

VERIFIKATION DER LEISTUNGSFÄHIGKEIT AUSGEWÄHLTER UNTERSYSTEME FÜR DIE LISA MISSION

P. F. Gath, D. Weise, Th. Heinrich, A. Schöllig, S. Otte
Astrium GmbH Satellites, 88039 Friedrichshafen, Deutschland

Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchung zur Systemleistung alternativer Nutzlastkonzepte für die LISA Mission (Laser Interferometer Space Antenna) werden bei Astrium derzeit einzelne Untersysteme der Nutzlast auf ihre Leistungsfähigkeit hin überprüft. Dies geschieht sowohl durch theoretische Untersuchungen im Rahmen von Simulationen als auch durch experimentelle Laboruntersuchungen.

Ein Themenschwerpunkt ist dabei die genaue Vermessung von Wärmeausdehnungskoeffizienten verschiedener Materialien. Da zur Erreichung der Gesamtsystemleistung Stabilitäten von einigen wenigen $\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ im Frequenzbereich von 1 mHz bis 1 Hz erforderlich sind, sind neben einer sehr guten Temperaturstabilität der Nutzlast auch sehr kleine Wärmeausdehnungskoeffizienten erforderlich. Dies kann in einigen Bereichen mit einer speziellen Glaskeramik (Zerodur[®]) erreicht werden. Um die Masse der Nutzlast zu reduzieren soll jedoch auch ein speziell auf Nullausdehnung gefertigter Kohlefaserverbundwerkstoff zum Einsatz kommen. Erste Proben dieses Materials werden mit Hilfe eines hochgenauen Laserinterferometers vermessen und charakterisiert.

Ein zweiter Themenschwerpunkt ist der Entwurf und die Implementierung eines digitalen Phasenmesssystems. Im Gegensatz zu kommerziell erhältlichen Messsystemen sind dabei die systemseitigen Anforderungen der LISA Mission zu berücksichtigen. Dazu wurde ein digitaler Phase-Locked-Loop (DPLL) zunächst in einer Simulationsumgebung entworfen und auf einem kommerziellen FPGA-Board implementiert. Das Gesamtsystem erlaubt schließlich eine Frequenz- und Phasenmessung durch die eine Messgenauigkeit von wenigen $\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ im relevanten Frequenzbereich erreicht werden kann.

1. EINLEITUNG

Die Laser Interferometer Space Antenna (LISA) Mission ist ein gemeinsames Projekt von ESA und NASA zur Messung von Gravitationswellen im Weltraum. Dazu ist die hochgenaue Vermessung von Entfernungsschwankungen zwischen inertialen Referenzpunkten notwendig. LISA befindet sich zurzeit in der sog. Mission Formulation Phase (vgl. z.B. [1]). In dieser Projektphase wird ein Gesamtsystemkonzept erstellt und kritische Untersysteme werden auf Ihre Leistungsfähigkeit hin überprüft. Diese Überprüfung wird sowohl durch theoretische Untersuchungen als auch durch verschiedene Laborexperimente durchgeführt.

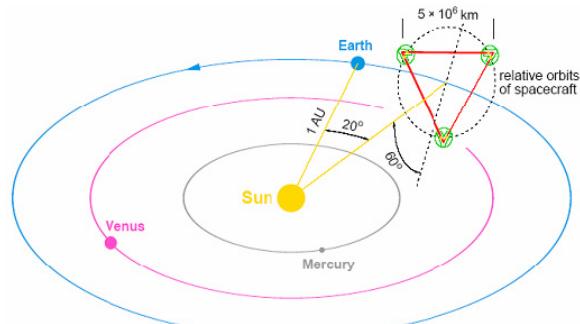


BILD 1. LISA Missionsgeometrie

Das LISA Flugsegment besteht aus drei Sonden die im Abstand von etwa 60 Millionen Kilometern in Form eines nahezu gleichseitigen Dreiecks vor oder hinter der Erde fliegen. Die Orbitmechanik führt dazu, dass sich das Dreieck einmal jährlich um sich selbst dreht und sich auch entlang der einzelnen Verbindungslien eine Relativgeschwindigkeit zwischen den Satelliten von bis zu 18 m/s einstellt. Die Orbitgeometrie ist in BILD 1 dargestellt.

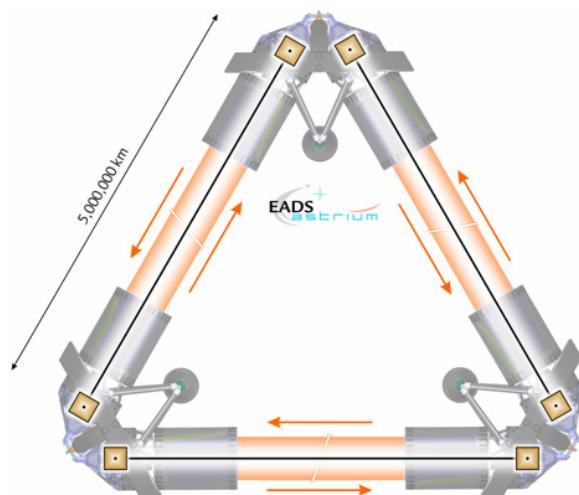


BILD 2. Aufbau des Laser-Interferometers

Um die Detektion von Gravitationswellen zu ermöglichen werden zwischen den drei Sonden Laserstrahlen ausgetauscht (BILD 2). Mit Hilfe dieser Laserstrahlen wird ein Interferometer mit einer Empfindlichkeit von etwa $12 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ bei 1 mHz aufgebaut. Mit Hilfe der drei Interferometerarme können verschiedene Interferometer-Geometrien realisiert werden. Diese reduzieren sich auf ein klassisches Michelson-Interferometer für den Fehlerfall, dass einer der drei Arme im Verlauf der Mission ausfallen sollte.

Um die hohe Messempfindlichkeit auch bei kleinen Frequenzen zu garantieren ist es notwendig, die inertialen Referenzpunkte von äußeren Störungen, beispielsweise durch den Sonnenwind oder durch Vibrationen auf der Sonde selbst, zu isolieren. Dies wird durch ein sog. Drag-Free Control System erreicht (Ref. [2]), welches mit Hilfe eines Mikro-Newton Schubsystems die einzelnen Sonden in sechs Freiheitsgraden um zwei an Bord befindliche Prüfmassen herum kontrolliert (vgl. BILD 3). Ein derartiges System wird auf der Technologiedemonstratormission LISA Pathfinder demonstriert, die sich derzeit in der Implementierungsphase befindet und voraussichtlich 2010 starten wird (siehe Ref. [3]).

