

# OPTIMIERUNG DER DATENÜBERTRAGUNG EINES OPTISCHEN SGL MITTELS KÜNSTLICHER INTELLIGENZ

R. Mahn<sup>1</sup>, K. Saucke<sup>1</sup>, J. Woicke<sup>1</sup>, J. Seidel<sup>1</sup>, T. Marynowski<sup>1</sup>,  
P. Martín Pimentel<sup>1</sup>, F. Heine<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG, Gerberstr. 49, 71522 Backnang, Deutschland

## Zusammenfassung

Tesat-Spacecom wurde von der deutschen Raumfahrtagentur (DLR) für den Bau und den Betrieb einer optischen Bodenstation beauftragt, welche mit dem Tesat Laser Communication Terminal 135 (LCT135) kommunizieren kann. Seit 2014 führt TESAT Experimente im Bereich Space to Ground Links (SGL) durch und setzt die gesammelte Erfahrung in Verbesserungen und Aufrüstung der Station um. Durch atmosphärische Einflüsse bei SGLs, können Unterbrechungen der Uplink-Kommunikation und/ oder der Downlink-Kommunikation auftreten, welche die Datenübermittlung verhindern.

Im untersuchten Fall wird eine unidirektionale Kommunikationsverbindung angenommen. Das Sendeterminal, welches in diesem Fall die Bodenstation darstellt, soll eine Unterbrechung der Datenübertragung feststellen, die Übertragung von Nutzdaten anhalten und erst bei Wiederherstellung der Kommunikation die Übermittlung fortsetzen. Hierzu wird im Rückkanal durch Spiegelbewegungen des LCT in Orbit ein Signal moduliert, welches an der Bodenstation als Intensitätsschwankungen erkennbar ist. Hierbei wurde Wert darauf gelegt, vorhandene Implementierungen zu nutzen, um keine Änderungen der Software im Space-Segment zu erfordern.

In Experimenten mit der Transportablen Adaptiven Optischen Bodenstation (T-AOGS) wurden Messdatensätze mit und ohne Spiegelbewegungen des LCT in Orbit aufgezeichnet. Auf Basis dieser Daten wurden unterschiedliche Möglichkeiten zur Detektion untersucht: a) Bandpass, b) Fast Fourier Transformation und c) Artificial Intelligence. Wir präsentieren die Ergebnisse der Untersuchung zu den einzelnen Ansätzen und fassen die Empfehlungen für eine Implementierung zusammen.

## 1. EINLEITUNG

Die optische Kommunikation ist eine Möglichkeit um mehr Nutzdaten, welche beispielsweise auf Erdbeobachtungssatelliten erzeugt werden, zum Endanwender zu übertragen. Hierbei verbindet eine optische Nutzlast viele Vorteile: das Gewicht, der benötigte Platzbedarf und der Leistungsverbrauch sind durch den schmalen Sendestrahl geringer als bei vergleichbaren RF-Nutzlasten. Durch die höhere spektrale Bandbreite sind außerdem höhere Datenraten möglich. Die größte Herausforderung für optische Kommunikation ist allerdings das Pointing, die Akquisition und das Tracking durch den schmalen Laserstrahl [1].

Die Technologie Demonstrations Payload Nr. 1 (TDP1) ist eine TESAT-Nutzlast auf dem geostationären Alphasat-Satelliten, welche aus einem Laser Communication Terminal 135 (LCT mit 135 mm Apertur) und einer Ka-Band Nutzlast besteht. Die ursprüngliche Mission war die Demonstration eines Inter-Satellite-Link (ISL) Relay-System, wie es mittlerweile beim kommerziellen European Data Highway eingesetzt wird. Mit TPD1 wurden zu Beginn Links zu den Sentinel-Erdbeobachtungssatelliten des Copernicus-Programms durchgeführt. Zunehmend wurde das System zu einem umfangreichen Testbett ausgebaut, welches für Experimente mit TESAT-LCTs dient (BILD 1). Im Jahr 2014 wurde die Transportable Adaptive Optische Bodenstation (T-AOGS) in Betrieb genommen. Bei einem optischen Link spielen atmosphärische Einflüsse eine größere Rolle als bei einer RF-Verbindung. Mit dem Testsystem werden seitdem Untersuchungen zum Einfluss

