

Ein Verfahren
der bildverarbeitenden Erkennung von unbekanntem Sternmustern
zur autonomen und 3-axialen Lagebestimmung von Raumflugkörpern

Vom Fachbereich Produktionstechnik
der
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Hartmut Renken

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Rath
Prof. Dr. rer. nat. Heinz-Otto Peitgen

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Dezember 1998

Vorwort und Danksagung

Neben meiner beruflichen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Forschungsgruppe *Verbrennung* am *Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation* (ZARM) bis Ende des Jahres 1997 habe ich mich im Rahmen meiner Dissertation mit der *Entwicklung und Realisierung eines Verfahrens der bildverarbeitenden Erkennung von unbekanntem Sternmustern als Werkzeug zur autonomen und 3-axialen Lagebestimmung von Raumflugkörpern* beschäftigt. Dieses von mir stets mit besonderer Vorliebe behandelte Thema stellt aus meiner Sicht eine sehr interessante und interdisziplinäre Verbindung insbesondere der Wissenschafts- und Ingenieurbereiche *Raumfahrttechnik, Astronomie, Elektrotechnik* und *Bildverarbeitung* dar und bietet viele spannende Nebenaspekte, die weit über den *Tellerrand* eines eng gefaßten Wissenschaftsgebiets herausragen. Das stärkste Anwendungspotential der bildverarbeitenden Sternmustererkennung ist im Bereich der Raumfahrttechnik zu finden. Hier kann das Verfahren als *on-board* Anwendung zur vollautomatischen 3-axialen Lagebestimmung von Satelliten während Raumfahrtmissionen im All genutzt werden.

Es war stets eine besondere Herausforderung, diese Dissertation mit dem beruflichen Tagesgeschäft der Bildverarbeitung und Kameratechnik zur Verbrennungsforschung am Fallturm Bremen und der damit verbundenen Projektarbeit in Einklang zu bringen, haben doch beide Thematiken wenig miteinander zu tun. Ich danke daher besonders Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Rath sowie dem Leiter der Forschungsgruppe *Verbrennung* am ZARM, Herrn Dipl.-Ing. Christian Eigenbrod, daß sie die vorliegende Arbeit gerade auch unter diesem Gesichtspunkt gefördert haben. Herrn Prof. Dr. rer. nat. Heinz-Otto Peitgen danke ich für das Koreferat und die Diskussionen und Anregungen, die diese Dissertation in der Endphase begleitet haben. Hans-Rossavik Gundersen gilt mein besonderer Dank für die sehr fruchtbare Zusammenarbeit während der *heißen* Implementierungsphase im Sommer 1997. Peter Offterdinger sei gedankt für die Bereitstellung von Himmelsaufnahmen, die mit einer speziell entwickelten CCD-Sternenkamera aufgenommen wurden. In den frühen Phasen dieser Arbeit, insbesondere zur Zeit der Kleinsatellitenmission *BREM-SAT*, habe ich diesbezüglich mit Dr.-Ing. Hans-Jörg Königsmann und Bernd-Carsten Sander zusammengearbeitet, denen ebenfalls Dank für ihre Anregungen gebührt. Für die abschließende mühsame Durchsicht der Dissertationsschrift sei meinen Eltern und den Kollegen der Raumfahrtgruppe des ZARMs gedankt. Und *last but not least* danke ich Stefan Lochmann für die Diskussionen während der Endphase der vorliegenden Arbeit.

Ich wünsche mir, daß in nicht allzu ferner Zukunft die nachfolgend zu lesenden Erkenntnisse bei möglichst vielen Raumfahrtprojekten zu deren Missionserfolg mit beitragen mögen.

Hartmut Renken

Bremen, im August 1998

Abstract

Die Erkennung von unbekanntem Sternmuster ist ein wichtiges Hilfsmittel um die Ausrichtung von Raumflugkörpern und insbesondere um die Lage von Satelliten gegenüber einem äußeren Referenzkoordinatensystem zu bestimmen. So wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation ein robustes Verfahren zur Sternmustererkennung entwickelt, als Personal-Computer basierter Softwareprototyp realisiert und unter den für die praktische Anwendung so wichtigen Aspekten wie Verarbeitungsgeschwindigkeit, Speicherminimalität und Erfolgsquote optimiert. Anhand realer Himmelsaufnahmen und mittels der Simulation eines typischen weltraumtauglichen Kameratyps wurde gezeigt, daß die eindeutige Erkennung von unbekanntem Sternmuster mit einer Erfolgsquote von bis zu 99,7% ohne Hinzuziehung von Vorwissen möglich ist. Durch Kombination des Verfahrens mit einer geeigneten Sternenkamera ergibt sich das Komplettsystem eines sogenannten *Startrackers*, der auch die Bestimmung der vollständigen 3-axialen Lageinformation zuläßt, gemäß dem Motto *Bild rein → Lage raus*.

Der Kern des Verfahrens zur Sternmustererkennung beruht auf dem Vergleich aller realen Winkelabstände von musterbildenden Sternen der Bildvorlage mit den synthetischen Winkelabständen von Sternen, die über einen Sternkatalog und einen schnellen Korrelationsalgorithmus generierbar sind. Hierbei enthält der Sternkatalog das notwendige *Soll-Wissen* durch Auflistung der Himmelskoordinaten aller durch den Bildaufnehmer der Sternenkamera detektierbaren Sterne.

Mittels geschickter Programmier- und Datenorganisation kann die Verarbeitungszeit einer zu untersuchenden Himmelsaufnahme auf weniger als eine Sekunde gedrückt werden, wobei im Maximalfall bis zu 4480 Sterne im Sternkatalog berücksichtigt werden. Insgesamt werden weniger als 256 Kilobyte als Programm-, Daten- und Bildspeicher benötigt. Daher ist das Verfahren insbesondere für speicherminimale *on-board* Anwendungen während Satellitenmissionen sehr interessant.

Inhaltsverzeichnis:

	Vorwort und Danksagung	2
	Abstract	3
	Inhaltsverzeichnis	4
	Notationen	6
1	Einleitung und Zielsetzung	12
2	Begriff der Lage	18
2.1	Übersicht zu Methoden und Sensoren der Lagebestimmung	21
2.2	Verfahren zur Erkennung von Sternmustern	24
3	Rahmenbedingungen	25
3.1	Die Programmpakete <i>MATCH-IT</i> und <i>MATCH-TOOLS</i>	29
4	Konzept eines vollständigen Systems zur Bestimmung der 3-axialen Lageparameter mittels bildverarbeitender Sternmustererkennung	31
5	Vorverarbeitung der Bilddaten (<i>image-data-pre-processing</i>)	36
5.1	Grauwertstatistik von Himmelsaufnahmen der CCD-Sternenkamera	37
5.2	Verfahren der Segmentierung von Bildsternen (<i>image-stars-segmentation</i>)	41
5.3	Zusammenfassung der Bilddatenvorverarbeitung	46
6	Verfahren der 3-axialen Lagebestimmung mittels Sternmustererkennung	48
6.1	Erkennung von 2-Sterne-Mustern (<i>match-2-stars-pattern</i>)	53
6.2	Erkennung von 3-Sterne-Mustern (<i>match-3-stars-pattern</i>)	60
6.3	Erkennung von 4-Sterne-Mustern (<i>match-4-stars-pattern</i>)	67
6.4	Erkennung von 5-Sterne-Mustern (<i>match-5-stars-pattern</i>)	75
6.5	Erkennung von 6-Sterne-Mustern (<i>match-6-stars-pattern</i>)	83
6.6	Spiegelbildüberprüfung (<i>mirror-image-check</i>)	91
6.7	Berechnung der 3-axialen Lageparameter (<i>calculate-3-axis-attitude</i>)	95
6.8	Organisation eines <i>n-Sterne-Musters</i> nach der <i>closest-stars</i> Methode	101
6.9	Allgemeine Formulierung des Verfahrens zur 3-axialen Lagebestimmung mittels bildverarbeitender Erkennung eines <i>n-Sterne-Musters</i>	103
6.10	Aspekte zur Unterteilung des Sternkatalogs in <i>Sub-Sternkataloge</i>	113
6.11	Abschätzung des Speicheraufwands	121
7	Beispiele und Ergebnisse anhand realer Himmelsaufnahmen	123
7.1	Beispiel-Himmelsaufnahme <i>Ursa Major</i>	126
7.2	Beispiel-Himmelsaufnahme <i>Perseus</i>	130
7.3	Beispiel-Himmelsaufnahme <i>Cepheus</i>	134
7.4	Beispiel-Himmelsaufnahme <i>Cygnus</i>	138
7.5	Beispiel-Himmelsaufnahme <i>Aquila</i>	142
7.6	Beispiel-Himmelsaufnahme <i>Lyra</i>	146
7.7	Beispiel-Himmelsaufnahme <i>Andromeda</i>	150
7.8	Beispiel-Himmelsaufnahme <i>Draco</i>	154
7.9	Beispiel-Himmelsaufnahme <i>Sagitta</i>	158

8	Simulation	162
8.1	Simulationsergebnisse mit Sternen bis zu einer Helligkeit von $mag < 3,0$	167
8.2	Simulationsergebnisse mit Sternen bis zu einer Helligkeit von $mag < 4,0$	168
8.3	Simulationsergebnisse mit Sternen bis zu einer Helligkeit von $mag < 4,5$	169
8.4	Simulationsergebnisse mit Sternen bis zu einer Helligkeit von $mag < 5,0$	170
8.5	Simulationsergebnisse mit Sternen bis zu einer Helligkeit von $mag < 5,4$	171
8.6	Simulationsergebnisse mit Sternen bis zu einer Helligkeit von $mag < 5,7$	172
8.7	Simulationsergebnisse mit Sternen bis zu einer Helligkeit von $mag < 6,0$	173
8.8	Übersicht der Simulationsergebnisse ($mag < 3,0$ bis $mag < 6,0$)	174
8.9	Simulationsergebnisse zum Laufzeitverhalten	175
9	Verfahrenskritik und Strategien zur Fehlerminimierung	176
10	Zusammenfassung und Ausblick	182
	Literatur	185
Anhang A		
A	Astronomische Aspekte	191
A.1	Koordinatensysteme	191
A.1.1	Äquatoriales Koordinatensystem der Erde und des Himmels	194
A.2	Zur Berechnung von Winkelabständen	196
A.3	Helligkeiten von Himmelsobjekten	199
A.3.1	Farbspektren von Himmelsobjekten	201
A.3.4	Sternkataloge	202
A.4.1	SAO-Sternkatalog	204
A.5	Sternbilder, Sternnamen und Sternmuster	206
Anhang B		
B	Aspekte zur Auslegung eines Bildaufnehmersystems (CCD-Sternenkamera)	207
	Angaben zum Verfasser	217

Notationen

Allgemeine Abkürzungen und Formelzeichen

α	Rektaszension, 1. Lageparameter, Winkel
β	Winkel
γ	Winkel
δ	Deklination, 2. Lageparameter
η	Wirkungsgrad, Erfolgsquote
ϑ	Deklinationsgrenze
λ	geographische Länge, Wellenlänge
φ	geographische Breite
ω	Winkelgeschwindigkeit, dritter Winkel, 3. Lageparameter
Υ	Frühlingspunkt
arcmin	Bogenminute (1/60 deg)
arcsec	Bogensekunde (1/3600 deg)
adr	attitude determination rate (Lagebestimmungsrate)
att	attitude (Lage)
b	Bildweite
cl	clock (Takt)
cs	catalog star (Katalogstern)
d	distance (Entfernung), Determinante
deg	degree (Grad)
f	Brennweite
fov	field-of-view (Gesichtsfeld)
g	Gegenstandsweite, diskreter Grauwert
gc	gray value coding (Grauwertkodierung)
h	Stunde
hlp	high-level-pixel
hs	1/100 Sekunde
is	image star (Bildstern)
km	Kilometer
m	Minute
mag	Magnitude
mem	Memory (Speicherkapazität)
ms	Millisekunden
n	Sternenanzahl
np	number of pixel (Pixelanzahl)
nm	Nanometer
p	Parallaxenwinkel, Winkel, Wahrscheinlichkeit
parsec	Parallaxensekunde
rad	Winkel im Bogenmaß (deg/180* π)
s	Sekunden
v	velocity (Geschwindigkeit)
x	kartesische Koordinate in Richtung einer x-Achse, Bildkoordinate in x-Richtung
y	kartesische Koordinate in Richtung einer y-Achse, Bildkoordinate in y-Richtung
z	kartesische Koordinate in Richtung einer z-Achse
μm	Mikrometer

A	Fläche
ACS	Attitude Control System
AIAA	American Institute of Aeronautics and Astronautics
ASM	Autonomous Star Mapper
AST	Autonomous Star Tracker
B	Bildgröße
BV	Bildverarbeitung
CCD	Charge Coupled Device
CPU	Central Processing Unit
D	Anzahl von Doppelsternen
DOS	Disk Operating System
DSP	Digitaler Signalprozessor
E	Entropie
F	Strahlungsstrom
FI	Farbindex
FPU	Floating Point Unit
G	Gegenstandsgröße
GB	Gigabyte
GPS	Global Positioning System
GSC	Hubble-Guide-Star-Catalog
H	Histogramm
HEAO	High-Energy-Astronomy-Observatory
Hz	Hertz
IAU	International Astronomical Union
IC	Index-Catalog
IRAS	Infrared-Astronomical-Satellite
ISS	International-Space-Station
IUE	International-Ultraviolet-Explorer
KAO	Kuiper-Airborne-Observatory
KB	Kilobyte
LEO	Low Earth Orbit
LJ	Lichtjahr
LPT	Line Printer
M	Gesamtanzahl der Bildpunkte im Bild
MEV	Megaelektronenvolt
MB	Megabyte
MHz	Megahertz
N	Norden
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NGC	New-General-Catalog
OBC	On-Board-Computer
PC	Personal-Computer
PCI	Peripheral Component Interconnect
PPM	Positions and Proper Motion
RAM	Random Access Memory

S	Süden
SAO	Smithsonian Astrophysical Observatory
SAS	Small-Astronomy-Satellite
SCSI	Small-Computer-System-Interface
SPIE	The International Society für Optical Engineering
SSC	Sub-Star-Catalog (Sub-Sternkatalog)
STS	Space-Transportation-System
T	Time (Zeit)
VGA	Video-Graphics-Array
ZARM	Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation

Im Text benutzte und verfahrensinterne Bezeichnungen von Konstanten und Variablen

<i>a</i>	Koeffizient, Skalierungsfaktor
<i>angle_distance_is_x↔is_y</i>	Winkelabstand der Bildsterne <i>is_x</i> und <i>is_y</i>
<i>angle_per_pixel</i>	<i>Pixel-zu-Winkel</i> Umrechnungsfaktor
<i>angle_tolerance</i>	zugelassene Winkeltoleranz der Match-Intervalle
<i>b</i>	Koeffizient, Skalierungsfaktor
<i>clear_3_axis_attitude_counter</i>	Zähler für eindeutig bestimmte Lageparameter
<i>cos_cs_x↔cs_y</i>	Kosinuswinkel der Katalogsterne <i>cs_x</i> und <i>cs_y</i>
<i>cos_is_x↔is_y_max</i>	obere Grenze des Match-Bereiches von <i>is_x</i> und <i>is_y</i>
<i>cos_is_x↔is_y_min</i>	untere Grenze des Match-Bereiches von <i>is_x</i> und <i>is_y</i>
<i>cp_image_triplet</i>	Kreuzprodukt zweier Bildsternvektoren
<i>cp_matched_pattern_triplet</i>	Kreuzprodukt zweier Katalogsternvektoren
<i>critical_matched_pattern</i>	zur Lageberechnung ungeeignetes <i>n-Sterne-Muster</i>
<i>critical_matched_pattern_counter</i>	Zähler von <i>critical_matched_pattern</i>
<i>cs_x</i>	Katalogstern mit Index <i>x</i>
<i>d₀, d₁, d₂</i>	Determinanten
<i>delta_max</i>	maximal sinnvolle Deklinationsdifferenz
<i>delta_x</i>	Abstand zweier <i>high-level-pixel</i> in x-Richtung
<i>delta_y</i>	Abstand zweier <i>high-level-pixel</i> in y-Richtung
<i>diff_alpha</i>	Rektaszensionsdifferenz
<i>diff_delta</i>	Deklinationsdifferenz
<i>diff_delta(cs_x↔cs_y)</i>	Deklinationsdifferenz zwischen <i>cs_x</i> und <i>cs_y</i>
<i>detect_hlp[1..number_hlp]</i>	Markierungsfeld zur Bildsternzugehörigkeit
<i>gray_value_hlp[1..number_is]</i>	Datenfeld der Grauwerte von <i>high-level-pixel</i>
<i>gray_value_is[1..number_is]</i>	Datenfeld der Bildstern-Grauwerte
<i>image[1..image_width;1..image_length]</i>	Datenfeld der Roh-Bilddaten
<i>image_data_ok</i>	Variable zur Kennzeichnung brauchbarer Bilddaten
<i>image_length</i>	Bildlänge (max. Pixelanzahl in y-Richtung)
<i>image_triplet</i>	Bildstern-Triplet zur 3-axialen Lageberechnung
<i>image_triplet_ok</i>	Kennzeichnung brauchbarer Bildstern-Dreiecke
<i>image_width</i>	Bildbreite (max. Pixelanzahl in x-Richtung)
<i>is_x</i>	Bildstern mit Index <i>x</i>
<i>lower_limit_ssc</i>	untere Deklinationsgrenze eines Sub-Sternkatalogs
<i>matching_counter</i>	Anzahl erkannter Sternmuster
<i>matching_time</i>	Laufzeit der Sternmustererkennung
<i>mean_matching_time</i>	durchschnittliche Laufzeit während der Simulation
<i>min_image_triplet_vector_length</i>	minimaler Bildsternabstand zur Lageberechnung
<i>min_image_triplet_angle_deg</i>	minimaler Winkel zwischen Bildsternvektoren
<i>min_matched_triplet_vector_length</i>	minimaler Katalogsternabstand zur Lageberechnung
<i>min_matched_triplet_angle_deg</i>	min. Winkel zwischen Katalogsternverbindungen
<i>number_cs</i>	Anzahl der Katalogsterne
<i>more_hlp_found</i>	Boolesche Markierungsvariable
<i>number_hlp</i>	Anzahl der <i>high-level-pixel</i>
<i>number_hlp_max</i>	maximale Anzahl zugelassener <i>high-level-pixel</i>
<i>number_is</i>	Anzahl der Bildsterne
<i>number_is_pixel</i>	Anzahl der Pixel eines Bildsterns
<i>number_ssc</i>	Anzahl der Sub-Sternkataloge
<i>pixel_distance_is_x↔is_y</i>	Pixelabstand der Bildsterne <i>is_x</i> und <i>is_y</i>

<i>random_argument</i>	per Zufallsgenerator ermitteltes Argument
<i>random_delta</i>	per Zufallsgenerator ermittelte Deklination
<i>random_sign</i>	per Zufallsgenerator ermitteltes Vorzeichen
<i>sign_cp_image_triplet</i>	Vorzeichen von <i>cp_image_triplet</i>
<i>sign_cp_matched_pattern_triplet</i>	Vorzeichen von <i>cp_matched_pattern_triplet</i>
<i>sim_loop_counter</i>	Schleifenzähler für die Simulation
<i>sum_gray_value_is</i>	summierte Pixelgrauwerte eines Bildsterns
<i>sum_x_is</i>	summierte x-Koordinaten eines Bildsterns
<i>sum_y_is</i>	summierte y-Koordinaten eines Bildsterns
<i>threshold</i>	Helligkeitsschwellwert
<i>upper_limit_ssc</i>	obere Deklinationsgrenze eines Sub-Sternkatalogs
<i>visible_hlp[1..number_hlp]</i>	Markierungsfeld zur Bildsternsegmentierung
<i>x_hlp[1..number_hlp]</i>	Datenfeld der <i>high-level-pixel</i> x-Koordinaten
<i>x_is[1..number_is]</i>	Datenfeld der Bildstern x-Koordinaten
<i>y_hlp[1..number_hlp]</i>	Datenfeld der <i>high-level-pixel</i> y-Koordinaten
<i>y_is[1..number_is]</i>	Datenfeld der Bildstern y-Koordinaten

Im Text benutzte und verfahrensinterne Bezeichnungen von Softwaremodulen

<i>calculate-3-axis-attitude</i>	Berechnung der 3-axialen Lageparameter
<i>check-image-data</i>	Überprüfung der Qualität der Roh-Bilddaten
<i>get-high-level-pixel</i>	Extraktion der <i>high-level-pixel</i> aus den Bilddaten
<i>image-data-pre-processing</i>	Vorverarbeitung der Roh-Bilddaten
<i>image-stars-segmentation</i>	Segmentierung der Bildsterne
<i>image-stars-list-sorting</i>	Grauwertsortierung der Bildsterne
<i>init-image-data-variables</i>	Initialisierung der Bilddatenvariablen
<i>make-image-data-histogram</i>	Berechnung der Histogramme der Bilddaten
<i>match-2-stars-pattern</i>	Erkennung eines 2-Sterne-Musters
<i>match-3-stars-pattern</i>	Erkennung eines 3-Sterne-Musters
<i>match-4-stars-pattern</i>	Erkennung eines 4-Sterne-Musters
<i>match-5-stars-pattern</i>	Erkennung eines 5-Sterne-Musters
<i>match-6-stars-pattern</i>	Erkennung eines 6-Sterne-Musters
<i>mirror-image-check</i>	Spiegelbildüberprüfung von Sternmustern
<i>prepare-match-2-stars-pattern</i>	Datenaufbereitung für das Modul <i>match-2-stars-pattern</i>
<i>prepare-match-3-stars-pattern</i>	Datenaufbereitung für das Modul <i>match-3-stars-pattern</i>
<i>prepare-match-4-stars-pattern</i>	Datenaufbereitung für das Modul <i>match-4-stars-pattern</i>
<i>prepare-match-5-stars-pattern</i>	Datenaufbereitung für das Modul <i>match-5-stars-pattern</i>
<i>prepare-match-6-stars-pattern</i>	Datenaufbereitung für das Modul <i>match-6-stars-pattern</i>
<i>release-image-data-memory</i>	Freigabe des Bilddatenspeichers

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Bestimmung der auch *Lage* genannten Ausrichtung von beweglichen Körpergeometrien gegenüber äußeren und festen Bezugssystemen im dreidimensionalen Raum ist eine Aufgabe, die insbesondere für die Raumfahrt von außerordentlicher Bedeutung ist. So gilt es, bei vielen Satellitenmissionen die *Ist-Ausrichtung* der internen Geometrie eines Raumflugkörpers 3-axial und damit vollständig zu bestimmen und im Falle der Notwendigkeit einer Lageregelung durch geeignete Stellmechanismen (*Torquer*) an eine vorgegebene *Soll-Ausrichtung* anzugleichen (Bild 1.1). Gerichtete Sende- oder Empfangseinrichtungen oder auch auf definierte Beobachtungsziele ausrichtende Meßinstrumente und Teleskope innerhalb von Trägersatelliten bis hin zu bemannten Raumstationen bedürfen einer besonders präzisen Bestimmung der Lage, um zum einen überhaupt einen Kommunikationskontakt zu gewährleisten und um zum anderen sinnvolle wissenschaftliche Ergebnisse oder eine maximale Energieversorgung durch bestmögliche Ausrichtung von Solarkollektoren zur Sonne zu ermöglichen.

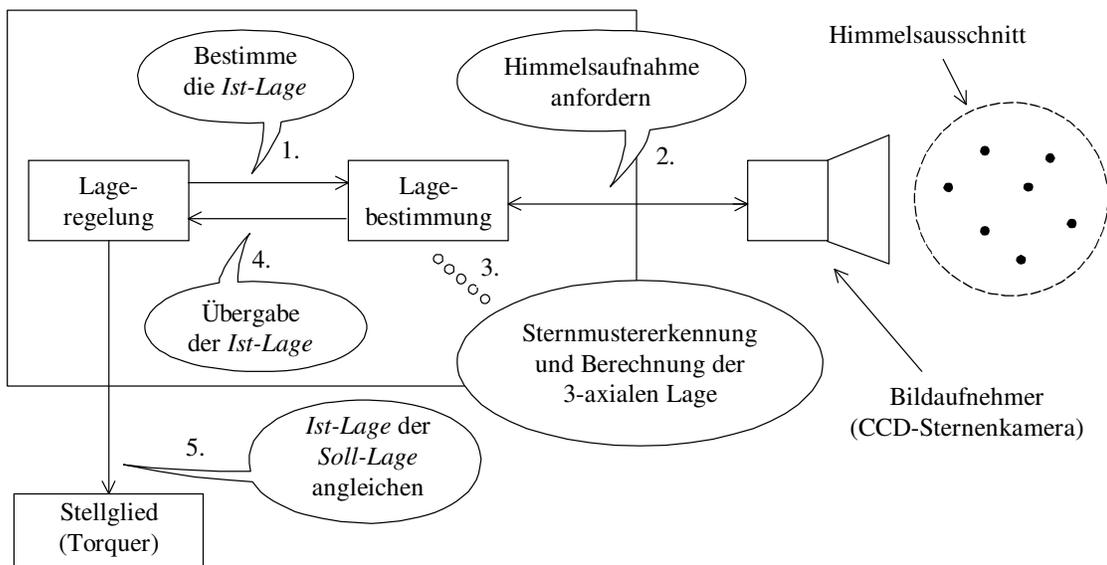


Bild 1.1: Konzept eines Zusammenspiels zwischen den Modulen *Lageregelung* und *3-axiale Lagebestimmung mittels Sternmustererkennung*

Verschiedenste Methoden und technische Realisierungen zur Lagebestimmung stehen heutzutage zur Verfügung. Die Zuhilfenahme von Sternen und deren computergestützte Erkennung auf Himmelsaufnahmen mit anschließender Berechnung der 3-axialen Lageparameter stellt jedoch das präziseste Instrument aller bekannten Verfahren zur Bestimmung der absoluten Lage dar und ist somit bei dem heutigen Stand der Technik für Raumfahrtmissionen mit hohen Genauigkeitsanforderungen an eine definierte Lage bis in den Bereich von weniger als einer Bogensekunde unverzichtbar. Andererseits stellt ein schnell arbeitendes System zur Sternmustererkennung sehr hohe Anforderungen an die Leistung der verfahrensausführenden Rechenmaschine.

Die Grundidee der Bestimmung der absoluten Lage mittels der Erkennung von Sternmustern basiert darauf, daß die optische Achse des Bildaufnehmersystems einer CCD-Sternenkamera möglichst parallel zu der zu bestimmenden Lageachse innerhalb des Raumflugkörpers ausgerichtet und zunächst eine Himmelsaufnahme durchgeführt wird, die verschiedene musterbildende Sterne auf dem Bildsensor der Kamera zweidimensional abbildet. Dieses so gewonnene Bild ist die Eingangsgröße eines *Bildverarbeitungssystems*, das mittels eines schnell arbeitenden Mustererkennungsverfahrens die abgebildeten Sterne identifizieren und abschließend die Himmelskoordinaten der Bildmitte als Maß für die 2-axiale Ausrichtung des Lagevektors berechnet. Ferner gilt es, die Eigendrehung des Lagevektors als Maß für die *Rotation* bzw. *In-sich-Drehung* des Flugkörpers zu berechnen (dritter Lageparameter). Damit ist die Lage durch die Angabe von drei Parametern gegenüber der zweidimensionalen und in sich geschlossenen Fläche der *Himmelskugel* vollständig beschrieben.

Ein wichtiger Aspekt ist die geringe Rechenlaufzeit des mittels Softwarewerkzeugen realisierten Bildverarbeitungssystems zur Sternmustererkennung, um eine möglichst hohe Rate zur Bestimmung der 3-axialen Lageparameter zu erzielen. Innerhalb dieser Arbeit wird eine Lagebestimmungsrate von mindestens einem Hertz angestrebt, um der Anforderung an ein *schnelles Verfahren* bei Nutzung der zur Verfügung stehenden Rechenmaschine (Personal-Computer, siehe Kapitel 3) gerecht zu werden. Demgegenüber steht jedoch der gewünschte Aspekt der *Speicherminimalität*, um ein nur wenig Leistung benötigendes Lagebestimmungssystem insbesondere für den Einsatz während Kleinsatellitenmissionen bereitstellen zu können.

So wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation als Zielsetzung *ein Verfahren der bildverarbeitenden Erkennung von unbekanntem Sternmustern zur autonomen und 3-axialen Lagebestimmung von Raumflugkörpern* entwickelt, als Softwaresystem implementiert und unter den Gesichtspunkten von *Verarbeitungsgeschwindigkeit*, *Speicherminimalität* und *Erfolgsquote* optimiert. Der Begriff *Erfolgsquote* steht für das Verhältnis zwischen der Anzahl eindeutig erkannter Sternmuster nebst Berechnung der 3-axialen Lageparameter und der Anzahl der zu untersuchenden Bildvorlagen. Durchgeführte Simulationen (Kapitel 8) zeigen, daß eine Erfolgsquote von $\eta=99,7\%$ erreichbar ist.

Das entwickelte Verfahren ist dadurch gekennzeichnet, daß zur Erkennung des vorgegebenen Sternmusters ausschließlich geometrische Informationen über den Abstand der Sterne benötigt werden. Helligkeitsinformationen werden nur bei der automatischen Auswahl der musterbildenden Bildsterne berücksichtigt, jedoch nicht während des Erkennungsvorgangs. Das Verfahren ist befähigt, *autonom* zu arbeiten, das heißt ohne Zuhilfenahme von *a-priori* Wissen durch andere Lagebestimmungssensoren oder zeitlich vorangegangene Messwerte als *Gedächtnisstütze*. Es lassen sich daher *lost-in-space* Szenarien bearbeiten und Situationen von ungewollten Lageinstabilitäten eines Satelliten erfassen und mit geeigneten Stellgliedern korrigieren. Sollte trotzdem ein *a-priori* Wissen - z.B. durch ein Zusammenspiel mit anderen Lagebestimmungssensoren - vorliegen, so ist dies natürlich nur von Vorteil und ermöglicht eine größere Sicherheit der Datenqualität und eine weitere Laufzeitverkürzung der rechenintensiven Algorithmen zur Sternmustererkennung.

Die technische Umsetzung des Verfahrens fällt in den Bereich der in der internationalen Raumfahrt üblichen Bezeichnung der *autonomous star tracker* (AST), mitunter auch *autonomous star mapper* (ASM) genannt.

Eine der Eingangsgröße des Systems zur Erkennung von unbekanntem Sternmuster ist eine Himmelsaufnahme mit den musterbildenden Sternen (Bild 1.2). Nach einer Vorverarbeitung der Bilddaten werden die segmentierten Objekte (Bildsterne) über den Kosinus der Winkelabstände untereinander verbunden. Nachfolgend versucht ein *Korrelationsalgorithmus* das vorgegebene Sternmuster innerhalb eines datenbankähnlich organisierten Sternkatalogs wiederzufinden. Der Sternkatalog ist eine weitere Eingangsgröße des Systems und beinhaltet systemintern ausschließlich Angaben der einheitsvektorierten, kartesischen Himmelskoordinaten von durch das Bildaufnehmersystem detektierbaren Sternen, also keine Informationen über Helligkeiten oder explizite Sternmuster. Durch Bildung von Skalarprodukten wird bei jedem Systemdurchlauf der Kosinus des Winkels zwischen Katalogsternen gebildet, der mit den entsprechenden Werten von Sternen der Bildvorlage korrespondieren muß.

Wie sich im Verlauf dieser Arbeit zeigen wird, ist es wichtig, daß *hinreichend* viele Sterne auf der Himmelsaufnahme vorliegen müssen und dementsprechend zur Musterbildung beitragen, um das Problem einer mehrdeutigen Erkennung des Sternmusters zu minimieren. Im Falle eines den Himmel flächenmäßig vollständig abdeckenden Sternkatalogs, was dem *lost-in-space* Szenario ohne *a-priori* Wissen entspricht, und der durch das vorgegebene Bildaufnehmersystem (Anhang B) bedingten Bildqualität, liefert eine Anzahl von sechs vorliegenden und zur Musterbildung beitragenden Bildsternen gute Ergebnisse. Dies stellt jedoch auch wichtige Anforderungen an das Bildaufnehmersystem einerseits hinsichtlich der Empfindlichkeit des detektierenden Bildsensors und andererseits hinsichtlich der Größe des abgebildeten Himmelsausschnitts. Auch der letztgenannte Aspekt ist ein Gegenstand dieser Arbeit und ist wichtig für den Entwurf einer speziellen CCD-Sternenkamera, da es sich anbietet Bildverarbeitungssystem und Kamera *Hand in Hand* arbeiten zu lassen.

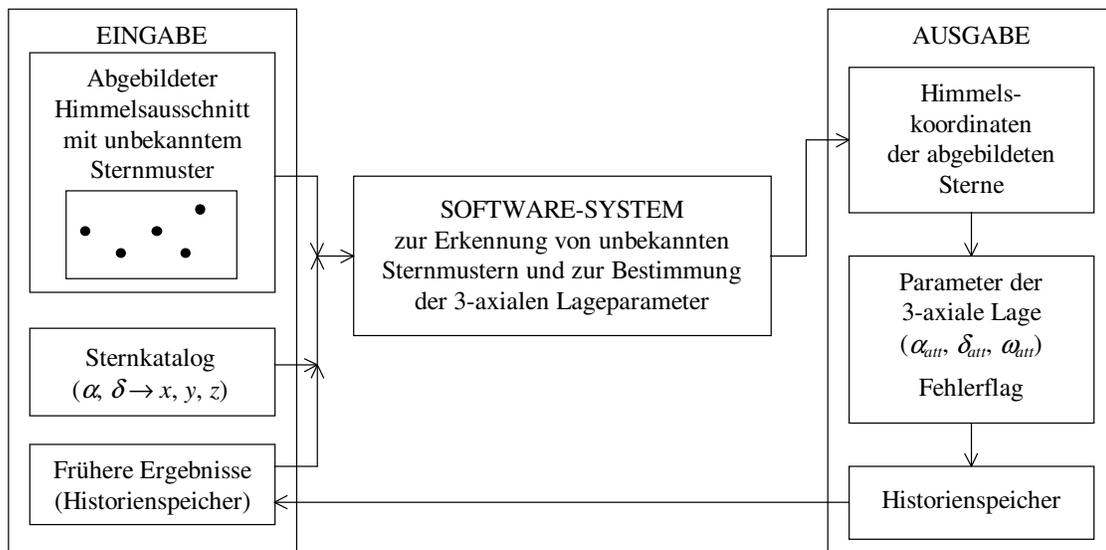


Bild 1.2: System zur Sternmustererkennung

Durch die Einbettung des realisierten *Verfahrens zur Sternmustererkennung nebst Bestimmung der 3-axialen Lageparameter* in eine auf einen *Standard-Personal-Computer* basierende Benutzerumgebung und der Zuhilfenahme eines bei allen internen Verfahrensvarianten gemeinsam benutzten Prozessor- und Datentyps wurde Sorge getragen, daß Vergleiche zu Rechenlaufzeiten der Algorithmen objektiv möglich sind. Durch modulare Programmieretechnik und Trennung von Kernroutinen und Visualisierungsteil ist eine Portierung auf andere Computerplattformen oder *on-board* Rechner eines Satelliten leicht und schnell möglich. Die implementierte Software (*MATCH-IT*) steht in ihrer jetzigen Form für den Einsatz innerhalb einer Bodenstation sofort zur Verfügung und ermöglicht die Behandlung via Telemetrie von einem Satelliten heruntergefunkteter Roh-Bilddaten oder beliebig anderer Bildquellen. Nach der Datenverarbeitung können die Ergebnisse der 3-axialen Lagebestimmung zum Satelliten hochgefunkt und in den Lageregelungsprozeß eingebunden werden (Bild 1.3). Ferner ist der Einsatz des *MATCH-IT*-Systems zur späteren *post-mission-analysis* denkbar.

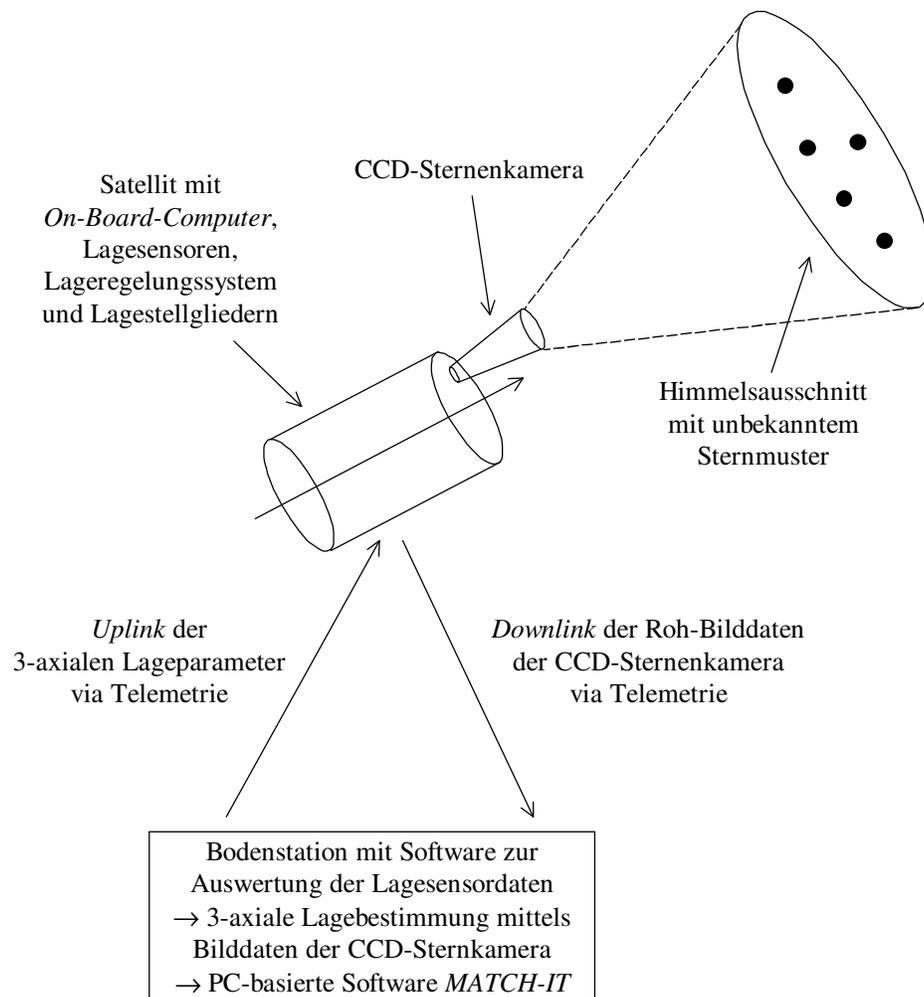


Bild 1.3: Konzept einer Lageregelungs- und Lagebestimmungskette zwischen einem Satelliten und einer Bodenstation

Kapitel 2 definiert den Begriff der Lage und gibt einen kurzen *Überblick zur gegenwärtigen Technik von verschiedenen Sensoren und Methoden zur Lagebestimmung* wieder. Im speziellen wird der Stand zu Forschung und Entwicklung von Sensoren und Techniken zur Lagebestimmung mittels Sternmustererkennung dargelegt.

Die *hardware- und softwaremäßigen Rahmenbedingungen* unter denen alle im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Software realisierten Verfahrensvarianten und Hilfsprogramme implementiert sind, beschreibt Kapitel 3. Das Ergebnis der Verfahrensumsetzung sind die Programmpakete *MATCH-IT* und *MATCH-TOOLS*.

Ein Vorschlag für ein *vollständiges System zur 3-axialen Lagebestimmung mittels Sternmustererkennung* wird innerhalb des Kapitels 4 vorgestellt. Das Verfahren zur Sternmustererkennung ist Kern dieses Systems, welches bei einer möglichen Anwendung während einer Satellitenmission als autonomes System - bestehend aus Bildaufnehmer (CCD-Sternenkamera), Rechenwerk, sowie Programm- und Datenspeicher - bzw. *black-box* Sub-System (*autonomous star tracker*) in ein übergeordnetes Lageregelungssystem (*attitude control system, ACS*) eingebunden werden kann.

Die notwendigen Methoden der *Bilddatenvorverarbeitung* werden in Kapitel 5 dargelegt. Hier ist in erster Linie die Qualitätskontrolle der Roh-Bilddaten und ein Verfahren zur schnellen Segmentierung der abgebildeten und später zur Musterbildung beitragenden Bildsterne zu nennen.

Das Kernstück dieser Dissertation ist das entwickelte und implementierte *Verfahren zur Erkennung unbekannter Sternmuster nebst Bestimmung der 3-axialen Lageparameter* und wird in Kapitel 6 beschrieben. Ausführlich werden alle Aspekte zur schnellen Auffindung eines aus n Sternen bestehenden *n-Sterne-Musters* unter der Zuhilfenahme der Informationen eines Sternkatalogs dargelegt. Resultierend aus den Beobachtungen einer Vielzahl von möglichen Verfahrensschritten, die als eine Art *Rechnerexperiment* auf eine reale Bildvorlage angewendet werden, wird innerhalb des Kapitels 6.9 eine *allgemeine und strenge Formulierung des Verfahrens* abgeleitet. Abschließend werden Aspekte zur optionalen Unterteilung des Sternkatalogs in *Sub-Sternkataloge* angeführt, was eine weitere Verkürzung der Laufzeiten auf Rechenmaschinen zur Folge haben kann.

Ergebnisse und Beispiele zum im vorherigen Kapitel geschilderten Verfahren sind anhand von *realen Himmelsaufnahmen* in Kapitel 7 zu finden. Alle neun Beispiel-Himmelsaufnahmen werden eindeutig erkannt.

Kapitel 8 beinhaltet die Ergebnisse von verschiedenen *Simulationen* und einfachen *statistischen Untersuchungen* unter der Zuhilfenahme von künstlich generierten Bildvorlagen. Durch den Einsatz eines eigens implementierten *Kamerasimulators*, der nahezu unbegrenzt viele Bildvorlagen liefern kann, können Aussagen über Zuverlässigkeit und Wirkungsgrad des Verfahrens zur Sternmustererkennung bzw. Lageberechnung bei Variation der wichtigsten äusseren Verfahrensparameter getroffen werden. Als Spitzenwert des Wirkungsgrades wurde eine Erfolgsquote eindeutig bestimmter 3-axialer Lageparameter von $\eta=99,7\%$ festgestellt.

Eine Verfahrenskritik sowie Aspekte zur Lösung praktischer Problemfälle sind im Kapitel 9 nachzulesen.

Eine Zusammenfassung mit dem Ausblick auf mögliche weiterführende Arbeiten und die Literaturübersicht schließen die vorliegende Dissertation ab.

Anhang A beschäftigt sich mit *astronomischen Aspekten*, die für diese Arbeit von Wichtigkeit sind. So sind Koordinatensysteme das Werkzeug zur eindeutigen Festlegung von Positionen und Lageinformationen im Raum. Erläutert werden Betrachtungen und Folgerungen zum äquatorialen und vektorisierten Koordinatensystem auf der Himmels- bzw. Einheitskugel, stellt doch letzteres Koordinatensystem das für alle nachfolgenden Kapitel entscheidende Koordinatensystem dar. Die ebenfalls beschriebenen Sternkataloge sind eine datenbankähnliche Zusammenfassung primär von Sternpositionen und Sternhelligkeiten an der Himmelskugel und sind neben der Bildinformation die wichtigste Eingangsgröße für das Bildverarbeitungssystem zur Erkennung von Sternmustern.

Die Aspekte zur *Auslegung eines Bildaufnehmersystems* werden in Anhang B behandelt, um eine CCD-Sternenkamera zu entwerfen, die hinreichend viele Sterne zur möglichst eindeutigen Identifizierung von Sternmustern abbildet. Die wichtigsten Parameter, die hierbei beachtet werden müssen, sind die Größe des abgebildeten Gesichtsfelds (*field-of-view*) und die Empfindlichkeit des Kamerasystems.

2 Begriff der Lage

Unter der *Lage* der Körpergeometrie eines Raumflugkörpers wird die Ausrichtung einer ausgewählten Körperachse (zu beschreiben mit zwei Parametern \rightarrow *2-axiale Lageinformation*) gegenüber einem äußeren Referenzkoordinatensystem sowie die *In-sich-Drehung* (Rotation) dieser Körperachse (zu beschreiben mit einem Parameter \rightarrow *1-axiale Lageinformation*) verstanden (Bild 2.1, 2.2 und 2.3). Die Lage läßt sich somit durch die Angabe von drei Parametern (*3-axiale Lageinformation*) vollständig beschreiben. Andere Synonyme für den Begriff *Lage* sind *Ausrichtung* und *Orientierung*. Das interne Koordinatensystem von Raumflugkörpern basiert primär auf einem dreidimensionalen und kartesischen Koordinatensystem, so auch im Rahmen dieser Arbeit. Dabei steht die Körper z-Achse senkrecht zu einer durch die Körper x-Achse und Körper y-Achse aufgespannten Ebene, bei orthogonaler Ausrichtung aller Achsen (Bild 2.3). Ferner ist es üblich, die Körper z-Achse parallel zur größten Hauptträgheitsachse des Raumflugkörpers zu definieren, die sich bei den meisten Satellitenanwendungen fest innerhalb der internen Körpergeometrie befindet, z.B. aufgrund einer erzwungenen *Drallradstabilisierung* [Pisacane 1994].

Als äußeres Referenzkoordinatensystem kommen verschiedene Systeme in Frage, wie in Anhang A näher dargelegt wird. Recht anschaulich ist die Zuhilfenahme des *äquatorialen Koordinatensystems des Himmels* mit der Angabe von Rektaszension α_{att} und Deklination δ_{att} für die Ausrichtung der ausgewählten Körper z-Achse und des sogenannten *dritten Winkels* ω_{att} als Maß für die *In-sich-Drehung* der Körper z-Achse. Letzterer wird angegeben durch den Winkel ω_{att} zwischen der Körper x-Achse (oder auch der x-Achse des Bildes bei einer entsprechend montierten CCD-Sternenkamera wie in Bild 2.3 dargestellt) und dem *Himmelsäquator* (siehe auch Kapitel 6.7). Das äquatoriale (sphärische) Koordinatensystem ist jedoch nur orthogonal und nicht kartesisch organisiert [Bronstein 1982, Reinhardt 1978].

Andere Möglichkeiten zur Lagebeschreibung sind z.B. durch die Angabe von *Euler-Winkeln* oder *Quaternions* gegeben. Die Euler-Winkel beschreiben die drei üblicherweise in der Raumfahrt als *roll*, *pitch* und *yaw* bezeichneten Drehwinkel zwischen dem kartesischen Koordinatensystem der internen Körpergeometrie und dem kartesischen Koordinatensystem der äußeren Referenz. Für numerische Anwendungen empfiehlt sich die Nutzung der mittels vier Parametern zum Ausdruck gebrachten Quaternions, da diese frei von *Singularitäten* (Polstellenproblem) sind [Fortescue 1995, Wertz 1978].

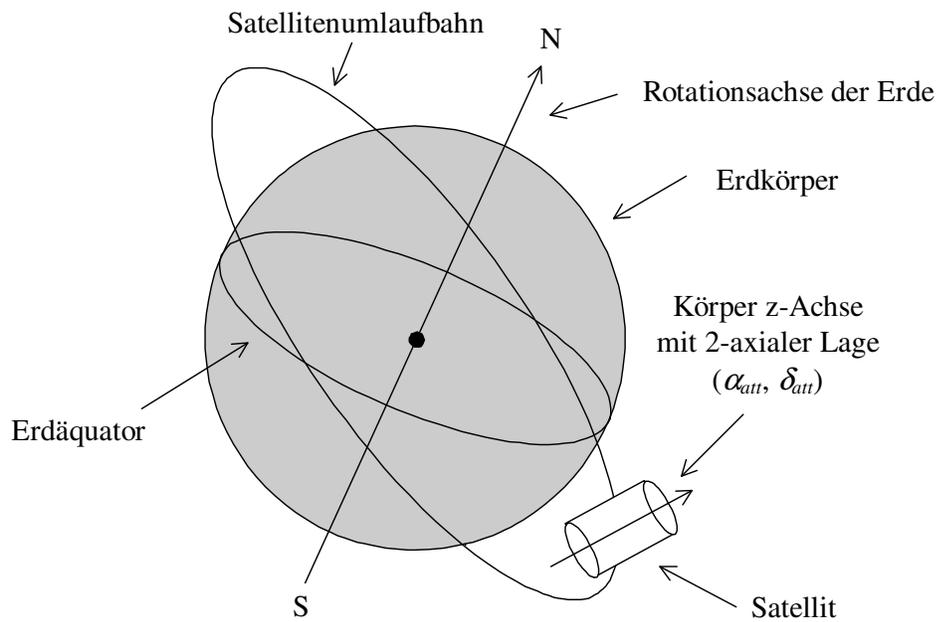


Bild 2.1: Szenario eines erdumlaufenden Raumflugkörpers mit 2-axialer Lage

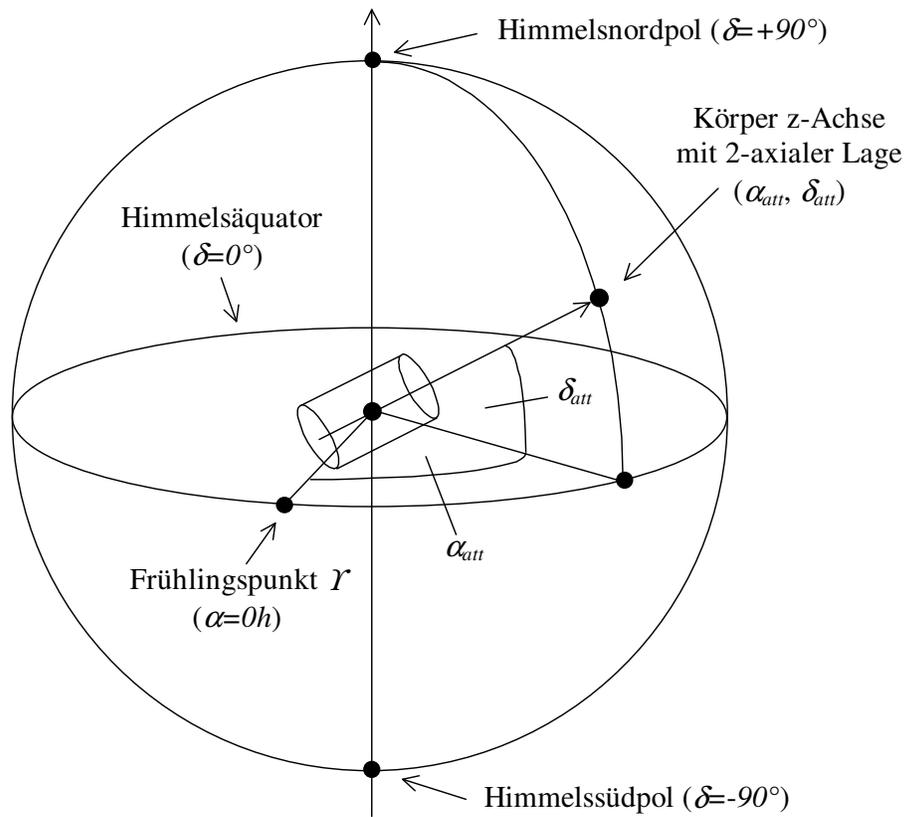


Bild 2.2: Zweidimensionale Ausrichtung der Körper z-Achse gegenüber dem äquatorialen Himmelskoordinatensystem, beschrieben durch die Lageparameter α_{att} und δ_{att}

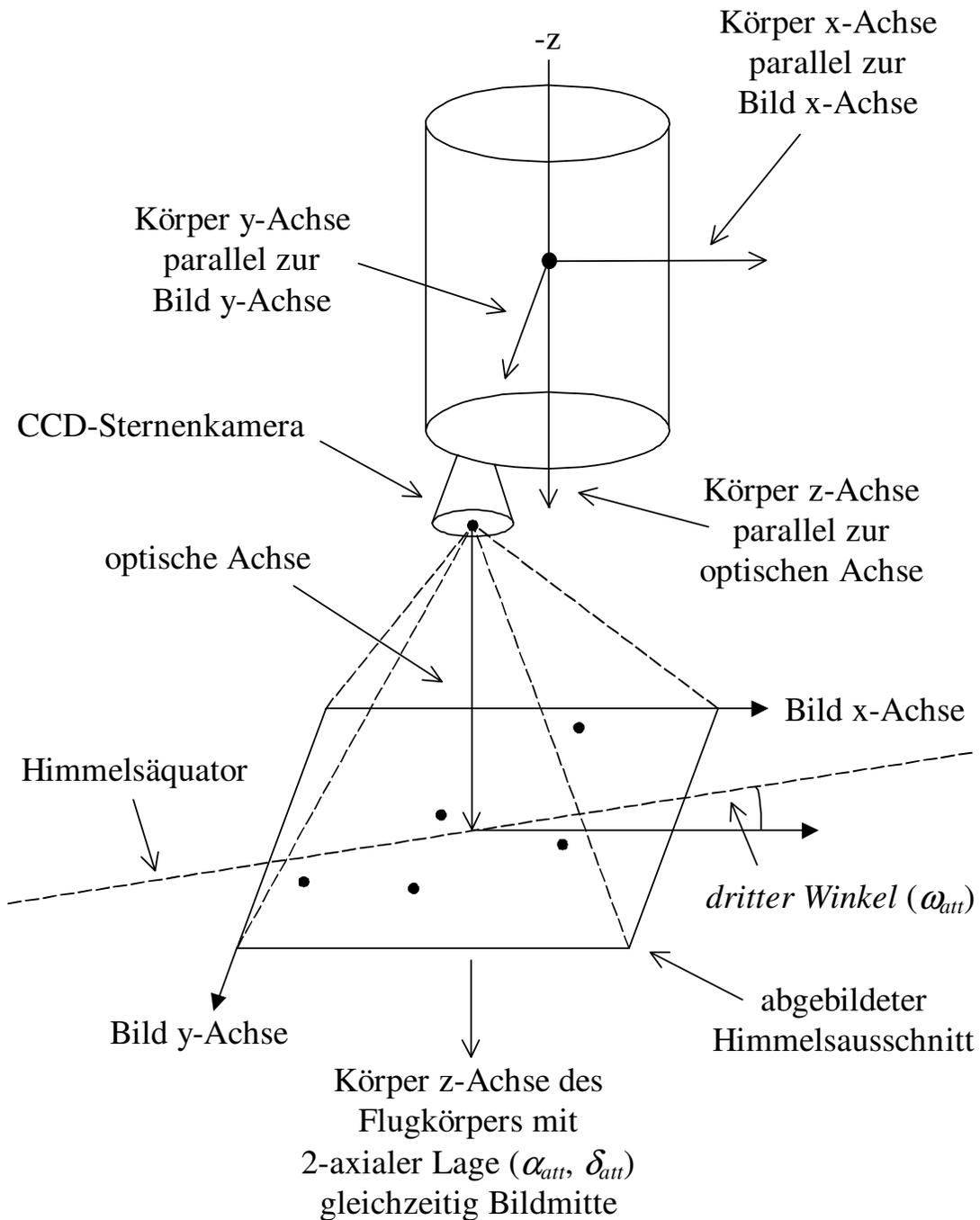


Bild 2.3: 3-axiale Lageinformation eines Flugkörpers durch Angabe der 2-axialen Ausrichtung der Körper z-Achse (α_{att} , δ_{att}) und des Drehwinkels (*dritter Winkel* ω_{att})

2.1 Übersicht zu Methoden und Sensoren der Lagebestimmung

Heutzutage steht eine Vielzahl von Methoden zur Lagebestimmung eines Raumflugkörpers im All zur Verfügung, die in Form verschiedenster *Sensoren* technisch realisiert sind. Den *optimalen Sensor* zur Lagebestimmung gibt es jedoch nicht - jedem individuellen Vorteil eines Sensortyps stehen auch entsprechende Nachteile gegenüber (z.B. hohe Genauigkeit \leftrightarrow hoher Rechenaufwand und hohe Kosten beim *Sternsensor*). Lagebestimmungssensoren müssen sich immer bestimmter *Referenzen* bedienen, die sich innerhalb oder außerhalb des Körpers befinden können. Die äußeren Referenzen zur Bestimmung der *absoluten Lage* können sein:

- Sonne
- Horizonte (z.B. Erdhorizont)
- Magnetfelder (z.B. Erdmagnetfeld)
- künstlich erzeugte Felder (z.B. Signalfeld von *GPS-Satelliten*)
- Sterne und Planeten

Als körper-interne Referenzen zur Bestimmung ausschließlich der *relativen Lage* (Lageänderung) kommen in Frage:

- Kreiselstabilität (Drehimpluserhaltung)
- Beschleunigungen

Es folgt eine Kurzübersicht zu unterschiedlichen Typen von Sensoren zur Lagebestimmung, die Einzug in der Raumfahrt erhalten haben [Fortescue 1995, Pisacane 1994, Wertz 1978]. Die Tabelle 2.1 schließt dieses Unterkapitel mit einer Aufstellung von potentiellen Sensorgenauigkeiten im praktischen Betrieb ab.

Sonnensensoren messen den Winkel einer ausgewählten Körperachse gegenüber der Sonnenrichtung mittels des Einfallswinkels des Sonnenlichtes (Prinzip der *Schattenwurfänge*) an einer schlitzzartigen Öffnung. Diese zunächst eindimensionale Information kann durch Kombination zweier Meßvorrichtungen auf eine 2-axiale Lageinformation erweitert werden. Vorteil: Leichte und kleine Bauweise; Sonnensensor benötigt wenig Leistung. Nachteil: Die Sonne ist bei niedrigen Umlaufbahnen um einen Zentralkörper oftmals unsichtbar.

Horizontsensoren (im speziellen Erdsensoren) erfassen flächenartige Objekte mittels einer *Abtastung* des Himmels und bestimmen die Lage 2-axial. So lassen sich z.B. die Oberflächen und Krümmungsradien von Erde und Mond mittels deren Infrarotstrahlung detektieren. Vorteil: Einfach zu handhaben bei niedrigen Umlaufbahnen um einen Zentralkörper. Nachteil: Die Nähe von großflächigen Objekten muß gegeben sein; der Horizontsensor muß vor der Sonne geschützt werden.

Magnetometer können sich 3-axial an einem äußeren Magnetfeld orientieren, das als Referenz bekannt sein muß. Dieser Umstand ist nur der Nähe von großen Planetenkörpern, deren Magnetfeld vermessen und modellierbar ist, gegeben und oftmals mit *Anomalien* versehen [Wertz 1978]. Vorteil: Der Magnetfeldsensor arbeitet im bekannten Magnetfeld robust und leistungsarm. Nachteil: Die Einsatzmöglichkeit ist auf Räume bekannter Magnetfelder beschränkt (bei der Erde: niedrige Umlaufbahnen - *low-earth-orbits* (LEO) - bis zu einer Höhe von $d=500\text{km}$).

Ein das *Global-Positioning-System* (GPS) ausnutzender Lagebestimmungssensor, der mit mehreren im Raumflugkörper platzierten, aber örtlich möglichst weit auseinanderliegenden GPS-Empfangsteilen ausgestattet ist, kann 3-axial im Reichweitfeld des von *GPS-Satelliten* erzeugten Referenzfeldes arbeiten. Ausgewertet werden die Laufzeitunterschiede und Phasendifferenzen von zumindest drei GPS-Satelliten. Vorteil: Das Referenzfeld ist vollständig bekannt und frei von Anomalien. Nachteil: Räumliche Begrenzung auf erdnahe Orbits bis zu einer Höhe von $d=10^4 km$ und Probleme bei zu großer Annäherung an einen einzelnen GPS-Feld erzeugenden Satelliten [Parkinson 1996].

Sternsensoren benötigen die überall sichtbaren Sterne als Referenz zur Lagebestimmung. Es gibt verschiedene Varianten dieses Sensortyps bei leider nicht einheitlicher Typenbezeichnung. So steht aber im allgemeinen der Begriff *Sternsensor* (*star sensor*) für jede Art von realisiertem Sensor, der sich als Referenz zur Lagebestimmung des Sternhimmels bedient. Dies kann technisch eindimensional durch Vorrichtungen mit schlitzartigen Öffnungen (mitunter als *star scanner* bezeichnet) oder zweidimensional durch flächenartige Bildaufnehmersysteme (*star tracker*) erfolgen (z.B. durch CCD-Bildsensoren). Die letztgenannten zweidimensional arbeitenden Detektoren unterteilen sich - historisch bedingt - in die *gimbaled star tracker*, die ein zweidimensionales Bild durch Bewegung einer zunächst eindimensional arbeitenden Bildaufnehmereinheit erzeugen und in die *fixed head star tracker*, die von vornherein einen zweidimensionalen Bildaufnehmersensor beinhalten. *Fixed head star tracker* sind erst seit Anfang der siebziger Jahre verfügbar und waren zunächst mit *Vidicon-Röhren* oder Anordnungen von *Photomultiplerröhren* ausgestattet. Die heute mit einer Selbstverständlichkeit genutzte *CCD-Technik* steht erst seit Mitte der siebziger Jahre für *star tracker* Anwendungen zur Verfügung [Salmon 1976]. Die *fixed head star tracker* werden inzwischen auch als *star camera* bezeichnet und stellen den modernen und dato üblichen Typ einer *Sternenkamera* mit einem zweidimensional arbeitenden CCD-Bildaufnehmersensor dar. Alternativ zur Bezeichnung *star camera* ist mitunter das Synonym *star mapper* üblich. Das im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Verfahren ist primär ein Baustein für einen *fixed head star tracker* zur absoluten, autonomen und 3-axialen Lagebestimmung ohne *a-priori* Wissen. Der zumeist übliche Begriff für dieses System ist nach heutigem Stand *autonomous star tracker* (AST), mitunter auch *autonomous star mapper* (ASM) [Bezooijen 1993, Gottlieb in Wertz 1978].

Marktführer auf dem Gebiet kommerzieller *star tracker* sind dato die US-Firmen *Ball-Aerospace*, *Honeywell* und *Hughes-Danberry*, deren *high-end* Produkte jedoch im Minimum mehrere Hunderttausend und im Maximum bis zu mehreren Millionen US-Dollar kosten und eine Leistung von 30 Watt und mehr benötigen. Daher kommen diese *star tracker* nur für Anwendungen innerhalb größerer Satellitenstrukturen oder der internationalen Raumstation *ISS* in Frage [Bostock 1993, Garrish 1993] und scheiden schon aus Gründen hoher Kosten und hohen Leistungsbedarfs für den Einsatz während universitärer Kleinsatellitenmissionen aus. Kleinere Systeme werden z.B. von den Firmen *Cal-Corporation* (Kanada) und *OCA* (USA) angeboten.

Für die Sternsensoren gelten folgende Vorteile: Präziseste Bestimmung der absoluten Lage aller Sensoren; die Sterne sind während Raumfahrtmissionen stets sichtbar. Die Nachteile sind: Sternsensoren müssen vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt werden; äußerst rechen- und leistungsintensiv; hohe Kosten.

Gyroskope nutzen die raumfeste Lage von sich schnell drehenden und damit drallradstabilisierten Kreiseln (Prinzip der Drehimpluserhaltung) bei entsprechender Lagerung innerhalb eines Raumflugkörpers und können die Lageänderung zeitlich begrenzt, aber dafür sehr präzise im Bereich von einer Bogensekunde 3-axial erfassen.

Auch lässt sich durch mehrere innerhalb eines Raumflugkörpers angebrachte *Beschleunigungssensoren* die Lageänderung 3-axial erfassen.

Sensortyp	Potentielle Genauigkeit
Sternsensor	1 arcsec
Sonnensensor	1 arcmin
Horizontsensor	6 arcmin
Magnetometer	30 arcmin
GPS-Signal	60 arcmin
Gyroskop	1 arcsec

Tabelle 2.1: Übersicht zur potentiellen Genauigkeit verschiedener Sensortypen der Lagebestimmung im praktischen Betrieb [Quelle: Fortescue 1995]

2.2 Verfahren zur Erkennung von Sternmustern

Über verschiedene Sensortechniken und Möglichkeiten zur Identifizierung von Sternmustern als Werkzeug zur Lagebestimmung berichtet Gottlieb auf Basis des Wissenstands der siebziger Jahre bereits ausführlich [Gottlieb in Wertz 1978, Seiten 155-203 und 259-266] (siehe auch Kapitel 2.1 *Sternsensoren*). Die dort geschilderten Verfahren zur Sternmustererkennung basieren auf der Anwendung von umfangreichem *a-priori* Wissen im Zusammenspiel mit anderen Sensoren wie Gyroskope, beziehen eine bereits vorhandene Kenntnis über die grobe Orientierung am Himmel (*estimated celestial coordinates frame*) mit ein und verfolgen einzelne Sterne oder Sternmuster von Bild zu Bild. Über einen *autonomous star tracker* wird noch nicht berichtet. Zu beachten ist in diesem Kontext sicherlich, daß in den siebziger Jahren schon rein technologisch bedingt nur solche Rechenmaschinen zur Verfügung standen, die, falls sie nicht *schränkähnliche* Dimensionen annehmen sollten, erheblich leistungsschwächer waren, als die heutzutage für jedermann mit einer Selbstverständlichkeit zur Verfügung stehende Personal-Computer Technologie. Während der Satellitenmissionen *Small-Astronomy-Satellite-3* (SAS-3, Start: 7. Mai 1975) und *High-Energy-Astronomy-Observatory-1* (HEAO-1, Start: 8. Dezember 1977) wurden *on-board* jeweils ein *fixed head star tracker* der Firma Ball eingesetzt, der die Bewegung von Einzelsternen über eine Sequenz von Einzelbildern feststellen konnte, um die Lageänderung des Satelliten zu erfassen [Cleavinger 1976]. Der *on-board-computer* (OBC) dieser Satelliten verfügte über eine Speicherkapazität von nur $mem=32KB$ und brauchte z.B. für die Ausführung einer Multiplikation eine Rechenzeit von etwa $T=10\mu s$ [Lerner in Wertz 1978, Seiten 210-213].

Zu bekannten Verfahrenstechniken der auf *a-priori* Wissen basierenden Identifizierung von zu erkennenden Sternmustern berichtet Gottlieb [Wertz 1978] über folgende Methoden:

- *direct-match* Technik
- *angular-separation-match* Technik
- *phase-match* Technik

Die *direct-match* Technik basiert auf der Verfolgung einzelner abgebildeter Sterne von Bild zu Bild, wobei auch Informationen über die Bewegung des Raumflugkörpers berücksichtigt werden müssen. Unter der Voraussetzung der bekannten Dynamik des Raumflugkörpers wird die bei der nächsten Aufnahme im Gesichtsfeld der *star camera* zu erwartende neue *Szene* bzw. eine Auswahl von entsprechend zu erwartenden Katalogsternen vorherbestimmt, um eine direkte Korrelation der Sternpositionen im Bild der neuen realen Himmelsaufnahme und der theoretisch vorhergesagten Aufnahme der Katalogsterne im Rahmen eines erlaubten Fehlerfensters durchführen zu können.

Die *angular-separation-match* Technik basiert auf der Korrelation des paarweisen Winkelabstands von Sternen der zu erwartenden neuen Himmelsaufnahme mit Winkelabständen von Sternen eines durch ein vorhandenes *a-priori* Wissen vom Umfang her eingeschränkten Sternkatalogs. Somit ist diese Technik mit dem im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Verfahren eng verwandt, arbeitet jedoch nur auf der Basis einer Doppelsternererkennung. Die Erkennung eines aus mehreren Sternpaaren bestehenden *Polygons*, das dem in Kapitel 6 beschriebenen *n-Sterne-Mustes* ähnlich ist, wird angeregt, jedoch aufgrund des zu erwartenden hohen Rechen- und Speicheraufwands nicht weiter verfolgt.

Auch die *phase-match* Technik benötigt *a-priori* Wissen. Sie basiert auf einer stabilen Drehrate der Rotationsachse des Raumflugkörpers und ist eine eindimensionale Variante der *angular-separation-match* Technik. Hierbei werden die vorbestimmten *Azimitwinkel* der im neuen Bild zu erwartenden Sterne mit den *Azimitwinkeln* der aufgenommenen Bildsterne verglichen (*phase-angle*, *Azimitwinkel*: innerhalb des vorherbestimmten Bildausschnitts befindlicher Längengrad des inertialen Koordinatensystems des Raumflugkörpers).

Sollte doch keine *a-priori* Information zur Verfügung stehen, so wird auf die *discrete-attitude determination* Technik hingewiesen, die über *trial-and-error* Verfahren alle zur Verfügung stehenden Informationen der Sternenkamera nutzt (z.B. auch Helligkeitsinformationen) bis ein *best-guess* gefunden wurde. Es wird nicht weiter darauf eingegangen, was unter dem Begriff *best-guess* verstanden wird, jedoch auf den damit verbundenen enormen Rechenaufwand verwiesen. Die Situation der fehlenden *a-priori* Information entspricht jedoch genau dem äußeren Szenario dieser Dissertation.

Manuelle Identifizierungen von Sternmustern durch *human operators* werden selbst in heutiger Zeit noch durchgeführt, sofern die Bearbeitungszeit unkritisch ist [Bezooijen 1993]. Dies geschieht meistens bei solchen Anwendungen, bei denen eine spätere Auswertung der Lageinformation genügt (*post-mission-analysis*). Beispiele hierfür sind das an Bord einer *Lockheed C-141A* installierte und immer noch im Einsatz befindliche Infrarotteleskop des fliegenden *Kuiper-Airborne-Observatory* (KAO) oder der Satellit *International-Ultraviolet-Explorer* (IUE), der 1978 gestartet wurde und 19 Jahre funktionstüchtig blieb [Bogges 1978]. Es wird berichtet, daß die manuelle Identifikation eines Sternmusters durch den KAO-Operator im Durchschnitt etwa 30 Minuten dauert.

Beispiele für begrenzt autonom arbeitende *star tracker* sind die Satellitenmissionen *Voyager 1* (Start: 5. September 1977), *Voyager 2* (Start: 20. August 1977), *Infrared-Astronomical-Satellite* (IRAS, Start: Januar 1983) und *Galileo* (Start: 18. Oktober 1989 aus der Ladebuch des Space-Shuttle *Atlantis* im Rahmen der *STS-34* Mission) [Pouw 1984, Stephenson 1985]. Alle vier Satelliten orientieren sich zunächst mittels Sonnensensoren 1- oder 2-axial und führen die endgültige Bestimmung der 3-axialen Lageinformation mittels des *star tracker* und ausgewählter Referenzsterne durch, die nicht in der Bahnebene des Satelliten liegen. Hierfür bekannt ist der Stern *Canopus*, der während interplanetarer Missionen bevorzugt benutzt wird, da sich dieser Stern weit außerhalb der Ebene der *Ekliptik* befindet (*Canopus star-tracker*). Anhand der Referenzobjekte *rastet* der Satellit in eine definierte Lage ein, die durch Regelsysteme gehalten wird.

Erst in den achtziger Jahren kamen Rechenkapazitäten auf den Markt, die eine *fully autonomous star identification* im Rahmen akzeptabler Zeiten ermöglichten. Lai und Wang berichten über ein auf einem *UNIVAC-1108* Computer durchgeführten Algorithmus zur Sternmustererkennung, der auf der Basis eines nur 200 Sterne umfassenden Sternkatalogs etwa 30 Sekunden Bearbeitungszeit benötigt. Das Verfahren beruht auf der Erkennung von Dreiecken (*triplet-matching*) [Lai 1981]. Zum Vergleich: Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren benötigt weniger als $T=1/100$ Sekunde Bearbeitungszeit, bezogen auf 136 Katalogsterne und etwa $1/20$ Sekunde, bezogen auf 427 Katalogsterne.

Ein weiterer Vorschlag zur *fully autonomous star identification* kommt von Groth aus dem Jahr 1986 [Groth 1986] und ist eine Erweiterung des Verfahrens von Lai und Wang. Der Algorithmus ist im wesentlichen dadurch gekennzeichnet, daß alle aus Katalogsternen gebildeten Dreiecke (*triplets*), die sich prinzipiell im Gesichtsfeld des Bildaufnehmersystems befinden können, in Suchlisten abgelegt werden. Später wird ein *triplet-matching* dieser Dreiecke, bezogen auf die zu untersuchenden *triplet-Sternmuster* der realen Bildvorlage durchgeführt. Problematisch ist jedoch der sehr hohe Speicherumfang, der für dieses Verfahren benötigt wird.

1993 wurde ein Verfahren zur Sternmusteridentifikation von Baldini et. al. vorgestellt, daß hauptsächlich auf der Helligkeitsauswertung von Einzelsternen des zu erkennenden Sternmusters basiert [Baldini 1993].

Die Firma *JENA-Optronik* in Jena hat den *ASTRO-1M-star-tracker* entwickelt, über den 1992 berichtet wird [Elstner 1992]. Die Fähigkeit der *fully autonomous star identification* wurde während Feldversuchen an der *Karl-Schwarzschild-Sternwarte* in Tautenburg demonstriert, wobei jedoch eine extrem lange Bearbeitungszeit von fünf Minuten je Schnappschuß benötigt wurde [Bezooijen 1993]. Als eine Weiterentwicklung derselben Firma kann der Sternsensor *SETIS* angesehen werden, der bezüglich der Bilddatenakquisitionsrate im Bereich von 5Hz arbeitet. Es wird auch über ein integriertes Modul zur Sternmustererkennung berichtet, ohne dieses jedoch näher zu beschreiben [Schmidt 1997].

Bezooijen hat sich über Jahre mit Verfahren zur Identifizierung von Sternmustern beschäftigt und wird in vielen Veröffentlichungen zu diesem Thema zitiert [Bezooijen 1989]. Eine Vielzahl der heute technisch realisierten und kommerziell erhältlichen *star tracker* basiert auf der Arbeit von Bezooijen. Das Grundprinzip ist die Bildung von *Unter-Sternmustern* des zu erkennenden Sternmusters und deren auf der Basis von Doppelsternerkennungen durchgeführte Identifizierung. Das *Unter-Sternmuster*, das die größte Anzahl von Sternen beinhaltet und erfolgreich im Sternkatalog gefunden wurde, wird als *erfolgreich erkannt* betrachtet. Während des Vorgangs der Mustererkennung werden sowohl Informationen der Geometrie von Sternmustern als auch der Helligkeit von Einzelsternen berücksichtigt [Bezooijen 1993, DeAntonio 1994]. Im Rahmen eines *lost-in-space* Szenarios ohne *a-priori* Wissen wird die Erfolgsquote des Verfahrens von Bezooijen zur eindeutigen Sternmustererkennung zwischen $\eta=99,44\%$ bis $\eta=99,72\%$ angegeben.

Ein anderer Ansatz zur Sternmustererkennung ist das Anlegen von *binären Suchbäumen*, die alle Informationen über die prinzipiell möglichen Sternmuster im Rahmen eines vorgegebenen Sternkatalogs beinhalten. Das zu erkennende reale Sternmuster wird dann lediglich durch Vergleichsoperationen (Relationen) im binären Suchbaum gefunden. Dieser Ansatz ist auf der einen Seite zwar sehr schnell, da keine Berechnungen während des Vorgangs der Musterbildung durchgeführt werden müssen, auf der anderen Seite dauert der Aufbau des Suchbaums jedoch sehr lange und ist extrem speicherintensiv. Die Zuhilfenahme von binären Suchbäumen scheidet deshalb bei *on-board* Sternsensoren mit begrenzter Speicherkapazität aus, bietet sich jedoch bei einer bodengestützten Datenauswertung an [Quine 1995-2, Quine 1996]. Hinsichtlich der Erfolgsquote seines Verfahrens berichtet Quine über Werte bis zu maximal $\eta=98,7\%$ im Rahmen des *lost-in-space* Szenarios ohne *a-priori* Wissen.

3 Rahmenbedingungen

Das Verfahren der *bildverarbeitenden Sternmustererkennung zur 3-axialen Lagebestimmung* wurde ausschließlich mittels Softwarewerkzeugen entwickelt und implementiert. Eine Realisierung in Hardware erfolgte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht. Verschiedene Verfahrensvarianten und Hilfsprogramme sind mittels entsprechender Einzelprogramme realisiert und zusammengefaßt durch die Programmpakete *MATCH-IT* und *MATCH-TOOLS*. Als Hardwareumgebung wurde ein 100%ig zum Standard eines *Personal-Computers* (PC) kompatibles System ausgewählt, ohne Einbeziehung zusätzlicher Signalprozessorhardware oder anderer nicht handelsüblichen PC-Komponenten [Tischer 1995]. Dadurch wird eine universelle Anwendbarkeit des Gesamtsystems auf jedem konventionellen und kostengünstigen PC-System gewährleistet. Insbesondere die Rechenleistung der *32-Bit-Fließkommaarithmetik* des Prozessors (FPU: *floating-point-unit*) bestimmt die Laufzeit der verschiedenen Verfahrensschritte und Algorithmen zur Sternmustererkennung und Lagebestimmung durch Nutzung von hierfür besonders geeigneten Datentypen (Datentyp *single* bei der Programmiersprache *PASCAL*).

Folgende Hardwareperformance stand für Entwicklung und Tests zur Verfügung:

- Mainboard *ASUS P55T2P4*, 512 KB Cache-Speicher, Bustakt: $cl=66MHz$
- Prozessor *Intel-Pentium* mit integrierter *floating-point* Einheit (FPU) und einer Taktrate von $cl=133MHz$
- VGA-Graphikadapterkarte *ELSA Winner 2000 AVI*, Bilddatenspeicher: 2MB-VRAM
- PCI-SCSI-II Bus- und Festplattensystem (*Adaptec 2940*, *IBM-DCAS 4,3 GB*)
- sonstige Standard-Peripherie (17'' Monitor, Tastatur, Maus, Drucker, ...)
- eine optional nutzbare CCD-Sternenkamera (Eigenentwicklung des ZARM-Instituts), die über die Parallelschnittstelle (LPT) des Personal-Computers anschließbar ist (Kapitel 6)

Als Softwareentwicklungssystem wurde gewählt:

- Betriebssystem *Microsoft DOS 6.22*
- Programmiersprache *Borland-PASCAL 7.0*

Die Auswahl der Programmiersprache *PASCAL* ist bedingt durch die Übersichtlichkeit der Programmquellcodes bei komplexen Softwareprojekten [Borland 1992]. Ausserdem wurden mittels der Hochsprache *PASCAL* bereits umfangreiche Vorstudien betrieben und Softwarebibliotheken zur graphischen Visualisierung von Ergebnissen implementiert [Renken 1992]. Die graphische Ausgabe erfolgt in einer Auflösung von 1024 x 768 Pixeln in x- bzw. y-Richtung bei einer Darstellung von 256 gleichzeitigen Farben einer 24-Bit-Farbpalette. Rechenkern und Visualisierungsteil sind durch modulare Programmieretechnik voneinander getrennt, um eine potentielle Portierung in andere Programmiersprachen oder Hardwareumgebungen (z.B. ein *weltraumtauglicher* Rechner mit digitalem Hochleistungssignalprozessor) schnell zu ermöglichen. Bild 3.1 zeigt die aktuell verwendete Systemumgebung mit den eingebetteten Programmpaketen *MATCH-IT* und *MATCH-TOOLS*.

Über die Parallelschnittstelle (LPT) des Personal-Computers kann optional die bereits erwähnte und in Anhang B näher beschriebene CCD-Sternenkamera an das System angeschlossen werden. Dieses Bildaufnehmersystem wurde im Rahmen einer früheren Arbeit eigens für die Erstellung von Himmelsaufnahmen entwickelt und gebaut [Offterdinger 1993]. Für praktische Feldversuche - z.B. zur Kalibrierung der Kamera und Verifikation des Verfahrens zur Sternmustererkennung -

steht somit ein *Komplettsystem* zur Verfügung, bestehend aus der CCD-Sternenkamera und dem PC-basierten Bildverarbeitungssystem zur Sternmustererkennung nebst 3-axialer Lagebestimmung. Ferner können die Himmelsaufnahmen auf Festplatte dauerhaft gespeichert und per Dateizugriff in das Bildverarbeitungssystem eingelesen werden. Die Bilddateien müssen dem speziellen Datenformat der CCD-Sternenkamera (*Binär-Dateien*) oder der Norm des universellen und standardisierten *Tagged-Image-File-Format (TIFF-Dateien)* entsprechen [Aldus 1992]. Auch ist der Einsatz der Programmpakete *MATCH-IT* und *MATCH-TOOLS* im Bodenstationsbetrieb einer Satellitenmission leicht möglich, wobei die mittels Telemetrie übermittelten Himmelsaufnahmen einer im Satelliten befindlichen CCD-Sternenkamera mit einem Personal-Computer der Bodenstation verarbeitet werden können.

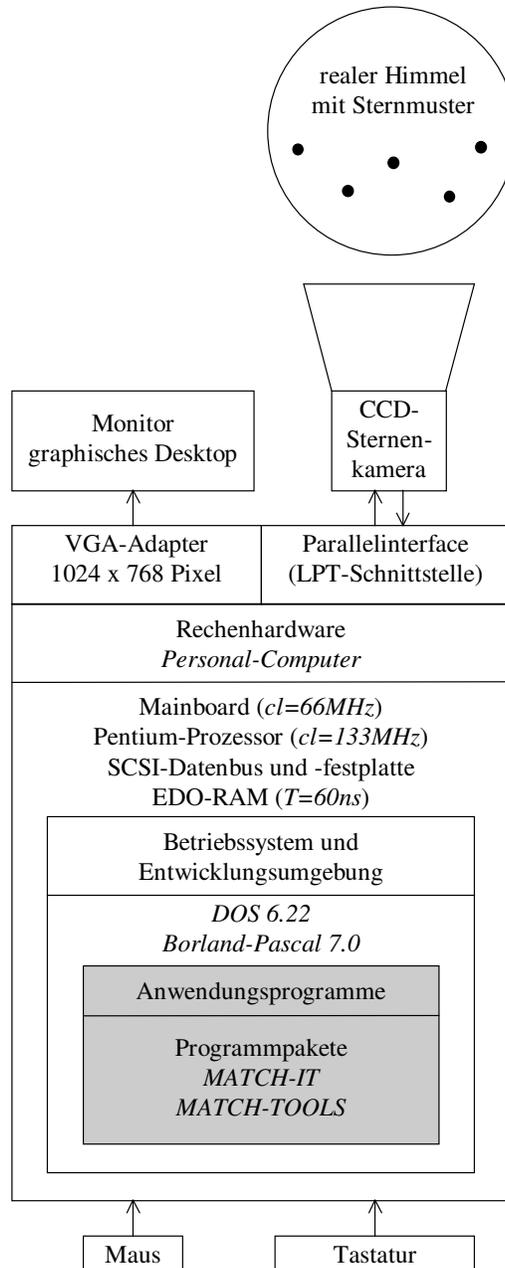


Bild 3.1: Systemübersicht der Hardware- und Softwareumgebung

3.1 Die Programmpakete *MATCH-IT* und *MATCH-TOOLS*

Die im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Software besteht aus einer Vielzahl von Anwendungsprogrammen, die über die beiden menügesteuerten Programmpakete *MATCH-IT* und *MATCH-TOOLS* zusammengefaßt sind. *MATCH-IT* beinhaltet die verschiedenen Verfahrensvarianten zur Sternmustererkennung, während *MATCH-TOOLS* diverse unterstützende Programme enthält, z.B. zur Bilddatenaufbereitung, Visualisierung der Sternkataloge oder zur Untersuchung der Verteilung von Sternen an der Himmelskugel.

Das Programmpaket *MATCH-IT* (Bild 3.2) beinhaltet sieben verschiedene Programme (*MATCH-1* bis *MATCH-7*), die das Verfahren der Sternmustererkennung unter dem Aspekt von jeweils unterschiedlich vororganisierten Sternkatalogen bzw. Sub-Sternkatalogen bewerkstelligen. Hierauf wird an geeigneter Stelle innerhalb des Kapitels 6.10 detailliert eingegangen.

```
M A T C H - I T - M A I N - M E N U

1: MATCH-1 (1 star catalog - no delta-max check)
2: MATCH-2 (1 star catalog)
3: MATCH-3 (2 sub star catalogs)
4: MATCH-4 (4 sub star catalogs)
5: MATCH-5 (8 sub star catalogs)
6: MATCH-6 (12 sub star catalogs)
7: MATCH-7 (16 sub star catalogs)
8: EDIT MATCH-IT.INI
q: QUIT

--- press the given number to execute choosen program ---

written by: Hartmut Renken, Heilshorner Str. 30, 28239 Bremen, Germany
e-mail: hartmut@renken.de
website: http://www.renken.de
```

Bild 3.2: Benutzermenü und Übersicht der *MATCH-IT* Programme

Das Programmpaket *MATCH-TOOLS* (Bild 3.3) beinhaltet vier Hilfsprogramme: Das Programm *DISPLAY* visualisiert die vollständigen Rohdaten des SAO-Sternkatalogs in der Zylinder- und Stereoprojektion und dient insbesondere als Werkzeug zur Überprüfung der Datenqualität des Sternkatalogs. Zur Untersuchung der Sternverteilung am Himmel steht das Programm *DISTR* zur Verfügung. Die im Verlauf des Anhangs B gezeigten Ergebnisse zur Bestimmung der Anzahl von Sternen innerhalb des Gesichtsfelds eines Bildaufnehmersystems wurden mit diesem Programm gewonnen. Die Software *CREATE* bereitet die Rohdaten des SAO-Sternkatalogs auf und erstellt automatisch alle durch die Vorgabe maximaler Magnituden begrenzte, aber den Himmel vollständig abdeckende Sternkataloge (siehe Tabelle A.2). Diese so erstellten Kataloge sind die von den *MATCH-IT* Programmen benutzten Sternkataloge *uptomag_1.0* bis *uptomag_6.0*. Das Programm *DOUBLE* dient zur Auffindung künstlich erzeugter Doppelsterne, um den sogenannten *closest-stars* Effekt zu untersuchen (Kapitel 6.8).

```
M A T C H - T O O L S - M A I N - M E N U

1: DISPLAY (VIEW SOURCE SAO-CATALOG)
2: DISTR (CHECK DISTRIBUTION OF THE STARS)
3: MAKE-CAT (BUILD STAR CATALOGS FROM SOURCE SAO-CATALOG)
4: DOUBLE (INVESTIGATE SYNTHETIC DOUBLE-STARS)
q: QUIT

--- press the given number to execute choosen program ---

written by: Hartmut Renken, Heilshorner Str. 30, 28239 Bremen, Germany
e-mail: hartmut@renken.de
website: http://www.renken.de
```

Bild 3.3: Benutzermenü und Übersicht der *MATCH-TOOLS* Programme

4 Konzept eines vollständigen Systems zur Bestimmung der 3-axialen Lageparameter mittels bildverarbeitender Sternmustererkennung

Das Verfahren zur bildverarbeitenden Sternmustererkennung ist im Falle einer vollständigen Systemrealisation zweckmäßigerweise in ein autonom arbeitendes sternmustererkennendes Lagebestimmungssystem mit definierten Eingangs- und Ausgangsgrößen eingebettet (*stand-alone* Lösung). Ein mögliches Gesamtkonzept hierzu wird innerhalb dieses Kapitels vorgestellt und kurz diskutiert. Es ist zum einen das Ergebnis aus Erfahrungen, die während der *BREM-SAT* Mission [Ginati 1990, Iglseder 1991] und zum anderen bei weiterführenden Auswertungen und Tests im Rahmen der vorliegenden Dissertation gewonnen wurden. Das Konzept versteht sich auch als Vorschlag für eine in sich geschlossene *lost-in-space* Systemlösung (auch in der Raumfahrt international üblich *autonomous star tracker* genannt), die als eine alle Hardware- und Softwarekomponenten beinhaltende *black-box* Lösung bei einer raumfahrttechnischen Anwendung in ein überordnetes Lageregelungssystem integriert werden kann (siehe auch Bild 1.1 in Kapitel 1). Das vollständige sternmustererkennende Lagebestimmungssystem mit den dazugehörigen Eingangs- und Ausgangsgrößen zeigt zusammengefaßt Bild 4.1 und ist ausführlicher auf Ebene der Systemmodule in Bild 4.2 dargestellt.

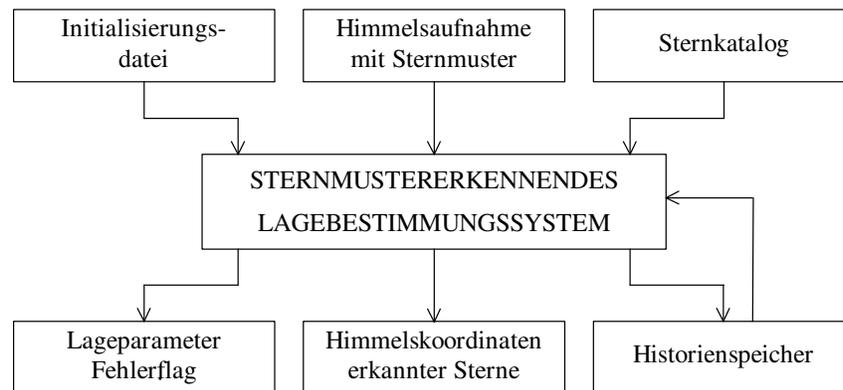


Bild 4.1: Ein- und Ausgangsgrößen des sternmustererkennenden Lagebestimmungssystems

Das System besitzt als *Eingangsgrößen*:

- Eine *Initialisierungsdatei* mit veränderbaren Grundeinstellungen, z.B. zur Steuerung der CCD-Sternenkamera und zur Vorgabe von Parametern der Bilddatenvorverarbeitung (*image-data-pre-processing*) und Sternmustererkennung (*match-n-stars-pattern*).
- Einen den Himmel (bis zu einer Grenzhelligkeit) vollständig abdeckenden *Sternkatalog* mit Himmelskoordinaten von mittels der CCD-Sternenkamera abbildungsfähigen und für die Sternmustererkennung zu berücksichtigenden Himmelsobjekten.
- Die *Abbildung eines realen Himmelsausschnitts* mit einem zu erkennenden *n-Sterne-Muster*, geliefert durch die CCD-Sternenkamera.
- Informationen eines bevorzugt systemintern gespeicherten *Historienspeichers*, der als Datenrecorder eine *Historie* zeitlich vergangener und wichtiger Ergebniswerte zur Sternmustererkennung und Lagebestimmung beinhaltet und zur *Plausibilitätsüberprüfung* bei möglicher Lieferung nicht eindeutiger Ergebnisse des aktuellen Systemdurchlaufs herangezogen werden kann (dient auch der allgemeinen Ergebnisverifikation).

Als *Ausgangsgrößen* des Systems sind vorhanden:

- Die *Parameter der 3-axialen Lage*: Rektaszension α_{att} , Deklination δ_{att} und der dritte Winkel ω_{att} , sowie ein *Fehlerflag*, welches einem möglichen nachfolgenden System mitteilt, ob die ausgehenden Lageparameter überhaupt brauchbar und für andere Systeme (z.B. für das System *Lageregelung*) weiterverwertbar sind.
- Die *Himmelskoordinaten* von Sternen des erkannten *n-Sterne-Muster*.
- Ein neuer Datensatz des systemintern gespeicherten *Historienspeichers*, der gleichzeitig als Eingangsgröße zur Plausibilitätsüberprüfung (siehe vorherige Seite) zur Verfügung steht.

Das sternmustererkennende Lagebestimmungssystem läßt sich in verschiedene Module zerlegen, wie in Bild 4.2 dargestellt. Die Modulfolge erinnert an eine typische und sequentiell abzuarbeitende Bildverarbeitungskette [Kazmierczak 1980, Bässmann 1993]. Jedes der nachfolgend vorgestellten Module beinhaltet wiederum eine Vielzahl von Sub-Modulen, deren wichtigste Aspekte im folgenden dargestellt werden:

- **Initialisierungsdatei / Sternkatalog:**

Über die Initialisierungsdatei werden die Grundeinstellungen (*Default-Werte*) wichtiger Parameter dem System zugeführt. Diese Datei ist bei Bedarf jederzeit veränderbar, um eine Anpassung an sich möglicherweise veränderte Rahmenbedingungen zu gewährleisten. Der Sternkatalog beinhaltet die Koordinaten aller durch die CCD-Sternenkamera detektierbaren Himmelsobjekte (*lost-in-space* Szenario). Sowohl die Initialisierungsdatei als auch der Sternkatalog sollten bei einer *on-board* Satellitenanwendung durch Telemetrieübertragung *uploadbar* sein.

- **CCD-Sternenkamera:**

Die CCD-Sternenkamera ist die Hardware des Bildaufnehmersystems, welches einen Himmelsausschnitt mit einem zu erkennenden Sternmuster aufnehmen soll. Um eine eindeutige Sternmustererkennung zu ermöglichen, ist zu beachten, daß eine hinreichende Anzahl von Himmelsobjekten bzw. Sternen abgebildet wird. Dies stellt gewisse Anforderungen insbesondere an Empfindlichkeit und Belichtungszeit des Bildaufnehmersensors, sowie an die Größe des Winkels des abgebildeten Himmelsausschnitts (*field-of-view*). Näheres hierzu ist im Anhang B nachzulesen.

- **Variableninitialisierungen / Sternkatalog vektorisieren:**

Hier werden Grundeinstellungen und Initialisierungen vorgenommen, die üblicherweise nur beim erstmaligen Aufruf (*Kaltstart*), bei einem *Warmstart* des Systems (z.B. durch Auslösung eines *Resets* wegen eines Hardwaredefekts oder Softwareabsturzes) oder bei Modifikationen der Initialisierungsdatei oder des Sternkatalogs durchgeführt werden. Dazu zählen z.B. die Allokierung von Programm- und Datenspeicher und das Einlesen von externen Parametern aus der Initialisierungsdatei. Außerdem wird der Sternkatalog dem dafür vorgesehenen Speicherbereich zugeführt und gegebenenfalls vektorisiert.

- **Kamerasteuerung / Himmelsaufnahme durchführen / Bilddaten einlesen:**

Dieses Modul übernimmt die Akquisition der Bilddaten, die den Himmelsausschnitt mit einem zu erkennenden Sternmuster beinhalten sollen. Bilddatenquelle kann zum einen die CCD-Sternenkamera sein, zum anderen können die Bilddaten bei der im Rahmen dieser

Arbeit entwickelten PC-basierten Systemrealisation (Programmpaket *MATCH-IT*) auch über Festplattendateizugriff zur Verfügung gestellt werden. Die CCD-Sternenkamera wird primär über die Parameter *Empfindlichkeit* und *Belichtungszeit* gesteuert, welche auch als Ergebnisse vorheriger Bilddatenvorverarbeitungen regelbar sind, um eine optimale Bildqualität zu gewährleisten. Quellenunabhängig werden die Bilddaten zur weiteren Verarbeitung in den systeminternen Bilddatenspeicher transferiert.

- **Bilddatenvorverarbeitung (Modul *image-data-pre-processing*):**

Die Vorverarbeitung der Bilddaten beinhaltet zunächst die Elimination von Störpixeln und die Berechnung diverser statistischer Größen zur Grauwertverteilung der Bilddaten, wie z.B. die des *Histogramms* [Haberäcker 1984]. Zur Störpixelelimination wird die minimal defokussierte Abbildung der Sterne dergestalt empfohlen, daß die Sterne flächenartig auf dem CCD-Bildsensor abgebildet werden. Dadurch wird eine Abgrenzung gegenüber einzelnen Störpixeln ermöglicht. Außerdem kann bei einer Defokussierung eine *Subpixel-Interpolation* durchgeführt werden, um das Auflösungsvermögen des bildverarbeitenden Lagebestimmungssystems zu erhöhen [Stanton 1993]. Unmittelbar danach findet eine schnelle Segmentierung der Bildsterne is_i gegenüber dem Himmelshintergrund statt. Als Ergebnis werden nach Helligkeit sortierte Listen der Flächenschwerpunkte der Bildsterne geliefert, sowie die Anzahl der Bildsterne $number_{is}$. Das Modul *image-data-pre-processing* wird ausführlicher in Kapitel 5 beschrieben.

- **Entscheidung: genügend Bildsterne vorhanden?**

Die Anzahl $number_{is}$ der Objekte bzw. Bildsterne muß mindestens drei sein ($number_{is} \geq 3$), d.h. es muß minimal ein *3-Sterne-Muster* auf der Himmelsaufnahme vorgelegen haben, um eine auf die aktuelle Bildvorlage bezogene Sternmustererkennung nebst Bestimmung der 3-axialen Lageparameter durchzuführen.

- **zu erkennendes *n-Sterne-Muster* auswählen (Modul *prepare-match-n-stars-pattern*):**

Aus der Flächenschwerpunktliste der Bildsterne werden die drei bis maximal sechs hellsten Sterne herausgegriffen, um ein *n-Sterne-Muster* zu bilden, innerhalb dessen jeder Stern mit jedem anderen über den Kosinus von Winkelabständen verbunden wird (Kapitel 6).

- **Sub-Sternkataloge organisieren (Modul *sub-star-catalog-organization*):**

Bei einer möglichen und durch den Anwender gewünschten Zerlegung des Sternkatalogs in verschiedene *Sub-Sternkataloge* werden an dieser Stelle die Überlappungsbereiche der Sub-Sternkataloge organisiert. Die Sub-Sternkataloge müssen sich vom Winkelbetrag soweit überlappen, wie dies dem maximalen Doppelsternabstand im ausgewählten *n-Sterne-Muster* entspricht. Zweck der Bildung von Sub-Sternkatalogen ist eine deutliche Reduzierung der Rechenlaufzeit des Algorithmus zur Sternmustererkennung (Kapitel 6.10).

- **Sternmustererkennung (Modul *match-n-stars-pattern*) / Lagebestimmung (Modul *calculate-3-axis-attitude*):**

Dieses Doppelmodul beinhaltet den wesentlichen Teil des Verfahrens zur Sternmustererkennung. Es wird versucht, das mittels der CCD-Sternenkamera vorgegebene *n-Sterne-Muster* über die Angaben von Himmelskoordinaten der Sternkatalogeinträge nachträglich zu rekonstruieren (Modul *match-n-stars-pattern*). Der zugrunde liegende Algorithmus stellt ein Korrelationsverfahren zwischen dem vorgegebenen realen *n-Sterne-Muster* und synthetisch generierten *n-Sterne-Mustern* mittels der Sternkatalogeinträge dar. Ein vorgegebenes Sternmuster gilt als erfolgreich erkannt, wenn es sich vollständig durch ein Sternmuster des Sternkatalogs rekonstruieren läßt und kein

Spiegelbild der Bildvorlage darstellt. Jeder erfolgreiche *Match* zieht die Bestimmung der 3-axialen Lageparameter nach sich (Modul *calculate-3-axis-attitude*). Kapitel 6 beschreibt alle hierfür notwendigen Aspekte ausführlich.

- **Plausibilitätsüberprüfung:**

Hier findet eine Ergebnisüberprüfung der zuvor ermittelten 3-axialen Lageparameter statt. Dafür wird z.B. der systeminterne *Historienspeicher* hinzugezogen, der als eine Art *Gedächtnis* ausgewählte wichtige Parameter zeitlich vergangener Durchläufe des sternmustererkennenden Lagebestimmungssystems beinhaltet. So kann z.B. bei einer soeben nicht eindeutig bestimmten Lage durch Vergleich mit von in der Vergangenheit eindeutig bestimmten Lageparametern die bestmögliche Lage des aktuellen Durchlaufs ausgewählt werden (*best-match*). Diese Maßnahme kann jedoch nur dann sinnvoll durchgeführt werden, sofern durch das Trägheitsverhalten eines z.B. drallradstabilisierten Raumflugkörpers davon ausgegangen werden kann, daß sich die Parameter der 2-axialen Lage (α_{att} , δ_{att}) innerhalb eines gewissen Zeitraums ΔT nur maximal um den Winkel Δp ändern können. Eine andere Möglichkeit der Plausibilitätsüberprüfung ist durch die Zusammenarbeit mit anderen Sensoren zur Lagebestimmung oder durch Anwendung von *Kalman-Filtern* gegeben (siehe auch Kapitel 9). So kann z.B. bei Satellitenumlaufbahnen in niedriger Höhe über der Erde (LEO: *low-earth-orbit*) eine grobe Lagebestimmung durch ein *Magnetometer* erfolgen und dadurch eine Eingrenzung der möglichen, aber präziseren Lagewerte als Ergebnis der Sternmustererkennung durchgeführt werden.

- **Historienpuffereintrag:**

Hier findet der Eintrag der wichtigsten Parameter des Lagebestimmungssystems in den ringpufferartig organisierten *Historienspeicher* statt. Dieser Speicher baut zeitlich vergangene Werte bis zu einer maximalen Anzahl von Einträgen auf und wird bevorzugt speicherminimal ausgelegt, um bei der *on-board* Anwendung während einer Satellitenmission ein schnelles Übertragen der Daten zu einer Bodenstation über eine geeignete Telemetrieverbinding zu ermöglichen.

