenen Einstellungs- und Einflußparametern andererseits durchgeführt. Auf Grundlage der Untersuchung der Übertragungsmechanismen an den optischen Verbindungsstellen wurde ein mathematisches Modell der Ein- und Zweikanal-LWL-Multiplexer als Zusammenhang zwischen der Übertragungseffizienz bzw. der übertragenen Lichtintensität und der Drehposition des Motorantriebs  $F(\varphi)$  ermittelt. Das mathematische Modell rekonstruiert die Funktion der LWL-Multiplexer und kann als Funktionsgesetz bezeichnet werden, wobei auch die Auswirkung verschiedener Parameter auf die Übertragungseffizienz berücksichtigt wird. Das mathematische Modell ermöglicht Computersimulationen der Übertragungsprozesse in den LWL-Multiplexern und kann zur systemtheoretischen Analyse der aufgebauten Multiplexer-Systeme eingesetzt werden. Aufgrund des mathematischen Modells kann auch die automatische Meßfehlerkorrektur bzw. -kompensation bei Betrieb der entwickelten Multiplexer in verschiedenen faseroptischen Sensorsystemen realisiert werden.

Die entwickelten Ein- und Zweikanal-LWL-Multiplexer wurden in verschiedenen Sensorsystemen eingesetzt und ihre Funktion charakterisiert.

Auf Basis des Einkanal-LWL-Multiplexers und der am Institut entwickelten photoakustischen Sensorköpfe [45] wurde ein Multiplexer-System mit faseroptisch geführten photoakustischen Sensoren für tiefenaufgelöste Messungen zur Profilierung eines Biofilms aufgebaut. Mit dem Multiplexer-System wurden die Untersuchungen der Biofilme im Durchflußkanal und am Bioreaktor im Labor durchgeführt.

Anschließend wurde auf Basis des Zweikanal-LWL-Multiplexers im Rahmen der Doktorarbeit ein Multiplexer-System für automatische Messungen mit verschiedenen faseroptisch geführten optischen Sensoren zur on-line Prozeßkontrolle und Steuerung einer UV/Ozon-Anlage aufgebaut. Der Aufbau des Multiplexer-Systems umfaßte sowohl die Ausarbeitung des Strukturkonzeptes und die Entwicklung der Durchflußzellen als Sensorelemente zur kombinierten on-line Fluoreszenz- und Transmissions-Analyse mit entsprechender Meßdatenerfassung, als auch die Gestaltung der Meß- und Steuerungssoftware. Durch seine flexible Struktur kann das aufgebaute Multiplexer-System für spezifische meß- und verfahrenstechnische Anforderungen und Lösungen angepaßt, für alle speziellen Aufgabenstellungen optimiert und mit den entsprechenden Lichtquellenmodulen, Faseroptiken

und Sensorelementen zu einem beliebigen Meßsystem zur automatischen Prozeßüberwachung und -steuerung erweitert werden.

Aufgrund der Analyse der Störfaktoren in den entwickelten Ein- und Zweikanal-LWL-Multiplexern bei ihrem Betrieb in den aufgebauten optischen Multiplexer-Systemen wurde eine Optimierung der Konstruktion und der Ansteuerung zur Steigerung der Übertragungseffizienz und der Reproduzierbarkeit bei verschiedenen Meßbedingungen durchgeführt. Es wurde weiterhin ein Regelungssystem für die automatische Justierung der LWL-Multiplexer im on-line Meßbetrieb in verschiedenen faseroptischen Sensorsystemen realisiert.

Das Betriebsverhalten der entwickelten LWL-Multiplexer als Komponente eines Meß- und Steuerungssystems wurde in verschiedenen optischen Sensorsystemen untersucht und charakterisiert. Dazu wurde der Einfluß der Lichtübertragung durch die LWL-Multiplexer in den aufgebauten Sensorsystemen auf das photoakustische bzw. Fluoreszenz-Signal analysiert, insbesondere die Auswirkung der Positionierungsgenauigkeit, der Übertragungseffizienz und verschiedener Einstellungsparameter der LWL-Multiplexer auf das Meßsignal und die Meßergebnisse. Aufgrund der systemtheoretischen Analyse der aufgebauten Multiplexer-Systeme wurden Algorithmen für eine automatische Meßfehlerkorrektur in einem photoakustischen und photometrischen Meßsystem umgesetzt.

