

Versuch Ultraschnelle Photolumineszenz

Praktikumsbericht

Betreuer: Slawa Schmidt

Vorgelegt von: Piere Schulze und Jens Brauer E-Mail Adressen entfernt

Abgabetermin: 15. Januar 2010

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 4			
Tabellenverzeichnis 4			
1. Einleitung	5		
 2. Spektral aufgelöste Messungen 2.1. Absorption	6 6 6 8 8 10 11		
 2.4.1. Quantenausbeute	11 12 14 15		
 3. Zeitlich aufgelöste Messungen 3.1. Fluoreszenzabklingdauer	 17 17 17 19 20 23 23 23 23 23 23 23 23 23 30 		
4. Fazit	31		
A. Anhang	32		
Literaturverzeichnis	38		

Abbildungsverzeichnis

1.	Strukturformel von Oxazin-1 aus [1]	5
2.	Extinktion für verschiedene Probenlösungen	$\overline{7}$
3.	Herstellerangaben zum Extinktionskoeffizient gelöst in Ethanol aus [3]	7
4.	Versuchsaufbau für die Emissionsmessung und die Absorptionsmessung	9
5.	Unterschied von korrigierten und unkorrigierten Messwerten	10
6.	Korrigierte Fluoreszenzspektren für alle Proben	11
7.	Apparatefunktion für die Anregungsspektren	13
8.	Anregungsspektren von Oxazin-1 in verschiedenen Lösungsmitteln	13
9.	Anregungs- und Emissionsspektrum von Ethanol	14
10.	Darstellung des Effekts der Lösungsmittelrelaxation. S_0 ist der Grundzu-	
	stand, S_1 der angeregte Franck-Condon-Zustand, S'_1 der angeregte Zustand	
	nach Umorientierung des Lösungsmittels, S'_0 der Grundzustand in der um-	
	orientierten Solvathülle. F ist die Fluoreszenz ohne Lösungsmittelrelaxation	
	und F' die Fluoreszenz nach der Lösungsmittelrelaxation (Aus[6])	15
11.	Untersuchung des Emmissionsspektrums von Oaxzin-1 in Butanol für ver-	
	schiedenen Temperaturen	16
12.	Aufbau des Pikosekundenfluorometers	18
13.	Messergebnisse zur Bestimmung der Kanalbreite	19
14.	Abklingkurven für Probenlösungen, auf 1 normiert (Rohdaten, nicht gefittet)	20
15.	Abklingkurve mit exponentiellem Fit für Oxazin-1 in Ethanol	21
16.	Linearer Fit für die Abklingdauer τ in Abhängigkeit der Viskosität pro	
	Temperatur $\left(\frac{\eta}{T}\right)$ in doppelt-logarithmischer Darstellung	22
17.	Versuchsaufbau für polarisationsabhängige Messungen	24
18.	Polarplot der Anisotropie für die Alkohole Methanol, Hexanol und Decanol	25
19.	Zerfallskurven für den magischen Winkel und die Winkel vom Maximum	
	und vom Minimum für Methanol	26
20.	Zerfallskurven für den magischen Winkel und die Winkel vom Maximum	
	und vom Minimum für Hexanol	26
21.	Zerfallskurven für den magischen Winkel und die Winkel vom Maximum	
	und vom Minimum für Decanol	27
22.	Zeitlicher Verlauf der Anisotropie	29
23.	Fit über den zeitlichen Verlauf der Anisotropie für Methanol, Hexanol und	
~ .	Decanol	29
24.	Fit über die Zerfallskurve beim magischen Winkel für Methanol, Hexanol	
~ ~	und Decanol	30
25.	Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Methanol	32
26.	Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Ethanol	32
27.	Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Propanol	33
28.	Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Buthanol	33
29.	Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Hexanol	34
30.	Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Decanol	34

- 31. Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Methanol (Origin) . 35
 32. Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Propanol (Origin) . . 35
 33. Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Buthanol (Origin) . . 36
 34. Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Hexanol (Origin) . . 36
- 35. Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Decanol (Origin) . . 37

Tabellenverzeichnis

1.	Überblick über die verwendeten Lösungsmittel und Viskositäsdaten für $T =$	
	$25^{\circ}C$. Viskositätsdaten aus [5]	8
2.	Quantenausbeute für die jeweilige Probe	12
3.	Zusammenfassung der Messwerte zur Bestimmung der Abklingdauer	22
4.	Verhältnisse, bestimmt durch Counts, beim jeweiligen Winkel	24
5.	Verhältnisse, bestimmt durch Flächen unter den Zerfallskurven	25
6.	Rotationskorrelationszeiten für Methanol, Hexanol und Decanol	30
7.	Anisotropie für Methanol, Hexanol und Decanol	31

1. Einleitung

In dem folgenden Praktikumsbericht zum Versuch "Ultraschnelle Photoluminesezenz" geht es im Wesentlichen darum, den Laserfarbstoff Oxazin-1 (Abbildung 1) näher zu untersuchen. Ein Farbstofflaser beruht auf dem Prinzip der Lumineszenz, d.h. der Phopshphoreszenz und der Flouresezenz. Dabei wird ein Farbstoff mit einer energiereichen Lichtquelle (Blitzlicht oder mit Pumplaser) bestrahlt, wodurch die Moleküle des Laserfarbstoffs angeregt werden und die Elektronen durch die Energie des Photons in ein höheres Energieniveau übergehen. Nach kurzer Zeit geht das Elektron dann wieder in den Grundzustand über (relaxiert) und emittiert wiederrum Lichtquanten einer bestimmten Wellenlänge. Der Vorteil von Farbstofflasern mit einem Farbstoff als optisches Medium besteht darin, dass mit verschiedenen Farbstoffen nahezu der gesamte Spektralbereich zwischen 300 nm und 1200 nm abgedeckt werden kann.

Ziel dieses Praktikums ist also, den Laserfarbstoff Oxazin-1 genauer zu verstehen. Dazu wurden zum einen Absorptions-, sowie Emmissionsspektren von Oxazin-1 in unterschiedlichen Lösungsmitteln aufgenommenm. Mit den Spektren lassen sich die Quantenausbeute, d.h. das Verhältnis von absorbierten und emmitierten Photonen berechnen und es lassen sich Aussagen über die Abhängigkeit von der Viskosität des Lösungsmittels machen. Weiterhin wurde untersucht, inwiefern die Temperatur einen Effekt auf das Emmissionsspektrum, bzw. die Qauntenausbeute hat. In einem weiteren Versuch wurde die Abängigkeit der Fluoresezenzabklingdauer vom Lösungsmittel mit Hilfe eines Pikosekunden-Fluorometer gemessen und es wurden polarisationsabhängige Messungen der Abklingdauer durchgeführt.

