

## Schlussbericht INVERITAS 3D-LIDAR

Zuwendungsempfänger: Jena-Optronik GmbH  
Zuwendungsgeber: Raumfahrtagentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Vorhabensbezeichnung: INVERITAS – **I**nnovative **T**echnologien zur **R**elativnavigation (-bewegung) und **C**apture mobiler **a**utonomer **S**ysteme  
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2009 – 31.01.2012  
Förderkennzeichen: 50 RA 0909

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Kurzdarstellung</b>	<b>6</b>
2.1	Aufgabenstellung	6
2.2	Voraussetzungen	6
2.3	Planung und Ablauf	6
2.4	Stand der Technik	7
2.4.1	Allgemeines	7
2.4.2	LIDAR auf Basis von ILT	7
<b>3</b>	<b>Ausführliche Darstellung</b>	<b>8</b>
3.1	Ziele	8
3.2	Ergebnisse	8
3.3	Systemanalyse	9
3.3.1	Systemanforderungen vs. LIDAR Parameter	9
3.3.2	Resultierende Weiterentwicklungen	10
3.4	LIDAR Fertigung	11
3.4.1	LIDAR Komponenten-Überblick	11
3.4.2	Optischer Kopf	12
3.4.3	Scanner Elektronik	14
3.4.4	Laser Range Finder	15
3.4.5	Steuerungseinheit und Sensor Software, Unit Tester Software	16
3.4.5.1	Steuerungseinheit	16
3.4.5.2	Software-Design	17
3.4.5.3	Datensynchronisation	20
<b>3.4.5.3.1</b>	<b>Einführung Datensynchronisation.</b>	<b>20</b>
<b>3.4.5.3.2</b>	<b>Datensynchronisation 1:1 Ansatz</b>	<b>20</b>
<b>3.4.5.3.3</b>	<b>Zeitbasierte Datensynchronisation</b>	<b>21</b>

---

Projekt: INVERITAS

---

<b>3.4.5.3.4</b>	<b>Lücken im Datenstrom</b>	<b>22</b>
3.4.6	Übersicht LIDAR Sensor	23
3.4.7	Sensor Kalibrierung	24
3.4.8	Sensordatenvorverarbeitung und Tracking	26
3.4.9	Akzeptanz Tests	27
3.5	LIDAR Integration und Test	28
3.6	Notwendigkeit	29
3.7	Nutzen und Verwertbarkeit	29
3.8	Veröffentlichungen	29

# 1 Abkürzungsverzeichnis

Az	Azimut
DFKI	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH
DSP	Digital Signal Processor
EI	Elevation
FIFO	First-In First-Out Datenspeicher
FOV	Field-of-View
HDLC	High-Level Data Link Control
IF	Interface
ILT	Imaging LIDAR Technology
LOS	Line of Sight
LRF	Laser Range Finder
LWL	Lichtwellenleiter
PPS	Pulse per Second
RvC	Rendezvous und Capture
RvD	Rendezvous und Docking
RX-	Empfang-
SCE	Scanner Elektronik
SSW	Sensor Software
TR	Target Return
TX-	Sende-
UDP	User Datagram Protocol
UT	Unit Tester

## **2 Kurzdarstellung**

### **2.1 Aufgabenstellung**

Ziel des Projektes war die Bereitstellung eines LIDAR Sensors für reale Messungen an Demonstrationsobjekten unter Beachtung von Systemvorgaben.

### **2.2 Voraussetzungen**

Die Jena-Optronik GmbH als Zuwendungsempfänger bietet als weltweit tätiges Unternehmen im Bereich der Optik und Kamerasysteme für Weltraumanwendungen beste Voraussetzung für die Durchführung des Vorhabens. Hierbei konnten auf Erfahrungen im Optik-, Elektronik- und Mechanik-Design für Rendezvous Sensoren, Sternsensoren, Multispektralkameras und andere optische Geräte für den Weltraumeinsatz zurückgegriffen werden.

### **2.3 Planung und Ablauf**

Das Projekt INVERITAS gliederte sich in drei Projektphasen, die Anforderungsanalyse, die LIDAR Komponentenentwicklung und -Fertigung und die Integration/Test-Phase. Die Ergebnisse der Anforderungsanalyse sind direkt in die Komponentenentwicklung geflossen. Danach hat sich die Fertigungsphase angeschlossen. Da für den LIDAR auch auf bestehende Lösungen zurückgegriffen wurden, konnte für verschiedene Komponenten direkt mit der Fertigungsphase begonnen werden. Die Fertigungsphase beinhaltet nicht nur die Herstellung der jeweiligen Komponenten sondern auch die Integration, Kalibrierung und Sensortests in Hersteller-Umgebung.

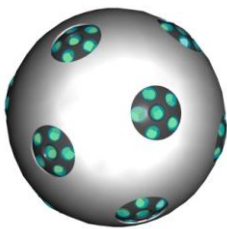
Nach Fertigstellung des LIDAR Sensors erfolgte die Integrations- und Test-Phase in der Zieltestumgebung.

## 2.4 Stand der Technik

### 2.4.1 Allgemeines

Vorgängermodelle des LIDAR Sensors kamen und kommen bei der Versorgung der Internationalen Raumstation zum Einsatz. Dort liefern sie die Positionsdaten, die für das jeweilige Docking- oder Berthing-Manöver erforderlich sind. Die Bestimmung der Entfernung sowie der Azimut- und Elevationswinkel erfolgte durch die Messung auf kooperativen Targets.

Eine Weiterentwicklung dieser Rendezvous-Sensoren wurde im Rahmen des ESA Projektes ILT – Innovative LIDAR Technologien entwickelt. Als Zielobjekt wurde hierbei ein Sample-Return-Canister definiert, der ebenfalls mit kooperativen Retroreflektoren ausgestattet war. Das Zielobjekt sollte bis zu einer Entfernung von 5 km vom LIDAR Sensor erfasst werden können.



**Abbildung 1: ILT Sample Return Canister**

Die Anforderungen an die Fähigkeiten von LIDAR Sensoren haben sich in den letzten Jahren geändert. Anwendungen in den Bereichen von Satelliten On-Orbit Servicing, Entsorgung von Weltraumschrott und Mond- bzw. Mars-Landern erfordern die Messung auf nicht-kooperative Targets.

### 2.4.2 LIDAR auf Basis von ILT

Das Hauptaugenmerk des im Rahmen von ILT entwickelten LIDAR Sensors lag in der Entwicklung eines kleinen und leichten optischen Kopfes und in der Weiterentwicklung der Laser Range Finder Komponente.

Der im ILT-LRF eingesetzte Faserlaser eröffnete Perspektiven, einerseits hinsichtlich Reichweite des Sensors bei nicht-kooperativen Targets, andererseits hinsichtlich der Bildauflösung. Die Abtastung von Objekten und die Erzeugung hochauflösender 3D-Bilder ist mit diesem LIDAR möglich. Begrenzungen für den Einsatz des LIDARS im INVERITAS Vorhaben lagen lediglich in der Ansteuerungselektronik des optischen Kopfes, in der Prozessierkapazität des Steuerungs-PCs und in der Datenübertragungsrate des intern verwendeten Interfaces.

## **3 Ausführliche Darstellung**

### **3.1 Ziele**

Das Ziel des Vorhabens bestand in der Bereitstellung eines LIDAR Sensors, welcher den Anforderungen an das Testvorhaben erfüllt. Hierzu sollte der LIDAR im Nahbereich 3D-Messdaten liefern, die als reale Daten zur Überprüfung der simulierten Annahmen herangezogen werden können. Durch diesen Ansatz sollten, bezogen auf eine mögliche Servicing Mission, frühzeitig die entwickelten Verfahrenen zur Zielerkennung, Zielnachverfolgung und Capture des Zielobjektes mit realen LIDAR Daten verifiziert werden.