## 13 Literaturverzeichnis

1. K. T. V. Grattan, B. T. Meggitt: *Optical Fiber Sensor Technology*, Chapman Hall, 1992.
2. E. Udd (Edit.): *Fiber Optic Smart Structures*, John Wiley & Sons, New York 1995, 409-443.
3. J. Dakin, B. Culshaw: *Optical Fiber Sensors, Principles and Components*, Aritech House, Boston and London, 197-197.
4. E. Ansari, Z. Chen, Q. Li: *A Multiplexed Optical Fiber Sensor System for Distributed Measurement of Structural Strains, Nondestructive Characterization of Materials in Aging Systems*, Symposium, Mater. Res. Soc. Warrendale, PA, USA, 1998, 119-130.
5. Y. Kawataba, K. Yasunaga, T. Imasaka, N. Ishibashi: *Photoacoustic Spectrometry Using a Fiber-optic Pressure Sensor*, Anal. Chem., 65, 1993, 3493-3496.
6. O. Tohyama, M. Kohashi, M. Sugihara, H. Itoh: *A Fiber-optic Pressure Microsensor for Biomedical Applications*, Sensors and Actuators, A 66, 1998, 150-154.
7. M. Kimura, K. Toshima: *Vibration Sensor Using Optical-fiber Cantilever with Bulb-lens*, Sensors and Actuators, A 66, 1998, 178-183.
8. R. H. Marshall, Y. N. Ning, A. W. Palmer, K. T. V. Grattan: *Simultaneous Measurement of a.c. and d.c. Stresses Using a Fibre-optic Electronically Scanned White-light Interferometer*, Sensors and Actuators A 64, 1998, 225-229.
9. A. Schneider, R. Chabicovsky, A. Aumüller: *Optical Sensor System for the on-line Measurement of Carbon in Fly-ash*, Sensors and Actuators A 67, 1998, 24-31.
10. Y. Shen, Y. Wang, L. Tong, L. Ye: *Novel Sapphire Fiber Thermometer Using Fluorescent Decay*, Sensors and Actuators A 71, 1998, 70-73.
11. E. Peiner, D. Scholz, A. Schlachtzky, P. Hauptmann: *A Miromachined Vibration Sensor Based on the Control of Power Transmitted Between Optical Fibres*, Sensors and Actuators A 65, 1998, 23-29.
12. L. Yuan, L. Zhou: *Sensitivity Coefficient Evaluation of an Embedded Fiber-optic Strain Sensor*, Sensors and Actuators, A 69, 1998, 5-11.
13. Z. Y. Zhang, T. Sun, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer: *Erbium-doped Intrinsic Fiber Sensor for Cryogenic Temperature Measurement*, Sensors and Actuators, A 71, 1998, 183-186.
14. S. Zacher (Hrsg.): *Automatisierungstechnik kompakt*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden 2000.
15. R. Lauber, P. Göhner: *Prozessautomatisierung*, Bd. 1,2, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg 1999.

16. L. Kasarian, M. Pahl: *Modellgeschützte Messung der Zirkulationsgeschwindigkeit der Strömung in einem Biogas-Turmreaktor durch Differenzdruckmessung*, Technisches Messen 12/95, 518-521.
17. A. Kersay: *Fiber-optic Sensor Multiplexing Techniques*, Fiber Optic Smart Structures, edited by E. Udd, John Wiley and Sons, 1995, Chapter 15, 409-445.
18. K.T.V. Grattan, B.T. Meggitt (Edit.): *Optical Fiber Sensor Technologie*, Optoelectronics Imaging and Sensing Volume 2: Devices and Technology, Chapman & Hall, London 1992.
19. H. Hultsch (Hrsg.): *Optische Telekommunikationssysteme*, Damm-Verlag KG, Gelsenkirchen 1996.
20. W. Haist (Hrsg.): *Optische Telekommunikationssysteme*, Bd.1: Physik und Technik, Damm-Verlag KG, Gelsenkirchen-Buer 1989.
21. D. Opielka: *Optische Nachrichtentechnik*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft Braunschweig/Wiesbaden 1995.
22. G. Milton, L. M. Clive, J. M. Ley: *Electro-optic and Acousto-optic Scanning and Deflection*, Dekker-Verlag, New York 1983.
23. T. L. Tipton; B. S. Vogt : *Multiplexed Fiber-optic Fluorescence Sensors for Measurement of Fuels in a Model*, Aquifer Field Screening Methods Hazard Waster Toxic Chem., Proc. Int. Symp.1, 1995, Volume 1 416-425; Publisher Air and Waste Management Association, Pittsburgh, Pa.
24. G. Conforti, M. Brenci, A. Mencaglia, A. G. Mignani, A. M. Scheggi : *Multiplexed Fiber-optic Thermometer*, Reprinted from SPIE Fiber Optic and Laser Sensors 4, 1988.
25. L. Finzel: *Schalter für Lichtwellenleiter*, Offenlegungsschrift DE 4015649 A1, veröffentlicht vom Deutschen Patentamt am 14.11.1991.
26. N. N.: *Verfahren und Vorrichtung zum Umschalten von optischen Signalleitungen*, Offenlegungsschrift DE 19500214 A, veröffentlicht vom Deutschen Patentamt am 11.7.1996.
27. E. Staitzok, M. Adams, H. Krause: *Optischer Schalter*, Offenlegungsschrift DE 4234916 A1, veröffentlicht vom Deutschen Patentamt am 21.4.1994.
28. H. Bruch, M. Kneier, A. Steckenborn, H. Schlaak: *Optischer Schalter*, Offenlegungsschrift DE 4109195 A1, veröffentlicht vom Deutschen Patentamt am 24.9.1992.
29. J. Eicher, F. Meyer: *Optischer Schalter*, Offenlegungsschrift DE 3927441 A1, veröffentlicht vom Deutschen Patentamt am 21.2.1991.
30. R. A. Eno: *Optischer Schalter*, Offenlegungsschrift DE 3914952 A1, veröffentlicht vom Deutschen Patentamt am 16.11.1989.

