Digitale Vermessung und Auswertung von All-Sky-Meteorfotografien

Diplomarbeit

Technische Universität Chemnitz-Zwickau
Fakultät für Informatik
Professur Computergraphik und CA-Techniken

Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt
Institut für Planetenerkundung

eingereicht von Sirko Molau
geboren am 4. März 1971 in Berlin

Betreuer: Prof. Dr. H. Schreiter
Dr. J. Oberst
Dipl.-Inf. M. Lorenz

Chemnitz, den 17. Dezember 1996

Technische Universität Chemnitz-Zwickau
Fakultät für Informatik

AUFGABENSTELLUNG FÜR DIE DIPLOMARBEIT

Name, Vorname des Diplomanden: **M o l a u , Sirko**

Immatrikulations-Nr.: 6681

Thema:

Digitale Vermessung und Auswertung von All-Sky-Meteorfotografien

Zielstellung:
Ziel der Diplomarbeit ist die Erstellung eines Programmpaketes zur digitalen Vermessung von Fotonegativen des Europäischen Feuerkugelnetzes (EN) sowie die Automatisierung der Auswertung. Nach der Spezifikation der Anforderungen an die zu entwickelnde Software sind ausgehend von einem hochauflösend digitalisierten Fotonegativ Algorithmen zu entwickeln und implementieren, die Sternspuren erkennen und die Sterne automatisch identifizieren. Es ist eine bentzerfreundliche grafische Oberfläche zur semiautomatischen Vermessung der Positionen der Sterne und des Meteors zu entwickeln. Ausgehend von den ermittelten Objektpositionen sind Koordinatentransformationen zur Bestimmung der geozentrischen Meteorbahn vorzunehmen, wobei die Portierung bereits existierender Software zu prüfen ist. Die angestrebte Softwarelösung soll flexibel sein, um in die zukünftig anstehende Vermessung von Videometeoraufzeichnungen übernommen werden zu können. Das Programmpaket soll dem Nutzer die Eingabe der Aufnahmdaten über komfortable Eingabemasken ermöglichen. Die Speicherung der Ergebnisse dagegen erfolgt in einem geeigneten Format zusammen mit dem digitalisierten Bild. Der Softwaretest erfolgt anhand bereits manuell vermessener Fotonegative, wobei die erreichte Genauigkeit und Effizienzsteigerung der computer-gestützten Problemlösung zu diskutieren ist. Die Software soll ausführlich dokumentiert und mit Hilfe-Funktionen versehen werden. Das Programmpaket ist objektorientiert in C++ auf einer Workstation zu implementieren, wobei Basisroutinen einer in der Planetenerkundung und Astronomie gebräuchlichen Bildverarbeitungssoftware genutzt werden sollen.

Hochschullehrer:	Prof. Dr. H. Schreiter
Fakultät:	Informatik
Professur:	Computergraphik und CA-Techniken
Betreuer:	Dr. Oberst, Deutsche Forschungsgesellschaft für Luft- und Raumfahrt e. V., Dipl.- Inf. M. Lorenz, Fak. Informatik
Beginn am:	01.05.1996
Einzureichen am:	31.10.1996

Muth

Unterschrift des betreuenden Hochschullehrers

Verteiler: Prüfungsamt
HSL
Student (Deckblatt der Diplomarbeit)
Betreuer

Inhaltsverzeichnis

0 Gliederung

Im ersten Kapitel werden die astronomischen Grundlagen zum Verständnis dieser Arbeit ausführlich erläutert und das Thema der Diplomarbeit in den Gesamtkontext des EUROPEAN FIREBALL NETWORK eingeordnet. Im Kapitel 2 werden daraus die Anforderungen an die Arbeit abgeleitet und die zu lösenden Problemstellungen spezifiziert. Kapitel 3 behandelt den Schwerpunkt der Diplomarbeit, den Aufgabenkomplex der Bildsegmentierung und -vermessung. Die Einbindung weiterführender Software wird im Kapitel 4 diskutiert, Kapitel 5 behandelt den Gesamtkomplex der Benutzeroberfläche des Programms. Schließlich werden im Kapitel 6 die Ergebnisse der Programmtests diskutiert und die erreichten Ziele mit den am Anfang formulierten Forderungen verglichen. Es schließen sich ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen (Kapitel 7) und die Thesen (Kapitel 8) an. Die Diplomarbeit endet mit einem Glossar (Kapitel 9), der Liste von Literaturreferenzen (Kapitel 10), dem Abbildungs- und Tabellenverzeichnis (Kapitel 11), einem Verzeichnis der bei der Arbeit verwendeten Hilfsmittel (Kapitel 12) sowie der Selbständigkeitserklärung (Kapitel 13).

1 Einführung in die Problemstellung der Diplomarbeit

1.1 Das Sonnensysten

In unserer näheren kosmischen Heimat, dem Sonnensystem (Abbildung 1), gibt es Materie in den verschiedensten Formen und Größen. Der Hauptteil davon befindet sich in Form von Wasserstoff und Helium in unserem Zentralgestirn. Die neun Planeten, die die Sonne umkreisen, machen zusammen nur etwa $^1/_{750}$ der Masse unserer Sonne aus. Während die großen jupiterähnlichen Planeten einen festen Kern haben und ansonsten ebenfalls zum großen Teil aus den leichtesten chemischen Elementen bestehen, haben die kleinen erdähnlichen Planeten im inneren Sonnensystem eine feste Oberfläche aus Gesteinen verschiedener Zusammensetzung.

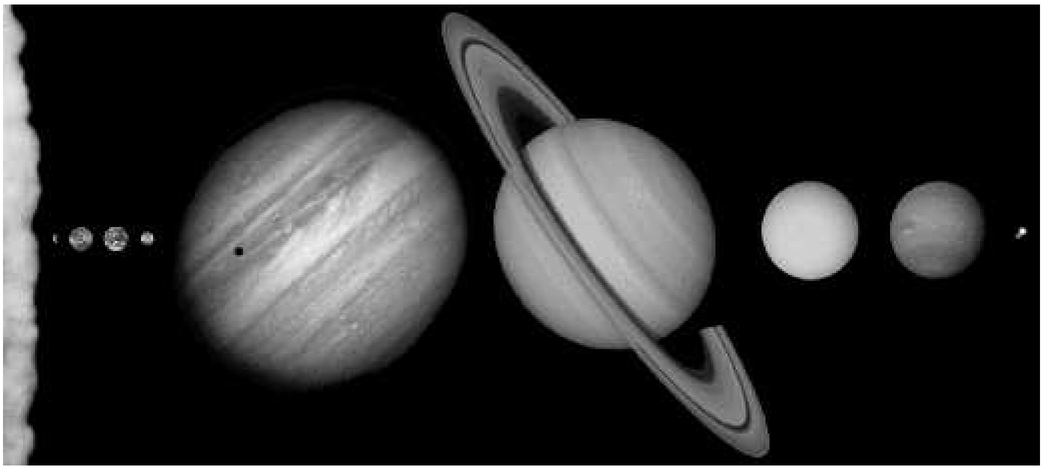

Abbildung 1: Das Sonnensystem

Zwischen den Bahnen der Planeten Mars und Jupiter gibt es den Planetoidengürtel. Dort hält sich eine Vielzahl kleiner Objekte auf, Gesteinsbrocken von einigen Metern Größe bis hin zu den größten *Planetoiden* mit über 100 km Durchmesser. Trotz ihrer großen Zahl erreichen Sie zusammen nur etwa die Hälfte der Masse unserer Erde. Ebenfalls einige hundert Meter bis einige Kilometer groß sind die *Kometen*, die in unregelmäßigen Abständen als prachtvolle Erscheinung am nächtlichen Himmel auftreten. Man vermutet eine riesige Kometenwolke (die *Oortsche Wolke*) mit einigen Milliarden Kometen am äußeren Rand des gravitativen Einflußbereichs unserer Sonne, weit außerhalb der Plutobahn. Die meisten der Kometen verweilen ständig in dieser Wolke. Nur einige wenige von ihnen werden durch gravitative Störungen in das innere Sonnensystem katapultiert. Sie werden erst sichtbar, wenn sie in der Nähe der Sonne ihr bekanntes Erscheinungsbild mit *Koma* und *Schweif* entwickeln. Vor allem durch die Schwerkraft des größten Planeten Jupiter wird die Bahn der Kometen mitunter so geändert, daß sie als kurzperiodische Kometen im inneren Sonnensystem verbleiben und nicht mehr in die Oortsche Wolke zurückkehren.

Die kleinsten Objekte im Sonnensystem bilden schließlich Staubpartikel und Gase, die vor allem in der Ebene der *Ekliptik* konzentriert sind und nur unter bestimmten Umständen für uns sichtbar werden.

1.2 Beobachtung der kleinsten Objekte im Sonnensystem

Es gibt nur wenige Möglichkeiten, den Staub und kleinsten Körper im Sonnensystem direkt zu beobachten.
Bei totalen Sonnenfinsternissen wird die *Korona* sichtbar, die äußerste Atmosphärenschicht der Sonne, die den stufenlosen Übergang von unserem Zentralgestirn zum interplanetaren Raum markiert (Abbildung 2). Von ihr fließt ständig ein Strom heißer Gase und geladener Teilchen, der *Sonnenwind*, in Richtung Planetensystem.

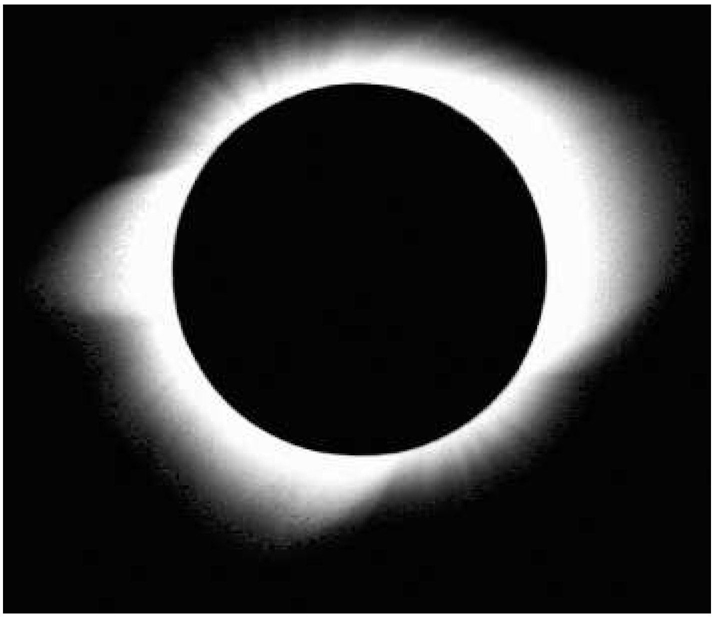

Abbildung 2: Die Sonnenkorona während einer totalen Sonnenfinsternis

Wenn die Sonnenaktivität ihr Maximum erreicht und starke Eruptionen auf der Sonnenoberfläche stattfinden, können wenige Tage später in hohen geografischen Breiten der Erde intensive Polarlichter (Abbildung 3) beobachtet werden. Der erhöhte Strahlungsdruck hat dann das Magnetfeld der Erde sehr stark deformiert. Geladene Teilchen des Sonnenwindes, die sich entlang der Magnetfeldlinien der Erde bewegen, können bis in die Ionosphäre eindringen und regen die dortigen Gase zum Leuchten an.

Abbildung 3: Polarlicht

Kometen sind eine wichtige Quelle von Staub im interplanetaren Raum. Ihr Schweif besteht aus kleinen Partikeln und Gasen, die das Sonnenlicht reflektieren. Er bildet sich aus, wenn sich der wenige Kilometer große Kern des Kometen in Sonnennähe erhitzt und die flüchtigen Bestandteile ausgasen. Dabei entsteht zunächst eine kugelförmige Hülle um den Kern, die *Koma*, die später vom Sonnenwind weggeweht wird. Kometenschweife sind daher immer von der Sonne abgewandt. In voll ausgeprägter Form kann man zwei getrennte Komponenten, den *Staub*- und den *Gasschweif* (Abbildung 4), unterscheiden.

Abbildung 4: Komet *West* (1976) mit stark ausgeprägten Schweifstrukturen

In klaren Frühjahrs- und Herbstnächten ist manchmal entlang der Ekliptik das *Zodiakallicht* mit bloßem Auge sichtbar. Hier wird das Sonnenlicht an den Staubteilchen im interplanetaren Raum vorwärts gestreut und sorgt für eine diffuse Aufhellung des Himmelshintergrundes. Noch schwächer ist der *Gegenschein*, ein Aufhellung am scheinbar der Sonne gegenübergelegenen Punkt des Himmels. Hier streut der Staub das Sonnenlicht zurück.

1.3 Untersuchung der Kleinkörper

Die Untersuchung von kosmischem Staub, *Meteoroiden*, Planetoiden und Kometenkernen ist in der Astronomie von besonderem Interesse. Man vermutet hier Material, das noch fast unverändert aus der Anfangszeit unseres Sonnensystems vorliegt. Die Wissenschaft erhofft sich aus seiner Untersuchung Antworten auf Fragen nach der Entstehung unseres Sonnensystems, der Erde und sogar des Lebens auf unserem Planeten.
Um diese Objekte aus nächster Nähe zu untersuchen und ihre Zusammensetzung und Eigenschaften zu erkunden, werden teure Raumfahrtmissionen (*NEAR, Rosetta*) geplant und durchgeführt. Kostenintensive Raumsonden wie *Stardust* werden gestartet, um interplanetare und kometare Staubproben 'einzusammeln' und zur Untersuchung in ein irdisches Labor zu bringen.
Es gibt jedoch noch andere, billigere Methoden, Material aus dem interplanetaren Raum zu studieren, wie im folgenden dargelegt werden soll.

1.4 Kollisionen mit der Erde

Die Erde bewegt sich mit einer mittleren Geschwindigkeit von knapp 30 $^{km}/_{s}$ auf einer nahezu kreisförmigen Bahn um die Sonne. Auf ihrem Weg durch den Raum stürzen dabei nach aktuellen Schätzungen täglich etwa 100 Tonnen Materie auf unseren Planeten [Ceplecha 1992; Hughes 1992]. Je nach Ausgangsmasse der Teilchen ergeben sich dabei unterschiedliche Szenarien (Abbildung 5).

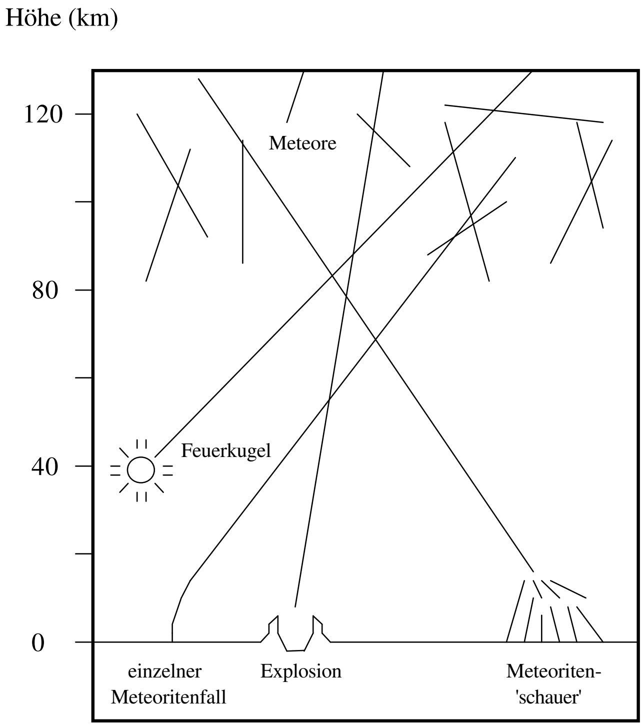

Abbildung 5: Schematische Darstellung des Eintritts von Meteoroiden in die Atmosphäre

Der größte Teil von ihnen, die *Mikrometeoriten* mit einer Masse in der Größenordnung von 10^{-6} g, werden bereits in den höchsten atmosphärischen Schichten zerstörungsfrei abgebremst und sinken dann langsam auf die Erdoberfläche herab. Seit Mitte der sechziger Jahre setzt die amerikanische Raumfahrtbehörde NASA spezielle U2-Stratosphärenflugzeuge ein, um diese sogenannten *interplanetary dust particles* (IDPs) 'einzusammeln' und später zu analysieren (Abbildung 6).

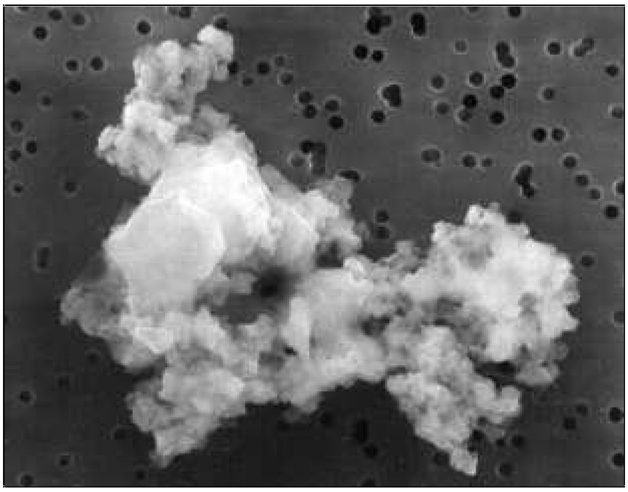

Abbildung 6: Ein IDP unter dem Elektronenmikroskop

Etwas größere Objekte (Staubkorngröße) mit Massen zwischen üblicherweise 10^{-3} und einem Gramm dringen mit ihren hohen kosmischen Geschwindigkeiten (11-73 $^{km}/_{s}$) in dichtere Atmosphärenschichten ein. Schon in einer Höhe von etwa 100 km verglühen sie jedoch vollständig. Ein irdischer Beobachter bekommt nur die Leuchterscheinung, *Sternschnuppe* oder auch *Meteor* genannt, zu sehen. Zusätzlich hinterlassen die Meteoroide einen Schlauch ionisierter Gase, der wenige Sekunden lang mittels Radar beobachtet werden kann, ehe er sich auflöst. Größere Körper von einigen Kilogramm Anfangsmasse erzeugen besonders helle und spektakuläre Meteore, die *Feuerkugeln* oder auch *Bolide* genannt werden. Sie können bis in tiefere Atmosphärenschichten vordringen, wobei sie durch die starke Reibung an der Erdatmosphäre ständig gebremst werden und Material verlieren. Viele dieser Objekte werden durch die starken Druckkräfte regelrecht auseinandergerissen und zerplatzen auf ihrer Bahn durch die Atmosphäre. Die Fragmente verglühen dann entweder vollständig oder gehen in Form eines *Meteoritenschauers* auf die Erde nieder.

Nur wenn die anfänglichen Bahnparameter besonders günstig sind [Ceplecha & Mc Crosky 1976, Wetherill & Re Velle 1981], wenn das Meteoroid mit relativ geringer Anfangsgeschwindigkeit (weniger als 25 $^{km}/_{s}$) unter flachem Winkel auf die Erdatmosphäre trifft und aus besonders widerstandsfähigem Material besteht, kann es den Flug durch die Erdatmosphäre überstehen und als kleiner *Meteorit* die Erdoberfläche treffen. Meteorite haben ihre kinetische Energie durch die Abbremsung fast vollständig verbraucht und weisen nur noch 'irdische' Fallgeschwindigkeiten von etwa 100 $^{m}/_{s}$ auf.

Meteoritenfälle sind verglichen mit der Größe unseres Planeten selten (wenige Ereignisse pro Monat auf der ganzen Erde). Sie sind von ganz besonderem Interesse, weil sie eine günstige Gelegenheit zur Untersuchung kosmischer Materie darstellen. Da die Erdoberfläche zum größten Teil mit Wasser bedeckt und der Hauptteil der Landfläche unbewohnt ist, wird jedoch nur ein Bruchteil der herabfallenden Meteorite gefunden (z.B. nach Einschlägen in Hausdächer oder Autos). Aufgrund ihrer Seltenheit stellen Objekte dieser Größe keine ernsthafte Gefahr für Menschen dar. Bis heute gibt es keine verbürgten Berichte von Opfern eines Meteoritenfalls.

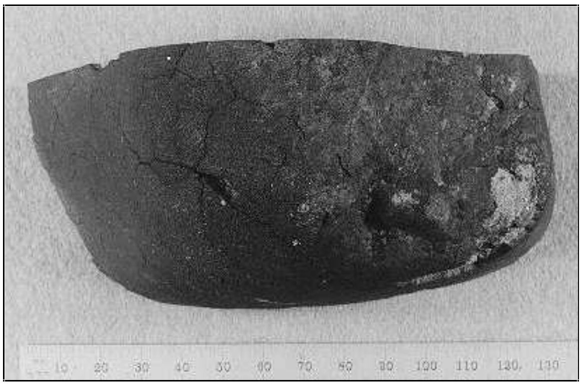

Abbildung 7: Meteorit von Peekskill (USA), der 1992 in ein Auto einschlug

Je größer die Meteoroide sind, desto seltener werden Kollisionen mit der Erde:

[1] Impacthäufigkeit $f = 10 * d^{-2}$

mit f ... Kollisionen pro Jahr nach Morrison et al. [1994]
d ... Größe des Objekts in m

Andererseits steigt mit ihrer Größe auch die Gefahr, die von ihnen für das Leben auf unserem Planeten ausgeht. Während Objekte mit einigen Metern Durchmesser etwa einmal pro Jahr beobachtet werden (die wenigsten erreichen den Erdboden), ist einmal in mehreren hundert Jahren ein Körper von etwa hundert Metern Durchmesser zu erwarten [Halliday et al. 1996]. Vermutlich war es ein solches Objekt, das im Jahr 1908 über der Steinigen Tunguska in Sibirien niederging und in einer Höhe von etwa 20 Kilometern explodierte [Chyba et al. 1993]. Das obere Ende der Größenskala wird mit den sogenannten *K/T-Ereignissen* erreicht, benannt nach einem kosmischen Körper, der an der Grenze zwischen Kreidezeit und Tertiär auf die Erde niederging und vermutlich für das Aussterben von 75% aller Arten (u.a. der Dinosaurier) verantwortlich war [Pope 1994]. Objekte dieser Größe (mehrere Kilometer Durchmesser) können von der irdischen Atmosphäre nicht abgebremst werden und treffen mit kosmischer Geschwindigkeit auf die Erdoberfläche auf [Ceplecha 1991]. Sie verursachen globale Klimakatastrophen, die den Großteil allen Lebens vernichten. Nach heutigem Kenntnisstand ist jedoch nur alle 100 Millionen Jahre mit einem Ereignis dieser Art zu rechnen [Morrison et al. 1994].

Die Untersuchung von Körpern, die sich der Erde nähern können (sogenannte *Near-Earth Objects*, *NEOs*), ist eines der aktuellsten Forschungsgebiete in der Astronomie. So wird zum Beispiel seit einigen Jahren in den USA das *Spacewatch-Teleskop* betrieben. Es handelt sich um ein Forschungsprojekt mit dem Ziel, im Anflug befindliche Kometen und Asteroiden automatisch aufzuspüren [Rabinowitz 1993]. Außerdem stehen seit einigen Jahren die Daten militärischer Beobachtungssatelliten des amerikanischen Verteidigungsministeriums zur wissenschaftlichen Analyse zur Verfügung. Die Satelliten, deren eigentliche Aufgabe es ist, Raketenstarts zu registrieren, haben von 1975 bis 1992 136 Kollisionen größerer Objekte mit der Erde registriert [Tagliaferry et al. 1994].

1.5 Meteorbeobachtung

Wichtige Informationen über Objekte, die mit unserer Erde zusammenstoßen, können aus deren optischen Erscheinungsbildern abgeleitet werden. Daher ist die Meteorbeobachtung noch heute die gebräuchlichste Methode, Daten über die Konzentration und Zusammensetzung des interplanetaren Staubes und größerer Körper in der Nähe der Erde zu gewinnen.

Sporadische Meteore treten zu jeder Tages- und Nachtzeit völlig zufällig am Himmel verteilt auf. An bestimmten Tagen, während der Aktivität von *Meteorströmen*, zeigen sich die Meteore jedoch gehäuft und scheinen bevorzugt aus einer bestimmten Richtung zu kommen.

Wenn die Erde auf ihrem Weg durch das innere Sonnensystem die Bahn eines Kometen kreuzt bzw. ihr nahe kommt, dann durchquert sie eine Zone, die durch viele Kometenpassagen mit Staub und Gas besonders angereichert ist. Die dadurch verursachten Meteore scheinen alle von einem Punkt am Himmel auszugehen, dem *Radianten* (Abbildung 8). Meteorströme werden nach dem Sternbild benannt, in dem ihr Radiant liegt. So ist der bekannteste Meteorstrom ein vom Kometen *P/Swift-Tuttle* erzeugter Teilchenstrom, dessen Meteore aus dem Sternbild Perseus zu kommen scheinen. Es sind die *Perseiden*, die jährlich um den 12. August für besonders viele Sternschnuppen sorgen.