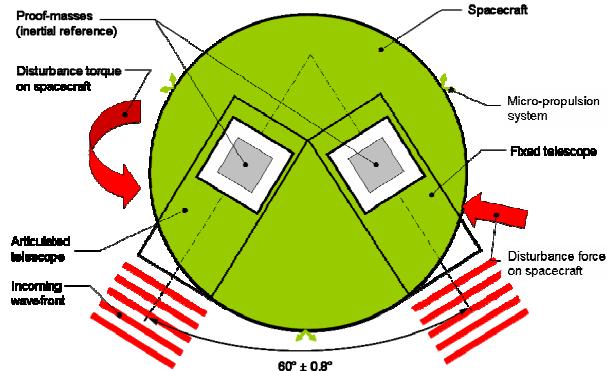


BILD 3. Prinzip des Drag-Free Control Systems

Im Rahmen des optischen Metrologiesystems wird zunächst die Bewegung jeweils einer Referenz-Prüfmasse (PM) bezüglich einer optischen Bank (OB) vermessen. Auch hierzu wird ein Laser-Interferometer (Optical Readout „ORO“) verwendet. In einem zweiten Schritt werden Abstandsschwankungen zwischen der lokalen optischen Bank, und der jeweils dazugehörigen optischen Bank auf der nächsten Sonde in 5 Millionen Kilometer Entfernung vermessen. Diese Zwei-Schritt-Messung wird auch als „Strap-Down“ System bezeichnet und ist in BILD 4 skizziert.

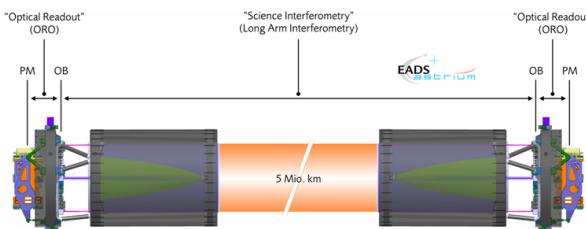


BILD 4. Ein Arm des LISA Interferometers

Um mit Hilfe eines Laserstrahls eine Entfernung von 5 Millionen Kilometern zu überbrücken ist neben einer relativ hohen, kontinuierlichen Leistung von etwa 1 Watt auch

eine Vergrößerungsoptik in Form eines Teleskops notwendig. Im Falle von LISA wurde hierzu ein Schieflspiegelteleskop mit einer Apertur von 40 cm ausgewählt. Dieses Teleskop ist durch eine thermische Isolation vom restlichen Instrument getrennt. Dadurch wird erreicht, dass das optische Metrologiesystem bei Raumtemperatur betrieben werden kann, während sich das Teleskop auf -60°C bis -100°C abkühlt.

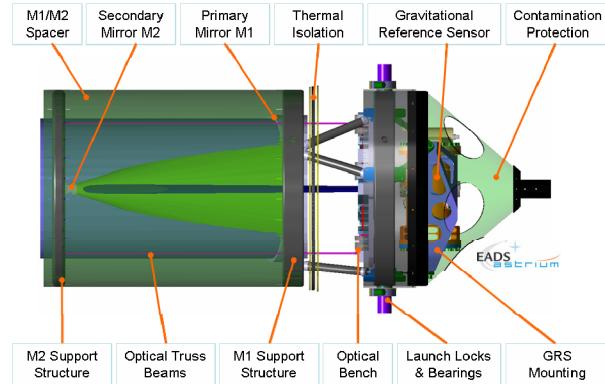


BILD 5. Aufbau des optischen Metrologiesystems

Die optische Bank selbst besteht aus Zerodur®, einer speziellen Glaskeramik mit einem thermalen Ausdehnungskoeffizienten kleiner als $2 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$. Zusammen mit einer hohen Thermalstabilität von $10^{-5} \text{ K}/\sqrt{\text{Hz}}$ bei 1 mHz lässt sich auf der Bank eine Stabilität im Pikometerbereich erreichen. Das Teleskop selbst besteht im Wesentlichen aus einem Haupt- und einem Sekundärspiegel die durch eine Kohlefaserverbundstruktur miteinander verbunden werden. Auch dieser Teil des Instrumentes muss auf Pikometer stabil sein. Dazu soll ein speziell auf niedrige Wärmeausdehnung gewickeltes Kohlefaserverbundrohr zum Einsatz kommen. Um sicherzustellen, dass die für LISA notwendige geringe Wärmeausdehnung reproduzierbar erreicht werden kann, werden derzeit entsprechende Materialproben im Labor vermessen. Dies ist in Sektion 2 dieser Veröffentlichung detailliert beschrieben.

Zur Vermessung wird ein Heterodyn-Interferometer verwendet. Das grundlegende Messprinzip ist in BILD 6 skizziert. Dabei wird ein Messstrahl vom Prüfkörper (in diesem Fall die Prüfmasse) reflektiert und mit einem Referenzstrahl zur Interferenz gebracht. Zur Verbesserung der Messgenauigkeit wird zudem eine Interferenz zwischen dem Messstrahl und dem Referenzstrahl ohne Reflexion an der Prüfmasse erzeugt. Die Differenz der beiden Signale ergibt die Weglängenänderung zum Prüfkörper und ein eventuelles Rauschen auf Mess- und Referenzstrahl wird als Common Mode Signal unterdrückt.

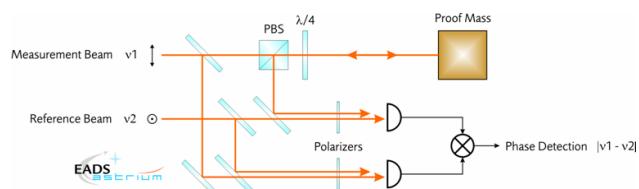


BILD 6. Aufbau eines Laserinterferometers mit linear polarisiertem Laserlicht

Als Detektoren kommen Photodioden zum Einsatz. Um neben einer Vermessung von Weglängenänderungen auch eine Drehung des Prüfkörpers vermessen zu können

werden sogenannte Vier-Quadrantdiode verwendet. Durch die Phasenverschiebung des Signals auf den jeweiligen Quadranten können Verkipplungen mit einer Empfindlichkeit von einigen $nrad/\sqrt{Hz}$ um die beiden Achsen senkrecht zum Messstrahl gemessen werden. Das Prinzip ist in BILD 7 beschrieben.

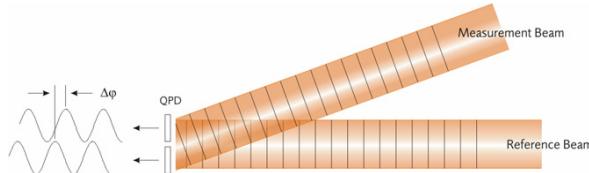


BILD 7. Wellenfrontdetektion

Die Auswertung der elektrischen Signale verfolgt mit Hilfe eines Phase-Locked-Loops (BILD 8). Während zur Zeit im Rahmen der Wärmeausdehnungskoeffizientbestimmung noch ein weitgehend analoges System zum Einsatz kommt, wurde mit entsprechenden Arbeiten zur Realisierung eines vollständig digitalen Phase-Locked-Loops begonnen, das die Anforderungen der LISA Mission erfüllen soll. Diese Arbeiten werden in Sektion 3 dieses Papiers beschrieben.