- **Parameterübergabe:**

Das letzte Modul des sternmustererkennenden Lagebestimmungssystems übergibt die 3-axialen Lageparameter (z.B. durch die im Rahmen dieser Dissertation benutzten Lagerepräsentanten α_{att} , δ_{att} und ω_{att}) an das nachfolgende bzw. übergeordnete System, welches im Falle eines vollständigen Lageregelungssystems das Modul mit den Lageregelungsalgorithmen darstellt [Königsmann 1995]. Ferner wird ein *Fehlerflag* ausgegeben, um eine mögliche Unbrauchbarkeit der Lageparameter auch bei Hinzuziehung der Plausibilitätsüberprüfung anzuzeigen.

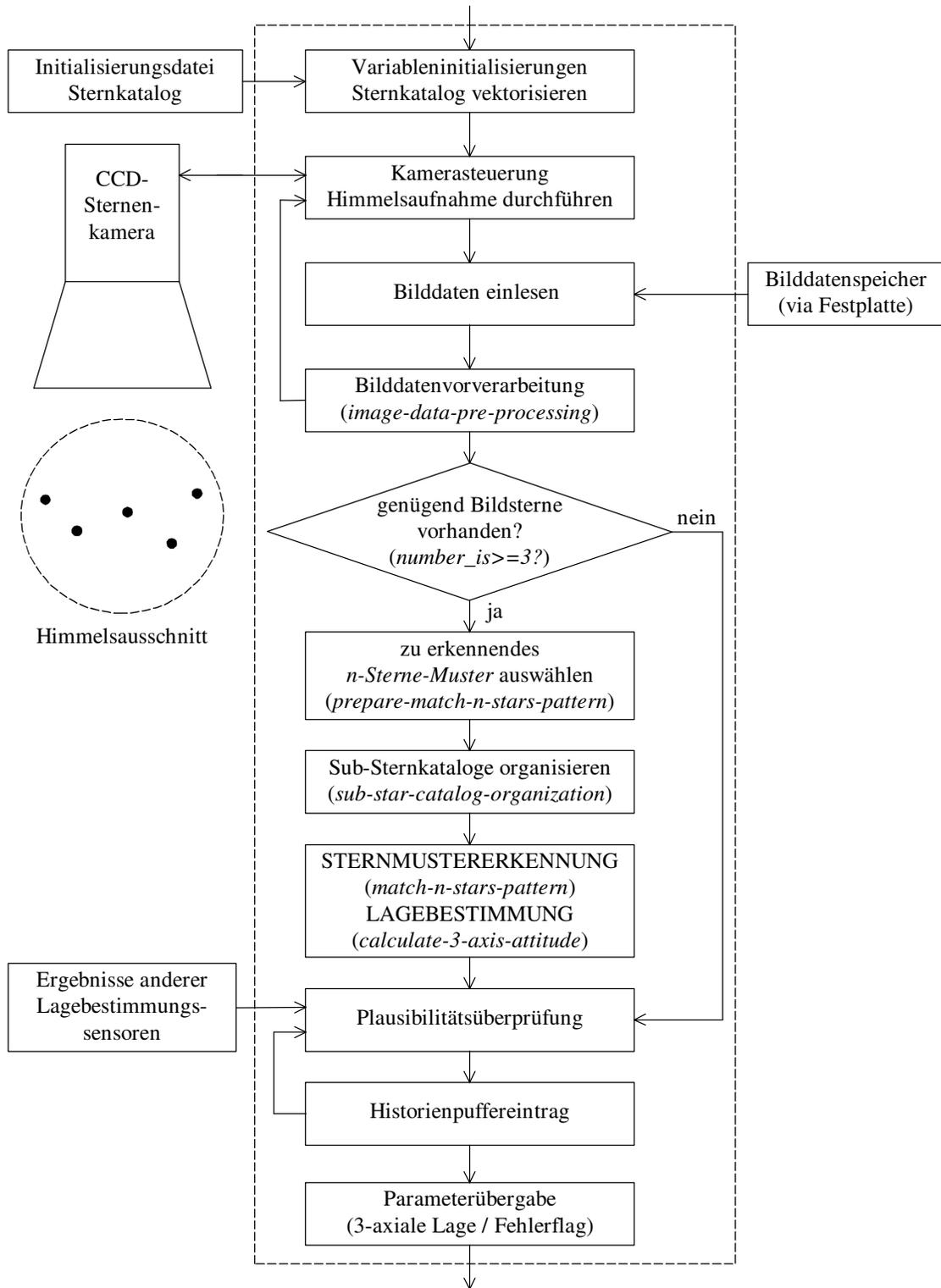


Bild 4.2: Systemmodule eines vollständigen Systems zur Bestimmung der 3-axialen Lageparameter mittels bildverarbeitender Sternmustererkennung

5 Vorverarbeitung der Bilddaten (*image-data-pre-processing*)

Die Aufgabe der *Bilddatenvorverarbeitung* (programmtechnisch realisiert durch das Modul *image-data-pre-processing*) besteht in erster Linie in der *bereichsorientierten Segmentierung* der Bildsterne (*image-stars*, is_i) aus der durch die CCD-Sternenkamera gelieferten und digitalisierten, zweidimensionalen Bildvorlage ($image[1..image_width;1..image_length]$) als Eingangsgröße. Dies bedeutet konkret das *Herauslösen* der Bildsterne gegenüber dem Himmelshintergrund und die Bestimmung von folgenden Kenngrößen:

- der Anzahl $number_is$ der Bildsterne is_1 bis is_{number_is}
- Ermittlung der zweidimensionalen Flächenschwerpunkte aller Bildsterne is_i mit $x_is[1..number_is]$ in x-Richtung und $y_is[1..number_is]$ in y-Richtung des Bildes
- Ermittlung der Grauwerte $gray_value_is[1..number_is]$ aller Bildsterne is_i

Ferner wird eine Sortierung der Bildsterne is_i in absteigender Reihenfolge der Grauwerte aller Bildsterne durchgeführt mit is_1 als hellsten Bildstern und is_{number_is} als dunkelsten Bildstern. Diese derart sortierte zweidimensionale Bildsternliste ($x_is[1..number_is]$, $y_is[1..number_is]$) sowie die Variable $number_is$ der Anzahl der Bildsterne sind Ausgangsgrößen des Moduls *image-data-pre-processing* und gleichzeitig Eingangsgrößen des im Kapitel 6 dargelegten Kernmoduls, welches das Verfahren zur Erkennung von Sternmustern (Modul *match-n-stars-pattern*) bei gleichzeitiger Bestimmung der 3-axialen Lageparameter (Modul *calculate-3-axis-attitude*) beinhaltet (Bild 5.1).

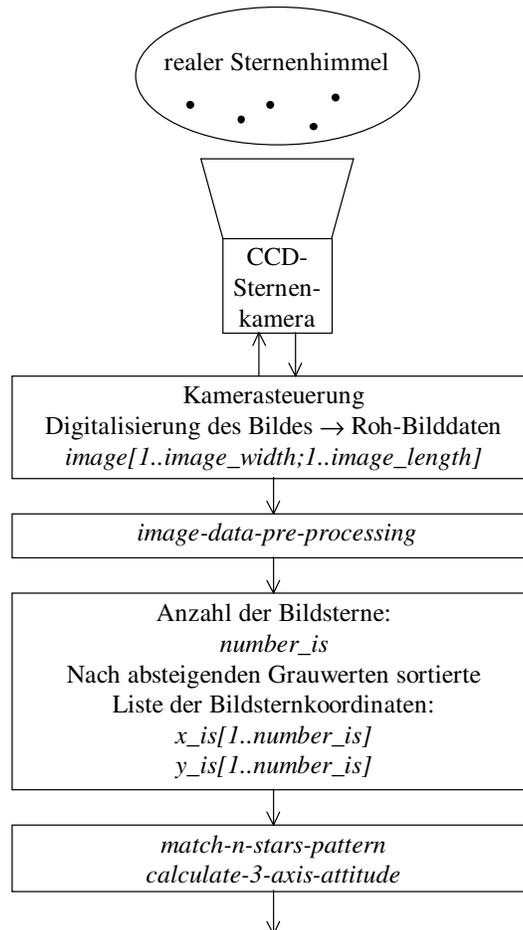


Bild 5.1: Eingangs- und Ausgangsgrößen des Moduls *image-data-pre-processing*

5.1 Grauwertstatistik von Himmelsaufnahmen der CCD-Sternenkamera

Für die als Eingangsgröße zur Verfügung stehenden Himmelsaufnahmen der CCD-Sternenkamera können einige wichtige *Plausibilitätsannahmen* gemacht werden, die nicht nur in der Theorie, sondern auch in der Praxis gelten, wie umfangreiche Tests gezeigt haben [Offterdinger 1993]. Die relativ kurzen Belichtungszeiten bis zu maximal $T=3s$ haben zur Folge, daß nur wenige Sterne vor einem dunklen Himmelshintergrund abgebildet werden, was auch anhand aller Beispiel-Himmelsaufnahmen der Kapitel 6 und 7 deutlich zu sehen ist. Sollten sich sehr helle Objekte wie Sonne und Mond oder ein Ausschnitt der durch die Sonne angeleuchteten Erde im Gesichtsfeld der CCD-Sternenkamera befinden, so würde die Himmelsaufnahme bei dem derzeitigen technischen Stand der Kamera durch *Blooming*- und andere Streueffekte extrem überbelichtet sein und die abgebildeten Sterne mitunter vollständig *verschluckt* werden. Dieser äußerst unerfreuliche Effekt ist jedoch auch bei den meisten marktgängigen *low-cost* CCD-Kameras gegeben. Nebulöse und großflächige Objekte wie Galaxien und Gasnebel fehlen gänzlich, da für deren Abbildung die Belichtungszeit wiederum zu kurz ist. Im Rahmen der Kameraauslegung gemäß Anhang B heben sich die abgebildeten Sterne aber deutlich durch einen höheren Grauwert gegenüber dem Himmelshintergrund ab und *verschmieren* durch Effekte von Licht- und Ladungstreueung im Halbleitermaterial über mehrere Pixel auf dem CCD-Flächensensor (Bild 5.2). Selten wird nur ein Stern auf ebenfalls nur einem CCD-Pixel abgebildet. Charakteristisch ist eine Abbildung von vier bis zu 15 Sternen mit je ein bis zu zehn CCD-Pixeln je Stern. Diese sich vom Hintergrund durch einen höheren Grauwert abhebenden CCD-Pixel werden auch *high-level-pixel* genannt.

Als Vorschlag für spätere Ausführungen von CCD-Sternenkameras bietet es sich an, die Brennebene der Optik gegenüber der Ebene des Bildaufnehmersensors bewußt derart minimal zu defokussieren, daß Sterne grundsätzlich über mehrere CCD-Pixel abgebildet werden, um diese z.B. durch Anwendung eines *Medianfilters* [Jähne 1995] von einzelnen potentiellen CCD-Fehlpixeln separieren zu können.

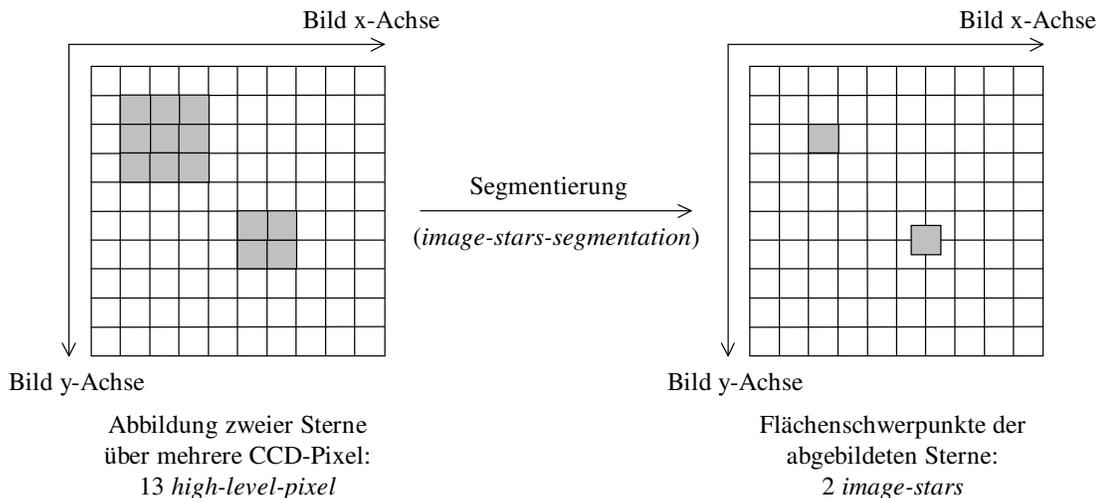


Bild 5.2: Abbildung von Bildsternen über mehrere CCD-Pixel

Der Informationsgehalt einer Himmelsaufnahme der CCD-Sternenkamera - die sogenannte *Entropie* $E(image)$ - ist folglich sehr gering und läßt bei Bedarf eine massive und verlustfreie Datenkompression der Bilddaten zu [Pavlidis 1982, Wahl 1984]. Die Entropie $E(image)$ ist ein statistisches Maß für die *minimale binäre Bit-Kodierung* je Pixel (*bit/pixel*), läßt sich aber auch erweitern auf die Anzahl der benötigten Bytes je Bild (*byte/image*) und ist somit gleichbedeutend

mit der resultierenden Datenmenge bei Anwendung eines optimalen und verlustfrei arbeitenden Datenkompressionsverfahrens [Streichert 1987].

Die digitalen Bilddaten liegen *grauwertdiskret* vor, wobei zwei Datenvarianten der Grauwertkodierung je nach Ausführung der CCD-Sternenkamera existieren:

- Grauwertkodierung $gc=1bit/pixel$:
Hier liegen reine Binärbilder vor, wobei bereits innerhalb der Elektronik der CCD-Sternenkamera bei der *Analog-/Digitalwandlung* des zunächst noch analogen Bilddatenstroms über einen einstellbaren analogen Spannungsschwellwert $U_{threshold}$ und mittels eines *Komperators* eine *Null/Eins* Entscheidung getroffen wird (mit *Null* für Pixel des Himmelshintergrunds und *Eins* für die möglichen relevanten *high-level-pixel* der Bildsterne).
- Grauwertkodierung $gc=8bits/pixel$ entsprechend $gc=1byte/pixel$:
Dies ist das Standard-Datenformat mit 256 diskreten Grauwerten je Bildpunkt. Erst programmintern bzw. innerhalb des Moduls *image-data-pre-processing* wird über die Variable *threshold* entschieden, ob ein Bildpixel an der Stelle (x,y) und mit dem Grauwert $image[x,y]$ der Menge der *high-level-pixel* zugeordnet wird.

Eine der wichtigsten Kenngrößen der Grauwertstatistik ist die *diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung* der zweidimensionalen Bilddaten $image[x,y]$, das sogenannte *Histogramm* $H(g)$ eines Bildes. Unterschieden wird zwischen dem *absoluten Histogramm* $H_{absolut}(g)$ und dem normierten *relativen Histogramm* $H_{relativ}(g)$ [Haberäcker 1984]. Beide Formen des Histogramms geben Aufschluß über die Häufigkeit p_g aller möglichen diskreten Grauwerte g des Bildes mit:

$$H_{absolut}(g) = p_g$$

$$H_{relativ}(g) = p_g / M$$

(Gleichungen 5.1 und 5.2)

Im konkret vorliegenden Fall der zweiten oben erwähnten digitalen Bilddatenvariante der CCD-Sternenkamera mit $gc=8bits/pixel$ gilt: Die möglichen diskreten Grauwerte g variieren im Bereich $g=0..255$ bei $M=110592$ für die Anzahl der Bildpunkte innerhalb des Bildes ($M=image_width*image_length=384*288$). Für die Summation über alle g Elemente der diskreten Grauwertmenge gilt somit:

$$\sum_{g=0}^{255} H_{absolut}(g) = 110592, \text{ für das absolute Histogramm}$$

$$\sum_{g=0}^{255} H_{relativ}(g) = 1, \text{ für das relative Histogramm}$$

(Gleichungen 5.3 und 5.4)

Für die *Summenhäufigkeit* bzw. für das bis zum Grauwert g kumulierte Histogramm $H_{cum}(g)$ gilt:

$$H_{cum, absolut}(g) = \sum_{k=0}^g H_{absolut}(g), \text{ für die absolute Summenhäufigkeit}$$

$$H_{cum, relativ}(g) = \sum_{k=0}^g H_{relativ}(g), \text{ für die relative Summenhäufigkeit}$$

(Gleichungen 5.5 und 5.6)

Die Entropie $E(image)$ des Bildes ist wiederum berechenbar aus dem *relativen Histogramm* gemäß Gleichung 5.4:

$$E(image) = - \sum_{g=0}^{255} (H_{relativ}(g) * \ln(H_{relativ}(g)))$$

(Gleichung 5.7)

Es fällt bei Gleichung 5.7 auf, daß jeder Summenbeitrag $H_{relativ}(g)$ mit dem *Logarithmus Dualis* ($\log_2 = \ln$) von $H_{relativ}(g)$ gewichtet wird. Dieser Umstand ist dadurch begründet, daß mittels des Informationsträgers *Bit* zwei Zustände je Informationsträger kodiert werden können. Bei einer Kodierung von $gc=8\text{bits/pixel}$ variiert die Entropie im Bereich von $E(image)=0..8$. Der Wert $E(image)=0$ ist gleichbedeutend mit einem homogenen Grauwert über das gesamte Bild (kein Informationsgehalt), und $E(image)=8$ ist gleichbedeutend mit *weißem Rauschen* (maximaler Informationsgehalt). Der mittlere Informationsgehalt $E(image)$ aller im Rahmen dieser Dissertation benutzten Beispiel-Himmelsaufnahmen (Kapitel 6 und 7) ist jedoch äußerst gering, wie auch der Tabelle 5.1 zu entnehmen ist.

Bildname	$E(image)$ (bits/pixel)	$E(image)$ (bytes/image)	Anzahl der high-level-pixel	Anzahl der Bildsterne
<i>Cassiopeia</i>	0,00340	46,8482	28	9
<i>Ursa Major</i>	0,00274	37,7656	22	5
<i>Perseus</i>	0,00252	34,6767	20	6
<i>Cepheus</i>	0,00285	39,2975	23	10
<i>Cygnus</i>	0,00383	52,7689	32	8
<i>Aquila</i>	0,00589	81,1965	52	13
<i>Lyra</i>	0,00457	62,9211	39	10
<i>Andromeda</i>	0,00425	58,6004	36	13
<i>Draco</i>	0,00383	52,7689	32	13
<i>Sagitta</i>	0,00342	47,0704	20	7

Tabelle 5.1: Übersicht statistischer Bildparameter der realen Beispiel-Himmelsaufnahmen aus Kapitel 6 und 7

Ausgehend davon, daß - wie zuvor erwähnt - in der Praxis bei qualitativ brauchbaren Bildern maximal 15 Sterne zu je maximal zehn CCD-Pixeln je Bildstern vorliegen, sind folglich innerhalb eines Bildes nur etwa maximal 150 *high-level-pixel* vorhanden, die sich gegenüber dem Himmelshintergrund mittels eines steuerbaren Grauwertschwellwerts *threshold* abheben. Es wird daher eine maximal zugelassene Anzahl *number_hlp_max* von *high-level-pixel* vereinbart, die für ausschließlich Sterne beinhaltende Bildvorlagen Sinn macht, mit *number_hlp_max=150* im oben genannten Beispiel. Wie der Parameter *threshold* ist auch der Parameter *number_hlp_max* über eine dem Modul *image-data-pre-processing* (Bild 5.7) von außen zuführbare Initialisierungsdatei bei Bedarf jederzeit änderbar. Sollten jedoch mehr *high-level-pixel* als durch *number_hlp_max* zugelassen vorliegen, so kann dies als einfaches qualitatives Kriterium für eine überbelichtete oder fehlerhafte Aufnahme angesehen werden. Mögliche Ursachen dafür können sein:

- Überbelichtung aufgrund zu langer Belichtungszeiten
- großflächige Objekte wie Erde, Mond oder Sonne im Gesichtsfeld
- Defekt der Kameraelektronik oder des CCD-Halbleitersensors

Durch die Analyse des absoluten kumulierten Histogramms $H_{cum,absolut}(g)$ an der Stelle $g=threshold$ und der Gesamtanzahl von Bildpixeln $M=image_width*image_length$ kann überprüft werden, ob die Bilddaten weniger *high-level-pixel* als die zugelassene Höchstzahl *number_hlp_max* beinhalten und somit eine einfache Entscheidung zur prinzipiellen weiteren Verwendbarkeit der Bilddaten getroffen werden. Es wird vereinbart, daß die Bilddaten dann und nur dann für eine Weiterverarbeitung geeignet sind (*image_data_ok=true*, sonst *image_data_ok=false*), wenn gilt:

$$M-H_{cum,absolut}(threshold) \leq number_hlp_max$$

(Bedingung 5.1)

Sollte die Bedingung 5.1 erfüllt sein (durch Setzen der Booleschen Variable *image_data_ok=true*), so bietet es sich an, nur die relevanten Informationen der *high-level-pixel* für eine Weiterverarbeitung zu berücksichtigen und die Bildvorlage nach Extraktion dieser Kenngrößen wieder zu verwerfen und den für die Roh-Bilddaten reservierten und relativ großen Speicherbereich sofort für andere Anwendungen freizugeben (Modul *release-image-data-memory*, Bild 5.7). Die Anzahl der *high-level-pixel* wird der Variablen *number_hlp* zugeordnet. Folgende drei Kenngrößen werden je *high-level-pixel* in indizierten Listen bzw. Datenfeldern abgelegt (realisiert innerhalb des Moduls *get-high-level-pixel*, Bild 5.7):

- *x_hlp[1..number_hlp]*: x-Koordinaten der *high-level-pixel* im Bild
- *y_hlp[1..number_hlp]*: y-Koordinaten der *high-level-pixel* im Bild
- *gray_value_hlp[1..number_hlp]*: Pixelgrauwerte der *high-level-pixel*

Diese drei Datenlisten beinhalten jeweils *number_hlp* bis maximal *number_hlp_max* Einträge, entsprechend der Anzahl der *high-level-pixel*.

5.2 Verfahren der Segmentierung von Bildsternen (*image-stars-segmentation*)

Die Separierung der Bildsterne gegenüber dem Himmelshintergrund bzw. aus der Menge der *high-level-pixel* erfolgt mittels eines eigens entwickelten *bereichsorientierten Verfahrens zur Objektsegmentierung* mit extrem schneller Laufzeit auf Rechenmaschinen (bei *Pentium* CPU mit $cl=133MHz$: $T < 5ms$ falls $number_hlp < 200$). Als *Bildsterne* werden alle sich aus solchen *high-level-pixel* zusammengesetzte Objekte im Bild aufgefaßt, die ein pixelweise zusammenhängendes Gebilde darstellen (Bilder 5.2 und 5.3). Per Definition werden alle Pixel, die eine direkte Verbindung über eine *Achter-Nachbarschaft* (Bild 5.3, rechts) zueinander haben, einem einzigen Objekt bzw. Bildstern zugeordnet. Bezogen auf ein Pixel $image[x,y]$ mit den Bildkoordinaten (x,y) kommen zu den Pixeln der *Vierer-Nachbarschaft* (Bild 5.3, links) auch die vier unmittelbar diagonal angrenzenden Pixel als zum aktuellen Objekt bzw. Bildstern dazugehörig dazu.

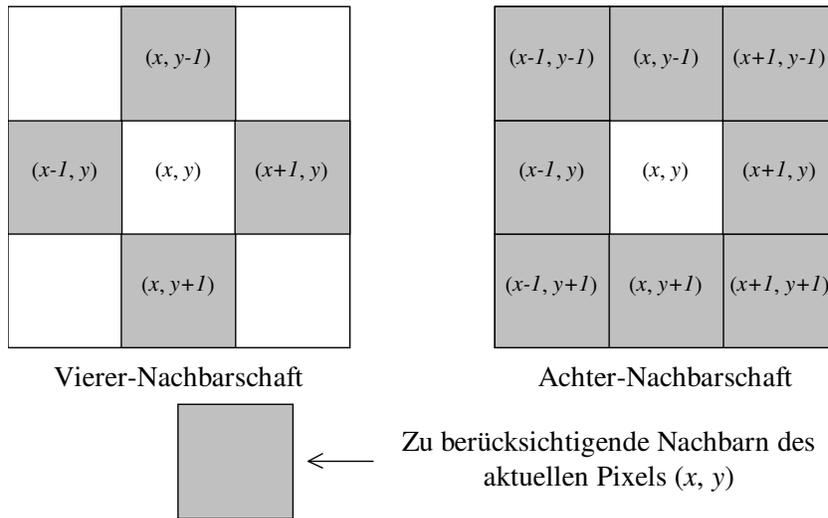


Bild 5.3: Vierer- und Achter-Nachbarschaften von Pixeln

Ausgehend von der Problematik, daß für jeden bestimmten *high-level-pixel* im Normalfall die vollständige Achter-Nachbarschaft untersucht werden müßte, wurde eine *richtungsabhängige Suche* nach Nachbarn implementiert, zwecks Reduzierung der Laufzeit auf Rechenmaschinen. Dadurch bleibt das hier vorgestellte Segmentierungsverfahren gemäß des in Bild 5.6 dargestellten Ablaufschemas auch bei anderweitigen Anwendungen zur Segmentierung großflächiger Objekte mit umfangreicheren Datenmengen universell nutzbar, bei schneller Lieferung von Ergebnissen.

Grundlage für diese Art der richtungsbeschränkten Suche ist das *Freeman-Kodierungsschema* der gefundenen *high-level-pixel* gemäß Bild 5.4 [Fröhlich 1991]. Außerdem werden jedem *high-level-pixel* mit dem Index $w1$ ($w1=1..number_hlp$) neben dessen Position $(x_hlp[w1], y_hlp[w1])$ und Grauwert $(gray_value_hlp[w1])$ im Bildraster zwei zusätzliche Markierungen zugeordnet. Dies ist zum einen ein Boolesches Variablenfeld $detect_hlp[w2]$ zur Markierung der Zugehörigkeit des *high-level-pixel* mit dem Index $w2$ ($w2=1..number_hlp$) zur Achter-Umgebung des aktuellen *high-level-pixel* mit dem Index $w1$ des gerade in der Segmentierungsphase befindlichen Objekts bzw. Bildsterns $number_is$. Zum anderen gibt es ein Boolesches Variablenfeld $visible_hlp[w2]$ zur quasi *Unsichtbarkeitsmachung*, falls das aktuelle *high_level_pixel* mit Index $w2$ bereits dem aktuellen Objekt bzw. Bildstern fest zugeordnet wurde. Hierdurch wird eine spätere *Doppeldetektion* vermieden.

Zu Beginn des Segmentierungsverfahrens wird das Feld $detect_hlp[1..number_hlp]$ auf $unwahr=false$ gesetzt, weil noch keine $high_level_pixel$ detektiert wurden. Entsprechend wird das Feld $visible_hlp[1..number_hlp]$ vollständig auf $wahr=true$ gesetzt, da zu Beginn noch kein $high-level-pixel$ einem Bildstern fest zugeordnet ist. Die Variable der Anzahl der segmentierten Bildsterne $number_is$ wird auf $number_is=0$ gesetzt.

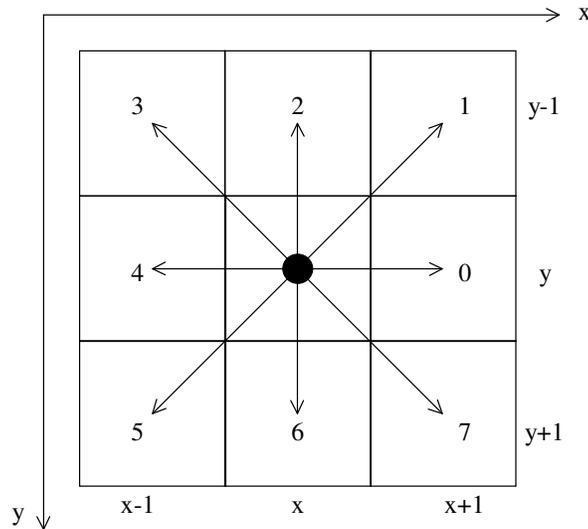


Bild 5.4: Das Freeman-Kodierungsschema der Achter-Umgebung eines Pixels (x,y)

Ausgehend von einem aktuellen $high-level-pixel$ mit den Koordinaten $(x_hlp[w1], y_hlp[w1])$ kann gemäß dem Freeman-Kodierungsschema aus Bild 5.4 die Suche nach zu detektierenden Nachbarn auf die Richtungen 0, 5, 6, und 7 beschränkt werden. Grundlage für diese laufzeitparende Beschränkung ist der übergeordnete, zeilenweise sequentielle Suchlauf innerhalb der bildpositionssortierten Listen der $high-level-pixel$, mit wachsendem x -Wert ($x=1..image_width$) innerhalb einer Zeile und wachsendem y -Wert ($y=1..image_length$) innerhalb des gesamten Bildes (Bild 5.5). Nachbarn einer Achter-Umgebung in Richtung 1, 2, 3 und 4 des Freeman-Kodierungsschemas sind folglich bereits zuvor berücksichtigt worden und brauchen kein zweites Mal behandelt zu werden.

Die generelle Zugehörigkeit anderer $high-level-pixel$ mit dem Index $w3$ zur aktuellen Achter-Nachbarschaft eines $high-level-pixel$ mit dem Index $w2$ wird dadurch festgestellt, daß eine Schleifenstruktur für $w3$ schrittweise durchlaufen wird ($w3=1..number_hlp$). Dabei wird überprüft, ob die Abstände in x - und y -Richtung ($delta_x$ und $delta_y$) zwischen den $high-level-pixel$ mit den Indizes $w2$ und $w3$ in beiden Richtungen betragsmäßig höchstens einem Pixel entsprechen. Das aktuelle $high-level-pixel$ mit dem Index $w2$ wird in jedem Fall dem aktuellen Bildstern is_number_is fest zugeordnet. Nach Feststellung aller Nachbarschaftspixel in Richtung 0, 5, 6 und 7 gemäß dem Freeman-Kodierungsschema wird das aktuelle Pixel $w2$ in den Zustand *unsichtbar* gesetzt ($visible_hlp[w2]=false$). Falls sich mindestens ein sichtbares $high-level-pixel$ in der Achter-Umgebung finden läßt, wird die Boolesche Markierung $more_hlp_found$ auf *wahr* gesetzt ($more_hlp_found=true$) als Kennzeichnung dafür, daß sich prinzipiell noch weitere $high-level-pixel$ eines Bildsterns is_number_is finden lassen können. Die Nachbarschaftspixel $w3$ der Richtungen 1, 2, 3 und 4 werden automatisch nicht berücksichtigt, da sich diese bereits im Zustand *unsichtbar* befinden ($visible_hlp[w3]=false$). Alle neu gefundenen Nachbarschaftspixel $w3$ werden als zum aktuellen Bildstern is_number_is zugehörig mittels des Zustands $detected_hlp[w3]=true$ markiert.

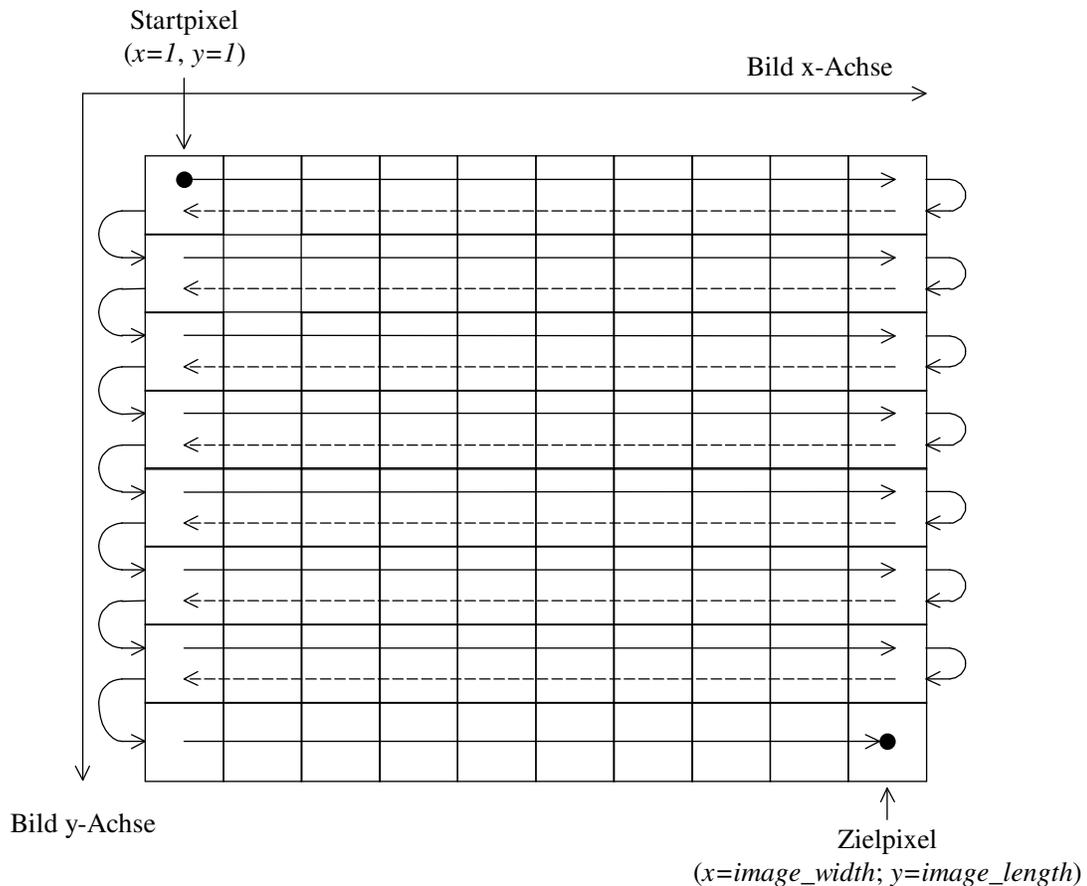


Bild 5.5: Zeilen- und spaltenweiser Suchlauf innerhalb der positionssortierten Koordinatenlisten ($x_hlp[1..number_hlp]$, $y_hlp[1..number_hlp]$) der *high-level-pixel*

Für δ_x und δ_y der betroffenen *high-level-pixel* mit Index w_2 bzw. w_3 gilt:

$$\begin{aligned} \delta_x &= x_hlp[w_2] - x_hlp[w_3] \\ \delta_y &= y_hlp[w_2] - y_hlp[w_3] \end{aligned}$$

(Gleichungen 5.8 und 5.9)

Für eine gültige Achter-Nachbarschaft zwischen den aktuellen betroffenen *high-level-pixel* mit Index w_2 und w_3 muß gelten:

$$(\text{absolute}(\delta_x) \leq 1) \text{ and } (\text{absolute}(\delta_y) \leq 1) = \text{true}$$

(Bedingung 5.2)

Sollten sich keine weiteren *high-level-pixel* in der Achter-Umgebung eines aktuellen Bildsterns is_number_is finden lassen ($more_hlp_found = \text{false}$), gilt die Segmentierung dieses Bildsterns is_number_is als abgeschlossen.

So werden letztendlich alle *high-level-pixel* eines zusammenhängenden Objekts bzw. Bildsterns mit dem Index *number_is* extrahiert, bei gleichzeitiger Ermittlung der zweidimensionalen gemittelten Koordinaten der Flächenschwerpunkte ($x_{is}[number_is]$, $y_{is}[number_is]$) und des Gesamtgrauwerts $gray_value_is[number_is]$ eines jeden Bildsterns. Bei der Berechnung der Schwerpunktpositionen wird verfahrenstern eine *Subpixel-Interpolation* durch arithmetische Mittelwertbildung der Koordinaten der relevanten *high-level-pixel* und bei Berücksichtigung einer Nachkommastelle zugelassen (1/10 Pixel).

Jedes so berücksichtigte *high-level-pixel* mit Index $w3$ wird nach einer Bildsternzuordnung in den Zustand *unsichtbar* versetzt ($visible_hlp[w3]=false$), zwecks Vermeidung der bereits oben erwähnten Doppelzuordnung dieses *high-level-pixel* zu mehr als einem Bildstern. Falls sich keine weiteren *high-level-pixel* in der Achter-Umgebung des aktuellen Bildsterns is_{number_is} finden lassen, so wird der Bildsternzähler *number_is* inkrementiert und ein neuer Bildstern is_{number_is+1} definiert, falls noch weitere als *sichtbar* gekennzeichnete *high-level-pixel* vorhanden sind. Das Segmentierungsverfahren ist vollständig abgeschlossen, wenn keine weiteren sichtbaren

high-level-pixel vorhanden sind. Der letzte Wert des Bildsternzählers *number_is* entspricht dann der Gesamtanzahl der Bildsterne.

Als Endergebnis des Segmentierungsverfahrens gemäß des im Bild 5.6 dargestellten Ablaufschemas liegen der Wert der Variablen der Anzahl der Bildsterne *number_is* und drei Listen bzw. Datenfelder mit folgenden Kenngrößen je Bildstern is_i vor:

- $x_{is}[1..number_is]$: Koordinaten der Flächenschwerpunkte in x-Richtung
- $y_{is}[1..number_is]$: Koordinaten der Flächenschwerpunkte in y-Richtung
- $gray_value_is[1..number_is]$: absolute Grauwerte

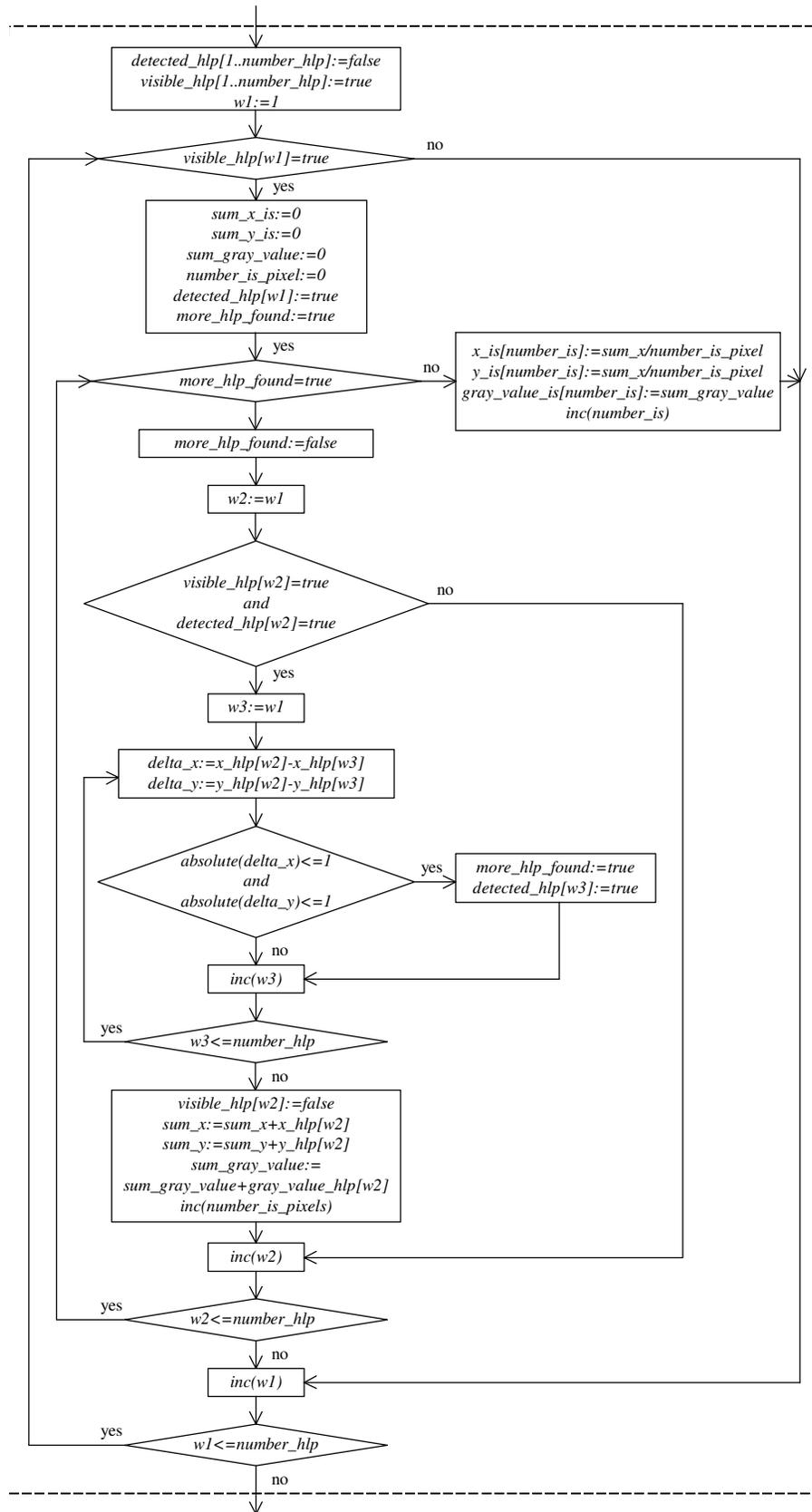


Bild 5.6: Vollständiges Ablaufschema des Verfahrens zur Segmentierung von Objekten bzw. Bildsternen (Modul *image-stars-segmentation*)

5.3 Zusammenfassung der Bilddatenvorverarbeitung

Abschließend erfolgt eine Kurzübersicht der innerhalb des Moduls *image-data-pre-processing* durchgeführten wichtigsten Sub-Module und Entscheidungen gemäß des in Bild 5.7 dargestellten Ablaufplans:

- Modul *init-image-data-variables*:
Bereitstellung (Allokierung) des zweidimensionalen Bilddatenspeichers (*image[1..image_width;1..image_length]*) und Grundinitialisierung aller benötigten Variablen zur Verarbeitung der Bilddaten.
- Modul *make-image-data-histogram*:
Ermittlung der absoluten und relativen Histogramme ($H_{absolut}(g)$, $H_{relativ}(g)$), der dazugehörigen kumulierten Histogramme der Summenhäufigkeiten ($H_{cum,absolut}(g)$, $H_{cum,relativ}(g)$) und der Entropie ($E(image)$) der aktuellen Roh-Bilddaten.
- Modul *check-image-data*:
Überprüfung der Bedingung 5.1 mittels Werten des kumulierten, absoluten Histogramms:

$$M-H_{cum,absolut}(threshold) \leq number_hlp_max \rightarrow image_data_ok=true$$
$$M-H_{cum,absolut}(threshold) > number_hlp_max \rightarrow image_data_ok=false$$

- Entscheidung auf Brauchbarkeit der Bilddaten (*image_data_ok?*):
Nur wenn die Anzahl der möglichen *high-level-pixel* die zugelassene Obergrenze *number_hlp_max* nicht überschreitet (*image_data_ok=true*), werden die Bilddaten für *brauchbar* angesehen und im folgenden eine Weiterverarbeitung innerhalb des Moduls *image-data-pre-processing* durchgeführt. Ansonsten (*image_data_ok=false*) wird das Modul *image-data-pre-processing* sofort beendet und auch keine nachfolgende tiefergehende Sternmustererkennung (Modul *match-n-stars-pattern*, Kapitel 6) durchgeführt, da die Anzahl der Bildsterne gleich *Null* ist (*number_is=0*).
- Module *get-high-level-pixel* und *release-image-data-memory*:
Extraktion der x- und y-Bildkoordinaten ($x_hlp[1..number_hlp]$, $y_hlp[1..number_hlp]$) und Grauwerte ($gray_value_hlp[1..number_hlp]$) aller *high-level-pixel*. Freigabe des Bilddatenspeichers (*release-image-data-memory*).
- Modul *image-stars-segmentation* (Kapitel 5.2):
Mittels der drei Kenngrößenlisten der *high-level-pixel* erfolgt die bereichsorientierte Ermittlung der Flächenschwerpunkte ($x_is[1..number_is]$, $y_is[1..number_is]$) und Grauwerte ($gray_value_is[1..number_is]$) der Bildsterne is_i nebst Bestimmung der Anzahl der Bildsterne (*number_is*).
- Entscheidung *number_is > 1?* und Ausführung des Moduls *image-stars-list-sorting*:
Falls mehr als ein Bildstern (*number_is > 1*) vorliegt, erfolgt die Sortierung der Bildsternliste in der Reihenfolge absteigender Grauwerte mit is_1 als hellsten Bildstern und is_{number_is} als dunkelsten Bildstern.
- Parameterübergabe an das nachfolgende Kernmodul zur Sternmustererkennung und Bestimmung der 3-axialen Lageparameter (Kapitel 6: Modul *match-n-stars-pattern* und Modul *calculate-3-axis-attitude*).

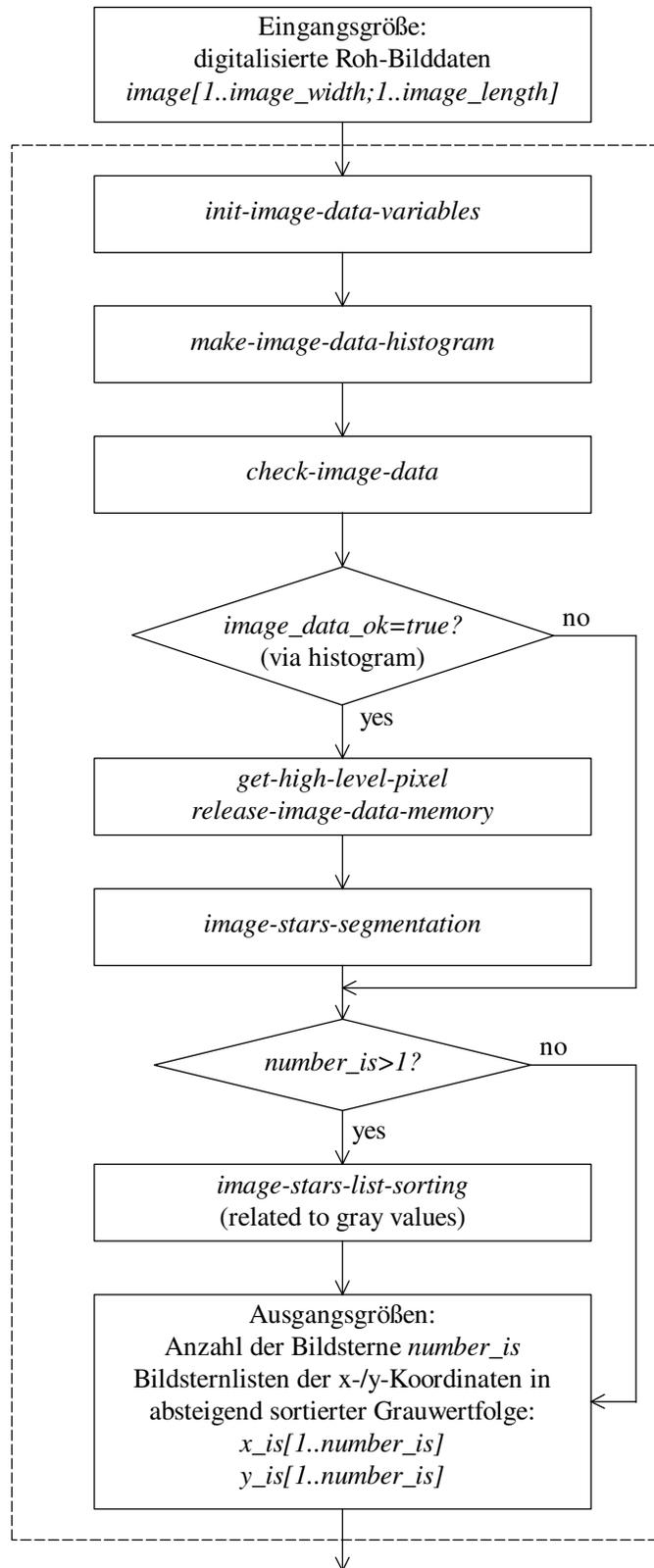


Bild 5.7: Übersicht der internen Sub-Module des Moduls *image-data-pre-processing*

6 Verfahren der 3-axialen Lagebestimmung mittels Sternmustererkennung

Das Verfahren zur Erkennung von unbekanntem Sternmuster, bestehend aus einer Anzahl von n Sternen (n -Sterne-Muster), basiert im wesentlichen auf einem Korrelationsverfahren (auch *Matching* genannt), bei dem das zu erkennende und über eine Himmelsaufnahme vorgegebene Sternmuster mit synthetisch aufgebauten Sternmustern, die aus den Angaben der Himmelskoordinaten von Katalogsternen eines Sternkatalogs generiert werden, verglichen und identifiziert wird. Unter dem Begriff *Sternmuster* wird der Winkelabstand von Sternen sowohl auf der Himmelsaufnahme (Bildsterne, *image-stars is*) als auch innerhalb des Sternkatalogs (Katalogsterne, *catalog-stars cs*) verstanden. Alle im Muster eingebundenen Sterne sind sowohl in der Bildstern- als auch in der Katalogsternkonstellation untereinander verbunden.

Ein aus Bildsternen bestehendes Sternmuster gilt als erkannt, wenn es sich unter Berücksichtigung einer zugelassenen Winkeltoleranz (*angle_tolerance*) vollständig mittels Katalogsternen rekonstruieren läßt und kein Spiegelbild (*mirror-image*, siehe Kapitel 6.6) der Bildvorlage darstellt (wie in Bild 6.1 anhand eines *5-Sterne-Musters* verdeutlicht). Helligkeitsinformationen von Sternen finden während des Korrelationsvorgangs keine Berücksichtigung, sondern nur bei der Auswahl des Sternmusters aus der Bildvorlage und bei der Auslegung des Sternkatalogs. Im Falle einer automatischen Bildsternauswahl werden die jeweils n hellsten Bildsterne zur Konstruktion eines n -Sterne-Musters mit $n=2..6$ hinzugezogen. Die *MATCH-IT* Programme erlauben bei Bedarf auch die manuelle Auswahl anderer Bildsterne. Die Rekonstruktion des Sternmusters erfolgt im folgenden also rein geometrisch. Die mehrdeutige Erkennung von Sternmustern ist ausdrücklich zugelassen, wobei jedoch die eindeutige Sternmustererkennung als Kriterium für einen *Erfolg* gewertet wird. Bei Bedarf können Mehrdeutigkeiten durch eine gesonderte Handhabung bearbeitet werden, um zu einer eindeutigen Lösung zu kommen (z.B. durch geeignete *Plausibilitätsbetrachtungen*, die bei Satellitenmissionen auf dem Trägheitsverhalten von Raumflugkörpern basieren). Aspekte zum Management von Mehrdeutigkeiten (*multiple-match*) werden im Rahmen dieser Dissertation jedoch nur diskutiert und sind nicht im realisierten Verfahren implementiert (Kapitel 4 und 9).

Die Idee des Matchings verfolgt den Gedanken, daß bereits wenige sternmusterbildende Bildsterne ausreichen, um das zu erkennende Bildsternmuster eindeutig zu identifizieren bzw. innerhalb der Wissensbasis des Sternkatalogs wiederzufinden. Es sind Verfahren zur Erkennung von Sternmustern mittels der *MATCH-IT* Programme implementiert worden, die Konstellationen, bestehend aus zwei bis zu sechs Sternen, erkennen können. Die Anzahl der durch die CCD-Sternenkamera abgebildeten Sterne kann durch die Auslegung von Bildsensor und Optik gesteuert werden (Anhang B). Dadurch kann abgesichert werden, daß eindeutige Identifizierungen von Sternmustern zur Lagebestimmung durch hinreichend *gute* Bildvorlagen bzw. entsprechend viele Bildsterne mit hoher Wahrscheinlichkeit möglich sind (siehe auch Kapitel 8, *Simulation*).

Ohne das Ergebnis des Erkennungsverfahrens qualitativ zu beeinflussen, können zur Reduzierung der Rechenlaufzeit zusätzliche Aspekte berücksichtigt werden, wie:

- die ausschließliche Betrachtung des Kosinus der Winkelabstände (Kosinuswinkelabstand) statt der Betrachtung der expliziten Winkelabstände
- die Berücksichtigung von nur solchen Katalogsternpaaren, die sinnvollerweise im Gesichtsfeld der CCD-Sternenkamera liegen können
- die *closest-stars* Methode (Kapitel 6.8)
- die Unterteilung des Sternkatalogs in *Sub-Sternkataloge* (Kapitel 6.10)

Abschließend können nach erfolgreicher Sternmustererkennung mittels einfacher Methoden der Vektoralgebra die 3-axialen Lageparameter (α_{att} , δ_{att} und ω_{att}) der Bildvorlage berechnet werden, sofern ein aus mindestens drei Sternen bestehendes Sternmuster vorliegt (Kapitel 6.7).

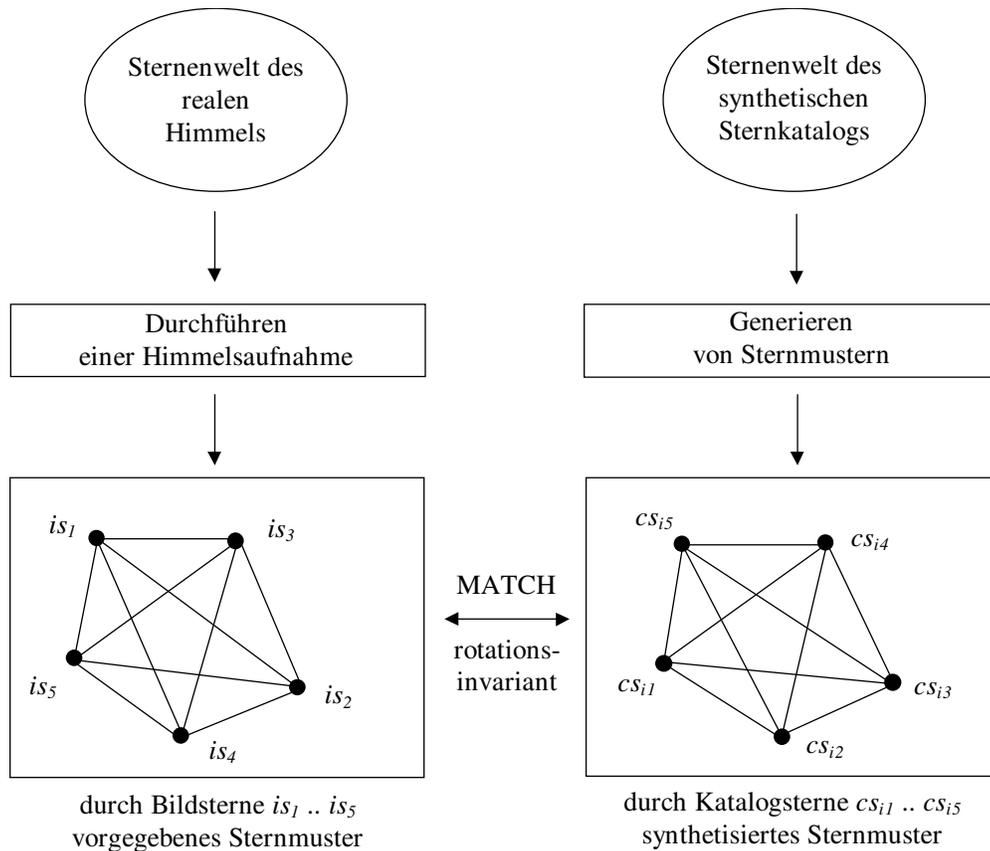


Bild 6.1: Matching eines durch Bildsterne vorgegebenen Sternmusters mittels Katalogsternen

Die wichtigsten Parameter hinsichtlich der Güte der Sternmustererkennung sowie auch hinsichtlich der Laufzeit des Korrelationsverfahrens auf Rechenmaschinen sind:

- *number_cs*: Anzahl der Einträge von Sternen im Sternkatalog
- *angle_per_pixel*: Faktor zur Umrechnung von Pixelabstand zu Winkelabstand
- *angle_tolerance*: erlaubte Winkelabweichung bei der Abstandserkennung von Sternen

Die grundlegenden Gedanken und Aspekte des Verfahrens zur Erkennung von Sternmustern sollen zunächst am Beispiel einer realen Himmelsaufnahme als eine Art *Rechnerexperiment* anschaulich dargelegt und diskutiert werden, die einen Ausschnitt des Sternbilds *Cassiopeia* zeigt (Bild 6.2 und 6.3). Je nach Anzahl der ausgewählten Bildsterne sind Verfahren zum Matching von zwei bis zu sechs Sternen implementiert. Aus den Beobachtungen der Ergebnisse des Rechnerexperiments wird später eine allgemeine und strenge Formulierung des Verfahrens zur Erkennung von Sternmustern abgeleitet (Kapitel 6.9). Die Verifikation des Verfahrens zur Erkennung von *n-Sterne-Mustern* wird sodann in Kapitel 7 anhand anderer realer Himmelsaufnahmen durchgeführt, sowie durch *Simulationen* mittels einer Vielzahl von künstlich generierten Bildvorlagen in Kapitel 8.

Im folgenden werden zur Verdeutlichung und Visualisierung der Ergebnisse des Matchings neben reinen Zahlenangaben auch *screen-shots* der graphischen Oberfläche (in invertierter Darstellung) der *MATCH-IT* Programme hinzugezogen, die neben einigen Statusinformationen auch den Himmel mit allen Sternen des zur Sternmustererkennung hinzugezogenen Sternkatalogs in der Zylinderprojektion darstellen. Außerdem werden die erkannten Sternmuster durch Linienverbindungen zwischen den erkannten Einzelsternen dargestellt. Bei einer Erkennung von drei Bildsternen und mehr werden auch die Kanten der Bildvorlage, die Bildmitte als Repräsentation der 2-axialen Lageinformation α_{att} bzw. δ_{att} und die Ausrichtung der x-Achse der Bildvorlage als Maß des dritten Lageparameters *dritter Winkel* ω_{att} eingezeichnet (illustriert in Bild 6.4a und 6.4b).



Bild 6.2: Himmelsaufnahme des Sternmusters *Cassiopeia* (invertiertes Original)

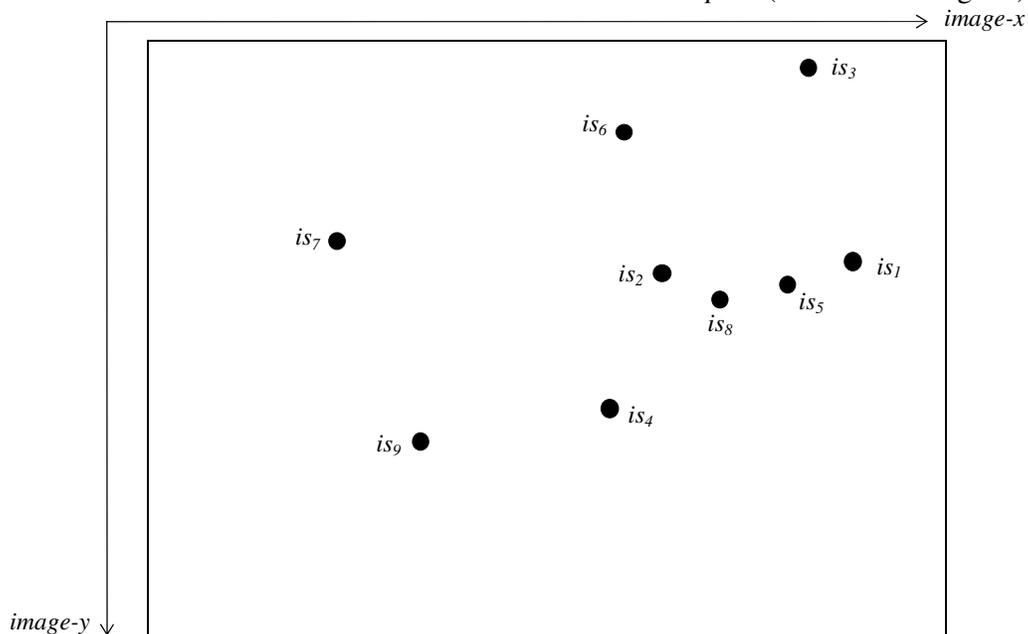


Bild 6.3: Himmelsaufnahme *Cassiopeia* mit neun hervorgehobenen Bildsternen is_1 bis is_9

Die Himmelsaufnahme *Cassiopeia* (Bild 6.2) wurde mit der in Anhang B vorgestellten CCD-Sternenkamera gewonnen, wie auch alle anderen Himmelsaufnahmen, welche im Rahmen dieser vorliegenden Arbeit benutzt werden (Kapitel 7). Die Darstellung dieser sowie aller anderen Himmelsaufnahmen erfolgt in invertierter Form, also in der Negativdarstellung mit schwarzen Sternen vor weißem Himmelshintergrund. Die Belichtungszeit der Himmelsaufnahme *Cassiopeia* beträgt $T=1100ms$ und zeigt neun Bildsterne bis zu einer visuellen Helligkeit von $mag=4,24$ (verdeutlicht dargestellt in Bild 6.3). Tabelle 6.1 gibt einen Überblick der abgebildeten neun Bildsterne in einer Sortierfolge gemäß der Objekt- bzw. Bildsterngrauwerte. Es ist zu erkennen, daß diese Reihenfolge nicht exakt die der visuellen Helligkeit (Magnitude mag) entspricht, da die spektrale Empfindlichkeit der CCD-Sternenkamera anders ausgeprägt ist als die des menschlichen Auges bzw. die der im Sternkatalog angegebenen Helligkeiten. Dies verdeutlicht einmal mehr die Anforderung an eine spektrale Kalibrierung von Bildaufnehmer und Sternkatalog, um einen Sternkatalog mit minimaler Anzahl von Einträgen zu generieren (Anhang B). Ein Sternkatalog, der Katalogsterne bis zur visuellen Helligkeit von $mag=5,0$ beinhaltet, sollte jedoch alle von der CCD-Sternenkamera detektierbaren Sterne beinhalten und als geeignete Grundlage dienen, um die Aufnahme *Cassiopeia* nachstehend zu behandeln.

Die Sternkatalogdatei *uptomag_5.0* deckt den Himmel bis zu einschließlich einer visuellen Helligkeit von $mag=5,0$ mit 1370 Sterneinträgen vollständig ab und stellt einen Sternkatalog dar, der alle Sterne beinhaltet, die bei praktisch relevanten Belichtungszeiten von der benutzten CCD-Sternenkamera aufgenommen werden können, einschließlich eines geringen *overheads* an Sterneinträgen. Der Sternkatalog *uptomag_4.0* beinhaltet mit 427 Einträgen jedoch nur Sterne bis zur visuellen Helligkeit von $mag=4,0$ und umfaßt daher nicht alle Sterne der Bildvorlage *Cassiopeia*. Die Datei *uptomag_6.0* ist ein Sternkatalog, der Sterne bis zu einer visuellen Helligkeit von $mag=6,0$ aufweist und 4480 Einträge zählt. Dieser Sternkatalog umfaßt daher auch sehr viele Sterne, die von der CCD-Sternenkamera bei der gewählten Belichtungszeit von $T=1100ms$ nicht detektierbar sind. Alle drei Dateien *uptomag_4.0*, *uptomag_5.0* und *uptomag_6.0* werden als Sternkataloge innerhalb dieses Kapitels auf die Bildvorlage *Cassiopeia* zur Erkennung von verschiedenen *n-Sterne-Mustern* angesetzt.

Bildstern	Bildsternname	Rektaszension α	Deklination δ	Magnitude mag
1	α Cas (Schedir)	0h 37,7m	+56° 16'	2,47
2	γ Cas (Cih)	0h 53,7m	+60° 27'	1,6 - 3,0 (var)
3	β Cas (Caph)	0h 06,5m	+58° 52'	2,42
4	δ Cas (Ksora)	1h 22,5m	+59° 59'	2,8
5	η Cas (Achrid)	0h 46,1m	+57° 33'	3,64
6	κ Cas	0h 30,1m	+62° 39'	4,24
7	ψ Cas (Doppelstern)	1h 43,0m	+70° 40'	4,8
8	υ Cas (Doppelstern)	0h 56,0m	+59° 05'	4,1
9	ϵ Cas (Segin)	1h 50,8m	+63° 25'	3,44

Tabelle 6.1: Übersicht zu den im Sternmuster *Cassiopeia* abgebildeten Sternen is_1 bis is_9

Darstellung der vollständigen Himmelskugel
in der Zylinderprojektion

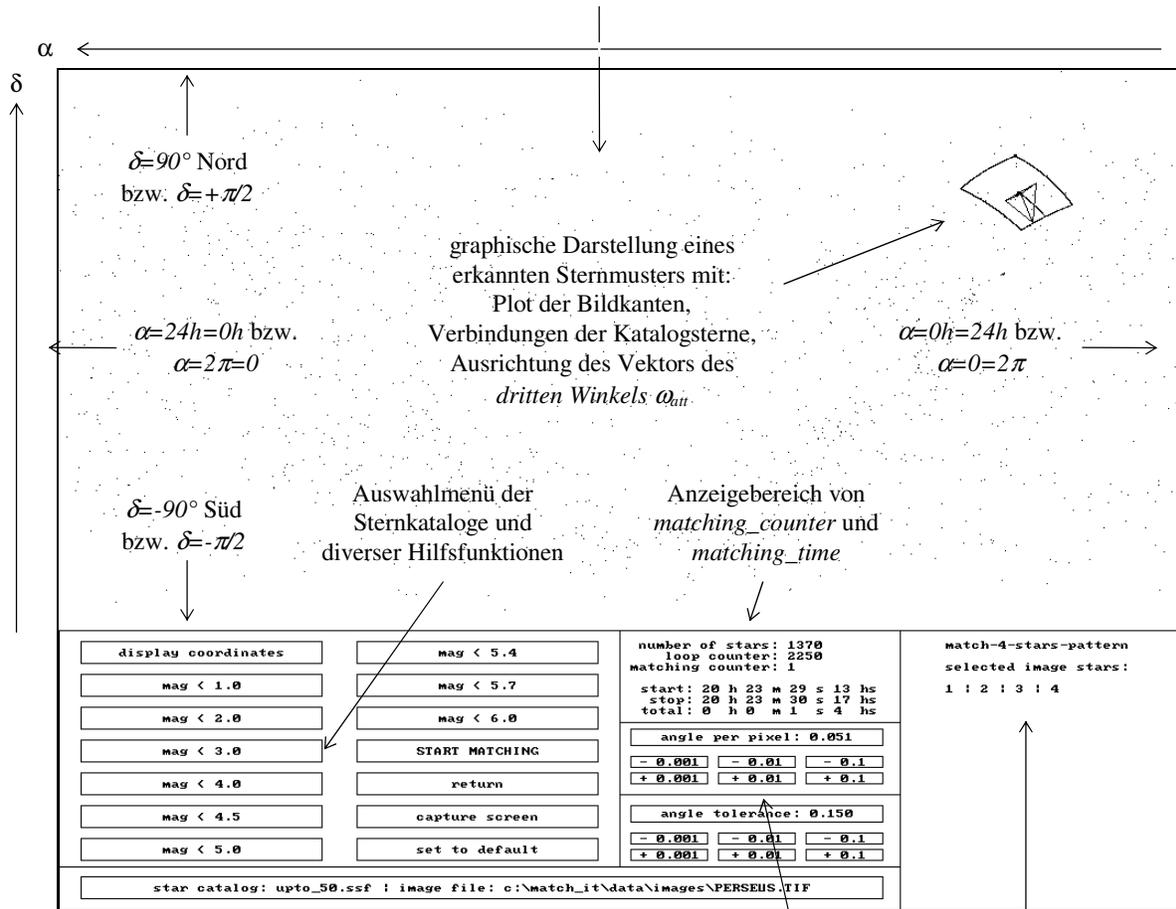


Bild 6.4a: Zur graphischen Ergebnisdarstellung der Sternmustererkennung mittels *screen-shots* der Benutzeroberfläche der MATCH-IT Programme

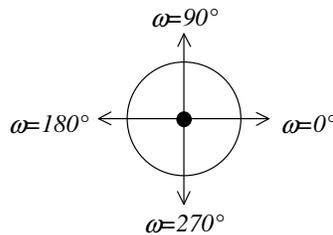


Bild 6.4b: Zur Ausrichtung der Bildrotation bzw. des Lageparameters *dritter Winkel* ω_{III}

Die untere Winkeltoleranzgrenze $angle_distance_{is_x \leftrightarrow is_y} - angle_tolerance$ darf jedoch den Wert 0 nicht unterschreiten, was einer Winkelkosinusobergrenze $cos_{is_x \leftrightarrow is_y_max}$ von 1 entsprechen würde. Die Winkelbreite eines Match-Bereichs entspricht stets dem Zweifachen der Winkeltoleranz $angle_tolerance$. Zu beachten ist hierbei, daß die Kosinusfunktion monoton fallend und eindeutig ist im Argumentbereich $[0^\circ..180^\circ]$ bzw. $[0..\pi]$. Das für Bildsterne is_1 und is_2 ermittelte Intervall $cos_{is_1 \leftrightarrow is_2_max}..cos_{is_1 \leftrightarrow is_2_min}$ ist gleichzeitig die Vorgabe für eine erfolgreiche Doppelsternererkennung mittels der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i2} :

- $[cos_{is_1 \leftrightarrow is_2_max}..cos_{is_1 \leftrightarrow is_2_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i2}

Nach abgeschlossener Initialisierung wird im nächsten Schritt der Sternkatalog hinzugezogen, welcher $number_cs$ Einträge besitzt. Es werden mittels Gleichung 6.37 bzw. A.2 aus Anhang A.2 (Formalismus zur Skalarproduktbildung zweier kartesischer und einheitsvektorieller Sternkoordinaten) und einer Schleifenstruktur (zur Bildung der Indizes $i1$ und $i2$) sämtliche Kosinuswinkelabstände $cos_{cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i2}}$ aller Katalogsterne (cs_1 bis cs_{number_cs}) untereinander gebildet, die sinnvollerweise im Gesichtsfeld (fov) des Bildaufnehmersystems liegen können. Dies geschieht durch vorherigen Vergleich der aktuellen Deklinationsdifferenz $diff_delta$ der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i2} mit dem maximalen Winkelabstand $delta_max$ der Bildsterne is_1 und is_2 . Nur wenn die Bedingung $diff_delta(cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i2}) < delta_max$ erfüllt ist, wird überprüft, ob $cos_{cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i2}}$ innerhalb des durch $cos_{is_1 \leftrightarrow is_2_max}$ und $cos_{is_1 \leftrightarrow is_2_min}$ begrenzten Kosinuswinkelintervalls liegt (Bild 6.5). Falls dies der Fall ist, gelten die gerade aktuellen Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i2} als gefundene Lösung für ein 2-Sterne-Muster (Bedingung 6.1). Der Zähler zur Sternmustererkennung $matching_counter$ wird daraufhin inkrementiert. Das Ablaufschema zur Erkennung eines 2-Sterne-Musters (realisiert durch das Modul *match-2-stars-pattern*) ist in Bild 6.8 vollständig dargestellt.

Für eine erfolgreiche Erkennung eines 2-Sterne-Musters muß also gelten:

$$(cos_{cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i2}} < cos_{is_1 \leftrightarrow is_2_max}) \text{ and } (cos_{cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i2}} > cos_{is_1 \leftrightarrow is_2_min}) = true$$

(Bedingung 6.1)

Angewandt auf die beiden Bildsterne is_1 und is_2 der Himmelsaufnahme *Cassiopeia*, bedeutet der soeben beschriebene Vorgang das Auffinden sämtlicher Doppelsterne innerhalb des Sternkatalogs, welche den Winkelabstand der Bildsterne αCas und γCas aufweisen, unter Berücksichtigung der Winkeltoleranz $angle_tolerance$. Jedoch ist nach erfolgreicher Erkennung eines 2-Sterne-Musters keine eindeutige Zuordnung zwischen den Bildsternen (is_1 und is_2) und den gefundenen Katalogsternen (cs_{i1} und cs_{i2}) gegeben (veranschaulicht dargestellt in Bild 6.7) - dies gelingt erst bei der Erkennung eines aus mindestens drei Sternen bestehenden n -Sterne-Musters. Somit kann nach erfolgreicher Erkennung eines 2-Sterne-Musters keine exakte Berechnung der Himmelskoordinaten der Bildmitte durchgeführt werden und daher auch keine Bestimmung der 3-axialen Lageparameter. Dadurch begründet wird das Modul *match-2-stars-pattern* für die automatische Lagebestimmung mittels Sternmustererkennung nicht hinzugezogen, zumal auch die Mehrdeutigkeit gefundener Lösungen im allgemeinen sehr problematisch ist, was auch die folgenden Beispiele anhand verschieden umfangreicher Sternkataloge und variiertes Winkeltoleranzen $angle_tolerance$ zeigen werden (Bild 6.9 bis 6.14).

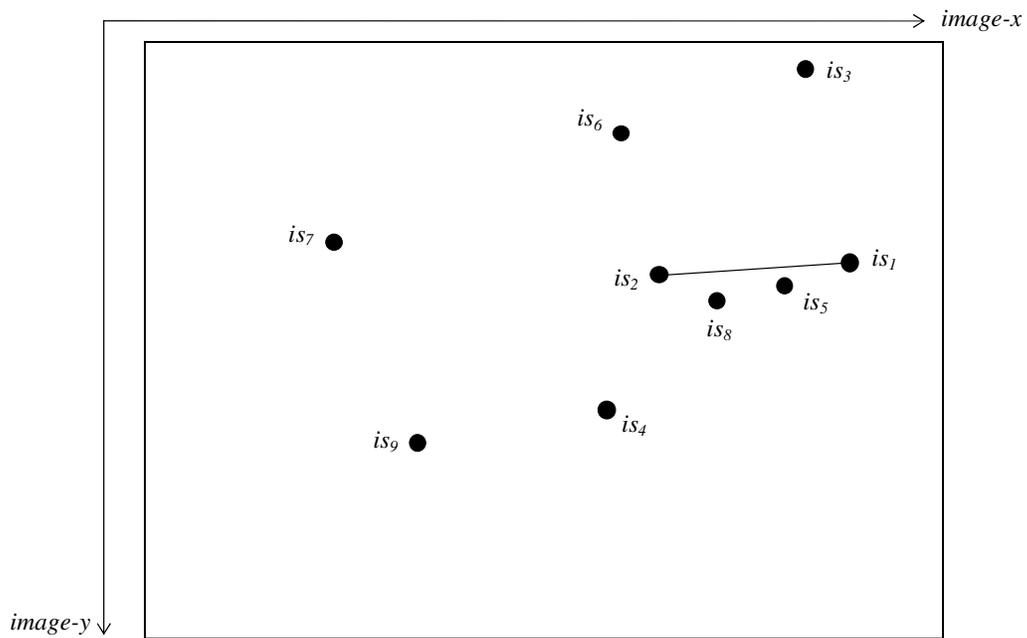


Bild 6.6: 2-Sterne-Muster der zwei hellsten Bildsterne is_1 und is_2 im Sternmuster *Cassiopeia*

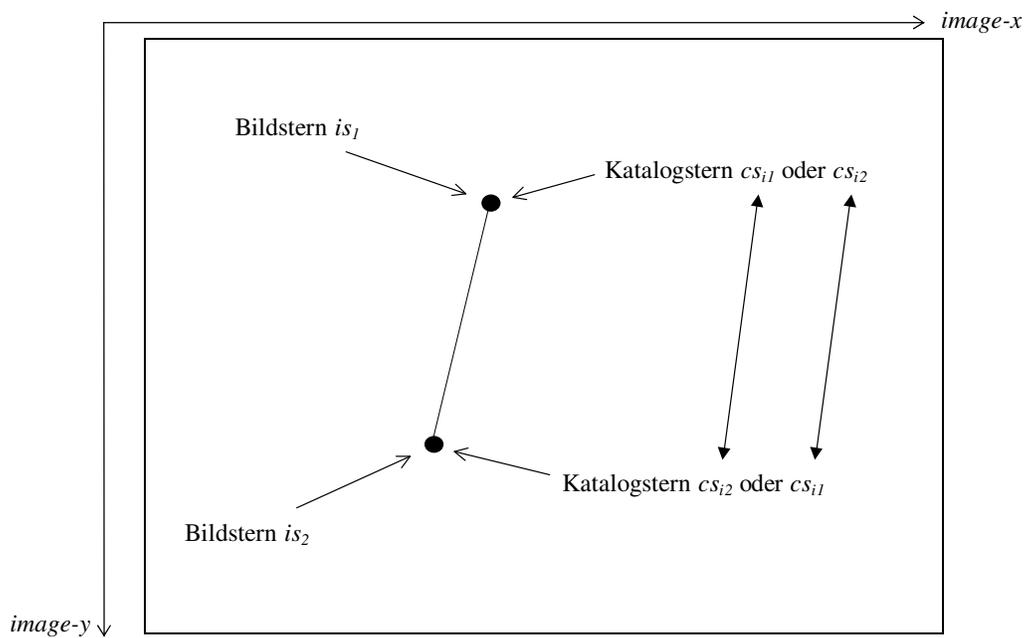


Bild 6.7: Generelle Problematik der Zweideutigkeit bei der Zuordnung von nur zwei vorliegenden Bild- und Katalogsternen

Bild 6.9 und Bild 6.10 zeigen gefundene Lösungen für Doppelsterne innerhalb des Sternkatalogs *uptomag_4.0*, die dem Doppelsternmuster α Cas und γ Cas entsprechen. Bei einer zugelassenen Winkeltoleranz von $angle_tolerance=0,25^\circ$ liegen 33 Lösungen vor (Bild 6.9). Bei $angle_tolerance=0,1^\circ$ reduzieren sich die gefundenen Doppelsterne auf 16 Sternpaare (Bild 6.10). Eine weitere Reduzierung der Winkeltoleranz als $angle_tolerance<0,1^\circ$ ist im allgemeinen aber nicht sinnvoll, da sonst zum einen die Ungenauigkeiten der örtlichen Pixelquantisierung bei der Abbildung auf dem CCD-Sensor des Bildaufnehmersystems und zum anderen die Abbildungsfehler des Objektivs die Winkeltoleranz $angle_tolerance$ überwiegen. Bild 6.11 und Bild 6.12 liegt der Sternkatalog *uptomag_5.0* zugrunde. Die Anzahl gefundener Doppelsterne liegt bei 427 ($angle_tolerance=0,25^\circ$) bzw. 153 ($angle_tolerance=0,1^\circ$) Sternpaaren. Bei Nutzung des Sternkatalogs *uptomag_6.0* explodiert die Anzahl gefundener Lösungen, wie in Bild 6.13 ($angle_tolerance=0,25^\circ$) und Bild 6.14 ($angle_tolerance=0,1^\circ$) deutlich zu sehen ist.

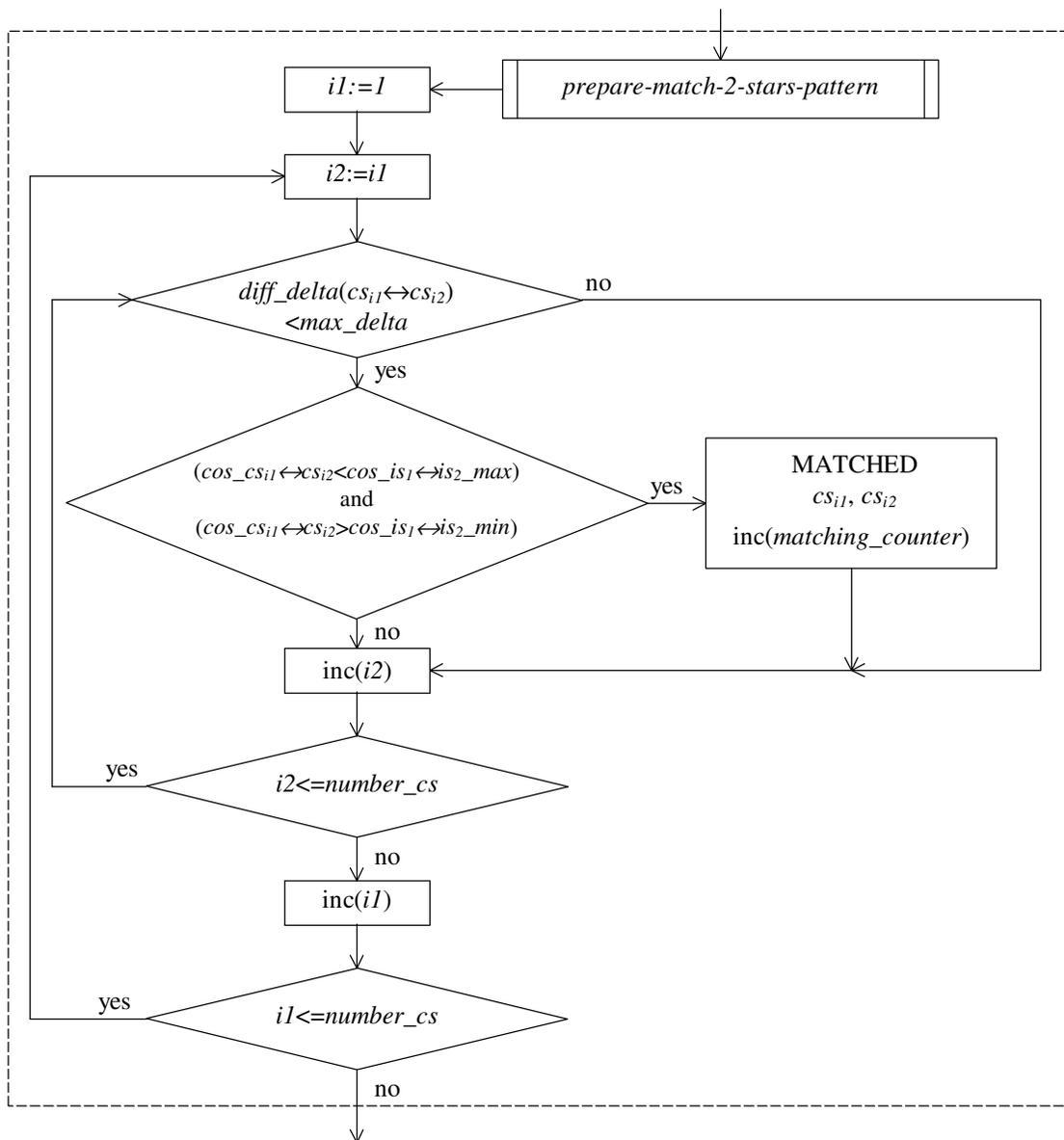


Bild 6.8: Ablaufschema des Moduls *match-2-stars-pattern*

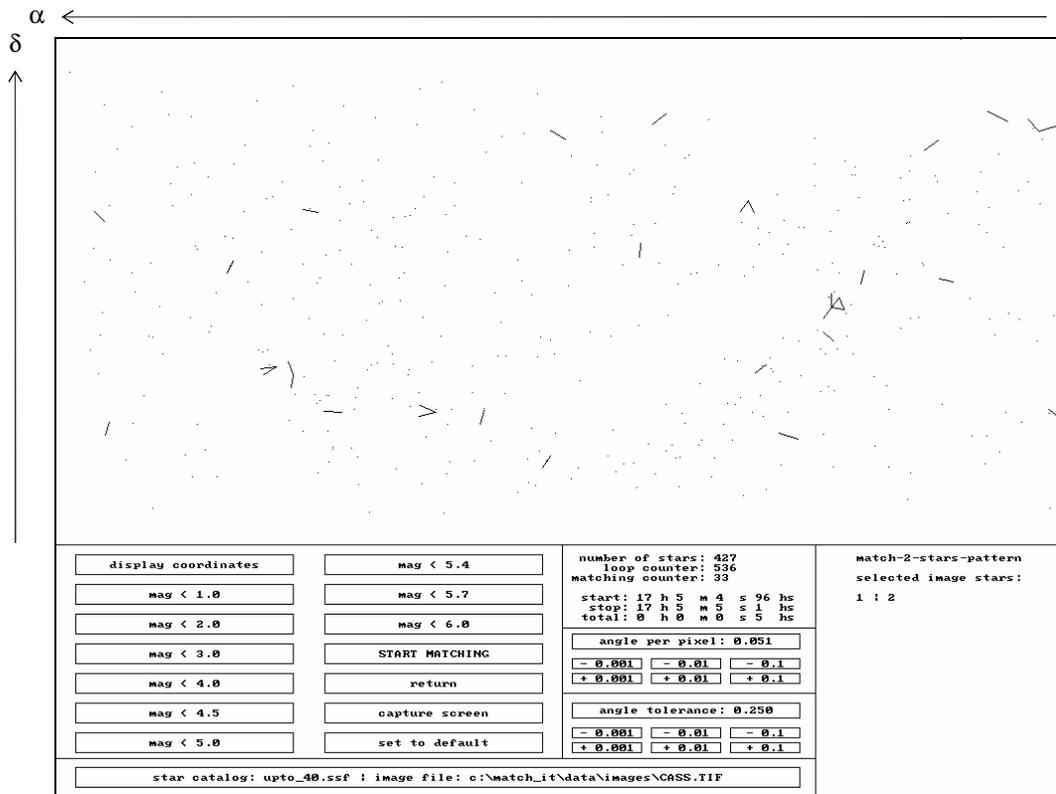


Bild 6.9: 33 erkannte 2-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_4.0*, 427 Sterne, *angle_tolerance=0,25°*)

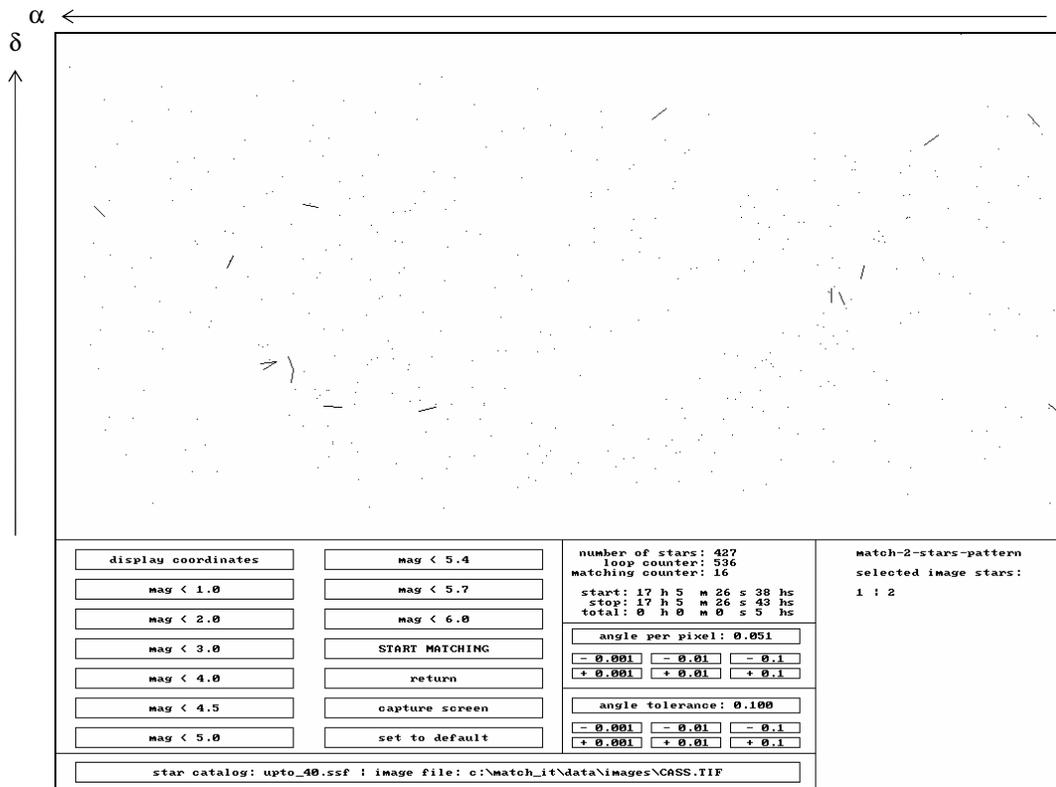


Bild 6.10: 16 erkannte 2-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_4.0*, 427 Sterne, *angle_tolerance=0,1°*)

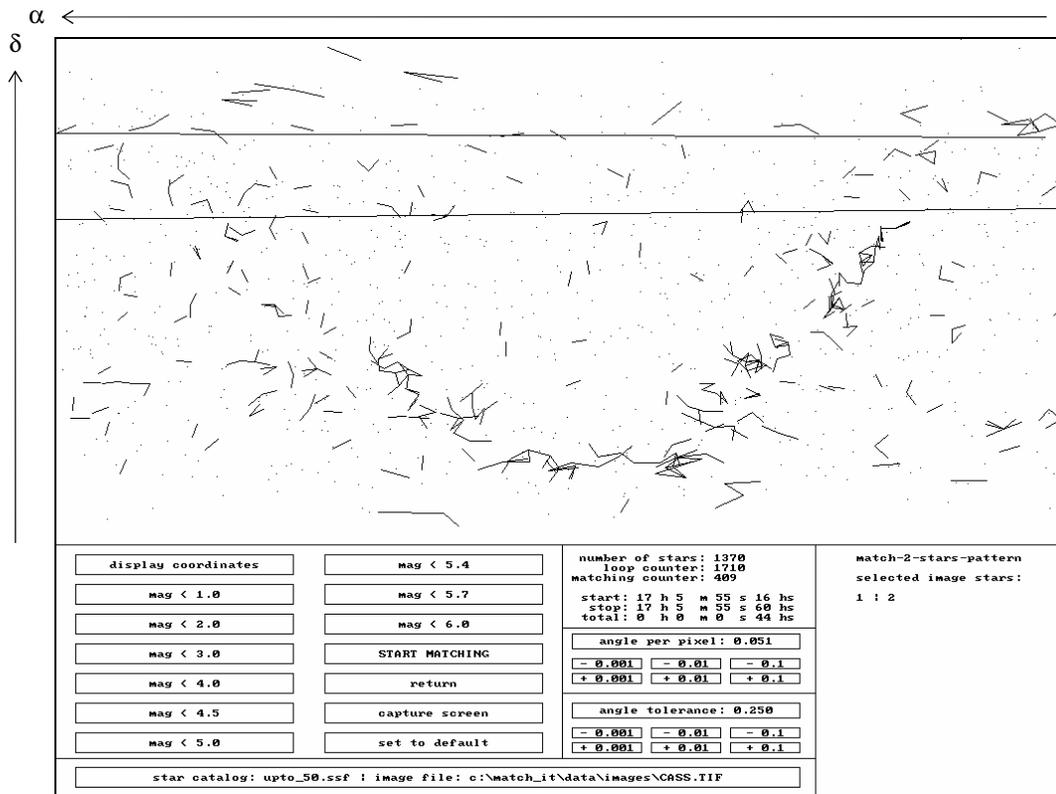


Bild 6.11: 409 erkannte 2-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,25°*)

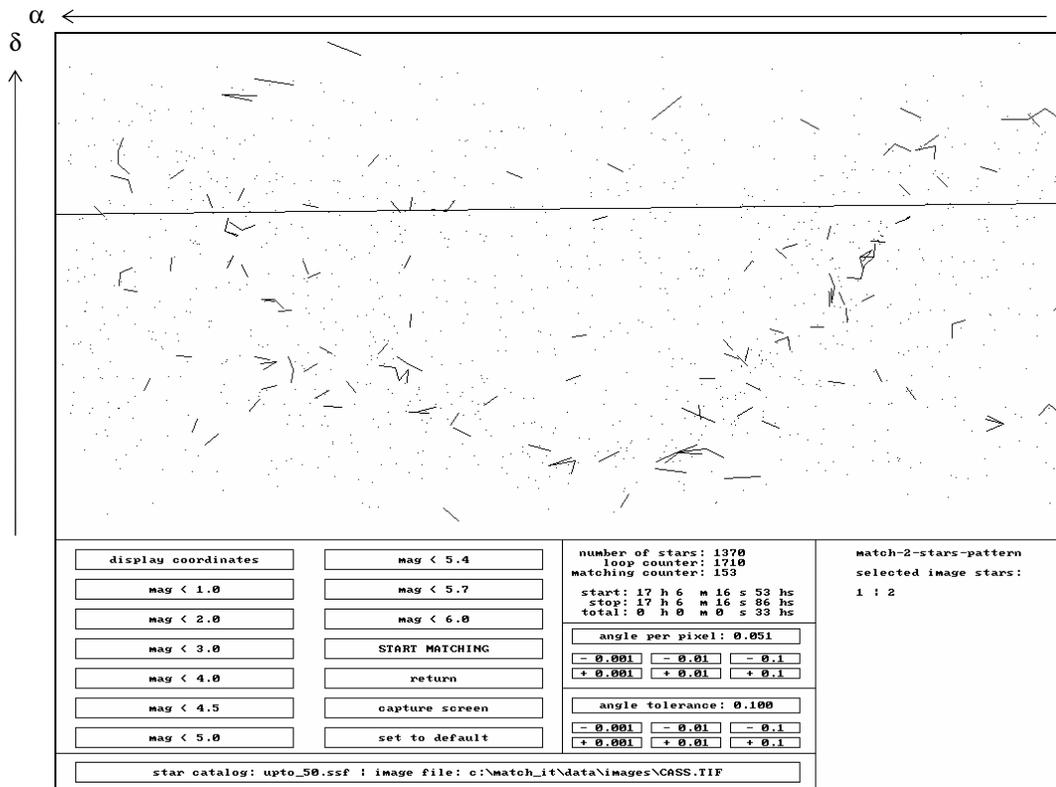


Bild 6.12: 153 erkannte 2-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance= 0,1°*)

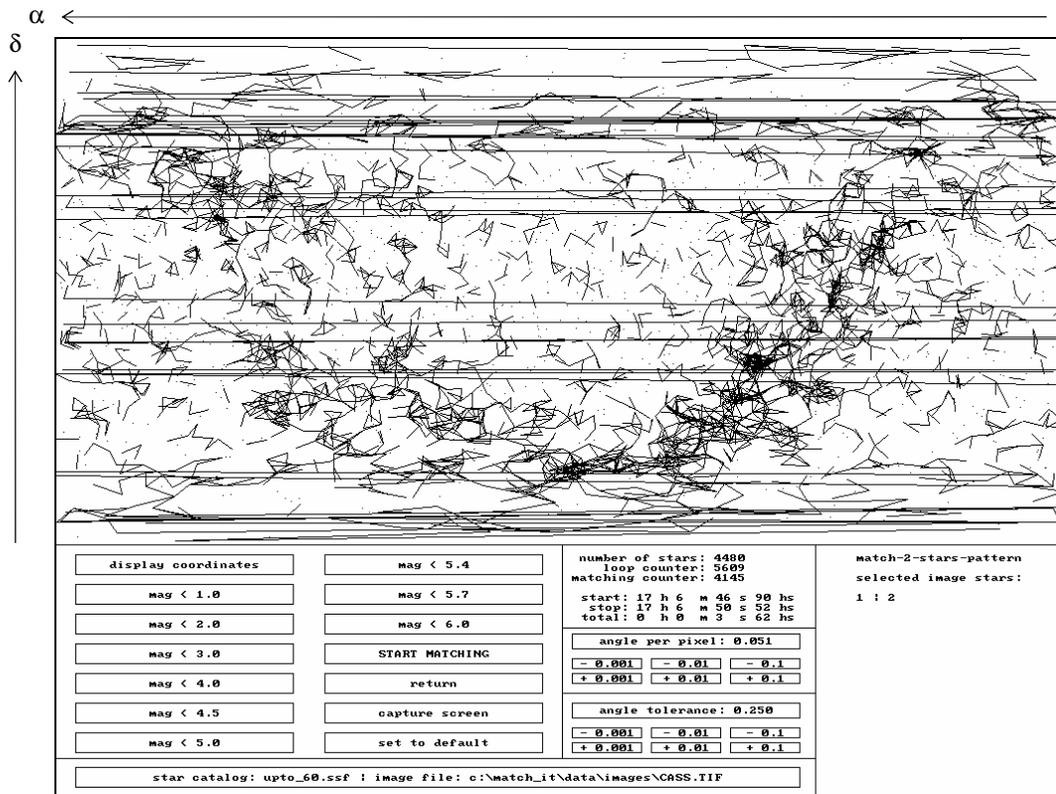


Bild 6.13: 4145 erkannte 2-Sterne-Muster bei Cassiopeia
 (Sternkatalog: *uptomag_6.0*, 4480 Sterne, *angle_tolerance=0,25°*)

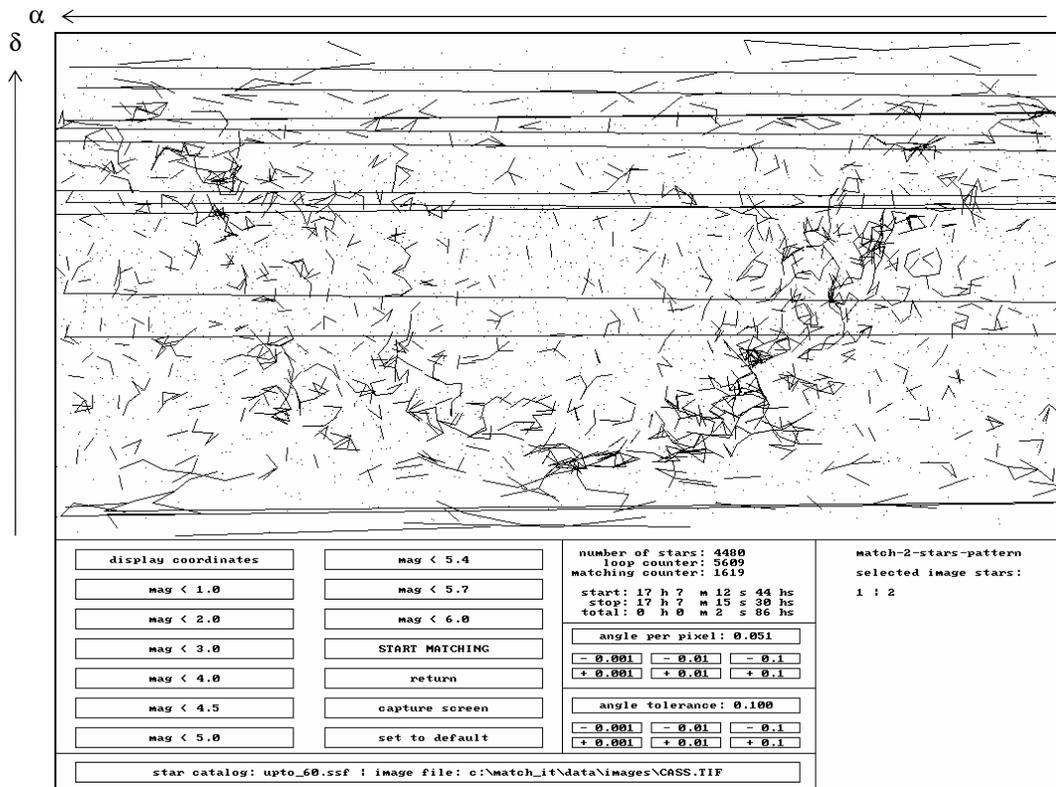


Bild 6.14: 1619 erkannte 2-Sterne-Muster bei Cassiopeia
 (Sternkatalog: *uptomag_6.0*, 4480 Sterne, *angle_tolerance=0,1°*)

6.2 Erkennung von 3-Sterne-Mustern (*match-3-stars-pattern*)

Das aus den drei hellsten Bildsternen der Bildvorlage *Cassiopeia* gebildete *3-Sterne-Muster* zeigt Bild 6.15. Dem *2-Sterne-Muster* (Bild 6.6), bestehend aus den Bildsternen is_1 (α Cas) und is_2 (γ Cas), wird Bildstern is_3 (β Cas) hinzugefügt. Das Initialisierungsmodul *prepare-match-3-star-pattern* führt zunächst (analog zu *prepare-match-2-stars-pattern* des Moduls *match-2-stars-pattern*) verschiedene Wertezuweisungen durch, um letztendlich die zugelassenen Kosinuswinkeltoleranzbereiche aller Bildsternverbindungen untereinander zu ermitteln. Aus den Bildsternabständen $pixel_distance_{is_1 \leftrightarrow is_3}$ und $pixel_distance_{is_2 \leftrightarrow is_3}$, dem *Pixel-zu-Winkel* Umrechnungsfaktor $angle_per_pixel$ und der Winkeltoleranz $angle_tolerance$ ergeben sich zwei weitere Kosinuswinkelintervalle:

- $[cos_{is_1 \leftrightarrow is_2_max}..cos_{is_1 \leftrightarrow is_2_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i2}
- $[cos_{is_1 \leftrightarrow is_3_max}..cos_{is_1 \leftrightarrow is_3_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i3}

Somit liegen drei Kosinuswinkelintervalle zur Erkennung eines *3-Sterne-Musters* vor:

- $[cos_{is_1 \leftrightarrow is_2_max}..cos_{is_1 \leftrightarrow is_2_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i2}
- $[cos_{is_1 \leftrightarrow is_3_max}..cos_{is_1 \leftrightarrow is_3_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i3}
- $[cos_{is_2 \leftrightarrow is_3_max}..cos_{is_2 \leftrightarrow is_3_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i2} und cs_{i3}

Veranschaulicht wird das Ablaufschema des Moduls *match-3-stars-pattern*, das eine konsequente Erweiterung des Moduls *match-2-stars-pattern* darstellt, in Bild 6.16. Durch die Indizes $i1$ und $i2$ wird zunächst die bereits bekannte Programmschleife zur Erzeugung von Katalogdoppelsternen cs_{i1} und cs_{i2} und Berechnung deren jeweiligen Kosinuswinkelabstands $cos_{cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i2}}$ aufgebaut, die als erkannt gilt, sobald die Bedingung 6.1 erfüllt ist. Dann und nur dann wird über eine weitere Programmschleife ein dritter Katalogstern cs_{i3} (Index $i3$ wird von 1 bis $number_cs$ durchlaufen) aus dem Sternkatalog hinzugenommen, wobei dessen Kosinuswinkelabstände $cos_{cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i3}}$ und $cos_{cs_{i2} \leftrightarrow cs_{i3}}$ zu den zuvor gefundenen Katalogsternen cs_{i1} und cs_{i2} passen bzw. innerhalb der durch die Bildsterne vorgegebenen *Match-Bereiche* liegen muß.

