

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Entwicklung der CubeSat Technologien	2
1.2	Lagebestimmung von Picosatelliten	3
1.3	Funktionsweise einer Sternkamera	4
2	Ziel der Arbeit	6
2.1	Motivation	6
2.2	BEESAT-5...8	7
2.3	Systemanforderungen	9
2.4	Vorgehensweise und Methodik	12
3	Kamerasysteme für Pico- und Nanosatelliten	13
3.1	Sternkamerasysteme	13
3.2	Sonstige Kamerasysteme	15
3.2.1	Miniaturisierte CubeSat Kameras	15
3.2.2	Kameras zur Systemverifikation	16
3.2.3	Kameras im Formationsflug	17
4	Technischer Hintergrund	18
4.1	Bildsensorysysteme	18
4.1.1	CCD-Bildsensoren	19
4.1.2	CMOS-Bildsensoren	21
4.1.3	Elektronische Belichtungssteuerung	24
4.1.4	Charakteristische Eigenschaften von Bildsensoren	25
4.2	Sternenhimmel	27
4.2.1	Geozentrisches äquatoriales Koordinatensystem	27
4.2.2	Definition der scheinbaren Helligkeit	28
4.2.3	UBV-System	29
4.2.4	Hipparcos Katalog	29
4.2.5	Himmelsabdeckung	31

5	Hardware	33
5.1	Auswahl des Bildsensors	33
5.1.1	Sensorempfindlichkeit	36
5.1.2	Untersuchung des Sensorrauschens	41
5.1.3	Dynamikumfang der Kamera	42
5.1.4	Rolling Shutter Verzug	43
5.2	Objektive	44
5.2.1	Auflösungsvermögen	47
5.2.2	Analyse der Punktverwaschungsfunktion	49
5.2.3	Verzeichnung	53
5.2.4	Vignettierung und \cos^4 -Randlichtabfall	54
5.2.5	Anzahl der Sterne im FOV	56
5.3	Hardwareimplementierung in BEESAT-5...8	57
5.3.1	Mikrocontroller und externer Bildspeicher	60
5.3.2	Gyroskope	61
5.4	Streulichtblende	63
6	Software und Algorithmen	66
6.1	Bildformatierung und Binning	67
6.2	Detektierung von Sternen	67
6.2.1	Schwellwert	68
6.2.2	Schwerpunktbestimmung	69
6.2.3	Wandern von Sternen durch die Pixelmaske	72
6.3	Kalibration der optischen Verzeichnung	75
6.3.1	Mathematisches Modell	77
6.3.2	Ergebnisse der Kalibration	81
6.3.3	Vergleich der Verzeichnungen verschiedener Objektive	84
6.4	Sternerkennungsalgorithmen	85
6.4.1	Distanzmethode	86
6.4.2	Oriented Triangles	88
6.4.3	Grid Methode	90
6.4.4	Radial and Cyclic Star Patterns	91
6.5	Methoden der Lagebestimmung	93
6.6	Bilddatenkomprimierung	95
6.6.1	Integrierter JPEG Encoder	95
6.6.2	Schwellwert und heatshrink Implementierung	96
6.7	Softwareimplementierung in BEESAT-5...8	97
6.8	Integration und Fokussierung	98

7 Systemqualifikation und -verifikation	102
7.1 Ergebnisse am Nachthimmel	102
7.1.1 Lagebestimmung mit Hilfe einzelner Sternpaare	103
7.1.2 Lagevektorrauschen bei der Messung der Erdrotation	107
7.2 Umwelttests	112
7.2.1 Mechanische Belastungstests	113
7.2.2 Thermal-Vakuumtest	114
7.2.3 Strahlungstest	115
8 Zusammenfassung und Ausblick	119
Literaturverzeichnis	124
Anhang	137
A Aufnahme im Sternbild Lyra	138
B Liste der detektierten Sterne im Sternbild Lyra	139
C BEESAT-10...13	141