### **3.2 Ergebnisse**

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein LIDAR Sensor entwickelt, der ein nicht-kooperatives Zielobjekt mit Hilfe eines Lasers abtasten und als 3 D-Punktwolke darstellen kann. Mit dem LIDAR konnten die erforderlichen Tests in der Zielumgebung durchgeführt und qualitative Aussagen über die verschiedenen Verfahren erzielt werden. Detaillierte Beschreibungen der Ergebnisse diesbezüglich sind den entsprechenden Berichten der Kooperationspartner Astrium Space Transportation Bremen und Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz Bremen zu entnehmen.

Sowohl die Weiterentwicklung der Scanner Elektronik als auch die Integration eines leistungsfähigen PCs als Steuerungs- und Datenverarbeitungs-Komponente konnte erfolgreich in den LIDAR Sensor eingebracht werden

### 3.3 Systemanalyse

#### 3.3.1 Systemanforderungen vs. LIDAR Parameter

Während der Systemanalyse wurden in Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner Astrium Space Transportation Bremen die relevanten ILT LIDAR Parameter identifiziert und bezüglich den INVERITAS Anforderungen überprüft.

Die wesentlichen Parameter sind in der nachfolgenden Tabelle aufgezeigt.

Parameter	ILT	INVERITAS
<b>Gesamt Field of view (FOV)</b>	30 °x30 °	40 °x 40 °
<b>Maximales Scan Fenster</b>	20 °x20 °	20 °x 20 °
<b>Scan Zeit bei maximalem FOV</b>	20 Sekunden	1 Sekunde
<b>Frame Rate</b>	1 Hz	1 Hz
<b>Target Objekt</b>	kooperativ	Nicht-kooperativ
<b>Entfernung f. Target Objekt</b>	1 m ... 5000 m	1 m ... 30 m
<b>Maximale Anzahl an Treffern</b>	< 200	~ 35.000
<b>Internes Interface SCE-PC</b>	FIFO	HDLC
<b>Internes Interface LRF-PC</b>	Ethernet, UDP	Ethernet, UDP
<b>Externes Interface LIDAR - GNC</b>	Ethernet	Ethernet

**Tabelle 1 Überblick LIDAR Parameter**

Die Gegenüberstellung der Fähigkeiten des ILT LIDAR Sensors und den Anforderungen an den LIDAR, der bei INVERITAS eingesetzt werden soll zeigen zwei wesentliche Parameter, die zu Weiterentwicklungen des ILT LIDAR Sensors geführt haben.

Bei ILT wurde das größte Scan Fenster von 20 °x 20 ° lediglich im Acquisition Mode Scan verwendet. Hierbei waren Scan-Zeiten von 20 Sekunden vorgesehen. Für das INVERITAS Vorhaben war es erforderlich, das größte Scan Fenster innerhalb einer Sekunde zu durchlaufen.

Bei ILT wurde auf ein kooperatives Target gemessen, was durch die kleine räumliche Ausdehnung auch zu einer kleinen Anzahl an Bildpunkten (Treffern) geführt hat. Durch die Messung auf nicht-kooperative Objekte ergeben sich Trefferzahlen, die weit über denen des ILT LIDAR Sensors liegen.

Da durch die geforderte maximale Entfernung von 5000 m beim ILT LIDAR bereits ein leistungsstarker Laser integriert wurde, war dieser für die Anforderungen des INVERITAS Vorhabens bereits ausreichend dimensioniert.



### **3.3.2 Resultierende Weiterentwicklungen**

Die Ergebnisse der Anforderungsanalyse führten zu notwendigen Änderungen, die bei der Entwicklung des LIDAR Sensors berücksichtigt werden sollten.

Die wesentlich kürzere Scan-Zeit stellt an die Scanner Elektronik (SCE) erhöhte Ansprüche. So muss sowohl die Regelungselektronik als auch die Leistungselektronik angepasst werden. Erstere stellt die Parametrisierung und Regelung der Vorgaben für die Scan-Durchführung bereit. Die Leistungselektronik stellt sicher, dass die Motoren mit der notwendigen Energie versorgt werden können.

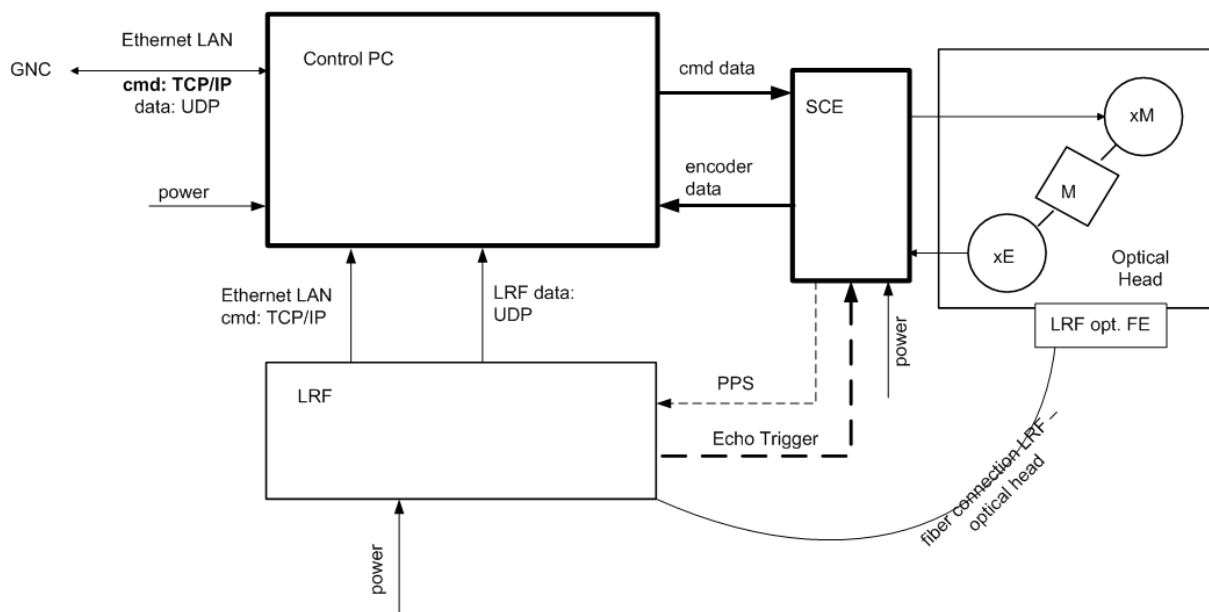
Im ILT LIDAR waren die Regelungselektronik- und die Leistungselektronik-Komponenten voneinander getrennt. Im Rahmen der notwendigen Änderungen sollte das PC-basierte DSP Board, auf dem die Regelung implementiert war, mit in eine gemeinsame Scanner Elektronik Box integriert werden.

Als zweiter wesentlicher Parameter wurden die stark erhöhten Trefferzahlen identifiziert. Für den ILT LIDAR konnte ein FIFO Interface zur Übertragen der Daten von Scanner Elektronik zur Datenprozessierungseinheit verwendet werden. Durch die erhöhte Datenrate des INVERITAS LIDARS und die Zusammenführung der Scanner Elektronikkomponenten wurde diese Schnittstelle durch ein HDLC-Interface realisiert.

Die erhöhte Anzahl an Treffern führt außerdem dazu, dass die Datenverarbeitungs- und Sensorsteuerungseinheit durch eine leistungsstärkere Hardware ersetzt wird. Hierzu wird von einem 1-Prozessor PC auf einen 8-Prozessor PC gewechselt. Dies hat zur Folge, dass auch die Sensorsteuerungs- und Unit Tester Software an ein Mehr-Prozessor-System angepasst werden muss.

## 3.4 LIDAR Fertigung

### 3.4.1 LIDAR Komponenten-Überblick



**Abbildung 2: LIDAR Komponenten**

Der LIDAR besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten

- Optischer Kopf
- Scanner Elektronik
- Laser Range Finder
- Steuerungs-PC

Hinzu kommen die entsprechenden Interface-Kabel als Verbindung sowohl zur internen als auch zur externen Kommunikation.