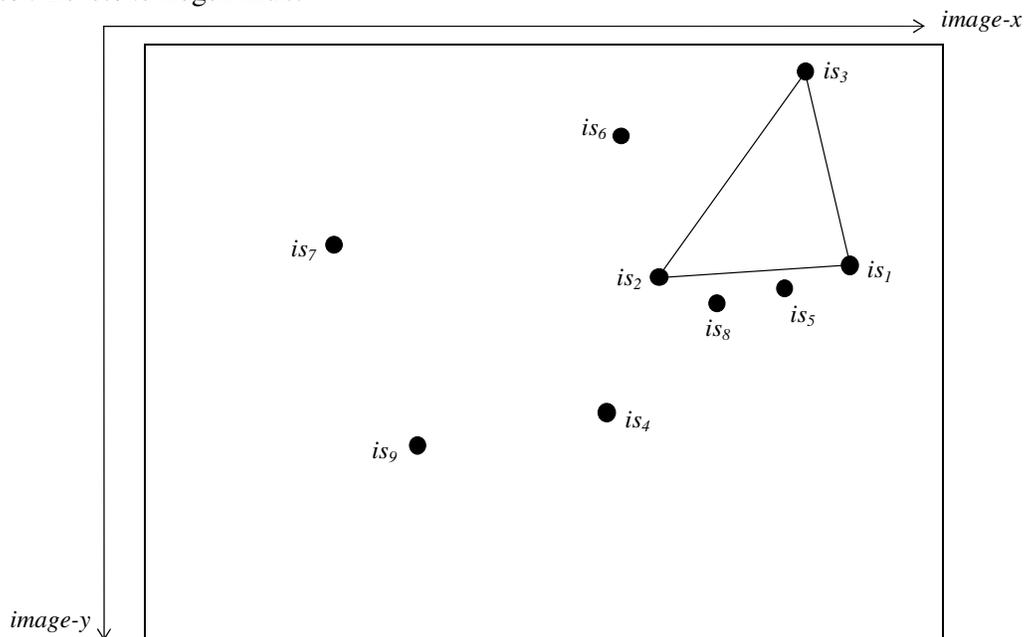


Bild 6.15: *3-Sterne-Muster* der drei hellsten Bildsterne is_1 bis is_3 im Sternmuster *Cassiopeia*

Es ist jedoch zu berücksichtigen, daß bezüglich der Zuordnung der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i2} zu den Bildsternen is_1 und is_2 zwei Möglichkeiten bestehen:

- Bildstern is_1 entspricht Katalogstern cs_{i1} und Bildstern is_2 entspricht Katalogstern cs_{i2} oder vertauscht:
- Bildstern is_1 entspricht Katalogstern cs_{i2} und Bildstern is_2 entspricht Katalogstern cs_{i1}

Der letztgenannte Umstand wird dadurch abgefangen, daß zwei Abfragen zur Erkennung des von den Katalogsternen cs_{i1} , cs_{i2} und cs_{i3} gebildeten *3-Sterne-Musters* stattfinden:

Für die erste Möglichkeit gilt:

$$\begin{aligned} & (cos_cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i3} < cos_is_1 \leftrightarrow is_{3_max}) \text{ and } (cos_cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i3} > cos_is_1 \leftrightarrow is_{3_min}) \\ & \text{and} \\ & (cos_cs_{i2} \leftrightarrow cs_{i3} < cos_is_2 \leftrightarrow is_{3_max}) \text{ and } (cos_cs_{i2} \leftrightarrow cs_{i3} > cos_is_2 \leftrightarrow is_{3_min}) = true \end{aligned}$$

(Bedingung 6.2)

Für die zweite Möglichkeit gilt:

$$\begin{aligned} & (cos_cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i3} < cos_is_2 \leftrightarrow is_{3_max}) \text{ and } (cos_cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i3} > cos_is_2 \leftrightarrow is_{3_min}) \\ & \text{and} \\ & (cos_cs_{i2} \leftrightarrow cs_{i3} < cos_is_1 \leftrightarrow is_{3_max}) \text{ and } (cos_cs_{i2} \leftrightarrow cs_{i3} > cos_is_1 \leftrightarrow is_{3_min}) = true \end{aligned}$$

(Bedingung 6.3)

Falls entweder Bedingung 6.2 oder Bedingung 6.3 erfüllt ist, so gilt das durch die Bildsterne is_1 , is_2 und is_3 vorliegende Sternmuster als vorläufig durch die Katalogsterne cs_{i1} , cs_{i2} und cs_{i3} erkannt.

Sind insgesamt betrachtet die Bedingungen 6.1 und 6.2 für wahr (*true*) befunden worden, so gilt folgende Korrespondenz zwischen den Bildsternen und Katalogsternen:

- Bildstern is_1 → Katalogstern cs_{i1}
- Bildstern is_2 → Katalogstern cs_{i2}
- Bildstern is_3 → Katalogstern cs_{i3}

Sind hingegen die Bedingungen 6.1 und 6.3 für wahr (*true*) befunden worden, so liegt eine Vertauschung der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i2} vor:

- Bildstern is_1 → Katalogstern cs_{i2}
- Bildstern is_2 → Katalogstern cs_{i1}
- Bildstern is_3 → Katalogstern cs_{i3}

Im nächsten und nicht im Ablaufschema in Bild 6.16 dargestellten Verfahrensschritt wird sicherheitshalber überprüft, ob die drei Katalogsterne cs_{i1} , cs_{i2} und cs_{i3} als zwingende Notwendigkeit voneinander verschieden sind. Diese Überprüfung macht Sinn, da - bedingt durch die Schleifenstruktur zur Bildung der Indizes $i1$, $i2$ und $i3$ - gleiche Katalogsterne cs_{ix} und cs_{iy} vorliegen können, wenn deren Winkelabstand geringer ist als das Doppelte der vorgegebenen Winkeltoleranz *angle_tolerance*.

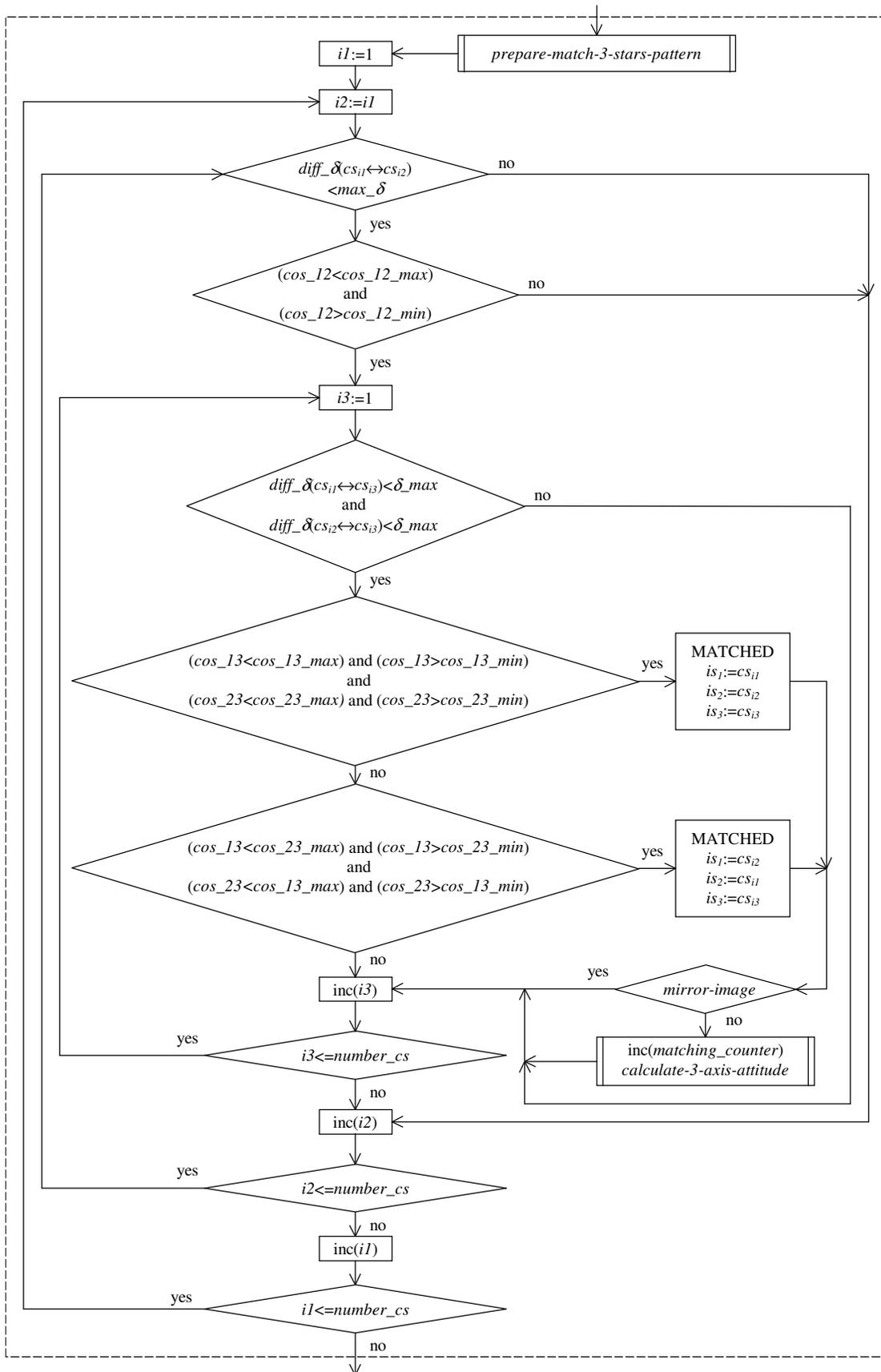


Bild 6.16: Ablaufschema des Moduls *match-3-stars-pattern*

Zur entgeltigen Absicherung des erkannten Sternmusters muß noch überprüft werden, ob das ausschließlich mittels Kosinuswinkelabständen gefundene Sternmuster nicht ein Spiegelbild (*mirror-image*) der Bildvorlage darstellt. Diese Problematik wird gesondert in Kapitel 6.6 behandelt. Liegt kein *mirror-image* vor, so werden abschließend die 3-axialen Lageparameter der gefundenen Sternkonstellation durch das Modul *calculate-3-axis-attitude* bestimmt (siehe Kapitel 6.7) und der Zähler der Sternmustererkennung *matching_counter* inkrementiert.

Auch innerhalb des Moduls *match-3-stars-pattern* wird vor allen Berechnungen des Kosinuswinkelabstands zwischen zwei Katalogsternen (mittels Skalarproduktbildung der einheitsvektorierten Sternkoordinaten gemäß Gleichung A.2) zwecks deutlicher Einsparung von Rechenzeit zuvor überprüft, ob die Deklinationsdifferenz $diff_delta(cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy})$ der gerade aktuellen Katalogsterne cs_{ix} und cs_{iy} überhaupt sinnvoll zur Weiterverarbeitung ist. Anders ausgedrückt: Die Deklinationsdifferenz $diff_delta(cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy})$ zwischen den beiden Katalogsternen cs_{ix} und cs_{iy} muß kleiner sein als der maximal mögliche Deklinationsabstand von Bildsternen $delta_max$, damit der Kosinuswinkelabstand der Katalogsterne cs_{ix} und cs_{iy} überhaupt berechnet bzw. berücksichtigt wird. Durch den maximalen Winkelabstand der Verbindungen der drei Bildsterne is_1 , is_2 und is_3 wird $delta_max$ vorgegeben. Konkret ausgedrückt, findet bei der äußeren Schleifenstruktur (Indizes $i1$ und $i2$) eine Überprüfung der Deklinationsdifferenz $diff_delta(cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i2})$ zwischen den Katalogsternen cs_{i1} und cs_{i2} statt. Bei der durch den Index $i3$ gebildeten inneren Schleife werden sowohl die Deklinationsdifferenz $diff_delta(cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i3})$ zwischen den Katalogsternen cs_{i1} und cs_{i3} sowie die Deklinationsdifferenz $diff_delta(cs_{i2} \leftrightarrow cs_{i3})$ zwischen den Katalogsternen cs_{i2} und cs_{i3} überprüft, wobei jeweils gelten muß: $diff_delta(cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}) < delta_max$.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind im Ablaufschema des Bildes 6.16 die Variablenbezeichnungen $cos_cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}$ (Kosinuswinkelabstands zwischen den Katalogsternen cs_{ix} und cs_{iy}) durch die Variablenbezeichnungen cos_xy ersetzt worden. Aus demselben Grund sind die Variablenbezeichnungen $cos_is_x \leftrightarrow is_y_max$ und $cos_is_x \leftrightarrow is_y_min$ (Begrenzungen der vorgegebenen Match-Bereiche der Bildsterne is_x und is_y) durch die Variablenbezeichnungen cos_xy_max bzw. cos_xy_min ersetzt worden.

Bild 6.17 und Bild 6.18 zeigen gefundene Lösungen innerhalb des Sternkatalogs *uptomag_4.0* (427 Sterne), die dem *3-Sterne-Muster*, bestehend aus den Sternen αCas , γCas und βCas , entsprechen. Bei einer zugelassenen Winkeltoleranz von $angle_tolerance=0,25^\circ$ (Bild 6.17), sowie bei $angle_tolerance=0,1^\circ$ (Bild 6.18) liegt jeweils eine eindeutig gefundene Lösung vor. Der 1370 Sterne umfassende Sternkatalog *uptomag_5.0* liefert bei $angle_tolerance=0,25^\circ$ (Bild 6.19) 14 Sterndreiecke, wiederum liegt bei $angle_tolerance=0,1^\circ$ (Bild 6.20) eine eindeutige Lösung vor. Die Bilder 6.19 und 6.20 verdeutlichen gut den Einfluß der zugelassenen Winkeltoleranz bei Festhaltung aller anderen Parameter. Durch Herabsetzen von $angle_tolerance$ kann zumindest am Beispiel der Bildvorlage *Cassiopeia* die Eindeutigkeit bei der Erkennung der drei hellsten Bildsterne is_1 , is_2 und is_3 mittels des Sternkatalogs *uptomag_5.0* bewirkt werden. Der Sternkatalog *uptomag_6.0* liefert sowohl bei $angle_tolerance=0,25^\circ$ (Bild 6.21) als auch bei $angle_tolerance=0,1^\circ$ (Bild 6.22) eine *ausufernde* Vielzahl gefundener *3-Sterne-Muster*.

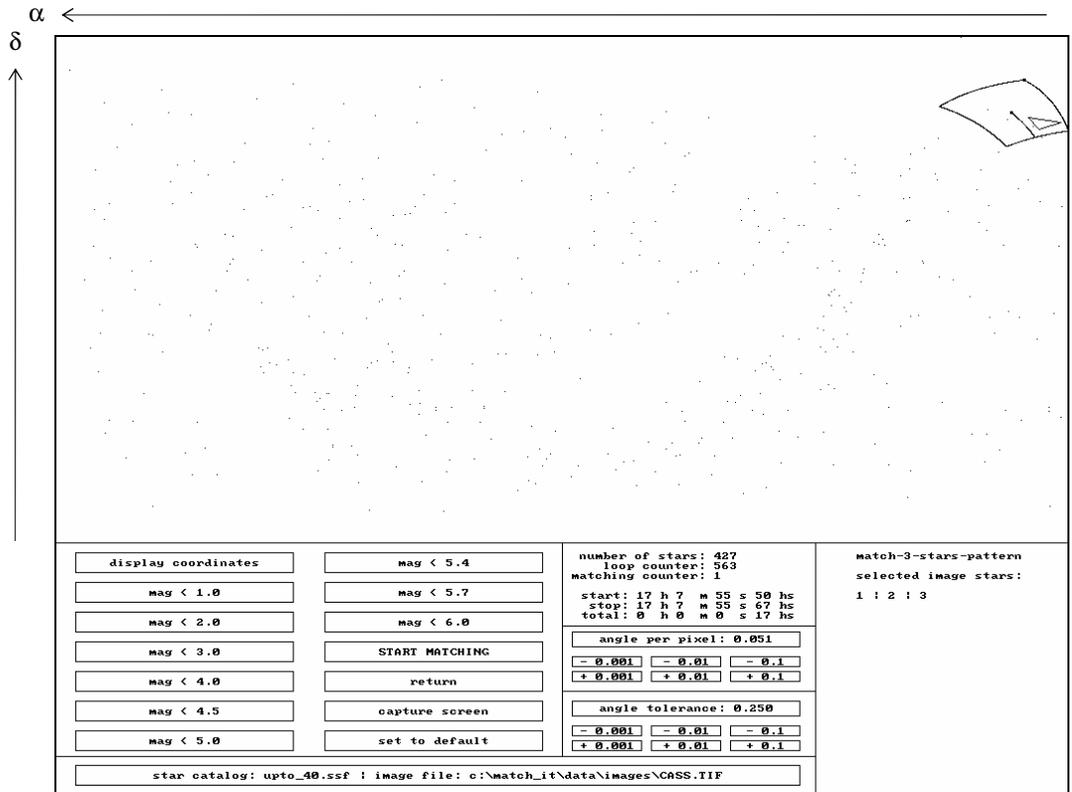


Bild 6.17: Ein erkanntes 3-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_4.0*, 427 Sterne, *angle_tolerance=0,25°*)

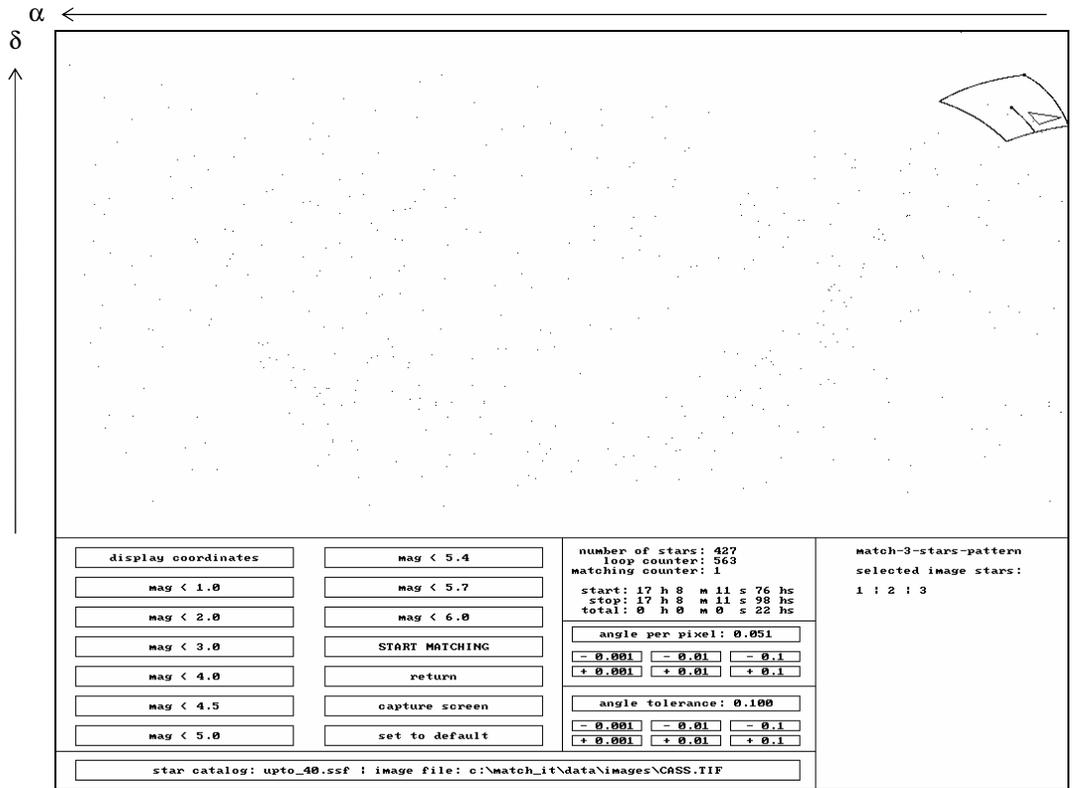


Bild 6.18: Ein erkanntes 3-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_4.0*, 427 Sterne, *angle_tolerance=0,1°*)

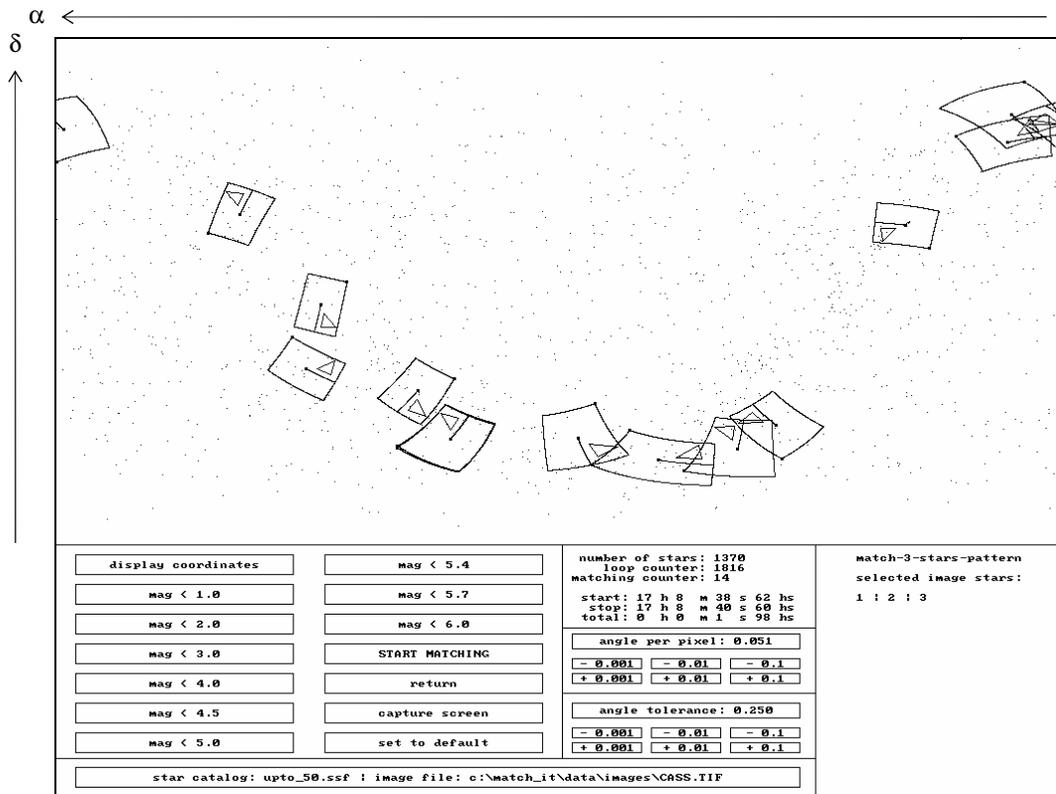


Bild 6.19: 14 erkannte 3-Sterne-Muster bei Cassiopeia
 (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,25°*)

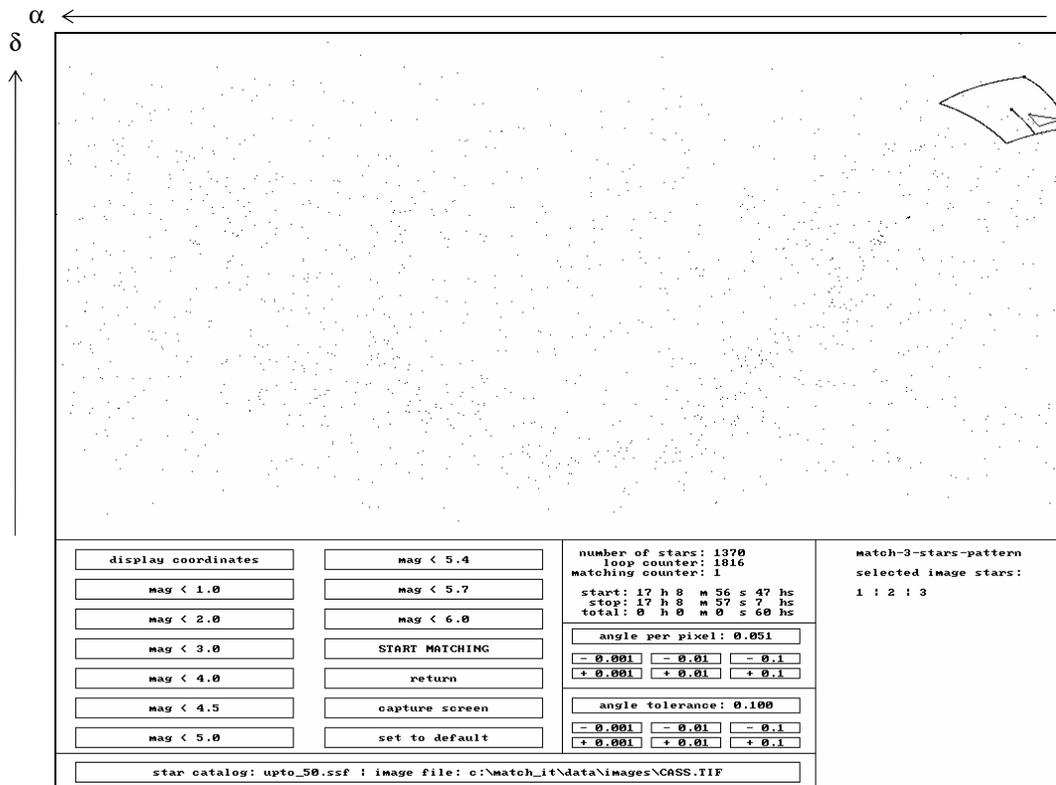


Bild 6.20: Ein erkannte 3-Sterne-Muster bei Cassiopeia
 (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,1°*)

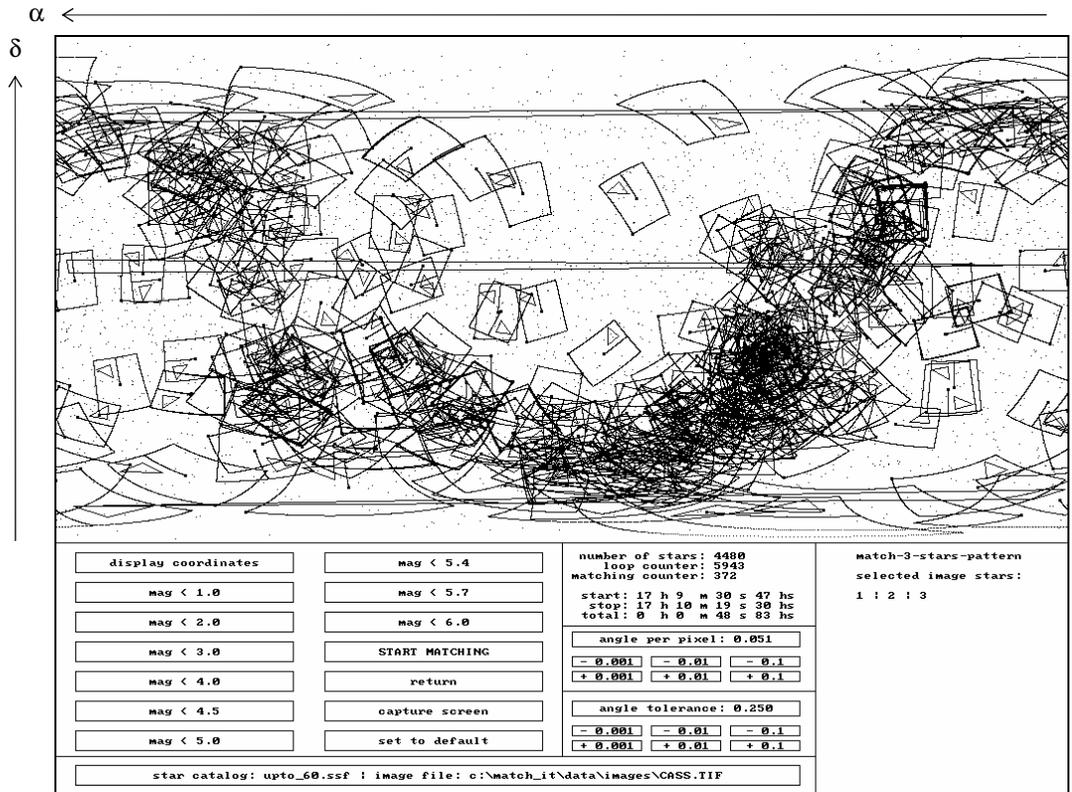


Bild 6.21: 372 erkannte 3-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_6.0*, 4480 Sterne, *angle_tolerance=0,25°*)

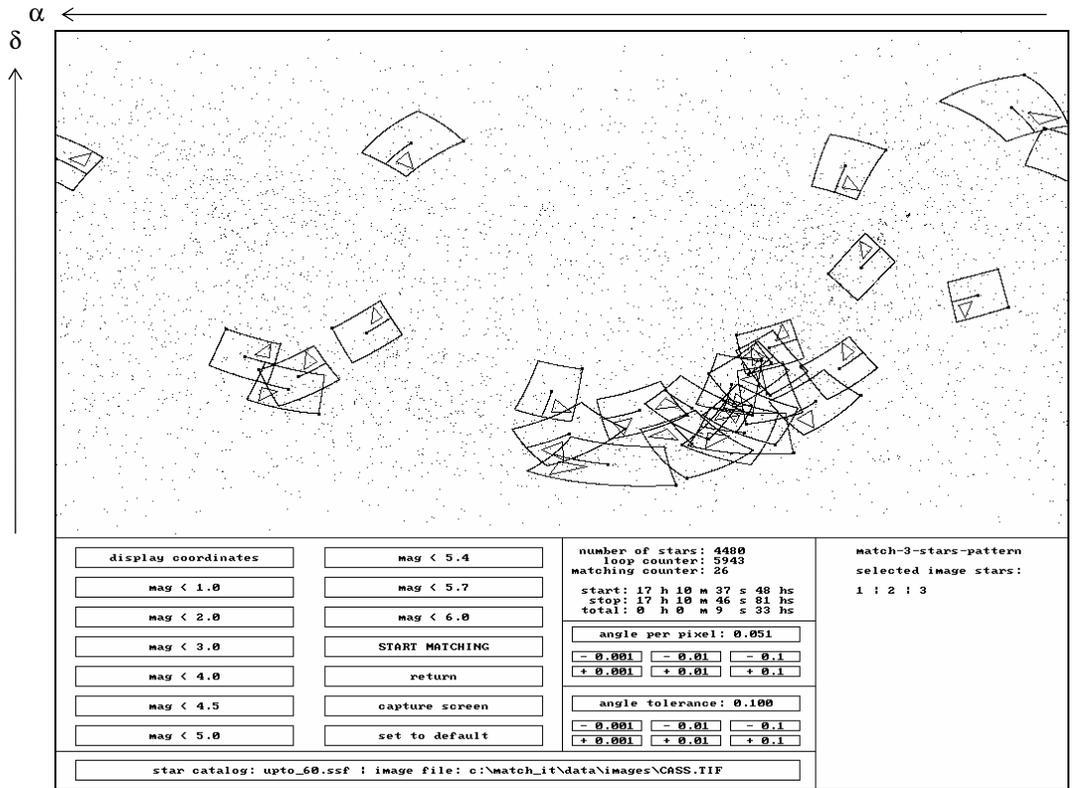


Bild 6.22: 26 erkannte 3-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_6.0*, 4480 Sterne, *angle_tolerance=0,1°*)

6.3 Erkennung von 4-Sterne-Mustern (match-4-stars-pattern)

Die Erkennung eines 4-Sterne-Musters ist wiederum die konsequente Erweiterung des Moduls *match-3-stars-pattern* und wird bei der Bildvorlage *Cassiopeia* automatisch auf die vier hellsten Sterne αCas , γCas , βCas und δCas angewandt (Bild 6.22). Zuerst werden alle notwendigen Initialisierungen von programminternen Variablen im Modul *prepare-match-4-stars-pattern* durchgeführt. Gegenüber dem 3-Sterne-Muster kommen die Bildsternabstände $pixel_distance_{is_1 \leftrightarrow is_4}$, $pixel_distance_{is_2 \leftrightarrow is_4}$ und $pixel_distance_{is_3 \leftrightarrow is_4}$ dazu - es liegen jetzt insgesamt sechs Verbindungen vor. Folglich kommen unter Berücksichtigung des Pixel-zu-Winkel Umrechnungsfaktors $angle_per_pixel$ und der Winkeltoleranz $angle_tolerance$ drei weitere Kosinuswinkelintervalle hinzu, welche die Toleranzbereiche der Kosinuswinkelabstände von Bildstern is_4 zu den drei Bildsternen is_1 , is_2 und is_3 vorgeben:

- $[cos_{is_1 \leftrightarrow is_4_max}..cos_{is_1 \leftrightarrow is_4_min}]$
- $[cos_{is_2 \leftrightarrow is_4_max}..cos_{is_2 \leftrightarrow is_4_min}]$
- $[cos_{is_3 \leftrightarrow is_4_max}..cos_{is_3 \leftrightarrow is_4_min}]$

Insgesamt liegen also jetzt sechs Kosinuswinkelintervalle vor:

- $[cos_{is_1 \leftrightarrow is_2_max}..cos_{is_1 \leftrightarrow is_2_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i2}
- $[cos_{is_1 \leftrightarrow is_3_max}..cos_{is_1 \leftrightarrow is_3_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i3}
- $[cos_{is_1 \leftrightarrow is_4_max}..cos_{is_1 \leftrightarrow is_4_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i4}
- $[cos_{is_2 \leftrightarrow is_3_max}..cos_{is_2 \leftrightarrow is_3_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i2} und cs_{i3}
- $[cos_{is_2 \leftrightarrow is_4_max}..cos_{is_2 \leftrightarrow is_4_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i2} und cs_{i4}
- $[cos_{is_3 \leftrightarrow is_4_max}..cos_{is_3 \leftrightarrow is_4_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i3} und cs_{i4}

Sodann wird der Kern des Algorithmus des Moduls *match-3-stars-pattern* auf die drei hellsten Bildsterne angesetzt. Nach erfolgreichem *Matching* eines 3-Sterne-Musters wird durch den Index $i4$ ein vierter Katalogstern cs_{i4} (Index $i4$ wird von 1 bis $number_cs$ durchlaufen) hinzugezogen, um mit dessen Hilfe letztendlich ein aus vier Katalogsternen bestehendes Sternmuster zu generieren, daß dem des 4-Sterne-Musters der Bildvorlage entsprechen muß. Konkret bedeutet dies, daß die Verbindungen von Bildstern is_4 zu den Bildsternen is_1 , is_2 und is_3 mittels nur einem Katalogstern cs_{i4} im Sternkatalog wiedergefunden werden müssen. Es werden innerhalb der vom Index $i4$ gebildeten Programmschleife stets die Kosinuswinkelabstände $cos_{cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i4}}$ (Kosinuswinkelabstand zwischen Katalogstern cs_{i1} und cs_{i4}), $cos_{cs_{i2} \leftrightarrow cs_{i4}}$ (Kosinuswinkelabstand zwischen Katalogstern cs_{i2} und cs_{i4}) und $cos_{cs_{i3} \leftrightarrow cs_{i4}}$ (Kosinuswinkelabstand zwischen Katalogstern cs_{i3} und cs_{i4}) gebildet und überprüft, ob alle drei Werte innerhalb der dazugehörigen und oben genannten Kosinuswinkelintervalle der Bildsterne liegen. Die Berechnung der Kosinuswinkelabstände $cos_{cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}}$ von Katalogsternen erfolgt auch hier durch Bildung des Skalarprodukts (Gleichung A.2) zwischen zwei einheitsvektoriellen Katalogsternen cs_{ix} und cs_{iy} . Sollte sich ein Katalogstern $i4$ finden lassen, der zu den drei Bildsternen is_1 , is_2 und is_3 paßt und kein *mirror-image* der Bildvorlage vorliegen, dann gilt das 4-Sterne-Muster als erkannt. Dies zieht auch die Bestimmung der 3-axialen Lageparameter durch das Modul *calculate-3-axis-attitude* und die Inkrementierung des Erkennungszählers *matching_counter* nach sich.

Bild 6.24 verdeutlicht das vereinfachte Ablaufschema der Erkennung eines *4-Sterne-Musters*, wobei auf die mögliche Vertauschung der ersten beiden Bild- und Katalogsterne (is_1 und is_2 bzw. cs_{i1} und cs_{i2}) sowohl beim Matching, als auch bei deren Zuordnung untereinander zu achten ist. Dadurch begründet, ergibt sich zur Auffindung des vierten Katalogsterns cs_{i4} eine verzweigte Parallelsequenz im Ablaufschema.

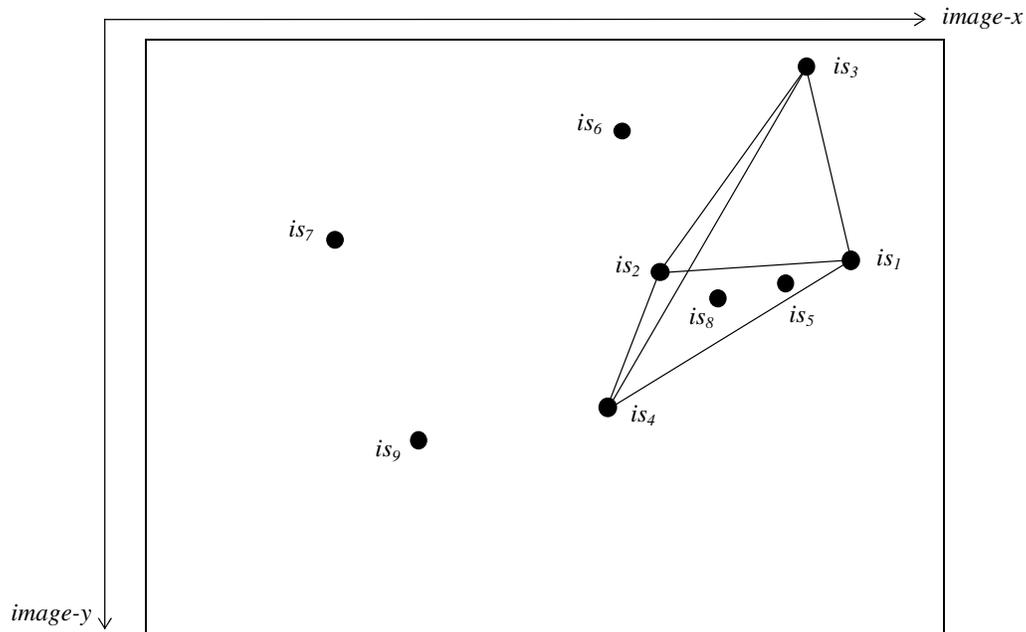


Bild 6.23: *4-Sterne-Muster* der vier hellsten Bildsterne is_1 bis is_4 im Sternmuster *Cassiopeia*

Sollte bereits ein erfolgreicher Durchlauf der Moduls *match-3-stars-pattern* gemäß der Bedingungen 6.1 und 6.2 vorliegen, so muß, auf das Modul *match-4-stars-pattern* bezogen, die erweiterte Bedingung 6.4 erfüllt sein, um Bildstern is_4 als Katalogstern cs_{i4} zu identifizieren:

$$\begin{aligned}
 & (\cos_{cs_{i1}} \leftrightarrow cs_{i4} < \cos_{is_1} \leftrightarrow is_{4_max}) \text{ and } (\cos_{cs_{i1}} \leftrightarrow cs_{i4} > \cos_{is_1} \leftrightarrow is_{4_min}) \\
 & \quad \text{and} \\
 & (\cos_{cs_{i2}} \leftrightarrow cs_{i4} < \cos_{is_2} \leftrightarrow is_{4_max}) \text{ and } (\cos_{cs_{i2}} \leftrightarrow cs_{i4} > \cos_{is_2} \leftrightarrow is_{4_min}) \\
 & \quad \text{and} \\
 & (\cos_{cs_{i3}} \leftrightarrow cs_{i4} < \cos_{is_3} \leftrightarrow is_{4_max}) \text{ and } (\cos_{cs_{i3}} \leftrightarrow cs_{i4} > \cos_{is_3} \leftrightarrow is_{4_min}) = \text{true}
 \end{aligned}$$

(Bedingung 6.4)

Sind also insgesamt die Bedingungen 6.1, 6.2 und 6.4 erfüllt und stellt das mittels der Katalogsterne cs_{i1} bis cs_{i4} erkannte Sternmuster kein *mirror-image* der Bildvorlage dar, so gilt das *4-Sterne-Muster* als erkannt, mit folgender Zuordnung zwischen Bildsternen und Katalogsternen:

- Bildstern is_1 → Katalogstern cs_{i1}
- Bildstern is_2 → Katalogstern cs_{i2}
- Bildstern is_3 → Katalogstern cs_{i3}
- Bildstern is_4 → Katalogstern cs_{i4}

Sollte hingegen ein erfolgreicher Durchlauf des Moduls *match-3-stars-pattern* gemäß der Bedingungen 6.1 und 6.3 vorliegen, also eine Vertauschung in der Zuordnung der ersten beiden Bild- bzw. Katalogsterne (Bildstern is_1 entspricht Katalogstern cs_{i2} und Bildstern is_2 entspricht Katalogstern cs_{i1}), so muß, auf das Modul *match-4-stars-pattern* bezogen, die erweiterte Bedingung 6.5 erfüllt sein, um Bildstern is_4 als Katalogstern cs_{i4} zu identifizieren:

$$\begin{aligned}
 & (\cos_{cs_{i1}} \leftrightarrow cs_{i4} < \cos_{is_2} \leftrightarrow is_{4_max}) \text{ and } (\cos_{cs_{i1}} \leftrightarrow cs_{i4} > \cos_{is_2} \leftrightarrow is_{4_min}) \\
 & \quad \text{and} \\
 & (\cos_{cs_{i2}} \leftrightarrow cs_{i4} < \cos_{is_1} \leftrightarrow is_{4_max}) \text{ and } (\cos_{cs_{i2}} \leftrightarrow cs_{i4} > \cos_{is_1} \leftrightarrow is_{4_min}) \\
 & \quad \text{and} \\
 & (\cos_{cs_{i3}} \leftrightarrow cs_{i4} < \cos_{is_3} \leftrightarrow is_{4_max}) \text{ and } (\cos_{cs_{i3}} \leftrightarrow cs_{i4} > \cos_{is_3} \leftrightarrow is_{4_min}) = \text{true}
 \end{aligned}$$

(Bedingung 6.5)

Sind also vielmehr insgesamt die Bedingungen 6.1, 6.2 und 6.5 erfüllt und liegt kein *mirror-image* vor, so gilt das *4-Sterne-Muster* ebenfalls als erkannt, mit folgender Zuordnung zwischen Bildsternen und Katalogsternen:

- Bildstern is_1 → Katalogstern cs_{i2}
- Bildstern is_2 → Katalogstern cs_{i1}
- Bildstern is_3 → Katalogstern cs_{i3}
- Bildstern is_4 → Katalogstern cs_{i4}

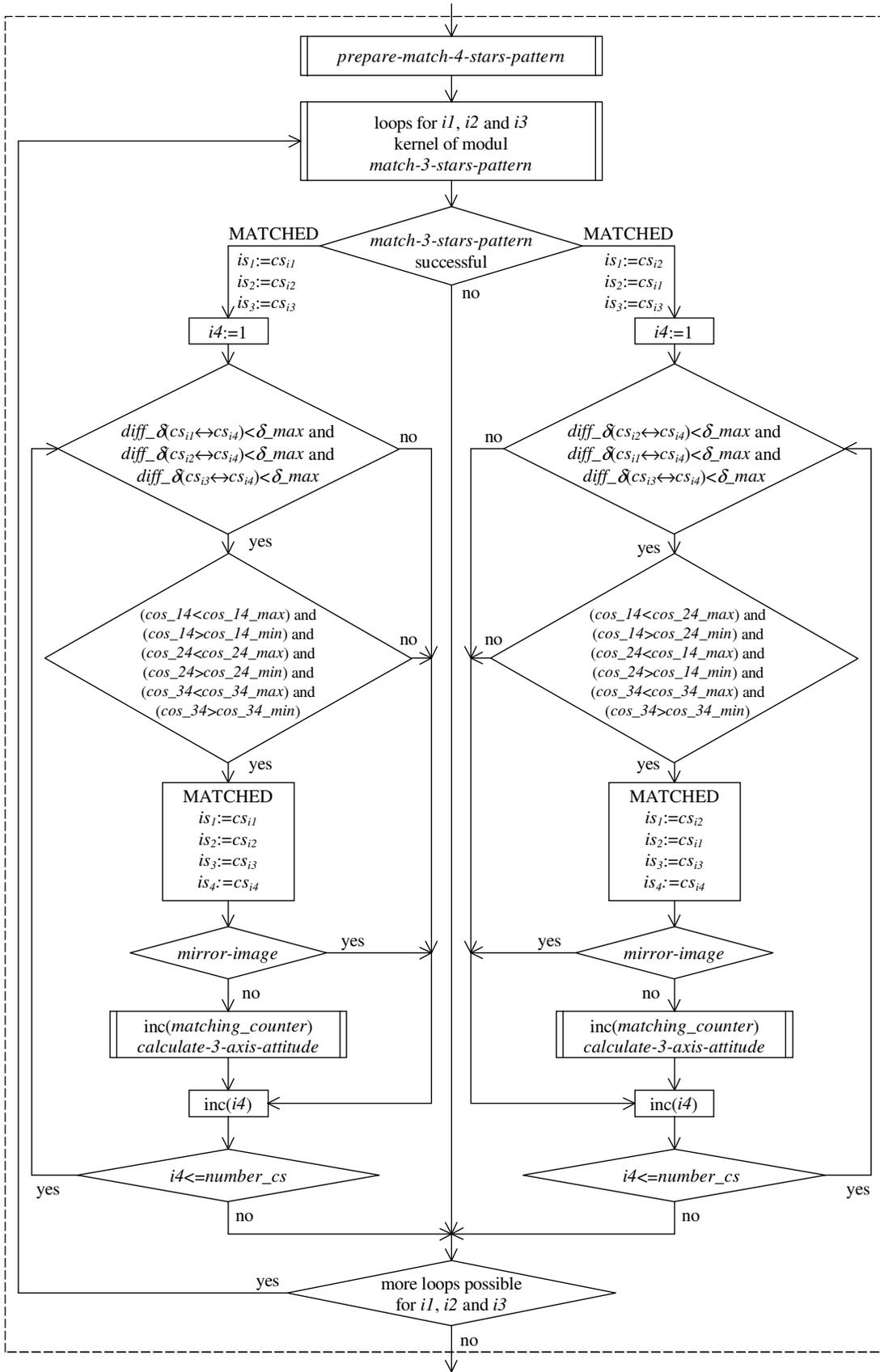


Bild 6.24: Vereinfachtes Ablaufschema des Moduls *match-4-stars-pattern*

Im nächsten und nicht im Ablaufschema in Bild 6.24 dargestellten Verfahrensschritt wird sicherheitshalber überprüft, ob die vier gefundenen Katalogsterne cs_{i1} , cs_{i2} , cs_{i3} und cs_{i4} als zwingende Notwendigkeit voneinander verschieden sind. Diese Überprüfung macht Sinn, da - bedingt durch die Schleifenstruktur zur Bildung der Indizes $i1$, $i2$, $i3$ und $i4$ - gleiche Katalogsterne cs_{ix} und cs_{iy} vorliegen können, wenn deren Winkelabstand geringer ist als das Doppelte der vorgegebenen Winkeltoleranz $angle_tolerance$.

Auch innerhalb des Moduls *match-4-stars-pattern* wird vor allen Berechnungen des Kosinuswinkelabstands $cos_cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}$ zwischen zwei Katalogsternen cs_{ix} und cs_{iy} (mittels Skalarproduktbildung der einheitsvektorierten Sternkoordinaten gemäß Gleichung A.2) zwecks deutlicher Einsparung von Rechenzeit zuvor überprüft, ob die Deklinationsdifferenz $diff_delta(cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy})$ der gerade aktuellen Katalogsterne cs_{ix} und cs_{iy} überhaupt sinnvoll für eine erfolgreiche Weiterverarbeitung ist. Anders ausgedrückt: Die Deklinationsdifferenz $diff_delta(cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy})$ zwischen den beiden Katalogsternen cs_{ix} und cs_{iy} muß stets kleiner sein als der maximal mögliche Deklinationsabstand von Bildsternen $delta_max$, damit der Kosinuswinkelabstand der Katalogsterne cs_{ix} und cs_{iy} überhaupt berechnet bzw. berücksichtigt wird, wie auch im vereinfachten Ablaufschema des Moduls *match-4-stars-pattern* in Bild 6.24 dargestellt. Durch den maximalen Winkelabstand aller sechs Verbindungen der vier Bildsterne is_1 , is_2 , is_3 und is_4 untereinander wird $delta_max$ vorgegeben. Bereits innerhalb des Moduls *prepare-match-4-stars-pattern* wird der Wert von $delta_max$ ermittelt.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind im Ablaufschema des Bildes 6.24 die Variablenbezeichnungen $cos_cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}$ (Kosinuswinkelabstands zwischen den Katalogsternen cs_{ix} und cs_{iy}) durch die Variablenbezeichnungen cos_xy ersetzt worden. Aus demselben Grund sind die Variablenbezeichnungen $cos_is_x \leftrightarrow is_y_max$ und $cos_is_x \leftrightarrow is_y_min$ (Begrenzungen der vorgegebenen Match-Bereiche der Bildsterne is_x und is_y) durch die Variablenbezeichnungen cos_xy_max bzw. cos_xy_min ersetzt worden.

Bild 6.25 und Bild 6.26 zeigen gefundene Lösungen innerhalb des Sternkatalogs *uptomag_4.0*, die dem 4-Sterne-Muster αCas , γCas , βCas und δCas entsprechen. Sowohl bei einer zugelassenen Winkeltoleranz von $angle_tolerance=0,25^\circ$ (Bild 6.25) als auch bei $angle_tolerance=0,1^\circ$ (Bild 6.26) liegt jeweils eine eindeutig gefundene Lösung vor. Das gleiche Ergebnis, nämlich eine eindeutige Erkennung des 4-Sterne-Musters, liefert auch die Benutzung des Sternkatalogs *uptomag_5.0*, der alle 1370 Sterne bis zu einer visuellen Helligkeit von $mag=5,0$ beinhaltet (Bild 6.27 und Bild 6.28). Da sich die Winkeltoleranz $angle_tolerance$ in der Praxis nicht beliebig minimieren läßt, liegt bereits hier die Vermutung nahe, daß die Anzahl der musterbildenden Sterne der wichtigste Aspekt für ein eindeutiges *Matching* ist. Innerhalb des Sternkatalogs *uptomag_6.0* lassen sich bei $angle_tolerance=0,25^\circ$ 21 Lösungen (Bild 6.29) und bei $angle_tolerance=0,1^\circ$ zwei Lösungen (Bild 6.30) des vorgegebenen 4-Sterne-Musters finden.

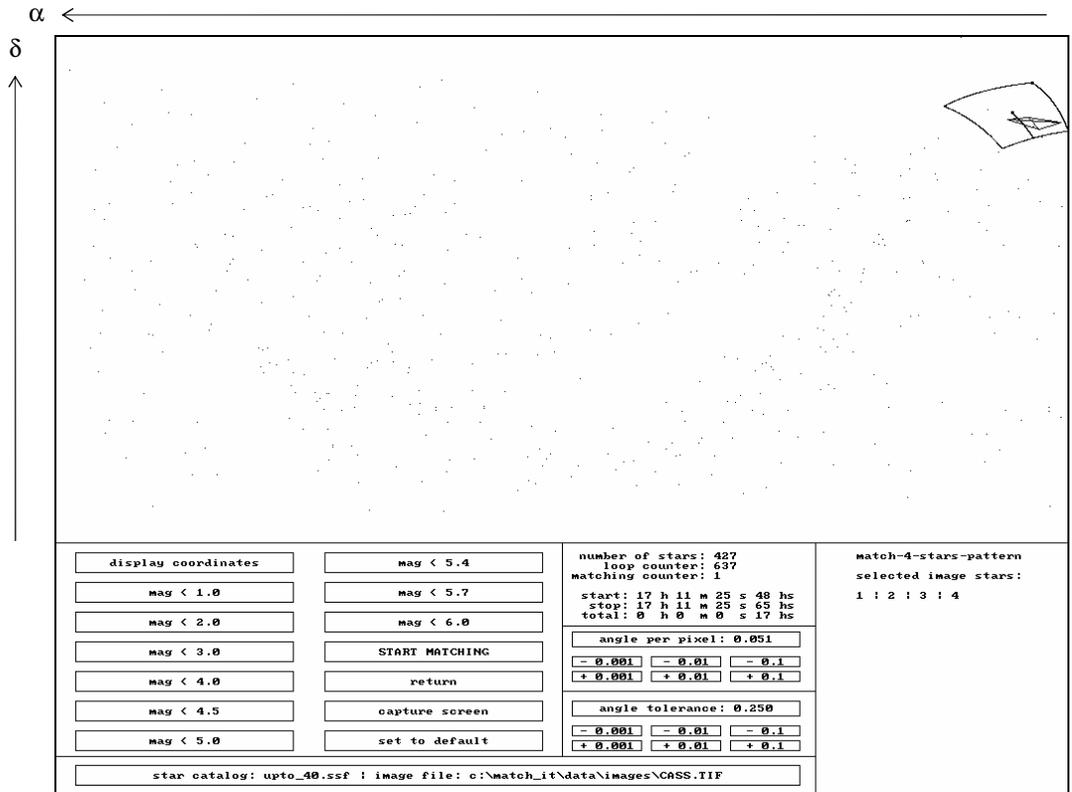


Bild 6.25: Ein erkanntes 4-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_4.0*, 427 Sterne, *angle_tolerance=0,25°*)

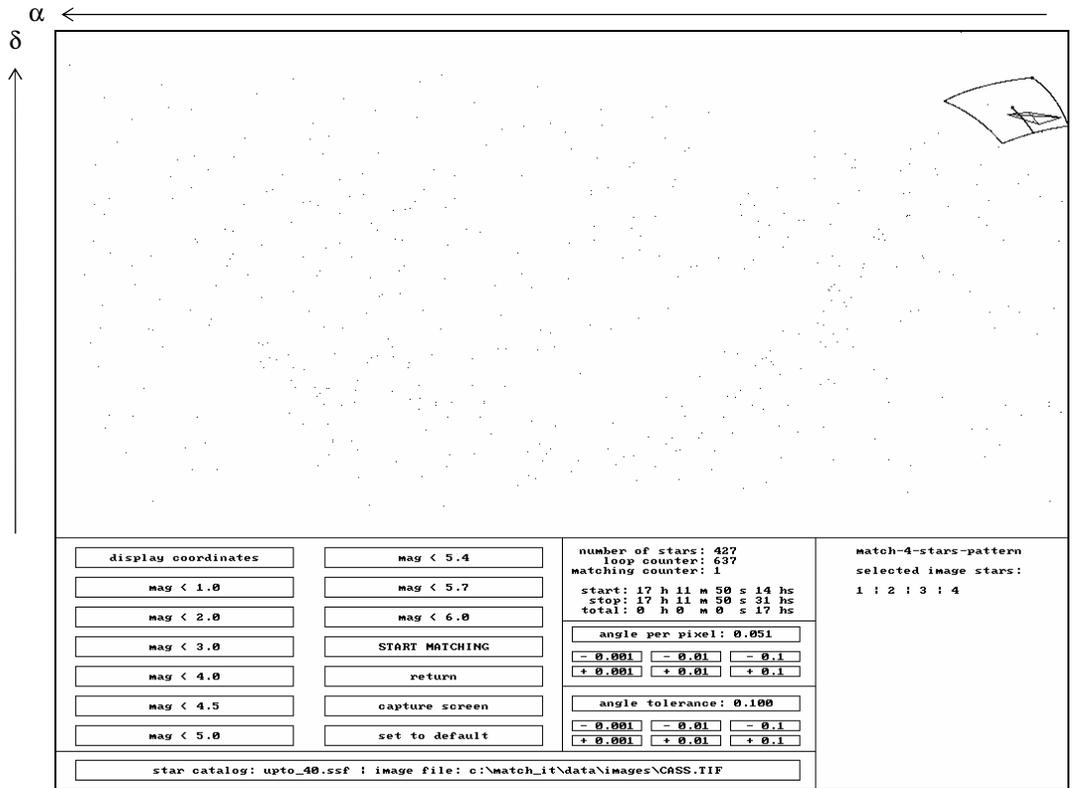


Bild 6.26: Ein erkanntes 4-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_4.0*, 427 Sterne, *angle_tolerance=0,1°*)

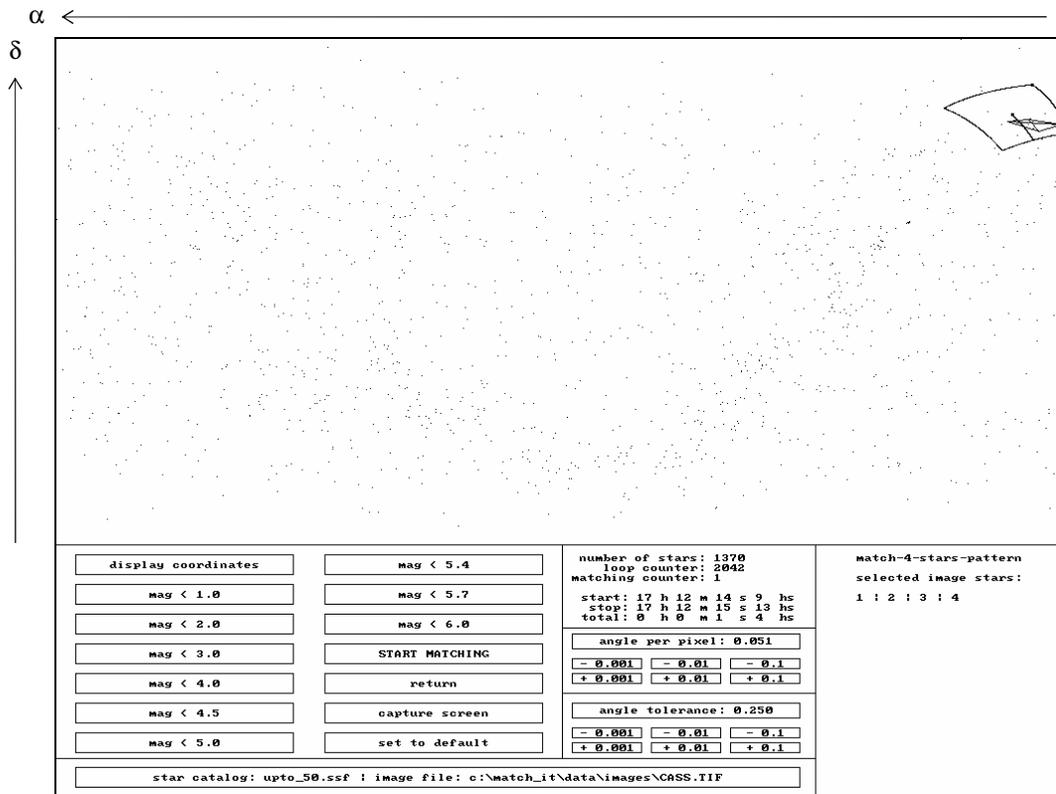


Bild 6.27: Ein erkanntes 4-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,25°*)

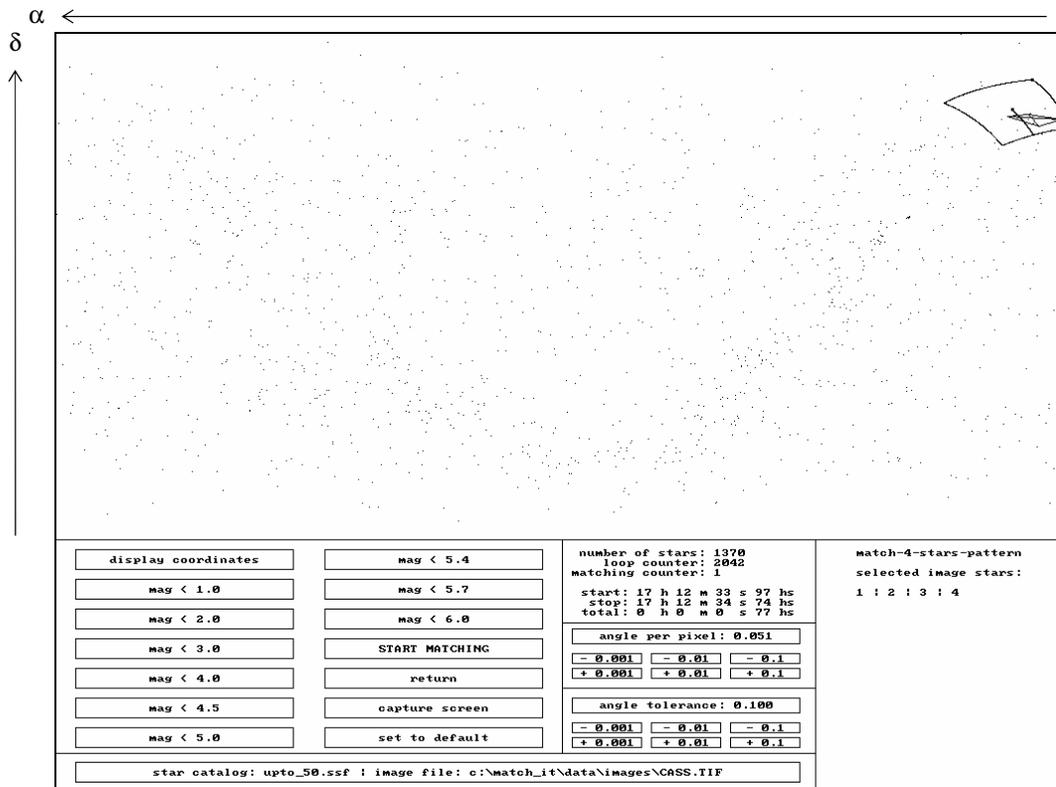


Bild 6.28: Ein erkanntes 4-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,1°*)

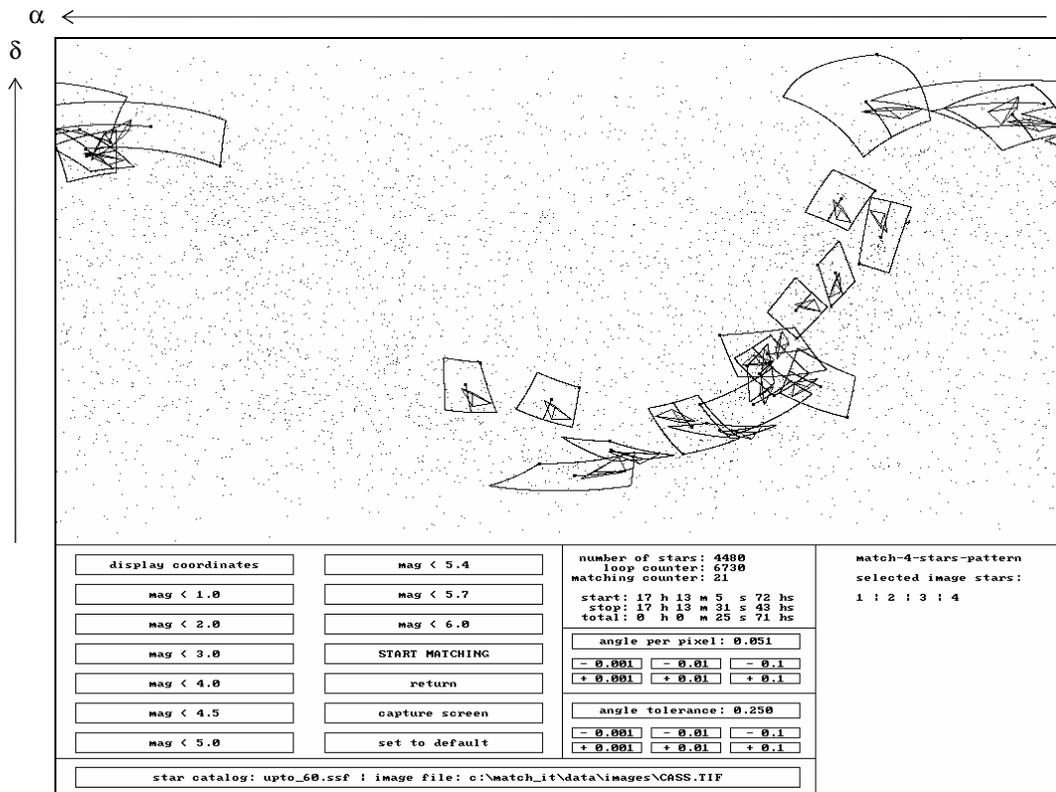


Bild 6.29: 21 erkannte 4-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_6.0*, 4480 Sterne, *angle_tolerance=0,25°*)

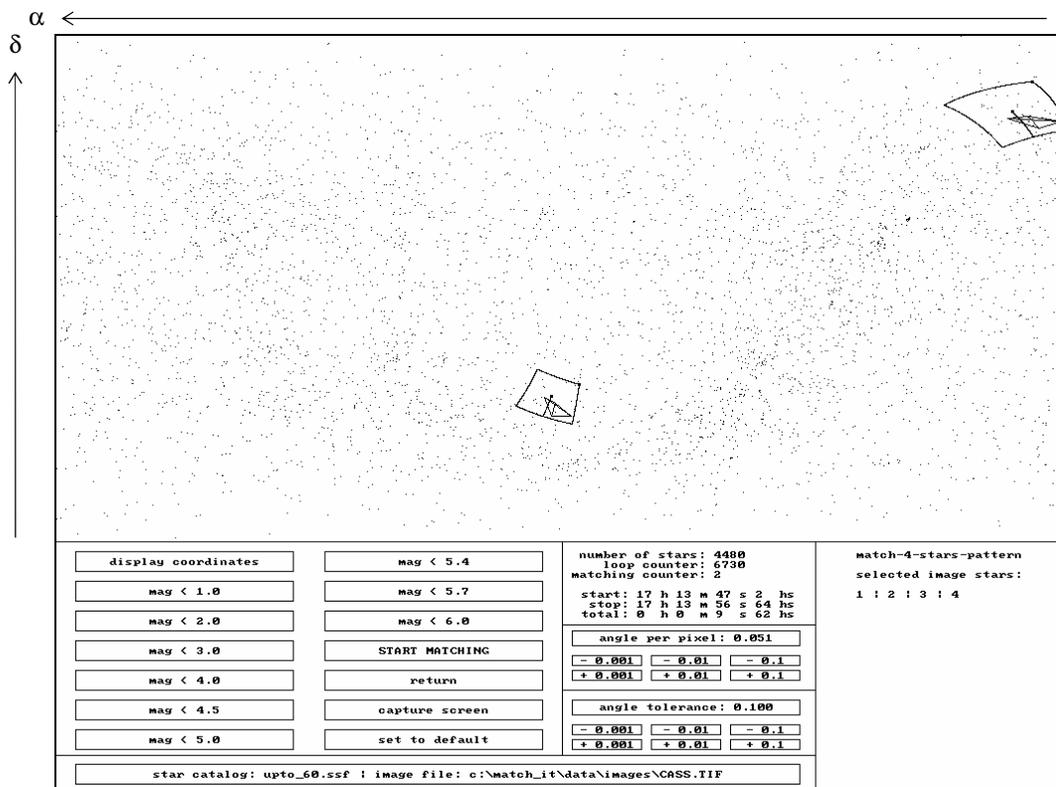


Bild 6.30: Zwei erkannte 4-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_6.0*, 4480 Sterne, *angle_tolerance=0,1°*)

6.4 Erkennung von 5-Sterne-Mustern (match-5-stars-pattern)

Wiederum eine konsequente Weiterentwicklung des Moduls *match-4-stars-pattern* stellt die Erkennung eines *5-Sterne-Musters* dar. Im Falle einer automatischen Auswahl von Bildsternen werden die fünf hellsten Bildsterne der zugrunde liegenden Himmelaufnahme zu dem zu erkennenden Sternmuster zusammengesetzt (Bild 6.31). Der fünfte Bildstern ist η Cas. Dies bedeutet, daß alle fünf Bildsterne is_1 bis is_5 untereinander (ausgehend von den jeweiligen Pixelabständen und dem *Pixel-zu-Winkel* Umrechnungsfaktor *angle_per_pixel*) letztendlich über deren Kosinuswinkelabstände verbunden werden und unter der Berücksichtigung von *angle_tolerance* die dazugehörigen Kosinuswinkelintervalle ermittelt werden. Es kommen bei der Erkennung eines *5-Sterne-Musters* gegenüber der Erkennung eines *4-Sterne-Musters* noch vier weitere Kosinuswinkelintervalle hinzu, welche die Bereiche der Kosinuswinkelabstände von Bildstern is_5 zu den vier Bildsternen is_1 , is_2 , is_3 und is_4 vorgeben:

- $[cos_{is_1} \leftrightarrow is_5_{max}..cos_{is_1} \leftrightarrow is_5_{min}]$
- $[cos_{is_2} \leftrightarrow is_5_{max}..cos_{is_2} \leftrightarrow is_5_{min}]$
- $[cos_{is_3} \leftrightarrow is_5_{max}..cos_{is_3} \leftrightarrow is_5_{min}]$
- $[cos_{is_4} \leftrightarrow is_5_{max}..cos_{is_4} \leftrightarrow is_5_{min}]$

Insgesamt liegen also für die Erkennung eines *5-Sterne-Musters* zehn sich aus der Bildvorlage ergebende Kosinuswinkelintervalle vor:

- $[cos_{is_1} \leftrightarrow is_2_{max}..cos_{is_1} \leftrightarrow is_2_{min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i2}
- $[cos_{is_1} \leftrightarrow is_3_{max}..cos_{is_1} \leftrightarrow is_3_{min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i3}
- $[cos_{is_1} \leftrightarrow is_4_{max}..cos_{is_1} \leftrightarrow is_4_{min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i4}
- $[cos_{is_1} \leftrightarrow is_5_{max}..cos_{is_1} \leftrightarrow is_5_{min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i5}
- $[cos_{is_2} \leftrightarrow is_3_{max}..cos_{is_2} \leftrightarrow is_3_{min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i2} und cs_{i3}
- $[cos_{is_2} \leftrightarrow is_4_{max}..cos_{is_2} \leftrightarrow is_4_{min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i2} und cs_{i4}
- $[cos_{is_2} \leftrightarrow is_5_{max}..cos_{is_2} \leftrightarrow is_5_{min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i2} und cs_{i5}
- $[cos_{is_3} \leftrightarrow is_4_{max}..cos_{is_3} \leftrightarrow is_4_{min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i3} und cs_{i4}
- $[cos_{is_3} \leftrightarrow is_5_{max}..cos_{is_3} \leftrightarrow is_5_{min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i3} und cs_{i5}
- $[cos_{is_4} \leftrightarrow is_5_{max}..cos_{is_4} \leftrightarrow is_5_{min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i4} und cs_{i5}

Nach erfolgreicher Erkennung der Bildsterne is_1 bis is_4 mittels der Katalogsterne cs_{i1} bis cs_{i4} gemäß Kapitel 6.3 wird der zu findende fünfte Katalogstern cs_{i5} über den Index $i5$ aus dem Sternkatalog herausgegriffen (Index $i5$ wird von 1 bis $number_{cs}$ durchlaufen). Alle vier möglichen Kosinuswinkelabstände des Katalogsterns cs_{i5} werden zu den Katalogsternen cs_{i1} , cs_{i2} , cs_{i3} und cs_{i4} gebildet, um die aktuellen Kosinuswinkelabstände $cos_{cs_{i1}} \leftrightarrow cs_{i5}$, $cos_{cs_{i2}} \leftrightarrow cs_{i5}$, $cos_{cs_{i3}} \leftrightarrow cs_{i5}$ und $cos_{cs_{i4}} \leftrightarrow cs_{i5}$ zu ermitteln, die im Falle einer erfolgreichen Erkennung alle innerhalb der jeweils dazugehörigen Kosinuswinkelintervalle der Bildsterne liegen müssen. Anders ausgedrückt bedeutet dies, daß die Verbindungen von Bildstern is_5 zu den Bildsternen is_1 , is_2 , is_3 und is_4 mittels nur einem Katalogstern cs_{i5} und dessen Verbindungen zu den aktuellen Katalogsternen cs_{i1} , cs_{i2} , cs_{i3} und cs_{i4} der äußeren Programmschleifenstruktur (Schleifen zur Bildung der Indizes $i1$, $i2$, $i3$ und $i4$) wiedergefunden werden müssen. Ein vereinfachtes Ablaufschema des Moduls *match-5-stars-pattern* ist in Bild 6.32 zu sehen. Die Erkennung des fünften Bildsterns is_5 ist innerhalb des *Matching* des *4-Sterne-Musters* der Bildsterne is_1 bis is_4 eingebettet. Deutlich zu sehen ist außerdem die aus der möglichen Vertauschung der Bildsterne is_1 und is_2 bzw. der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i2} resultierende Programmverzweigung.

Die erfolgreiche spiegelbildfreie Erkennung eines *5-Sterne-Musters* wird mit Aufruf des Moduls *calculate-3-axis-attitude* zur Bestimmung der 3-axialen Lageparameter und der Inkrementierung des Erkennungszählers *matching_counter* abgeschlossen.

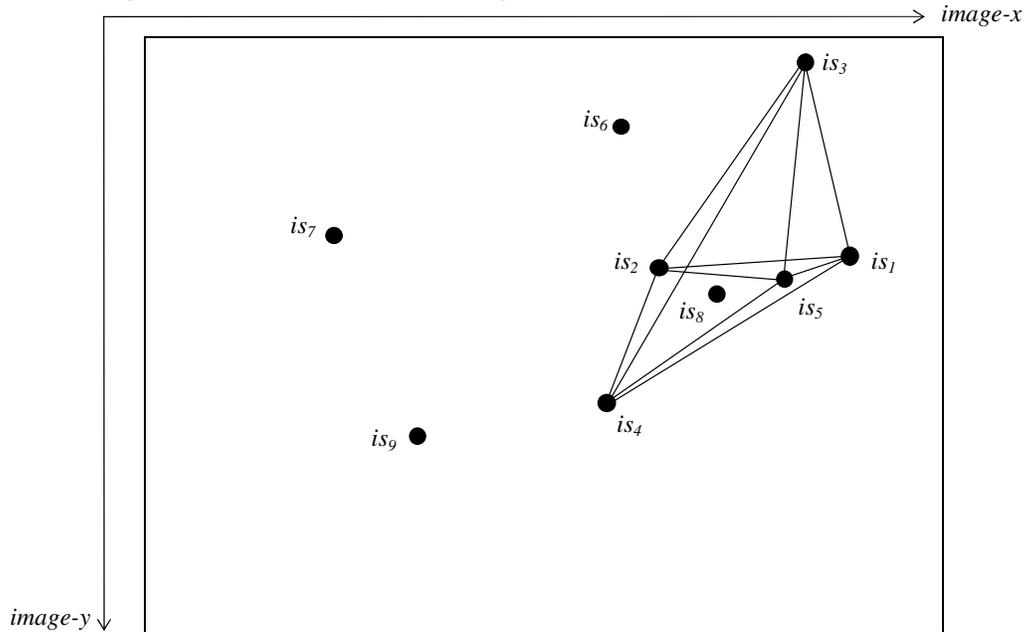


Bild 6.31: *5-Sterne-Muster* der fünf hellsten Sterne *is1* bis *is5* im Sternmuster *Cassiopeia*

Sollte bereits ein erfolgreicher Durchlauf des Moduls *match-4-stars-pattern* gemäß der Bedingungen 6.1, 6.2 und 6.4 vorliegenden, so muß auf das Modul *match-5-stars-pattern* bzw. auf ein *5-Sterne-Muster* bezogen, die erweiterte Bedingung 6.6 erfüllt sein, um Bildstern *is5* als Katalogstern *cs_{i5}* zu identifizieren:

$$\begin{aligned}
 & (cos_cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i5} < cos_is_1 \leftrightarrow is_5_max) \text{ and } (cos_cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i5} > cos_is_1 \leftrightarrow is_5_min) \\
 & \text{and} \\
 & (cos_cs_{i2} \leftrightarrow cs_{i5} < cos_is_2 \leftrightarrow is_5_max) \text{ and } (cos_cs_{i2} \leftrightarrow cs_{i5} > cos_is_2 \leftrightarrow is_5_min) \\
 & \text{and} \\
 & (cos_cs_{i3} \leftrightarrow cs_{i5} < cos_is_3 \leftrightarrow is_5_max) \text{ and } (cos_cs_{i3} \leftrightarrow cs_{i5} > cos_is_3 \leftrightarrow is_5_min) \\
 & \text{and} \\
 & (cos_cs_{i4} \leftrightarrow cs_{i5} < cos_is_4 \leftrightarrow is_5_max) \text{ and } (cos_cs_{i4} \leftrightarrow cs_{i5} > cos_is_4 \leftrightarrow is_5_min) = true
 \end{aligned}$$

(Bedingung 6.6)

Sind also insgesamt die Bedingungen 6.1, 6.2, 6.4 und 6.6 erfüllt und stellt das mittels der Katalogsterne *cs_{i1}* bis *cs_{i5}* erkannte Sternmuster kein *mirror-image* der Bildvorlage dar, so gilt das *5-Sterne-Muster* als erkannt, mit folgender Zuordnung zwischen Bildsternen und Katalogsternen:

- Bildstern *is1* → Katalogstern *cs_{i1}*
- Bildstern *is2* → Katalogstern *cs_{i2}*
- Bildstern *is3* → Katalogstern *cs_{i3}*
- Bildstern *is4* → Katalogstern *cs_{i4}*
- Bildstern *is5* → Katalogstern *cs_{i5}*

Sollte hingegen das Modul *match-4-stars-pattern* gemäß den Bedingungen 6.1, 6.3 und 6.5 erfolgreich durchlaufen sein, also ein *4-Sterne-Muster* bei Vertauschung in der Zuordnung der ersten beiden Bild- bzw. Katalogsterne vorliegen (Bildstern is_1 entspricht Katalogstern cs_{i2} und Bildstern is_2 entspricht Katalogstern cs_{i1}), so muß - auf das Modul *match-5-stars-pattern* bezogen - die erweiterte Bedingung 6.7 erfüllt sein, um Bildstern is_5 als Katalogstern cs_{i5} zu identifizieren:

$$\begin{aligned}
 & (cos_{cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i5}} < cos_{is_2 \leftrightarrow is_5_max}) \text{ and } (cos_{cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i5}} > cos_{is_2 \leftrightarrow is_5_min}) \\
 & \qquad \qquad \qquad \text{and} \\
 & (cos_{cs_{i2} \leftrightarrow cs_{i5}} < cos_{is_1 \leftrightarrow is_5_max}) \text{ and } (cos_{cs_{i2} \leftrightarrow cs_{i5}} > cos_{is_1 \leftrightarrow is_5_min}) \\
 & \qquad \qquad \qquad \text{and} \\
 & (cos_{cs_{i3} \leftrightarrow cs_{i5}} < cos_{is_3 \leftrightarrow is_5_max}) \text{ and } (cos_{cs_{i3} \leftrightarrow cs_{i5}} > cos_{is_3 \leftrightarrow is_5_min}) \\
 & \qquad \qquad \qquad \text{and} \\
 & (cos_{cs_{i4} \leftrightarrow cs_{i5}} < cos_{is_4 \leftrightarrow is_5_max}) \text{ and } (cos_{cs_{i4} \leftrightarrow cs_{i5}} > cos_{is_4 \leftrightarrow is_5_min}) = true
 \end{aligned}$$

(Bedingung 6.7)

Sind also vielmehr insgesamt die Bedingungen 6.1, 6.3, 6.5 und 6.7 erfüllt und liegt kein *mirror-image* vor, so gilt das *5-Sterne-Muster* ebenfalls als erkannt, mit folgender Zuordnung zwischen Bildsternen und Katalogsternen:

- Bildstern is_1 → Katalogstern cs_{i2}
- Bildstern is_2 → Katalogstern cs_{i1}
- Bildstern is_3 → Katalogstern cs_{i3}
- Bildstern is_4 → Katalogstern cs_{i4}
- Bildstern is_5 → Katalogstern cs_{i5}

In einem weiteren und nicht im Ablaufschema in Bild 6.32 dargestellten Verfahrensschritt wird sicherheitshalber überprüft, ob die fünf gematchten Katalogsterne cs_{i1} , cs_{i2} , cs_{i3} , cs_{i4} und cs_{i5} als zwingende Notwendigkeit voneinander verschieden sind. Diese Überprüfung macht Sinn, da - bedingt durch die Schleifenstruktur zur Bildung der Indizes $i1$, $i2$, $i3$, $i4$ und $i5$ - gleiche Katalogsterne cs_{ix} und cs_{iy} vorliegen können, wenn deren Winkelabstand geringer ist als das Doppelte der vorgegebenen Winkeltoleranz *angle_tolerance*.

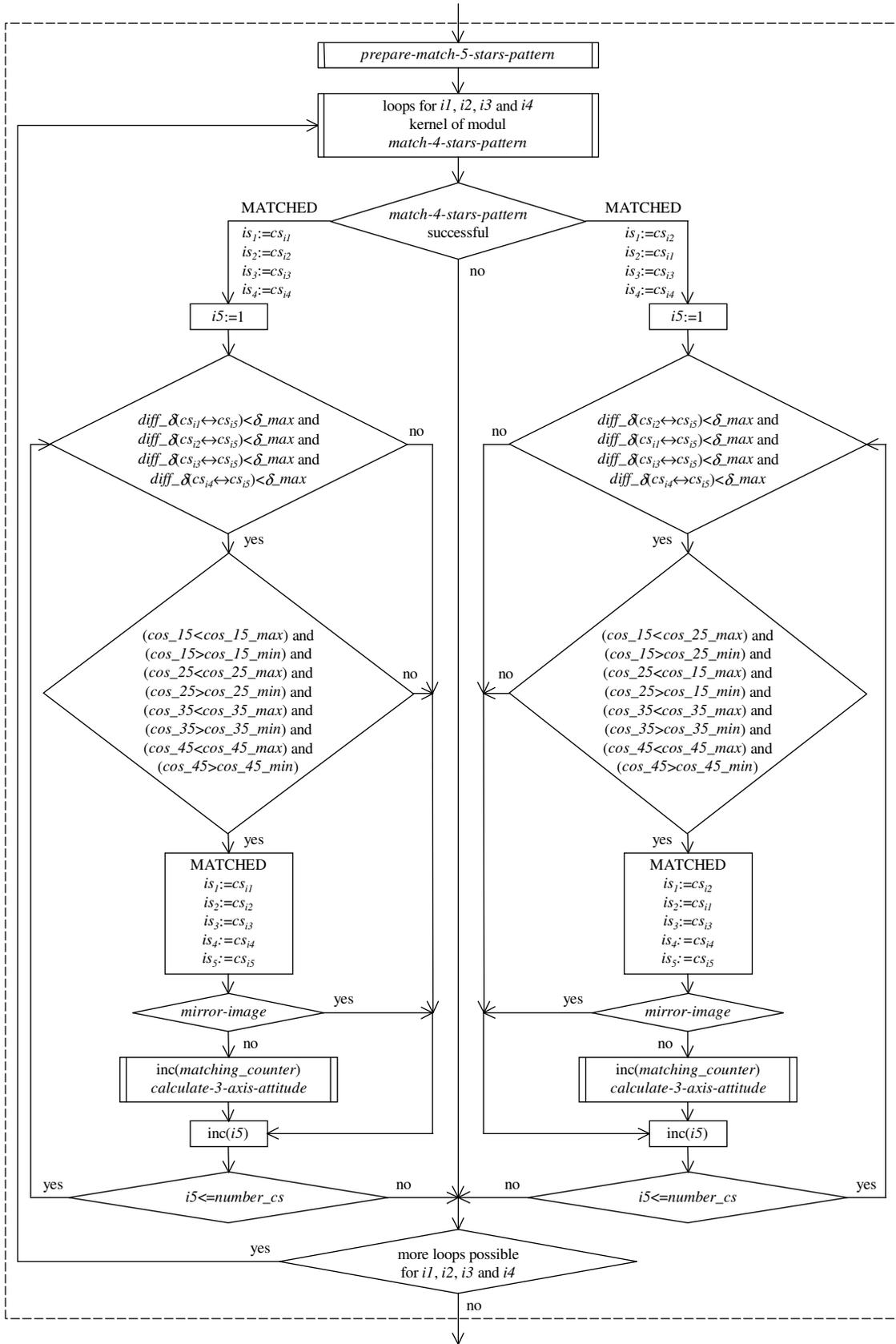


Bild 6.32: Vereinfachtes Ablaufschema des Moduls *match-5-stars-pattern*

Auch innerhalb des Moduls *match-5-stars-pattern* wird vor allen Berechnungen des Kosinuswinkelabstands $\cos_{cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}}$ zwischen zwei Katalogsternen cs_{ix} und cs_{iy} (mittels Skalarproduktbildung der einheitsvektorierten Sternkoordinaten gemäß Gleichung A.2) zwecks deutlicher Einsparung von Rechenzeit zunächst überprüft, ob die Deklinationsdifferenz $diff_delta(cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy})$ der gerade aktuellen Katalogsterne cs_{ix} und cs_{iy} überhaupt sinnvoll für eine Weiterverarbeitung ist. Die Deklinationsdifferenz $diff_delta(cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy})$ der beiden Katalogsterne cs_{ix} und cs_{iy} muß auch hier kleiner sein als der maximal mögliche Deklinationsabstand von Bildsternen $delta_max$ im vorgegebenen *5-Sterne-Muster*, damit der Kosinuswinkelabstand $\cos_{cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}}$ der Katalogsterne cs_{ix} und cs_{iy} überhaupt berechnet bzw. berücksichtigt wird. Der bereits im Modul *prepare-match-5-stars-pattern* ermittelte Wert der Variablen $delta_max$ ergibt sich aus der maximalen Winkeldistanz aller fünf Bildsterne is_1 bis is_5 untereinander.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind im Ablaufschema des Bildes 6.32 die Variablenbezeichnungen $\cos_{cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}}$ (Kosinuswinkelabstands zwischen den Katalogsternen cs_{ix} und cs_{iy}) durch die Variablenbezeichnungen \cos_{xy} ersetzt worden. Aus demselben Grund sind die Variablenbezeichnungen $\cos_{is_x \leftrightarrow is_y_max}$ und $\cos_{is_x \leftrightarrow is_y_min}$ (Begrenzungen der vorgegebenen Match-Bereiche der Bildsterne is_x und is_y) durch die Variablenbezeichnungen \cos_{xy_max} bzw. \cos_{xy_min} ersetzt worden.

Die Bilder 6.33 und 6.34 zeigen gefundene Lösungen innerhalb des Sternkatalogs *uptomag_4.0*, die dem *5-Sterne-Muster*, bestehend aus αCas , γCas , βCas , δCas und ηCas , entsprechen. Wie schon bereits bei der Erkennung eines *3-Sterne-Musters* und *4-Sterne-Musters* liegt sowohl bei einer zugelassenen Winkeltoleranz von $angle_tolerance=0,25^\circ$ (Bild 6.33) als auch bei $angle_tolerance=0,1^\circ$ (Bild 6.34) jeweils eine eindeutig gefundene Lösung vor. Auch bei Benutzung des 1370 Sterne umfassenden (optimalen) Sternkatalogs *uptomag_5.0* liegen sowohl bei einer Winkeltoleranz von $angle_tolerance=0,25^\circ$ (Bild 6.35) als auch bei $angle_tolerance=0,1^\circ$ (Bild 6.36) je eine gefundene Lösung vor. Der bis zu einer visuellen Helligkeit von $mag=6,0$ den Himmel vollständig abdeckende Sternkatalog *uptomag_6.0* liefert mit seinen 4480 Einträgen bei $angle_tolerance=0,25^\circ$ fünf Lösungen (Bild 6.37), bei $angle_tolerance=0,1^\circ$ (Bild 6.38) wird wiederum ein eindeutiges Ergebnis ausgegeben.

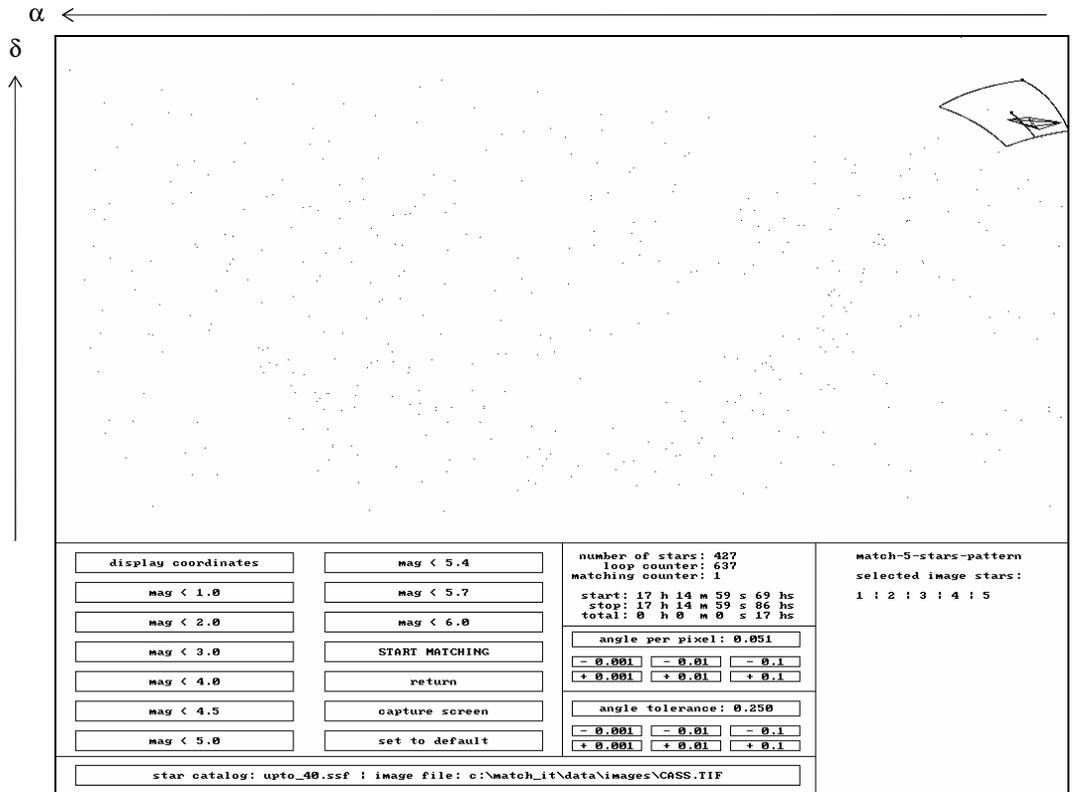


Bild 6.33: Ein erkanntes 5-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_4.0*, 427 Sterne, *angle_tolerance=0,25°*)

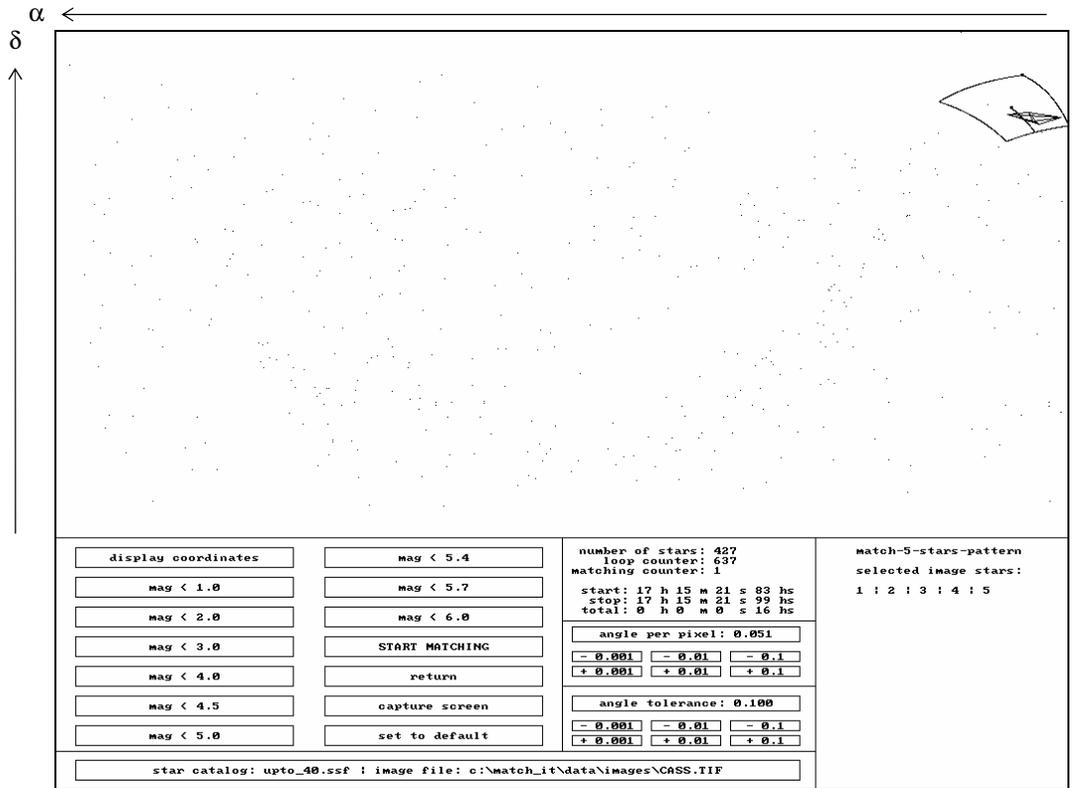


Bild 6.34: Ein erkanntes 5-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_4.0*, 427 Sterne, *angle_tolerance=0,1°*)

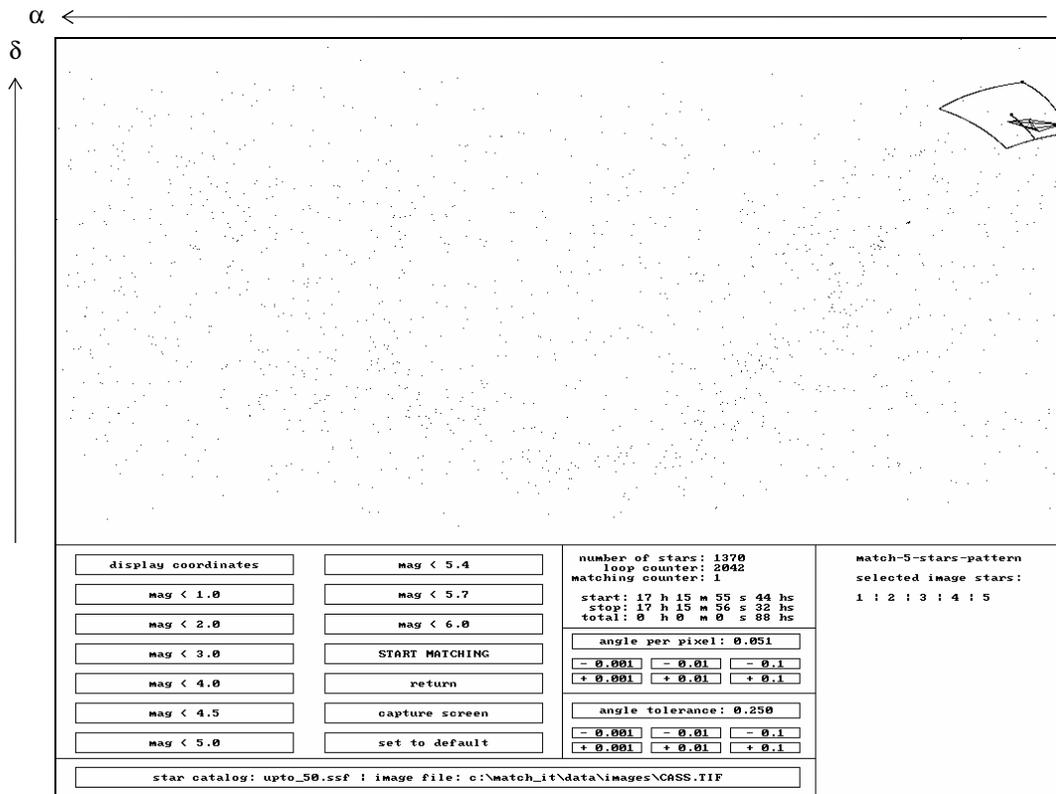


Bild 6.35: Ein erkanntes 5-Sterne-Muster bei Cassiopeia
 (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,25°*)

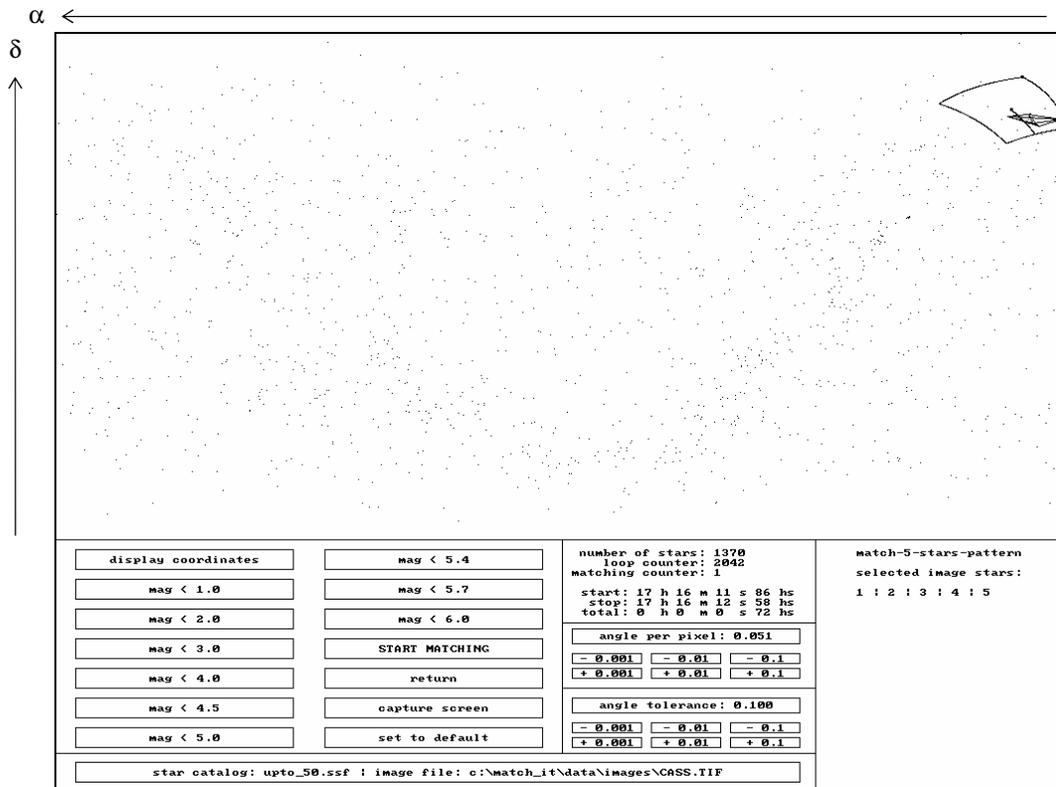


Bild 6.36: Ein erkanntes 5-Sterne-Muster bei Cassiopeia
 (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,1°*)

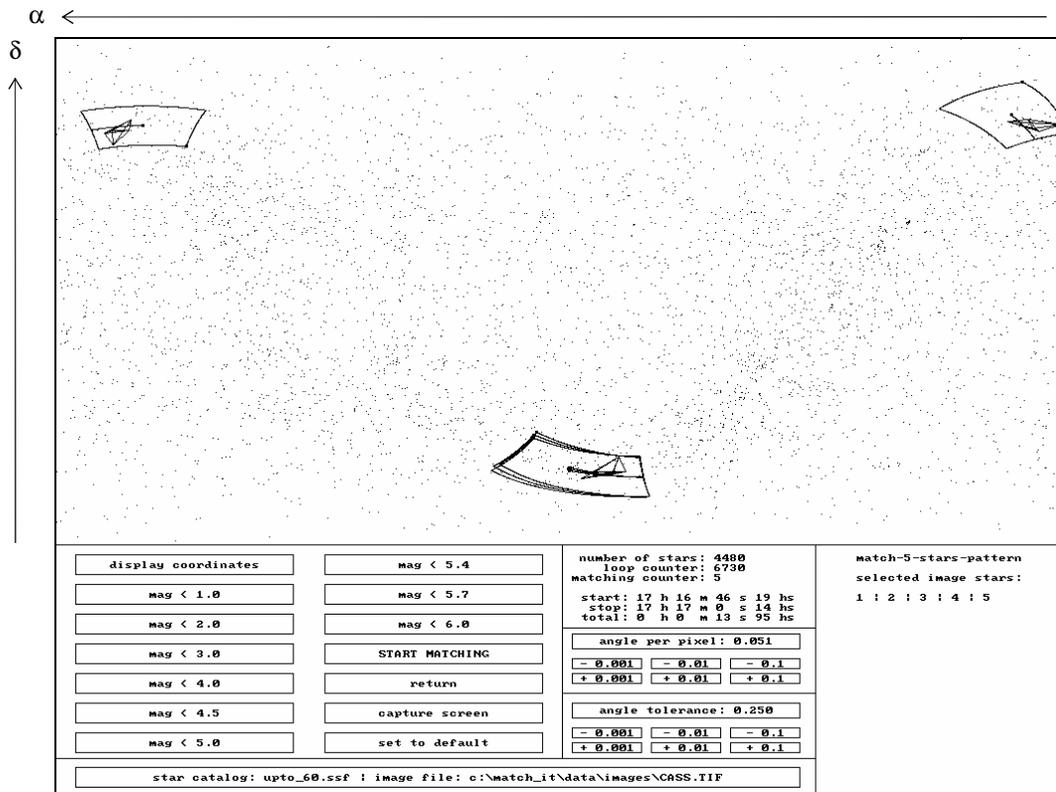


Bild 6.37: Fünf erkannte 5-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_6.0*, 4480 Sterne, *angle_tolerance=0,25°*)

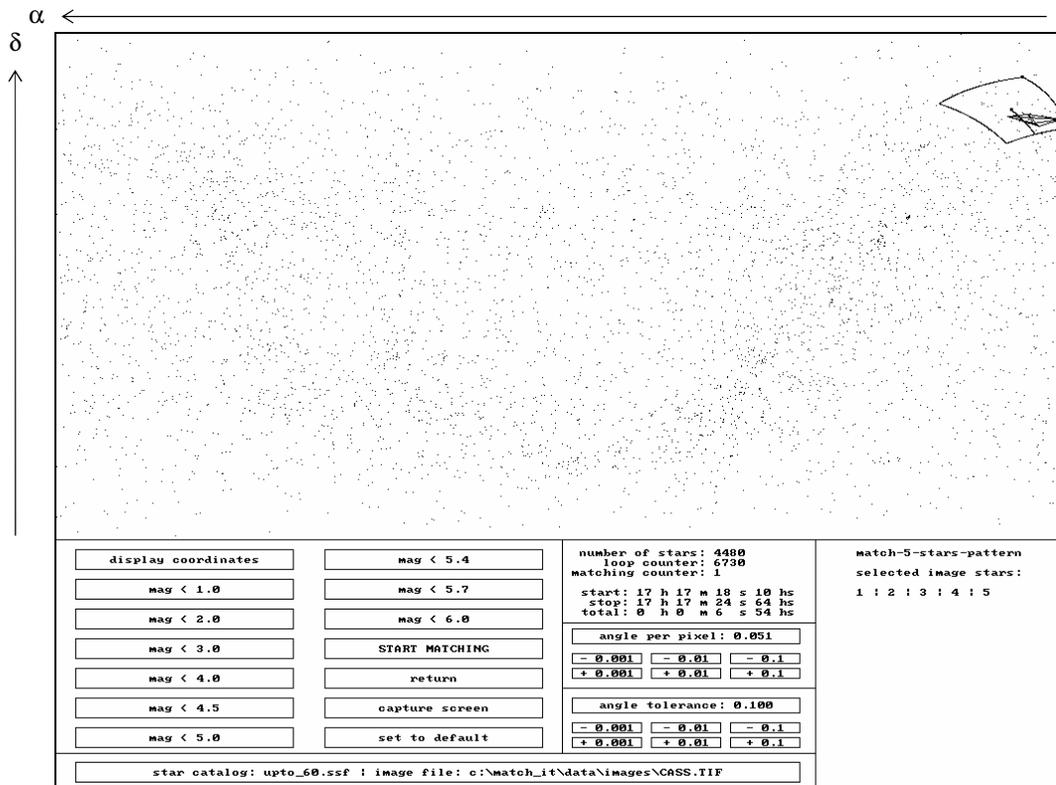


Bild 6.38: Ein erkanntes 5-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_6.0*, 4480 Sterne, *angle_tolerance=0,1°*)

6.5 Erkennung von 6-Sterne-Mustern (match-6-stars-pattern)

Das Modul *match-6-stars-pattern* stellt das letzte Modul zur Erkennung von Sternmustern dar und bedient sich außerdem der höchsten Anzahl von beteiligten musterbildenden Sternen. Dieses Modul ist eine konsequente Weiterentwicklung des Moduls *match-5-stars-pattern* und beinhaltet das Verfahren zur Erkennung eines *6-Sterne-Musters*. Im Fall einer automatischen Auswahl von Bildsternen werden die sechs hellsten Bildsterne der zugrunde liegenden Himmelsaufnahme ausgewählt und zu dem zu erkennenden Sternmuster zusammengesetzt. Bei der Bildvorlage *Cassiopeia* kommt der Bildstern κ Cas als sechste Komponente hinzu (Bild 6.39) Dies bedeutet, daß alle sechs Bildsterne is_1 bis is_6 untereinander (ausgehend von den jeweiligen Pixelabständen) letztendlich über die Kosinuswinkelabstände verbunden und die dazugehörigen Kosinuswinkelintervalle unter der Berücksichtigung der erlaubten Winkeltoleranz *angle_tolerance* ermittelt werden. Es kommen bei der Erkennung eines *6-Sterne-Musters* gegenüber einem *5-Sterne-Muster* noch fünf weitere Kosinuswinkelintervalle hinzu, die den Kosinuswinkelabstand von Bildstern is_6 zu den anderen fünf Bildsternen is_1 , is_2 , is_3 , is_4 und is_5 vorgeben:

- $[cos_{is_1} \leftrightarrow is_{6_max} .. cos_{is_1} \leftrightarrow is_{6_min}]$
- $[cos_{is_2} \leftrightarrow is_{6_max} .. cos_{is_2} \leftrightarrow is_{6_min}]$
- $[cos_{is_3} \leftrightarrow is_{6_max} .. cos_{is_3} \leftrightarrow is_{6_min}]$
- $[cos_{is_4} \leftrightarrow is_{6_max} .. cos_{is_4} \leftrightarrow is_{6_min}]$
- $[cos_{is_5} \leftrightarrow is_{6_max} .. cos_{is_5} \leftrightarrow is_{6_min}]$

Zur vollständigen Erkennung eines *6-Sterne-Musters* liegen somit 15 sich aus der Bildvorlage ergebenden Kosinuswinkelintervalle vor:

- $[cos_{is_1} \leftrightarrow is_{2_max} .. cos_{is_1} \leftrightarrow is_{2_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i2}
- $[cos_{is_1} \leftrightarrow is_{3_max} .. cos_{is_1} \leftrightarrow is_{3_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i3}
- $[cos_{is_1} \leftrightarrow is_{4_max} .. cos_{is_1} \leftrightarrow is_{4_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i4}
- $[cos_{is_1} \leftrightarrow is_{5_max} .. cos_{is_1} \leftrightarrow is_{5_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i5}
- $[cos_{is_1} \leftrightarrow is_{6_max} .. cos_{is_1} \leftrightarrow is_{6_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i6}
- $[cos_{is_2} \leftrightarrow is_{3_max} .. cos_{is_2} \leftrightarrow is_{3_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i2} und cs_{i3}
- $[cos_{is_2} \leftrightarrow is_{4_max} .. cos_{is_2} \leftrightarrow is_{4_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i2} und cs_{i4}
- $[cos_{is_2} \leftrightarrow is_{5_max} .. cos_{is_2} \leftrightarrow is_{5_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i2} und cs_{i5}
- $[cos_{is_2} \leftrightarrow is_{6_max} .. cos_{is_2} \leftrightarrow is_{6_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i2} und cs_{i6}
- $[cos_{is_3} \leftrightarrow is_{4_max} .. cos_{is_3} \leftrightarrow is_{4_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i3} und cs_{i4}
- $[cos_{is_3} \leftrightarrow is_{5_max} .. cos_{is_3} \leftrightarrow is_{5_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i3} und cs_{i5}
- $[cos_{is_3} \leftrightarrow is_{6_max} .. cos_{is_3} \leftrightarrow is_{6_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i3} und cs_{i6}
- $[cos_{is_4} \leftrightarrow is_{5_max} .. cos_{is_4} \leftrightarrow is_{5_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i4} und cs_{i5}
- $[cos_{is_4} \leftrightarrow is_{6_max} .. cos_{is_4} \leftrightarrow is_{6_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i4} und cs_{i6}
- $[cos_{is_5} \leftrightarrow is_{6_max} .. cos_{is_5} \leftrightarrow is_{6_min}] \rightarrow$ Match-Bereich der Katalogsterne cs_{i5} und cs_{i6}

Im Falle einer bereits erfolgreichen Erkennung des *5-Sterne-Musters* wird über den Index $i6$ ein sechster Katalogstern cs_{i6} aus dem Sternkatalog herausgegriffen (Index $i6$ wird von 1 bis *number_cs* durchlaufen). Alle Kosinuswinkelabstände des Katalogsterns cs_{i6} werden zu den Katalogsternen cs_{i1} , cs_{i2} , cs_{i3} , cs_{i4} und cs_{i5} gebildet, um die aktuellen Kosinuswinkelabstände $cos_{cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i6}}$, $cos_{cs_{i2} \leftrightarrow cs_{i6}}$, $cos_{cs_{i3} \leftrightarrow cs_{i6}}$, $cos_{cs_{i4} \leftrightarrow cs_{i6}}$ und $cos_{cs_{i5} \leftrightarrow cs_{i6}}$ zu ermitteln, die bei erfolgreicher Erkennung des *6-Sterne-Musters* alle innerhalb der jeweiligen dazugehörigen Kosinuswinkelintervalle der Bildsterne liegen müssen, wie auch dem Ablaufschema in Bild 6.40

zu entnehmen ist. Erneut fällt eine Ablaufverzweigung auf, die aus der möglichen Vertauschung der Zuordnung der Bildsterne is_1 und is_2 zu den Katalogsternen cs_{i1} und cs_{i2} resultiert. Sollte sich ein neuer Katalogstern cs_{i6} finden lassen, der zum sechsten Bildstern is_6 korrespondiert bzw. alle Abstandsvorgaben zu den Bildsternen is_1 bis is_5 erfüllt und stellt außerdem das sodann gematchte 6-Sterne-Muster kein Spiegelbild der Bildvorlage dar, so werden wie gewohnt mittels des Moduls *calculate-3-axis-attitude* die 3-axialen Lageparameter berechnet und der Zähler der erfolgreichen Sternmustererkennung *matching_counter* inkrementiert.