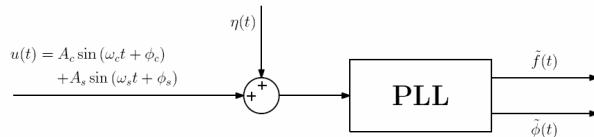


BILD 8. Phasenmessung mit Hilfe eines Phase-Locked-Loops

2. VERMESSUNG VON WÄRMEAUSDEHNUNGSKOEFFIZIENTEN

Eine grundlegende Technologie zur Realisierung der LISA Mission ist die Herstellung einer Teleskopoptik mit geringen optischen Pfadlängenänderungen. Einerseits wird dies durch eine Umgebung mit hoher thermaler Stabilität sichergestellt, andererseits durch die Verwendung eines speziell auf kleine Wärmeausdehnung gewickeltes Kohlefaserverbundmaterial (CFRP).

Für eine erste Überprüfung ([4]) kam zunächst ein CFRP Rohr zum Einsatz, welches 1997 zur Charakterisierung der Festigkeit einer Verklebung zwischen Titan und CFRP im Rahmen der Meteosat Second Generation Mission verwendet wurde. Das dabei verwendete Material hat einen theoretischen Wärmeausdehnungskoeffizienten von $-6,47 \cdot 10^{-7} K^{-1}$.



BILD 9. Prüfkörper mit Titanflanschen

Die Titanflansche wurden für die Messung entfernt und durch entsprechende Spiegelhalter ersetzt. Zur Vermessung des thermalen Wärmeausdehnungskoeffizienten wird die Probe mit Hilfe von Peltierelementen erhitzt und abgekühlt. Um eine gleichmäßige Erwärmung und Abkühlung zu erreichen ist die Probe zusätzlich von einem Kupferrohr

umgeben. Das Prinzip ist in BILD 10 verdeutlicht. Die Temperaturen werden sowohl am Heizer als auch an verschiedenen Stellen des CFRP Rohres gemessen.

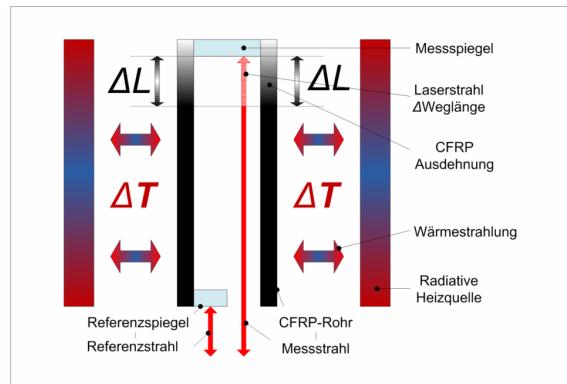


BILD 10. Prinzipieller Messaufbau

Eine große Herausforderung bei der Vermessung des Prüfkörpers ist die Konstruktion einer Spiegelhalterung die einerseits dem Spiegel eine mechanisch stabile Fixierung bietet und andererseits das Messergebnis nicht zusätzlich durch die eigene Wärmeausdehnung beeinflusst. Das prinzipielle Konstruktionsprinzip für eine derartige Spiegelhalterung ist in BILD 11 gezeigt. Es stellt eine thermisch neutrale Ebene zur Verfügung in der die jeweilige Spiegeloberfläche angebracht wird von der aus der Messstrahl reflektiert wird. Die Halterung selbst wird in den Prüfkörper geklemmt.

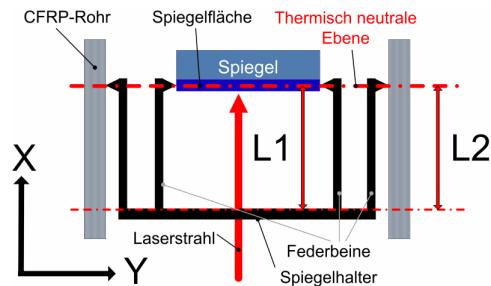


BILD 11. Funktionaler Aufbau eines Spiegelhalters

Um Pfadlängenänderungen aufgrund von Schwankungen in der Luftpumpe zu vermeiden wird der gesamte Versuch unter Vakuumbedingungen durchgeführt. Dies reduziert auch den Einfluss von thermalen Schwankungen da ein Wärmeaustausch nahezu ausschließlich durch Strahlung erfolgt.

2.1. Versuchsaufbau

Die Realisierung des Probenhalters ist in BILD 12 gezeigt. Im Probenhalter ist bereits die CFRP Probe mitsamt den Spiegelhaltern eingespannt. Der Aufbau wird über Glasfaserstützen mit einem Interferometer-Board (Ref. [5], [6] und [7]) verbunden. Glasfasermaterial wurde hier aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit gewählt um die konduktive Wärmeübertragung zu minimieren.

Um eine Ausrichtung der Probe zum Laserstrahl zu ermöglichen enthält der Versuchsaufbau Feinstellschrauben und Federringe. Diese ermöglichen eine genaue Ausrichtmöglichkeit in zwei Winkelfreiheitsgraden bezüglich des Interferometer-Boards.

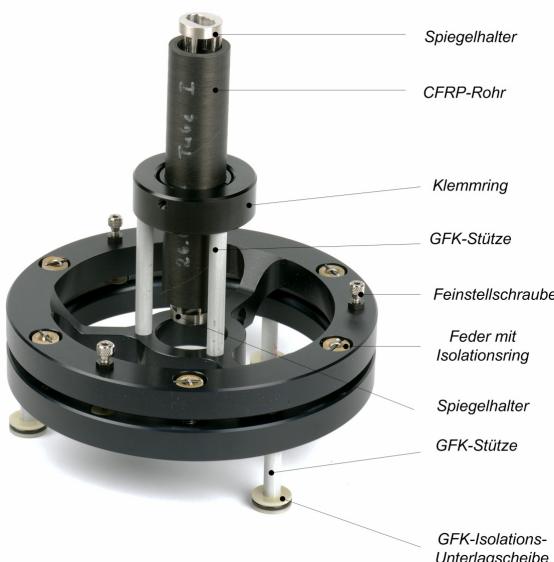


BILD 12. Realisierung des Probenhalters inklusive des CFRP Prüfkörpers

Eine Anforderung bei der Konstruktion der Spiegelhalter war die Möglichkeit, beide Spiegel mit einem einheitlichen Halter zu montieren. Die Realisierung dieses Halters ist BILD 13 zu entnehmen. Dabei ist der Halter sowohl mit dem oberen Spiegel (linkes Bild) als auch mit dem unteren Spiegel (rechtes Bild) gezeigt. Wie bereits aus dem prinzipiellen Messaufbau (BILD 10) hervorgeht, muss der untere Spiegel einen Durchgang für den Laserstrahl bieten, der vom oberen Spiegel reflektiert wird. Dies wird durch eine entsprechende Aussparung am unteren Spiegel erreicht.



