

## UNTERSUCHUNGEN VON FLUORESCENZFARBSTOFF- EIGENSCHAFTEN BEI HOHEN DRÜCKEN UND TEMPERATUREN

### INVESTIGATIONS CONCERNING PROPERTIES OF FLUORESCENT DYES UNDER HIGH PRESSURE AND TEMPERATURE CONDITIONS

**Mario Kuschewski, Rudi Kulenovic, Eckart Laurien**

Institut für Kernenergetik und Energiesysteme, Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart

Laser-Induzierten-Fluoreszenz, LIF, Farbstoffe, Druckbehälter, Alterung, Spektrometer  
Laser-induced-Fluorescence, dyes, ageing, pressure-vessel, experiments, spectrometer

#### Zusammenfassung

Für die Untersuchung von wasserlöslichen organischen Farbstoffverbindungen unter maximalen Temperaturen von  $285^{\circ}\text{C}$  und Drücken von bis zu  $75\text{ bar}$  wurde ein optisch zugänglicher Druckbehälter konzipiert und gebaut. Dieser verfügt über einen optischen Einbau, der es ermöglicht, Farbstoffe in einer Küvette mittels Laserlichts zur Fluoreszenz anzuregen. Der Druckbehälter als Teil eines optischen Aufbaus ermöglicht die Untersuchung der alterungsbedingten Veränderungen der Farbstoffe. Es wurde hierbei beobachtet, dass die untersuchten Farbstoffe Rhodamin 101, Rhodamin B, Sulforhodamin B, Pyridin 1 und Rhodamin 6G unterschiedlich stark auf die thermische Beanspruchung reagieren. Aufgrund von Dissoziation wird die effektive Farbstoffkonzentration und entsprechend die Fluoreszenzintensität reduziert. Die Fluoreszenzlöschung läuft bei den betrachteten Farbstoffen unterschiedlich ab. Rhodamin 101 und insbesondere Rhodamin 6G erweisen sich als temperaturstabil. Der stark nichtlinear ablaufende Alterungsprozess führt frühzeitig zu einem Ausbleichen der Farbstoffe bis zu einem Alterungsmaximum, bei der sich trotz weiterer thermischer Beanspruchung die Farbstoffeigenschaften nicht mehr verändern. Neben der Reduktion der Gesamtemission ändert sich auch die elektronische Struktur der Substanzen, was zu einer Farbänderung führt.

#### Einleitung

Farbstoffe, welche mittels Laser zur Fluoreszenz angeregt werden können, werden für laser-optische Messverfahren in der Strömungsmechanik vermehrt eingesetzt. Sie ermöglichen unter anderem die Vermessung von punktuellen, flächigen oder räumlichen Verteilungen von Mischungsbrüchen, Temperaturen, Reaktionsprodukten, Geschwindigkeiten und Drücken. Die zugrundeliegenden Verfahren basieren auf der Fluoreszenz der eingesetzten Farbstoffe und deren Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen (vgl. Inman et al. 2009 und Coppeta et al. 1998).

Für die Untersuchung von Wasserkreisläufen im industriellen Maßstab müssen Farbstoffe ausgewählt werden, welche in genügender Menge mit gleichbleibenden physikalischen und chemischen Eigenschaften zur Verfügung stehen und hinreichende Wasserlöslichkeit besitzen. Viele Eigenschaften der betreffenden Farbstoffe, wie die wellenlängenabhängige Fluoreszenzemission, sind nur für Lösungen in Alkoholen oder für atmosphärischen Druck und Temperaturen um  $20^{\circ}\text{C}$  dokumentiert (vgl. Crimaldi 2008). Es ist bekannt, dass in Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen, Temperaturen, Drücken, Laserleistung, chemische

Eigenschaften des Lösungsmittels, etc., die Fluoreszenzeigenschaften der Farbstoffe über der Versuchszeit abnehmen. Dies wird als Alterung des Farbstoffs bezeichnet.

### Experimentelle Anlage und Versuchsaufbau

Für die experimentellen Untersuchungen der Alterungsphänomene von organischen Farbstoffverbindungen in wässrigen Lösungen bei unterschiedlichen Drücken und Temperaturen wurde ein Versuchsaufbau bestehend aus einem beheizbaren, optisch zugänglichen Druckbehälter und einem optischen Aufbau konzipiert.