Abbildung 1: Strukturformel von Oxazin-1 aus [1]

2. Spektral aufgelöste Messungen

2.1. Absorption

2.1.1. Theorie

Zu Beginn wurde die Extinktion des Farbstoffes Oxazin-1 in mehreren Probelösungen gemessen. Die Extinktion ist allgemein definiert als

$$E = -\log(T) = \log(\frac{I_0}{I}),\tag{1}$$

dabei ist T die Transmission, das Verhältnis von transmittierter Intensität zu einfallender Intensität. Die Extinktion ist also ein Maß für die Absorption. Dabei gilt weiterhin das Lambert-Beersche Gesetz:

$$E = \epsilon \cdot c \cdot d \tag{2}$$

D.h. die Extinktion ist proportional zum Extinktionskoeffizienten ϵ des Farbstoffes und zur Konzentration c der Probenlösung, sowie zur Schichtdicke d.

2.1.2. Messung

Gemessen wurde die Extinktion des Farbstoffes Oxazin-1 in den Probenlösungen Ethanol, Methanol, 1-Propanol, 1-Buthanol, 1-Hexanol und 1-Decanol. Die Farbstoffkonzentration c betrug jeweils 10^{-5} mol/m für eine Extinktion von unegfähr 1 und die Schichtdicke wird durch die verwendeten Küvetten bestimmt. Gemessen wurde die Extinktion mit einem VARIAN Cary Scan 100 UV-VIS Spectrometer. Dieses war mit einem Computer verbunden und mit dem zugehörigen Programm ließ sich die Extinktion für einen bestimmten Wellenlängenbereich messen. Dafür mussten lediglich die Probenküvette und eine Küvette mit der Referenzprobe (z.B. Ethnaol) eingelegt werden. Der Wellenlängenbereich wurde auf 500 nm - 700 nm festgelegt. Um die verschiedenen Proben vergleichen zu können, wurde die Probe jeweils soweit nachverdünnt, dass die gemessene Extinktion zwischen 0.8 und 1 betrug. Die Messergebnisse sind in Abbildung 2 gezeigt.

2.1.3. Auswertung

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Messwerte für die verschiedenen Probenlösungen eine ähnliche Extinktionskurve zeigen. Verglichen mit den Herstellerdaten des Laserfarbstoffs ([7]) für den Extinktionskoeffizienten in Abbildung 3 ist zu erkennen, dass Abbildung 2 die Ergebnisse wiederspiegelt. Auch hier wurde ein erhöhte Absorption (Extinktion) bei



Abbildung 2: Extinktion für verschiedene Probenlösungen

einer Wellenlänge von etwa 650 nm gemessen. Und auch der restliche Verlauf der Extinktion (bzw. des Extinktionskoeffizienten) stimmt überein. Die Messwerte zeigen also die erwartete Form und Intensität.



Abbildung 3: Herstellerangaben zum Extinktionskoeffizient gelöst in Ethanol aus [3]

Lösungsmittel	Wellenlänge max. Extinktion /nm	Summenformel	Viskosität $\eta\ /{\rm mPas}$
Methanol	643	CH ₃ OH	0,544
Ethanol	647	$CH_3(CH_2)OH$	1,074
1-Propanol	647	$CH_3(CH_2)_2OH$	1,945
1-Butanol	649	$CH_3(CH_2)_3OH$	2,544
1-Hexanol	650	$CH_3(CH_2)_5OH$	4,578
1-Decanol	651	$CH_3(CH_2)_9OH$	10,91

Tabelle 1: Überblick über die verwendeten Lösungsmittel und Viskositäsdaten für $T = 25^{\circ}C$. Viskositätsdaten aus [5]

Bei genauerem Hinsehen fällt weiterhin auf, dass die Extinktionsmaxima je nach Lösungsmittel in der Wellenlänge verschoben sind.

Dies kommt durch den Effekt der Solvatochromie. Solvatochromie beschreibt den Effekt, dass ein Farbstoff gelöst in Lösungsmittel unterschiedlicher Polarität verschiedene Farben annehmen kann. D.h. bei Lichtabsorption wird entweder der Grundzustand abgesenkt (negative Solvatochromie) oder der Anregungszustand wird geringer (positive Solvatochromie). In diesem Fall hat man es mit negativer Solvatocromie zu tun.D.h. dadurch dass das Anregungsniveau gleich bleibt, der Grundzustand jedoch abgesenkt wird, werden die Absorptionswellenlängen umso kleiner (und energiereicher) je polarer das Lösungsmittel ist, da jetzt mehr Energie für die Absorption nötig ist. Die Energielücke zwischen Grundzustand und angeregtem Zustand wird mit der Polarität des Lösungsmittels größer. Man spricht von hypsochromer Verschiebung. [2]

Hier lässt sich also schon ein Zusammenhang zwischen der Viskosität/Polarität des Lösungsmittels und der Wellenlänge mit der größten Extinktion erahnen. So verschiebt sich die Wellenlänge bei dem polarsten Lösungsmittel Methanol am stärksten hin zum kurzwelligen Bereich, bei Decanol (am wenigsten polar) ist die Wellenlänge maximaler Extinktion am größten. Die genauen Daten der Extinktionsmaxima und der Viskoitäten sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

2.2. Aufbau

2.3. Versuchsaufbau

In Abbildung 4 ist der Versuchsaufbau für Emissions- und Absorptionsmessungen zu sehen. Das weiße Licht der Xenon-Lampe wird durch eine Linse auf den Eingangsspalt des Anregungsmonochromators fokussiert. Ein davor geschalteter Chopper sorgt für ein periodisches Signal, das nötig ist, um im Lock-In-Verstärker das Rauschen des Signals



