1 Einleitung

Seit mehreren Jahrzehnten werden Satelliten erfolgreich für wissenschaftliche und kommerzielle Zwecke eingesetzt. Durch die fortschreitende Entwicklung der Satelliten- und Raumfahrttechnik wurden das Aufgabengebiet und das Einsatzspektrum in Forschung und Industrie für Satelliten stetig erweitert. Durch Einsatz von Kommunikationssatelliten können im Vergleich zur herkömmlichen Übertragungstechnik mit Glasfaserkabeln schwer zugängliche Gebiete erreicht und globale, mobile Kommunikationsverbindungen ermöglicht werden. Die dafür benötigten Kommunikationsverbindungen zwischen Satelliten (Intersatellitenverbindung) werden heutzutage zuverlässig mit Hilfe der Mikrowellentechnik realisiert, deren Datenübertragungsgeschwindigkeit aber nicht dem steigenden Bedarf an Datenübertragungskapazitäten im Bereich der Telekommunikation genügt. Daher ist für die Intersatellitenkommunikation der Einsatz einer neuen, optischen Kommunikationstechnik geplant, die auf der Verwendung von kohärentem Laserlicht anstelle von Mikrowellen basiert und den Bedarf an hohen Datenübertragungsgeschwindigkeiten von $> 1\,\mathrm{GBit/s}$ abdecken kann.

Für diese optische, kohärente Intersatellitenkommunikationstechnik werden weltraumqualifizierte, einfrequente und frequenzstabile Lasersysteme benötigt, deren Entwicklung und Charakterisierung den Schwerpunkt dieser Arbeit bildeten. Weltraumqualifizierte gepulste Festkörperlaser wurden bereits zur Vermessung der Höhenprofile von Planetenoberflächen [Afzal94; Ramos-Izquierdo94; Abshire00] eingesetzt. Diese sind aber für die kohärente Kommunikation ungeeignet, da sie nicht den Anforderungen an Strahlqualität, Frequenzstabilität und −abstimmbarkeit genügen. Allerdings hat sich das in der Raumfahrt eingesetzte Laserkristallmaterial Nd:YAG seit vielen Jahren bewährt, da eine Unempfindlichkeit des Kristallmaterials gegen kosmische Strahlung durch eine Kodotierung demonstriert wurde. Aufgrund vielfältiger Erfahrungen und bekannter Zuverlässigkeit wird Nd:YAG daher als Lasermaterial ebenfalls für die einfrequenten, frequenzstabilen Lasersysteme in der optischen, kohärenten Intersatellitenkommunikation vorgesehen. Für die Kommunikationsverbindung wird bei der Nd:YAG-Laserwellenlänge (Trägerwelle) von $1\,\mu\mathrm{m}$ eine Sendelaserleistung von etwa $1\,\mathrm{W}$ benötigt. Geeignete und zuverlässige Modulatoren mit hoher Modulationsbandbreite zur Signalaufprägung auf die Laserfrequenz sind nur für kleinere optische Leistungen geeignet. Wegen dieser Limitierung wird als Sendelaser ein Masterlaser-Verstärker-Konzept angestrebt, wobei das Nutzsignal auf die Trägerwelle des Masterlasers vor der Verstärkung aufgeprägt wird. Darüber hinaus wird zur kohärenten Kommunikation im Empfangssystem ein Laser als Lokaloszillator benötigt, um das aufgeprägte Datensignal zu extrahieren.

In terrestrischen Anwendungen wurden erfolgreich monolithische Laserdioden-gepump-

te Festkörperlaser eingesetzt, um einfrequente, beugungsbegrenzte Laserstrahlung mit einer hohen Intensitäts- und Frequenzstabilität zu erreichen. Monolithische Laser haben den Vorteil, dass sie unempfindlicher gegen äußere Störungen (z. B. Vibrationen, Akustik, Luftdruckschwankungen) sind als aus Einzelkomponenten aufgebaute Resonatoren, bei denen Resonatorspiegel und Verstärkungsmedium separiert sind. Der kompakte Aufbau monolithischer Laser ermöglicht eine hohe intrinsische mechanische und optische Resonatorstabilität. Durch die Entwicklung und den Einsatz spektral-schmalbandiger Laserdioden als Pumpquelle, konnten hohe elektrisch-zu-optische Effizienzen erreicht werden. Aus diesen Gründen sind monolithische Laser als kompakte, stabile und effiziente Strahlquellen für die Raumfahrt geeignete Kandidaten.