Der optisch zugängliche Druckbehälter (Abbildung 1) ermöglicht die Untersuchung der Fluoreszenz von Farbstoffproben bei maximalen Temperaturen von  $285^{\circ}\text{C}$  und Drücken von bis zu  $75\text{bar}$ . Der Farbstoff wird in eine Fluoreszenzküvette gefüllt und im Druckbehälter mittels eines Küvettenhalters (Abbildung 2) in einem Wasserbad positioniert. Der Behälter ist beheizbar, wodurch die Temperatur des Wassers und der wässrigen Farbstofflösung eingestellt werden kann. Alle Komponenten des Druckbehälters sind für maximale Einsatztemperaturen bis  $300^{\circ}\text{C}$  ausgelegt.

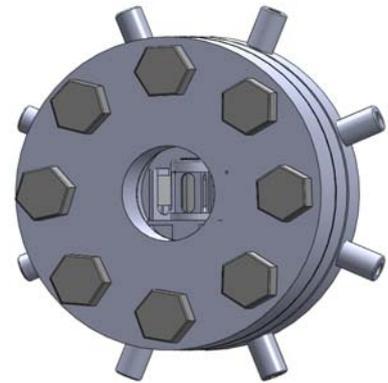


Abbildung 1: Druckbehälter



Abbildung 2: Küvetteneinbau

Der Küvetteneinbau für den Druckbehälter besteht aus einer Edelstahlbasis, auf der der Küvettenhalter zusammen mit zwei Spiegelhaltern montiert ist. Die Spiegel stehen in einer  $45^{\circ}$  Anordnung zur Küvette, so dass der Laserstrahl in  $90^{\circ}$  Winkeln durch die Testzelle geführt wird. Die  $90^{\circ}$  Strahlführung minimiert den Einfluss der unterschiedlichen Brechungsindizes von Glas, Wasser, Farbstoff und Luft. Alle tragenden Einbauteile sind antirefektiv beschichtet. Das Befüllen des Behälters mit demineralisiertem Wasser und die Befüllung der Küvette erfolgt über Druckverschraubungen. Darüber hinaus sind weitere Armaturen für die Druckmessung und den Überdruckabbau vorgesehen. Die Temperatur wird mittels eines PT100-Widerstandsthermometers, welches in die Farbstoffküvette geführt ist, gemessen.

Der Küvettenhalter ist Teil eines optischen Aufbaus (Abbildung (3)), in dem der Farbstoff mit einem Dauerstrichlaser ( $532\text{nm}$ ) angeregt und die Farbstoffemission mittels eines Spektrometers analysiert wird. Der Laserstrahl (1) wird hierzu mit einer Spiegelanordnung (2) parallel zur optischen Achse der Fasereinkopplung des Spektrometers geführt und trifft im Druckbehälter auf die  $45^{\circ}$  Umlenkspiegel (3), welche den Strahl durch die Farbstoffküvette führen. Die Lichtemission der Farbstoffprobe wird mit einer Kollimatorlinse (4) in die Glasfaser (5) des Spektrometers (6) eingekoppelt. Vor der Fasereinkopplung ist ein Bandpassfilter (7) installiert, dessen Transmission für Wellenlängen zwischen  $536\text{nm}$  und  $750\text{nm}$  über  $85\%$  liegt. Die Transmission der Laserlichtwellenlänge wird blockiert, und das Fluoreszenzsignal mit Wellenlängen bis  $830\text{nm}$  wird zum Spektrometer geführt.

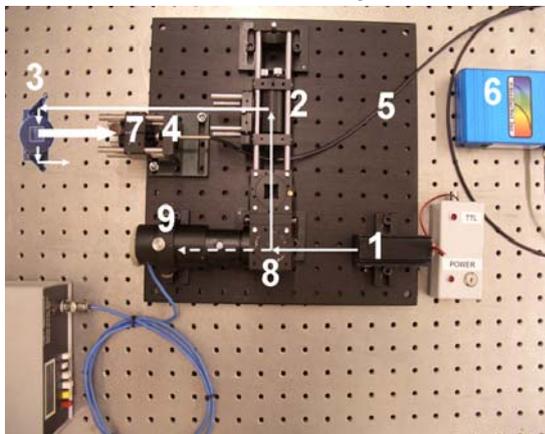


Abbildung 3: Optischer Aufbau

Da sich die Laserleistung während der mehrstündigen Versuche zeitabhängig verändern kann, muss diese ebenfalls gemessen werden. Im optischen Aufbau wird hierfür ein dichroitischer Spiegel (8) zur Auskopplung des Laserlichts für die Leistungsmessung verwendet. Unter Ausnutzung der Stopp-band-Transmission wird ein Auskopplungsverhältnis von  $1 : 2000$  realisiert. Hierdurch wird nur ein Minimum an Laserlicht aus dem Hauptstrahlengang entnommen.

