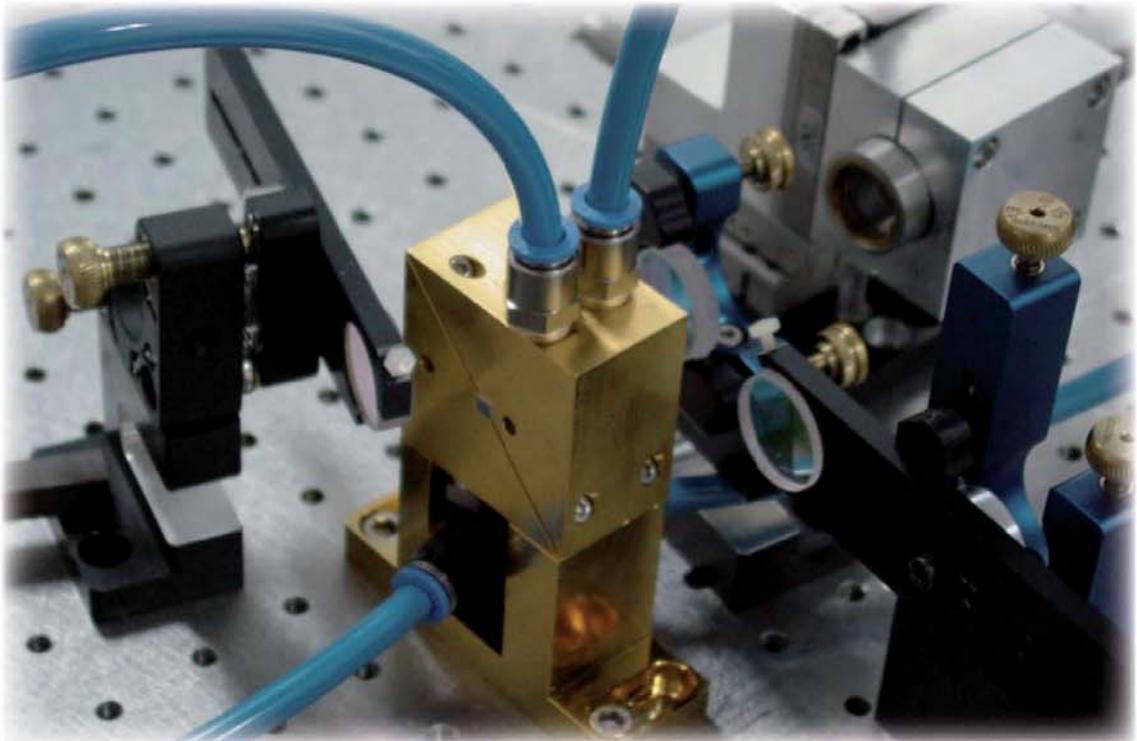


Florian Lenhardt

**Experimentelle Realisierung von neuen
Konzepten für Hochleistungs-Nd:YVO₄-
Laser bei 1342 nm**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



Experimentelle Realisierung von neuen Konzepten
für Hochleistungs-Nd:YVO₄-Laser bei 1342 nm





Experimentelle Realisierung von neuen Konzepten für Hochleistungs-Nd:YVO₄-Laser bei 1342 nm

Dissertation

Florian Lenhardt

Vom Fachbereich der Physik der Universität Kaiserslautern zur
Verleihung des akademischen Grades „Doktor der
Naturwissenschaften“ genehmigte Dissertation

Betreuer: *Dr. habil. J. L’huillier*
Zweitgutachter: *Prof. Dr. R. Beigang*

Datum der wissenschaftlichen Aussprache: 11. Januar 2012

D 386



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2012

Zugl.: Kaiserslautern, Univ., Diss., 2012

978-3-95404-045-2

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2012

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2012

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-95404-045-2

Abstract

Experimental Realization of New Concepts for High-Power Nd:YVO₄ Lasers at 1342 nm

The subject of this work is the development and characterization of high-power continuous-wave, nanosecond and picosecond 1342 nm lasers based on the solid-state material Nd:YVO₄. For such compact and efficient diode laser-pumped solid-state lasers at 1342 nm, there is a wide variety of application fields, such as for example in fiber optics or in medicine. In particular, the second and third harmonic of the 1342 nm radiation at the wavelengths 671 nm and 447 nm in the red and blue spectral region open another large field of applications, especially for wavelength-sensitive processes in the visible.

In order to generate 1342 nm laser radiation the ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ transition in Nd:YVO₄ is exploited. This offers a lower stimulated emission cross section in comparison with the strongest transition at a wavelength of 1064 nm. Until now, the output power of 1342 nm lasers was limited by the huge heat load into the laser crystal for 1342 nm emission. Due to the high quantum defect and the additional excited state absorption, 40 % of the absorbed pump power contributes directly to the heat load of the crystal. This leads to very strong thermal lensing and in extreme cases to the destruction of the laser crystal. By pumping at 888 nm and using a low doped 30 mm long Nd:YVO₄ crystal the heat load can be spread over a larger volume of the laser crystal. This opens the opportunity to use high pump powers of up to 110 W without risking damage of the crystal and the thermal lens is considerably reduced. With the help of a numerical simulation of the thermo-optical and thermo-mechanical properties of the laser crystal and the experimental determination of the focal length of the thermal lens it is possible to develop a resonator, which allows for stable mode matched laser operation.

