

Mehrfarbig emittierende, diodenerregte
Aufkonversions-Laser auf Basis Pr,Yb-dotierter
Fluoridglasfasern

Stefan Salewski

Institut für Laser-Physik
Universität Hamburg

Disputation, 2. Mai 2005

Gliederung

1. Motivation
2. Pr,Yb-dotierte Fluoridglas-Faserlaser
3. Einfarbig emittierende Laser
4. Charakterisierung der Fasern
5. Farbumschaltung
6. Leistungsstabilisierung
7. Zusammenfassung

Motivation

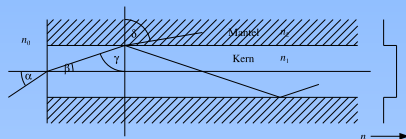
Warum Pr,Yb-dotierte Faserlaser?

- ▶ Vielzahl anregbarer Laserübergänge (u. a. 492, 521, 635 nm)
- ▶ Anregung durch IR-Laserdiode möglich (Aufkonversion)
- ▶ Gute Lasereffizienz

Anwendungen

- ▶ Ersatz für Argon-Ionen-Laser (488 nm \rightarrow 492 nm)
- ▶ Mehrfarbige Laser-Lichtquelle für
 - ▶ Konfokale Fluoreszenz-Mikroskopie
 - ▶ Optische Datenspeicherung
 - ▶ Ausbelichtung von Digitalphotos
 - ▶ Laserdisplays

Lichtwellenleiter



Stufenindexfaser.

Lichtführung durch Totalreflexion

Kern von der Größenordnung der Lichtwellenlänge:

⇒ Beschreibung der Lichtausbreitung durch Maxwell-Gl.

⇒ Fasermode

$$\lambda_{\text{cut}} = 2\pi \frac{a}{2,405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \equiv NA)$$

$\lambda > \lambda_{\text{cut}}$:

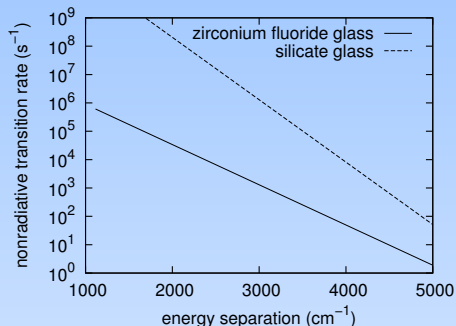
⇒ Faser führt nur die Grundmode LP_{01} (nahezu gaußförmig)

⇒ Austretendes Licht ist nahezu beugungsbegrenzt ($M^2 \approx 1$)

Fluoridglas

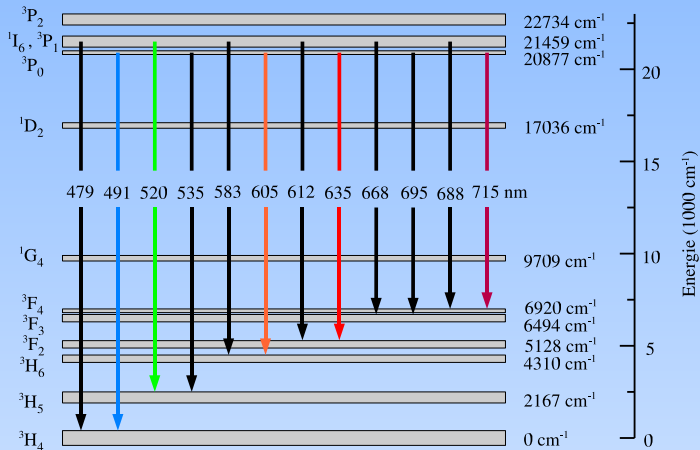
Gegenüber Silikatglas geringere maximale Phononenenergie

- ▶ geringere nichtstrahlende Zerfallsraten
- ▶ geringere phononische Verbreiterung der Energieniveaus
 - ▶ höhere Übergangsrate für induzierte Emission
 - ▶ höherer Lichtverstärkung

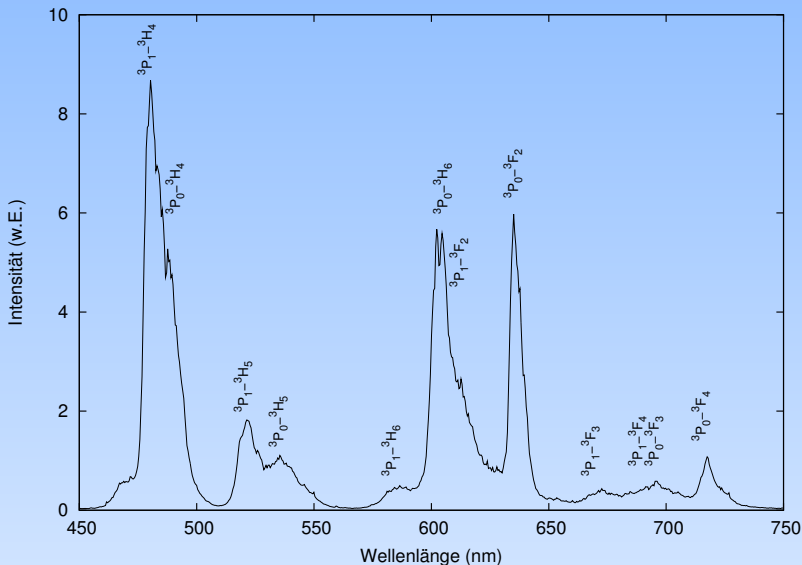


Nicht-Strahlende Zerfallsraten für ZBLAN- und Silikat-Gläser (France 1991: *Optical Fibre Lasers and Amplifiers*).