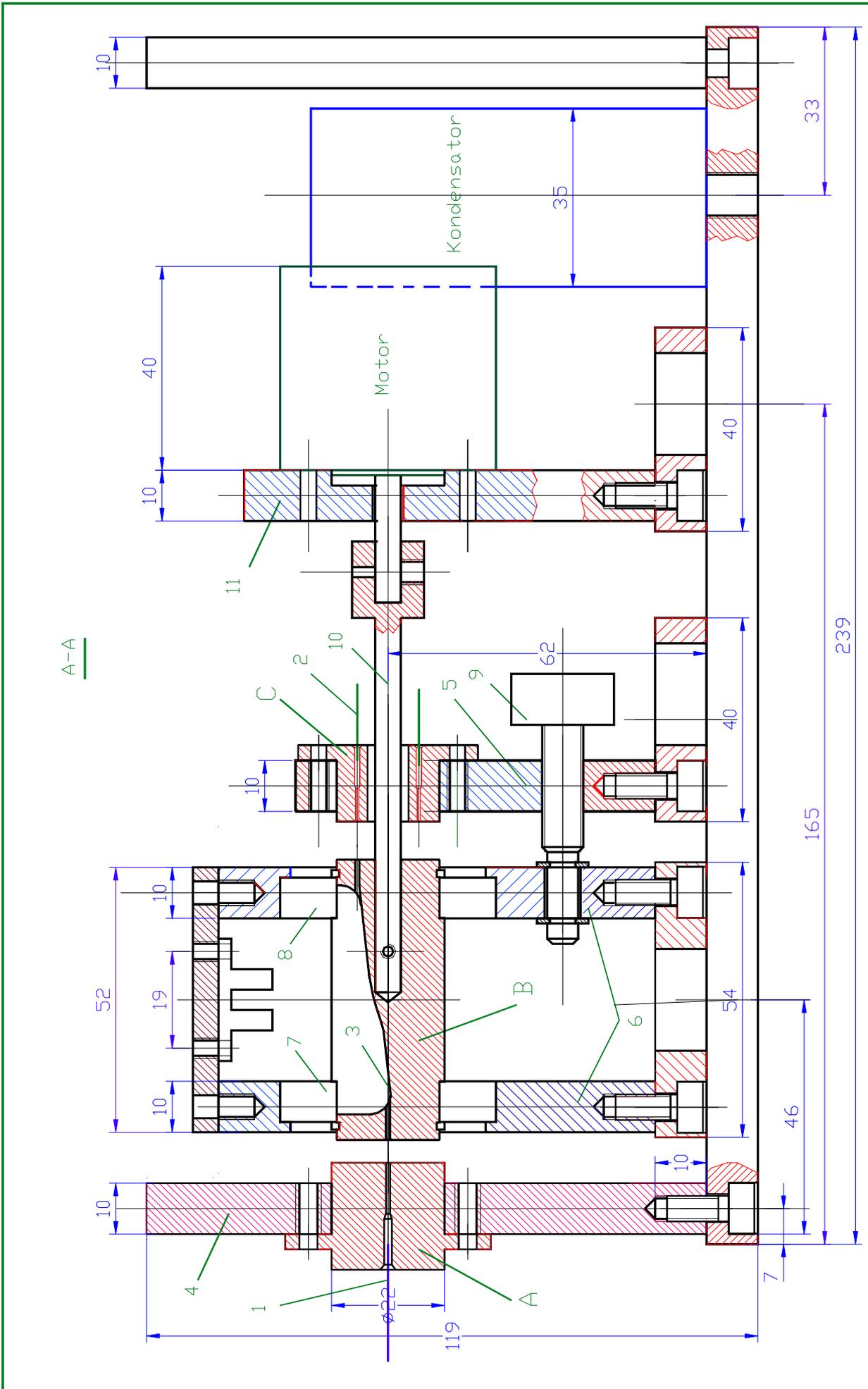
31. H. Stocker: *Drehschalter für Lichtwellenleiter*, Offenlegungsschrift DE 3439905 A1, veröffentlicht vom Deutschen Patentamt am 30.04.1986.
32. F. Elfert: *Lichtleiterschalter*, Offenlegungsschrift DE 3800510 A1, veröffentlicht vom Deutschen Patentamt am 20.7.1989.
33. T. Heinzel: *Opto-mechanische Drehschalter*, Offenlegungsschrift DE 3420154 A1, veröffentlicht vom Deutschen Patentamt am 5.12.1985.
34. P. Rohner: *Schalter für Lichtwellenleiter*, Offenlegungsschrift DE 3127574 A1, veröffentlicht vom Deutschen Patentamt am 21.04.1983.
35. H. Sakamoto und H. Komazawa: *Optical Switch Capable of Detecting Correct Switching Operation*, European Patent Application EP 0 846 969 A2, 1998/24.
36. DiCon Fiber Optics, Inc.; Berkeley, USA; CA 94710, Patent.
37. H.-W. Dederichs; T. Ischdonat: *Multiplexer für Lichtwellenleiter*, Offenlegungsschrift DE 195 15 375 A1, veröffentlicht vom Deutschen Patentamt am 7.11.1996.
38. W. Arnold, G. Benz, H. Hauer, R. Müller-Fiedler, K. Mayer: *Optischer Schalter*, Offenlegungsschrift 4101043 A1, veröffentlicht vom Deutschen Patentamt am 13.8.1992.
39. K. A. Jones: *Optoelektronik*, herausgegeben von H.-D. Junge, Weinheim New York Basel Cambridge, 1992, S. 81-99.
40. G. Grau, W. Freude: *Optische Nachrichtentechnik*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1991.
41. S. Geckeler: *Lichtwellenleiter für die optische Nachrichtenübertragung*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New-York 1990.
42. C. Kopp: *Entwicklung eines photoakustischen Sensorsystems zur tiefenaufgelösten Analyse von Biofilmen*, Doktorarbeit, Technische Universität München 1999.
43. C. Kopp, R. Nießner: *Photoacoustic Depth Profiling of Layers Samples*, Analyst 123, 1998, 547-550.
44. C. Kopp, R. Nießner: *Depth-Resolved Determination of the Absorption Coefficient by Photoacoustic Spectroscopy within a Hydrogel*, Analytical Chemistry, Analytical Chemistry A, 1993,
45. C. Kopp, R. Nießner: *Optoacoustic Sensor Head for Depth Profiling*, Applied Physics B 68, 1999, 719-725.
46. V. E. Gusev, A. A. Karabutov: *Laser Optoacoustics*, AIP Press, New York 1993.
47. A. A. Karabutov, N. B. Podymova, V. S. Letokhov: *Time-Resolved Laser Optoacoustic Tomography of Inhomogeneous Media*, Applied Physics B 63, 1996, 545-563.