### 3.4.2 Optischer Kopf

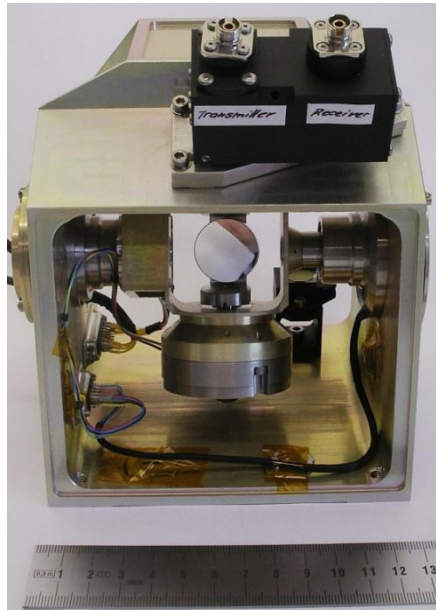
Das Mechanik Design des optischen Kopfes wurde von ILT übernommen. Dadurch konnte sehr früh mit der Fertigung dieser LIDAR-Komponente begonnen werden.



**Abbildung 3: Optischer Kopf - Komponenten**

Abbildung 3 zeigt einzelne Komponenten des optischen Kopfes. Im linken Bild sieht man das Kopfgehäuse, an welchem alle weiteren Elemente des optischen Kopfes befestigt werden. Rechts und links vom Gehäuse werden der Elevations-Encoder und Elevations-Motor befestigt, welche mit der Elevations-Achse verbunden werden. Das mittlere Bild zeigt die Elevations-Achse mit den Aufnahmen für die Azimut-Komponenten bestehend aus Azimut-Encoder, Azimut-Motor und Azimut-Achse. Im rechten Bild sieht man die integrierte Azimut Achse und den Spiegel.

Das Gehäuse stellt im Wesentlichen auch die finalen Maße des Scan-Kopfes dar. Einzig das optische Front-End, an dem die Glasfasern vom und zum Laser Range Finder befestigt werden, vergrößert die Abmessungen. Das optische Front-End ist der schwarze Block, welcher in Abbildung 4 zu sehen ist.

**Abbildung 4: Optischer Kopf**

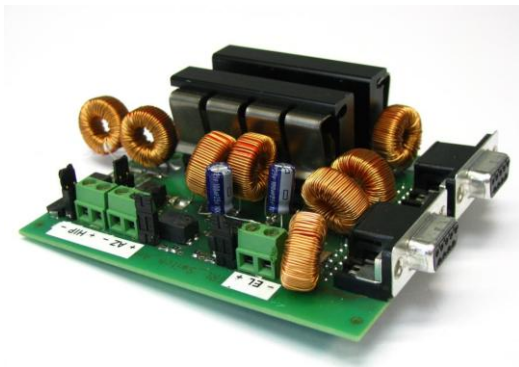
Trotz des Nachbaus dieser LIDAR Komponente kam es zu nicht vorhersehbaren Problemen und dadurch hervorgerufenen Verzögerungen.

Bei der Integration der Baugruppen wurde ein nicht-nominales Verhalten der Encoder im Optik-Scanner-Kopf festgestellt, welches eine Rücksendung der Encoder an den Hersteller Netzer Precision Motion Sensors Ltd. / Israel erforderlich machte. Die weiteren Arbeiten zur Hardware-Inbetriebnahme und zur anschließenden Hardware-Software-Integration mussten daraufhin bis zum Erhalt der reparierten Encoder verschoben werden. Letztendlich waren Fehler im Produktionsprozess der Firma Netzer verantwortlich für die technischen Probleme. Der dadurch hervorgerufene Zeitverlust bei der Fertigstellung des optischen Kopfes lag bei 4 Monaten.

### 3.4.3 Scanner Elektronik

Eine Verbesserung der Parameter der Regelung wurde durch den Einsatz einer getakteten Endstufe erreicht, was zur Reduktion des Leistungsverbrauchs führte. Gleichzeitig wurde damit eine Massereduktion der SCE erreicht, da der Kühlkörper am Gehäuse nicht mehr erforderlich ist.

Außerdem führte der Übergang vom PD zum PID-Kontroller zur Verbesserung der Genauigkeit der Sprungantworten, d.h. zu einer genaueren Positionierung der Scanfenster insbesondere bei großen Sprüngen.



**Abbildung 5: SCE-Box und DSP-Board für INVERITAS LIDAR**

Im linken Bild von Abbildung 5 ist das neu entwickelte DSP Board zu sehen. Dieses ist somit nicht mehr im Steuerungs-PC sondern in der SCE Box integriert. Letztere ist im rechten Bild von Abbildung 5 sichtbar.

Mit der verbesserten Regelungs- und Leistungselektronik konnten die gewünschten Scan Parameter erreicht werden. Die Regelungselektronik stellte jetzt den notwendigen Regelungssatz bzw. die entsprechenden Größenordnung zur Kommandierung zur Verfügung. Die Leistungselektronik stellte die entsprechende Stromversorgung des Azimut- und des Elevationsmotors sicher.

Das maximale Scan-Fenster von  $20^\circ \times 20^\circ$  konnte innerhalb von 0.9 Sekunden durchfahren werden. Eine weitere Steigerung der Geschwindigkeit war auf Grund der verwendeten Motoren nicht möglich. Da in diesem Vorhaben der optische Kopf ein Nachbau des ILT LIDAR Sensors darstellte, konnten keine leistungsstärkeren Motoren integriert werden. Eine Leistungssteigerung bedeutet hierbei eine größere Anzahl an Motorwicklungen. Dies wiederum hätte größere Abmaße und eine Änderung des Gehäuses des optischen Kopfes zur Folge gehabt.

Projekt: INVERITAS

### 3.4.4 Laser Range Finder

Die Laser Range Finder Komponente wurde im Wesentlichen vom ILT LIDAR übernommen. Abbildung 6 zeigt die Elektronikbox des Laser Range Finders. Auf der Elektronikbox ist die zugehörige Optik als schwarzer Block sichtbar. Inhaltlich ist die Optik inklusive der Fasern der LRF-Komponente zuzuordnen. Physikalisch wird diese aber am optischen Kopf des LIDAR Sensor befestigt, um den Laserstrahl über die TX-Lichtwellenleitern (LWL), die Optik und den Spiegel auszusenden. Entsprechende Echosignale von Zielobjekten werden über den Spiegel, die Optik und der RX-LWL wieder in den LRF zur Entfernungsmessung eingekoppelt. Die Lichtwellenleiter sind an der Rückseite der Elektronikbox befestigt, wie in Abbildung 7 sichtbar. Hierbei ist die Sendefaser fest mit dem LRF verbunden. Die Empfangsfaser kann hingegen von der Box getrennt werden.



**Abbildung 6: Laser Range Finder mit Optik**



**Abbildung 7: Laser Range Finder mit Lichtwellenleitern**

### **3.4.5 Steuerungseinheit und Sensor Software, Unit Tester Software**

#### **3.4.5.1 STEUERUNGSEINHEIT**

Auf Grund der notwendigen Rechenleistung wurde als Steuerungs-PC ein DELL PC mit zwei Intel® Xeon® Prozessoren E5530; 8M Cache, 2.40 GHz, 5.86 GT/s Intel® QPI ausgewählt. Jeder dieser Prozessoren ist ein Quad-Prozessor, d.h. er vereinigt 4 Prozessoren in einem. Insgesamt standen somit 8 Prozessoren zur Verfügung, die die Vielfältigen Aufgaben übernehmen konnten.