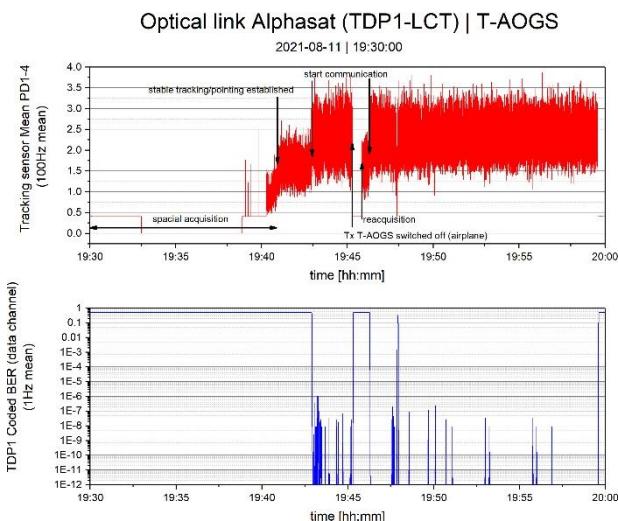
der Atmosphäre auf die optische Space-to-Ground Kommunikation untersucht. Zum einen können SW-Änderungen auf dem TDP1-LCT und der T-AOGS durchgeführt werden, zum anderen gibt es die Möglichkeit für HW-Anpassungen an der Bodenstation. Dadurch können die Systeme stetig verbessert und auf die speziellen Anforderungen angepasst werden. Durch Analysen von Messungen können Rückschlüsse auf den optischen Kanal an dem Standort der Messung gezogen werden. Für die Analysen dienen die bisher über 600 durchgeföhrten Space-to-Ground Links (SGLs) [2], welche in den Jahren 2014 bis 2019 am Standort Teneriffa durchgeführt wurden.



BILD 1. Übersicht TDP1-Testsystem

In den Jahren 2020 und 2021 wurde die Bodenstation einer umfangreichen Instandhaltung unterzogen [3]. Dazu wurden degradierte optische Komponenten ausgetauscht und Verbesserungen an der Konstruktion vorgenommen, sodass die Performance langfristig verbessert wurde. Die Funktionalität der adaptiven Optik wurde überprüft und der deformierbare Spiegel auf Grund statischer Degradation ausgetauscht. Neben diesen Maßnahmen wurden auch Erweiterungen umgesetzt. Zum Beispiel wurde ein zusätzliches Transmit Tracking System verbaut, um zukünftig stabilere optische Links mit erhöhter Genauigkeit durchführen zu können. Außerdem wurde die optische Bank für eine automatisierte Fasereinkopplung vorbereitet, wodurch zukünftig das empfangene Licht zuverlässiger eingekoppelt werden soll und die Kommunikationszeiten erhöht werden sollen. Zuletzt wurde der existierende Luft-Wasser-Kühler durch einen leistungsfähigeren ersetzt, um den Betrieb bei Temperaturen über 20°C aufrecht erhalten zu können.

Nach der Grundüberholung wurde eine Messkampagne in Zimmerwald (Schweiz) durchgeführt. Durch reduzierte Höhenlage (Zimmerwald 900 m, Teneriffa 2400 m) konnte der Einfluss von dickeren Atmosphärenschichten und deren Auswirkung auf die Performance untersucht werden. Neben der Inbetriebnahme der T-AOGS konnten somit erste Messergebnisse von einem anderen optischen Kanal aufgezeichnet werden und direkt mit dem Standort Teneriffa verglichen werden. Ein solcher Vergleich ist durch die Nutzung der selben Terminals in Space und am Boden sehr gut möglich und ein bedeutender Vorteil des gesamten Testsystems [3].



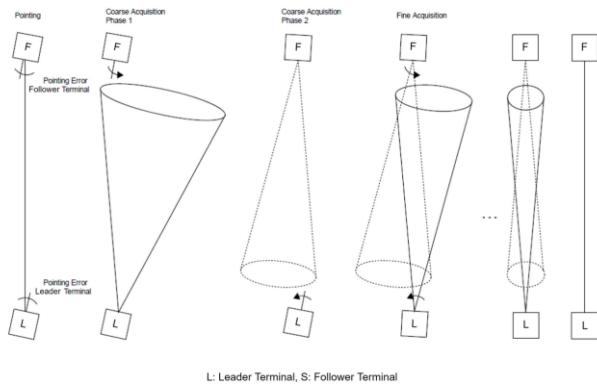
**BILD 2. Optischer SGL mit Unterbrechung der Kommunikation**

Seit dem Jahr 2019 verfügt die T-AOGS über einen funktionierenden Nutzdaten-Transmitter. Dieser kodiert die Nutzdaten auf geeignete Art und Weise, sodass kurze atmosphärische Störungen wiederhergestellt werden können. Jedoch sind längere Unterbrechungen, welche z.B. durch einen Kommunikationsverlust oder Flugzeuge in der Sichtverbindung und die zeitweise Unterbrechung von Links verursacht sind (BILD 2), im Code nicht mit abgedeckt. Aus diesem Grund muss bei solchen Ereignissen das Senden von Nutzerdaten unterbrochen

werden. Hierzu muss der Bodenstation bekannt sein, ob das Space-Terminal die Daten gerade empfängt oder nicht. Im Folgenden soll der Ablauf eines SGLs kurz skizziert werden, bevor auf die Erkennung des Uplink-Kommunikationsstatus mit unterschiedlichen Methoden eingegangen wird.

