

Berichts.-Nr.:

DLR-IB 224-2015 A 113

Verfasser:

Steffen Risius, Marco Costantini, Tobias Kleindienst

Titel:

Technical Report

**Untersuchung optischer Komponenten (LEDs und Filter)
für den Einsatz bei kryoTSP und warmTSP**

Datum: 19.10.2015

Auftraggeber:

Auftrags-Nr.:

Vorgesehen für:

Der Bericht umfaßt:

28	Seiten einschl.
2	Tabellen
22	Bilder
3	Literaturstellen

Vervielfältigung und Weitergabe dieser Unterlagen sowie Mitteilung ihres Inhalts an Dritte,
auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des DLR des Auftraggebers.

DLR

**Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik
Abteilung Experimentelle Verfahren
Bunsenstraße 10
37073 Göttingen
Germany**

Untersuchung optischer Komponenten (LEDs und Filter) für den Einsatz bei kryoTSP und warmTSP

Kurzfassung:

Dieser Bericht beschreibt, wie durch den Einsatz neuer LEDs und neuer optischer Filter das TSP Messsystem verbessert werden kann. Die Lumineszenzintensität der TSP kann bei TSP Messungen bei Umgebungstemperatur etwa um einen Faktor 7,5 erhöht werden, während sie bei kryogenen Temperaturen sogar um einen Faktor 8 erhöht werden kann. Dadurch kann das Signal-Rauschverhältnis von TSP-Aufnahmen verbessert, sowie die Belichtungszeit der Aufnahmen reduziert werden.

DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V.

Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik Abteilung Experimentelle Verfahren

Institutsleiter:



(Prof. Dr. Andreas Dillmann)

Abteilungsleiter:



(Dr. Lars Koop)

Autoren:



(Steffen Risius)



(Marco Costantini)



(Tobias Kleindienst)

Datum: 05.08.2015
Bearbeitet: Ilka Micknaus

Abteilung:
Experimentelle Verfahren

Bericht:
224-2015 A 113

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Abkürzungen	3
1 Einleitung	4
1.1 Anmerkungen	4
1.1.1 Auftragung der Intensität	4
1.1.2 Bezeichnung der Filter	5
2 TSP Messungen bei Umgebungstemperatur	6
2.1 TSP OV322 und OV933	6
2.2 LEDs für TSP Messungen bei Umgebungstemperatur (warmTSP)	7
2.2.1 Bisher eingesetzte LEDs	7
2.2.2 Vorgeschlagene neue LEDs	7
2.3 LED-Filter für TSP Messungen bei Umgebungstemperatur	8
2.3.1 Bisher eingesetzte Filter	8
2.3.2 Vorgeschlagene neue Filter	8
2.4 Vergleich der alten und neuen LEDs und LED-Filter	11
2.4.1 Vergleich der Intensitäten	11
2.4.2 Vergleich der relativen Temperatursensitivität	11
2.5 Kamerafilter für TSP Messungen bei Umgebungstemperatur	12
2.5.1 Bisher eingesetzte Kamerafilter	12
2.5.2 Vorgeschlagene neue Kamerafilter	14
2.5.3 Vergleich der Intensitäten	14
3 TSP Messungen bei kryogenen Temperaturen (kryoTSP)	16
3.1 TSP VSR01	16
3.2 LEDs für kryoTSP-Messungen	17
3.2.1 Bisher eingesetzte LEDs	17
3.2.2 Vorgeschlagene neue LEDs	17
3.3 LED-Filter für kryoTSP-Messungen	18
3.3.1 Bisher eingesetzte Filter	18
3.3.2 Vorgeschlagene neue Filter	18
3.4 Vergleich der alten und neuen LEDs und LED-Filter	21
3.4.1 Vergleich der Intensitäten	21
3.4.2 Vergleich der relativen Temperatursensitivität	21
3.5 Kamerafilter für TSP Messungen bei kryoTSP	22
3.5.1 Bisher eingesetzte Kamerafilter	22
3.5.2 Vorgeschlagene neue Kamerafilter	23
3.5.3 Vergleich der Intensitäten	23
4 Schlussfolgerung und Empfehlung	25



5 Ausblick	27
5.1 Anmerkungen für den ETW	27
Danksagung	27
Literatur	27

Zusammenfassung

Dieser Bericht beschreibt, wie durch den Einsatz neuer LEDs und neuer optischer Filter das TSP Messsystem verbessert werden kann. Die Lumineszenzintensität der TSP kann bei TSP Messungen bei Umgebungstemperatur etwa um einen Faktor 7,5 erhöht werden, während sie bei kryogenen Temperaturen sogar um einen Faktor 8 erhöht werden kann. Dadurch kann das Signal-Rauschverhältnis von TSP-Aufnahmen verbessert sowie die Belichtungszeit der Aufnahmen reduziert werden.

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
DNW	Deutsch-Niederländische Windkanäle
DNW-KRG	Kryogener Rohrwindkanal Göttingen
DNW-KKK	Kryo-Kanal Köln
ETW	European Transonic Windtunnel
IAG	Institut für Aerodynamik und Gasdynamik
kryoTSP	TSP Messung bei kryogenen Temperaturen
2K-TSP	zwei-Komponenten TSP
LED	Light Emitting Diode
OV322	TSP für Umgebungstemperaturen
OV933	Komponente für warme TSP-Messung mit 2K-TSP
SAMTEX	Steuerbare Montierungen für neue ETW-Thermoboxen
TSP	Temperature-Sensitive Paint
VSR01	TSP für kryogene Temperaturen
warmTSP	TSP Messung bei Umgebungstemperatur



1 Einleitung

Seit über 10 Jahren werden Messungen unter Einsatz von temperaturempfindlicher Farbe (engl. *Temperature-Sensitive Paint*, TSP) an unterschiedlichen kryogenen Windkanälen, z.B. dem European Transonic Windtunnel (ETW), dem kryogenen Rohrwindkanal Göttingen (DNW-KRG) und dem Kryo-Kanal Köln (DNW-KKK) durchgeführt. Bei der TSP-Messtechnik werden Luminophore, die in eine Farbschicht eingebettet sind, mit kurzwelligem Licht angeregt und dadurch in einen energetisch höheren Zustand versetzt. Bei dem Übergang in den Grundzustand des Moleküls wird längerwelliges Licht emittiert, welches als Lumineszenzlicht bezeichnet wird. Abhängig von der Temperatur ändert sich die Intensität der Lumineszenz, so dass eine berührungslose Temperaturmessung mit Hilfe einer Kamera möglich ist.

Um für eine TSP bei kurzen Belichtungszeiten ein möglichst gutes Signal-Rauschverhältnis zu erhalten, ist es notwendig eine möglichst hohe Intensität des lumineszenten Lichts zu erreichen. Dies kann durch die folgenden drei Maßnahmen erreicht werden

1. Die Verluste durch optische Komponenten (Filter, Objektive, Glasscheiben) zu minimieren.
2. Die Wellenlängenbereiche der optischen Komponenten möglichst gut mit denen der TSP übereinstimmen zu lassen.
3. Die Intensität des anregenden Lichts zu maximieren.

Diese Voraussetzungen können insbesondere durch die Wahl geeigneter Lichtquellen und Filter erzielt werden. Als die TSP-Messtechnik vor über 10 Jahren in kryogenen Windkanälen installiert wurde, konnten nur die damals verfügbaren LEDs und Filter eingesetzt werden. Seitdem haben sich LEDs und optische Filter jedoch stark weiterentwickelt, so dass durch den Einsatz neuer Komponenten die TSP-Messtechnik deutlich verbessert werden kann. Dieser Bericht beschreibt die Verbesserungen, die durch die neuen LEDs und Filter erzielt werden können.

1.1 Anmerkungen

1.1.1 Auftragung der Intensität

In diesem Bericht sind viele Diagramme (Spektren) enthalten, in denen auf der Ordinate die Intensität aufgetragen ist. Falls es nicht anders angegeben ist, wird die Intensität dabei in beliebigen Einheiten angegeben. Die Diagramme sind somit im Allgemeinen nicht für einen Vergleich der Intensitäten, sondern der Wellenlängen vorgesehen. Eine Ausnahme sind die Diagramme in denen die "absoluten Intensitäten" in "counts" aufgetragen sind. Diese Diagramme dienen dazu die Intensität der aufgetragenen Kurven in einem Diagramm untereinander zu vergleichen. Um die Diagramme auch anderweitig verwenden zu können, wurde hier eine englische Beschriftung gewählt.

1.1.2 Bezeichnung der Filter

Je nachdem, an welcher Stelle die optischen Filter in dem TSP-Aufbau eingesetzt werden sollen, werden sie in diesem Bericht als “LED-Filter” oder als “Kamerafilter” bezeichnet. Diese Bezeichnung kennzeichnet daher keine Eigenschaft der Filter an sich.