Abbildung 4: Versuchsaufbau für die Emissionsmessung und die Absorptionsmessung

herausfiltern zu können. Der Anregungsmonochromator wählt aus dem breiten Spektralbereich eine Farbe aus, wobei durch den Einsatz schmalerer Schlitzbleche die Genauigkeit erhöht werden kann. Je schmaler der Spalt ist, desto geringer ist aber auch die Intensität, so dass ein geeignetes Mittel gewählt werden muss. Gesteuert wird der Anregungsmonochromator über einen Schrittmotor (MA), der wiederrum, wie auch der Schrittmotor (ME), vom PC gesteuert werden kann. Hinter dem Anregungsmonochromator wird das Licht mit einer Sammellinse auf die Detektionsseite der Probenküvette gerichtet, weil bei einer Anregung in der Mitte, emittierte Photonen in Detektionsrichtung noch von anderen dazwischenliegenden Molekülen absorbiert werden können, die dann wieder in eine andere Richtung emittieren können, so dass diese nicht messbar sind. Die emittierten Photonen werden durch weitere Linsen in den Emissionmonochromator geleitet. Dieser hat auch wieder austauschbare Spaltbreiten und wird durch einen Schrittmotor (ME) gesteuert. Dort werden wieder nur die Photonen mit der eingestellten Wellenlänge durchgelassen. Die vorhandenen Photonen mit der entsprechendnen Wellenlänge werden danach von einem Photomultiplier(PMT), der mit Hochspannung versorgt wird(HV), in kurze Stromimpulse umgewandelt. Die Stromimpulse werden durch einen Widerstand von $1 M\Omega$ geglättet, so dass danach eine Gleichspannung vorliegt, die mit einer Analog-Digital-Wandler Karte vom PC eingelesen werden kann. Da der Chopper das Licht mit einer Frequenz moduliert hat, wird auch die Spannung mit dieser Frequenz moduliert und dessen Signal Rausch Verhältnis kann mit einem Lock-In-Verstärker deutlich verbessert werden.

2.4. Messung Fluoreszenzspektrum

Bei diesem Versuch durchläuft der Emissionmonochromator die Wellenlängen von 600 nm bis 800 nm. Es wurden Schlitzbleche mit einer Spaltbreite von 1,25 nm gewählt, so dass nur wenig andere Wellenlängen den Monochromator passieren können. Die eingestellte Wellenlänge am Anregungsmonochromator muss außerhalb dieses Bereiches liegen, da sonst Streulicht die Messung verfälschen würde. Um noch in einem Bereich hoher Absorption zu landen, wurde eine Wellenlänge von 590 nm gewählt. Die Emissions- und Anregungsspektren unterliegen apparativen Einflüssen. So detektiert ein Photomultiplier abhängig von der Wellenlänge nicht immer die richtige Anzahl an Photonen und der Reflexionskoeffizient des verwendeten Gitters im Monochromator ist auch wellenlängenabhängig. Um diese Störungen zu beseitigen, wird eine Apparatefunktion A_n mit Gleichung 3 berechnet, wobei Lit_{norm} genormte Literaturdaten aus [7] und Exp_{norm} die genormten experimentellen Werte für Oxazin-1 in Ethanol sind. Anschließend werden die Messergebnisse der anderen Proben mit der Apparatefunktion multipliziert.

$$A_n = \frac{Lit_{norm}}{Exp_{norm}} \tag{3}$$

In Abbildung 5 sind die gemessenen und die korrigierten Werte für Ethanol dargestellt. Es ist zu sehen, dass das Intensitätsmaximum der korrigierten Werte bei einer kleineren Wellenlänge vorliegt als bei den unkorrigierten Werten. In Abbildung 6 sind die korrigierten



Abbildung 5: Unterschied von korrigierten und unkorrigierten Messwerten

Werte aller Proben dargestellt. Es ist wieder zu erkennen, dass bei steigender Viskosität eine Verschiebung der Intensitätsmaxima zu größeren Wellenlängen vorhanden ist. Das ist wiederum mit der Solvatochromie zu erklären. Des Weiteren werden die Intensitätsmaxima bei steigender Viskosität größer, wobei hier Propanol und Butanol getauscht werden müssten.



Abbildung 6: Korrigierte Fluoreszenzspektren für alle Proben

2.4.1. Quantenausbeute

Die Quantenausbeute wird durch das Verhältnis zwischen emittierten und absorbierten Photonen beschrieben. Da die Anzahl der absorbierten Photonen im Gegensatz zur Anzahl der emittierten Photonen oft nicht leicht zu bestimmen ist, wird die Quantenausbeute häufig nicht direkt berechnet, sondern nur im Verhältnis zu einer Referenzprobe, deren Quantenausbeute bekannt ist, bestimmt. Hierfür wurde die Probenlösung von Oxazin in Ethanol beutzt, deren Quantenausbeute mit 11% bekannt ist. Zur Berechnung der Quantenausbeute der anderen Probenlösunge wurde dann folgende Formel verwendet:

$$\Phi_{Probe} = \frac{\sum_{Probe}}{\sum_{r}} \cdot \Phi_r \tag{4}$$

,
dabei bezeichnet \sum_{Probe} den Quotienten aus der Gesamtzahl der emittierten Photonen
 und dem Extinktionswert $E_{\lambda,Probe}$ mit $\lambda = 590 \,\mathrm{nm}$ (Anregungswellenlänge) aus den Mes-

Lösungsmittel	Quantenaus beute / $\%$
Methanol	10,0
Ethanol	11,0
Propanol	13,7
Butanol	13,7
Hexanol	17,7
Decanol	19,3

Tabelle 2: Quantenausbeute für die jeweilige Probe

sungen zur Absorption. Der Index r steht für die Referenzprobe Ethanol. Zu erwarten ist eine höhere Quantenausbeute mit steigender Viskosität, da sich dann die Oxazinmoleküle weniger bewegen und somit weniger Anregungsenergie durch Stöße mit den Alkoholmolekülen strahlungslos verloren geht. Die in Tabelle 2 zu sehenden experimentell ermittelten Ergebnisse bestätigen diese Erwartungen.

2.5. Anregungsspektren

Um nun mit dem Aufbau Anregungsspektren aufnehmen zu können, ist es nur notwendig die Spalte zu vertauschen und im PC-Programm auf "Extinktion" umzustellen. Dadurch durchläuft nun der Anregungsmonochromator einen bestimmten Wellenlängenbereich und der Emissionsmonochromator ist für die ganze Messung auf eine einzige Wellenlänge eingestellt. Da schon bekannt ist, dass die Absorption für einen Wellenlängenbereich von 500 nm - 700 nm stattfindet, wurde dieser Wellenlängenbereich für den Anregungsmonochromator in das Programm eingegeben. Die Wellenlänge des Emissionsmonochromators muss oberhalb des Abtastbereichs liegen damit die Energie kleiner ist als die der Anregung und um keine Störeffekte zu bekommen. Um aber auch noch eine genügend hohe Intensität der Emmission zu erhalten wurde der Emissionsmonochromator auf eine Wellenlänge von 710 nm eingestellt.