## 2. ABLAUF EINES SPACE-TO-GROUND LINKS

Die nominelle Akquisitionsprozedur mit einem LCT von TESAT im Geostationären Orbit sieht eine Einteilung in Leader und Follower vor, einen Überblick gibt BILD 3. In Phase 1 der Akquisition fährt das Leader-LCT Spiralen mit aktiviertem Laser in der Größe des berechneten Uncertainty Cones (UC), während das Follower-LCT seinen initialen Pointingfehler beim Empfangen eines sogenannten Blips (Lichtblitz) minimiert. Ein Blip wird empfangen, wenn die Spirale des Leader beim Gegenterminal für einen kurzen Moment auf den Akquisitionssensor trifft. Durch den Aufbau als 4-Quadranten Diode kann der Pointingfehler lokalisiert und korrigiert werden. In Phase 2 deaktiviert der Leader seinen Laser und das Follower-Terminal führt mit aktiviertem Laser Spiralen durch. Dadurch kann das Leader-Terminal seinen Ausrichtungsfehler beim Empfangen von Blips minimieren. In der anschließenden Feinakquisition führen beide Terminals mit aktiviertem Laser kleiner werdende Spiralen durch, bis die Ausrichtung optimiert ist.



**BILD 3. Akquisitionsschritte ISL**

Space-To-Ground Links (SGL) verwenden ein vergleichbares Akquisitionsverfahren. Bei Durchführung eines Links mit der Bodenstation T-AOGS und dem TDP1-LCT werden die beiden Coarse Pointing Assemblies (CPAs) der Bodenstation zur Temperierung der optischen Pfade einige Zeit vor dem Link ausgeparkt. BILD 4 zeigt die CPAs im ausgeparkten Zustand. Die CPA270 kann sowohl als Sende- (Tx) als auch als Empfangsapertur (Rx) genutzt werden, während die CPA100 nur als Sendeapertur dient. In der Standardkonfiguration wird die CPA100 als Tx und die CPA270 als Rx genutzt.

Kurz vor Linkbeginn erfolgt die Kalibrierung der adaptiven Optik (AO) sowie ein Tx/Rx-Alignment um eine optimale Performanz der AO und des Trackingalgorithmus zu gewährleisten. Zu Linkbeginn wird die Aufzeichnung der Telemetriedaten mit 5 kHz gestartet. Bei SGLs mit der T-AOGS bildet das TDP1-LCT den Leader und die T-AOGS den Follower, der Link beginnt also mit Spiralen des TDP1-LCTs über eine in der Planung festgelegte Dauer. Dabei korrigieren die beiden CPAs der T-AOGS unabhängig

voneinander den initialen Fehler. Hierzu wird ein Kamerasystem genutzt, durch welches die Blips detektiert werden und der Fehler pixelbasiert berechnet wird. In Phase 2 deaktiviert der Satellit seinen Laser und der Operator der Bodenstation aktiviert den Laserverstärker der T-AOGS. Durch die vorherige Minimierung des Ausrichtungsfehlers der Tx-CPA mit dem Kamerasystem trifft der Laser der Bodenstation meistens direkt das TDP1-LCT. Ist das nicht der Fall, werden Spiralen mit dem Tx-CPA durchgeführt, bis der Satellit getroffen ist. Daraufhin aktiviert der Satellit seinen Laser und ein räumliches Tracking der beiden LCTs ist hergestellt. Im Verlauf des Links kann der Operator die Ausrichtung des Sendestrahl durch den Point Ahead Spiegel manuell anpassen, um beispielsweise thermische Effekte auszugleichen.



BILD 4. CPA100 und CPA270

Sobald die Akquisitionsphase abgeschlossen ist, wird der lokale Oszillator des Homodynemfängers in beiden Terminals auf die jeweilige Empfangsfrequenz geregelt. Durch den Lock der sogenannten Optical Phase Lock Loop (OPLL) steigt die Detektorleistung um 3 dB und die Kommunikation, z.B. das Senden und Empfangen von Daten zwischen den LCTs, ist möglich. Bei SGLs kann es durch atmosphärische Störeinflüsse passieren, dass die Wellenfront und damit das Empfangssignal verfälscht wird und der lokale Oszillator nicht schnell genug geregelt werden kann, man spricht von einem OPLL Unlock. In diesem Fall ist so lange keine Kommunikation möglich, bis die Frequenzen wieder übereinstimmen.