Utilizing this pump concept a laser can be realized, which emits diffraction-limited continuous-wave laser radiation at a maximum output power of 24 W. So far, there are no powerful continuous-wave light sources in the red spectral range based on frequency doubling of a solid-state laser at 1.3 μm . This is caused by the lack of appropriate 1.3 μm lasers. Based on this continuous-wave laser at 1342 nm it is possible to efficiently generate radiation at 671 nm by external frequency doubling in magnesium oxide doped periodically poled lithium niobate (MgO:PPLN). The conversion efficiency is 51 %, corresponding to an output power of 10 W.

With the help of active Q-switching by an acousto-optical modulator (AOM) it is possible to modify the continuous-wave Nd:YVO₄ laser for the emission of nanosecond pulses with very high peak powers of up to 108 kW. By shortening the cavity it is possible to reach a minimum pulse duration of 14.8 ns. The average output power is, depending on repetition rate, between 10 W and 20 W. Thereby, the laser is optimized for an interval of repetition rates between 6 kHz and 30 kHz, wherefore the laser offers stable TEM₀₀ mode operation for this interval. The high peak powers and the excellent beam quality of the presented nanosecond Nd:YVO₄ laser ensure an efficient generation of the second and third harmonic in bismuth borate (BiBO) and accordingly lithium triborate (LBO). This leads to average output powers of 12.2 W at 671 nm and 6.8 W at 447 nm, corresponding to conversion efficiencies of 62 % and 49 %.

Until now the output powers for picosecond lasers at 1342 nm are limited due to the thermal problems at 1342 nm but especially because of the lack of appropriate mode-locking techniques at 1342 nm. The method of parametric Kerr-lens mode-locking (PKLM) is based on a lensing effect, equivalent to the Kerr effect, generated by a cascaded $\chi^{(2)}$ process in a nonlinear crystal. In the past with the help of PKLM it was possible to realize stable cw-mode-locking at 1064 nm. Therefore a possibility for power scaling of mode-locked lasers at 1342 nm can be demonstrated by transferring this technique to an emission wavelength of 1342 nm. The presented picosecond laser at 1342 nm offers self-starting cw-mode-locking by PKLM. Thereby no evidence for cw-underground in the mode-locked radiation shows up. A hard aperture is used in order to transform the phase modulation into a loss modulation. Thus, an average output power of up to 6.5 W with a pulse duration of 20 ps is achieved. A maximum peak power of 7.3 kW is emitted for an average output power of 4.8 W and a pulse duration of 4 ps. Thereby mode-locking is stable over several hours, without any signs of breakdown. The presented picosecond Nd:YVO₄ laser demonstrates for the first time mode-locking of a 1342 nm laser by pure PKLM. By external frequency doubling of the picosecond Nd:YVO₄ laser in a short MgO:PPLN crystal an average output power of 2.3 W with a conversion efficiency of 49 % is generated.

The present work proves, that with the help of 888 nm pumping and the analysis of the thermal properties of the laser material power scaling of lasers at 1342 nm is possible. Based on a powerful continuous-wave laser nanosecond pulses via AOM and picosecond pulses via PKLM can be produced. Furthermore it is possible to create powerful light sources in the visible spectral range by frequency doubling and tripling of the 1342 nm laser.

Kurzzusammenfassung

Experimentelle Realisierung von neuen Konzepten für Hochleistungs-Nd:YVO₄-Laser bei 1342 nm

Inhalt dieser Arbeit ist die Entwicklung und Charakterisierung von leistungsstarken kontinuierlich emittierenden, Nanosekunden- und Pikosekunden-1342 nm-Lasern, basierend auf dem Festkörpermateriale Nd:YVO₄. Für solche kompakte und effiziente Diodenlaser-gepumpte Festkörperlaser bei 1342 nm finden sich eine Vielzahl von Anwendungen, wie zum Beispiel in der Faseroptik oder in der Medizin. Vor allem die zweite und dritte Harmonische der 1342 nm-Strahlung, die bei 671 nm und 447 nm und damit im roten und blauen Spektralbereich liegen, eröffnen weitere große Anwendungsfelder, speziell für Wellenlängen-sensitive Prozesse im Sichtbaren.