2 TSP Messungen bei Umgebungstemperatur

2.1 TSP OV322 und OV933

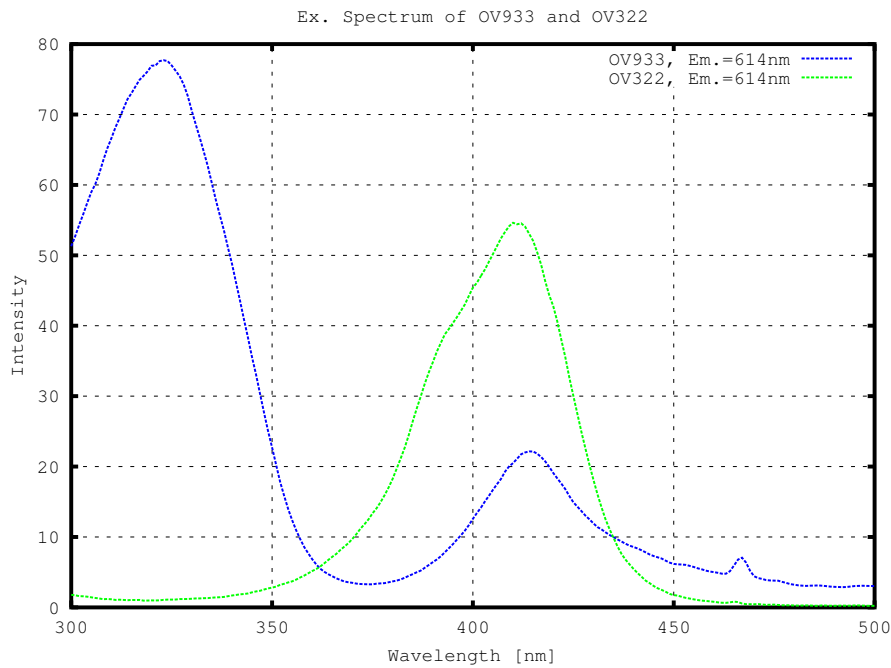


Abbildung 1: Anregungsspektrum von OV322 und OV933.

Die TSP OV322 wird für TSP Messungen eingesetzt, die bei Umgebungstemperaturen (-10°C bis 50°C) stattfinden (warmTSP). Die TSP basiert auf einem Europium-Komplex, dessen Anregungsmaximum bei ca. 410 nm liegt (Abb. 1) [Ondrus, 2015].

Um TSP sowohl bei kryogenen Temperaturen, als auch bei Umgebungstemperatur einsetzen zu können, wurde eine zwei-Komponenten TSP (2K-TSP) entwickelt [Egami, 2012]. Die Komponente der 2K-TSP, welche für Umgebungstemperaturen eingesetzt wird, wird mit OV933 bezeichnet. Als Luminophor bei Umgebungstemperatur wird ebenfalls ein Europium-Komplex eingesetzt. Das absolute Maximum des Anregungsspektrums liegt bei ca. 325 nm, jedoch existiert ein zweites lokales Maximum bei 414 nm, über das die Farbe ebenfalls angeregt werden kann (Abb. 1).

Das Emissionsmaximum des Europium-Komplexes liegt bei ca. 614 nm, so dass sowohl OV322 als auch OV933 in diesem Wellenlängenbereich emittieren (Abb. 2).

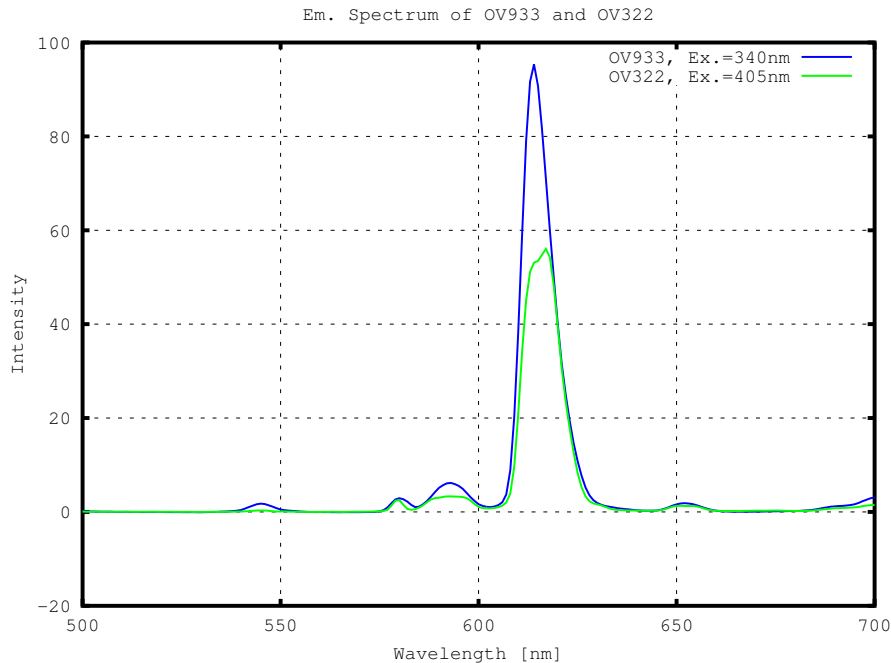


Abbildung 2: Emissionsspektrum von OV322 und der Komponente OV933 für TSP Messungen bei Umgebungstemperatur.

2.2 LEDs für TSP Messungen bei Umgebungstemperatur (warmTSP)

2.2.1 Bisher eingesetzte LEDs

Zur Anregung des Europium-Komplexes wurden bisher LEDs mit der Bezeichnung **ACULED-VHL** verwendet. Diese haben ein Emissionsmaximum bei einer Wellenlänge von 407 nm (Abb. 3).

2.2.2 Vorgeschlagene neue LEDs

Neue LEDs, die in den letzten Jahren entwickelt wurden, haben eine deutlich höhere Intensität als die bisher verwendeten. Für die Anregung des Europium-Komplexes wird daher vorgeschlagen, zukünftig die LEDs mit der Bezeichnung **LED ENGIN LZ4-40UA00-U8** zu verwenden, die ein Emissionsmaximum bei ca. 411 nm haben (Abb. 3). Die LEDs werden im DNW-KRG seit Oktober 2013 eingesetzt und haben dort Druckbelastungen von bis zu 8 bar Überdruck schadlos überstanden [Risius, 2014].

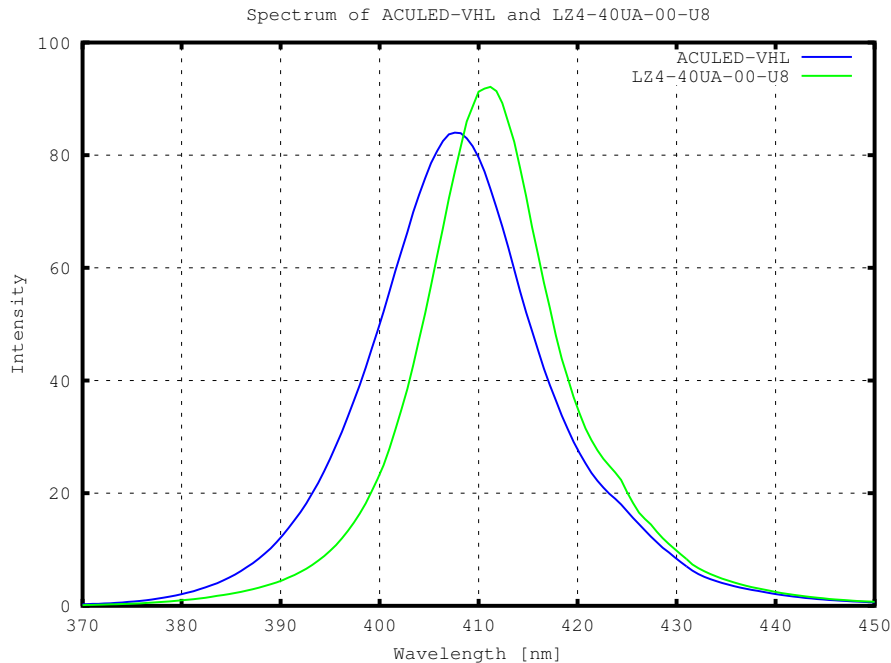


Abbildung 3: Spektrum der ACULED-VHL und LED ENGIN LZ4-40UA00-U8.

2.3 LED-Filter für TSP Messungen bei Umgebungstemperatur

2.3.1 Bisher eingesetzte Filter

Da die LEDs auch im längerwelligen Bereich emittieren, ist es notwendig das emittierte Licht der LEDs zusätzlich durch einen Filter zu begrenzen. Bisher wurden dazu Bandpassfilter von der Firma Chroma (bestellt bei LOT-Oriel) mit der Bezeichnung **D415/60M** eingesetzt. Im Bereich des Emissionsmaximums der LEDs (ca. 407 nm) liegt die maximale Transmission der Filter nur bei ca. 70% (Abb. 4 und 6). Ein weiterer Nachteil dieser Filter besteht darin, dass sie bei Wellenlängen über 600 nm wieder durchlässig werden, so dass das längerwellige LED Licht nicht vollständig blockiert wird (Abb. 5 und 7).

2.3.2 Vorgeschlagene neue Filter

Eine deutliche Steigerung der Transmission kann heutzutage durch den Einsatz neuer LED-Filter erzielt werden. Vorgeschlagen wird die Verwendung der LED-Filter **ET410/40X**, die eine Transmission von ca. 95% in dem relevanten Wellenlängenbereich (ca. 410 nm) haben (Abb. 4 und 6) und bis 1150 nm undurchlässig sind (Abb. 5 und 7 zeigen die Transmission bis 710 nm).