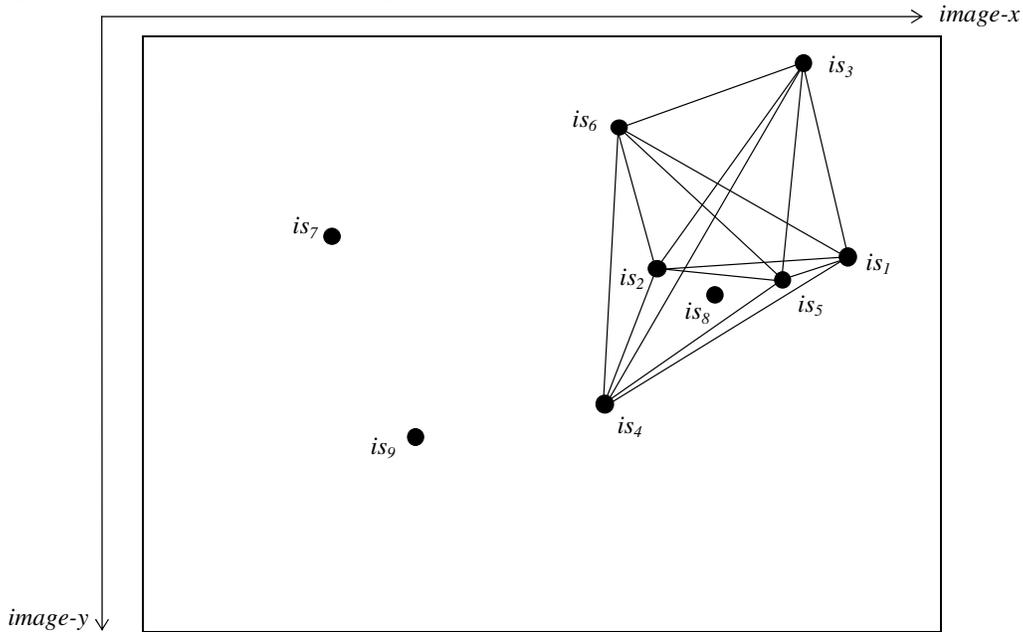


Bild 6.39: 6-Sterne-Muster der sechs hellsten Sterne der Bildvorlage *Cassiopeia*

Sollte bereits ein erfolgreicher Durchlauf des Moduls *match-5-stars-pattern* gemäß der Bedingungen 6.1, 6.2, 6.4 und 6.6 vorliegen, so muß - auf ein 6-Sterne-Muster bezogen - die erweiterte Bedingung 6.8 erfüllt sein, um Bildstern is_6 als Katalogstern cs_{i6} zu identifizieren:

$$\begin{aligned}
 & (cos_cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i6} < cos_is_1 \leftrightarrow is_{6_max}) \text{ and } (cos_cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i6} > cos_is_1 \leftrightarrow is_{6_min}) \\
 & \text{and} \\
 & (cos_cs_{i2} \leftrightarrow cs_{i6} < cos_is_2 \leftrightarrow is_{6_max}) \text{ and } (cos_cs_{i2} \leftrightarrow cs_{i6} > cos_is_2 \leftrightarrow is_{6_min}) \\
 & \text{and} \\
 & (cos_cs_{i3} \leftrightarrow cs_{i6} < cos_is_3 \leftrightarrow is_{6_max}) \text{ and } (cos_cs_{i3} \leftrightarrow cs_{i6} > cos_is_3 \leftrightarrow is_{6_min}) \\
 & \text{and} \\
 & (cos_cs_{i4} \leftrightarrow cs_{i6} < cos_is_4 \leftrightarrow is_{6_max}) \text{ and } (cos_cs_{i4} \leftrightarrow cs_{i6} > cos_is_4 \leftrightarrow is_{6_min}) \\
 & \text{and} \\
 & (cos_cs_{i5} \leftrightarrow cs_{i6} < cos_is_5 \leftrightarrow is_{6_max}) \text{ and } (cos_cs_{i5} \leftrightarrow cs_{i6} > cos_is_5 \leftrightarrow is_{6_min}) = true
 \end{aligned}$$

(Bedingung 6.8)

Sind also insgesamt die Bedingungen 6.1, 6.2, 6.4, 6.6 und 6.8 erfüllt und stellt das mittels der Katalogsterne cs_{i1} bis cs_{i6} erkannte Sternmuster kein *mirror-image* der Bildvorlage dar, so gilt das *6-Sterne-Muster* als erkannt, mit folgender Zuordnung zwischen Bildsternen und Katalogsternen:

- Bildstern is_1 → Katalogstern cs_{i1}
- Bildstern is_2 → Katalogstern cs_{i2}
- Bildstern is_3 → Katalogstern cs_{i3}
- Bildstern is_4 → Katalogstern cs_{i4}
- Bildstern is_5 → Katalogstern cs_{i5}
- Bildstern is_6 → Katalogstern cs_{i6}

Sollte hingegen ein erfolgreicher Durchlauf des Moduls *match-5-stars-pattern* gemäß der Bedingungen 6.1, 6.3, 6.5 und 6.7 vorliegen, also eine Vertauschung in der Zuordnung der ersten beiden Bild- bzw. Katalogsterne (Bildstern is_1 entspricht Katalogstern cs_{i2} und Bildstern is_2 entspricht Katalogstern cs_{i1}), so muß das Modul *match-6-stars-pattern* die erweiterte Bedingung 6.9 erfüllt haben, um Bildstern is_6 als Katalogstern cs_{i6} zu identifizieren:

$$\begin{aligned}
 & (\cos_{cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i6}} < \cos_{is_2 \leftrightarrow is_6_max}) \text{ and } (\cos_{cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i6}} > \cos_{is_2 \leftrightarrow is_6_min}) \\
 & \qquad \qquad \qquad \text{and} \\
 & (\cos_{cs_{i2} \leftrightarrow cs_{i6}} < \cos_{is_1 \leftrightarrow is_6_max}) \text{ and } (\cos_{cs_{i2} \leftrightarrow cs_{i6}} > \cos_{is_1 \leftrightarrow is_6_min}) \\
 & \qquad \qquad \qquad \text{and} \\
 & (\cos_{cs_{i3} \leftrightarrow cs_{i6}} < \cos_{is_3 \leftrightarrow is_6_max}) \text{ and } (\cos_{cs_{i3} \leftrightarrow cs_{i6}} > \cos_{is_3 \leftrightarrow is_6_min}) \\
 & \qquad \qquad \qquad \text{and} \\
 & (\cos_{cs_{i4} \leftrightarrow cs_{i6}} < \cos_{is_4 \leftrightarrow is_6_max}) \text{ and } (\cos_{cs_{i4} \leftrightarrow cs_{i6}} > \cos_{is_4 \leftrightarrow is_6_min}) \\
 & \qquad \qquad \qquad \text{and} \\
 & (\cos_{cs_{i5} \leftrightarrow cs_{i6}} < \cos_{is_5 \leftrightarrow is_6_max}) \text{ and } (\cos_{cs_{i5} \leftrightarrow cs_{i6}} > \cos_{is_5 \leftrightarrow is_6_min}) = \text{true}
 \end{aligned}$$

(Bedingung 6.9)

Sind also insgesamt die Bedingungen 6.1, 6.3, 6.5, 6.7 und 6.9 erfüllt und liegt kein *mirror-image* vor, so gilt das *6-Sterne-Muster* ebenfalls als erkannt, mit folgender Zuordnung zwischen Bildsternen und Katalogsternen:

- Bildstern is_1 → Katalogstern cs_{i2}
- Bildstern is_2 → Katalogstern cs_{i1}
- Bildstern is_3 → Katalogstern cs_{i3}
- Bildstern is_4 → Katalogstern cs_{i4}
- Bildstern is_5 → Katalogstern cs_{i5}
- Bildstern is_6 → Katalogstern cs_{i6}

Im nächsten und nicht im Ablaufschema in Bild 6.40 dargestellten Verfahrensschritt wird sicherheitshalber überprüft, ob die sechs gefundenen Katalogsterne cs_{i1} , cs_{i2} , cs_{i3} , cs_{i4} , cs_{i5} und cs_{i6} als zwingende Notwendigkeit voneinander verschieden sind. Diese Überprüfung macht Sinn, da - bedingt durch die Schleifenstruktur zur Bildung der Indizes $i1$, $i2$, $i3$, $i4$, $i5$ und $i6$ - gleiche Katalogsterne cs_{ix} und cs_{iy} vorliegen können, wenn deren Winkelabstand geringer ist als das Doppelte der vorgegebenen Winkeltoleranz *angle_tolerance*.

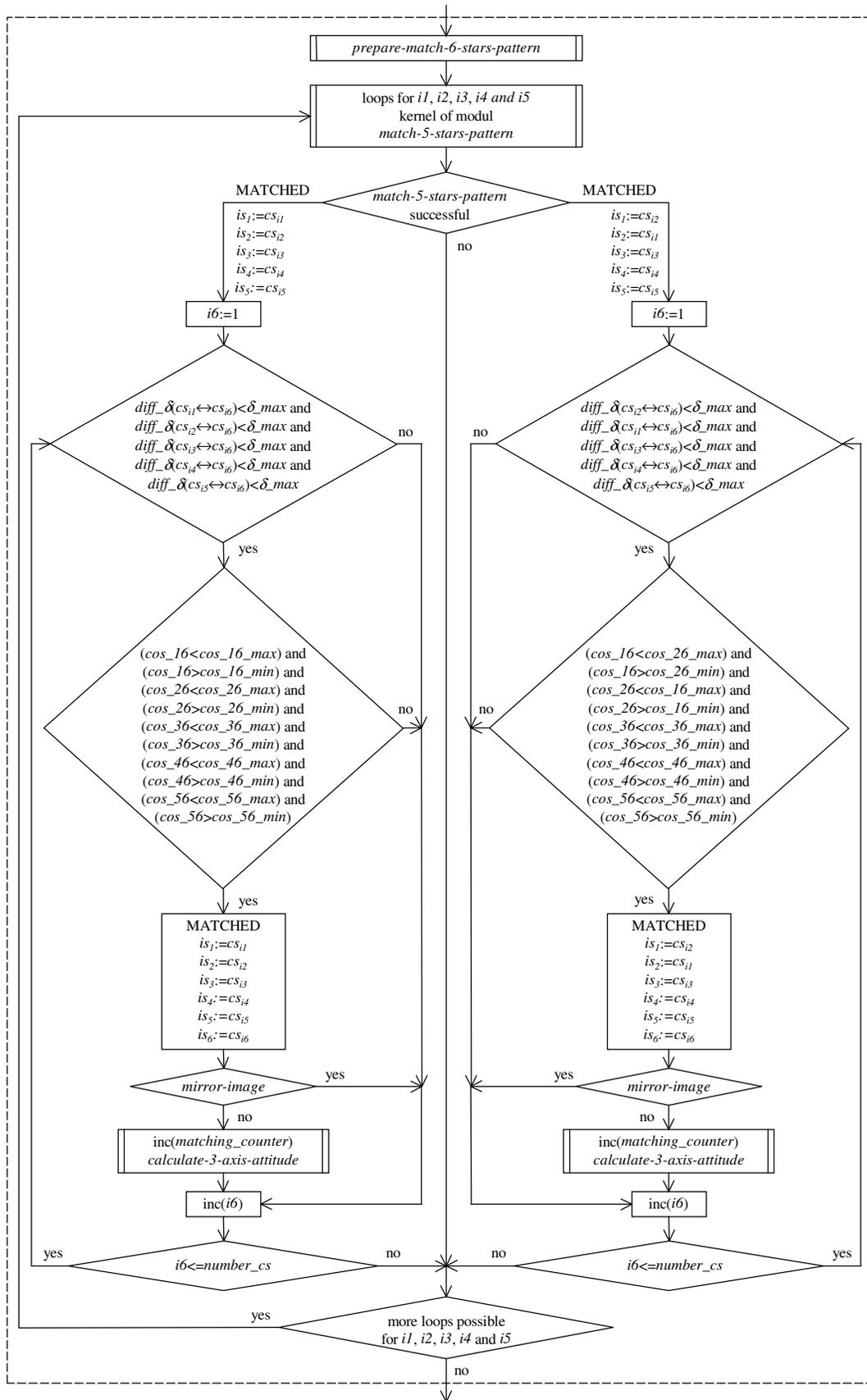


Bild 6.40: Vereinfachtes Ablaufschema des Moduls *match-6-stars-pattern*

Wie dem Ablaufschema des Moduls *match-6-stars-pattern* (Bild 6.40) zu entnehmen ist, finden vor der Bildung von Skalarprodukten gemäß Gleichung A.2 zur Berechnung des Kosinuswinkelabstands $\cos_{cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}}$ zweier Katalogsterne cs_{ix} und cs_{iy} zunächst Überprüfungen zur Deklinationsdifferenz der beiden beteiligten Katalogsterne cs_{ix} und cs_{iy} statt. Nur wenn deren Deklinationsdifferenz $diff_delta(cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy})$ geringer ist als der maximale Winkelabstand $delta_max$ aller Bildsterne is_1 bis is_6 untereinander, wird in die Programmstruktur tiefer eingestiegen. Dadurch werden nur solche Sternpaare aus dem Sternkatalog berücksichtigt, die bezüglich ihrer Deklinationsdifferenz im vorgegebenen Bildsternmuster liegen können. Der Sinn dieser Überprüfung liegt erneut in der Einsparung von Rechenzeit.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind auch im Ablaufschema des Bildes 6.40 die Variablenbezeichnungen $\cos_{cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}}$ (Kosinuswinkelabstands zwischen den Katalogsternen cs_{ix} und cs_{iy}) durch die Variablenbezeichnungen \cos_{xy} ersetzt worden. Aus demselben Grund sind die Variablenbezeichnungen $\cos_{is_x \leftrightarrow is_y_max}$ und $\cos_{is_x \leftrightarrow is_y_min}$ (Begrenzungen der vorgegebenen Match-Bereiche der Bildsterne is_x und is_y) durch die Variablenbezeichnungen \cos_{xy_max} bzw. \cos_{xy_min} ersetzt worden.

Auf die Bildvorlage *Cassiopeia* angewandt, liefert die Erkennung eines *6-Sterne-Musters* bei Nutzung des Sternkatalogs *uptomag_4.0* keine Lösungen (Bild 6.41 und 6.42). Dies ist darin begründet, daß der Bildstern is_6 (α Cas) wegen seiner visuellen Helligkeit von $mag=4,24$ nicht im Sternkatalog *uptomag_4.0* enthalten ist. Jedoch liefern der Sternkatalog *uptomag_5.0* (Bild 6.42 und 6.44) und der Sternkatalog *uptomag_6.0* sowohl bei einer vorgegebenen Winkeltoleranz von $angle_tolerance=0,25^\circ$ als auch bei $angle_tolerance=0,1^\circ$ jeweils eindeutige Lösungen. Dies läßt die Vermutung aufstellen, daß mit hoher Anzahl von sternmusterbildenden Bildsternen auch bei Nutzung eines deutlich zu umfangreichen Sternkatalogs (wie im Falle des bis zur visuellen Helligkeit von $mag=6,0$ reichenden Sternkatalogs *uptomag_6.0* mit seinen 4480 Einträgen) eine gewisse Sicherheit zur eindeutigen Sternmustererkennung gegeben ist.

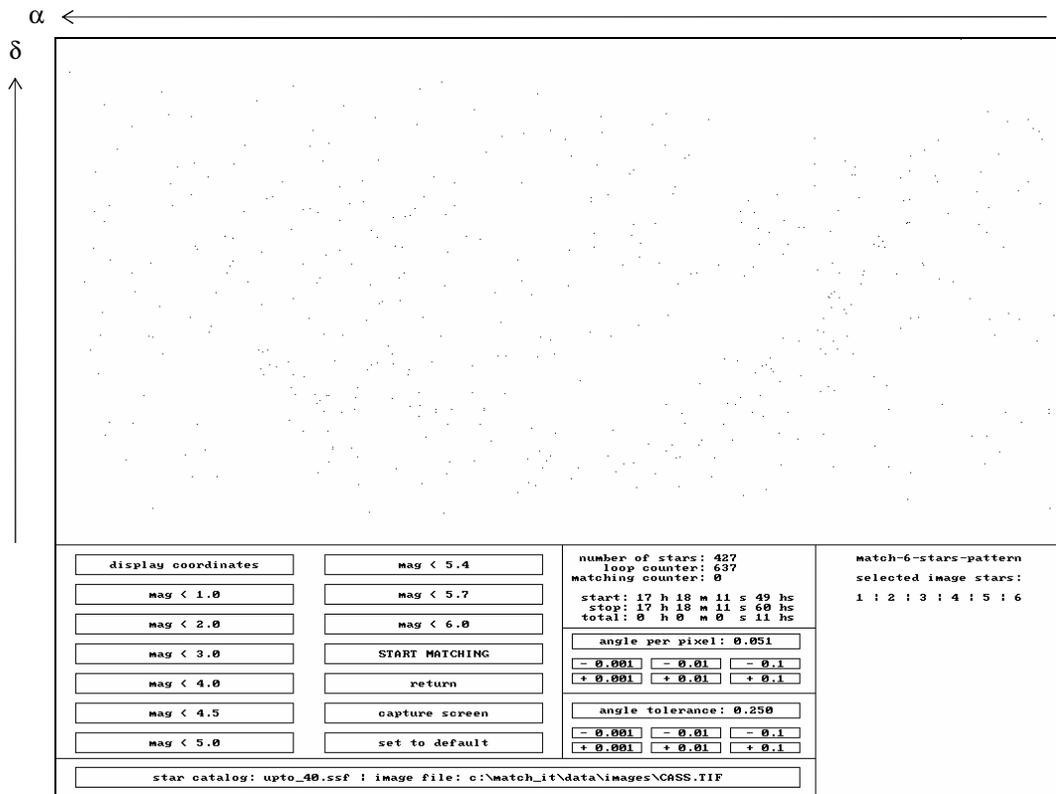


Bild 6.41: Kein erkanntes 6-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_4.0*, 427 Sterne, *angle_tolerance=0,25°*)

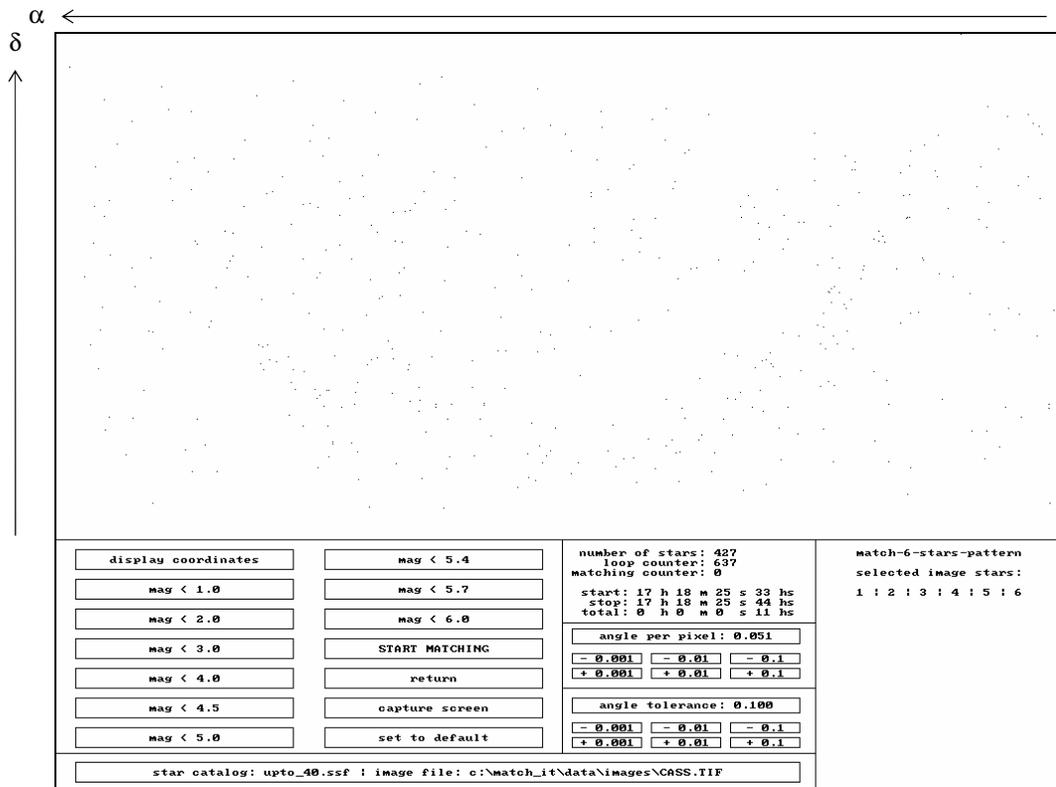


Bild 6.42: Kein erkanntes 6-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_4.0*, 427 Sterne, *angle_tolerance=0,1°*)

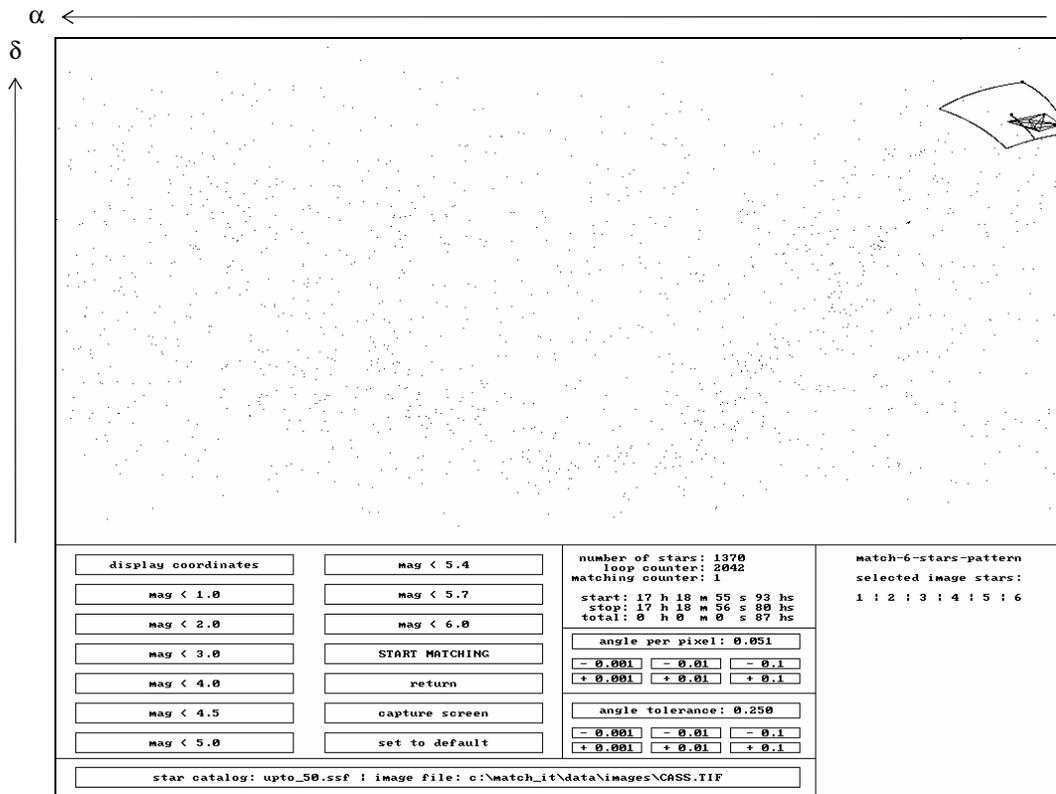


Bild 6.43: Ein erkanntes 6-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,25°*)

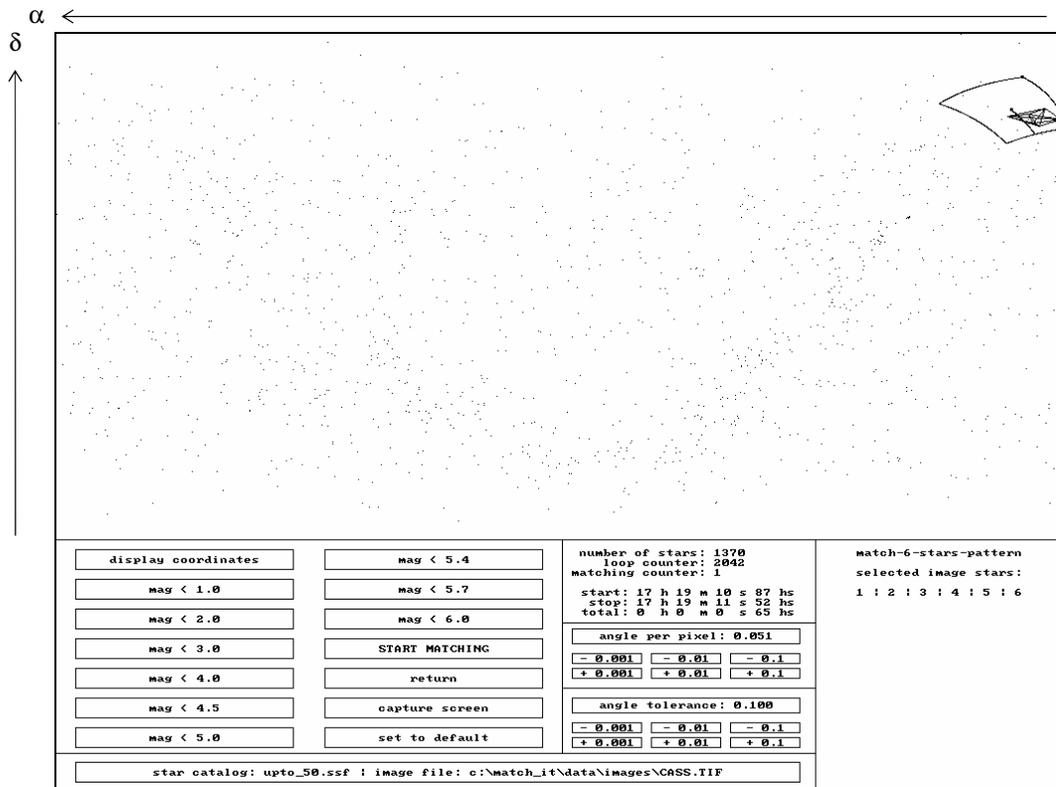


Bild 6.44: Ein erkanntes 6-Sterne-Muster bei Cassiopeia
(Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,1°*)

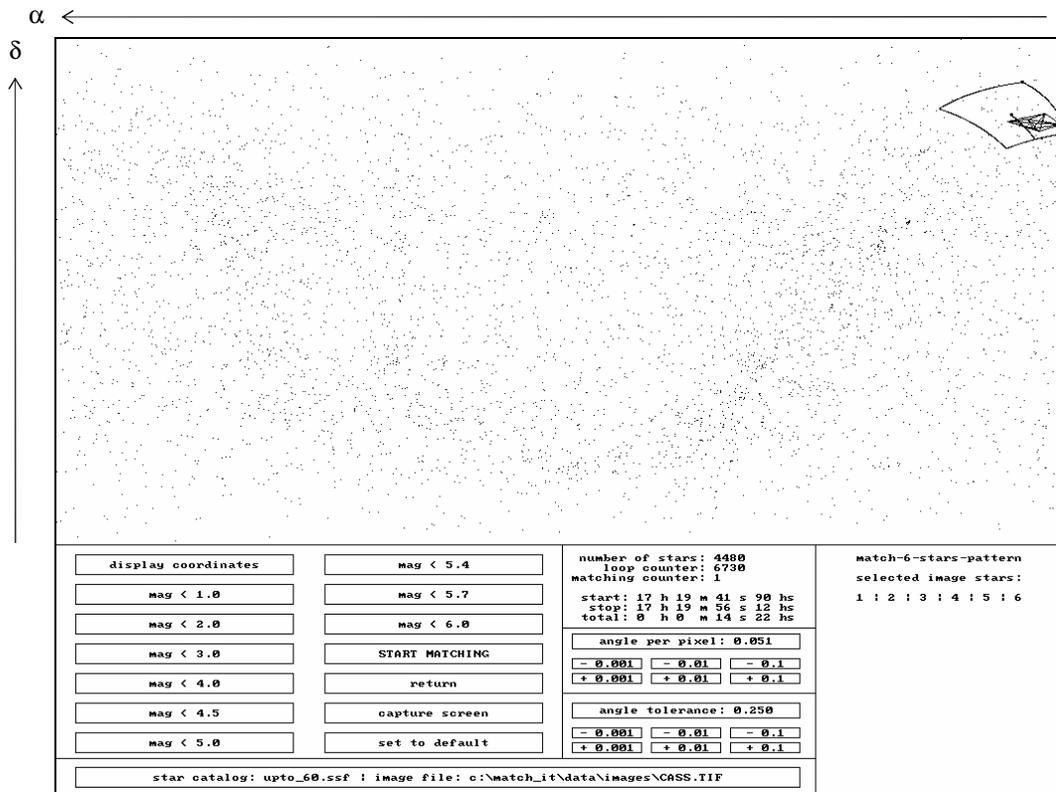


Bild 6.45: Ein erkanntes 6-Sterne-Muster bei Cassiopeia
 (Sternkatalog: *uptomag_6.0*, 4480 Sterne, *angle_tolerance=0,25°*)

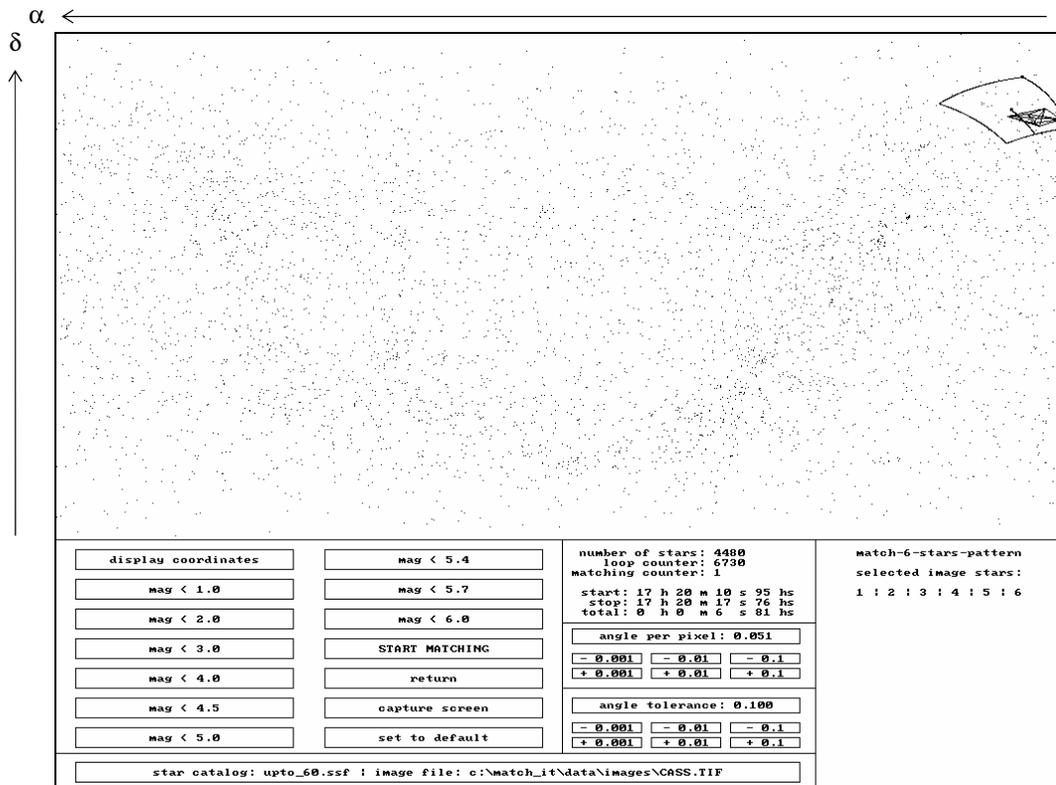


Bild 6.46: Ein erkanntes 6-Sterne-Muster bei Cassiopeia
 (Sternkatalog: *uptomag_6.0*, 4480 Sterne, *angle_tolerance=0,1°*)

6.6 Spiegelbildüberprüfung (*mirror-image-check*)

Ein ausschließlich auf dem Vergleich von Winkelabständen beruhendes Verfahren zur Erkennung von Sternmustern wird zunächst auch *Spiegelbilder* der Bildvorlage als Lösung eines im Sternkatalog gefundenen *n-Sterne-Musters* ausgeben, sofern dieses Spiegelbild (*mirror-image*) mittels Katalogsternen überhaupt generierbar ist. Bild 6.47 verdeutlicht diese Problematik anhand eines *3-Sterne-Musters* (*image-triplet*): Denn sowohl innerhalb des korrekt erkannten Sternkatalogmusters (Bild 6.47, links unten), als auch innerhalb des dazu korrespondierenden, aber inkorrekten Spiegelbildes (Bild 6.47, rechts unten) sind die Abstände zwischen den Katalogsternen cs_{i1} , cs_{i2} und cs_{i3} bzw. cs_{i3}^* passend zu den Abständen zwischen den Bildsternen is_1 , is_2 und is_3 , die das zu erkennende Sternmuster (Bild 6.47, oben) vorgeben. Daher wird stets nach jedem erfolgreichen und auf dem geometrischen Vergleich von Kosinuswinkelabständen basierenden Matchings eine *Spiegelbildüberprüfung* (Modul *mirror-image-check*) durchgeführt, um das im Sternkatalog gefundene Sternmuster endgültig als erkannt abzusichern.

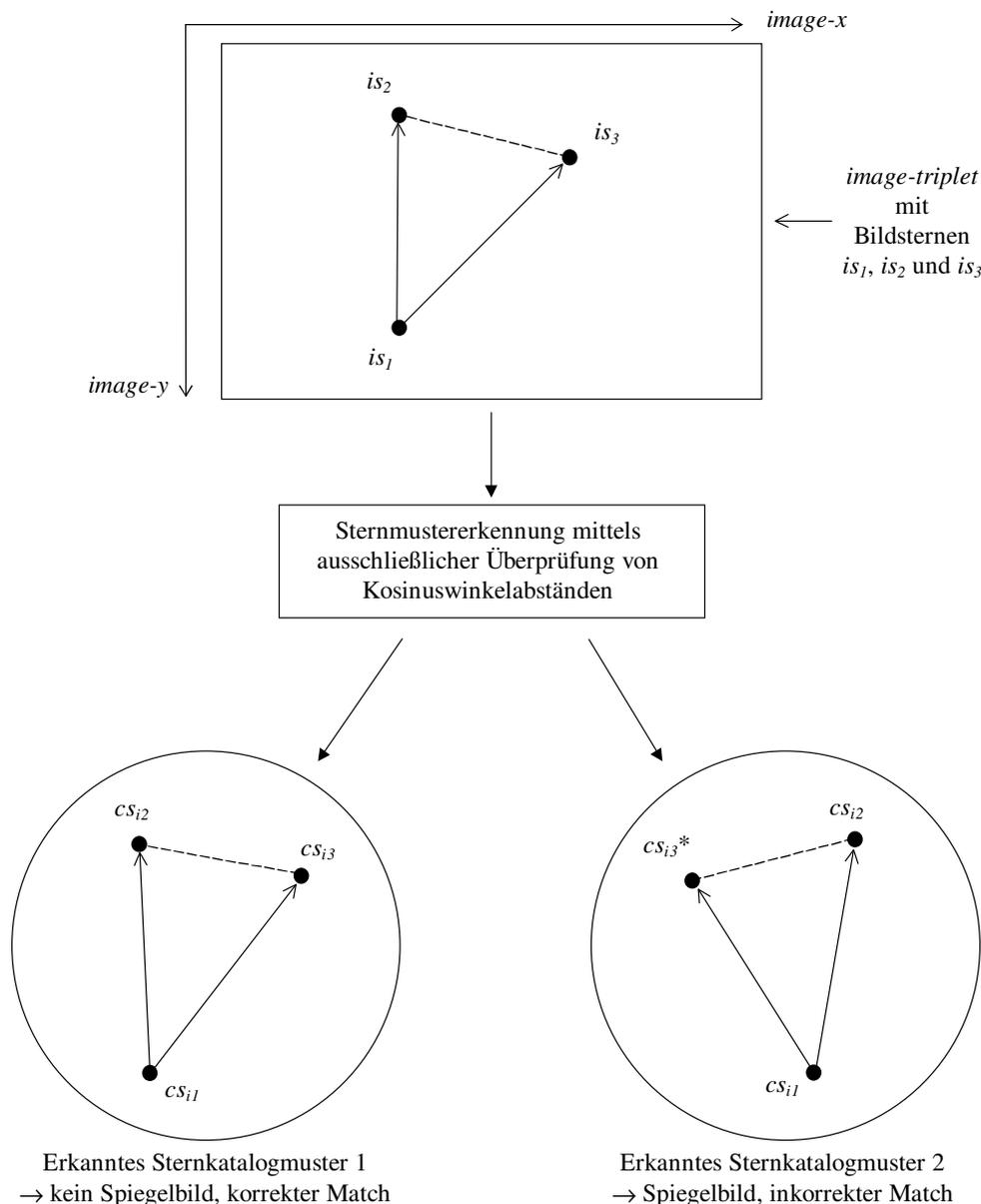


Bild 6.47: Zur Problematik der Erkennung von Spiegelbildern

Durchgeführt wird diese Überprüfung innerhalb des Moduls *mirror-image-check*, welches in den Modulen *match-n-stars-pattern* mit $n=3..6$ eingebettet ist, anhand eines qualitativen Vergleiches des Vorzeichens der Beträge *sign_cp_image_triplet* und *sign_cp_matched_pattern_triplet* zweier Vektorprodukte. Diese Methode ist unabhängig von der Drehung der Bildvorlage und frei von Singularitäten. Die Bildung der Vektorprodukte findet zum einen innerhalb der x-y-Ebene der Bildvorlage und zum anderen innerhalb der x-y-Ebene des kartesischen, dreidimensionalen Systems der Himmelskoordinaten statt. Um eine quasi-parallele Ausrichtung der beiden Bezugsebenen zu erreichen, wird die x-y-Ebene der nördlichen Hemisphäre des dreidimensionalen Himmelskoordinatensystems auf die x-y-Ebene der Bildvorlage projiziert. Zu beachten ist jedoch, daß die y-Achsen der beiden Koordinatensysteme antiparallel orientiert sind.

Die Himmelskoordinaten der drei Katalogsterne cs_{i1} , cs_{i2} und cs_{i3} bzw. cs_{i3}^* werden zunächst einer *Koordinatentransformation* unterzogen ($cs_{ix} \rightarrow cs'_{ix}$), wobei dem Katalogstern cs_{i1} grundsätzlich diejenigen neuen Himmelskoordinaten ($\delta_{cs'_{i1}}$, $\alpha_{cs'_{i1}}$ bzw. $x_{cs'_{i1}}$, $y_{cs'_{i1}}$, $z_{cs'_{i1}}$) zugeordnet werden, die denen des Himmelsnordpols bzw. dem Ursprung der x-y-Ebene des kartesischen Himmelskoordinatensystems entsprechen:

$$\begin{aligned} \delta_{cs'_{i1}} &\rightarrow 90^\circ; \alpha_{cs'_{i1}} \rightarrow 0^\circ \text{ (sphärisch)} \\ &\text{bzw.} \\ x_{cs'_{i1}} &\rightarrow 0; y_{cs'_{i1}} \rightarrow 0; z_{cs'_{i1}} \rightarrow 1 \text{ (kartesisch)} \end{aligned}$$

Entsprechend findet eine Transformation der parallel zum kartesischen System vorliegenden sphärischen Himmelskoordinaten der beiden Katalogsterne cs_{i2} und cs_{i3} bzw. cs_{i3}^* statt, mit anschließender Rücktransformation in das kartesische Koordinatensystem [Wepner 1985].

Für die neuen sphärischen Koordinaten $\delta_{cs'_{ix}}$ (Deklination) und $\alpha_{cs'_{ix}}$ (Rektaszension) eines Katalogsterns cs'_{ix} gilt:

$$\delta_{cs'_{ix}} = \arcsin\left(\sin(\delta_{cs'_{i1}}) * \sin(\delta_{cs_{ix}}) + \cos(\delta_{cs'_{i1}}) * \cos(\delta_{cs_{ix}}) * \cos(\alpha_{cs'_{i1}} - \alpha_{cs_{ix}})\right)$$

(Gleichung 6.3)

$$\alpha_{cs'_{ix}} = 2 * \arctan\left(\frac{\left(\cos(\delta_{cs'_{ix}}) + \cos(\delta_{cs'_{i1}}) * \sin(\delta_{cs_{ix}}) - \sin(\delta_{cs'_{i1}}) * \cos(\delta_{cs_{ix}}) * \cos(\alpha_{cs'_{i1}} - \alpha_{cs'_{ix}})\right)}{\cos(\delta_{cs_{ix}}) * \sin(\alpha_{cs'_{i1}} - \alpha_{cs'_{ix}})}\right)$$

(Gleichung 6.4)

Für die Rücktransformation ins kartesische Koordinatensystem gilt:

$$\begin{aligned} x_{cs'_{ix}} &= \cos(\delta_{cs'_{ix}}) * \cos(\alpha_{cs'_{ix}}) \\ y_{cs'_{ix}} &= \cos(\delta_{cs'_{ix}}) * \sin(\alpha_{cs'_{ix}}) \\ z_{cs'_{ix}} &= \sin(\delta_{cs'_{ix}}) \end{aligned}$$

(Gleichungen 6.5, 6.6 und 6.7)

Das erste Vektorprodukt *cp-image-triplet* ergibt sich aus der Bildvorlage und wird gebildet durch Multiplikation des Vektors $is_1 \rightarrow is_2$ von Bildstern is_1 zu is_2 mit dem Vektor $is_1 \rightarrow is_3$ von Bildstern is_1 zu Bildstern is_3 . Berücksichtigt werden die jeweiligen x- bzw. y-Komponenten (x_{is_x} , y_{is_x}) der drei Bildsterne is_1 , is_2 und is_3 innerhalb der zweidimensionalen Bildvorlage:

- $is_1 \rightarrow x_{is_1}, y_{is_1}$
- $is_2 \rightarrow x_{is_2}, y_{is_2}$
- $is_3 \rightarrow x_{is_3}, y_{is_3}$

Daraus ergeben sich durch Subtraktion der jeweiligen Komponenten die beiden zweidimensionalen Vektoren $is_1 \rightarrow is_2$ und $is_1 \rightarrow is_3$, die jedoch voneinander linear unabhängig sein müssen (*image_triplet_ok=true*, siehe auch Kapitel 6.7). Für den vorzeichenbehafteten Betrag des Vektorprodukts *cp_image_triplet* der beiden Vektoren $is_1 \rightarrow is_2$ und $is_1 \rightarrow is_3$ gilt:

$$cp_image_triplet = x(is_1 \rightarrow is_2) * y(is_1 \rightarrow is_3) + y(is_1 \rightarrow is_2) * x(is_1 \rightarrow is_3)$$

bzw.

$$cp_image_triplet = (x_{is_2} - x_{is_1}) * (y_{is_3} - y_{is_1}) + (y_{is_2} - y_{is_1}) * (x_{is_3} - x_{is_1})$$

(Gleichung 6.8)

Für das Vorzeichen *sign_cp_image_triplet* des Vektors *cp_image_triplet* gilt wiederum:

$$sign_cp_image_triplet = sign(cp_image_triplet)$$

(Gleichung 6.9)

Das zweite vorzeichenbehaftete Vektorprodukt *cp_matched_pattern_triplet* wird berechnet durch Multiplikation des Vektors $cs'_{i1} \rightarrow cs'_{i2}$ von Katalogstern cs'_{i1} zu cs'_{i2} mit dem Vektor $cs'_{i1} \rightarrow cs'_{i3}$ von Katalogstern cs'_{i1} zu Katalogstern cs'_{i3} . Hierbei werden jedoch nur die x- und y-Komponenten ($x_{cs'_{ix}}$, $y_{cs'_{ix}}$) der kartesischen, dreidimensionalen und gemäß der Gleichungen 6.3 bis 6.7 koordinatentransformierten Sternkatalogeinträge berücksichtigt, was quantitativ gesehen fehlerhaft ist, aber zur qualitativen Auswertung der Ausrichtung des Sternmusters (und damit auch zur Spiegelbildüberprüfung) völlig ausreichend und im Kontext der Aufgabenstellung korrekt ist:

- $cs'_{i1} \rightarrow x_{cs'_{i1}}, y_{cs'_{i1}}, (z_{cs'_{i1}})$
- $cs'_{i2} \rightarrow x_{cs'_{i2}}, y_{cs'_{i2}}, (z_{cs'_{i2}})$
- $cs'_{i3} \rightarrow x_{cs'_{i3}}, y_{cs'_{i3}}, (z_{cs'_{i3}})$

Es ergeben sich durch komponentenweise Subtraktion und ohne Betrachtung der z-Komponenten ($z_{cs'_{ix}}$) die beiden jetzt nur noch zweidimensionalen Vektoren ($cs'_{i1} \rightarrow cs'_{i2}$)' und ($cs'_{i1} \rightarrow cs'_{i3}$)'.

Für den Betrag des Vektorprodukts $cp_matched_pattern_triplet$ beider Vektoren $(cs'_{i1} \rightarrow cs'_{i2})'$ und $(cs'_{i1} \rightarrow cs'_{i3})'$ gilt:

$$\begin{aligned}
 cp_matched_pattern_triplet &= \\
 x(cs'_{i1} \rightarrow cs'_{i2})' * y(cs'_{i1} \rightarrow cs'_{i3})' &+ y(cs'_{i1} \rightarrow cs'_{i2})' * x(cs'_{i1} \rightarrow cs'_{i3})' \\
 &\text{bzw.} \\
 cp_matched_pattern_triplet &= \\
 (x_{cs'_{i2}} - x_{cs'_{i1}}) * (y_{cs'_{i3}} - y_{cs'_{i1}}) &+ (y_{cs'_{i2}} - y_{cs'_{i1}}) * (x_{cs'_{i3}} - x_{cs'_{i1}})
 \end{aligned}$$

(Gleichung 6.10)

Für das Vorzeichen $sign_cp_matched_pattern_triplet$ des Vektors $cp_matched_pattern_triplet$ gilt entsprechend:

$$sign_cp_matched_pattern_triplet = sign(cp_matched_pattern_triplet)$$

(Gleichung 6.11)

Sodann sind alle für die Spiegelbildüberprüfung benötigten Variablen bestimmt, und die entscheidende Abfrage im Modul *mirror-image-check* kann mittels Auswertung der Vorzeichen beider soeben bestimmter Vektorprodukte $sign_cp_image_triplet$ und $sign_cp_matched_pattern_triplet$ stattfinden:

Es liegt dann und nur dann kein Spiegelbild vor (korrekte und spiegelbildfreie Erkennung des vorgegebenen Sternmusters), wenn gilt:

$$(sign_cp_image_triplet \neq sign_cp_matched_pattern_triplet)$$

(Bedingung 6.10)

Die Ungleichheit der zueinander korrespondierenden Vorzeichen ist durch die bereits erwähnte antiparallele Ausrichtung der y-Achsen in den kartesischen Koordinatensystemen der Bildvorlage bzw. des Himmels begründet.

6.7 Berechnung der 3-axialen Lageparameter (*calculate-3-axis-attitude*)

Nach einer erfolgreichen und spiegelbildfreien Sternmustererkennung werden innerhalb des Softwaremoduls *calculate-3-axis-attitude* die 3-axialen Lageparameter α_{att} , δ_{att} und ω_{att} berechnet:

- α_{att} : Dieser erste Parameter beschreibt die 2-axiale Lage gegenüber dem äquatorialen Himmelskoordinatensystem in Richtung der Rektaszension α .
- δ_{att} : Dieser zweite Parameter beschreibt die 2-axiale Lage gegenüber dem äquatorialen Himmelskoordinatensystem in Richtung der Deklination δ .
- ω_{att} : Der dritte und letzte Parameter legt die Drehung der x-Achse des Körpers bzw. x-Achse des Bildes gegenüber dem Himmelsäquator fest. Gemessen wird der auch *dritter Winkel* genannte Drehwinkel ω_{att} , ausgehend vom Himmelsäquator in nördliche Richtung und mathematisch positiv, also entgegen dem Uhrzeigersinn.

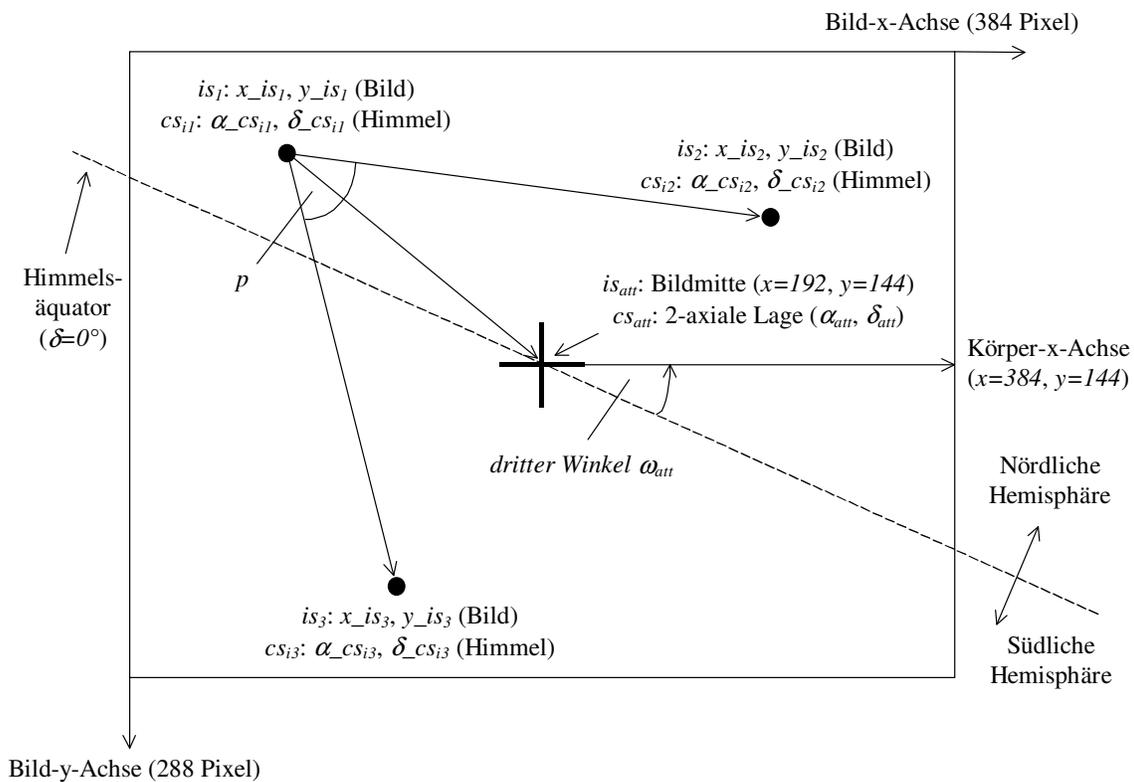


Bild 6.48: Zur Berechnung der 3-axialen Lageparameter

Die Berechnung der 2-axialen Lageinformation (α_{att} , δ_{att}) geschieht mittels einer Methode der Vektoralgebra in kartesisch organisierten Koordinatensystemen. Hierfür sind mindestens drei Sterne erforderlich, deren kartesische Koordinaten nach einer erfolgreichen Sternmustererkennung sowohl im Bild, als auch dazu korrespondierend an der Himmelskugel bekannt sein müssen. Daher muß zunächst eine Aufruf des Moduls *match-n-stars-pattern* mit $n \geq 3$ stattfinden und eine erfolgreiche und spiegelbildfreie Erkennung eines entsprechenden *n-Sterne-Musters* mit der Zuordnung von Koordinaten zwischen Bildsternen und Katalogsternen vorliegen.

Innerhalb der Bildvorlage mögen die Bildsterne is_1 , is_2 und is_3 die jeweils folgenden zweidimensionalen Ortskoordinaten haben:

- $is_1 \rightarrow x_{is_1}, y_{is_1}$
- $is_2 \rightarrow x_{is_2}, y_{is_2}$
- $is_3 \rightarrow x_{is_3}, y_{is_3}$

Für die Himmelskoordinaten der dazugehörigen gefundenen Katalogsterne cs_{i1} , cs_{i2} und cs_{i3} gilt:

- $cs_{i1} \rightarrow \alpha_{cs_{i1}}, \delta_{cs_{i1}}$ (2-dim.) bzw. einheitsvektoriell: $x_{cs_{i1}}, y_{cs_{i1}}, z_{cs_{i1}}$ (3-dim.)
- $cs_{i2} \rightarrow \alpha_{cs_{i2}}, \delta_{cs_{i2}}$ (2-dim.) bzw. einheitsvektoriell: $x_{cs_{i2}}, y_{cs_{i2}}, z_{cs_{i2}}$ (3-dim.)
- $cs_{i3} \rightarrow \alpha_{cs_{i3}}, \delta_{cs_{i3}}$ (2-dim.) bzw. einheitsvektoriell: $x_{cs_{i3}}, y_{cs_{i3}}, z_{cs_{i3}}$ (3-dim.)

Es wird ferner vereinbart, daß eine gewisse *Mindestqualität* des durch die drei ausgewählten Bildsterne is_1 , is_2 und is_3 aufgespannten Dreiecks (*image-triplet*) vorliegen muß, die sicherstellen soll, daß die drei Bildsterne nicht auf oder in der *relativen Nähe* einer Geraden liegen (es muß eine lineare Unabhängigkeit zwischen den Bildsternverbindungen $is_1 \rightarrow is_2$ und $is_1 \rightarrow is_3$ bestehen) und einen definierten Mindestabstand voneinander haben (Bild 6.48). Diese Anforderung ist insbesondere durch die örtliche Diskretisierung während des Digitalisierungsvorgangs bedingt. Dies bedeutet zweierlei: Zum einen müssen die Bildsternverbindungen von is_1 nach is_2 und von is_1 nach is_3 jeweils eine Mindestlänge von $min_image_triplet_vector_length$ aufweisen (Bedingung 6.12). Es muß somit gelten:

$$\begin{aligned} & absolut(is_1 \rightarrow is_2) > min_image_triplet_vector_length \\ & \text{and} \\ & absolut(is_1 \rightarrow is_3) > min_image_triplet_vector_length \end{aligned}$$

(Bedingung 6.12)

Zum anderen muß der Öffnungswinkel p (Bild 6.48) zwischen den Vektoren $is_1 \rightarrow is_2$ und $is_1 \rightarrow is_3$ einen Mindestbetrag von $p > min_image_triplet_angle_deg$ und einen Höchstbetrag von $p < (180 - min_image_triplet_angle_deg)$ aufweisen (Bedingung 6.13). Der Winkel p ist durch Auswertung des Vektorprodukts der beteiligten Bildsterne is_1 , is_2 und is_3 bestimmbar, gemäß der nachstehenden Gleichung 6.12:

$$p = \arcsin \left(\frac{absolut \left((is_1 \rightarrow is_2) \times (is_1 \rightarrow is_3) \right)}{(is_1 \rightarrow is_2) (is_1 \rightarrow is_3)} \right)$$

(Gleichung 6.12)

$$\begin{aligned} & p > min_image_triplet_angle_deg \\ & \text{and} \\ & p < (180 - min_image_triplet_angle_deg) \end{aligned}$$

(Bedingung 6.13)

Falls die Bedingungen 6.12 und 6.13 durch ein *image-triplet* des vorgegebenen *n-Sterne-Musters* erfüllt sind, so wird dieser Zustand mit der Booleschen Variable *image_triplet_ok=true* kodiert und innerhalb der Bildvorlage mittels einer Linearkombination des Vektors $is_1 \rightarrow is_2$ von Bildstern is_1 zu is_2 und des Vektors $is_1 \rightarrow is_3$ von Bildstern is_1 zu is_3 der resultierende Vektor $is_1 \rightarrow is_{att}$ von Bildstern is_1 zum Pseudo-Bildstern is_{att} bestimmt (Bild 6.48). Falls mindestens vier Bildsterne vorliegen ($n > 3$), werden durch die Berücksichtigung aller brauchbarer *image-triplets* innerhalb der Bildvorlage die Ergebnisse der ermittelten Lageparameter α_{att} , δ_{att} und ω_{att} gegenseitig verifiziert und im Gesamtergebnis durch eine arithmetische Mittelwertbildung geglättet ausgegeben. Sollte sich der Zustand *image_triplet_ok=true* mit keinem der möglichen *image_triplet* erfüllen lassen, so liegt ein *critical_matched_pattern* (*image_triplet_ok=false*) vor.

Der Pseudo-Bildstern is_{att} (mit der Koordinaten $x_{is_{att}}$, $y_{is_{att}}$) entspricht einem fiktiv gedachten Stern in der Bildmitte und befindet sich damit in exakter Richtung der zu bestimmenden 2-axialen Lage. Bei den Abmessungen des vorliegenden Halbleitersensors der benutzten CCD-Sternenkamera (siehe Anhang B) betragen die Ortskoordinaten der Bildmitte $x_{is_{att}}=192$ und $y_{is_{att}}=144$ (Bild 6.48).

Bei der Linearkombination müssen die Vektoren $is_1 \rightarrow is_2$ und $is_1 \rightarrow is_3$ mittels der Koeffizienten a und b skaliert werden, um den Zielvektor $is_1 \rightarrow is_{att}$ als resultierenden Vektor im kartesischen Koordinatensystem zu konstruieren:

$$is_1 \rightarrow is_{att} = a * (is_1 \rightarrow is_2) + b * (is_1 \rightarrow is_3)$$

(Gleichung 6.13)

Dies sieht im Bild 6.48 auf Ebene der x- bzw. y-Komponenten wie folgt aus:

für die x-Komponenten:

$$x_{is_{att}} - x_{is_1} = a * (x_{is_2} - x_{is_1}) + b * (x_{is_3} - x_{is_1})$$

(Gleichung 6.14)

und entsprechend für die y-Komponenten:

$$y_{is_{att}} - y_{is_1} = a * (y_{is_2} - y_{is_1}) + b * (y_{is_3} - y_{is_1})$$

(Gleichung 6.15)

Es liegen somit zwei Gleichungen mit den beiden Unbekannten a und b vor. Die Lösungen für die Faktoren a und b lassen sich mittels Anwendung der *Cramerschen Regel* und den zu ermittelnden Determinanten d_0 , d_1 und d_2 bestimmen [Bronstein 1982, Dirschmid 1990].

Für die Determinanten d_0 , d_1 und d_2 gilt:

$$d_0=(x_{is_2}-x_{is_1})*(y_{is_3}-y_{is_1})-(x_{is_3}-x_{is_1})*(y_{is_2}-y_{is_1})$$

$$d_1=(y_{is_3}-y_{is_1})*(x_{is_{att}}-x_{is_1})-(x_{is_3}-x_{is_1})*(y_{is_{att}}-y_{is_1})$$

$$d_2=(x_{is_2}-x_{is_1})*(y_{is_{att}}-y_{is_1})-(y_{is_2}-y_{is_1})*(x_{is_{att}}-x_{is_1})$$

(Gleichungen 6.16, 6.17 und 6.18)

Für die Koeffizienten a und b gilt somit:

$$a = \frac{d_1}{d_0}$$

$$b = \frac{d_2}{d_0}$$

(Gleichungen 6.19 und 6.20)

Durch die zuvor geforderte Mindestqualität an das *image-triplet* der Bildvorlage wird automatisch ausgeschlossen, daß d_0 den Wert *Null* annehmen kann. Die Koeffizienten a und b sind gleichermaßen auch die beiden Skalierungsfaktoren, um mittels der vektorisierten und kartesischen Himmelskoordinaten der Katalogsterne cs_{i1} , cs_{i2} und cs_{i3} die dreidimensionalen Koordinaten x_{att} , y_{att} und z_{att} des Pseudo-Katalogsterns cs_{att} zu konstruieren, welcher einem Katalogstern bzw. Einheitsvektor mit 2-axialer Ausrichtung am Himmel bzw. örtlicher Plazierung in der Bildmitte entspricht. Begründet durch die zugelassene Winkeltoleranz *angle_tolerance* während des Vorgangs der Sternmustererkennung müssen auch die Katalogsternvektoren $cs_{i1} \rightarrow cs_{i2}$ und $cs_{i1} \rightarrow cs_{i3}$ einer Prüfung auf lineare Unabhängigkeit unterzogen werden (ähnlich der Methode zur Überprüfung der *image-triplets* aus Kapitel 6.6). Zum einen müssen die Katalogsternverbindungen von cs_{i1} nach cs_{i2} und von cs_{i1} nach cs_{i3} jeweils einen Mindestbetrag von *min_matched_triplet_vector_length* aufweisen und zum anderen muß der Öffnungswinkel zwischen den Vektoren $cs_{i1} \rightarrow cs_{i2}$ und $cs_{i1} \rightarrow cs_{i3}$ einen Mindestbetrag von *min_matched_triplet_angle_deg* aufweisen.

Sollte die lineare Unabhängigkeit der beiden Katalogsternvektoren gegeben sein, so lassen sich die Komponenten x'_{att} , y'_{att} und z'_{att} des noch unnormierten kartesischen Lagevektors gemäß nachstehender Linearkombinationen ermitteln:

$$x'_{att}=x_{cs_{i1}}+a*(x_{cs_{i2}}-x_{cs_{i1}})+b*(x_{cs_{i3}}-x_{cs_{i1}})$$

$$y'_{att}=y_{cs_{i1}}+a*(y_{cs_{i2}}-y_{cs_{i1}})+b*(y_{cs_{i3}}-y_{cs_{i1}})$$

$$z'_{att}=z_{cs_{i1}}+a*(z_{cs_{i2}}-z_{cs_{i1}})+b*(z_{cs_{i3}}-z_{cs_{i1}})$$

(Gleichungen 6.21, 6.22 und 6.23)

Dieser Lagevektor muß abschließend noch normiert werden, um den Einheitsvektor der 2-axialen Lageinformation mit den Komponenten x_{att} , y_{att} und z_{att} zu ergeben:

$$x_{att} = \frac{x'_{att}}{\text{absolute}(x'_{att}, y'_{att}, z'_{att})}$$

$$y_{att} = \frac{y'_{att}}{\text{absolute}(x'_{att}, y'_{att}, z'_{att})}$$

$$z_{att} = \frac{z'_{att}}{\text{absolute}(x'_{att}, y'_{att}, z'_{att})}$$

(Gleichungen 6.24, 6.25 und 6.26)

Durch eine Rückrechnung der Anweisung zur Vektorisierung von zweidimensionalen Himmelskoordinaten gemäß Anhang A.2 ergeben sich aus dem kartesischen Einheitsvektor der Lage (x_{att} , y_{att} , z_{att}) die gesuchten sphärischen und 2-axialen Lageparameter α_{att} und δ_{att} .

Der dritte Lageparameter ω_{att} wird über die Ausrichtung des Vektors der Körper x-Achse bzw. Bild x-Achse gegenüber dem äquatorialen Himmelskoordinatensystem bestimmt. Dazu werden zunächst die Differenzen der Rektaszension $diff_alpha$ und Deklination $diff_delta$ zwischen den jeweiligen Koordinaten der Bildmitte und des in x-Richtung befindlichen rechten Bildrands ermittelt. Hierfür wird vorausgesetzt, daß die x-Achse des Bildes parallel zur x-Achse des Raumflugkörpers ausgerichtet ist. In Bild 6.48 sind dies die zweidimensionalen Himmelskoordinaten der Bildkoordinaten $x=192$ und $y=144$ für die Bildmitte bzw. $x=384$ und $y=144$ für den rechten Bildrand in x-Richtung. Die Himmelskoordinaten des erstgenannten Bildpunktes sind nichts anderes als die 2-axialen Lageparameter α_{att} und δ_{att} , die bereits berechnet wurden. Die Himmelskoordinaten des letztgenannten Bildpunktes lassen sich mit dem gleichen Berechnungsverfahren wie zur Bestimmung der Lageparameter α_{att} und δ_{att} ermitteln, bei jedoch anders gesetzten Randbedingungen durch die geänderten Ortskoordinaten des Pseudosterns is_{att} mit $x=384$ und $y=144$. Liegen die Differenzwerte von Rektaszension ($\Delta x = diff_alpha$) und Deklination ($\Delta y = diff_delta$) erst einmal vor, so kann der Wert von ω_{att} mittels des bekannten Formalismus

$$\omega_{att} = \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) = \arctan\left(\frac{diff_delta}{diff_alpha}\right)$$

(Gleichung 6.27)

und unter der Berücksichtigung des Quadranten, innerhalb dessen sich der durch die Differenzen von Rektaszension und Deklination gekennzeichnete Vektor ausgerichtet ist, berechnet werden. Der relevante Quadrant wird durch Vorzeichenabfrage von $diff_delta$ und $diff_alpha$ ermittelt.

Für die Himmelsaufnahme *Cassiopeia* (Bild 6.2) ergeben sich die folgenden 3-axialen Lageparameter (Tabelle 6.2), die auch bereits anhand der graphischen Ausgabe einer eindeutigen Sternmustererkennung gut zu erkennen sind (siehe z.B. Bild 6.17):

	α_{att}	δ_{att}	ω_{att}
(rad)	0,34	1,09	5,41
(deg)	19,73	62,44	309,89

Tabelle 6.2: Ergebnistabelle der 3-axialen Lageparameter der Bildvorlage *Cassiopeia*

6.8 Organisation eines n -Sterne-Musters nach der *closest-stars* Methode

Untersucht man das Laufzeitverhalten des Verfahrens zur Erkennung eines *2-Sterne-Musters*, das wiederum auch den Einstieg bzw. die äußere und rechenintensivste Programmschleife zur Erkennung von Sternmustern mit mehr als zwei Bildsternen ($n > 2$) bedeutet, so fällt ein Effekt auf, der bei entsprechender Berücksichtigung zur deutlichen Herabsetzung der Laufzeit auf Rechenmaschinen beitragen kann: Mittels des Programms *DOUBLE* des *MATCH-TOOLS* Programmpakets läßt sich ein synthetischer Doppelstern mit den Komponenten is_1 und is_2 bilden und hinsichtlich des Winkelabstands $angle_distance_{is_1 \leftrightarrow is_2}$ zwischen den beiden Komponenten mittels einer Programmschleife schrittweise variieren. Der Parameter der erlaubten Winkeltoleranz $angle_tolerance$ wird dabei festgehalten. Das Modul *match-2-stars-pattern* wird auf jede aktuelle Winkeldistanz $angle_distance_{is_1 \leftrightarrow is_2}$ angewandt, wobei die Ergebnisse in Form der Anzahl (*matching_counter*) der erkannten Doppelsterne cs_{i1} und cs_{i2} des vorgegebenen Sternkatalogs und der Rechenlaufzeit (*matching_time*) gespeichert werden. Es fällt deutlich auf, daß die Rechenlaufzeit mit steigendem Winkelabstand monoton wächst, insbesondere fast linear im Bereich kleinerer Winkel (siehe Bild 6.49 und 6.50). Daher bietet es sich an, daß ein zu erkennendes *n-Sterne-Muster* vor dem Matching stets derart umorganisiert wird, daß die Bildsterne is_1 und is_2 grundsätzlich dem Doppelstern mit dem geringsten Winkelabstand entsprechen, falls dieser Umstand nicht sowieso schon gegeben ist. Die derartige Organisation des Sternmusters wird *closest-stars* Methode genannt, kostet nur äußerst geringe Rechenzeit und findet automatisch in den Modulen *prepare-n-stars-pattern* Berücksichtigung. Dies kann durchaus zur Folge haben, das z.B. die Erkennung eines *4-Sterne-Musters* schneller bewerkstelligt wird als die Erkennung eines *3-Sterne-Musters* derselben Bildvorlage, falls im erweiterten *4-Sterne-Muster* eine kürzere Winkelverbindung zwischen zwei Bildsternen vorliegt als im *3-Sterne-Muster*.

Der Effekt einer möglichen Laufzeitreduzierung bei Anwendung der *closest-stars* Methode ist auch in vielen Ergebnistabellen innerhalb der nachfolgenden Kapitel zu erkennen, z.B. anhand der Tabellen 6.3 und 6.4: Hier benötigt das Verfahren zur Erkennung eines *5-Sterne-Musters* bei der Bildvorlage *Cassiopeia* eine deutlich geringere Rechenzeit als das entsprechende Verfahren zur Erkennung eines *4-Sterne-Musters*.

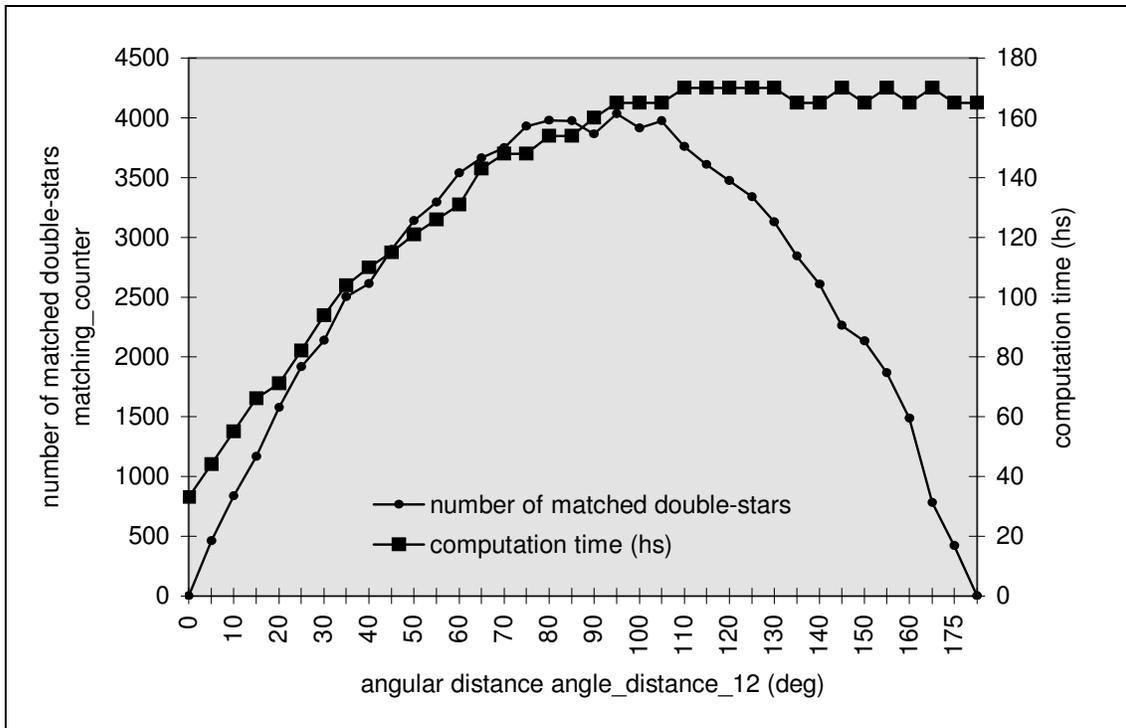


Bild 6.49: Abhängigkeit der Rechenzeit (*match-2-stars-pattern*) und der Anzahl erkannter Doppelsterne vom Winkelabstand $angle_distance_12$ ($0^\circ..180^\circ$) (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, Winkeltoleranz $angle_tolerance=0,25^\circ$)

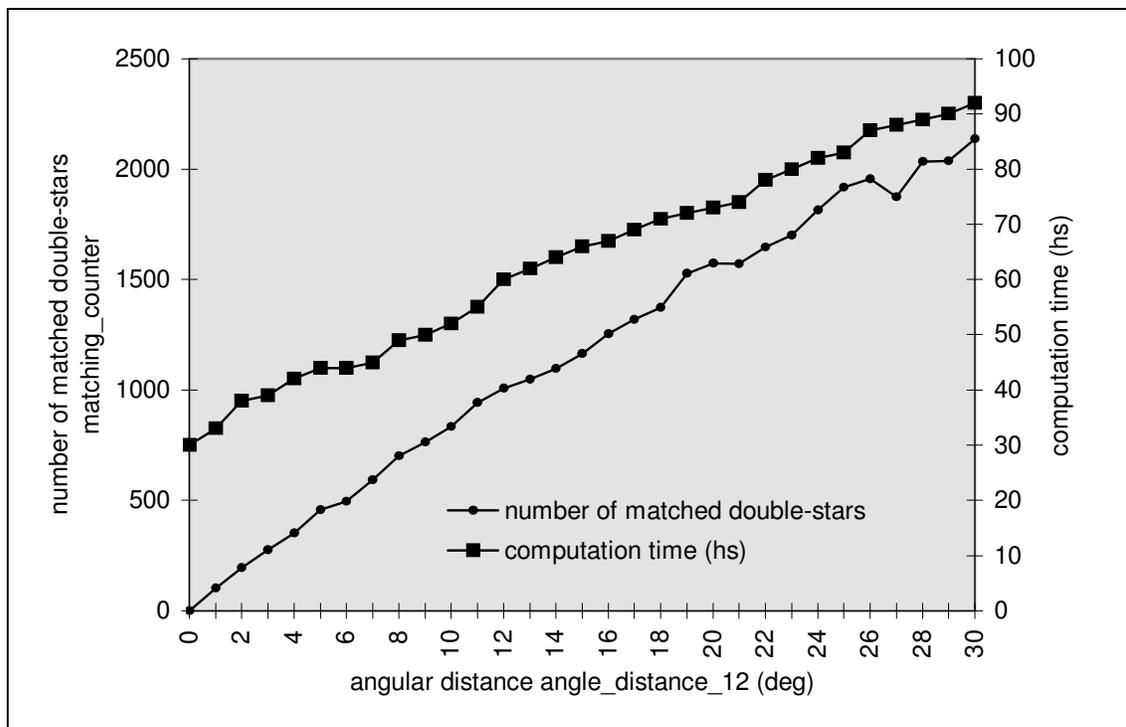


Bild 6.50: Abhängigkeit der Rechenzeit (*match-2-stars-pattern*) und der Anzahl erkannter Doppelsterne vom Winkelabstand $angle_distance_12$ ($0^\circ..30^\circ$) (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, Winkeltoleranz $angle_tolerance=0,25^\circ$)

6.9 Allgemeine Formulierung des Verfahrens zur 3-axialen Lagebestimmung mittels bildverarbeitender Erkennung eines n -Sterne-Musters

Betrachtet man sich die Ergebnisse der verschiedenen Module zur Erkennung eines n -Sterne-Musters, die bei dem auf das Testbild *Cassiopeia* angewandten Rechnerexperiment bzw. innerhalb der Kapitel 6.1 bis 6.8 angefallen sind, etwas genauer, so lassen sich hieraus einige Erkenntnisse ableiten, die eine vereinheitlichte und allgemeine Formulierung des Verfahrens zur Erkennung eines n -Sterne-Musters nebst Bestimmung der 3-axialen Lageparameter zulassen. Zwei tabellarische Aufstellungen (Tabelle 6.3 und 6.4) geben einen vollständigen Überblick der Ergebnisse des Matchings von *Cassiopeia*. Insgesamt neun verschieden umfangreiche und den Himmel vollständig abdeckende Sternkataloge wurden benutzt, die jeweils alle helleren Sterne bis zur Grenzhelligkeit von $mag=1,0$ (Sternkatalog *uptomag_1.0*: 12 Sterne) bis zu $mag=6,0$ (Sternkatalog *uptomag_6.0*: 4480 Sterne) beinhalten. Die Ergebnistabellen 6.3 und 6.4 unterscheiden sich bezüglich der von aussen gesetzten Parameter nur hinsichtlich des Wertes der zugelassenen Winkeltoleranz mit $angle_tolerance=0,25^\circ$ bei Tabelle 6.3 und $angle_tolerance=0,1^\circ$ bei Tabelle 6.4. Zum Vergleich: Aus Sicht der Erde beträgt der Winkeldurchmesser des Mondes und der Sonne jeweils etwa $p=0,5^\circ$ und entspricht somit dem Match-Bereich bei $angle_tolerance=0,25^\circ$ (siehe Bild 6.5 in Kapitel 6.1).

Wichtigstes Kriterium zur eindeutigen Erkennung eines unbekanntes Sternmusters ist die Anzahl der musterbildenden Sterne. Selbst bei einem Sternkatalog, der weit mehr Sterne beinhaltet als von der CCD-Sternenkamera detektierbar sind, wird bei der Erkennung eines 6 -Sterne-Musters eine eindeutige Lösung gefunden, wie am Beispiel des Sternkatalogs *uptomag_6.0* gut zu sehen ist. Die Hinzuziehung von mehr als sechs Sternen zur Musterbildung (n -Sterne-Muster mit $n>6$) scheint zumindest im Fall der Bildvorlage *Cassiopeia* nicht notwendig zu sein und wird im Rahmen der vorliegenden Dissertation auch nicht weiter untersucht. Diese Annahme wird anhand der Simulationen in Kapitel 8 bestätigt und läßt dadurch eine *robuste* programmiertechnische Umsetzung des Matchingverfahrens zu. Ferner würde bei Hinzuziehung weiterer musterbildender Objekte die Wahrscheinlichkeit steigen, daß Fehlpixel oder nicht im Sternkatalog aufgeführte Sterne als Bildsterne hinzugezogen würden. Gegebenenfalls ist eine Erweiterung der Module zur Erkennung von n -Sterne-Mustern mit $n\geq 7$ leicht möglich. Wie bereits erwähnt, sollte der Sternkatalog jedoch so dimensioniert werden, daß dieser nur Sterne beinhaltet, die vom Bildaufnehmersystem detektierbar sind (bei einem möglichst minimalen *overhead* von Sterneinträgen), um sicherzustellen, daß keine Bildsterne durch die Himmelsaufnahme zur Sternmusterbildung beitragen können, die nicht im Sternkatalog enthalten sind. Im Beispielbild *Cassiopeia* ist dies der Katalog *uptomag_5.0*, der Sterne bis zu $mag=5,0$ beinhaltet. Hier führt selbst die Erkennung eines 4 -Sterne-Musters bei der größeren Winkeltoleranz von $angle_tolerance=0,25^\circ$ zu einem eindeutigen Ergebnis. Die sehr eng gefaßte Winkeltoleranz von $angle_tolerance=0,1^\circ$ liefert sogar bei der Erkennung eines 3 -Sterne-Musters und Nutzung des Sternkatalogs *uptomag_5.0* eine eindeutige Lösung.

Die Ergebnisse des Matchings bei Nutzung der Sternkataloge *uptomag_1.0*, *uptomag_2.0* und *uptomag_3.0* sind unbefriedigend, was jedoch nicht anders zu erwarten ist, da hier nur Sterne bis zu einer visuellen Helligkeit von $mag=3,0$ enthalten sind.

Da bei der Bildvorlage *Cassiopeia* sechs Sterne im Minimum vorliegen, spricht auch nichts dagegen in diesem Fall das Modul *match-6-stars-pattern* zur Erkennung eines *6-Sterne-Musters* anzuwenden. Es bietet sich an, als musterbildende Sterne automatisch die sechs hellsten Bildsterne auszuwählen, um die in der Praxis potentiell bestehende Möglichkeit zu minimieren, daß schwächere Sterne (oder sogar einzelne Störpixel auf dem Sensor der CCD-Sternenkamera) als im Sternkatalog enthalten sind, zur Musterbildung herangezogen werden.

	<i>n=2</i>	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag<1,0</i> (12 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag<2,0</i> (36 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag<3,0</i> (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	9 < 0s 1hs	1 < 0s 1hs	1 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag<4,0</i> (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	33 0s 6hs	1 0s 6hs	1 0s 6hs	1 0s 6hs	0 0s 6hs
<i>mag<4,5</i> (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	127 0s 11hs	3 0s 33hs	1 0s 28hs	1 0s 22hs	1 0s 27hs
<i>mag<5,0</i> (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	409 0s 44hs	14 1s 64hs	1 1s 75hs	1 1s 21hs	1 1s 27hs
<i>mag<5,4</i> (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1360 1s 54hs	71 8s 95hs	3 10s 71hs	1 5s 99hs	1 6s 20hs
<i>mag<5,7</i> (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	2640 3s 8hs	198 23s 72hs	10 31s 92hs	2 15s 98hs	1 16s 65hs
<i>mag<6,0</i> (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	4145 4s 73hs	372 46s 14hs	21 1m 5s 42hs	5 32s 2hs	1 33s 39hs

Tabelle 6.3: Ergebnisse der Erkennung von *n-Sterne-Mustern* beim Testbild *Cassiopeia*
Ausgeführtes Programm: *MATCH-2*
(*angle_per_pixel=0,051°/pixel*, *angle_tolerance=0,25°*, CPU: *Pentium*, *cl=133MHz*)

Begründet dadurch, daß bei der Erkennung eines *2-Sterne-Musters* auch bei einem nur wenige Sterne umfassenden Sternkatalogs zu viele Lösungen herausgegeben werden, wird eine ausschließlich auf die Erkennung eines Doppelsterns beruhende Sternmustererkennung verworfen, zumal auch die weiterführende Bestimmung der 3-axialen Lageparameter mittels der in Kapitel 6.7 vorgestellten Methode nicht möglich ist. Das Modul *match-2-stars-pattern* steht aber trotzdem für Testzwecke im Rahmen der *MATCH-IT* Programme zur Verfügung und ist quasi die äußere Programmschleife aller Module *match-n-stars-pattern* zur Erkennung von aus mindestens drei Sternen bestehenden Sternmustern ($n \geq 3$, Bild 6.51). Ferner wird das Modul *match-2-stars-pattern* im Rahmen der *Simulation* (Kapitel 8) bei Vorlage von zwei Bildsternen durchlaufen - jedoch werden die Ergebnisse zur Beurteilung einer eindeutigen Erkennung eines Sternmusters grundsätzlich negativ gewertet, da kein *image-triplet* vorliegt und folglich die Berechnung der 3-axialen Lageparameter nicht möglich ist.

	<i>n=2</i>	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag<1,0</i> (12 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag<2,0</i> (36 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag<3,0</i> (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	4 < 0s 1hs	1 < 0s 1hs	1 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag<4,0</i> (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	16 0s 6hs	1 0s 6hs	1 0s 6hs	1 0s 6hs	0 0s 6hs
<i>mag<4,5</i> (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	50 0s 17hs	1 0s 22hs	1 0s 22hs	1 0s 22hs	1 0s 22hs
<i>mag<5,0</i> (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	153 0s 44hs	1 0s 93hs	1 0s 93hs	1 0s 77hs	1 0s 77hs
<i>mag<5,4</i> (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	511 1s 49hs	5 4s 45hs	1 4s 50hs	1 3s 8hs	1 3s 18hs
<i>mag<5,7</i> (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1035 3s 8hs	14 11s 28hs	1 11s 37hs	1 7s 19hs	1 7s 42hs
<i>mag<6,0</i> (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1619 4s 56hs	26 20s 33hs	2 20s 54hs	1 11s 64hs	1 12s 36hs

Tabelle 6.4: Ergebnisse der Erkennung von *n-Sterne-Mustern* beim Testbild *Cassiopeia*
Ausgeführtes Programm: *MATCH-2*
(*angle_per_pixel*=0,051°/pixel, *angle_tolerance*=0,1°, CPU: *Pentium*, *cl*=133MHz)

Bei Nutzung des Rechenwerks eines *Pentium* Prozessors mit $cl=133MHz$ CPU-Takt und $cl=66MHz$ Bustakt liegt die Gesamtrechenzeit *matching_time* des Verfahrens zur Sternmustererkennung nebst Bestimmung der 3-axialen Lageparameter und unter Verwendung des für die Bildvorlage *Cassiopeia* optimalen Sternkatalogs *uptomag_5.0* bei etwa einer Sekunde. Deutlich fällt auf, daß auch der Parameter der Winkeltoleranz *angle_tolerance* Einfluß auf das Laufzeitverhalten nimmt. Ein niedrigerer Wert der Winkeltoleranz hat eine kürzere Laufzeit zur Folge. Bei einer Winkeltoleranz von $angle_tolerance=0,1^\circ$ und der Hinzuziehung des Sternkatalogs *uptomag_5.0* liegt stets eine geringere Laufzeit *matching_time* als eine Sekunde vor ($matching_time < 1s$, siehe auch Tabelle 6.4). Somit ist im Fall der Bildvorlage *Cassiopeia* die Forderung der angestrebten Lagebestimmungsrate *adr* (*attitude determination rate*) von mehr als einem Hertz erfüllt ($adr > 1Hz$). Es fällt ferner auf, daß die Laufzeit bei Erkennung des *5-Sterne-Musters* niedriger ist als bei Erkennung des *4-Sterne-Musters*. Hier trifft der bereits zuvor erwähnte Effekt der Verkürzung der Gesamtrechenzeit durch die *closest-stars* Methode in Erscheinung. Durch den Bildstern *is₅* liegt im *5-Sterne-Muster* des Testbilds *Cassiopeia* ein kleinerer minimaler Winkelabstand vor als im dazugehörigen *4-Sterne-Muster*, was auch durch Vergleich der Bilder 6.23 und 6.31 zu erkennen ist.

Die Module *match-n-stars-pattern* zur Erkennung eines *n-Sterne-Muster* sind jeweils eigenständig implementiert für $n=2$ bis $n=6$. Die Erkennung eines *n+1-Sterne-Musters* ist jedoch von der Vorstellung her in die Erkennung eines *n-Sterne-Musters* eingebettet, wie auch in Bild 6.51 angedeutet. So basiert z.B. die Erkennung eines *6-Sterne-Musters* zunächst auf der Erkennung eines *2-Sterne-Musters* durch die Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i2} . Bei jeder erfolgreichen Auffindung der Katalogsterne cs_{i1} und cs_{i2} wird über den Index $i3$ der Katalogstern cs_{i3} gesucht, der zum Bildstern is_3 korrespondieren muß, gemäß dem Verfahren des Moduls *match-3-stars-pattern*. Sollte sich ein solcher Katalogstern cs_{i3} finden, so wird über den Index $i4$ der Katalogstern cs_{i4} gesucht, entsprechend dem Verfahren des Moduls *match-4-stars-pattern* usw. Letztendlich wird über die innerste Zählerschleife der Index $i6$ durchlaufen, um einen Katalogstern cs_{i6} zu finden, passend zum vorgegebenen Bildstern is_6 .

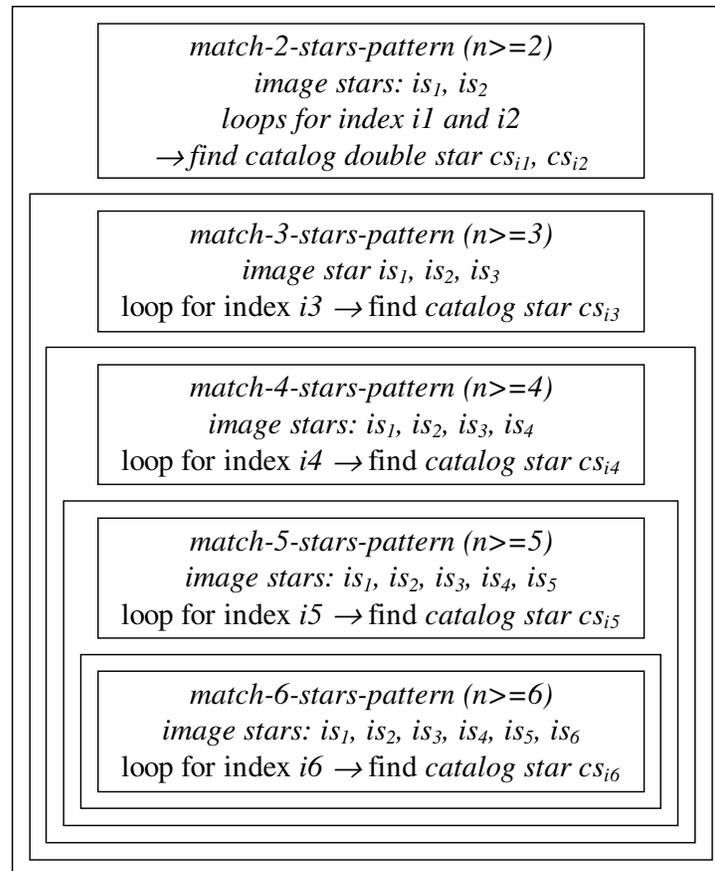


Bild 6.51: Vorstellung der ineinander geschachtelten Einbettung der verschiedenen Module zur Erkennung von *n*-Sterne-Mustern

Resultierend aus allen bisher beschriebenen Beobachtungen wird folgende allgemeine Formulierung des Verfahrens zur Erkennung eines *n*-Sterne-Musters als sequentiell abzuarbeitender Algorithmus aufgestellt:

- Ausgehend von einer digitalen Bildvorlage wird zuerst eine Bilddatenvorverarbeitung (Modul *image-data-pre-processing* gemäß Kapitel 5 durchgeführt, die als Ergebnis die Flächenschwerpunkte (x_{is_x} , y_{is_x}) und Helligkeiten ($gray_value_{is_x}$) aller abgebildeten $number_is$ Bildsterne (*image-stars* $is_1..is_{number_is}$) liefert.
- Es wird ein aus n Bildsternen bestehendes Sternmuster (*n*-Sterne-Muster) gebildet.
- Die Auswahl der n musterbildenden Bildsterne erfolgt durch Hinzuziehung der hellsten drei bis sechs Bildsterne, mit $gray_value_{is_x}$ als Helligkeitskriterium. Es wird stets die maximal mögliche Anzahl der ausgewählten Bildsterne zur Musterbildung genommen ($n=3..6$, siehe auch Bild 6.52).
- Bedeutung des Musters der Bildsterne: alle ausgewählten Bildsterne is_1 bis is_n werden über ihre jeweiligen zweidimensionalen Flächenschwerpunkte (x_{is_x} , y_{is_x}) untereinander verbunden. Hieraus ergibt sich eine Liste aller möglichen Pixelabstände $pixel_distance_{is_x \leftrightarrow is_y}$:

$$pixel_distance_{is_x \leftrightarrow is_y} = \sqrt{(x_{is_x} - x_{is_y})^2 + (y_{is_x} - y_{is_y})^2}$$

(Gleichung 6.28)

- Über einen *Pixel-zu-Winkel* Umrechnungsfaktor $angle_per_pixel$ werden aus den Pixelabständen die dazu korrespondierenden Winkelabstände $angle_distance_{is_x \leftrightarrow is_y}$ berechnet:

$$angle_distance_{is_x \leftrightarrow is_y} = angle_per_pixel * pixel_distance_{is_x \leftrightarrow is_y}$$

(Gleichung 6.29)

- Unter der Berücksichtigung einer zugelassenen Winkeltoleranz $angle_tolerance$ werden ein minimaler Winkelabstand $min_angle_distance_{is_x \leftrightarrow is_y}$ und maximaler Winkelabstand $max_angle_distance_{is_x \leftrightarrow is_y}$ einer jeden Bildsternverbindung $is_x \leftrightarrow is_y$ bestimmt:

$$min_angle_distance_{is_x \leftrightarrow is_y} = angle_distance_{is_x \leftrightarrow is_y} - angle_tolerance$$

$$max_angle_distance_{is_x \leftrightarrow is_y} = angle_distance_{is_x \leftrightarrow is_y} + angle_tolerance$$

(Gleichungen 6.30 und 6.31)

- Zu beachten ist, daß die Winkeluntergrenze $min_angle_distance_{is_x \leftrightarrow is_y}$ den Wert 0 nicht unterschreitet.