Für die Erzeugung der 1342 nm-Laserstrahlung wird der ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ -Übergang in Nd:YVO₄ ausgenutzt. Dieser weist einen geringeren Wirkungsquerschnitt für die stimulierte Emission auf als der stärkste Übergang bei einer Wellenlänge von 1064 nm. Die Ausgangsleistung von 1342 nm-Lasern war bisher durch den sehr hohen Wärmeeintrag bei 1342 nm-Emission in den Laserkristall begrenzt. Aufgrund des hohen Quantendefekts und der zusätzlich auftretenden *excited state absorption* tragen 40 % der absorbierten Pumpleistung direkt zur Erwärmung des Kristalls bei. Dies führt zu sehr starken thermisch induzierten Linsen und im Extremfall zur Zerstörung des Laserkristalls. Durch die optische Anregung bei 888 nm und das Verwenden eines niedrig dotierten 30 mm-langen Nd:YVO₄-Kristalls kann die Wärmelast auf ein großes Volumen verteilt werden. Dadurch wird die Verwendung hoher Pumpleistungen von bis zu 110 W ohne Zerstörung des Kristalls möglich und die thermisch induzierte Linse wird erheblich reduziert. Durch eine numerische Simulation der thermo-optischen und thermo-mechanischen Eigenschaften des Laserkristalls und die experimentelle Bestimmung der Brennweite der thermischen Linsen ist es möglich einen Resonator zu entwickeln, der stabilen modenangepassten Laserbetrieb erlaubt.

Mit Hilfe dieses Pumpkonzepts kann ein Laser realisiert werden, der kontinuierlich eine beugungsbegrenzte Strahlung bei einer maximalen Ausgangsleistung von 24 W emittiert. Bisher gibt es keine leistungsstarken Dauerstrich-Strahlquellen im roten Spektralbereich, die auf der Frequenzverdopplung der Strahlung eines Festkörperlaser bei 1,3 μm basieren. Dies ist auf das Fehlen geeigneter Laser bei 1,3 μm zurückzuführen. Aufbauend auf dieser Dauerstrich-Strahlquelle bei 1342 nm kann mittels externer Fre-



quenzverdopplung in Magnesiumoxid-dotiertem periodisch gepolten Lithiumniobat (MgO:PPLN) effizient Strahlung bei 671 nm erzeugt werden. Die Effizienz beträgt hierbei 51 %, was einer Leistung von 10 W entspricht.

Mit Hilfe aktiver Güteschaltung durch einen akusto-optischen Modulator (AOM) ist es möglich den gegebenen Dauerstrich-Nd:YVO₄-Laser für die Emission von Nanosekunden-Impulsen mit sehr hohen Impulsspitzenleistungen von bis zu 108 kW zu modifizieren. Durch eine Verkürzung des Resonators kann dabei eine minimale Impulsdauer von 14,8 ns erreicht werden. Die mittlere Ausgangsleistung liegt, je nach Repetitionsrate, zwischen 10 W und 20 W. Der Laser ist dabei für den Repetitionsratenbereich zwischen 6 kHz und 30 kHz optimiert, weshalb er für diese Repetitionsraten stabilen Betrieb im Gauß'schen Grundmode aufweist. Die hohen Spitzenleistungen und sehr gute Strahlqualität des vorgestellten ns-Nd:YVO₄-Lasers gewährleisten eine effiziente Erzeugung der zweiten und dritten Harmonischen in Wismutborat (BiBO) beziehungsweise Lithiumtriborat (LBO). Es werden dabei mittlere Ausgangsleistungen von 12,2 W bei 671 nm und 6,8 W bei 447 nm erzeugt. Dies entspricht hohen Konversionseffizienzen von 62 % und 49 %.

Die Ausgangsleistungen für ps-Laser bei 1342 nm sind bisher zum einen aufgrund der thermischen Problematik bei 1342 nm, aber vor allem wegen des Fehlens von geeigneten Modenkopplungsverfahren bei 1342 nm beschränkt. Das Verfahren der parametrischen Kerrlinsen-Modenkopplung (PKLM) basiert auf einer, dem Kerr-Effekt äquivalenten, Linsenwirkung, die durch einen kaskadierten $\chi^{(2)}$ -Prozess in einem nichtlinearen Kristall erzeugt wird. Mit PKLM wurde in der Vergangenheit stabile cw-Modenkopplung bei 1064 nm erreicht. Daher kann durch die in dieser Arbeit vorgestellte Übertragung dieses Verfahrens auf eine Emissionswellenlänge von 1342 nm eine Möglichkeit der Leistungsskalierung aufgezeigt werden. Der vorgestellte Pikosekunden-Nd:YVO₄-Laser bei 1342 nm weist selbststartende cw-Modenkopplung mittels PKLM auf. Dabei ist kein Anzeichen für cw-Untergrund der modengekoppelten Strahlung erkennbar. Zur Umwandlung der Phasenmodulation in eine Verlustmodulation wird eine Modenblende verwendet. Dadurch wird eine mittlere Ausgangsleistung der modengekoppelten Strahlung von bis zu 6,5 W bei einer Impulsdauer von 20 ps erreicht. Eine maximale Impulsspitzenleistung von 7,3 kW wird bei einer mittleren Ausgangsleistung von 4,8 W und einer Impulsdauer von 4 ps emittiert. Die Modenkopplung ist dabei über mehrere Stunden stabil, ohne Anzeichen von Einbrüchen. Das System stellt damit den ersten mittels reiner PKLM modengekoppelten Laser bei 1342 nm dar. Durch externe Frequenzverdopplung des ps-Nd:YVO₄-Lasers in einem kurzen MgO:PPLN-Kristall

wird eine mittlere Ausgangsleistung von 2,28 W im roten Spektralbereich bei einer Konversionseffizienz von 49 % erzeugt.

