Weißer Festkörperlaser – ein Paradoxon?

Julien Hansen – L-LAB, Lukas Pörtner – L-LAB
Julien.Hansen@l-lab.de, L-LAB, Rixbecker Str. 75, 59555 Lippstadt

Der Laser erobert stets immer mehr Bereiche in Forschung und Industrie. Auch in der automobilen Scheinwerfertechnik hat der Laser im Jahre 2014 mit der Markteinführung eines laserbasierten Zusatzfernlichtes im Audi R8 LMX und BMW i8 das erste Mal Serienreife erreicht. Diese heutigen laserbasierten Scheinwerfermodule besitzen ein YAG:Ce Konversionselement, welches blaue Laserstrahlung teilweise in gelbe Strahlung umwandelt und durch additive Farbmischung des blauen und gelben Spektralbereichs ein ECE-Weiß ergibt. Hierbei ist die Kühlung des Systems äußerst aufwendig, der notwendige Bauraum im Vergleich zur LED sehr groß und kann aufgrund dessen und des für andere Lichtfunktionen geringen Strahlungsflusses auch nur als Zusatzfernlicht angeboten werden.

Vollständige Scheinwerfersysteme, welche sowohl Abblendlichtfunktionen und Fernlicht, als auch andere denkbare Lichtfunktionen realisieren, sind mit Hilfe dieses Systems bisher nur bedingt, bis gar nicht umsetzbar. Ab einer gewissen Leistung beginnt in den YAG:Ce Leuchtstoffen aufgrund der zu hohen thermischen Belastung das sogenannte „Quenching“. Unter diesem Ausdruck kann eine durch die Wärme entstehende Fluoreszenzlöschung verstanden werden, in der die anregende Strahlung zwar noch absorbiert wird, allerdings keine oder nur sehr geringe Anteile an konvertierter Strahlung emittiert werden. Dies bedeutet, die Nachteile des heutigen Lasersystems liegen einerseits in der Wärmeableitung der Systeme, vor allem aber im Verlust der Kohärenz und der Polarisation des Laserlichts, welche durch die Konversion in diffuses Weißlicht verloren gehen. Diese zwei Haupteigenschaften einer Laserlichtquelle, vor allem aber die Polarisation, wären für diverse Anwendungen wünschenswert. So würde durch die Nutzung von polarisierter Strahlung in Kombination mit LC-Displays im Vergleich zu konventionellen Leuchtmitteln wie die LED 50 % weniger Licht verloren gehen.

Ein weiterer Vorteil des Lasers ist die nahezu verlustfreie Einkopplung in Glasfasern, weshalb die Lichtquelle an beliebiger Stelle im Automobil platziert werden könnte. Mittels einer Standard-Kommunikationsglasfaser könnte das Licht dann zu den Scheinwerfern transportiert und weiterverarbeitet werden. Hierzu ist allerdings ein weißer, räumlich kohärenter Laserstrahl nötig, um eine nahezu verlustfreie Kopplung zu gewährleisten. Der weiße Festkörperlaser wäre also eine benötigte Grundkomponente zur Realisierung einer Remote-Laser-Lichtquelle [Han2016].

Polarisiertes und räumlich kohärentes Laserlicht kann durch die Nutzung des hier präsentierten Ansatzes auf Basis eines Pr^{3+}-Ionen dotierten Yttrium-Lithium-Fluorid Kristalls (kurz Pr:YLF) zur Realisierung eines polychromatischen „Weißlichtlasers“ erzeugt werden. Die Umsetzung eines monochromatischen Festkörperlasers auf Basis eines Pr:YLF Kristalls ist bereits hinreichend bekannt. Mittels eines Pr:YLF basierten Lasers lassen sich Emissionen im sichtbaren Wellenlängenbereich bei 480 nm, 523 nm, 607 nm, 639 nm und 721 nm mit diskreten Peaks realisieren, welcher beispielsweise bei den Pumpwellenlängen 445 nm und 480 nm angeregt werden kann. [Str2013]