Die Leistungsbestimmung erfolgt anhand einer Photodiode (9), die das ausgekoppelte und mit einem Kerb-Anregungsfilter monochromatisierte Licht empfängt. Die verbleibende Laserleistungsdichte liegt immer noch oberhalb der Zerstörungsschwelle der Photodiode und muss deshalb mittels einer plan-konkaven Linse aufgeweitet werden.

## Messtechnik

Zum Einsatz kommt ein diodengepumpter OEM Festkörperlaser (DPSS) mit Frequenzverdopplung. Er emittiert kontinuierlich Licht mit einer zentralen Wellenlänge von  $532\text{ nm}$  und einer durchschnittlichen Leistung von  $57\text{ mW}$ . Beim Spektrometer handelt es sich um ein BlueWave-VIS Faserspektrometer von StellarNet Inc. mit einem 2048 Pixel CCD-Zeilensensor. Es wurde mit einem  $100\text{ }\mu\text{m}$  Spalt ausgestattet und verfügt über ein Beugungsgitter mit Gitterabstand  $1/600\text{ mm}$ . In dieser Konfiguration steht eine spektrale Auflösung von  $0.4\text{ nm}$  zur Verfügung. Das Fluoreszenzlicht wird mittels Glasfaserverbindung (F600-VIS/NIR-Faser) zum Spektrometer geführt. Dies beschränkt den detektierbaren Wellenlängenbereich auf  $400\text{ nm} - 1150\text{ nm}$ . Die Kontrolle der Leistungsmessung erfolgt mit dem thermoelektrischen Messkopf XLP12-3S-H2 von Gentec. Die Photodiode Model 818-UV von Newport ist an den Messwertumformer 815 angeschlossen. Bei den eingesetzten Filtern handelt es sich um OEM-Produkte von Omega Optical. Der Kerbfilter, Model 527DF19, hat eine Resonanzwellenlänge von  $527\text{ nm}$  und besitzt bei  $532\text{ nm}$  eine Transmission von ca. 67%. Als Auskopplungsspiegel wird das Model 560DRLP und als Emissionsbandpass das Model 539LP eingesetzt. Ihre Transmissionskurven sind in Abbildung (4) dargestellt.

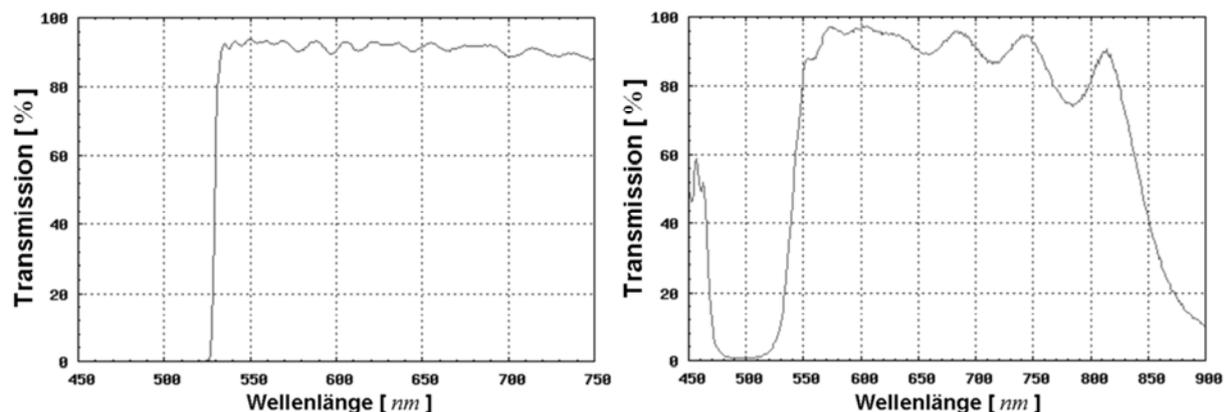


Abbildung 4: Transmissionskurven des Auskopplungsspiegels bei einem Einstrahlwinkel von  $45^\circ$  (rechts) und des Emissionsbandpasses (links)