BILD 13. Realisierung der Spiegelhalter inklusive Spiegel

Der gesamte Aufbau wird schließlich mit dem Interferometer-Board verbunden. Dies ist in BILD 14 gezeigt. Der Probenhalter selbst inklusive einem montierten Kühlkörper ist dabei in eine silbrige Multi-Layer-Isolations-Schutzfolie (MLI) verpackt um ihn von externen Temperaturfluktuationen abzuschirmen und gleichzeitig den Wärmeeintrag in das Interferometer-Board zu minimieren.

Das Interferometer-Board selbst ist auf einer Aluminium Grundplatte aufgebaut. Dabei wurde der Aufbau der optischen Elemente so gewählt, dass Temperaturfluktuationen nach Möglichkeit den Mess- und Referenzstrahl gleichermaßen (common mode) beeinflussen bzw. erst nach der Interferenz beider Strahlen auftreten können.

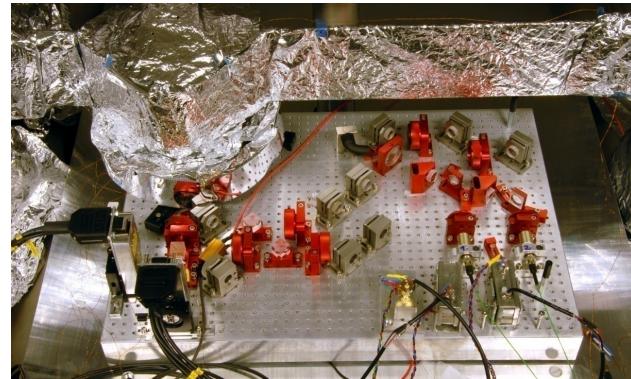


BILD 14. Optisches Interferometer inklusive der in thermale MLI-Schutzfolie verpackten Probenhalterung (links oben)

Da die Probe im Verlauf des Versuches aufgeheizt und wieder abgekühlt werden muss, wurde die thermische Schutzhülle um den Probenhalter derart entworfen, dass nur ein Minimum an Wärmestrahlung auf das Interferometer-Board austreten kann. In Kombination mit den Glasfaser-Stützen wird dadurch eine thermische Beeinflussung des Interferometeraufbaus durch die Heizelemente minimiert (BILD 15).

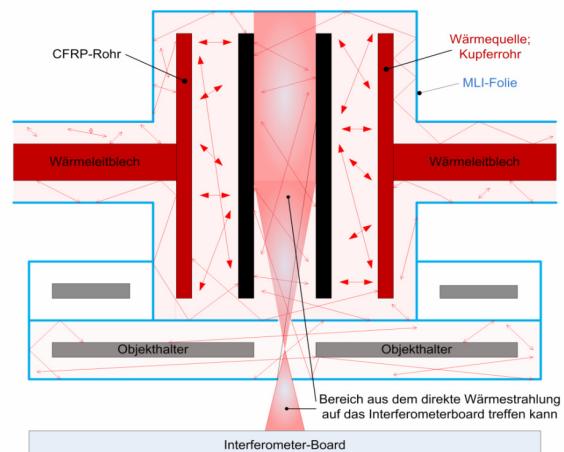


BILD 15. Wärmestrahlung von der Probenhalterung auf das Interferometer-Board

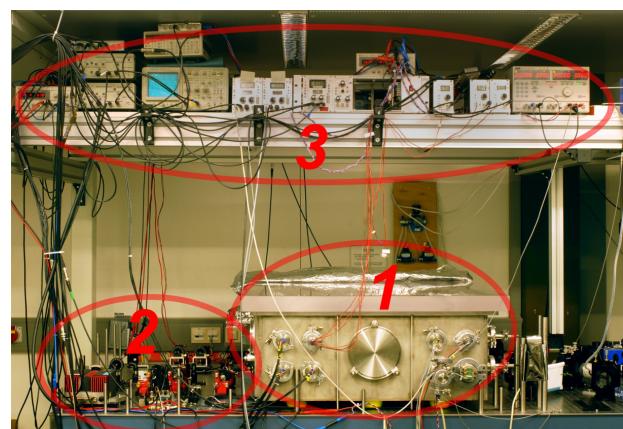


BILD 16. Gesamter Versuchsaufbau mit Vakuumkammer (1), Laseraufbau (2) und Messgeräten (3)

BILD 16 zeigt schließlich den vollständigen Versuchsaufbau. Der Probenhalter sowie das Interferometer-Board befinden sich in der Vakuumkammer (1). Das Lasersystem sowie die dazugehörigen Modulatoren und weitere Hilfsoptik sind außerhalb der Vakuumkammer aufgebaut (2) und das Laserlicht wird über Glasfasern in die Vakuumkammer geleitet. Alle notwendigen Mess- und Steuergeräte sind oberhalb der Vakuumkammer (3) angeordnet. Nicht abgebildet ist der PC zur Messdatenerfassung und Steuerung des gesamten Versuchs. Die Datenerfassung selbst erfolgt mit LabView 8.2.

2.2. Versuchsvorbereitung und -durchführung

Das verwendete CFRP Material zeigt neben einer thermalen Wärmeausdehnung auch eine Längenänderung durch eine Veränderung des Feuchtigkeitsgehalts. Dabei entspricht eine Längenänderung aufgrund eines 100 K großen Temperaturunterschiedes ungefähr der Längenänderung aufgrund einer 1%-igen Feuchtigkeitsänderung.

Um eine Beeinflussung der Messung durch eine Feuchtigkeitsabnahme im Material zu vermeiden wurde der Prüfling über zwei Monate in einem Vakuum-Trockenschrank gelagert. BILD 17 zeigt die gemessene Gewichtsabnahme des Prüflings. Nach zwei Monaten Trocknung wurden Werte erreicht, die eine genügend kleine Beeinflussung der CTE Messungen gewährleisten.

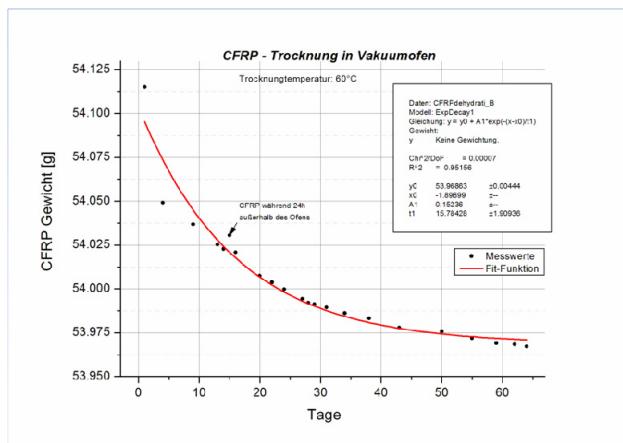


BILD 17. Gewichtsabnahme des CFRP Prüflings während der Vakuumtrocknung.

