

Schlussbericht

**Verbundprojekt: Neuartige Diodenlasersysteme
für Präzisionsexperimente unter
Schwerelosigkeit (LasUS)**

Teilprojekt: Neuartige Frequenzstabilisierungen

50 WM 0939

Institut für Quantenoptik
Leibniz Universität Hannover

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, und Forschung unter dem Förderkennzeichen 50WM0939 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Im Rahmen des vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik (DLR) mit Mitteln des Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojektes LASUS werden Laser-Technologien entwickelt, die für die Realisierung eines Quantengasexperimentes im Rahmen einer Sounding Rocket Mission unerlässlich sind. Basierend auf den Erfahrungen im Verbundprojekt QUANTUS, das Experimente unter Schwerelosigkeit am Fallturm des ZARM in Bremen durchführt, wurde die Notwendigkeit dieser Entwicklungsarbeit deutlich, da die dort verwendeten Komponenten den thermischen und mechanischen Anforderungen der Raketenmission nicht genügen.

Inhaltlicher Schwerpunkt des Projektes ist daher die Realisierung von hoch-kompakten und zuverlässigen Diodenlasersystemen, um die lasertechnologischen Grundlagen für die nächste Generation von quantenoptischen Präzisionsmessungen unter Schwerelosigkeit auf Forschungsraketen zu schaffen. Die Arbeit des Instituts für Quantenoptik (IQ) der Leibniz Universität Hannover konzentriert sich dabei auf die Entwicklung von kompakter rechnergesteuerter Ansteuerungselektronik für Laserdioden. Dies umfasst u. A. rauscharme Stromtreiber, Temperaturregler und Frequenzregler.

Aus praktischen Gründen ist der Entwicklungsauftrag nicht nur auf die Ansteuerung von Laserdioden begrenzt worden, sondern ist erweitert worden auf die gesamte Elektronik die für ein quantenoptisches Experimente nötig ist. Sodass u.a. auch Schaltungen zur Strahlmanipulation und für den Betrieb von Vakuumpumpen und Sensoren entwickelt worden sind.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die AG Rasel verfügt unter anderem über Expertise auf dem Gebiet der Atomoptik, Atomlaser und Mikrogravitation. Es bestehen Kooperationen mit diversen führenden nationalen und internationalen universitären Gruppen und Forschungseinrichtungen. Diese Einbindung in aktuelle Forschung und wissenschaftlichen Austausch auf hohem Niveau kommt auch dem Projekt in Form von Knowhow und Verfügbarkeit von Technologien zugute. Das Verbundprojekt QUANTUS stellt hier die wesentliche Grundlage dar, aus der Technologien und Apparaturen hervorgehen.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt LASUS ist ein Technologie- und Entwicklungsprojekt mit direkter Anwendung in den von BMWI/DLR finanzierten Projekten QUANTUS2, PRIMUS2 und MAIUS sowie dem durch die europäische Kommission (EC) finanzierten Projekt iSense. Die Baugruppen sind dementsprechend in enger Zusammenarbeit mit dem Anwender entwickelt worden.

Aus personellen Gründen kam es zu leichten Verzögerungen zu Beginn des Projektes, trotzdem sind die wesentlichen Ziele des Antrags erreicht worden.

Wie im Antrag dargestellt, wurden Schaltungen zur Stabilisierung von Diodenlasern entwickelt und getestet. Dabei wurden zum Einem die absolute Stabilisierung auf einen atomaren Übergang und

zum Anderen die relative Stabilisierung mittels einer Schwebungsmessung realisiert. Neben den Schaltungen zur Stabilisierung der Laserfrequenz sind noch eine Reihe von weiteren Schaltungen notwendig um die Laser betreiben zu können und um diese sinnvoll in die Experimente einzubinden. Diese wurden ebenfalls entwickelt.

Die in LASUS entwickelte Regelungselektronik ist mit Erfolg an verschiedenen Lasersystemen getestet worden. Deshalb ist davon auszugehen, dass die Elektronik auch mit den geplanten Diodenlasern vom Ferdinand-Braun-Institut (FBH) funktionieren wird. Ein Test war auf Grund der nicht vollständigen Verfügbarkeit nicht möglich. Die Demonstration der Stabilisierung auf einen Kalium-Übergang, der Stabilisierung eines Frequenzkamms und Stabilisierung auf Schwebungsmessung mit einem Frequenzkamm soll in LASUS2 erreicht werden.