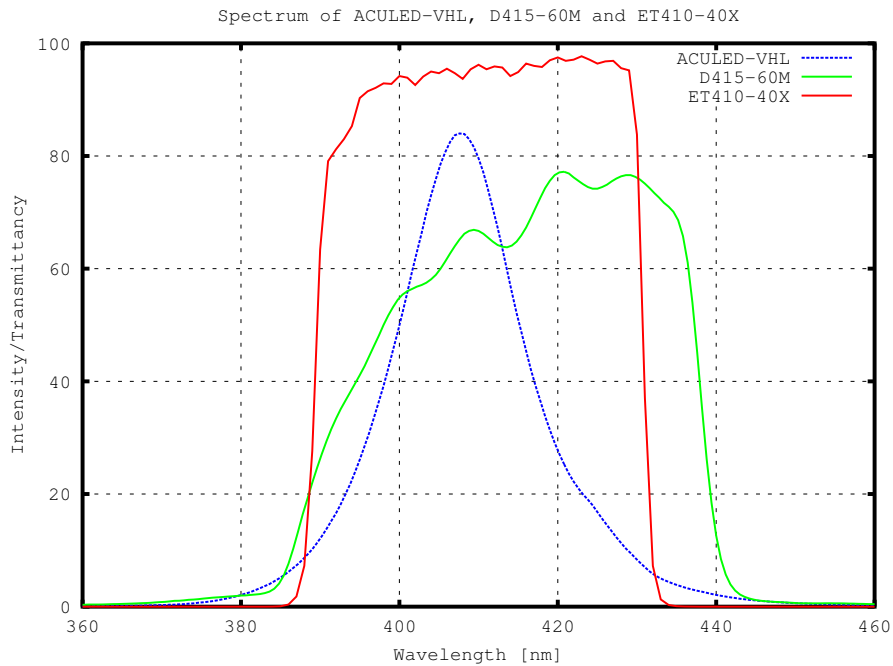


Abbildung 4: Vergleich der Spektren von ACULED-VHL LED, LED-Filter D415/60M und ET410/40X von 360 nm bis 460 nm.

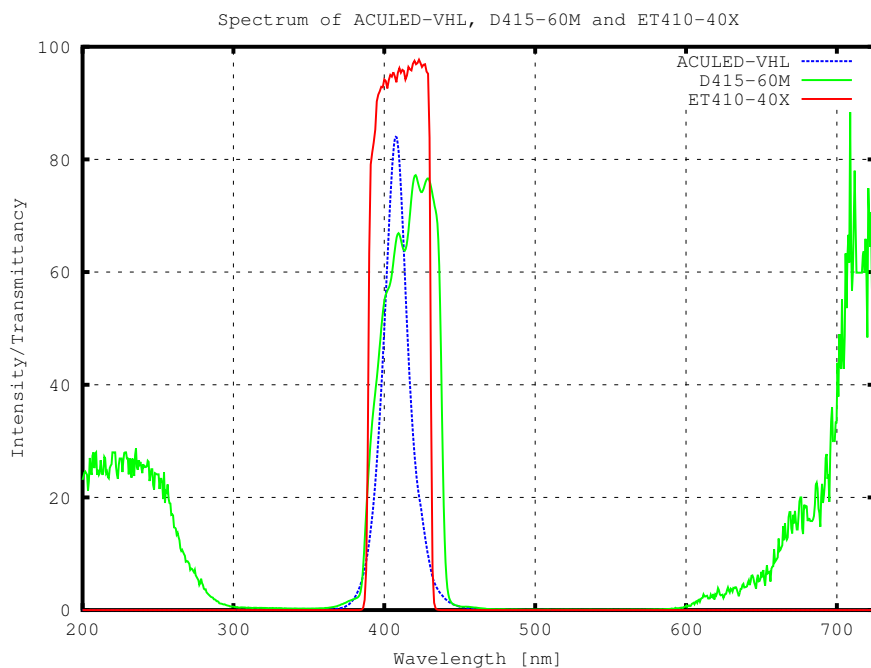


Abbildung 5: Vergleich der Spektren von ACULED-VHL LED, LED-Filter D415/60M und ET410/40X von 200 nm bis 725 nm.

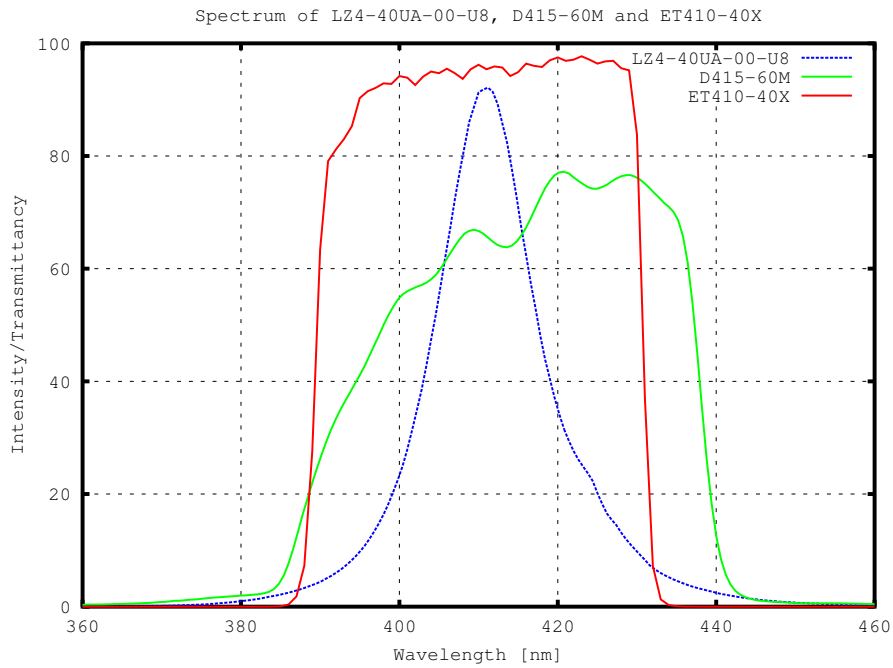


Abbildung 6: Vergleich der Spektren der LED LZ4-40UA00-U8, LED-Filter D415/60M und ET410/40X von 360 nm bis 460 nm.

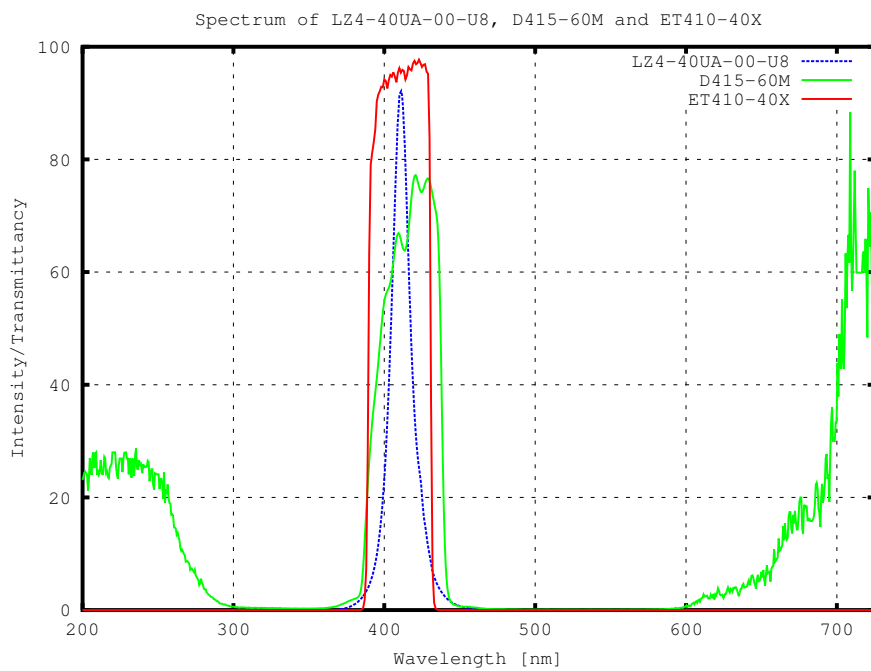


Abbildung 7: Vergleich der Spektren der LED LZ4-40UA00-U8 und der LED-Filter D415/60M und ET410/40X von 200 nm bis 725 nm.

2.4 Vergleich der alten und neuen LEDs und LED-Filter

2.4.1 Vergleich der Intensitäten

Zum Vergleich der alten und neuen LEDs und LED-Filter wurde eine Kalibrierung der TSP OV322 durchgeführt. Dabei wurden die LEDs und LED-Filter variiert, während die übrigen Einstellungen (Belichtungszeit=90 ms, Stromstärke zum Betrieb der LEDs=350 mA und die Anordnung der optischen Komponenten) identisch beibehalten wurden. Wie man in Abb. 8 sieht, führt sowohl der Einsatz neuer LED-Filter als auch neuer LEDs zu einer deutlichen Intensitätssteigerung des lumineszenten Signals der TSP. Wenn sowohl LEDs als auch LED-Filter erneuert werden, kann die Intensität der Lumineszenz etwa um einen **Faktor 6** gesteigert werden. Am DNW-KRG wurden bereits die neuen LEDs (LED ENGIN LZ4-40UA00-U8) eingebaut und seit Oktober 2013 für TSP Messungen verwendet.