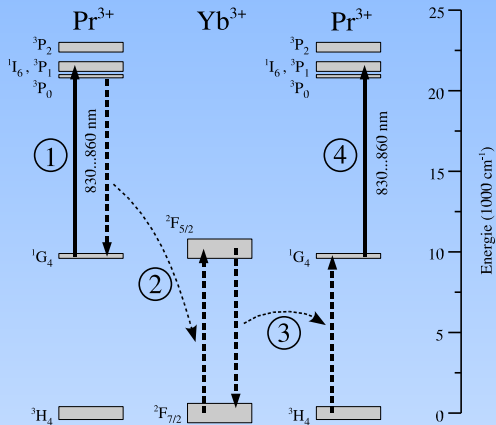
Energieniveau-Schema des Pr³⁺-Ions



Energieniveau-Schema des dreifach positiv geladenen Praseodym-Ions in Fluoridglas (Zahlenwerte nach Smart 1991).

Fluoreszenzspektrum einer Pr^{3+} , Yb^{3+} -dotierten Faser

Anregungsprozess¹



Dotierung:^a

- ▶ 3 000 ppm Pr³⁺
- ▶ 20 000 ppm Yb³⁺

Pumpprozess:

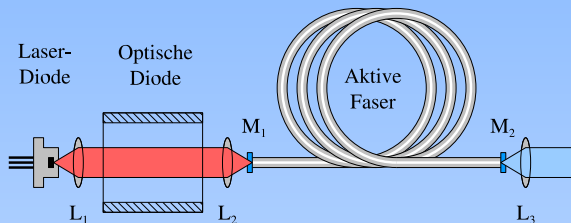
- ▶ ¹G₄ → ¹I₆

^aPing Xie and
T.R. Gosnell (1995)

Aufkonversions-Anregungsprozess durch Kreuzrelaxation.

¹T. Sandrock, E. Heumann, G. Huber, V. Lupei, B. Bejan, E. Osiaç:
Visible Emission under Sensitized Photon Avalanche Upconversion (1996)

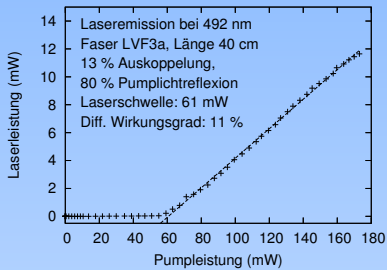
Einfarbig emittierende Laser



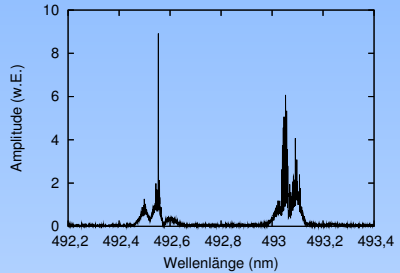
Schematischer Aufbau des Lasersystems.

- ▶ Kompakter, robuster Aufbau
- ▶ Gute Effizienz \Rightarrow geringer Energiebedarf, wenig Abwärme
- ▶ Emission von mehr als 10 mW bei 492, 521 oder 635 nm
- ▶ Beugungsbegrenzte Strahlqualität ($M^2 \approx 1$)
- ▶ Rauschen: 1 bis 5 % (RMS)
- ▶ Relativ geringe Stückkosten

Laseremission bei 492 nm

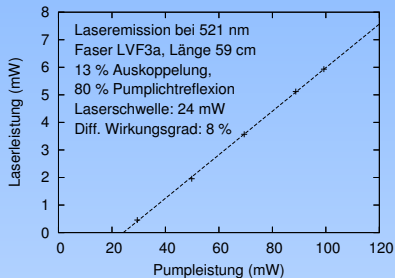


Ausgangsleistung (LVF3a).

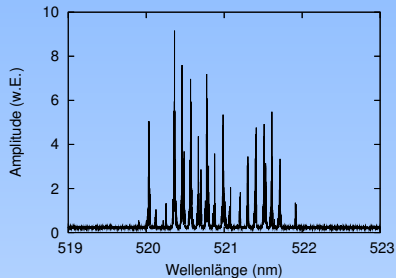


Emissionsspektrum (LVF3a).

Laseremission bei 521 nm

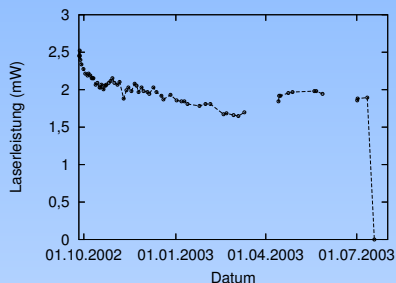


Kennlinie (LVF3a).

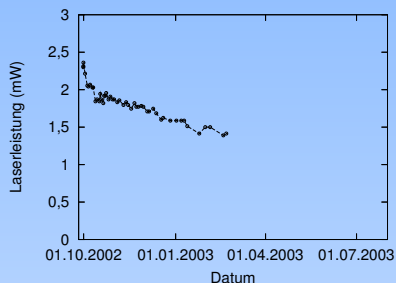


Emissionsspektrum (LVF3a).

Dauerhaltbarkeit bei 492 nm Emissionswellenlänge



Langzeittest einer Faser von Typ LVF3a (492 nm).



Langzeittest einer Faser von Typ LVF3a (492 nm).