OPLL Unlock Ereignisse können unabhängig voneinander im Uplink (Bodenstation zu Satellit) oder im Downlink (Satellit zu Bodenstation) vorkommen. Wenn Downlink-Kommunikation möglich ist, wird die Bitfehlerrate des Gegenterminals im sogenannten Service-Channel übertragen. Ist keine Downlinkkommunikation möglich, kann der Status des Uplinks derzeit nicht an der Bodenstation erkannt werden. Für Anwendungen in denen große Datenmengen im Uplink gesendet werden sollen, ist es von Vorteil, den Status des Uplinks an der Bodenstation zu kennen, damit nur Daten gesendet werden, wenn diese am Satelliten empfangen werden können. Dieses Problem soll über die Verwendung einer vorhandenen Funktionalität des LCTs auf dem Satelliten gelöst werden, wodurch ein aufwändiges Softwareupdate umgangen werden kann.

### 3. DETEKTION UPLINK KOMMUNIKATIONSSTATUS

Im LCT-Algorithmus kann eine Funktionalität aktiviert werden, welche bei Kommunikation eine Kreisbewegung mit dem Point-Ahead Spiegel durchführt. Durch die Kreisbewegung des Spiegels wird ein Signal erzeugt, welches an der Bodenstation als sinusähnliche Amplitudenmodulation erkennbar ist. Die Höhe der Amplitudenmodulation ist vom Tx/Rx-Misalignment, der optischen Sendeleistung und dem Radius des Kreises abhängig. Die Kreisbewegung kann in unterschiedlichen Frequenzen ausgeführt werden, in unseren Experimenten wurden Frequenzen zwischen 10 Hz und 50 Hz gewählt. Im Folgenden wird die PAA-Kreis Funktionalität erläutert und die verfügbaren Telemetriedaten dargestellt. Anschließend werden zwei untersuchte deterministische Methoden, der Bandpass und die Fast-Fourier-Transformation, und die Nutzung einer künstlichen Intelligenz für diese Anwendung erläutert. Für die Analysen und Simulationen wurden die Telemetriken von durchgeführten Experimenten der Bodenstation (Detektorsignal mit 5 kHz) und dem LCT in Orbit (Kommunikationsstatus und PAA-Auslenkung) genutzt.

#### 3.1. PAA-Kreis Funktionalität

In BILD 5 ist ein einminütiger Ausschnitt des Links vom 18.05.2017 dargestellt. Auf der linken Seite ist in blau der Uplink-Kommunikationsstatus und in rot die angesteuerte PAA-Position der Alpha-Achse dargestellt. Die Akquise ist hier bereits durchgeführt und zu Beginn des Ausschnitts besteht Uplink-Kommunikation (Status 6, blaue Kurve). Zur Zeit 04:08:16 wird die Uplink-Kommunikation durch äußere Einflüsse (z.B. Atmosphäre) unterbrochen und die PAA-Kreise stoppen, was an der geringeren Amplitude des roten Signals zu erkennen ist. Nachdem die Kommunikation um 04:08:23 wiederhergestellt ist, bewegt sich auch der PAA wieder in Kreisen. Eine solche Unterbrechung passiert in diesem Ausschnitt ein weiteres Mal um 04:08:49.

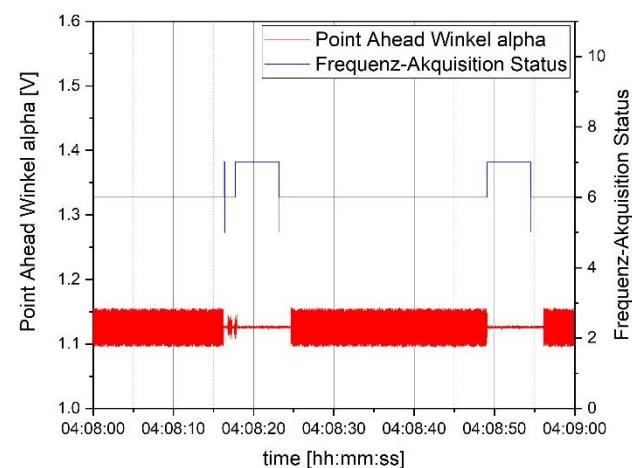


BILD 5. 18.05.2017 04:08 | Bewegung Point Ahead Winkel und Frequenz-Akquisition Status