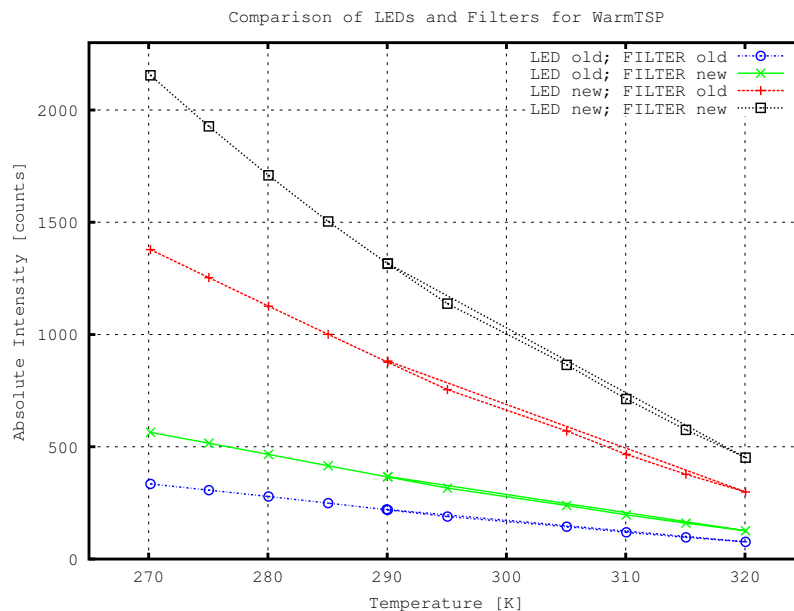


Abbildung 8: Vergleich der lumineszenten Intensitäten unter Einsatz der alten LEDs (ACULED-VHL), alten LED-Filter (D415/60M), neuen LEDs (LZ4-40UA00-U8) und neuen LED-Filter (ET410/40X). Um einen möglichen Hysterese-Effekt auszuschließen, wurde der Messpunkt bei 290 K nach der Messung wiederholt.

2.4.2 Vergleich der relativen Temperatursensitivität

Um zu überprüfen, ob sich durch den Einsatz der neuen optischen Komponenten auch die Temperatursensitivität geändert hat, wurde diese ebenfalls untersucht. Die negative

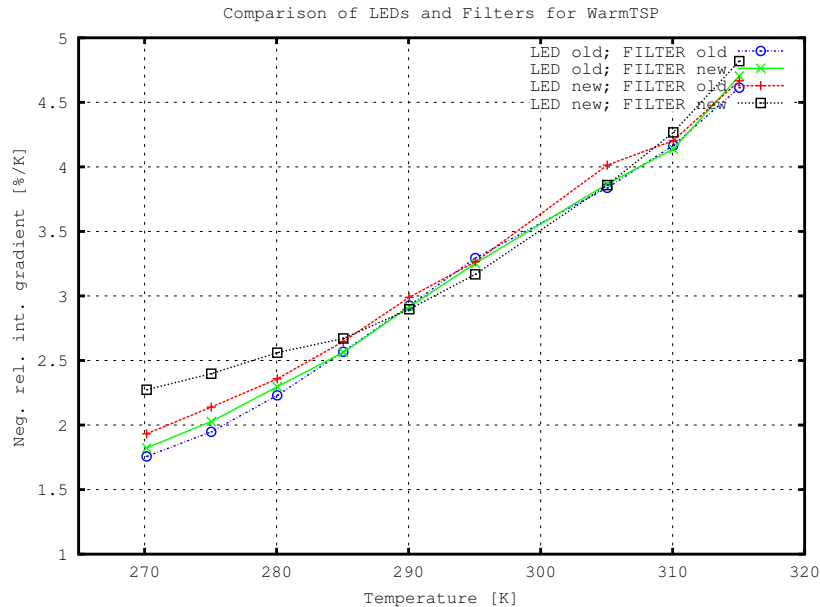


Abbildung 9: Vergleich der relativen Temperatursensitivität unter Einsatz der alten LEDs (ACULED-VHL), alten LED-Filter (D415/60M), neuen LEDs (LZ4-40UA00-U8) und neuen LED-Filter (ET410/40X).

relative Temperatursensitivität wird dazu folgendermaßen berechnet:

$$-\frac{\Delta I}{\Delta T} = -\frac{\frac{I_n - I_{n+1}}{\left(\frac{I_n + I_{n+1}}{2}\right)}}{T_n - T_{n+1}} = -\frac{2(I_n - I_{n+1})}{T_n - T_{n+1}} \quad (1)$$

Der Index n bezeichnet dabei die Messung bei einer bestimmten Temperatur. Es zeigt sich, dass die Temperatursensitivität durch den Einsatz neuer LEDs und LED-Filter im Bereich von 270 K bis 280 K leicht verbessert werden kann aber bei höheren Temperaturen praktisch gleich bleibt (Abb. 9).

2.5 Kamerafilter für TSP Messungen bei Umgebungstemperatur

2.5.1 Bisher eingesetzte Kamerafilter

Um das lumineszente Licht der TSP aufzunehmen wurden am DNW-KRG und ETW bisher die pco.pixelfly-Kameras eingesetzt. Damit möglichst ausschließlich das Licht der lumineszenten Wellenlänge aufgenommen wird, sind die Kameras mit optischen Filtern versehen. Bisher wurden Kamerafilter mit der Bezeichnung **590FG05** verwendet. Die Kamerafilter 590FG05 haben eine maximale Transmission von ca. 90% (Abb. 10 und 11).

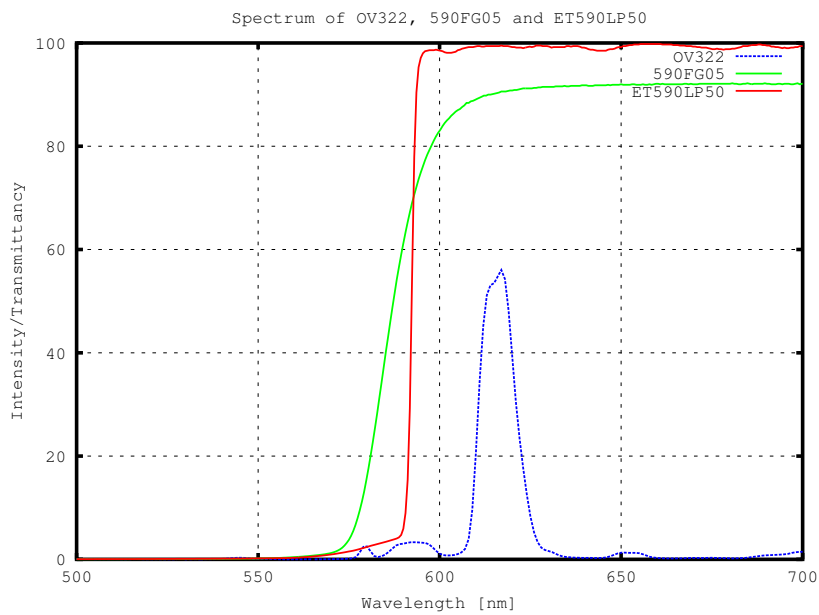


Abbildung 10: Emissionsspektrum von OV322 und Transmission der Kamerafilter 590FG05 und ET590LP.

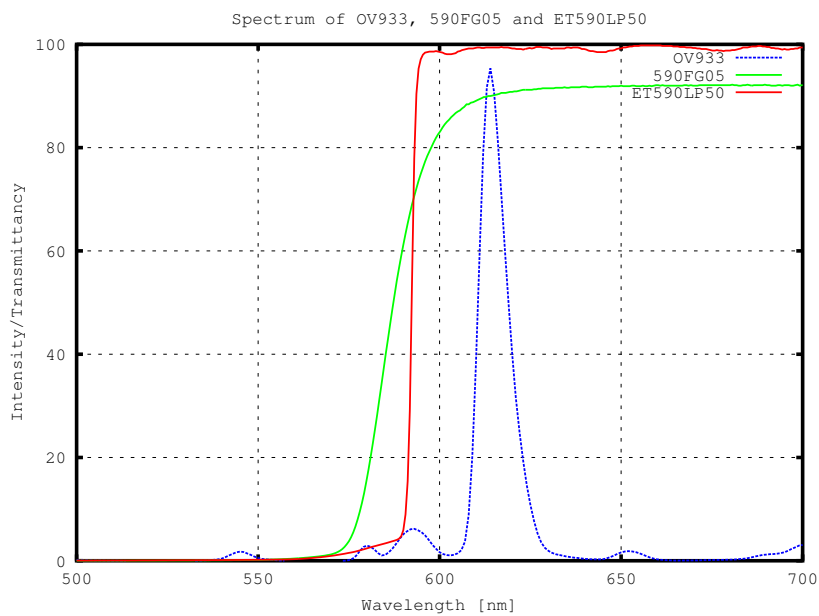


Abbildung 11: Emissionsspektrum von OV933 und Transmission der Kamerafilter 590FG05 und ET590LP.

2.5.2 Vorgeschlagene neue Kamerafilter

Da die Kamerafilter 590FG05 nicht mehr hergestellt werden, sollten zukünftig die Kamerafilter **ET590LP** verwendet werden. Diese Filter verfügen über eine Transmission von ca. 99% (Abb. 10 und 11). Als ebenso gute Alternative kann für die Kameras auch der Bandpassfilter **ET630/75M** verwendet werden, der im Rahmen dieses Berichts nicht untersucht wurde, jedoch am DNW-KRG und am Laminarkanal des IAG der Universität Stuttgart erfolgreich für TSP Messungen eingesetzt wurde.