48. A. A. Karabutov, N. B. Podymova, V. S. Letokhov: *Time-resolved Optoacoustic Detection of Absorbing Particles in Scattering Media*, Journal of Modern Optics 42, 1995, 7-11.
49. W. Demtröder: *Laser Spectroscopy*, Springer-Verlag, Berlin 1993.
50. A. D. Rosencwaig: *Photoacoustics and Photoacoustic Spectroscopy*, John Wiley & Son, New York 1980.
51. A. Beenen, G. Spanner, R. Nießner: *Photoacoustic Depth-resolved Analysis of Tissue Models*, Applied Spectroscopy 51, 1997, 51-57.
52. A. A. Oraesvky, S. L. Jacques, F. K. Tittel: *Measurement of Tissue Optical Properties by Time-resolved Detection of Laser-induced Transient Stress*, Applied Optics 36, 1997, 402-415.
53. G. Spanner, R. Nießner: *A Photoacoustic Laser Sensor for the Non-invasive Determination of Blood Contents*, Analytical Methods and Instrumentation, 1993, 208-212.
54. G. Spanner, R. Nießner: *New Concept for the Non-invasive Determination of Pphysiological Glucose Concentrations Using Modulated Laser Diodes*, Fres. J. Anal. Chem. 354, 1996, 306-310.
55. G. Spanner: *Anwendung der photoakustischen Laserspektroskopie zur nichtinvasiven Bestimmung von Blutinhaltsstoffen*, Doktorarbeit, Technische Universität München 1995.
56. W. Linder: *Feinwerktechnik*, Vogel-Verlag, Würzburg 1974.
57. H. Ringhandt: *Feinwerkelemente*, Carl Hanser Verlag, München Wien 1979.
58. E. Herter, M. Graf: *Optische Nachrichtentechnik*, Carl Hanser Verlag, München Wien 1994.
59. H.-P. Hubmann: *Lichtwellenleiter-Praxis*, Franzis-Verlag GmbH & Co. KG, München 1992.
60. D. Schröder: *Elektrische Antriebe 2*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1995.
61. W. Schmusch: *Elektronische Meßtechnik*, Vogel Fachbuchverlag Würzburg 1998.
62. E. Schiessle: *Sensortechnik und Meßwertaufnahme*, Vogel Fachbuchverlag, Würzburg 1999.
63. E. Schrüfer: *Elektrische Meßtechnik*, Carl Hanser Verlag, München Wien 1988.
64. L. Constantinesco-Simon, A. Franusa, K. Saal; *Elektrische Maschinen und Antriebssysteme*, Friedr. Vieweg Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden 1999.
65. J. Vogel: *Grundlagen der elektrischen Antriebstechnik mit Berechnungsbeispielen*, Hüthig-Verlag, 1986.
66. A. Wenzel: *Aufbereitung von Deponiesickerwasser durch naßchemische Oxidation unter Verwendung von Ozon und UV-C-Strahlung*, Doktorarbeit, Technische Universität München 1998.
67. G. Schwedt: *Fluorimetrische Analyse*, Verlag Chemie, Weinheim 1981.