Für die eigentliche Messung des thermalen Ausdehnungskoeffizienten wurden sinusförmige Anregungsfunktionen verwendet. Dabei wurden unterschiedliche Magnituden und Frequenzen verwendet um sicherzustellen, dass die Messergebnisse nicht durch transiente Effekte oder Hysterese verzerrt werden. Außerdem wurden Temperaturmessungen an verschiedenen Stellen des Messaufbaus sowie an der Probe durchgeführt.

BILD 18 zeigt exemplarisch den Temperaturverlauf der Heizung sowie des CFRP Rohres. Es ist deutlich eine Zeitverzögerung von etwa 0,16 Stunden zu beobachten. Diese entspricht der Zeitkonstante des Versuchsaufbaus für die Übertragung einer Wärmeeinleitung vom Heizer zur Probe.

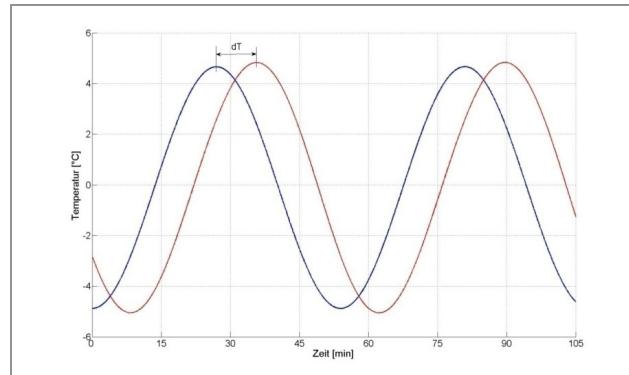


BILD 18. Temperaturverlauf des Anregungssignals direkt am Heizer und am CFRP Rohr

2.3. Messdatenauswertung

Bei der Auswertung der Messdaten kamen verschiedene Auswertungsverfahren zum Einsatz.

Datenfit: Mit Hilfe eines Least Square Fits wurde parametrisierte Funktionen an die Messdaten angenähert. Je nach verwandter Anregungsfunktion kann dies eine Sinusfunktion oder eine Exponentialfunktion sein.

Hysteresekurve: Die Ausdehnung wird über der Temperatur aufgetragen und aus der Steigung der Kurve kann der CTE ermittelt werden. Weitere Systemeigenschaften können aus der Form der Hysteresekurve ermittelt werden.

Frequenzbereichsanalyse: Im Falle einer sinusförmigen Anregung kann aus einer Frequenzbereichsanalyse ein Rückschluss auf die Amplitudenverhältnisse der Anregung und der Wärmeausdehnung gezogen werden.

Datenfilterung: Die Messdaten werden mit einem Butterworth-Filter linearisiert und die Amplitude durch eine Maximumsuche berechnet.

2.4. Messergebnisse

In BILD 19 ist ein Datenfit mit einer Sinusfunktion gezeigt. Dabei werden sowohl die Temperaturmessdaten als auch die gemessenen Ausdehnungen gefittet. Es ist deutlich das negative Vorzeichen des CTE zu erkennen (schrumpfen der Probe bei steigender Temperatur).

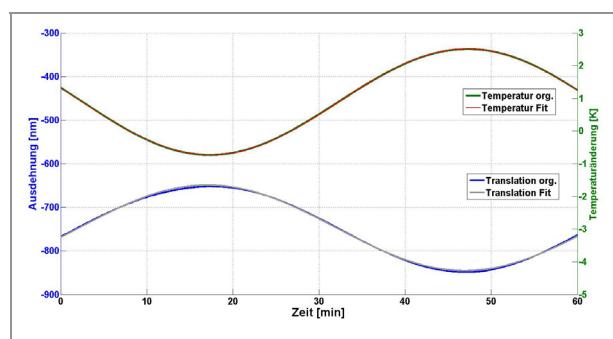


BILD 19. Datenfit mit einer Sinusfunktion

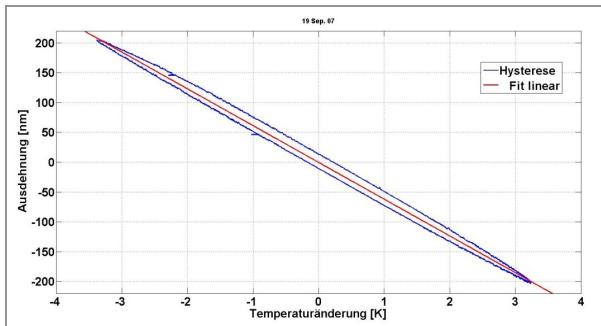


BILD 20. Hystereseauftragung der Messdaten

Eine Auftragung der Probenausdehnung über der Temperaturänderung ist in BILD 20 gezeigt. Es lässt sich eine leichte Hysterese erkennen.

BILD 21 zeigt die Darstellung der Messdatenreihen als Spektren. Die absolute Höhe der Linien bei der Anregungsfrequenz hängt von der Anzahl der durchgeführten Temperaturzyklen ab. Für eine zuverlässige Aussage über den CTE sind mindestens 50 Temperaturzyklen notwendig.

BILD 22 zeigt schließlich die Messdatenauswertung mit Hilfe verschiedener Butterworthfilter. Dabei wurde als Anregung ein Temperaturschritt verwendet.