Aus praktischen Gründen ist der Entwicklungsauftrag nicht nur auf die Ansteuerung von Laserdioden begrenzt worden, sondern über den Antrag hinaus auf die gesamte Hardware die für ein quantenoptisches Experimente nötig ist erweitert worden. Sodass u.a. auch Schaltungen zur Strahlmanipulation und für den Betrieb von Vakuumpumpen und Sensoren entwickelt worden sind.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das IQ hat langjährige Erfahrung mit quantenoptischen Experimenten wobei häufig Diodenlaser eingesetzt werden. Diese Laborexperimente sind im Verhältnis zu den für Raketenmissionen geplanten Experimenten groß und mit einem geringen Grad an Automatisierung ausgestattet. Auch bei der im Experiment QUANTUS1 für den Fallturm eingesetzten Elektronik handelt es sich lediglich um leicht modifizierte Laborgeräte. Das im Bau befindliche QUANTUS2 wäre ohne LASUS nicht möglich gewesen, ebenso wenig wie MAIUS.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

LASUS ist eine Kooperation universitärer Gruppen und Forschungseinrichtungen. Mitglieder sind:

- Ernst M. Rasel, Institut für Quantenoptik, Universität Hannover
- Achim Peters, AG Metrologie, Humboldt-Universität zu Berlin
- Andreas Wicht, Geschäftsbereich Diodenlaser, Ferdinand-Braun-Institut, Berlin
- Klaus Sengstock, ILP, Universität Hamburg

Auch mit dem Projekt QUANTUS2, MAIUS, PRIMUS2 und iSense gab es enge Kooperationen. Viele Teile aus LASUS sind dort bereits im Einsatz.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

1.1. Gesamtkonzept

Da sich der Aufbau von Experimenten häufig im Laufe der Zeit ändern ist ein modulares Konzept für die Elektronik gewählt worden. Dieses Konzept ist in Abbildung 1 dargestellt und umfasst nicht nur die Hardware die direkt mit den Lasern zu tun hat, sondern umfasst auch die benötigte Infrastruktur (wie Energieversorgung und Rechnerschnittstellen) und die Software.

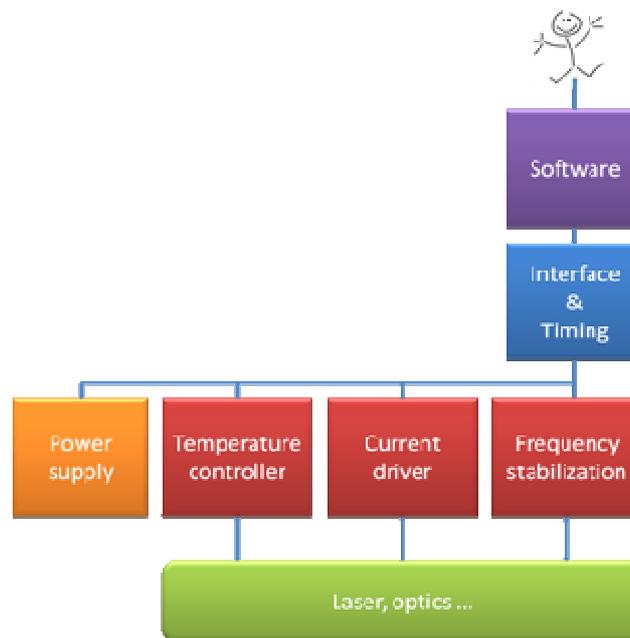


Abbildung 1. Ein schematischer Überblick über das Gesamtsystem. Unten stehen Laser und Optik, die nächste Ebene umfasst die Hardware-Treiber, darauf steht dann ein Interface und Timing Modul, wonach einen Software-Paket die Schnittstelle zum Nutzer bildet.

Bei der Entwicklung waren neben der Erfüllung der Anforderungen wie z.B. Kompaktheit, Zuverlässigkeit und ein geringes Rauschen vor Allem die Vereinfachung der Entwicklung und die Bedienung von zentraler Rolle. Dies ist durch ein modulares Konzept realisiert worden, wobei Aufgaben dort erledigt werden wo sie sich am einfachsten implementieren lassen. In den Platinen sind deshalb vielfach FPGAs eingesetzt um zum Beispiel die Verdrahtung stark zu vereinfachen und um kleinere Schnittstellenanpassungen zwischen dem Datenbus und den Front-End-ICs zu implementieren. Viele komplexe serielle Datenströme können daher als Treiber im Steuerrechner implementiert. Auch das Softwarepaket für die Einbindung der Hardware in ein übergeordnetes Steuerprogramm ist modular aufgebaut um mit möglichst wenig Aufwand weitere Schnittstellen, Programmiersprachen und Betriebssystemen zu unterstützen.

Weil bestehende Standards häufig entweder zu groß sind, zu komplex sind oder bestimmte Signale fehlen musste ein eigenes Platinenformat definiert werden. Um ein möglichst kleines, flexibles und kompaktes System zu bekommen ein stapelbares System gewählt worden. Dabei wurde auf eine Backplane verzichtet, da dabei vorher festgelegt werden muss wie viele Steckplätzen es gibt. Die

Platinen haben eine Größe von 100 mm x 100 mm, ähnlich dem PC104-Standard. Siehe dazu auch Abbildung 2. Alle notwendigen Signale wie Versorgung, Daten, Timing und analoge Verbindungen zwischen den Modulen werden durch einen stapelbaren Stecker realisiert.



Abbildung 2. Ein Foto von einem Modulstapel. Die Platinen sind 100 mm x 100 mm, der hintere Stecker ist für Datentransport, Timing und Stromversorgung, der vordere Stecker ist für analoge Verbindungen zwischen den Modulen. Die Stecker auf die rechte Seite gehen zum Laser, Optik und Vakuumkammer.