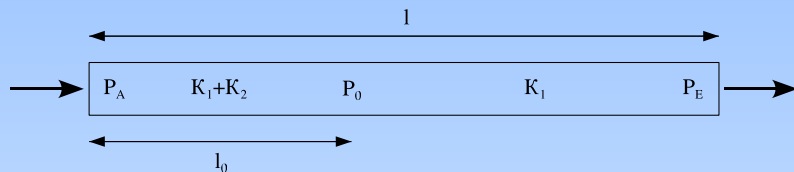
- ▶ Bei geeigneter Präparation und Abkapselung der Faserendflächen liegt die Lebensdauer der Laser in der Größenordnung von 5 000 Stunden und mehr!

Modell für die Pumplichtabsorption

Absorption des Pumplichtes setzt erst ab einer bestimmten Leistungsdichte P_0 im Faserkern ein:

$P < P_0$: minimale Dämpfung (Streuung)

$P > P_0$: starke Dämpfung durch Absorption

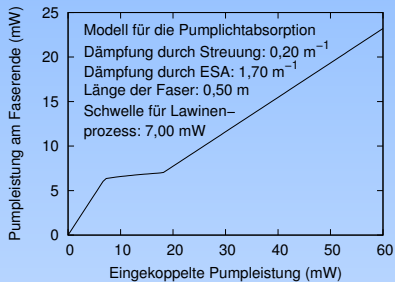


$$P_A < P_0 \quad : \quad P_E = P_A e^{-\kappa_1 l},$$

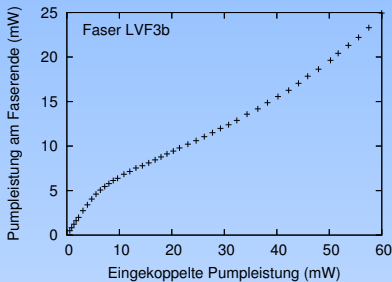
$$P_A > P_0, l < l_0 : P_E = P_A e^{-(\kappa_1 + \kappa_2)l},$$

$$P_A > P_0, l > l_0 : P_E = P_A e^{-(\kappa_1 + \kappa_2)l_0} \cdot e^{-\kappa_1(l-l_0)}.$$

Vergleich des Modells mit gemessener Pumplichtabsorption

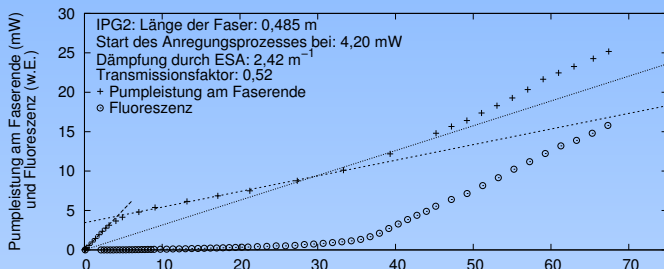


Transmission nach Modell.

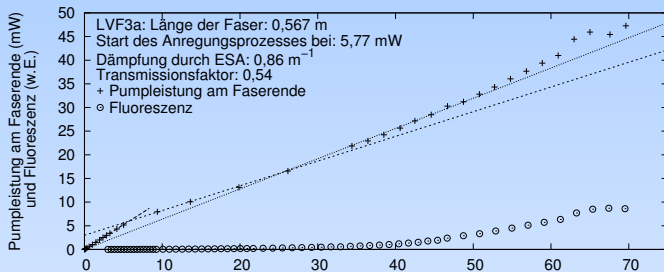


Transmission der Faser LVF3.

Absorptionskurven



Pumpleistung, die ohne ESA (und ohne Fresnelreflex) aus der Faser austreten würde (mW)



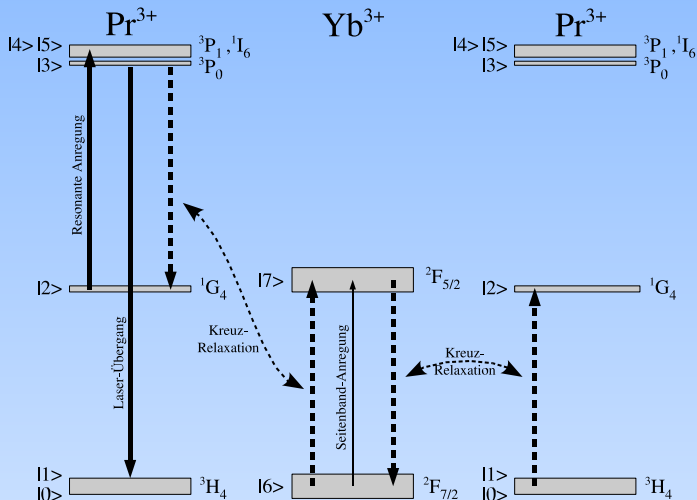
Pumpleistung, die ohne ESA (und ohne Fresnelreflex) aus der Faser austreten würde (mW)

Pumplichtabsorption verschiedener Fasertypen

Fasertyp	V (840 nm)	$P_{\text{core}}/P_{\text{tot}}$	κ_{ESA} (m^{-1})	$\kappa_{\text{ESA}}/(P_{\text{core}}/P_{\text{tot}})$ (m^{-1})
IPG2	2,19	0,79	2,42	3,06
KDD2	1,51	0,59	1,34	2,27
LVF2	1,80	0,70	$\geq 1,71$	$\geq 2,44$
LVF3a	1,57	0,61	0,86	1,41
LVF3b	1,70	0,65	1,61	2,48
LVF5	2,47	0,84	$\geq 3,60$	$\geq 4,29$
LVF6	1,57	0,61	$\geq 1,18$	$\geq 1,93$
LVF8	2,07	0,77	$\geq 1,65$	$\geq 2,14$