Abbildung 8: Aufnahme des Meteorstroms der Lyriden

Während die meisten Meteorströme jedes Jahr zur gleichen Zeit wiederkehren und etwa die gleiche Aktivität zeigen, treten einige wenige von ihnen nur in bestimmten Jahren in Erscheinung. Der bekannteste Vertreter dieser Gruppe ist ein vom Kometen *P/Temple-Tuttle* erzeugter Teilchenschwarm, die *Leoniden.* Sie sorgen alle 33 Jahre für einen regelrechten *Meteorsturm* auf der Erde. Ihr nächster Ausbruch wird für 1998/99 vorhergesagt.

Es gibt verschiedene Methoden der Beobachtung von Meteoren. In den fünfziger Jahren wurden in der professionellen Astronomie vor allem *Super-Schmidt-Kameras* eingesetzt, um möglichst viele Meteore zu erfassen und exakt zu vermessen [Whipple 1955]. Heute werden dagegen vor allem Radarsysteme genutzt, um die ionisierten Spuren der Meteore zu verfolgen. Die Interpretation von Radardaten ist zwar viel schwerer als die Auswertung optischer Beobachtungen, dafür ist diese Methode unabhängig von Wetter und Tageszeit.

Die Amateurastronomen spielen eine besondere Rolle in der Meteorastronomie. Weil eine flächendeckende Beobachtung von Meteoren nicht möglich ist, beschaffen die weltweit agierenden Amateure in mühevoller Fleißarbeit das nötige Beobachtungsmaterial und liefern damit die Grundlagen für viele wissenschaftliche Untersuchungen. Dabei werden vor allem Beobachtungen im sichtbaren Licht vorgenommen.

Die älteste und noch immer verbreitetste Methode ist die *visuelle* Meteorbeobachtung. Der Beobachter observiert den Himmel ohne optische Hilfsmittel und notiert die Bahnen, Zeiten und Helligkeiten der Sternschnuppen. Auf diese Art lassen sich *Aktivitätsprofile* und *Radiantenpositionen* von Meteorströmen ermitteln [Rendtel et al. 1995].

Die *teleskopische* Meteorbeobachtung ist ein Spezialfall, bei der ein lichtstarker Feldstecher zur Hilfe genommen wird. Damit wird zwar das Gesichtsfeld bedeutend kleiner, dafür kann man jedoch schwächere Meteore beobachten und das Verhalten einer völlig anderen Population von Meteoroiden studieren. Es stellt sich heraus, daß der Anteil der Strommeteore mit geringer werdender Helligkeit gegenüber den sporadischen Meteoren ständig abnimmt.

Besonders geeignet zur Untersuchung lichtschwacher Meteore ist das jüngste Beobachtungsverfahren, die *Videobeobachtung* [Jobse 1988, Molau 1995]. Bereits seit den siebziger und achtziger Jahren werden Bildverstärker zusammen mit lichtstarken Optiken und Videokameras in der Astronomie genutzt, um schwache und kurzlebige Objekte wie Sternschnuppen zu erfassen und zu vermessen. Die Videometeorbeobachtung ist eines der erfolgsversprechendsten Verfahren der nahen Zukunft [Molau 1996].

Auf sehr helle Objekte hingegen ist die *Meteorfotografie* spezialisiert. Mittels eines Fotoapparats kann man zwar nur die hellsten und damit nur sehr wenige Meteore erfassen, dafür erlauben Fofografien die genausten Positionsmessungen [Rendtel 1991]. Eine spezielle Form ist die *all-sky-Fotografie*, bei der die Kamera mit einem *Fischaugenobjektiv* oder einem *all-sky-Spiegel* ausgestattet ist. Bei diesem Verfahren wird der komplette Himmel erfaßt, wodurch es sich besonders für flächendeckende Überwachungen anbietet.

Wird ein helles Meteor von mehreren Stationen aus fotografiert, so kann man nicht nur die scheinbare Bahn des Meteors vor dem Himmelshintergrund bestimmen, sondern durch

Triangulation auch die räumliche Bahn des Meteoroids durch die Atmosphäre berechnen. Das ermöglicht es, den Orbit des Objekts um die Sonne zu ermitteln, bevor es auf die Erde stürzte. Zusätzlich kann bei besonders hellen Feuerkugeln die Bahn des Teilchens extrapoliert werden, nachdem es in etwa zwanzig Kilometern Höhe aufgehört hat zu leuchten. Für 'Meteoritenkandidaten' (langsame und sehr helle Feuerkugeln mit flachem Eintrittswinkel und weiteren charakteristischen Merkmalen) läßt sich das Gebiet auf der Erdoberfläche bestimmen, auf dem ein möglicherweise überlebender Meteorit eingeschlagen ist. In günstigen Fällen ist die Streuellipse nur wenige hundert Meter groß und bildet die Grundlage für nachfolgende Suchexpeditionen.

Regelmäßige Beobachtungen dieser Art erhält man durch flächendeckende Kameranetze.

1.6 Feuerkugel-Kameranetze

In den sechziger und siebziger Jahren dieses Jahrhunderts errichteten professionelle Astronomen drei große Kameranetze. Nach dem Fall des Meteoriten *Pribram* 1961 in der Tschechoslowakei, baute man aus den bereits vorhandenen Kamerastationen ein Feuerkugelnetz auf [Ceplecha 1961]. Mitte der sechziger Jahre wurde das Netz durch neue Kamerastationen auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland erweitert. Zusammen bildeten sie das EUROPEAN FIREBALL NETWORK (EN). In den USA wurde im Jahre 1964 das PRAIRIE-NETWORK installiert [Mc Crosky et al. 1971], in Kanada operierte seit dem Jahr 1971 das MORP-Kameranetz [Halliday et al. 1978].

Jedes der Netze deckte eine Fläche von etwa 10^6 km^2 ab und zeichnete viele Feuerkugeln auf. Die Berechnung der Bahn eines Meteoriten, der danach auch aufgefunden wurde, gelang in jedem der Netze jedoch nur einmal. So wurde mittels des PRAIRIE-NETWORKS der Meteorit *Lost City* verfolgt und gefunden, das MORP-NETZ war mit *Innisfree* erfolgreich. Zusätzlich konnte im Jahre 1992 der Fall des Meteoriten *Peekskill* (Abbildung 7) von zahlreichen Zuschauern eines Baseballspiels in den USA verfolgt und mit Videokameras aufgezeichnet werden [Brown 1993], so daß heutzutage weltweit für vier Meteorite verläßliche *heliozentrische Orbits* vorliegen. Diese geringe Zahl zeigt bereits, wie wichtig jeder einzelne beobachtete Meteoritenfall ist. Die aus diesen vier Beobachtungen abgeleiteten Bahnen stellen den einzigen direkten Nachweis dar, wo die Meteorite ihren Ursprung im Sonnensystem haben. Für weitere zwölf Meteoritenfälle konnten Orbits aus visuellen Beobachtungen bestimmt werden [Jenniskens et al. 1992], die jedoch mit bedeutend größeren Fehlern behaftet sind.

Neben Informationen, die die Suche von Meteoriten erleichtern und ihre Herkunft klären, liefern die Kameranetze das nötige Datenmaterial zur Bestimmung der Massenflußdichte in Erdnähe und über den Aufbau der Meteoroide. Anhand der Interaktion mit der Erdatmosphäre lassen sich Parameter wie die Masse, Dichte und Festigkeit der Körper bestimmen. Aus der Zahl der aufgezeichneten Erscheinungen kann man aktuelle und historische Einschlagshäufigkeiten von Meteoriten rekonstruieren und mit anderen Messungen wie Mondkraterstatistiken [Neukum & Ivanow 1994] oder seismischen Messungen auf dem Mond [Oberst 1991] vergleichen. Außerdem erlauben Sie eine reale Abschätzung des Risikos von Zusammenstößen der Erde mit größeren Himmelskörpern. Die Feuerkugelnetze schließen die Beobachtungslücke zwischen den Millimeter und Zentimeter großen Meteoroiden, die in Form von Meteoren täglich durch Amateurastronomen beobachtet werden, und größeren Körpern von einigen zehn bis hundert Metern Durchmesser, die mittlerweile routinemäßig mit dem Spacewatch-Teleskop gefunden werden.

1.7 Das EUROPEAN FIREBALL NETWORK

Während sowohl das amerikanische (1974) als auch das kanadische (1985) Feuerkugelnetz nach einigen Jahren geschlossen wurden, wird das EUROPEAN FIREBALL NETWORK weiterhin betrieben. Es besteht zur Zeit aus 34 Stationen (Abbildung 9 und Tabelle 1) in Deutschland, Tschechien, Belgien, Österreich und der Schweiz [Heinlein & Oberst 1996].

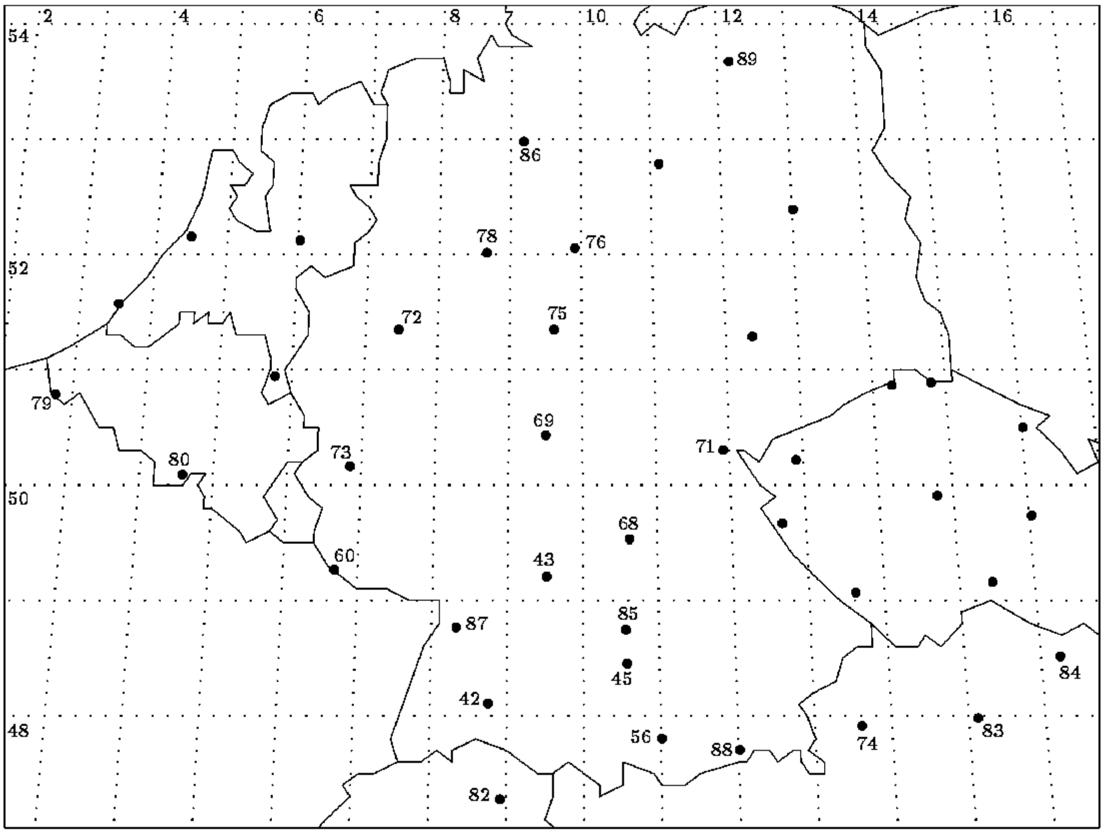

Abbildung 9: Aktueller Stand des EN-Feuerkugelnetzes

Tabelle 1: EN-Stationen in Frühjahr 1996

EN #	Ort	Geografische Länge	Geografische Breite	Höhe [m]
3	Ruzova	14° 17‘ 17,9“ O	50° 50‘05,7“ N	347
4	Churanov	13° 37‘ 00,5“ O	49° 04‘08,5“ N	1119
9	Svratouch	16° 02‘ 09,1“ O	49° 44‘08,1“ N	744
11	Primda	12° 40‘ 47,2“ O	49° 40‘10,9“ N	744
12	Veseli nad Moravou	17° 22‘ 17,0“ O	48° 57‘15,9“ N	173
14	Cervena hora	17° 32‘ 37,5“ O	49° 46‘39,5“ N	750
15	Kostelni Myslova	18° 26‘ 58,6“ O	48° 06‘ 24,0“ N	577
16	Lysa hora	15° 43‘ 51,7“ O	50° 41‘ 31,9“ N	1323
17	Pec pod Snezkou	15° 43‘ 51,7“ O	50° 41‘31,9“ N	810
20	Ondrejov	14° 46‘ 58,7“ O	49° 54‘35,8“ N	529
42	Klippeneck	08° 45‘ 23,0“ O	48° 06‘24,0“ N	973
43	Öhringen	09° 31‘ 09,0“ O	49° 12‘28,0“ N	280
45	Violau	10° 34‘ 28,5“ O	48° 27‘13,5“ N	495
56	Hohenpreißenberg	11° 00‘ 38,2“ O	47° 48‘ 11,5“ N	989
60	Berus	06° 41‘ 24,5“ O	49° 15‘ 54,0“ N	365
68	Losaurach	10° 37‘ 38,4“ O	49° 31‘ 51,9“ N	382
69	Magdlos	09° 30‘ 15,0“ O	50° 25‘ 59,2“ N	420
71	Hof	11° 54‘ 57,0“ O	50° 18‘ 07,8“ N	524
72	Hagen	07° 27‘ 26,0“ O	51° 20‘ 49,5“ N	290
73	Daun	06° 50‘ 55,1“ O	50° 09‘ 48,6“ N	549
74	Gahberg	13° 36‘ 30,8“ O	47° 54‘ 47,6“ N	865
75	Benterode	09° 37‘ 03,6“ O	51° 20‘ 47,6“ N	280
76	Sibbese	09° 54‘ 39,0“ O	52° 03‘ 13,0“ N	196
78	Leopoldshöhe	08° 40‘ 27,0“ O	52° 00‘ 50,0“ N	106
79	Westouter	02° 46‘ 11,8“ O	50° 47‘ 18,7“ N	98
80	Dourbes	04° 35‘ 01,4“ O	50° 05‘ 29,4“ N	195
82	Wald	08° 55‘ 19,1“ O	47° 16‘ 33,0“ N	669
83	Scheibbs	15° 07‘ 16,0“ O	47° 58‘ 55,0“ N	795
84	Herzogbirbaum,	16° 15‘ 23,0“ O	48° 31‘ 00,0“ N	270
85	Tuifstedt	10° 33‘ 47,0“ O	48° 44‘ 48,0“ N	500
86	Langwedel	09° 11‘ 04,6“ O	52° 58‘ 37,4“ N	20
87	Gernsbach	08° 19‘ 44,5“ O	48° 46‘ 02,6“ N	210
88	Wendelstein	12° 00‘ 49.4“ O	47° 42‘ 15.8“ N	1838
89	Reimershagen	12° 10‘ 41.0“ O	53° 40‘ 23.2“ N	60

Die 24 von deutscher Seite betreuten Stationen sind seit ihrer Gründung mit all-sky-Kameras ausgerüstet. Das Herzstück eines solchen Systems ist ein 36 cm großer Kugelspiegel, über dem an drei Streben die Kamera befestigt ist (Abbildung 10). Diese Konstruktion erlaubt die Überwachung des gesamten Himmels, wie in Abbildung 11 schematisch dargestellt. Die Belichtungsautomatik wird von einem Uhrwerk gesteuert.

Im Gegensatz dazu nutzen die zehn tschechischen Stationen Fischaugenoptiken. Diese Kameras erreichen eine höhere Genauigkeit und sind in der Lage, schwächere Meteore aufzuzeichnen.

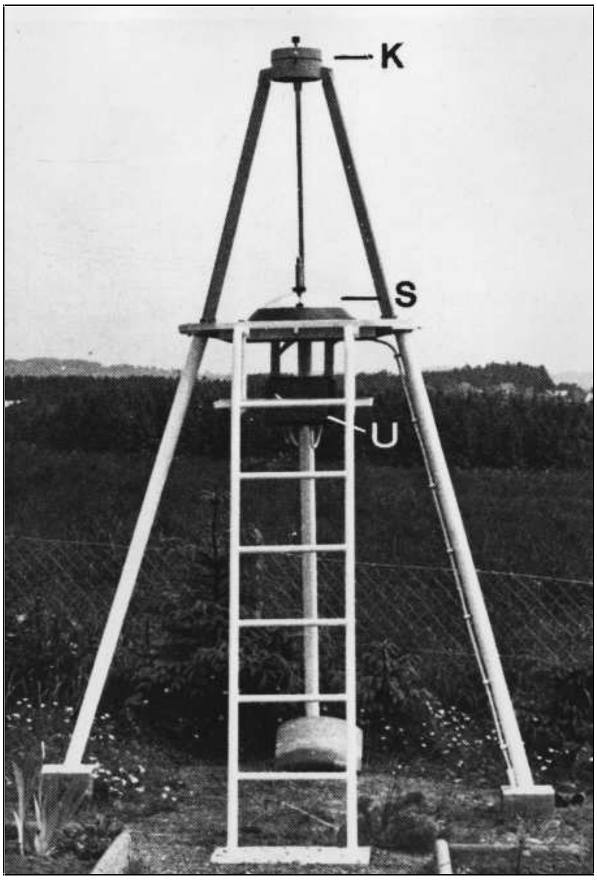

Abbildung 10: Typischer Aufbau einer EN-Kamerastation
K - Kamera, S - all-sky-Spiegel, U - Uhrwerk

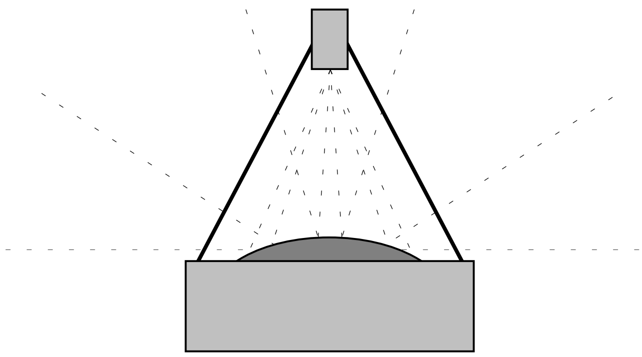

Abbildung 11: Funktionsweise einer all-sky-Kamera

Alle Kameras sind mit einem *Shutter*, einer vor dem Kameraobjektiv rotierenden Sektorscheibe, ausgestattet. Der Shutter rotiert mit einer definierten Frequenz von 12,5 Hz und unterbricht damit mehrmals pro Sekunde kurzzeitig die Belichtung des Films. Eine Feuerkugel erscheint daher nicht als durchgezogene Linie, sondern als unterbrochene Strichspur auf dem Negativ (Abbildungen 12 und 13). Aus der Zahl und Lage der Unterbrechungen läßt sich später sowohl die Winkelgeschwindigkeit der Feuerkugel als auch die Eintrittsgeschwindigkeit und Abbremsung des Meteoroids in der Atmosphäre berechnen.

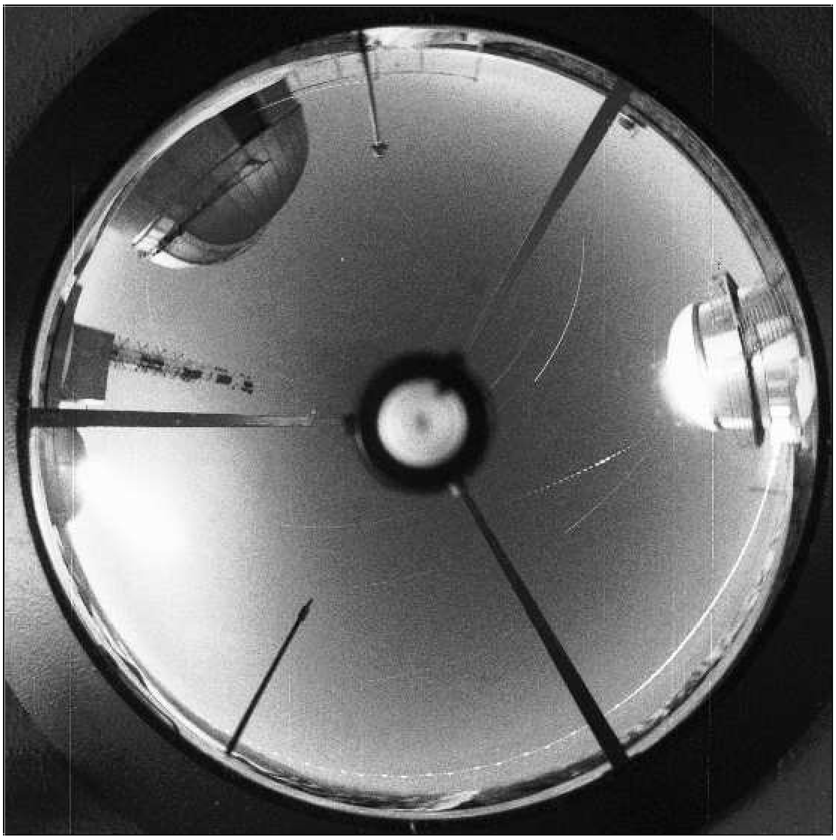

Abbildung 12: Typische all-sky-Feuerkugelaufnahme

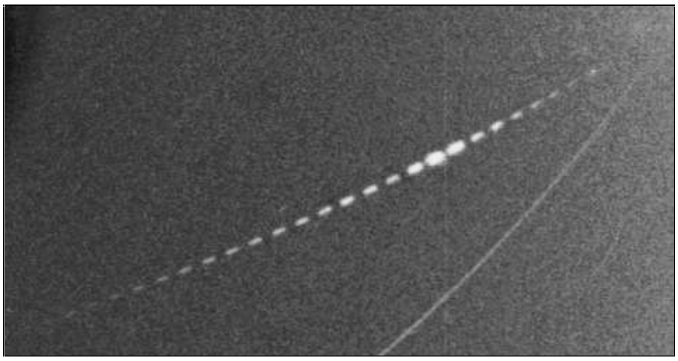

Abbildung 13: Ausschnittsvergrößerung der Feuerkugel

Die Kameras sind fixiert und werden nicht der scheinbaren Drehung des Himmels nachgeführt. Sterne erscheinen daher bei den verwendeten langen Belichtungszeiten als konzentrische Ringsegmente um den *Himmelspol*. Die Sternspuren haben grundlegende Bedeutung für die radiometrische und photometrische Kalibrierung der Aufnahme.

Die meisten Stationen des EUROPEAN FIREBALL NETWORK werden ehrenamtlich von Mitarbeitern an Wetterstationen und von Amateurastronomen betreut. Im Gegensatz zu den tschechischen Kameras, die nur bei klarem Himmel zum Einsatz kommen, liefern die deutschen Stationen unabhängig vom Wetter jeweils eine Aufnahme pro Nacht. Zeiten, in denen der Mond sichtbar ist, werden dabei weitestgehend ausgeschlossen.

Im Durchschnitt kann der Himmel an jeder Station pro Tag etwa 3 Stunden effektiv überwacht werden. In der übrigen Zeit sind durch Tageslicht, Mondschein oder schlechtes Wetter keine auswertbaren Aufzeichnungen möglich. Trotzdem gelingen dem Netz im Jahr etwa 100 Aufnahmen von 50 verschiedenen Feuerkugeln. Es wurden bereits eine Vielzahl von 'Meteoritenkandidaten' fotografiert (Tabellen 2 und 3) und mehrere Suchaktionen gestartet, wovon jedoch nur eine erfolgreich war.