Auch hier kann nun wieder eine Apparatefunktion berechnet werden, um apparative Einflüsse aus den Messdaten zu eliminieren. Die Apparatefunktion wurde wieder mit Gleichung 3 berechnet, wobei Lit_{norm} diesmal die normierten Literaturwerte für Oxazin-1 in Methanol aus [7] bezeichnet und Exp_{norm} den normierten Messwerten für Oxazin-1 in Methanol entspricht. Die korrigierten Messwerte durch Multpilpikation mit der Apparatefunktion sind in Abbildung 8 zu finden. Die Anregungsspektren zeigen, dass die Intensitäten im Maximum mit zunehmender Viskosität der Probenlösungen größer werden, was wieder daran liegt, dass bei größerer Viskosität weniger Anregungsenergie durch Stöße strahlungslos verloren geht.



Abbildung 7: Apparatefunktion für die Anregungsspektren



Abbildung 8: Anregungsspektren von Oxazin-1 in verschiedenen Lösungsmitteln

2.5.1. Vergleich von Anregungs- und Emissionsspektrum

Vergleicht man die Anregungs- und die Emissionsspektren, so fällt auf, dass die Maxima der Anregungsspektren bei größeren Wellenlängen liegen, als die der Emissionsspektren. Als Beispiel dafür wurden die beiden Spektren für Ethanol in Abbildung 9 dargestellt. Dort liegt das Maximum des Fluoreszenzlichts bei einer Wellenlänge von $\lambda_{Fluor} = 665$ nm und das Maximum des Anregungsspektrum bei einer Wellenlänge von $\lambda_{Anreg} = 645$ nm. Somit ergibt sich eine Verschiebung $\Delta \lambda = 20$ nm. Diese Verschiebung zu größeren Wellenlängen heißt Stokes-Verschiebung.



Abbildung 9: Anregungs- und Emissionsspektrum von Ethanol

Sie entsteht durch zwei Effekte die in Abbildung 10 zu sehen sind.

Der eine Effekt, die Schwingungsrelaxation entsteht dadurch, dass sich Elektronen sowohl nach der Absorption nur selten im vibronischen Grundzustand des elektronisch angeregten Zustands, wie auch nach der Emission nur selten im vibronischen Grundzustand des elektronischen Grundzustands befinden. Durch nichtstrahlende Relaxation in den jeweiligen vibronischen Grundzustand geht Energie Verloren die eine Verschiebung der Wellenlänge verursacht.

Der zweite, in den meisten Fällen stärkere Effekt ist die Lösungsmittelrelaxation. Durch Lichtabsorption kommt es zu einer Umorientierung der Elektronen und somit zu einer spontanen Änderung des Dipolmoments. Durch Reorganisation der Solvathülle kommt man in einen Zustand geringerer Energie (S'_1) . Nach der Emission eines Photons gelangt das Molekül in den Grundzustand (S'_0) , dessen Solvathülle genauso orientiert ist wie die von S'_1 . Anschließend gelangt das Molekül durch Schwingungsrelaxation und erneute Umorientierung der Lösungsmittelmoleküle in den ursprünglichen Grundzustand (S_0) . (vgl.[6])



Abbildung 10: Darstellung des Effekts der Lösungsmittelrelaxation. S_0 ist der Grundzustand, S_1 der angeregte Franck-Condon-Zustand, S'_1 der angeregte Zustand nach Umorientierung des Lösungsmittels, S'_0 der Grundzustand in der umorientierten Solvathülle. F ist die Fluoreszenz ohne Lösungsmittelrelaxation und F' die Fluoreszenz nach der Lösungsmittelrelaxation (Aus[6])

2.6. Messungen bei veränderter Temperatur

Als Nächstes wurde untersucht inwiefern sich das Emmsionsspektrum von Oxazin-1 in einer Probenlösung verändert, wenn sich die Temperatur T verändert. Dazu wurde die Probe von Oxazin-1 in Buthanol verwendet. Mit einem angeschlossenen Wärmeregler ließ sich nun die Temperatur der Probenlösung runterregeln bzw. raufregeln und auf einen bestimmten Wert einstellen. Dabei wurden folgende Temperaturen eingestellt:

 $0\,^{\rm o}{\rm C},\,15\,^{\rm o}{\rm C},\,25\,^{\rm o}{\rm C},\,40\,^{\rm o}{\rm C}$ und $55\,^{\rm o}{\rm C}$

Auch in diesem Versuchsteil gilt wieder, dass der Anregungsmonochromator auf eine Wellenlänge λ von 590 nm eingestellt wurde und der Emmsionsmonochromator bei jeder Temperatur ein Fluoreszenzspektrum von 600-800 nm aufgenommen hat.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 11 zu finden.

Man kann an Abbildung 11 deutlich erkennen, dass die Emmission mit steigender Temperatur T geringer wird. Dies lässt sich physikalisch damit erklären, dass bei einer höheren Temperatur die Elektronen in der Lösung genug Energie bekommen, um auch höhere Energieniveas zu besetzen. Dadurch gilt dann, dass die Elektronen in den höheren Energieniveaus eine höhere Energie haben, als die Energie der Photonen selbst. D.h. die Energie der Photonen mit der Energie $E = h \cdot f = h \frac{c}{\lambda}$ reicht nicht mehr aus um die Elektronen



Abbildung 11: Untersuchung des Emmissionsspektrums von Oaxzin-1 in Butanol für verschiedenen Temperaturen

in den höheren Niveaus anzuregen. Die Elektronen bleiben einfach in den Niveaus bedingt duch die Wärmeenergie. Somit lassen sich durch die Photonen mit der Wellenlänge $\lambda = 590 \text{ nm}$ nur die Elektronen in der "niedrigeren" Energieniveaus anregen. Und mit steigender Temperatur besetzen immer mehr Elektronen die höheren Energieniveaus. Folglich werden weniger Elektronen angeregt und es werden weniger Photonen emittiert.