1.2. Rechnerschnittstelle

Um mit dem System möglichst viele Experimente ansteuern zu können sind verschiedene Rechnerschnittstellen entwickelt worden. Diese Module erzeugen auch das Timingsignal für alle Karten die sich in einem Stapel befinden.

- USB: Hiermit kann das System mit fast jeden Büro-Rechner betrieben werden kann. Es ist vor allen für den Laborbetrieb am Boden gedacht, und wird auch intensiv in der Entwicklung andere Modulen genutzt, ebenso für viele Testaufbauten.
- Die NI-FPGA-Schnittstelle ermöglicht die Kontrolle der Hardware via einer NI-FPGA-Karte wie sie häufig in Fallturm-Experimenten eingesetzt wird. Vieles der Logik der Schnittstelle ist an die NI-FPGA ausgelagert. Hierdurch ist nicht nur der höchste Durchsatz aller im LASUS entwickelten Schnittstellen möglich, es kann außerdem mit passenden Programmen auch eine detaillierte Debug durchgeführt werden.
- Die PC104-Schnittstelle erlaubt eine direkte Anbindung an das PC104-Stecksystem mit kompakten Industrirechnern. Es erlaubt ein sehr kompaktes Gesamtsystem da ein PC104-Rechner mit Versorgung nur zwei weitere Platinen auf dem Stapel bedeutet.
- Eine Ethernet-Schnittstelle befindet sich noch in Entwicklung. Es soll den Betrieb im Netzwerk ermöglichen. Diese Schnittstelle ist auf Redundanz ausgelegt: es hat 2 Netzwerkanschlüssen mit jeweils einem eigenen Mikroprozessor, sodass über mehrere getrennte Netzwerke bzw. auch mehrere Rechner auf dieselbe Hardware zugreifen können. Dies ist insbesondere bei MAIUS vorgesehen.

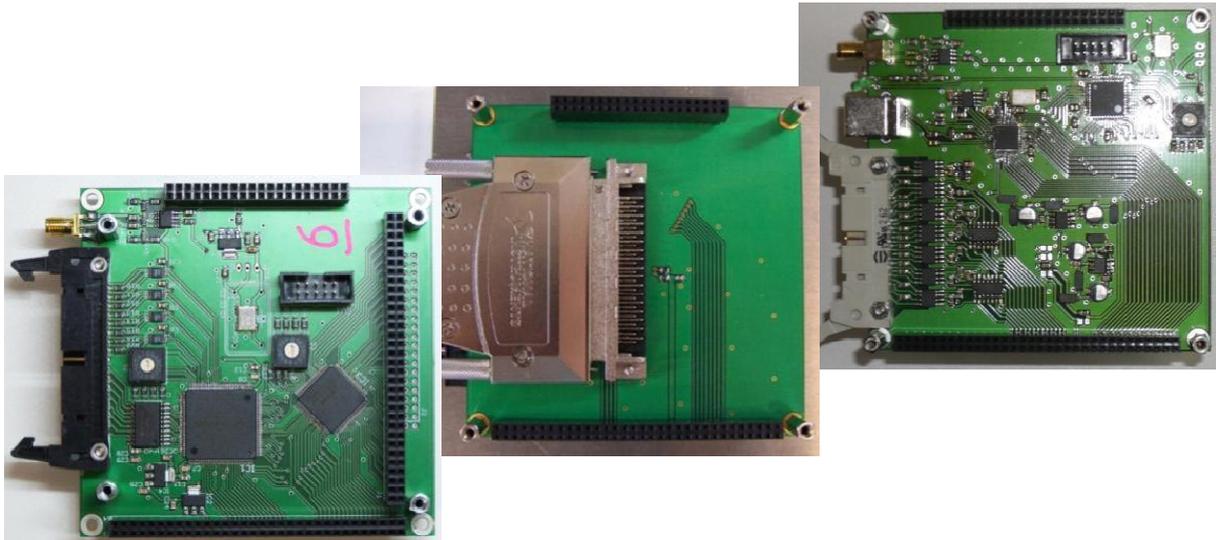


Abbildung 3. Fotos der verschiedene Rechnerschnittstellen. Von links nach rechts: USB, NI-FPGA, PC104.

1.3. Diodenstromtreiber

Für den Betrieb von Laserdioden sind die Stromtreiber sehr kritische Elemente, zum Einen wegen der hohen Empfindlichkeit der Wellenlänge auf den Strom und zum Anderen weil selbst kürzeste Spannungsspitzen schnell zur Zerstörung der Laserdioden führen können.

