

Untersuchungen des Einflusses von Satellitenjitter auf die Bildqualität von hochauflösenden optischen Sensoren

ANGELO CONJO¹ & RALF REULKE²

Zusammenfassung: Jitter werden in der Raumfahrt als ungewollte, stochastische Bewegungen definiert, die durch aktive Instrumente, z.B. zur Lageänderung im Raum, zur Energiegewinnung oder für die Kühlung des Systems verursacht werden. Jede einzelne Komponente hat eine eigene typische Jittercharakteristik. Durch das Zusammenwirken dieser Systeme entsteht ein spezifisches Spektrum.

Ein vorhandener Messplatz wurde so erweitert, dass quer zur Bewegungsrichtung die Störungen durch Jitter simuliert werden können. Es wurde ein geeignetes Auswertungsverfahren entwickelt, um die Änderung der Abbildungsqualität zu erfassen. Dazu wurde die durch Jitter verursachte Verschmierung ist an der resultierenden Point-Spread-Function (PSF) anhand ihrer Verbreiterung und ihrer vertikalen Pixelverschiebung beschrieben.

1 Einleitung

Um die Effizienz von CCD-Zeilensensoren zu verbessern, werden seit den 90er Jahren sogenannte Time-Delay Integration (TDI)-Zeilensensoren verwendet. Sie ermöglichen durch Mehrfachbelichtung und Aufintegration eine Verlängerung der Belichtungszeit und dadurch eine wesentliche Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses. Gleichzeitig muss man sich intensiver mit Jitter-Effekten beschäftigen, da Jitter die Bildqualität entscheidend beeinflussen kann (siehe zum Beispiel (RAN 2008)).

Heutzutage ist es ohne weiteres möglich, diese Jittereffekte durch Einsatz von Lageregelungs- und Stabilisierungssystemen zu minimieren und durch Bildverarbeitungsalgorithmen den Jitter zu korrigieren. Offen bleibt jedoch, wie im Detail die Bildqualität durch Jitter in Form und Größe beeinträchtigt wird. Dazu wurde ein vorhandener Messplatz so erweitert, dass quer zur Bewegungsrichtung die Störungen durch Jitter simuliert werden können. Es wurden für bekannte Satellitenplattformen die Größe und Spektren des Jitter festgestellt, um einen geeigneten Aktor zu spezifizieren. Dieser Antrieb wurde adäquat charakterisiert um definierte Jitterfunktionen und ihre Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Anschließend wurde er auf dem Messplatz integriert.

Um stochastische Störbewegungen ausführen zu können, wurde ein Generator für die Jittermodulation programmiert. Ziel ist eine experimentelle Bestimmung der Bildgüte bei verschiedenen Jittersimulationen auf dem vorhandenen Messplatz. Es soll herausgefunden werden, welche Parameter welchen Einfluss auf die Abbildung des gegebenen optischen Systems haben.

¹ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Optische Sensorsysteme, Rutherfordstrasse 2, D-12489 Berlin, E-Mail: Angelo.Conjo@dlr.de

² Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Informatik, D-10099 Berlin, E-Mail: reulke@informatik.hu-berlin.de

Nach einigen grundlegenden Betrachtungen zu den Grundlagen von TDI und Jitter, wird der Messplatz vorgestellt. Das dritte Kapitel beschreibt das Experiment und die Datenauswertung. Im vierten Kapitel werden die Ergebnisse zusammengefasst. Der Beitrag endet mit einem Fazit und einem Ausblick.

2 Grundlagen

2.1 TDI Sensor und Jitter

Der TDI Sensor ist eine Sonderform eines Zeilensensors. Durch Mehrfachbelichtung von ein und demselben Objekt lässt sich eine SNR Verbesserung erzielen. Im Gegensatz zu konventionellen Zeilensensoren steigt bei dieser Technologie der Kalibrieraufwand, da Sensor und Auslesegeschwindigkeit synchronisiert werden müssen. Wenn die Synchronisierung nicht gewährleistet ist, kommt es zur Verschlechterung der Bilddaten.