**Abbildung 8: Steuerungs-PC**

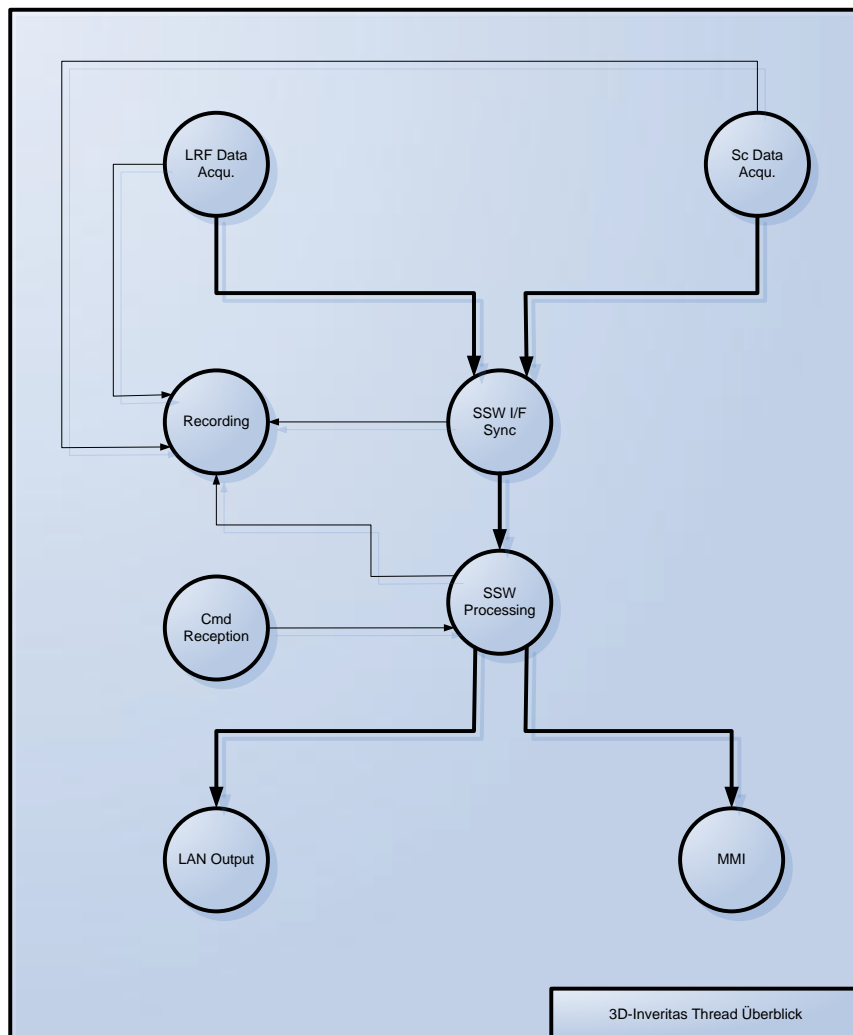
Diese Aufgaben unterteilen sich in zwei Hauptbereiche, für die entsprechende Software entwickelt werden musste.

- Sensor-Aufgaben: Software, die den Sensor ansteuert und die Messwerte akquiriert und prozessiert und ans übergeordnete System weiterleitet
- Unit Tester Aufgaben: Software, die die prozessierten Daten vom Sensor-Bereich entgegennimmt, grafisch darstellen und auf Speichermedien aufzeichnen kann. Dieser Bereich bildet auch die Schnittstelle zum Benutzer.

Ein Sensor, der sich auf einem höheren TRL befinden, hat lediglich die Sensor-Software implementiert. Die Unit Tester Applikationen läuft dann auf einem separaten System. Für das INVERITAS Vorhaben werden beide zu einer gemeinsamen Software Anwendung zusammengefasst und auf dem PC integriert.

### 3.4.5.2 SOFTWARE-DESIGN

Die Sensor- und die UT-Anwendungen müssen ihre jeweiligen Daten prozessieren, ohne dass die andere Datenverarbeitung gestört oder gar blockiert wird. Hierzu war es notwendig, die jeweiligen Aufgaben einzelnen Threads zuzuordnen. Diese Threads werden vom Betriebssystem verwaltet und auf die 8 Prozessoren aufgeteilt. Jeder Thread läuft somit unabhängig im System. Abbildung 9 gibt einen Überblick über die verschiedenen Threads und ihre Beziehungen zueinander untereinander. Um wirkliches paralleles Prozessieren zu ermöglichen, müssen die Datenzugriffe entsprechend abgesichert werden. Ein gleichzeitiges Zugreifen auf die Daten würde zu einem Systemabsturz führen. Dies muss durch geeignete Implementation verhindert werden.



**Abbildung 9: Überblick Threads**

Für die messdatenliefernden Hardware-Einheiten ist jeweils ein Daten-Acquisition Thread implementiert. Dies ermöglicht das Empfangen der Messdaten vom LRF und der SCE. Der nachfolgende Thread „SSW I/F Sync“ ist für die Synchronisation der LRF- und SCE-Daten zuständig. Die eigentliche Verarbeitung der Daten erfolgt dann im „SSW Processing“ Thread.



Dieser ist unterteilt in zwei separate Threads dem „Frame Start“ und dem „Final Frame“ Thread, sind hier aber nicht separate dargestellt. Beide zusammen steuern den internen Messframe des LIDAR Sensors. Wobei letzterer noch die momentane Datenverarbeitung übernimmt. Die Ergebnisse werden dann dem LIDAR Datenausgabe Thread „LAN Output“ oder/und dem „MMI“ Thread übergeben. Der „LAN Output“ Thread sorgt dafür, dass die Messdatensätze zum übergeordneten System geschickt werden. Der „MMI“ Thread stellt sowohl die Messergebnisse als auch diverse Zwischenergebnisse der Datenverarbeitung sowie Status Daten dem Benutzer dar. Dadurch erhält dieser die Möglichkeit, den Messprozess und die Datenverarbeitung zu verfolgen.

Ein separater Thread ermöglicht es, Kommandos vom übergeordneten System zu empfangen und dem „SSW Processing“ Thread zur Ausführung der entsprechenden Aufgabe Verfügung zu stellen.

Um alle LRF-, SCE-, Sync- und Sensor-spezifischen Daten aufzeichnen zu können, gibt es für jeden dieser Datengruppen jeweils einen eigenen Datenaufzeichnungs-Thread, der hier als einzelner „Recording“ Thread dargestellt ist. Eine Implementierung in mehreren Threads ist auch an dieser Stelle wichtig, um die Aufzeichnung der verschiedenen Datentypen parallel gestalten zu können. Für jeden Datentyp wird eine separate Datei angelegt, die dann entsprechend konvertiert und ausgewertet werden kann.