Die in LASUS entwickelte Baugruppe kann bis zu zwei Laserdioden mit bis zu 3 A versorgen, was selbst für Tapered Amplifiers und MOPAs ausreicht. Die Karte ist so konstruiert worden, dass der Maximal-Strom durch einige Widerstände festgelegt ist und so fehlerhafte Software-Befehle keine Schäden an die Laserdioden verursachen können. Die kritische Endstufe der Stromtreiber besteht im wesentlichen aus zwei in Reihe geschaltete Linear-Regler um möglichst wenig Rauschen und Störungen zu erzeugen, allerdings auf Kosten der Effizienz. Die Leistungsbauteile sind auf einer separaten Aluminium-Platine montiert um eine gute Kühlung zu gewährleisten. Diese wird auch temperaturüberwacht und kann gegebenenfalls abgeschaltet werden um eine Überhitzung zu vermeiden.

Messungen der Linienbreite haben ein Rauschen auf dem Niveau der besten kommerziellen Laserstromtreiber ergeben.



Abbildung 4. Ein Foto der Laserdiodenstromtreiber. Die Ausgänge sind auf zwei SMA Stecker für zwei Laserdioden. Die Leistungsbauteile sind für eine bessere Kühlung auf einer separaten Aluminium-Platine montiert.

1.4. Temperaturregler

Laserdioden sind nicht nur sehr empfindlich auf Stromänderungen sondern auch auf Temperaturänderungen. Daher muss die Temperatur von Laserdioden auf wenige Millikelvin stabil gehalten werden um die richtige Wellenlänge zu erreichen. Somit ist eine aktive Temperaturstabilisierung notwendig.

Der in LASUS entwickelten Temperaturregler ermöglicht es auf engstem Raum die Temperatur von bis zu zwei Lasern zu stabilisieren (1 ECDL oder 2 DFB/DFB-MOPAs). Dabei ist wegen ihrer Zuverlässigkeit auf analoge Technik mit digitaler Überwachung gesetzt worden.

Für die Überwachung von weiteren Temperaturen, ohne Stabilisierung, ist eine weitere Karte entwickelt worden die bis zu 25 Temperatursensoren (NTC) auslesen kann.

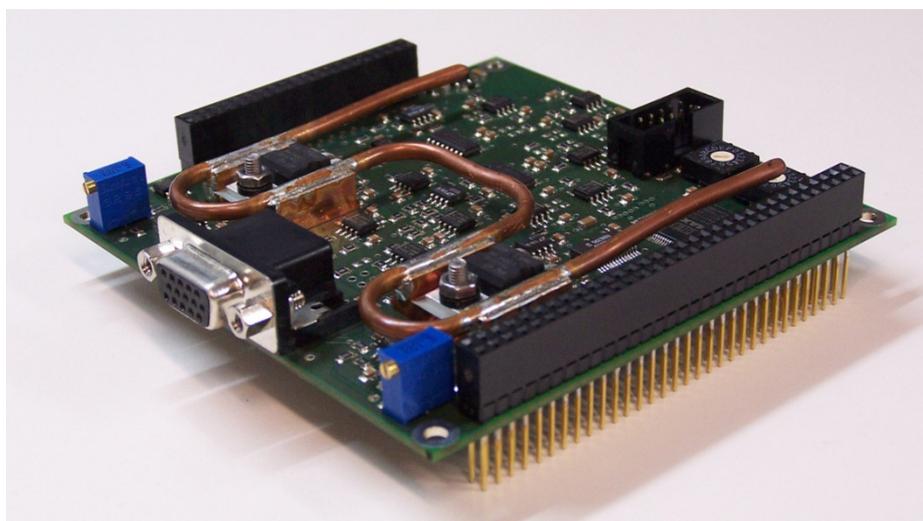


Abbildung 5. Foto der Temperaturregler. Da die Endstufen viel Wärme erzeugen können ist ein Kupferrohr für die Wasserkühlung vorgesehen, in die meiste Fällen ist eine Luftkühlung aber ausreichend.

1.5. Spannungs- und Stromversorgung

Für die Spannungsversorgung der Platinen ist ein einfaches Versorgungsmodul entwickelt worden welche in der ersten Version nur aus drei Spannungskonstantern besteht die die drei Festspannungen des Systems bereitstellen. Eine weitere Version die sämtliche Ströme und Spannungen misst befindet sich noch in der Entwicklung.

1.6. Strahlmanipulation

In die meisten quantenoptischen Experimente wird das Licht aus den Lasern nicht direkt genutzt, sondern durch AOMs und Shutter in seine Frequenz, Phase und Amplitude manipuliert und geschaltet.

Für die Ansteuerung von AOMs ist eine Frequenzgeneratorkarte auf Basis eines DDS-Chips entwickelt worden. Diese Karte hat vier Ausgängen die unabhängig voneinander in ihre Frequenz, Phase und Amplitude eingestellt werden können. Dabei sind Frequenzen bis zu 200MHz bei einer Leistung von +0dBm möglich. Mit nachgeschalteten externen 1W-Verstärkern lassen sich damit bis zu vier AOMs betreiben.

Für den Betrieb von Shuttern ist eine Karte entwickelt worden welche bis zu acht Shutter ansteuern kann. Dabei wird auch ein Teil der Experimentsequenz auf der Karte gespeichert um einen genauen Ablauf der Experimentsequenz zu gewährleisten.