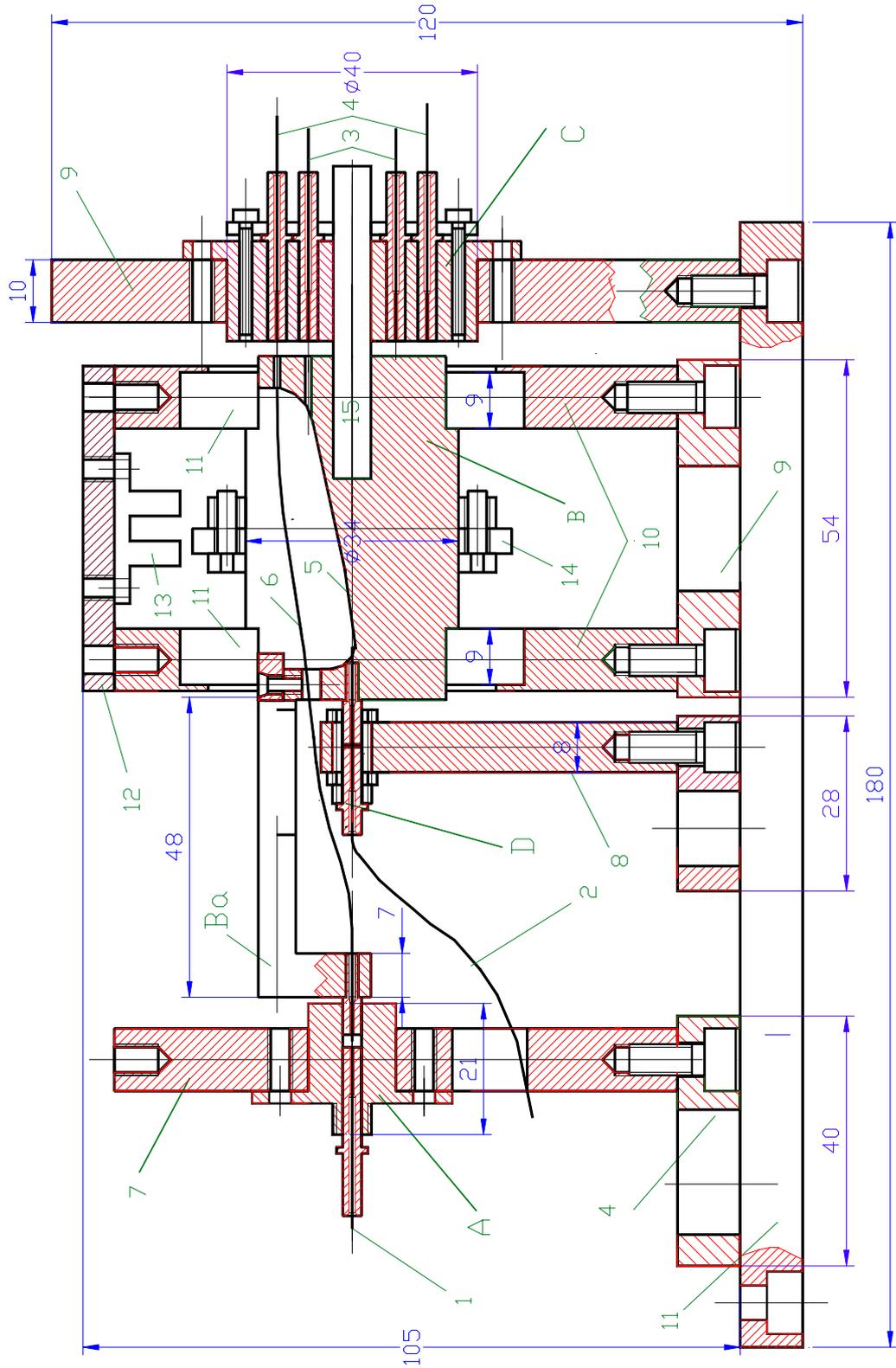
68. M. Otto: *Analytische Chemie*, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1995.
69. M. Hesse, H. Meier, B. Zeeh: *Spektroskopische Methoden in der organischen Chemie*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
70. P. W. Atkins: *Quanten, Begriffe und Konzepte für Chemiker*, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1993.
71. T. Baumann, B. Delakowitz, B. Fruhstorfer, T. Klein, R. Nießner: *The Role of Colloids in the Transport of Pollutants in the Shallow Groundwaters: Development of Monitoring and Assessment Procedures*, Schlußbericht CEC-Contract EV5V-CT-92-0228, München 1996.
72. S. Haaszio: *Bau und Anwendung eines kompakten faseroptischen Fluoreszenzensors zur Überwachung von Mülldeponien und zur Erkundung des Gefahrenpotentials von Altlasten*, Forschungs- und Entwicklungsvorhaben E 19, Schlußbericht, TU München 1996.
73. R. Kotzick, R. Nießner: *Application of Time-resolved Laser-induced and Fiber-optically Guided Fluorescence Spectroscopy for Monitoring of a PAH-contaminated Remediation Site*, Fres. J. Anal. Chem. 354, 72-76.
74. E. Müller-Ackermann: *Konzeption eines faseroptischen Sensorarrays zu Bestimmung von Schwermetallen in wässriger Lösung*, Doktorarbeit, Technische Universität München 1996.
75. S. Haaszio, T. Baumann, R. Nießner: *Erkundung und Überwachung von Grundwasserschadensfällen mittels der zeitaufgelösten Fluoreszenzspektroskopie*, Vom Wasser 86, 1996, 391-405.
76. U. Panne: *Zeitaufgelöste, faseroptisch geführte, multi-dimensionale Fluoreszenz als Sensorprinzip zum Nachweis wassergelöster Fluorophore*, Doktorarbeit, Universität Dortmund 1994 .
77. P. Profos, T. Pfeifer: *Handbuch der industriellen Meßtechnik*, Oldenbourg Verlag, München 1994.
78. D. Jansen: *Optoelektronik*, Friedr. Vieweg Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig 1993.
79. F. Lühe: *Optische Signalübertragung mit Lichtwellenleitern*, Friedr. Vieweg Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig 1993.
80. S. Geckeler: *Auswerteverfahren für Impulsmessungen an Lichtwellenleitern*, Nachrichtentechnische Zeitschrift 36, 1983, 442-445.
81. D. Marcuse: *Pulse Distortion in Single-mode Fibers, Part. 3: Chipped pulses*, Appl. Opt. 20, 1981, 3573-3579.
82. W.-J. Becker, K. W. Bonfig, K. Höing: *Handbuch Elektrische Meßtechnik*, Hüthig Verlag, Heidelberg 2000.