In BILD 6 ist das Empfangssignal am Szintillationsdetektor der T-AOGS zu erkennen. Wenn die Kommunikation unterbrochen ist und keine Kreise aktiviert sind, ist das Empfangssignal höher als bei aktivierte Kreisen. Dies liegt

an der räumlichen Auslenkung durch die PAA-Kreise um einen bestimmten Radius. Je größer der Radius des Kreises ist, desto höher ist der Verlust. Das Detektorsignal an der T-AOGS steht als Telemetrie mit 5kHz für jeden Link zur Verfügung. Für die folgenden Analysen wurde dieses Signal als Basis genutzt. Während unseren Messkampagnen haben wir mehrere Links durchgeführt, um Daten bei unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen zu erhalten und damit eine zuverlässige Detektion durchführen zu können.

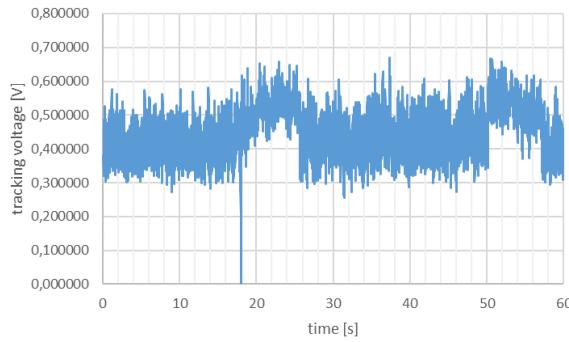


BILD 6. 18.05.2018 04:08 | Detektorspannung T-AOGS

### 3.2. Bandpass

Im zentralen Prozessor zur Steuerung eines LCTs, welcher auch in der T-AOGS genutzt wird, ist ein Bandpass implementiert. Da die Software an der Bodenstation einfach geändert und getestet werden kann ist es naheliegend vorhandene Implementierungen zu nutzen. Aus diesem Grund wurde die Funktion des Bandpasses nachgebildet und die Funktionalität mit realen Messdaten simuliert. Für den oben erläuterten Link wurden nun die Detektorsignale der Bodenstation genutzt und der Bandpass darauf angewendet. Der Bandpass ist auf 10Hz ausgelegt und es wird in BILD 7 die Differenz von Minimum und Maximum des Bandpassausgangs der letzten 100 Millisekunden über den einminütigen Ausschnitt dargestellt.

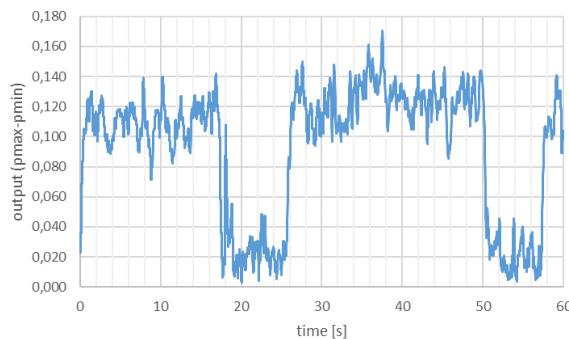


BILD 7. 18.05.2017 04:08 | Ergebnis Bandpass 2.5  $\mu$ rad Kreisradius

Im Verlauf sind zwei Level erkennbar, das höhere Level zeigt das eine Frequenz mit 10Hz, also der Kreisfrequenz, vorliegt und das niedrige Level bedeutet keine Kreisbewegung. Für diesen Ansatz kann eine Schwelle zwischen den beiden Niveaus festgelegt werden und damit der PAA-Kreis erkannt werden. In BILD 8 ist ein anderer

Link mit einem Radius von 1.2  $\mu$ rad zu sehen. Hier ist die Detektion durch die atmosphärischen Störungen schwieriger. Da die Implementierung des Bandpasses relativ starr ist, sind hier die klaren Grenzen des Bandpasses. Kleinere Radien können nicht mehr zuverlässig erkannt werden und die Nutzung von anderen Frequenzen ist durch das Design der PAA-Loop aufwändig. Für Kreise mit einer Frequenz von 10Hz und einem Radius von 2.5 $\mu$ rad kann ein Kreis innerhalb von 1.4 Sekunden detektiert werden.