Tabelle 2: Beobachtungen von 'Meteoritenkandidaten' im Bereich des EN seit 1959

Datum	Zeit [UT]	Ort (berechnet)	Aufschlagpunkt (berechnet) geogr. Länge	geogr. Breite	Endmasse (berechnet) [kg]
07.04.1959	19:30:21 ± 1s	Pribram (+)	14° 10‘ 51“ O*	49° 40‘ 20“ N*	50
10.04.1969	21:44:30 ± 30s	Otterskirchen	13° 33‘ 33“ O	48° 38‘ 56“ N	5
24.11.1970	01:47:00 ± 1m	Mt. Riffler	10° 02‘ 46“ O	47° 08‘ 28“ N	0,9
30.08.1974	01:25:00 ± 5m	Leutkirch	09° 05‘ 41“ O	47° 50‘ 41“ N	9,6
01.06.1977	21:46:00 ± 2m	Freising	11° 03‘ 04“ O	48° 27‘ 58“ N	0,7
12.06.1977	23:03:00 ± 2m	Alpen	06° 02‘ 24“ O	46° 06‘ 00“ N	30
27.05.1979	20:38:50 ± 50s	Zvolen (+)	19° 08‘ 17“ O	48° 32‘ 13“ N	1,2
09.10.1983	18:55:21 ± 43s	Zdar (+)	15° 55‘ 14“ O	49° 35‘ 30“ N	1,5
04.12.1983	17:09:48 ± 5s	Neuberg I	15° 32‘ 10“ O	47° 42‘ 50“ N	4
03.08.1984	21:05:53 ± 12s	Valec (+)	16° 04‘ 16“ O	49° 09‘ 22“ N	16
13.08.1985	23:32:00 ± 5s	Valmez (-)	17° 55‘ 44“ O	49° 24‘ 43“ N	2,1
04.10.1987	02:57:00 ± 1m	Janov (-)	17° 28‘ 14“ O	50° 15‘ 15“ N	75
24.12.1987	02:25:23 ± 56s	Freiberg	13° 27‘ 00“ O	50° 51‘ 36“ N	10
14.05.1988	23:15:50 ± 5s	Brdy	14° 06‘ 22“ O	49° 47‘ 20“ N	1
07.05.1991	23:03:53 ± 3s	Benesov (+)	14° 36‘ 50“ O	49° 46‘ 38“ N	3
22.09.1991	16:48:00 ± 30s	Dobris (#,-)	14° 15‘ 00“ O	49° 42‘ 36“ N	100
09.05.1992	04:06:00 ± 30s	Neuberg III	15° 35‘ 46“ O	47° 38‘ 42“ N	10
22.02.1993	22:12:45 ± 2s	Meuse	04° 48‘ 07“ O	49° 25‘ 16“ N	2,7
07.08.1993	21:08:15 ± 15s	Polna	15° 55‘ 00“ O	49° 32‘ 09“ N	0,2
25.10.1995	02:25:53 ± 1s	Tizsa	20° 46‘ 52“ O	47° 47‘ 31“ N	3,9
23.11.1995	04:30:00 ± 1h	Jindrichuv Hradec (-)	15° 01‘ 40“ O	49° 08‘ 25“ N	0,7

* Koordinaten des größten Fundstückes „Luhy“ (5.6 kg)
\+ systematische Suchaktion in einem bedeutenden Teil des berechneten Fallgebiets
\- unsystematische Suche im berechneten Fallgebiet
\# Tageslichtfeuerkugel: alle Daten beruhen auf ca. 200 visuellen Sichtungen

Tabelle 3: Meteoritenfälle im Bereich des EN seit 1959

Datum	Zeit [UT]	Ort	Geografische Länge	Geografische Breite	Masse [kg]	Typ
07.04 .1959	19:30	Pribram*	14° 02' O	49° 40' N	5,600	Steinmeteorit
12.06. 1963	12:58	Usti nad Orlici	16° 23' O	49° 59' N	1,260	Steinmeteorit
16.09.1969	7:15	Police nad Metuji	16° 01' O	50° 31' N	0,840	Steinmeteorit
26.04.1962	11:45	Kiel	10° 09' O	54° 24' N	0,738	Steinmeteorit
14.11.1985	18:17	Salzwedel **	11° 12' O	52° 48' N	0,043	Steinmeteorit
01.03.1988	12:30	Trebbin	13° 10' O	53° 13' N	1,250	Steinmeteorit
04.07.1990	19:33	Glanerbrug	06° 57’ O	52° 13’ N	0,800	Steinmeteorit

* erster fotografierter Meteoritenfall in der Geschichte der Meteoritenforschung
** Aufnahmen von einer deutschen EN-Station

1.8 Organisation des EN und Motivation zur Diplomarbeit

Nachdem das MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR ASTRONOMIE lange Jahre die Leitung des Feuerkugelnetzes innehatte, ist seit 1995 das INSTITUT FÜR PLANETENERKUNDUNG der DEUTSCHEN FORSCHUNGSANSTALT FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR) der Projektträger. Die von der DLR zur Verfügung gestellten Filme werden nach ihrer Belichtung im Fotolabor des Instituts entwickelt. Sie gelangen dann zum Netzwerkkoordinator, der die Negative sichtet, archiviert und mögliche Feuerkugelaufnahmen aussortiert.

Die Vermessung der Negative und Bestimmung der Bahnparameter ist ein komplexer und arbeitsintensiver Vorgang. Dabei wird zunächst die Position der einzelnen Unterbrechungen der Feuerkugel durch den Shutter relativ zu einer Reihe von bekannten Referenzobjekten (Sternen) mit einer Genauigkeit von wenigen Mikrometern bestimmt. Daraus lassen sich dann die astronomischen Koordinaten der scheinbaren Bahn des Meteors am Himmel berechnen. Konnte die Erscheinung von verschiedenen Stationen verfolgt werden, kann man aus den einzelnen Aufnahmen über komplexe mathematische Verfahren die räumliche Bahn des Meteoroids durch die Atmosphäre sowie den vorherigen heliozentrischen Orbit ermitteln.

Die Aufnahmen der tschechischen Feuerkugelstationen werden seit Jahren an der STERNWARTE ONDREJOV manuell an einem Meßtisch vermessen (Abbildung 14). Für die nachfolgende Berechnung der Meteorkoordinaten und der anderen Parameter wird das Programm FIRBAL [Borovicka 1995] genutzt, das in den sechziger Jahren entwickelt und seitdem kontinuierlich verbessert wurde. Für die Auswertung einer einzigen hellen Feuerkugel mit ungefähr zwanzig Unterbrechungen, die von fünf Stationen des Netzwerks erfaßt wurde, benötigt eine Person etwa eine Woche Arbeitszeit [Spurny 1996]! Der weitaus größte Teil der Zeit entfällt dabei auf die manuelle Vermessung der Meteor- und Sternpositionen.

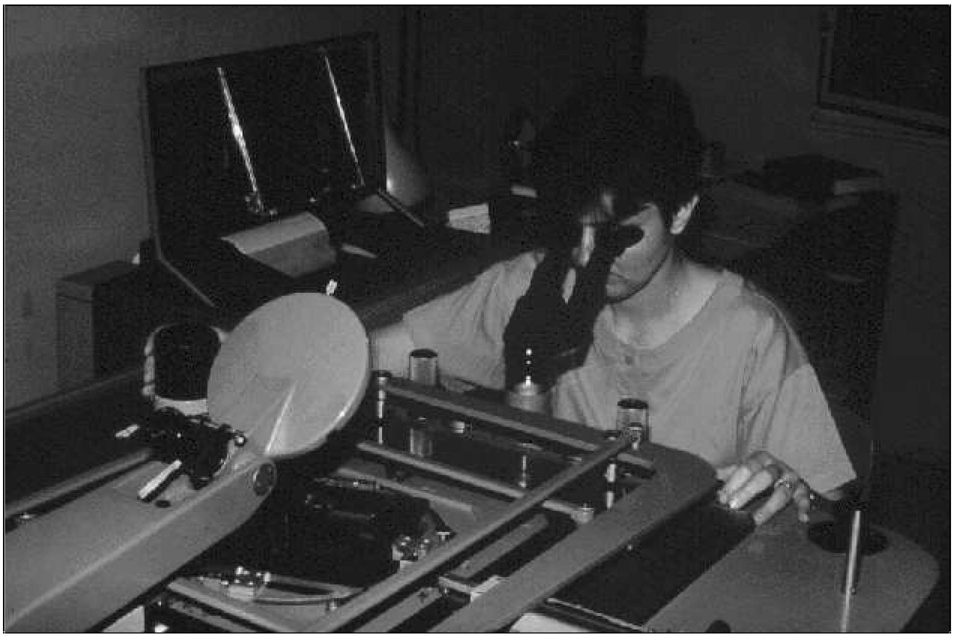

Abbildung 14: Manuelle Vermessung eines Negativs an der STERNWARTE ONDREJOV

Auf Grund des enormen Aufwandes kann nur ein kleiner Teil aller aufgezeichneten Ereignisse untersucht werden. Für die Aufnahmen vom deutschen Teil des Netzes gibt es überhaupt keine umfassende Auswertung. Besonders helle Meteore werden zwar in Ondrejov mitbearbeitet, der größte Teil des Datenmaterials wartet jedoch im Archiv auf seine wissenschaftliche Analyse.
Dieser Zustand hat dazu geführt, daß bisher relativ wenige wissenschaftliche Ergebnisse aus dem reichlich vorhandenen Beobachtungsmaterial gewonnen werden konnten. Zwar wurde von den beiden anderen Feuerkugelnetzen auch nur ein Teil der angefallenen Aufnahmen ausgewertet [Halliday et al. 1996], jedoch ist die Bearbeitung des Datenmaterials des EUROPEAN FIREBALL NETWORK eine wichtige Voraussetzung für seinen zukünftigen Bestand. Die anzustrebende Lösung besteht in der effizienten digitalen Vermessung der Feuerkugelaufnahmen. Damit würde der enorme Arbeitsaufwand an einem mechanischen Meßtisch entfallen. Neue Aufnahmen des deutschen Teils des Netzes sowie das Feuerkugelarchiv könnten schnell und unkompliziert ausgewertet werden. Die dabei entstehende Datenbasis würde neue Untersuchungen an den kosmischen Kleinkörpern in Erdnähe ermöglichen.

2 Formulierung der Aufgabenstellung

Folgende Schwerpunkte der Diplomarbeit ergeben sich aus der zuvor beschriebenen Problemstellung:

Hauptziel der Arbeit:

- **digitale Vermessung** der Negative des EN-Netzes
- **automatische Auswertung** der Aufnahmen

Folgende Teilaufgaben sind hierbei zu lösen:

- automatische Segmentierung und Identifizierung von Sternspuren
- semiautomatische Vermessung der Sternspuren und des Meteors
- Untersuchungen zur Einbindung von FIRBAL in das zu entwickelnde Programmpaket
- Schaffung einer komfortablen grafischen Benutzeroberfläche mit integrierten Hilfsfunktionen
- Erfassung von Zusatzinformationen zur Feuerkugel als Grundlage für ein Archiv
- Test der Software und der Vergleich der am Rechner erzielten Ergebnisse mit denen aus dem derzeitigen manuellen Verfahren

Aus Sicht der Informatik sollte die Diplomarbeit in drei Themenkomplexe unterteilt werden.

- Entwicklung, Implementation und Evaluierung von Algorithmen zur automatischen Segmentierung, Identizierung und Vermessung von Sternspuren und Meteoren
- Einbindung des Programmpakets FIRBAL
- Entwicklung einer komfortablen grafischen Oberfläche mit Hilfs- und Archivierungsfunktionen

Entsprechend diesen Komplexen ist die vorliegende Arbeit gegliedert.

3 Schritte der Bildverarbeitung

In diesem Abschnitt werden Probleme diskutiert, die mit der Segmentierung (der automatischen Erkennung) von Sternspuren sowie deren Identifizierung zusammenhängen. Außerdem fällt die exakte Vermessung der Sterne und des Meteors in den Bereich der Bildverarbeitung.
Es soll erkundet werden, inwieweit Sternspuren auf Feuerkugelaufnahmen *ohne* Zusatzinformationen vollautomatisch erkannt und vermessen werden können. Diese Problemstellung ist zunächst theoretischer Natur, da in der Praxis Daten wie die geografische Lage des Beobachtungsortes, der Aufnahmezeitpunkt, die Belichtungszeit des Negativs und die Orientierung des Bildes bekannt sind. Je mehr Informationen jedoch selbständig vom Programm aus dem vorliegenden Rasterbild gewonnen werden können, desto besser läßt sich der Gesamtprozeß der Vermessung von Feuerkugelfotografien automatisieren. Anhand der bei der Bildverarbeitung erzielten Ergebnisse kann später entschieden werden, welche Kombination aus manuellen Eingaben und automatischen Routinen den Vermessungsprozeß am effektivsten gestaltet.
Die ersten Betrachtungen betreffen die Digitalisierung der Negative (Kapitel 3.1), gefolgt von der Segmentierung (Kapitel 3.2) und Identizierung (Kapitel 3.3) von Sternspuren und Meteoren (Kapitel 3.4). Es schließt sich die Vermessung der Sterne und des Meteors (Kapitel 3.5) an. Schließlich werden die Ergebnisse der Bildverarbeitung im Kapitel 3.6 bewertet.

3.1 Digitalisierung des Negativs

Die Grundlage zur digitalen Vermessung von Feuerkugelaufnahmen wird durch die hochauflösende Digitalisierung des Negativs geschaffen. Am INSTITUT FÜR PLANETENERKUNDUNG steht dazu ein POLAROID-Diascanner mit einer maximalen *Auflösung* von 2700 dpi und einer *Farbtiefe* von bis zu 24 Bit zur Verfügung. Der Scanner ist an einem APPLE MACINTOSH angeschlossen, als Steuersoftware dient ADOBE PHOTOSHOP. Das Programm erlaubt es, das Negativ beim Scannen zu invertieren, so daß nach der Digitalisierung ein normales Bildpositiv vorliegt.
Um die höchstmögliche Genauigkeit bei der späteren Vermessung zu erreichen, wird die maximale Auflösung benutzt. Die 2700 dpi des Scanners entsprechen etwa 100 Linien pro Millimeter auf dem Film. Das ist der Wert, den feinkörnige Filme heutzutage üblicherweise erreichen (80-110 Linien pro Millimeter nach Rendtel [1991]). Lediglich teure Spezialemulsionen können bis zu 300 Linien pro Millimeter auflösen. Dabei gilt die Regel: je empfindlicher ein Film, desto geringer seine Auflösung auf Grund der Grobkörnigkeit.
Beim Prozeß des Scannens wird also bereits die Filmauflösung erreicht. Im digitalen Bild kann die Genauigkeit noch einmal gesteigert werden, indem die Positionen mit Subpixelgenauigkeit vermessen werden. Andererseits muß man prüfen, inwieweit die Aufnahme beim Scanvorgang

verzerrt wird. Es ist zu erwarten, daß die digitale der manuellen Bildvermessung insgesamt ebenbürtig ist.
Als Farbtiefe wurden 8 Bit gewählt, wobei nur Graustufenwerte verwendet wurden. 256 Helligkeitswerte sind für die angestrebten astrometrischen und photometrischen Ziele ausreichend. Eine größere Farbtiefe würde den Speicheraufwand für Bilder und den Rechenaufwand bei ihrer Verarbeitung unnötig erhöhen.
Abbildung 15 zeigt eine weitere Auschnittsvergrößerung der Feuerkugel von Abbildung 13. Sie demonstriert die bei der Digitalisierung erreichte Auflösung. Das komplette von den EN-Kameras erzeugte Bild ist kreisförmig und hat auf dem Film einen Durchmesser von 16 mm. Das digitale Gegenstück besitzt damit die beachtliche Größe von etwa 2200x2200 Pixeln. Pro Bild fallen ca. 4,5 Megabyte unkomprimierte Daten an.

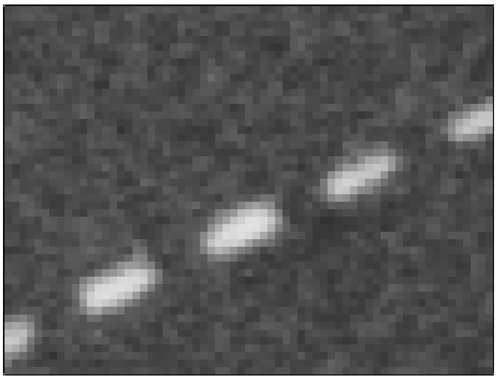

Abbildung 15: Ausschnittsvergrößerung der Feuerkugel aus Abbildung 13

3.2 Segmentierung von Sternspuren

Ziel der Bildsegmentierung ist es, aus dem Rasterbild die einzelnen Sternspuren zu extrahieren. Anhand einer typischen Aufnahme (Abbildung 16) lassen sich folgende Eigenschaften von Sternspuren ableiten, die bei der Segmentierung eine zentrale Rolle spielen:

- Sternspuren heben sich als helle Linien vom dunklen Hintergrund ab
- die Spuren haben im digitalisierten Bild eine typische Breite von etwa fünf Pixeln
- Sternspuren sind längliche Bildelemente (abgesehen vom *Polarstern*)
- die Sterne beschreiben konzentrische Ringsegmente um den Himmelspol

Die Segmentierung wird dadurch erschwert, daß es eine Reihe von Artefakten im Bild gibt, die ebenfalls eine oder mehrere der genannten Eigenschaften besitzen. Bevor die Sterne aus dem Bild extrahiert werden, ist es daher ratsam, ihre besonderen Eigenschaften mit Mitteln der Bildverarbeitung hervorzuheben.

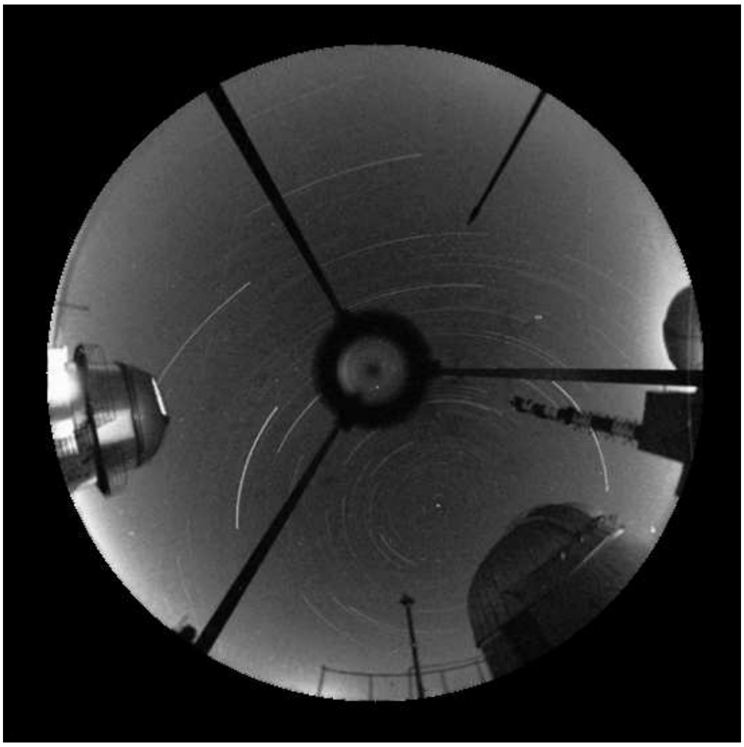

Abbildung 16: Beispielbild zur Demonstration der digitalen Bildverarbeitung

3.2.1 Bildverarbeitung zur Verstärkung der Sternspuren

Klassische Verfahren zur Linienerkennung beinhalten im allgemeinen drei Schritte:

- Hochpaßfilterung: Ziel der Anwendung von mathematischen Hochpaßfiltern ist die Verstärkung von linienförmigen Bildelementen (hohe Bildfrequenzen) bei gleichzeitiger Unterdrückung von flächenhaften Objekten (tiefe Bildfrequenzen)
- Verdünnung der Linien zu einer Stärke von einem Pixel
- Verbinden von Linienelementen, die beim Verdünnen getrennt wurden

Da Sterne im Bild als Linien erscheinen, bieten sich die Prozeduren in abgewandelter Form auch für die Verstärkung von Sternspuren an.
Zu beachten ist, daß die meisten Verfahren der Bildverarbeitung von hoher Komplexität sind und einen enormen Rechenaufwand erfordern. Zur Segmentierung und Identifizierung wird das Bild jedoch noch nicht in seiner vollen Auflösung benötigt, weshalb es zunächst verkleinert wird.
Für die konkrete Problemstellung hat es sich bewährt, das Bild in beiden Achsen um den Faktor vier zu stauchen. Das Ergebnisbild weist dann im Mittel eine Größe von 550x550 Bildpunkten auf. Der Rechenaufwand aller nachfolgenden Routinen vermindert sich um einen Faktor 16. Die Sternspuren haben im verkleinerten Bild eine durchschnittliche Breite von 1 bis 3 Pixeln. Als weiterer positiver Nebeneffekt ist die Reduzierung des Rauschens im Bild gemäß Gleichung [2] auf $^1/_4$ des Originalwertes zu verzeichnen.

[2]   Rauschen $r \sim 1 / Sqrt(n)$

mit n ... Anzahl der Bildpunkte, die zusammengefaßt werden

3.2.2 Hochpaßfilterung des Bildes

Die mathematische Filterung von Rasterbildern erfolgt meistens durch die *Faltung* des Bildes mit einer bestimmten Filtermatrix. Der Typ der Filtermatrizen entscheidet dabei über die Eigenschaften des Filters.

Für eine bestimmte Art von Bildelementen (Abbildung 17) sind spezielle Filter besonders geeignet.

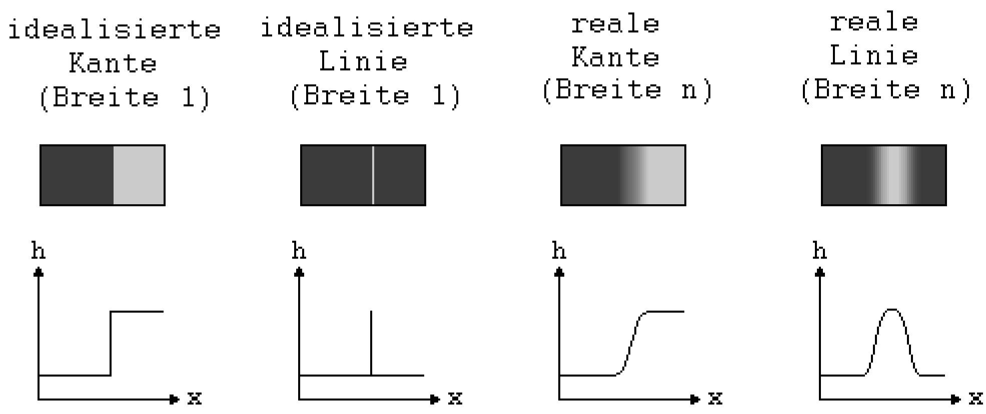

Abbildung 17: Typische Bildelemente

Die einfachsten Filter zur Kanten- und Linienverstärkung beruhen auf den Filterkernen von *Prewitt* oder *Sobel:*

[3]   Prewitt-Filtermatrizen
$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +1 & +1 \end{bmatrix}$$

[4]   Sobel-Filtermatrizen
$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix}$$

Der eigentliche Prozeß der Filterung, die Faltung des Bildes mit der Filtermatrix, geschieht nach folgender Gleichung:

[5]   Faltung
$$F(u,v) \bullet B(x,y) = \sum_{\substack{(u,v) \in UxV \\ (x-u,y-v) \in XxY}} F(u,v) * B(x-u,y-v)$$

mit F ... Filtermatrix
B ... Bild

Jeder Bildpunkt im Ergebnisbild resultiert aus der Summe der umliegenden Bildpunkte im Originalbild, multipliziert mit dem entsprechenden Koeffizienten in der Filtermatrix. Bei [3] und [4] handelt es sich um differentielle, gerichtete Filter.

Differentiell sagt aus, daß die Helligkeits*unterschiede* zwischen benachbarten Bildpunkten ermittelt werden. Gerichtet sind die Filter, weil sie jeweils nur Kanten parallel zur x- bzw. y-Achse verstärken. Wendet man die Filter paarweise nacheinander an, kann man beliebig orientierte Kanten hervorheben und ihre Orientierung im Bild ermitteln.

Die verallgemeinerte Form ist ein rotationssymmetrisches (nichtgerichtetes, differentielles) 3x3-Hochpaßfilter, das beliebig orientierte Kanten und Linien verstärkt:.

```
[ 6 ]      Hochpaßfilter  [ -1  -1  -1 ]
                          [ -1  +8  -1 ]
                          [ -1  -1  -1 ]
```

Der Filterkern eines Hochpaßfilters zeichnet sich generell dadurch aus, daß die peripheren Elemente der Matrix negative Vorzeichen besitzen, während in der Mitte positive Koeffizienten stehen. Die Summe aller Koeffizienten ist Null. Dadurch werden Flächen konstanter Helligkeit (tiefe Bildfrequenzen) vollständig vom Filter gelöscht. Hohe Ortsfrequenzen im Bild werden dagegen verstärkt.

Die Wirkung von Hochpaßfiltern läßt sich wie folgt erklären: Wenn ein idealisierter physikalischer Impuls beliebiger Größe, jedoch infinitesimal kleiner Ausdehnung (ein *Dirac-Stoß*) in ein System geschickt wird, z.B. wenn ein punktförmiger Stern fotografiert und digitalisiert wird, so erscheint er am Ausgang des Systems nicht mehr beliebig schmal (Abbildung 18). Statt dessen wird das Signal ‘geglättet’. In betrachteten Fall erscheint das Licht des punktförmigen Sterns nicht in einem einzigen Bildpunkt, sondern wird auf mehrere benachbarte Pixel verteilt. Betrachtet man diesen Vorgang im *Frequenzraum*, so stellt man fest, daß die hohen Frequenzen des Signals gedämpft oder abgeschnitten werden.