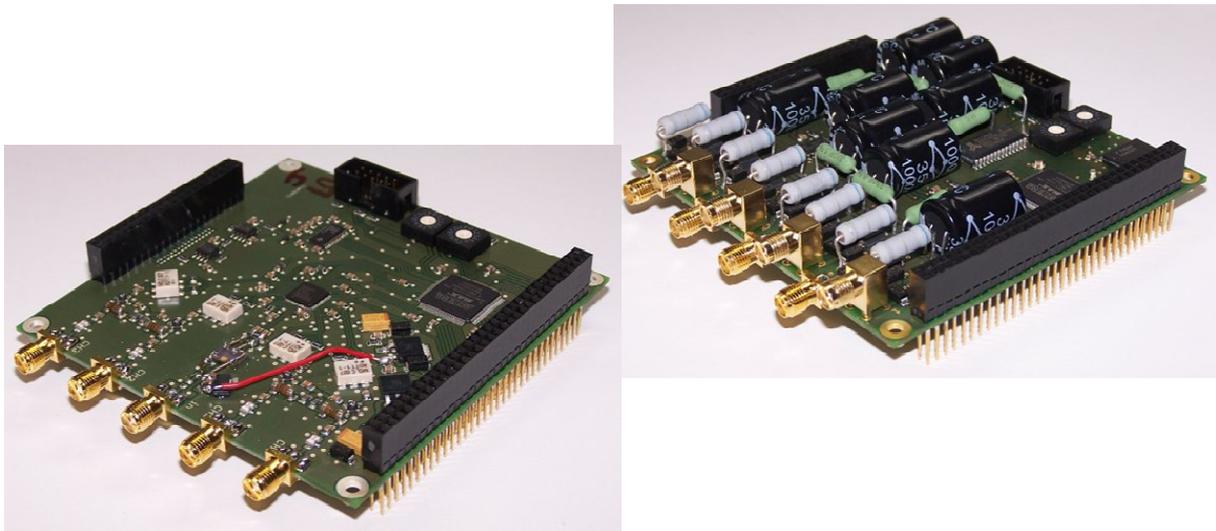


Abbildung 6. Links ein Foto der Frequenzgenerator für den Betrieb von AOMs und rechts die Karte zur Ansteuerung von Shuttern.

1.7. Vakuum

Für den Betrieb eines Quantenoptisches Experiment sind nicht nur Laser nötig sondern auch einen Ultrahochvakuumkammer. Um die benötigte Vakuumqualität zu erreichen werden wegen ihrer unterschiedlichen Pumpleistung für verschiedene Restgase normalerweise neben passiven Pumpen immer auch Ion-Getter Pumpen eingesetzt. Um eine Ion-Getter Pumpe zu betreiben ist eine Hochspannungsquelle entwickelt worden welche auch alle Betriebsparameter der Pumpe überwacht.

Mit einer maximale Spannung von 5 kV und einem Strom bis 100 μ A war das Modul ursprünglich für eine Pumpe vom Typ SEAS NEXTorr bei MAIUS ausgelegt, aber auch andere Pumpenmodelle können damit betrieben werden .

Da Ion-Getter Pumpen keine zuverlässigen Drucksensoren sind, wird normalerweise noch ein separater Drucksensor genutzt. Auch für die in unseren Experimenten üblichen Drucksensoren vom Typ Pfeiffer IKR 270 ist eine geeignete Elektronik entwickelt worden.

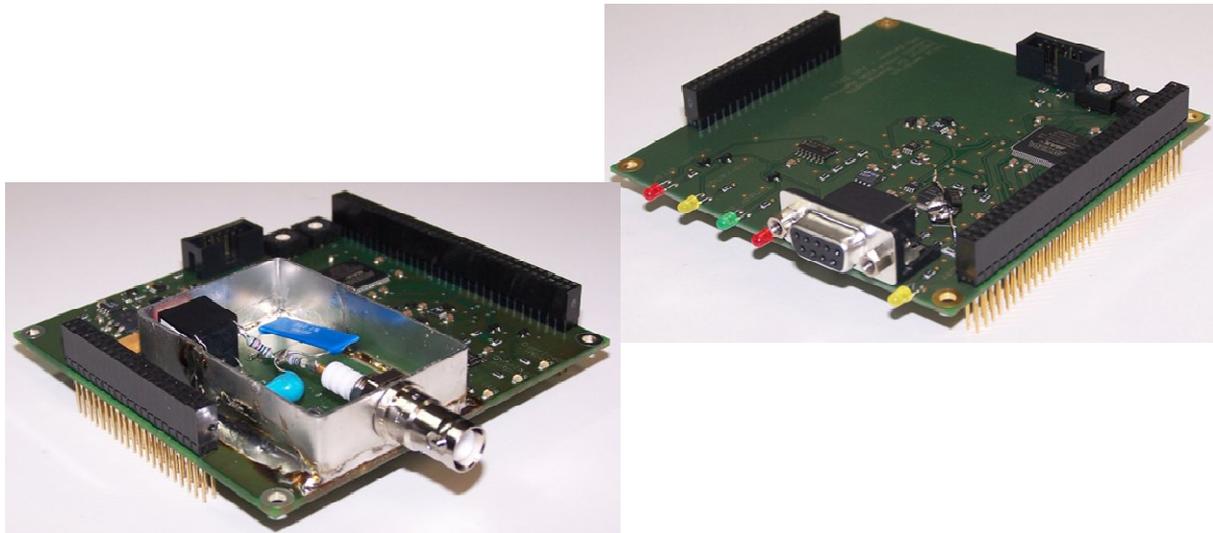


Abbildung 7. Links ein Foto der Ion-Getter-Treiber (vor dem Vergießen der Hochspannungssektion) für den Betrieb von Ion-Getter-Pumpen und rechts die Karte zum Auslesen von UHV-Drucksensoren.