In der Literatur wurden verschiedene effiziente monolithische Festkörperlaser auf der Basis unterschiedlicher Verstärkungsmedien veröffentlicht. An erster Stelle sei hier der Mikrochiplaser genannt, der einen sehr kurzen longitudinalen Resonator (einige hundert Mikrometer) und eine niedrige Laserschwelle aufweist [Zayhowski89]. Im stabilen einfrequenten Betrieb sind die realisierbaren optischen Leistungen des Lasers für die oben angesprochenen Raumfahrtmissionen jedoch zu gering. Des Weiteren ist die thermisch induzierte Spannungsdoppelbrechung problematisch, um eine hohe Frequenzstabilität zu erreichen, da eine Wärmeabfuhr aus dem Kristall nur über die sehr kleinen Seitenflächen erfolgen kann. Zwei weitere einfrequente Laser mit einer Laserkristallgröße von mehreren Millimetern und einer besseren Wärmeabfuhr sind der monolithische *twisted-mode-cavity*-Laser [Wallmeroth90a] und der monolithische, nichtplanare Ringlaser [Kane85], bei denen als aktives Lasermaterial bereits Nd:YAG verwendet wurde. Im Gegensatz zum monolithischen *twisted-mode-cavity*-Laser zeichnet sich der nichtplanare Ringlaser durch einen einfacheren Aufbau und eine bereits demonstrierte Frequenzabstimmung aus. Bei konstanter Laserleistung wurde für den monolithischen Ringlaser eine definierte und modensprungfreie Frequenzänderung von mehreren GHz demonstriert [Freitag94], die für die optische Intersatellitenkommunikation erforderlich ist. Die fundamentalen Laser- und Rauscheigenschaften monolithischer Ringlaser wurden von verschiedenen Wissenschaftlern und Arbeitsgruppen intensiv untersucht [Kane85; Kane87; Day90; Freitag94; Harb97]. Aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse wird der monolithische, nichtplanare Ringlaser für mehrere Raumfahrtmissionen (*Laser Interferometer Space Antenna* (LISA), *Atmospheric Dynamic Mission* (ADM), SMART-II) vorgesehen [LISA Study Team00; Heine02; Cramer03; Wielders03].

Zu Beginn dieser Dissertation stand keine weltraumqualifizierte Laserstrahlquelle zur Verfügung, die als Masterlaser und Lokaloszillator in der optischen Intersatellitenkommunikation eingesetzt werden kann. Daher war das Ziel der vorliegenden Arbeit die Entwicklung und Charakterisierung einer weltraumqualifizierbaren Laserstrahlquelle auf der Basis eines monolithischen, nichtplanaren Nd:YAG-Ringlasers und die Realisierung eines einfachen Frequenzstandards zur Lasercharakterisierung. Bei der Laserentwicklung wurden die einwirkenden Umwelteinflüsse im Weltraum und beim Raketenstart wie z. B. Vakuum, kosmische Strahlung, Temperaturschwankungen und mechanische Vibrationen berücksichtigt, die sich auf die Lasereigenschaften auswirken können. So bewirkt z. B. die

fehlende Konvektion der Luft einen veränderten thermischen Haushalt des Lasersystems unter Vakuumbedingungen im Vergleich zum terrestrischen Betrieb bei Normalluftdruck, da sämtliche Verlustleistungen von Laserdioden und Laser-Temperaturstabilisierungen vollständig durch Wärmeleitung abgeführt werden müssen. Dies kann sich auf die Frequenzabstimmung und -stabilität auswirken. In der Startphase, in der die Temperaturkontrolle des Gesamtsystems noch nicht aktiviert ist, ist das passive Lasersystem hohen Temperaturschwankungen ausgesetzt. Diese führen wegen unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien zu hohen mechanischen Spannungen, die z. B. eine Dejustage optischer Komponenten bewirken und so Einfluss auf die Lasereigenschaften nehmen können. Mit dem in dieser Arbeit entwickelten und realisierten Laserdesign, dessen Darstellung wesentlicher Bestandteil des 2. Kapitels ist, wurde die Bereitstellung eines weltraumqualifizierbaren Lasers erreicht.

Mit diesem Laser wurden erstmals im Vakuum Frequenzabstimmung, Abstimmgeschwindigkeiten, Intensitäts- und Frequenzrauschen, sowie der Einfluss des Vakuums auf die verwendete Pumpquelle und deren Rauscheigenschaften untersucht. Diese in Kapitel 3 dargestellten Ergebnisse sind nicht nur für die optische Intersatellitenkommunikation, sondern ebenfalls für die erwähnten, zukünftigen Raumfahrtprojekte von Bedeutung, da ebenfalls monolithische Ringlaser eingesetzt werden sollen. Zur Verifikation der Weltraumtauglichkeit des Lasers wurden zwei wesentliche Umwelteinflüsse simuliert. Neben dem Betrieb im Vakuum wurde dieser passiv (ohne Laserbetrieb) zyklischen Temperaturschwankungen zwischen -40° C und +60° C ausgesetzt und anschließend hinsichtlich seiner Lasereigenschaften untersucht. Diese Ergebnisse sind zusammen mit denen weiterer Umwelteinflüsse in Kapitel 4 zusammengefasst.