Die vorliegenden Arbeiten belegen, dass mit Hilfe der optischen Anregung bei 888 nm und der Analyse der thermischen Eigenschaften des Lasermaterials eine Leistungsskalierung von Lasern bei 1342 nm möglich ist. Basierend auf einem leistungsstarken Dauerstrich-Laser können mittels AOM ns-Impulse und mit dem PKLM-Verfahren ps-Impulse erzeugt werden. Zudem kann durch die Frequenzverdopplung und Frequenzverdreifung der 1342 nm-Laser leistungsstarke Strahlung im sichtbaren Spektralbereich erzeugt werden.



Publikationen

Zeitschriftenbeiträge

1. F. Lenhardt, M. Nittmann, T. Bauer, J. Bartschke, and J. A. L’huillier: *High-power 888-nm-pumped Nd:YVO₄ 1342-nm oscillator operating in the TEM₀₀ mode*. Appl. Phys. B **96**, 803-807 (2009).
2. F. Lenhardt, C. Schäfer, C. Theobald, M. Nittmann, J. Bartschke, R. Knappe, and J. A. L’huillier: *888 nm pumped 1342 nm Nd:YVO₄ oscillator Kerr-lens mode-locked using cascaded second-order nonlinearities*. Appl. Phys. B **106**, 5-8 (2012).

Tagungsbeiträge (international)

1. F. Lenhardt, M. Nittmann, T. Bauer, J. Bartschke, and J. A. L’huillier: *24 W 888 nm pumped Nd:YVO₄ 1342 nm oscillator operating in the TEM₀₀ mode*. Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, Optical Society of America, 2009, paper CtuP4.
2. F. Lenhardt, A. Nebel, R. Knappe, M. Nittmann, J. Bartschke, and J. A. L’huillier: *Efficient Single-Pass Second Harmonic Generation of a Continuous Wave Nd:YVO₄-Laser at 1342 nm Using MgO:PPLN*. Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, Optical Society of America, 2010, paper CthEE5.

Tagungsbeiträge (national)

1. F. Lenhardt, T. Bauer, M. Nittmann, J. Bartschke und J. L’huillier: *888 nm gepumpter Nd:YVO₄-Hochleistungslaser im TEM₀₀-Mode bei 1342 nm*. DPG-Frühjahrstagung 2009, Hamburg.
2. F. Lenhardt, A. Nebel, R. Knappe, T. Bauer, J. Bartschke und J. A. L’huillier: *Effiziente Frequenzverdopplung im Einfachdurchgang eines kontinuierlich betriebenen Nd:YVO₄-Hochleistungslaser bei 1342 nm in MgO:PPLN*. DPG- Frühjahrstagung 2010, Hannover.
3. F. Lenhardt, A. Nebel, R. Knappe, T. Bauer, J. Bartschke und J. L’huillier: *888 nm diode-pumped nanosecond Nd:YVO₄-highpowerlaser at 1342 nm*. DPG-Frühjahrstagung 2011, Dresden.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Leistungskalierung diodengepumpter Festkörperlaser bei 1342 nm	7
2.1	Das Lasermaterial Nd:YVO ₄	8
2.1.1	Physikalische Eigenschaften	9
2.1.2	Spektroskopische und thermo-mechanische Eigenschaften	12
2.2	Thermische Eigenschaften von Nd:YVO ₄	15
2.2.1	Thermische Effekte in Laserkristallen	15
2.2.2	Thermische Belastung in Nd:YVO ₄ für Laseremission bei 1342 nm	16
2.3	Optimierte Anregung bei 888 nm	21
2.3.1	Anregung bei 808 nm	22
2.3.2	Anregung bei 888 nm	23
2.3.3	Charakterisierung der Laserdiode bei 888 nm	25
2.4	Analyse der thermo-optischen und thermo-mechanischen Eigenschaften	28
2.4.1	Numerische Simulation der thermo-optischen und thermo-mechanischen Eigenschaften	29
2.4.2	Experimentelle Bestimmung der thermischen Linse	39
3	Kontinuierlich emittierender Nd:YVO₄-Hochleistungslaser bei 1342 nm	45
3.1	Aufbau und Optimierung des kontinuierlich emittierenden Nd:YVO ₄ -Lasers bei 1342 nm	46
3.2	Charakterisierung des kontinuierlich emittierenden Nd:YVO ₄ -Hochleistungslasers bei 1342 nm	50
3.2.1	Leistungskennlinien	50
3.2.2	Spektrale Eigenschaften	52
3.2.3	Strahlqualität	53
3.3	Fazit	54