83. D. Marcuse: *Loss Analysis of Single-mode Fiber Splices*, Bell Syst. Techn. J 56, 1977, 703-718.
84. M Miyamoto, T. Sakai, R. Yamauchi, K. Inada: *Bending Loss Evaluation of Single-mode Fibers with Arbitrary Core Index Profile by Far-field Pattern*, IEEE J. Lightwave Technol. 8, 1990, 673-677.
85. D. Rittich: *Physikalische Grundlagen der optischen Nachrichtentechnik*, ANT Nachrichtentechnische Berichte, Heft 3 1986.
86. C. Wrobel (Hrsg.): *Optische Übertragungstechnik in industrieller Praxis*, Hüthig-Verlag, Heidelberg 1994.
87. H. Kogelnik, T. Li: *Laser Beams and Resonators*, Proc. IEEE 54, 1966, 1550-1567.
88. H.-R. Tränkler: *Taschenbuch der Meßtechnik*, R. Oldenbourg Verlag, München 1989.
89. A. Freudenberger: *Prozeßmeßtechnik*, Vogel Buchverlag, Würzburg 2000.
90. P. Böttle, G. Boy, H. Clausing: *Elektrische Meß- und Regelungstechnik*, Vogel Buchverlag, Würzburg 1998.
91. G. Oesterle: *Prozeßanalytik*, R. Oldenbourg Verlag, München Wien 1995.
92. L. Kasarian: „Gerät zur automatischen Messung von Konzentrationen“, Patent Nr. 2008651, Ausschuß der Russischen Föderation für Patente und Warenzeichen (Rospatent), eingetragen am 28.02.1994.
93. L. Kasarian: „Gerät zur automatischen Messung von Konzentrationen“, Patent Nr. 2087903, Ausschuß der Russischen Föderation für Patente und Warenzeichen (Rospatent), eingetragen am 20.08.1997.
94. Y. Z. Zhong, C. Yappert: *Determination of Effective Depth and Equivalent Pathlength for a Single-Fiber Fluorometric Sensors*, Applied Spectroscopy, 46, 1992, 912-919.
95. Y. Z. Zhong, C. Yappert: *Determination of the Effective Depth for Double-Fiber Fluorometric Sensors*, Applied Spectroscopy, 46, 1992, 919-924.
96. T. F. Cooney, H. T. Skinner, S.M. Angel: *Comparative Study of Some Fiber-Optic Remote Raman Probe Designs. Part1: Model for Liquids and transparent Solids*, Applied Spectroscopy 50, 1996, 836-848.
97. P. Plaza, N. Q. Dao, M. Jouan, H. Fevrier, H. Saisse: *Simulation et Optimisation des Capteurs a Fibres-optiques Adjacentes*, Applied Optics, 1986, 3448-3454.
98. G. Turell, J. Corset: *Raman Microscopy. Developments and Applications*, Academic Press, London 1996, 128-133.

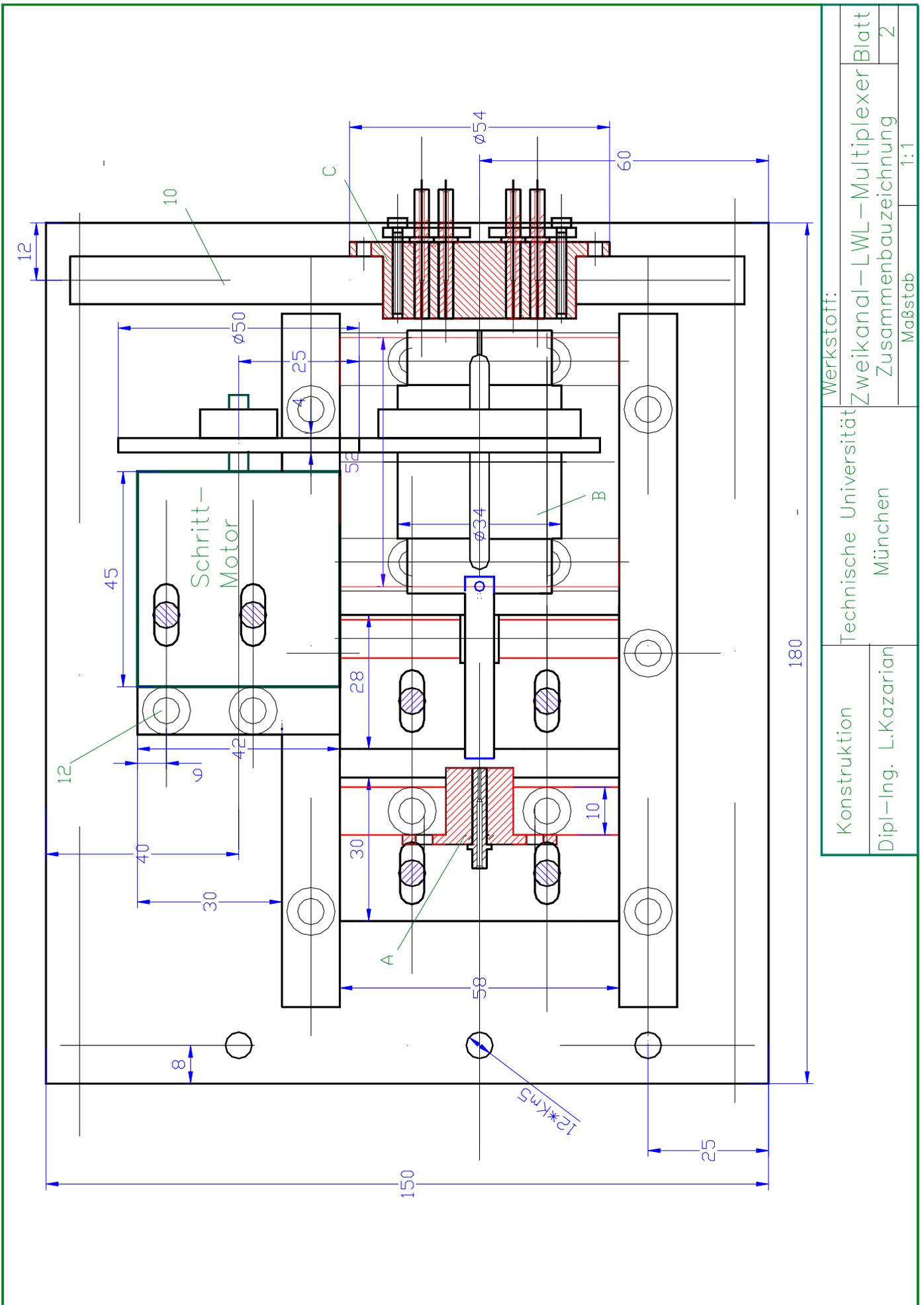
99. M. L. Myrick, S. M. Angel, R. Desiderio: *Comparisation of some Fiber-optic Configurations for Measurement of Luminescence and Raman Scattering*, Applied Optics 29,1990, 1333-1344.
100. A. Weinmann: *Regelungen, Analyse und technischer Entwurf*, Springer-Verlag, Wien New-York 1994.
101. G. Strohrmann: *Automatisierungstechnik*, Oldenbourg Verlag, München 1986.
102. L. Merz, H. Jaschek: *Grundkurs der Regelungstechnik*, R. Oldenbourg Verlag, München Wien 1992.
103. H. Mann, H. Schiffelgen: *Einführung in die Regelungstechnik*, Carl Hanser Verlag, München Wien 1986.
104. R. Isermann: *Digitale Regelsysteme*, Springer-Verlag Berlin 1987.
105. J. Lunze: *Regelungstechnik 1, systemtechnische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen und Regelungstechnik 2*, Springer Verlag, Berlin 1999.
106. W. Latzel: *Einführung in die digitalen Regelungen*, VDI-Verlag, Düsseldorf 1995.
107. G. Schmidt: *Grundlagen der Regelungstechnik, Analyse und Entwurf linearer und einfacher nichtlinearer Regelungen sowie diskrete Steuerungen*, Springer-Verlag, Berlin 1987.
108. L. Kazarian, R. Nießner: „*Verfahren zum optischen Schalten und Drehschalter*“, Patentschrift DE 197 20 619 A1, Deutsches Patentamt, Tag der Anmeldung 16.05.1997, Erteilung am 01.03.2001.
109. L. Kazarian, R. Nießner: „*Drehschalter für Lichtwellenleiter*“, Gebrauchsmuster DE 299 18 972 U1, Deutsches Patentamt, Tag der Anmeldung 18.10.1999, Eintragung am 23.03.2000.
110. L. Kazarian, R. Nießner: „*Verfahren zum Schalten von übertragenen Lichtsignalen und Drehschalter*“, Offenlegungsschrift DE 199 51 992 A1, Deutsches Patentamt, Anmeldetag 28.10.1999, Offenlegungstag 3.5.2001.
111. L. Kasarian, R. Nießner: *A New Optical Fiber Multiplexer for Distortion-free Light Transfer in Multichannel Fiber Optic Sensor Systems*, Sensors and Actuators 84, 2000, 250-258.
112. T. Schmid, L. Kazarian, U. Panne, R. Nießner: „*Depth-resolved Analysis of Biofilms by Photoacoustic Spectroscopy*“, Analytical Sciences, 2000, im Druck.