2.5.3 Vergleich der Intensitäten

Um zu vergleichen, wie hoch der Gewinn an Intensität beim Einsatz der neuen Kamerafilter ist, wurden eine Probe OV322 unter Einsatz der alten und neuen LEDs und Kamerafilter kalibriert, während die übrigen Einstellungen (Belichtungszeit [11 ms], Stromstärke zum Betrieb der LEDs [350 mA] und die Anordnung der optischen Komponenten) identisch beibehalten wurden.

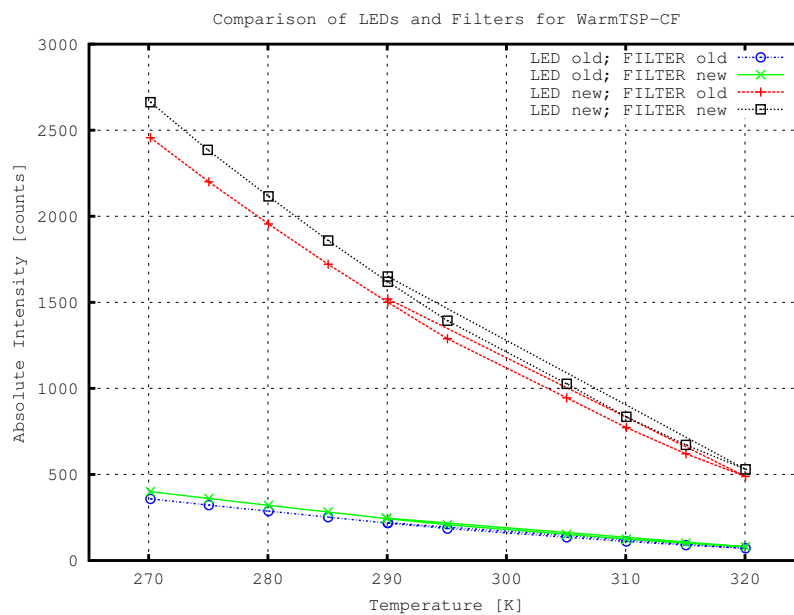


Abbildung 12: Vergleich der lumineszenten Intensitäten unter Einsatz der alten LEDs (ACULED-VHL), alten Kamerafilter (590FG05), neuen LEDs (LZ4-40UA00-U8) und neuen Kamerafilter (ET590LP). Um einen möglichen Hysterese-Effekt auszuschließen, wurde der Messpunkt bei 290 K nach der Messung wiederholt.

Wie man in Abb. 12 sieht, führt sowohl der Einsatz neuer Kamerafilter als auch neuer LEDs zu einer deutlichen Intensitätssteigerung des lumineszenten Signals der TSP. Die neuen Kamerafilter führen zu einem **Intensitätsgewinn von etwa 10%**. Wenn sowohl

LEDs als auch LED- und Kamerafilter erneuert werden, kann die Intensität der Lumineszenz insgesamt um einen **Faktor 7.5**, im Vergleich zu einem Aufbau mit alten LEDs, alten LED-Filtern und alten Kamerafiltern gesteigert werden.

3 TSP Messungen bei kryogenen Temperaturen (kryoTSP)

3.1 TSP VSR01

Zur TSP Messung im kryogenen Temperaturbereich (100 K - 250 K) wird die TSP VSR01 eingesetzt, die auf einem Ruthenium-Komplex basiert. Das Anregungsmaximum der Farbe liegt bei ca. 480 nm während das Emissionsmaximum bei ca. 605 nm liegt (Abb. 13 und Abb. 14). Die Ruthenium-Komponente von der Zweikomponentenfarbe OV933 besitzt ein ähnliches Spektrum wie die Farbe VSR01. Daher können für beide Farben die selben Filter und LEDs eingesetzt werden.

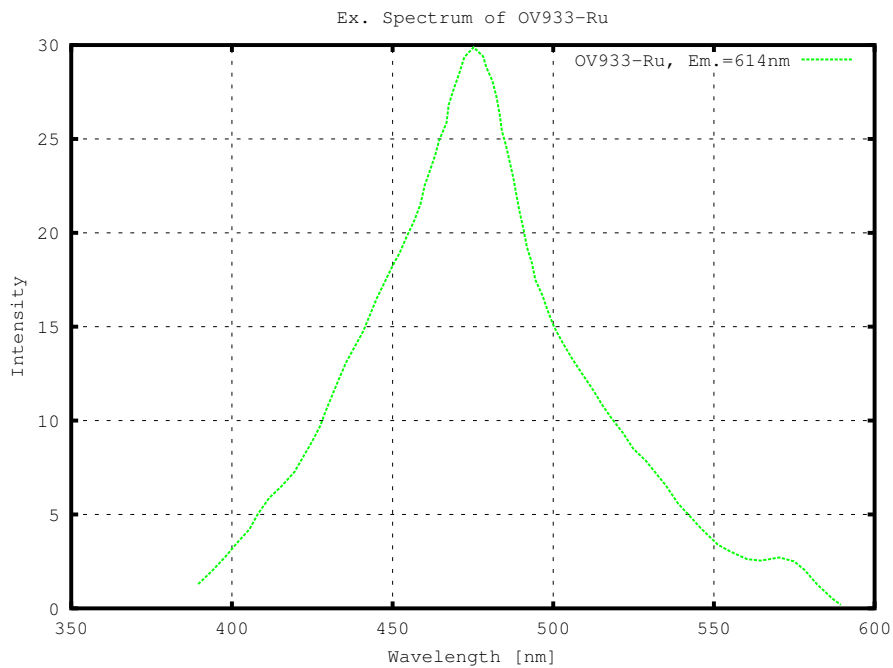


Abbildung 13: Anregungsspektrum von OV933-Ru.

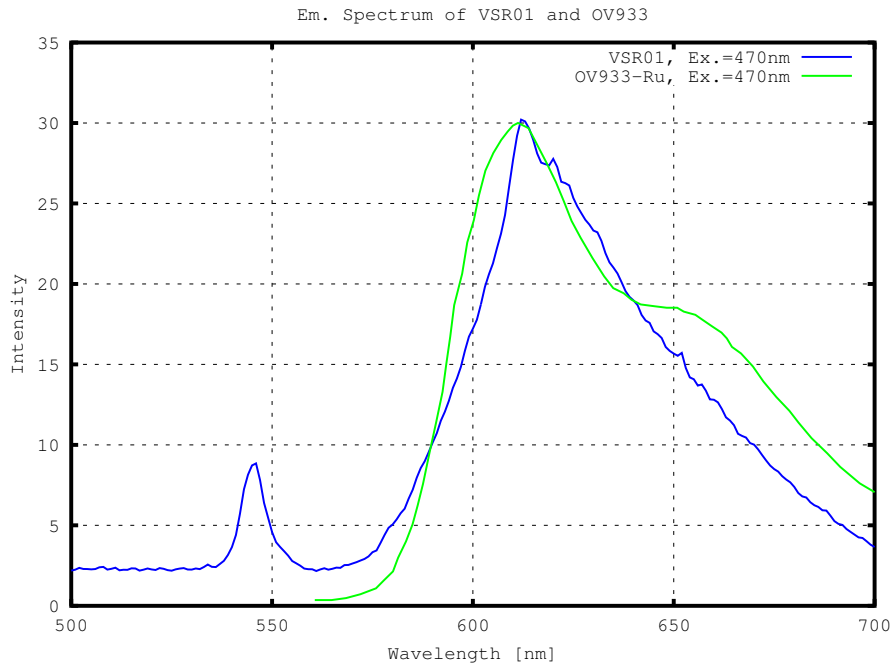


Abbildung 14: Emissionsspektrum von VSR01.

3.2 LEDs für kryoTSP-Messungen

3.2.1 Bisher eingesetzte LEDs

Zur Anregung des Ruthenium-Komplexes wurden bisher LEDs mit der Bezeichnung **Luxeon V Star 470 blue** verwendet. Diese haben ein Emissionsmaximum bei einer Wellenlänge von ca. 480 nm (Abb. 15).

3.2.2 Vorgeschlagene neue LEDs

Neue LEDs, die in den letzten Jahren entwickelt wurden, haben eine deutlich höhere Intensität, als die bisher verwendeten. Zur Anregung des Ruthenium-Komplexes wurden in dieser Vergleichsstudie die LEDs mit der Bezeichnung **LED ENGIN LZ4-40B200-0B34** verwendet, die ein Emissionsmaximum bei ca. 455 nm haben (Abb. 15). Das Maximum der emittierten Wellenlänge dieser LEDs liegt nicht exakt auf dem Anregungsmaximum von VSR01, jedoch ist die Intensität der LED ENGIN LZ4-40B200-0B34 so viel größer, dass auch die Intensität der Lumineszenz deutlich größer ist (siehe Kapitel 3.4). Laut Datenblatt beträgt die Intensität der LEDs, je nach Abstrahlwinkel, 75 bis 93 lumen.