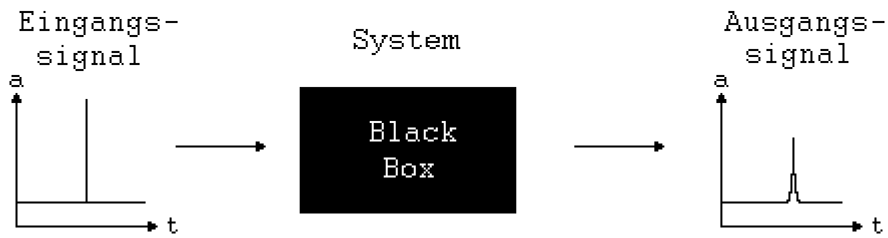

Abbildung 18: Verhalten eines Systems bei Anliegen eines Dirac-Stoßes

Die negativen Koeffizienten des Hochpaßfilters sorgen nun dafür, daß die auf die Nachbarpixel verteilte Helligkeit des Sterns durch die Faltung mit dem Filterkern wieder dem zentralen Bildpunkt ‘zugeführt’ wird. Helligkeitsstufen im Bild (Linien und Kanten) entsprechen den hohen

Ortsfrequenzen und werden verstärkt. Ihre Amplitude wird vergrößert und die Breite vermindert.

Hochpaßfilter verstärken nicht nur hochfrequente Bildanteile sondern auch das hochfrequente Rauschen entsprechend Gleichung [7]. Trotzdem ist insgesamt ein Gewinn an Information zu verzeichnen, da die betrachteten Bildelemente im Verhältnis zur ihrer Umgebung hervortreten.

[7] Varianz $\sigma_f^2 = a * \sigma^2$

mit σ ... Varianz des Bildes vor der Filterung
a ... Autokorrelation der Fitermatrix

Hochpaßfilter haben die Eigenschaft, daß sie jeweils nur für Linien oder Kanten einer bestimmten Breite optimal sind. Das unter [6] beschriebene Hochpaßfilter verstärkt zum Beispiel Linien der Stärke 1 Pixel besonders gut, während breitere Linien kaum hervorgehoben werden. Die optimale Linienbreite entspricht der Größe des Kerns positiver Koeffizienten in der Filtermatrix.
Die Lösung für breitere Linien stellt das *diskrete Laplace-Filter* dar. Es handelt sich dabei um Filtermatrizen mit ungeraden Kantenlängen, die in ihrer Größe jeweils an die im Bild vorhandenen Linien und Kanten angepaßt werden. Die Filterelemente der Matrix werden entsprechend der negativen zweiten Ableitung der *Gauß-Funktion* (*Laplace-Funktion*) berechnet:

[8] Gauß-Funktion $g(x) = e^{-x*x}$

erste Ableitung $g'(x) = -2x * e^{-x*x}$

zweite Ableitung $g''(x) = (4x^2-2) * e^{-x*x}$

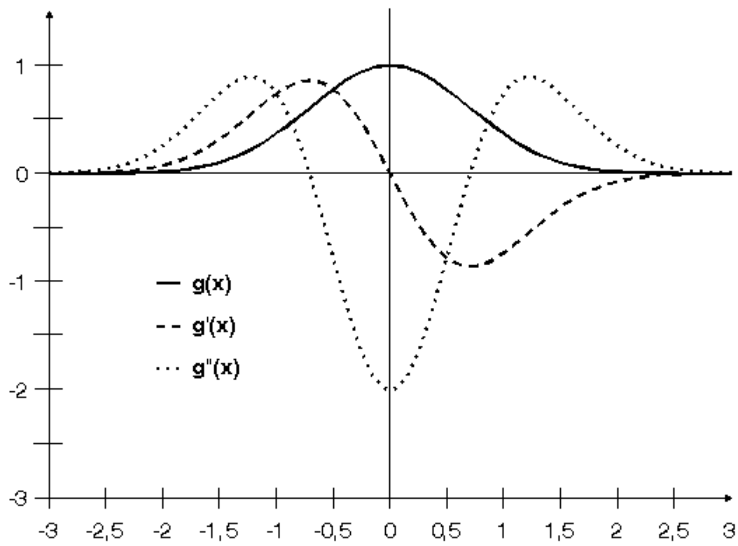

Abbildung 19: Gauß-Funktion sowie ihre erste und zweite Ableitung

Für die Verstärkung von Sternspuren in Feuerkugelaufnahmen ist es also notwendig, eine passende Filtermatrix für die durchschnittliche Sternspur zu finden. Dabei ist zu beachten, daß die komplette Filtermatrix bei jedem einzelnen Bildpunkt zur Anwendung kommt, so daß der Rechenaufwand bei der Faltung polynomial mit der Größe des Filters wächst:

[9] Komplexität $O = O(x*y*x_f*y_f)$

mit x ... horizontale Ausdehnung des Bildes
y ... vertikale Ausdehnung des Bildes
x_f ... horizontale Ausdehnung des Filters
y_f ... vertikale Ausdehnung des Filters

Das Filter ist also so klein wie möglich zu wählen.

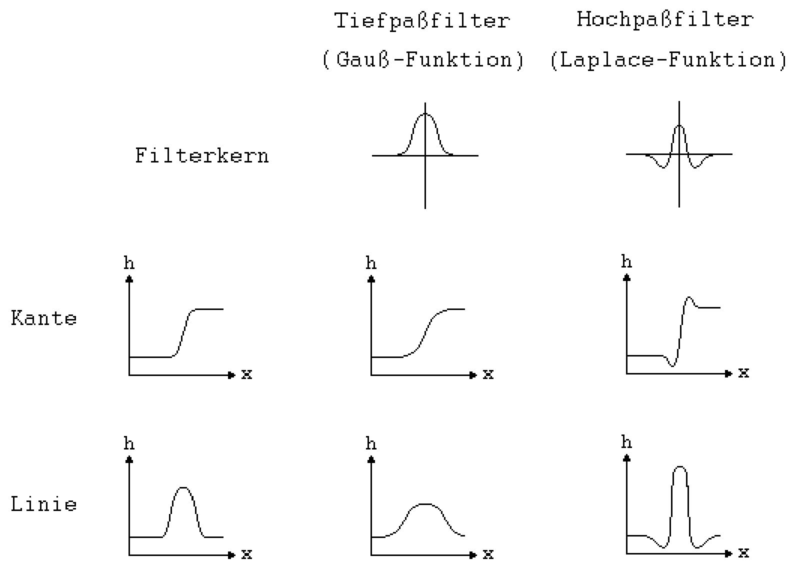

Abbildung 20: Wirkung von Gauß- und Laplace-Filtern auf Linien und Kanten

Weiterhin ist zu bedenken: Beim Standardverfahren zur Linienerkennung nach *Canny* wird das Bild mit einem passenden Laplace-Filter bearbeitet und anschließend über einen Schwellwert binär klassifiziert. Ein anderes Verfahren nach *Marr-Hildred* verwendet ebenfalls einen Hochpaßfilter, betrachtet dann jedoch die Nulldurchgänge im gefilterten Bild. Der Vorteil dieses Verfahren ist, daß direkt zwischen Linien und Kanten unterschieden werden kann, während normale Hochpaßfilter beide Bildelemente gleichermaßen verstärken. Der wesentliche Nachteil des Verfahren nach Marr-Hildred besteht jedoch in seiner bedeutend höheren Anfälligkeit gegenüber Rauschen, so daß zur Linienerkennung im allgemeinen das Canny-Verfahren bevorzugt wird.

Schließlich können alle Filterverfahren nicht nur wie bisher beschrieben im *Ortsraum*, sondern auch im *Frequenzraum* implementiert werden. Dazu wird das Bild zunächst *Fourier-transformiert* (mittels *Fast-Fourier-Transformation, FFT)* und die Bildfrequenzen dann direkt im Frequenzraum manipuliert. Was im Ortsraum durch eine komplexe Faltung mit der Filtermatrix erreicht wird, läßt sich im Frequenzraum durch einfache Multiplikation mit einer äquivalenten Filterfunktion bedeutend schneller bewerkstelligen. Danach muß das Bild jedoch wieder mittels der *inversen Fast-Fourier-Transformation* (FFT^{-1}) in den Ortsraum zurücktransformiert werden.

Die zweidimensionale Fast-Fourier-Transformation hat eine enorme Komplexität [10]. Daher ist der zusätzliche Aufwand durch FFT und FFT^{-1} so hoch, daß die Filterung im Frequenzraum im allgemeinen erst für Filtermatrizen mit mehr als 10x10 Koeffizienten effektiv wird.

[10] Komplexität $O = O(x*\log(x)*y*\log(y))$

mit x ... horizontale Ausdehnung des Bildes
y ... vertikale Ausdehnung des Bildes

Außerdem läßt sich prinzipiell die Gleichheit von Orts- und Frequenzraumfilterung nachweisen [11], so daß keine grundsätzlich neuen Effekte von der Arbeit im Frequenzbereich zu erwarten sind. Aus diesem Grunde wird hier die Filterung im Ortsbereich bevorzugt.

[11] $F(u,v) \bullet B(x,y) \equiv FFT^{-1}(I * FFT(B(x,y)))$

mit F ... Filtermatrix im Ortsraum
I ... Filterfunktion im Frequenzraum
B ... Bild

Für die konkrete Aufgabenstellung der Verstärkung von Sternspuren auf Feuerkugelaufnahmen wurden verschiedene Filtergrößen und Arten (diskrete Laplace-Filter, ähnliche Filter) getestet und qualitativ bewertet. Während 3x3-Filter einen zu kleinen Filterkern haben und breitere Sternspuren nicht optimal verstärken (Abbildung 21) , ist ein Filter mit 5x5 Elementen etwa der mittleren Breite von Sternspuren angepaßt (Abbildung 22). Der kleine positive Kern der Matrix unterdrückt das Rauschen, indem über benachbarte Bildpunkte gemittelt wird[1], während die peripheren negativen Elemente für den Verstärkungseffekt sorgen. Noch größere Filter (7x7 Pixel) bringen keine Vorteile für die gegebene Problemstellung (Abbildung 23). Einerseits werden sehr schwache Sternspuren mit nur einem Pixel Breite durch den positiven Kern der Filtermatrix völlig verwischt, andererseits ist der Rechenaufwand etwa doppelt so hoch wie bei einem 5x5-Filter.

[1] Es handelt sich also genau genommen um einen Bandpaß, da die höchsten Frequenzen unterdrückt werden.

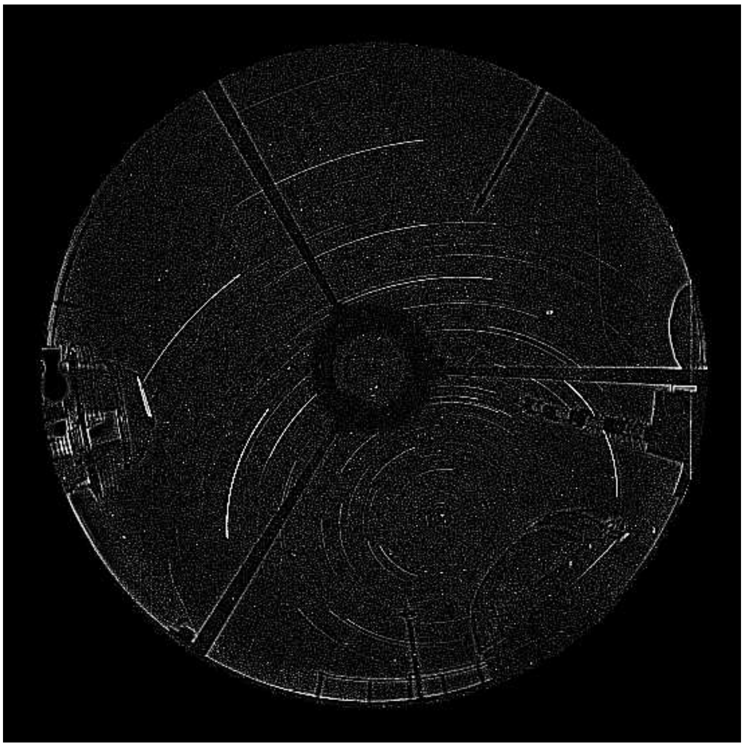

Abbildung 21: Ergebnis der Bearbeitung mit einem 3x3-Laplace-Filter

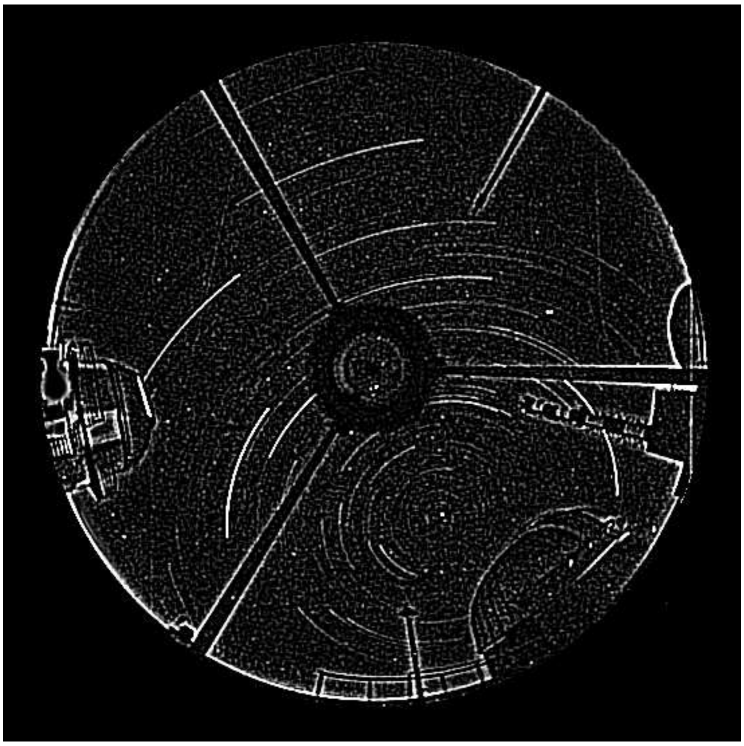

Abbildung 22: Ergebnis der Bearbeitung mit einem 5x5-Laplace-Filter

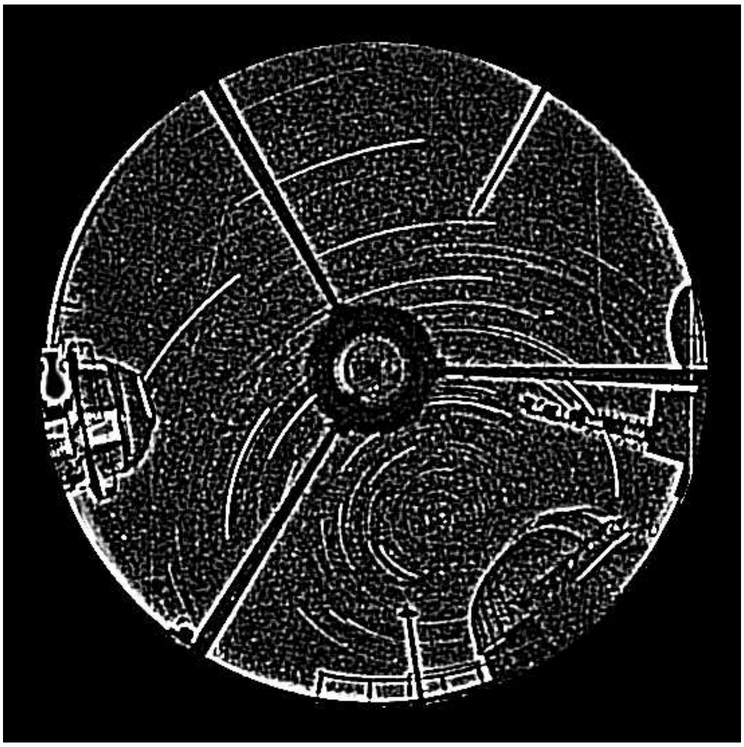

Abbildung 23: Ergebnis der Bearbeitung mit einem 7x7-Laplace-Filter

Die Veränderungen im Ergebnisbild bei modifizierten Koeffizienten der Filtermatrix waren so minimal, daß die Entscheidung zugunsten des 5x5-Laplace-Filters [12] unproblematisch war.

```
[ 12 ]    Laplace-Filtermatrix     [ -1  -1  -1  -1  -1 ]
                                   [ -1  +1  +2  +1  -1 ]
                                   [ -1  +2  +4  +2  -1 ]
                                   [ -1  +1  +2  +1  -1 ]
                                   [ -1  -1  -1  -1  -1 ]
```

Während der Filterung bietet sich wie beim Canny-Verfahren eine binäre Klassifikation des Bildes an. Statt 256 Graustufen kommen für jeden Bildpunkt dann nur noch die Farbwerte schwarz oder weiß in Frage (Abbildung 24). Es handelt sich um den nächsten Schritt der Bildsegmentierung. Nur noch die Bildpunkte bleiben erhalten, die mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Linie gehören. Als Schwellwert zur Klassifikation hat sich der Helligkeitswert 40 als brauchbar erwiesen.

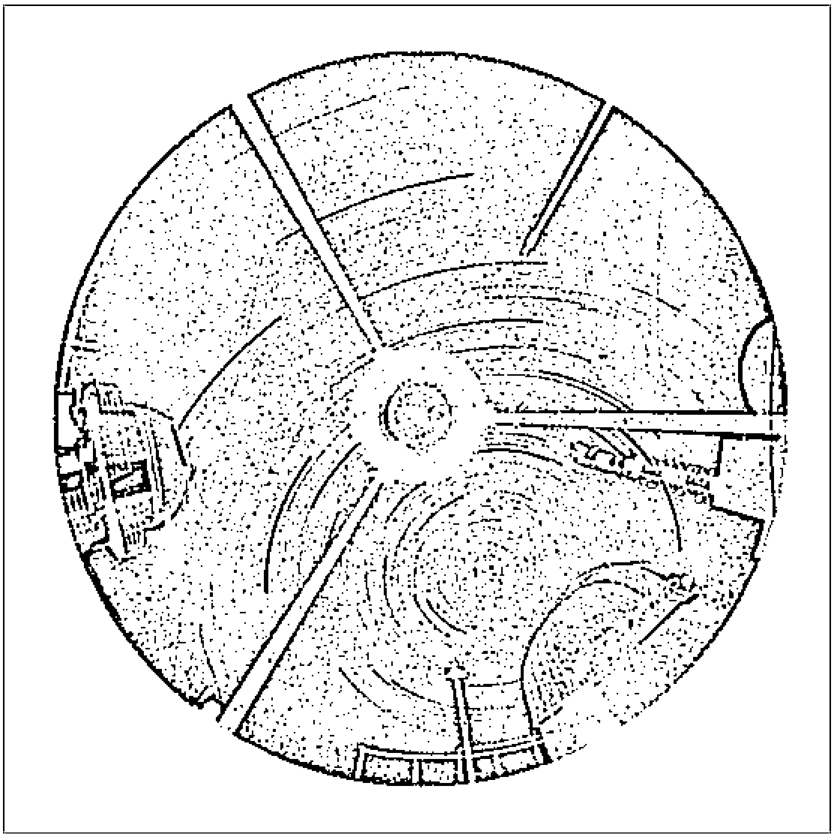

Abbildung 24: Bearbeitungsstand nach Hochpaßfilterung und binärer Klassifikation[2]

3.2.3 Verdünnung von Linien und Verbindung getrennter Bildsegmente

Nachdem die Sternspuren durch Hochpaßfilterung verstärkt und mittels binärer Klassifikation vom Bildhintergrund getrennt wurden, würde sich nach dem Canny-Algorithmus das Ausdünnen der Linien (*non-local maximum supression*) und das Verbinden getrennter Linienelemente (*hysterisis linking*) anschließen.

Da es kein erklärtes Ziel der Sternsegmentierung ist, alle Spuren auf eine einheitliche Breite von einem Pixel zu bringen, entfällt das Ausdünnen. Helle Sterne weisen im Bild also breitere Spuren auf als dunkle.

Auch das Verbinden von getrennten Bildsegmenten erübrigt sich damit in seiner ursprünglichen Form, da die Sternspuren nicht ausgedünnt werden. Andererseits spielt das Verbinden von unterbrochenen Sternspuren eine besondere Rolle bei der Identifizierung der Sterne. Wie in Abbildung 10 zu sehen war, wird die Kamera über dem Kugelspiegel an drei Streben gehalten. Sowohl die Kamera als auch die Streben decken damit einen Teil des Himmels ab, so daß Sternspuren häufig unterbrochen sind. Derselbe Effekt kann auftreten, wenn Objekte am

[2] Zur besseren Anschaulichkeit werden die folgenden Bilder invers dargestellt, helle Linien erscheinen also schwarz.

Horizont (z.B. Bäume oder Häuser) einen Stern bedecken und später wieder freigeben oder wenn Wolken während der Belichtung durch das Gesichtsfeld ziehen.
In dieser Arbeit wurde versucht, einen dem hysterisis linking angelehnten Algorithmus zu entwerfen, der unterbrochene Sternspuren wieder verbindet. Dabei wurde ausgehend vom dem Ende einer Sternspur in gewissem Abstand nach einer Fortsetzung in derselben Richtung gesucht.
Es hat sich jedoch gezeigt, daß dieses Verfahren keine sinnvollen Ergebnisse bringt. Einerseits wurden auf diese Art eng beieinander liegende Sterne fehlerhaft miteinander verbunden. Andererseits sind die durch Streben und Kamera verursachten Lücken so groß, daß sie nur in wenigen Fällen durch einfaches Verbinden von Bildsegmenten behoben werden können. Das Verbinden von unterbrochenen Sternspuren ist erst zu einem späteren Zeitpunkt möglich, wenn mehr Informationen zur Lage der Sterne vorliegen.

3.2.4 Rauschunterdrückung

Wie Abbildung 24 zeigt, beinhaltet das Bild in der derzeitigen Bearbeitungsstufe neben den Sternspuren viele Artefakte. Diese entstanden bei der Hochpaßfilterung durch Gegenstände wie die Streben der Kamerahalterung, die Kamera selbst, terrestrische Objekte am Bildrand oder einfach durch das Rauschen im Originalbild. Sie wurden so weit verstärkt, daß sie bei der Schwellwertsetzung nicht beseitigt werden konnten.
Anhand eines einfachen Kriteriums, welches auf einer weiteren Eigenschaft von Sternspuren beruht (siehe Kapitel 3.2), läßt sich das verbliebene Rauschen deutlich mindern. Während Sternspuren durch die scheinbare Drehung der Erde eine gewisse Mindestlänge aufweisen, ist das Rauschen größtenteils punktförmiger Natur. Es wird also ein weiteres digitales Filter benötigt, das nur Bildsegmente mit einer gewissen Mindestgröße akzeptiert.

Grundlage dafür ist die Betrachtung einzelner Segmente. Ein Bildsegment wird als eine Menge von Punkten definiert, die über die Eigenschaft der *8-connectivity* verfügen. Zur Extraktion eines Segments geht man von einem Startpixel mit dem Wert 1 aus, ermittelt dazu alle Nachbarpunkte, die ebenfalls den Wert 1 haben (sie gehören zum selben Bildsegment) und setzt die Prozedur rekursiv für diese Bildpunkte fort.
Im nächsten Schritt wird die Größe des Segments als der *maximale euklidische Abstand* zweier zum selben Segment gehörigen Bildpunkte definiert. Der euklidische Abstand berechnet sich zu

[13] Abstand $a = Sqrt\ ((x_a-x_b)^2 + (y_a-y_b)^2)$

mit x_a, y_a ... Koordinaten des ersten Bildpunktes
x_b, y_b ... Koordinaten der zweiten Bildpunktes

Es wird also der paarweise Abstand aller Pixel eines Segments berechnet. Unterschreitet die Größe einen bestimmten Schwellwert, dann wird das Segment gelöscht.

Der Algorithmus besitzt die Komplexität

[14] Komplexität $O = O\ (m*n^2)$

mit m ... Anzahl der Segmente
n ... Anzahl der Bildpunkte des Segments

Der hohe Aufwand ist vertretbar, weil die Zahl der zu einem Segment gehörenden Bildpunkte im allgemeinen klein ist.
Abbildung 25 zeigt das betrachtete Beispielbild nach Anwendung des Verfahrens zur Rauschunterdrückung. Es wurden alle Bildsegmente gelöscht, die kleiner als 8 Pixel waren.