3. Zeitlich aufgelöste Messungen

3.1. Fluoreszenzabklingdauer

3.1.1. Theorie

In diesem Teil geht es darum, die Floureszenzabklingdauer in Abhängigkeit vom Lösungsmittel zu messen. Unter Abklingdauer versteht man die mittlere Lebensdauer eines Elektrons im Energieniveau S_1 . D.h. die Abklingdauer beschreibt die Dauer, die das Elektron nach Anregung im Zustand S_1 verbringt, bevor es unter Aussendung eines Fluoreszenzphotons in den Grundzustand übergeht. Allgemein gilt für die Abnahme der Anzahl angeregter Moleküle folgende Differentialgleichung:

$$dN(t) = -(k_{fl} + k_{ic} + k_{isc} + k_{pc}) \cdot N(t) \cdot dt = -kN(t)dt$$

$$\tag{5}$$

, dabei steht k für die unterschiedlichen Übergangsraten und die Indizes kennzeichnen die verschiedenen Relaxationskanäle im Molekül. fl steht für Fluoresezenz, ic für internal conversion, isc für intersystem crossing und pc für photochemische Prozesse. Die Lösung der Differntialgleichung 5 ist:

$$N(t) = N_0 e^{-kt} = N_0 e^{\frac{-\iota}{\tau}}, \qquad \tau = \text{Fluoresezenzlebensdauer}$$
(6)

3.1.2. Messung

Die Versuche zur zeitlich aufgelösten Messungen wurdem mit einem Pikosekundenfluorometer der AG UNO durchgeführt. Dieses kann das Abklingverhalten im Pikosekundenbereich auflösen.

Das Messprinzip besteht darin, die Probe mit einem gepulsten Laser anzuregen und die Zeit zwischen Anregung und der Detektion des ersten Fluoresezenzphotons mittels eines Photomultipliers zu messen. Dabei ist zu beachten, dass der Laserpuls mehr als einen Anregungszustand erzeugt und daher das Verhältnis von detektierten Photonen zur Anregungsrate klein gehalten werden muss um keine Überbewertung kurzer Lebensdauern zu erhalten.

Der genaue Messaufbau ist in Abbildung 12 gezeigt. Das Signal eines Pulsgenerators wird an den Laser weitergegeben, dessen Intensitätsmaximum bei $\lambda_{exc} = 656,3$ nm liegt. Der Laserstrahl bestrahlt nach Durchgang durch ein Interferenzfilter mit $\lambda_{max} = 656,3$ nm die im Probenhalter befestige Probe (anders als in der Abbildung über ein Glasfaserkabel). Die Fluoreszenz wird mit einem Photomultiplier detektiert und das Spannungssignal an



Abbildung 12: Aufbau des Pikosekundenfluorometers

einen Constant Fraction Discriminator (CFD) weitergeleitet. Um Streulicht (vor allem vom Laser) herauszufiltern wird vor den Photomultiplier weiterhein ein Interferenzfilter mit $\lambda_{max} = 695$ nm und ein Kantenfilter mit $\lambda_{Kante} = 695$ nm befestigt. Der CFD dient nun dazu den Triggerzeitpunkt präzise zu bestimmen und den Spannungsimpuls zu einem Normpuls aufzubereiten. Das gleiche wird mit dem Signal des Pulsgenerators gemacht. Die Zeitdifferenz beider Signal wird nun durch einen TAC (Zeit-Amplituden-Konverter) ermittelt. Dieser hat zwei Eingänge, einen für das Start-Signal und einen für das Stopp-Signal. Durch den Start-Puls wird dann im TAC ein Kondensator mit konstantem Strom aufgeladen. Das Stopp-Signal stoppt den Aufladevorgang. Die zeitliche Differenz zwischen Start- und Stopp-Signal ist nun proportional zur aufgeladenen Spannung. Durch einen Analog-Digital-Converter wird die Spannung dann digitalisiert und an den Multi Channel Analyser (MCA) weitergeleitet. Dieser hat 1024 Kanäle und jeder Kanal entspricht einem bestimmten Zeitintervall. Somit lässt sich die Spannung genau einem Zeitinterval zuordnen.

Wie in Abbildung 12 zu sehen, arbeitet das Pikosekundenfluorometer zeitinverterit. D.h. das Signal des Pulsgenerators wird mit einem Delaymodul zeitlich verzögert und dient als Stoppsignal, während das Signal vom Photomultiplier als Start-Signal dient.



Abbildung 13: Messergebnisse zur Bestimmung der Kanalbreite

3.1.3. Bestimmung der Kanalbreite

Um Aussagen über den zeitlichen Verlauf der Fluoresezenzemission zu machen, musste zunächst die zeitliche Kanalbreite δt ermittelt werden. Dazu wurde die Abklingkurve des Fluorophors DQTCI gemessen, welches eine sehr kurze Abklingdauer hat. Danach wurde der Delay am Delaymodul um $\Delta t = 8$ ns erweitert, das Signal also um diese Zeit verzögert und dann erneut gemessen (Abbildung 13). Aus der resultierenden Kanaldifferenz Δ_{Kanal} konnte nun die Kanalbreite berechnet werden:

$$\delta t = \frac{\Delta t}{\Delta_{Kanal}} \tag{7}$$

Dies ergab $\delta t = \frac{8ns}{576channel} = 13,9 \,\mathrm{ps}.$

Die auf 1 normierten Abklingkurven für unsere Probenlösungen sind in Abbildung 14 gezeigt.

Hierbei ist zu erkennen, das die Breite der Abklingkurve mit steigender Viskotiät (von Methanol bis Decanol) zunimmt. Also steigt mit zunehmender Viskosität die Lebensdauer eines Fluorphors.



Abbildung 14: Abklingkurven für Probenlösungen, auf 1 normiert (Rohdaten, nicht gefittet)

3.1.4. Auswertung

Um die Messwerte vom Pikosekundenfluorometer auswerten zu können und über die Zeit auftragen zu können, mussten diese noch mit dem Matlab Code TCSPC gefittet werden. Dazu mussten dem Programm die Kanalbreite und eine Apparatefunktion übermittelt werden. Die Apparatefunktion wird so von dem Matlab Programm direkt mit eingerechnet (Faltung) um so apparative Einflüsse herauszufiltern. Für die Apparatefunktion wurde die bereits aufgenommene Abklingkurve des schnell abklingenden DQTCI verwendet. Bei dem nun erstellten monoexponentiellen Fit wurde darauf geachtet, dass der Fehler möglichst klein wird und der Fit möglichst gut passt. Ggf. wurde der Shift (Verschiebung der mit der Apparatefunktion gefalteten Exp-Funktion gegen die Messwerte) verändert und der Fit wiederholt. Die Ergebnisse sind im Anhang zu finden (Abbildung 25 - Abbildung 30). Hierbei ist anzumerken, dass der Wert für τ durch das Programm viel zu genau angegeben wurde, denn so genau lässt sich der Wert nicht bestimmen. Schon kleine Änderungen am Shift führen zu einer Änderung von τ um ± 20 ps. Daher gilt für Ethanol z.B. $\tau = (770 \pm 20)$ ps

Trotzdem kann man die ermittelten Werte der Abklingdauer τ nicht als exakt hinnehmen, da zum einen der Fit je nach Probenlösung weniger gut passt und zum anderen der Fehler

doch recht groß ist. Trotzdem lässt sich eine Tendenz erkennen. Die Abbildungen sind der Reihe nach von Methanol bis hin zu Decanol eingefügt, sodass die Viskosität von Probe zu Probe größer wird (siehe auch Tabelle 1). Man erkennt, dass die Abklingdauer τ mit steigender Viskosität anwächst (mit Ausnahme von Ethanol, aber hier gilt auch dass der Wert mit Fehlerangabe ± 20 ps in die Reihe passt).