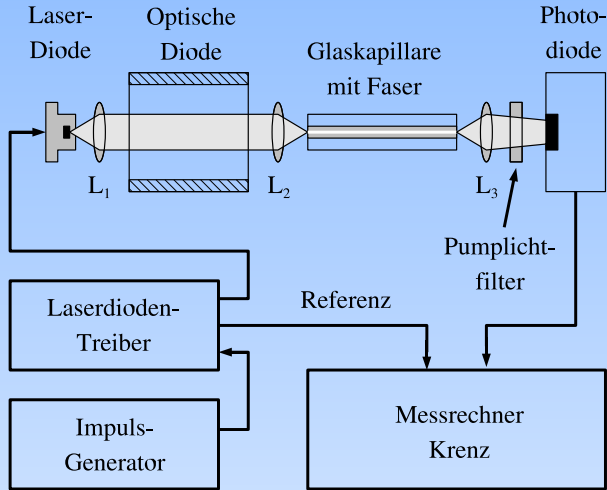
$$(V = 2\pi \frac{a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2})$$

Lebensdauer der angeregten Zustände

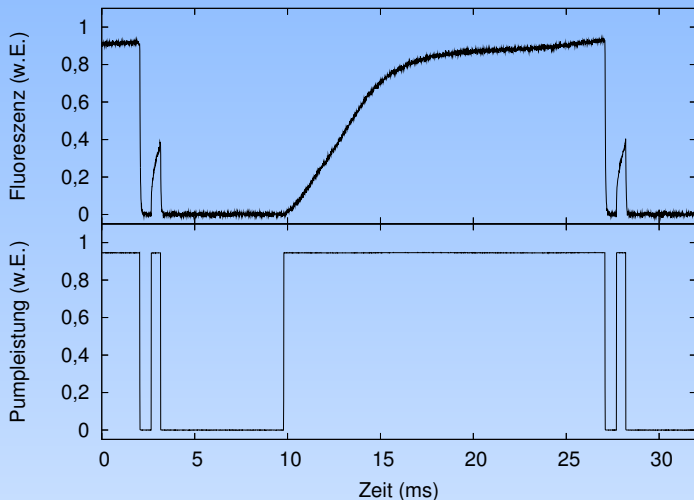


Am Anregungs- und Laserprozess beteiligte Energieniveaus.

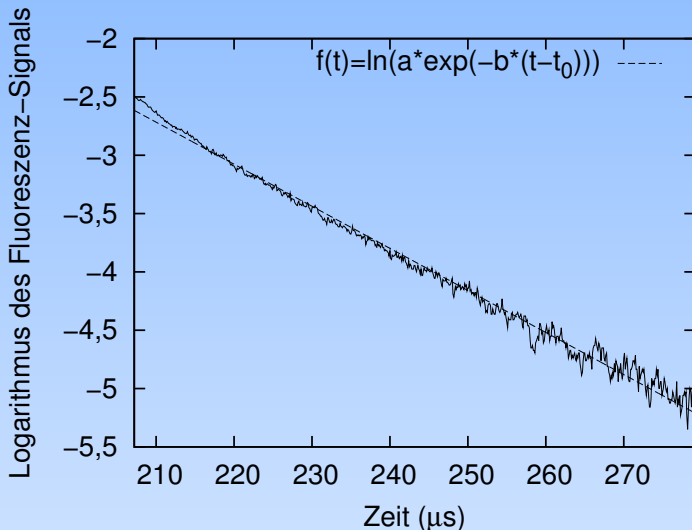
Versuchsaufbau für die Lebensdauermessungen



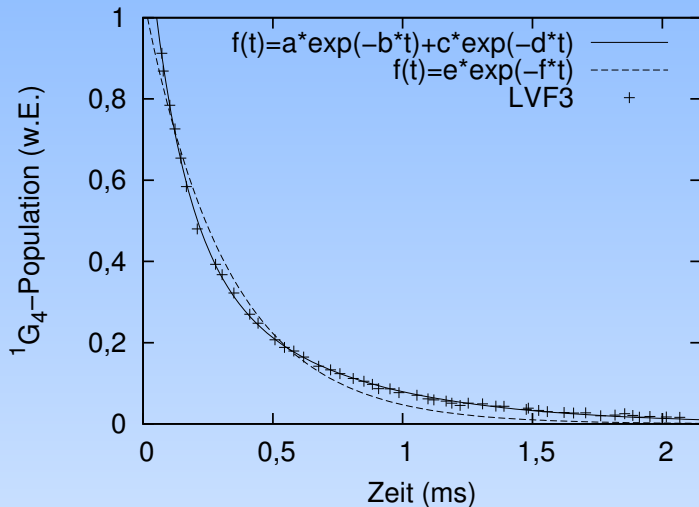
Lebensdauer der angeregten Zustände



Fluoreszenz-Signal (oben) bei modulierter Pumpleistung (unten) (LVF3).