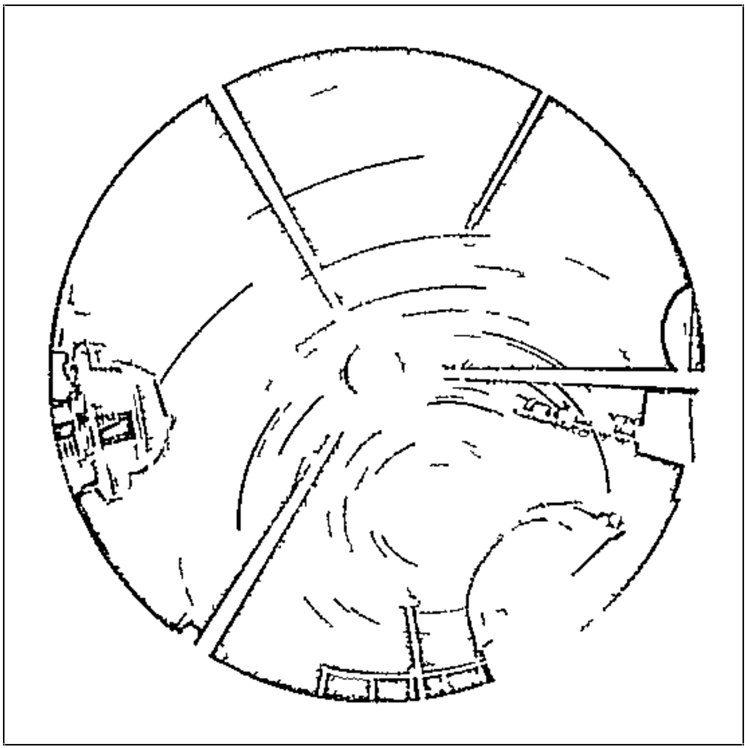

Abbildung 25: Bearbeitungsstand des Bildes nach Beseitigung des Rauschens

3.2.5 Trennung verbundener Bildelemente

Nach der Anwendung des im letzten Abschnitt erläuterten Verfahrens ist zwar das Rauschen im wesentlichen beseitigt worden, die schon erwähnten Artefakte wurden davon jedoch nicht beeinflußt. Nun muß also die zuletzt aufgeführte Eigenschaft von Sternspuren, ihre relative Lage zum Himmelspol, betrachtet werden, um sie von den Artefakten im Bild zu unterscheiden. Dabei tritt jedoch folgendes Problem auf:
Bisher wurden einzelne Bild*segmente* betrachtet. Es handelt sich dabei eine Ansammlung von Pixeln, die durch ihre *physische* Lagebeziehung zueinander definiert wurde. Sternspuren sind jedoch Bild*elemente*, also eine Menge von Bildpunkten, die durch ihre *logische* Zugehörigkeit zu einem bestimmten Objekt (z.B. Sternspur, Kamerastrebe) definiert werden.

Es gibt Bildsegmente, die aus mehreren Bildelementen bestehen. Wenn zum Beispiel eine Sternspur von der Kamerahalterung im Bild unterbrochen wurde, so handelt es sich um zwei verschiedene Elemente. Im aktuellen Bild (Abbildung 25) sind sie jedoch fälschlicher Weise in einem Bildsegment miteinander verbunden. Es handelt sich um einen Nebeneffekt des verwendeten Hochpaßfilters, daß sowohl Linien (z.B. Sternspuren) als auch Kanten (z.B. Kamerastreben) verstärkt werden. Damit die speziellen Eigenschaften von Sternspuren überprüft werden können, müssen also zunächst die verbundenen Bildelemente getrennt werden.

Wodurch zeichnen sich Verbindungen von Sternspuren mit anderen Elementen aus? Während Sterne in erster Näherung gerade Linien darstellen, die in größerem Maßstab immer mehr gekrümmt sind, sind die zu beseitigenden Verbindungsstellen durch einen abrupten Richtungswechsel gekennzeichnet. Man kann also definieren, daß zwei Nachbarpixel eines bestimmten Bildpunktes genau dann zum selben Bildelement gehören, wenn sie eine der folgenden Bedingungen erfüllen (Abbildung 26):

a) Sie haben einen geringen Winkelabstand (<45 Grad) voneinander. Folglich liegen sie auf derselben Seite des Bildpunktes.
b) Sie haben einen sehr großen Winkelabstand (>180-45 Grad) voneinander und liegen demnach gegenüber.

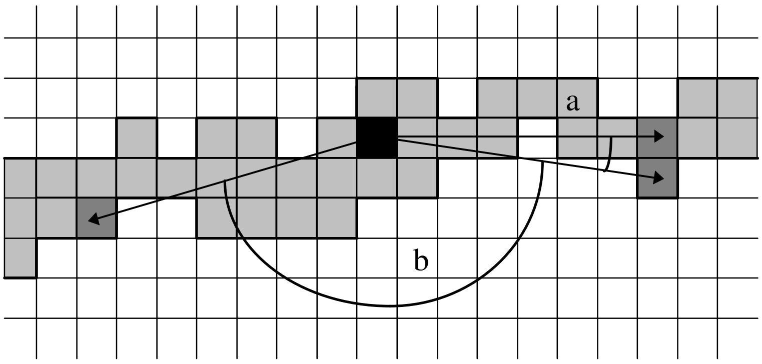

Abbildung 26: Zwei Nachbarpixel, die zum selben Bildelement gehören

Wenn die genannten Nachbarpixel jedoch einen Winkelabstand zwischen 45 und 135 Grad aufweisen, dann liegt ein abrupter Richtungswechsel im Bildsegment vor. Der hier betrachtete Bildpunkt (Abbildung 27) bildet die Schnittstelle zweier verschiedener Bildelemente und kann gelöscht werden.

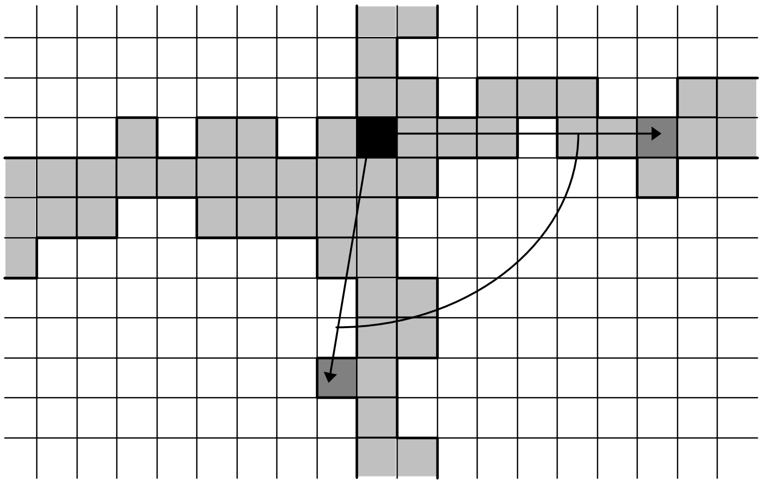

Abbildung 27: Zwei Nachbarpixel, die zu verschiedenen Bildelementen gehören

Schließlich ist noch der Begriff Nachbarpixel in diesem Zusammenhang genauer zu definieren. Es können nicht die unmittelbaren Nachbarn eines Pixels gemeint sein: Da Sternspuren häufig breiter als ein Pixel sind, würde die Bedingung zum Löschen für fast jeden Bildpunkt einer hellen Sternspur zutreffen. Andererseits dürfen die beiden zu betrachtenden Nachbarn nicht beliebig weit vom aktuellen Pixel entfernt sein. Da die Sternspuren keine Linie sondern in größerem Maßstab ein Ringsegment bilden, können sehr weit voneinander entfernt liegende Nachbarn einen Winkel kleiner als 135 Grad aufweisen, obwohl sie zum selben Bildelement gehören.
Es hat sich in verschiedenen Beispielen als praktisch erwiesen, alle diejenigen Pixel in die Untersuchung einzubeziehen, die einen euklidischen Abstand (siehe [13]) von 6 bis 8 Pixeln zum betrachteten Bildpunkt aufweisen (Abbildung 28).

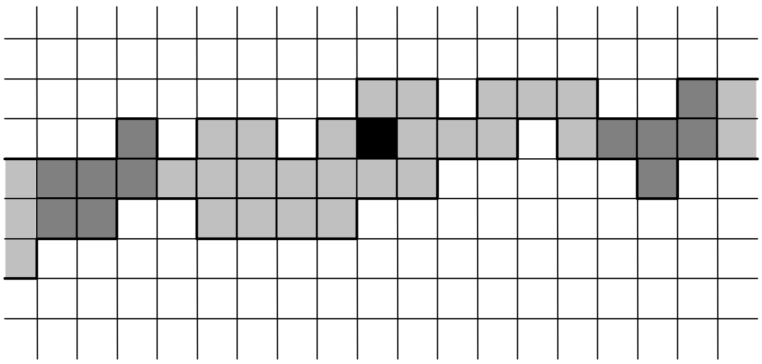

Abbildung 28: Nachbarn sind Bildpunkte mit 6 bis 8 Pixeln Abstand

Abbildung 29 zeigt das Resultat des beschriebenen Verfahrens nach Anwendung auf das Beispielbild. Zusätzlich wurde anhand des im folgenden ermittelten Bilddurchmessers der äußere Rand abgeschnitten, was den Horizont eliminierte. Die Prozedur trennte die meisten miteinander verbundenen Bildelemente und beseitigte gleichzeitig einige Artefakte von terrestrischen Objekten.

Abbildung 29: Bearbeitungsstand nach dem Trennen verbundener Bildelemente

Folgende Nebeneffekte sind zu erkennen:

- Wenn eine Sternspur bis an die Kamerastrebe heranreicht, wird an der Verbindungsstelle auch ein Teil des Sterns gelöscht. Es folgt aus der Definition von Schnittpunkten und des Abstands von Nachbarpixeln, daß auch in der Nähe von Schnittstellen gelegene Bildpunkte beseitigt werden. Das stellt jedoch keinen Verlust im Sinne der angestrebten Identifizierung und Positionsbestimmung von Sternen dar. Beim Schnittpunkt zwischen Sternspur und Strebe handelt es sich von vorn herein um eine künstliche Unterbrechung und nicht um den gesuchten Anfang oder das Ende einer Sternspur.
- Wenn sich zwei Bildelemente nur in geringem Winkel schneiden (Beispiel: heller Stern an der rechten Strebe in Abbildung 29), so können sie durch das Verfahren nicht getrennt werden. Auch das liegt in der Definition von Schnittstellen verschiedener Bildelemente begründet. Im konkreten Fall gibt es jedoch nur wenige Stellen, an denen ein solcher spitzer Winkel auftritt. Die Bearbeitung derartiger Sonderfälle muß auf spätere Phasen des Segmentierungsverfahrens verschoben werden.

Der Rechenaufwand zum Trennen von bestehenden Bildelementen ist sehr hoch. So müssen zu jedem im Bild verbliebenen Bildpunkt alle Nachbarpixel in passendem Abstand gefunden und paarweise untersucht werden. Bei einer mittleren Zahl von k Pixeln pro Bildsegment ist die Komplexität von der Größenordnung

[15] Komplexität $O = O\ (n*k^2)$

```
mit  n ... Anzahl der Bildpunkte
     k ... Anzahl der Bildpunkte je Bildsegment
```

Je weniger Bildsegmente zu untersuchen und je kleiner sie sind, desto schneller arbeitet das Verfahren. Das spricht dafür, das Trennen von Bildelementen nach der im vorigen Abschnitt beschriebenen Prozedur zur Rauschunterdrückung durchzuführen. Allerdings können im Ergebnis des Trennens Bildsegmente entstehen, die nicht mehr die geforderte Mindestgröße besitzen. Folglich muß das Verfahren zur Rauschunterdrückung noch einmal angewandt werden oder es wird erst nach dem Trennen verbundener Bildelemente durchgeführt.

3.2.6 Bestimmung des Koordinatensystems

Der letzte Schritt der Bildsegmentierung bildet bereits einen fließenden Übergang zur anschließenden Identifizierung der Sternspuren. Nachdem im Bild nur noch getrennte Bildelemente vorliegen, muß anhand ihrer Lagebeziehung zueinander entschieden werden, ob es sich um Sterne oder weiterhin verbliebene Artefakte handelt. Wie bereits beschrieben zeichnen sich Sterne dadurch aus, daß sie konzentrische Ringsegmente um den Himmelspol bilden. Da das zugrunde liegende *äquatoriale Koordinatensystem* und damit auch die Lage des *Himmelspols* unbekannt ist, können die Sternspuren nicht ohne weiteres extrahiert werden. Vielmehr ist anhand der gegenseitigen Lagebeziehung *aller* Bildelemente das Koordinatensystem zu ermitteln, welches dann gleichzeitig zur Klassifikation der Elemente genutzt wird. Außerdem bildet es die Grundlage für die spätere Identifizierung der Sterne.

Das dem Bild zugrunde liegende äquatoriale Koordinatensystem kann durch fünf Parameter beschrieben werden, von denen sich drei auf einfache Art näherungsweise bestimmen lassen.

- x_z, y_z - die Lage des Zenits
- r_z - der Radius des Bildausschnitts
- x_p, y_p - die Lage des Himmelspols

Eine Feuerkugelaufnahme zeichnet sich dadurch aus, daß in der Mitte des Negativs ein kreisförmiger Ausschnitt von ca. 16 mm Durchmesser belichtet ist, während der äußere Rand unbelichtet bleibt (siehe Abbildung 12). Berechnet man ein *Histogramm* des Bildes, so kann man den zentralen Ausschnitt relativ leicht vom Rand trennen.
Der unbelichtete Rand stellt eine große Fläche geringer Helligkeit dar. Er wird also am unteren Ende des Histogramms ein deutliches Maximum hervorgerufen. Wählt man nun einen Schwellwert, der leicht über dem Maximum liegt, so hat man alle Bildpunkte ausgeschlossen, die außerhalb des Bildfeldes liegen. Anhand der verbliebenen Pixel kann man dann sowohl die

Mittelpunktskoordinaten (x_z und y_z) als auch den Radius (r_z) mittels *räumlicher Momente zweiter Ordnung* [16] näherungsweise bestimmen. Diese Operation muß erfolgen, bevor das Bild gefiltert und binär klassifiziert wird!

[16] Momente erster Ordnung

$$x_z = \sum_{i=1}^{n} x_i \;/\; n$$

$$y_z = \sum_{i=1}^{n} y_i \;/\; n$$

Momente zweiter Ordnung

$$\mu_{xx} = \sum_{i=1}^{n} (x_i - x_z)^2 \;/\; n$$

$$\mu_{xy} = \sum_{i=1}^{n} (y_i - y_z)^2 \;/\; n$$

$$\mu_{xy} = \sum_{i=1}^{n} (x_i - x_z) * (y_i - y_z) \;/\; n$$

$$r_z = \mu_{xx} \;/ (4 * \mu_{xx} * \mu_{yy} - 4 * \mu_{xy}^2)$$

Die ungefähre Position des Himmelspols könnte unter Zuhilfenahme des Polarsterns ermittelt werden. Der ist jedoch schwierig automatisch zu finden, da er sich auf den Aufnahmen als heller Fleck (keine Strichspur) kaum vom Rauschen unterscheidet und dementsprechend von der Routine zur Rauschunterdrückung gelöscht wird. Man muß seine Position also über die einzelnen Strichspuren der Sterne ermitteln: Die Sterne bilden Ringsegmente und der Mittelpunkt aller Ringsegmente entspricht dem Himmelspol.

Es stellt sich nunmehr die Frage, mit welcher mathematischen Figur die Ringsegmente am besten hinreichend genau beschrieben werden können. In einem ersten Versuch wurde davon ausgegangen, daß der Kreis eine gute Näherung für die wirkliche Form einer Sternspur darstellt. Ein Kreis in beliebiger Lage läßt sich durch drei Parameter, seine Mittelpunktskoordinaten und den Radius, definieren.
Es gibt zwei Verfahren, wie man aus einem gegebenen Rasterbild und der zu erwartenden geometrischen Figur die Parameter des Bildelements bestimmen kann. Ein relativ schnelles und sicheres Verfahren ist die *Hough-Transformation*. Ist die geometrische Figur durch n Parameter definiert, so wird ein n-dimensionaler Parameterraum betrachtet.

Für den Kreis wird also eine dreidimensionale Matrix aufgespannt. Jeder Punkt auf dem Kreis genügt der Formel

[17] Kreisgleichung $r^2 = (x-x_z)^2 + (y-y_z)^2$

mit x,y ... Koordinaten eines Punktes auf dem Kreis
x_z,y_z ... Koordinaten des Kreismittelpunktes
r ... Radius

Für einen einzelnen Punkt ist das Gleichungssystem des Kreises unterbestimmt[3], die gesuchten Kreisparameter lassen sich also nicht direkt ableiten. Man probiert daher zu jedem Bildpunkt nacheinander alle möglichen Wertekombinationen von x_z und y_z durch, bestimmt nach [17] den zugehörigen Radius r und erhöht das entsprechende Matrixelement $\{x_z,y_z,r\}$ um eins.
Jeder einzelne Punkt spannt so eine Ebene im x_z-y_z-r-Raum auf. Wenn man das Verfahren auf alle zu einem Kreis oder Kreissegment gehörenden Punkte anwendet, so werden verschiedene Ebenen in die Matrix eingetragen. Alle Ebenen schneiden sich genau in einem Punkt, der dem gesuchten Mittelpunkt und Radius des Kreises entspricht. Das folgt daraus, daß Gleichung [17] nur bei einem bestimmten Triple $\{x_z,y_z,r\}$ für alle Bildpunkte erfüllt ist. Man muß also nach Eintrag aller Ebenen nur noch das größte Matrixelement bestimmen, seine Indizes entsprechen dann den gesuchten Kreisparametern.

Die Hough-Transformation eignet sich sehr gut für verrauschte Daten. Nicht alle Punkte einer Sternspur liegen exakt auf einem Kreissegment. Die Ebenen werden sich daher auch nicht exakt in einem Punkt treffen, sondern es wird ein kleines Gebiet innerhalb der Matrix mit großen Zahlen gefüllt sein. Man bestimmt dann den Schwerpunkt des Gebiets und erhält so die Parameter für den am besten zu allen Pixeln passenden Kreis.
Die Hough-Transformation hat jedoch auch zwei entscheidende Nachteile, die sie für den konkreten Anwendungsfall ungeeignet machen: Die Größe der Matrix hängt von der geforderten Genauigkeit der Kreisparameter ab. In diesem Fall müßte sie für x_z, y_z und r jeweils mindestens 300 verschiedene Werte zulassen. Die Matrix hätte also eine Größe von 27.000.000 Elementen und für jeden einzelnen Bildpunkt müßten 90.000 Matrixelemente inkrementiert werden. Der Rechen- und Speicheraufwand wäre also unvertretbar hoch. Hinzu kommt, daß mit komplexer werdenden geometrischen Figuren der Grad der polynomialen Komplexität steigt. Für eine durch vier Parameter beschriebene Ellipse wird zum Beispiel eine vierdimensionale Matrix benötigt, die nicht mehr sinnvoll bearbeitet werden kann. Die Hough-Transformation ist also vor allem für Objekte mit zwei Parametern (Linien) interessant, jedoch nicht für das untersuchte Problem.

[3] Es werden drei Punkte benötigt, die nicht auf einer Linie liegen, um die Lage eines Kreises eindeutig zu definieren.

Statt dessen bietet sich ein klassisches *Gradientenverfahren* an, bei dem der Mittelpunkt aller Bildpunkte eines Segments so lange iterativ optimiert wird, bis die Sternspur bestmöglichst durch einen Kreis beschrieben wird. Die ermittelte Lage entspricht dann der gesuchten Position des Himmelspols.

Die Iteration verläuft wie folgt: Zunächst wird ein Startwert für die Mittelpunktskoordinaten gewählt. Für jeden Punkt der Sternspur wird der euklidische Abstand zum Mittelpunkt (entspricht dem Radius des Kreises) bestimmt. Der mittlere Radius des Kreises ergibt sich dann aus dem *arithmetischen Mittel* der Abstände aller Punkte des Bildelements. Die Qualität der vermuteten Mittelpunktsposition wird nach der *Methode der kleinsten Quadrate* durch die *Standardabweichung* beschrieben.

[18] Radius $r_i = Sqrt((x_i - x_m)^2 + (y_i - y_m)^2)$

arithmetisches Mittel $\overline{r} = \sum_{i=1}^{n} r_i / n$

Standardabweichung $\sigma = Sqrt(\sum_{i=1}^{n} (\overline{r} - r_i)^2 / (n-1))$

mit x_i, y_i ... Koordinaten des i.ten Bildpunktes
x_m, y_m ... Mittelpunktskoordinaten
n ... Anzahl der Bildpunkte

Dieselbe Rechnung wird nun für eine Position des Kreismittelpunktes oberhalb, unterhalb, links und rechts der Startposition vorgenommen. Schließlich wird der Mittelpunkt in die Richtung korrigiert, in welcher der Fehler (Standardabweichung) minimal war, und die Iteration von neuem gestartet. Das Verfahren terminiert, wenn ein Optimum oder der Bildrand erreicht ist. Im letzten Fall handelt es sich um ein Bildelement, das nicht um den Himmelspol gebogen ist (ein Artefakt). Es kann also gelöscht werden.

Um die Konvergenzgeschwindigkeit zu erhöhen, wird eine variable Schrittweite bei der Veränderung der Mittelpunktsposition zugelassen. So kann man zunächst mit großen Positionsänderungen in die Nähe des Himmelpols gelangen. Ist die aktuell betrachtete Position besser als alle umliegenden Werte, wird die Schrittweite halbiert. Die Schrittweite 0 gilt als optimal im Sinne des Abbruchkriteriums.

Im praktischen Test stellte sich heraus, daß der Algorithmus in allen Fällen sehr sicher und relativ schnell konvergiert. Leider war die Approximation der Sternspuren durch ein Kreissegment ungeeignet. Zwar gab es eine Häufung der ermittelten Kreismittelpunkte in der Nähe des wahren Himmelspols, jedoch waren die einzelnen Werte systematisch radial verschoben. Würden die Sterne gleichmäßig um den Pol verteilt sein, wäre das unproblematisch, weil sich die Verschiebung im statistischen Mittel aller Sterne aufheben würde. Da sich nördlich des

Polarsterns jedoch viel weniger Sternspuren als südlich davon befinden (rechts unten bzw. links oben in Abbildung 16), waren die berechneten Himmelspolpositionen systematisch in Richtung Zenit verschoben.
In einem weiteren Versuch wurden die Sternspuren durch Ellipsen angenähert. Neben den drei freien Parametern des Kreises kam jetzt als vierte Größe die Exzentrizität hinzu. Das Ergebnis der Iteration war jedoch noch schlechter als das bei den Kreisbögen.

Auf Grund der Fehlschläge bei der Approximation der Form von Sternspur durch eine einfache geometrische Figur stand die Frage nach einer analytischen Lösung im Raum. Es mußte also ermittelt werden, wie das äquatoriale Koordinatensystem des Himmels auf die Filmebene projiziert wird.

Zunächst einmal ist dazu die Verzeichnung des all-sky-Spiegels zu betrachten. Beim verzeichnungsfreien Bild entsprechen gleiche Winkelabstände am Himmel gleichen absoluten Abständen in der Aufnahme.
Zwar können die Hauptspiegel der einzelnen EN-Kameras leicht variieren, was bei der späteren Konvertierung von linearen Bildkoordinaten in das astronomisches Koordinatensystem über eine Reihe von *Plattenkonstanten* Beachtung findet, jedoch läßt sich die Verzeichnung für diese Zwecke völlig ausreichend durch die folgende Exponentialfunktion beschreiben [Spurny 1996]:

[19] Verzeichnung $r' = 0.921*r + (e^{6.219*r}-1)$

mit r [0..1] ... relativer Abstand eines Objekts vom Zentrum im verzeichnungsfreien Bild
r' [0..1] ... relativer Abstand eines Objekts vom Zentrum im verzeichneten Bild

Kennt man den Mittelpunkt des Bildes und wendet die inverse Funktion auf die radialen Abstände von Objekten zum Bildfeldzentrum an, so läßt sich der größte Teil der ohnehin geringen optischen Verzeichnung eliminieren.

Im verzeichnungsfreien Bild sind die *Höhenkreise* äquidistant (Abbildung 30). Die Höhe eines Objekts über dem Horizont nimmt linear mit seinem radialen Abstand vom *Zenit* ab. Die Form der Abbildung entspricht also nicht der üblichen Parallelprojektion einer Halbkugel auf die Ebene!