- Durch Bildung des Kosinus der Winkelabstandsextrema ergibt sich letztendlich ein zu jeder Bildsternverbindung $is_x \leftrightarrow is_y$ entsprechend korrespondierendes Kosinuswinkelintervall $[cos_{is_x \leftrightarrow is_y_{max}}..cos_{is_x \leftrightarrow is_y_{min}}]$ mit:

$$\begin{aligned} cos_{is_x \leftrightarrow is_y_{max}} &= cos(min_angle_distance_{is_x \leftrightarrow is_y}) \\ cos_{is_x \leftrightarrow is_y_{min}} &= cos(max_angle_distance_{is_x \leftrightarrow is_y}) \end{aligned}$$

(Gleichungen 6.32 und 6.33)

- Mit den ausschließlich geometrischen Informationen aller möglichen Kosinuswinkelintervalle $[cos_{is_x \leftrightarrow is_y_{max}}..cos_{is_x \leftrightarrow is_y_{min}}]$ des zu identifizierenden Sternmusters erfolgt zwecks dessen Erkennung der Einstieg in einen Sternkatalog mit $number_{cs}$ Sterneinträgen. Helligkeitsinformationen einzelner Bild- und Katalogsterne werden im weiteren nicht hinzugezogen.
- Die Rekonstruktion des zu erkennenden Sternmusters erfolgt mittels eines Sternkatalogs mit $number_{cs}$ Einträgen, dessen Koordinaten die Einheitsvektoren $(x_{cs_{ix}}, y_{cs_{ix}}, z_{cs_{ix}})$ von Sternpositionen im dreidimensionalen, kartesischen Koordinatensystem darstellen. Gegebenenfalls müssen die sonst üblichen zweidimensionalen, äquatorialen Himmelskoordinaten (Rektaszension $\alpha_{cs_{ix}}$, Deklination $\delta_{cs_{ix}}$) vektorisiert werden mittels:

$$\begin{aligned} x_{cs_{ix}} &= cos(\delta_{cs_{ix}}) * cos(\alpha_{cs_{ix}}) \\ y_{cs_{ix}} &= cos(\delta_{cs_{ix}}) * sin(\alpha_{cs_{ix}}) \\ z_{cs_{ix}} &= sin(\delta_{cs_{ix}}) \end{aligned}$$

(Gleichungen 6.34, 6.35 und 6.36)

- Der Sternkatalog umfaßt die Himmelskoordinaten derjenigen Sterne, die durch den Bildaufnehmer (CCD-Sternenkamera) detektierbar sind (bei einer vollständigen Himmelsabdeckung: *lost-in-space* Szenario), ohne Angabe von Helligkeiten.
- Im Sternkatalog werden diejenigen verschiedenen n Sterne gesucht, mit denen sich das über die Kosinuswinkelintervalle $[cos_{is_x \leftrightarrow is_y_{max}}..cos_{is_x \leftrightarrow is_y_{min}}]$ vorgegebene Muster der n Bildsterne nachträglich aufbauen läßt. Dazu werden mittels Strukturen von Programmschleifen (Indizes ix und iy) und der Bildung des nachstehenden Skalarprodukts der Kosinuswinkelabstand $cos_{cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}}$ von zwei einheitsvektoriserten, kartesischen Sternkatalogeinträgen cs_{ix} (mit den Komponenten: $x_{cs_{ix}}, y_{cs_{ix}}, z_{cs_{ix}}$) und cs_{iy} (mit den Komponenten: $x_{cs_{iy}}, y_{cs_{iy}}, z_{cs_{iy}}$) berechnet:

$$cos_{cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}} = x_{cs_{ix}} * x_{cs_{iy}} + y_{cs_{ix}} * y_{cs_{iy}} + z_{cs_{ix}} * z_{cs_{iy}}$$

(Gleichung 6.37)

- Zur erfolgreichen Erkennung des Kosinuswinkelabstands $\cos_{cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}}$ der Katalogsterne cs_{ix} und cs_{iy} muß $\cos_{cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}}$ innerhalb eines durch die Bildsterne is_x und is_y vorgegebenen Kosinuswinkelintervalls $[\cos_{is_x \leftrightarrow is_y_{max}}.. \cos_{is_x \leftrightarrow is_y_{min}}]$ liegen:

$$\cos_{is_x \leftrightarrow is_y_{max}} > \cos_{cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}} > \cos_{is_x \leftrightarrow is_y_{min}}$$

(Bedingung 6.14)

- Der Einstieg in den Sternkatalog erfolgt gemäß der *closest-stars* Methode (zwecks Einsparung von Rechenzeit) über eine Doppelsternererkennung (Modul *match-2-stars-pattern*), gebildet aus den beiden am engsten zusammenliegenden Bildsternen (is_1 und is_2) des *n-Sterne-Musters* ($n=3..6$). Hierbei ist eine mögliche Vertauschung der Zuordnung zwischen den Bildsternen is_1 und is_2 zu den Katalogsternen cs_{i1} ($i1=1..number_cs$) und cs_{i2} ($i2=i1..number_cs$) zu berücksichtigen.
- Sollte eine Doppelsternererkennung erfolgreich sein, so wird der Bildstern is_3 aus dem Sternmuster herausgenommen und versucht, einen Katalogstern cs_{i3} zu finden ($i3=1..number_cs$), der die vorgegebenen Abstände zu den Bildsternen is_1 und is_2 herstellen kann (Modul *match-3-stars-pattern*). Dies geschieht mittels der Überprüfung, ob die Skalarprodukte bzw. Kosinuswinkelabstände von Katalogstern cs_{i3} zu den Katalogsternen cs_{i1} und cs_{i2} innerhalb der Kosinuswinkelintervalle der entsprechenden Bildsterne liegen.
- Letztgenannter Schritt wird in ähnlicher Weise solange durchgeführt, bis die Überprüfung aller möglichen Bildsternverbindungen hinsichtlich ihrer Ersetzbarkeit durch Katalogsternverbindungen unter Hinzuziehung von insgesamt n voneinander verschiedenen Katalogsternen abgeschlossen ist. Dies geschieht durch eine schrittweise Überprüfung dergestalt, ob Bildstern is_m ($m=4..n$) des vorgegebenen *n-Sterne-Musters* erfolgreich durch einen Katalogstern cs_{im} im synthetischen Katalogsternmuster rekonstruierbar ist. Dafür müssen alle Kosinuswinkelabstände $\cos_{cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}}$ zwischen Katalogstern cs_{im} zu den Katalogsternen cs_{is} ($s=1..m-1$) innerhalb der entsprechenden Kosinuswinkelintervalle der Bildsterne liegen.
- Sollte sich ein *n-Sterne-Muster* mittels n verschiedener Katalogsternen und ausschließlichem Vergleich aller möglichen Kosinuswinkelabstände rekonstruieren lassen, so wird im nächsten Schritt überprüft, ob das aus den n Katalogsternen bestehende Sternmuster keine Spiegelbild des vorgegebenen *n-Sterne-Musters* der Bildvorlage dargestellt. Nur wenn kein Spiegelbild (Modul *mirror-image-check*) vorliegt und das Katalogsternmuster nicht schon bereits in einem vorherigen Verfahrensschritt erkannt wurde, gilt das Sternmuster als *erfolgreich* erkannt, was eine Inkrementierung des Erkennungszählers *matching_counter* nach sich zieht.
- Nach erfolgreicher Erkennung eines aus mindestens drei geeigneten, d.h. linear voneinander unabhängigen Sternen bestehenden Sternmusters wird die Bestimmung der dazugehörigen 3-axialen Lageparameter α_{att} , δ_{att} und ω_{att} durchgeführt (Modul *calculate-3-axis-attitude*).
- Neben der *closest-stars* Methode ist eine weitere Möglichkeit zur Einsparung von Rechenzeit dadurch gegeben, daß vor jeder möglichen Berechnung eines Skalarproduktes $\cos_{cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}}$ zwischen zwei Katalogsternen cs_{ix} und cs_{iy} zunächst deren Deklinationsdifferenz $diff_delta(cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy})$ überprüft wird, die geringer als der maximale Winkelabstand $delta_max$ aller n Bildsterne untereinander sein muß.

- Das über die Bildvorlage vorgegebene *n*-Sterne-Muster gilt endgültig als erkannt, wenn:
 - sich das durch *n* Bildsterne vorgegebene *n*-Sterne-Muster vollständig mittels *n* voneinander verschiedenen Katalogsternen eines Sternkatalogs und ausschließlich geometrischem Vergleich aller möglichen Kosinuswinkelabstände rekonstruieren läßt und
 - das mittels *n* verschiedenen Katalogsternen generierte synthetische *n*-Sterne-Muster nicht schon bereits im Rahmen des aktuellen Modulablaufs zuvor erkannt wurde und kein Spiegelbild des realen *n*-Sterne-Musters der Bildvorlage darstellt.

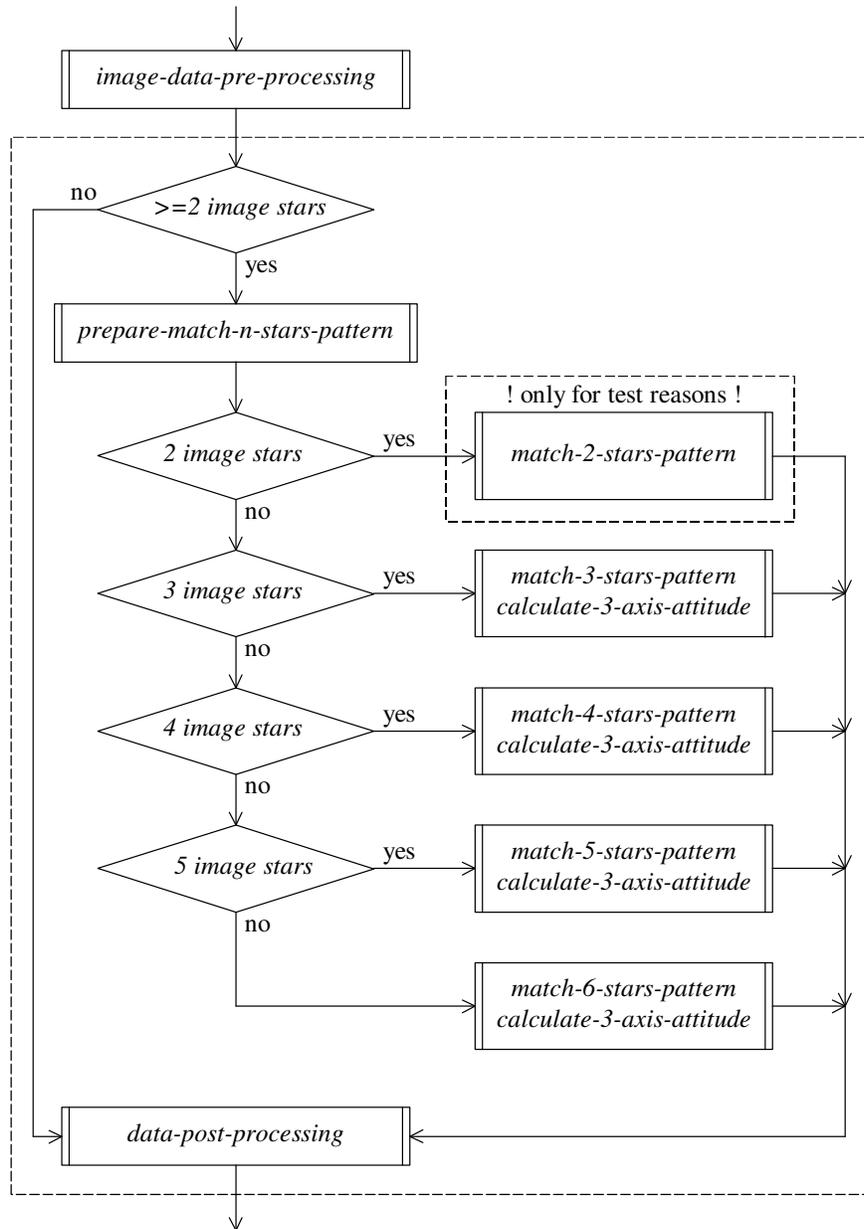


Bild 6.52: Menü der Modulauswahl zur Erkennung eines *n*-Sterne Musters und Bestimmung der dazugehörigen 3-axialen Lageparameter

Hinsichtlich der Anzahl $c(n,k)$ der einmal und nur einmal möglichen k -Sterne-Muster innerhalb eines n -Sterne-Musters gilt (Kombination von k -ter Ordnung mittels n Elemente ohne Wiederholung mit $k \leq n$):

$$c(n,k) = \frac{n!}{k! * (n-k)!} = \binom{n}{k}$$

(Gleichung 6.38)

Dem hier in Kapitel 6 vorgestellten Verfahren zur Sternmustererkennung liegt das Auffinden aller einmal möglichen Doppelsternverbindungen (k -Sterne-Muster mit $k=2$) innerhalb eines n -Sterne-Musters mit $n=2..6$ zugrunde. Für die Anzahl $c(n,2)$ aller möglichen 2-Sterne-Muster bzw. einmal auftretenden und insgesamt zu erkennenden Doppelsternverbindungen innerhalb eines n -Sterne-Musters gilt somit:

$$c(n,2) = \frac{n!}{2! * (n-2)!} = \binom{n}{2}$$

(Gleichung 6.39)

n	$c(n,2)$
2	1
3	3
4	6
5	10
6	15

Tabelle 6.5: Anzahl $c(n,2)$ möglicher Doppelsterne innerhalb eines n -Sterne-Musters ohne Wiederholung

6.10 Aspekte zur Unterteilung des Sternkatalogs in Sub-Sternkataloge

Ein zur Sternmustererkennung benutzter Sternkatalog mit $number_cs$ Einträgen wird während des Ablaufs der Module *match-n-stars-pattern* von verschiedenen und miteinander verschachtelten Programmschleifen zwecks Aufbau von Indexstrukturen durchlaufen. Mittels z.B. der gerade aktuellen Indizes i_x und i_y erfolgt der Zugriff auf die entsprechend indizierten Katalogsterne cs_{i_x} und cs_{i_y} . Jedes Modul zur Erkennung eines n -Sterne-Musters ist gekennzeichnet durch eine äußere Struktur zum Aufbau der Schleifen für die Indizes i_1 und i_2 , um den Doppelstern $is_1 \leftrightarrow is_2$ der Bildvorlage als einen möglichen Doppelstern $cs_{i_1} \leftrightarrow cs_{i_2}$ innerhalb des Sternkatalogs zu identifizieren. Nur falls diese Identifizierung gelingen sollte, erfolgt der Einstieg in eine tiefere Struktur, um im nächsten Schritt mittels des Index i_3 den Bildstern is_3 als Katalogstern cs_{i_3} zu identifizieren. Ähnliches gilt für die Indizes i_4 , i_5 und i_6 , mit deutlicher Rechendominanz jedoch bei den äußeren Schleifen zur Generierung der Indizes i_1 und i_2 . Um alle prinzipiell möglichen Doppelsterne $cs_{i_1} \leftrightarrow cs_{i_2}$ des Sternkatalogs einmal und nur einmal zu generieren, ist folgende Schleifenstruktur gemäß Bild 6.53 notwendig:

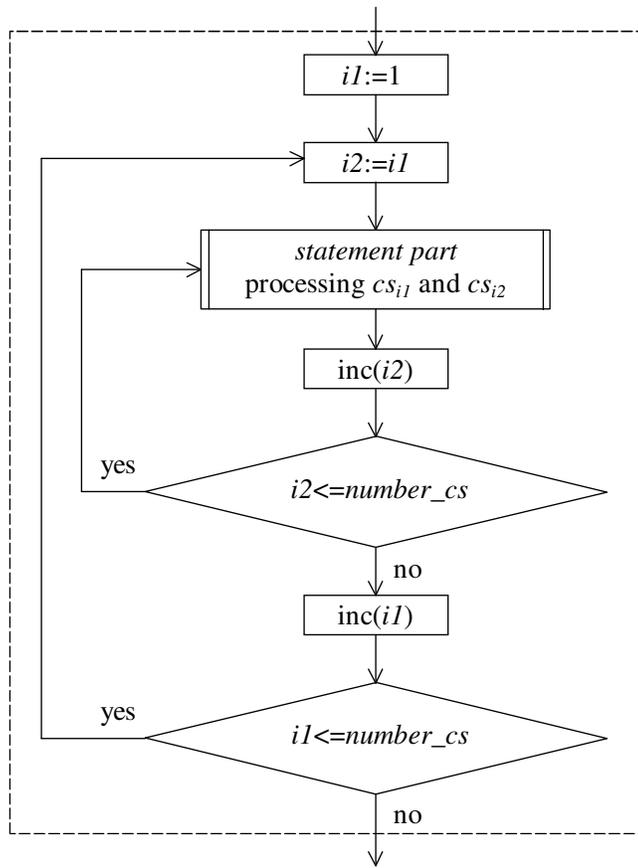


Bild 6.53: Schleifenstruktur zum Aufbau der Indizes i_1 und i_2 des Doppelsterns $cs_{i_1} \leftrightarrow cs_{i_2}$

Für die Anzahl D der möglichen Doppelsterne $cs_{i_1} \leftrightarrow cs_{i_2}$ in Abhängigkeit des Umfangs eines Sternkatalogs mit $number_cs$ Einträgen gilt:

$$D = (number_cs - 1) * \binom{number_cs}{2} = \binom{number_cs}{2}$$

(Gleichung 6.40)

Beispielsweise bei Nutzung des Sternkatalogs *uptomag_6.0* mit seinen $number_cs=4480$ Einträgen bedeutet dies für die mögliche Anzahl von Doppelsternen D bzw. der Anzahl der daraus resultierenden Anweisungsteile (*statement parts*): $D=10032960$.

Wird jedoch der Sternkatalog in verschiedene *Sub-Sternkataloge* (*sub-star-catalogs, ssc*) zerlegt, so hat dies großen Einfluß auf die Gesamtanzahl D_{sub_total} der konstruierbaren Doppelsterne $cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i2}$. Falls sich im Idealfall der Sternkatalog in $number_ssc$ Sub-Sternkataloge mit jeweils gleicher Anzahl von Sternen einteilen läßt, so gilt:

$$D_{sub_total} = number_ssc * \left(\frac{number_cs}{number_ssc} - 1 \right) * \left(\frac{number_cs}{2 * number_ssc} \right)$$

(Gleichung 6.41)

Erneut bezogen auf den Sternkatalog *uptomag_6.0* mit seinen 4480 Einträgen und einer Zerlegung dieses Katalogs in z.B. acht Sub-Sternkataloge ($number_ssc=8$) mit jeweils 560 Einträgen, ergibt sich eine deutlich reduzierte Gesamtanzahl D_{sub_total} von möglichen Doppelsternen um etwa Faktor 1:8 (entsprechend dem Reziproken der Anzahl der Sub-Sternkataloge) zu $D_{sub_total}=1252160$.

Dieser Effekt der reduzierten Anzahl von verschiedenen generierbaren Doppelsternen $cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i2}$ ist gleichbedeutend mit der reduzierten Abarbeitung von möglichen Anweisungsteilen (*statement parts*) und bewirkt daher eine massive Einsparung von Rechenzeit. Jeder Sub-Sternkatalog kann zur Erkennung eines *n-Sterne-Musters* separat bearbeitet werden. Die Sub-Sternkataloge können sequentiell oder sogar parallel auf geeigneten Rechnerstrukturen behandelt und abgearbeitet werden. Zu beachten ist jedoch, daß sich die Sub-Sternkataloge in einem gewissen Maß überlappen müssen, um zu berücksichtigen, daß auch ein solches korrekt erkanntes *n-Sterne-Muster* von Katalogsternen ermittelt werden kann, welches sich den Einträgen von mehr als einem Sub-Sternkatalog bedienen muß. Hierfür bietet es sich an (und ist auch entsprechend in den *MATCH-IT* Programmen realisiert), den ganzheitlichen Sternkatalog in Streifen von *Deklinationsintervallen* zu zerlegen und die Überlappung der Sub-Sternkataloge automatisch über den maximalen Winkelabstand $delta_max$ der Bildsterne zu steuern [Bone 1994]. Dabei ist auf ein mögliches *Doppelmatching* zu achten (bzw. durch programmiertechnische Maßnahmen zu verhindern), falls das erkannte *n-Sterne-Muster* innerhalb eines Überlappungsbereichs zweier benachbarter Deklinationsintervalle liegt.

Wird auf das zuvor genannte Beispiel der acht Sub-Sternkataloge eine theoretisch angenommene Überlappung von z.B. je 40 Sternen pro Deklinationsintervall zugrunde gelegt, was 600 Einträgen von Katalogsternen je Deklinationsintervall entspricht, so erhöht sich die Gesamtanzahl D_{sub_total} der möglichen Doppelsterne $cs_{i1} \leftrightarrow cs_{i2}$ auf $D_{sub_total}=1437600$. Auch dieser Wert ist immer noch deutlich geringer als der entsprechende Wert bei Nutzung des vollständigen Sternkatalogs *uptomag_6.0* mit $D=10032960$.

Die *number_ssc* Deklinationsintervalle sind im Rahmen dieser Dissertation zweidimensionale Gebiete gleicher Fläche A_{sub} und teilen den ursprünglichen Sternkatalog, welcher die Himmelskugel bei einem *lost-in-space* Szenario mit der Kugeloberfläche $A=4\pi r^2$ vollständig erfaßt, in *number_ssc* Sub-Sternkataloge ein. Jeder Bereich eines Sub-Sternkatalogs wird hinsichtlich der Deklination δ in Richtung des Himmelsnordpols durch *upper_limit_ssc_x* bzw. ϑ_2 und in Richtung des Himmelssüdpols durch *lower_limit_ssc_x* bzw. ϑ_1 begrenzt ($x=1..number_ssc$), wobei φ die Variable der geographischen Breite repräsentiert. Für die Gesamtoberfläche A der Himmelskugel gilt:

$$A = 4\pi r^2 = \int_{\varphi} \int_{\vartheta} r^2 \cos \vartheta' d\vartheta' d\varphi = \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} r^2 \cos \vartheta' d\vartheta' d\varphi$$

(Gleichung 6.42)

Um die Flächengleichheit der *number_ssc* Sub-Sternkataloge (begrenzt durch ϑ_1 und ϑ_2) mit einer jeweiligen Fläche von A_{sub} zu erreichen, muß gelten:

$$A_{sub} = \frac{A}{number_ssc} = \frac{4\pi r^2}{number_ssc} = \int_0^{2\pi} \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} r^2 \cos \vartheta' d\vartheta' d\varphi = 2\pi r^2 \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \cos \vartheta' d\vartheta'$$

bzw.

$$A_{sub} = 2\pi r^2 [\sin \vartheta']_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} = 2\pi r^2 * (\sin \vartheta_2 - \sin \vartheta_1)$$

(Gleichungen 6.43 und 6.44)

Daraus folgt für den Zusammenhang zwischen ϑ_1, ϑ_2 und *number_ssc*:

$$\frac{2}{number_ssc} = \sin \vartheta_2 - \sin \vartheta_1$$

bzw.

$$\sin \vartheta_1 = \sin \vartheta_2 - \frac{2}{number_ssc}, \vartheta_1, \vartheta_2 \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right], \vartheta_2 > \vartheta_1$$

(Gleichungen 6.45 und 6.46)

Die Berechnung der flächengleichen Sub-Sternkataloge geschieht nun dergestalt, daß zunächst das am nördlichsten gelegene Deklinationsintervall kalkuliert wird mit $\vartheta_2=+\pi/2$ und entsprechender Berechnung von ϑ_1 . Dann wird im zweiten Schritt die soeben kalkulierte Deklinationsintervallgrenze ϑ_1 dem ϑ_2 des zweiten Deklinationsintervalls zugeordnet und entsprechend ϑ_1 des zweiten Deklinationsintervalls neu berechnet, usw. Dieses Verfahren zur Berechnung der Begrenzungen der flächengleichen Deklinationsintervalle endet automatisch beim letzten Intervall mit $\vartheta_1=-\pi/2$.

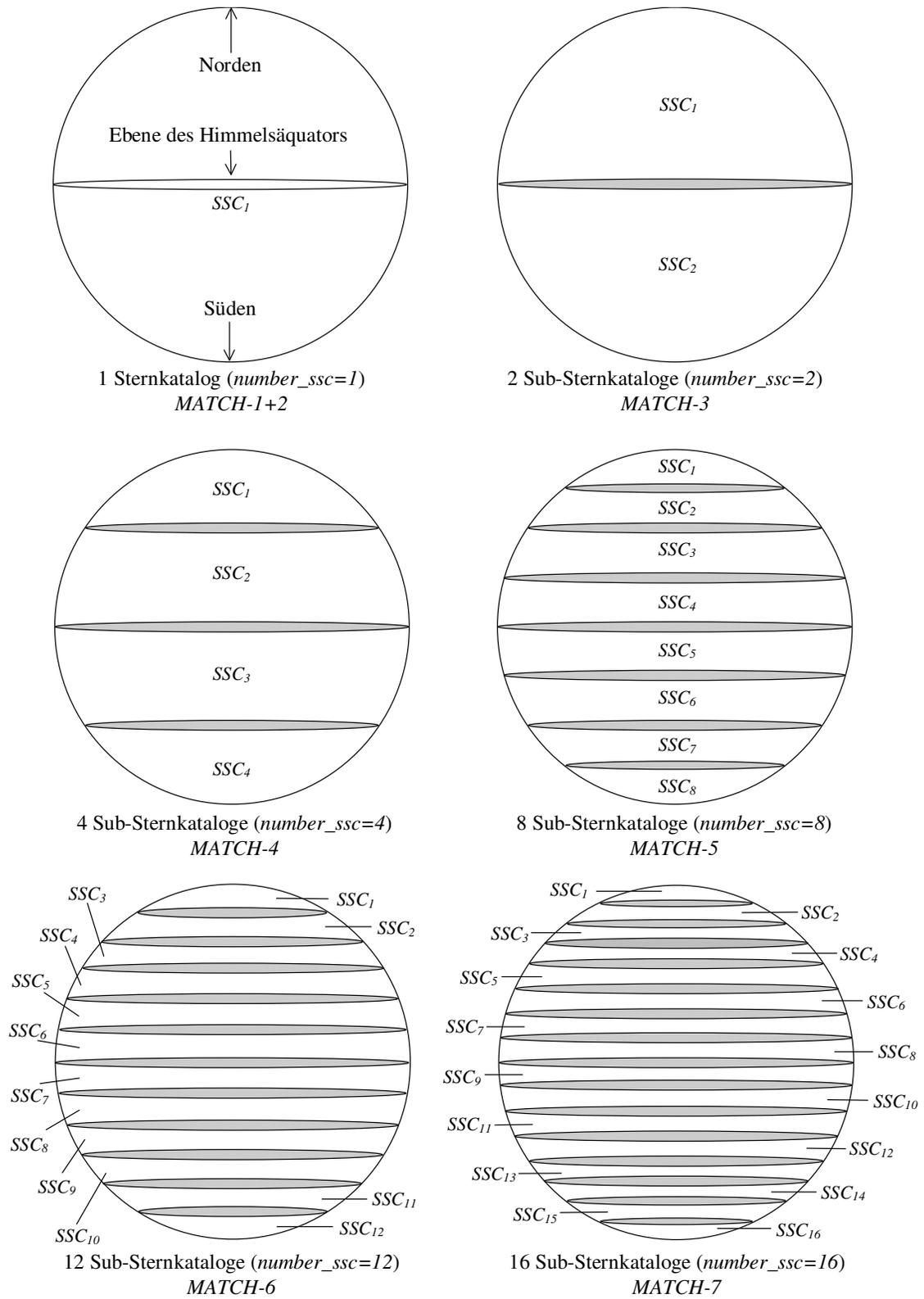


Bild 6.54: Zerlegung des Sternkatalogs in $number_ssc$ Sub-Sternkataloge (Deklinationsintervalle)

Im Rahmen der *MATCH-IT* Programme sind die in Tabelle 6.6 aufgeführten Programme mit einer jeweils festen Anzahl von einem Sternkatalog bis zu maximal 16 Sub-Sternkatalogen implementiert (siehe auch Bild 6.54). Die eingehenden Sternkataloge sind die bekannten Sternkataloge *uptomag_1.0* bis *uptomag_6.0*, welche programmintern in *number_ssc* Sub-Sternkataloge zerlegt werden und zwar bei automatischer Anpassung der Überlappung der Deklinationsintervalle durch die Vorgabe des maximalen Winkelabstands von Bildsternen *delta_max* des zu untersuchenden Sternmusters der Bildvorlage. *MATCH-1* und *MATCH-2* nutzen beide den ganzheitlichen Sternkatalog, wobei das Programm *MATCH-1* auf die Überprüfung der Sinnhaftigkeit der Deklinationsdifferenzen $diff_delta(cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy})$ zweier Katalogsterne cs_{ix} und cs_{iy} vor deren Skalarproduktbildung (gemäß Gleichung 6.37) zur Berechnung des Kosinuswinkelabstands $cos_cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}$ verzichtet. Der Effekt der Einsparung von Rechenzeit - bei dem allgemeinen Verfahrens zur Erkennung von *n-Sterne-Mustern* bedingt durch die stets vor jeder Skalarproduktbildung durchgeführten Überprüfung, ob die Deklinationsdifferenz zweier Katalogsterne geringer ist als *delta_max* - wird durch den Vergleich der Laufzeitergebnisse von *MATCH-1* und *MATCH-2* besonders deutlich.

Erneut angewandt auf die Bildvorlage *Cassiopeia*, ergibt sich je nach Anzahl der gewählten Sub-Sternkataloge ein unterschiedliches Laufzeitverhalten bei der Sternmustererkennung, wie anhand der Tabellen 6.7 und 6.8 deutlich zu sehen ist. Dafür wurde erneut ein Rechnerexperiment mit erzwungenen Erkennungen von *n-Sterne-Mustern* mit $n=2..6$ durchgeführt. Die Verwendung von acht Sub-Sternkatalogen (Programm *MATCH-5*) liefert bei der Bildvorlage *Cassiopeia* die kürzesten Laufzeiten bei Nutzung der im Rahmen dieser Dissertation zur Verfügung stehenden PC-Rechnerarchitektur (Kapitel 3). Diese Erkenntnis besitzt jedoch keine Allgemeingültigkeit.

Die ausführlichen Ergebnisse der Sternmustererkennung bei Nutzung von acht Sub-Sternkatalogen (*MATCH-5*) sind in den Tabellen 6.9 und 6.10 zusammengestellt, um einen direkten Vergleich mit den Ergebnistabellen 6.3 und 6.4 zu ermöglichen, bei denen jeweils ein ganzheitlicher Sternkatalog (*MATCH-2*) benutzt wurde. Der Tabelle 6.10 liegt eine Winkeltoleranz von $angle_tolerance=0,1^\circ$ zugrunde. Findet der in acht Sub-Sternkataloge zerlegte Sternkatalog *uptomag_6.0* mit seinen 4480 Einträgen Verwendung, so liegt die Laufzeit *matching_time* bei etwa acht Sekunden oder sogar noch darunter. Dies bezieht sich auf das sequentielle Abarbeiten aller acht Sub-Sternkataloge durch ein Rechenwerk. Bei der sich anbietenden Portierung auf eine kleine Parallelrechnerstruktur, bestehend aus acht Prozessoren mit ähnlichen oder sogar besseren Leistungsmerkmalen, wie sie der *Pentium* Prozessor mit $cl=133MHz$ aufweist, kann daher sogar bei Nutzung des Sternkatalogs *uptomag_6.0* eine Lagebestimmungsrate von $adr > 1Hz$ erreicht werden.

Da die Kameraparameter und insbesondere das *field-of-view* einen großen Einfluß auf die Größe der Überlappungsbereiche der Sub-Sternkataloge haben, kann eine allgemeine Aussage über die optimale Anzahl von Sub-Sternkatalogen nicht getroffen werden. Hinsichtlich der minimalsten durchschnittlichen Laufzeit (*mean_matching_time*) der im Rahmen der vorliegenden Arbeit benutzten CCD-Sternenkamera liefert bei sequentieller Abarbeitung auf der zur Verfügung stehenden PC-Rechenmaschine die Anzahl von vier Sub-Sternkatalogen ($number_ssc=4$) die besten Ergebnisse. Liegen mehr als vier Sub-Sternkataloge zugrunde, so kehrt sich der Effekt der Einsparung von Rechenzeit wieder um, da die Rechenlast der Überlappungsbereiche der Deklinationsintervalle immer mehr zum Tragen kommen. Das ist mittels durchgeführter Simulationen (Kapitel 8.9) bzw. anhand entsprechender Untersuchungen mittels der Programme *MATCH-1* bis *MATCH-7* zu sehen. Sollte jedoch ein Parallelrechner mit *number_ssc* Prozessoren zur Verfügung stehen, wobei jeder Prozessor mit der Abarbeitung eines der

number_ssc Sub-Sternkatalogen beschäftigt ist, so ist auch bei mehr als vier Sub-Sternkatalogen mit einer Verbesserung der Laufzeitperformance zu rechnen. Insbesondere Kostengründe, Komplexität, erhöhter Speicherbedarf und folglich auch erhöhter Stromverbrauch sprechen jedoch möglicherweise gegen ein Parallelrechnerkonzept bei *on-board* Realisierungen innerhalb von Kleinsatelliten.

Bei allen Anwendungen von Sub-Sternkatalogen ist jedoch darauf zu achten, daß sich der benötigte Speicherumfang durch die notwendigen Überlappungsbereiche der Deklinationsintervalle erhöht, was insbesondere bei *on-board* Raumfahrtanwendungen mit oftmals missionsbedingter Speicherbegrenzung berücksichtigt werden muß.

Name des Programms	Anzahl interner Sub-Sternkataloge (<i>number_ssc</i>)
<i>MATCH-1</i>	1 (keine Überprüfung von $diff_{cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}} < max_{\delta}$)
<i>MATCH-2</i>	1
<i>MATCH-3</i>	2
<i>MATCH-4</i>	4
<i>MATCH-5</i>	8
<i>MATCH-6</i>	12
<i>MATCH-7</i>	16

Tabelle 6.6: *MATCH-IT* Programme und deren Anzahl intern genutzter Sub-Sternkataloge

	<i>n=2</i>	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>MATCH-1</i>	15s 71hs	36s 63hs	37s 90hs	24s 1hs	25s 98hs
<i>MATCH-2</i>	4s 56hs	20s 33hs	20s 54hs	11s 64hs	12s 36hs
<i>MATCH-3</i>	2s 91hs	11s 53hs	13s 13hs	8s 24hs	8s 30hs
<i>MATCH-4</i>	2s 9hs	8s 62hs	10s 55hs	6s 81hs	6s 65hs
<i>MATCH-5</i>	1s 75hs	5s 66hs	8s 13hs	5s 33hs	5s 60hs
<i>MATCH-6</i>	1s 81hs	5s 77hs	9s 50hs	6s 54hs	6s 64hs
<i>MATCH-7</i>	1s 86hs	5s 82hs	9s 83hs	6s 70hs	7s 14hs

Tabelle 6.7: Gesamtperformance (*matching_time*)
der Sternmustererkennungsprogramme *MATCH-1* bis *MATCH-7*
(Bildvorlage: *Cassiopeia*: Sternkatalog *uptomag_6.0* (4480 Sterne), *angle_tolerance=0,1°*)

	<i>n=2</i>	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>MATCH-1</i>	15s 71hs	36s 63hs	37s 90hs	24s 1hs	25s 98hs
<i>MATCH-2</i>	4s 56hs	20s 33hs	20s 54hs	11s 64hs	12s 36hs
<i>MATCH-3</i>	1s 46hs	5s 77hs	6s 57hs	4s 12hs	4s 15hs
<i>MATCH-4</i>	0s 52hs	2s 16hs	2s 64hs	1s 70hs	1s 66hs
<i>MATCH-5</i>	0s 22hs	0s 71hs	1s 2hs	0s 67hs	0s 70hs
<i>MATCH-6</i>	0s 15hs	0s 48hs	0s 79hs	0s 55hs	0s 55hs
<i>MATCH-7</i>	0s 12hs	0s 36hs	0s 61hs	0s 42hs	0s 45hs

Tabelle 6.8: Performance je Sub-Sternkatalog (*matching_time/number_ssc*)
der Sternmustererkennungsprogramme *MATCH-1* bis *MATCH-7*
(Bildvorlage: *Cassiopeia*: Sternkatalog *uptomag_6.0* (4480 Sterne), *angle_tolerance=0,1°*)

	<i>n=2</i>	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag<1,0</i> (12 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag<2,0</i> (36 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag<3,0</i> (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	9 < 0s 1hs	1 < 0s 1hs	1 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag<4,0</i> (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	33 0s 1hs	1 0s 1hs	1 0s 5hs	1 0s 5hs	0 0s 5hs
<i>mag<4,5</i> (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	127 0s 5hs	3 0s 11hs	1 0s 16hs	1 0s 11hs	1 0s 11hs
<i>mag<5,0</i> (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	409 0s 16hs	14 0s 49hs	1 0s 71hs	1 0s 55hs	1 0s 55hs
<i>mag<5,4</i> (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1360 0s 55hs	71 2s 58hs	3 4s 29hs	1 2s 69hs	1 2s 81hs
<i>mag<5,7</i> (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	2640 1s 16hs	198 6s 53hs	10 11s 64hs	2 6s 64hs	1 6s 93hs
<i>mag<6,0</i> (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	4145 1s 75hs	372 11s 36hs	21 21s 64hs	5 11s 92hs	1 12s 53hs

Tabelle 6.9: Ergebnisse der Erkennung von *n*-Sterne-Mustern beim Testbild *Cassiopeia* bei Anwendung von acht Sub-Sternkatalogen (*MATCH-5*) (*angle_per_pixel*=0,051°/pixel, *angle_tolerance*=0,25°, CPU: *Pentium*, *cl*=133MHz)

	<i>n=2</i>	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag<1,0</i> (12 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag<2,0</i> (36 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag<3,0</i> (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	4 < 0s 1hs	1 < 0s 1hs	1 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag<4,0</i> (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	16 0s 1hs	1 0s 1hs	1 0s 5hs	1 0s 5hs	0 0s 5hs
<i>mag<4,5</i> (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	50 0s 5hs	1 0s 6hs	1 0s 11hs	1 0s 11hs	1 0s 11hs
<i>mag<5,0</i> (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	153 0s 16hs	1 0s 33hs	1 0s 43hs	1 0s 33hs	1 0s 39hs
<i>mag<5,4</i> (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	511 0s 55hs	5 1s 37hs	1 2s 3hs	1 1s 54hs	1 1s 65hs
<i>mag<5,7</i> (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1035 1s 15hs	14 3s 40hs	1 4s 78hs	1 3s 40hs	1 3s 52hs
<i>mag<6,0</i> (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1619 1s 75hs	26 5s 66hs	2 8s 13hs	1 5s 33hs	1 5s 60hs

Tabelle 6.10: Ergebnisse der Erkennung von *n*-Sterne-Mustern beim Testbild *Cassiopeia* bei Anwendung von acht Sub-Sternkatalogen (*MATCH-5*)
(*angle_per_pixel*=0,051°/pixel, *angle_tolerance*=0,1°, CPU: *Pentium*, *cl*=133MHz)

6.11 Abschätzung des Speicheraufwands

Bereits in der Einleitung wurde erwähnt, daß das Verfahren zur Sternmustererkennung unter den Aspekten der *Verarbeitungsgeschwindigkeit* und *Speicherminimalität* optimiert werden soll. Dies betrifft letztendlich die Gesamtheit aller Verfahrensschritte bzw. Softwaremodule, die notwendig sind um - ausgehend von den digitalen Roh-Bilddaten - die 3-axialen Lageparameter α_{att} , δ_{att} und ω_{att} zu bestimmen. Der rechenintensivste Teil der implementierten Algorithmen zur Sternmustererkennung basiert auf der Berechnung einer Vielzahl von Skalarprodukten, die den aktuellen Kosinus $\cos_{cs_x \leftrightarrow cs_y}$ des Winkels zwischen zwei Katalogsternen cs_x und cs_y bei jedem Systemaufruf neu berechnen. Andererseits besteht aber auch die prinzipielle Möglichkeit, den Kosinus des Winkels aller Katalogsterne, die sich sinnvollerweise im Gesichtsfeld der Kamera befinden können, explizit vorzugeben, um den Rechenaufwand der Bildung von Skalarprodukten einzusparen und direkt auf die Funktionsergebnisse über Zuordnungstabellen (*look-up-tables*) oder binäre Suchbäume zugreifen zu können. Dies kostet jedoch einen enormen und in der benötigten Größe mitunter nicht vorhandenen Speicheraufwand, da dieser bei einer *on-board* Anwendung während einer Kleinsatellitenmission schon aus Gründen des nur begrenzt zugelassenen Leistungsverbrauchs von seiner Kapazität her stark eingeschränkt ist. Außerdem besteht natürlich die Möglichkeit, anstatt des benutzten *Pentium* Prozessors einen für die schnelle Skalarproduktbildung besser geeigneten *Digitalen Signalprozessor* (DSP) zu verwenden, um eine weitere Reduzierung der Laufzeit zu bewirken (siehe auch Anhang A.2).

Bei einer Weltraumapplikation im Bereich von Kleinsatelliten ist es realistisch für das Sub-System *autonomous star tracker*, mit einem maximal zur Verfügung stehenden *Random-Access-Memory* (RAM-Speicher) von $mem_{max}=256KB$ zu rechnen, der als Hardwareausführung in Form eines kleinen Bausteins erhältlich ist. Folgende Speicherarten werden für das sternmustererkennende Lagebestimmungssystem benötigt, die aus Gründen der Geschwindigkeit des Datenzugriffs bei der Verfahrensausführung grundsätzlich in Form eines RAM-Speichers vorliegen sollten, bei zunächst maximaler Ausnutzung des schnelleren Cache- und Registerspeichers des Prozessors [Tischer 1995]:

- Speicher für den ausführbaren Programmcode
- Speicher für diverse statische Variablen
- Speicher für die Sternkatalogdaten
- Speicher für die Roh-Bilddaten

Der Speicherumfang des ausführbaren Programmcodes liegt bei einer Entkopplung von der bei einer *on-board* Anwendung nicht benötigten Benutzeroberfläche bei etwa $mem=50KB$ ($1KB=1024Byte$). Für eine Reihe diverser statisch deklarerter Variablen ist ein Speicher vom etwa $mem=5KB$ erforderlich. Als zweckpessimistische Betrachtung kann für den Speicher der Roh-Bilddaten ein Umfang von $mem=108KB$ (384×288 Pixel bei $gc=8bit$ Grauwerttiefe, siehe auch Anhang B) angesetzt werden. Ohne Berücksichtigung der Sternkatalogdaten ist also ein Speicherumfang von $mem=163KB$ einzukalkulieren. Der datenumfangreichste Sternkatalog, der im Rahmen der vorliegenden Arbeit benutzt wird, ist der Katalog *uptomag_6.0* mit 4480 Sterneinträgen (Anhang A.4.1). Jeder Katalogstern benötigt 12 Byte Speicherumfang, da die Werte der drei kartesischen, einheitsvektorierten Richtungskomponenten (x , y und z) eines jeden Sterns mit jeweils 4 Byte (*32-bit-floating-point* Format) kodiert werden. Also werden für den oben genannten Sternkatalog $mem=52,5KB$ Speicherkapazität benötigt.

Es ist somit überschlagsmäßig ein Datenspeicher von insgesamt $mem=215,5KB$ notwendig, der sich mit einer zusätzlich vorhandenen *Datenreserve* in einem RAM-Baustein mit $mem=256KB$ bequem unterbringen läßt (Tabelle 6.11). Zur Programmausführung unter der Betriebssystemumgebung *DOS 6.22* wären zusätzlich noch die beiden zwingend notwendigen Systemdateien *io.sys*, *msdos.sys* und der Befehlsprozessor *command.com* mit insgesamt etwa $mem=140KB$ zu berücksichtigen.

Speicherart	Speicherumfang [Byte]
Bildspeicher	110 . 592 (384x288 Pixel)
statische Variablen	5 . 120 (5KB)
Programmspeicher	51 . 200 (50KB)
Sternkatalog, kartesisch ($mag < 6,0$)	53 . 760 (52,5KB [4480 Sterne je 12 Byte])
Gesamtspeicher	220 . 672 (215,5KB [<256KB-Baustein])

Tabelle 6.11: Übersicht der geschätzten Speicherbelegung

7 Beispiele und Ergebnisse anhand realer Himmelsaufnahmen

Innerhalb dieses Kapitels werden neun ausgewählte Beispiel-Himmelsaufnahmen (Tabelle 7.1) zur Verifikation des *allgemeinen Verfahrens zur Erkennung von n-Sterne-Mustern nebst Bestimmung der 3-axialen Lageparameter* gemäß Kapitel 6.9 untersucht und die Ergebnisse durch graphische Sicherungen der Bildschirmausgabe (*screen-shots*) des verwendeten *MATCH-5* Programms (Organisation des Sternkatalogs in acht Sub-Sternkataloge) und zahlenmäßiger Angabe der wichtigsten Ergebnisvariablen dargestellt. Es wird sich zeigen, daß bei allen neun Himmelsaufnahmen und der Anwendung des allgemeinen Verfahrens zur Erkennung von *n-Sterne-Mustern* eine eindeutige Lösung des vorgegebenen Sternmusters bzw. der 3-axialen Lage gefunden werden kann, wenn ein *geeigneter* Sternkatalog ausgewählt wird. Das bedeutet konkret, daß dieser Katalog alle Sterne des zu erkennenden *n-Sterne-Musters* beinhalten muß. Außerdem werden zum Abschluß einer jeden Beispiel-Himmelsaufnahme zwei tabellarische Übersichten (mit $angle_tolerance=0,15^\circ$ und $angle_tolerance=0,3^\circ$) der Ergebnisse von verschiedenen erzwungenen Erkennungen von *n-Sterne-Mustern* der jeweiligen Bildvorlage wiedergegeben.

Alle Beispiel-Himmelsaufnahmen sind reale Aufnahmen (keine Simulationen) und wurden mit der in Anhang B beschriebenen CCD-Sternenkamera aufgenommen. Der CCD-Flächensensor liefert eine örtliche Auflösung von 384×288 Pixeln in x- bzw. y-Richtung des Bildes. Das abgebildete Gesichtsfeld umfaßt etwa $fov=24,5^\circ$ in der Bilddiagonalen. Bedingt durch die quadratische Anordnung der CCD-Pixel von $23 \times 23 \mu m$ je Pixel und der Zuhilfenahme eines abbildenden Objektivs mit einer Brennweite von $f=25,84 mm$, ergibt sich ein für alle Aufnahmen gleicher *Pixel-zu-Winkel* Umrechnungsfaktor von $angle_per_pixel=0,051^\circ/pixel$. Der Standardwert der Winkeltoleranz wurde bei allen Aufnahmen mit $angle_tolerance=0,15^\circ$ festgelegt und entspricht einem während Praxistests ermittelten optimalen Wert bei der hier benutzten CCD-Sternenkamera (Tabelle 7.2). Die Belichtungszeiten aller Aufnahmen liegen im Bereich zwischen $T=800..2300 ms$ (Tabelle 7.1) und repräsentieren den Stand der CCD-Sternenkamera des Jahres 1993. Mittlerweile ist die Kameraelektronik jedoch erheblich verbessert worden mit dem Ergebnis, daß die Integrationszeiten heute bei einem nahezu gleichen Bildegebnis um etwa Faktor 1:5 niedriger liegen. Die digitalen Beispiel-Himmelsaufnahmen liegen auf dem Personal-Computer als Bilddateien kompatibel zum universellen *Tagged-Image-File-Format (TIFF)* dauerhaft vor und können von den *MATCH-IT* Programmen eingelesen werden [Aldus 1992]. Die Darstellung der Himmelsaufnahmen und *screen-shots* erfolgt in invertierter Form.

Ein Vergleich der jeweils abgebildeten Bildsterne is_1 bis is_{number_is} mit Sternkarten und Sternatlanten zeigt, daß innerhalb der Aufnahmen *Andromeda*, *Draco* und *Sagitta* auch einige Bildsterne vorhanden sind, die eine geringere Helligkeit als $mag=5,0$ aufweisen [Becvar 1969, Tirion 1991, Vehrenberg 1987]. Da bei den Aufnahmen *Andromeda* und *Draco* auch das aus den sechs hellsten Bildsternen bestehende Sternmuster solche Bildsterne enthält, die eine geringere visuelle Helligkeit als $mag=5,0$ aufweisen, aber wiederum heller als $mag=5,4$ sind, wurde für die Aufnahmen *Andromeda* und *Draco* als Sternkatalog die Datei *uptomag_5.4* mit 2526 Einträgen ausgewählt. Im Fall der Aufnahme *Sagitta* mußte sogar die noch datenumfangreichere Datei *uptomag_5.7* mit 3581 Einträgen hinzugezogen werden, um den Himmel bis zur Grenzhelligkeit $mag=5,7$ abzudecken. Allen anderen Himmelsaufnahmen liegt stets der Sternkatalog *uptomag_5.0* mit 1370 Einträgen zugrunde (Anhang A.4.1). Deutlich ist daher innerhalb der Ergebnistabelle 7.3 der erhöhte Rechenaufwand bei den drei letztgenannten Himmelsaufnahmen anhand der Werte der Laufzeitvariablen *matching_time* zu sehen.

Zur Feststellung der Gesamtrechenlaufzeit *matching_time* wurde erneut der mit einem Prozessor vom Typ *Pentium* ($cl=133MHz$) ausgestattete Personal-Computer bei einem Datenbustakt von $cl=66MHz$ benutzt (Kapitel 3). Hierbei ist stets das allgemeine Verfahren zur Erkennung von *n-Sterne-Mustern* gemäß Kapitel 6.9 angewandt worden, bei Zerlegung des den Himmel vollständig abdeckenden Sternkatalogs in acht Sub-Sternkataloge (*MATCH-5*). Bei allen Beispiel-Himmelsaufnahmen liegt eine eindeutige Identifizierung des Sternmusters und damit auch der 3-axialen Lageparameter vor ($matching_counter=1$, siehe Tabelle 7.3). Unter Hinzuziehung des jeweils gleichen Sternkatalogs (*uptomag_5.0*) fällt beim Vergleich zwischen den Ergebnissen der ersten sechs Beispiel-Himmelsaufnahmen (*Ursa Major* bis *Lyra*) eine deutliche Reduzierung der Laufzeit *matching_time* bzw. Steigerung der Lagebestimmungsrate *adr* bei Herabsetzung des veränderlichen Parameters *max_delta* auf. Dieser Parameter beschreibt den geringsten Winkelabstand zwischen zwei Bildsternen und wird stets als erste zu erkennende Doppelsterndistanz genutzt. Der Effekt der Laufzeitreduzierung ist auf die automatisch angewandte *closest-stars* Methode zurückzuführen (Kapitel 6.8). Betrachtet man das Laufzeitverhalten je Sub-Sternkatalog, so liegt bei allen neun Bildvorlagen eine Lagebestimmungsrate von $adr_{sub} > 1Hz$ vor.

Bildname	Belichtungszeit (ms)	Datum	Uhrzeit	Anzahl der Bildsterne
<i>Ursa Major</i>	800	13. 08. 1993	22h 46m	5
<i>Perseus</i>	1100	13. 08. 1993	23h 45m	6
<i>Cepheus</i>	1400	13. 08. 1993	23h 16m	10
<i>Cygnus</i>	1400	15. 08. 1993	23h 29m	8
<i>Aquila</i>	1700	18. 08. 1993	00h 12m	13
<i>Lyra</i>	1700	15. 08. 1993	23h 18m	10
<i>Andromeda</i>	1700	18. 08. 1993	00h 58m	13
<i>Draco</i>	2300	15. 08. 1993	22h 14m	13
<i>Sagitta</i>	950	18. 08. 1993	00h 41m	7

Tabelle 7.1: Aufnahmeparameter der neun Beispiel-Himmelsaufnahmen

Bildname	Anzahl der Katalogsterne	<i>angle_per_pixel</i>	<i>angle_tolerance</i>
<i>Ursa Major</i>	1370 (<i>uptomag_5.0</i>)	0,051°/pixel	0,15°
<i>Perseus</i>	1370 (<i>uptomag_5.0</i>)	0,051°/pixel	0,15°
<i>Cepheus</i>	1370 (<i>uptomag_5.0</i>)	0,051°/pixel	0,15°
<i>Cygnus</i>	1370 (<i>uptomag_5.0</i>)	0,051°/pixel	0,15°
<i>Aquila</i>	1370 (<i>uptomag_5.0</i>)	0,051°/pixel	0,15°
<i>Lyra</i>	1370 (<i>uptomag_5.0</i>)	0,051°/pixel	0,15°
<i>Andromeda</i>	2526 (<i>uptomag_5.4</i>)	0,051°/pixel	0,15°
<i>Draco</i>	2526 (<i>uptomag_5.4</i>)	0,051°/pixel	0,15°
<i>Sagitta</i>	3581 (<i>uptomag_5.7</i>)	0,051°/pixel	0,15°

Tabelle 7.2: Parameter zur Sternmustererkennung der neun Beispiel-Himmelsaufnahmen bei Anwendung des allgemeinen Verfahrens gemäß Kapitel 6.9

Bildname	<i>max_delta</i>	<i>matching_counter</i>	<i>matching_time</i>	<i>adr</i>	<i>adr_{sub}</i>
<i>Ursa Major</i>	4,528°	1	0s 93hs	1,08Hz	8,60Hz
<i>Perseus</i>	1,734°	1	0s 60hs	1,67Hz	13,33Hz
<i>Cepheus</i>	2,376°	1	0s 55hs	1,82Hz	14,55Hz
<i>Cygnus</i>	1,024°	1	0s 49hs	2,04Hz	16,33Hz
<i>Aquila</i>	0,949°	1	0s 38hs	2,34Hz	21,05Hz
<i>Lyra</i>	1,668°	1	0s 50hs	2,00Hz	16,00Hz
<i>Andromeda</i>	2,898°	1	4s 6hs	0,25Hz	1,97Hz
<i>Draco</i>	4,102°	1	4s 77hs	0,21Hz	1,68Hz
<i>Sagitta</i>	1,809°	1	6s 92hs	0,14Hz	1,15Hz

Tabelle 7.3: Ergebnisse zur Sternmustererkennung und 3-axialen Lagebestimmung bei Anwendung des Algorithmus des allgemeinen Verfahrens gemäß Kapitel 6.9

Bei allen innerhalb der folgenden Kapitel aufgeführten Ergebnistabellen der neun Beispiel-Himmelsaufnahmen ist der jeweilige Zelleneintrag, der das Ergebnis bei Anwendung des *allgemeinen Verfahrens zur Sternmustererkennung nebst Bestimmung der 3-axialen Lage* gemäß Kapitel 6.9 beinhaltet, mit dem Symbol • gekennzeichnet. Die dazu korrespondierende graphische Ausgabe des *MATCH-5* Programms ist als *screen-shot* zu sehen, wie auch die graphischen Ergebnisse des erzwungenen Matchings des *3-Sterne-Musters* und *4-Sterne-Musters*, angewandt auf die jeweilige Bildvorlage.

Ähnliche Tests anhand weniger, aber realer und während Feldversuchen aufgenommener Beispiel-Himmelsaufnahmen, sind von Bezooijen [Bezooijen 1994], DeAntonio et. al. [DeAntonio 1994] und Bank [Bank 1997] zur Überprüfung der von ihnen entwickelten Sternsensoren und Algorithmen zur Identifizierung von Sternmustern durchgeführt worden. Bei der von DeAntonio durchgeführten Testkampagne wurden 13 von 16 Sternmustern ohne *a-priori* Wissen eindeutig erkannt.

7.1 Beispiel-Himmelsaufnahme *Ursa Major*

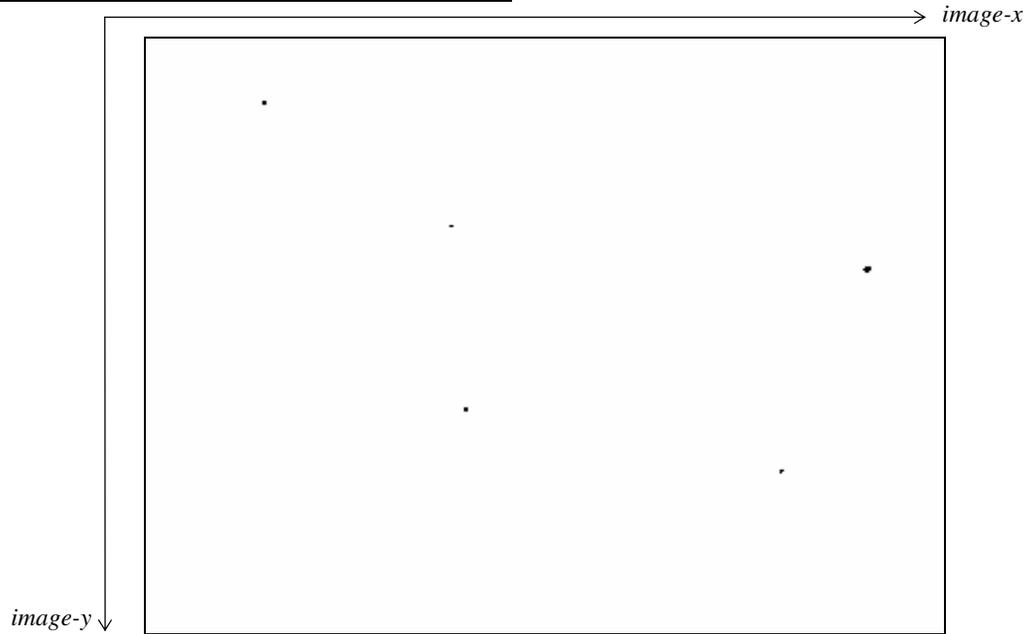


Bild 7.1: Beispiel-Himmelsaufnahme *Ursa Major* (invertiertes Original)

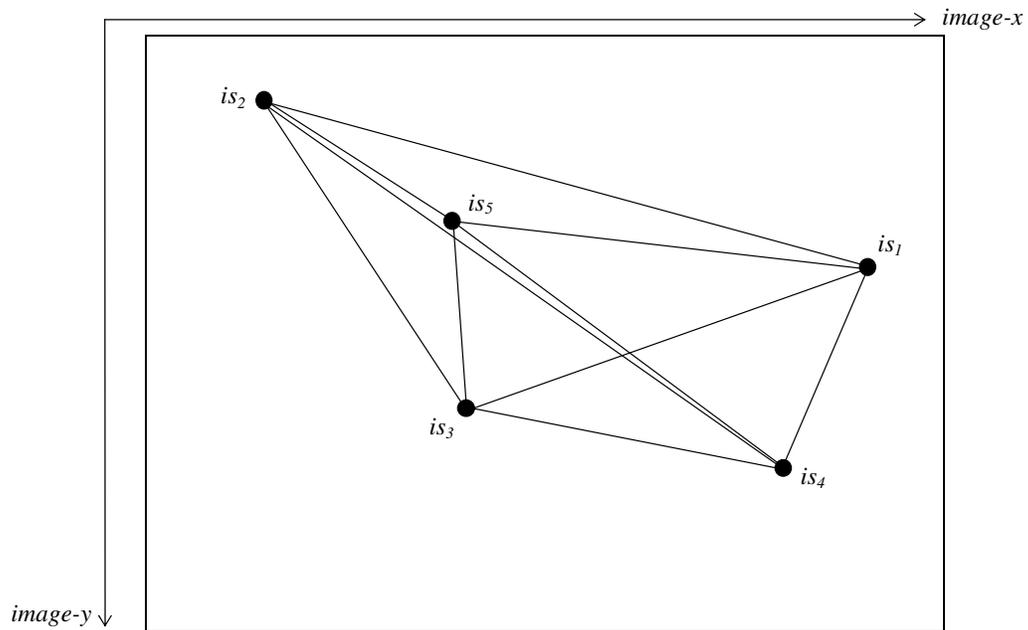


Bild 7.2: Beispiel-Himmelsaufnahme *Ursa Major* mit hervorgehobenen fünf Bildsternen und automatisch ausgewähltem 5-Sterne-Muster (is_1 bis is_5)

Ergebnisse unter Anwendung des allgemeinen Verfahrens zur Sternmustererkennung nebst Bestimmung der 3-axialen Lage bei *Ursa Major*:

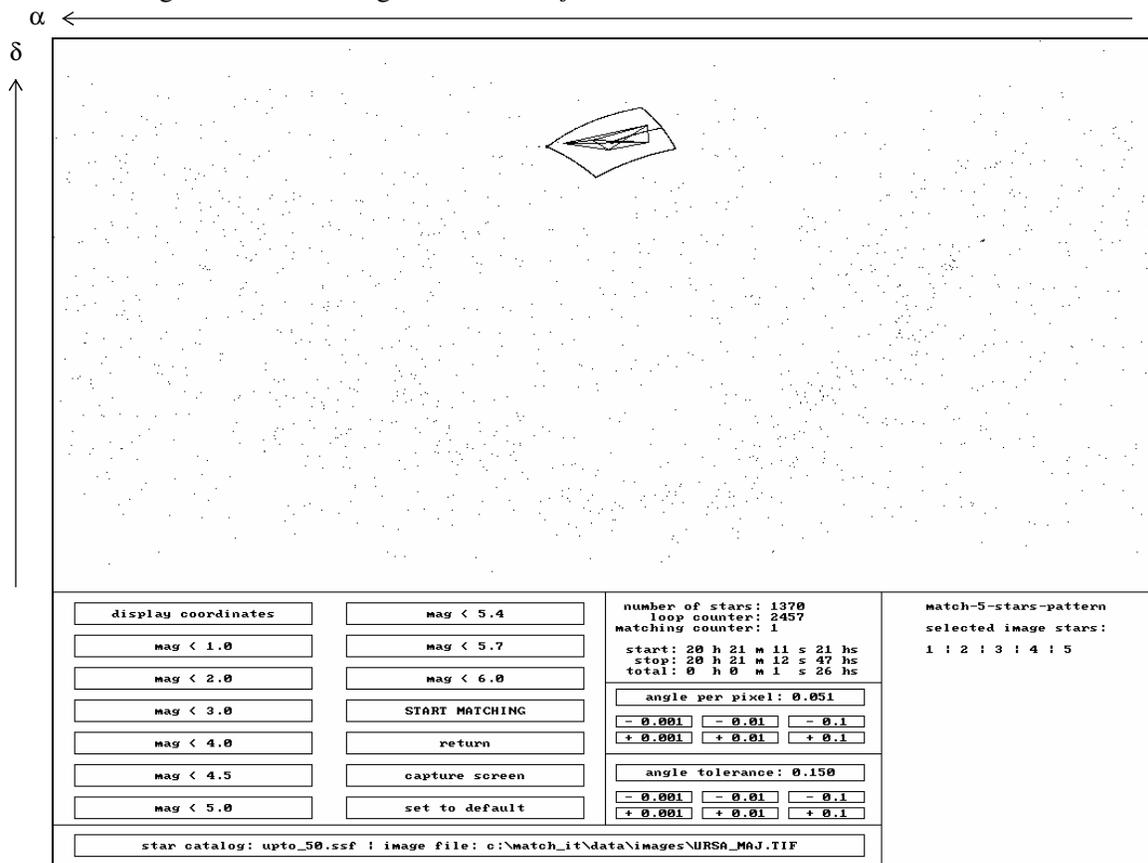


Bild 7.3: Eindeutig erkanntes 5-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage *Ursa Major* (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

matching_time=0,93s (acht Sub-Sternkataloge, *MATCH-5*)
 Lagebestimmungsrate insgesamt: *adr=1,08Hz*
 Lagebestimmungsrate je Sub-Sternkatalog: *adr_{sub}=8,60Hz*

	α_{att}	δ_{att}	ω_{att}
(rad)	3,100	0,982	0,276
(deg)	177,603	56,285	15,839

Tabelle 7.4: Ergebnistabelle der 3-axialen Lageparameter der Bildvorlage *Ursa Major*

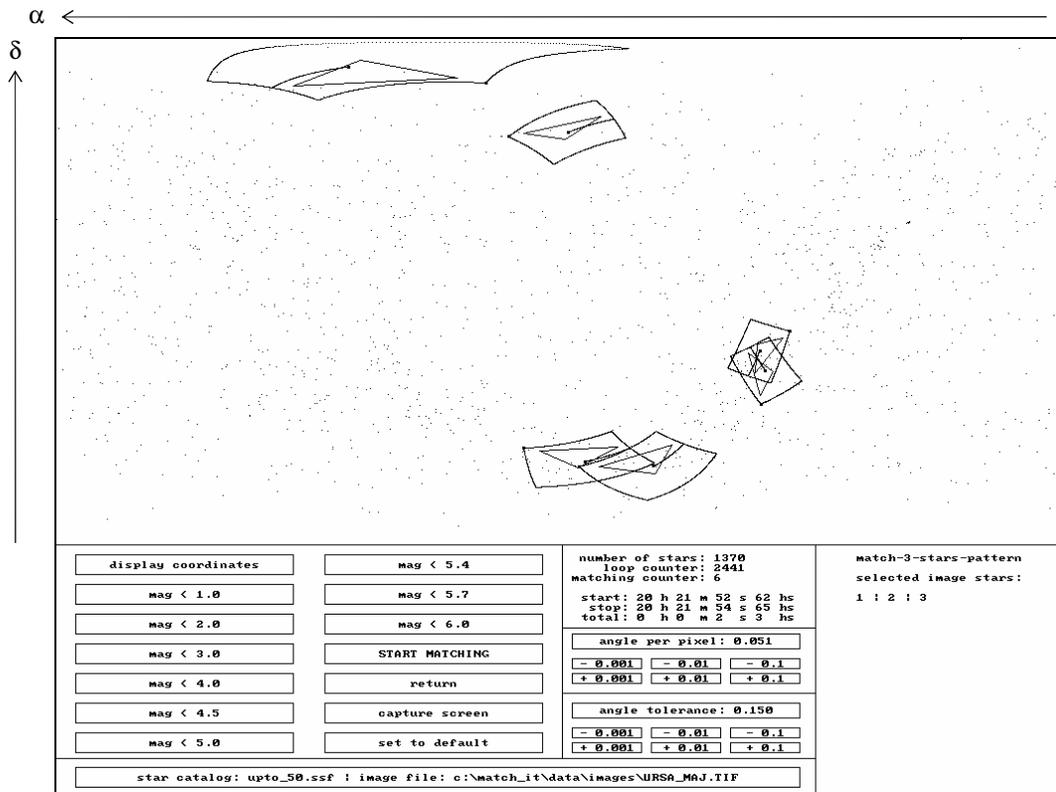


Bild 7.4: Sechs erkannte 3-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage *Ursa Major* bei einer erzwungenen Anwendung des Moduls *match-3-stars-pattern* (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

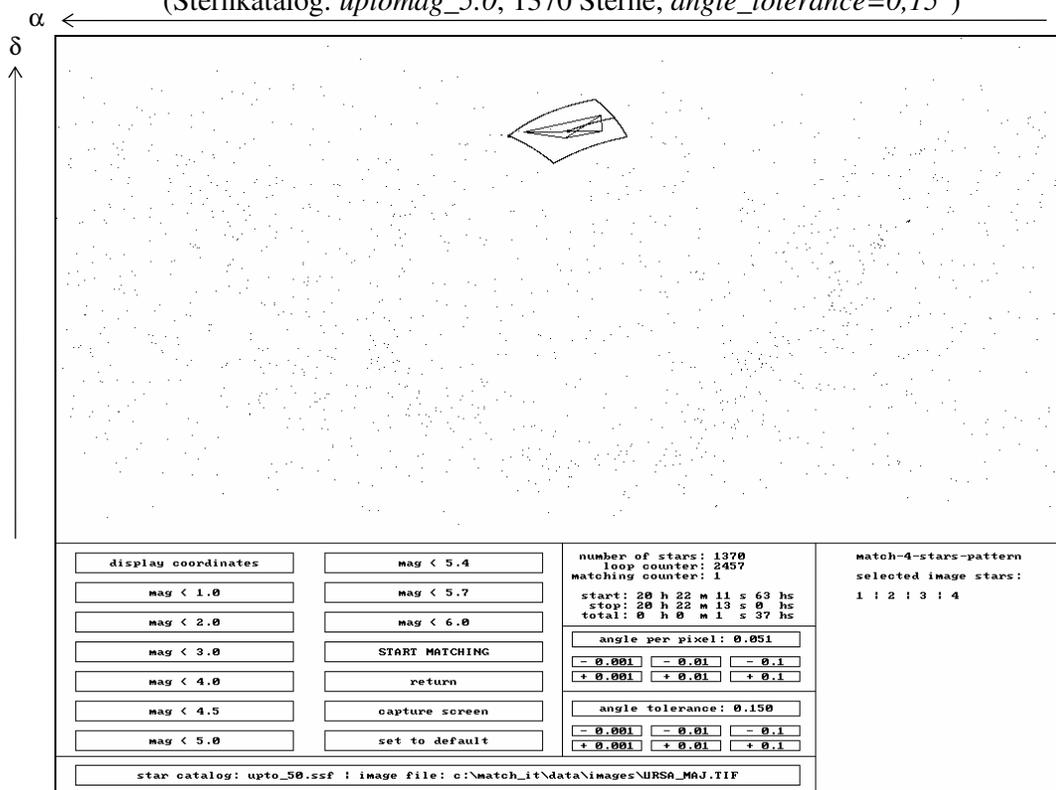


Bild 7.5: Eindeutig erkanntes 4-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage *Ursa Major* bei einer erzwungenen Anwendung des Moduls *match-4-stars-pattern* (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag</i> <3,0 (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1 < 0s 1hs	1 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	-
<i>mag</i> <4,0 (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1 0s 5hs	1 0s 5hs	1 0s 5hs	-
<i>mag</i> <4,5 (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	3 0s 27hs	1 0s 22hs	1 0s 22hs	-
<i>mag</i> <5,0 (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	6 1s 21hs	1 1s 4hs	• 1 0s 99hs	-
<i>mag</i> <5,4 (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	43 6s 5hs	1 4s 66hs	1 4s 28hs	-
<i>mag</i> <5,7 (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	104 15s 44hs	1 12s 14hs	1 10s 88hs	-
<i>mag</i> <6,0 (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	193 28s 40hs	2 22s 74hs	1 20s 38hs	-

Tabelle 7.5: Erkennung von *n*-Sterne-Mustern bei *Ursa Major* (*angle_tolerance*=0,15°)

	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag</i> <3,0 (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1 < 0s 1hs	1 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	-
<i>mag</i> <4,0 (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	2 0s 6hs	1 0s 6hs	1 0s 6hs	-
<i>mag</i> <4,5 (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	11 0s 44hs	1 0s 39hs	1 0s 33hs	-
<i>mag</i> <5,0 (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	51 1s 97hs	1 1s 65hs	• 1 1s 48hs	-
<i>mag</i> <5,4 (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	312 10s 27hs	12 8s 79hs	1 8s 8hs	-
<i>mag</i> <5,7 (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	822 26s 97hs	46 24s 88hs	1 22s 58hs	-
<i>mag</i> <6,0 (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1601 50s 58hs	87 49s 98hs	2 45s 10hs	-

Tabelle 7.6: Erkennung von *n*-Sterne-Mustern bei *Ursa Major* (*angle_tolerance*=0,3°)

7.2 Beispiel-Himmelsaufnahme *Perseus*

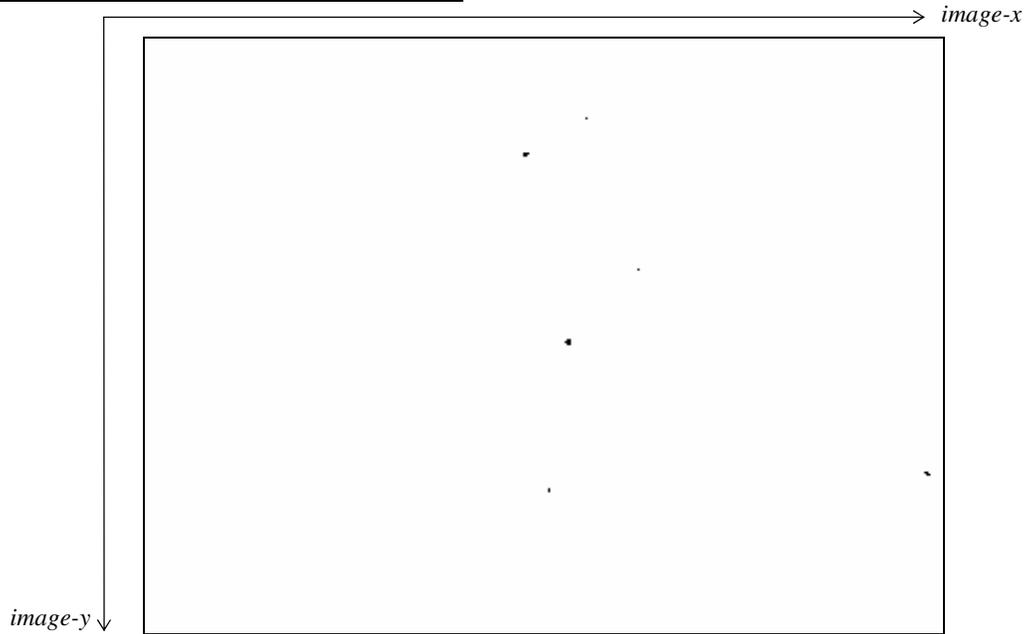


Bild 7.6: Beispiel-Himmelsaufnahme *Perseus* (invertiertes Original)

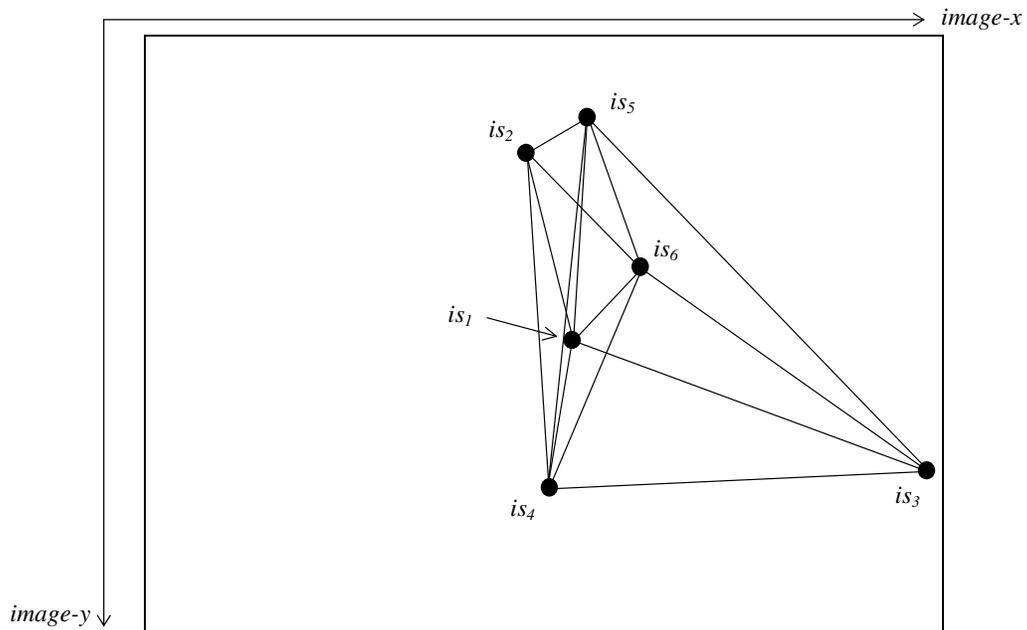


Bild 7.7: Beispiel-Himmelsaufnahme *Perseus* mit hervorgehobenen sechs Bildsternen und automatisch ausgewähltem 6-Sterne-Muster (is_1 bis is_6)

Ergebnisse unter Anwendung des allgemeinen Verfahrens zur Sternmustererkennung nebst Bestimmung der 3-axialen Lage bei *Perseus*:

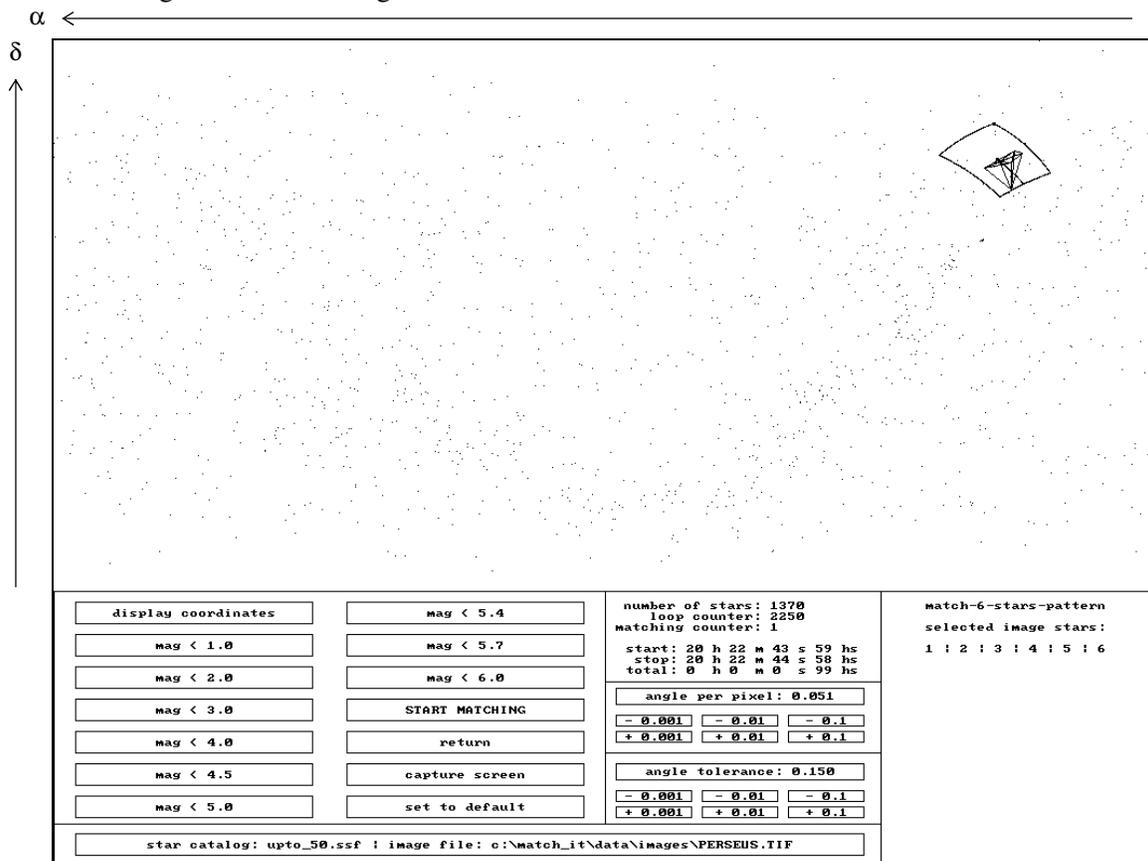


Bild 7.8: Eindeutig erkanntes 6-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage *Perseus* (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

matching_time=0,60s (acht Sub-Sternkataloge, *MATCH-5*)
 Lagebestimmungsrate insgesamt: *adr=1,67Hz*
 Lagebestimmungsrate je Sub-Sternkatalog: *adr_{sub}=13,33Hz*

	α_{att}	δ_{att}	ω_{att}
(rad)	0,900	0,882	5,533
(deg)	51,566	50,512	317,011

Tabelle 7.7: Ergebnistabelle der 3-axialen Lageparameter der Bildvorlage *Perseus*

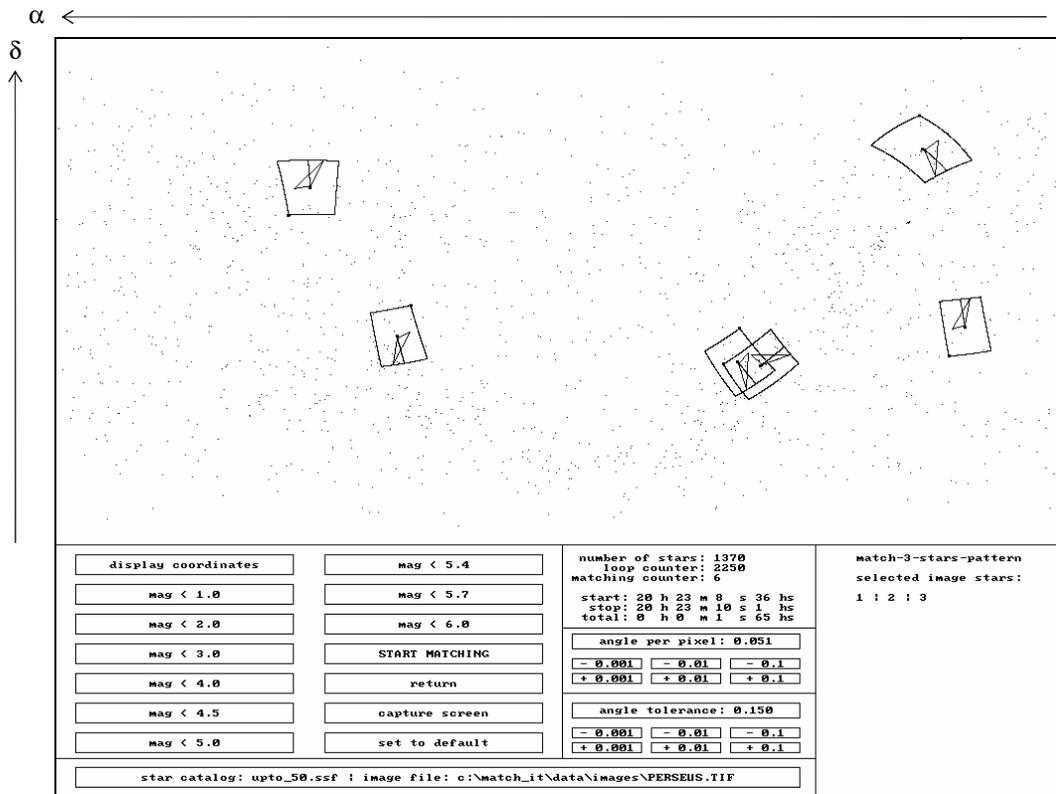


Bild 7.9: Sechs erkannte 3-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage *Perseus* bei einer erzwungenen Anwendung des Moduls *match-3-stars-pattern* (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

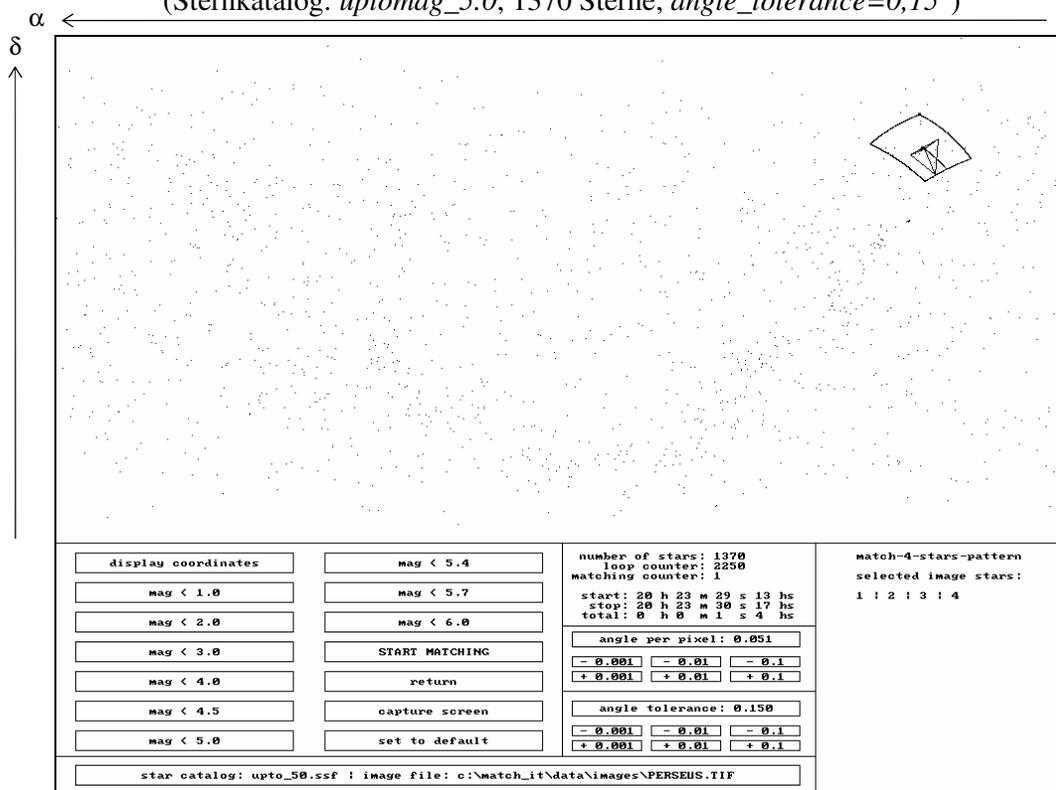


Bild 7.10: Eindeutig erkanntes 4-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage *Perseus* bei einer erzwungenen Anwendung des Moduls *match-4-stars-pattern* (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag</i> <3,0 (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag</i> <4,0 (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1 0s 5hs	1 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs
<i>mag</i> <4,5 (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	3 0s 17hs	1 0s 17hs	1 0s 17hs	1 0s 17hs
<i>mag</i> <5,0 (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	6 0s 77hs	1 0s 66hs	1 0s 60hs	• 1 0s 60hs
<i>mag</i> <5,4 (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	28 3s 46hs	1 3s 29hs	1 2s 41hs	1 2s 52hs
<i>mag</i> <5,7 (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	89 8s 46hs	3 7s 96hs	1 5s 65hs	1 5s 88hs
<i>mag</i> <6,0 (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	191 15s 49hs	4 14s 33hs	1 10s 21hs	1 10s 66hs

Tabelle 7.8: Erkennung von *n*-Sterne-Mustern bei *Perseus* (*angle_tolerance*=0,15°)

	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag</i> <3,0 (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag</i> <4,0 (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	3 0s 5hs	1 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs
<i>mag</i> <4,5 (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	7 0s 22hs	1 0s 22hs	1 0s 17hs	1 0s 22hs
<i>mag</i> <5,0 (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	36 1s 10hs	1 1s 10hs	1 0s 88hs	• 1 0s 94hs
<i>mag</i> <5,4 (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	294 5s 55hs	12 5s 98hs	2 4s 56hs	1 4s 78hs
<i>mag</i> <5,7 (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	809 14s 28hs	26 16s 4hs	3 12s 57hs	1 13s 18hs
<i>mag</i> <6,0 (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1564 26s 75hs	63 31s 58hs	5 25s 93hs	1 27s 19hs

Tabelle 7.9: Erkennung von *n*-Sterne-Mustern bei *Perseus* (*angle_tolerance*=0,3°)

7.3 Beispiel-Himmelsaufnahme *Cepheus*



Bild 7.11: Beispiel-Himmelsaufnahme *Cepheus* (invertiertes Original)

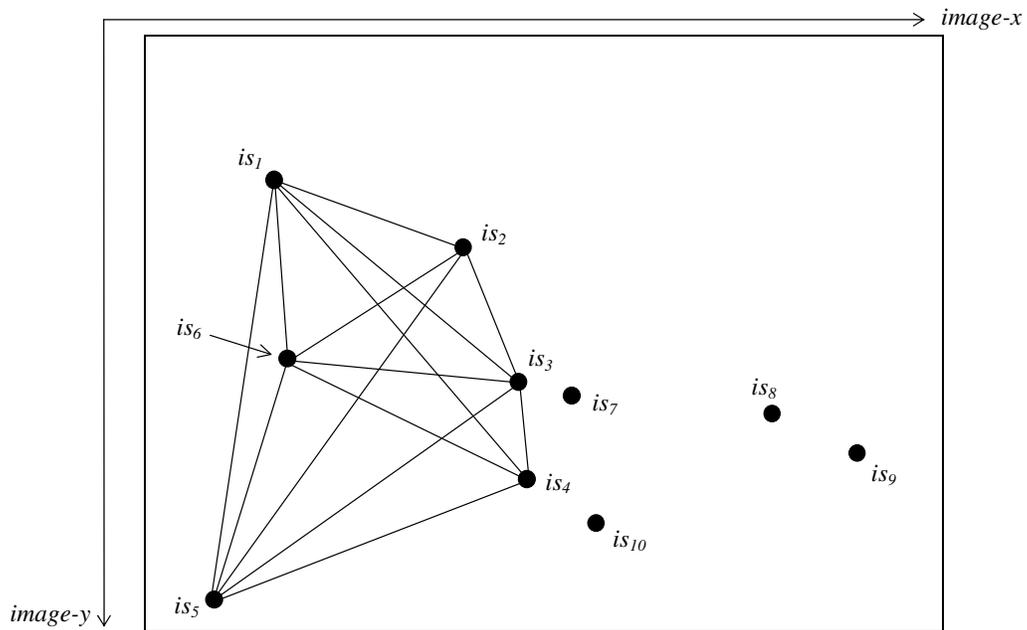


Bild 7.12: Beispiel-Himmelsaufnahme *Cepheus* mit hervorgehobenen zehn Bildsternen und automatisch ausgewähltem 6-Sterne-Muster (is_1 bis is_6)

Ergebnisse unter Anwendung des allgemeinen Verfahrens zur Sternmustererkennung nebst Bestimmung der 3-axialen Lage bei *Cepheus*:

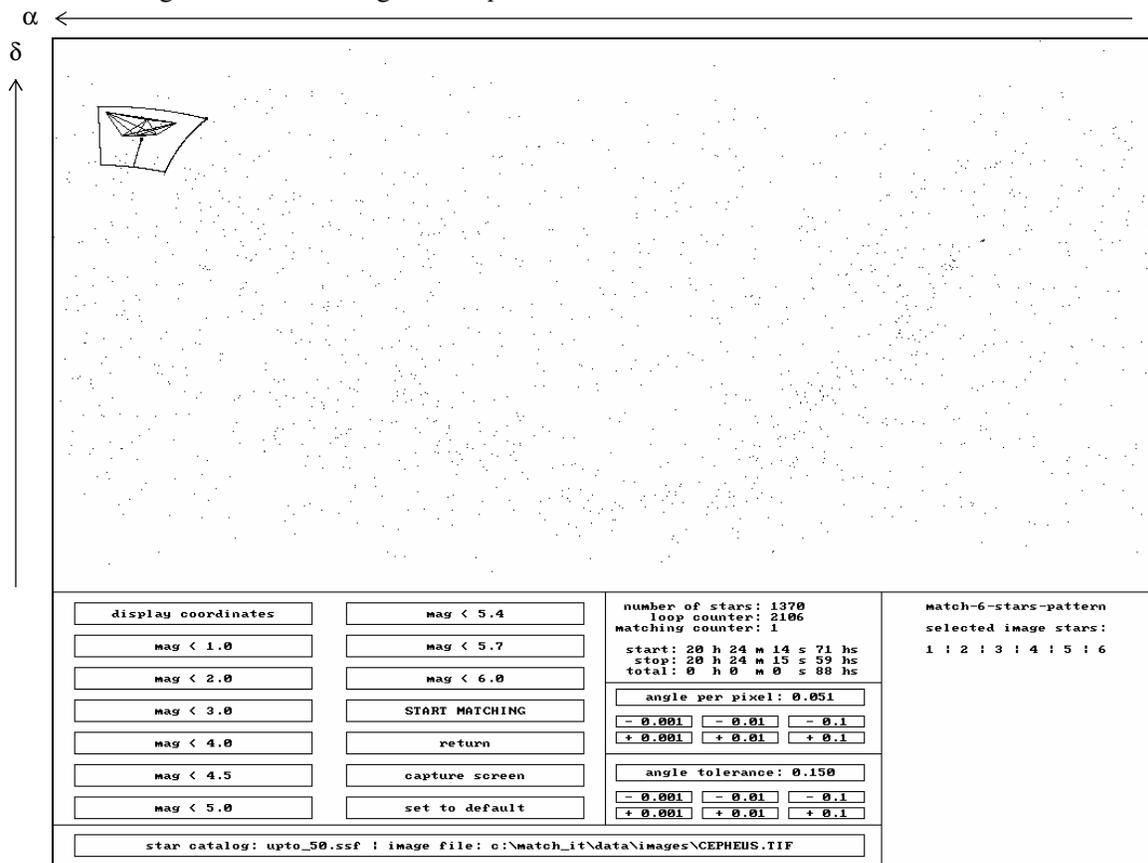


Bild 7.13: Eindeutig erkanntes 6-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage *Cepheus* (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

matching_time=0,55s (acht Sub-Sternkataloge, *MATCH-5*)
 Lagebestimmungsrate insgesamt *adr=1,82Hz*
 Lagebestimmungsrate je Sub-Sternkatalog *adr_{sub}=14,55Hz*

	α_{att}	δ_{att}	ω_{att}
(rad)	5,771	1,002	4,423
(deg)	330,672	57,387	253,395

Tabelle 7.10: Ergebnistabelle der 3-axialen Lageparameter der Bildvorlage *Cepheus*

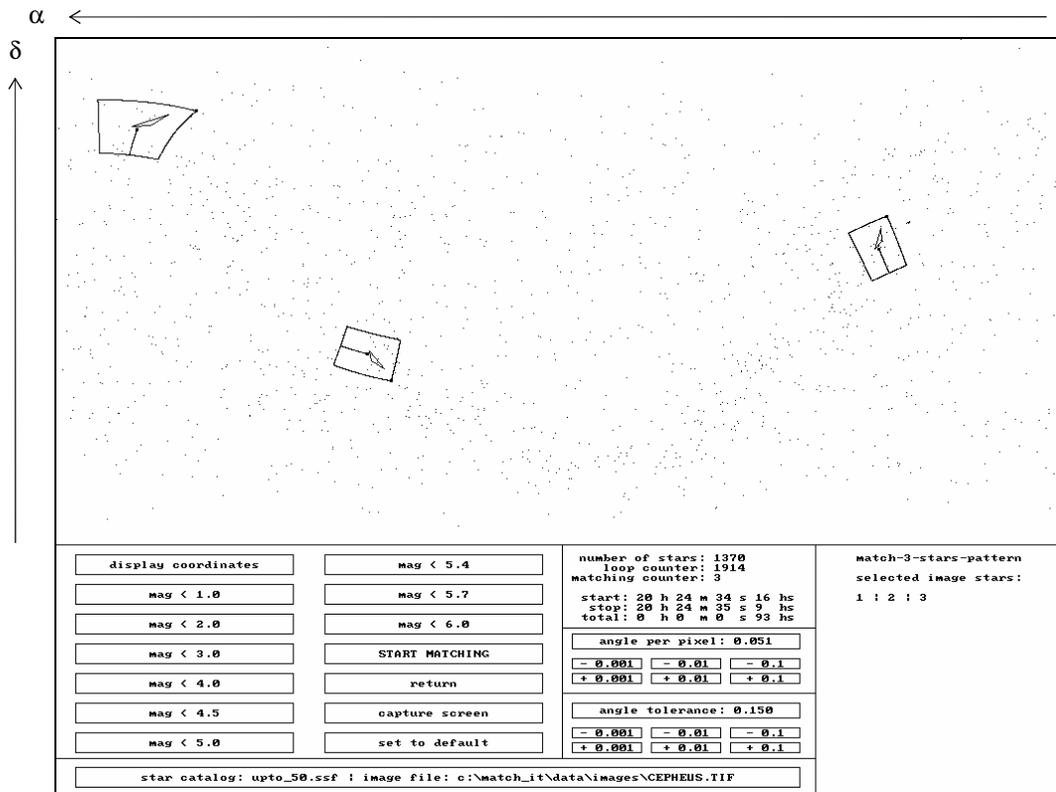


Bild 7.14: Drei erkannte 3-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage *Cepheus* bei einer erzwungenen Anwendung des Moduls *match-3-stars-pattern* (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

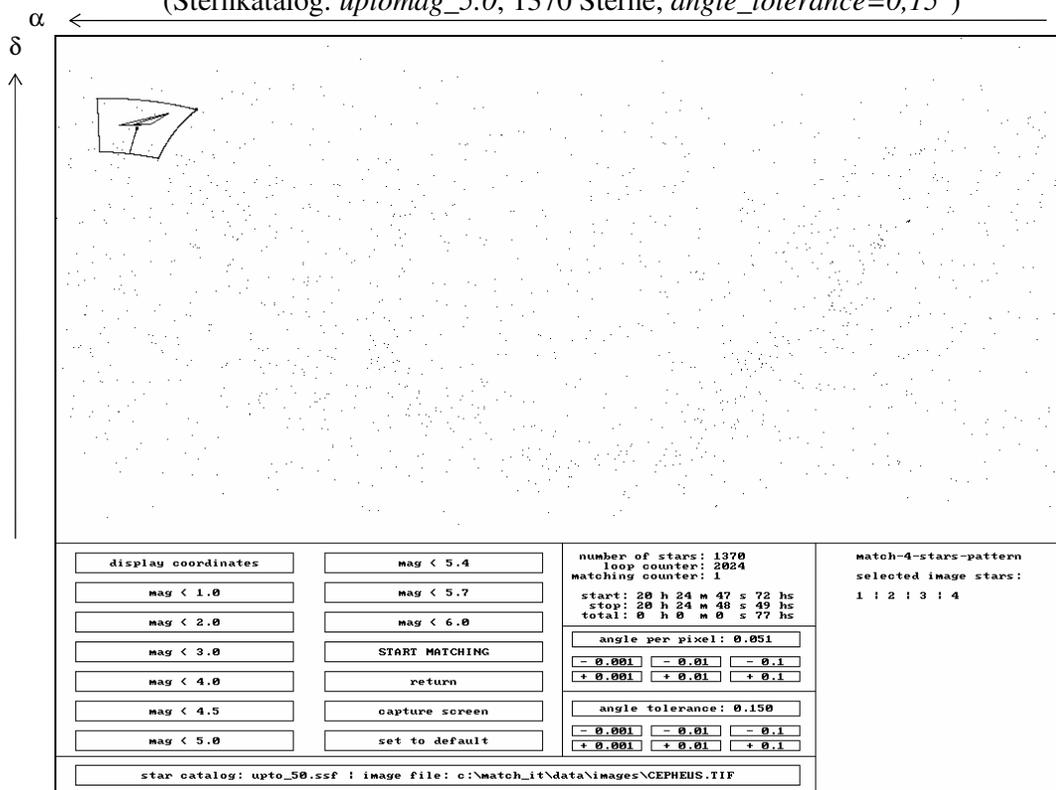


Bild 7.15: Eindeutig erkanntes 4-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage *Cepheus* bei einer erzwungenen Anwendung des Moduls *match-4-stars-pattern* (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag</i> <3,0 (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag</i> <4,0 (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs
<i>mag</i> <4,5 (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1 0s 11hs	1 0s 11hs	1 0s 11hs	0 0s 11hs
<i>mag</i> <5,0 (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	3 0s 44hs	1 0s 49hs	1 0s 50hs	• 1 0s 55hs
<i>mag</i> <5,4 (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	22 1s 92hs	1 2s 14hs	1 2s 25hs	1 2s 30hs
<i>mag</i> <5,7 (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	81 4s 56hs	3 5s 10hs	1 5s 44hs	1 5s 72hs
<i>mag</i> <6,0 (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	153 8s 19hs	3 9s 33hs	1 10s 0hs	1 10s 44hs

Tabelle 7.11: Erkennung von *n*-Sterne-Mustern bei *Cepheus* (*angle_tolerance*=0,15°)

	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag</i> <3,0 (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag</i> <4,0 (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs
<i>mag</i> <4,5 (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	7 0s 11hs	1 0s 16hs	1 0s 16hs	0 0s 16hs
<i>mag</i> <5,0 (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	47 0s 60hs	2 0s 71hs	1 0s 77hs	• 1 0s 83hs
<i>mag</i> <5,4 (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	303 3s 2hs	14 4s 28hs	1 4s 66hs	1 4s 89hs
<i>mag</i> <5,7 (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	709 7s 58hs	41 11s 97hs	1 13s 1hs	1 13s 63hs
<i>mag</i> <6,0 (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1271 13s 95hs	83 24s 33hs	4 26s 75hs	1 28s 6hs

Tabelle 7.12: Erkennung von *n*-Sterne-Mustern bei *Cepheus* (*angle_tolerance*=0,3°)