Erst kürzlich sind auf dem Markt die LEDs mit der Bezeichnung **LED ENGIN LZ4-40B208-0000** verfügbar. Da diese eine noch höhere Leistung als die LED ENGIN LZ4-40B200-0B34 haben (93 bis 117 lumen), kann durch deren Einsatz die Intensität noch

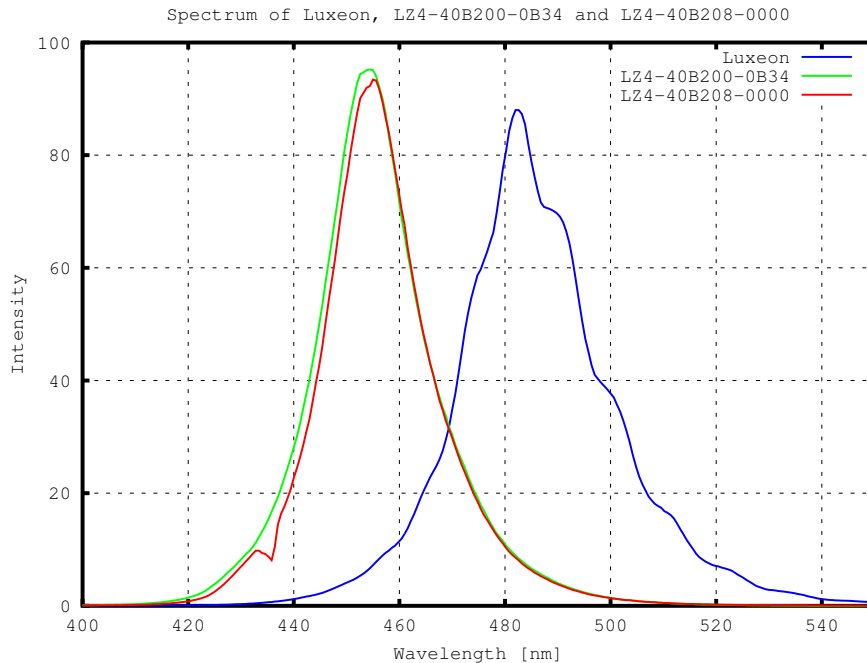


Abbildung 15: Spektrum der Luxeon-V-Star LED ENGIN LZ4-40B208-0000 und LED ENGIN LZ4-40B200-0B34.

weiter gesteigert werden. Dadurch kann die Intensität im Vergleich zur LED ENGIN LZ4-40B200-0B34 um weitere 13% gesteigert werden (siehe Abb. 16). Daher empfehlen wir für zukünftige kryoTSP Messungen die LEDs mit der Bezeichnung **LED ENGIN LZ4-40B208-0000** zu verwenden.

3.3 LED-Filter für kryoTSP-Messungen

3.3.1 Bisher eingesetzte Filter

Da die LEDs auch im längerwelligen Bereich emittieren, ist es notwendig das emittierte Licht der LEDs zusätzlich durch einen Filter zu begrenzen. Bisher wurden dazu Bandpassfilter von LOT-Oriel mit der Bezeichnung **D475/50X** eingesetzt. Die maximale Transmission des Filters liegt bei ca. 80% (Abb. 17).

3.3.2 Vorgeschlagene neue Filter

Die Filter D475/50X werden ebenfalls nicht mehr hergestellt. Bei dem Einsatz neuer LEDs kann zusätzlich eine Steigerung der Transmission durch den Einsatz neuer Filter erzielt werden. Vorgeschlagen wird die Verwendung der Filter **ET470/40X**, die eine Transmission von über 95% in dem Wellenlängenbereich um ca. 460 nm haben (Abb. 18). Die Filter zeigen keine Durchlässigkeit bis ca. 1000 nm.

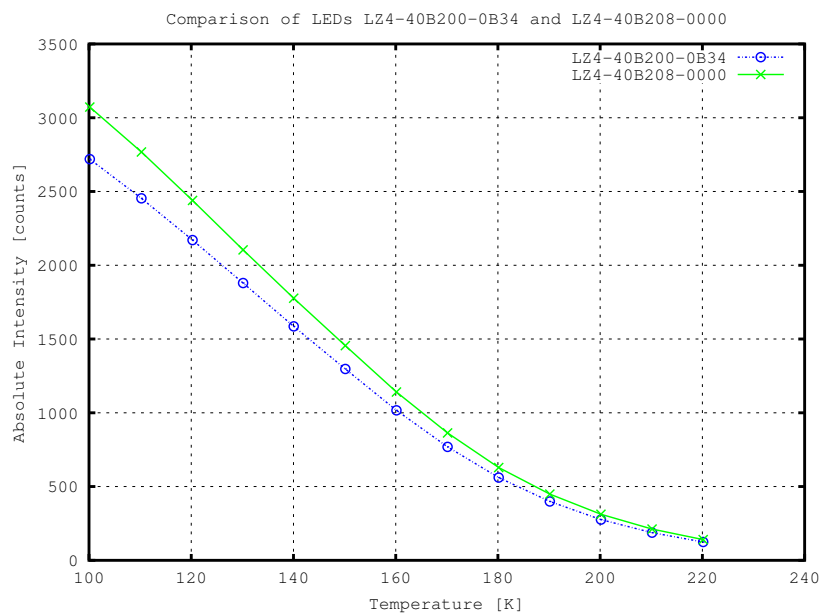


Abbildung 16: Vergleich der lumineszenten Intensitäten unter Einsatz der im folgenden getesteten LEDs, LED ENGIN LZ4-40B200-0B34, und der erst kürzlich verfügbaren und für kryoTSP empfohlenen LEDs: **LED ENGIN LZ4-40B208-0000**. Dies ermöglicht eine weitere Intensitätssteigerung von bis zu 13%.

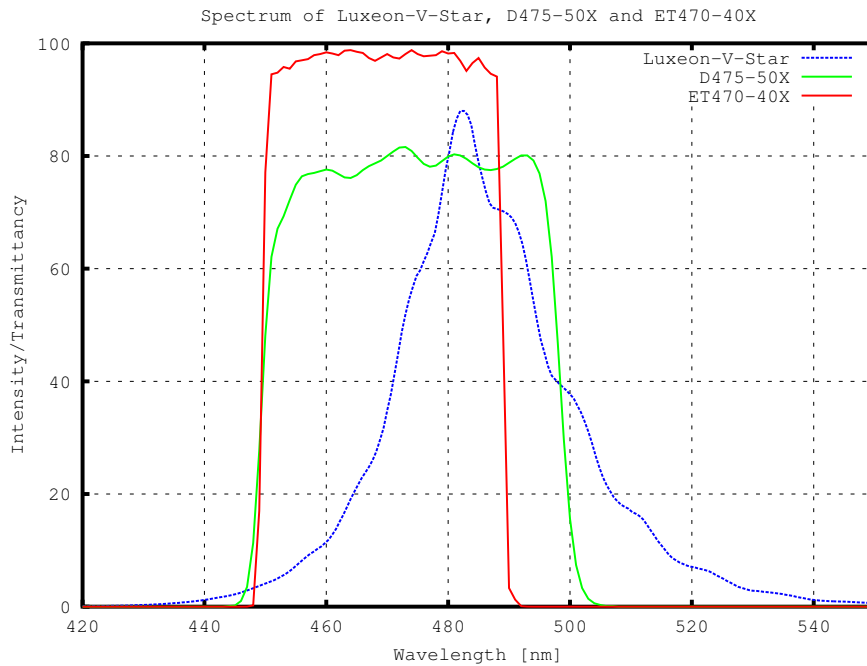


Abbildung 17: Vergleich der Spektren der LED Luxeon-V-Star und der Filter ET470/40X und D475/50X.

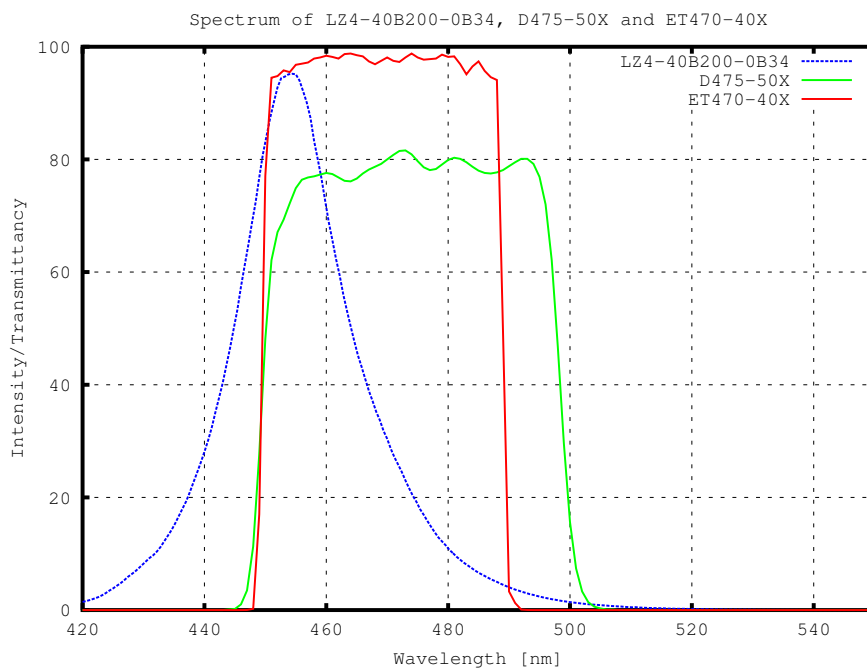


Abbildung 18: Vergleich der Spektren der LED LZ4-40B200-0B34 und der Filter ET470/40X und D475/50X.