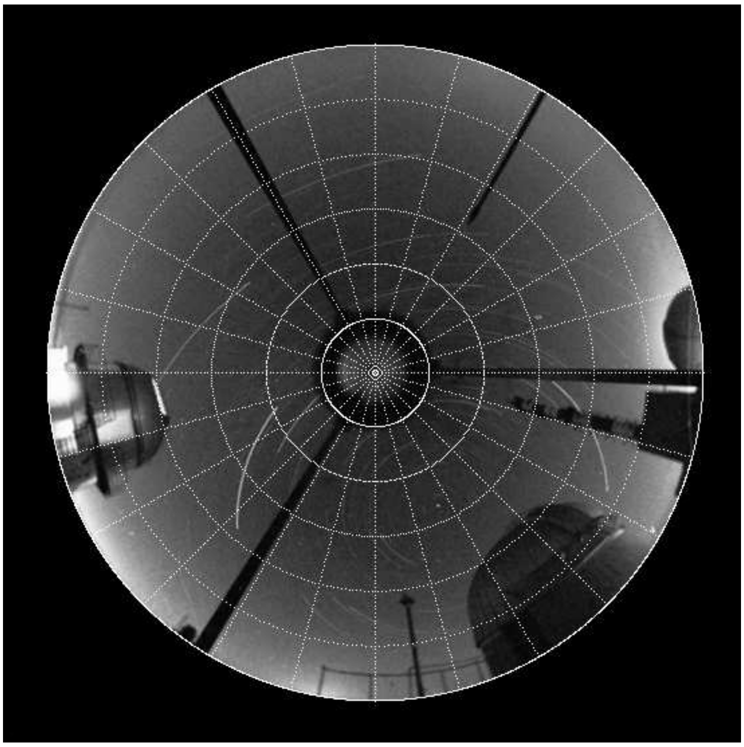

Abbildung 30: Beispielbild mit überlagertem horizontalen Koordinatensystem

Aus dieser Erkenntnis heraus lassen sich die *horizontalen Koordinaten* eines Objekts, also die Höhe und das *Azimut* (die Himmelsrichtung), relativ einfach nach folgenden Formeln bestimmen:

[20] Azimut $Tan\ (a_s) = (y_s - y_z)/(x_s - x_z) - Tan\ (a_p)$

Höhe $h_s = 90 * (1 - Sqrt((x_s - x_z)^2 + (y_s - y_z)^2)/r)$

mit x_s, y_s ... Koordinaten des Sterns
x_z, y_z ... Koordinaten des Zenits
a_p ... scheinbares Azimut des Himmelspols[4]
r ... Radius des Gesichtsfelds

Die in Gleichung [20] verwendeten Sternkoordinaten müssen entsprechend der Bildverzeichnung [19] korrigiert worden sein. Das kann entweder dadurch geschehen, daß die Position jedes einzelnen Pixels mit der inversen Verzeichnungsfunktion korrigiert wird, oder indem man noch vor der Hochpaßfilterung das gesamte Graustufenbild resampled. In dieser Arbeit wird aus Gründen der Übersichtlichkeit das letztgenannte Verfahren bevorzugt.

Das am Zenit orientierte horizontale Koordinatensystem liefert nicht direkt die Position des Himmelspols. Es ist das äquatoriale Koordinatensystem, welches mit seinen beiden Koordina-

[4] Der Himmelspol hat keinen Azimutwert. Als *scheinbares Azimut des Himmelspols* wird hier die Drehung des Bildes derart verstanden, daß Objekte in Nordrichtung einen Azimutwert von 180 Grad bekommen.

ten *Stundenwinkel* bzw. *Rektaszension* (analog der geografischen Länge auf der Erde) und *Deklination* (analog der geografischen Breite) um den gesuchten Himmelspol angeordnet ist (Abbildung 31). Aufgrund der Projektionsart sind die einzelnen Deklinationskreise einander *ähnlich*: Entlang eines Rektaszensionskreises nimmt die Deklination von Objekten linear mit deren Abstand vom Himmelspol ab.

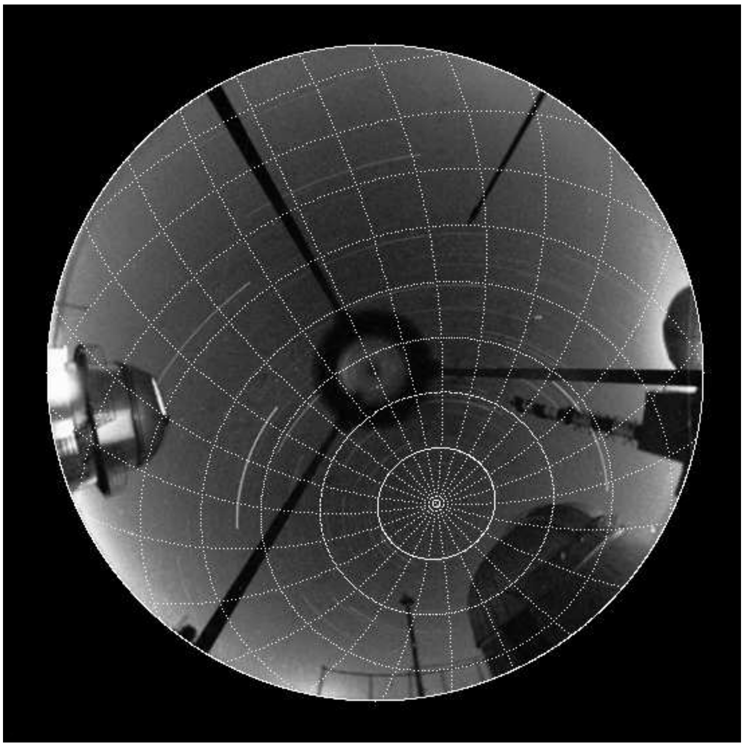

Abbildung 31: Beispielbild mit überlagertem äquatorialen Koordinatensystem

Folgende Standardtransformation besteht zwischen dem horizontalen und dem äquatorialen System:

[21] Koordinatentransformation horizontal → äquatorial

$$Sin(\delta) = Sin(\varphi)*Cos(z) - Cos(\varphi)*Sin(z)*Cos(a)$$

$$Cos(\delta)*Sin(t) = Sin(z)*Sin(a)$$

$$Cos(\delta)*Cos(t) = Cos(\varphi)*Cos(z) - Sin(\varphi)*Sin(z)*Cos(a)$$

$$z = 90 - h$$

mit a ... Azimut
h ... Höhe
z ... Zenitdistanz
φ ... geografische Breite
t ... Stundenwinkel
δ ... Deklination

Damit ist der entscheidende Schritt zur Bestimmung der Lage des Himmelspols getan. Für alle Punkte einer Sternspur muß nämlich gelten, daß sie unabhängig von ihrem *Stundenwinkel* (der Drehung des äquatorialen Koordinatensystems um die Polachse) eine *konstante* Deklination aufweisen. Die für die Berechnung der Deklination nach [21] benötigte geografische Breite des Beobachtungsortes folgt aus der Höhe des Himmelspols über dem Horizont:

[22] Geografische Breite $\varphi = h_P$

mit h_p ... Höhe des Himmelspols

Somit ergibt sich folgende Berechnungsvorschrift für die Qualität einer vermuteten Position des Himmelspols nach dem Gradientenverfahren: Nach Gleichung [20] ermittelt man das scheinbare Azimut und die Höhe des Pols aus seiner angenommenen Position. Daraus folgt die geografische Breite des Aufnahmeortes [22]. Für jeden Bildpunkt einer Sternspur wird dann ebenfalls das Azimut und die Höhe nach [20] berechnet. Schließlich wendet man die Gleichung [21] an und erhält Deklination und Stundenwinkel der Bildpunkte, bezogen auf den angenommenen Himmelspol. Aus den einzelnen Deklinationswerten kann man nach [18] die mittlere Deklination und die Standardabweichung berechnen, die ein Maß für die Genauigkeit der verwendeten Lage des Himmelspols darstellt. Man variiert wie schon für die Approximation durch einen Kreis die Position geringfügig und korrigiert den Himmelspol in die Richtung, in welcher der Fehler am kleinsten war. Am Ende hat man für eine Sternspur mit gegebenen Zenitkoordinaten und bekanntem Bildfeldradius die optimale Lage des Himmelspols entsprechend dem Mittelpunkt des Ringsegments bestimmt und setzt die Berechnung mit dem nächsten Bildsegment fort.
Im resultierenden Bild (Abbildung 32) sind alle berechneten Polpositionen durch einen Punkt markiert.

Für das Verfahren ist die geeignete Wahl der Anfangsparameter sehr wichtig. Damit der Algorithmus sicher für alle Sternspuren konvergiert, reicht es nämlich nicht, den Zenit als erste Approximation für den Himmelspol zu verwenden. In diesem Fall würde sich die Orientierung des Koordinatensystems bereits beim ersten Iterationsschritt drastisch ändern und der Algorithmus häufig in einem lokalen Minimum terminieren. Wählt man jedoch als Ausgangspunkt der Iteration den ungefähren Mittelpunkt einer Sternspur, der sich leicht aus dem Anfang und Ende der Spur errechnen läßt [23], dann arbeitet das Verfahren stabil.

[23] Startwert $x_s = (x_e - x_a) \ / \ 2$

$y_s = (y_e - y_a) \ / \ 2$

mit x_a, y_a ... Anfangspunkt des Segments
x_e, y_e ... Endpunkt des Segments

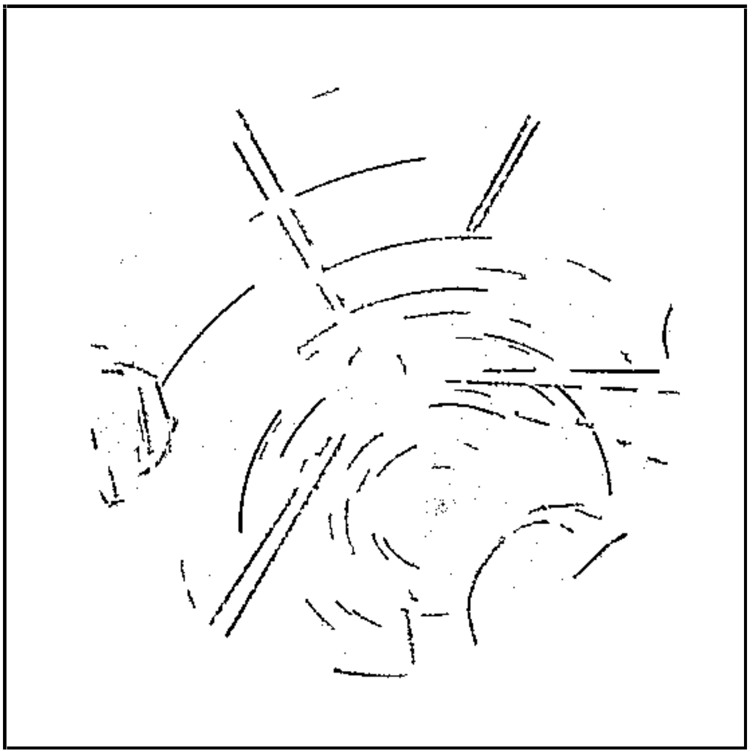

Abbildung 32: Bearbeitungsstand mit berechneten Mittelpunkten

Wie in Abbildung 32 ersichtlich, häufen sich die Mittelpunkte der Sternspuren am Himmelspol. Es ist jedoch zu beachten, daß auch für viele beliebig geformte Artefakte ein ‘Mittelpunkt’ innerhalb des Gesichtsfelds ermittelt wurde. Es genügt also nicht, den arithmetischen Mittelwert über alle gefundenen Positionen zu bilden, sondern man muß zuvor weitere Artefakte herausfiltern.

Dazu wird zunächst die Position des Himmelspols genähert bestimmt. Alle Werte innerhalb eines gewissen Abstands vom Zenit[5] werden aufsteigend nach x- und y-Koordinaten sortiert, später wird der *Median* berechnet. Im Gegensatz zum arithmetischen Mittel ist der Median unempfindlich gegen ‘Ausreißer’, er liefert auch bei stark verrauschten Daten gute Ergebnisse.

In einem zweiten Schritt wird nun überprüft, wie genau alle noch im Bild vorhandenen Elemente zu dem nun näherungsweise bekannten Himmelspol passen. Ist ihre Standardabweichung für die gegebene Position größer als ein bestimmter Grenzwert, so werden sie gelöscht. Schließlich wird mit den verbliebenen Objekten die endgültige Position des Himmelspols als arithmetisches Mittel der Position der Mittelpunkte bestimmt.

Durch die schrittweise Annäherung gelingt es zur gleichen Zeit den Himmelspol anhand von Sternspuren zu ermitteln und die Sternspuren mittels des Himmelspols von Artefakten zu unterscheiden. Offensichtlich kann der Algorithmus nur dann funktionieren, wenn eine genügend große Zahl von Sternspuren im Bild vorhanden ist.

---

[5] Da alle Feuerkugelkameras in Mitteleuropa installiert sind, kann sich der Himmelspol weder nahe am Zenit noch am Horizont befinden.

Wie am konkreten Beispiel ablesbar, ist das beschriebene Verfahren sehr leistungsfähig. Alle verbliebenen Artefakte werden aus dem Bild entfernt (Abbildung 33), der berechnete Himmelspol weist nur einen minimalen Fehler zum wahren Pol auf. Damit ist das Hauptziel der Bildsegmentierung erreicht.

Aus Abbildung 31 wird deutlich, daß es sich bei den Sternspuren weder um Kreise noch um Ellipsen, sondern um kompliziertere geometrische Formen handelt. Aus diesem Grunde führten die ersten Versuche mit einfachen geometrischen Approximationen zu keinem brauchbaren Ergebnis. Außerdem folgt daraus, daß die Hough-Transformation nicht angewandt werden kann.

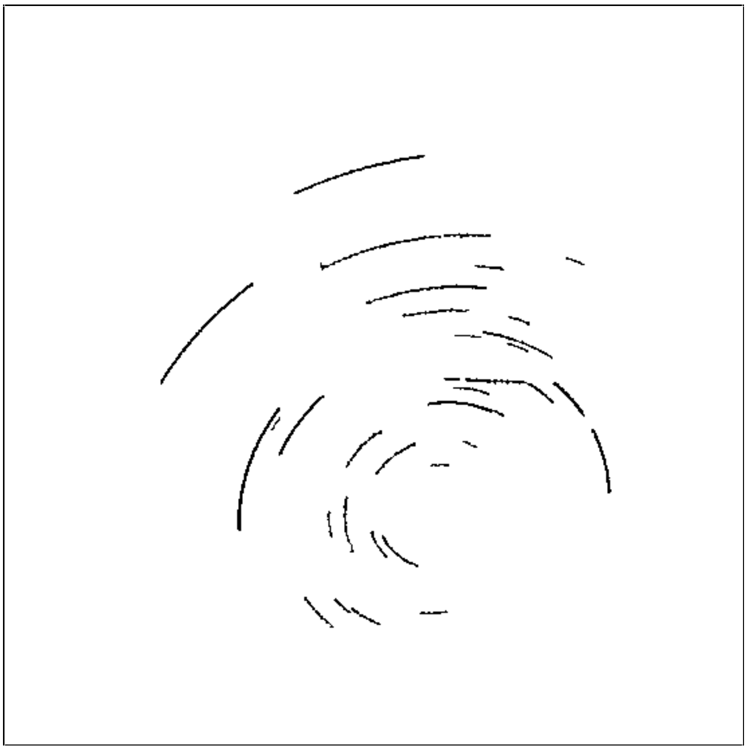

Abbildung 33: Bearbeitungsstand nach Beseitigung der verbliebenen Artefakte

Nachdem die zwei unbekannten Parameter x_p und y_p des äquatorialen Koordinatensystems gefunden wurden, kann dasselbe Verfahren auch zur genauen Bestimmung der bisher nur grob geschätzten Lage des Zenits (x_z und y_z) verwendet werden. Zu diesem Zweck wird nun seine Lage bei fixierter Position des Himmelspols variiert. Als Startwerte der Iteration dienen die bisher verwendeten Koordinaten des Gesichtsfeldmittelpunktes.
Bei praktischen Tests zeigt sich eine starke Abweichung der optimale Lage des Zenits einzelner Sternspuren vom wahren Zenit. Daher wird nicht mehr jede Sternspur so lange iteriert, bis der berechnete Fehler minimal ist. Statt dessen wird gleich der Gesamtfehler für alle Sternspuren

zu einer gegebenen Zenitposition berechnet und dann die Lage entsprechend des Fehlers bei leicht veränderten Positionen korrigiert.

Der nur näherungsweise bekannte Radius des Himmelsauschnitts läßt sich nicht mit dem beschriebenen iterativen Verfahren verbessern. Wie bereits im vorangegangenen erläutert, sind die Deklinationskreise im Bild einander ähnlich. Ändert man den Radius r_z des Bildfelds, so ändern sich alle Deklinationswerte linear. Auch die Standardabweichung der Sternspuren wächst linear mit dem gesamten Bildmaßstab und kann daher nicht mehr als Optimierungskriterium herangezogen werden.
Daraus folgt einerseits, daß die Bestimmung der anderen vier Parameter relativ unempfindlich gegen einen fehlerbehafteten Bildfeldradius ist. Andererseits wird der exakte Radius für die Identifizierung der Sternspuren benötigt und muß deshalb auf eine andere Art und Weise später ermittelt werden.

3.2.7 Zusammenfassung

Ziel der Bildsegmentierung ist es, aus einem 256-Graustufen-Bild alle Sternspuren zu extrahieren. Dazu wurde das Bild entsprechend der inversen Verzeichnungsfunktion resampled und nachfolgend verschiedene Filterverfahren implementiert und getestet: Optimal erscheint ein 5x5-Laplace-Filter, das zunächst die linienförmigen Strukturen im Bild verstärkt. Es wird ein Schwellwert gesetzt und das Bild binär klassifiziert. Man trennt verbundene Bildelemente und unterdrückt anschließend das Rauschen durch ein Größenkriterium. Schließlich werden die Parameter des dem Bild zugrunde liegenden äquatorialen Koordinatensystems ermittelt und die restlichen Artefakte identifiziert und beseitigt.
Verschiedene Teilschritte haben eine hohe Komplexität und sind sehr aufwendig. Der bisher beschriebene komplette Algorithmus benötigte auf einer SGI Indigo$_2$ Workstation etwa eine Minute. Damit ist das Programm zwar weit von der Echtzeitbearbeitung des Bildes entfernt, die allerdings auch nicht angestrebt wurde. Wenn der Nutzer etwa eine Minute warten muß, bis sein Bild automatisch segmentiert und die Orientierung bestimmt ist, kann das akzeptiert werden. Das Suchen aller Sternspuren per Mausklick würde deutlich mehr Zeit in Anspruch nehmen.

3.3 Identifizierung von Sternspuren

Der nächste Schritt bei der automatischen Vermessung von Sternspuren besteht in der Identifizierung der Objekte, die mit dem zuletzt beschriebenen Verfahren segmentiert wurden. Ausgangspunkt dazu ist ein binäres Rasterbild (Abbildung 33), in dem nur noch Sternspuren vorhanden sind.
Eine wichtige Vorarbeit ist bereits geleistet worden, indem der Zenit, der Himmelspol und der ungefähre Bildfeldradius des zu ermittelnden äquatorialen Koordinatensystem berechnet

wurden. Nun muß die Lagebeziehung der Sterne untereinander herangezogen werden, um die einzelnen Objekte zu identifizieren.

Neben den horizontalen Koordinaten Azimut und Höhe kann zu jeder Sternspur der Stundenwinkel und die Deklination nach [20] und [21] genähert berechnet werden. Unbekannt ist noch die *Rektaszension*, die mit dem Stundenwinkel und der *Ortssternzeit* folgendermaßen verknüpft ist:

[24] Stundenwinkel $t = s - \alpha$

mit s ... Ortssternzeit
α ... Rektaszension

In Analogie zum Koordinatensystem der Erde kennt man an diesem Punkt bereits die geografische Breite der zu bestimmenden Orte. Auch die geografischen Längen sind ermittelt, jedoch beziehen sie sich nicht auf den Greenwicher Nullmeridian, sondern einen anderen unbekannten Meridian. Es muß also der Versatz dieses Koordinatensystems zum definierten Greenwich System, die Sternzeit, gefunden werden. Erst dann kann im Atlas nachgeschlagen und anhand der berechneten Koordinaten der Ort identifiziert werden.
Eine weitere Unbekannte im Sinne der Problemstellung ist die Länge der Belichtungszeit der Aufnahme und der daraus resultierende Winkel, den eine ununterbrochene Sternspur überspannt.
Die Bestimmung dieser letzten zur Identifizierung von Sternen benötigten Parameter soll nun diskutiert werden.

3.3.1 Bestimmung der Belichtungszeit

Auf den ersten Blick stellt die Ermittlung der Belichtungszeit eine triviale Aufgabe dar. Bei genauerem Hinsehen bemerkt man jedoch Schwierigkeiten, die eine Bestimmung fast unmöglich erscheinen lassen.
Betracht man noch einmal das Ausgangsbild (Abbildung 16) so stellt man fest, daß kaum eine Sternspur vollständig erfaßt wurde. Meistens sind sie durch Kamerastreben und andere Objekte unterbrochen bzw. die Sterne gehen auf oder unter. Am sichersten ist die Messung der Winkelausdehnung von Sternspuren nahe des Himmelspols. In dieser Region gibt es jedoch nur wenige helle Sterne, so daß auch hier nur selten eine komplette Spur zu finden ist.
Zusätzliche Probleme bereiten die Spuren von Sternen mit nahezu gleicher Deklination, weil sie ineinander übergehen können, so daß der dann gemessene Winkel und die daraus abgeleitete Zeit bedeutend größer als die Belichtungszeit ist.

Zur Lösung des Problems wird ein Histogramm über alle vorkommenden Winkelausdehnungen erstellt. Zur Abschätzung der Belichtungszeit wird der größte Wert im Histogramm verwendet,

der an mindestens zwei Sternspuren gemessen wurde. Es ist sehr unwahrscheinlich, daß zwei Spuren, die aus sich berührenden Sternen resultieren, zufällig dieselbe Winkellänge besitzen.
Die Umrechnung zwischen dem Winkel und der Belichtungszeit erfolgt nach folgender Formel:

[25] Belichtungszeit [h] $t = 15 * w$

mit w ... Winkelausdehnung der Sternspur [°]

Das vorgeschlagene Verfahren funktioniert relativ stabil für Aufnahmen bei durchgehend klarem Himmel. Sind jedoch Wolken während der Belichtung durch das Gesichtsfeld gezogen, so sind alle Sternspuren unterbrochen und keine von ihnen liefert die wahre Belichtungszeit. In diesem Fall muß sie manuell vorgegeben werden.

3.3.2 Bestimmung der Sternzeit

Zur Ermittlung der Sternzeit, also der aktuellen Drehung des äquatorialen Koordinatensystems, wird die Lage der Sternspuren untereinander verglichen. Mit einem einfachen Verfahren ist es möglich, die wahrscheinlichste Sternzeit zu bestimmen und damit alle Objekte zu identifizieren.
Zunächst wird dazu eine Liste der Sterne benötigt, die auf den Himmelsaufnahmen sichtbar sein könnten. Bekannte Sternkataloge wie der *PPM-Katalog* sind dazu zwar gut geeignet, beinhalten aber zu viele Sterne (>400.000). Für diese Arbeit wurde ein Auszug von etwa 200 Sternen aus dem PPM-Katalog erstellt. Bei ihrer Auswahl war zu beachten, daß die scheinbare Bewegung der Sterne mit hoher Deklination viel langsamer verläuft als die von Objekten nahe dem *Himmelsäquator*. Die Sternspuren am Himmelspol sind daher viel kürzer als weit davon entfernte. Das Licht des Sterns fällt also über längere Zeit auf dieselbe Stelle des Films, so daß noch bedeutend schwächere Objekte abgebildet werden.
Aus der Länge der Sternspuren wurde eine empirische Formel entwickelt, die die Abnahme der Filmempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Deklination beschreibt:

[26] Empfindlichkeit $e \approx 10 / (100 - \delta)$

mit δ ... Deklination

Da die Helligkeit über eine logarithmische Funktion mit der Lichtintensität gekoppelt ist, gilt für die Abnahme der *Grenzhelligkeit* mit der Deklination:

[27] Grenzhelligkeit $h \approx h_z + \ln(10/(100 - \delta)) / \ln 2.5$

mit h_z ... Grenzhelligkeit im Zenit
δ ... Deklination

Die Grenzhelligkeit im Zenit (h_z) beträgt für die verwendeten all-sky-Kameras höchstens 5,5 Größenklassen. Laut Gleichung [27] ist die Grenzhelligkeit bei einer Deklination von 60 Grad bereits auf die vierte Größenklasse gefallen, am Äquator beträgt sie nur noch drei Größenklassen. Das entspricht ungefähr den realen Verhältnissen.

Aus dem PPM-Katalog wurden also alle die Sterne ausgewählt, die dem Helligkeitskriterium genügen. Ihre Daten wurden in ein strukturiertes Textfile geschrieben (Abbildung 34). Einerseits ermöglicht das, andere Objekte von Hand zu ergänzen. Andererseits treten bei diesem Datenformat im Gegensatz zur binären Speicherung keine Maschinenabhängigkeiten wie bei der Darstellung von Gleitkommazahlen auf.