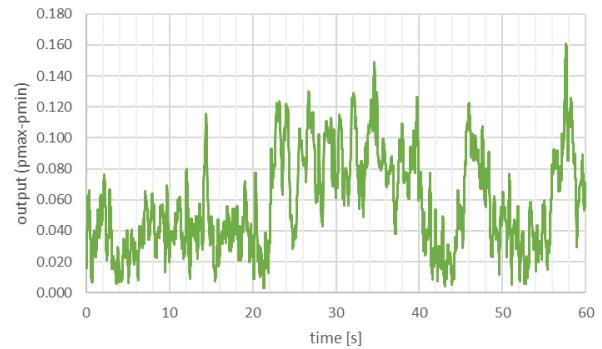


BILD 8. 24.08.2018 20:13 | Ergebnis Bandpass 1.2  $\mu$ rad Kreisradius

### 3.3. Fast Fourier Transformation (FFT)

Die FFT ist ein Standardwerkzeug in der Erkennung von Frequenzen in Messsignalen. In unserer Anwendung soll die Kreisfrequenz aus dem Detektorsignal analysiert werden. Hierzu wurden die Messsignale genutzt und in den Spektralbereich transformiert. Dort wurde nun nur die Frequenz welche der Kreisfrequenz entspricht genutzt und über die Zeit dargestellt.

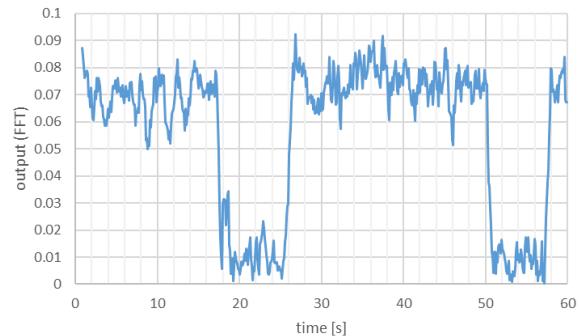


BILD 9. 18.05.2017 04:08 | Ergebnis FFT 2.5  $\mu$ rad Kreisradius

In BILD 9 und BILD 10 werden dieselben Ausschnitte wie bei der Bandpass-Analyse gezeigt. In BILD 9 ist klar zu erkennen, dass der Kreis zu Beginn des Links aktiviert war und im Verlauf zweimal deaktiviert war. Mit der FFT lassen sich auch kleinere Kreisradien eindeutiger detektieren als beim Bandpass (siehe BILD 10).

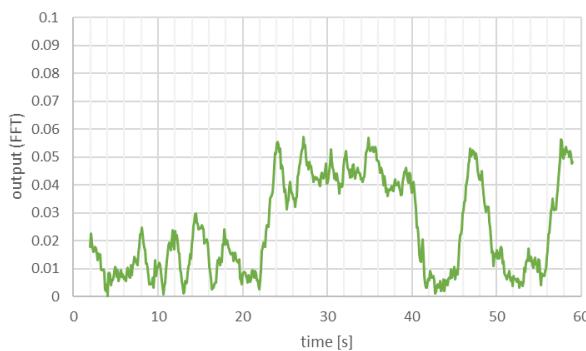


BILD 10. 24.08.2018 20:13 | Ergebnis FFT 1.2  $\mu$ rad Kreisradius

In den Experimenten können nun sowohl Kreisradius und Sendeleistung des LCT verändert werden, welche keinen Einfluss auf den Algorithmus haben. Lediglich die Entscheidungsschwelle muss dynamisch für die unterschiedlichen Einstellungen angepasst werden. Es gibt allerdings auch die Möglichkeit die Kreisfrequenz zu ändern, was einen direkten Einfluss auf den Erkennungsalgorithmus hat. Hier muss ein anderer Teil des Spektrums betrachtet werden um die Kreisbewegung zu detektieren. In BILD 11 ist das Spektrum des Detektorsignals für einen einzelnen Auswertezzeitraum dargestellt. In rot ist ein Zeitbereich mit PAA-Kreise aus und in grün mit an dargestellt. Bei circa 50Hz hat das grüne Signal einen deutlichen Ausschlag, was bedeutet das bei diesem Experiment Kreise mit 50 Hz durchgeführt wurden. Das Weitern ist zu erkennen, dass eine Detektion der Kreise bei höheren Frequenzen einfacher ist, da das Grundrauschen niedriger ist.