Allgemein wird Jitter eingeteilt in Niedrigfrequenz- und Hochfrequenzjitter. Betrachtet man einen langen Zeitraum, sind die resultierenden Änderungen stochastisch. Bei Zerlegung in kleinere Zeitintervalle lassen sich wiederholende Zyklen erkennen. Ist die Integrationszeit kleiner oder gleich der Periode einer Sinusschwingung, handelt es sich um ein Niedrigfrequenzjitter. Ist die Integrationszeit größer spricht man von Hochfrequenzjitter. Niedrigfrequenzjitter führt zu strukturellen Veränderungen des aufgenommenen Objekts im Bild, Hochfrequenzjitter führt zu Verschmierungen im Bild. Bei Erdbeobachtungssatelliten wie: Alos, Aster, ZY-3, Beijing-1 treten Amplituden zwischen 0,2 - 3 Pixel auf. Die Frequenzen können sich in einem Bereich von 0 bis über 1000 Hz bewegen (TONG et al. 2014).

2.2 Messplatz

Um den Einfluss der Winkelfehlausrichtung und der Synchronisationsfehlpassung auf die optische Abbildungsqualität zu untersuchen, wurde ein spezieller experimenteller Aufbau und ein Verfahren entwickelt (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Zur Analyse der Bildqualität wird die Modulation Transfer Function (MTF) entlang der Flugrichtung (TDI-Richtung) analysiert. Das Target, ein Pinhole von 10 μm Durchmesser, wurde auf einer schnell beweglichen linearen Plattform montiert, um die Bodenbahngeschwindigkeit des Satelliten zu simulieren. Die Plattform ist die Ultra-Präzisions-Linearmotorstufe XMS50 von Newport (Linearstage). Das Target wird durch eine Quarz Wolfram Halogen (QTH) Lampe über eine Glasfaser mit einer Fokussierlinse beleuchtet. Die Wellenlängenauswahl erfolgt durch Interferenzfilter mit 10 nm Bandbreite. Die Geschwindigkeit der schnellen Plattform muss mit der Zeilensynchronisationsfrequenz des TDI-Regimes synchronisiert werden.

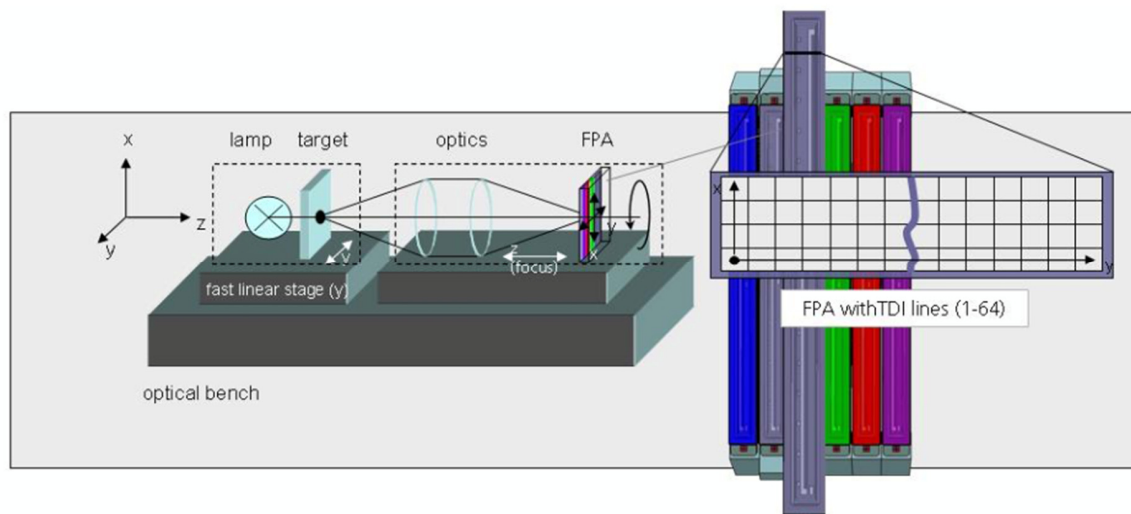


Abb. 1: Dynamischer Testaufbau zur Vermessung von TDI-Sensoren (aus SCHWARZER (2008))

Eine 1:1-Relaisoptik transformiert das Bild des Targets in die Fokalebene (FPA). Dazu wird das telezentrische Objektiv S5LPJ7210 von Sill Optics mit einer Brennweite von 72 mm, einem Arbeitsabstand von 180 mm und einem Sichtfeld von $70 \times 70 \text{ mm}^2$ verwendet.