Bezeichnung		Eigenname	PPM-Nummer	Rektaszension	Deklination	Helligkeit
Alpha	UMi	Polaris	431	37.950	89.264	+2.02
Gamma	Cep	Alrai	11709	354.840	77.633	+3.21
Beta	UMi	???	8758	222.675	74.156	+2.08
Gamma	UMi	???	8887	230.175	71.834	+3.05
Beta	Cep	???	10863	322.170	70.561	+3.23
Delta	Dra	Nodus-II	21358	288.135	67.662	+3.07
Zeta	Dra	???	20234	257.190	65.715	+3.17
Alpha	Cep	Alderamin	22755	319.650	62.586	+2.44
Alpha	UMa	Dubhe	17705	165.930	61.751	+1.79
Eta	Dra	???	19869	246.000	61.514	+2.74
Gamma	Cas	???	12597	14.175	60.717	+2.47
Delta	Cas	???	12969	21.450	60.235	+2.68
Beta	Cas	Caph	25054	2.295	59.150	+2.27
Jota	Dra	???	34972	231.195	58.987	+3.20
Delta	UMa	Megrez	33469	183.795	57.066	+3.30
Alpha	Cas	Schedar	25578	10.125	56.537	+2.23

Abbildung 34: Auszug aus dem modifizierten PPM-Sternkatalog

Nun wird zu jedem gefundenen Anfangs- und Endpunkt einer Sternspur nach [20] das Azimut und die Höhe sowie nach [21] der Stundenwinkel und die Deklination berechnet. Im Sternkatalog werden alle die Objekte ausgewählt, die etwa dieselbe Deklination aufweisen, wobei sich eine maximale Toleranz von 5 Grad bewährt hat. Schließlich wird die Summe aus dem Stundenwinkel der Sternspur und der Rektaszension des Sterns (nach [24] ist das die gesuchte Sternzeit) in ein Histogramm eingetragen.

Was kann man nach Eintrag aller passenden Kombinationen von Sternspuren und Katalogsternen im Histogramm erwarten? Es wird eine Vielzahl von Treffern geben, bei der ein Stern nur zufällig die gleiche Deklination wie die Sternspur hatte. Diese Zufallstreffer sind statistisch gleichverteilt und sorgen für das Hintergrundrauschen im Histogramm. An zwei Stellen müssen jedoch deutliche Peaks hervortreten, nämlich genau für die Sternzeit zum Belichtungsbeginn (verursacht durch richtige Identifizierung von Sternspuranfängen) und zum Belichtungsende (richtige Identifizierung von Sternspurenden) der Aufnahme. Der Abstand zwischen beiden

Peaks muß mit der im vorigen Abschnitt bestimmten Belichtungszeit übereinstimmen (Abbildung 35).

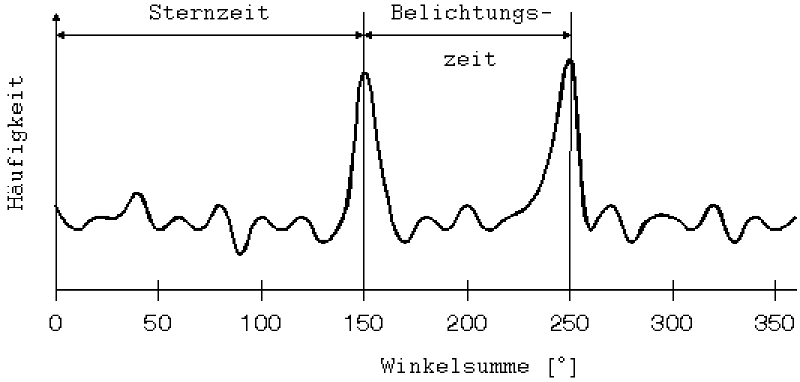

Abbildung 35: Histogramm der Summen von Stundenwinkel und Rektaszension

In der Praxis zeigt sich, daß die beiden Peaks längst nicht so prominent wie in der Skizze hervortreten. Zogen während der Belichtung Wolken durch das Gesichtsfeld, können sogar mehrere Peaks vorhanden sein.

Um die Stabilität des Verfahrens zu verbessern, wurden verschiedene heuristische Verbesserungen vorgenommen. So bekommt ein passender heller Stern ein größeres statistisches Gewicht als ein dunkler, weil er mit größerer Wahrscheinlichkeit auf der Aufnahme vorhanden ist. Zusätzlich wird ein spezielles Mittelungsverfahren angewandt: Die jeweils im Abstand der Belichtungszeit (siehe Kapitel 3.3.1) liegenden Histogrammwerte werden addiert. Dadurch wird, wie in Abbildung 36 schematisch gezeigt, ein einzelner Peak mit zwei kleineren Nebenmaxima erzeugt.

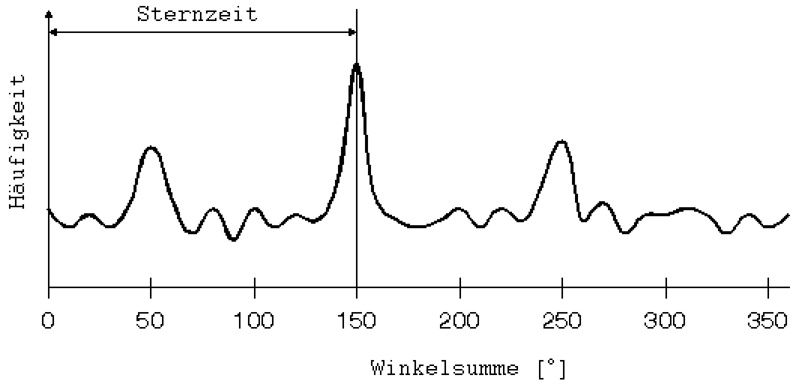

Abbildung 36: Histogramm nach Addition der Werte im Abstand der Belichtungszeit

Ob die ohne zusätzliche Informationen aus dem Rasterbild ermittelte Sternzeit wirklich korrekt ist, zeigt sich im letzten Schritt, der Identifizierung der Sternspuren.

3.3.3 Identifizierung von Sternspuren

Nachdem auch die letzten unbekannten Parameter bestimmt wurden (lediglich r_z ist weiterhin nur näherungsweise bekannt), kann nun die Identifizierung der Sternspuren erfolgen. Anfang und Ende einer Sternspur werden dabei zunächst unabhängig voneinander behandelt. Man berechnet ihre äquatorialen Koordinaten und überprüft im Sternkatalog, ob ein Eintrag an der entsprechenden Position existiert.
Ist kein Eintrag vorhanden, könnte es sich um eine Unterbrechung in der Sternspur (z.B. durch eine Kamerastrebe), um einen hellen Planeten oder um ein noch immer im Bild verbliebenes Artefakt handeln. Die entsprechende Position wird gelöscht.
Liegen mehrere Sterne in der Nähe, ist einer von ihnen auszuwählen. Dabei spielt neben dem Abstand des Katalogsterns von der gegebenen Position auch seine Helligkeit eine Rolle, da helle Sterne in der Aufnahme wahrscheinlicher anzutreffen sind als dunkle.
Alle identifizierten Sternspuren werden in eine Liste eingetragen, die neben den Bildkoordinaten die PPM-Nummer des identifizierten Sterns und weitere Informationen aus dem Sternkatalog (Name, Sternbild, Helligkeit) enthält. Wird für das Ende einer Sternspur ein anderes Objekt als für den Anfang gefunden, so ist nach den zuvor beschriebenen Regeln das wahrscheinlichste Objekt auszuwählen. Dieser Fall kann auftreten, wenn zufällig an einer künstlichen Unterbrechung der Sternspur ein anderer Stern im Katalog steht.
Schließlich kann es vorkommen, das bei einer Sternspur nur der Anfang, bei einer anderen nur das Ende identifiziert wurde und in beiden Fällen derselbe Stern angegeben wird. Hierbei handelt es sich nicht einen Fehler, sondern um die Lösung des unter 3.2.3 diskutierten Problems: Es wurde eine Sternspur identifiziert, die in der Mitte unterbrochen ist. Man kann also beide Sternspuren zu einer zusammenfassen und einen Listeneintrag entfernen.
Ist schließlich für 2 Sternspuren derselbe Stern ermittelt worden, so muß eine davon gelöscht werden. Größeres Gewicht hat die Spur, bei der sowohl der Anfang als auch das Ende zum Katalogstern passen.

Das praktische Ergebnis der automatischen Segmentierung und Identifizierung von Sternspuren zeigt Abbildung 37 am bisher behandelten Demonstrationsbild. Alle identifizierten Objekte wurden hier mit einem kleinen Kreuz markiert.
Es wird deutlich, daß nahezu alle hellen Sterne automatisch erkannt werden konnten. Die Spur am oberen Bildrand stammt vom Planeten Saturn, der nicht im Sternkatalog enthalten ist. Auch der Polarstern wurde nicht gefunden, weil er bei der Rauschunterdrückung verloren ging (vgl. Abschnitt 3.2.6).

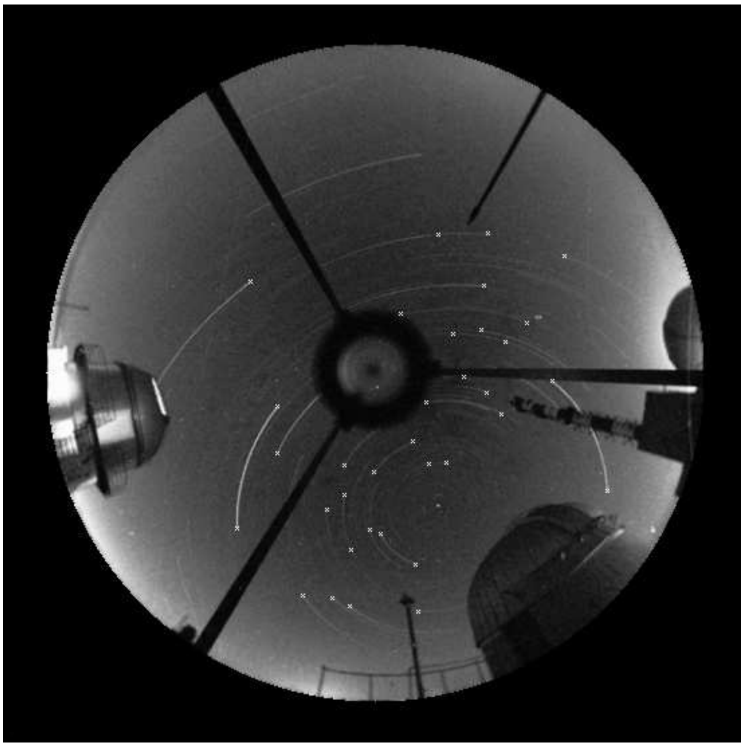

Abbildung 37: Ergebnis der automatischen Sternsegmentierung und -identifizierung

Wie beeinflußt nun ein ungenauer Bildfeldradius das Ergebnis der Identifizierung? Die Deklinationswerte der Sterne sind vom Radius abhängig. Je weiter ein Stern vom Himmelspol entfernt ist, desto größer wird also sein Deklinationsfehler. Sterne mit geringer Deklination überschreiten schließlich die Fehlertoleranzen und werden nicht mehr erkannt.
Hier liegt der Ansatzpunkt für die Radiuskorrektur. Die beschriebene Identifizierung von Sternen wird nacheinander für verschiedene Werte von r_z durchgeführt. Der Wert, bei dem die meisten Sterne erkannt werden, entspricht dem wahren Bildfeldradius!

Abschließend wäre zu erwähnen, daß die Sicherheit der Sternidentifizierung im wesentlichen von der Qualität der vorher bestimmten Parameter (Position des Himmelspols, Belichtungszeit, Sternzeit) abhängt. Es gilt das *all-or-nothing* Prinzip: Entweder werden alle Sternspuren richtig identifiziert oder (fast) keine.

3.3.4 Zusammenfassung

Zur Identifizierung der Sternspuren mußten weitere Parameter ermittelt werden, welche die Orientierung des äquatorialen Koordinatensystems festlegen. Während die Belichtungszeit über die Winkelausdehnung der Sternspuren berechnet wurde, konnte die Sternzeit aus dem Vergleich des gegebenen Sets von Koordinaten mit einem Sternkatalog abgeleitet werden. Grundlage dafür war ein Auszug aus dem PPM-Sternkatalog.
Schließlich ließen sich die Anfangs- und Endpunkte der Spuren identifizieren, wobei Unterbrechungen der Spur erkannt und behoben wurden. Im Ergebnis liegt eine Liste von identifi-

zierten Sternen samt den ungefähren Positionen ihrer Anfangs- und Endpunkte im Bild vor, die nunmehr mittels weiterer Verfahren subpixelgenau vermessen werden müssen.
Der Rechenaufwand für die Sternidentifikation ist vergleichsweise gering, sie erfolgt nahezu in Echtzeit. Auf einer SGI-Workstation dauerte der Vorgang weniger als fünf Sekunden.

3.4 Segmentierung der Meteorspur

Während Sternspuren wie bereits beschrieben automatisch segmentiert und identifiziert werden können, ist das bei einer Meteorspur nicht ohne weiteres möglich. Eine Feuerkugel hinterläßt im besten Fall eine gekrümmte Spur (Abbildung 12), die vom rotierenden Shutter (siehe 1.6) gleichmäßig unterbrochen wird. Hellere Feuerkugeln können hingegen den Film völlig überstrahlen, so daß keine Unterbrechungen mehr sichtbar sind (Abbildung 38).

Abbildung 38: Sehr helle Feuerkugel

Für solche Aufnahmen ist eine automatische Auswertung nicht mehr sinnvoll. Der Bearbeiter muß hier von Fall zu Fall festlegen, welche Abschnitte des Meteors manuell vermessen werden sollen.
Auch für den einfachen Fall einer nicht überbelichteten Feuerkugel ist die automatische Suche nach dem Objekt kaum sinnvoll. Im Gegensatz zu Sternen ist im Bild sofort erkennbar, um welches Objekt es sich handelt. Außerdem müssen die einzelnen Unterbrechungen von Hand vermessen werden, wie in den folgenden Kapiteln gezeigt werden soll.

3.5 Digitale Vermessung von Sternspuren und Meteoren

Die digitale Vermessung des Meteors und der Sternspuren ist ein weiterer Schritt auf dem Weg zur automatischen Bildanalyse. Im hochaufgelösten Originalbild (siehe 3.1) werden die Positionen von verschiedenen Objekten mit Subpixelgenauigkeit ermittelt. Die ungefähre Lage und die Identität des Objekts sind bereits bekannt. Sie wurden entweder automatisch gefunden (bei Sternen) oder durch das manuelle Positionieren eines Fadenkreuzes (beim Meteor) bestimmt.

3.5.1 Vermessung von Sternspuren

Entscheidend für die erreichbare Genauigkeit der zu berechnenden Position einer Feuerkugel ist die Präzision, mit der die Referenzsterne vermessen werden. Zwar entspricht der räumliche Abstand zweier Bildpunkte im digitalisierten Bild nur ca. $^{1}/_{100}$ Millimeter auf dem Negativ (siehe 3.1), trotzdem ist eine noch höhere Auflösung anzustreben. Dazu ist es nötig, die Lage der Anfangs- und Endpunkte von Sternspuren mit Subpixelgenauigkeit zu vermessen.
Die hier beschriebene Vorgehensweise beruht auf der Korrelation eines Helligkeitsmodells der Sternspur mit dem vergrößerten Originalbild. Es wird die zu erwartende Helligkeitsverteilung für Anfang und Ende einer Sternspur berechnet und dann die Position gesucht, an der das Modell mit dem Original im Sinne der Methode der kleinsten Quadrate (least-squares-fit) am besten übereinstimmt.

Zunächst muß also ein Modell für die Helligkeitsverteilung entlang einer Sternspur entwickelt werden. Dazu wurden im ADOBE PHOTOSHOP aus einem Testbild 10 Sternspuren ausgeschnitten, in die gleiche Richtung und Position gedreht und addiert, so daß eine mittlere Sternspur zum Studium vorliegt (Abbildung 39).

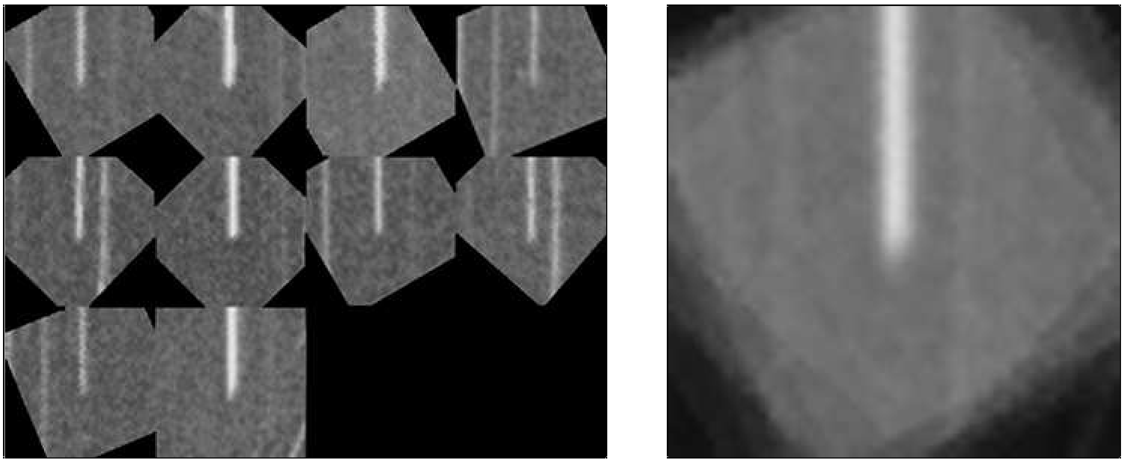

Abbildung 39: 10 verschiedene Sternspuren und ihr vergrößertes Mittel

Die an der mittleren Sternspur vorgenommenen Helligkeitsschnitte zeigen, daß sich die Helligkeit senkrecht zur Sternspur gut durch eine Gaußkurve [8] modellieren läßt (Abbildung 40). Auch ein Schnitt entlang der Spur zeigt am Ende einen radialen gaußförmigen Helligkeitsabfall.

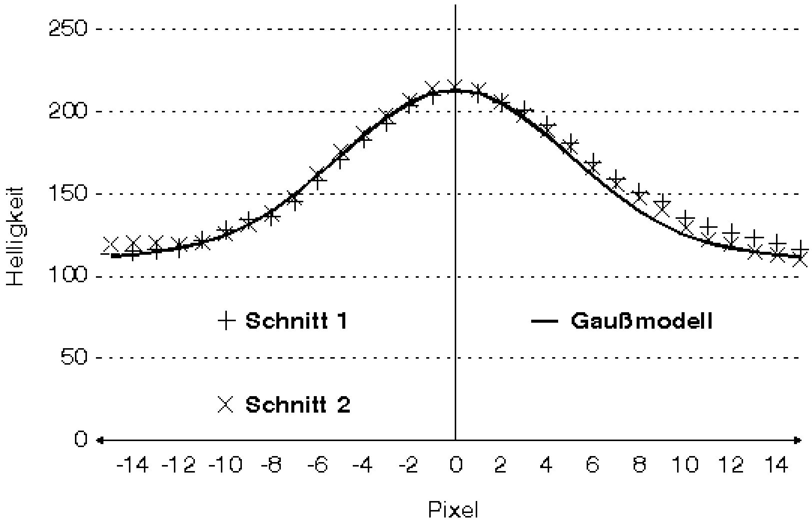

Abbildung 40: Helligkeitsschnitte durch die Sternspur und die entsprechende Gaußkurve

Damit läßt sich ein einfaches Modell für den Helligkeitsverlauf einer Sternspur entwerfen: Entlang der Spur wird die Helligkeit nach der Gauß-Funktion über den Abstand senkrecht zur Mittelachse bestimmt. Am Ende wird der Helligkeitsabfall radial mit derselben Funktion berechnet. Abbildung 41 zeigt das entsprechende Modell für die oben beschriebene gemittelte Sternspur.

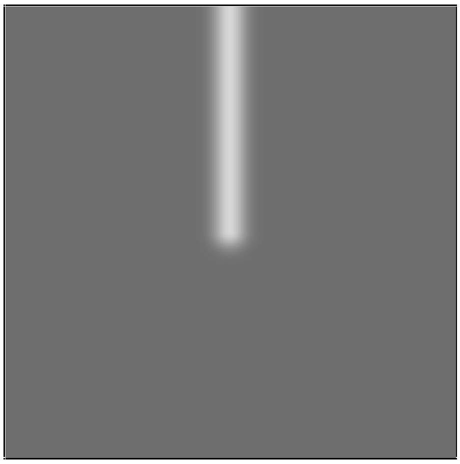

Abbildung 41: Modellhelligkeit für die gemittelte Sternspur

Offensichtlich stimmt das Gaußmodell sehr gut mit der mittleren Sternspur überein. Wie genau einzelne, stark verrauschte Spuren durch das Modell beschrieben werden, muß später anhand praktischer Messungen überprüft werden.

Das Gaußmodell hat vier Parameter: die Hintergrundhelligkeit im Bildausschnitt, die maximale Helligkeit der Sternspur, die Breite der Gaußglocke (ausgedrückt durch die Varianz σ) und den Positionswinkel der Sternspur im Bild. Damit minimale und maximale Helligkeit direkt in die Funktion zur Berechnung des Modells einfließen können, wird die Gauß-Funktion [8] leicht abgewandelt:

[28] Helligkeit $h = h_{min} + (h_{max} - h_{min}) * \exp(-x^2/\sigma^2)$

mit h_{min} ... minimale Bildhelligkeit
h_{max} ... maximale Bildhelligkeit
x ... Abstand von der Mittelachse
σ ... Standardabweichung

Die Parameter h_{min} und h_{max} lassen sich relativ einfach aus dem Bildausschnitt herleiten. Dazu wird ein kumulatives Histogramm berechnet. Die Hintergrundhelligkeit h_{min} entspricht dem Histogrammwert, der 80% der hellsten Pixel beinhaltet, die Maximalhelligkeit h_{max} errechnet sich aus dem Histogrammwert mit den hellsten 0,1% der Bildpunkte (Abbildung 42). Die entsprechenden Zahlenwerte ergaben sich aus praktischen Untersuchungen an Testbildern.

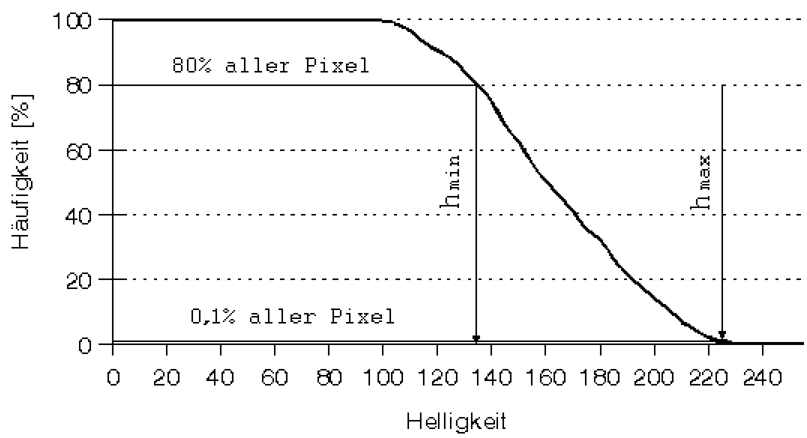

Abbildung 42: Kumulatives Histogramm für die Minimal- und Maximalhelligkeit

Der Positionswinkel der Sternspur läßt sich aus der Lage des Sterns im Bild berechnen. Die mathematisch exakte Lösung entspräche der ersten Ableitung nach Azimut und Höhe. Es handelt sich hier um eine sehr komplizierte Formel, da sowohl die Verzeichnungsfunktion [19] als auch die Koordinatentransformation [21] einfließt.