4	Aktiv gütegeschalteter Nd:YVO₄-Laser bei 1342 nm	57
4.1	Theoretische Grundlagen der Güteschaltung	59
4.1.1	Güteschaltung mit akusto-optischer Modulation	60
4.1.2	Aktive Güteschaltung: Auswertung der Ratengleichungen	61
4.2	Aktiv gütegeschalteter Nd:YVO ₄ -Laser bei 1342 nm	66
4.2.1	Aufbau und Optimierung des aktiv gütegeschalteten Nd:YVO ₄ -Lasers bei 1342 nm	66
4.2.2	Kenlinien	68
4.2.3	Spektrale Eigenschaften	73
4.2.4	Strahlqualität	74
4.3	Fazit	76
5	Passiv modengekoppelter Nd:YVO₄-Laser bei 1342 nm	79
5.1	Theoretische Grundlagen der Modenkopplung	81
5.1.1	Modenkopplungsverfahren	85
5.2	Theorie der parametrischen Kerrlinsen-Modenkopplung durch kaskadier- te Nichtlinearitäten zweiter Ordnung	89
5.2.1	Kaskadierte Nichtlinearitäten zweiter Ordnung	90
5.2.2	Modenkopplung mittels kaskadierter Nichtlinearitäten zweiter Ord- nung	97
5.3	Der modengekoppelte ps-Nd:YVO ₄ -Laser bei 1342 nm	100
5.3.1	Aufbau und Optimierung des parametrisch Kerrlinsen-modenge- koppelten Nd:YVO ₄ -Lasers	100
5.3.2	Charakterisierung des modengekoppelten Nd:YVO ₄ -Lasers	109
5.4	Fazit	113
6	Erzeugung von höheren Harmonischen	115
6.1	Theoretische Grundlagen der Erzeugung der höheren Harmonischen	116
6.1.1	Summenfrequenzmischung	116
6.1.2	Erzeugung der zweiten Harmonischen	118
6.1.3	Erzeugung der dritten Harmonischen	122
6.2	Frequenzverdopplung	124
6.2.1	Wahl der nichtlinearen Materialien	126
6.2.2	Charakterisierung der zweiten Harmonischen des kontinuierlich betriebeenen Nd:YVO ₄ -Lasers bei 1342 nm	131
6.2.3	Fazit	134



6.2.4	Charakterisierung des aktiv gütegeschalteten Nd:YVO ₄ -Lasers bei 1342 nm	135
6.2.5	Fazit	141
6.2.6	Charakterisierung der zweiten Harmonischen des cw-modengekoppelten Nd:YVO ₄ -Lasers bei 1342 nm	142
6.2.7	Fazit	148
6.3	Frequenzverdreifachung des aktiv gütegeschalteten Nd:YVO ₄ -Lasers bei 1342 nm	148
6.3.1	Der Aufbau der Frequenzverdreifachung	148
6.3.2	Charakterisierung der dritten Harmonischen des aktiv gütegeschalteten Nd:YVO ₄ -Lasers bei 1342 nm	151
6.3.3	Fazit	157
7	Zusammenfassung	159
	Literaturverzeichnis	164





Kapitel 1

Einleitung

Aufgrund ihrer ausgezeichneten Strahlqualität im Vergleich zu anderen Lasertypen, der kompakten und stabilen Bauweise und ihres hohen Wirkungsgrades finden sich für diodengepumpte Festkörperlaser eine Vielfalt von Einsatzmöglichkeiten, wie in der Medizin, der Spektroskopie, der Faseroptik oder der Materialbearbeitung.

Vor allem Festkörperlaser, die auf einer Kombination von Ionen der Seltenen Erden (z.B. Nd^{3+} , Yb^{3+} , Er^{3+} , ...) und einem geeigneten Wirtskristall (z.B. YVO_4 , YAG, GdVO_4 , ...) basieren, haben in der Vergangenheit immer mehr an Bedeutung gewonnen. Ein charakteristisches Merkmal von Seltenen Erden ist, dass das lokale Feld des Wirtskristalls durch die äußeren Elektronen abgeschirmt wird [1], weshalb sie spektral sehr schmalbandige Laserübergänge aufweisen. Zudem sind die Lebensdauern des oberen Laserniveaus sehr groß und bewegen sich im Bereich von einigen Mikro- bis Millisekunden, da der Dipolübergang ins untere Laserniveau eigentlich verboten, aber aufgrund der Wechselwirkung mit dem Kristallfeld schwach erlaubt ist. Deshalb lässt sich eine sehr große Besetzungsinversion aufbauen, was vor allem für die Erzeugung von kurzen gütegeschalteten Impulsen von Vorteil ist. Ein Nachteil dieser Lasermaterialien ist, dass sie nur wenige diskrete Laserübergänge aufweisen, die alle im infraroten Spektralbereich liegen. Durch die Methoden der Nichtlinearen Optik, ist es möglich durch Frequenzkonversion andere Wellenlängenbereiche zu erreichen. Vor allem die Erzeugung von Laserstrahlung im sichtbaren Spektralbereich eröffnet eine Vielzahl neuer Anwendungsfelder für solche Festkörperlaser, wie zum Beispiel in der Display-Technologie, der LCD-Display-Produktion, der Mikromaterialbearbeitung, der Stereolithographie, als Pumpquelle für einen Laser- oder weiteren nichtlinearen Prozess oder generell für Wellenlängen-sensitive Prozesse.