## Alterungsmechanismen

Die Fluoreszenzintensität der Farbstoffe ist für geringe eingestrahlte Intensitäten proportional zur Intensität der Anregung (vgl. Otter 1993) und demnach nach Rost 1995 und Walker 1985 beschrieben durch:

$$I_F = I_0 c \Phi(T) \varepsilon \quad (1)$$

Hierin ist  $I_F$  die Fluoreszenzintensität, welche von der Anregungsintensität  $I_0$ , der Konzentration  $c$  des Farbstoffs, der Quanteneffizienz  $\Phi$  und der Absorption  $\varepsilon$  abhängt. Die Quanteneffizienz und die Absorption sind farbstoff- und temperaturabhängig. Der dominierende Faktor für die Fluoreszenzintensität ist hierbei die Quanteneffizienz.

Neben der Temperatur gibt es weitere Einflussfaktoren, die insbesondere bei lang andauernden Versuchen Einfluss gewinnen. Dies sind i. E. der pH-Wert des Lösungsmittels, die Dauer der Anregung, die Dauer der thermischen Beaufschlagung sowie der Druck. Letzterer ist für flüssige Farbstoffmischungen nur unzureichend dokumentiert.

Es ist bekannt, dass Farbstoffe aus verschiedensten Gründen dissoziieren können. Durch sehr hohe Anregungsintensitäten werden chemische Bindungen im Farbstoff aufgebrochen und der Farbstoff wird für Fluoreszenzanwendungen unbrauchbar. Dieser Alterungsmechanismus wird auch als Foto-Bleiche (engl. photobleaching) bezeichnet und kann durch eine hinreichend kleine Lichtintensität vermieden werden. Der pH-Wert ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Lösungszusätze, z. B.  $\text{CO}_2$ , haben einen direkten Einfluss, und so ist der pH-Wert des Lösungsmittels, z. B. des Wassers, von der Temperatur abhängig. Ist Sauerstoff im Lösungsmittel gelöst, ist es dem Farbstoff im angeregten Zustand möglich, mit diesem zu interagieren. Führt dies zur Bildung von Explexen, wird die Fluoreszenz unterdrückt, da die Explexbildung auf kürzeren Zeitskalen als die Fluoreszenz abläuft (Schorr 2003).

Die Alterungsmechanismen sind nicht auf eine bestimmte Phase des Farbstoffs beschränkt. Im festen Zustand müssen einige Farbstoffe deshalb gekühlt gelagert werden, um Farbstoffveränderungen zu verlangsamen. Die Hersteller weisen zumeist Zeiträume von einigen Monaten aus, in denen die Farbstoffe eingesetzt werden sollten. Liegt ein Farbstoff in Lösungsmitteln (z. B. Wasser oder Alkoholen) gelöst vor, verändern sich die Fluoreszenzeigenschaften des Gemisches innerhalb relativ kurzer Zeiträume. Hierfür sind Agglomerationsmechanismen verantwortlich. Die Fluoreszenzlöschung durch Agglomeration oder Explexbildung sowie die Dissoziation der Moleküle haben eine vergleichbare Wirkung. Die Anzahl der fluoreszierenden Farbstoffmoleküle pro Volumeneinheit und die durchschnittliche Anzahl der emittierten Lichtquanten pro Molekül wird kleiner. Nach Gleichung (1) ist damit der Einfluss der Alterung ersichtlich. Die Fluoreszenz wird bei gleichen Bedingungen (Temperatur, Druck, Anregungsintensität) geringer sein bzw. sich unter- oder überproportional verändern.

## Diskussion der Experimente

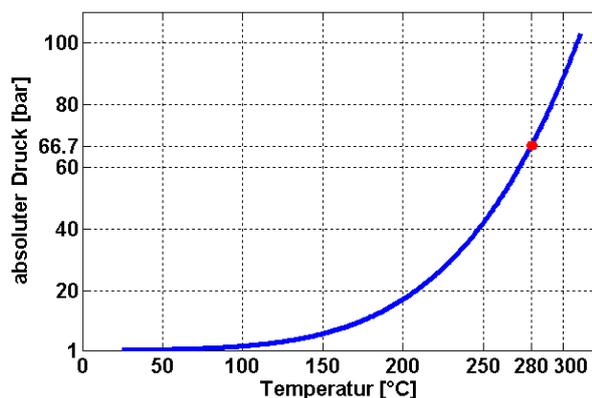


Abbildung 5: Druck/Temperaturbeziehung für isochore Siedevorgänge im Druckbehälter