Zum Vergleich mit den von Matlab errechneten Werten für τ wurde weiterhin ein exponentieller Fit mit Origin durchgeführt, ohne Entfaltung mit der Apparatefunktion. Dies ist beispielhaft für Ethanol in Abbildung 15 gezeigt. Hierbei wurden alle Messwerte bis zum



Abbildung 15: Abklingkurve mit exponentiellem Fit für Oxazin-1 in Ethanol

Abfall der Kurve maskiert (rot). Dies lieferte einen Wert für τ (t1 in der Abbildung) mit $\tau = (1107 \pm 4)$ ps. Der Wert ist also um über 200 ps größer als mit dem Matlab Programm "TCSPC". Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Apparatefunktion jetzt nicht mehr mit eingerechnet wurde. Trotzdem zeigt sich auch hier die gleiche Tendenz bei den Werten für τ : Je größer der Wert für die Viskosität, desto größer ist die Abklingdauer τ . Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Graphen sind im Anhang zu sehen. Nach [4] gilt nun folgender Zusammenhang:

$$\tau = C \cdot (\frac{\eta}{T})^{\beta} \tag{8}$$

Lösungsmittel	Viskosität $\eta\ /{\rm mPas}$	τ/ps (Origin)	$\tau/\mathrm{ps}\ (\mathrm{TPSPC})$
Methanol	0,544	1100	717
Ethanol	1,074	1107	770
Propanol	1,945	1300	756
Butanol	2,544	1344	801
Hexanol	4,578	1736	1218
Decanol	10,91	1969	1312

Tabelle 3: Zusammenfassung der Messwerte zur Bestimmung der Abklingdauer

Also erhält man durch logarithmieren folgenden Zusammanehang:

$$ln(\tau) = \tilde{C} + \beta \cdot ln(\frac{\eta}{T}) \tag{9}$$

Diesen Zusammenhang galt es nun zu bestätigen. Dafür wurde τ über $\frac{\eta}{T}$ doppelt-logarithmisch aufgetragen und eine linearer Fit durchgeführt (siehe Abbildung 16).

Es ergab sich für β ein Wert von (0.22\pm0.03) und C=(4130.08\pm606.99). Der Fit bestätigt



Abbildung 16: Linearer Fit für die Abklingdauer τ in Abhängigkeit der Viskosität pro Temperatur $(\frac{\eta}{T})$ in doppelt-logarithmischer Darstellung

Gleichung 9 jedoch nur halbwegs gut. Die Punkte liegen meistens nebem dem Fit. Jedoch gilt auch hier, dass die Fehlerbalken durch apparative Einflüsse, statistisches Rauschen etc. viel größer sein müssten, als durch den Standardfehler angenommen.

3.2. Fluoreszenzanisotropie

3.2.1. Theorie

In diesem Versuchsteil wird die Probe ausschließlich mit linear polarisiertem Licht angeregt. Das heißt, es werden hauptsächlich die Moleküle angeregt, deren Dipolvektor parallel zum Feldvektor \vec{E} des Laserlichts ist. Der Feldvektor vom Fluoreszenzlicht steht auch parallel zum Dipolvektor des angeregten Moleküls, sodass es eine Anisotropie zwischen dem absorbierten und dem emitierten Licht gibt. Der Effekt der Anisotropie nimmt aber mit zunehmender Zeit, die das Maolekül im angeregten Zusantand ist, ab. Das liegt an der Brownschen Molekularbewegung die für eine Rotation des Moleküls sorgt. Ein zweiter Effekt ist der Energietransfer von benachbarten Oxazinmolekülen, da ein Molekül im angeregten Zustand seine Energie auf ein anderes Molekül übertragen kann, wobei die Richtung der Dipolvektoren keine Rolle spielt. Dadurch entsteht eine zufällige Verteilung der Feldvektoren der Emissionsstrahlung. Durch Verdünnung der Lösung kann dieser Effekt aber so klein gehalten werden, dass er vernachlässigbar ist.

3.2.2. Versuchsaufbau

In diesem Abschnitt wird die Rotation eines Moleküls gemessen während es im angeregten Zustand ist. Die Rotation entsteht durch die brownsche Molekularbewegung. In den Versuchsaufbau werden dafür noch zwei Polarisationsfilter eingefügt. Der eine wird in den Strahlengang zwischen Laser und Probe und der andere in den Strahlengang zwischen Probe und Photomultiplier gebracht. Schematisch ist der Aufbau in 17 zu sehen. Der erste Polarisationsfilter sorgt dafür, dass das Licht linear polarisiert ist (Polarisator). In der Probe werden nun die meisten Moleküle angeregt, deren Dipolmoment parallel zur Polarisationsrichtung des Lichts ist. Am zweiten Polarisationsfilter wird ein Winkel relativ zum ersten Polarisationsfilter eingestellt, der fast nur das Licht durchlässt, das von Molekülen emitiert wurde, die sich während der Abklingzeit um den gleichen Winkel gedreht haben (Analysator).