7.4 Beispiel-Himmelsaufnahme *Cygnus*

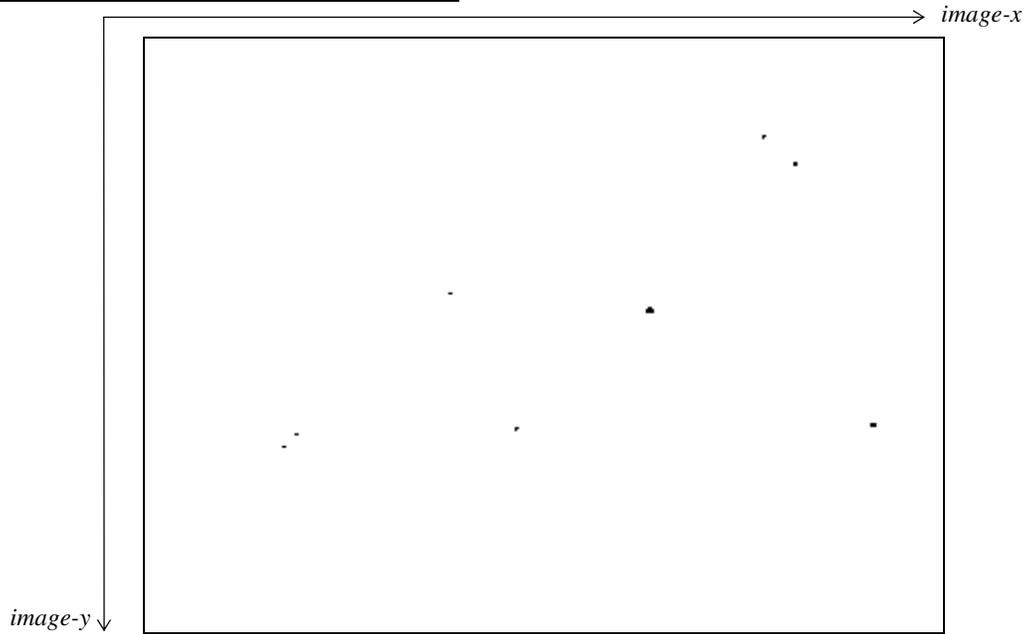


Bild 7.16: Beispiel-Himmelsaufnahme *Cygnus* (invertiertes Original)

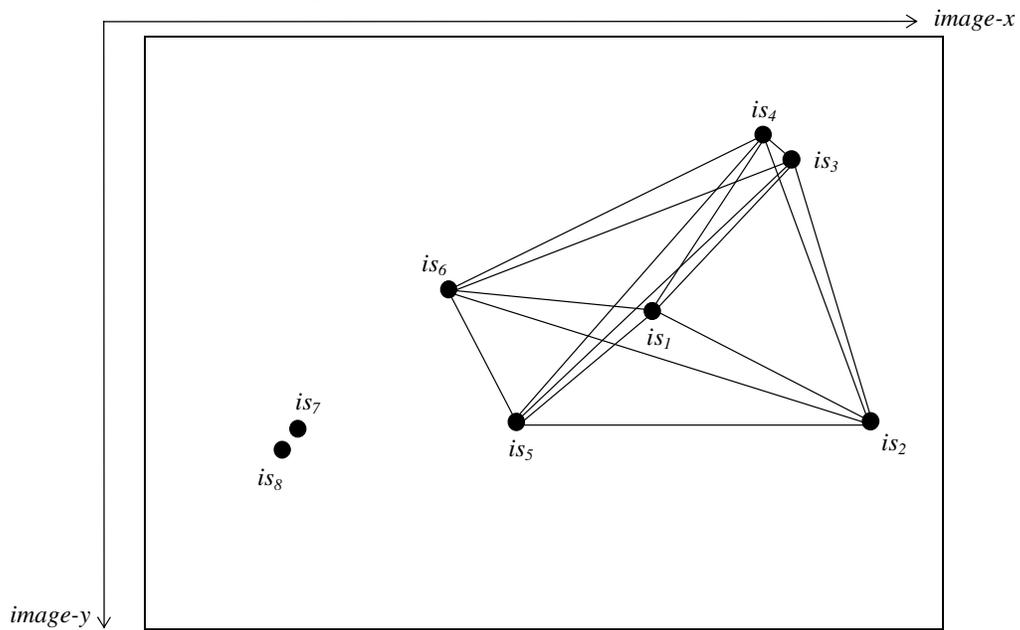


Bild 7.17: Beispiel-Himmelsaufnahme *Cygnus* mit hervorgehobenen acht Bildsternen und automatisch ausgewähltem 6-Sterne-Muster (is_1 bis is_6)

Ergebnisse unter Anwendung des allgemeinen Verfahrens zur Sternmustererkennung nebst Bestimmung der 3-axialen Lage bei *Cygnus*:

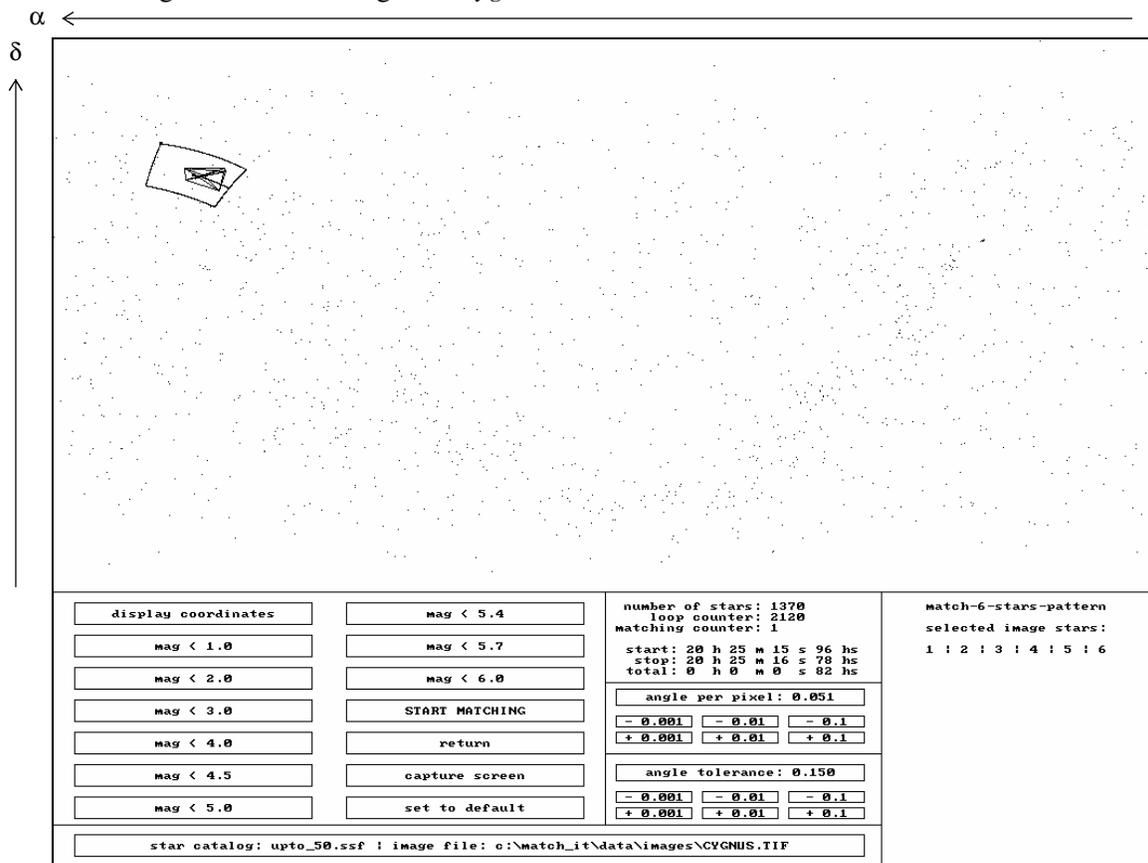


Bild 7.18: Eindeutig erkanntes 6-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage *Cygnus* (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

matching_time=0,49s (acht Sub-Sternkataloge, *MATCH-5*)
 Lagebestimmungsrate insgesamt *adr=2,04Hz*
 Lagebestimmungsrate je Sub-Sternkatalog *adr_{sub}=16,33Hz*

	α_{att}	δ_{att}	ω_{att}
(rad)	5,482	0,800	5,917
(deg)	314,079	45,834	339,026

Tabelle 7.13: Ergebnistabelle der 3-axialen Lageparameter der Bildvorlage *Cygnus*

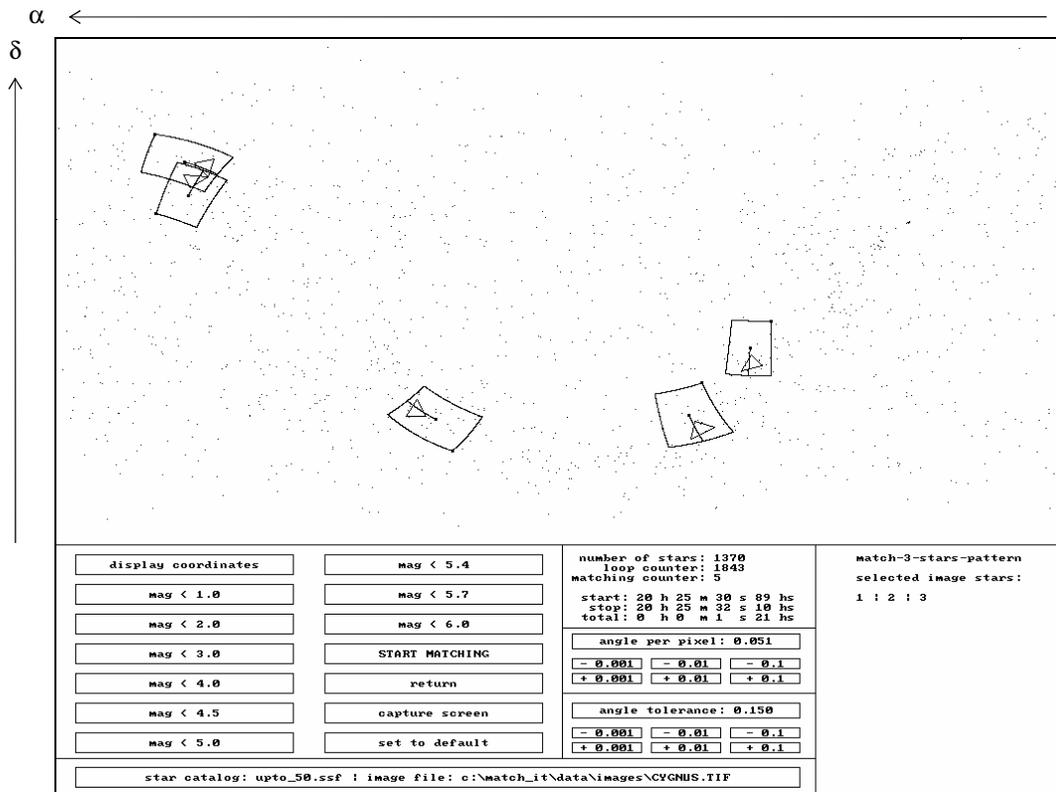


Bild 7.19: Fünf erkannte 3-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage Cygnus bei einer erzwungenen Anwendung des Moduls *match-3-stars-pattern* (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

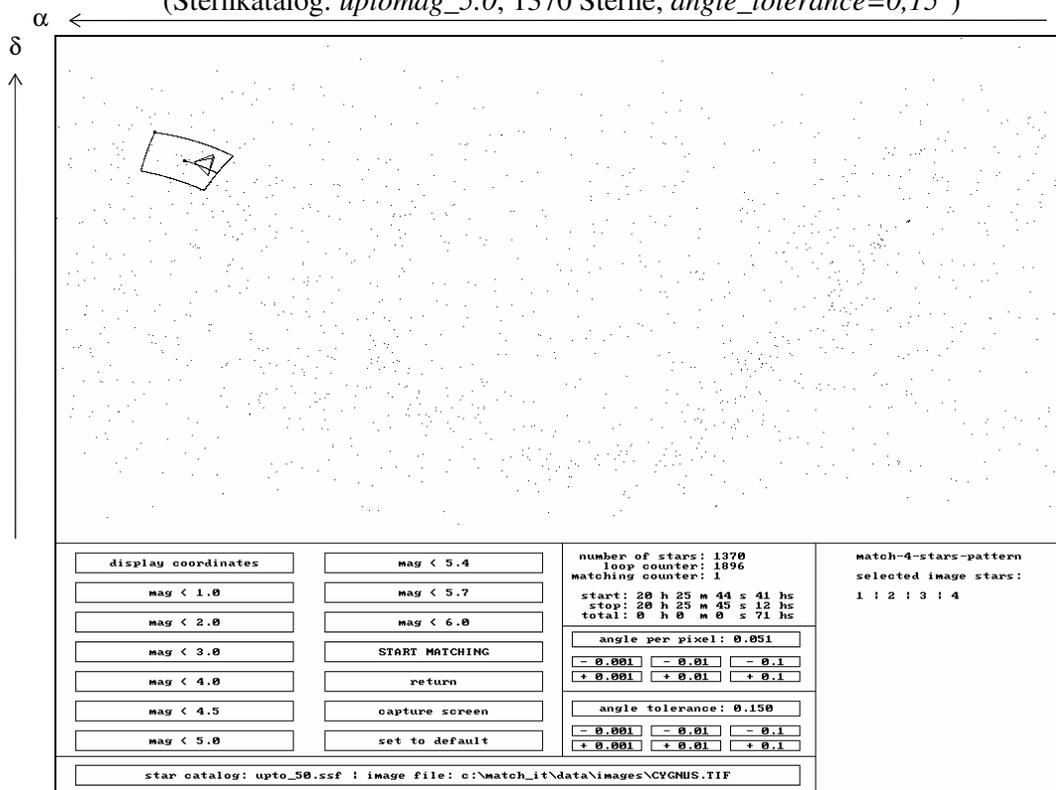


Bild 7.20: Eindeutig erkanntes 4-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage Cygnus bei einer erzwungenen Anwendung des Moduls *match-4-stars-pattern* (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag</i> <3,0 (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag</i> <4,0 (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs
<i>mag</i> <4,5 (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1 0s 11hs	1 0s 11hs	1 0s 11hs	0 0s 16hs
<i>mag</i> <5,0 (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	5 0s 44hs	1 0s 33hs	1 0s 39hs	• 1 0s 49hs
<i>mag</i> <5,4 (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	28 2s 3hs	2 1s 43hs	2 1s 59hs	2 1s 92hs
<i>mag</i> <5,7 (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	51 5s 5hs	2 3s 7hs	2 3s 57hs	2 4s 34hs
<i>mag</i> <6,0 (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	95 9s 11hs	2 5s 27hs	2 6s 15hs	2 7s 42hs

Tabelle 7.14: Erkennung von *n*-Sterne-Mustern bei Cygnus (*angle_tolerance*=0,15°)

	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag</i> <3,0 (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag</i> <4,0 (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs
<i>mag</i> <4,5 (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	4 0s 11hs	1 0s 11hs	1 0s 11hs	0 0s 16hs
<i>mag</i> <5,0 (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	29 0s 66hs	2 0s 44hs	1 0s 55hs	• 1 0s 66hs
<i>mag</i> <5,4 (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	174 3s 35hs	4 2s 20hs	2 2s 58hs	2 3s 7hs
<i>mag</i> <5,7 (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	416 8s 62hs	7 5s 82hs	2 6s 75hs	2 8s 13hs
<i>mag</i> <6,0 (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	809 16s 9hs	51 11s 43hs	5 13s 60hs	2 16s 47hs

Tabelle 7.15: Erkennung von *n*-Sterne-Mustern bei Cygnus (*angle_tolerance*=0,3°)

7.5 Beispiel-Himmelsaufnahme *Aquila*

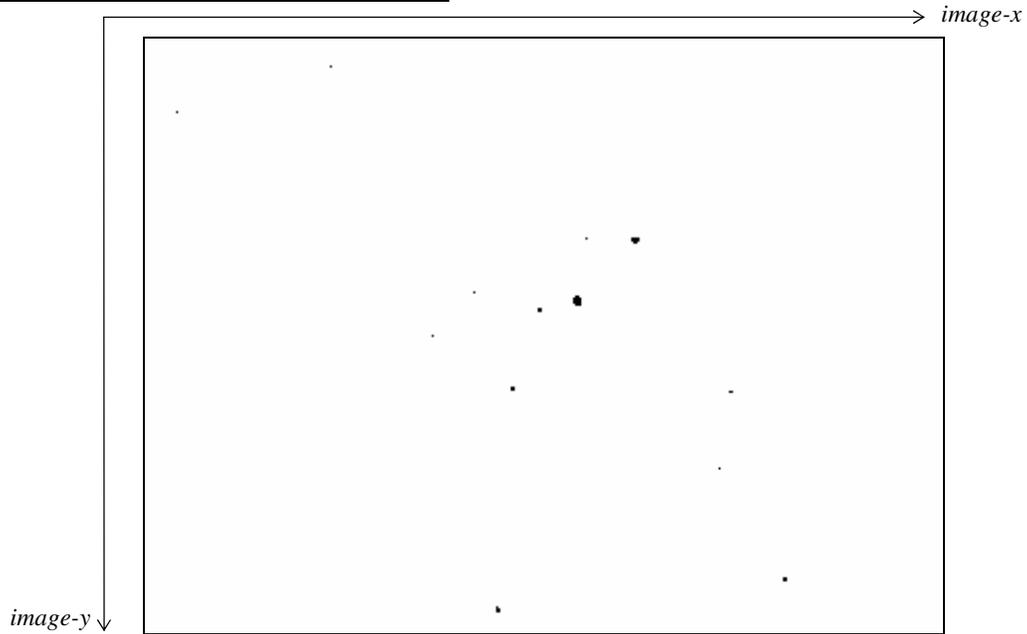


Bild 7.21: Beispiel-Himmelsaufnahme *Aquila* (invertiertes Original)

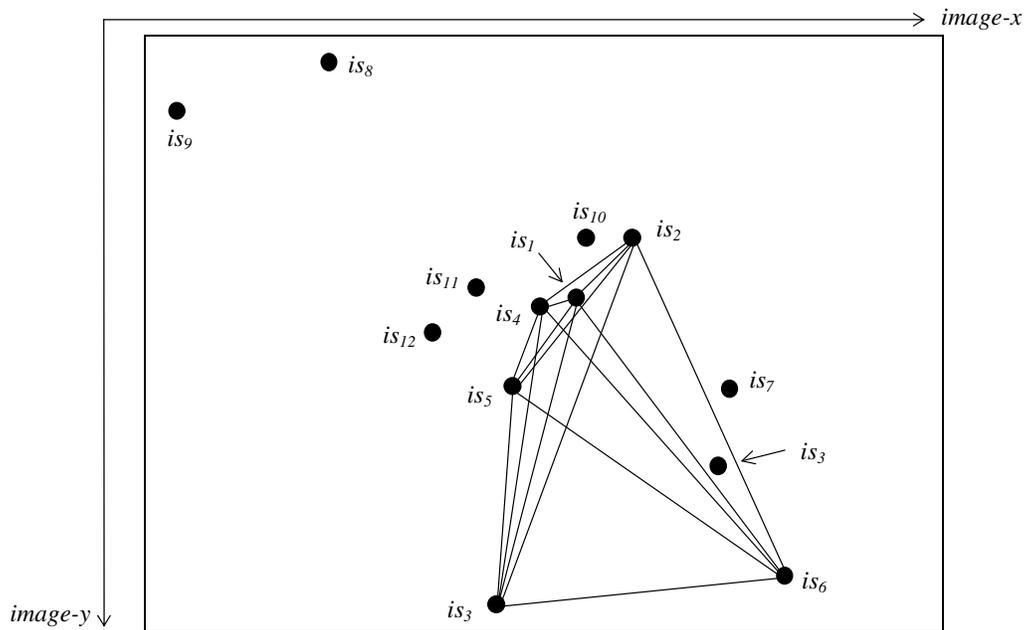


Bild 7.22: Beispiel-Himmelsaufnahme *Aquila* mit hervorgehobenen 13 Bildsternen und automatisch gewähltem 6-Sterne-Muster (is_1 bis is_6)

Ergebnisse unter Anwendung des allgemeinen Verfahrens zur Sternmustererkennung nebst Bestimmung der 3-axialen Lage bei *Aquila*:

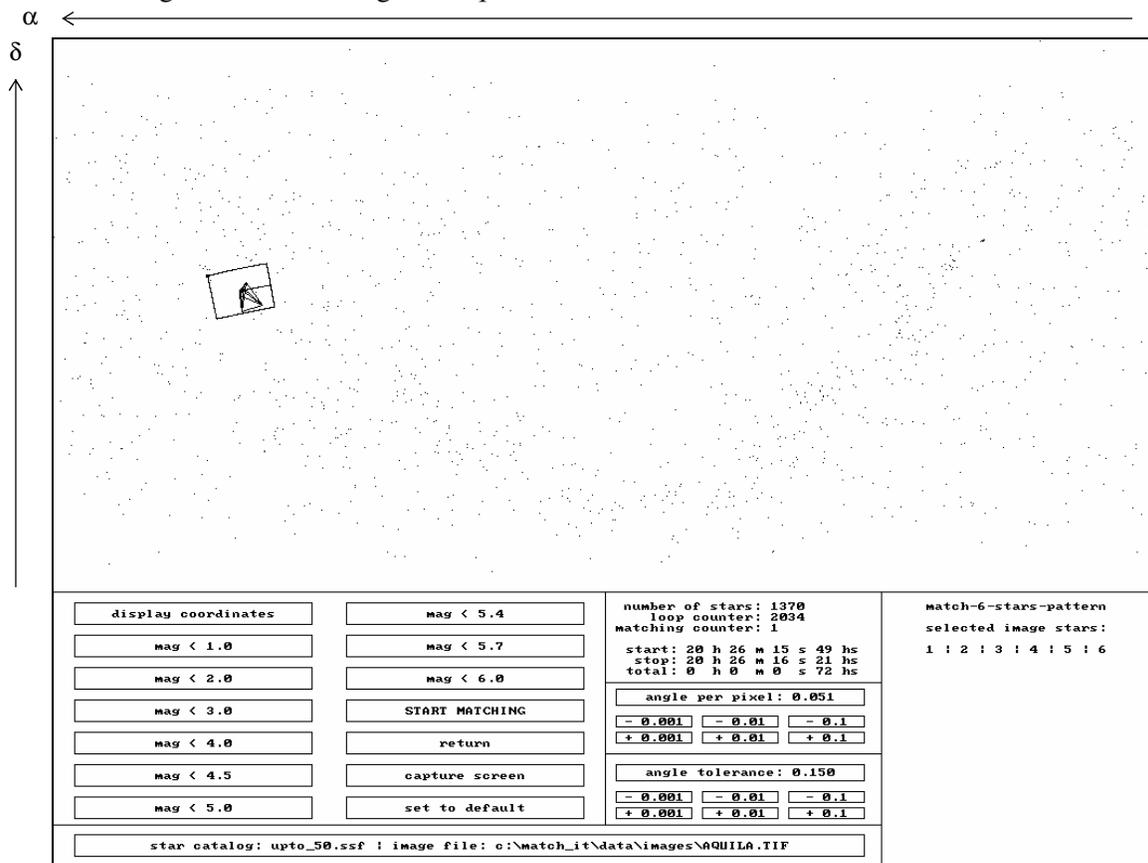


Bild 7.23: Eindeutig erkanntes 6-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage *Aquila* (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

matching_time=0,38s (acht Sub-Sternkataloge, *MATCH-5*)
 Lagebestimmungsrate insgesamt *adr=2,34Hz*
 Lagebestimmungsrate je Sub-Sternkatalog *adr_{sub}=21,05Hz*

	α_{att}	δ_{att}	ω_{att}
(rad)	5,207	0,137	0,192
(deg)	298,360	7,852	10,992

Tabelle 7.16: Ergebnistabelle der 3-axialen Lageparameter der Bildvorlage *Aquila*

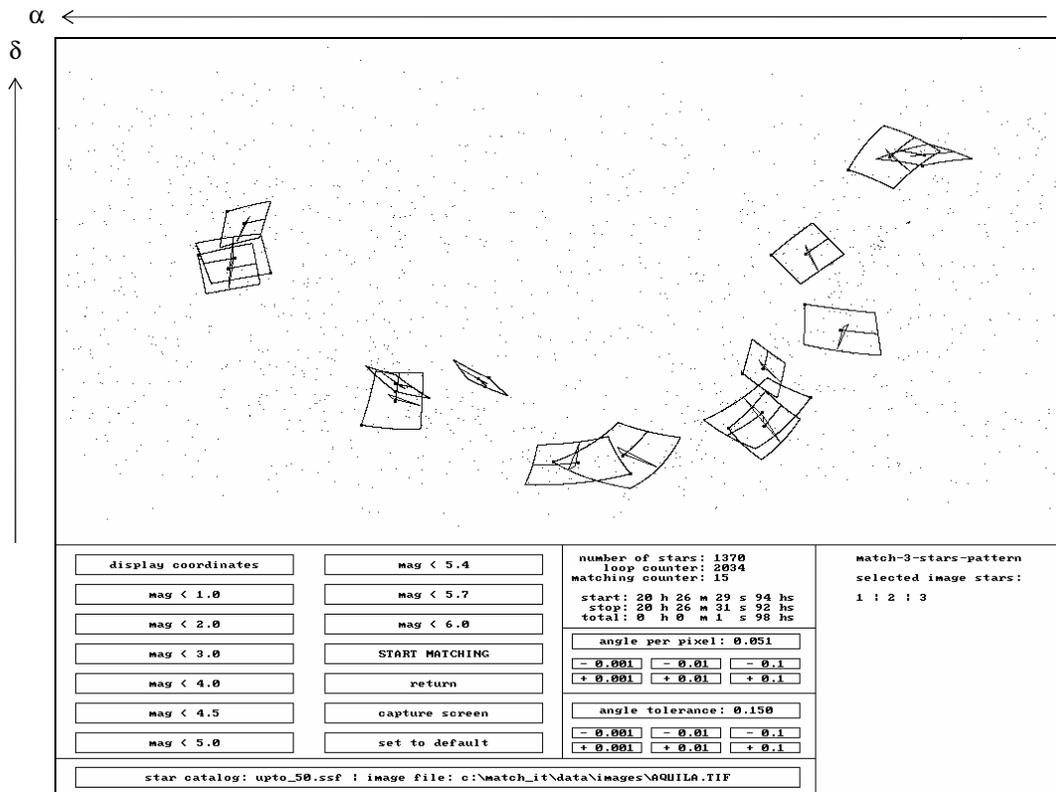


Bild 7.24: 15 erkannte 3-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage Aquila bei einer erzwungenen Anwendung des Moduls *match-3-stars-pattern* (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

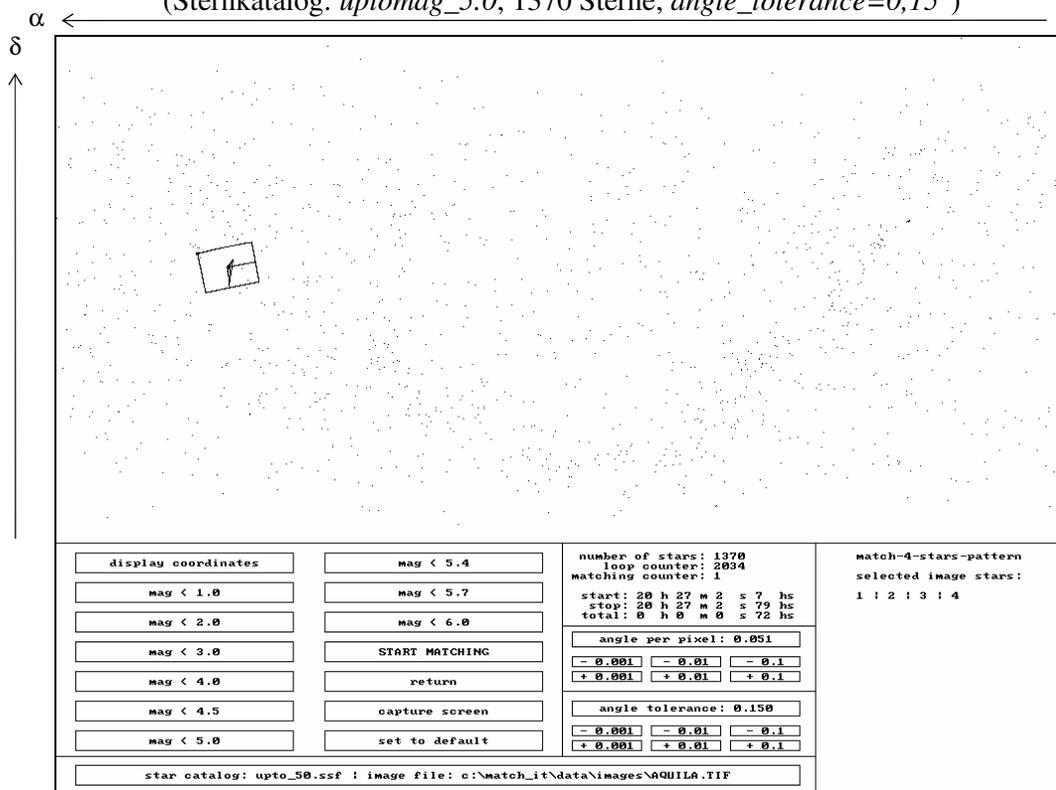


Bild 7.25: Eindeutig erkanntes 4-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage Aquila bei einer erzwungenen Anwendung des Moduls *match-4-stars-pattern* (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag</i> <3,0 (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag</i> <4,0 (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs
<i>mag</i> <4,5 (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	4 0s 11hs	0 0s 11hs	0 0s 11hs	0 0s 11hs
<i>mag</i> <5,0 (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	15 0s 49hs	1 0s 38hs	1 0s 38hs	• 1 0s 39hs
<i>mag</i> <5,4 (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	69 1s 98hs	1 1s 65hs	1 1s 59hs	1 1s 70hs
<i>mag</i> <5,7 (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	173 4s 45hs	4 3s 74hs	1 3s 57hs	1 3s 79hs
<i>mag</i> <6,0 (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	314 7s 75hs	7 6s 70hs	1 6s 48hs	1 6s 76hs

Tabelle 7.17: Erkennung von *n*-Sterne-Mustern bei Aquila (*angle_tolerance*=0,15°)

	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag</i> <3,0 (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag</i> <4,0 (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	4 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 6hs
<i>mag</i> <4,5 (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	17 0s 11hs	0 0s 11hs	0 0s 11hs	0 0s 11hs
<i>mag</i> <5,0 (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	68 0s 66hs	2 0s 55hs	1 0s 55hs	• 1 0s 54hs
<i>mag</i> <5,4 (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	380 2s 80hs	10 2s 91hs	1 2s 91hs	1 3s 2hs
<i>mag</i> <5,7 (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	969 6s 59hs	62 8s 18hs	5 8s 24hs	1 8s 62hs
<i>mag</i> <6,0 (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1752 11s 97hs	131 16s 53hs	11 16s 97hs	1 18s 7hs

Tabelle 7.18: Erkennung von *n*-Sterne-Mustern bei Aquila (*angle_tolerance*=0,3°)

7.6 Beispiel-Himmelsaufnahme *Lyra*

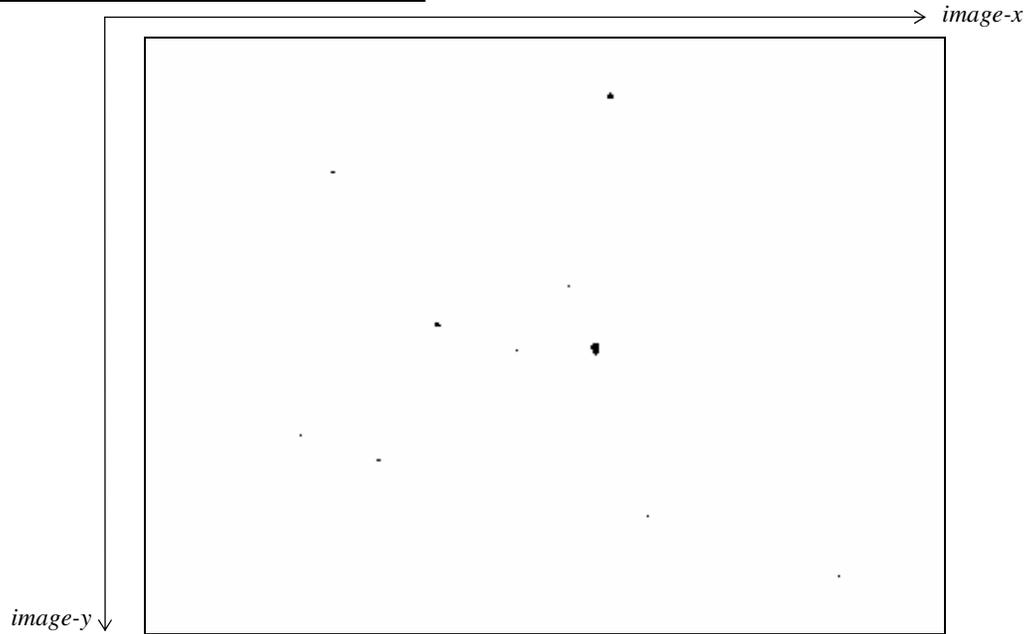


Bild 7.26: Beispiel-Himmelsaufnahme *Lyra* (invertiertes Original)

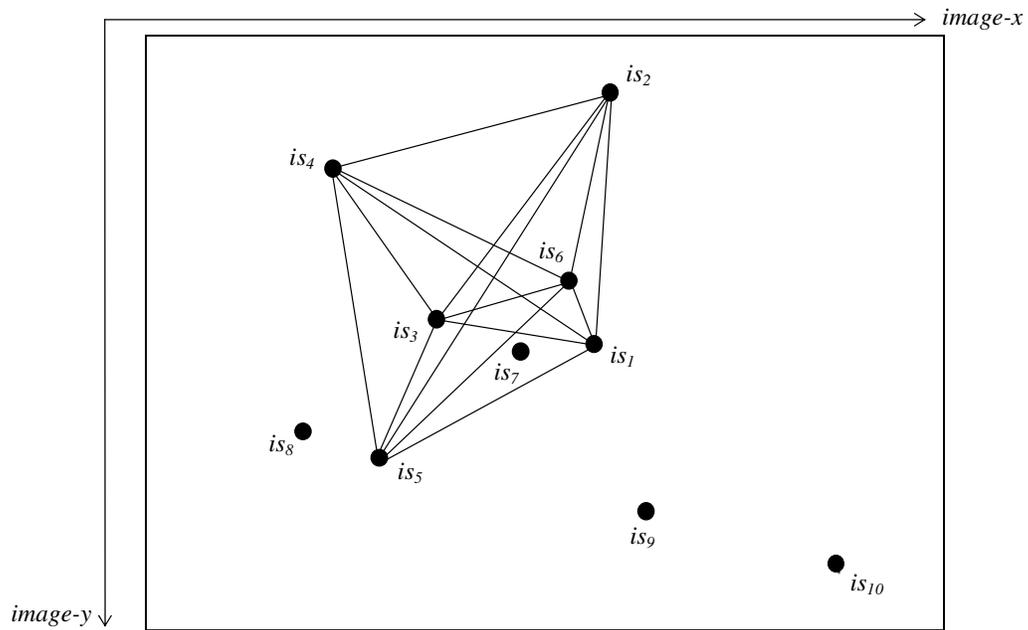


Bild 7.27: Beispiel-Himmelsaufnahme *Lyra* mit hervorgehobenen zehn Bildsternen und automatisch gewähltem 6-Sterne-Muster (is_1 bis is_6)

Ergebnisse unter Anwendung des allgemeinen Verfahrens zur Sternmustererkennung nebst Bestimmung der 3-axialen Lage bei *Lyra*:

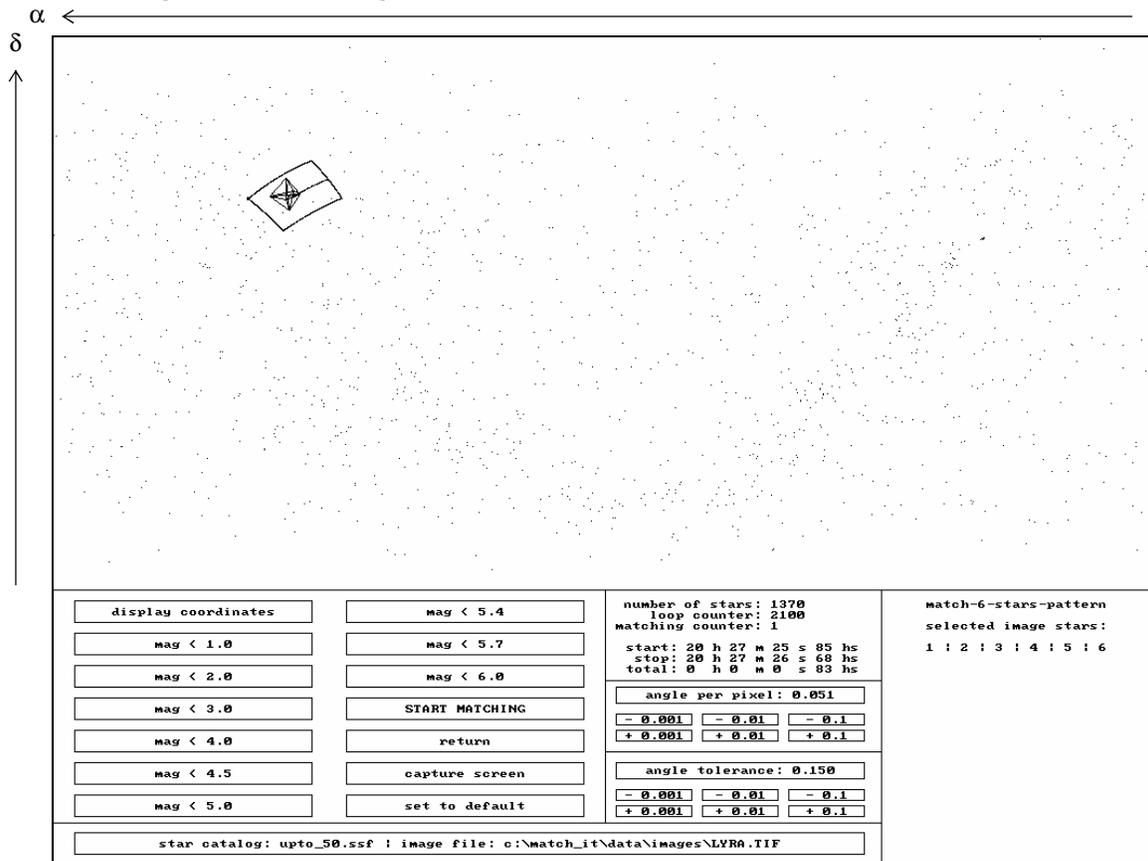


Bild 7.28: Eindeutiges erkanntes 6-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage *Lyra* (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

matching_time=0,50s (acht Sub-Sternkataloge, *MATCH-5*)
 Lagebestimmungsrate insgesamt *adr=2Hz*
 Lagebestimmungsrate je Sub-Sternkatalog *adr_{sub}=16Hz*

	α_{att}	δ_{att}	ω_{att}
(rad)	4,901	0,668	0,459
(deg)	280,783	38,282	26,292

Tabelle 7.19: Ergebnistabelle der 3-axialen Lageparameter der Bildvorlage *Lyra*

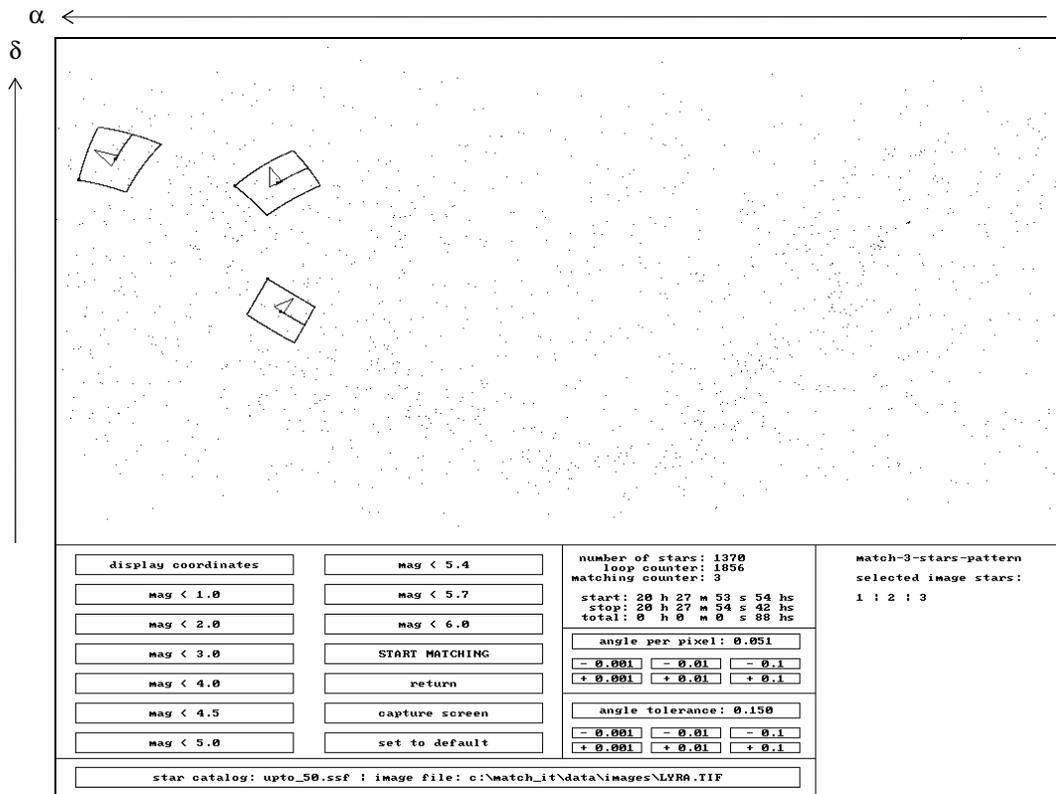


Bild 7.29: Drei erkannte 3-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage Lyra bei einer erzwungenen Anwendung des Moduls *match-3-stars-pattern* (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

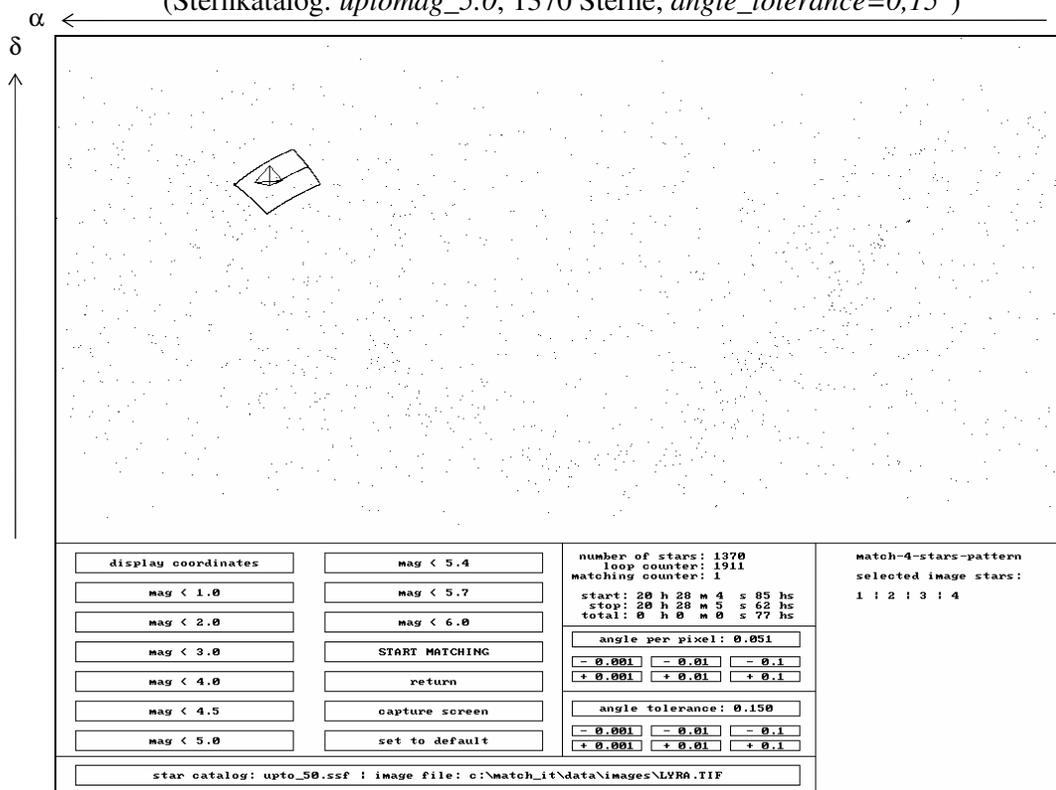


Bild 7.30: Eindeutig erkanntes 4-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage Lyra bei einer erzwungenen Anwendung des Moduls *match-4-stars-pattern* (Sternkatalog: *uptomag_5.0*, 1370 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag</i> <3,0 (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag</i> <4,0 (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs
<i>mag</i> <4,5 (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 0s 11hs	0 0s 11hs	0 0s 11hs	0 0s 11hs
<i>mag</i> <5,0 (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	3 0s 43hs	1 0s 44hs	1 0s 55hs	• 1 0s 50hs
<i>mag</i> <5,4 (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	22 1s 76hs	1 2s 4hs	1 2s 58hs	1 2s 8hs
<i>mag</i> <5,7 (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	54 4s 28hs	3 4s 88hs	2 6s 15hs	4 4s 67hs
<i>mag</i> <6,0 (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	98 7s 91hs	3 9s 18hs	2 11s 31hs	4 8s 24hs

Tabelle 7.20: Erkennung von *n*-Sterne-Mustern bei *Lyra* (*angle_tolerance*=0,15°)

	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag</i> <3,0 (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs	0 < 0s 1hs
<i>mag</i> <4,0 (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs
<i>mag</i> <4,5 (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	4 0s 11hs	0 0s 16hs	0 0s 17hs	0 0s 17hs
<i>mag</i> <5,0 (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	27 0s 55hs	1 0s 66hs	1 0s 83hs	• 1 0s 72hs
<i>mag</i> <5,4 (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	194 2s 91hs	10 3s 79hs	2 4s 61hs	2 3s 46hs
<i>mag</i> <5,7 (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	439 7s 30hs	22 10s 10hs	4 11s 97hs	4 8s 95hs
<i>mag</i> <6,0 (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	830 13s 73hs	50 19s 82hs	5 23s 79hs	4 17s 19hs

Tabelle 7.21: Erkennung von *n*-Sterne-Mustern bei *Lyra* (*angle_tolerance*=0,3°)

7.7 Beispiel-Himmelsaufnahme *Andromeda*

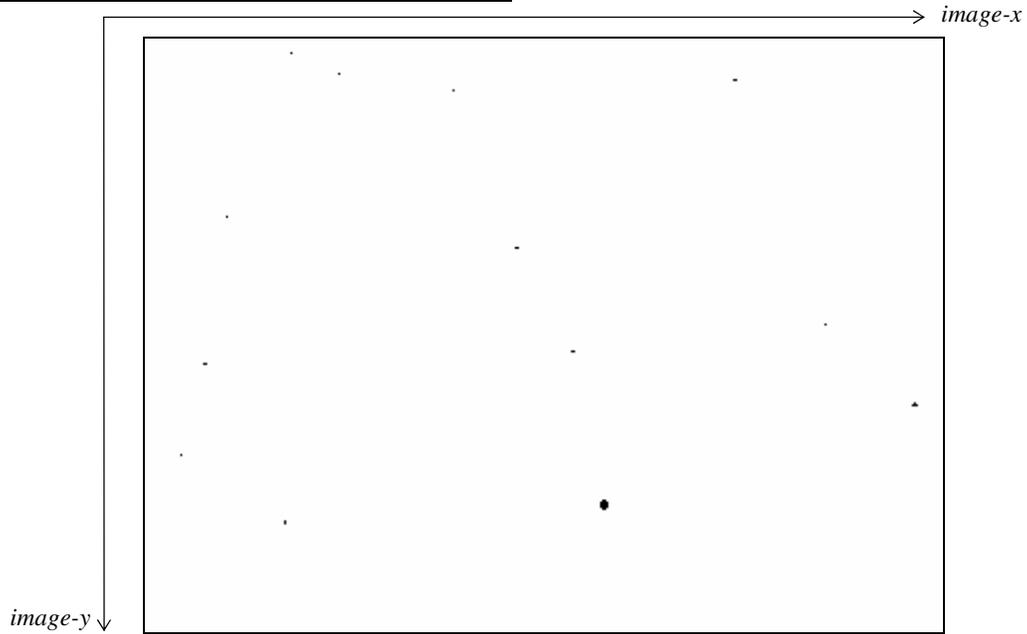


Bild 7.31: Beispiel-Himmelsaufnahme *Andromeda* (invertiertes Original)

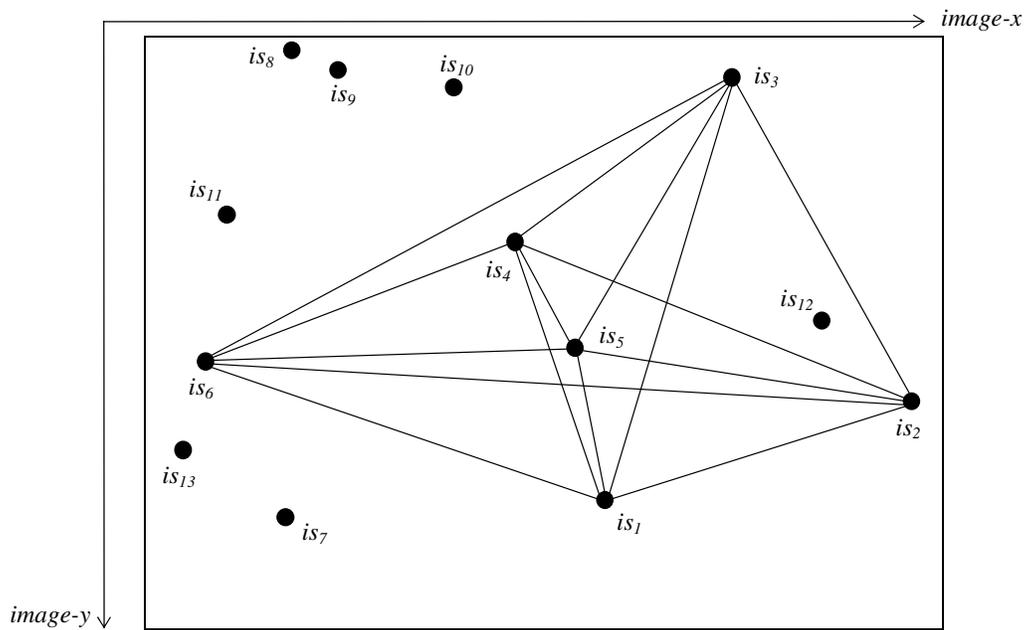


Bild 7.32: Beispiel-Himmelsaufnahme *Andromeda* mit hervorgehobenen 13 Bildsternen und automatisch gewähltem 6-Sterne-Muster (is_1 bis is_6)

Ergebnisse unter Anwendung des allgemeinen Verfahrens zur Sternmustererkennung nebst Bestimmung der 3-axialen Lage bei *Andromeda*:

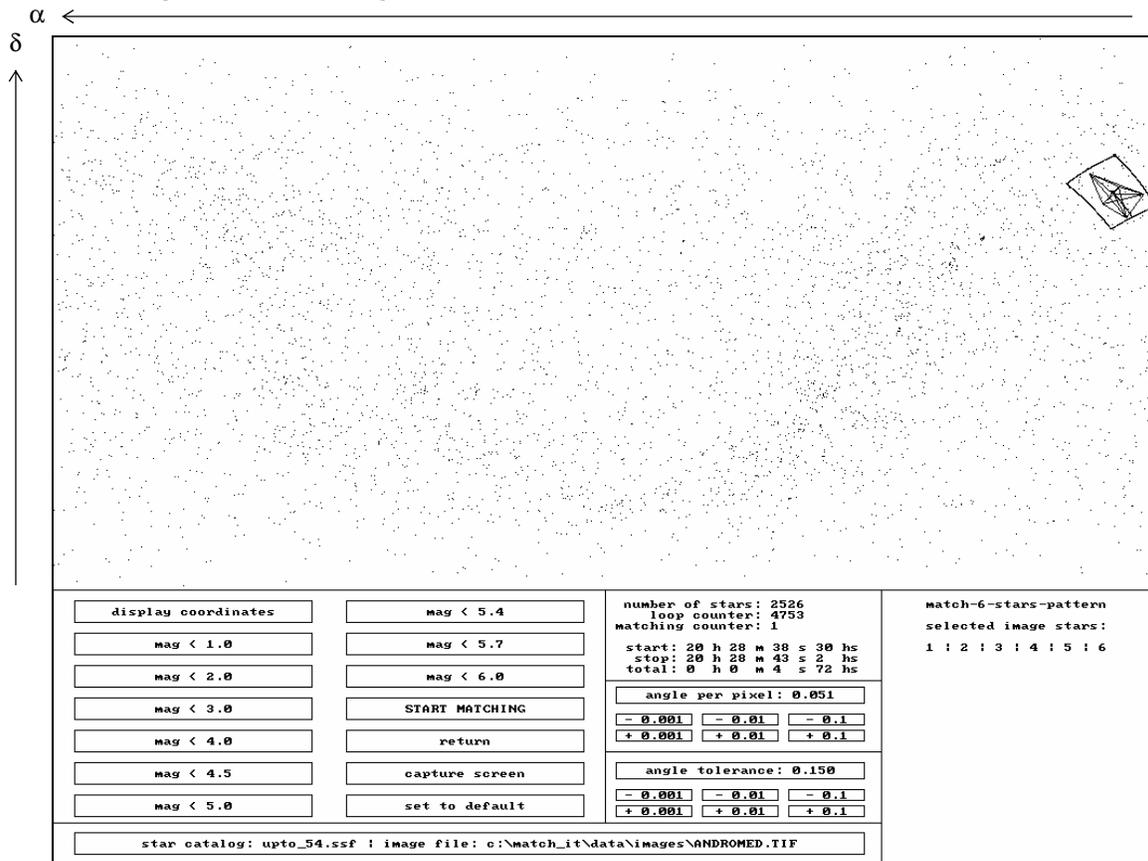


Bild 7.33: Eindeutig erkanntes 6-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage *Andromeda* (Sternkatalog: *uptomag_5.4*, 2526 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

matching_time=4,06s (acht Sub-Sternkataloge, *MATCH-5*)
 Lagebestimmungsrate insgesamt *adr=0,25Hz*
 Lagebestimmungsrate je Sub-Sternkatalog *adr_{sub}=1,95Hz*

	α_{att}	δ_{att}	ω_{att}
(rad)	0,250	0,687	5,381
(deg)	14,296	39,337	308,291

Tabelle 7.22: Ergebnistabelle der 3-axialen Lageparameter der Bildvorlage *Andromeda*

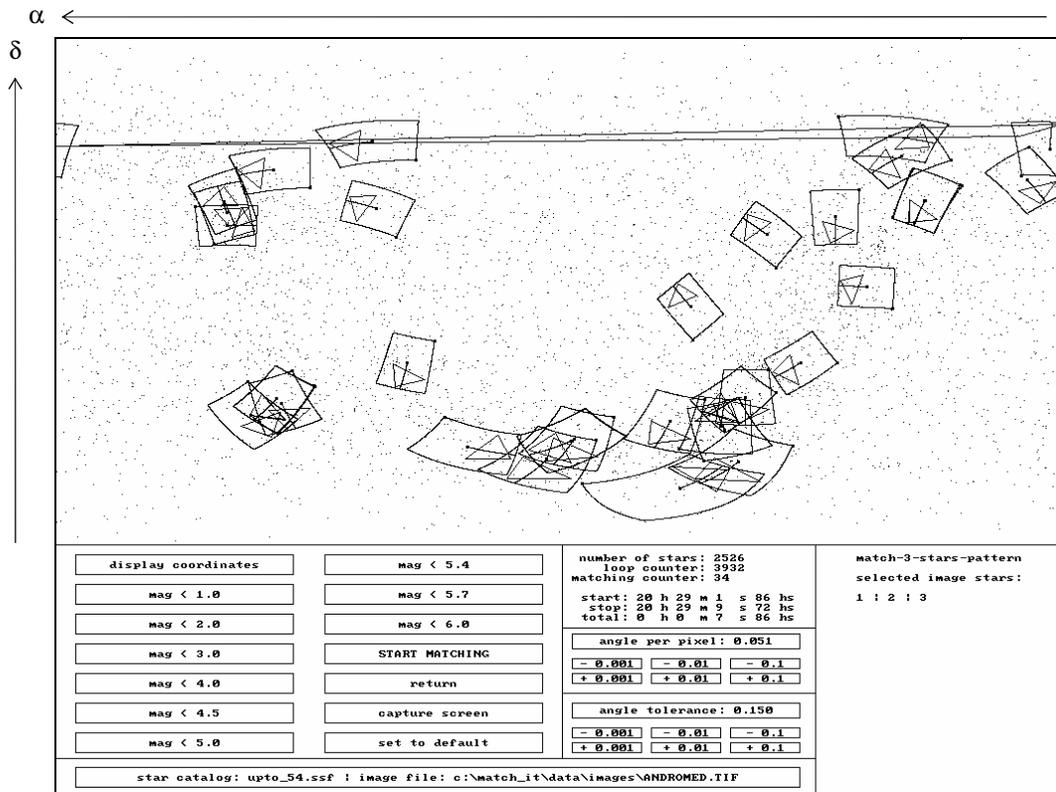


Bild 7.34: 34 erkannte 3-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage *Andromeda* bei einer erzwungenen Anwendung des Moduls *match-3-stars-pattern* (Sternkatalog: *uptomag_5.4*, 2526 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

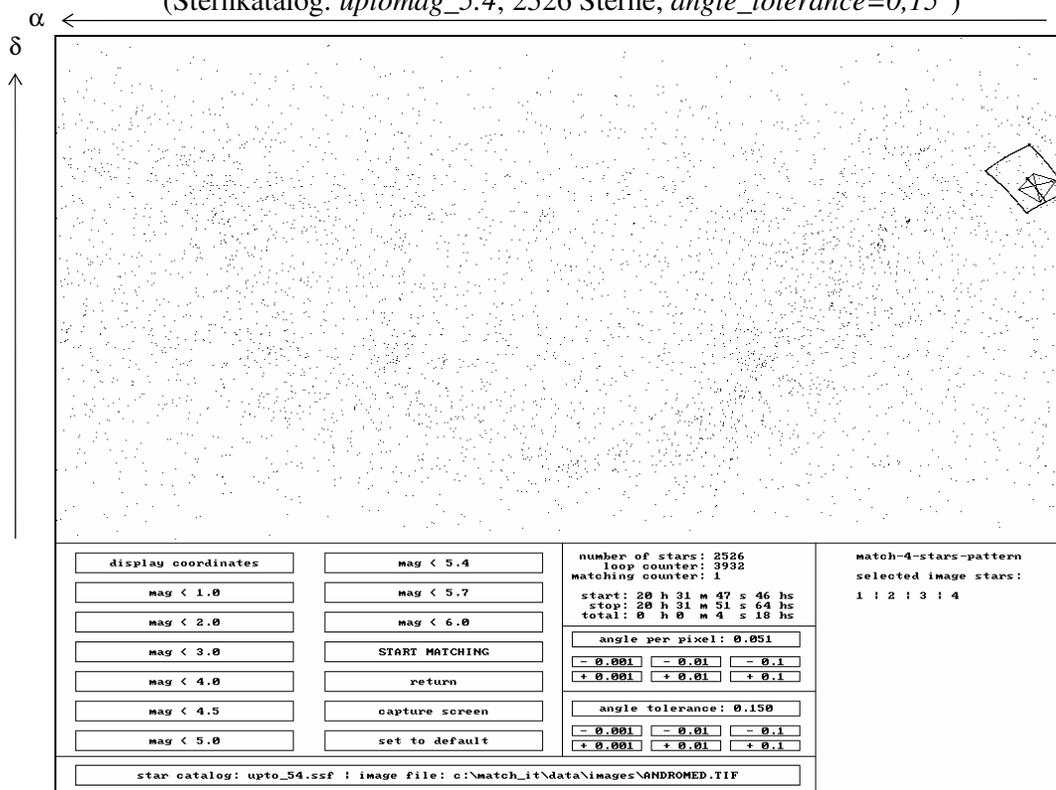


Bild 7.35: Eindeutig erkanntes 4-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage *Andromeda* bei einer erzwungenen Anwendung des Moduls *match-4-stars-pattern* (Sternkatalog: *uptomag_5.4*, 2526 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag</i> <3,0 (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 <0s 1hs	0 <0s 1hs	0 <0s 1hs	0 <0s 1hs
<i>mag</i> <4,0 (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs
<i>mag</i> <4,5 (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	2 0s 22hs	1 0s 16hs	1 0s 16hs	0 0s 22hs
<i>mag</i> <5,0 (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	8 0s 82hs	1 0s 77hs	1 0s 55hs	0 0s 94hs
<i>mag</i> <5,4 (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	34 3s 79hs	1 3s 74hs	1 2s 36hs	• 1 4s 7hs
<i>mag</i> <5,7 (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	96 9s 67hs	1 9s 61hs	1 5s 76hs	1 9s 94hs
<i>mag</i> <6,0 (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	157 18s 2hs	1 18s 7hs	1 10s 44hs	1 17s 85hs

Tabelle 7.23: Erkennung von *n*-Sterne-Mustern bei *Andromeda* (*angle_tolerance*=0,15°)

	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag</i> <3,0 (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1 <0s 1hs	0 <0s 1hs	0 <0s 1hs	0 <0s 1hs
<i>mag</i> <4,0 (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs
<i>mag</i> <4,5 (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	10 0s 27hs	1 0s 27hs	1 0s 17hs	0 0s 33hs
<i>mag</i> <5,0 (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	49 1s 27hs	1 1s 26hs	1 0s 82hs	0 1s 48hs
<i>mag</i> <5,4 (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	222 6s 65hs	6 7s 8hs	1 4s 67hs	• 1 7s 69hs
<i>mag</i> <5,7 (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	612 17s 52hs	26 19s 67hs	1 12s 36hs	1 20s 93hs
<i>mag</i> <6,0 (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1151 33s 1hs	53 39s 82hs	2 24s 44hs	1 41s 36hs

Tabelle 7.24: Erkennung von *n*-Sterne-Mustern bei *Andromeda* (*angle_tolerance*=0,3°)

7.8 Beispiel-Himmelsaufnahme *Draco*

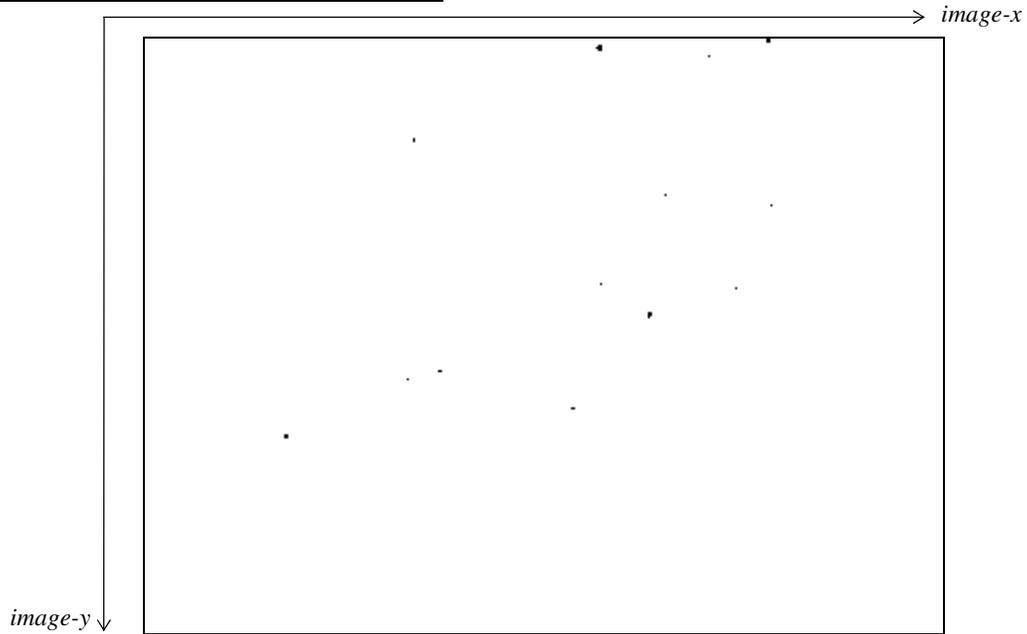


Bild 7.36: Beispiel-Himmelsaufnahme *Draco* (invertiertes Original)

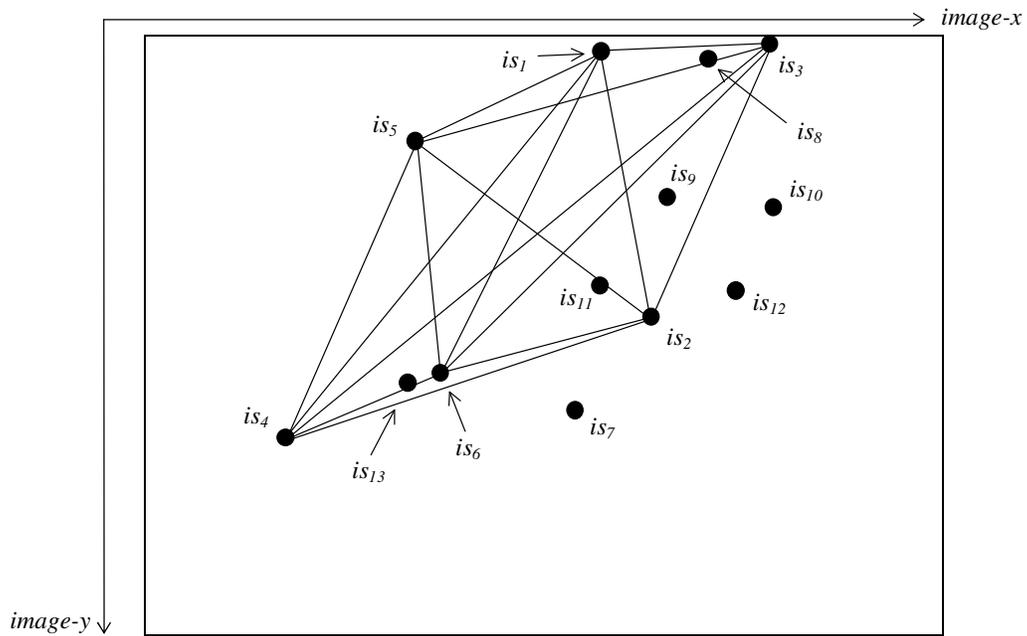


Bild 7.37: Beispiel-Himmelsaufnahme *Draco* mit hervorgehobenen 13 Bildsternen und automatisch gewähltem 6-Sterne-Muster (is_1 bis is_6)

Ergebnisse unter Anwendung des allgemeinen Verfahrens zur Sternmustererkennung nebst Bestimmung der 3-axialen Lage bei *Draco*:

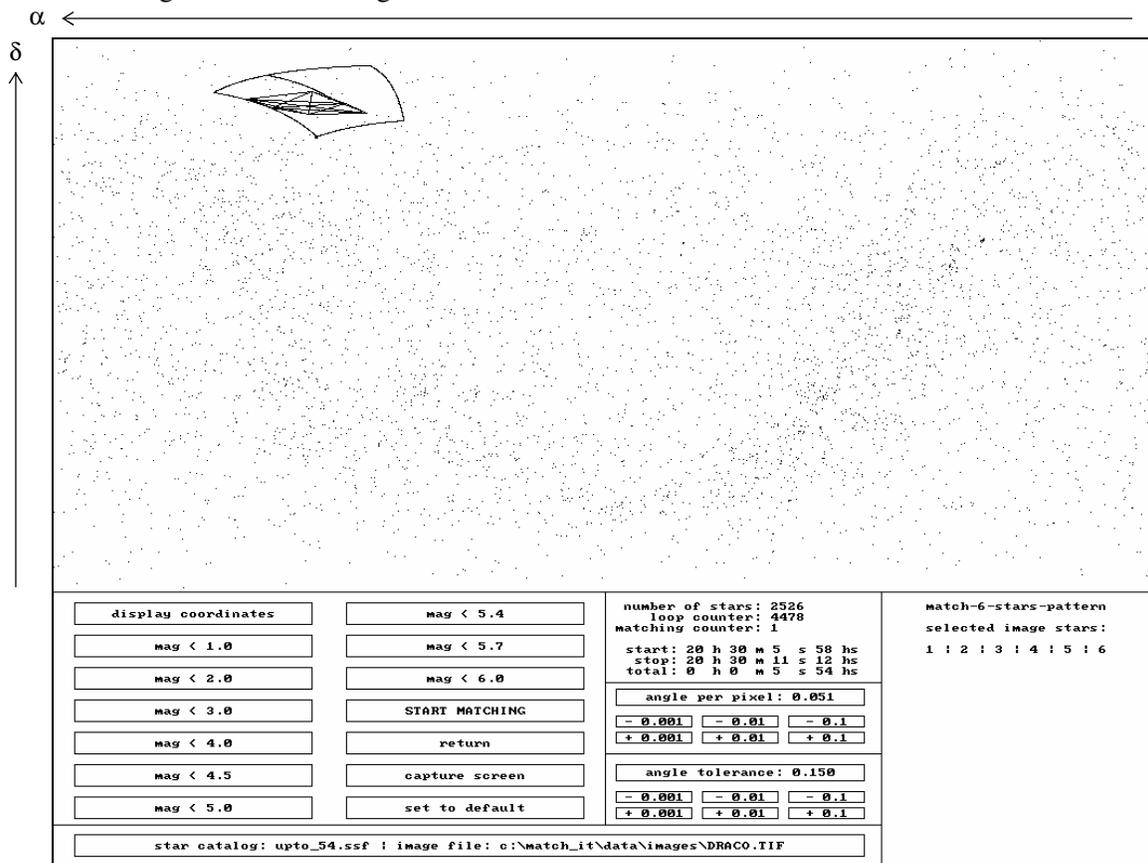


Bild 7.38: Eindeutig erkanntes 6-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage *Draco* (Sternkatalog: *uptomag_5.4*, 2526 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

matching_time=4,77s (acht Sub-Sternkataloge, *MATCH-5*)
 Lagebestimmungsrate insgesamt *adr=0,21Hz*
 Lagebestimmungsrate je Sub-Sternkatalog *adr_{sub}=1,68Hz*

	α_{att}	δ_{att}	ω_{att}
(rad)	4,704	1,234	2,794
(deg)	269,494	70,678	160,095

Tabelle 7.25: Ergebnistabelle der 3-axialen Lageparameter der Bildvorlage *Draco*

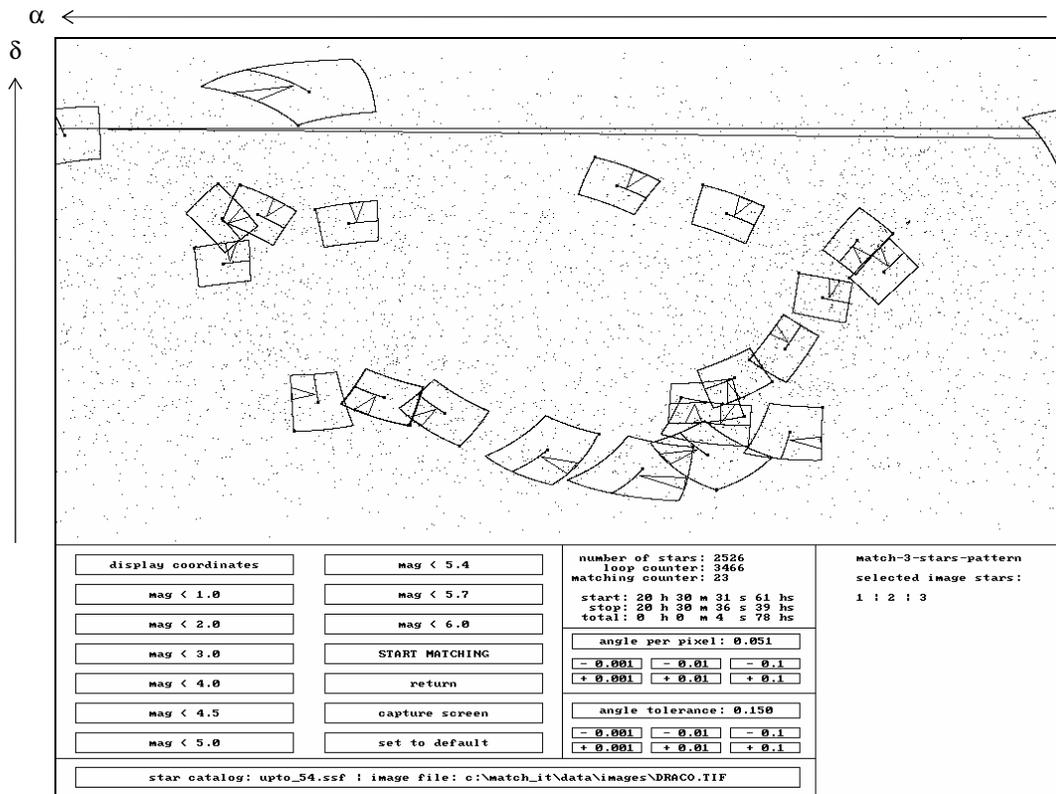


Bild 7.39: 23 erkannte 3-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage Draco bei einer erzwungenen Anwendung des Moduls *match-3-stars-pattern* (Sternkatalog: *uptomag_5.4*, 2526 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

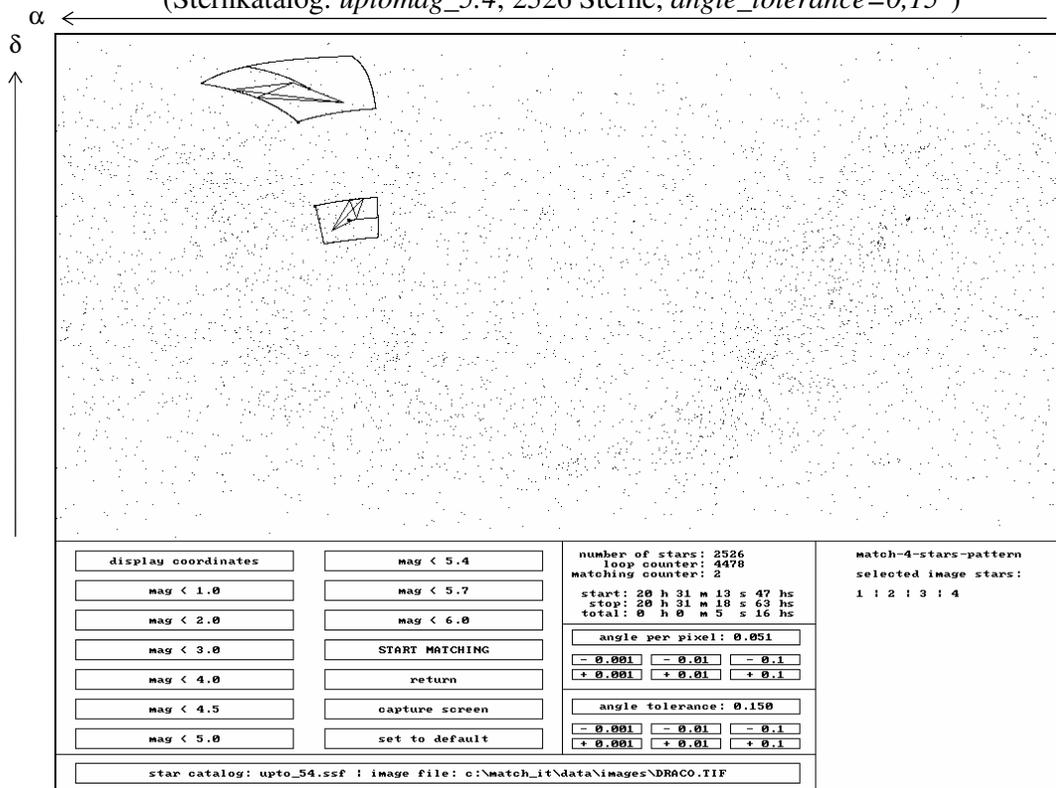


Bild 7.40: Zwei erkannte 4-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage Draco bei einer erzwungenen Anwendung des Moduls *match-4-stars-pattern* (Sternkatalog: *uptomag_5.4*, 2526 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag</i> <3,0 (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 <0s 1hs	0 <0s 1hs	0 <0s 1hs	0 <0s 1hs
<i>mag</i> <4,0 (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 6hs
<i>mag</i> <4,5 (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1 0s 11hs	1 0s 22hs	0 0s 22hs	0 0s 28hs
<i>mag</i> <5,0 (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	4 0s 44hs	1 0s 93hs	0 0s 88hs	0 0s 99hs
<i>mag</i> <5,4 (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	23 2s 3hs	2 4s 28hs	1 4s 6hs	• 1 4s 78hs
<i>mag</i> <5,7 (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	68 4s 84hs	4 10s 54hs	1 10s 11hs	1 12s 25hs
<i>mag</i> <6,0 (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	121 8s 79hs	4 19s 34hs	1 18s 56hs	1 23s 84hs

Tabelle 7.26: Erkennung von *n*-Sterne-Mustern bei *Draco* (*angle_tolerance*=0,15°)

	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag</i> <3,0 (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 <0s 1hs	0 <0s 1hs	0 <0s 1hs	0 <0s 1hs
<i>mag</i> <4,0 (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 6hs	0 0s 6hs
<i>mag</i> <4,5 (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	5 0s 16hs	1 0s 33hs	0 0s 33hs	0 0s 38hs
<i>mag</i> <5,0 (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	27 0s 66hs	2 1s 43hs	0 1s 38hs	0 1s 71hs
<i>mag</i> <5,4 (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	163 3s 13hs	10 7s 52hs	1 7s 25hs	• 1 10s 82hs
<i>mag</i> <5,7 (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	437 7s 97hs	32 20s 21hs	3 19s 61hs	1 32s 57hs
<i>mag</i> <6,0 (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	851 15s 5hs	96 40s 92hs	4 40s 20hs	1 1m 11s 13hs

Tabelle 7.27: Erkennung von *n*-Sterne-Mustern bei *Draco* (*angle_tolerance*=0,3°)

7.9 Beispiel-Himmelsaufnahme *Sagitta*

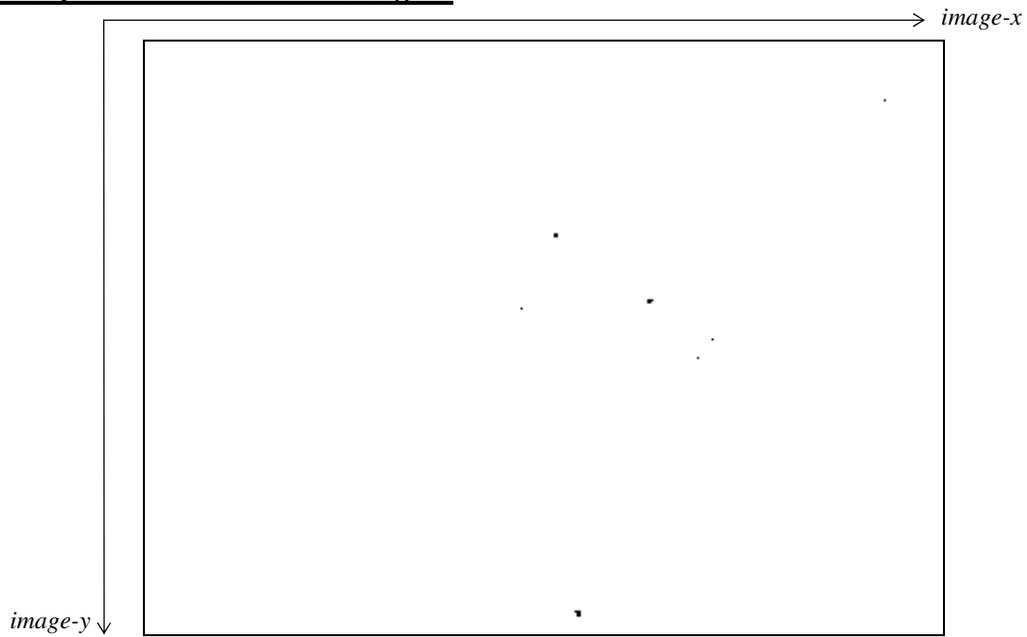


Bild 7.41: Beispiel-Himmelsaufnahme *Sagitta* (invertiertes Original)

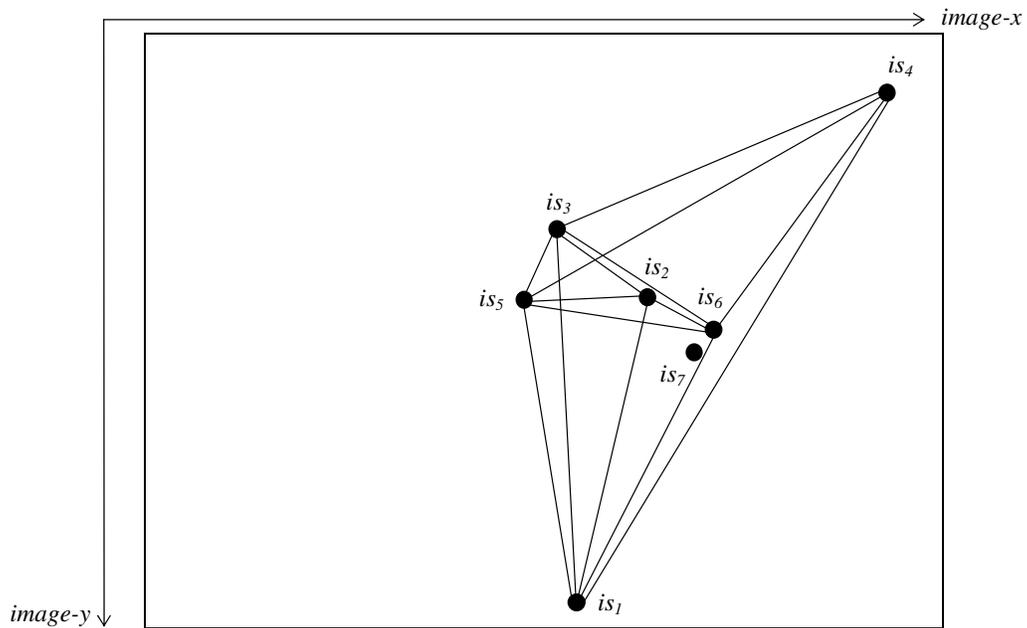


Bild 7.42: Beispiel-Himmelsaufnahme *Sagitta* mit hervorgehobenen 7 Bildsternen und automatisch gewähltem 6-Sterne-Muster (is_1 bis is_6)

Ergebnisse unter Anwendung des allgemeinen Verfahrens zur Sternmustererkennung nebst Bestimmung der 3-axialen Lage bei *Sagitta*:

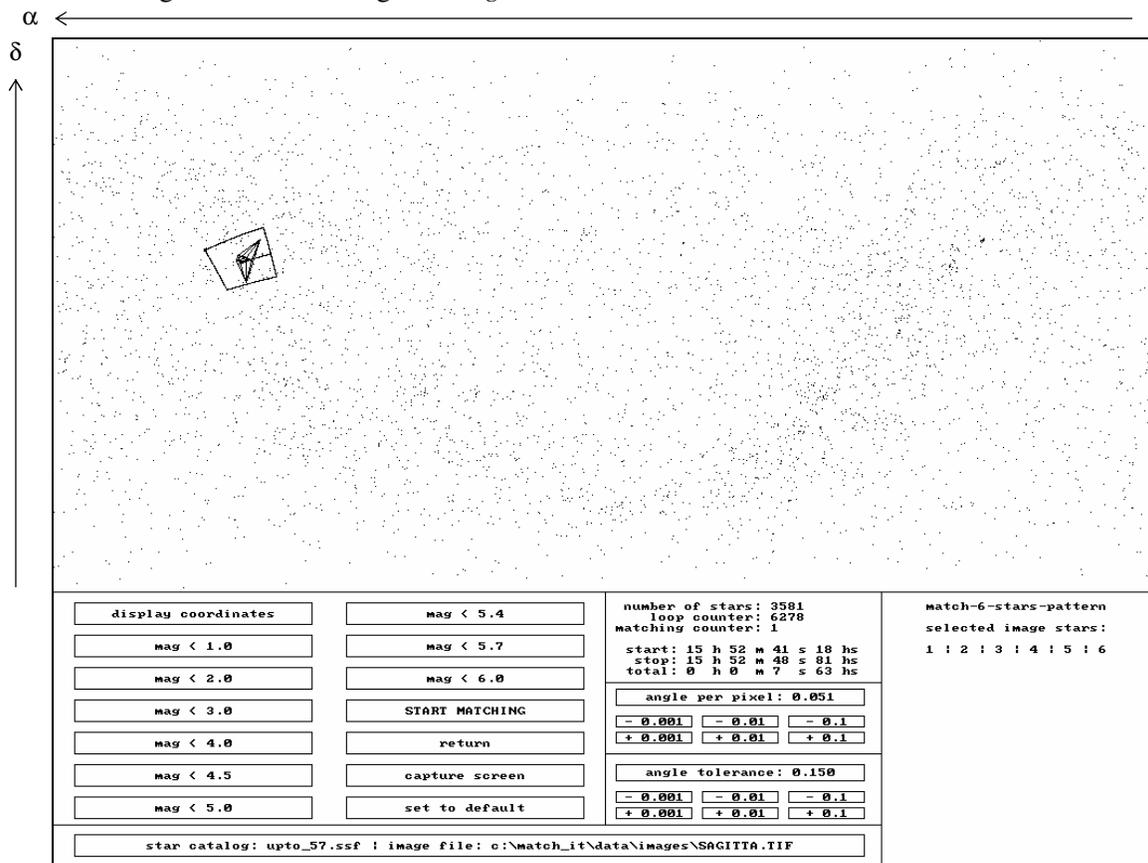


Bild 7.43: Eindeutig erkanntes 6-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage *Sagitta* (Sternkatalog: *uptomag_5.7*, 3581 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

matching_time=6,92s (acht Sub-Sternkataloge, *MATCH-5*)
 Lagebestimmungsrate insgesamt *adr=0,14Hz*
 Lagebestimmungsrate je Sub-Sternkatalog *adr_{sub}=1,16Hz*

	α_{att}	δ_{att}	ω_{att}
(rad)	5,204	0,298	0,292
(deg)	298,151	17,071	16,710

Tabelle 7.28: Ergebnistabelle der 3-axialen Lageparameter der Bildvorlage *Sagitta*

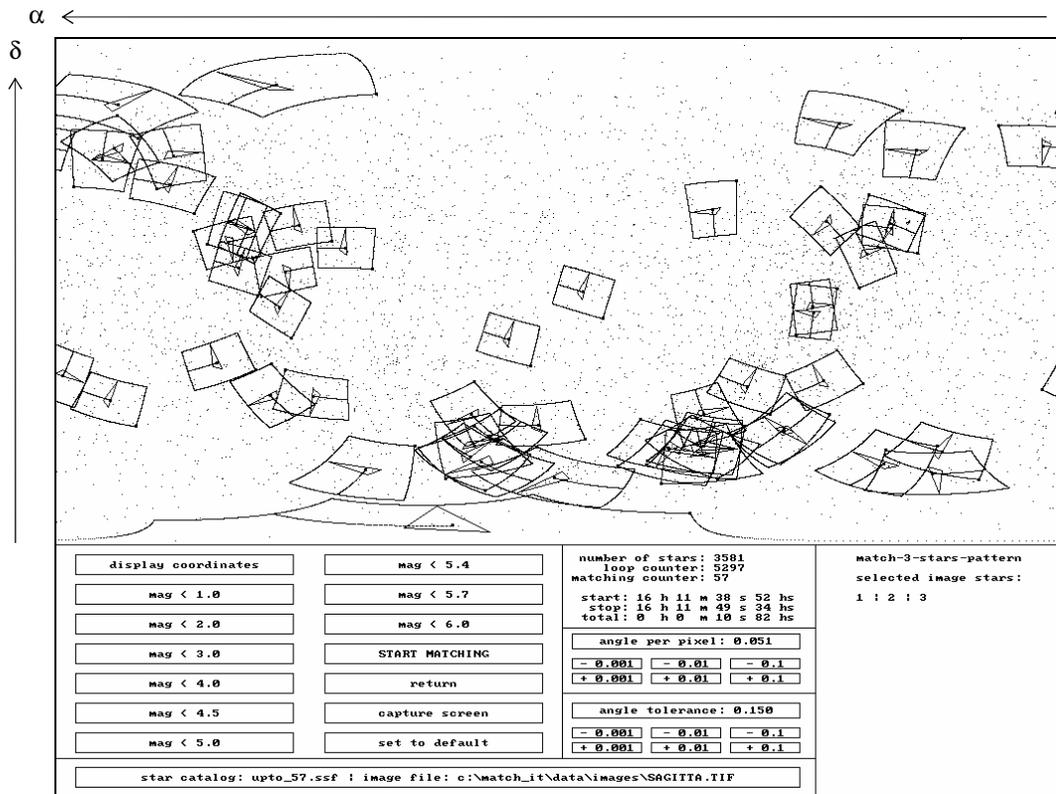


Bild 7.44: 57 erkannte 3-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage Sagitta bei einer erzwungenen Anwendung des Moduls *match-3-stars-pattern* (Sternkatalog: *uptomag_5.7*, 3581 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

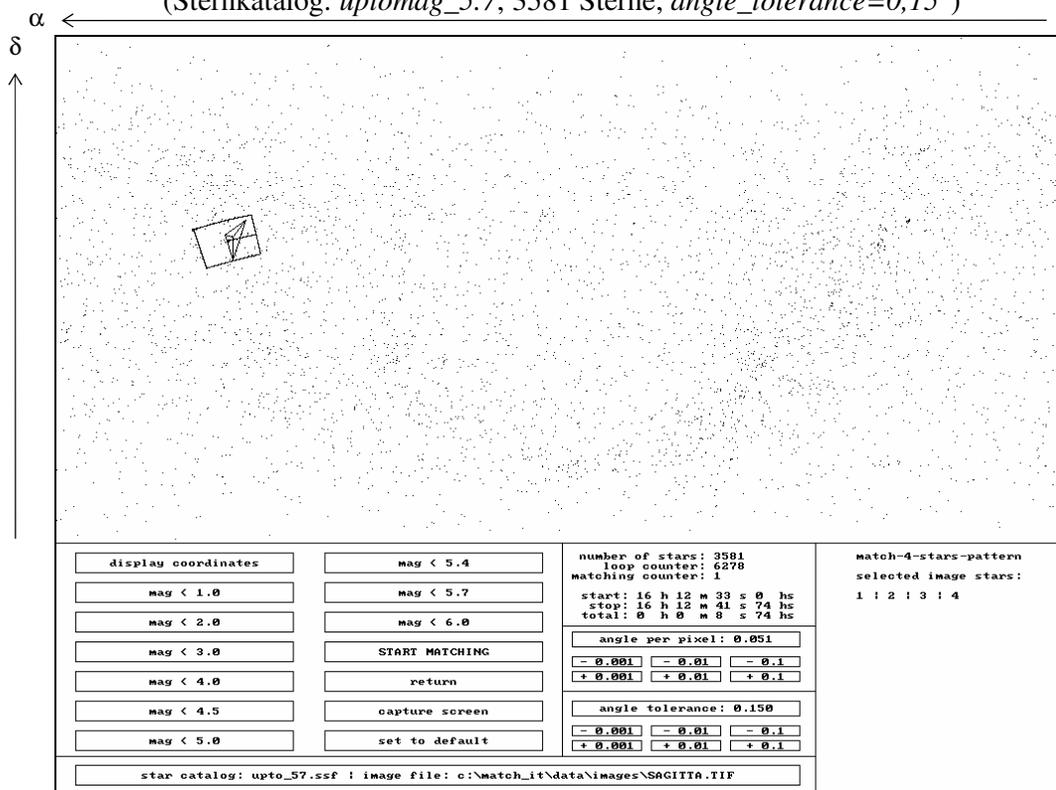


Bild 7.45: Eindeutig erkanntes 4-Sterne-Muster innerhalb der Bildvorlage Sagitta bei einer erzwungenen Anwendung des Moduls *match-4-stars-pattern* (Sternkatalog: *uptomag_5.7*, 3581 Sterne, *angle_tolerance=0,15°*)

	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag</i> <3,0 (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 <0s 1hs	0 <0s 1hs	0 <0s 1hs	0 <0s 1hs
<i>mag</i> <4,0 (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs
<i>mag</i> <4,5 (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	2 0s 11hs	0 0s 17hs	0 0s 22hs	0 0s 17hs
<i>mag</i> <5,0 (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	3 0s 44hs	1 0s 77hs	0 0s 77hs	0 0s 71hs
<i>mag</i> <5,4 (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	25 1s 92hs	1 3s 35hs	0 3s 35hs	0 2s 91hs
<i>mag</i> <5,7 (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	57 4s 62hs	1 7s 91hs	1 8s 2hs	• 1 6s 92hs
<i>mag</i> <6,0 (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	113 8s 18hs	1 14s 28hs	1 14s 83hs	1 12s 36hs

Tabelle 7.29: Erkennung von *n*-Sterne-Mustern bei *Sagitta* (*angle_tolerance*=0,15°)

	<i>n=3</i>	<i>n=4</i>	<i>n=5</i>	<i>n=6</i>
<i>mag</i> <3,0 (136 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	0 <0s 1hs	0 <0s 1hs	0 <0s 1hs	0 <0s 1hs
<i>mag</i> <4,0 (427 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs	0 0s 5hs
<i>mag</i> <4,5 (764 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	6 0s 11hs	0 0s 22hs	0 0s 27hs	0 0s 22hs
<i>mag</i> <5,0 (1370 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	29 0s 61hs	2 1s 9hs	0 1s 21hs	0 0s 99hs
<i>mag</i> <5,4 (2526 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	232 2s 96hs	12 6s 10hs	1 6s 81hs	0 4s 95hs
<i>mag</i> <5,7 (3581 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	557 7s 36hs	44 16s 64hs	2 18s 94hs	• 1 13s 2hs
<i>mag</i> <6,0 (4480 Sterne) <i>matching_counter</i> <i>matching_time</i>	1043 13s 62hs	87 33s 23hs	5 39s 22hs	1 26s 15hs

Tabelle 7.30: Erkennung von *n*-Sterne-Mustern bei *Sagitta* (*angle_tolerance*=0,3°)

8 Simulation

Um statistisch aussagekräftige Untersuchungen zur Zuverlässigkeit und insbesondere zur Erfolgsquote η des *allgemeinen Verfahrens zur Sternmustererkennung nebst Bestimmung der 3-axialen Lageparameter* gemäß Kapitel 6.9 bewerkstelligen zu können, müssen im Rahmen eines stets wiederkehrenden *lost-in-space* Szenarios die Anzahl der zu untersuchenden Bildvorlagen gegenüber der Anzahl der wenigen, aber realen Bildvorlagen aus Kapitel 7 deutlich gesteigert werden. Es wird im folgenden davon ausgegangen, daß eine Anzahl von 2000 verschiedenen Bildvorlagen zur Beurteilung eines ansonsten konstant bleibenden äußeren Parameter-Szenarios (Sternkatalog, Winkeltoleranz, ...) genügen soll. Dazu werden Simulationen mit einer Schleifenstruktur gemäß Bild 8.2 durchgeführt, wobei eine Zählvariable namens *sim_loop_counter* von 1 bis 2000 durchlaufen wird (Bild 8.2). Die Bildvorlagen werden unter Zuhilfenahme eines Zufallsgenerators erzeugt, der dafür Sorge trägt, daß durch einen geeigneten statistischen Prozeß eine annähernde Gleichverteilung der Ausrichtung der optischen Achse der Bildvorlagen an der Fläche der Himmelskugel bewirkt wird.

Es wurde eigens ein *Kamera-Simulator* implementiert und als Softwaremodul innerhalb der Matching-Programme (*MATCH-1* bis *MATCH-7*, siehe Kapitel 3.1) integriert. Der Kamerasimulator erlaubt zum einen mittels einer Initialisierungsdatei (siehe Kapitel 4) die Einstellung der Kameraparameter mit den Pixelabmessungen des zu nutzenden CCD-Sensors und des *Pixel-zu-Winkel* Umrechnungsfaktors *angle_per_pixel*. Im folgenden wird jedoch ausschließlich die näher in Anhang B beschriebene Kamera simuliert, mit den fest eingestellten Werten von $np=384$ Pixeln in x-Richtung und $np=288$ Pixeln in y-Richtung. Der Wert des *Pixel-zu-Winkel* Umrechnungsfaktors beträgt $angle_per_pixel=0,051^\circ/pixel$. Zum anderen können die Werte der 2-axialen Ausrichtung der optischen Achse bzw. Bildmitte und die *In-Sich-Drehung* des Bildes über die graphische Benutzeroberfläche (*Desktop*) eingestellt werden (Bild 8.1). Im Rahmen der Simulation erzeugt jedoch ein Zufallsgenerator die Werte $\alpha_{sim, random}$ für die Rektaszension, $\delta_{sim, random}$ für die Deklination und $\omega_{sim, random}$ für den dritten Winkel der 3-axialen Lage der Bildvorlage und baut daraufhin das digitale Bild auf. Zu beachten ist hierbei, daß bei der Ermittlung des Wertes der Deklination $\delta_{sim, random}$ eine *invertierte Kosinusfunktion* - angewandt auf ein ebenfalls per Zufallsgenerator ermitteltes Argument *random_argument* - multiplikativ berücksichtigt wird, um dem Umstand des Zusammenlaufens der Längengrade im sphärischen Koordinatensystem von der Äquatorebene zu den Polstellen Rechnung zu tragen (Gleichung 8.1). Durch die nur zwei Zustände annehmende Variable *random_delta_sign* wird die relevante Hemisphäre der Himmelskugel ebenfalls mittels eines Zufallsprozesses festgelegt:

- $\alpha_{sim, random} \rightarrow$ Zufallsprozeß mit Gleichverteilung im Wertebereich $0h..24h$ bzw. $0..2\pi$
- $\delta_{sim, random} \rightarrow$ Zufallsprozeß im Wertebereich $-90^\circ..+90^\circ$ bzw. $-\pi/2..+\pi/2$:

$$\delta_{sim, random} = random_delta_sign * 90^\circ * (1 - \cos(random_argument))$$

(Gleichung 8.1)

mit:

random_delta_sign: Zufallsprozeß mit Gleichverteilung im Bereich der Wertemenge $[-1, 1]$

random_argument: Zufallsprozeß mit Gleichverteilung im Wertebereich $0^\circ..90^\circ$ bzw. $0.. \pi/2$

- $\omega_{sim, random} \rightarrow$ Zufallsprozeß mit Gleichverteilung im Wertebereich $0^\circ..360^\circ$ bzw. $0..2\pi$

Alle Zufallsprozesse mit einer Gleichverteilung der zu erzeugenden Werte werden durch eine vordefinierte Funktion der *PASCAL*-Programmierungsumgebung zur Verfügung gestellt (Kapitel 3). Die für den Bildaufbau benötigten Daten zu Sternpositionen und Sternhelligkeiten werden dem Kamerasimulator über die auch für das Matching benötigten Sternkataloge zugeführt. Da sich im folgenden der Kamerasimulator und das Matchingverfahren jeweils ein und denselben Sternkatalog teilen, liegt der Umstand einer *perfekten Kalibrierung* vor (Anhang B).