3.4 Vergleich der alten und neuen LEDs und LED-Filter

3.4.1 Vergleich der Intensitäten

Zum Vergleich der alten und neuen LEDs und LED-Filter wurde eine Kalibrierung der TSP VSR01 durchgeführt. Dabei wurden die LEDs und LED-Filter variiert, während die übrigen Einstellungen (Belichtungszeit [130 ms], Stromstärke zum Betrieb der LEDs [350 mA] und die Anordnung der optischen Komponenten) beibehalten wurden. Wie man in Abb. 19 sieht, führt der Einsatz neuer LEDs zu einer deutlichen Intensitätssteigerung des lumineszenten Signals der TSP. Wenn sowohl LEDs als auch LED-Filter erneuert werden, kann die Intensität der Lumineszenz etwa um einen **Faktor 7.3** erhöht werden. Der Einsatz der neuen LED-Filter (ET470/40X) zusammen mit den alten LEDs führt zu einer geringfügigen Intensitätsminderung und ist daher nur bedingt zu empfehlen. Da die alten LED-Filter (D475/50X) jedoch nicht mehr beschafft werden können, wäre auch diese Kombination für eine Übergangszeit unter Umständen eine akzeptable Lösung.

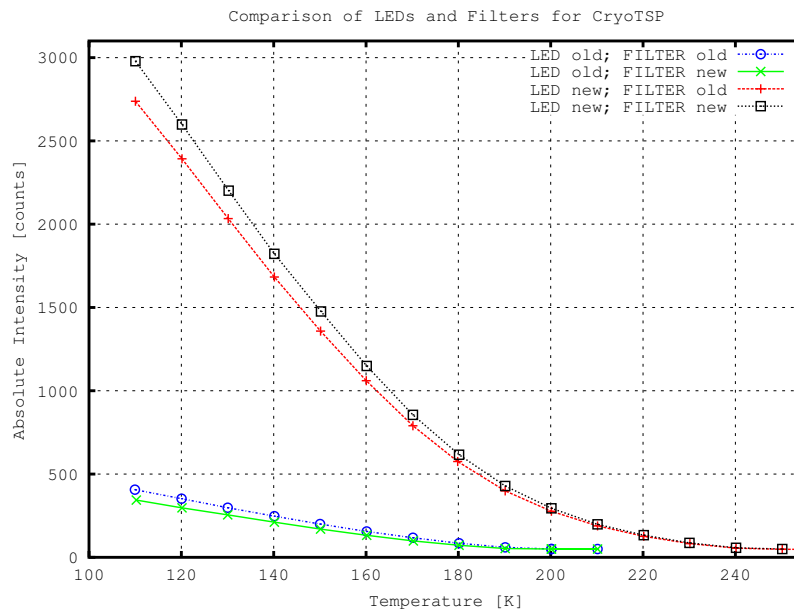


Abbildung 19: Vergleich der lumineszenten Intensitäten unter Einsatz der alten LEDs (Luxeon V Star), alten LED-Filter (D475/50X), neuen LEDs (LED ENGIN LZ4-40B200-0B34) und neuen LED-Filter (ET470/40X).

3.4.2 Vergleich der relativen Temperatursensitivität

Um zu überprüfen, ob sich durch den Einsatz der neuen optischen Komponenten auch die Temperatursensitivität geändert hat, wurde diese ebenfalls untersucht. Die negative

relative Temperatursensitivität wird dazu folgendermaßen berechnet:

$$-\frac{\Delta I}{\Delta T} = -\frac{\frac{I_n - I_{n+1}}{\left(\frac{I_n + I_{n+1}}{2}\right)}}{T_n - T_{n+1}} = -\frac{2(I_n - I_{n+1})}{I_n + I_{n+1}} \quad (2)$$

Der Index n bezeichnet dabei die Messung bei einer bestimmten Temperatur. Es zeigt sich, dass die Temperatursensitivität durch den Einsatz neuer LEDs und LED-Filter im Rahmen des Messfehlers unverändert bleibt (Abb. 20).

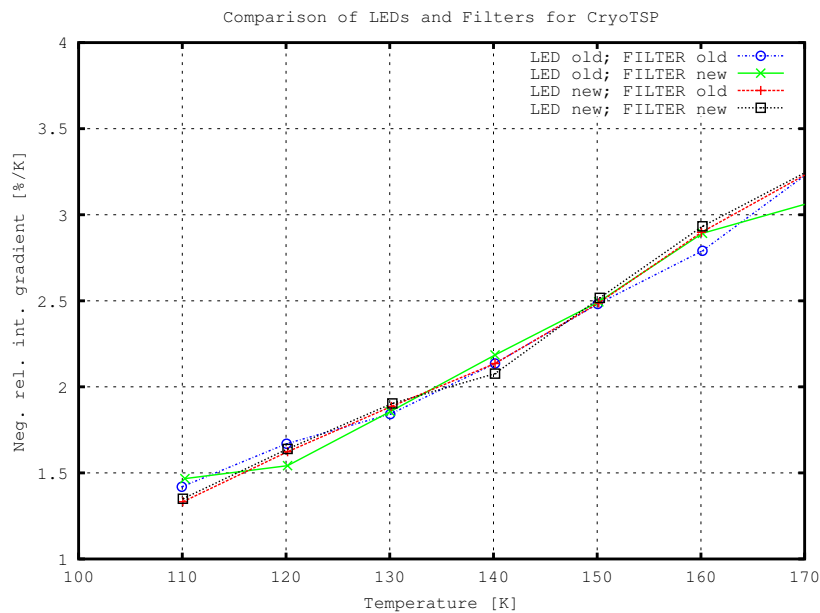


Abbildung 20: Vergleich der relativen Temperatursensitivität unter Einsatz der alten LEDs (Luxeon V Star), alten LED-Filter (D475/50X), neuen LEDs (LED ENGIN LZ4-40B200-0B34) und neuen LED-Filter (ET470/40X).

3.5 Kamerafilter für TSP Messungen bei kryoTSP

3.5.1 Bisher eingesetzte Kamerafilter

Um das lumineszente Licht der TSP aufzunehmen wurden am DNW-KRG und ETW bisher die pco.pixelfly-Kameras eingesetzt. Damit möglichst ausschließlich das Licht der lumineszenten Wellenlänge aufgenommen wird, sind die Kameras mit optischen Filtern versehen. Bisher wurden Kamerafilter mit der Bezeichnung **590FG05** verwendet. Die Kamerafilter 590FG05 haben eine maximale Transmission von ca. 90% (Abb. 21).

3.5.2 Vorgeschlagene neue Kamerafilter

Da die Kamerafilter 590FG05 nicht mehr hergestellt werden, sollten zukünftig die Kamerafilter **ET590LP** verwendet werden. Diese Filter verfügen über eine Transmission von ca. 99% und einen steileren Übergang zwischen den transmittierten und absorbierten Bereichen (Abb. 21). Als ebenso gute Alternative kann für die Kameras auch der Bandpassfilter **ET630/75M** verwendet werden, der im Rahmen dieses Berichts nicht untersucht wurde, jedoch am DNW-KRG und am Laminarkanal in Stuttgart erfolgreich für TSP Messungen eingesetzt wurde.

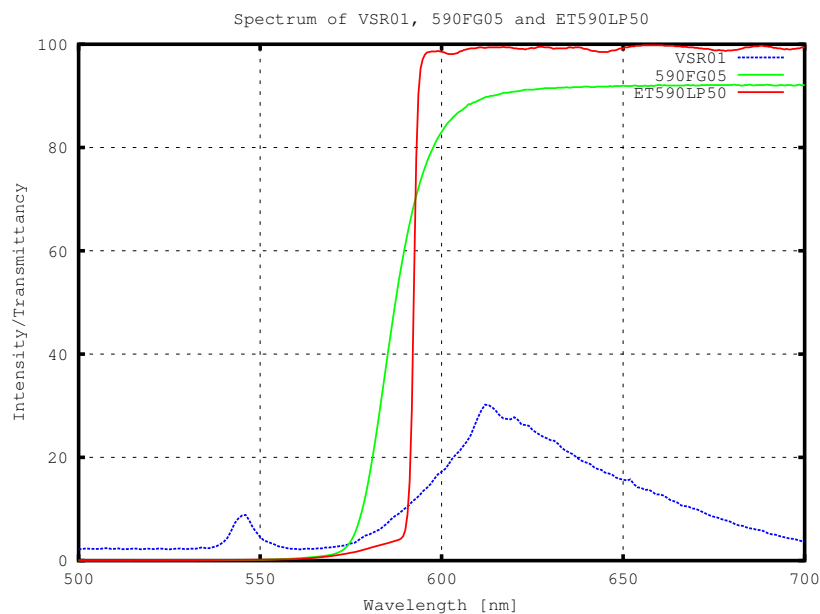


Abbildung 21: Emissionsspektrum von VSR01 und Transmission der Kamerafilter 590FG05 und ET590LP.

3.5.3 Vergleich der Intensitäten

Um zu vergleichen, wie hoch der Gewinn an Intensität beim Einsatz der neuen Kamerafilter ist, wurden eine Probe VSR01 unter Einsatz der alten und neuen LEDs und Kamerafilter kalibriert, während die übrigen Einstellungen (Belichtungszeit [11 ms], Stromstärke zum Betrieb der LEDs [350 mA] und die Anordnung der optischen Komponenten) identisch beibehalten wurden. Wie man in Abb. 22 sieht, führt sowohl der Einsatz neuer Kamerafilter als auch neuer LEDs zu einer deutlichen Intensitätssteigerung des lumineszenten Signals der TSP. Die neuen Kamerafilter führen zu einem **Intensitätsgewinn von etwa 10%**. Wenn sowohl LEDs als auch LED- und Kamerafilter erneuert werden, kann die Intensität der Lumineszenz insgesamt um einen **Faktor 8** gesteigert werden, im Vergleich zu einem Aufbau mit alten LEDs, alten LED-Filtern und alten Ka-

merafiltern.