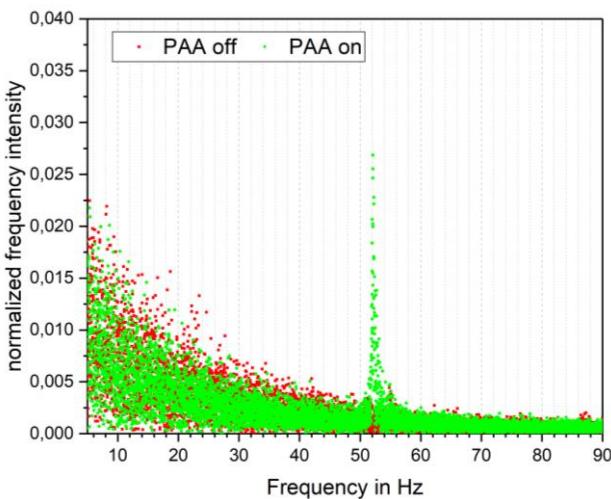


BILD 11. Spektrum Detektorsignal für Kreisfrequenz 50 Hz

### 3.4. Künstliche Intelligenz

Zur Beschleunigung der Detektionszeit des Uplink-Kommunikationsstatus wird ein KI-Modell entwickelt, welches anhand von Daten der Bodenstation bestimmen kann, ob das LCT auf dem Satelliten eine Kreisbewegung durchführt oder nicht. Dieses KI-Modell wird nach dem Training auf einem FPGA von Xilinx implementiert, wodurch die Ausführung potentiell beschleunigt werden kann.

Der Datensatz für das Training der KI muss die beim Betrieb der Bodenstation vorkommenden Fälle möglichst ausgewogen abbilden und ausreichend groß sein. Da die Bodenstation bereits mehrere Jahre im Betrieb ist und schon zahlreiche Experimente durchgeführt wurden, existieren über 600 Aufzeichnungen von vergangenen Laserlinks. Ein Python-Skript erstellt anhand ausgewählter Zeitfenster aus den Daten der Bodenstation einen Datensatz für das Training der KI, wobei unterschiedliche Parameter wie z.B. die Größe der einzelnen Samplesätze oder deren Überlappung festgelegt werden können. Die generierten Datensätze enthalten zusätzlich den Zustand der PAA-Kreisbewegung für jeden Samplesatz und werden im HDF5-Format abgespeichert. Da sowohl Telemetriedaten vom Satelliten, als auch von der Bodenstation vorhanden sind, lässt sich der Zustand der PAA-Kreisbewegung für jeden Samplesatz automatisch ermitteln. Dieser Zustand ist dabei das Label des entsprechenden Samplesatzes, entspricht also dem gewünschten Ausgangswert der KI bei Inferenz mit diesen Eingangsdaten.

Für die Klassifizierung der Sensorwerte kommt ein Convolutional Neural Network mit ResNet-Blöcken zum Einsatz, dessen Architektur an der in Paper [4] verwendeten angelehnt ist. Das Training der KI erfolgt mit dem Framework Tensorflow2 von Google zusammen mit der Keras-API und wird in einem Jupyter Notebook durchgeführt. Während des Trainings wird die Lernrate durch einen Optimierungsalgorithmus dynamisch für jeden Parameter angepasst, wodurch das Netzwerk schneller gute Ergebnisse erzielt. Um zu ermitteln, bei welchen Szenarien die Klassifizierung fehlschlägt, wird nach Abschluss eines Trainingsdurchlaufs ein in Ausschnitte aufgeteilter Link sequentiell klassifiziert. Dieser kann daraufhin in Verbindung mit den bekannten Telemetriedaten des Satelliten ausgewertet werden.

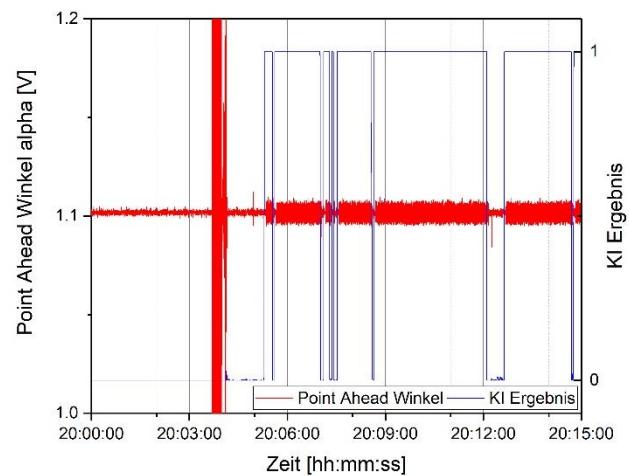


BILD 12. KI Klassifizierung im Verlauf eines Links

In BILD 12 ist ein Link von 20:00 Uhr bis 20:15 dargestellt. Auf der linken y-Achse ist der Point Ahead Spiegel der alpha Achse in Volt (rote Kurve) und auf der rechten y-Achse die KI-Klassifizierung (blaue Kurve) dargestellt. Zu Beginn des Links sind kleine Bewegungen (Grundrauschen) des Spiegels zu sehen. Um 20:03:41 sind große Auslenkungen zu erkennen, dies entspricht den in Kapitel 2 erklärten Spiralen während der Akquise. Um