Der hier vorgestellte Ansatz zielt auf eine simultane, stimulierte Emission bei $\lambda_{grün} = 523\,nm$ und $\lambda_{rot} = 639\,nm$ unter Ausnutzung einer Pumpquelle bei $\lambda_{blau} = 445\,nm$ ab. Somit wären die drei benötigten Komponenten RGB zur Erzeugung einer Emission im ECE-Weißbereich vorhanden, was eine Grundvoraussetzung für die Nutzung der Remote-Laser-Lichtquelle im Automobil darstellt. Da die rote Emission eine höhere

Leistung als die grüne Emission aufweist, müssen die spektralen Anteile mittels Filter zum Erzielen eines weißen Laserstrahls auf das richtige Verhältnis zwischen Rot, Grün und Blau angepasst werden. Das Verhältnis zum Erreichen eines Farborts im ECE-Weißbereich für diskrete rote, grüne und blaue Emissionen in den genannten Wellenlängenbereichen liegt bei $R = 50{,}5\,\%$, $G = 31{,}8\,\%$ und $B = 17{,}7\,\%$.

Zu wählen ist für diesen Weißlicht-Festkörperlaser eine geeignete Resonatorgeometrie. Aufgrund des vergleichsweise geringen Justageaufwandes soll ein hemisphärischer Resonator mit Spiegelradien bei $R_1 = \infty$ und $R_2 = \sim L_{Resonatorlänge}$ umgesetzt werden (vgl. Abbildung 1). Hierbei sind hohe Anforderungen an die Transmissions- und Reflektionseigenschaften der Spiegel zu richten. Der Einkoppelspiegel R_1 muss möglichst hochtransmittiv für die Pumpstrahlung sein, sowie möglichst 100 % Reflektivität für Rot und Grün aufweisen können. Der Auskoppelspiegel hingegen benötigt unterschiedliche Reflektionsgrade für Rot und Grün, soll allerdings erneut einen Großteil der blauen Strahlung transmittieren, um den Blauanteil der RGB-Lichtquelle zu gewährleisten. Aus der Arbeit von STROTKAMP [Str2013] geht hervor, dass ein Anschwingen des grünen Lasers erst ab einer Reflektivität des Auskoppelspiegels R_2 über 98 % möglich ist. Die Reflektionseigenschaft des Auskoppelspiegels für den roten Wellenlängenbereich besitzt einen größeren Spielraum zur Umsetzung stimulierter Emission (Laseremissionen wurden bereits bei Reflektivitäten von etwa 95 % bis 98 % gezeigt [Zhe2013]). Für den Aufbau eines derartigen Festkörperlasers (sowohl bei simultaner, als auch bei oszillierender Emission) ist ein möglichst verlustfreier Resonator nötig. Hierfür muss der Pr:YLF Kristall mit einer Antireflexions-Beschichtung auf den Stirnflächen ausgestattet sein.

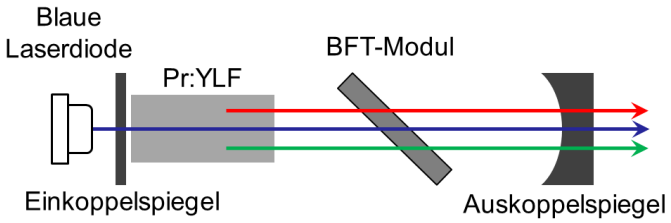

Abbildung 1: Schematische Darstellung des genutzten Aufbaus zur Realisierung der Emission mehrerer Wellenlängen aus einer Kavität mittels BFT-Moduls (Birefringent-Filter-Tuner)

Damit eine simultane Emission von zwei Wellenlängen erzielt werden kann, muss der Lawineneffekt für Photonen beider Energien in etwa ausgeglichen sein. Hierzu wurde in ersten Versuchen gezeigt, dass benachbarte Laserlinien des Pr^{3+}-dotierten Kristalls simultan angeregt werden können. Wie in Abbildung *2* dargestellt, konnte eine zeitgleiche Emission zweier Wellenlängen bei 523 nm und 546 nm (Abb.2 a)), 607 nm und 639 nm (Abb. 2 b)), 607 nm und 698 nm (Abb.2 c)), 639 nm und 698 nm (Abb.2 d)), sowie 639 nm und 721 nm (Abb.2 e)) gezeigt werden. Des Weiteren konnte ein Zustand mit der simultanen Emission dreier verschiedener Wellenlängen bei 607 nm, 639 nm und 721 nm generiert werden (Abb.2 f)). Die Stabilität dieses Systems ist aktuell problematisch, da die Intensität der zwei, bzw. drei emittierten Wellenlängen zeitweise schwanken kann. Somit kann eine stabile Emission mehrerer Spektrallinien nur mit einem sehr hohen Justage-Aufwand erzeugt werden.