Zerfall der Besetzung des oberen Laserniveaus 3P_0 

Zerfall der Besetzung des 1G_4 -Niveaus



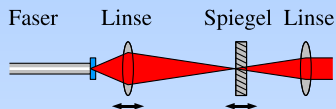
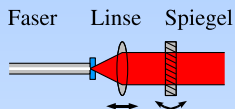
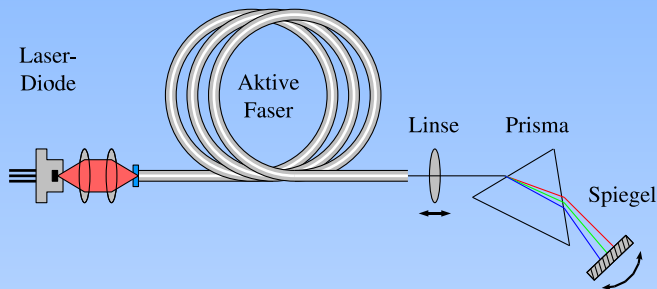
Faser LVF3.

Faser	Dotierung		3P_0	1G_4	$^2F_{5/2}$	P
	$N_{Pr} \text{ (m}^{-3}\text{)}$	$N_{Yb} \text{ (m}^{-3}\text{)}$	$\tau_1 \text{ (}\mu\text{s)}$	$\tau_2 \text{ (}\mu\text{s)}$	$\tau_3 \text{ (}\mu\text{s)}$	(mW)
LVF3	$5,49 \cdot 10^{25}$	$3,66 \cdot 10^{26}$	$29,2 \pm 0,5$	137	568	100
LVF3''	$5,49 \cdot 10^{25}$	$3,66 \cdot 10^{26}$	$27,3 \pm 1,2$	158	572	60
LVF5	$5,49 \cdot 10^{25}$	$3,66 \cdot 10^{26}$	$25,7 \pm 0,2$	144	569	94
LVF5'	$5,49 \cdot 10^{25}$	$3,66 \cdot 10^{26}$	$25,3 \pm 0,3$	150	608	63
LVF5''	$5,49 \cdot 10^{25}$	$3,66 \cdot 10^{26}$	$24,9 \pm 0,4$	190	684	60
IPG2'	$2,63 \cdot 10^{25}$	$2,27 \cdot 10^{26}$	$25,9 \pm 0,5$	147	673	90
IPG2''	$2,63 \cdot 10^{25}$	$2,27 \cdot 10^{26}$	$25,1 \pm 1,0$	159	716	63
KDD2	$2,63 \cdot 10^{25}$	$2,27 \cdot 10^{26}$	$28,6 \pm 0,4$	161	662	110
LVF6	$5,49 \cdot 10^{25}$	$3,66 \cdot 10^{26}$	$28,8 \pm 0,4$	149	590	110
LVF6'	$5,49 \cdot 10^{25}$	$3,66 \cdot 10^{26}$	$28,2 \pm 0,9$	151	552	80
LVF8	$5,49 \cdot 10^{25}$	$3,66 \cdot 10^{26}$	$29,0 \pm 0,1$	190	662	110
LVF8'	$5,49 \cdot 10^{25}$	$3,66 \cdot 10^{26}$	$28,6 \pm 0,3$	182	697	63

τ_1 folgt aus der Anpassung einer Funktion der Form $f(t) = a e^{-(t-t_0)/\tau_1}$ an das exponentiell abklingende Fluoreszenzsignal des oberen Laserniveaus 3P_0 .

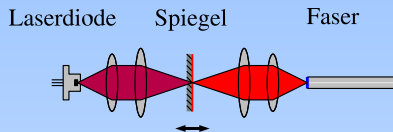
τ_2 bezeichnet die Lebensdauer des 1G_4 -Niveaus der Pr^{3+} -Ionen und wurde wie die Lebensdauer τ_3 des $^2F_{5/2}$ -Niveaus der Yb^{3+} -Ionen durch Anpassung einer Funktion der Form $f(t) = a e^{-t/\tau_2} + b e^{-t/\tau_3}$ an die Messdaten bestimmt.

Farbumschaltung durch Justierung optischer Elemente

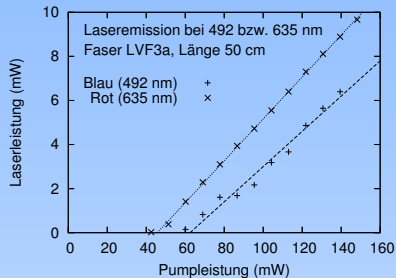


Oben Links: Allain u. a. 1991, Laseremission bei 610, 635, 695, 715, 885 und 910 nm (direkte Anregung durch einen Argon-Ionen-Laser bei 476 nm).

Farbumschaltung an der Einkoppelseite²



Farbumschaltung Blau/Rot auf der Einkoppelseite.



Emissionsleistung des umschaltbaren Lasers.

²O. Hellmig, Diplomarbeit 2004.

Farbumschaltung durch veränderte Spiegelreflexion

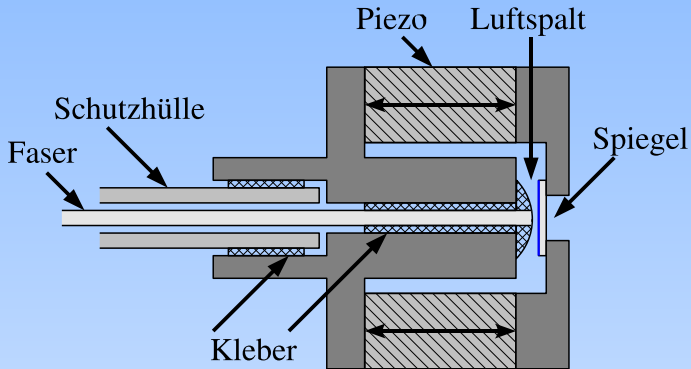
Dielektrische Schichten mit unterschiedlichen Brechungsindizes