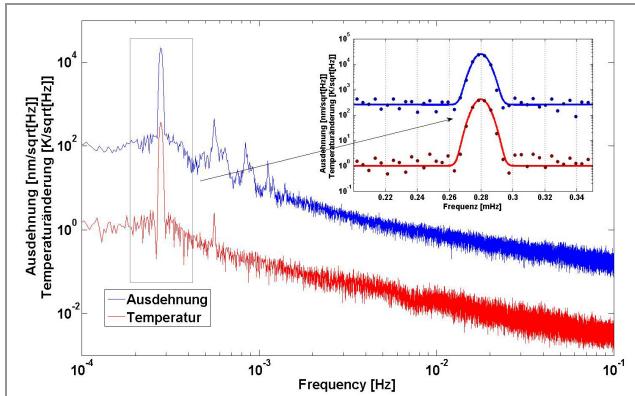


BILD 21. Spektren der gemessenen Temperaturen und Probenausdehnungen

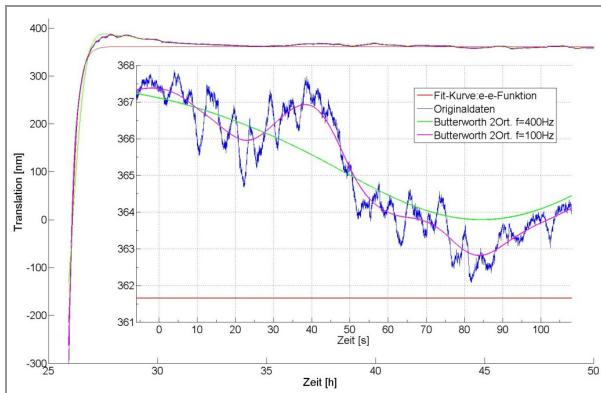


BILD 22. Filterung der Messdaten mit verschiedenen Butterworth-Filters

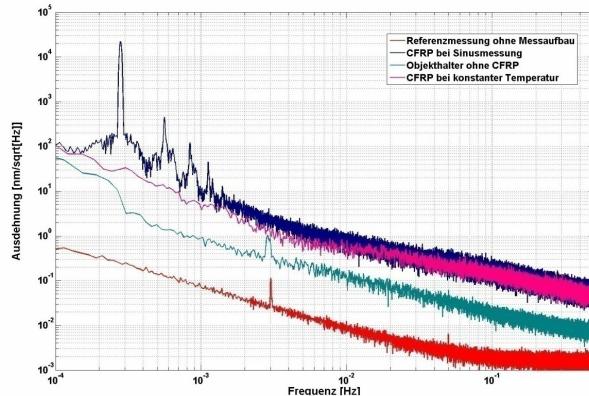


BILD 23. Messrauschen und Signale

Schließlich wurde noch das grundlegende Messrauschen der Messeinrichtung selbst bestimmt (BILD 23). Dabei wurde der Versuchsaufbau durch eine Referenzmessung ohne Probenhalterung (rot, unterste Kurve), mit Probenhalterung aber ohne CFRP Rohr (cyan, 2. Kurve von unten), sowie eine Referenzmessung mit CFRP Rohr (pink, ohne Sinusanregung, 2. Kurve von oben) durchgeführt. Erwartungsgemäß zeigt sich eine Zunahme des Messrauschen durch hinzufügen der weiteren Komponenten.

Datum	CTE [K^{-1}]	Funktion	Auswertung
18. Sep 07	$-5.07 \cdot 10^{-3}$	Sinus	Fit
19. Sep 07	$-5.56 \cdot 10^{-3}$	Sinus	Fit
	$-5.47 \cdot 10^{-3}$	Sinus	Fitter
20. Sep 07	$-5.50 \cdot 10^{-3}$	Sinus	Fit
27. Sep 07	$-5.25 \cdot 10^{-3}$	Sinus	Fit
28. Sep 07	$-5.16 \cdot 10^{-3}$	Sinus	Fit
1. Okt 07	$-5.19 \cdot 10^{-3}$	Sinus	Fit
2. Okt 07	$5.12 \cdot 10^{-3}$	Sinus	Fit
25. Okt 07	$-5.09 \cdot 10^{-3}$	Impuls	Hysterese
	$-5.26 \cdot 10^{-3}$	Impuls	Fitter
26. Okt 07	$-5.29 \cdot 10^{-3}$	Impuls	Hysterese
29. Okt 07	$-5.41 \cdot 10^{-3}$	Sinus	Fit
1. Nov 07	$-4.46 \cdot 10^{-3}$	Sinus	Fit
11. Nov 07	$4.46 \cdot 10^{-3}$	Sinus	Fit
15. Nov 07	$-5.26 \cdot 10^{-3}$	Impuls	Fit
19. Sep 07	$-5.47 \cdot 10^{-3}$	Sinus	Hysterese

TAB 1. Ermittelte CTE Werte aus verschiedenen Messkampagnen

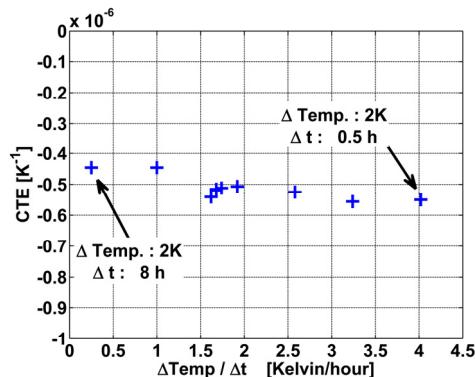


BILD 24. CTE Messungen mit verschiedenen Temperaturänderungsgeschwindigkeiten

TAB 1 zeigt eine Übersicht der aus verschiedenen Messkampagnen ermittelten CTE Werte. Die Messungen erfolgten mit verschiedenen Anregungsfrequenzen (s.a. BILD 24), -funktionen und auch der Vergleich mit der Reaktion des Systems auf eine schrittweise Anhebung der Temperatur ergab einen Wärmeausdehnungskoeffizienten von $-(5,19 \pm 0,24) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. Dies ist eine Abweichung von etwa 20% vom theoretisch vorhergesagten Wert. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die Vorgeschichte des Prüflings. Große mechanische und thermische Belastungen des Prüflings können zu Mikrorissen im CFRP geführt haben, die den Wärmeausdehnungskoeffizienten beeinflussen. Außerdem kann auch die Alterung des Materials zu einer Änderung des Koeffizienten geführt haben. Eine weitere mögliche Fehlerquelle ist ein systematischer Fehler in der theoretischen CTE Vorhersage. Nachfolgenden Versuchen mit dediziert für den Versuch hergestellten Proben sowie eine Referenzprobe aus Zerodur® sollen die Fehlerquelle eingrenzen und letztlich Daten über die Reproduzierbarkeit eines CFRP Rohres mit einem bestimmten CTE liefern.

3. DIGITALES PHASENMESSSYSTEM

Eine Erweiterung des in der vorhergehenden Sektion beschriebenen Messaufbaus ist die Einführung einer vollständig digitalen Phasenmessung. Hierzu wurde zunächst die Auslegung eines digitalen Phase-Locked-Loops (PLL) durchgeführt. Parallel dazu erfolgte eine erste Programmierung auf einem kommerziellen FPGA Board um die für den Messbetrieb erforderlichen Datenschnittstellen zur Verfügung zu stellen.

3.1. Auslegung einer Digitalen PLL

Die Auslegung der PLL erfolgte basierend auf den in der Literatur beschriebenen Ansätzen im Rahmen von Ref. [8]. Der grundlegende Aufbau einer analogen PLL ist in BILD 25 gezeigt. Für eine Anwendung im Rahmen der LISA Mission sind sowohl die Phasen als auch die Frequenzmessungen von Interesse. Dies ist in BILD 26 für eine analoge PLL skizziert. Während die bereits beschriebenen CTE Messungen im Labor auf einer Phasenmessung beruhen, ist im Rahmen von LISA für eine weitere Stabilisierung der Laserfrequenz an Board auch eine Frequenzmessung erforderlich. Beide Messungen können durch eine Auslesung der entsprechenden Register mit einer PLL erreicht werden.