Der TDI-Sensor, ist der CCD8091 von Fairchild. Es ist ein $9216 \text{ Pixel} \times 128 \text{ Zeilen}$ Hochgeschwindigkeits-TDI-Sensor mit einer Pixelgröße von $8,75 \times 8,75 \mu\text{m}^2$ und einer 14-Bit-A / D-Wandlung. Die elektronisch wählbare Anzahl von TDI-Stufen beträgt 4, 8, 16, 32, 64, 96 und 128. Weil wir eine 685 km Umlaufbahn simulieren wollen, müssen wir für diesen Detektor eine Zeilensynchronisationsfrequenz von 9,26 kHz verwenden. Unter Berücksichtigung der Abbildungsbeziehungen der Optik benötigen wir eine Geschwindigkeit der linearen Stufe von 81 mm / s , um die Geschwindigkeit des Satelliten zu simulieren.

2.3 Messplatzerweiterung

Der XMS 50 ist ein linearer Präzisionspositionierer der Firma Newport. Auf ihm werden Justierelemente, Optiken, die notwendigen Erweiterungen wie Adapter und Jitterantrieb montiert. Er realisiert die synchrone Bewegung des Objektpunktes mit der Ladungsverschiebung der TDI Kamera.

Wegen der Erweiterung des Schlittenaufbaus muss der XMS 50 an das zu bewegende Gewicht angeglichen werden. Dazu sind die Parameter „ScalingAcceleration“ (passt die ausgehende Motorspannung des Controllers an für die maximale Beschleunigung) und „Acceleration-Limit“ (gibt die vom beladenen Schlitten maximal mögliche Beschleunigung an) in der Initialisierungsdatei des Motorcontrollers anzupassen. Das Ziel ist die Vorbeugung und Minimierung von Störgrößen, die neben dem zu untersuchenden Jitter auch Einfluss auf die PSF-Messung haben.