1.8. Frequenzregler

Kernstück der in LASUS entwickelten Ansteuerungselektronik ist der Frequenzregler. Dieser Baustein ist notwendig da die passive Stabilität und Genauigkeit einer Diodenlaser bei weitem nicht ausreicht um zuverlässig die Wellenlänge auf den gewünschte atomaren Übergang zu halten wie es für ein quantenoptische Experiment nötig ist. Im normalen Laborbetrieb ist dies eine der größten und wichtigsten Baugruppe mit vielen Einstellmöglichkeiten bei deren Bedienung viel Erfahrung der Benutzer nötig ist. Die in LASUS neu entwickelte Karte setzt stark auf digitale Technik um damit Flexibilität zu gewinnen und um einen hohen Grad an Automatisierung zu ermöglichen.

Das zentrale Bauteil der Karte ist ein FPGA (Field Programmable Gate Array). Mit diesem wird u. A. die Frequenzzähler der Beateingänge, die eigentliche Regelung, und die Datenaufnahme für die Überwachung realisiert. Ein großes Vorteil de FPGAs ist, dass er sehr leicht auf andere Aufgaben umprogrammiert oder erweitert werden kann. Insbesondere auch auf solche die während der Entwicklung noch nicht bekannt waren. Der Rest der Karte besteht im Wesentlichen nur aus Analog-zu-Digital- und Digital-zu-Analog-Wandlern- mit den zugehörigen analogen Elementen.

Der Frequenzregler ist darauf ausgelegt einen Laser mittels Modulationsspektroskopie in der Absolutfrequenz auf einen atomaren Übergang zu stabilisieren und gleichzeitig die Frequenzen von bis zu drei Lasern mittels einer Schwebungsmessung relativ zu einem anderen Laser zu stabilisieren. Hiermit ist es zum Beispiel möglich das gesamte Rubidium-Laser-System von QUANTUS2 mit nur einer Regelplatine zu stabilisieren.



Abbildung 8. Foto der Frequenzreglerkarte. Die SMA-Buchsen sind Eingänge für drei Schwebungssignale, ein Spektroskopiesignal und vier Hilfeingänge. Die Ausgänge sind auf dem kleinen Stapelstecker untergebracht. Der große Chip auf der Platine ist der FPGA wo die gesamte Datenverarbeitung stattfindet.

1.9. Ergebnissen der Frequenzregler

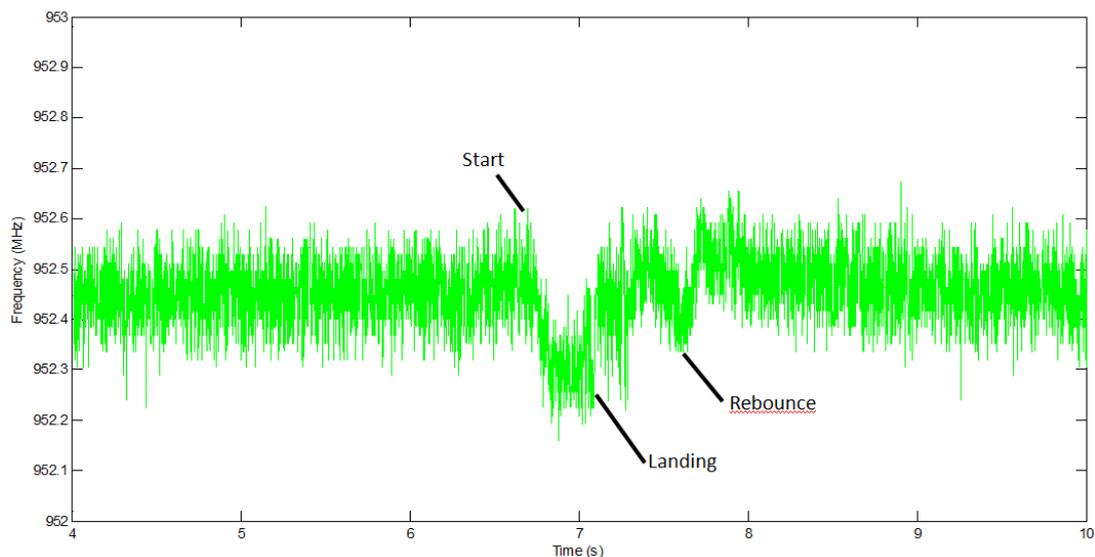


Abbildung 9. Eine Schwebungsmessung wobei der „DFB-Klotz Laser“ einen Stoß, ähnlich eines Katapultstarts bekommt, während er mit dem FPGA-basierten Frequenzregler auf Rubidium-Spektroskopie stabilisiert ist. Der Laser zum Vergleich ist eine weitere DFB-Diode die auf einem anderen Rubidium-Übergang stabilisiert ist. Alle Schwankungen lassen sich auf Probleme mit der Kabelverbindung zurückführen.

