

Femtosekundenlaser-basierte Frequenzkämme für optische Atomuhren

Markus P. Plattner, Thomas Zeh, Alexander W. Koch

Motivation

Atomuhren basierend auf optischen Übergängen erreichen Meßunsicherheiten im Bereich von 10^{-17} . Mit Anwendung dieser Technologie könnten z.B. zukünftige Satellitennavigationssysteme hinsichtlich Positionergenauigkeit verbessert werden. Um die höheren Genauigkeiten der Frequenznormale zu nutzen, wird mit Hilfe eines Frequenzkamms die optische Frequenz in eine Radiofrequenz transformiert. Der Einsatz einer optischen Uhr in einem Satelliten setzt daher einen weltraumqualifizierten optischen Frequenzkamm voraus, welcher als Kernkomponente aus einem Femtosekundenlaser besteht.

Das Design für einen weltraumtauglichen Femtosekundenlaser muß folgende Punkte berücksichtigen:

- autonomer Betrieb
- Lebensdauer gleich der Missionsdauer
- leistungseffizient, geringe Masse und Volumen
- kompatibel mit Umweltbedingungen: Vakuum, Schwerelosigkeit, Strahlungsbelastung, erhöhte Temperaturbereiche, Vibration

Diese Bedingungen werden von faserbasierten Systemen am Besten erfüllt. Für die Untersuchungen wurden zwei modengekoppelte Faserlaser basierend auf Erbium und Ytterbium Dotierung ausgewählt. Das Ytterbium Lasersystem könnte nicht direkt als Frequenzkammgenerator verwendet werden, da es Pulse im Picosekundenbereich erzeugt, die noch komprimiert werden müßten. Dennoch ist die Technologie dieses Systems zur Weiterentwicklung für weltraumqualifizierte Hardware geeignet.

Repetitionsrate

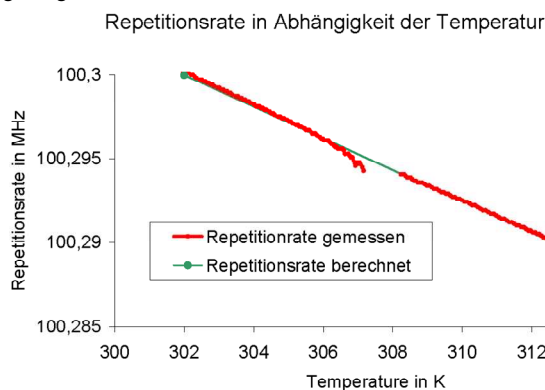
Die Abhängigkeit der Repetitionsrate von Temperaturänderungen des Lasers ist auf zwei Effekte zurückzuführen:

- Änderung der Resonatorlänge durch Längenausdehnung der optischen Fasern s_{Faser} und des Aluminiumgehäuses, wodurch sich die Freistrahstrecke s_{Luft} des Lasers ändert.
- Änderung des Brechungsindex n_{Faser} der Glasfaser bei Temperaturschwankungen

Eine Kombination beider Effekte resultiert in einem nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Repetitionsrate f_{rep} und der Temperatur T , welcher sich in linearer Näherung um den Punkt $T_0=293K$ zu folgender Gleichung vereinfacht:

$$f_{rep}(T) = f_{rep,0} - c \frac{(n_{Faser,0} s_{Faser,0} (\alpha_{Luft} + \alpha_{Faser}) + n_{Luft} s_{Luft,0} \alpha_{Alu})}{(n_{Faser,0} s_{Faser,0} + n_{Luft} s_{Luft,0})^2} (T - T_0) + O(T^2)$$