3.2.3. Messung der Winkelabhängigkeit der Intensität

Zunächst soll die Intensität in Abhängigkeit vom Winkel gemessen werden. Dafür wird der Polarisationsfilter hinter der Probe in 5°-Schritten von 0° auf 180° erhöht und die jeweilige Anzahl der mit dem angeschlossenen Zähler detektierten Photonen, die ein Maß für die Intensität sind, aufgeschrieben. Die Messung wurde für die Proben, Methanol, Hexanol und Decanol durchgeführt. In Abbildung 18 sind die normierten Ergebnisse dargestellt,



Abbildung 17: Versuchsaufbau für polarisationsabhängige Messungen

Lösungsmittel	Verhältnis max/min	Verhältnis max/mag
Methanol	1,7	1,2
Hexanol	2,5	1,5
Decanol	3,3	1,7

Tabelle 4: Verhältnisse, bestimmt durch Counts, beim jeweiligen Winkel

wobei auf Fehlerbalken der Übersicht halber verzichtet wurde. Die Ungenauigkeit bei der Einstellung des Winkels beträgt 0.5° und die Anzahl der Counts schwankte bei Werten von 12000 um 300, was einen prozentualen Fehler von 2,5% entspricht. Es ist zu erkennen, dass die Anisotropie mit steigender Viskosität zunimmt, was auch den Erwartungen entspricht, denn je viskoser die Lösung, desto langsamer können sich die Moleküle drehen. Des Weiteren ist zu sehen, dass das Maximum nicht bei 0° liegt, wo es zu vermuten ist sondern bei 20°. Das Minimum liegt dementsprechnd bei 110°. Daraus lässt sich schließen, dass die beiden Polarisationsfilter bei einer Einstellung von 20° parallel waren.

Die Verhältnisse zwischen der Intensität im Maximum und im Minimum, bzw. zwischen der Intensität im Maximum und dem magischen Winkel (mag) wurden durch die Werte, die beim jeweiligen Winkel gemessen wurden, berechnet und sind in Tabelle 4 zu sehen.

Aus den Abbildungen 19,20 und 21 kann man entnehmen, dass die Flächen unter den Kurven im Maximum größer sind als beim magischen Winkel und diese wiederrum größer



Abbildung 18: Polarplot der Anisotropie für die Alkohole Methanol, Hexanol und Decanol

sind als die beim Minimum. Die Verhältnisse, die aus den Werten des Polarplots ermittelt wurden müssten mit den Verhältnissen der Größe der Flächen übereinstimmen. In Tabelle 5 sind die Werte für die Verhältnisse zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Werte bis auf den einen Wert für Decanol sehr ähnlich zu den davor ermittelten Werten in Tabelle 4 sind.

Lösungsmittel	Verhältnis max/min	Verhältnis max/mag
Methanol	1,5	1,4
Hexanol	2,3	1,5
Decanol	2,6	1,8

Tabelle 5: Verhältnisse, bestimmt durch Flächen unter den Zerfallskurven



Abbildung 19: Zerfallskurven für den magischen Winkel und die Winkel vom Maximum und vom Minimum für Methanol



Abbildung 20: Zerfallskurven für den magischen Winkel und die Winkel vom Maximum und vom Minimum für Hexanol



Abbildung 21: Zerfallskurven für den magischen Winkel und die Winkel vom Maximum und vom Minimum für Decanol

3.2.4. Theorie zur Bestimmung der Rotationskorrelationszeit

Die Anisotropie r wird mathematisch durch Gleichung 10 beschrieben, wobei $I_{\parallel}(t) + 2I_{\perp}(t) = I_{ges}(t)$ jederzeit gilt.

$$r(t) = r_0 e^{-\frac{t}{\tau_{\phi}}} = \frac{I_{\parallel}(t) - I_{\perp}(t)}{I_{\parallel}(t) + 2I_{\perp}(t)}$$
(10)

Beim Übergang vom Grundzustand in einen Anregungszustand ändern sich die Elektronendichteverteilungen, wodurch Absorptions- und Emissionsdipol oft unterschiedlich orientiert sind. Die Anisotropie hängt, wie in Gleichung 11 beschrieben, vom Winkel β zwischen Absorptions- und Emissionsdipol ab.

$$r_0 = \frac{2}{5} \frac{3\cos^2(\beta) - 1}{2} \tag{11}$$

Die Anisotropie wird maximal für $\beta = 0$.

Zur Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der Gesamtintensität stören Effekte wie Anisotropien oder Depolarisation. Eliminieren kann man die Effekte durch die Einstellung des magischen Winkels, da dann die parallele und die senkrechte Intensität gleich gewichtet werden. Dreht man den Polarisationsfilter hinter der Probe um $\alpha_{mag} = 54.7^{\circ}$ aus der Richtung mit maximaler Intensität (I_{\parallel}) heraus, so trägt die parallele Polarisationsrichtung $\frac{1}{3} = \cos^2(54,7^\circ)$ und die senkrechte Polarisationsrichtung $\frac{2}{3} = \sin^2(54,7^\circ)$ bei, so dass I_{\parallel} und I_{\perp} im Verhältnis 1:2 gewichtet sind. Dies entspricht $\frac{1}{3}$ der Gesamtintensität und ist zeitlich unabhängig. Für die Intesität beim magischen Winkel erhält man somit Gleichung 12.

$$I_{mag} = \frac{1}{3}(I_{\parallel} + 2I_{\perp}) \tag{12}$$

Mit Gleichung 10 erhält man dann Gleichung 13

$$I_{mag} = \frac{1}{3}e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{13}$$

Mit der mittleren Anisotropie $r = \frac{\int_0^{\infty} I(t)r(t) dt}{\int_0^{\infty} I(t) dt}$ und Gleichung 10 erhält man die Perrin-Gleichung für die Statische Fluoreszenzanisotropie (Gl.14).

$$\frac{r_0}{r} = 1 + \frac{\tau}{\tau_\phi} \tag{14}$$

3.2.5. Messung der Rotationskorrelationszeit

Zur Bestimmung der Rotationskorrelationszeit wurden für die Proben Methanol, Hexanol und Decanol die Zerfallskurven für die im Versuch über die "Messung der Winkelabhängigkeit der Intensität" ermittelten Winkel, für das Maximum, das Minimum sowie des magischen Winkels, aufgenommen. Mit Gleichung 10 wurde der zeitliche Verlauf der Anisotropie ausgerechnet. Dieser ist in Abbildung 22 dargestellt, wobei nur ein Zeitausschnitt genommen wurde, da der Rest von großem Rauschen überdeckt war. Auffällig ist die Kurve für Methanol, da bei ihr kein Abfall zu erkennen ist. Legt man einen exponentiellen Fit nach Gleichung 10 durch die Kurven erhält man Werte für die Rotationskorrelationszeit. Die Fits sind in Abbildung 23 zu sehen.

Aus den Fits ergaben sich folgende Werte für Gleichung 10.