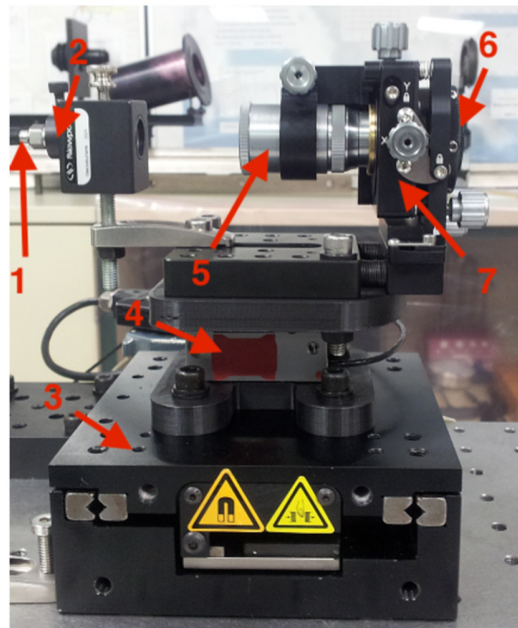


Abb. 2: Erweiterung der linearen Plattform mit Piezo

In der oben gezeigten Darstellung ist die erweiterte Konstruktion zu sehen (siehe Abb. 2). Mit Hilfe der Glasfaseroptik (1) ist es möglich, die Beleuchtung auf den Schlitten zu bringen. Die Faser besitzt einen Durchmesser von $200\ \mu\text{m}$. Am Ende dieser Glasfaser befindet sich ein Kollimator (2). Dieser wird an den beweglichen Teil des Versuchsaufbaus, der Linearstage, gekoppelt. Der XMS 50 (3) simuliert die Bahngeschwindigkeit des Satelliten, diese ist mit der Auslesegeschwindigkeit der TDI Kamera synchronisiert. Auf der Linearstage ist der PU 100 HL (4) montiert. Er simuliert die Jitter-Bewegungen quer zur Bahnrichtung des Schlittens. Unter und über dem Piezo sind Adapterplatten angeflanscht, die zum einen den Jitterantrieb mit der Linearstage verbinden und zum anderen den Piezo-Aktor mit dem optischen Aufbau fixieren. Von der Austrittsöffnung des Kollimators passiert der Lichtstrahl ein Mikroskopobjektiv (5). Mit ihm ist es möglich, durch eine mechanische Blende die Belichtung zu steuern. Das Objektiv fokussiert den ankommenden Lichtstrahl auf das Pinhole oder Lochblende (6). Der Durchmesser sollte um $10\ \mu\text{m}$ betragen. Gemessen wurde ein Durchmesser von $12,1\ \mu\text{m}$. Pinhole und Mikroskopobjektiv sind an einer 5-Achsen-Justierung (7) montiert. Damit wird ein optimales Einstellen des Signaldurchlaufs gewährleistet.

2.4 Untersuchungen zum XMS 50

Um PSF Messungen mit Jitter messen zu können, muss eine synchrone Geschwindigkeit des Positionierers gewährleistet sein. Weiterhin soll ein Einblick auf das Verhalten des Schlittens bei Jitter-Erregung gegeben werden.

Zur Parameterfindung für eine konstante Geschwindigkeit fährt der Schlitten eine festgelegte Strecke von $20\ \text{mm}$ mit jeweils wechselnden Beschleunigungsparametern ab. Die erste Messung wird mit einer Beschleunigung von $500\ \text{mm/s}^2$ durchgeführt. Anschließend wird der Parameter um $500\ \text{mm/s}^2$ erhöht und die Messung wiederholt. Die Beschleunigung wird bis zu einem Wert von 2000

mm/s² untersucht. Anhand der Position des Schlittens und der jeweiligen Geschwindigkeit kann eine Grafik erstellt werden, die den Einfluss der Beschleunigung auf die konstante Bewegung darstellt. Anschließend kann aus der grafischen Darstellung abgelesen werden, bei welcher Beschleunigung für dieses Gewicht ein konstanter Verfahrweg gewährleistet wird.

Die Auswertung belegt, dass mit einem Beschleunigungswert von 1500 mm/s² die stabilsten Verfahrwege zu realisieren sind.

Diese Untersuchung macht auch deutlich, dass der XMS 50 keine synchrone Bewegung ausführen kann. Durch Gegenmaßnahmen wie optimale Anpassung an das Gewicht wird der Fehler minimiert. Werden dem Schlitten Jitter hinzugefügt, haben diese auch einen deutlichen Einfluss auf den Speed Ratio. Der Speed Ratio beschreibt das Verhältnis zwischen Zeilenfrequenz und Geschwindigkeit des Schlittens. Bei diesem Test schwanken die aufgenommenen Positionier-Geschwindigkeiten ca. 0,6 mm/s um den Idealwert von 81 mm/s.

2.5 Jitter-Simulationsprogramm

Für die Voruntersuchung wurde ein vorhandenes Programm erweitert. Das Programm setzt sich aus den folgenden Elementen zusammen: TDI Matrix, Ausleseregister zum Auslesen der integrierten Stage Information, punktförmige Lichtquelle, Jitter Störbewegung, Benutzeroberfläche für das Einstellen der gewünschten Simulationsparameter und einer zweidimensionalen grafischen Darstellung nach der Simulation.

Um vergleichbare Werte mit dem Messaufbau zu erhalten, sind die Parameter an die Messwertverhältnisse angepasst. Ein Zeilenelement besitzt die Größe eines Pixels von 8,75µm. Da der verwendete Spot nicht ruckartig, sondern fließend von Stage zu Stage wandert, werden die Pixel in kleinere feine Schritte eingeteilt. Die Anzahl der Integrationsstufen ist wie auf dem Messplatz variabel einstellbar.