Im beschriebenen Druckbehälter wird Wasser isochor erwärmt. Durch das Verdampfen von Flüssigkeit sowie die Erhöhung des spezifischen Volumens des Wassers wird der Druck mit steigender Temperatur höher. In Abbildung (5) ist dieser Zusammenhang dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich der Druck bei Temperaturen unter  $50^\circ\text{C}$  nur gering ändert und sich bei  $280^\circ\text{C}$  ein Wert von  $66,7\text{ bar}$  einstellt. Die Erwärmung des Druckbehälters von  $20^\circ\text{C}$  auf  $280^\circ\text{C}$  lässt den Druck kontinuierlich von  $1\text{ bar}$  auf  $66,7\text{ bar}$  ansteigen. Aufgrund der zu erwärmenden thermischen Masse des Behälters bedarf es hierfür circa drei Stunden.

In Tabelle (1) sind Ergebnisse von Farbstoffen aufgeführt, die im Rahmen von Voruntersuchungen thermisch beaufschlagt wurden. Bei allen Messungen wurde der Druckbehälter nach Erreichen des maximalen Drucks wieder abgekühlt. Die Dauer der thermischen Beaufschlagung wird in  $Kh$  angegeben. So hat ein Farbstoff der eine Stunde bei konstanten  $100^\circ\text{C}$  im Druckbehälter verblieben ist,  $(100 + 273,15\text{ K}) \cdot 1\text{ h} = 373,15\text{ Kh}$  thermische Beaufschlagung erfahren. Für die Experimente ergibt sich dies aus der Integration der Temperaturkurve über die Zeit. Diese proportionale Beziehung von Temperatur und Zeit wird verwendet, um die vorliegenden Messungen direkt miteinander vergleichen zu können. Alternativ müsste für jeden Farbstoff eine kritische Temperatur identifiziert werden, ab welcher eine Alterung eintritt und darüber hinaus weitere Temperaturstufen identifiziert sein, für welche unterschiedliche Gewichtungsfaktoren gelten, mit denen eine beschleunigte Alterung des Farbstoffs berücksichtigt werden kann.

Aus der Solvatochromie ist bekannt, dass das Emissionsspektrum der Farbstofflösungen stark vom Lösungsmittel und der Laserleistung abhängig ist. Das Emissionsmaximum verschiebt sich bei Wasser im Vergleich zu Alkoholen. Aus diesem Grund wurde für die vorliegenden Messungen durchgängig demineralisiertes Wasser als Lösungsmittel verwendet. Die

Fluoreszenzaktivität der Farbstoffe bei Raumtemperatur 25 °C vor und nach den Tests wurde mittels des Spektrometers erfasst. Die Emission wurde als Integral der spektralen Emissionsdichte zwischen 536 nm und 1150 nm berechnet.

Tabelle 1: Übersicht einiger getesteter Farbstoffe und deren alterungsbedingte Emissionsänderung

Farbstoff	CAS	Thermische Beaufschlagung [Kh]	Emissionsänderung (25 °C ,1013,25 mbar) [%]
Rhodamin 101	64339-18-0	1250	-57,59
Rhodamin 101	64339-18-0	2500	-58,74
Rhodamin B	81-88-9	1250	-96,2
Rhodamin B	81-88-9	2500	-96,4
Sulforhodamin B	3734-67-6	1250	-94
Sulforhodamin B	3734-67-6	2500	-94
Sulforhodamin B	3734-67-6	3750	-94,5
Pyridin 1	110-86-1	1250	-84