Als Phasendetektor kommt eine Multiplikation des zu messenden Signals $u(t)$ mit dem Ausgang eines Voltage Controlled Oscillators (VCO) zum Einsatz. Durch eine entsprechende Wahl des Loop Filters und unter der Annahme, dass das mit dem VCO erzeugte Signal die gleiche Frequenz wie das zu messende Signal $u(t)$ hat, kann erreicht werden, dass das Fehlersignal $\epsilon(t)$ direkt proportional zur Phasenverschiebung zwischen $u(t)$ und $y(t)$ ist. Das Fehlersignal kann daher zur Steuerung des VCO verwendet werden und es stehen innerhalb der PLL alle Informationen zur Frequenz und Phase zur Verfügung.

Das in BILD 26 gezeigte System lässt sich unter der Annahme, dass mit dem VCO annähernd die gleiche

Frequenz des Eingangssignals eingestellt wurde sowie unter der Annahme einer kleinen Phasendifferenz $\Delta\Phi$, linearisieren. Dies ist in BILD 27 gezeigt.

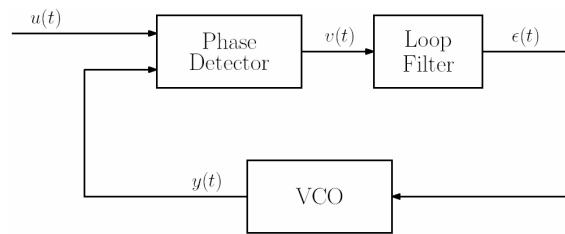


BILD 25. Prinzipieller Aufbau einer analogen PLL

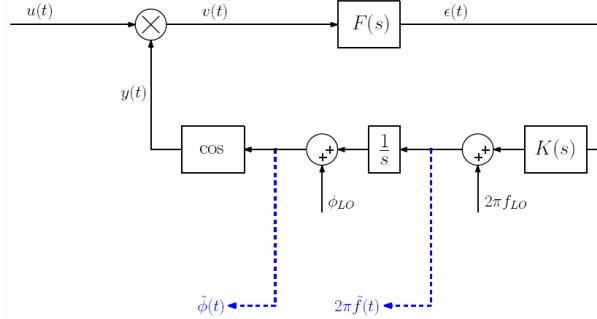


BILD 26. Aufbau einer analogen PLL mit Frequenz und Phasenausgang.

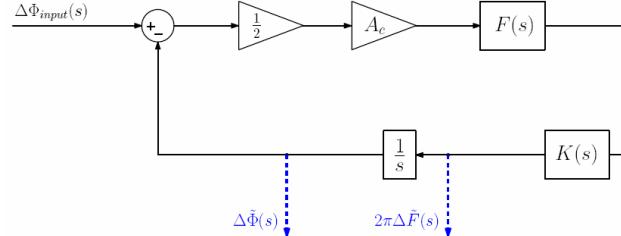


BILD 27. Linearisierte Übertragungsfunktion einer PLL

Basierend auf dem linearen Modell einer PLL kann ein entsprechender Regler entworfen werden. Dieser besteht im Wesentlichen aus der Wahl des Filters $F(s)$ und dem Feedback Regler $K(s)$. Für den offenen Regelkreis ergibt sich die Übertragungsfunktion

$$(1) \quad GK = \frac{1}{2} \frac{A_c F(s) K(s)}{s}$$

Im LISA Fall ist die Frequenz des zu messenden Signals in der Größenordnung von 4 MHz bis 20 MHz. Neben dem Hauptträgersignal sind noch Seitenbänder im Abstand von etwa ± 2 MHz aufmoduliert. Dies bedeutet, dass der Loop Filter eine sehr starke Unterdrückung von Signalen bei 2 MHz vorsehen muss. Ferner ist für eine erfolgreiche Messung eine Bestimmung der Signalphase mit einem Restrauschen kleiner als $10^{-4} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ notwendig. Um außerdem eine hohe Bandbreite der PLL zu ermöglichen, darf die durch den Filter eingeführte Verzögerung nicht zu groß werden. Dies führte zur Wahl eines elliptischen Filters 5. Ordnung mit einer Eckfrequenz von 20 kHz, 3 dB Ripple im Passband und 100 dB Differenz zwischen Pass- und Stopband. Im ersten Entwurf wurde der Regler in der Rückführung als $K(s)=10000$ gewählt. Dies führt zu einer PLL mit 21,5 dB Amplitudenreserve und 180° Phasenreserve.

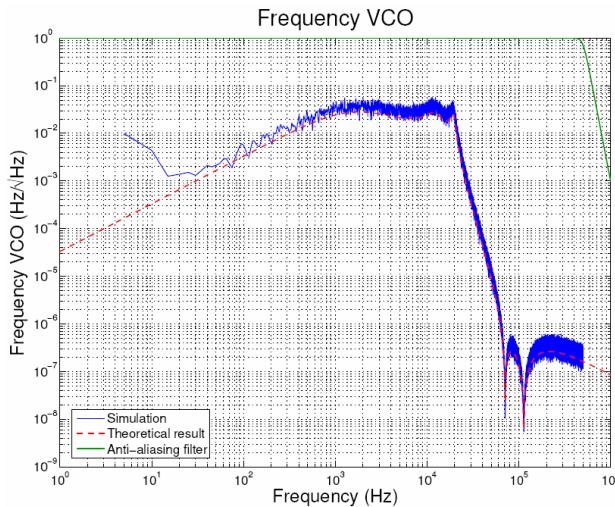


BILD 28. Übertragungsfunktion von Phasenrauschen zum Frequenzausgang

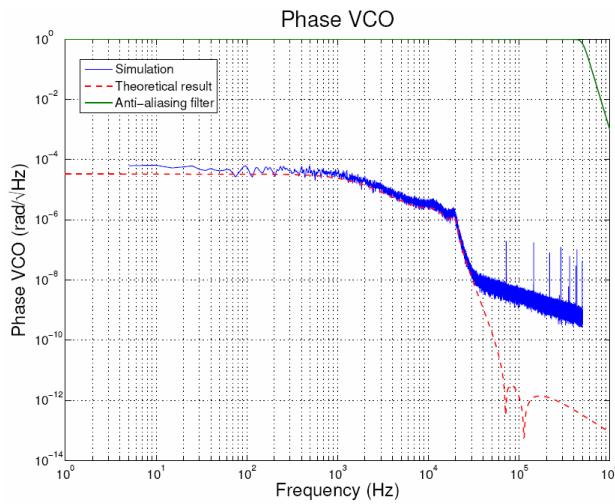


BILD 29. Übertragungsfunktion von Phasenrauschen zum Phasenausgang

BILD 28 und BILD 29 zeigen den Einfluss von Phasenrauschen im zu messenden Eingangssignal auf die Ausgänge für die Frequenz- und Phasenmessung. Dabei wurden die für LISA erwarteten Rauschgrößen im Eingangssignal verwendet und Berechnungen sowohl im Frequenz- als auch im Zeitbereich durchgeführt und miteinander verglichen. Die Zeitbereichssimulationen wurden in MATLAB/Simulink 2007a mit Zeitschritten von 10^{-9} s durchgeführt. Die Daten selbst wurden dabei mit einer Samplingrate von 1 MHz gespeichert, wobei zur Vermeidung von Aliasing-Effekten vor dem Downsampling ein entsprechender Butterworth-Filter verwendet wurde. Bei der Phasenmessung zeigt sich im oberen Frequenzbereich eine Abweichung zwischen der theoretischen Vorhersage und der Zeitsimulation. Dies bedarf noch einer detaillierteren Untersuchung und wird derzeit auf numerische Ungenauigkeiten zurückgeführt. Für den Frequenzeingang ergibt sich eine perfekte Übereinstimmung zwischen der linearen Analyse und der nichtlinearen Zeitsimulation.