Aufgrund des Fehlens von leistungsstarken Festkörperlaser-basierten Strahlquellen im Sichtbaren, den grünen Spektralbereich ausgenommen, ist besonders die Erzeugung von roter und blauer Laserstrahlung durch die Frequenzverdopplung beziehungsweise Frequenzverdreifung der Strahlung eines Nd-basierten Festkörperlasers, der den ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ -Übergang bei 1,3 μm ausnutzt, von Interesse.

Gerade im Bereich der Wellenlängen-sensitiven Prozesse in der Materialbearbeitung finden sich viele Einsatzmöglichkeiten für ein Lasersystem, das sowohl rote als auch blaue Laserstrahlung zur Verfügung stellt. Wellenlängen-sensitive Prozesse finden sich zum Beispiel in der Reparatur von LCD-Displays, bei der gezielt defekte Farbpixel zerstört werden, oder aber auch im selektiven Ausbleichen von Farbstoffen für die RGB-Laserbeschriftung. Dabei findet vor allem Strahlung in Form von kurzen intensiven Impulsen mit hoher Repetitionsrate Verwendung, was zu einer hohen Prozessgeschwindigkeit führt.

Eine weitere Anwendung, speziell für die zweite Harmonische von Laserstrahlung bei 1,3 μm , ist zum Beispiel die Verwendung als Strahlquelle für die Anregung von Cr:LiSAF- [2] oder Cr:LiCAF-Lasern [3], die im roten Spektralbereich gepumpt werden. Dabei sind vor allem eine möglichst hohe Ausgangsleistung und gute Strahlqualität der roten Strahlung erwünscht. In der Nichtlinearen Optik kann durch die Anregung eines PPLN-OPOs oder OPGs mit Strahlung im roten Spektralbereich die grün-induzierte Infrarot-Absorption (GRIIRA) vermieden werden, die bei der Verwendung von PumpLasern auftritt, die bei 1 μm und deren zweiter Harmonischer arbeiten [4]. Zudem kann mit Hilfe einer leistungsstarken gepulsten Laserstrahlquelle bei 1,3 μm durch die Erzeugung von weiteren Harmonischen Strahlung bis ins mittlere und ferne UV (zum Beispiel sechste Harmonische bei 224 nm und siebte Harmonische bei 192 nm) generiert werden, welche im Fall der siebten Harmonischen Anwendung in der VUV-Lithographie findet [5, 6].

Es besteht also ein großer Bedarf an der Entwicklung leistungsstarker Laserstrahlquellen im sichtbaren Spektralbereich. Je nach Anwendung wird dabei kontinuierlich emittierte Laserstrahlung oder aber in Form von kurzen intensiven Impulsen im Nanosekunden (mittels Güteschaltung) oder Pikosekunden-Bereich (mittels Modenkopplung) benötigt. Dabei stellt die Frequenzkonversion von auf Nd-basierenden Lasern bei 1,3 μm einen vielversprechenden Ansatz für die Erzeugung von roter und blauer Laserstrahlung dar. Bisher waren auf Nd-dotierten Festkörpermaterialien basierende, kontinuierlich emittierende Laserstrahlquellen bei 1,3 μm mit guter Strahlqualität in ihrer Ausgangsleistung limitiert. Die Ausgangsleistungen betragen dabei zwischen 6 W und 11 W [7, 8, 9, 10, 11]. Es konnten zwar Systeme mit Ausgangsleistungen von bis zu 120 W realisiert werden, diese wiesen aber eine sehr schlechte Strahlqualität

mit einer Beugungsmaßzahl $M^2 > 34$ auf [12, 13]. Das Fehlen von leistungsstarken Festkörperlasern bei $1,3 \mu\text{m}$ mit guter Strahlqualität resultiert aus der thermischen Belastung des Laserkristalls durch die absorbierte Pumpleistung. Der Laserübergang bei 1342 nm in Nd:YVO_4 weist, bei optischer Anregung bei 808 nm , einen sehr hohen Quantendefekt auf. Zusätzlich wird der Wärmeeintrag in den Laserkristall durch die bei 1342 nm auftretende *excited state absorption* (ESA) erhöht [14]. Dadurch tragen über 40% der absorbierten Pumpleistung direkt zur Erwärmung des Kristalls bei. Dies führt zur Bildung einer sehr starken, thermisch induzierten Linsenwirkung im Laserkristall, die durch entsprechend stark gekrümmte Spiegel im Resonator kompensiert werden muss. Für die, bei sehr starken thermischen Linsen auftretenden, asphärischen Anteile ist dies nicht mehr möglich [15]. Zudem kommt es beim Überschreiten der Bruchspannung des Kristalls aufgrund der thermischen Ausdehnung letztendlich zu dessen Zerstörung.