- ▶ Wellenlängenabhängiger Reflexionsverlauf aufgrund der Interferenz der an der Grenzflächen reflektierten Teilwellen

Der Reflexionsverlauf wird bestimmt durch

- ▶ Brechungsindizes der Schichten
- ▶ Dicke der Schichten
- ▶ Anzahl der Schichten
- ▶ Einfallswinkel

Auskoppeleinheit zur Farbumschaltung



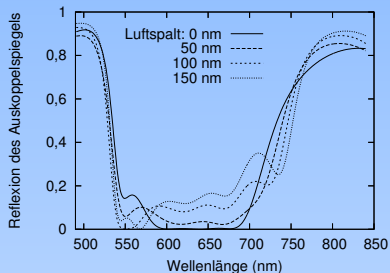
Veränderung der Spiegelreflexion durch einen variablen Luftspalt.

Auskoppelspiegel für Rot/Blau-Farbumschaltung

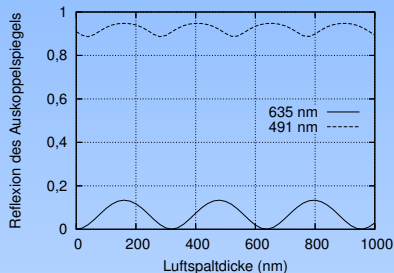
Schicht	HfO ₂ (nm)	SiO ₂ (nm)	HfO ₂ (nm)	SiO ₂ (nm)
01...04	167,1	110,9	127,3	124,0
05...08	138,3	101,8	100,5	163,1
09...12	100,5	081,6	202,3	084,2
13...16	078,3	058,7	069,8	077,7
17...20	073,7	062,0	070,5	078,3
21	035,9			

Schichtsystem für Farbumschaltung: Zwischen der 21. Schicht und der Faser befindet sich der Luftspalt.

Auskoppelspiegel für Rot/Blau-Farbumschaltung

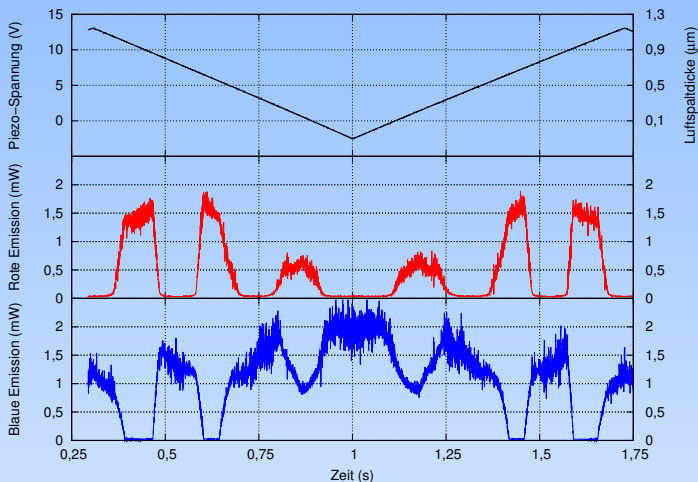


Veränderung des Reflexionsvermögens des Auskoppelspiegels durch die Größe des Luftspaltes (berechnet).



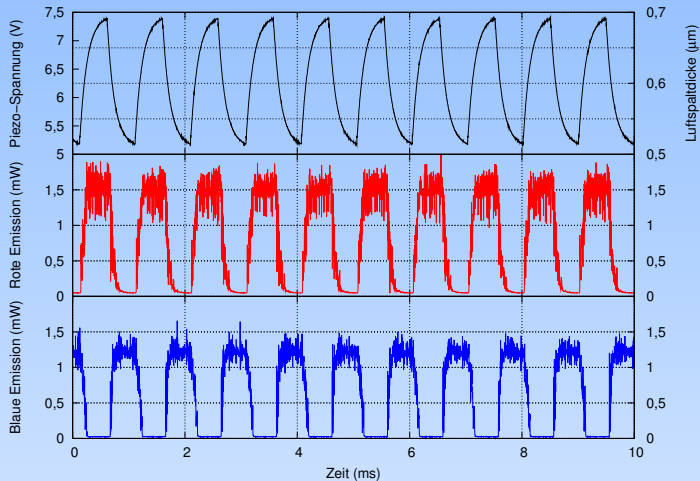
Spiegelreflexion bei 491 und 635 nm als Funktion vom Abstand des Spiegels zur Faser (berechnet).

Umschaltung der Emissionsfarbe durch Modulation des Abstandes des Auskoppelspiegels zur Faserendfläche



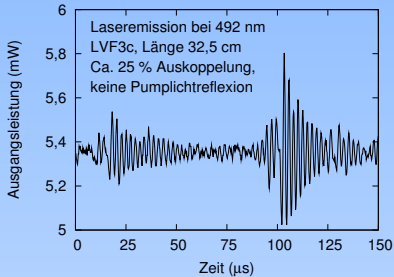
Farbumschaltung zwischen blauer und roter Laseremission.

Umschaltung der Emissionsfarbe durch Modulation des Abstandes des Auskoppelspiegels zur Faserendfläche

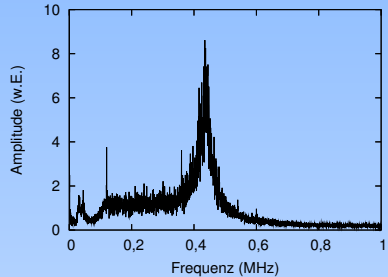


Farbumschaltung Rot/Blau durch schnelle Modulation der Luftspaltdicke.