Rhodamin 101 (640) reduziert mit fortschreitender thermischer Beaufschlagung seine Emission und erreicht nach 1250 Kh einen Wert von kleiner als fünfzig Prozent der Ausgangsemission. Die Emission von Rhodamin B (610) und Sulforhodamin B (Kiton Red) fällt nach der ersten Alterung bereits auf weniger als zehn Prozent der Ausgangsemission ab. Die genannten Farbstoffe wurden im Anschluss nochmals beaufschlagt, um zu überprüfen, ob ein weiterer Emissionsrückgang eintritt. Dies ist nicht der Fall. Die Farbstoffe erreichen ein Emissionsminimum, welches sich auch bei weiterer thermischer Beaufschlagung nicht mehr verändert. Für Pyridin 1 (LDS 698) liegt nur eine Messung vor, welche ein Emissionsrückgang von 84 % ausweist. Anhand vorliegender Datenbasis ist nicht nachzuweisen, ob dies bereits ein Alterungsmaximum für diesen Farbstoff darstellt. Ergänzend zu diesen Messungen wurde eine Küvette nur mit demineralisiertem Wasser vermessen, um ausschließen zu können, dass die bestimmte Restaktivität weder durch das Wasser noch durch den Aufbau verursacht wird. Es konnte keinerlei Signal oberhalb der Rauschgrenze des Spektrometers detektiert werden.

In der Literatur wird für Rhodamin 6G (CAS 989-38-8) eine thermische Zersetzung bei Temperaturen um 600 K angemerkt. Die thermische Alterung des Farbstoffs wurde in den Experimenten zur Überprüfung dieser Angabe stufenweise durchgeführt, um eine sukzessive Änderung der Fluoreszenzeigenschaften beobachten zu können. Die Emissionsänderung als Funktion der thermischen Beaufschlagung sowie die entsprechenden Spektren sind in Abbildung (6) dargestellt.

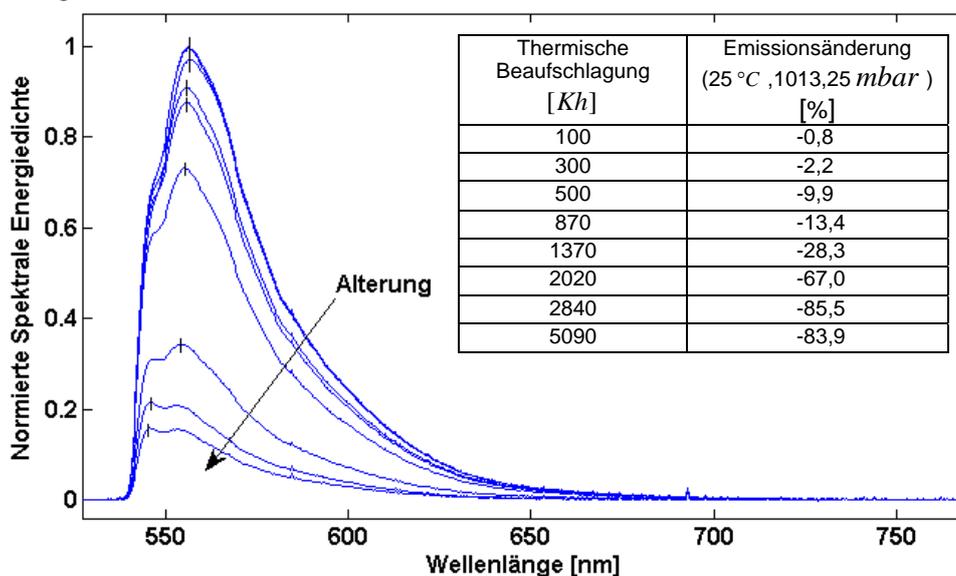


Abbildung 6: Alterung von Rhodamin 6G; Emissionsspektren bei den jeweiligen Alterungsstufen und Tabelle der Emissionsänderungen

Rhodamin 6G zeigt bei einer thermischen Beaufschlagung von 300 *Kh* eine erste, relativ kleine Emissionsreduktion von 2,2 % gegenüber dem Ausgangszustand. Über 500 *Kh* tritt eine überproportionale Signalreduktion auf. Wie bereits schon festgestellt, findet sich ein Alterungsmaximum, sodass sich die Emission nach 2800 *Kh* nicht mehr reduziert. Betrachtet man die Spektren, fällt neben der Signalreduktion auch die Formänderung des Emissionsspektrums auf. Grundlegend wird die Form durch den Emissionsbandfilter beeinflusst. Dieser blockiert die Lichtemission für Wellenlängen unterhalb von 536 *nm*. Die ersten beiden Spektren für  $\leq 300$  *Kh* entsprechen der aus der Literatur bekannten Emissionskurve mit einem Maximum bei circa 556,4 *nm*. Mit zunehmender Beaufschlagung verschiebt sich dieses Maximum zu kleinen Wellenlängen. Nach 2020 *Kh* liegt die Emissionsspitze bei 554,8 *nm* und für 2840 *Kh* liegt das Maximum bei 545,5 *nm*. Die elektronische Struktur des Farbstoffs hat sich offensichtlich stark verändert. Im Vergleich mit den Daten der anderen Farbstoffe ist Rhodamin 6G der alterungsbeständigste Farbstoff für die gegebenen Testbedingungen. Die bisherigen Darstellungen berücksichtigen die Temperaturabhängigkeit der Farbstoffemission nicht. Es ist anzunehmen, dass die Veränderung der elektronischen Struktur auch zur Veränderung der Temperatursensitivität führt. Für Rhodamin 6G wurde die Temperaturabhängigkeit für zwei unterschiedliche Alterungszustände erfasst. Die Emission wurde nach 100 *Kh* und 1725 *Kh* erfasst und vor Normierung auf den Emissionswert bei 35 °C um die temperaturabhängige Dichte des Wassers korrigiert. Die entsprechenden Kurven sind in Abbildung (7) zusammengefasst.