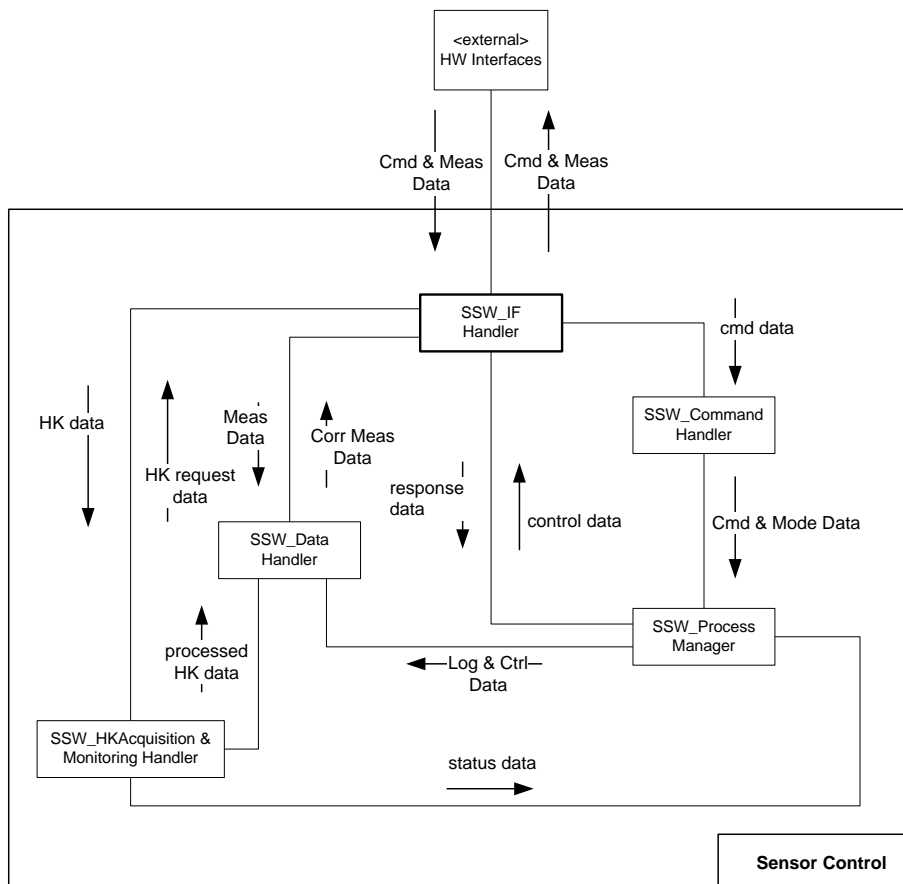
Projekt: INVERITAS

Die zentrale Software-Steuerungskomponente ist im Nachfolgenden als repräsentativer Teil des Software-Designs dargestellt. Abbildung 10 zeigt einen Überblick über die Software Komponenten der Sensor Steuerungs-Software. Die zentrale Rolle bildet der SSW\_Process\_Manager, der die Steuerung der internen Aufgaben übernimmt und alle Aktionen für die verschiedenen SW-Komponenten auslöst. Diese Aufgabe können vom SSW-IF-Handler unterbrochen werden, welcher am Austausch aller Daten beteiligt ist. Der SSW-IF-Handler ist unterteilt in spezialisierte IF-Handler Komponenten, die jeweils ein spezielles I/F steuern können (z.B. HDLC I/F). Daten und Kommandos werden vom SSW-IF-Handler direkt an die Unterkomponenten weitergeleitet.

Die eingehenden Kommandos an den LIDAR Sensor werden vom SSW\_Command\_Handler verarbeitet. Bevor interne Aktionen abgeleitet werden, überprüft diese Komponente die empfangenen Kommandos auf ihre korrekte Syntax und zulässigen Parameter. Die Ergebnisse werden direkt an den SSW-Process-Manager gesendet.

Alle Messergebnisse werden vom IF-Handler an den SSW\_DataHandler weitergeleitet. Diese Komponente ist dann für die Verarbeitung der Daten verantwortlich.

Während der gesamten Zeit stellte die Komponente SSW-HKAcquisition & MonitoringHandler Status-Daten des Sensors zur Verfügung. Dies schließt auch die Behandlung von Fehlerzuständen im Sensor mit ein.


**Abbildung 10: Sensor Steuerungs-Software - Komponenten Überblick**

### **3.4.5.3 DATENSYNCHRONISATION**

#### **3.4.5.3.1 EINFÜHRUNG DATENSYNCHRONISATION.**

Aus den Erfahrungen des ILT-Projektes wurde für das INVERITAS Vorhaben der Synchronisations-Thematik bereits im Vorfeld erhöhte Aufmerksamkeit eingeräumt. Der Design-Ansatz für die Synchronisation besteht aus einem PPS-Signal (Pulse per Second), das von der SCE an den LRF gesendet wird. Auf LRF-Seite wird zu jedem PPS Signal die entsprechende interne Zeit gespeichert und zusammen mit dem PPS-Zähler an den PC übertragen. Somit besteht als gemeinsame Zeitbasis sowohl auf LRF- als auch auf SCE-Seite die PPS basierte Zeit. Diese wird jeweils mit jedem Datensatz übertragen. Über diese lassen sich Daten 100%ig einander zuordnen. Während der Integration der LRF- und SCE Hardware offenbarten sich Probleme bei der Synchronisation zwischen den Daten beider Einheiten. Es war nicht möglich, die LRF- und SCE-Datensätze über die Zeitinformation einander zuzuordnen. Um Zeit bei der Integration zu sparen, wurde sich dann für den 1:1 Ansatz entschieden.

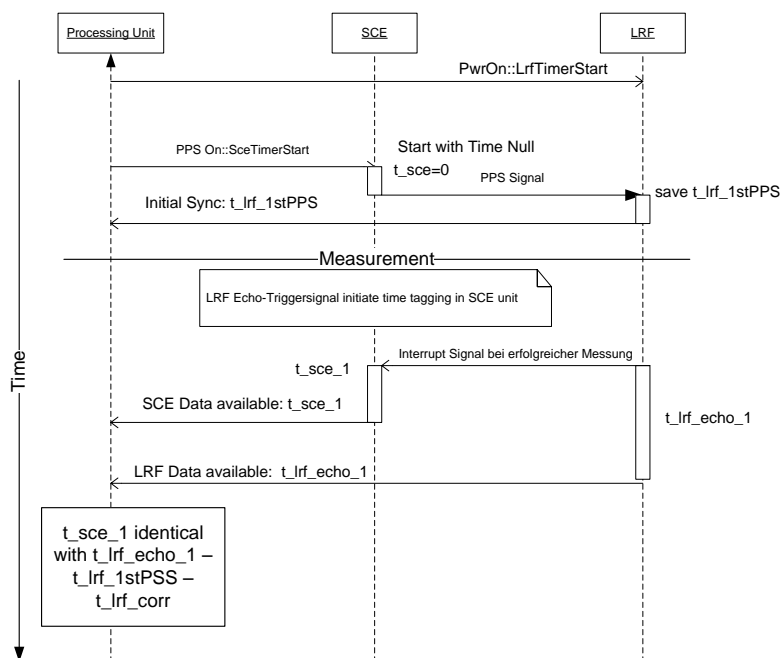
#### **3.4.5.3.2 DATENSYNCHRONISATION 1:1 ANSATZ**

Der Ansatz für eine 1:1 Zuordnung der Daten wurde verfolgt, weil der LRF laut Design zu jedem detektiertem Laser-Echo ein Trigger-Signal an die SCE-Einheit senden sollte. Diese sollte zu jedem Trigger-Signal die Encoder-Werte und die Zeit auslesen und an den PC senden. Bei der Implementierung wurde festgestellt, dass es mehr SCE- als LRF- Datensätze gibt. Nach Untersuchungen ergab sich, dass die LRF-Hardware Fehltrigger-Signale gesendet hat. Die aufwendigen Untersuchungen und die Fehlerbehebung der Firma Riegler Laser Measurement Systems GmbH / Österreich führten zu Verzögerungen von mehr als zwei Monaten.

Nachdem der LRF zur weiteren Integration wieder zur Verfügung stand, wurde festgestellt, dass die 1:1 Zuordnung weiterhin nicht zum Erfolg führt. Die Ursache hierfür liegt in der unterschiedlichen Behandlung der LRF- und SCE-Einheiten am Ende eines Scans. Hier werden 100ms zur Verarbeitung der Messdaten reserviert, bei dem keine weiteren Messergebnisse angenommen werden können. Die SCE lässt sich durch schnelle Kommandierung in den nicht-Scan-Mode versetzen. Die LRF-Kommandierung läuft hingegen über das Ethernet und ist in der Abarbeitung relativ langsam. Die zur Verfügung stehende Zeit von 100 ms wird hierfür bei weitem überschritten. Daher wird der LRF weiter im Mess-Mode belassen und lediglich der PC-seitige LRF Daten Akquirierungs-Thread für die Datenaufnahme gesperrt. Nach den 100 ms schließt sich der nächste Scan an. Die SCE Einheit wird entsprechend in den Scan-Mode kommandiert und der LRF Daten-Akquirierungs-Thread wird wieder freigegeben. Da der LRF mehrere Daten in einem Paket sendet, können direkt nach dem Einschalten bereits LRF-Daten zur Verfügung stehen, zu denen dann aber keine SCE-Daten existieren. Die 1:1 Zuordnung funktioniert nicht und es kommt zu Verschiebungen zwischen den Datenströmen. Entfernungswerte werden hierbei falschen Winkelwerten zugeordnet.