Relaxationsschwingungen

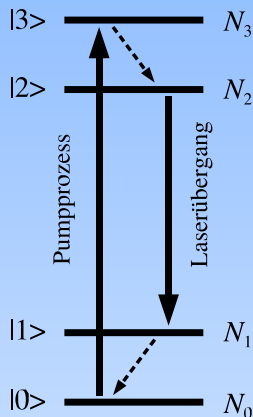


Relaxationsschwingungen.



Fourierspektrum.

Vierniveaulaser



Vier-Niveau-Laser.

Ratengleichungen:^a

$$N_0 \approx \text{const.}, \quad N_1 \approx 0, \quad N_2 = N_2(P), \\ N_3 \approx 0, \quad N = N_2 - N_1 \approx N_2$$

$$\dot{M} = BN(M + 1) - \gamma M$$

$$\dot{N} = -BNM - AN + P$$

γ : Photonenverlustrate

A : spontane Zerfallsrate von Niveau $|2\rangle$

B : Koeffizient für induzierte Emission

M : Anzahl Photonen im Resonator

P : Pumprate

^aSiegman 1986, Svelto 1999

Stationären Gleichgewichts mit kleinen Störungen³

$$M = M_0 + m(t), \quad m(t) \ll M_0$$

$$N = N_0 + n(t), \quad n(t) \ll N_0$$

$$P = P_0 + p(t).$$

⇒ Differentialgleichung

$$\ddot{m} + Ar_0\dot{m} + \gamma A(r_0 - 1)m(t) - A(r_0 - 1)p(t) = 0.$$

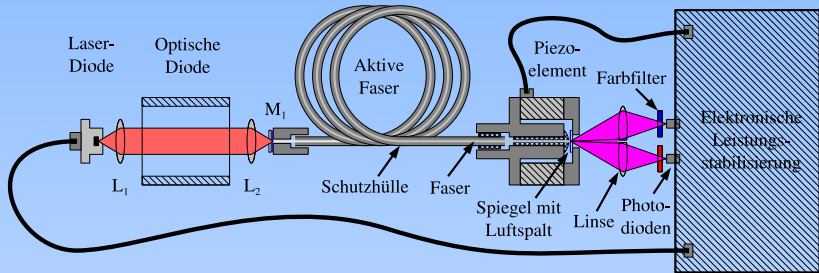
Für $(\frac{Ar_0}{2})^2 - \gamma A(r_0 - 1) < 0$

ergeben sich gedämpfte harmonische Schwingungen.

Dämpfung wird erhöht, wenn $p(t) \sim -\dot{M}$

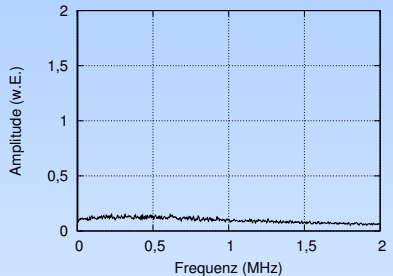
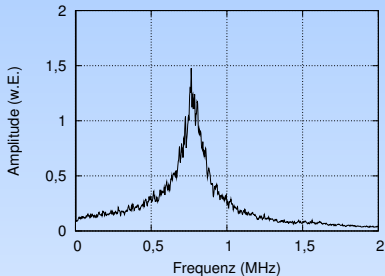
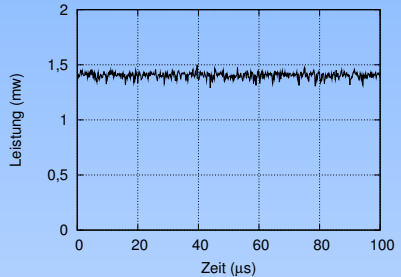
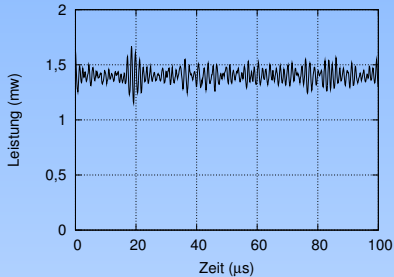
³Siegman 1986

Versuchsaufbau für mehrfarbige Leistungsstabilisierung

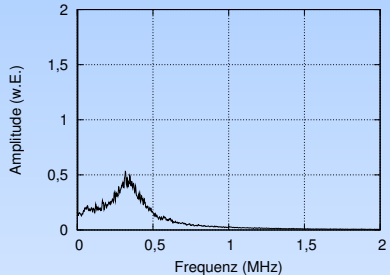
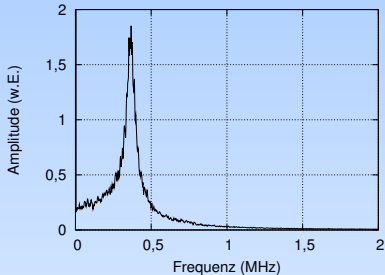
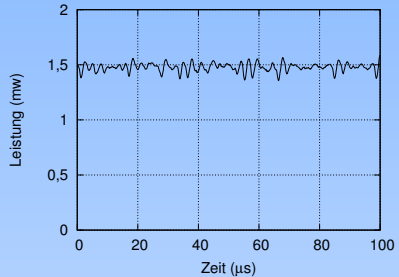
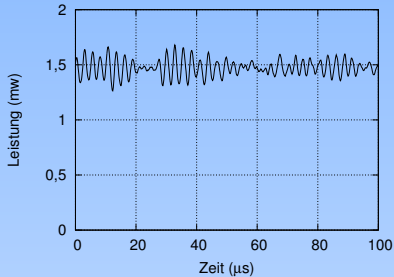


Versuchsaufbau zur Erprobung der Leistungsstabilisierung.