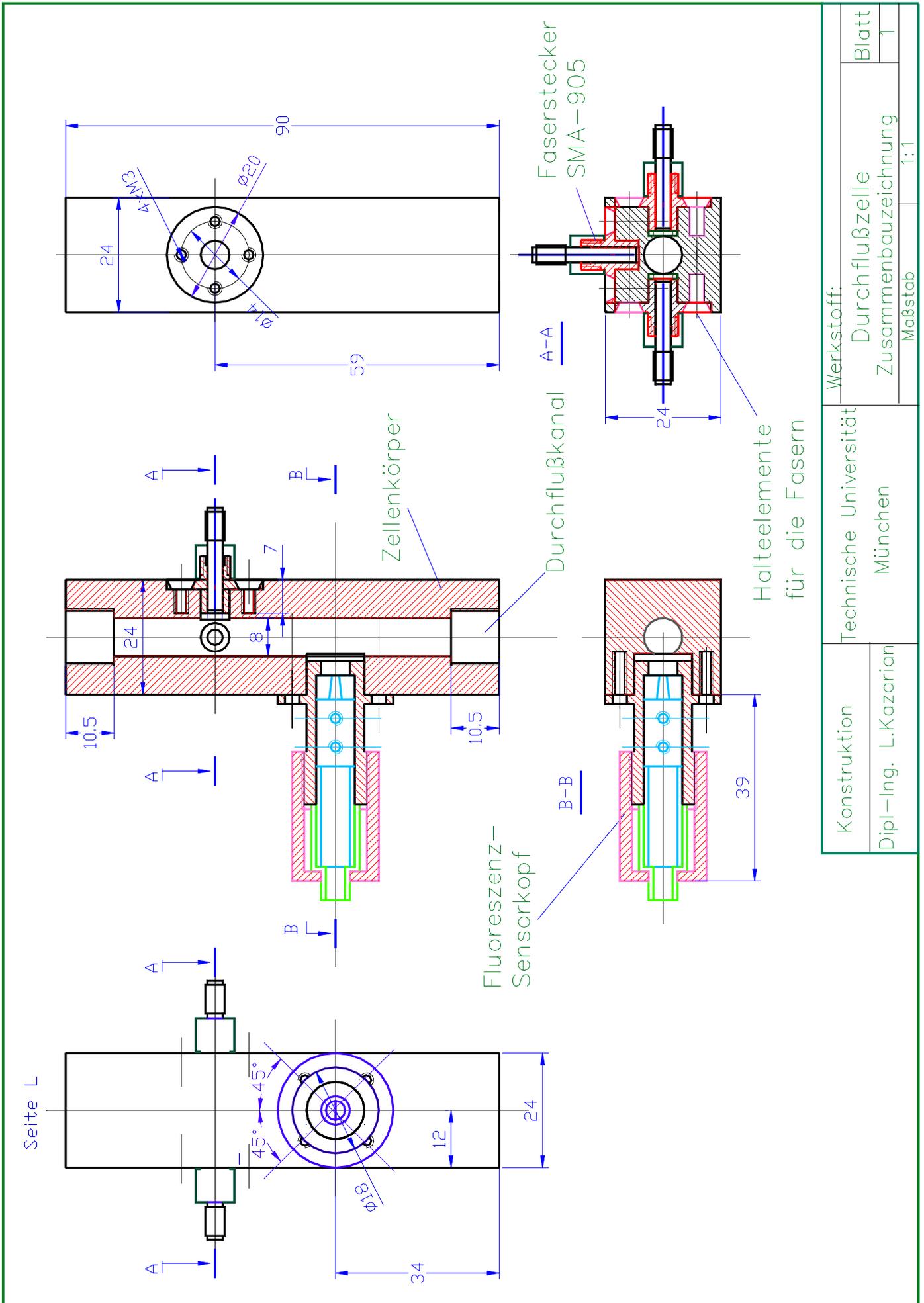
Konstruktion Dipl.-Ing. L.Kazarian	Technische Universität München	Werkstoff:	
		Einkanal-LWL-Multiplexer	Blatt
Zusammenbauzeichnung		Maßstab	
		1:1	