### 3.4.5.3.3 ZEITBASIERTE DATENSYNCHRONISATION

Wie bereits im ursprünglichen Design angedacht, muss die Datensynchronisation zeitbasiert erfolgen. Die erforderlichen Hardware-Komponenten sind bereits implementiert, hatten aber nicht zu einer erfolgreichen Synchronisation geführt. Da auf Grund von Laufzeitverschiebungen im System die Scanner und LRF Daten nicht ein-eindeutig aufeinander abgebildet werden konnten, musste die Datensynchronisation abgeändert werden. Auf Basis der LRF-Firmware-Anpassungen für die Behandlung der Fehl-Trigger-Signale konnte eine zeitbasierte Synchronisation der LRF- und Scanner-Daten implementiert werden. In Abbildung 11 ist das Prinzip der Synchronisation zwischen den drei beteiligten Hardware-Komponenten dargestellt.



**Abbildung 11: Ansatz zeitbasierte Datensynchronisation**

- $t_{sce\_1}$  → SCE Zeit zum Zeitpunkt des 1. Treffer Signals, das vom LRF gesendet wird
- $t_{lrf\_echo\_1}$  → LRF Zeit zum Zeitpunkt des 1. Treffers
- $t_{lrf\_1stPPS}$  → LRF Zeit zum Zeitpunkt des 1. PPS Signals, das von der SCE gesendet wird
- $t_{sce}$  → SCE Zeit zum Zeitpunkt des 1. PPS Signals; Zeitähler steht auf Null
- $t_{lrf\_corr}$  → Korrekturzeit, die nach der Initialisierung ermittelt wird

Bei dieser Implementierung findet eine Initialisierungssynchronisation statt. Diese basiert auf der Detektion des ersten PPS Signals. Damit hat man sowohl in der SCE- als auch in der LRF-Einheit einen gemeinsamen Zeitbezug. Diese erste Zeitsynchronisation muss nach jedem Einschalten kalibriert werden, da von Einschalt- zu Einschaltvorgang leicht unterschiedliche

Projekt: INVERITAS

Abweichungen zwischen SCE- und LRF-Zeiten auftreten. Diese liegen im Bereich von  $120\mu\text{s}$   $\pm$   $60\mu\text{s}$ .

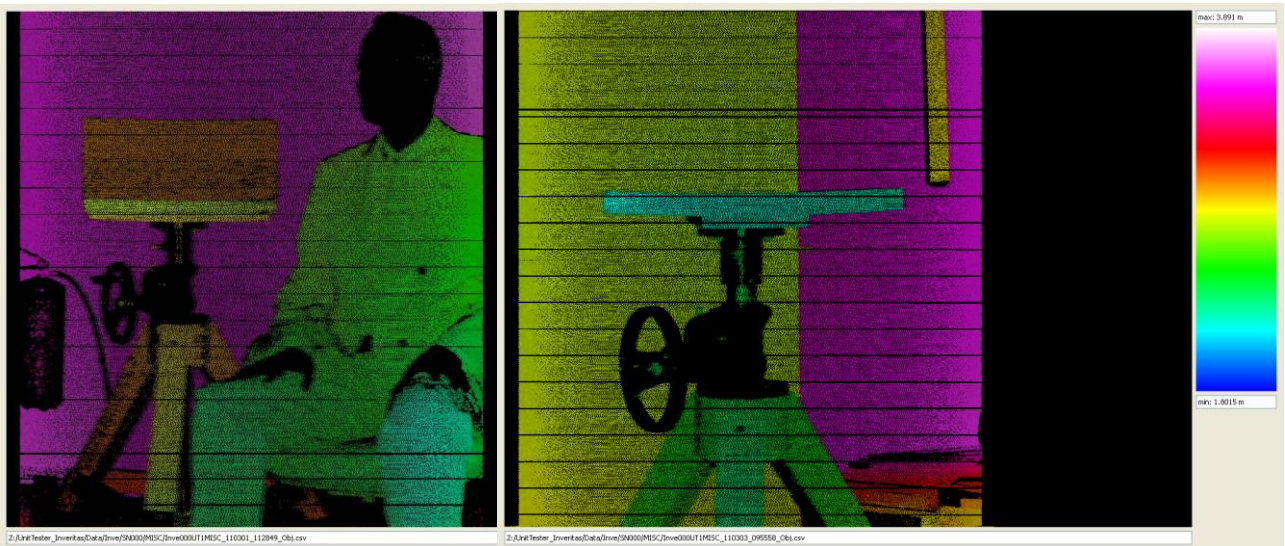
Des Weiteren hat der Taktgeber im LRF einen Versatz um  $\sim 7,9\mu\text{s}$ . Dies ist für kommerzielle Bauteile durchaus normal und muss über die Laufzeit korrigiert werden. Hierzu betrachtet man die zwei LRF-Zeiten zu den PPS Signalen und ermittelt den Korrekturwert für die LRF-Messzeiten.

Während der Messung wird vom LRF ein Trigger-Signal an die SCE gesendet, sobald ein Treffer detektiert wurde. Somit wird eine ereignisnahe Zeit- und Datenmessung ( $t_{\text{sce}_1}$ , Azimut und Elevation) vorgenommen.

Mit dieser Art der Synchronisation können die SCE- und LRF-Daten auch unter Verwendung der höchsten Laserleistung uneindeutig zugeordnet werden.

#### 3.4.5.3.4 LÜCKEN IM DATENSTROM

Bei den Testmessungen sind Lücken im Datenstrom aufgefallen. Dies ist in Abbildung 12 sichtbar. Die Abbildung zeigt ein Azimut-Elevations-Bild bei dem die Entfernung farblich dargestellt wurde. Dabei repräsentiert der blaue Farbton die kürzeste und der lila Farbton die weiteste Entfernung.