Aufgrund der thermischen Problematik bei der Leistungsskalierung von Laserstrahlquellen bei $1,3 \mu\text{m}$ sind auch die bisher veröffentlichten gütegeschalteten Laser bei $1,3 \mu\text{m}$ in ihrer Leistung beschränkt. Die meisten dieser Systeme basieren auf passiver Güteschaltung mit Hilfe eines $\text{V}^{3+}:\text{YAG}$ -Kristalls als sättigbaren Absorber und liefern mittlere Ausgangsleistungen um 1 W [16, 17, 18, 19]. Mittels aktiver Güteschaltung konnten die höchsten mittleren Ausgangsleistungen und Impulsspitzenleistungen erreicht werden. M. Nittmann realisierte einen ns- Nd:YVO_4 -Laser mit einer mittleren Ausgangsleistung von $4,9 \text{ W}$ und einer Impulsdauer von 11 ns bei einer Repetitionsrate von 15 kHz , was einer Impulsspitzenleistung von 30 kW entspricht [20]. C. Lu erzeugte ebenfalls mit Nd:YVO_4 bei einer Repetitionsrate von 50 kHz eine mittlere Ausgangsleistung von $11,2 \text{ W}$ bei einer Impulsdauer von 60 ns , also eine Impulsspitzenleistung von $3,7 \text{ kW}$ [21].

Die Entwicklung von leistungsstarken modengekoppelten Lasern bei $1,3 \mu\text{m}$ wurde, zusätzlich zur thermischen Problematik, durch das Fehlen von geeigneten Modenkopplungsverfahren bei 1342 nm erschwert. Die passive Modenkopplung mit Hilfe von sättigbaren Halbleiterabsorberspiegeln (SESAM) ist zwar eine gebräuchliche Methode zur Erzeugung ultrakurzer Impulse [22, 23, 24, 25], war aber in der Vergangenheit durch das Fehlen von Halbleiterstrukturen, die sich für den Wellenlängenbereich um $1,3 \mu\text{m}$ eignen, nur eingeschränkt nutzbar [26]. Erst in den letzten Jahren konnte durch die Entwicklung neuer Konzepte für SESAMs bei $1,3 \mu\text{m}$ das Problem behoben werden [26, 27, 28]. Dennoch sind die bisher durch Modenkopplung mit einem SESAM erreichten Leistungen auf $2,3 \text{ W}$ bei einer Impulsdauer von 29 ps beschränkt [29], da bei einer Leistungsskalierung das Auftreten von Q-switch-Modenkopplung und die damit

verbundene Zerstöranfälligkeit des SESAMs immer mehr in den Fokus rücken [30, 31]. Die besten Ergebnisse, im Bezug auf die mittlere Ausgangsleistung, konnten bisher von D. Krennrich mit Hilfe einer modifizierten selbststabilisierenden Form des *additive pulse mode-locking* (APM) mit einer Ausgangsleistung von 4,7 W bei einer Impulsdauer von 7 ps erzielt werden [32]. Ein großer Nachteil ist aber, dass APM eine interferometrische Stabilisierung der Längen beider gekoppelter Resonatoren benötigt.

Als Konsequenz des Fehlens von leistungsstarken Strahlquellen bei 1,3 μm mit guter Strahlqualität sind auch die durch Frequenzkonversion erreichbaren Ausgangsleistungen im sichtbaren Spektralbereich limitiert. Man kann zwar auch bei geringen Ausgangsleistungen der fundamentalen Strahlung durch resonatorinterne Frequenzverdopplung und -verdreifung sehr hohe Effizienzen für den jeweiligen Prozess erreichen, die Ausgangsleistung ist aber dennoch durch die zur Verfügung stehende Leistung der 1,3 μm -Strahlung beschränkt. Die SHG von Dauerstrich-Lasern in den roten Spektralbereich wurde bisher ausschließlich resonatorintern durchgeführt. Dabei konnten mittlere Ausgangsleistungen im Bereich zwischen 1 W und 5 W bei guter Strahlqualität erreicht werden [33, 34, 35, 36, 37, 38, 39]. Im Fall von gütegeschalteter Strahlung wurden die meisten Ergebnisse ebenfalls mittels resonatorinterner SHG beziehungsweise THG realisiert. Die erreichten mittleren Ausgangsleistungen bei guter Strahlqualität waren dabei für die SHG auf den einstelligen Watt-Bereich beschränkt [20, 40, 41, 42, 43] und für die THG kleiner als 2 W [20, 44, 45]. Da die modengekoppelten Laser bei 1342 nm in ihrer Leistung stark begrenzt sind, gibt es bisher nur sehr wenige Veröffentlichungen, die die Frequenzverdopplung der Strahlung eines solchen Systems beschreiben. Die bisher höchste mittlere Ausgangsleistung im Bezug auf die SHG modengekoppelter Strahlung bei 1,3 μm wurde mit 3 W von D. Krennrich durch externe SHG in periodisch gepoltem KTP bei einer sehr hohen Konversionseffizienz von 80 % erreicht [46].