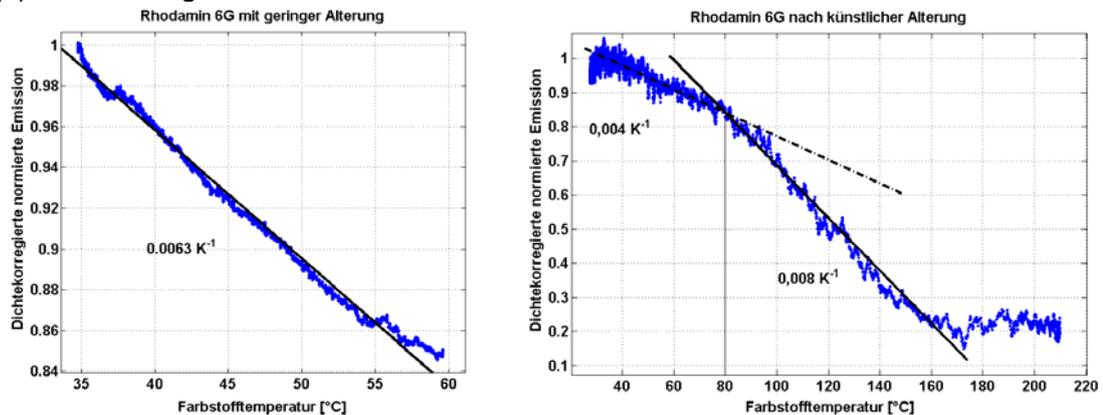


Abbildung 7: Temperaturabhängige Emission von Rhodamin 6G in Wasser nach einer thermischen Beaufschlagung von 100 *Kh* (links) und nach 1725 *Kh* (rechts)

Rhodamin 6G zeigt für die vermessenen Temperaturbereiche lineare Zusammenhänge zwischen Temperatur und Emission. Nach 100 *Kh* thermischer Beaufschlagung ändert sich die Emission zwischen 35 °C und 60 °C um circa  $0,0063 \text{ K}^{-1}$ . Die weitergehende Alterung des Farbstoffs ändert die Emission sowie die Temperatursensitivität. Zwischen 35 °C und 80 °C liegt eine Änderung von  $0,004 \text{ K}^{-1}$  vor, während im Temperaturintervall zwischen 80 °C und 160 °C ein Gradient von  $0,008 \text{ K}^{-1}$  zu finden ist. Oberhalb von 160 °C ändert sich die Emission nicht mehr eindeutig. Hätte sich die Temperatursensitivität des Farbstoffs nicht geändert, wäre eine maximale Temperaturdifferenz von  $1/0,0063 \text{ K}^{-1} \cong 159 \text{ K}$  bzw. eine Temperatur von  $159 \text{ K} + (273,15 \text{ K} + 35 \text{ K}) = 194 \text{ °C}$  detektiert worden. Ob die vorgestellten Unstetigkeiten bzw. nicht-linearen Verläufe eine eindeutige Temperaturabhängigkeit haben und deshalb diese Werte relativ nahe beieinander liegen muss in weiteren Untersuchungen festgestellt werden. Es ist insbesondere zu klären, wie sich die Sauerstoffkonzentration im Lösungsmittel, welche ja selbst temperaturabhängig ist, auf die Messergebnisse auswirkt und ob Gleichung (1) um eine weitere Abhängige erweitert werden muss. Die Grundlage für diese Beziehung ist eine hinreichend kleine Intensität der anregenden Lichtquelle. Ergänzend zu dieser gibt es eine weitere notwendige Bedingung für die Anwendung der laserinduzierten Fluoreszenzmesstechniken. Die sogenannte Kasha-Regel besagt, dass die Fluoreszenz