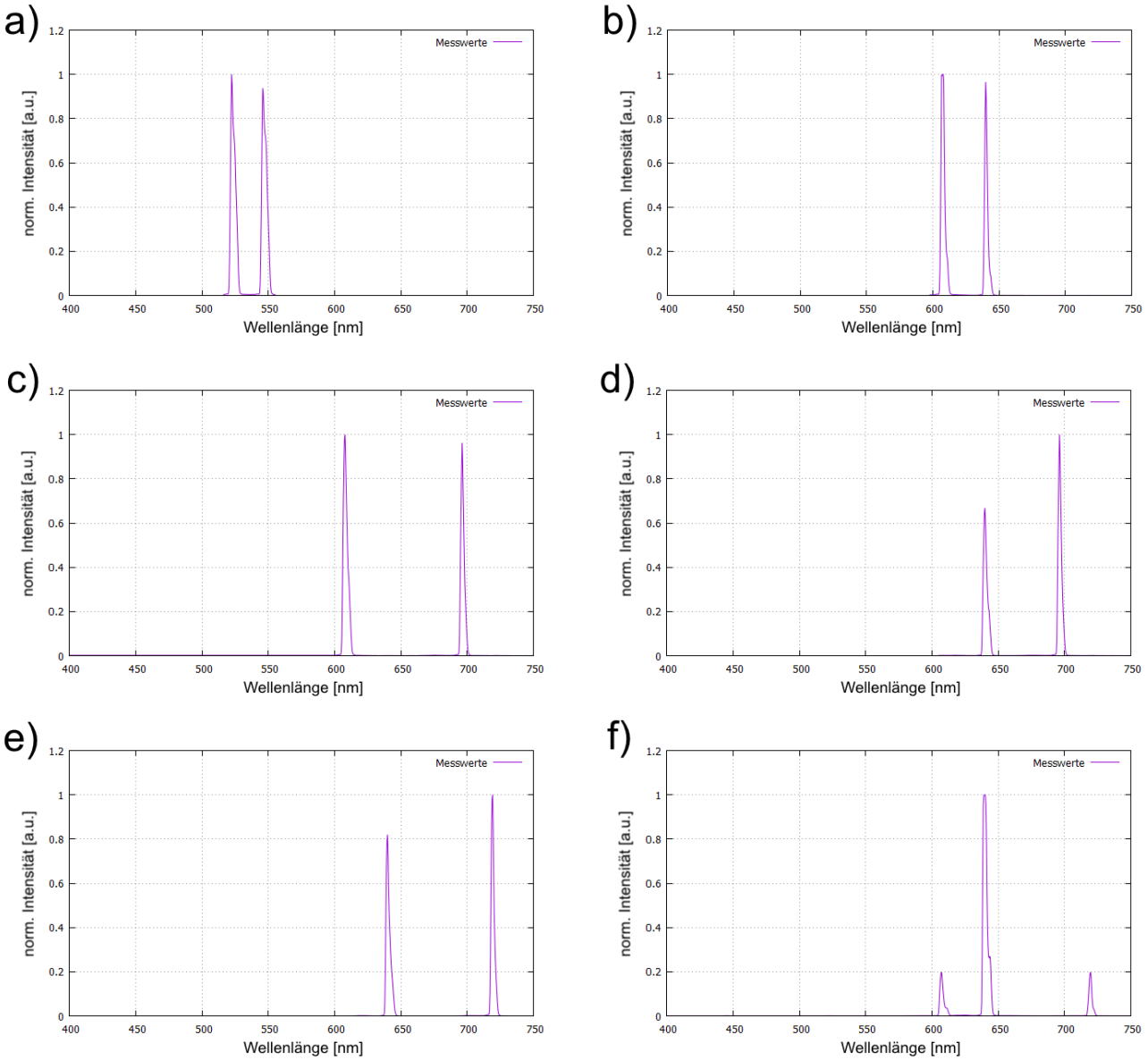

Abbildung 2: Simultane Laseremission des Pr:YLF Kristalls aus einer Kavität für zwei Wellenlängen bei a) 523 nm und 546 nm, b) 607 nm und 639 nm, c) 607 nm und 698 nm, d) 639 nm und 698 nm, e) 639 nm und 721 nm sowie für drei Wellenlängen zeitgleich bei f) 607 nm, 639 nm und 721 nm.