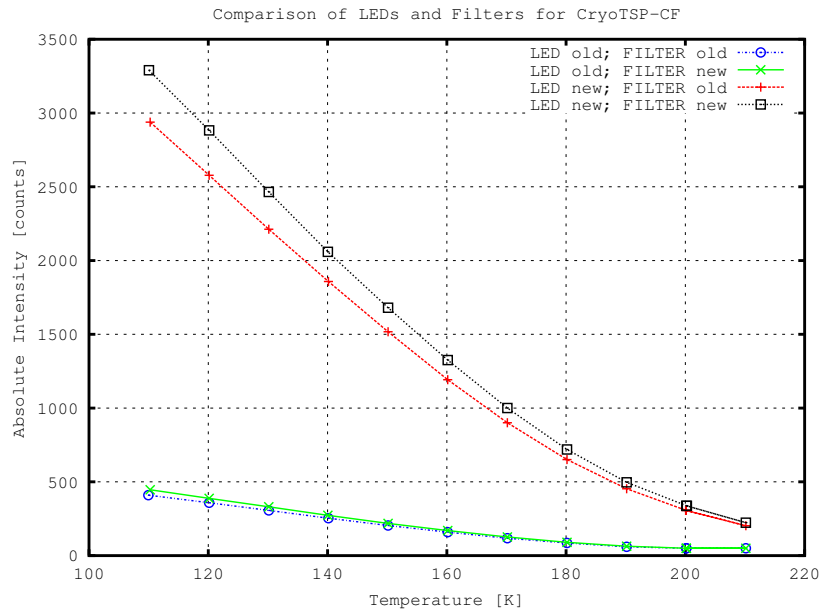


Abbildung 22: Vergleich der lumineszenten Intensitäten unter Einsatz der alten LEDs (Luxeon V Star), alten Kamera-Filter (590FG05), neuen LEDs (LED ENGIN LZ4-40B200-0B34) und neuen Kamera-Filter (ET590LP).

4 Schlussfolgerung und Empfehlung

Ein großer Teil der bisher eingesetzten Filter und LEDs für TSP-Messungen wird nicht mehr hergestellt und muss erneuert werden. Darüber hinaus kann eine deutliche Verbesserung der TSP-Messtechnik durch den Einsatz neuer Komponenten erzielt werden. Für zukünftige TSP-Messungen sollten daher die beschriebenen LEDs und Filter eingesetzt werden.

Die Anregung der TSP OV933 bei warmen Temperaturen, wird derzeit mit UV-Blitzlampen der Firma Rapp (340 nm) durchgeführt. Da diese Blitzlampen jedoch aufwendig im Betrieb sind, vorgeheizt werden müssen und zusätzliche optische Zugänge belegen, wird vorgeschlagen, dass man zukünftig die Anregung von OV322 und der warmen Komponente von OV933 mit Hilfe der LEDs **LZ4-40UA00-U8** der Firma LED ENGIN durchführt. Die LEDs LZ4-40UA00-U8 wurden im DNW-KRG bereits erfolgreich bei TSP-Messungen mit OV322 getestet. Obwohl die LEDs nicht im Bereich des absoluten Maximums von OV933 (325 nm) emittieren, sondern im Bereich des lokalen Maximums von OV933 (414 nm), können sie dennoch für warmTSP Messungen eingesetzt werden, da die Intensität dieser LEDs sehr viel größer ist als bei den früher verfügbaren ACULED-VHL.

Der hier durchgeführte Vergleich der LEDs, wurde mit einem Betriebsstrom von 350 mA durchgeführt. Da die neuen LEDs jedoch mit einer Stromstärke von bis zu 1000mA betrieben werden dürfen, kann die Leistung der LEDs noch weiter gesteigert werden. Die LEDs **LZ4-40UA00-U8** wurden am DNW-KRG bereits bei mehreren hundert Messpunkten mit dem maximal zulässigen Betriebsstrom von 1000 mA betrieben. Jedoch ist bei Betrieb der LEDs mit maximaler Leistung sicherzustellen, dass eine ausreichende Kühlung bzw. Abführung der thermischen Verlustleistung sichergestellt ist.

Für kryoTSP-Messungen mit VSR01 werden die LEDs **LZ4-40B208-0000** von LED ENGIN empfohlen. Sie haben ein Emissionsmaximum von ca. 455 nm und eine wesentlich höhere Intensität, wodurch die Intensität der Lumineszenz insgesamt etwa um einen Faktor 8 gesteigert werden kann.

Da die alten Filter nicht mehr hergestellt werden und neue leistungsfähigere Filter verfügbar sind, sollten neue Filter verwendet werden. Für die LEDs bei warmTSP Messungen werden Bandpassfilter von der Firma Chroma mit der Bezeichnung **ET410/40X** empfohlen. Für LEDs bei kryoTSP Messungen sollten Filter der Firma Chroma mit der Bezeichnung **ET470/40X** verwendet werden.

Für die Kameras werden Hochpassfilter mit der Bezeichnung **ET590LP50** empfohlen. Als ebenso gute Alternative kann für die Kameras auch der Bandpassfilter **ET630/75M** verwendet werden, der im Rahmen dieses Berichts nicht untersucht wurde, jedoch am DNW-KRG und am Laminarkanal in Stuttgart erfolgreich für TSP Messungen eingesetzt wurde.

warmTSP	alt	neu
LEDs	ACULED-VHL	LED ENGIN LZ4-40UA00-U8
LED-Filter	D415/60M	ET410/40X
Kamera-Filter	590FG05	ET590LP oder ET630/75M

Tabelle 1: Gegenüberstellung der alten und neuen Komponenten für warmTSP Messungen.

kryoTSP	alt	neu
LEDs	Luxeon V Star	LED ENGIN LZ4-40B208-0000
LED-Filter	D475/50X	ET470/40X
Kamera-Filter	590FG05	ET590LP oder ET630/75M

Tabelle 2: Gegenüberstellung der alten und neuen Komponenten für kryoTSP Messungen.

5 Ausblick

Auch zukünftig wird sich die TSP-, LED- und Filtertechnologie weiterentwickeln. Dieser Bericht stellt daher nur den derzeitigen Stand der Technik dar. Auch in Zukunft werden weitere Untersuchungen zur Verbesserung der TSP-Technologie benötigt werden.

5.1 Anmerkungen für den ETW

Am ETW werden zur Steuerung der Kameras (Ausrichtung, Blende, Fokus) derzeit sogenannte SAMTEX-Einheiten verwendet, in denen ebenfalls die LEDs zur Beleuchtung der TSP untergebracht sind. In den SAMTEX-Einheiten können zukünftig auch die LEDs LZ4-40UA00-U8 montiert werden, da sich die Einbaumaße der LEDs nicht geändert haben.

Ein Nachteil der am ETW eingesetzten SAMTEX-Einheiten besteht darin, dass ein Teil des LED-Lichts an den Scheiben der Thermoboxen reflektiert wird. Dieses Licht wird zurück in die Kamera gestreut, wodurch sich das Signal-Rauschverhältnis verschlechtert. Um das Streulicht der LEDs zu verringern, könnten die LEDs zukünftig in einer separaten Thermobox untergebracht werden, sofern ausreichend optische Zugänge verfügbar sind. Dabei könnten evtl. LEDs für warmTSP- und kryoTSP-Messungen gemeinsam in einem Gehäuse platziert werden, so dass bei einem Temperaturwechsel kein Umbau der Beleuchtung notwendig ist.

Danksagung

Für die Hilfe bei der Kalibrierung von Filtern und LEDs möchten wir uns insbesondere bei Uwe Fey und Christopher Schwarze bedanken. Die Aufnahme der Kalibrierkurven wurde durch die Modifikationen an der Kalibrierkammer von Ulrich Henne und Carsten Fuchs erst ermöglicht. Stark vereinfacht wurde ebenfalls die Auswertung der Daten durch ein nToPas-Skript von Armin Weiß. Die untersuchte TSP wurde von Vladimir Ondrus und Christian Klein entwickelt und vorbereitet und für diesen Test zur Verfügung gestellt. Für diese Unterstützung sind wir sehr dankbar.

Literatur

[Egami, 2012] Y. Egami, U. Fey, C. Klein, J. Quest, V. Ondrus, U. Beifuss: *Development of new two-component temperature-sensitive paint (TSP) for cryogenic testing*; Measurement Science and Technology, 23 (11), Seiten 1-10. IOP PUBLISHING, 2012

[Ondrus, 2015] V. Ondrus, R. Meier, C. Klein, U. Henne, M. Schäferling, U. Beifuss: *Europium 1,3-di(thienyl)propane-1,3-diones with outstanding properties for temperature sensing*; Sensors and Actuators A: Physical. Accepted for publication, 2015

[Risius, 2014] S. Risius: Entwurf eines Messsystems zur instationären quantitativen TSP Messung am kryogenen Rohrwindkanal Göttingen (KRG). DLR-Interner Bericht. DLR-IB 224-2014 A 103, 2014