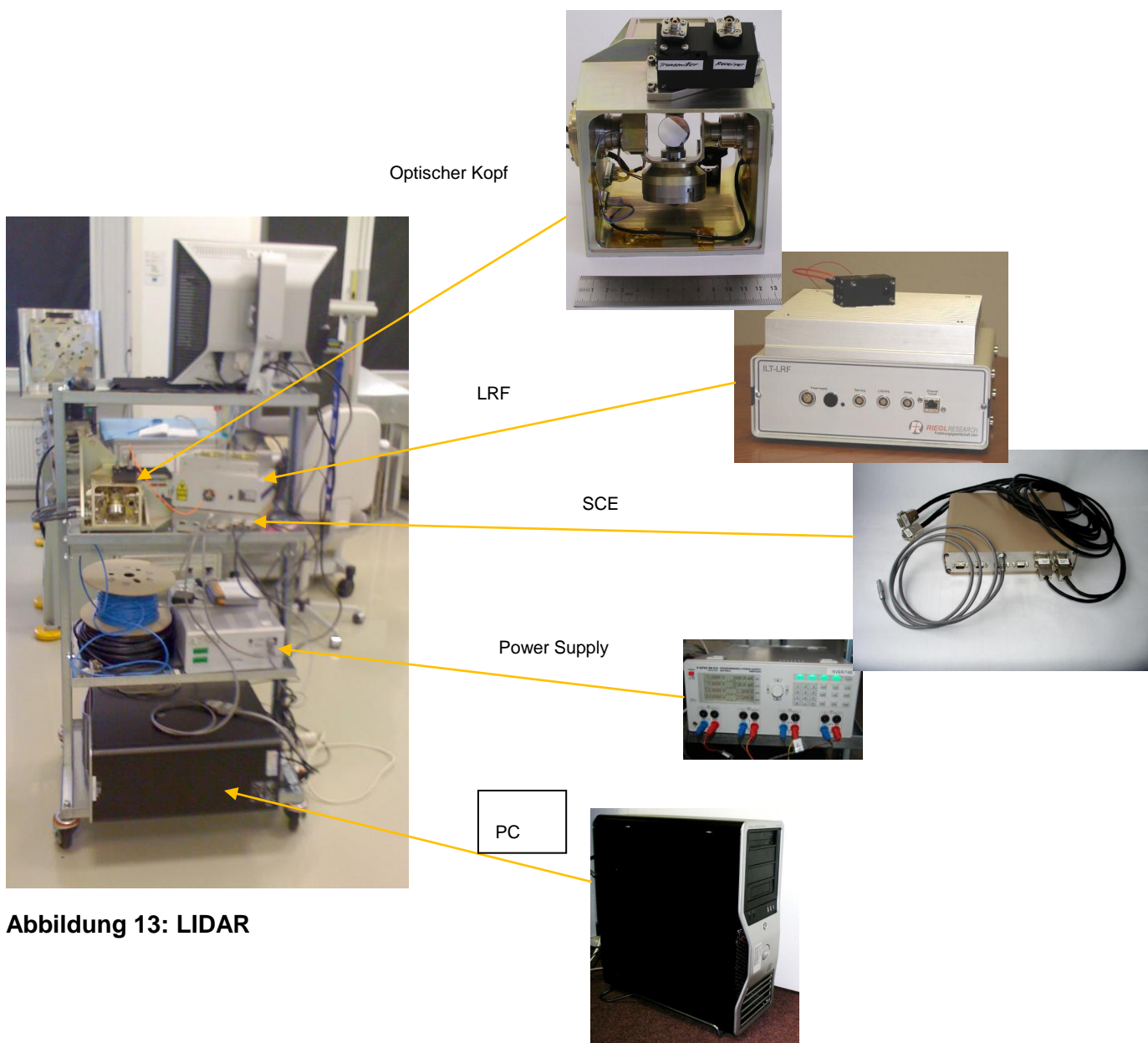


**Abbildung 12: Aufnahme mit Datenlücken**

Die Datenlücken hatten eine Länge zwischen 10 ms und 70 ms. Die Ursache lag in der Steuerung der LIDAR-Messframes. Ein solcher Frame besteht aus einer Scan-Phase (900ms) auf der einen Seite und Datenprozessierungs- und Spiegelpositionierungsphase (100ms) auf der anderen Seite. Beide Aktivitäten wurden jeweils in einem separaten Thread implementiert und über einen Timer-Thread angesteuert. Bei der Ansteuerung durch den Timer-Thread kam es zu Verzögerungen, bei denen die Messwerte nicht akquiriert werden konnten. Durch Umstellungen der Thread-Steuerung in diesem Bereich konnten die Lücken im Datenstrom beseitigt werden.

### 3.4.6 Übersicht LIDAR Sensor

In Abbildung 13 ist der INVERITAS LIDAR Sensor im Versuchsaufbau während der Kalibrierung zu sehen. Dieser Aufbau beinhaltet noch die Möglichkeit einer räumlichen Trennung zwischen optischem Kopf, SCE und LRF auf der einen Seite und PC und Stromversorgung auf der anderen Seite. Hierzu standen jeweils ein 50 m HDLC Interface-Kabel und ein 50 m Stromversorgungskabel zur Verfügung. Durch die Möglichkeit, alle Komponenten auf der DFKI SpiderCam zu integrieren, konnten die Längen auf 2 m reduziert werden.



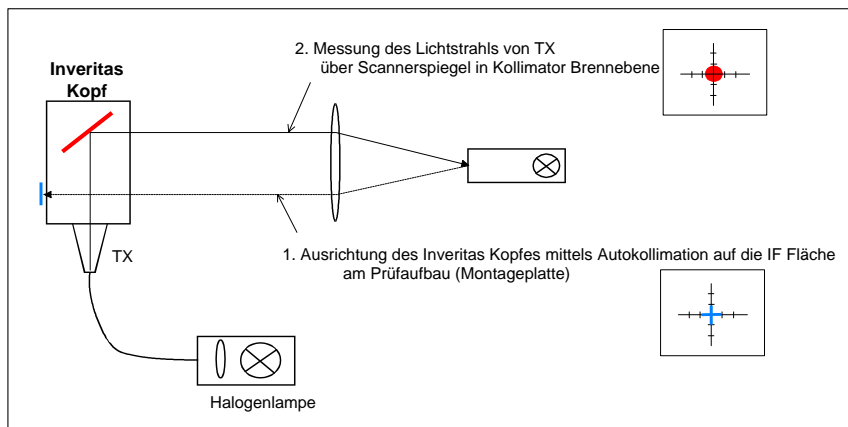
**Abbildung 13: LIDAR**

### 3.4.7 Sensor Kalibrierung

Die Kalibrierung wurde durchgeführt für die

- Spiegel – Nullposition
- Entfernungsabweichung
- Richtung des Koordinatensystems
- Winkelabweichung

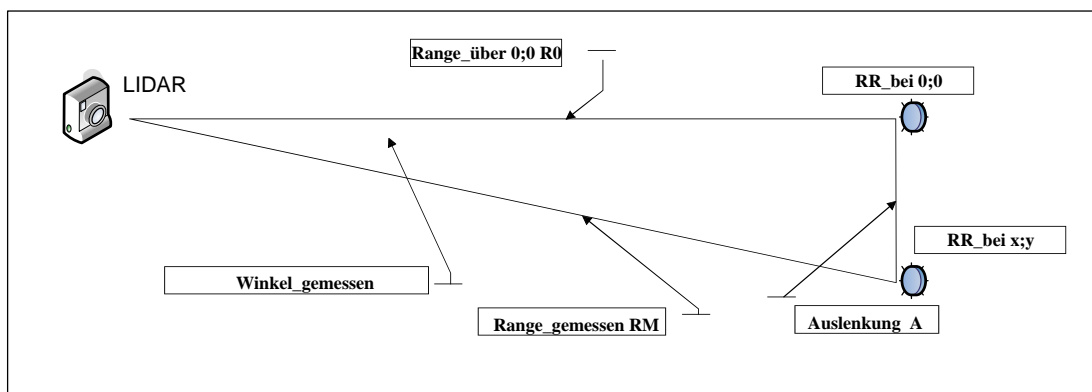
Die Encoder Nullpunktbestimmung ist erforderlich, um den Austritt des Laserstrahls senkrecht zur Anschraubfläche des optischen Kopfes zu gewährleisten. Für die Kalibration wurde der optische Kopf des Sensors senkrecht vor einen Kollimator angebracht. Der Referenzlichtstrahl und er vom LIDAR ausgesendete Lichtstrahl müssen beide auf der Null-Position des Fadenkreuzes des Kollimators liegen.



**Abbildung 14: Encoder Nullpunktbestimmung**

Die Überprüfung der Ausrichtung des Koordinatensystems erfolgt durch die Messung auf ein kooperatives Target. Dieses wird in positiver als auch in negativer Richtung für Azimut und Elevation ausgelenkt. Der Sensor hat die entsprechende Richtung der Auslenkung gemessen - Richtungen Az+, Az-, El+ und El-.

Die Entfernungs- und Winkelkalibrierung erfolgt ebenfalls durch die Messung auf ein kooperatives Target. Für die Kalibrierung der Azimut- und Elevationswinkel wird das Target um eine definierte Strecke A ausgelenkt. Dies erfolgt für Azimut bei Elevationsposition Null und für Elevation bei Azimutposition Null. Diese Auslenkung erfolgt in mehreren Schritten. Die Auswertung der Messreihen ergab für Azimut einen Faktor von 0,866 und für Elevation einen Faktor von 1,006.



**Abbildung 15: Entfernungs- und Winkelkalibrierung**

Die Entfernungsangaben des LIDAR Sensors sind per Definition von der Interface-Fläche (Montagefläche an der Rückseite des optischen Kopfes) aus anzugeben. Um dies zu gewährleisten, muss der Sensor hinsichtlich dieser Fläche kalibriert werden. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle aufgezeigt.

	Messung	Referenz	Korrektur
Entfernung	7,165 m	7,290 m	+ 0,125 m

**Tabelle 2 Entfernungskalibration**



### **3.4.8 Sensordatenvorverarbeitung und Tracking**

Als Sensordatenvorverarbeitung wurden die LIDAR-spezifischen Korrekturen implementiert. Dies betrifft die mechanische Korrektur für Entfernung und LOS Werte. Des Weiteren besteht die Möglichkeit die Sensor Messdaten in sphärischen oder kartesischen Koordinaten auszugeben. Eine Mittelwertberechnung über alle Treffer eines Scans wurde ebenfalls implementiert. Man erhält dann eine Target-Information für die Entfernung, Azimut und Elevation.