Es wird deutlich, dass für die Realisierung von Hochleistungslasern bei 1,3 μm und damit auch einer möglichen Steigerung der Ausgangsleistung, der durch Frequenzkonversion erzeugten Strahlung im sichtbaren Spektralbereich, die Entwicklung neuer innovativer Konzepte nötig ist, durch die die bei 1,3 μm auftretenden Limitierungen, wie die starke thermische Linse und die mögliche Zerstörung des Laserkristalls, überwunden werden können.

Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung und experimentelle Realisierung von neuen Konzepten zur Leistungsskalierung von Nd-dotierten Lasern bei 1,3 μm . Als Lasermaterial wird dabei Neodym-dotiertes Yttrium Vanadat (Nd:YVO₄) verwendet, dessen ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ -Übergang einer Wellenlänge von 1342 nm entspricht. Nd:YVO₄

verfügt über herausragende spektroskopische Eigenschaften. Vor allem in Bezug auf den Wirkungsquerschnitt der stimulierten Emission übertrifft dieses Lasermaterial alle anderen gebräuchlichen Festkörpermateriale. Nd:YVO₄ eignet sich aufgrund der relativ langen Lebensdauer des oberen Laserniveaus sehr gut für die Verwendung in gütegeschalteten Lasern. Des Weiteren ermöglicht die Fluoreszenzbandbreite von Nd:YVO₄ die Erzeugung kurzer Pikosekunden-Impulse mit Impulsdauern kleiner 10 ps mittels Modenkopplung.

In dieser Arbeit wird erstmals das Pumpkonzept, das auf der optischen Anregung des Lasers mit einer Laserdiode bei einer Wellenlänge von 888 nm basiert, für die Erzeugung von Laserstrahlung bei 1342 nm in Nd:YVO₄ angewandt. Aufgrund der nur schwach ausgeprägten Absorption bei 888 nm kann die Wärmelast des Kristalls durch die Verwendung eines langen, niedrig-dotierten Nd:YVO₄-Kristalls auf ein größeres Volumen verteilt werden. Ein weiterer Vorteil stellt der um 15 % reduzierte Quantendefekt, im Vergleich zur optischen Anregung bei 808 nm, dar. Durch die optische Anregung bei 888 nm ist es also möglich mit wesentlich höheren Pumpleistungen zu arbeiten, ohne eine Zerstörung des Laserkristalls zu riskieren. Zudem wird durch die Verteilung der Wärmelast die thermisch induzierte Linse erheblich reduziert. Dieses Pumpkonzept wurde von L. McDonagh entwickelt und mit großem Erfolg für die Leistungsskalierung eines 1064 nm-Nd:YVO₄-Lasers ausgenutzt [47].

Um das Pumpkonzept erfolgreich umsetzen zu können, müssen als erstes die thermo-optischen und thermo-mechanischen Eigenschaften des Laserkristalls unter Pumplichteinstrahlung untersucht werden. Dadurch erhält man eine Abschätzung der im Kristall auftretenden Spannungsintensitäten, wodurch sich eine mögliche Zerstörung des Kristalls durch die thermische Ausdehnung ausschließen lässt. Des Weiteren wird es durch die Kenntnis der Brennweite der thermischen Linse möglich, diese bei der Resonatorplanung zu berücksichtigen. Dazu wird sowohl eine numerische Simulation der Kristalleigenschaften mittels Finite Elemente Analyse als auch eine experimentelle Bestimmung der Brennweite der thermisch induzierten Linse durchgeführt, sowohl mit aktivem Laserprozess bei 1342 nm als auch ohne Laserbetrieb. Die thermische Linse ohne Laserbetrieb ist wichtig, da der Laserresonator auch für diese Brennweite stabil sein muss, um den Laserprozess starten zu können.

Anhand dieser Ergebnisse ist es möglich einen, speziell an die sehr kleinen und zudem stark unterschiedlichen Brennweiten mit und ohne Laserbetrieb, angepassten Resonator für den Dauerstrich-Betrieb zu konzipieren, der sowohl mit als auch ohne Laserbetrieb stabil ist. Zusätzlich wird durch das Resonatordesign gleichzeitig guter Modenüberlapp gewährleistet. Dadurch ist die Entwicklung eines leistungsstarken Dauerstrich-Lasers