Für eine erste Implementierung auf einem FPGA Board wurde zunächst eine Digitalisierung der entworfenen PLL durchgeführt. Dies betrifft in erster Linie den elliptischen

Filter und den Ersatz des VCO durch einen NCO (Numerical Controlled Oscillator). Der diskrete Filter arbeitet noch mit einer Fließkommadarstellung, kann jedoch durch eine entsprechende Skalierung und Quantisierung auf eine effiziente Darstellung für eine FPGA Implementierung umgerechnet werden. Ein weiterer Schritt ist die Implementierung einer ausreichend großen und genauen Sinustabelle im FPGA um die für die PLL notwendige Sinus- und Cosinusberechnung in Echtzeit durchführen zu können.

Für die Implementierung wurde ein kommerzielles FPGA Board mit einem Stratix II EP2S60F1020C4 FPGA ausgewählt (BILD 30). Das Board verfügt u.a. über zwei analoge Eingänge mit 12-Bit ADC's die mit 125 MHz getaktet werden können.



BILD 30. Kommerzielles FPGA Board

Die Programmierung der FPGA's erfolgt über entsprechende MATLAB/Simulink Tools, die eine automatische Konvertierung der in Simulink aufgebauten Modelle in VHDL ermöglicht und über eine Datenschnittstelle auf den FPGA überträgt.

Erste grundlegende Tests der vorläufigen DPLL Implementierung wurden mit Hilfe eines Signalgenerators und eines Oszilloskops durchgeführt. Dabei wurden die korrekte Messung des Eingangssignals sowie der Datenaustausch zwischen PC und Board getestet. Ferner wurde die korrekte Implementierung der Sinustabelle überprüft.

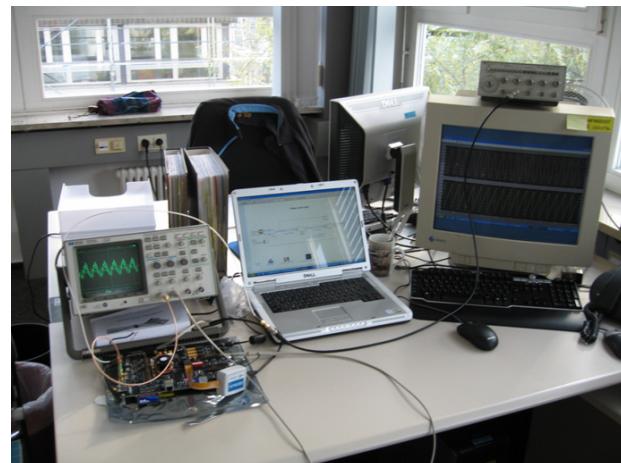


BILD 31. Testaufbau zur Programmierung des FPGA Board

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen der Verifikation der Leistungsfähigkeit von Untersystemen der LISA Mission wurde ein Versuchsaufbau zur Charakterisierung des Wärmeausdehnungskoeffizienten mit hoher Genauigkeit erstellt. Darin wurde eine erste CFRP Probe vermessen und eine etwa 20%-ige Abweichung zum theoretisch vorhergesagten Wert festgestellt. Messungen an weiteren Proben sowie an einer Zerodur® Referenzprobe werden derzeit durchgeführt.

Für zukünftige Messungen wird derzeit an einem vollständig digitalen Phasenmesssystem, basierend auf einer auf einem FPGA implementierten digitalen PLL gearbeitet. Erste Entwürfe für den digitalen PLL sowie die grundlegende Programmierung des FPGA Boards sind abgeschlossen und werden derzeit in weiterführenden Arbeiten in einem Gesamtsystem integriert. Das System wird basierend auf den Anforderungen der LISA Mission entworfen, die eine hochgenaue Phasenbestimmung sowie eine zusätzliche Frequenzmessung für On-Board Anwendungen erfordert.

5. SCHRIFTTUM

- [1] Gath, P.F., et al., "LISA System Design Overview", *6th International LISA Symposium*, 19.-23. Juni 2006, NASA GSFC, Greenbelt, Maryland, USA
- [2] Gath, P.F., et al., "Drag Free and Attitude Control System Design for the LISA Science Mode", AIAA 2007-6731, *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, 20.–23. August 2007, Hilton Head, South Carolina
- [3] McNamara, et al., „LISA Pathfinder“, *6th International LISA Symposium*, 19.-23. Juni 2006, NASA GSFC, Greenbelt, Maryland, USA
- [4] Heinrich, Th., Interferometrische Messung des Thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Kohlenstoff-Verbundwerkstoff für Weltraum-Anwendungen mit Pikometer-Stabilität, Master-Thesis, HTWG Konstanz und Astrium GmbH Friedrichshafen, Dezember 2007
- [5] Schuldt, T., Gohlke, M., Weise, D., Johann, U., Peters, A., und Braxmaier, C., "Compact laser interferometer for translation and tilt metrology", *International Journal of Optomechatronics* 1(2), 168-179 (2007)
- [6] Schuldt, T., Gohlke, M., Weise, D., Johann, U., Peters, A., und Braxmaier, C., "Compact laser interferometer for translation and tilt measurement as optical readout for the LISA inertial sensor," in *Proceedings of SPIE*, Vol. 6716, *Optomechatronic Sensors and Instrumentation III* (2007), 2007
- [7] Schuldt, T., Gohlke, M., Weise, D., Peters, A., Johann, U., und Braxmaier, C., "A compact high-sensitivity heterodyne interferometer for industrial metrology", in *Proceedings of SPIE*, Vol. 7003, *Optical Sensors*, 2008
- [8] Schöllig, A., Laser Frequency Measurement and Stabilization for the LISA Gravitational Wave Detector, Praktikumsbericht, Astrium GmbH Friedrichshafen, Dezember 2007
- [9] Otte, S., Implementierung eines digitalen Phase Lock Loop Systems auf einem Field Programmable Gate Array, Praktikumsbericht, Astrium GmbH Friedrichshafen, März 2008

6. DANKSAGUNG

Diese Arbeit wird vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) im Rahmen der Zuwendung für das Vorhaben „Untersuchungen zur Systemleistung alternativer Nutzlastkonzepte für LISA“ unterstützt; Förderkennzeichen 50OQ0701.