Die Anforderung an die Stabilisierungselektronik ergibt sich daraus, dass eine Stabilität und eine Genauigkeit deutlich besser als die Breite der benutzten Rubidium-Übergänge von etwa 6 MHz erreicht werden soll. Wie in Abbildung 9 für die Spektroskopiestabilisierung und Abbildung 10 für die Offsetstabilisierung zu sehen ist, ist dieses Ziel sogar während einiger Fallversuche erreicht worden. Die Stabilität und Genauigkeit der Spektroskopie sind damit ausreichend für quantenoptische Experimente.

Mit dem Offsetregler und einem FBH-ECDL bei Zählerzeiten von $10\mu\text{s}$ ist eine Regelbandbreite (Störungen bis zu dieser Frequenz werden von der Regelung unterdrückt) von 10kHz erreicht worden. Dies entspricht in etwa der bei diesen Parametern zu erwartenden Bandbreite. Die

Offsetregelung ist außerdem extrem Robust: selbst größte Störungen wie die Unterbrechung der Laserstrahlen bringen die Regelung nicht aus dem Tritt: Die Stabilisierung funktioniert wieder sobald das Licht wieder da ist und falls der richtige Betriebspunkt in Reichweite ist.

Eine Messung der Regelbandbreite der Spektroskopie steht noch aus. Bei der Spektroskopie ist anzumerken, dass die Ergebnisse stark von der Qualität der optische Aufbau abhängen. Auch braucht die Bedienung auf Grund der viele Möglichkeiten eine gewisse Übung der Benutzer. Um die Abhängigkeit an die Benutzer zu minimieren soll im Nachfolgerprojekt LASUS2 an diese Stelle ein hoher Automatisierungsgrad erreicht werden.

Die Frequenzregler-Karte ist mit verschiedene Laser (FBH-ECDL, FBH-DFB_gen2 und linear-cavity-ECDL) und auch verschiedene Regelalgorithmen (Schwebung und Spektroskopie) erfolgreich getestet worden. Deshalb ist davon auszugehen, dass die Stabilisierung von den leider noch nicht zur Verfügung stehenden Laser-Typen der dritten Generation kein größeres Problem darstellen wird.

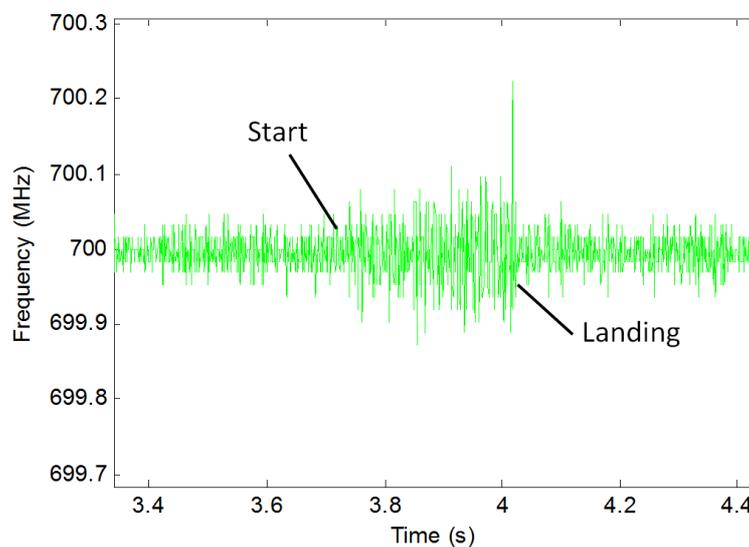


Abbildung 10. Eine Schwebungsmessung wobei der „DFB-Klotzlasers“ einen Stoß, ähnlich eines Katapultstarts bekommt, während er mit dem FPGA-basierte Frequenzregler auf eine Schwebung mit einem zweiten Laser stabilisiert wird. Ohne Stabilisierung gibt es Schwankungen von bis zu 20 MHz. Man sieht hier auch, dass der Zähler für die Datenaufnahme eine Auflösung von 16 kHz hat während der Zähler der Regelung eine Auflösung von 1.6MHz hat.

1.10. Integration

Um das gesamte Paket an LASUS-Technologien zu Demonstrieren ist ein Demonstrationssystem in Hamburg realisiert worden, welches in Abbildung 11 gezeigt ist. Damit sollen auch unabhängig von den bereits bei den einzelnen Experimenten eingesetzte Systemen die verschiedenen Komponenten weiter aufeinander zu abgestimmt werden. Außerdem wird vieles der in LASUS entwickelten Technologie bereits in den Projekten QUANTUS2, MAIUS, PRIMUS2 und iSense eingesetzt. QUANTUS2 ist dabei am weitesten fortgeschritten in der Integration. Auf Grund der großen Nachfrage sind mittlerweile fast 400 Platinen produziert worden oder befinden sich in Produktion.