20:04:09 ist diese abgeschlossen und der Spiegel bewegt sich erst einmal nicht mehr. Um 20:05:16 wird dann Kommunikation erreicht, was durch die definierte Auslenkung des Spiegels zu erkennen ist. Hier werden die Kreise mit einer vorgegebenen Frequenz und dem entsprechenden Radius abgefahren. Es ist zu erkennen, dass das KI Ergebnis bei der Durchführung der Kreise auf 1 ansteigt, die Kreisbewegung also aus den Detektorsignalen am Boden detektiert werden können. Im gezeigten Ausschnitt wird die Kommunikation, und damit die Kreise, mehrfach unterbrochen. Die KI kann alle diese Änderungen ohne Probleme erkennen.

Des Weiteren ist hervorzuheben, dass die Spiralen bei der Akquise, welche kurzzeitig die Kreisfrequenz haben können, von der KI als keine Kreise erkannt werden. Dies ist ein Vorteil gegenüber den anderen Algorithmen, da eine FFT die Frequenz einfach erkennen würde und im ersten Ansatz nicht zwischen Spirale und Kreis differenzieren kann.

Das trainierte KI-Modell wird auf einem FPGA-Board des Herstellers Xilinx implementiert und getestet. Hierfür wird das neuronale Netzwerk mit den Xilinx Vitis AI-Tools für die DPU angepasst und kompiliert. Für das FPGA-Board müssen die Parameter des neuronalen Netzwerks von 32-Bit Gleitkommazahlen in 8-Bit Ganzzahlen umgewandelt werden, wodurch ein Teil der Klassifizierungsgenauigkeit verloren geht. Die Verschlechterung ist in diesem Fall nur marginal und beeinflusst das Ergebnis kaum. Ein mit Python entwickeltes Programm steuert die Inferenz auf dem Board mit passenden Eingangsdaten und gibt die Klassifizierungsergebnisse zurück. Tests auf dem FPGA-Board ergeben eine Inferenzzeit für einen einzelnen Samplesatz von 10,2 ms, was deutlich schneller als die Inferenz des gleichen KI-Modells auf dem Trainingscomputer mit 248 ms ist.

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Paper haben wir den aktuellen Stand der Analysen zum Uplink-Kommunikationsstatus gezeigt. Es wurden sowohl deterministische Methoden (Bandpass und FFT) als auch ein KI-Algorithmus untersucht. Für den Bandpass gibt es zwar bereits eine Implementierung, die Performance ist allerdings nicht zufriedenstellend. Daher wird der Fokus auf die FFT gelegt. Dazu im Vergleich soll weiterhin der KI-Algorithmus untersucht werden. Für diesen wird momentan an einer neuen KI-Architektur gearbeitet, welche speziell für Frequenzanwendungen geeignet ist. Mit dieser Architektur erhoffen wir uns eine genauere Klassifizierung. Des Weiteren wird momentan ein FPGA entwickelt, welcher die Daten des Detektors mit einem A/D-Wandler einlesen kann und anschließend sowohl FFT als auch KI-Anwendung in Echtzeit berechnet und jeweils ein Uplink-Kommunikationsstatus-Signal ausgibt. Dieses Signal kann dann an den User-Daten-Transmitter angeschlossen werden und die Nutzdaten werden nur in Abhängigkeit des Bits gesendet. Nach der Implementierung soll der FPGA an der T-AOGS getestet werden und somit die Performance der beiden Methoden direkt verglichen werden. Bei diesen Tests ist vor allem von Interesse inwiefern die beiden Lösungen mit unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen performen.

#### DANKSAGUNG

Die Aktivitäten werden im Auftrag des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR e.V.) mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter der Förderkennzahl 50 YH 2001 durchgeführt. Das TDP1 Programm wird durch ESA und Inmarsat unterstützt.

#### REFERENZEN

- [1] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques", IEEE Communications Surveys Tutorials, 19(1):57-96, Firstquarter 2017.
- [2] R. Mahn et al., "Durchführung von optischen Satellit-zu-Boden Links: Linkstatistik und Wetterauswertung aus fünf Jahren betrieb der T-AOGS", DLRK 2020.
- [3] R. Mahn et al., "SGL Activities with Uplink Communication from Switzerland with the T-AOGS", ICSO 2022.
- [4] T. J. O'Shea et al., "Over the Air Deep Learning Based Radio Signal Classification", 13.09.2017, arXiv:1712.04578