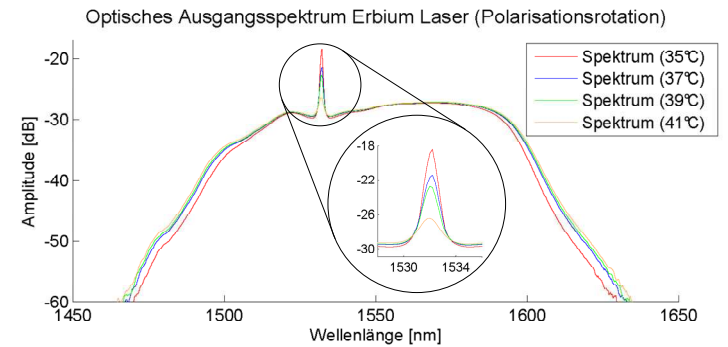
Wobei α die jeweiligen Ausdehnungskoeffizienten bezeichnet und der Index 0 die Werte bei $T=T_0$ kennzeichnet. In der folgenden Abbildung ist die gemessene und die nach obiger Formel berechnete Repetitionsrate in Abhängigkeit der Temperatur aufgetragen.



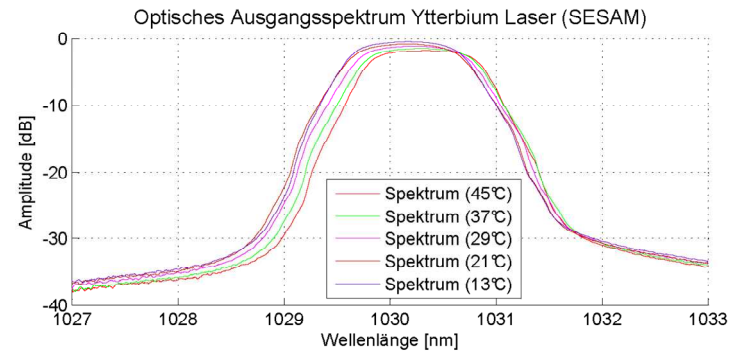
Mit Hilfe dieser formelmäßigen Zusammenhänge können Stellmechanismen zur Stabilisierung der Repetitionsrate bei gegebenem Temperaturbereich geeignet parametrisiert werden.

Ausgangsspektrum

Das Erbium Lasersystem, welches auf Modenkopplung nach dem Prinzip der nichtlinearen Polarisations-Rotation basiert, zeigt temperaturabhängige „continuous wave“ (cw) Peaks im Ausgangsspektrum.



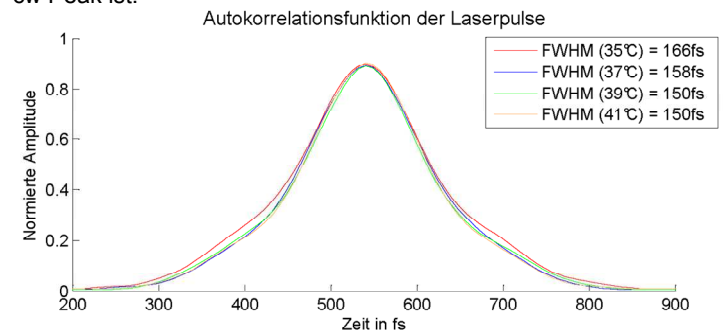
Dies deutet darauf hin, dass ein sich einige Moden im Resonator mit höherer Energie ausbilden, was zu einer Verschmälerung des Ausgangsspektrums führt.



Beim Ytterbium basierten Laser, welcher einen SAM (saturable absorber mirror) als Modenkoppler verwendet, tritt kein cw Peak auf, was für die intrinsisch stabilere Technologie spricht. Dies ist auf die Verwendung von polarisationserhaltenden Fasern innerhalb des Lasers zurückzuführen.

Pulsdauer

Mit Hilfe eines optischen Autokorrelators konnte nachgewiesen werden, dass sich die Höhe des cw Peaks direkt auf die Pulsdauer auswirkt. Bei einem größeren cw Peak sind durch das schmalere Ausgangsspektrum weniger Resonatormoden miteinander gekoppelt. Dadurch ist die Pulsdauer um so geringer, je höher der cw Peak ist.



Zusammenfassung

Die Testergebnisse zeigen, dass faserbasierte Laser prinzipiell für den zu erwartenden Temperaturbereich in einem Satelliten geeignet sind. Für einen weltraumbasierten Femtosekundenlaser bietet sich das Prinzip der Modenkopplung basierend auf einem SAM an, da die Performance des Lasers im Gegensatz zur Polarisations-Rotation keine Temperaturabhängigkeit zeigt.