 $r_{Methanol} = (76\,639, 7 \pm 47\,304, 4)e^{-\frac{t}{(100\pm10)\,\mathrm{ps}}}$

 $r_{Hexanol} = (1,61 \pm 0,03)e^{-\frac{t}{(1289 \pm 32)\,\mathrm{ps}}}$

 $r_{Decanol} = (1.14 \pm 0.01)e^{-\frac{t}{(2711 \pm 100)\,\mathrm{ps}}}$

Die Werte für die Rotationskorrelationszeit sind nochmal in Tabelle 6 dargestellt. Sie zeigen wie schon Abbildung 22, dass die Messung für Methanol sehr fehlerhaft war. Trotzdem kann man einen Anstieg der Rotationskorrelationszeit bei steigender Viskosität erkennen. Das war auch zu erwarten, da die Moleküle sich bei größerer Viskosität langsamer aus ihrer ursprünglichen Positoin herausdrehen, so dass eine zeitlich längere Korrelation zwischen



Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf der Anisotropie



Abbildung 23: Fit über den zeitlichen Verlauf der Anisotropie für Methanol, Hexanol und Decanol

den Feldvektoren von Absorbtions- und Emissionslicht besteht.

Lösungsmittel	$\tau_{\phi} \ / \ \mathrm{ps}$	$\Delta \tau_{\phi} / \mathrm{ps}$
Methanol	100	10
Hexanol	1289	32
Decanol	2711	100

Tabelle 6: Rotationskorrelationszeiten für Methanol, Hexanol und Decanol

3.2.6. Berechnung der Anisotropie

Die Anisotropie wird mit der Perrin-Gleichung berechnet. Dafür werden die Werte für τ benötigt, die sich durch Fits nach Gleichung 13, für die Zerfallskurven der Proben beim magischen Winkel, bestimmen lassen. Die Fits sind in Abbildung 24 zu sehen. Es ist zu sehen, dass die Fits deutlich dichter an den Kurven liegen, als das in Abbildung 23 zu sehen war. Aus den Fits ergeben sich folgende Werte für Gleichung 13.



Abbildung 24: Fit über die Zerfallskurve beim magischen Winkel für Methanol, Hexanol und Decanol

$$\begin{split} I_{Methanol} &= (704\,370 \pm 9423) \,\mathrm{Ve}^{-\frac{t}{(545 \pm 2)\,\mathrm{ps}}} \\ I_{Methanol} &= (460\,565 \pm 3135) \,\mathrm{Ve}^{-\frac{t}{(813 \pm 2)\,\mathrm{ps}}} \\ I_{Methanol} &= (218\,808 \pm 1419) \,\mathrm{Ve}^{-\frac{t}{(963 \pm 2)\,\mathrm{ps}}} \\ \text{Stellt man die Gleichung 14 nach } r \,\mathrm{um}, \,\mathrm{so \ erhält \ man \ Gleichung 15.} \end{split}$$

$$r = \frac{r_0}{1 + \frac{\tau}{\tau_{\phi}}} \tag{15}$$

Lösungsmittel	$r \ / \ ps$	$\Delta r / \mathrm{ps}$
Methanol	11882	8375
Hexanol	0,99	0,03
Decanol	0,84	0,02

Tabelle 7: Anisotropie für Methanol, Hexanol und Decanol

Die maximal Abweichung von der Anisotropie Δr wird mit Gleichung

$$\Delta r = \left|\frac{1}{1 + \frac{\tau}{\tau_{\phi}}}\right| \Delta r_0 + \left|-\frac{r}{(1 + \frac{\tau}{\tau_{\phi}})^2 \tau_{\phi}}\right| \Delta \tau + \left|\frac{r\tau}{(\tau_{\phi} + \tau)^2}\right| \Delta \tau_{\phi}$$
(16)

Setzt man die Werte von r_0 , τ_{ϕ} und τ in Gleichung 14, sowie deren Fehler in Gleichung 16 ein, so erhält man die Werte die in Tabelle 7 zu sehen sind. Auch hier sieht man, dass die Messung für Methanol falsche Ergebnisse geliefert hat. Aus den beiden anderen Messungen kann man keine Tendenz erkennen.

4. Fazit

Fasst man die Versuchsergebnisse zusammen, so ist zu erkennen, dass Eingeschaften, wie die Kettenlänge und die Viskosität, Einflüsse auf die Lumineszenseigenschaften eines Laserfarbstoffs haben. So hat sich gezeigt dass bei größerer Viskosität der Probenlösung, sowohl die Intensität der Emission wie auch die Abklingdauer größer wird. Auch die Quantenausbeute nahm mit steigender Viskosität zu. Ereignisse wie Solvatochromatie und Stokes-Shift waren in den Versuchen auch gut zu erkennen. Da beim Versuch der Fluoreszenzanisotropie nur noch drei Proben verwendet wurden und die Messung für Methanol sehr fehlerhaft war, ließen sich aus den Versuchsteilen keine weiteren Tendenzen erkennen.

A. Anhang



Abbildung 25: Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Methanol



Abbildung 26: Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Ethanol



Abbildung 27: Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Propanol



Abbildung 28: Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Buthanol



Abbildung 29: Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Hexanol



Abbildung 30: Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Decanol



Abbildung 31: Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Methanol (Origin)



Abbildung 32: Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Propanol (Origin)



Abbildung 33: Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Buthanol (Origin)



Abbildung 34: Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Hexanol (Origin)



Abbildung 35: Abklingkurve und exponentieller Fit von Oxazine-1 in Decanol (Origin)

Literatur

- [1] http://www.wolframalpha.com/input/?i=oxazine-1. [Online; Stand 14. Dezember 2010].
- [2] J. Bülle and A. Hüttermann. Das Basiswissen der organischen Chemie: Die wichtigsten organischen Reaktionen im Labor und in der Natur. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2000.
- [3] Ulrich Brackmann. Lambdachrome Laser Dyes, Data Sheets 2nd revised Edition. Lambda Physik GnbH, 1994.
- [4] Sarah Falke. Studienarbeit: Viskosit¨ats- und Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenz-Abklingdauer von Oxazin-1-Lösungen. http://physikpraktika. uni-oldenburg.de/download/FPR/Anleitungen/FPRB/Ultraschnelle_ Photolumineszenz/Studienarbeit_Falke_Fluoreszenz-Abklingdauer.pdf, Universität Oldenburg, Mai 2005.
- [5] David R. Lide (Editor in chief). CRC Handbook of chemistry and physics 85th Edition. CRC Press, 2004-2005.
- [6] Jens Kruse. Curcumin und synthetische Derivate als umgebungssensitive Fluoreszenzsonden, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel 2003.
- [7] Scott Prahl. Oxazine-1. http://omlc.ogi.edu/spectra/PhotochemCAD/html/ oxazine-1.html.