nicht von der Wellenlänge des angeregten Lichtes abhängt, vorausgesetzt, die Energie des eingestrahlt Lichtes ist hinreichend groß. Reicht die photonische Energie nicht aus, um alle in Strahlrichtung liegenden und vom Spektrometer berücksichtigten Moleküle gleichermaßen anzuregen, kann beobachtet werden, wie sich die Farbe in Abhängigkeit von der Konzentration des Farbstoffs ändert. Wird die Änderung der lokalen Konzentrationsänderung bei konstanten Temperaturen betrachtet, kann eine alterungsbedingte Farbänderung des Farbstoffs beobachtet werden. Für das entsprechende Experiment wurde eine Rhodamin 6G Lösung bereitgestellt, für welche die vorhandene Laserleistung im oberen Sinne nicht ausgereicht hat. Die Anfangskonzentration des Farbstoffs im Wasser betrug  $0,1 \text{ mol} / \text{m}^3$  bei  $20^\circ \text{C}$ . Der Farbstoff wurde durch thermische Beaufschlagung gealtert und sequentiell das Emissionsspektrum bei konstanter Temperatur aufgenommen. Das Ergebnis ist in Abbildung (8) dargestellt.

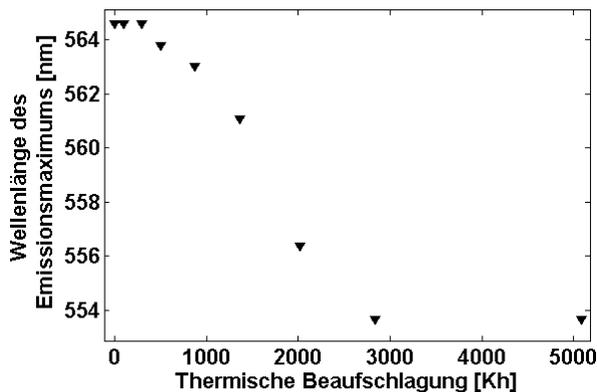


Abbildung 8: Alterungsbedingte Verschiebung des Emissionsmaximums von Rhodamin 6G

Farbänderung ändert sich aufgrund reduzierter Absorption von Fluoreszenzlicht auch die Gesamtintensität der Fluoreszenz im betrachteten Spektralbereich. Diese Änderung kann einige Größenordnungen betragen.

## Dankesworte

Dank gilt den Mitarbeitern des Karlsruhe-Institute of Technology (KIT) und der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit für die Projekträgerchaft sowie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMWF) für die Finanzierung dieser Arbeiten.

## Literatur

- Crimaldi, J.P., 2008: "Planar laser induced fluorescence in aqueous flows", Experiments in Fluids, 44, S. 851-863
- Coppeta, J., Rogers, C., 1998: "Dual emission laser induced fluorescence for direct planar scalar behavior measurements", Experiments in Fluids, 25, S. 1-15
- Inman, J.A., Danehy, P.M., Alderfer, D.W., Buck, G. M., McCrea, A., 2009: "Planar Fluorescence Imaging and Three-Dimensional Reconstructions of Capsule Reaction-Control-System Jets", AIAA Journal, Bd. 47, Nr. 4, S. 803-812
- Klein, Ch., 2008: "Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung des Temperaturfeldes in Mikro-wärmeübertragerkanälen, Doktorarbeit, Universität Karlsruhe, Karlsruhe
- Otter, G., Honecker, R., 1993: "Atome – Moleküle - Kerne", Atomphysik, Nr.1
- Rost, F.W., 1995: "Quantitative fluorescence microscopy", Cambridge University Press, Cambridge
- Schorr, J., 2003: "Entwicklung und Anwendung von Fluoreszenztracer-Verfahren für die lasergestützte, abbildende Spraydiagnostik", Doktorarbeit, Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg
- Walker, D.A., 1985: "A fluorescence technique for measurement of concentration in mixing liquids", J. Phys. E:Sci. Instrum., Nr. 20, S. 22-24