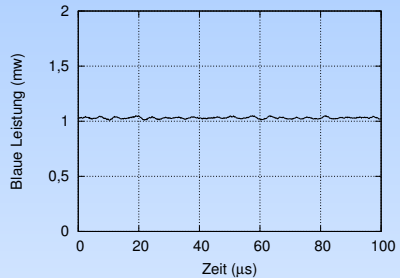
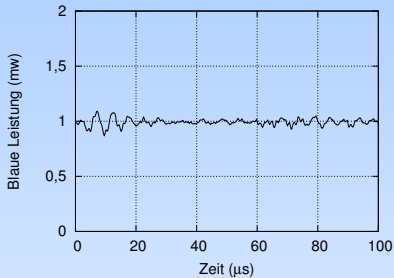
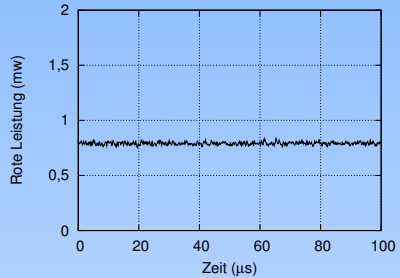
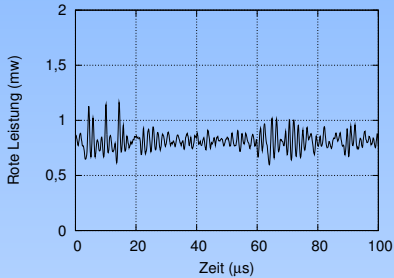
Leistungsstabilisierung bei roter Laseremission



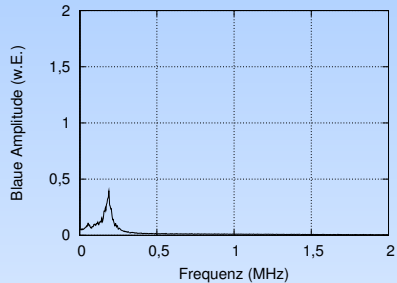
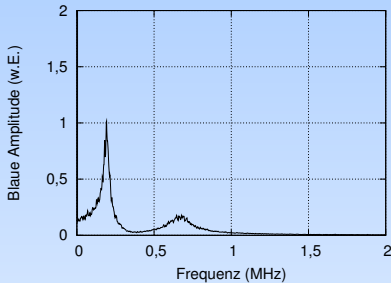
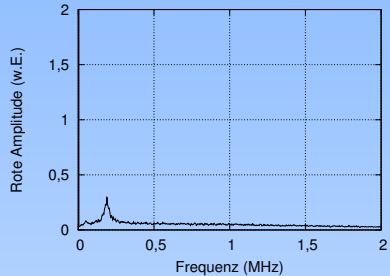
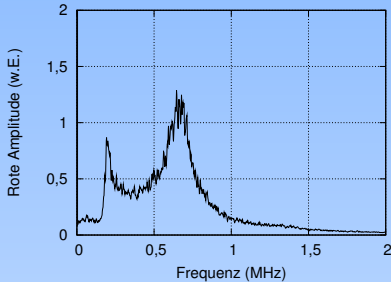
Leistungsstabilisierung bei blauer Laseremission



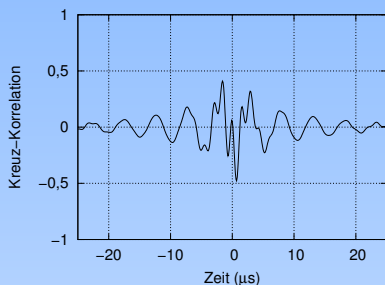
Zweifarbige Laseremission, ohne/mit el. Stabilisierung



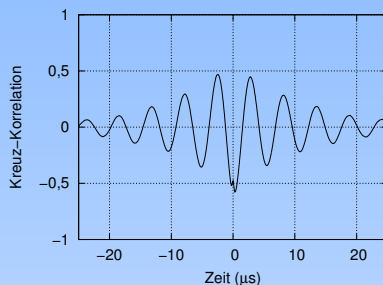
Zweifarbige Laseremission, ohne/mit el. Stabilisierung



Kreuzkorrelation der roten und blauen Laserleistung



Konstanter Pumpleistung.



Aktiver Leistungsstabilisierung.

Zusammenfassung

- ▶ Die physikalischen und technischen Grundlagen des Aufkonversions-Faserlasersystems wurden präsentiert
- ▶ Verschiedene physikalische Eigenschaften des Lasersystems wurden untersucht
 - ▶ U. a. Pumplichtabsorption und Lebensdauer der Laserniveaus
- ▶ Einfarbige Laseremission
 - ▶ Mehr als 10 mW Emissionsleistung bei 492, 521 und 635 nm bei 200 mW Pumpleistung (diodengepumpt)
- ▶ Mehrfarbiger Laserbetrieb
 - ▶ Farbumschaltung 635 nm \leftrightarrow 492 nm mit einem in Reflexionsverlauf steuerbaren Laserspiegel wurde in dieser Arbeit erstmalig demonstriert
 - ▶ Stabilisierte gleichzeitige Laseremission bei 635 und 492 nm