Bei jeder Ladungsverschiebung übergibt die letzte Stufe ihre Daten an das Ausleseregister. In ihr wird das Ergebnis der integrierten Signale zeilenweise gesammelt. Anschließend werden die Ausleseregisterdaten genutzt für die grafische Darstellung.

Um eine punktförmige Lichtquelle zu erzeugen, wird eine zweidimensionale Standard- Gauß-Verteilung verwendet. Im Zentrum des Lichtspots ist der Signalwert am höchsten. Entfernt man sich von dem Zentrum, sinkt die Leuchtkraft. Diese Funktion wird wie folgt beschrieben:

$$f(x, y) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2 \right)}$$

Das Ergebnis von $f(x, y)$ ist ein Zahlenwert, der als Lichtintensität im erstellten Programm interpretiert wird. Die Kennzahlen σ_x und σ_y beschreiben die Größe des zu betrachtenden Lichtflecks. Die Störbewegung erfolgt in Y-Richtung. Die Jitteramplitude wird aus Pixelanzahl multipliziert mit der Pixeldimension berechnet.

Die Jitterfrequenz wird als Konstante vom Benutzer eingegeben. Im Programm können die Auswirkungen auf die PSF von Sinusfunktionen als auch von Rauschfunktionen simuliert und dargestellt werden.

3 Experiment

3.1 Messung

Um qualitative Aussagen des abzubildenden Spots treffen zu können, wird ein Versuch ohne Jitter durchgeführt. Die Messergebnisse dienen als Referenz für die mit Jitter behafteten Messungen. Um reproduzierbare Daten zu erhalten, ist es nötig, feste Parameter zu setzen. Der Lichtspot wird für jeden Versuch auf das gleiche Pixel der 9k TDI Zeile fokussiert. Die Untersuchungen beziehen sich auf sinusförmige Jitter. Die Amplituden betragen 10 μm und 30 μm . Es wurde eine Frequenz von 1 Hz und 200 Hz verwendet.

Die Schlittengeschwindigkeit beträgt 81 mm/s und ist synchron mit der Ladungsträgerverschiebung von 9259 Hz der TDI-Kamera. Für jede Jitter-Untersuchung werden 30 Wiederholungen durchgeführt. Die Ansteuerung des Schlittens erfolgt mit LabVIEW. Die Kameraaufnahme erfolgt über einen separaten Computer.

Ist eine Messung beendet, wird die Ausrichtung des Lichtspots überprüft und gegebenenfalls korrigiert. Für die spätere Messauswertung werden die Daten des Schlittens, die sogenannte gathering-Datei, und die Daten der 9kTDI Kamera in sogenannte spot-Dateien abgespeichert.

3.2 Auswertung

Wesentliche Parameter zur Bewertung sind FWHM und Pixelverschiebung. Die Verschmierung des Spots wird über die FWHM berechnet. Die Abkürzung steht für „Full Width at Half Maximum“ und beschreibt die Breite der PSF an dem Ort, an dem die Intensität nur noch die Hälfte des ursprünglichen Peaks beträgt. Mit der Halbwertsbreite ist es außerdem möglich, die Intensitätsverschiebung zu ermitteln. Sie wird berechnet mit

$$FWHM = |x_{halfmax_1} - x_{halfmax_2}|$$

Dabei ist $x_{halfmax_1}$ der erste Wert, an dem die Funktion auf die Hälfte abgesunken ist, $x_{halfmax_2}$ der zweite Wert, an dem sich der Spitzenwert halbiert. Je kleiner die FWHM, desto geringer ist die Verschmierung. Um die Halbwertsbreite berechnen zu können, muss eine lineare Interpolation

$$\frac{y - y_1}{x - x_1} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

durchgeführt werden. Dabei wird ausgenutzt, dass die Orte der Pixel x_1 , x_2 , die zugehörige Intensität y_1 , y_2 und ein gegebener Parameter zwischen den bekannten Pixeln, das halbe Helligkeitsmaximum, bekannt sind. Durch die Anwendung des Verfahrens kann ein Schätzwert für die gesuchte Größe der Position an der gegebenen y -Koordinate des halben Maximums bestimmt werden. Nach Umstellen auf die gesuchte Variable nach

$$x_{halfmax} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \cdot (x_2 - x_1) + x_1$$

kann $x_{halfmax}$ in die FWHM Formel eingesetzt und die Halbwertsbreite bestimmt werden.