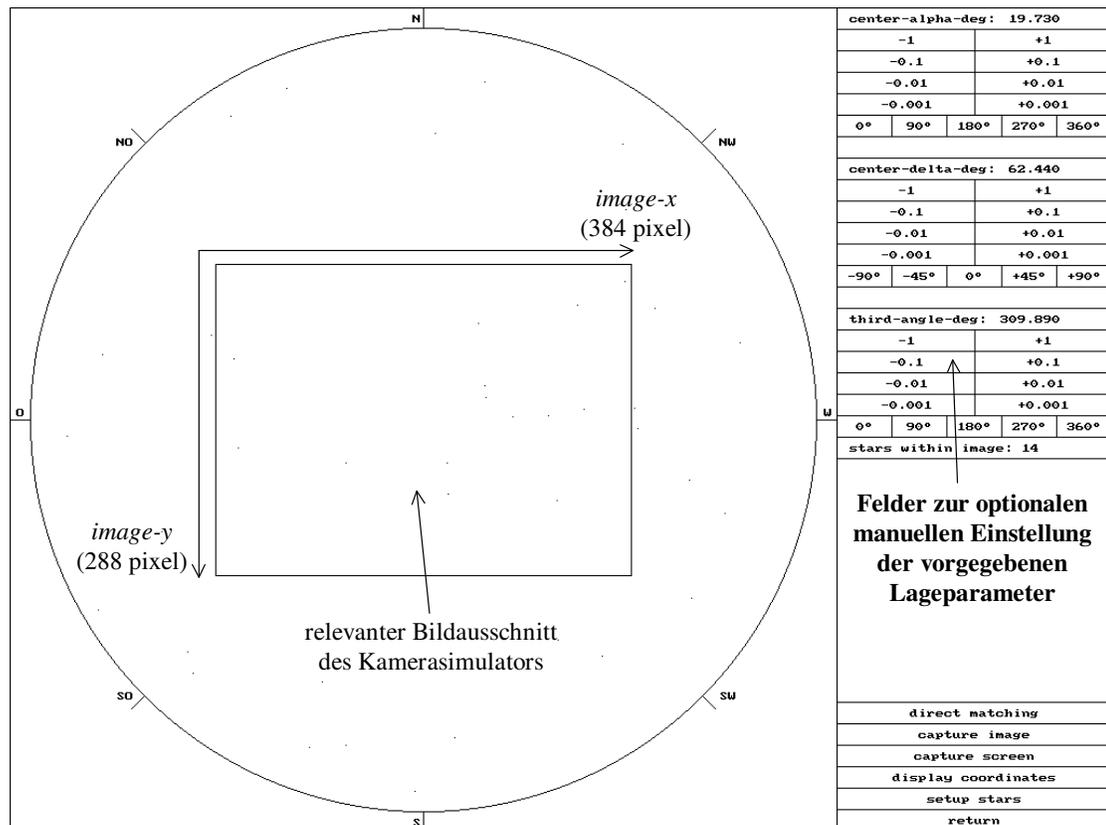


Bild 8.1: Desktop des Kamerasimulators

Die jeweils benutzten Sternkataloge werden programmintern zu Beginn eines Simulationsverfahrens einer Modifikation unterzogen, wobei mögliche Mehrfachsternsysteme, deren Winkelabstand unterhalb des Auflösungsvermögen des Bildaufnehmersystems liegen, zu einem Objekt verschmolzen werden. Hierbei ist die Änderung der Magnitude des resultierenden Objektes gegenüber den Magnituden der Einzelkomponenten gemäß Gleichung A.5 zu berücksichtigen. Hinsichtlich der Himmelskoordinaten des resultierenden Objektes wird aus Gründen der Vereinfachung eine arithmetische Mittelwertbildung durchgeführt. Auch sind Sterne niedrigerer Helligkeiten zu berücksichtigen als diejenigen, die ursprünglich durch die Magnitudengrenzen der ursprünglichen Original-Sternkataloge aus Tabelle A.2 vorgegeben werden. Die *Verschmelzung* macht Sinn, da Untersuchungen des Sternkatalogs gezeigt haben, daß Mehrfachsternsysteme mit ihren Komponenten im Sternkatalog einzeln gelistet sind, die - bezogen auf ein niedrig auflösendes Bildaufnehmersystem, wie dies die benutzte CCD-Sternenkamera darstellt - zu einem entsprechenden, aber redundanten und somit überflüssigen Mehrfachmatching führen würden. Im Falle der in den Kapiteln 6 und 7 benutzten realen Himmelsaufnahmen brauchte der Umstand der Mehrfachsternverschmelzung nicht berücksichtigt werden, da eine diesbezügliche Überprüfung gezeigt hat, daß alle abgebildeten

Sterne als Einzelsterne im SAO-Sternkatalog gelistet sind und keine Mehrfachsternsysteme darstellen.

Dem Algorithmus zum künstlichen Bildaufbau unterliegt ein Verfahren der *azimutalen Abbildung* (Polarprojektion) [Wertz 1978, Brockhaus 1989] mit einer gedachten Tangentialebene durch den Himmelsnordpol. Dies bedeutet, daß die sphärischen Himmelskoordinaten ($\alpha_{sim, random}$, $\delta_{sim, random}$) der optischen Achse bzw. der vorgegebenen 2-axialen Lage in die der Himmelskoordinaten des Himmelsnordpols überführt werden ($\alpha_{sim, random} \rightarrow 0h$ bzw. 0 (rad) und $\delta_{sim, random} \rightarrow 90^\circ$ bzw. $\pi/2$ (rad)), bei entsprechender Transformation der Himmelskoordinaten aller anderen Katalogsterne. Die Koordinatentransformation erfolgt unter der Zuhilfenahme der Gleichungen 6.3 und 6.4. Das zu erzeugende Bild wird sodann über den Himmelsnordpol (dieser Punkt an der Himmelskugel entspricht exakt der Mitte des zu generierenden Bildes) und mit Hilfe des Azimutwinkels und der Poldistanz eines jeden Katalogsterns radial abgerollt und graphisch dargestellt (Bild 8.1). Die *In-Sich-Drehung* des Bildes wird mittels einer zweidimensionalen Matrixdrehung der gesamten Bildinformation um den Winkel $\omega_{sim, random}$ verarbeitet [Bronstein 1982].

Durch Abspeicherung des relevanten Bildausschnitts (siehe Illustration in Bild 8.1) liefert der Kamerasimulator zunächst ein künstlich generiertes Bild, das dem *TIFF-Format* [Aldus 1992] unterliegt. Diese auch separat speicherbare Bildvorlage ist neben dem Sternkatalog eine der Eingangsgrößen des Lagebestimmungssystems und wird im Rahmen der Simulation sofort dem Modul der Bilddatenvorverarbeitung (*image-data-pre-processing*) mit automatisch nachfolgender Ausführung der zusammengefaßten Module zur Sternmustererkennung (*match-n-stars-pattern*) und zur Bestimmung der 3-axialen Lageparameter (*calculate-3-axis-attitude*) übergeben (Bild 8.2).

Die je Einzelschritt des Simulationsdurchlaufs innerhalb einer Protokolldatei gespeicherten Werte sind:

- Die mittels Zufallsprozeß vorgegebenen Lageparameter zur Erzeugung der Bildvorlage:
 $\alpha_{sim, random}$, $\delta_{sim, random}$ und $\omega_{sim, random}$
- Anzahl der Bildsterne im künstlich generierten Bild: *number_is*
- Anzahl der gemäß Kapitel 6.9 erkannten Sternmuster: *matching_counter*
- Berechnungszeit der Sternmustererkennung nebst Lageberechnung *matching_time*
- Die berechneten Lageparameter im Falle einer eindeutigen Sternmustererkennung:
 α_{att} , δ_{att} und ω_{att}

Ferner werden folgende Größen während eines Simulationsverfahrens ermittelt:

- Anzahl der eindeutig bestimmten und mit den vorgegebenen Werten übereinstimmenden Sternmuster bzw. Lageparameter *clear_3_axis_attitude_counter* (dient insbesondere zur Ermittlung der Erfolgsquote η)
- Die durchschnittliche Laufzeit des Verfahrens zur Sternmustererkennung *mean_matching_time* (einschließlich der Zeit zur Berechnung der 3-axialen Lageparameter)
- Anzahl der eindeutig erkannten Sternmuster, die jedoch keine Berechnung der 3-axialen Lageparameter zulassen: *critical_matched_pattern_counter* (siehe Kapitel 6.7)
- Häufigkeiten verschiedener Ergebniswerte von *number_is* und *matching_counter* (Tabellen 8.1 bis 8.21)

Damit kein *critical_matched_pattern* vorliegt, muß im erkannten *n-Sterne-Muster* zumindest ein solches *image-triplet* vorhanden sein, daß folgende Bedingung zur Berechnung der 3-axialen Lageparameter erfüllt (siehe Kapitel 6.7):

$$\begin{aligned} & \textit{min_image_triplet_vector_length}=5 \textit{ Pixel and} \\ & \textit{min_image_triplet_angle_deg}=5^\circ \textit{ and} \\ & \textit{min_matched_triplet_vector_length}=4*\textit{angle_per_pixel} \textit{ and} \\ & \textit{min_matched_triplet_angle_deg}=2^\circ \end{aligned}$$

(Bedingung 8.1)

Die Variable *critical_matched_pattern_counter* wird inkrementiert, sobald die Bedingung 8.1 nicht erfüllt ist.

Die zur Ermittlung der Erfolgsquote η wichtige Variable *clear_3_axis_attitude_counter* zählt während eines laufenden Simulationsverfahrens die eindeutig erkannten Sternmuster, bei denen die Bestimmung der 3-axialen Lageparameter durchgeführt wurde, und wird inkrementiert, wenn die Bedingung 8.2 erfüllt ist:

$$\begin{aligned} & \textit{number_is}>2 \textit{ and} \\ & \textit{matching_counter}=1 \textit{ and} \\ & \textit{image_triplet_ok} \end{aligned}$$

(Bedingung 8.2)

Die nachfolgenden Kapitel 8.1 bis 8.7 zeigen die tabellarisch zusammengestellten Ergebnisse der Simulationen 1 bis 21 unter der Zuhilfenahme von insgesamt sieben verschiedenen Sternkatalogen und bei Anwendung des *allgemeinen Verfahrens zur Sternmustererkennung nebst Bestimmung der 3-axialen Lageparameter* gemäß Kapitel 6.9. Die Sternkataloge umfassen grundsätzlich jeweils die gesamte Himmelskugel (*lost-in-space* Szenario) bis zu einer vorgegebenen Grenzhelligkeit, angefangen bei $\textit{mag}<3.0$ (Kapitel 8.1) und abgestuft bis zur Helligkeit von $\textit{mag}<6.0$ (Kapitel 8.7). Innerhalb der Kapitel wird die zugelassene Winkeltoleranz in drei Stufen variiert ($\textit{angle_tolerance}=0,1^\circ, 0,2^\circ$ und $0,3^\circ$), um den Einfluß dieses Parameters zu demonstrieren. Wie nicht anders zu erwarten, liefert die niedrigste Winkeltoleranz die besten Ergebnisse hinsichtlich der Erfolgsquote η und der Laufzeit *mean_matching_time*. Dies ist auch bei der Betrachtung der zusammenfassenden Ergebnisdarstellung in Kapitel 8.8 deutlich zu sehen. Die angegebene durchschnittliche Berechnungszeit *mean_matching_time* basiert auf der Nutzung des Programms *MATCH-4*, das sich eines in vier Sub-Sternkataloge ($\textit{number_ssc}=4$) zerlegten Sternkatalogs bedient. Die Übersicht zum Laufzeitverhalten aller Matchingprogramme (Kapitel 8.9) zeigt deutlich, daß sich generell bei Nutzung eines in vier Sub-Sternkatalog zerlegten Sternkatalogs die minimalsten Berechnungszeiten (*mean_matching_time*) ergeben.

Sollte eine mehrdeutige Sternmustererkennung nebst Bestimmung der 3-axialen Lageparameter mit $\textit{matching_counter}>1$ vorliegen, so ist das richtige Ergebnis in der Lösungsschar vorhanden. Zur praktischen Handhabung dieser Situation sei auf Methoden der *Plausibilitätsbetrachtung* hingewiesen (siehe auch Kapitel 4 und 9).

Der Maximalwert der Erfolgsquote wird im Rahmen der Simulation 13 mit $\eta=99,7\%$ bei Nutzung eines Sternkatalogs bis zur Helligkeit von $mag<5,4$ und einer Winkeltoleranz von $angle_tolerance=0,1^\circ$ erzielt (Tabelle 8.13 und 8.26). Hierbei beträgt die durchschnittliche Berechnungszeit $mean_matching_time=288hs$, was einer Rate von $adr=0,35Hz$ entspricht. Somit wird bei Nutzung der *Pentium-CPU* mit $cl=133MHz$ die angestrebte Lagebestimmungsrate von $adr>1Hz$ bei sequentieller Abarbeitung der Sub-Sternkataloge nicht erfüllt, falls das zuletzt genannte Parameterszenario angewandt wird. Die Zielsetzung von $adr>1Hz$ lässt sich jedoch bei Nutzung der im August 1998 erhältlichen *state-of-the-art* CPU-Technologie, wie *Pentium-II* Prozessoren mit einer Taktrate von $cl=450MHz$ bequem erreichen.

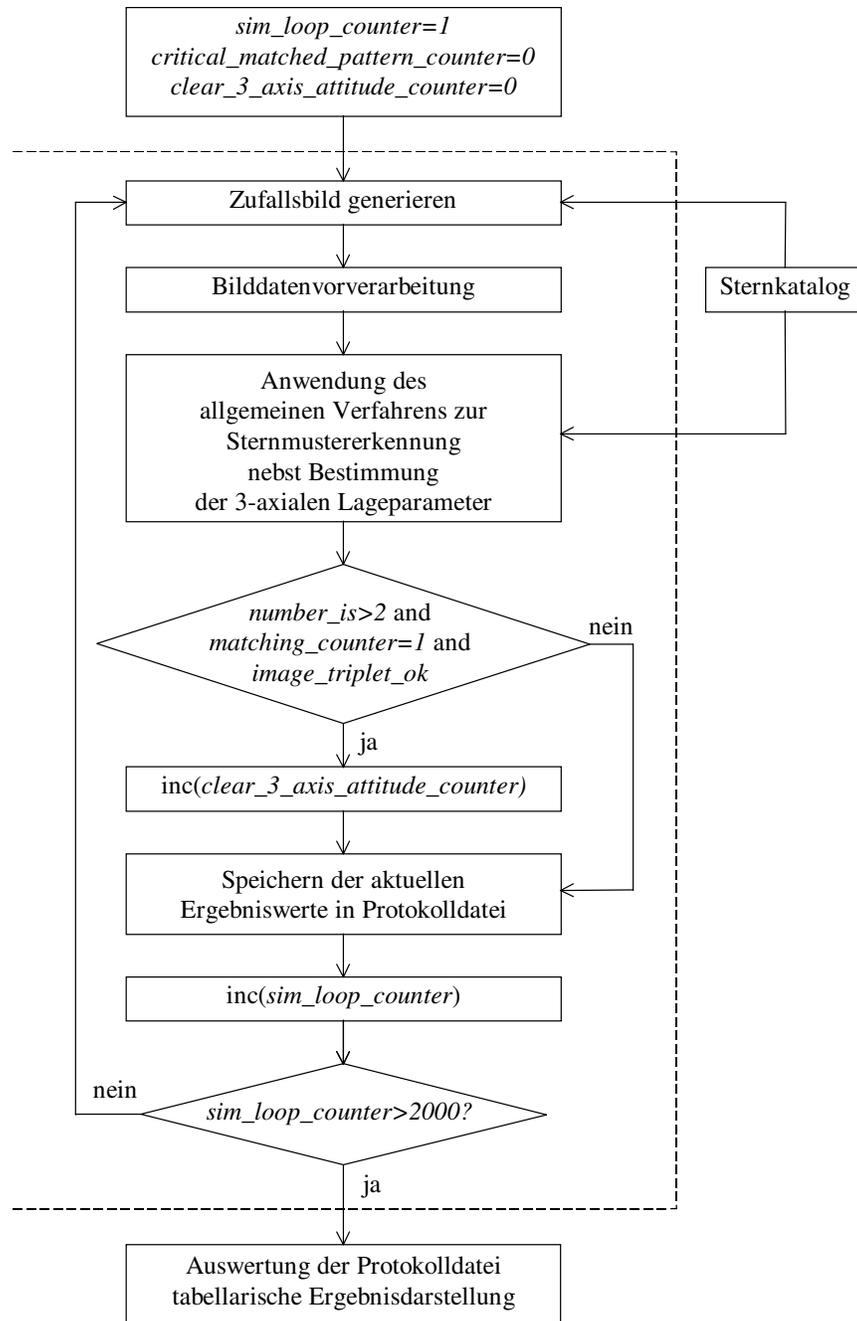


Bild 8.2: Vereinfachtes Ablaufschema des Simulationsverfahrens

8.1 Simulationsergebnisse mit Sternen bis zu einer Helligkeit von $mag < 3,0$:

	absolut	relativ		absolut	relativ
$number_is=0$	920	46,0%	$matching_counter=0$	1639	81,95%
$number_is=1$	719	35,95%	$matching_counter=1$	173	8,65%
$number_is=2$	212	10,6%	$matching_counter=2$	38	1,9%
$number_is=3$	64	3,2%	$matching_counter=3$	26	1,3%
$number_is=4$	42	2,1%	$matching_counter=4$	40	2,0%
$number_is=5$	18	0,9%	$matching_counter=5$	25	1,25%
$number_is=6$	15	0,75%	$matching_counter=6$	30	1,5%
$number_is=7$	7	0,35%	$matching_counter=7$	12	0,6%
$number_is=8$	3	0,15%	$matching_counter=8$	9	0,45%
$number_is=9$	0	0%	$matching_counter=9$	3	0,15%
$number_is \geq 10$	0	0%	$matching_counter \geq 10$	5	0,25%

Tabelle 8.1: Simulation 1 - $angle_tolerance=0,1^\circ$, $mag < 3,0$
Häufigkeiten von $number_is$ und $matching_counter$

	absolut	relativ		absolut	relativ
$number_is=0$	970	48,5%	$matching_counter=0$	1653	82,65%
$number_is=1$	683	34,15%	$matching_counter=1$	158	7,9%
$number_is=2$	202	10,1%	$matching_counter=2$	7	0,35%
$number_is=3$	77	3,85%	$matching_counter=3$	7	0,35%
$number_is=4$	37	1,85%	$matching_counter=4$	9	0,45%
$number_is=5$	18	0,9%	$matching_counter=5$	7	0,35%
$number_is=6$	6	0,3%	$matching_counter=6$	24	1,2%
$number_is=7$	5	0,25%	$matching_counter=7$	16	0,8%
$number_is=8$	2	0,1%	$matching_counter=8$	23	1,15%
$number_is=9$	0	0%	$matching_counter=9$	26	1,3%
$number_is \geq 10$	0	0%	$matching_counter \geq 10$	70	3,5%

Tabelle 8.2: Simulation 2 - $angle_tolerance=0,2^\circ$, $mag < 3,0$
Häufigkeiten von $number_is$ und $matching_counter$

	absolut	relativ		absolut	relativ
$number_is=0$	989	49,45%	$matching_counter=0$	1639	81,95%
$number_is=1$	650	32,5%	$matching_counter=1$	132	6,6%
$number_is=2$	220	11,0%	$matching_counter=2$	27	1,35%
$number_is=3$	59	2,95%	$matching_counter=3$	2	0,1%
$number_is=4$	41	2,05%	$matching_counter=4$	20	1,0%
$number_is=5$	24	1,2%	$matching_counter=5$	5	0,25%
$number_is=6$	7	0,35%	$matching_counter=6$	7	0,35%
$number_is=7$	10	0,5%	$matching_counter=7$	3	0,15%
$number_is=8$	0	0%	$matching_counter=8$	8	0,4%
$number_is=9$	0	0%	$matching_counter=9$	22	1,1%
$number_is \geq 10$	0	0%	$matching_counter \geq 10$	135	6,75%

Tabelle 8.3: Simulation 3 - $angle_tolerance=0,3^\circ$, $mag < 3,0$
Häufigkeiten von $number_is$ und $matching_counter$

8.2 Simulationsergebnisse mit Sternen bis zu einer Helligkeit von $mag < 4,0$:

	absolut	relativ		absolut	relativ
<i>number_is=0</i>	204	10,2%	<i>matching_counter=0</i>	619	30,95%
<i>number_is=1</i>	415	20,75%	<i>matching_counter=1</i>	912	45,6%
<i>number_is=2</i>	445	22,25%	<i>matching_counter=2</i>	24	1,2%
<i>number_is=3</i>	368	18,4%	<i>matching_counter=3</i>	1	0,05%
<i>number_is=4</i>	234	11,7%	<i>matching_counter=4</i>	0	0%
<i>number_is=5</i>	123	6,15%	<i>matching_counter=5</i>	0	0%
<i>number_is=6</i>	81	4,05%	<i>matching_counter=6</i>	5	0,25%
<i>number_is=7</i>	43	2,15%	<i>matching_counter=7</i>	4	0,2%
<i>number_is=8</i>	37	1,85%	<i>matching_counter=8</i>	2	0,1%
<i>number_is=9</i>	26	1,3%	<i>matching_counter=9</i>	4	0,2%
<i>number_is>=10</i>	24	1,2%	<i>matching_counter>=10</i>	429	21,45%

Tabelle 8.4: Simulation 4 - *angle_tolerance=0,1°*, $mag < 4,0$
Häufigkeiten von *number_is* und *matching_counter*

	absolut	relativ		absolut	relativ
<i>number_is=0</i>	200	10,0%	<i>matching_counter=0</i>	622	31,1%
<i>number_is=1</i>	422	21,1%	<i>matching_counter=1</i>	756	37,8%
<i>number_is=2</i>	457	22,85%	<i>matching_counter=2</i>	112	5,6%
<i>number_is=3</i>	376	18,8%	<i>matching_counter=3</i>	29	1,45%
<i>number_is=4</i>	215	10,75%	<i>matching_counter=4</i>	16	0,8%
<i>number_is=5</i>	112	5,6%	<i>matching_counter=5</i>	4	0,2%
<i>number_is=6</i>	82	4,1%	<i>matching_counter=6</i>	4	0,2%
<i>number_is=7</i>	39	1,95%	<i>matching_counter=7</i>	1	0,05%
<i>number_is=8</i>	40	2,0%	<i>matching_counter=8</i>	2	0,1%
<i>number_is=9</i>	16	0,8%	<i>matching_counter=9</i>	1	0,05%
<i>number_is>=10</i>	41	2,05%	<i>matching_counter>=10</i>	453	22,65%

Tabelle 8.5: Simulation 5 - *angle_tolerance=0,2°*, $mag < 4,0$
Häufigkeiten von *number_is* und *matching_counter*

	absolut	relativ		absolut	relativ
<i>number_is=0</i>	217	10,85%	<i>matching_counter=0</i>	668	33,4%
<i>number_is=1</i>	451	22,55%	<i>matching_counter=1</i>	585	29,25%
<i>number_is=2</i>	479	23,95%	<i>matching_counter=2</i>	106	5,3%
<i>number_is=3</i>	372	18,6%	<i>matching_counter=3</i>	64	3,2%
<i>number_is=4</i>	209	10,45%	<i>matching_counter=4</i>	47	2,35%
<i>number_is=5</i>	87	4,35%	<i>matching_counter=5</i>	22	1,1%
<i>number_is=6</i>	61	3,05%	<i>matching_counter=6</i>	13	0,65%
<i>number_is=7</i>	43	2,15%	<i>matching_counter=7</i>	7	0,35%
<i>number_is=8</i>	25	1,25%	<i>matching_counter=8</i>	6	0,3%
<i>number_is=9</i>	17	0,85%	<i>matching_counter=9</i>	3	0,15%
<i>number_is>=10</i>	39	1,95%	<i>matching_counter>=10</i>	479	23,95%

Tabelle 8.6: Simulation 6 - *angle_tolerance=0,3°*, $mag < 4,0$
Häufigkeiten von *number_is* und *matching_counter*

8.3 Simulationsergebnisse mit Sternen bis zu einer Helligkeit von $mag < 4,5$:

	absolut	relativ		absolut	relativ
$number_is=0$	40	2,0%	$matching_counter=0$	160	8,0%
$number_is=1$	120	6,0%	$matching_counter=1$	1454	72,7%
$number_is=2$	258	12,9%	$matching_counter=2$	90	4,5%
$number_is=3$	362	18,1%	$matching_counter=3$	23	1,15%
$number_is=4$	317	15,85%	$matching_counter=4$	12	0,6%
$number_is=5$	276	13,8%	$matching_counter=5$	0	0%
$number_is=6$	185	9,25%	$matching_counter=6$	1	0,05%
$number_is=7$	125	6,25%	$matching_counter=7$	2	0,1%
$number_is=8$	83	4,15%	$matching_counter=8$	1	0,05%
$number_is=9$	60	3,0%	$matching_counter=9$	2	0,1%
$number_is \geq 10$	174	8,7%	$matching_counter \geq 10$	255	12,75%

Tabelle 8.7: Simulation 7 - $angle_tolerance=0,1^\circ$, $mag < 4,5$
Häufigkeiten von $number_is$ und $matching_counter$

	absolut	relativ		absolut	relativ
$number_is=0$	61	3,05%	$matching_counter=0$	184	9,2%
$number_is=1$	123	6,15%	$matching_counter=1$	1294	64,7%
$number_is=2$	235	11,75%	$matching_counter=2$	65	3,25%
$number_is=3$	300	15,0%	$matching_counter=3$	53	2,65%
$number_is=4$	331	16,55%	$matching_counter=4$	44	2,2%
$number_is=5$	263	13,15%	$matching_counter=5$	43	2,15%
$number_is=6$	223	11,15%	$matching_counter=6$	39	1,95%
$number_is=7$	135	6,75%	$matching_counter=7$	18	0,9%
$number_is=8$	91	4,55%	$matching_counter=8$	4	0,2%
$number_is=9$	69	3,45%	$matching_counter=9$	6	0,3%
$number_is \geq 10$	169	8,45%	$matching_counter \geq 10$	250	12,5%

Tabelle 8.8: Simulation 8 - $angle_tolerance=0,2^\circ$, $mag < 4,5$
Häufigkeiten von $number_is$ und $matching_counter$

	absolut	relativ		absolut	relativ
$number_is=0$	48	2,4	$matching_counter=0$	191	9,55%
$number_is=1$	143	7,15%	$matching_counter=1$	1172	58,6%
$number_is=2$	229	11,45%	$matching_counter=2$	53	2,65%
$number_is=3$	354	17,7%	$matching_counter=3$	9	0,45%
$number_is=4$	314	15,7%	$matching_counter=4$	14	0,7%
$number_is=5$	271	13,55%	$matching_counter=5$	24	1,2%
$number_is=6$	187	9,35%	$matching_counter=6$	31	1,55%
$number_is=7$	135	6,75%	$matching_counter=7$	27	1,35%
$number_is=8$	107	5,35%	$matching_counter=8$	27	1,35%
$number_is=9$	50	2,5%	$matching_counter=9$	32	1,6%
$number_is \geq 10$	162	8,1%	$matching_counter \geq 10$	420	21,0%

Tabelle 8.9: Simulation 9 - $angle_tolerance=0,3^\circ$, $mag < 4,5$
Häufigkeiten von $number_is$ und $matching_counter$

8.4 Simulationsergebnisse mit Sternen bis zu einer Helligkeit von $mag < 5,0$:

	absolut	relativ		absolut	relativ
$number_is=0$	0	0%	$matching_counter=0$	12	0,6%
$number_is=1$	12	0,6%	$matching_counter=1$	1882	94,1%
$number_is=2$	42	2,1%	$matching_counter=2$	24	1,2%
$number_is=3$	75	3,75%	$matching_counter=3$	20	1,0%
$number_is=4$	161	8,05%	$matching_counter=4$	7	0,35%
$number_is=5$	228	11,4%	$matching_counter=5$	4	0,2%
$number_is=6$	266	13,3%	$matching_counter=6$	1	0,05%
$number_is=7$	242	12,1%	$matching_counter=7$	1	0,05%
$number_is=8$	185	9,25%	$matching_counter=8$	5	0,25%
$number_is=9$	161	8,05%	$matching_counter=9$	1	0,05%
$number_is \geq 10$	628	31,4%	$matching_counter \geq 10$	43	2,15%

Tabelle 8.10: Simulation 10 - $angle_tolerance=0,1^\circ$, $mag < 5,0$
Häufigkeiten von $number_is$ und $matching_counter$

	absolut	relativ		absolut	relativ
$number_is=0$	0	0%	$matching_counter=0$	8	0,4%
$number_is=1$	8	0,4%	$matching_counter=1$	1794	89,7%
$number_is=2$	40	2,0%	$matching_counter=2$	63	3,15%
$number_is=3$	90	4,5%	$matching_counter=3$	3	0,15%
$number_is=4$	177	8,85%	$matching_counter=4$	1	0,05%
$number_is=5$	222	11,1%	$matching_counter=5$	1	0,05%
$number_is=6$	242	12,1%	$matching_counter=6$	1	0,05%
$number_is=7$	238	11,9%	$matching_counter=7$	2	0,1%
$number_is=8$	190	9,5%	$matching_counter=8$	4	0,2%
$number_is=9$	133	6,65%	$matching_counter=9$	6	0,3%
$number_is \geq 10$	660	33,0%	$matching_counter \geq 10$	117	5,85%

Tabelle 8.11: Simulation 11 - $angle_tolerance=0,2^\circ$, $mag < 5,0$
Häufigkeiten von $number_is$ und $matching_counter$

	absolut	relativ		absolut	relativ
$number_is=0$	1	0,05%	$matching_counter=0$	16	0,8%
$number_is=1$	15	0,75%	$matching_counter=1$	1677	83,85%
$number_is=2$	37	1,85%	$matching_counter=2$	126	6,3%
$number_is=3$	88	4,4%	$matching_counter=3$	29	1,45%
$number_is=4$	173	8,65%	$matching_counter=4$	14	0,7%
$number_is=5$	221	11,05%	$matching_counter=5$	5	0,25%
$number_is=6$	253	12,65%	$matching_counter=6$	4	0,2%
$number_is=7$	219	10,95%	$matching_counter=7$	0	0%
$number_is=8$	196	9,8%	$matching_counter=8$	4	0,2%
$number_is=9$	152	7,6%	$matching_counter=9$	0	0%
$number_is \geq 10$	645	32,25%	$matching_counter \geq 10$	125	6,25%

Tabelle 8.12: Simulation 12 - $angle_tolerance=0,3^\circ$, $mag < 5,0$
Häufigkeiten von $number_is$ und $matching_counter$

8.5 Simulationsergebnisse mit Sternen bis zu einer Helligkeit von $mag < 5,4$:

	absolut	relativ		absolut	relativ
$number_is=0$	0	0%	$matching_counter=0$	0	0%
$number_is=1$	0	0%	$matching_counter=1$	1994	99,7%
$number_is=2$	0	0%	$matching_counter=2$	5	0,25%
$number_is=3$	1	0,05%	$matching_counter=3$	0	0%
$number_is=4$	2	0,1%	$matching_counter=4$	0	0%
$number_is=5$	4	0,2%	$matching_counter=5$	0	0%
$number_is=6$	19	0,95%	$matching_counter=6$	0	0%
$number_is=7$	39	1,95%	$matching_counter=7$	0	0%
$number_is=8$	58	2,90%	$matching_counter=8$	0	0%
$number_is=9$	107	5,35%	$matching_counter=9$	1	0,05%
$number_is \geq 10$	1770	88,5%	$matching_counter \geq 10$	0	0%

Tabelle 8.13: Simulation 13 - $angle_tolerance=0,1^\circ$, $mag < 5,4$
Häufigkeiten von $number_is$ und $matching_counter$

	absolut	relativ		absolut	relativ
$number_is=0$	0	0%	$matching_counter=0$	0	0%
$number_is=1$	0	0%	$matching_counter=1$	1926	96,3%
$number_is=2$	0	0%	$matching_counter=2$	64	3,2%
$number_is=3$	1	0,05%	$matching_counter=3$	4	0,2%
$number_is=4$	4	0,2%	$matching_counter=4$	2	0,1%
$number_is=5$	7	0,35%	$matching_counter=5$	1	0,05%
$number_is=6$	17	0,85%	$matching_counter=6$	1	0,05%
$number_is=7$	35	1,75%	$matching_counter=7$	0	0%
$number_is=8$	73	3,65%	$matching_counter=8$	1	0,05%
$number_is=9$	103	5,15%	$matching_counter=9$	0	0%
$number_is \geq 10$	1760	88,0%	$matching_counter \geq 10$	1	0,05%

Tabelle 8.14: Simulation 14 - $angle_tolerance=0,2^\circ$, $mag < 5,4$
Häufigkeiten von $number_is$ und $matching_counter$

	absolut	relativ		absolut	relativ
$number_is=0$	0	0%	$matching_counter=0$	0	0%
$number_is=1$	0	0%	$matching_counter=1$	1773	88,65%
$number_is=2$	0	0%	$matching_counter=2$	204	10,2%
$number_is=3$	1	0,05%	$matching_counter=3$	5	0,25%
$number_is=4$	3	0,15%	$matching_counter=4$	4	0,2%
$number_is=5$	9	0,45%	$matching_counter=5$	2	0,1%
$number_is=6$	11	0,55%	$matching_counter=6$	0	0%
$number_is=7$	35	1,75%	$matching_counter=7$	0	0%
$number_is=8$	70	3,5%	$matching_counter=8$	1	0,05%
$number_is=9$	108	5,4%	$matching_counter=9$	1	0,05%
$number_is \geq 10$	1763	88,15%	$matching_counter \geq 10$	10	0,5%

Tabelle 8.15: Simulation 15 - $angle_tolerance=0,3^\circ$, $mag < 5,4$
Häufigkeiten von $number_is$ und $matching_counter$

8.6 Simulationsergebnisse mit Sternen bis zu einer Helligkeit von $mag < 5,7$:

	absolut	relativ		absolut	relativ
$number_is=0$	0	0%	$matching_counter=0$	0	0%
$number_is=1$	0	0%	$matching_counter=1$	1992	99,6%
$number_is=2$	0	0%	$matching_counter=2$	8	0,4%
$number_is=3$	0	0%	$matching_counter=3$	0	0%
$number_is=4$	0	0%	$matching_counter=4$	0	0%
$number_is=5$	1	0,05%	$matching_counter=5$	0	0%
$number_is=6$	0	0%	$matching_counter=6$	0	0%
$number_is=7$	2	0,1%	$matching_counter=7$	0	0%
$number_is=8$	6	0,3%	$matching_counter=8$	0	0%
$number_is=9$	19	0,95%	$matching_counter=9$	0	0%
$number_is \geq 10$	1972	98,6%	$matching_counter \geq 10$	0	0%

Tabelle 8.16: Simulation 16 - $angle_tolerance=0,1^\circ$, $mag < 5,7$
Häufigkeiten von $number_is$ und $matching_counter$

	absolut	relativ		absolut	relativ
$number_is=0$	0	0%	$matching_counter=0$	0	0%
$number_is=1$	0	0%	$matching_counter=1$	1882	94,1%
$number_is=2$	0	0%	$matching_counter=2$	107	5,35%
$number_is=3$	0	0%	$matching_counter=3$	7	0,35%
$number_is=4$	0	0%	$matching_counter=4$	2	0,1%
$number_is=5$	0	0%	$matching_counter=5$	0	0%
$number_is=6$	1	0,05%	$matching_counter=6$	0	0%
$number_is=7$	1	0,05%	$matching_counter=7$	0	0%
$number_is=8$	3	0,15%	$matching_counter=8$	0	0%
$number_is=9$	13	0,65%	$matching_counter=9$	0	0%
$number_is \geq 10$	1982	99,1%	$matching_counter \geq 10$	2	0,1%

Tabelle 8.17: Simulation 17 - $angle_tolerance=0,2^\circ$, $mag < 5,7$
Häufigkeiten von $number_is$ und $matching_counter$

	absolut	relativ		absolut	relativ
$number_is=0$	0	0%	$matching_counter=0$	0	0%
$number_is=1$	0	0%	$matching_counter=1$	1625	81,25%
$number_is=2$	0	0%	$matching_counter=2$	303	15,15%
$number_is=3$	0	0%	$matching_counter=3$	42	2,1%
$number_is=4$	0	0%	$matching_counter=4$	20	1,0%
$number_is=5$	0	0%	$matching_counter=5$	3	0,15%
$number_is=6$	1	0,05%	$matching_counter=6$	0	0%
$number_is=7$	2	0,1%	$matching_counter=7$	3	0,15%
$number_is=8$	3	0,15%	$matching_counter=8$	1	0,05%
$number_is=9$	13	0,65%	$matching_counter=9$	1	0,05%
$number_is \geq 10$	1981	99,05%	$matching_counter \geq 10$	2	0,1%

Tabelle 8.18: Simulation 18 - $angle_tolerance=0,3^\circ$, $mag < 5,7$
Häufigkeiten von $number_is$ und $matching_counter$

8.7 Simulationsergebnisse mit Sternen bis zu einer Helligkeit von $mag < 6,0$:

	absolut	relativ		absolut	relativ
<i>number_is=0</i>	0	0%	<i>matching_counter=0</i>	0	0%
<i>number_is=1</i>	0	0%	<i>matching_counter=1</i>	1989	99,45%
<i>number_is=2</i>	0	0%	<i>matching_counter=2</i>	10	0,5%
<i>number_is=3</i>	0	0%	<i>matching_counter=3</i>	1	0,05%
<i>number_is=4</i>	0	0%	<i>matching_counter=4</i>	0	0%
<i>number_is=5</i>	0	0%	<i>matching_counter=5</i>	0	0%
<i>number_is=6</i>	0	0%	<i>matching_counter=6</i>	0	0%
<i>number_is=7</i>	0	0%	<i>matching_counter=7</i>	0	0%
<i>number_is=8</i>	0	0%	<i>matching_counter=8</i>	0	0%
<i>number_is=9</i>	1	0,05%	<i>matching_counter=9</i>	0	0%
<i>number_is>=10</i>	1999	99,95%	<i>matching_counter>=10</i>	0	0%

Tabelle 8.19: Simulation 19 - *angle_tolerance=0,1°*, $mag < 6,0$
Häufigkeiten von *number_is* und *matching_counter*

	absolut	relativ		absolut	relativ
<i>number_is=0</i>	0	0%	<i>matching_counter=0</i>	0	0%
<i>number_is=1</i>	0	0%	<i>matching_counter=1</i>	1838	91,9%
<i>number_is=2</i>	0	0%	<i>matching_counter=2</i>	140	7,0%
<i>number_is=3</i>	0	0%	<i>matching_counter=3</i>	8	0,4%
<i>number_is=4</i>	0	0%	<i>matching_counter=4</i>	12	0,6%
<i>number_is=5</i>	0	0%	<i>matching_counter=5</i>	2	0,1%
<i>number_is=6</i>	0	0%	<i>matching_counter=6</i>	0	0%
<i>number_is=7</i>	0	0%	<i>matching_counter=7</i>	0	0%
<i>number_is=8</i>	0	0%	<i>matching_counter=8</i>	0	0%
<i>number_is=9</i>	0	0%	<i>matching_counter=9</i>	0	0%
<i>number_is>=10</i>	2000	100%	<i>matching_counter>=10</i>	0	0%

Tabelle 8.20: Simulation 20 - *angle_tolerance=0,2°*, $mag < 6,0$
Häufigkeiten von *number_is* und *matching_counter*

	absolut	relativ		absolut	relativ
<i>number_is=0</i>	0	0%	<i>matching_counter=0</i>	0	0%
<i>number_is=1</i>	0	0%	<i>matching_counter=1</i>	1391	69,55%
<i>number_is=2</i>	0	0%	<i>matching_counter=2</i>	433	21,65%
<i>number_is=3</i>	0	0%	<i>matching_counter=3</i>	88	4,4%
<i>number_is=4</i>	0	0%	<i>matching_counter=4</i>	55	2,75%
<i>number_is=5</i>	0	0%	<i>matching_counter=5</i>	9	0,45%
<i>number_is=6</i>	0	0%	<i>matching_counter=6</i>	9	0,45%
<i>number_is=7</i>	0	0%	<i>matching_counter=7</i>	3	0,15%
<i>number_is=8</i>	0	0%	<i>matching_counter=8</i>	3	0,15%
<i>number_is=9</i>	0	0%	<i>matching_counter=9</i>	2	0,1%
<i>number_is>=10</i>	2000	100,0%	<i>matching_counter>=10</i>	7	0,35%

Tabelle 8.21: Simulation 21 - *angle_tolerance=0,3°*, $mag < 6,0$
Häufigkeiten von *number_is* und *matching_counter*

8.8 Übersicht der Simulationsergebnisse ($mag < 3,0$ bis $mag < 6,0$)

	<i>angle_tolerance</i> =0,1°	<i>angle_tolerance</i> =0,2°	<i>angle_tolerance</i> =0,3°
<i>η_clear_3_axis_attitude_counter</i>	7,3 % (146)	7,15 % (143)	6,5 % (130)
<i>mean_matching_time</i>	< 0s 1hs	< 0s 1hs	< 0s 1hs

Tabelle 8.22: Ergebnisse für Sterne bis zur Helligkeit $mag < 3,0$ (Simulationen 1, 2 und 3)

	<i>angle_tolerance</i> =0,1°	<i>angle_tolerance</i> =0,2°	<i>angle_tolerance</i> =0,3°
<i>η_clear_3_axis_attitude_counter</i>	44,2 % (884)	37,6 % (752)	29,0 % (580)
<i>mean_matching_time</i>	0s 3hs	0s 3hs	0s 3hs

Tabelle 8.23: Ergebnisse für Sterne bis zur Helligkeit $mag < 4,0$ (Simulationen 4, 5 und 6)

	<i>angle_tolerance</i> =0,1°	<i>angle_tolerance</i> =0,2°	<i>angle_tolerance</i> =0,3°
<i>η_clear_3_axis_attitude_counter</i>	71,95 % (1439)	64,6 % (1292)	58,6 % (1172)
<i>mean_matching_time</i>	0s 17hs	0s 19hs	0s 25hs

Tabelle 8.24: Ergebnisse für Sterne bis zur Helligkeit $mag < 4,5$ (Simulationen 7, 8 und 9)

	<i>angle_tolerance</i> =0,1°	<i>angle_tolerance</i> =0,2°	<i>angle_tolerance</i> =0,3°
<i>η_clear_3_axis_attitude_counter</i>	93,95 % (1879)	89,3 % (1786)	83,8 % (1676)
<i>mean_matching_time</i>	0s 76hs	0s 97hs	1s 32hs

Tabelle 8.25: Ergebnisse für Sterne bis zur Helligkeit $mag < 5,0$ (Simulationen 10, 11 und 12)

	<i>angle_tolerance</i> =0,1°	<i>angle_tolerance</i> =0,2°	<i>angle_tolerance</i> =0,3°
<i>η_clear_3_axis_attitude_counter</i>	99,7 % (1994)	96,3 % (1926)	88,65 % (1773)
<i>mean_matching_time</i>	2s 88hs	4s 27hs	7s 3hs

Tabelle 8.26: Ergebnisse für Sterne bis zur Helligkeit $mag < 5,4$ (Simulationen 13, 14 und 15)

	<i>angle_tolerance</i> =0,1°	<i>angle_tolerance</i> =0,2°	<i>angle_tolerance</i> =0,3°
<i>η_clear_3_axis_attitude_counter</i>	99,6 % (1992)	94,05 % (1881)	81,25 % (1625)
<i>mean_matching_time</i>	6s 71hs	11s 67hs	20s 28hs

Tabelle 8.27: Ergebnisse für Sterne bis zur Helligkeit $mag < 5,7$ (Simulationen 16, 17 und 18)

	<i>angle_tolerance</i> =0,1°	<i>angle_tolerance</i> =0,2°	<i>angle_tolerance</i> =0,3°
<i>η_clear_3_axis_attitude_counter</i>	99,15 % (1983)	91,9 % (1838)	69,55 % (1391)
<i>mean_matching_time</i>	11s 61hs	23s 68hs	40s 13hs

Tabelle 8.28: Ergebnisse für Sterne bis zur Helligkeit $mag < 6,0$ (Simulationen 19, 20 und 21)

Ausgeführtes Programm: *MATCH-4* (vier Sub-Sternkataloge)

Klammerangaben innerhalb der Tabellen 8.22 bis 8.28:

absolute Anzahl von *clear_3_axis_attitude_counter* bei 2000 Bildvorlagen

Simulierte Kamera: $f=25,84mm$, 384×288 Pixel, $23 \times 23 \mu m$ je Pixel, $angle_per_pixel=0,051^\circ$

8.9 Simulationsergebnisse zum Laufzeitverhalten

	MATCH-1	MATCH-2	MATCH-3	MATCH-4	MATCH-5	MATCH-6	MATCH-7
$mag < 3,0$	< 0s 1hs						
$mag < 4,0$	0s 10hs	0s 4hs	0s 3hs	0s 3hs	0s 3hs	0s 4hs	0s 4hs
$mag < 4,5$	0s 49hs	0s 24hs	0s 17hs	0s 17hs	0s 19hs	0s 22hs	0s 23hs
$mag < 5,0$	1s 94hs	0s 95hs	0s 74hs	0s 76hs	0s 81hs	0s 91hs	0s 95hs
$mag < 5,4$	7s 60hs	3s 84hs	2s 97hs	2s 88hs	3s 26hs	3s 44hs	3s 87hs
$mag < 5,7$	17s 22hs	9s 1hs	6s 83hs	6s 71hs	7s 34hs	7s 98hs	8s 29hs
$mag < 6,0$	29s 42hs	16s 13hs	12s 51hs	11s 61hs	12s 44hs	13s 10hs	14s 5hs

Tabelle 8.29: Laufzeitergebnisse (*mean_matching_time*) bei *angle_tolerance*=0,1°

	MATCH-1	MATCH-2	MATCH-3	MATCH-4	MATCH-5	MATCH-6	MATCH-7
$mag < 3,0$	< 0s 1hs						
$mag < 4,0$	0s 11hs	0s 4hs	0s 3hs	0s 3hs	0s 3hs	0s 4hs	0s 4hs
$mag < 4,5$	0s 56hs	0s 31hs	0s 21hs	0s 19hs	0s 21hs	0s 26hs	0s 28hs
$mag < 5,0$	2s 45hs	1s 35hs	0s 99hs	0s 97hs	1s 6hs	1s 10hs	1s 20hs
$mag < 5,4$	11s 80hs	6s 46hs	4s 92hs	4s 27hs	4s 85hs	5s 28hs	5 46hs
$mag < 5,7$	29s 71hs	17s 84hs	13s 73hs	11s 67hs	12s 18hs	13s 9hs	13s 24hs
$mag < 6,0$	55s 52hs	35s 88hs	25s 14hs	23s 68hs	23s 78hs	24s 27hs	25s 66hs

Tabelle 8.30: Laufzeitergebnisse (*mean_matching_time*) bei *angle_tolerance*=0,2°

	MATCH-1	MATCH-2	MATCH-3	MATCH-4	MATCH-5	MATCH-6	MATCH-7
$mag < 3,0$	< 0s 1hs	< 0s 1hs	< 0s 1hs	< 0s 1hs	< 0s 1hs	< 0s 1hs	< 0s 1hs
$mag < 4,0$	0s 13hs	0s 5hs	0s 4hs	0s 3hs	0s 4hs	0s 4hs	0s 5hs
$mag < 4,5$	0s 68hs	0s 38hs	0s 26hs	0s 25hs	0s 26hs	0s 32hs	0s 31hs
$mag < 5,0$	3s 23hs	1s 83hs	1s 35hs	1s 32hs	1s 36hs	1s 48hs	1s 57hs
$mag < 5,4$	18s 39hs	11s 38hs	8s 7hs	7s 3hs	7s 16hs	8s 7hs	8s 7hs
$mag < 5,7$	51s 8hs	34s 69hs	23s 78hs	20s 28hs	21s 17hs	22s 8hs	23s 56hs
$mag < 6,0$	105s 99hs	73s 29hs	50s 60hs	40s 13hs	41s 82hs	42s 51hs	45s 40hs

Tabelle 8.31: Laufzeitergebnisse (*mean_matching_time*) bei *angle_tolerance*=0,3°

Name des Programms	Anzahl interner Sub-Sternkataloge (<i>number_SSC</i>)
MATCH-1	1 (keine Überprüfung von $diff_{cs_{ix} \leftrightarrow cs_{iy}} < max_{\delta}$)
MATCH-2	1
MATCH-3	2
MATCH-4	4
MATCH-5	8
MATCH-6	12
MATCH-7	16

Tabelle 8.32: MATCH-IT Programme und deren Anzahl intern genutzter Sub-Sternkataloge (analog zu Tabelle 6.8)

9 Verfahrenskritik und Strategien zur Fehlerminimierung

Eine *strenge* Anwendung des vorgestellten Verfahrens zur Sternmustererkennung bzw. zur Bestimmung der 3-axialen Lage gemäß Kapitel 6.9 bringt natürlich auch die Problematik der Lieferung von nicht eindeutigen oder auch inkorrekten Ergebnissen nach einem Systemdurchlauf gemäß Bild 6.52 mit sich. So sind unter anderem folgende praktische Problemfälle denkbar:

- Es wurde kein Sternmuster erkannt (*miss-match*, *matching_counter=0*)
- Die Sternmustererkennung ist nicht eindeutig (*multiple-match*, *matching_counter>1*)
- Das als *erkannt* erwertete Sternmuster ist falsch (*wrong-match*, *matching_counter=1*)

In diesem Kontext ist eine Reihe von den Problemfällen zugrundeliegenden *Fehlerszenarien* denkbar, wobei innerhalb dieses Kapitels nur eine Auswahl von möglichen Fehlerquellen aufgeführt ist und grundlegende Strategien zum Fehlermanagement diskutiert werden können. Dabei ist generell zu unterscheiden, ob dem System zur Sternmustererkennung nur systeminterne Informationen (z.B. die des *Historienspeichers*, siehe Kapitel 4) oder auch externe Informationen (z.B. die von anderen Lagebestimmungssensoren oder geeigneten *Estimatoren*) zur Verfügung stehen. Auch ist es denkbar, die Lageparameter bei Satellitenmissionen innerhalb eines zeitlich begrenzten Rahmens theoretisch vorherzusagen (*attitude prediction*, z.B. unter der Zuhilfenahme von *Kalman-Filtern*), sofern das Dynamikverhalten des Raumflugkörpers bekannt ist [Gelb 1992, Kalman 1960, Quine 1995-1, Wertz 1978]. Die nachfolgenden Ausführungen beschäftigen sich jedoch in erster Linie mit einfachen internen Lösungen eines sternmustererkennenden Lagebestimmungssystems, die im Falle einer Satellitenmission mit in die *on-board* Software integriert werden können. Sollte die Möglichkeit des *downlinks* der Roh-Bilddaten bestehen (Bild 1.3), so kann eine Auswertung durch die PC-basierten *MATCH-IT* Programme und eine eventuelle manuelle Korrektur der Bilddaten in der Bodenstation durchgeführt werden, um anschließend die zuvor berechnete Lageinformation zum Satelliten hochzufunkeln.

Liegt ein *miss-match* (*matching_counter=0*) vor, obwohl gemäß der Bilddatenvorverarbeitung (Modul *image-data-pre-processing*) die Qualität der Bilddaten für *in Ordnung* befunden wurde (*image_data_ok=true*, siehe Kapitel 5), so kann dies dadurch begründet sein, daß sich auf dem Flächensensor der CCD-Sternenkamera *künstliche Objekte* oder auch *Geistersterne* z.B. aufgrund von Lichtreflexen abgebildet haben oder daß sich ein dauerhafter *Hardwaredefekt* innerhalb des Halbleiterflächensensors ausgebildet hat. Dieser Defekt kann z.B. bedingt sein durch den Einschlag hochenergetischer und kosmischer Partikelstrahlung im Energiebereich von mehreren Hundert Megaelektronenvolt (MEV), die bei Satellitenmissionen außerhalb der vor Strahlung schützenden Atmosphäre und Magnetosphäre der Erde durchaus vorkommen kann [Piscane 1994]. Bei einem Totalausfall der CCD-Sternenkamera kann nur durch eine *Redundanz* der Hardware in Form eines weiteren Bildaufnehmersystems Abhilfe geschaffen werden.

Es ist daher sinnvoll, die Vorverarbeitung der Bilddaten dergestalt zu erweitern, daß bei der bereichsorientierten Segmentierung der Bildsterne auch Objekteigenschaften wie *Form* und *Größe* als Bildsternkriterium berücksichtigt werden [Fröhlich 1991, Ebi 1989, Wahl 1984]. So kann ein extrem linienartig geformtes oder großflächiges Objekt als Bildstern ausgeschlossen werden, sofern aufgrund einer kurzen Belichtungszeit der CCD-Sternenkamera und einer zu beachtenden Eigendrehung des Raumflugkörpers von den Bildsternen keine extremen *Strichspuren* gezogen werden, die dem Störobjekt ähnlich sind (Bild 9.1). Dauerhafte Hardwarefehler in der Pixelstruktur des Halbleitermaterials des Bildaufnehmers lassen sich mittels einer *zeitlichen Überwachung* der Positionen von *high-level-pixel* feststellen.

Die betroffenen Pixelpositionen können dann programmintern als *defekt* markiert werden und bleiben bei zukünftigen Bildsternsegmentierungen unberücksichtigt.

Ferner kann durch eine leichte *Defokussierung* der Optik bewirkt werden, daß die Bildsterne stets minimal, aber definiert *klecksig* abgebildet werden, um ein Abgrenzungskriterium gegenüber einzelnen stochastisch auftretenden Störpixeln (Pixelrauschen) zu erreichen (siehe auch Anhang B). Dies hat allerdings eine Herabsetzung der Empfindlichkeit des Bildaufnehmersystems zur Folge, da sich die Energie des Lichtes großflächiger verteilen muß. Andererseits bietet die durch die Defokussierung bedingte flächenartige Abbildung der quasi-punktförmigen Sterne eine Möglichkeit zur *Subpixel-Interpolation*. Dadurch kann das Auflösungsvermögen des Bildaufnehmersystems und damit auch die Genauigkeit der Lageparameter erhöht werden. In diesem Kontext wird über kommerzielle Sternenkameras (*star tracker*) berichtet, die eine sinnvolle Interpolation von 1/100 der regulären Pixelgröße zulassen [Stanton 1993].

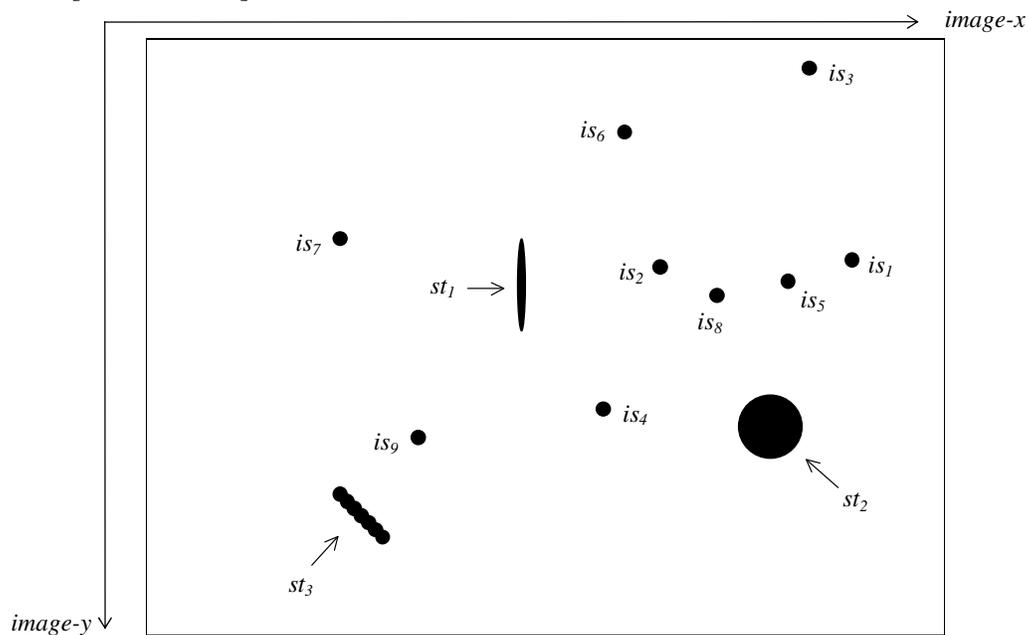


Bild 9.1: Himmelsaufnahme mit neun Bildsternen is_1 bis is_9 und drei markierten Störobjekten st_1 bis st_3

Liegt trotz erweiterter Bilddatenvorverarbeitung ein *miss-match* des zu erkennenden *n-Sterne-Musters* vor, so kann ein *Not-Modus* aktiviert werden, wobei auch hier eine Reihe von Varianten denkbar ist. Der nachfolgend vorgeschlagene *Not-Modus* wird von der Rechenzeit her gesehen länger ablaufen, als ein idealer Systemdurchlauf bei sofortiger und eindeutiger Sternmustererkennung und möglicherweise die angestrebte Lagebestimmungsrate von $adr > 1Hz$ nicht erfüllen. Dafür bietet der *Not-Modus* aber eine vorhandene Wahrscheinlichkeit von $p > 0$, so daß trotzdem noch eine eindeutige Sternmustererkennung bzw. Bestimmung der 3-axialen Lageparameter möglich ist.

Der Vorschlag für den *Not-Modus* besteht darin, daß versucht wird, alle möglichen $(n-1)$ -Sterne-Muster oder gegebenenfalls auch $(n-2)$ -Sterne-Muster als *Sub-Sternmuster* des *n-Sterne-Musters* zu erkennen. Sollte bei dem zu erkennenden *n-Sterne-Muster* nur ein Bildstern is_f falsch sein, so wird bei der Erkennung eines der möglichen $(n-1)$ -Sterne-Muster ein richtiger Match vorliegen (Bild 9.2). Sollten hingegen bei dem zu erkennenden *n-Sterne-Muster* zwei

Bildsterne falsch sein, so wird bei der Erkennung eines der möglichen $(n-2)$ -Sterne-Muster ein richtiger Match vorliegen, der aber aufgrund der geringeren Anzahl der musterbildenden $(n-2)$ Bildsterne die Gefahr einer Vielfalt von gefundenen Sternmustern innerhalb des Sternkatalogs mit sich führt ($matching_counter > 1$). Deshalb sollte stets die bereits in Kapitel 4 erwähnte *Plausibilitätsüberprüfung* zur Auffindung des *best-match* hinzugezogen werden, bei der z.B. das Trägheitsverhalten eines drallradstabilisierten Raumflugkörpers ausgenutzt und ein Vergleich mit begrenzt zeitlich zurückliegenden Ergebnissen durchgeführt wird. Außerdem ist zu beachten, daß die Sternmustererkennung mit minimal drei Bildsternen durchzuführen ist. Bild 9.3 zeigt ein vereinfachtes Ablaufschema des soeben vorgestellten *Not-Modus*.

Sollten sich innerhalb der Bildvorlage mehr als sechs Sterne befinden, so ist es auch denkbar, einen weiteren Bildstern is_x mit $x > 7$ zur Bildung des zu erkennenden *6-Sterne-Musters* hinzuzunehmen und einen entsprechenden Bildstern is_y mit $y < 7$ zu ignorieren, bis eine eindeutige und plausible Lösung im Sternkatalog gefunden worden ist. Bild 9.2 zeigt den Fall der Bildvorlage eines *6-Sterne-Musters* mit einem *falschen* Bildstern $is_3 = is_f$. Das *5-Sterne-Muster*, bestehend aus den Bildsternen is_1, is_2, is_4, is_5 und is_6 , würde jedoch ein Sternmuster aus realen Sternen darstellen und vom Matchingalgorithmus erkannt werden. Auch würde ein *6-Sterne-Muster*, bestehend aus sechs Bildsternen - jedoch ohne Beteiligung von Bildstern is_3 , aber unter Hinzuziehung der Bildsterne is_7 oder is_8 - ein erkennbares Sternmuster darstellen.

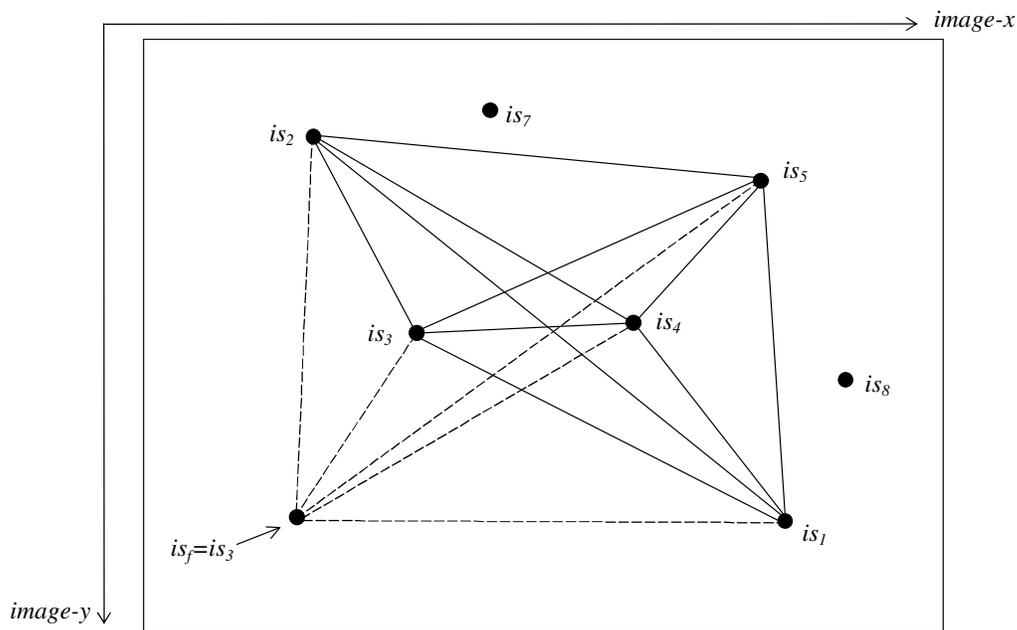


Bild 9.2: *6-Sterne-Muster* mit falschem Bildstern $is_f = is_3$ und weiteren Bildsternen is_7 und is_8

Auch kann ein *miss-match* dadurch begründet sein, daß zwar die Informationen über die Bildsterne und damit auch über das zu erkennende n -Sterne-Muster korrekt sind, jedoch der Sternkatalog unvollständig oder fehlerhaft ist. Diesbezüglich ist denkbar, daß zumindest einer der musterbildenden Bildsterne nicht im Sternkatalog enthalten ist oder daß die Angaben der Himmelskoordinaten der betroffenen Katalogsterne nicht ausreichend genau sind.

Also ist die Datenqualität des datenbankähnlich organisierten Sternkatalogs ein weiterer und sehr wichtiger Aspekt des Gesamtsystems zur Sternmustererkennung. So ist unter anderem der SAO-Sternkatalog in seiner ursprünglichen Form nicht frei von Fehlern gewesen, wobei mitunter auch helle Sterne mit $mag < 5,0$ fehlten. Diese Fehler sind jedoch nachträglich durch manuelle Korrekturen minimiert worden. Die neuesten Sternkataloge wie der PPM- oder der GSC-Sternkatalog (Anhang A.4) sind auf elektronischem Wege durch Abtastung von Photoplatten erstellt worden, was bei der Vielzahl von Millionen von Sterneneinträgen potentielle Fehlerquellen impliziert, z.B. aufgrund von Plattenverunreinigungen oder minimalen Plattenbeschädigungen [Bastian 1991, Klare 1991]. Für das System zur Sternmustererkennung wird im allgemeinen jedoch nur eine Auswahl der hellsten Katalogsterne vorgenommen. Im Rahmen dieser Arbeit ist ein Sternkatalog (*uptomag_6.0*) bis zu einer visuellen Helligkeit von $mag = 6,0$ mit 4480 Sterneinträgen der umfangreichste Sternkatalog (Anhang A.4.1). Der vom Lagebestimmungssystem benutzte Sternkatalog bleibt somit noch *überschaubar* und kann durch praktische Feldversuche und Korrelation mit realen Himmelsaufnahmen überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden.

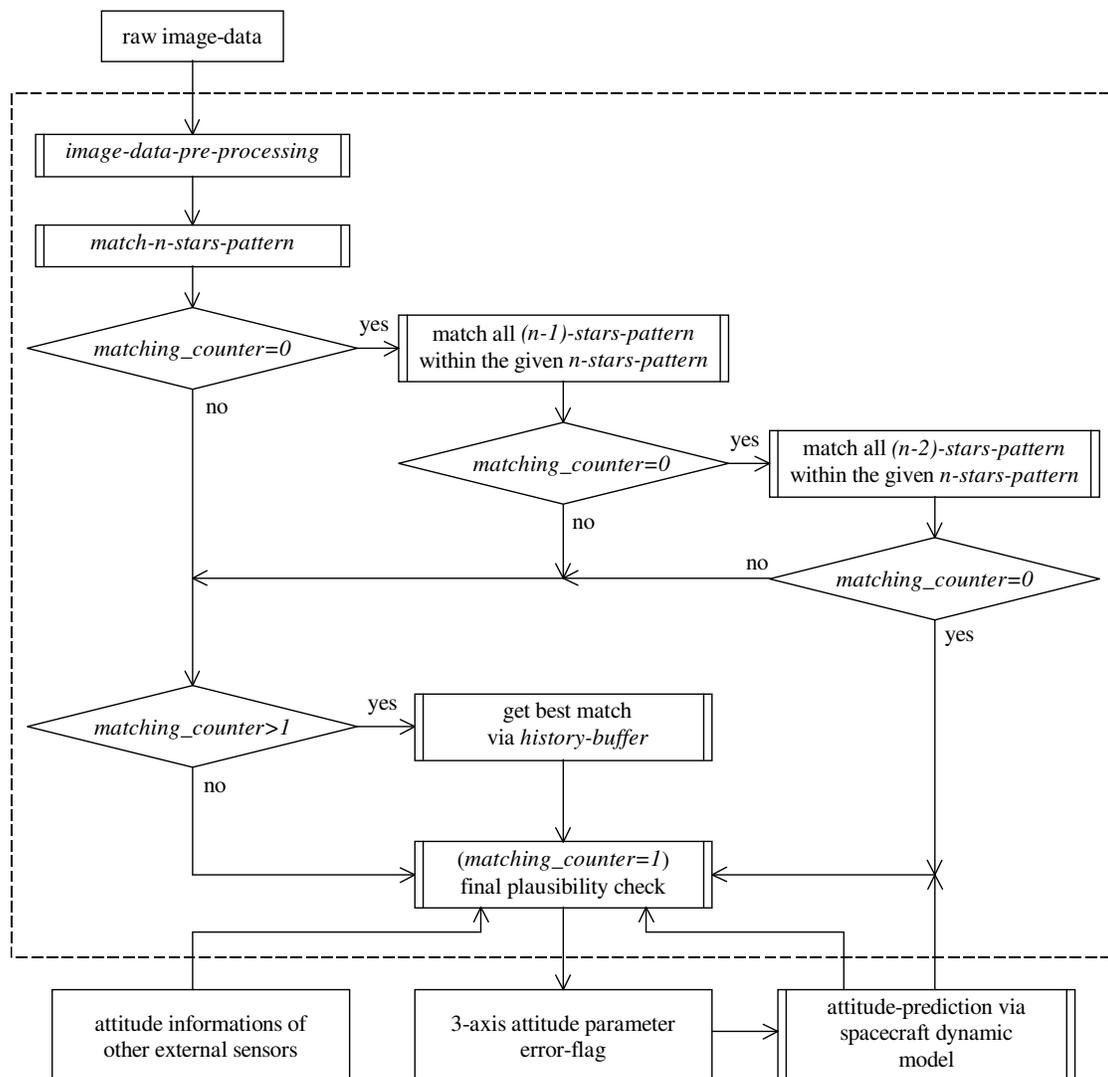


Bild 9.3: Vereinfachter Ablaufplan einer *Not-Modus* Variante unter Berücksichtigung von *Sub-Sterne-Mustern* zur Fehlerbehebung

Die nicht eindeutige Erkennung (*multiple-match*, *matching_counter*>1) eines *n-Sterne-Musters* ist primär dadurch begründet, daß das zu erkennende *n-Sterne-Muster* durch mehr als eine aus *n* Katalogsternen bestehende Konstellation rekonstruierbar ist, wobei die *richtige Lösung* jedoch in der Lösungsschar vorhanden ist. Ein anderer Fall eines *multiple-matchings* ist dann gegeben, wenn sich zumindest zwei Bildsterne is_x und is_y innerhalb der Bildvorlage befinden, die einen geringeren Winkelabstand $angle_distance_{is_x \leftrightarrow is_y}$ aufweisen als die für die Matchbereiche zugelassene Winkeltoleranz $angle_tolerance$. Dann ist eine Vertauschung der betroffenen Bildsterne is_x und is_y hinsichtlich der Zuordnung zu zwei korrespondierenden Katalogsternen möglich, was zu einem unerwünschten *Doppel-Match* führt. Diese Situation liegt z.B. bei der Bildvorlage *Lyra* zwischen den Bildsternen is_1 und is_6 vor (Kapitel 7.6). Durch einen vorgegebenen Minimalwert für den Winkelabstand von zwei im zu erkennenden *n-Sterne-Muster* befindlichen Bildsternen kann aber Abhilfe geschaffen werden. Generell wird für den Fall eines *multiple-match* empfohlen, die Informationen des systeminternen Historienspeichers zur Auffindung des *best-match* zu nutzen. Wie bereits erwähnt, werden hierfür die aktuellen Ergebnisse des *multiple-match* mit den Ergebnissen von zeitlich begrenzt zurückliegenden und bevorzugt eindeutigen Ergebnissen des Historienspeichers vergleichen, um den aktuellen Match mit der minimalsten Abweichung zu früheren Lagewerten zu ermitteln (*Plausibilitätsüberprüfung*, siehe auch Kapitel 4). Sollten systemexterne Lageinformationen durch anderen Sensoren vorliegen, so bietet es sich an ein Zusammenspiel zwischen den Sensoren zu implementieren.

Eine weitere und drastische Reduzierung der Anzahl erkannter Sternmuster (*matching_counter*) ist durch eine Minimierung des Wertes der für eine zu erkennende Doppelsternverbindung $is_x \leftrightarrow is_y$ notwendigen Winkeltoleranz $angle_tolerance$ möglich, was insbesondere im Rahmen der Simulationen in Kapitel 8 deutlich unterstrichen wird. Durch die Winkeltoleranz wurden im Rahmen dieser Arbeit insbesondere die optischen Abbildungsfehler des Bildaufnehmersystems kompensiert, da in dieser Hinsicht keine anderweitige mathematische Behandlung erfolgte. Der Wert der Winkeltoleranz $angle_tolerance$ war somit relativ hoch. Optische Abbildungseigenschaften lassen sich jedoch modellieren und Abbildungsfehler dergestalt herausrechnen, daß ein nahezu ideal proportionaler Zusammenhang zwischen dem Pixelabstand $pixel_distance_{is_x \leftrightarrow is_y}$ von zwei Bildsternen is_x und is_y auf dem Flächensensor des Bildaufnehmersystems und dem entsprechenden Winkelabstand $angle_distance_{is_x \leftrightarrow is_y}$ von zwei realen Sternen am Himmel gegeben ist (Anhang B). Dies zieht automatisch die Möglichkeit einer deutlichen Herabsetzung der noch zur Kompensation von Restfehlern benötigten Winkeltoleranz $angle_tolerance$ nach sich. Das Problem des *multiple-matching* kann folglich durch eine *geometrische Entzerrung* des Abbildungsverhaltens der CCD-Sternenkamera und der dadurch ermöglichten Herabsetzung des Wertes der Winkeltoleranz $angle_tolerance$ minimiert werden.

Die potentielle Möglichkeit eines eindeutigen, aber falsch erkannten *n-Sterne-Musters* (*wrong-match* bei *matching_counter*=1) kann ebenfalls durch eine *Plausibilitätsüberprüfung* abgefangen werden.

Hinsichtlich des Problems von unbrauchbaren Bilddaten z.B. aufgrund von Überbelichtungen oder der Abbildung eines großen Ausschnitts der Erde - insbesondere bei erdumlaufenden Satelliten in niedrigen Höhen - wird empfohlen ein *Doppel-Bildaufnehmersystem* zu benutzen [Kouzmin 1997]. Bei zwei CCD-Sternenkameras mit entgegengesetzter Ausrichtung liegt eine hohe Wahrscheinlichkeit vor, daß zumindest ein Kamerasystem brauchbare Bilddaten an das Bildverarbeitungssystem übergeben kann. Ein solches Doppel-Kamerasystem ist mit großem Erfolg bei der Satellitenmission *Clementine* während einer Mission zur Erforschung des Mondes eingesetzt worden [Clementine 1997].

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit implementierte *Verfahren der bildverarbeitenden Sternmustererkennung zur 3-axialen Lagebestimmung* beruht auf einem *lost-in-space* Szenario, also ohne die Einbeziehung von Vorwissen über die Lage (*autonomous star tracker*). Es liegen den Algorithmen zur Sternmustererkennung daher stets solche Sternkataloge zugrunde, die den Himmel bis zu einer bestimmten Grenzhelligkeit vollständig abdecken. Sollten jedoch Vorabinformationen (*a-priori* Wissen) über die zu bestimmende Lage zur Verfügung stehen, so läßt sich das Verfahren insbesondere hinsichtlich der Rechenzeit erheblich verbessern, da der Umfang des Sternkatalogs mitunter massiv eingeschränkt werden kann. So kann im Falle eines Zusammenspiels mit anderen Sensoren zur Lagebestimmung die Lage bei einem erdnahen Satelliten z.B. durch ein *Magnetometer* oder *GPS-basierten Lagebestimmungssensor* mit einer Genauigkeit von etwa $\Delta p = 5^\circ$ vorausbestimmt werden. Dies würde dann eine derart massive Einschränkung des Sternkatalogs erlauben, daß selbst eine Lagebestimmung mittels eines *3-Sterne-Musters* mit hoher Wahrscheinlichkeit ein eindeutiges Ergebnis liefern würde. Ferner kann bei Satelliten in erdnahen Umlaufbahnen ein Großteil des Sternkatalogs deaktiviert werden, da sich fast 50% aller Sterne unterhalb des Erdhorizonts befinden.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Ein System zur *3-axialen Lagebestimmung mittels der Erkennung von unbekanntem Sternmustern* ist im Bereich der angewandten Raumfahrttechnik von außerordentlichem Interesse. Als Lagereferenz sind die Sterne bei allen Anwendungen außerhalb einer Atmosphäre stets sichtbar. Daher ist die Erkennung von unbekanntem Sternmustern als Werkzeug zur *3-axialen Lagebestimmung* von Flugkörpern durch einen *stand-alone* Sensor im All universell nutzbar und nicht nur innerhalb begrenzter Raumgebiete anwendbar, wie dies bei anderen Sensoren zur Lagebestimmung der Fall ist. Die technischen Ausführungen dieser auch *star tracker* genannten Systeme können Genauigkeiten im Bereich von einer Bogensekunde erreichen und sind somit das präziseste Instrument zur Bestimmung der absoluten Lage. Andererseits sind geeignete Kamerasysteme zur bildlichen Erfassung von Sternmustern und weltraumtaugliche Rechensysteme im Gegensatz zu anderen Lagebestimmungssensoren relativ teuer und haben einen hohen Leistungsbedarf. Kommerziell erhältliche *star tracker* sind deshalb bei vielen Raumfahrtmissionen schon aus Gründen eines niedrigen Finanzbudgets oder aufgrund von sehr begrenzt zur Verfügung stehender Energien nur bedingt einsetzbar.

Zielsetzung dieser Dissertation war die Entwicklung *eines Verfahrens zur 3-axialen Lagebestimmung mittels bildverarbeitender Erkennung von unbekanntem Sternmustern*, das implementiert und unter den Aspekten von Speicherminimalität, Rechengeschwindigkeit und Wirkungsgrad (Erfolgsquote) optimiert wurde. Anhand von neun realen Himmelsaufnahmen erfolgte eine Verifikation des Verfahrens bei jeweils eindeutiger Lieferung von Ergebnissen. Durchgeführte Simulationen haben gezeigt, daß bei der Wahl bestimmter äußerer Parameter ein Wirkungsgrad von $\eta=99,7\%$ möglich ist. Dies bedeutet mit anderen Worten, daß ohne *a-priori* Wissen und im Rahmen eines *lost-in-space* Szenarios 1994 von 2000 Bildvorlagen eindeutig identifiziert bzw. deren 3-axiale Lageparameter ohne Mehrdeutigkeiten bestimmt werden konnten (Kapitel 8). Zur Behandlung von möglicherweise auftretenden Fehlerszenarien wurden Lösungskonzepte erarbeitet.

Das Verfahren versteht sich unter anderem als ein Baustein zur Realisation eines kostengünstigen *star tracker*, der somit auch für Universitäten und Applikationen in kleinen Satellitenstrukturen interessant ist. In Form einer Personal-Computer basierten Softwarerealisation steht das System zur 3-axialen Lagebestimmung für den Einsatz im Bodenstationsbetrieb oder zum Zweck einer *post-mission-analysis* zur sofortigen Verfügung.

Der Algorithmus zur Identifizierung von Sternmustern ist rotationsinvariant und basiert im Kern darauf, daß n ausgewählte Sterne der Bildvorlage untereinander zu einem *n-Sterne-Muster* verbunden werden, um dieses mittels ausschließlich geometrischer Informationen innerhalb eines *Sternkatalogs* wiederzufinden, der das *Sollwissen* aller prinzipiell möglichen Sternmuster durch die Angabe der Himmelskoordinaten von Sternen implizit beinhaltet. Nach der Bilddatenakquisition und der Durchführung einer schnellen Vorverarbeitung der Bilddaten werden die segmentierten Flächenschwerpunkte der hellsten n Bildsterne über Winkelabstände zu dem zu identifizierenden *n-Sterne-Muster* zusammengesetzt. Es müssen minimal drei Bildsterne vorliegen bei einer automatischen Berücksichtigung der maximal sechs hellsten Bildsterne ($3 \leq n \leq 6$). Nachfolgend versucht ein Korrelationsverfahren das vorgegebene Sternmuster mittels der ausschließlichen Angabe der einheitsvektoriellen und kartesischen Himmelskoordinaten von Sternen, die sich innerhalb des vorgegebenen Sternkatalogs befinden, zu rekonstruieren. Dazu wird durch Bildung von *Skalarprodukten* der Kosinus solcher Doppelsternverbindungen im Sternkatalog aufgesucht, der innerhalb einer zugelassenen Winkeltoleranz zum Kosinus der Winkelverbindung von zwei Sternen der Bildvorlage korrespondiert.

Im Falle eines erfolgreichen Matchings muß zum einen das sich aus n Sternen zusammengesetzte Sternmuster der Bildvorlage durch n verschiedene Katalogsterne und über alle möglichen Doppelsternverbindungen des n -Sterne-Musters vollständig rekonstruieren lassen. Zum anderen darf das synthetisch aufgebaute Katalogsternmuster kein Spiegelbild der Bildvorlage darstellen. Nach einer erfolgreichen Identifizierung eines Sternmusters werden abschließend die zur Bildvorlage dazugehörigen 3-axialen Lageparameter berechnet.

Helligkeitsinformationen werden nur bei der Auswahl der musterbildenden Sterne der Bildvorlage berücksichtigt, jedoch nicht während des Erkennungsvorgangs. Um ein *lost-in-space* Szenario ohne *a-priori* Wissen bearbeiten zu können, muß der Sternkatalog dergestalt ausgelegt werden, daß dieser alle Sterne beinhaltet, die sich prinzipiell auf der Bildvorlage befinden können bzw. durch ein geeignetes Bildaufnehmersystem (CCD-Sternenkamera) detektierbar sind.

Auch sind Aspekte zum Entwurf eines Bildaufnehmersystems untersucht worden, da nur durch das Kamerasystem die Qualität der zu verarbeitenden Bilddaten sichergestellt werden kann, insbesondere durch die Anzahl von gegenüber dem Himmelshintergrund abgebildeten Sternen (Anhang B).

Die schnelle, erfolgreiche und im Idealfall eindeutige Erkennung des vorgegebenen Sternmusters ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Eine wichtige Größe zur eindeutigen Mustererkennung ist die Anzahl von Sternen innerhalb der Bildvorlage, die das zu identifizierende n -Sterne-Muster bilden. Auch ist die Qualität der Daten des Sternkatalogs zu beachten. Einerseits muß der Sternkatalog zumindest diejenigen Sterne beinhalten, die vom Bildaufnehmersystem detektierbar sind. Andererseits sollte der Katalog nicht unnötig viele Sterne beinhalten, da mit steigendem Datenumfang des Sternkatalogs die Rechenzeit näherungsweise quadratisch mit der Anzahl der Katalogsterne wächst und das Problem einer mehrdeutigen Mustererkennung entsprechend zunimmt.

Die für die erfolgreiche Erkennung einer Winkelverbindung zugelassene Winkeltoleranz *angle_tolerance* dient in erster Linie zur Kompensation von Abbildungsfehlern des Bildaufnehmersystems und ist so niedrig wie möglich zu halten. Ein niedriger Wert der Winkeltoleranz wirkt sich äußerst positiv aus hinsichtlich der Minimierung der Rechenzeit und des Problems der mehrdeutigen Mustererkennung.

Das Bildverarbeitungssystem zur *Erkennung unbekannter Sternmuster nebst Bestimmung der 3-axialen Lageparameter* wurde bei Nutzung einer Personal-Computer basierten Benutzerumgebung mittels Softwarewerkzeugen realisiert. Automatisch werden die zu untersuchenden Bildvorlagen mittels verschiedener und *sequentiell* abzuarbeitender Module gemäß dem Motto *Bilddaten rein - 3-axiale Lageparameter raus* bearbeitet.

Eine Unterteilung des Sternkatalogs in *Sub-Sternkataloge* ermöglicht eine weitere Reduzierung der Laufzeit des Korrelationsalgorithmus und eröffnet die Möglichkeit einer *Parallelisierung* des Verfahrens, da jeder einzelne Sub-Sternkatalog unabhängig von den anderen bearbeitet werden kann. Jedoch wächst die benötigte Gesamtspeicherkapazität mit steigender Anzahl der Sub-Sternkataloge, da die notwendigen Überlappungsbereiche von benachbarten Sub-Sternkatalogen berücksichtigt werden müssen.

Ein Vorschlag für eine konsequente Weiterführung des im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Verfahrens besteht in der Zusammenführung der Personal-Computer basierten Bildverarbeitungssoftware zur Sternmustererkennung mit der Hardware des am ZARM-Instituts entwickelten Bildaufnehmersystems zu einem *autonomus star tracker*, der befähigt ist, als *on-board* Sensor zur Bestimmung der 3-axialen Lageparameter während einer Satellitenmission zu arbeiten. Um dies zu erreichen, muß ein geeigneter digitaler Signalprozessor ausgesucht und eine Rechnerstruktur aufgebaut werden, die den Anforderungen an einen Einsatz unter Weltraumbedingungen gerecht wird. Die Verfahren bzw. Softwaremodule zur Erkennung von Sternmustern nebst Bestimmung der 3-axialen Lage sind an die neue Hardwareumgebung anzupassen. Um im Ergebnis ein attraktives und kostengünstiges Produkt insbesondere für Kleinsatellitenanwendungen darzustellen, sind die in der vorliegenden Arbeit berücksichtigten und untersuchten Aspekte zu Speicherminimalität und schneller Datenverarbeitung entsprechend umzusetzen. Nach umfangreichen bodengestützten Testkampagnen ist die Fähigkeit des *autonomous star tracker* durch einen Qualifikationsflug im All unter Beweis zu stellen.

Ein weiterer Vorschlag hat schließlich die auch *sensor fusion* genannte Zusammenführung von mehreren Sensoren zur Lagebestimmung zum Inhalt. Bei Satellitenmissionen in niedrigen Erdumlaufbahnen kann sich der *autonomous star tracker* des *a-priori* Wissens von z.B. Magnetometern oder GPS-basierten Lagebestimmungssensoren bedienen, um zum einen die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems zur Lagebestimmung zu verbessern und um zum anderen die Rate der Lagebestimmung durch die Einbeziehung von *Vorwissen* zu erhöhen.

Hinsichtlich der Verbesserung des Wirkungsgrads bzw. der Trefferquote von eindeutig bestimmten Sternmustern bietet es sich an, auch solche *n-Sterne-Muster* zu berücksichtigen, die mehr als sechs Sterne beinhalten ($n \geq 7$). Ferner kann die explizite Auswertung und Berücksichtigung von Sternhelligkeiten als Matchingkriterium während des Erkennungsverfahrens weitere Verbesserungen liefern, sofern eine Kalibrierung zwischen den empfundenen Sternhelligkeiten der Sternenkamera und den gelisteten Sternhelligkeiten des Sternkatalogs durchgeführt wurde.

Literatur

- Aldus Corporation: *TIFF-Revision 6.0 (Final)*, Seattle, WA, USA (1992)
- Bähr, H.P. (Editor): *Digitale Bildverarbeitung - Anwendung in Photogrammetrie und Fernerkundung*, Herbert-Wichmann-Verlag, Karlsruhe (1985)
- Bässmann, H. / Besslich, P.W.: *Bildverarbeitung Ad Oculos*, Springer-Verlag, Berlin (1993)
- Baldini, D., et. al.: *A new star-constellation matching algorithm for satellite attitude determination*, ESA-Journal, Vol. 17, Seiten 185-198 (1993)
- Bank, T.: *Characterizing a star tracker with built in attitude estimation algorithms under the night sky*, Proceedings of the SPIE conference on acquisition, tracking, pointing XI, Vol. 3086-39, Seiten 264-274, Orlando, FL, USA (1997)
- Bastian, U. / Röser, S.: *PPM: Der Nachfolgekatalog des SAO-Katalogs*, Zeitschrift Sterne und Weltraum, Heft 10/1991, Verlag Sterne und Weltraum, Heidelberg (1991)
- Becvar, A.: *Skalnate Pleso, atlas of the heavens 1950.0*, Sky Publishing Corporation, Cambridge, MA, USA (1969)
- Bone, J.W.: *On-orbit star processing using multi-star star trackers*, Proceedings of the SPIE conference on acquisition, tracking and pointing VIII, Vol. 2221-67, Seiten 6-14, Orlando, FL, USA (1994)
- Borland GmbH: *Borland PASCAL mit Objekten - Referenzhandbuch*, Langen (1992)
- Bezooijen, R. van: *Automated star pattern recognition*, ph.d. dissertation, Stanford University, CA, USA (1989)
- Bezooijen, R. van: *Star sensors for autonomous attitude control and navigation*, SPIE conference on optical technologies for aerospace sensing, Critical Review Vol. 47, Seiten 153-180, Bellingham, WA, USA (1993)
- Bezooijen, R. van: *True sky demonstration of an autonomous star tracker*, Proceedings of the SPIE conference on acquisition, tracking and pointing VIII, Vol. 2221-67, Seiten 156-168, Orlando, FL, USA (1994)
- Booges, F.A.: *The IUE spacecraft and instrumentation*, Nature, Vol. 275, Seiten 372-377 (1978)
- Bostock, C.W.: *Space station Freedom attitude determination system utilization of star tracker capabilities*, Proceedings of the SPIE conference on space guidance, control and tracking, Vol. 1949-10, Seiten 68-79, Orlando, FL, USA (1994)
- Brockhaus: *Lexikon Naturwissenschaften und Technik*, Brockhaus-Verlag, Mannheim (1989)
- Bronstein, I.N. / Semendjajew, K.A.: *Taschenbuch der Mathematik*, Verlag Harry Deutsch, Frankfurt am Main (1982)

- Buil, C.: *Construction and use of an astronomical CCD-camera*, Willmann-Bell, Richmond, VA, USA (1991)
- Chobotov, V.: *Spacecraft attitude dynamics and control*, Krieger Publishing Company, Malabar, FL, USA (1991)
- Cleavinger, R.L. / Mayer, W.F.: *Attitude determination sensor for Explorer 53*, Proceedings of the 14th AIAA aerospace science meeting, Vol. AIAA-76-114, Washington, DC, USA (1976)
- Clementine: *Clementine host instrument overview*, Bericht des Jet Propulsion Laboratory (JPL), Pasadena, CA, USA, erhältlich im Internet unter <http://jpl.nasa.gov> (1997)
- DALSA: *DALSA - CCD image capture technology*, DALSA INC., Waterloo, Ontario, Canada (1995)
- DeAntonio, L. / et. al.: *Star-tracker based, all-sky, autonomous attitude determination*, Proceedings of the conference on space guidance, control and tracking, Vol. 1949-25, Seiten 204-215, Orlando, FL, USA (1994)
- Dirschmid, H.J.: *Mathematische Grundlagen der Elektrotechnik*, Vieweg-Verlag, Braunschweig (1990)
- Ebi, N.: *Methoden zur Objektextrahierung in Binärbildern*, unveröffentlichter institutsinterner Bericht, Fachbereich 1, Universität Bremen (1989)
- Elstner, Ch. / Ratzsch, D. / Skarus, W.: *Star pattern recognition sensor of the ASTRO type*, Preprints of the 12th IFAC symposium on automatic control in aerospace, Seiten 557-561, Ottobrunn (1992)
- Fasching, G.: *Sternbilder und ihre Mythen*, Springer-Verlag, Wien (1997)
- Feith, W. / et. al.: *Projekt CCD-Kamera*, Zeitschrift C'T, Heft 1/1992, Seiten 158-173, Heise-Verlag, Hannover (1991)
- Foith, J.P.: *Intelligente Bildsensoren*, Springer-Verlag, Berlin (1995)
- Fortescue, P. / Stark, J.: *Spacecraft systems engineering*, J. Wiley, New York, NY, USA (1995)
- Fröhlich, M. / Renken, H.: *Linienverfolgung mittels Analysefenster in graphischen Vorlagen*, Studienarbeit, Fachbereich 1, Universität Bremen (1991)
- Garrish, J. / Bostock, C.W.: *Star trackers for space station Freedom*, Proceedings of the SPIE conference on space guidance, control and tracking, Vol. 1949-02, Seiten 118-126, Orlando, FL, USA (1994)
- Gelb, A.: *Applied optimal estimation*, MIT-Press (1992)
- Gevarter, W.B.: *Intelligente Maschinen*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA (1985)

- Ginati, A. / et. al.: *BREM-SAT, a small scientific satellite*, Proceedings of the 4th AIAA/USU conference on small satellites, Logan, UT, USA (1990)
- Gonzales, R.C. / Woods, R.E.: *Digital image processing*, Addison-Wesley, Reading, MA, USA (1993)
- Gottlieb, D.M.: *SKYMAP - a new catalog of stellar data*, The astrophysical journal supplement series, Vol. 38, Seiten 287-308 (1978)
- Groth, E.J.: *A pattern matching algorithm for two-dimensional coordinate lists*, The astronomical journal, Vol. 91, No. 5, Seiten 1244-1248 (1986)
- Haberäcker, P.: *Digitale Bildverarbeitung*, Springer-Verlag, Berlin (1984)
- Henbest, N. / Marten, M.: *Die Neue Astronomie*, Birkhäuser-Verlag, Basel (1983)
- Herrmann, J.: *Großes Lexikon der Astronomie*, Mosaik-Verlag, München (1980)
- Herrmann, J.: *dtv-Atlas zur Astronomie*, Deutscher Taschenbuch Verlag, München (1996)
- Hughes, P.: *Spacecraft attitude dynamics*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA (1986)
- Iglseder, H. / et. al.: *BREM-SAT, a small university satellite*, Proceedings of the 42th IAF congress, Montreal, Canada (1991)
- Jähne, B.: *Digital image processing*, Springer-Verlag, Berlin (1995)
- Kalman, R.E.: *A new approach to linear filtering and predication theory*, Journal of basic engineering, Vol. 82, Seiten 35-45 (1960)
- Kazmierczak, H.: *Erfassung und maschinelle Verarbeitung von Bilddaten*, Springer-Verlag, Berlin (1980)
- Kammeyer, K.D.: *Nachrichtenübertragung*, Teubner-Verlag, Stuttgart (1992)
- Klare, G.: *Sternatlanten und Sternkataloge*, Zeitschrift Sterne und Weltraum, Heft 10/1991, Verlag Sterne und Weltraum, Heidelberg (1991)
- Königsmann, H.J. / Renken, H. / Rath, H.J.: *Attitude determination by image processing algorithms*, Proceedings of the 6th AIAA/USU conference on small satellites, Logan, UT, USA (1992)
- Königsmann, H.J.: *Magnetische Lageregelung von Kleinsatelliten in niedrigen Höhen*, Dissertation, Fachbereich 4, Universität Bremen (1995)
- Kustaanheimo, P.: *On vector methods in spherical astronomy*, Societas Scientiarum Fennica, Helsinki, Commentationes Physico-Mathematicae XXIV, 4 (1959) und XXIV, 7 (1960)
- Kuchling, H.: *Taschenbuch der Physik*, Verlag Harry Deutsch, Frankfurt am Main (1988)

- Kosolov, M.P. / Eisourovich, A.L.: *Distinctive features of making the wide-angle lenses of star trackers for attitude control of space vehicles*, Proceedings of the SPIE conference on acquisition, tracking, pointing XI, Vol. 3086-40, Seiten 332-338, Orlando, FL (1997)
- Kouzmin, V.S. / Fedosseev, V.I. / Panasenko, A.F.: *Light jummings and their suppression in the star trackers of space vehicles*, Proceedings of the SPIE conference on acquisition, tracking, pointing XI, Vol. 3086-06, Seiten 25-29, Orlando, FL (1997)
- Lai, J.Y. / Wong, E.C.: *Autonomous attitude determination from star data for a dual-spin planetary spacecraft*, AGARD-AG-260, Neuilly sur Seine, France (1981)
- Mahnken, A.: *Erprobung und Kalibrierung eines Sternsensors*, Studienarbeit, Fachbereich 4, Universität Bremen (1993)
- Malin, D. / Murdin, P.: *Colors of the stars*, Cambridge University Press, New York, NY, USA (1984)
- Mielke, E.W.: *Sonne, Mond und Schwarze Löcher*, Vieweg-Verlag, Braunschweig (1997)
- Offteding, P. / Rodehorst, L.: *Entwicklung und Aufbau eines Sternsensors*, Diplomarbeit, Fachbereich Elektrotechnik, Hochschule Bremen (1993)
- Parkinson, B.W. / Spilker, J.J.: *Global positioning system, theory and applications I & II*, AIAA, Washington, DC, USA (1996)
- Pavlidis, T.: *Algorithms for graphic and image processing*, Computer Science Press (1982)
- Pisacane, V.L. / Moore, R.C. (Editor): *Fundamentals of space systems*, Oxford University press, New York, NY, USA (1994)
- Pouw, A.: *System design and operational flight experience of the IRAS attitude control subsystem*, AIAA 22th aerospace sciences meeting, AIAA-84-0152 Reno, NV, USA (1984)
- Quine, B.M. / Durrant-Whyte, H.F.: *An improved navigation algorithm for on-board attitude determination*, Proceedings of the 18th Rocky Mountain guidance and control conference, Keystone, CO, USA (1995-1)
- Quine, B.M. / Durrant-Whyte, H.F.: *A fast autonomous star acquisition algorithm for spacecraft*, Proceedings of the IFAC autonomous control conference, T1-19, Beijing, China (1995-2)
- Quine, B.M. / Durrant-Whyte, H.F.: *Rapid star pattern identification*, Proceedings of the SPIE conference on acquisition, tracking, pointing X, Vol. 2739, Seiten 351-360, Orlando, FL, USA (1996)
- Reichl, H.: *Halbleitersensoren*, Expert-Verlag, Ehningen (1989)
- Reinhardt, F. / Soeder, H.: *dtv-Atlas zur Mathematik*, dtv-Verlag, München (1978)

- Renken, H.: *Entwurf und Realisierung von Bildverarbeitungssoftware für das BREM-SAT Projekt*, Dokumentation, DIGSY-Institut, FB1, Universität Bremen (1992)
- Renken, H. / Rath, H.J.: *Lageerfassung von Satelliten mittels bildverarbeitender Sternmustererkennung*, Tagungsband der DGLR-Jahrestagung 1994, DGLR-94-G5-117, Erlangen (1994)
- Renken, H. / Rath, H.J.: *A method for three-axis attitude determination by image-processed star constellation matching*, Proceedings of the SPIE conference on acquisition, tracking, pointing XI, Vol. 3086-38, Seiten 254-263, Orlando, FL (1997)
- Renken, H.: *Three-axis attitude determination of spacecrafts by image-processed star constellation matching*, Tagungsband der DGLR-Jahrestagung 1997, DGLR-JT97-190, München (1997)
- Salmon, P.M. / Goss, W.C.: *A microprozessor-controlled CCD star tracker*, Proceedings of the AIAA 14th aerospace sciences meeting, AIAA-76-116, Washington, DC, USA (1976)
- Schäifers, K. / Traving, G.: *Meyers Handbuch Weltall*, Bibliographisches Institut, Heidelberg (1984)
- Schröder, G.: *Technische Optik*, Vogel-Buchverlag, Würzburg (1984)
- Schmidt, U. / Wunder, D.: *The modular star sensor SETIS - a new generation of attitude sensors*, Tagungsband der DGLR-Jahrestagung 1997, DGLR-JT97-097, München (1997)
- Shannon, C.: *A mathematical theory of communication*, Bell System Technical Journal Nr. 27, Seiten 379-424 und 623-656 (1948)
- Sigl, R.: *Ebene und sphärische Trigonometrie*, Akademische Verlagsanstalt, Frankfurt am Main (1969)
- Stanton, R.H. / Alexander, J.W. / Dennison, E.W.: *CCD star tracker experience - key results from ASTRO-1 flight*, Proceedings of the SPIE conference on space guidance, control and tracking, Vol. 1949-05, Seiten 138-148, Orlando, FL, USA (1994)
- Stephenson, R.R.: *The Galileo attitude and articulation control system*, Preprints of the 10th IFAC symposium on automated control in space, Seiten 85-92, Toulouse, France (1985)
- Streichert, F.: *Informationsverschwendung - Nein Danke*, Zeitschrift C'T, Heft 1/1987, Seiten 90-92, Heise-Verlag, Hannover (1987)
- Strunz, H.C. / Baker, T. / Ethridge, D.: *Estimation of stellar instrument magnitudes*, Proceedings of the SPIE conference on space guidance, control and tracking, Vol. 1949-27, Seiten 228-235, Orlando, FL, USA (1994)
- Tietze, U. / Schenk, C.: *Halbleiterschaltungstechnik*, Springer-Verlag, Berlin (1989)
- Tirion, W.: *Sky Atlas 2000.0*, Cambridge University Press, New York, NY, USA (1991)

Tischer, M., Jennrich, B.: *PC intern 5*, DATA Becker, Düsseldorf (1995)

Vehrenberg, H. / Blank, D.: *Handbook of the constellations*, Treugesell-Verlag, Düsseldorf (1987)

Wahl, F.M.: *Digitale Bildsignalverarbeitung*, Berlin, Springer-Verlag (1984)

Wepner, W.: *Mathematisches Hilfsbuch für Studierende und Freunde der Astronomie*, Treugesell-Verlag, Düsseldorf (1985)

Wertz, J.R. (Editor): *Spacecraft attitude determination and control*, D. Reidel Publishing, Dordrecht, Holland (1978)

Wertz, J.R. / Larson, W.J.: *Space mission analysis and design*, Space Technology Library (1991)

Anhang A

A Astronomische Aspekte

Astronomische Aspekte, welche für die vorliegende Dissertation von besonderer Wichtigkeit sind, werden innerhalb dieses Anhangs dargelegt. Zur Beschreibung der Position von Himmelsobjekten und der Orientierung bzw. der Lage von Raumflugkörpern am Himmel werden *Koordinatensysteme* benutzt, allen voran das äquatoriale Himmelskoordinatensystem. Auch läßt sich mittels Koordinatenangaben der *Winkelabstand* zweier Himmelsobjekte bequem berechnen. Da dies bei dem in Kapitel 6 vorgestellten Verfahren zur Sternmustererkennung von großer Bedeutung ist, werden auch einige Ausführungen zur schnellen Berechnung von Winkelabständen dargelegt, was insbesondere bei einer Vielzahl dieser Berechnungen auf Rechenmaschinen zu beachten ist. Ferner werden Grundbegriffe zu Helligkeiten und Farben von Himmelsobjekten und zur spektralen Sensitivität von Strahlungsempfängern ausgeführt, die zur Auslegung und spektralen Kalibrierung eines *Bildaufnehmersystems* (CCD-Sternenkamera, Anhang B) relevant sind. Abschließend werden gängige Sternkataloge vorgestellt, insbesondere der *SAO-Sternkatalog* des *Smithsonian-Astrophysical-Observatory*. Der SAO-Sternkatalog und dessen unterteilte Kataloge mit geringerem Sternumfang sind die im Rahmen dieser Arbeit benutzten Sternkataloge und enthalten implizit das *Soll-Wissen* zur Erkennung von Sternmustern durch die Angaben von Koordinaten und Helligkeiten aller von der CCD-Sternenkamera detektierbaren Sterne.

A.1 Koordinatensysteme

Koordinatensysteme dienen der zahlenmäßigen Festlegung der Lage von Punkten in *n-dimensionalen* Räumen. Sie sind als absolutes Referenzsystem das Grundwerkzeug zur Beschreibung der Orientierung von relativ hierzu orientierten und gedrehten Körpersystemen, wie zum Beispiel Raumflugkörper. Von besonders praktischer Wichtigkeit sind die *zweidimensionale Fläche* und der *dreidimensionale Raum*. Jedes Koordinatensystem impliziert eine Meßvorschrift, nach der die Lage innerhalb des Systems mittels der *n* Koordinaten eindeutig bestimmt werden kann. So läßt sich durch Koordinaten auch die Lage von Himmelskörpern an der fiktiv gedachten *Himmelskugel*, welche eine zweidimensionale, gekrümmte und in sich geschlossene Fläche darstellt, beschreiben. Dazu denkt man sich die Gestirne vom Beobachtungsstandort aus an die Himmelskugel projiziert, wobei die Himmelskugel als mathematische Hilfsgröße einen beliebig großen Radius haben kann. Die Erde kann im Vergleich mit der Himmelskugel als verschwindend klein, also quasi punktförmig, angesehen werden, so daß die Definitionen für Punkte und Kreise an der Himmelskugel für alle irdischen Standorte dergestalt gelten, als befänden sich diese im Erdmittelpunkt. Sogar die Position von Erde und Raumflugkörpern innerhalb des Sonnensystems spielt im allgemeinen eine zu vernachlässigende Rolle, da *Parallaxeneffekte* der relativ weit entfernten Sterne äußerst gering sind, wie auch in den Bildern A.1 und A.2 angedeutet. So liegt z.B. der Parallaxenwinkel p des sonnenumlaufenden Erdkörpers (Basislinie ca. $d=150 \cdot 10^6 \text{ km}$) bezogen auf ein $d=3,26 \text{ LJ}$ ($d=1 \text{ parsec}$) entferntes Objekt bei nur $p=1 \text{ arcsec}$. Der sonnennächste Fixstern (*Proxima Centauri*) ist jedoch $d=4,3 \text{ LJ}$ entfernt, was einem Parallaxenwinkel von nur $p=0,75 \text{ arcsec}$ entspricht [Herrmann 1996]. Genauigkeitsanforderungen an die Lage unterhalb einer Bogensekunde sind äußerst selten und können bei Bedarf durch entsprechende Berechnungen des Parallaxenwinkels kompensiert werden. Praktisch hat dieser Parallaxeneffekt jedoch bei marktgängigen CCD-Sternenkameras wenig Relevanz, da das Auflösungsvermögen von abbildender Optik und Bildsensor selbst bei Interpolation auf Subpixelebene oberhalb einer Bogensekunde liegt (Anhang B).