Über die Bereitstellung und Charakterisierung des Lasers hinaus wurde ein neuartiger, einfacher und kompakter Frequenzstandard demonstriert, der zur Charakterisierung der Frequenzstabilität eines Lasers insbesondere für industrielle Anwendungen z. B. im Rahmen der Qualitätssicherung zur Verifikation der Spezifikationen terrestrischer und weltraumtauglicher Lasersysteme eingesetzt werden könnte. Dazu wurde erstmals eine Frequenzstabilisierung auf eine Hyperfeinstruktur des molekularen Jods mit einem modulationsfreien Zwei-Farben-Interferometer [Hong00] realisiert, das nur aus einem nichtlinearen Kristall zur Frequenzverdopplung, einer Jodzelle und einem Spiegel besteht. Mit einem periodisch gepolten nichtlinearen Kristall wurde der Strahlversatz bei der Frequenzverdopplung reduziert und ein besseres Signal-zu-Rauschverhältnis für die Sättigungsdispersionssignale erreicht. Gleichzeitig wurde mit dem nichtlinearen Kristall erstmals die relative Phase zwischen den interferierenden Strahlen eingestellt und der Aufbau durch eine Reduzierung der Anzahl optischer Komponenten vereinfacht. In Kapitel 5 werden die zu diesem Frequenzstandard relevanten Spektroskopieergebnisse, Fehlersignale und Stabilisierungsergebnisse dargestellt und mit bereits veröffentlichten Ergebnissen anderer Frequenzstabilisierungsverfahren verglichen. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung.

2 Laser für Weltraumanwendungen

2.1 Einsatz weltraumtauglicher Lasersysteme

Der Einsatz von Laserstrahlquellen hat in Wissenschaft und Industrie eine Vielzahl von leistungsfähigen, messtechnischen Verfahren ermöglicht, die ebenfalls für weltraumgestützte Anwendungen interessant sind. Dazu zählen u. a. berührungslose Messverfahren für Abstände und Geschwindigkeiten. Weitere Anwendungsgebiete liegen im Bereich der hochpräzisen Interferometrie, Spektroskopie sowie der optischen Intersatellitenkommunikation.

Im Bereich der Abstandsmessung wurden gepulste Festkörperlaser erfolgreich zur satellitengestützten Höhenvermessung der Mond- und Marsoberfläche eingesetzt [Afzal02; Afzal94; Ramos-Izquierdo94]. Dabei wurden über eine Laufzeitmessung der Laserpulse und die bekannte Satellitenposition Höhenunterschiede gemessen.

Für die erste europäische, satellitengestützte, höhenaufgelöste Vermessung des Windgeschwindigkeitsprofils der Erdatmosphäre sind frequenzstabile Laser in einer injektionsgekoppelten Masterlaser-Verstärker-Konfiguration vorgesehen. Ein geeignetes Lasersystem für diese Anwendung wurde in der Literatur veröffentlicht [Heine02; Hunnekuhl04a]. Ein Dauerstrich-betriebener monolithischer Ringlaser wird bei 1064 nm als Frequenzreferenz für einen gepulsten Masterlaser verwendet, dessen Pulse nach einer Verstärkung durch Frequenzverdopplung und Summenfrequenzmischung in den ultravioletten Spektralbereich bei 355 nm konvertiert werden.

Der Einsatz frequenzstabilisierter monolithischer Ringlaser ist ebenfalls für ein sehr empfindliches Messinstrument, den weltraumgestützten Gravitationswellendetektor LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*) vorgesehen [LISA Study Team00]. Dieser basiert prinzipiell auf drei Michelson Interferometern mit fünf Millionen Kilometern Armlänge mit denen – durch Gravitationswellen verursachte – Längenunterschiede zwischen Testmassen („Interferometerspiegeln“) gemessen werden. Dazu wird eine Messgenauigkeit relativer Längenänderungen von 10^{-23} im Messbereich von 10^{-4} bis 10^{-1} Hz benötigt. Um die notwendige Messempfindlichkeit zur erreichen, wird eine extrem hohe Frequenzstabilität des Lasers ($\leq 30\,\mathrm{Hz}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ im Messbereich von 10^{-4} bis 10^{-1} Hz) benötigt, die mit einer Frequenzstabilisierung auf eine externe Referenz erreicht werden soll. Des Weiteren wird eine Ausgangsleistung von 1 W benötigt. Als alternatives Laserkonzept zum monolithischen Ringlaser wird eine Master-Verstärker-Konfiguration diskutiert, die auf einem leistungsschwächeren monolithischen Ringlaser (Masterlaser) und einem Faserverstärker basiert [Cramer03].