Für die Berechnung der oben genannten Größen werden nur Daten der Kamera benötigt. In der Spot-Datei befinden sich je Messdurchlauf ungefähr 200.000 Messwerte. Über ein Ausleseprogramm wird die benötigte Helligkeitsverteilung mit den entsprechenden Intensitätswerten herausgefiltert und als txt-Datei mit einer Größe von 32x32 Pixeln abgespeichert.

Um eine aussagekräftigere PSF zu erhalten, werden die Daten durch eine Gaußschen Normalverteilung angepasst.

4 Ergebnisse

In Abb. 3 werden einzelne PSF-Kurven dargestellt, die sich bei diesem Experiment ergeben haben. Gezeigt wird jeweils ein Messdurchlauf je Versuchsspezifikation.

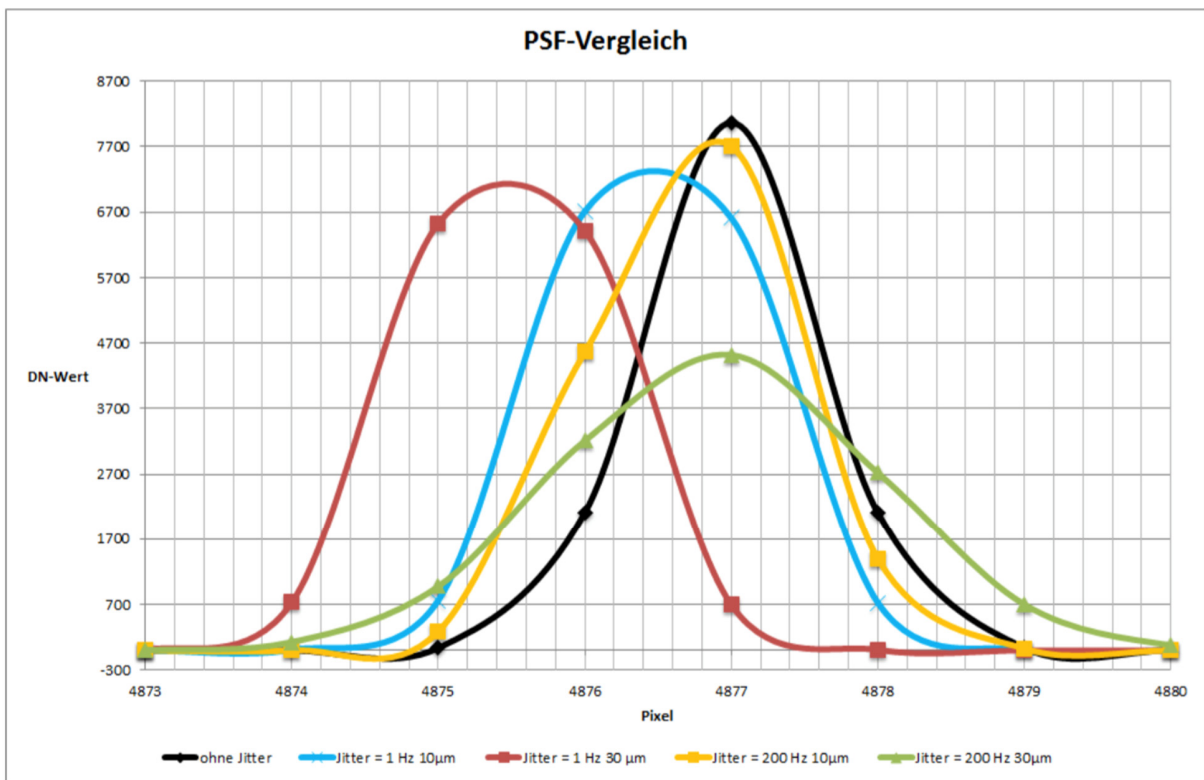


Abb. 3: Ergebnis der PSF-Messungen für verschiedene Frequenzen und Amplituden

Die schwarz gekennzeichnete Funktion stellt die optimale PSF dar. Die 1 Herz Jitter-Messungen weisen eine deutlich breitere PSF auf. Im Gegensatz zu der Referenzkurve ist diese verschoben. Bei den kleinen Frequenzen haben hohe Amplituden große Auswirkung auf die Verschiebung der kompletten PSF. Je höher die Amplitude des Jitter, desto größer ist der Abstand zum Referenz Pixel. Bei 200 Hz und kleiner Amplitude wird ebenfalls die PSF breiter. Die Verteilungskurve ist jedoch nur geringfügig verschoben. Werden bei solchen Frequenzen die Amplituden erhöht, hat

dies große Auswirkungen auf die Verbreiterung der PSF. Je höher die Amplitude des Jitter, desto breiter wird die PSF.

Die Untersuchung zeigt, dass kleine Frequenzen sich auf die komplette Verschiebung der PSF bemerkbar machen. Die Verschmierung ist bei dieser Art Jitter wenig ausgeprägt. Dies erfolgt dadurch, dass bei langsamen Frequenzen die Wahrscheinlichkeit höher ist, nur eine Pixelzeile während des Durchlaufs zu beleuchten. Außerdem reichen bei kleinen Frequenzen die Samplingrate der Kamera noch aus um den Lichtspot noch Abbildungsgetreu, jedoch verschoben abzutasten. Hohe Frequenzen dagegen verschmieren die gesamte PSF. Dies erfolgt dadurch, dass bei schnellen Frequenzen innerhalb eines TDI-Durchlaufs mehrere