Die Lage eines Gestirns oder Raumflugkörpers an der Himmelskugel kann durch zweidimensionale, sphärische Koordinaten, d.h. durch zwei voneinander unabhängige Winkelangaben, festgelegt werden. Möglich ist auch die Festlegung von Koordinaten über dreidimensionale, kartesische Vektoren, ohne die Entfernung zum jeweiligen Himmelskörper einfließen zu lassen [Bronstein 1992]. Im Falle der *Einheitskugel* sind dies zweckmäßigerweise dreidimensionale *Einheitsvektoren*. Für mathematische Berechnungen empfiehlt sich generell die Zuhilfenahme der Einheitskugel mit einem auf die zu beschreibende Ausrichtung bzw. Lage gerichteten Einheitsvektor. Mittels der Nutzung von Einheitsvektoren anstatt der Anwendung von Methoden der *sphärischen Trigonometrie* verkürzen sich mathematische Berechnungen, wie Winkelabstandsberechnungen, sowohl vom Formalismus als auch von der Laufzeit auf Rechenmaschinen in einem erheblichen Maß, wie in Anhang A.2 zu sehen ist [Kustaanheimo 1959 und 1969, Sigl 1969].

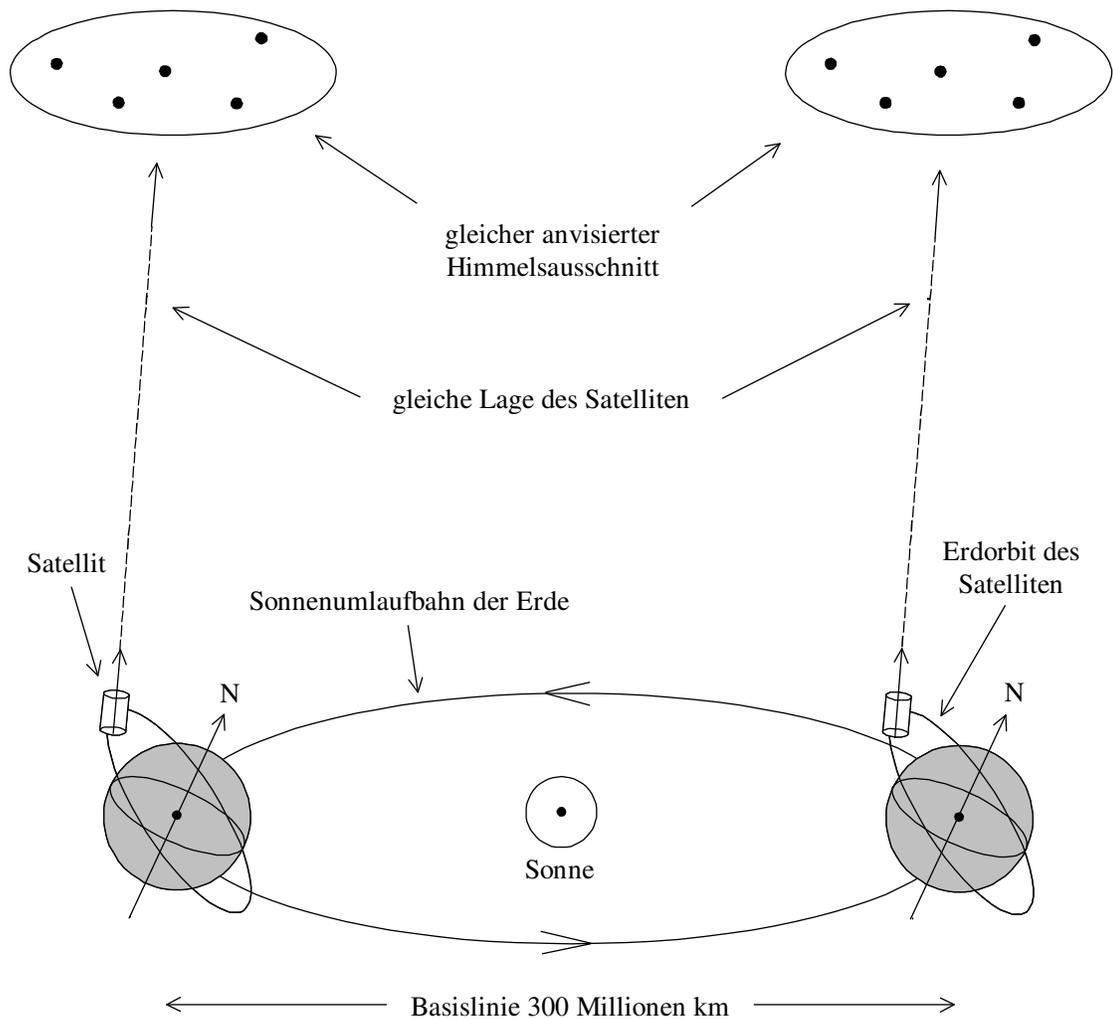


Bild A.1: Zu vernachlässigender Einfluß der Sternparallaxe auf die Lage beim Lauf der Erde um die Sonne

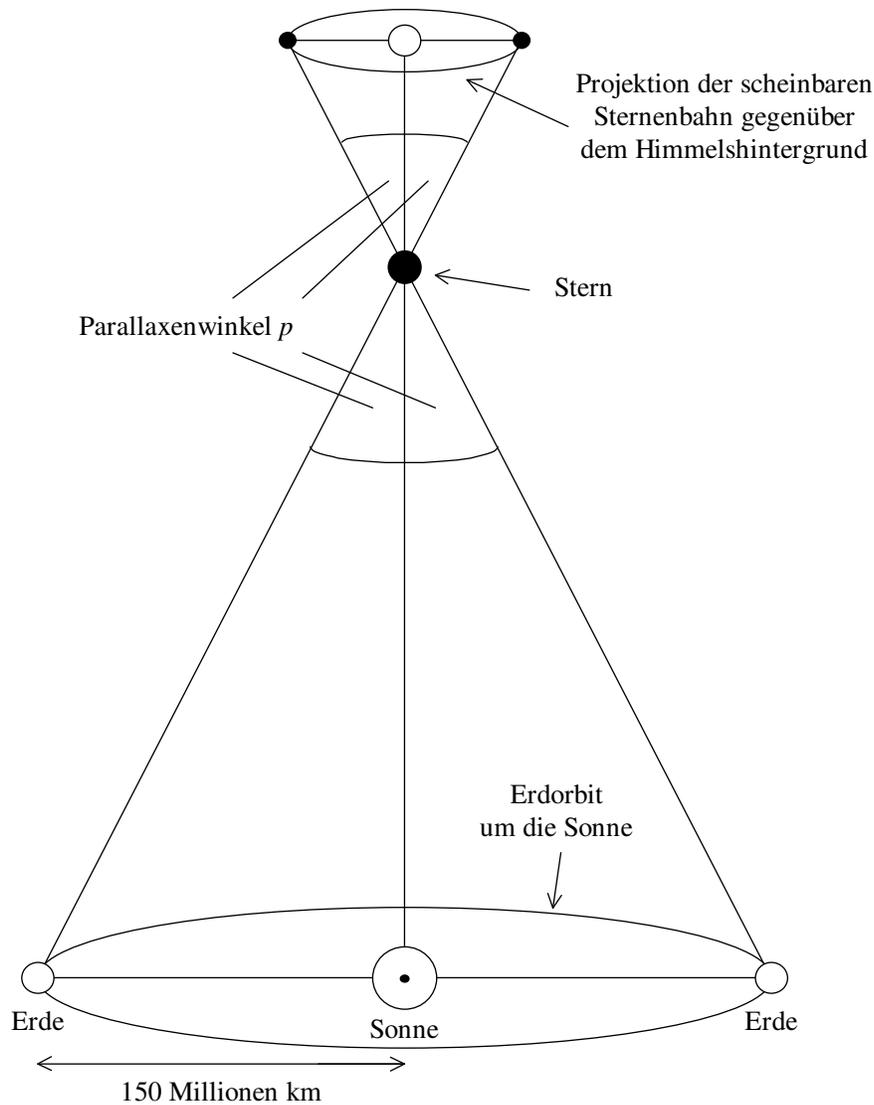


Bild A.2: Zum Parallaxenwinkel p von Himmelsobjekten

Es werden in der Astronomie und Raumfahrt folgende Koordinatensysteme benutzt:

- Horizontales (azimutales) Koordinatensystem
- Äquatoriales Koordinatensystem
- Ekliptikales Koordinatensystem
- Galaktisches Koordinatensystem

Das *horizontale*, auch als *azimutal* bezeichnete Koordinatensystem ist positions- und zeitabhängig und beschreibt die Ausrichtung der Lageachse gegenüber der Horizontebene als Referenzebene. Da die Horizontebene nicht für alle Beobachtungsstandorte gleich ist, sondern vielmehr von Standort und Ortszeit abhängt, macht dieses Koordinatensystem zwar für terrestrisch gebundene Positionsbetrachtungen von Himmelsobjekten Sinn, führt als Werkzeug zur universellen Angabe von Lageinformationen aber zu unnötigem Aufwand. Das horizontale Koordinatensystem wird daher im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt.

Das äquatoriale, ekliptikale und galaktische Koordinatensystem sind sich vom Prinzip her sehr ähnlich und basieren alle auf einer orts-, raum- und zeitfesten Referenzebene. Beim *äquatorialen Koordinatensystem* dient der Schnitt durch den Erdäquator als Grundebene. Dieses System ist das Gebräuchlichste in Astronomie und Raumfahrt und wird auch im weiteren Rahmen dieser Dissertation ausschließlich benutzt. Wichtige Aspekte hierzu werden im nachfolgenden Anhang A.1.1 behandelt. Das *ekliptikale Koordinatensystem* bedient sich der auch als *Ekliptik* bezeichneten Ebene der Erdumlaufbahn um die Sonne als Grundebene und findet mitunter bei interplanetaren Raumfahrtmissionen Anwendung. Die Ebene der Milchstraße ist Grundebene des *galaktischen Koordinatensystems* und wird überwiegend von Astronomen zur Positionsbeschreibung von in der Milchstraße befindlichen Objekten benutzt. Alle Koordinatensysteme lassen sich bei Bedarf stets mittels Methoden der *Koordinatentransformation* leicht ineinander überführen [Wepner 1985].

A.1.1 Äquatoriales Koordinatensystem der Erde und des Himmels

Das äquatoriale Koordinatensystem der Erde bezieht seine Grundebene aus der natürlichen Drehung der Erde, nämlich der senkrecht zur Rotationsachse des Erdkörpers stehenden Äquatorebene (Bild A.3). Zur Positionsangabe eines Ortes auf der Erde aus Sicht des Erdmittelpunktes sind zwei Koordinaten erforderlich: die geographische Breite φ und die geographische Länge λ . Die geographische Breite φ ist der Winkel eines senkrecht zum Äquator stehenden Kreisbogens zwischen dem Äquator und dem zu beschreibenden Ort auf der Erde, gemessen vom Nordpol mit $\varphi=+90^\circ$ (Nord) bis zum Südpol mit $\varphi=-90^\circ$ (Süd). Zur Festlegung der zweiten Koordinate wird als Bezugsmaß - historisch bedingt - der senkrecht zum Äquator laufende Halbkreisbogen durch die bei London gelegene Sternwarte in *Greenwich* genommen.

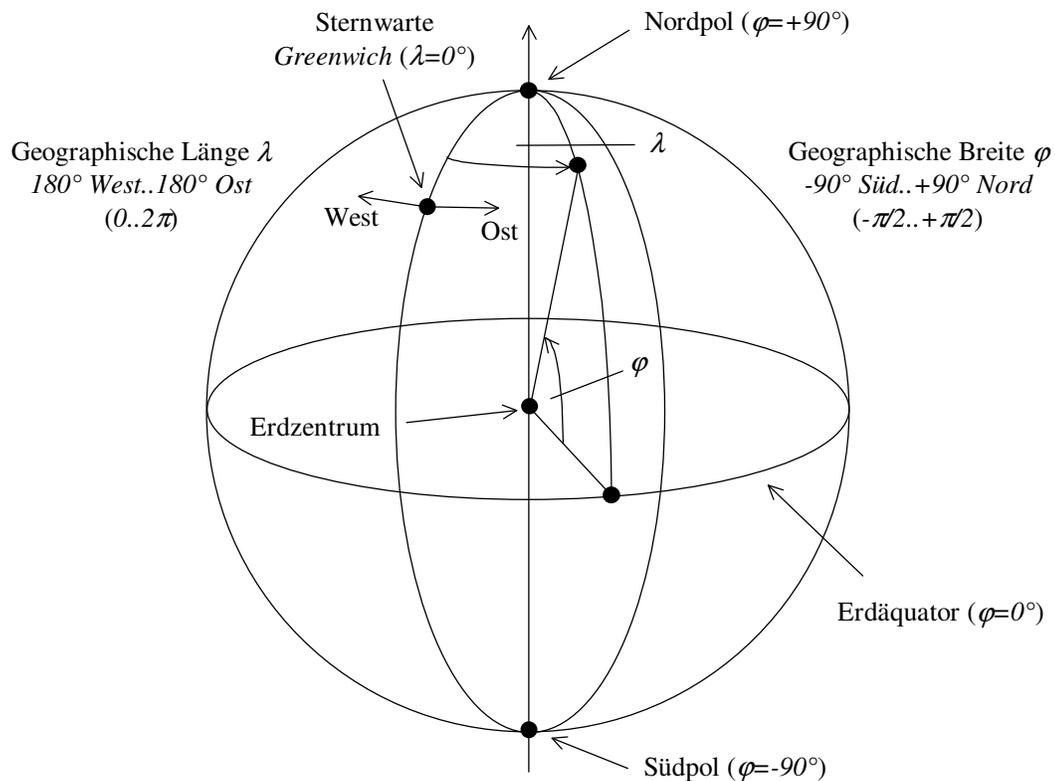


Bild A.3: Zweidimensionales Koordinatensystem (λ , φ) auf dem Erdkörper

Jeweils in West- bzw. Ostrichtung erfolgt die Winkelangabe der geographischen Länge λ von 0° bis 180° . Für mathematische Berechnungen läßt man jedoch die geographische Breite φ besser von $\varphi=+\pi/2$ für den Nordpol der Erde bis $\varphi=-\pi/2$ für den Südpol der Erde variieren, die geographische Länge λ hingegen von 0 bis 2π in Ostrichtung.

Das äquatoriale Koordinatensystem des Himmels ist eine Erweiterung des äquatorialen Koordinatensystems der Erde (siehe Bild A.4). Im Mittelpunkt des Systems befindet sich der Erdkörper. Von hier aus betrachtet, werden die Richtungen von Himmelskörpern an der fiktiv gedachten *Himmelskugel* festgelegt. Aussagen über Entfernungen werden nicht getroffen. Der Erdäquator geht ebenenparallel in den Himmelsäquator über. Die geographische Breite φ geht in die Deklination δ über. Als Bezugshalbkreis zur Festlegung der Rektaszension α , welche der geographischen Länge λ entspricht, wird jener Halbkreisbogen gewählt, der senkrecht zum Himmelsäquator verlaufend durch den Frühlingspunkt γ geht. Das ist jener Schnittpunkt zwischen Ekliptik und Himmelsäquator, den die Sonne zu Frühlingsbeginn von Süden nach Norden durchläuft. Die Deklination δ wird vom Himmelsnordpol zum Himmels-südpol verlaufend von $\delta=+90^\circ$ bis $\delta=-90^\circ$ gemessen. Die Rektaszension α durchläuft 0 bis 24 Stunden, entsprechend einem Winkel von 360° in Ostrichtung. Besser ist auch hier die Winkelangabe in bezug auf die Bogenlänge im Einheitskreis, nämlich der Verlauf von $+\pi/2$ für den Himmelsnordpol bis zu $-\pi/2$ für den Himmels-südpol, bezogen auf die Deklination δ und der Verlauf von 0 bis 2π in Ostrichtung, bezogen auf die Rektaszension α .

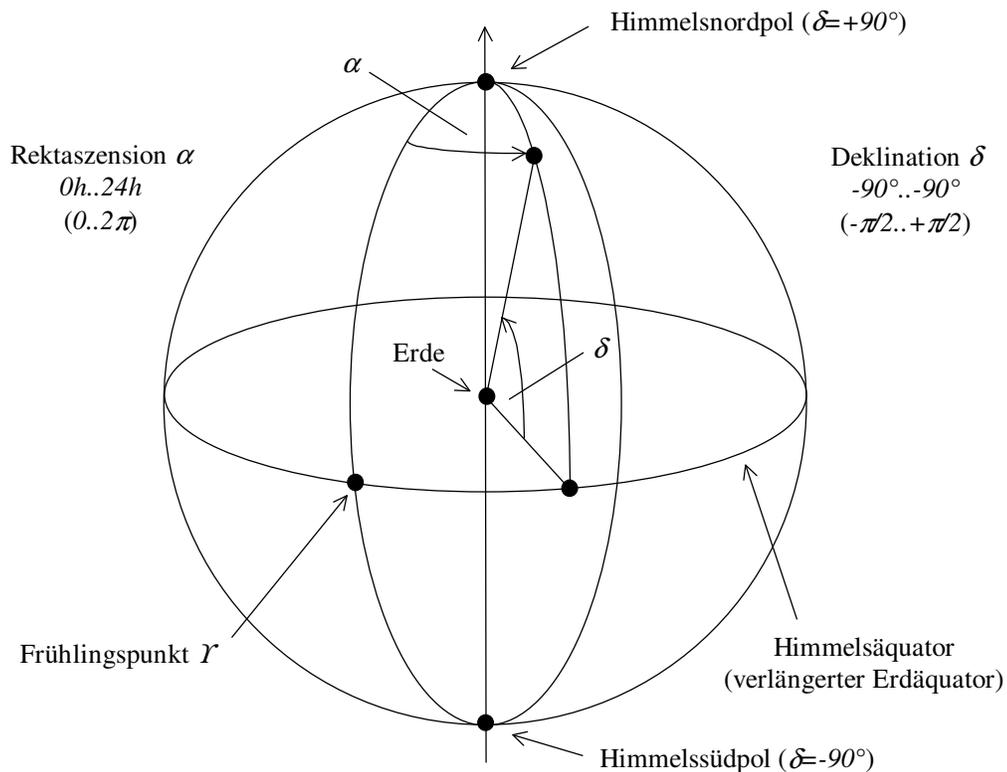


Bild A.4: Zweidimensionales Koordinatensystem (α , δ) auf der Himmelskugel

A.2 Zur Berechnung von Winkelabständen

Faßt man die Himmelskugel als Einheitskugel auf, so ergeben sich bei deren Verwendung große Vorteile bei der Berechnung von Winkeln zwischen Himmelsobjekten. Dies bezieht sich insbesondere auf die Laufzeit innerhalb von Rechenmaschinen, wenn es gilt, eine Vielzahl von Winkelabstandsberechnungen mittels einfacher Vektoralgebra in kurzer Zeit durchzuführen. Denn nach Vektorisierung der zweidimensionalen Koordinatenangabe durch Rektaszension α und Deklination δ in ein quasi dreidimensionales, kartesisches Einheitsvektorsystem mit den Koordinaten x , y und z genügt die Anwendung des *Skalarprodukts* auf Einheitsvektoren zur Abstandsberechnung. Der zweidimensionale Fall führt bei der Verwendung des mathematisch erheblich aufwendigeren *Seitenkosinussatzes* der sphärischen Trigonometrie zu unnötigen Rechenzeitverlusten [Sigl 1969]. Die Äquatorebene geht hierbei in die x/y -Ebene des dreidimensionalen, kartesischen Koordinatensystems über, mit $x=1$ und $y=0$ im Frühlingspunkt Υ und $x=0$ und $y=1$ in 90° bzw. $\pi/2$ östlicher Richtung (Bild A.5).

Nachfolgend wird die Umrechnungsvorschrift zur Überführung vom zweidimensionalen α/δ -System in das dreidimensionale $x/y/z$ -System mit den jeweiligen Wertebereichen angegeben:

zweidimensional:	→	quasi dreidimensional (Einheitsvektor)
• Rektaszension α [0.. 2π]		• $x = \cos(\delta) * \cos(\alpha)$ [-1..+1]
• Deklination δ [- $\pi/2$..+ $\pi/2$]		• $y = \cos(\delta) * \sin(\alpha)$ [-1..+1]
		• $z = \sin(\delta)$ [-1..+1]

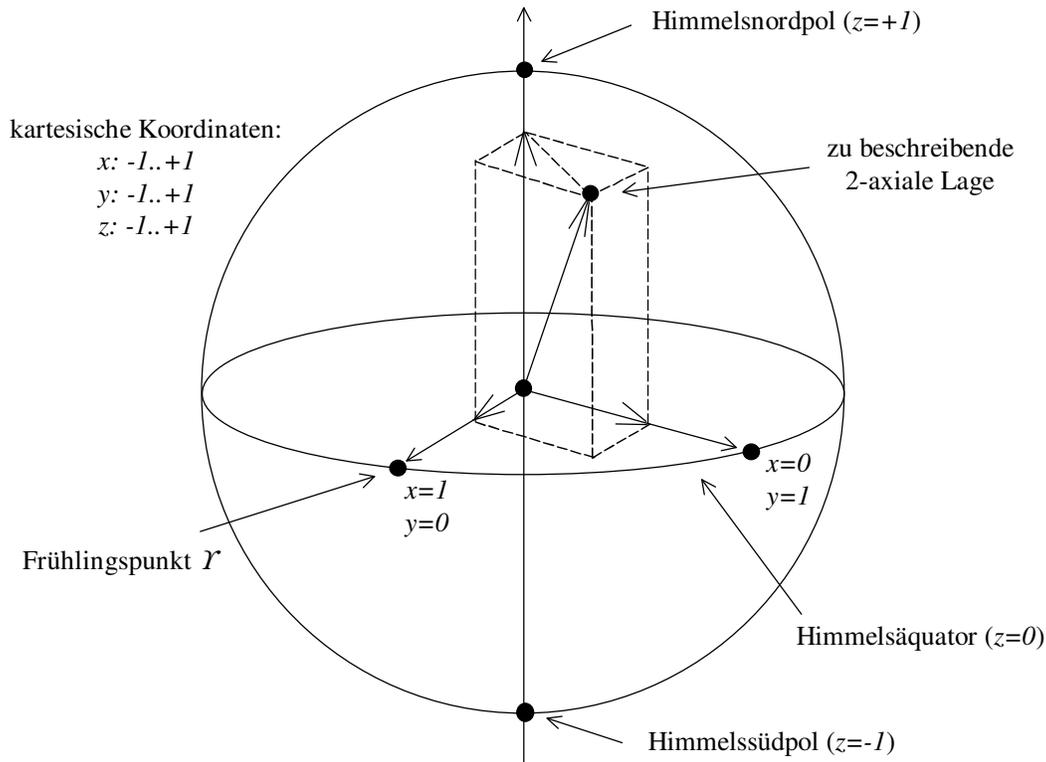


Bild A.5: Vektorisiertes, kartesisches und quasi dreidimensionales Koordinatensystem (x , y , z) auf der Himmelskugel

Bei der Festlegung von Winkeln zwischen zwei Objekten an der Himmelskugel treten Werte von 0° bis maximal 180° bzw. von 0 bis maximal π auf. Ein Winkel von 180° bzw. π bedeutet, daß sich die winkeleinschließenden Objekte an der Himmelskugel genau gegenüber gelegen befinden. Es liegt dann die *Oppositionsstellung* vor. Daher ist es zulässig und für weitere Betrachtungen von Vorteil, statt des expliziten Winkels c den Kosinus eines jeden Winkels $\cos(c)$ zu betrachten, da im Wertebereich für c von $[0^\circ..180^\circ]$ bzw. $[0..\pi]$ der entsprechende Kosinus eindeutig im Intervall $[1..-1]$ liegt und eine monoton fallende Funktion darstellt. Nur für die Ausgabe von Ergebniswerten erfolgt eine Rückrechnung aus der systeminternen *Welt des Kosinus* in die *Welt des expliziten Winkels*.

Bild A.6 zeigt ein Szenario mit den Himmelsobjekten A und B , deren Winkelabstand c bzw. $\cos(c)$ berechnet werden soll.

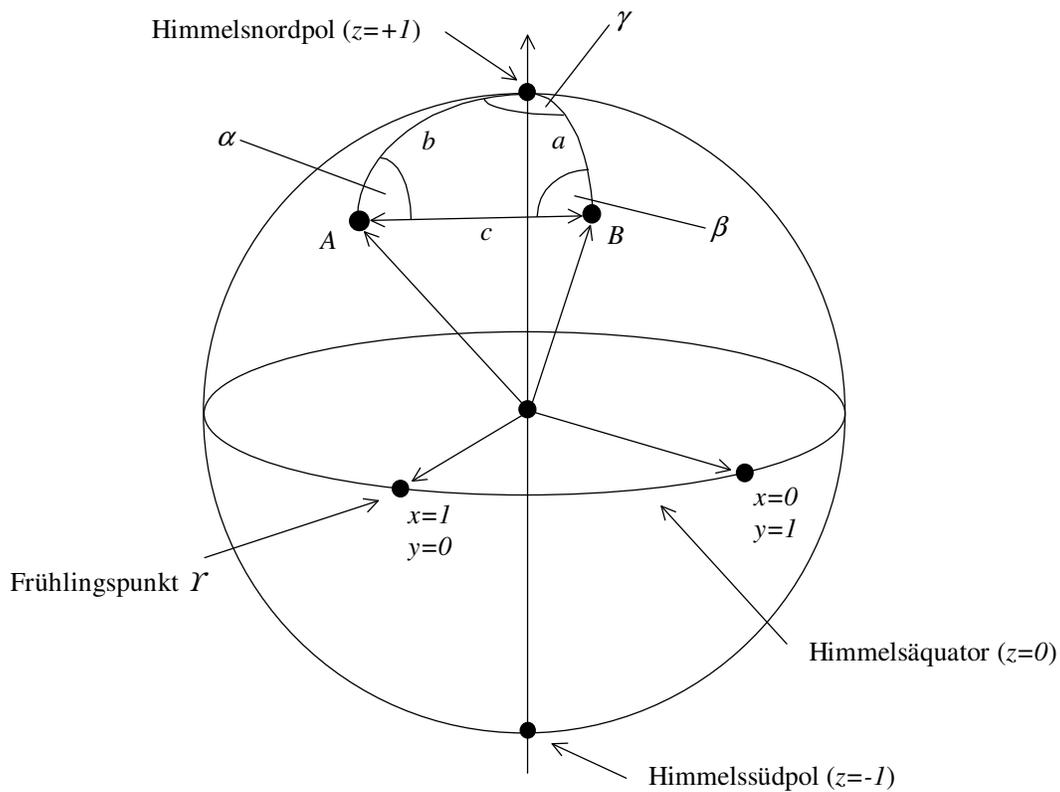


Bild A.6: Himmelskugel mit zwei Sternen A und B und deren Winkeldistanz c bzw. $\cos(c)$

Unter Zuhilfenahme des *Seitenkosinussatzes* der sphärischen Trigonometrie (zweidimensional) und diverser aus Rektaszension α und Deklination δ ermittelbarer Winkelhilfsgrößen (a, b, γ , siehe Bild A.6) berechnet sich $\cos(c)$ wie folgt:

$$\cos(c) = \cos(a) * \cos(b) + \sin(a) * \sin(b) * \cos(\gamma)$$

(Gleichung A.1)

Benutzt man hingegen das *Skalarprodukt* im quasi dreidimensionalen Fall, angewandt auf Einheitsvektoren (mit den Koordinaten x_A, y_A und z_A für den Stern A bzw. x_B, y_B und z_B für den Stern B) im kartesischen Koordinatensystem, so gilt:

$$\cos(c) = x_A * x_B + y_A * y_B + z_A * z_B$$

(Gleichung A.2)

Durch die Vorgabe von Einheitsvektoren bei der Skalarproduktbildung entfällt sogar die Multiplikation mit den Vektorbeträgen, da diese vom Betrag her gesehen stets den Wert 1 aufweisen. Außerdem ist eine Überprüfung von *Singularitäten an den Polstellen* bei Nutzung des Skalarprodukts nicht notwendig, im Gegensatz zur sphärischen Trigonometrie.

Als Rechenkern zur Berechnung des Kosinus eines zu berechnenden Winkelabstands bleibt bei Benutzung der dreidimensionalen Vektoralgebra also nur der einfache Formalismus gemäß Gleichung A.2 übrig, was der Ausführung von drei Multiplikationen und zwei Additionen entspricht. Dazu braucht ein Rechenwerk mit *floating-point* Eigenschaften nur wenige Taktzyklen, im Gegensatz zur Nutzung des Seitenkosinussatzes (Gleichung A.1) mit fünf trigonometrischen Winkelfunktionen je Berechnung. So wird z.B. bei Benutzung eines PC-basierten Prozessors vom Typ *Pentium* die Laufzeit etwa um Faktor 1:15 reduziert. Bei Benutzung eines speziellen digitalen Signalprozessors (DSP) sind noch erheblich bessere Rechenzeitreduktionen möglich.

A.3 Helligkeiten von Himmelsobjekten

Schon bei einer flüchtigen Betrachtung der Himmelsobjekte fällt auf, daß diese für den irdischen Beobachter nicht alle gleich hell erscheinen. Es liegt nahe, die Sterne in *Helligkeitsklassen* einzuteilen, mitunter auch *Größenklassen* oder besser *Magnituden* genannt. Eine solche Einteilung haben schon die Astronomen des Altertums eingeführt und zwar derart, daß sie die hellsten Sterne als Sterne *1. Größe*, die nächsthellsten als Sterne *2. Größe* und so fort bezeichneten bis zu den schwächsten mit bloßem Auge noch sichtbaren Sterne, die auf dieser Skala der 6. Helligkeitsklasse angehörten. Um nach der Erfindung des Fernrohrs und photometrischen Meßgeräten ein für alle Beobachter einheitliches Helligkeitssystem aufzustellen, war eine Reform dieses recht groben Systems unerlässlich. Andererseits wollte man aber das alte Helligkeitssystem nicht grundsätzlich aufgeben, da dieses schon zu sehr Einzug in der Astronomie erhalten hatte. 1859 wurde von Weber und Fechner das sogenannte *psychophysische Grundgesetz* formuliert, welches besagt, daß die Empfindlichkeiten des Auges den Logarithmen der Reize proportional sind. Danach entsprechen wahrgenommene Helligkeiten bestimmten Verhältnissen in den Strahlungsleistungen [Herrmann 1980].

Man unterscheidet hinsichtlich der Helligkeiten von Himmelsobjekten zwischen der *scheinbaren* und *absoluten* Helligkeit. Die scheinbare Helligkeit ist ein Maß für die Intensität der zur Erde gelangenden Strahlung eines Himmelskörpers. Dies sagt nur wenig über die wahre Leuchtkraft aus, da zu beachten ist, daß sich die verschiedenen Himmelsobjekte alle in unterschiedlichen Abständen zur Erde befinden. Die Helligkeit nimmt bekanntlich nach dem *Quadratabstandsgesetz* mit dem Quadrat der Entfernung ab. Demgegenüber ist die *absolute Helligkeit* ein Maß für die wirkliche Leuchtkraft der Himmelsobjekte untereinander. Dazu wird das Himmelsobjekt rein rechnerisch (vorausgesetzt, daß die Entfernung zu diesem bekannt ist) in eine definitorische Bezugsentfernung von $d=10\text{parsec}$ (entsprechend $d=32,6\text{LJ}$) gesetzt und dann die theoretisch zu beobachtende Helligkeit als absolute Helligkeit genommen. Ein Lichtjahr ist die Wegstrecke, die das Licht und jede andere elektromagnetische Welle im Vakuum im Laufe eines Jahres zurücklegt. Dies sind etwa $d=9,4 \cdot 10^{12}\text{km}$, bei einer Lichtgeschwindigkeit im Vakuum von etwa $v=3 \cdot 10^5\text{km/s}$. Die absolute Helligkeit ermöglicht den objektiven Vergleich von Leuchtkräften der Himmelsobjekte untereinander, während die scheinbare Helligkeit den subjektiven Eindruck aus Sicht der Erde vermittelt. Im folgenden beziehen sich alle Helligkeitsangaben auf die scheinbare Helligkeit, da im Rahmen dieser Arbeit nur der Helligkeitseindruck von der Erde aus bzw. aus Sicht der CCD-Sternenkamera relevant ist.

Wenn man mit *mag* (Größe = lat. Magnitudo, abgekürzt *mag*) die Helligkeit (als Maß für die Empfindung) und mit *F* den Strahlungsstrom des Sternlichtes (als Maß für den Reiz) bezeichnet, dann ist die Beziehung zwischen Helligkeitsdifferenz $mag_1 - mag_2$ zweier Sterne *1* und *2* und dem Verhältnis F_1/F_2 der dazugehörigen Strahlungsströme:

$$mag_1 - mag_2 = -2,512 * \lg \left(\frac{F_1}{F_2} \right)$$

(Gleichung A.3)

In der Umkehrung dieser Formel erhält man das Verhältnis der Strahlungsströme aus der Differenz der scheinbaren Helligkeiten durch den folgenden Ausdruck:

$$\frac{F_1}{F_2} = \left(\frac{1}{2,512} \right)^{mag_1 - mag_2} = 10^{-0,398(mag_1 - mag_2)}$$

(Gleichung A.4)

Die Strahlungsströme zweier aufeinanderfolgender Helligkeiten verhalten sich also wie 1:2,512. Die Konstante 2,512 der Definitionsgleichung wurde so gewählt, daß der Logarithmus der Konstanten eine möglichst einfache Zahl ergab und außerdem etwa dem historischen Helligkeitsklassensystem entsprach. Zur Festlegung des Nullpunktes benutzte man den auch *Polaris* genannten *Polarstern* (α UMi: Hauptstern des Sternbilds *Ursa Minor*), dessen mittlere Helligkeit per Definition eine Magnitude von $mag=2,12$ zugeordnet wurde. Nun gibt es jedoch erheblich hellere Himmelsobjekte als α UMi, weshalb man in konsequenter Weiterführung der Helligkeitsskala zu negativen Helligkeitswerten kam. So besitzt z.B. *Sirius* (α CMa: Hauptstern des Sternbilds *Canes Major*) als scheinbar hellster Fixstern des Himmels, eine visuelle Helligkeit von $mag=-1,47$. Die Sonne leuchtet am Taghimmel mit $mag=-26,7$ und der Vollmond mit $mag=-13,0$. Die schwächsten, heutzutage von CCD-Sensoren unter Zuhilfenahme großer Teleskope detektierbaren Objekte haben eine Helligkeit von etwa $mag=33$. In bezug auf die Sonne entspricht dies einem Dynamikbereich von $1:7,6 \cdot 10^{23}$.

Es sei an dieser Stelle ausdrücklich erwähnt, daß sich die zuvor beschriebenen Helligkeiten von Himmelskörpern auf die von dem menschlichen Auge empfundenen, visuellen Helligkeiten beziehen. Die Empfindlichkeit eines Strahlungsempfängers, wie in diesem Fall die des Auges oder bei technischen Systemen die des Bildaufnehmers, ist jedoch im hohen Maße von dem Farbspektrum der Strahlungsquelle abhängig, worauf in Kapitel A.3.1 eingegangen wird.

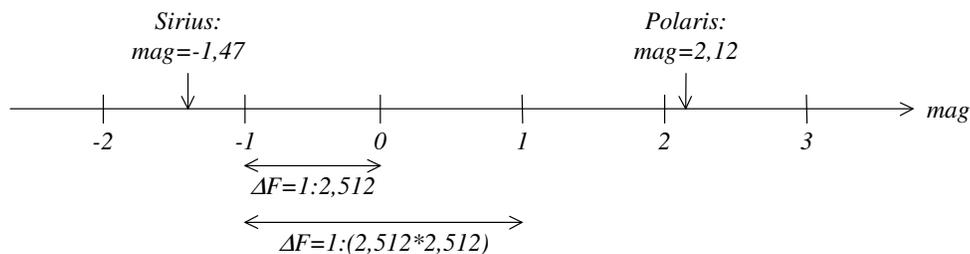


Bild A.7: Zur Helligkeitseinteilung in Magnituden

Für die Gesamthelligkeit mag_{ges} eines sich aus n Himmelsobjekten (mit einer jeweiligen Helligkeit von mag_k) zusammengesetzten Himmelsobjektes, gilt:

$$mag_{ges} = -2,5 * \lg \sum_{k=1}^n 10^{-0,4 * mag_k}$$

(Gleichung A.5)

Die Gleichung A.5 findet Anwendung, wenn die einzelnen Komponenten eines Mehrfachsternsystems zu einem *quasi-stellaren* Einzelobjekt verschmelzen. Dies kann z.B. bei einem engen Doppelstern der Fall sein, der sich durch eine abbildende Optik nicht mehr in seine beiden Komponenten auflösen läßt.

A.3.1 Farbspektren von Himmelsobjekten

Spektren sind in bezug auf das Licht die Verteilungen der Energiedichten über die Wellenlänge λ einer elektromagnetischen Strahlung. Normalerweise besteht eine solche Strahlung aus einer Mischung von elektromagnetischen Wellen verschiedener Wellenlängen. Das menschliche Auge setzt die sichtbaren Wellen bei einer gewissen Mindestintensität in Farben bzw. in ein Farbspektrum um. Bei einem Gemisch von Wellen liegt der Farbeindruck bei der Wellenlänge, für die das Auge die größte Intensität empfindet. Das Auge selber ist für verschiedene Wellenlängen bzw. verschiedene Farben nicht gleich empfindlich. Die größte Sensibilität liegt im Bereich von $\lambda=650\text{nm}$. Dies entspricht dem Energiedichtemaximum innerhalb des Sonnenspektrums.

Die spektrale Empfindlichkeit von photochemischen Emulsionen oder elektrischen Detektoren, wie auch die des Halbleitersensors der im Rahmen dieser Arbeit benutzten CCD-Sternenkamera, verhält sich in den meisten Fällen erheblich anders als die des menschlichen Auges. Praktisch wird oft versucht, die Farbintensitäten von Filmen und Detektoren denen des menschlichen Auges durch geeignete Maßnahmen anzugleichen. Es kommt also auf die spektrale Empfindlichkeit einer jeden Meßapparatur an. Durch sie wird das *photometrische System* festgelegt. Jede Helligkeitsangabe eines Objektes am Himmel bedarf neben dem Zahlenwert und der Angabe des Nullpunktes der Skala noch der Mitteilung der spektralen Empfindlichkeitsfunktion, die von der Optik des Instruments, den Filtern und dem verwendeten Strahlungsempfänger abhängig ist. Häufig genügt schon die Angabe des Wellenlängenbereichs, in dem die Helligkeit bestimmt wurde oder sogar nur die der Wellenlänge des Schwerpunkts der Empfindlichkeitsfunktion. Diese wird als *isophote Wellenlänge* bezeichnet und liegt etwa in der Mitte des Empfindlichkeitsbereiches.

Da bei Sternen höherer Temperatur die Strahlung im Blauen und Ultravioletten stärker ist als die Strahlung im Roten, während bei Sternen mit kühleren Oberflächen die letztere mehr hervortritt (analog zu einem *Schwarzkörper-Strahler*), werden im photographischen System die heißen (bläuliche) Sterne heller, im visuellen System, dessen isophote Wellenlänge größer ist, die kühleren (rötlicher) Sterne heller erscheinen. Man kann also die Helligkeitsdifferenzen zwischen verschiedenen Systemen als ein generelles Maß für die Farbe und damit für die Energieverteilung im Spektrum verwenden. Eine derartige Differenz wird als *Farbindex FI* bezeichnet. Dieser ist definiert durch die nachfolgende Gleichung A.6:

$$\text{Farbindex} = FI = \text{mag}_{\text{kurzwellig}} - \text{mag}_{\text{langwellig}} = -2,5 * \lg \left(\frac{F_{\text{kurzwellig}}}{F_{\text{langwellig}}} \right)$$

(Gleichung A.6)

Durch Farbindices werden also Intensitätsverhältnisse im kontinuierlichen Spektrum beschrieben. Die Möglichkeit durch relativ einfache und genaue photometrische Messungen Informationen über die Energieverteilung in den Spektren der Sterne zu erhalten, hat zur Entwicklung zahlreicher photometrischer Systeme geführt, wobei man sich bemühte, durch geeignete Kombinationen von Filtern und Strahlungsempfängern solche Empfindlichkeitsfunktionen zu erzielen, die sich wenig überlappen und welche den gesamten beobachtbaren Spektralbereich möglichst gut überdecken. Besonders das *Johnsonsche UBV-System*, das auch durch eine Kombination von Filtern mit entsprechend sensibilisierten photographischen Platten realisiert werden kann, hat eine weite Verbreitung gefunden [Schaifers 1984].

A.4 Sternkataloge

Die große Anzahl der lichtschwächeren oder sogar nur teleskopisch erfaßbaren Sterne zwingt zur Anlegung von indizierten *Sternkatalogen* [Schaifers 1994, Herrmann 1996]. In diesen datenbankähnlichen Verzeichnissen werden nicht nur die Himmelskoordinaten von Sternen in zumeist zweidimensionalen (sphärischen) äquatorialen Himmelskoordinaten mittels Rektaszension α und Deklination δ angegeben, sondern zumindest die auch deren Helligkeit. Gebräuchliche Sternkataloge sind zum Beispiel:

- Bonner Durchmusterung
- Cordoba Durchmusterung
- Smithsonian-Astrophysical-Observatory Sternkatalog (SAO-Sternkatalog)
- SKYMAP-Sternkatalog
- Positions and Proper Motion Sternkatalog (PPM-Sternkatalog)
- Hubble-Guide Sternkatalog (GSC-Sternkatalog)
- Henry-Draper Sternkatalog

Um 1855 begann F.W. Argelander (1799-1875) an der Bonner Sternwarte mit der genäherten Ortsbestimmung aller Sterne zwischen dem Nordpol des Himmels und einer Deklination von $\delta=-2^\circ$. Der nach sieben Jahren und innerhalb insgesamt 625 Beobachtungsnächten vollendete Katalog namens *Bonner Durchmusterung* enthält 324198 Sterne, darunter sämtliche Sterne bis zur Helligkeit von $mag=9$ und viele bis zu $mag=10$. Argelanders Nachfolger Schönfeld setzte dieses Werk bis zur Deklination von $\delta=-23^\circ$ fort. Im Unterschied zu Argelanders Bonner Durchmusterung wird dieser Sternkatalog *Südliche Bonner Durchmusterung* genannt. Dieser enthält weitere 133659 Sterne. Thome und seine Mitarbeiter unternahmen in Cordoba (Argentinien) die Ausdehnung dieser Durchmusterung bis hin zum äquatorialen Südpol ($\delta=-90^\circ$). Das Ergebnis war die *Cordoba Durchmusterung*. Allein die Anzahl der in Cordoba aufgenommenen Sterne beträgt rund 580000 Sterne.

Da die älteren Durchmusterungskataloge vollständig nur noch schwer zu erhalten waren, hat man in jüngster Zeit Sternverzeichnisse mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung aus einer größeren Anzahl von Katalogen zusammengetragen oder auch auf elektronischem Wege automatisch erstellt. Einer dieser Sternkataloge ist der *SAO-Sternkatalog*, der am *Smithsonian-Astrophysical-Observatory* in Cambridge (Massachusetts, USA) erstellt wurde. Der SAO-Sternkatalog enthält die Positionen und Eigenbewegungen von 258942 Sternen. Auch werden für fast alle Sterne die scheinbaren visuellen Helligkeiten, für ca. 50% aller Sterne deren photographische Helligkeiten und für 83% der Spektraltyp angegeben. Aus diesem Katalog lassen sich ebenfalls auch die Durchmusterungsnummern der Bonner- und der Cordoba-Durchmusterung entnehmen. Die Sternpositionen sind im SAO-Sternkatalog auf die jeweiligen Positionen des Jahres 1950 (Epoche 1950.0) festgeschrieben.

Der *SKYMAP-Sternkatalog* ist eine Weiterentwicklung des SAO-Sternkatalogs (jedoch bezogen auf die Epoche 2000.0) und beinhaltet etwa 255000 Sterne bei vollständiger Himmelsabdeckung bis zu einer visuellen Helligkeit von $mag=9$. Informationen über den Spektraltyp und Farbindices von Sternen sind fast vollständig angegeben, so auch die des *Johnsonschen UBV-Systems*. Daher ist der SKYMAP-Sternkatalog als Werkzeug für spektrale Kalibrierungen besonders gut geeignet [Gottlieb 1978].

Der *Positions and Proper Motion*- und der *Hubble-Guide-Sternkatalog* sind die jüngsten Kataloge ihrer Art mit enormem Datenumfang und sehr genauen Angaben zur Eigenbewegung von Sternen. Daher sind diese Kataloge für hochpräzise Positions- und Lagebestimmungen gedacht, wie z.B. der Ausrichtung des *Hubble-Space-Teleskops* und auch als Hilfsmittel zur genauen Positionsbestimmung von Himmelsobjekten in der Astronomie.

Der *Henry-Draper-Sternkatalog* ist ein Spezialkatalog der Astrophysik. Er enthält neben den oben erwähnten Angaben für jeden aufgeführten Stern dessen Spektralklasse mit zusätzlichen Angaben zu den auch als *Zustandsgrößen* bezeichneten physikalischen Eigenschaften der Sterne. Dazu mußten die Spektren der Objekte in Handarbeit hinsichtlich der Lage und Intensität vorhandener Spektrallinien untersucht und vermessen werden.

Ähnlich wie bei den Sternen ist auch die Benennung eines nicht-sternartig leuchtenden Objekts an der Himmelskugel üblich, etwa die von Sternhaufen, Nebeln und Galaxien. Erst seit Anfang des 20. Jahrhunderts ist jedoch die wahre Natur der einzelnen Himmelsobjekte, insbesondere die der Galaxien, bekannt. Deshalb enthalten frühere Kataloge ein Gemisch verschiedenster Nebeltypen. Die Angabe einer Katalognummer besagt im allgemeinen nichts über die Art des Objektes. In Gebrauch sind in erster Linie drei Kataloge:

- Messier-Katalog
- New-General-Katalog (NGC-Katalog)
- Index-Katalog (IC-Katalog)

Die von Charles Messier (1730-1817) aufgestellte und teilweise fehlerhafte Nebelliste, der *Messier-Katalog*, enthält 103 Objekte. Ferner ist der von A.J. Dreyer (1852-1926) bearbeitete Katalog mit über 6000 Nebeln und Sternhaufen in Gebrauch, der *New-General-Catalog of Nebulae and Clusters* (NGC-Katalog). Eine spätere Ergänzung des NGC-Katalogs ist der *Index-Catalog* (IC-Katalog).

A.4.1 SAO-Sternkatalog

Für diese Dissertation wurde der *SAO-Sternkatalog* als Basis-Sternkatalog ausgewählt. Der einfach aufgebaute SAO-Sternkatalog ist mittlerweile über das *Internet* frei erhältlich und enthält zumindest alle Sterne, die von der CCD-Sternenkamera (Anhang B) aufgenommen werden können, sowie darüber hinausgehend auch noch erheblich lichtschwächere Sterne als vom benutzten Halbleitersensor (bedingt durch kurze Belichtungszeit und lichtschwache Optik) detektiert werden können. Der SAO-Sternkatalog wurde Anfang der sechziger Jahre zusammengestellt und zum wesentlichen Teil von der NASA finanziert, die erstmals im großen Umfang Sternpositionen zur Bestimmung und Überwachung der Umlaufbahnen ihrer Satelliten benötigte. Die durch die Eigenbewegung bedingten Winkelabweichungen der aufgeführten Himmelskoordinaten der Sterne des SAO-Sternkatalogs von deren wahren Position betragen im Mittel etwa $p=1,2arcsec$, bezogen auf das Äquinoktikum 2000.0 gegenüber dem ursprünglichen Äquinoktikum 1950.0 [Bastian 1991]. Die daraus bedingten Fehler mögen für die höher winkelauflösende astronomische Forschung mittlerweile zu groß sein, weshalb bereits verbesserte Nachfolgekataloge, wie z.B. der im vorherigen Kapitel erwähnte Heidelberger PPM-Sternkatalog, realisiert wurden. Die Weitwinkeloptik der im Rahmen dieser Arbeit benutzten CCD-Sternenkamera mit einer Brennweite von $f=25,84mm$ und $d=23\mu m$ Kantenlänge messenden CCD-Pixeln besitzt folglich ein geringes Auflösungsvermögen von ca. $p=180arcsec$ (siehe auch Anhang B). Die folglich recht niedrigen Genauigkeitsanforderungen an den zu benutzenden Sternkatalog werden vom SAO-Sternkatalog immer noch sehr gut erfüllt.

Die Verteilung der Sterne innerhalb des SAO-Sternkatalogs in Abhängigkeit von Helligkeit bzw. Magnitude zeigt die nachfolgende Aufstellung (Tabelle A.1). Alle Sterne bis zu $mag=8,5$ sind vollständig erfaßt, sowie eine Auswahl schwächerer Sterne bis zu $mag=12,9$.

Magnitudenintervall	Anzahl der Sterne	kumulierte Anzahl der Sterne
$mag < 1,0$	12	12
$1,0 \leq mag < 2,0$	24	36
$2,0 \leq mag < 3,0$	100	136
$3,0 \leq mag < 4,0$	291	427
$4,0 \leq mag < 4,5$	337	764
$4,5 \leq mag < 5,0$	606	1370
$5,0 \leq mag < 5,4$	1156	2526
$5,4 \leq mag < 5,7$	1055	3581
$5,7 \leq mag < 6,0$	899	4480
$6,0 \leq mag < 7,0$	9697	14177
$7,0 \leq mag < 8,0$	24814	38991
$8,0 \leq mag < 9,0$	113489	152480
$9,0 \leq mag < 10,0$	100492	252972
$10,0 \leq mag < 11,0$	4464	257436
$11,0 \leq mag < 12,0$	39	257475
$12,0 \leq mag < 13,0$	1467	258942

Tabelle A.1: Helligkeitsverteilung von Sternen innerhalb des SAO-Sternkatalogs

Es wurde im Rahmen dieser vorliegenden Arbeit auch eine Software erstellt, die eine Aufbereitung (*MAKE-CAT*) und Visualisierung (*DISPLAY*) der Originaldaten des SAO-Sternkatalogs erlaubt (Kapitel 3.1), um diese der Software zur Sternmustererkennung (Programmpaket *MATCH-IT*) zugänglich zu machen. Das sich neu ergebende Datenformat entspricht dem *floating-point* Format mit 32-Bit-Kodierung je Dateneintrag. Es kann eine Auswahl hinsichtlich der maximalen Magnitude vorgenommen werden, um eine Anpassung an die Sensitivität der CCD-Sternenkamera zu erreichen. Außerdem kann optional eine Separierung in verschiedene Deklinationsbereiche vorgenommen werden. Standardmäßig werden jedoch Sternkataloge erstellt, die den Himmel vollständig abdecken, um das *lost-in-space* Szenario bearbeiten zu können (Tabelle A.2).

Die aufbereiteten Sternkataloge enthalten grundsätzlich kein explizites Wissen über mögliche Sternmuster, sondern ausschließlich Angaben über die Himmelskoordinaten (Rektaszension α und Deklination δ zu je vier Byte = acht Byte je Eintrag) und Helligkeiten von Sternen (Magnitude *mag* zu vier Byte je Eintrag). Zur Rekonstruktion aller sinnvoll möglichen Sternkonfigurationen werden jedoch nur die Koordinatenangaben benutzt (siehe Kapitel 6).

Sternkatalogname	Magnitudengrenze	Anzahl der Sterne	Datenumfang (Byte)
<i>uptomag_1.0</i>	<i>mag<1,0</i>	12	144
<i>uptomag_2.0</i>	<i>mag<2,0</i>	36	432
<i>uptomag_3.0</i>	<i>mag<3,0</i>	136	1632
<i>uptomag_4.0</i>	<i>mag<4,0</i>	427	5124
<i>uptomag_4.5</i>	<i>mag<4,5</i>	764	9168
<i>uptomag_5.0</i>	<i>mag<5,0</i>	1370	16440
<i>uptomag_5.4</i>	<i>mag<5,4</i>	2526	30312
<i>uptomag_5.7</i>	<i>mag<5,7</i>	3581	42972
<i>uptomag_6.0</i>	<i>mag<6,0</i>	4480	53760

Tabelle A.2: Übersicht der Unterteilungen des SAO-Sternkatalogs, die vom implementierten Verfahren zur Erkennung von Sternmustern benutzt werden

A.5 Sternbilder, Sternnamen und Sternmuster

Betrachtet man den Sternhimmel mit der Absicht, Ordnung in die Vielfalt der Erscheinungen zu bringen, so bemerkt man neben den verschiedenen Helligkeiten der Sterne gewisse auffällige Konstellationen heller Sterne, die sich zu geometrischen Figuren - den *Sternbildern* - ergänzen und zusammensetzen lassen, wie z.B. bei *Ursa Major* oder dem *Orion*. Schon in frühgeschichtlichen Kulturkreisen, etwa in China oder bei den Assyrern und Babyloniern, dürften so die ersten Zusammenfassungen zu Sternbildern erfolgt sein. Spätere Kulturvölker wie die Griechen und dann die Araber setzten diesen Brauch fort und überlieferten die Einteilung des Himmels in Sternbildregionen. Da seinerzeit Priesteramt und Himmelskunde in einer Person vereint waren, ist die mythologische Namensgebung für die Sternbilder verständlich [Fasching 1997]. Noch heutzutage wird in der wissenschaftlichen Astronomie der Ort von Himmelsobjekten zur groben Beschreibung ihrer Lage an der Himmelskugel durch die Nennung der Sternbildregion angegeben. 1925 fand durch die *Internationale Astronomische Union* (IAU) eine für alle Nationen verbindliche Festlegung von 88 Sternbildern, sowie deren jeweils an der Himmelskugel beanspruchten Sternbildregion (mit den Sternbildgrenzen) statt. Für exakte Positions- bzw. Lageangaben werden die zuvor beschriebenen Koordinatensysteme benutzt.

Neben den Sternbildnamen waren früher auch vielfach Eigennamen für die Sterne in Gebrauch. Heute sind nur noch die Namen für einige helle Sterne allgemein bekannt. Meist sind diese Namen arabischen Ursprungs. Auf Vorschlag von Bayer (zu Anfang des 17. Jahrhunderts) wurde für die hellen Sterne bis hin zur visuellen Helligkeit von $mag=4,0$ ein einheitliches Benennungssystem eingeführt und zwar mit Hilfe der kleinen griechischen Buchstaben und der Sternbildnamen, wobei die Buchstabenfolge $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ usw. ungefähr auch die Helligkeitsfolge innerhalb des Sternbildes bezeichnet.

Unter dem Begriff *Sternmuster* wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch ein von den klassischen Sternbildern unabhängiges Muster von Sternen verstanden, das auf der Abbildungsebene der CCD-Sternenkamera vorliegt und durch automatische Auswahl der jeweils bis zu sechs hellsten Sternen erfolgt. Sollte das Sternmuster mit einem der oben erwähnten 88 Sternbildern identisch sein, so hat dies rein zufälligen Charakter.

Anhang B

B Aspekte zur Auslegung eines Bildaufnehmersystems (CCD-Sternenkamera)

Ein wichtiger Aspekt des bildverarbeitenden Systems zur Sternmustererkennung ist die *Qualität* der eingehenden Bilddaten, die in der Praxis und bei dem heutigen Stand der Technik durch eine spezielle *Sternenkamera* mit einem Bildaufnehmersensor der *Charged-Coupled-Device* (CCD) Halbleitertechnik sichergestellt werden muß [Reichl 1989, Buil 1991, DALSA 1995]. Der Begriff *Bildqualität* bedeutet im Rahmen der vorliegenden Arbeit zum einen, daß eine gewisse Mindestanzahl von Sternen zur Bildung von Sternmustern herangezogen werden muß, um eine möglichst eindeutige Identifizierung des zu erkennenden Sternmusters zu gewährleisten. Dieser Umstand ist anhand der in den Kapiteln 6, 7 und 8 dargelegten Ergebnisse deutlich zu sehen. Zum anderen sollten sich die Sterne innerhalb des Bereichs der *Grauwertdynamik* des Bildaufnehmers deutlich vom Hintergrund abheben, was in erster Linie durch die auf natürlichem Weg gegebene Tatsache der vor dem dunklen Himmelshintergrund befindlichen helleren Sterne gegeben ist (Kapitel 5). Als vereinfachende Annahme wird jedoch vorausgesetzt, daß sich keine extrem hellen Himmelsobjekte, wie Sonne, Erde oder Mond im Gesichtsfeld der Kamera befinden dürfen, zumal die hier vorgestellte Kamera in diesem Fall unbrauchbare Bilder wegen fehlender *Anti-Blooming* Maßnahmen liefern würde. Objekte wie Sonne, Erde und Mond lassen sich, falls erforderlich, durch Techniken der *Bereichsegmentierung* [Jähne 1995] und entsprechender *Bereichseigenschaften* von Objekten wie Sterne und Planeten trennen (Kapitel 5). Planeten können gegebenenfalls mit ihren aktuellen *Ephemeriden* bzw. Himmelskoordinaten den Sternkatalog dynamisch ergänzen.

Die Anzahl n der auf einer Himmelsaufnahme abgebildeten Sterne ist primär abhängig von:

- Winkel des auch *field-of-view* (fov) genannten abgebildeten Himmelsausschnitts
- Empfindlichkeit des CCD-Sensors, beschrieben durch die Grenzhelligkeit $mag_{CCD-max}$

Die Größe des *field-of-views* (Bild B.1) ist wiederum abhängig von:

- Brennweite f der abbildenden Optik
- Absolute Größe B des CCD-Bildaufnehmersensors des effektiv genutzten Abbildungsbereichs innerhalb der Bildebene

Die Grenzhelligkeit $mag_{CCD-max}$ wird hauptsächlich bestimmt durch:

- Eigenschaften der abbildenden Optik, wie Durchmesser und Transmissionsverhalten
- Belichtungszeit T
- physikalische Grundempfindlichkeit des CCD-Flächensensors
- Eigenschaften der Kameraelektronik

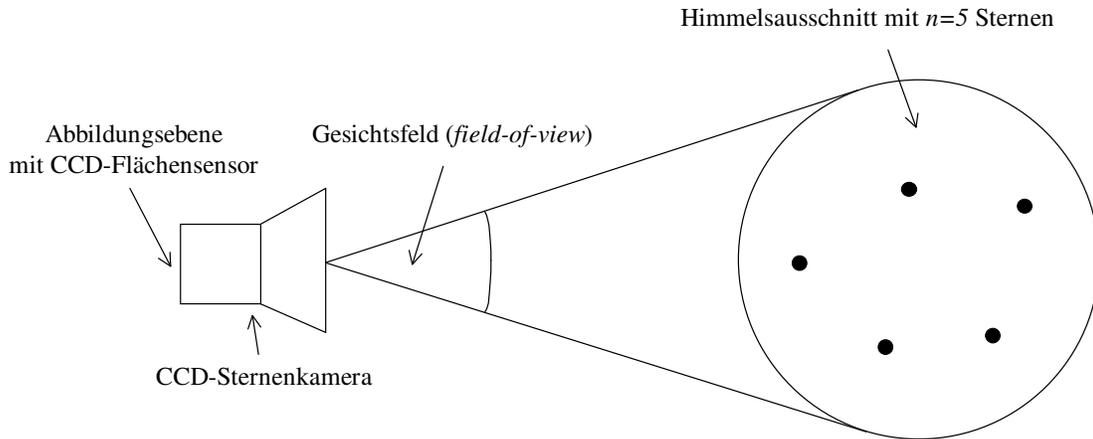


Bild B.1: CCD-Sternenkamera mit abgebildetem Himmelsausschnitt (*field-of-view*)

Ein CCD-Bildaufnehmersensor ist im allgemeinen realisiert durch einen örtlich gerasterten und aus Silizium bestehenden Halbleiterchip mit möglichst quadratischen Abmessungen je Pixelelement und rechteckigen Abmessungen, bezogen auf die absolute Gesamtfläche des Halbleiterflächensensors. Legt man z.B. den aus der Videotechnik bekannten CCD-Bildsensor *TH-7863A* der Firma *Thomson* zugrunde, der auch gleichzeitig Grundlage der am ZARM-Institut entwickelten CCD-Sternenkamera ist und mit der auch alle im Rahmen der vorliegenden Dissertation benutzten realen Himmelsaufnahmen gewonnen worden, so gilt eine quadratische Abmessung je Pixelelement zu $d=23 \times 23 \mu\text{m}$ und eine absolute Anzahl von $n_p=384$ Pixeln in x-Richtung und $n_p=288$ Pixeln in y-Richtung [Offterdinger 1993]. Die Abbildungsebene des CCD-Bildaufnehmers wird als ein Ausschnitt der Tangentialebene angesehen, die die Himmelskugel in der Bildmitte (Position der optischen Achse bzw. 2-axialen Lage) berührt.

Bei Hinzuziehung einer abbildenden Optik ohne extreme Weitwinkelwirkung können optische Abbildungsfehler, insbesondere die der nichtlinearen geometrischen Verzeichnung (z.B. bedingt durch *Bildfeldwölbung*), vernachlässigt werden [Kuchling 1988, Schröder 1984]. Die in der Praxis stets vorhandenen minimalen Abbildungsfehler werden durch die primär für das Verfahren der Sternmustererkennung (Kapitel 6) benötigte Winkeltoleranz (*angle_tolerance*) automatisch kompensiert [Kosolov 1997]. Ausgehend von der vereinfachenden Annahme einer *Winkelabstandstreue* in der Abbildungsebene läßt sich zwischen zwei realen Sternen 1 und 2 ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Gegenstandsgröße G bzw. dem Winkelabstand $angle_distance_{is_1 \leftrightarrow is_2}$ und der Bildgröße B bzw. dem Pixelabstand $pixel_distance_{is_1 \leftrightarrow is_2}$ der beiden Bildsterne is_1 und is_2 in der Abbildungsebene herstellen (Bild B.2). Die Verknüpfung erfolgt durch Multiplikation mit dem *Winkel-zu-Pixel* Umrechnungsfaktor *angle_per_pixel*:

$$angle_distance_{is_1 \leftrightarrow is_2} = angle_per_pixel * pixel_distance_{is_1 \leftrightarrow is_2}$$

(Gleichung B.1)

Für den Zusammenhang zwischen zwei unter einem Winkelabstand p abzubildenden Gegenstandspunkte in der Entfernung g , der Brennweite f des abbildenden Objektivs, der Bildgröße B und der Bildweite b gilt aus der *Abbildungsgleichung* (Gleichung B.3) folgend:

$$B=2*f*\tan\left(\frac{p}{2}\right)$$

(Gleichung B.2)

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

(Gleichung B.3)

Zur Vereinfachung der Abbildungsgleichung (Gleichung B.3) können bei astronomischen Objekten diese quasi als in der *Unendlichkeit* befindlich angenommen werden, was zur Folge hat, daß g gegen *Unendlich* geht ($g \rightarrow \infty$) und b der Brennweite f gleichzusetzen ist ($b \rightarrow f$). Bei einer Brennweite von $f=25,84\text{mm}$ (entsprechend der Brennweite des zur Verfügung stehenden Objektivs der Firma *Tarcus*) und einer Bildgröße von $B=23\mu\text{m}$ (entsprechend der Größe eines Pixelelements des CCD-Bildsensors *TH-7863A*) ergibt sich ein Winkel von $p=0,051^\circ$. Dies ist gleichermaßen der Wert für den Umrechnungsfaktor *angle_per_pixel* der benutzten CCD-Sternenkamera. Auch charakterisiert *angle_per_pixel* das maximale Auflösungsvermögen der CCD-Sternenkamera und stellt somit auch die maximale Genauigkeit bei der Parameterbestimmung der 2-axialen Lage (α_{att} , δ_{att}) dar. Durch Techniken der *Subpixel-Interpolation* läßt sich dieser Wert noch erheblich verbessern [Stanton 1993]. Diesem Aspekt wird aber im Rahmen dieser Dissertation nicht weiter nachgegangen.

Der Flächensensor der hier benutzten CCD-Sternenkamera bildet folglich einen Himmelsausschnitt von $fov=19,6^\circ$ in x-Richtung (384 Pixel), $fov=14,69^\circ$ in y-Richtung (288 Pixel) und $fov=24,48^\circ$ (480 Pixel) in der Bilddiagonalen ab. Überschlagsmäßig kann somit ein *field-of-view* von etwa $fov=20^\circ$ zugrunde gelegt werden. Ausserdem zeigen die Beispiel-Himmelsaufnahmen innerhalb der Kapitel 6, 7 und 8 daß eine Anzahl von $n=6$ Sternen im Maximum zur Bildung des zu erkennenden *n-Sterne-Musters* für eine eindeutige Identifikation mit hoher Wahrscheinlichkeit hinreichend groß ist (Erfolgsquote $\eta=99,7\%$, siehe Kapitel 8.8), falls die Empfindlichkeit der CCD-Sternenkamera bis zu einer Grenzhelligkeit von $mag_{\text{CCD-max}}=5,4$ reicht und demzufolge der für die Sternmusteridentifikation benötigte Sternkatalog bis zur Helligkeit vom $mag=5,4$ reicht (Datei *uptomag_5.4* mit *number_cs=2526* Sterneinträgen bei vollständiger Himmelsabdeckung). Eine hieraus ableitbare Verallgemeinerung für eine eindeutige Sternmustererkennung ist jedoch nicht möglich, wie die Simulationen in Kapitel 8 zeigen.

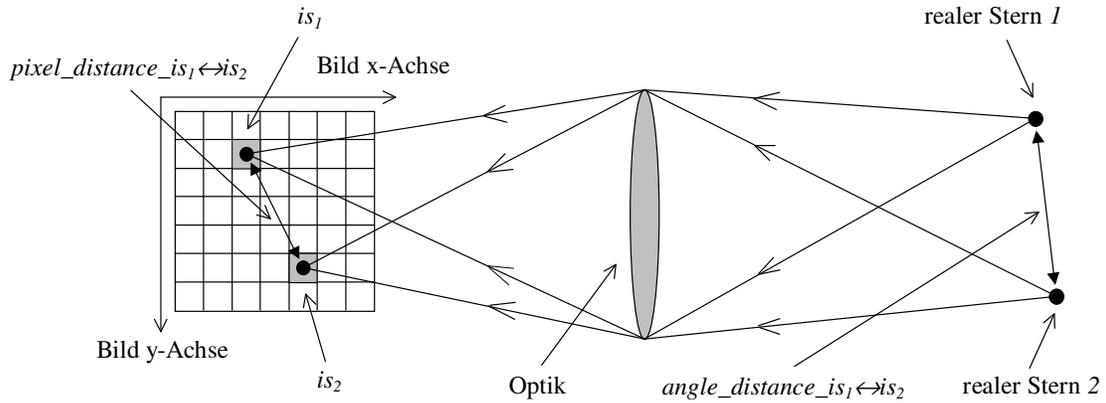


Bild B.2: Abbildung zweier realer Sterne 1 und 2 als Bildsterne is_1 und is_2 auf dem gerasterten Flächensensor der CCD-Sternenkamera

Eine allgemein gültige Aussage über eine *optimale* CCD-Sternenkamera kann grundsätzlich nicht getroffen werden. Stets muß eine Anpassung der Kameraparameter an deren Einsatzerfordernisse durchgeführt werden, damit die durch die CCD-Sternenkamera gelieferten Himmelsaufnahmen mindestens so viele Sterne beinhalten, daß der Algorithmus zur Sternmustererkennung sich eines solchen Sternkatalogs bedienen kann, der eine eindeutige Identifizierung des vorgegebenen Sternmusters mit hoher Wahrscheinlichkeit ermöglicht. Ebenfalls sei auf das Problem der *spektralen Kalibrierung* hingewiesen, dessen Lösung auch kameraindividuell durchgeführt werden muß [Strunz 1994]. Bezogen auf ein definiertes Himmelsobjekt, kann das Empfinden von Helligkeitsintensitäten der CCD-Sternenkamera stark von den entsprechenden Helligkeitseinträgen des Sternkatalogs abweichen, da die Werte der Farbindices $FI_{CCD-Sternenkamera}$ und $FI_{SAO-Sternkatalog}$ im allgemeinen unterschiedlich sind (siehe auch Anhang A.3). Eine Abweichung von etwa $\Delta mag=0,5$ ist bei der vorliegenden CCD-Sternenkamera gegenüber dem entsprechenden Helligkeitseintrag des benutzten SAO-Sternkatalogs durchaus möglich. Dieser Effekt ist jedoch relativ einfach durch einen entsprechenden *overhead* des Sternkatalogs kompensierbar, so geschehen im Rahmen dieser Arbeit. Das führt aber automatisch zu längeren aber nicht unbedingt notwendigen Rechenlaufzeiten des Algorithmus zur Sternmustererkennung. Es wird daher empfohlen, bei einer *on-board* Anwendung während einer Satellitenmission den Sternkatalog an das Helligkeitsempfinden der CCD-Sternenkamera unter Weltraumbedingungen spektral anzupassen, um einen *minimalen* Sternkatalog auslegen zu können. Hierfür sind jedoch umfangreiche Testkampagnen nötig.

Die Tabellen B.1 bis B.4 geben einen Überblick über die Anzahl n von Sternen innerhalb eines kreisförmig angenommenen Gesichtsfelds (siehe auch Bild B.1) und bei Variation verschiedener Parameter. Tabelle B.3 gibt in guter Näherung die Empfindlichkeit der hier benutzten CCD-Sternenkamera wieder ($mag_{CCD-max}=5,0$, siehe auch Kapitel 7). Zum Beispiel ergibt sich bei einem Gesichtsfeld von $fov=20^\circ$ für $n \geq 5$ ein Flächengebiet von 92,61% (Summe aus: $n=5$, $n=6$ und $n>6$) der gesamten Himmelskugel, das mit minimal fünf Sternen im Gesichtsfeld eine eindeutige Erkennung eines n -Sterne-Musters mit hoher Wahrscheinlichkeit ermöglichen sollte.

Die Bilder B.4 bis B.15 zeigen eine Auswahl graphischer Darstellungen der farbkodierten (gemäß der Farbkodierung aus Bild B.3) Anzahl von Sternen im Gesichtsfeld bzw. innerhalb der das n -Sterne-Muster beinhaltenden Bildvorlage bei Festhalten verschiedener Parameter und Variation der Ausrichtung der CCD-Sternenkamera über den gesamten Himmel. Hierbei korrespondiert das Bild B.11 mit den Einträgen für $fov=20^\circ$ der Tabelle B.3. Zur graphischen Visualisierung wurde die *Zylinderprojektion* gewählt mit nach oben aufgetragener Deklination δ . Der obere Bildrand entspricht dem Himmelsnordpol mit $\delta=+\pi/2$, und der untere Bildrand entspricht dem Himmelsüdpol mit $\delta=-\pi/2$. Die Himmelskugel ist über die Rektaszension α von rechts ($\alpha=0h=24h$) nach links ($\alpha=24h=0h$) mit wachsendem α abgerollt. Deutlich ist die Häufung von Sternen innerhalb des *Milchstraßenbandes* zu sehen.

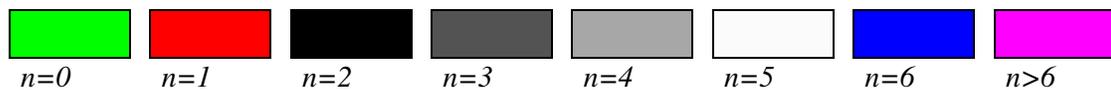


Bild B.3: Farbkodierung der Sternenzahl n im *field-of-view* (siehe Bilder B.4 bis B.15)

	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
$n=0$	93,78	78,55	59,44	40,66	25,41	14,48	7,92	4,05	1,71	0,76
$n=1$	5,99	17,87	28,55	33,89	31,75	25,16	16,31	9,69	5,41	2,43
$n=2$	0,19	2,91	8,41	15,43	22,55	26,15	25,41	18,95	13,37	8,30
$n=3$	0,03	0,54	2,17	4,98	9,19	13,54	16,51	18,37	14,36	10,94
$n=4$	-	0,13	1,02	2,78	4,33	7,64	12,14	15,24	16,64	13,28
$n=5$	-	0,01	0,29	1,48	3,55	4,73	6,63	9,99	12,82	13,63
$n=6$	-	0,01	0,09	0,45	1,75	3,29	4,29	5,77	8,74	12,01
$n>6$	-	-	0,04	0,33	1,48	5,02	10,78	17,94	26,96	38,64

Tabelle B.1: Flächenprozentuale Sternenanzahl n im *field-of-view* bei $mag_{CCD-max}=3,0$ (Sternkatalog *uptomag_3.0*, 136 Sterne)

	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
$n=0$	82,24	47,51	20,94	7,72	2,28	0,34	0,01	-	-	-
$n=1$	15,54	33,28	28,86	15,26	6,86	2,39	0,51	0,02	-	-
$n=2$	1,93	12,90	23,87	21,00	10,85	4,77	1,21	0,25	0,01	-
$n=3$	0,25	4,10	13,18	19,33	15,47	8,63	3,66	0,67	0,07	-
$n=4$	0,04	1,43	6,17	13,84	15,96	10,39	5,21	1,66	0,27	-
$n=5$	0,01	0,58	3,29	7,94	12,74	12,25	7,49	2,94	0,57	0,03
$n=6$	-	0,17	1,69	5,22	9,84	11,63	9,60	5,27	1,33	0,15
$n>6$	-	0,03	2,00	9,69	26,01	49,60	72,32	89,19	97,76	99,81

Tabelle B.2: Flächenprozentuale Sternenanzahl n im *field-of-view* bei $mag_{CCD-max}=4,0$ (Sternkatalog *uptomag_4.0*, 427 Sterne)

	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
$n=0$	55,30	10,95	0,53	0,01	-	-	-	-	-	-
$n=1$	30,52	22,45	3,92	0,29	0,01	-	-	-	-	-
$n=2$	9,94	24,26	8,99	0,88	0,07	-	-	-	-	-
$n=3$	2,90	17,19	13,53	2,07	0,21	0,01	-	-	-	-
$n=4$	0,88	10,49	15,58	4,14	0,35	0,29	-	-	-	-
$n=5$	0,31	5,96	14,23	6,99	0,73	0,14	-	-	-	-
$n=6$	0,11	3,46	10,92	10,11	1,44	0,11	0,01	-	-	-
$n>6$	0,05	5,24	32,28	75,51	97,20	99,72	99,99	100	100	100

Tabelle B.3: Flächenprozentuale Sternenanzahl n im *field-of-view* bei $mag_{CCD-max}=5,0$ (Sternkatalog *uptomag_5.0*, 1370 Sterne)

	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
$n=0$	14,97	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-
$n=1$	27,19	0,60	-	-	-	-	-	-	-	-
$n=2$	24,13	2,01	-	-	-	-	-	-	-	-
$n=3$	15,95	4,90	0,01	-	-	-	-	-	-	-
$n=4$	8,92	7,98	0,04	-	-	-	-	-	-	-
$n=5$	4,43	10,35	0,10	-	-	-	-	-	-	-
$n=6$	2,13	11,50	0,30	-	-	-	-	-	-	-
$n>6$	2,28	62,67	99,55	100	100	100	100	100	100	100

Tabelle B.4: Flächenprozentuale Sternenanzahl n im *field-of-view* bei $mag_{CCD-max}=6,0$ (Sternkatalog *uptomag_6.0*, 4480 Sterne)

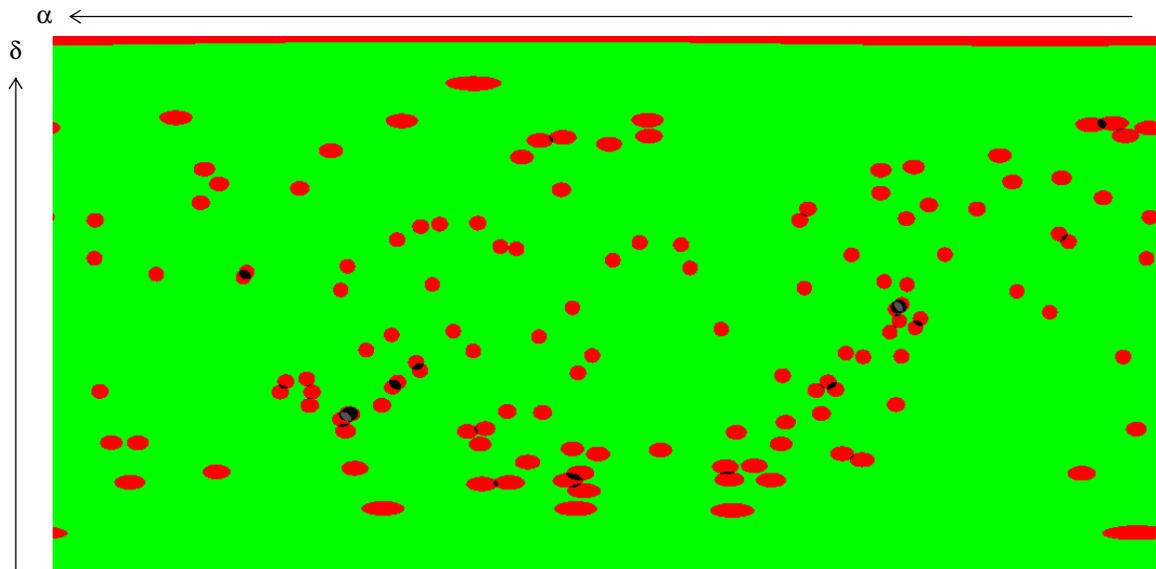


Bild B.4: Farbkodierte Sternenzahl n im Gesichtsfeld $fov=5^\circ$ bei $mag_{CCD-max}=3,0$



Bild B.5: Farbkodierte Sternenzahl n im Gesichtsfeld $fov=20^\circ$ bei $mag_{CCD-max}=3,0$

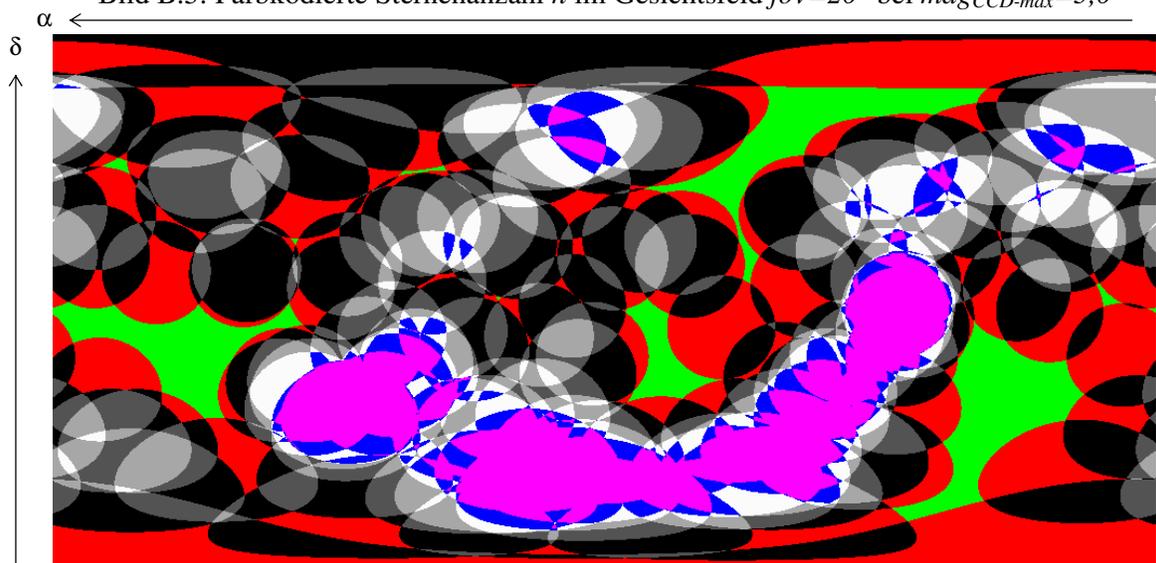


Bild B.6: Farbkodierte Sternenzahl n im Gesichtsfeld $fov=35^\circ$ bei $mag_{CCD-max}=3,0$

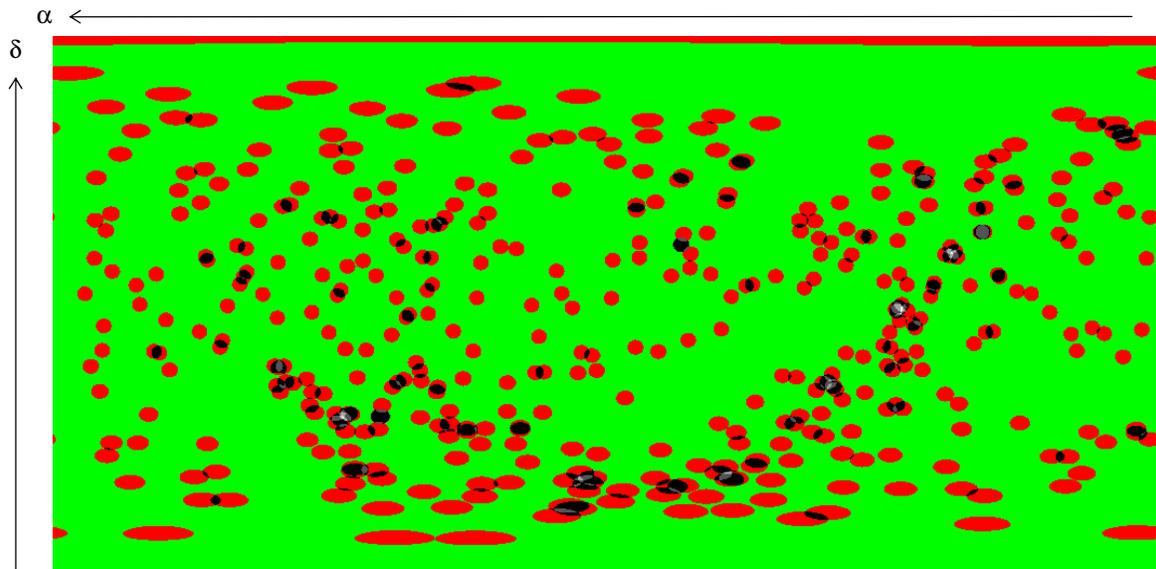


Bild B.7: Farbkodierte Sternenzahl n im Gesichtsfeld $fov=5^\circ$ bei $mag_{CCD-max}=4,0$

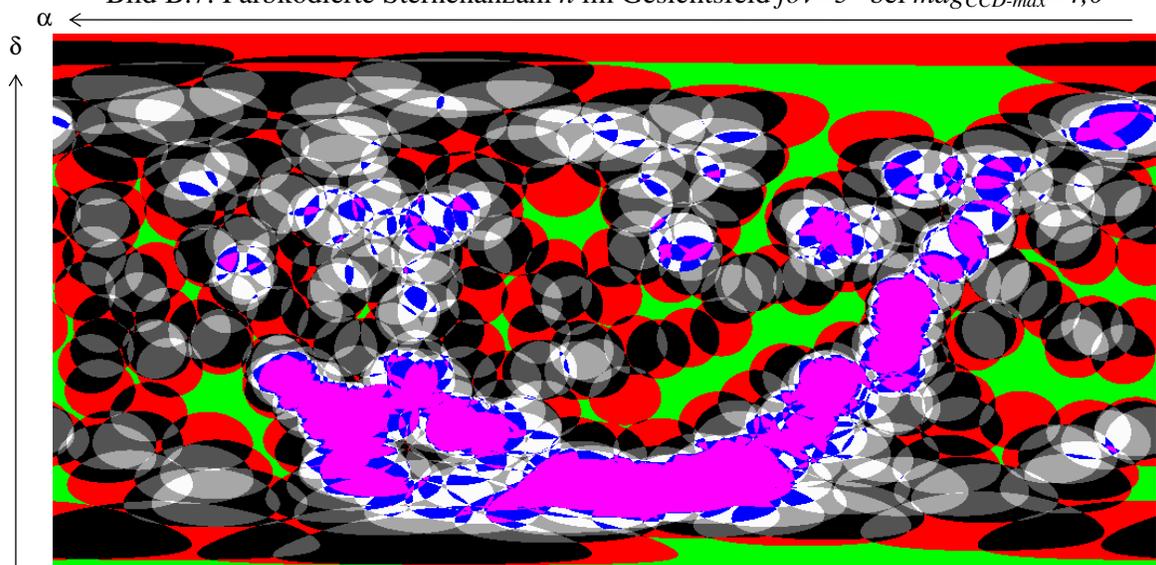


Bild B.8: Farbkodierte Sternenzahl n im Gesichtsfeld $fov=20^\circ$ bei $mag_{CCD-max}=4,0$

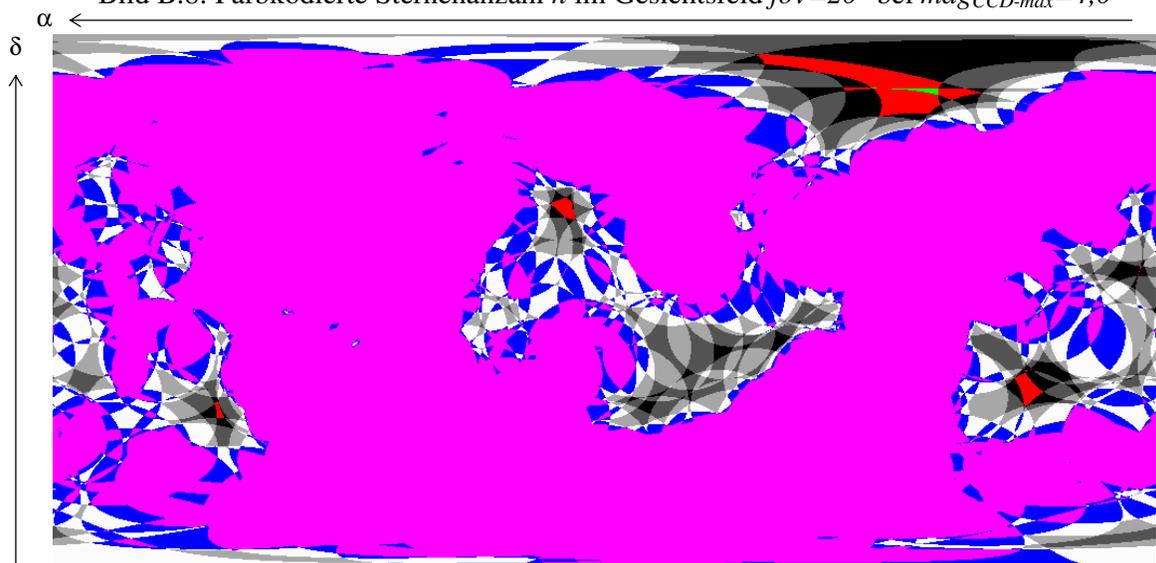


Bild B.9: Farbkodierte Sternenzahl n im Gesichtsfeld $fov=35^\circ$ bei $mag_{CCD-max}=4,0$

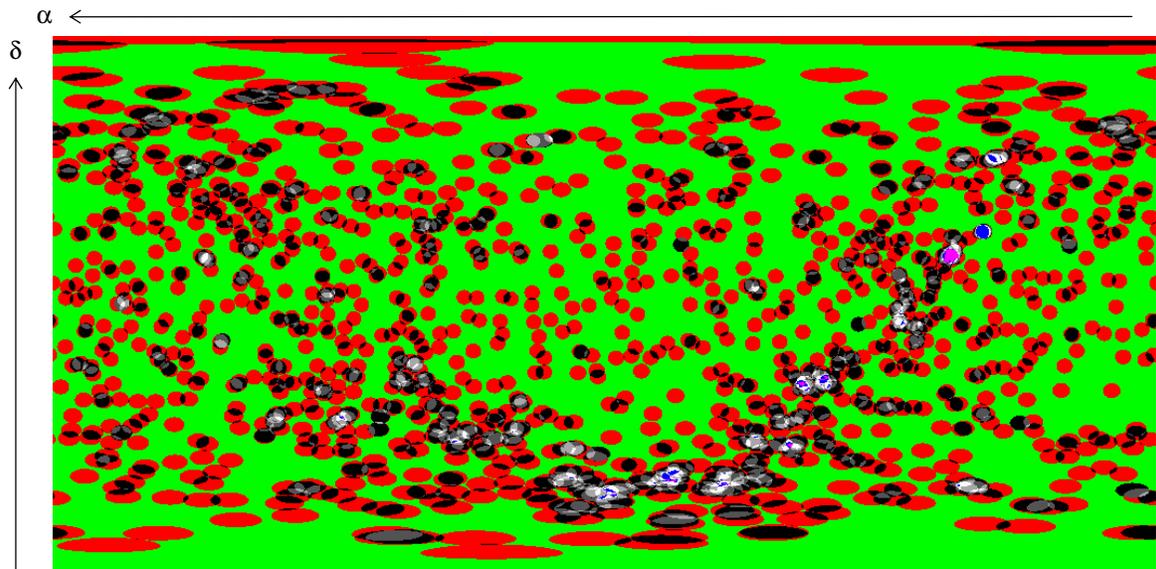


Bild B.10: Farbkodierte Sternenanzahl n im Gesichtsfeld $fov=5^\circ$ bei $mag_{CCD-max}=5,0$

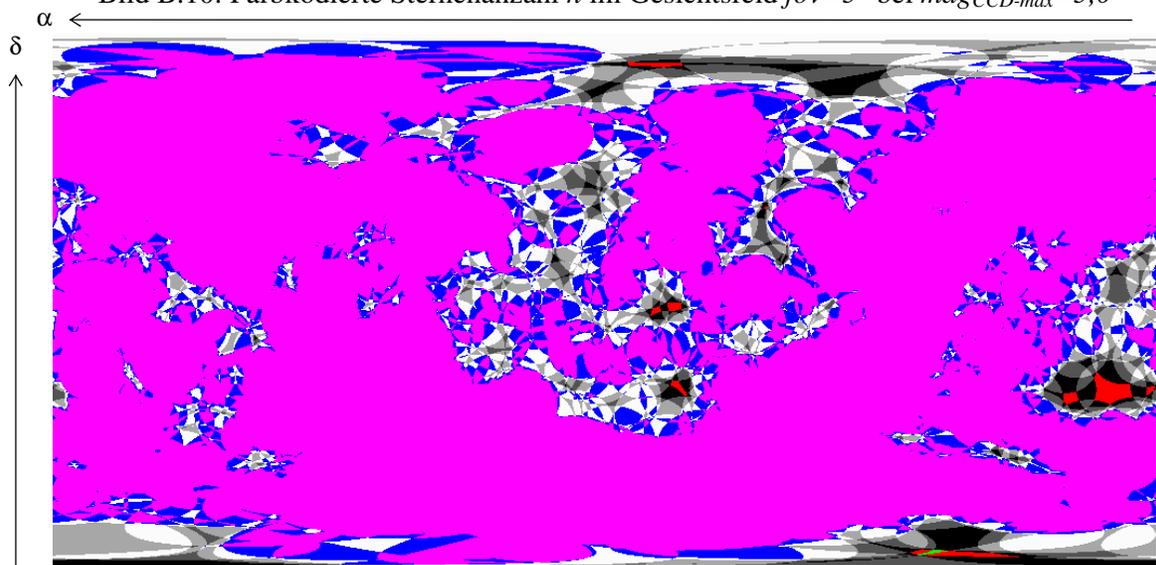


Bild B.11: Farbkodierte Sternenanzahl n im Gesichtsfeld $fov=20^\circ$ bei $mag_{CCD-max}=5,0$



Bild B.12: Farbkodierte Sternenanzahl n im Gesichtsfeld $fov=35^\circ$ bei $mag_{CCD-max}=5,0$

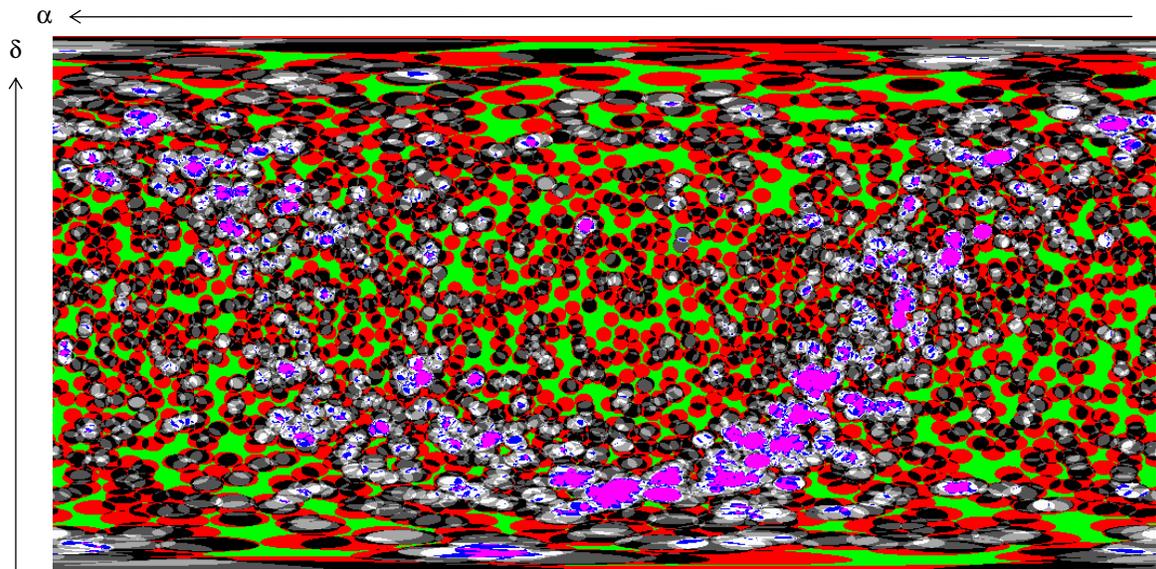


Bild B.13: Farbkodierte Sternenzahl n im Gesichtsfeld $fov=5^\circ$ bei $mag_{CCD-max}=6,0$

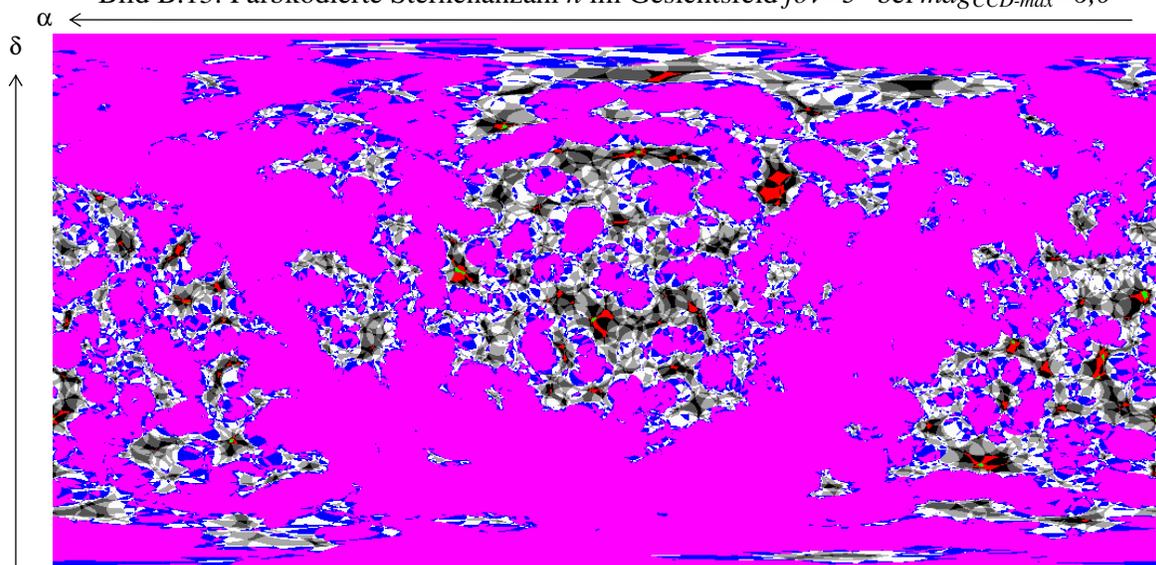


Bild B.14: Farbkodierte Sternenzahl n im Gesichtsfeld $fov=10^\circ$ bei $mag_{CCD-max}=6,0$

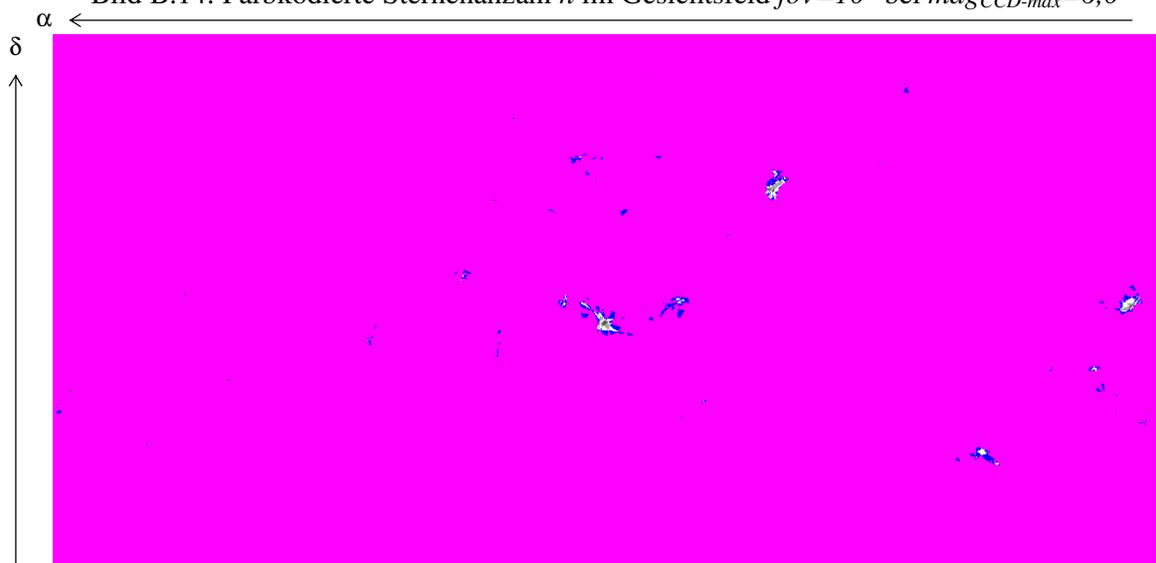


Bild B.15: Farbkodierte Sternenzahl n im Gesichtsfeld $fov=15^\circ$ bei $mag_{CCD-max}=6,0$

Angaben zum Verfasser

Hartmut Renken

15. Mai 1963 geboren in Bremen
1982 Abitur
1982 - 1983 Grundwehrdienst der Bundeswehr
1983 - 1986 Grundstudium des Wirtschaftsingenieurwesens an der TH Karlsruhe
1986 - 1992 Studium der Elektrotechnik in Bremen, Abschluß *Diplom-Ingenieur*
1987 - 1993 kaufmännische Tätigkeit, DV-Koordination, Programmierung und EDV-Schulung bei der Firma *Eduscho*, Bremen
1988 - 1992 Tätigkeiten als studentischer Mitarbeiter und Übungsleiter im Fachbereich *Physik/Elektrotechnik* an der Universität Bremen
1993 - 1997 wissenschaftlicher Mitarbeiter am *Institut für theoretische Elektrotechnik Mikroelektronik (ITEM)* und am *Zentrum für angewandte Raumfahrt-technologie und Mikrogravitation (ZARM)* an der Universität Bremen
1996 - 1998 Doktorand an der Universität Bremen, Abschluß *Dr.-Ing.*
seit 1986 Vortragstätigkeit am Bremer Planetarium
seit 1987 Dozent zu astronomischen und raumfahrttechnischen Themen im Bereich der Erwachsenenweiterbildung
seit 1998 selbständige Tätigkeit im Bereich der Verfahrens- und Softwareentwicklung für industrielle Meßtechnik, Optoelektronik und Bildverarbeitung

Kontaktaufnahme und weitere Informationen via Internet:

e-mail: hartmut@renken.de

website: <http://renken.de>