Für weitere Sensordatenverarbeitung wären wirkliche Bildinformationen nötig gewesen. Diese ist aber Bestandteil der GNC-Seite. Ohne Bildinformationen hätte eine pauschale Reduzierung des Datenstroms eventuell dazu geführt, dass relevante Objekt-Informationen verloren gegangen wären.

Da die Datenverarbeitungseinheit des LIDAR Sensors noch ausreichend Kapazität für zusätzliche Aufgaben zur Verfügung hatte, konnten Prozesse der GNC-Bildverarbeitung auf dem PC ablaufen. Für zukünftige LIDAR Sensoren wird diese Möglichkeit nicht bestehen, da dieser leistungsstarke PC nicht als flugfähige Hardware zur Verfügung steht. Hier muss man eher davon ausgehen, dass sogar einige LIDAR-spezifische Aufgaben, die momentan der Prozessor übernommen hatte, in eine geeignete Hardware-Lösung (FPGA) ausgelagert werden müssen.

Die Mittelwertberechnung führt zu einer Bestimmung des Schwerpunktes der 3D-Messpunktswolke. Da der LIDAR aber keine Auswertungen bezüglich des Zielobjektes vornimmt, kann dieser Mittelwert nicht zur Objektnachverfolgung oder Lageabschätzung verwendet werden. Auch ein Tracking des Zielobjektes war nicht möglich. Hintergrund bilden hier die Treffer, die der LIDAR Sensor auch von der Testumgebung aufnimmt. Eine Mittelwertberechnung bezieht bei Tests am Boden auch Treffer der Testumgebung mit ein. Dies führt zu Verfälschungen der Zielobjektinformationen. Ein Objekt-Tracking auf dieser Basis kann zu fehlerhaften Positionierungen des nächsten Scan-Fensters führen und somit zum Verlust der eigentlichen Zielobjekt-Informationen.

### **3.4.9 Akzeptanz Tests**

In Jena wurde ein Akzeptanztest unter Teilnahme von Jena Optronik und Astrium Space Transportation Bremen durchgeführt. Die LIDAR Funktionalität insbesondere die Datensynchronisation wurde getestet und nachgewiesen.

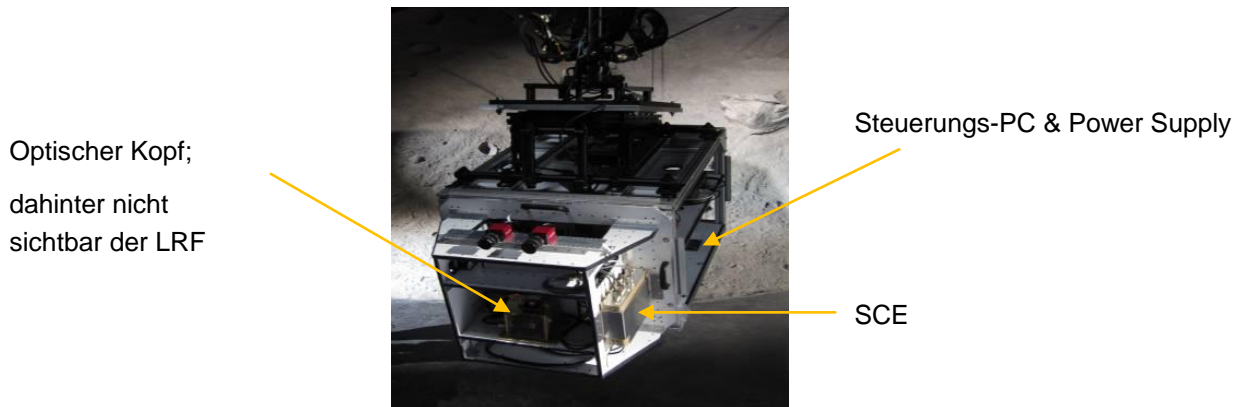
Außerdem wurden folgende Punkte geprüft:

- Empfang und Abarbeitung aller Kommandos via LAN Interface
- Sensor Daten Output via UDP Pakete
- Remote Control Fähigkeit inkl. System Boot ohne Monitor und Tastatur
- Messungen im Laser Power Level 1 und 2
- Transformation von Kugelkoordinaten Range, Azimut, Elevation in Kartesische Koordinaten  $x, y, z$
- Messungen am Client Modell des DEOS Satelliten mit verschiedenen Dreh- und Neigungspositionen
- Überprüfung der Funktionsweise der Zeitkalibration

Der Sensor wurde seitens Astrium Bremen akzeptiert und dann für den Versand vorbereitet.

### 3.5 LIDAR Integration und Test

Der LIDAR wurde für erste Integrationsschritte bei Astrium Space Transportation Bremen aufgebaut und getestet. Nach erfolgreichen Tests wurde der LIDAR beim DFKI in der Zieltestumgebung integriert. Abbildung 16 zeigt den LIDAR in der finalen Testumgebung. .



**Abbildung 16: LIDAR in Testumgebung beim DFKI**

Bei ersten Tests wurde festgestellt, dass die glatt aufgeklebten Folien des Modells wenige diffuse Reflektionen des Laserstrahls ermöglichen. Um dies zu umgehen, wurden die großflächigen Folienebenen mit Papierkarton abgedeckt. Mit dieser Variante konnten die verschiedenen Verfahren zur Objekterkennung und –nachverfolgung getestet und bewertet werden.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

### **3.6 Notwendigkeit**

Für zukünftige, weltraumtaugliche LIDAR Sensoren ist es notwendig, die verschiedenen Komponenten auf ein höheres Technology Readiness Level (TRL) zu bringen. Dies ist durch das DLR Vorhaben LiQuaRD für zwei Komponenten eingeleitet. Hierbei sollen sowohl der optische Kopf inklusive Mechanik, Motoren und Encoder als auch der Faserlaser für Weltraumanwendungen qualifiziert werden.

Die Sensorsteuerung und Datenverarbeitung hingegen befindet sich momentan noch auf einem unzureichenden TRL. Für diese Komponente bedarf es noch weiterer Technologieentwicklungen.

3D LIDAR Sensoren sind in mehreren Bereichen (ISS Versorgung, Satelliten Servicing etc.) einsetzbar. Wissenschaftlich-technische Aussagen über die Erkennung von Objekten könnten im Vorfeld erstellt werden. Allerdings können diese Angaben momentan nur mit einer großen Ungenauigkeit berechnet werden. Dies resultiert aus Annahmen zur Reflektivität von möglichen Zielobjekten. Es gibt keine Daten zur Reflektivität von möglichen Zielobjekten im Allgemeinen und für die verwendete Wellenlänge von 1550 nm im Speziellen.

### **3.7 Nutzen und Verwertbarkeit**

Der Nutzen und die Verwertbarkeit des LIDARS für dieses Vorhaben liegen im Wesentlichen im übergeordneten System. Die Erfahrungen bei der Verarbeitung von realen LIDAR-Daten können in weiterführende Projekte einfließen.

Die Erkenntnisse auf der LIDAR Seite sind in die Definition weiterführenden Tests mit dem im DLR Projekt LiQuaRD entstandenen LIDAR Sensor eingeflossen. Es besteht die Notwendigkeit, Daten über die Reflektionseigenschaften diverser Materialien zu sammeln, die beim Bau von Satelliten verwendet werden. Nur wenn man diese Eigenschaft definieren kann, sind zuverlässige Aussagen über die Sichtbarkeit dieser Objekte aus Sicht des LIDARS möglich.

### **3.8 Veröffentlichungen**

Im Rahmen des Vorhabens „INVERITAS“ erfolgten Zuarbeiten für Veröffentlichungen des Kooperationspartners Astrium Space Transportation Bremen:

Vorträge:

- Dr. Bernd Mädiger, Dr. Jan Paul, Michael Windmüller, INVERITAS - Technologien für zukünftige Robotikmissionen, 2.Nationale Konferenz zur Raumfahrt-Robotik, Berlin, 2012