Konstruktion	Technische Universität München		Werkstoff:
	Dipl.-Ing. L. Kazarian	München	
			Blatt
			1
			Zusammenbauzeichnung
			Maßstab
			1:1

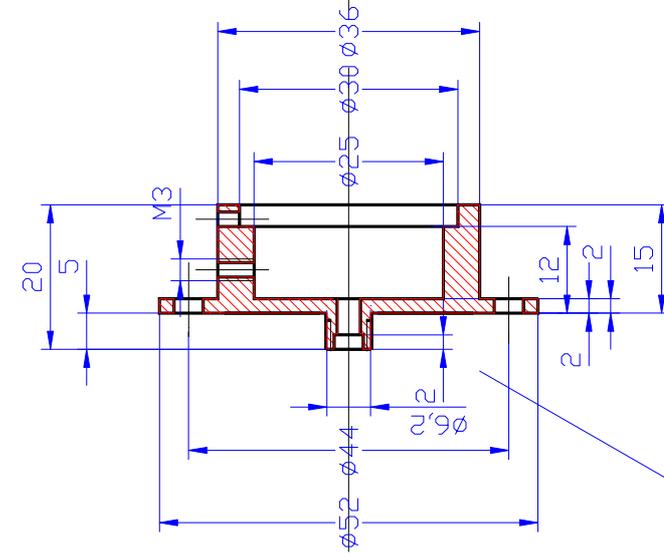


Konstruktion Dipl-Ing. L.Kazarian	Technische Universität München	Werkstoff: Zweikanal-LWL-Multiplexer	
		Zusammenbauzeichnung	
			Blatt 2
			Maßstab 1:1

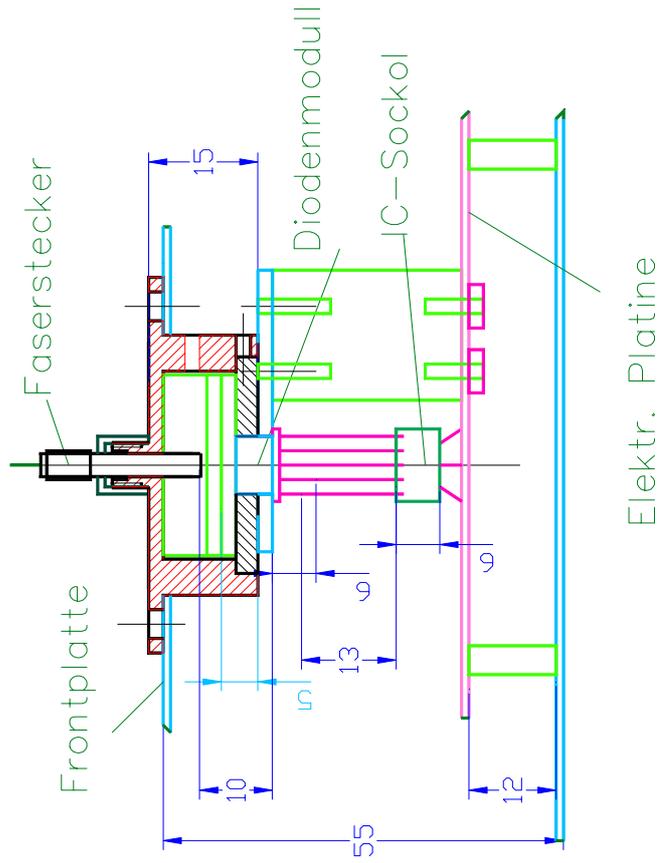
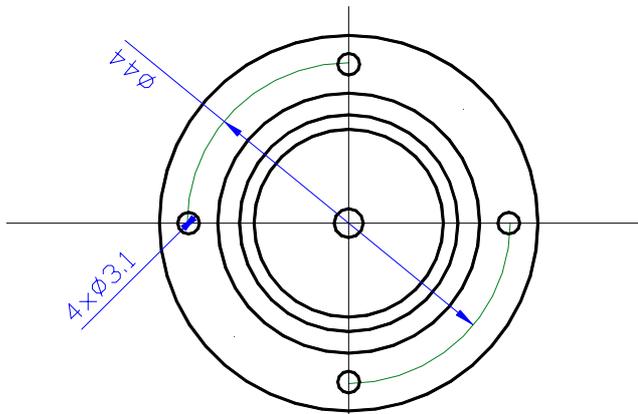


Konstruktion Dipl.-Ing. L.Kazarian	Technische Universität München	Werkstoff: Durchflußzelle Zusammenbauzeichnung	
		Maßstab 1:1	
		Blatt 1	

Aufnahmeelement für die Faserkopplung



Gewinde  
1/4 Zoll-36 UNS, 2A



Konstruktion Dipl-Ing. L.Kazarian	Technische Universität München		Werkstoff: Detektionsmodul		Blatt 1
			Masstab	1:1	