Laserbasierte (optische) Intersatellitenverbindungen wurden aufgrund des wachsenden

Bedarfs an Übertragungskapazitäten für verschiedene Anwendungen vorgeschlagen, da mit ihnen hohe Datenübertragungsraten von $> 1\,\mathrm{GHz}$ realisiert werden können. Drei wesentliche Aufgabenbereiche sind globale Kommunikationsverbindungen zwischen Telekommunikationssatelliten, Datenweiterleitungen zwischen Satelliten in unterschiedlich hohen Erdumlaufbahnen und die Datenübermittlung von weit entfernten Satelliten bzw. Sonden (Entfernungen $> 100.000\,\mathrm{km}$) im Weltall. Um diese Aufgaben zu erfüllen, wurden verschiedene Kommunikationsverfahren, notwendige Übertragungskapazitäten, Laserkonzepte und Detektionstechniken vorgeschlagen und diskutiert [Laurent04; Rochat00]. Voraussichtlich werden zukünftige Lasersysteme primär im Bereich der Intersatellitenverbindungen zwischen geostationären Satelliten benötigt und nicht bei mittleren und niedrigen Datenübertragungsanforderungen wie bei den übrigen zwei Aufgabengebieten.

Heutzutage werden diese Kommunikationsverbindungen zuverlässig mit Hilfe der Mikrowellentechnik realisiert. Dabei werden Mikrowellen analog zur Radiotechnik als Trägerwellen verwendet, auf die Signale mit Hilfe von Modulatoren aufgeprägt werden. Ein Vorteil dieser Kommunikationsverbindungen liegt in ihrer ausgereiften Technik mit langjährigen Erfahrungswerten. Die sich daraus ergebende Zuverlässigkeit wird durch das Zusammenspiel einer hohen Leistung der verwendeten Mikrowellensender, einem großen Öffnungswinkel der abgestrahlten Mikrowellen und der Positioniergenauigkeit der Satelliten erreicht. Die für den Aufbau und die Aufrechterhaltung der Kommunikationsverbindung notwendige Ausrichtung und Nachführung der Sender- und Empfängerteleskope kann mit einem sinnvollen technischen Aufwand realisiert werden. Ein weiterer Vorteil der Mikrowellentechnik liegt in der nahezu wetterunabhängigen Verbindungsqualität zwischen Satelliten und Bodenstationen. Ein Nachteil dieser Technik besteht in der durch die Trägerfrequenz begrenzten Modulationsbandbreite und der somit maximal erreichbaren Datenübertragungsrate.

Mit einer neuen Kommunikationstechnik, die auf der Verwendung von kohärentem Laserlicht anstelle von Mikrowellen als Trägerwelle basiert, könnte der steigende Bedarf an Datenübertragungskapazitäten für Intersatellitenverbindungen effizienter abgedeckt werden. Bei dieser optischen Kommunikationstechnik im sichtbaren oder nahinfraroten Spektralbereich wird eine wesentlich höhere Trägerfrequenz verwendet, so dass höhere Modulationsbandbreiten und damit größere Datenübertragungsraten möglich sind. Für die optische Intersatellitenkommunikation werden Übertragungsraten von $> 1\,\mathrm{GBit/s}$ angestrebt, die im Vergleich zur Mikrowellentechnik mit etwa 15-230 MBit/s deutlich größer sind [Dickinson97; Lutz97]. Durch den Einsatz eines Lasers anstelle eines Mikrowellensenders kann wegen seiner kleineren Wellenlänge der Trägerwelle ein physikalisch kleinerer Abstrahlwinkel erreicht werden. Dies führt bei gleicher ausgesandter Leistung und gleichem Teleskopdurchmesser zu unterschiedlichen Signalintensitäten beim Empfänger. Wird ein optischer Sender (Laser) mit einer Wellenlänge von $1\,\mu\mathrm{m}$ mit einem $30\,\mathrm{GHz}$ Mikrowellensender verglichen, so kann durch den kleineren Öffnungswinkel des Lichts eine um den Faktor 10^8 größere Signalintensität am Empfänger erreicht werden. Daraus ergibt sich ein offensichtlicher Vorteil: Bei einer gleichen Empfängerempfindlichkeit kann die Sendeleistung um viele Größenordnungen reduziert werden.