Für die Realisierung der Emission multipler Wellenlängen wurde ein hemisphärischer Resonator genutzt, welcher im Strahlengang ein BFT-Modul („Birefringent Filter Tuning“) im Brewsterwinkel zur optischen Achse aufweist. Mittels dieses BFT-Moduls können verschiedene Wellenlängen durchgestimmt und somit monochromatische Emissionen bei 523 nm, 546 nm, 607 nm, 627 nm, 639 nm, 698 nm und 721 nm erreicht werden. In den Übergangsbereichen zwischen den Emissionen mehrerer Peaks wurde ein Bereich ermittelt, bei dem der Laser simultan auf zwei Wellenlängen emittiert. Aufgrund der Ausprägung bzw. der Stärke der Peaks, konnten allerdings nur simultane Emissionen bei den o.g. Wellenlängen erzielt werden. Es gilt nun diese simultane Emission für Grün und Rot zu zeigen, um einen weißen Laserstrahl realisieren zu können. Erste Versuche hierzu werden aktuell im Labor umgesetzt, konnten allerdings bislang keine Ergebnisse erzielen.

Alternativ zur simultanen Emission wäre eine Oszillation des Lasers zwischen diesen beiden Wellenlängen denkbar. Die Idee ist demnach die Laseremission zwischen Grün und Rot mit einer Geschwindigkeit von >>24 Hz umzuschalten, um dem Auge einen Weißeindruck zu suggerieren. Mittels dieses Ansatzes würden mögliche Probleme, welche bei der simultanen angeregten Emission von Rot und Grün auftreten, vermieden werden. Eine solche Umschaltung könnte über die Rotation des BFT-Moduls generiert werden. So könnte dieser doppelbrechende Kristall genutzt werden, um die stimulierte Emission in dem Resonator zwischen roter und grüner Emission oszillieren zu lassen. Durch die Transmission der nicht absorbierten blauen Pumpstrahlung und der Umschaltung soll schließlich ein weißer Farbeindruck generiert werden.

Bei der Umsetzung des weißen Festkörperlasers sind die Emissionen aktuell allerdings nicht stark genug, um eine Ausleuchtung mit diesem System umsetzen zu können. Hierzu ist zu sagen, dass in diesem ersten Versuchsaufbau nur das Funktionsprinzip bewiesen werden soll und keine Leistungsoptimierung berücksichtigt wird. Die ersten Schritte zur Realisierung des weißen Festkörperlasers konnten in dieser Arbeit gezeigt werden. Nun gilt es, die Wellenlängen anzupassen, um eine simultane Emission von RGB umsetzen zu können. Für die Realisierung wird der Versuchsaufbau weiter optimiert, sodass Rot und Grün zeitgleich stimuliert werden.

Das Paradoxon weißer Festkörperlaser kann durch weitere Anpassungen des Aufbaus und durch die Wellenlängenkorrektur auf Grün und Rot Realität werden. Ein kohärenter und polarisierter weißer Laserstrahl würde Vorteile in Bezug auf Koppeleffizienzen in Glasfasern sowie in Beleuchtungsmodulen in Kombination mit LC-Displays bieten. Allerdings ist zu erwähnen, dass die hier erzeugten optischen Leistungen für eine Beleuchtung nicht ausreichend sind. Vielmehr sollte hier nur das Prinzip der simultanen Emission mehrerer Wellenlängen verdeutlicht werden.

Quellenverzeichnis

[Han2016] Hansen, Julien. *Remote-Laser-Lichtquelle für das Automobil*, Tagungsband Licht 2016.

[Str2013] Michael Strotkamp. *Kompakte, grün emittierende Laser auf Basis von Pr:YLF*. PhD thesis, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2013.

[Zhe2013] Liu Zhe. *Research on Spectroscopic Properties and Laser Performance of Pr:YLF Crystal.* PhD thesis, Xiamen University, 2013.