In Kooperation mit MAIUS sind Rütteltests gemacht worden, wo die mechanische Eignung der LASUS-Platinen für einen Raketeneinsatz gezeigt worden ist. Auch sind einige Platinen erfolgreich bei einem QUANTUS2-Testflug des Lasersystems im Bremer Fallturm geflogen.

Während großer Teile der Entwicklung war kein eigener Laser verfügbar, sodass einige der Tests in Kooperation mit den anderen Experimenten gemacht worden sind. Dabei ist gezeigt worden, dass die in LASUS entwickelten Schaltungen für den Betrieb verschiedenster Diodenlasertypen geeignet sind, nicht nur der vom FBH.

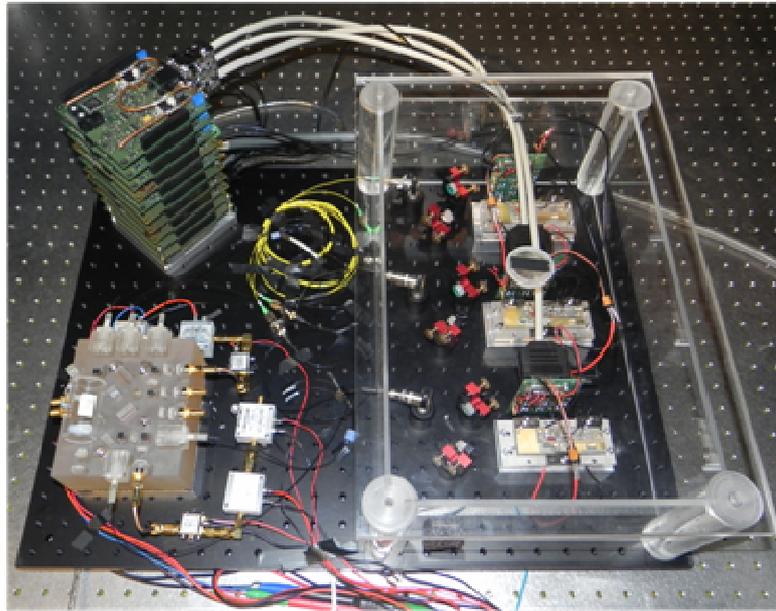


Abbildung 11. Das LASUS-Demonstrationssystem bestehend aus Laser vom FBH, Elektronik von der LUH und Verteiler von der UHH. In konventioneller Technik wäre dieses System um ein Vielfaches größer gewesen. Als Maßstab: Die Löcher in Tisch und Breadboard haben ein Raster von 25 mm.

2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises,

Die beantragten Mittel wurden entsprechend der Bewilligungen verwendet.

3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,

Das Projekt hat technologisches Neuland betreten und ist in seiner Zielrichtung weltweit einzigartig.

Für die Durchführung von Experimenten unter Schwerelosigkeit sind Masse und Volum ein kostbares Gut. Ohne die Elektronik vor LASUS ist es unmöglich quantenoptische Experimente wie QUANTUS2 oder MAIUS zu realisieren. Viele im Bau befindliche und geplante Experimente für den Weltraumeinsatz, aber auch für irdische transportable Experimenten brauchen kompakte rechnergesteuerte Steuerungselektronik wie sie in LASUS entwickelt wurde.

4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans,

Die in LASUS entwickelten Baugruppen werden bereits in verschiedenen Experimenten eingesetzt und verschiedene andere Experimente haben bereits Interessen gezeigt. Auch in vielen laufenden Projektanträgen wird mit LASUS-Technologie geplant.

5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen,

Von einigen Firmen werden mittlerweile Geräte für den Laborgebrauch angeboten die ähnliche (Teil-)Funktionen bieten, aber keins das in so kleiner Bauform alles beinhaltet was für ein komplettes Diodenlasersystem nötig ist.

Bei vielen sogenannten "Kompakten Atominterferometer" ist zwar der Vakuumkammer und manchmal auch die Optik vergleichsweise klein, aber setzen dann bei der Elektronik noch auf konventionelle, große, Laborgeräte wo vieles noch von Hand bedient werden muss.

6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 6.

Konferenzen:

DPG-Frühjahrstagung 2010, Hannover, 8.-12.3.2010, Poster, T.J. Wendrich, E.M. Rasel, W. Ertmer.
„Compact electronics for laser system in microgravity“

DPG-Frühjahrstagung 2011, Dresden, 15.-18.3.2011, Poster, T.J. Wendrich, E.M. Rasel, W. Ertmer.
„Compact electronics for laser system in microgravity“

DPG-Frühjahrstagung 2012, Stuttgart, 12.-16.3.2012, Poster, T.J. Wendrich, E.M. Rasel, W. Ertmer.
„Compact electronics for laser system in microgravity“