Pixelzeilen beleuchtet werden können und die Samplingrate nicht mehr ausreicht um schnelle Bewegungsabläufe zu detektieren. Die Verschiebung ist bei dieser Art Jitter weniger ausgeprägt. Hohe Frequenzen bei kleinen Amplituden scheinen daher auch weniger Einfluss auf die Verschlechterung der Bildqualität zu haben.

5 Fazit & Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Herangehensweise, Methodik und Problemlösung zur experimentellen Bestimmung der Bildgüte von hochauflösenden optischen Systemen unter Einfluss verschiedener Jittersimulationen betrachtet.

Die Untersuchung zeigte, dass hohe Frequenzen mit großen Amplituden zu einer starken Verschmierung im Bild führen. Bei geringen Amplituden und hohen Frequenzen, nähert sich diese FWHM dem Wert ohne Jitter sehr gut an. Die strukturellen Veränderungen (gemessen durch Verschiebung der PSF) sind gering.

Bei niedrigen Frequenzen ist die Verschmierung bedeutend kleiner als bei hohen Frequenzen. Die Pixelverschiebung ist allerdings stark ausgeprägt und abhängig von der jeweils verwendeten Amplitude. Für weitere Messungen könnten die Jitter in Frequenz und Amplitude weitere Variationen erfahren um eventuell ein Parameter für den Übergang vom Verschmieren zum Verschieben der PSF zu finden. Für eine bessere Interpretation der Ergebnisse ist es unverzichtbar, den Verlauf des Jitter während eines Messdurchlaufs zu detektieren, weil der Antrieb in seiner Bewegung aktuell noch eine Blackbox darstellt.

6 Literaturverzeichnis

- RAN, Q., CHI, Y. & WANG, Z., 2008: Property and Removal of Jitter In Beijing-1 Small Satellite Panchromatic Images, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **37**(B1).
- TONG, X., YE, Z., XU, Y., TANG, X., LIU, S., LI, L., XIE, H., WANG, F., LI, T., & HONG, Z., 2014: Framework of jitter detection and compensation for high resolution satellites. *Remote Sensing* **6**(5), 3944-3964.
- SCHWARZER, H., BOERNER, A., DEGEN, K.-H., ECKARDT, A. & SCHERBAUM, P., 2008: Dynamic PSF and MTF measurements on a 9k TDI CCD. *Proc. of SPIE* **7106**, 71061F-1.