Ein anderes Verfahren zur Bestimmung des Positionswinkels ist jedoch bedeutend einfacher. Zu jedem Bildpunkt ist nach [20] das Azimut und die Höhe bekannt, es kann also mittels [21] auch der Stundenwinkel und die Deklination berechnet werden. Addiert man zum Stundenwinkel am Sternspuranfang ein Grad, so erhält man die äquatorialen Koordinaten des Punktes, der als nächstes belichtet wurde. Am Ende der Spur wird hingegen ein Grad subtrahiert, um den kurz zuvor belichteten Punkt zu bestimmen. Die Rücktransformation von Stundenwinkel und Deklination in Azimut und Höhe erfolgt dann durch die inverse Koordinatentransformation zu [21]:

[29] Koordinatentransformation äquatorial → horizontal

$$Cos(z) = Sin(\varphi)*Sin(\delta) + Cos(\varphi)*Cos(\delta)*Cos(t)$$

$$Sin(z)*Sin(a) = Cos(\delta)*Sin(t)$$

$$Sin(z)*Cos(a) = -Cos(\varphi)*Sin(\delta) + Sin(\varphi)*Cos(\delta)*Cos(t)$$

$$h = 90 - z$$

mit t ... Stundenwinkel
δ ... Deklination
φ ... geografische Breite
z ... Zenitdistanz
a ... Azimut
h ... Höhe

Schließlich kann man anhand der inversen Funktion zu [20] auch die linearen Bildkoordinaten zu einem gegebenen Paar von Azimut und Höhe berechnen:

[30] $$x_s = x_z + r*(90-h_s)*Cos(a_s+a_p)$$

$$y_s = y_z + r*(90-h_s)*Sin(a_s+a_p)$$

mit x_s, y_s ... Koordinaten des Sterns
x_z, y_z ... Koordinaten des Zenits
a_S ... Azimut
a_P ... scheinbares Azimut des Himmelspols[4]
h_S ... Höhe
r ... Radius des Gesichtsfelds

Im Ergebnis haben wir zu den Bildkoordinaten des Anfangs/Endes einer Sternspur auch den Bildpunkt, der kurz darauf/zuvor belichtet worden ist. Der Positionswinkel der Sternspur errechnet sich dann nach

[31] Positionswinkel $Tan(w) = (y_2-y_1)/(x_2-x_1)$

mit x_1, y_1 ... Anfangs-/Endpunkt der Sternspur
x_2, y_2 ... benachbarter Bildpunkt

Als letzter Parameter ist mit σ die Breite der Gaußglocke zu bestimmen. Hier läßt sich leider keine analytische Lösung finden. Wie eine Untersuchung an Sternspuren in digitalisierten Bildern zeigte, hängt die Breite sowohl von der Sternhelligkeit als auch von der Deklination ab. Hinzu kommt, daß sie generell starken Streuungen unterworfen ist. Das Ende einer Sternspur kann also bereits eine andere Breite als der Anfang haben.
Es zeigte sich jedoch auch, daß die Korrelation zwischen Sternspur und Gaußmodell relativ robust gegenüber dem Parameter Sigma ist. Selbst wenn der Wert einen größeren Fehler

aufweist, konvergiert die Funktion sicher und findet die optimale Position. Daher wurde folgende empirisch ermittelte Funktion zur Berechnung von Sigma eingeführt:

$$\sigma = 10 + 5*(h_{max}-h_{min})/(100-\delta) \qquad [\,32\,]$$

mit h_{min} ... minimale Bildhelligkeit
h_{max} ... maximale Bildhelligkeit
δ ... Deklination

Damit sind alle Parameter des Helligkeitsmodells bekannt.

Der Korrelation läuft wie folgt ab: Nachdem die Position des Anfangs oder Endes einer Sternspur näherungsweise bekannt ist, wird ein 30x30 Pixel umfassender Bildausschnitt des Originalbildes durch *quadratische Interpolation* zehnfach vergrößert. Die Parameter des Helligkeitsmodells werden wie zuvor beschrieben ermittelt. Dann wird die Modellhelligkeitsverteilung in einer 101x101 Pixel großen Maske berechnet. Schließlich wird die Position bestimmt, bei der die quadratische Abweichung zwischen dem vergrößerten Bild und dem Modell minimal ist. Dieser Vorgang ist rechenintensiv, er hat dieselbe Komplexität wie die Faltung des Bildes mit einer Filtermaske [9]. Daher wird ein zweistufiges Berechnungsverfahren angewandt.

In der ersten Stufe wird die beste Position des Helligkeitsmodells nur genähert bestimmt, indem jeder zehnte x- und y-Wert in Betracht gezogen wird. Ist dann die Position ungefähr bekannt, wird in einem zweiten Schritt die exakte Lage im verkleinerten Bildausschnitt pixelgenau berechnet. Durch diese stufenweise Bestimmung wird er Rechenaufwand auf $^1/_{50}$ reduziert, wobei kein Verlust an Genauigkeit auftritt.

Hat man die optimale Position des Helligkeitsmodells im vergrößerten Bild gefunden, kann man die Lage der Sternspur mit $^1/_{10}$-Pixel Genauigkeit angeben. Das entspricht einer Auflösung von weniger als einem Mikrometer auf dem Negativ.

3.5.2 Vermessung der Meteorspur

Die präzise Vermessung der Meteorspur ist genauso wichtig wie die exakte Bestimmung der Referenzsterne. Es läßt sich jedoch kein allgemeingültiges Modell für die Helligkeitsverteilung einer Meteorspur finden. Feuerkugeln weisen verschiedene Geschwindigkeiten auf und variieren deutlich in ihrer Helligkeit. Die resultierenden Spuren auf dem Fotonegativ entsprechen komplexen geometrischen Formen. Zwar lassen sich an diesen Formen verschiedene statistische Messungen wie Schwerpunkt oder Extremwerte vornehmen, jedoch ist keine davon zur Fixierung der Position geeignet. Hinzu kommt, daß in der Praxis sowohl verschiedene Positionen eines Feuerkugelsegments (Anfang, Mitte oder Ende) als auch die vorliegenden Unterbrechungen vermessen werden können.

Der Auswerter muß die gesuchten Positionen daher manuell mit einem Fadenkreuz im vergrößerten Meteorbild festlegen. Das Originalbild wird hier nur um einen Faktor fünf vergrößert, so daß ein genügend großer Bildausschnitt sichtbar bleibt. Damit erreicht man zwar nominal eine Auflösung von $^1/_5$ Pixel, die übliche Genauigkeit ist jedoch deutlich schlechter. Das bedeutet aber nicht, daß die berechnete Bahn der Feuerkugel so ungenau wie die einzelnen Meßwerte der Meteorspur ist. Nachdem die äquatorialen Koordinaten der einzelnen Abschnitte anhand der Position der Referenzsterne bestimmt wurden, ergibt sich die Bahn der Feuerkugel aus dem Mittel aller Einzelpositionen. Sie ist damit wesentlich genauer als die Meßwerte, auf denen sie beruht.

3.5.3 Zusammenfassung

Die digitale Vermessung der Sternspuren und der Feuerkugel erfolgt nach zwei verschiedenen Methoden. Für die Sternspur wird ein Helligkeitsmodell berechnet, dessen Position im Bild mit Subpixelgenauigkeit automatisch errechnet wird. An der SGI-Workstation dauert dieser Vorgang pro Stern etwa eine Sekunde.
Das Meteor wird im vergrößerten Bild von Hand vermessen. In einer komfortablen Programmumgebung sollte jedoch auch dieser Vorgang nur einige Minuten pro Negativ in Anspruch nehmen.

3.6 Bewertung

Es sollte erkundet werden, inwieweit Feuerkugelaufnahmen mit den Verfahren der digitalen Bildverarbeitung automatisch segmentiert und vermessen werden können. Dazu wurde zunächst davon ausgegangen, daß keinerlei Zusatzinformationen zum Bild gegeben sind.
Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt werden konnte, ist dieses Problem lösbar. Sternspuren können anhand ihrer charakteristischen Eigenschaften automatisch im Bild segmentiert und später identifiziert und vermessen werden. Einzelne Algorithmen beruhen dabei jedoch auf Vorgaben, die nicht in allen praktischen Fällen gegeben sind (kein Wolkendurchzug während der Aufnahme, genügend Sternspuren in Bild). Sind diese Voraussetzungen nicht gegeben, müssen die entsprechenden Parameter vorgegeben werden. Eine effiziente Vermessung der Sternspuren ist auch dann möglich.
Die Feuerkugel selbst läßt sich aus verschiedenen Gründen nicht automatisch segmentieren und vermessen. Hier sind also manuelle Eingaben des Auswerters gefordert, die durch ein komfortables Programm sinnvoll unterstützt werden können.
Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die im Abschnitt 3 formulierte Aufgabenstellung gelöst wurde.

4 Einbindung der FIRBAL-Software

Als die Aufgabenstellung der Diplomarbeit formuliert wurde, war nur wenig über das tschechische Programm FIRBAL bekannt. Es wurde daher angestrebt, entweder die vorhandene Software nach C++ zu portieren und in die Oberfläche des Vermessungsprogramms zu integrieren oder die in FIRBAL enthaltenen Routinen neu zu implementieren.
Nach intensiver Literaturrecherche und privaten Kontakten mit den Entwicklern von FIRBAL entstand folgendes Bild: Die ersten Teile der Software schrieb man Anfang der sechziger Jahre. Durch neue Erkenntnisse in der Meteorastronomie gelangen in der Folgezeit umfangreiche Verbesserungen am Programm. Diese sind zum Teil empirischer Natur, beruhen also auf den Erfahrungswerten der Auswerter und können nicht direkt physikalisch oder mathematisch begründet werden. Hinzu kommt, daß viele Korrekturen und Veränderungen unvollständig dokumentiert sind.
Im Jahre 1987 wurde ein Artikel zu den in FIRBAL verwendeten Algorithmen veröffentlicht [Ceplecha 1987]. Die publizierten Formeln stellten jedoch nur das Kerngerüst der Berechnungen dar. Die empirischen Erweiterungen und die Erfahrungen der Auswerter konnten nicht vollständig schriftlich formuliert werden. Außerdem wurde auch in den letzten Jahren fleißig an FIRBAL weitergearbeitet [Borovicka 1995], so daß auch die o.g. Veröffentlichung nicht mehr aktuell ist.

FIRBAL besteht derzeit aus etwa 4000 Zeilen FORTRAN Code, der spärlich in tschechischer Sprache kommentiert ist. Sowohl die Portierung und Einbindung des Programm als auch die Neuimplementierung der Algorithmen im Rahmen der Vermessungssoftware hätte den Rahmen dieser Diplomarbeit gesprengt.

Die Suche nach einer Problemlösung, welche die Vorteile der digitalen Vermessung bei der Auswertung von Feuerkugelaufnahmen trotzdem wirksam werden läßt, war schnell erfolgreich. Die meiste Zeit wird bisher bei der manuellen Vermessung der Negative am Meßtisch in der STERNWARTE ONDREJOV (Abbildung 14) benötigt. Der Auswerter muß dort in mühevoller Kleinarbeit jede Sternspur mehrmals von Hand vermessen. Die ermittelten Positionen werden dann zusammen mit den manuell identifizierten Sternnamen in ein strukturiertes Textfile eingegeben (Abbildung 43). Dieses Textfile wird von FIRBAL als Eingabedatei gelesen und ausgewertet.

```
 1994    5   25  21.  28.  00.
 60.0                 1.  00.
   42
4120.52.00. 2.00.00.                                             1334
   1. 100.
ALF UMA     11.   3.43.69-.017  61.  45.  3.3-.065 1.80 1.07 0.81
BET UMA     11.   1.50.510.010  56.  22. 56.40.033 2.38-0.01 0.08
BET UMI     14.  50.42.44-.007  74.   9. 19.40.010 2.07 1.47 1.10
ALF UMI      2.  31.49.510.218  89.  15. 50.7-.015 0.00 0.00 0.00
VENUSE       6.  25.41.34       24.  57. 44.9
ALF BOO     14.  15.39.71-.077  19.  10. 56.3-2.00-0.06 1.24 0.98
JUPITER     14.  19.47.41      -12. -31.-41.8
ALF LYR     18.  36.56.340.017  38.  47.  0.80.281 0.00 0.00-0.04
ALF UMA     11.   3.43.69-.017  61.  45.  3.3-.065 1.80 1.07 0.81
BET UMI     14.  50.42.44-.007  74.   9. 19.40.010 2.07 1.47 1.10

                                ...

   -1
   42   1  464.8782  217.0835       0
   42   2  462.8482  215.2202       1
   42   3  462.8493  215.2214       1
   42   4  462.8504  215.2228       1
   42   5  462.8512  215.2239       1
   42   6  463.3661  214.9157       2
   42   7  463.3669  214.9155       2
   42   8  463.3673  214.9147       2
   42   9  463.3678  214.9148       2
   42  10  461.9118  217.7268       3
   42  11  461.9121  217.7262       3
   42  12  461.9123  217.7246       3
   42  13  461.9125  217.7235       3

                                ...
```

Abbildung 43: Typisches Eingabefile für FIRBAL

Dasselbe File kann natürlich auch als Schnittstelle zwischen den digital vermessenen Positionen und FIRBAL genutzt werden. Anstatt die Algorithmen zur weiteren Auswertung der Meßwerte zu portieren oder neu zu implementieren, werden die Messungen im digitalen Bild in das von FIRBAL benötigte Format gebracht. Der geübte Auswerter kann dann das originale Programm mit all seinen Sonderfallbehandlungen und empirischen Verbesserungen nutzen.

5 Benutzeroberfläche

Die folgenden Abschnitte befassen sich mit der Benutzeroberfläche des Vermessungsprogramms. Nach der Festlegung der Zielplattform und der zu verwendenden Hilfsmittel wird entsprechend den Anforderungen an moderne Software und der konkreten Funktionalität des Programms seine Menüstruktur spezifiziert. Es schließen sich Betrachtungen zu Zusatzfunktionen an, die den Komfort des Programms erhöhen. Schließlich werden einzelne Probleme der Implementierung und die Lösungen, die bei der Umsetzung der Aufgabenstellung gefunden wurden, diskutiert. Zum Abschluß wird der Ablauf einer Arbeitssitzung mit der Vermessungssoftware beschrieben.

5.1 Spezifikation der Programmierumgebung

Mit der Steigerung der Leistungsfähigkeit moderner Workstations und Personal Computer hat die Bedeutung der Benutzeroberfläche, der kommunikativen Schnittstelle zwischen dem Programm und seinem Benutzer, erheblich zugenommen. Noch vor zwanzig Jahren wurde der größte Teil der Prozessorzeit eines Rechners zum Lösen der eigentlichen Problemstellung benötigt. Viele Programme arbeiteten kommandozeilenorientiert und liefen im Batch-Modus.
Heutzutage kommuniziert die Software aufgrund der kürzeren Antwortzeiten häufig interaktiv mit dem Anwender. Das alphanumerische Terminal wurde mehr und mehr durch Rechner mit grafischen Benutzeroberflächen (graphic user interface, GUI) und Fenstersystemen (z.B. X, MS WINDOWS) ersetzt. Die enorme Steigerung der Rechenleistung ermöglichte einerseits die Verwirklichung der ursprünglichen Idee des 'persönlichen Computers', der mittlerweile an fast jedem Arbeitsplatz zu finden ist. Andererseits stellte sie auch ganz neue Anforderungen an die Programmierer. Der Schwerpunkt verlagerte sich mehr und mehr von der Entwicklung und Implementation der zur Bewältigung von Problemstellungen benötigten Algorithmen hin zur Gestaltung von komfortablen Benutzeroberflächen.
Ein bedeutender Schritt zur Vereinheitlichung und Vereinfachung der Gestaltung von Programminterfaces war die Einführung von *look & feel-Standards*. Die Einarbeitungszeit in ein neues Programm soll für den Nutzer gezielt minimiert werden, indem verschiedenste Programme dasselbe elementare Aussehen (look) und dieselbe Funktionalität wie Tastaturkürzel, Menüpunkte und Verhaltensweisen (feel) erhalten. Unterstützt wurde dieses Anliegen durch die Verfügbarkeit von Fenstersystemen, die von vorn herein ein Mindestmaß an Übereinstimmung der unter ihnen laufenden Programme sichern. Wenn ein Nutzer regelmäßig an einem PC unter MS-WINDOWS oder an einer Workstation mit X arbeitet, kennt er das Grundverhalten der Anwendungsprogramme und kann sich relativ schnell in neue Software einarbeiten.
Leider sind systemübergreifende Standards heutzutage noch nicht die Regel, obwohl sich die einzelnen Standards schrittweise annähern. Wechselt der Anwender die Hardwareplattform, so muß er im allgemeinen viele Dinge neu lernen.

Für das Programm zur Vermessung von Feuerkugeln war also zunächst die Zielplattform zu definieren. Weil es teilweise sehr rechenintensive Algorithmen beinhaltet und im wissenschaftlichen Bereich zum Einsatz kommen soll, in dem Workstations dominieren, wurde die Implementation unter dem verbreiteten Betriebssystem UNIX gewählt.
Das wichtigste grafische Fenstersystem unter UNIX ist das X-Windowsystem. Von verschiedenen Herstellern werden zwar auch andere Oberflächen angeboten (z.B. OPENWINDOWS von SUN), diese sind jedoch häufig nur auf der Hardware des entsprechenden Herstellers lauffähig und unterstützen in den meisten Fällen normale X-Programme.
Der bekannteste look&feel-Standard unter X ist OSF/MOTIF. Mit dem MOTIF-Toolkit wird dem Softwareentwickler ein Werkzeug in die Hand gegeben, mit dem er relativ schnell und einfach grafische Benutzeroberflächen für seine Software entwickeln kann. Das Bild und die Funktionalität von MOTIF-Programmen wird im *Motif Style Guide* definiert. Allein die Verwendung des MOTIF-Toolkits sichert noch nicht, daß ein Anwendungsprogramm auch wirklich MOTIF-konform ist. Die Festlegungen des Style Guides werden jedoch bereits in den angebotenen Widgetklassen manifestiert, so daß die Umsetzung der stilistischen Forderungen keine Probleme bereitet.
Aufgrund der weiten Verbreitung von MOTIF und den bisher geschilderten Vorteilen fiel die Entscheidung, die grafische Benutzeroberfläche für das Vermessungsprogramm in MOTIF zu erstellen.

Als nächstes war zu klären, inwieweit astronomische Bildverarbeitungspakete wie VICAR oder IDL sinnvoll zur Programmgestaltung genutzt werden können.
VICAR (*Video Image Communication and Retrival*) ist eine Sammlung von Programmen und Routinen zum Erwerb von digitalen Bildern, zu ihrer Verarbeitung und Archivierung. Die Bildverarbeitungssprache von VICAR wurde in einer ersten Version im Jahre 1966 definiert und am JET PROPULSION LABORATORY (JPL) des CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY (CALTECH) implementiert. Die Software wurde von Beginn an kontinuierlich weiterentwickelt und Anfang der achtziger Jahre grundlegend überarbeitet. Seit dieser Zeit ist sie unter dem Betriebssystem VMS auf DEC Systemen verfügbar. Vor kurzem wurde auch eine Implementation für UNIX vorgestellt.
Ursprünglich für die Bearbeitung von Bildern entwickelt, die im Rahmen der amerikanischen Planetenerkundungsmissionen anfielen, unterstützt VICAR heute auch die Bildverarbeitung anderer Disziplinen wie der optischen Astronomie, Erdnaherkundung, Flächennutzung und Biomedizin.
VICAR stellt eine Schnittstelle zwischen dem Anwender, der Bibliothek von Applikationsprogrammen und -prozeduren und dem zugrundeliegenden Betriebssystem dar. Ziel der Software ist es, die Benutzerschnittstelle verschiedener Programme zu standardisieren, das Betriebssystem vor dem Nutzer zu verbergen und die Programmierung neuer Anwendungen zu vereinfachen. VICAR-Anwendungen kommunizieren mit dem Systemkern über ein definiertes

Set von Prozeduren. Dieses Set beinhaltet sowohl die Bildverarbeitungsroutinen als auch die Ansteuerung externer Geräte wie Monitore und Drucker. VICAR unterstützt direkt die Dokumentation der Bildverarbeitung und übernimmt einen Teil der Routinearbeit, die beim Schreiben von Anwendungsprogrammen anfällt.
Die bereits vorhandenen VICAR-Routinen sind hauptsächlich in FORTRAN und C entwickelt worden.
IDL (*Interactive Data Language*) ist ein Produkt der RESEARCH SYSTEMS, INC. Die erste moderne Version der Software wurde im Jahr 1981 für VAX/VMS-Systeme in FORTRAN entwickelt, es folgten Implementationen für UNIX-Workstations und PCs unter MS-WINDOWS. Die Software findet hauptsächlich in Bereichen Anwendung, in denen es um die schnelle Auswertung großer Mengen von Daten geht. Der Einsatzbereich reicht von der Astronomie und Physik über die Signal- und Bildverarbeitung bis hin zur Statistik und Medizin.
IDL ist ein Softwarepaket zur Auswertung, Analyse und Visualisierung wissenschaftlicher Daten und Bilder. Optimiert für Workstations umfaßt IDL eine eigene feldorientierte Sprache mit verschiedenen wissenschaftlichen Analysefunktionen. Im Gegensatz zu einfachen Funktionssammlungen oder menügesteuerten Systemen zeichnet sich IDL durch einen hohen Grad an Interaktion mit dem Anwender aus. Anweisungen können während der Ausführung von Programmen an einem Kommandoprompt eingegeben werden und so direkt in die Abarbeitung eingreifen.
IDL ist besonders zur Bildverarbeitung geeignet. Es stellt dem Nutzer ein leistungsstarkes Paket von Funktionen wie Filterroutinen, Fourier-Transformationen und Interpolationen zur Verfügung. Die Notation der Algorithmen erfolgt in einer Syntax, die FORTRAN nahe kommt. Eigene Programme werden in speziellen Bibliotheken abgelegt. Die Routinensammlung von IDL umfaßt alle gängigen Darstellungsformen von Graphen, Meßreihen und Bildern, so daß Zwischen- und Endergebnisse von Berechnungen schnell und komfortabel zur Anzeige gebracht werden können.
IDL unterstützt die Entwicklung von grafischen Benutzeroberflächen im MOTIF-Stil durch einen eigenen *Widget Builder*. Das ermöglicht die schnelle Erstellung und Anpassung von Nutzerschnittstellen (rapid prototyping), in die später der IDL-Programmcode eingebunden wird.

Ein wesentlicher Grund sprach für die Verwendung von VICAR oder IDL: Diese Pakete liefern fertige Routinen zum Einlesen und Abspeichern von Bildern, zu Grundfunktionen der digitalen Bildverarbeitung und zur Darstellung der Ergebnisse auf dem Monitor. Alternativ können die erstgenannten Funktionen auch relativ einfach in C realisiert werden, die Unterstützung der Ausgabe von Farbbildern im X-Windowsystem ist jedoch noch nicht ausgereift. Das MOTIF-Toolkit liefert keine Zusatzfunktionen, die die Erstellung von Farbtabellen oder die Ausgabe von Bildern vereinfacht. Es muß also auf die Basisfunktionen der XLIB-Bibliothek bzw. des XTINTRINSICS-Toolkits zurückgegriffen werden, was einen höheren Zeit- und Arbeitsaufwand bedeutet.

Ein Nachteil, der aus der Nutzung von IDL folgen würde, ist die beschränkte Verfügbarkeit des Vermessungsprogramms. Die Software würde dann nur auf Workstations oder PCs laufen, die eine lizensierte Kopie des Programmpakets besitzen, was die Zahl der möglichen Rechner enorm einschränkt. Vor allem die Weitergabe der Software und Nachnutzung der Routinen außerhalb westlicher astronomischer Institute wäre damit praktisch unterbunden.
VICAR-Programme können im Gegensatz dazu zwar statisch gelinkt und ohne Verletzung des Lizenzrechts weitergegeben werden, jedoch gibt es keine Implementation für PCs.
Viele der Funktionen, die von VICAR oder IDL angeboten werden, gehen weit über den Rahmen der Probleme, wie sie in dieser Arbeit behandelt werden, hinaus. Andererseits beinhalten die im Kapitel 3 besprochenen Verfahren Spezialalgorithmen, die nicht von den Softwarebibliotheken erfaßt werden. Ihre Neuimplementierung ist also unumgänglich.
Die Nutzung von VICAR oder IDL im Rahmen dieser Diplomarbeit würde außerdem zusätzliche Einarbeitungszeit in die Programmpakete erfordern, die den oben beschriebenen Zeitvorteil egalisieren würde.
Aus diesem Grunde fiel die Entscheidung gegen externe Softwarepakete und für die Programmentwicklung in MOTIF. Die Software kann damit leicht weitergegeben werden und ist auch auf schnellen PCs, auf denen das UNIX-Derivat LINUX installiert ist, sinnvoll einsetzbar.

Eine weitere Entscheidung betraf die für die Nutzerführung verwendete Sprache. Zwar ist die Software zunächst einmal für den Einsatz am INSTITUT FÜR PLANETENERKUNDUNG vorgesehen, jedoch ist auch die zukünftige Nutzung an anderen Instituten außerhalb der BRD denkbar. Das führte zu dem Entschluß, die gesamte Benutzeroberfläche in Englisch zu gestalten.

Die Entscheidung gegen die Nutzung anderer Softwarepakete brachte eine weitere Änderung in der ursprünglich formulierten Aufgabenstellung mit sich. Das Programm mußte nun nicht mehr notwendiger Weise in C++ erstellt werden, weil die Klassenbibliotheken von IDL nicht verwendet wurden. Das MOTIF-Toolkit verfolgt den geforderten objektorientierten Programmieransatz, indem es Klassenhierarchien von Widgets mit den OOP-üblichen Eigenschaften wie Vererbung und Instantiierung bereitstellt. Das Klassenmodell von MOTIF ist jedoch nicht mit dem von C++ kompatibel, so daß sich bei Nutzung dieser Programmiersprache kein direkter Vorteil gegenüber der Implementierung in C ergibt. Wenn die Funktionen zur Ausgabe von Dialogen und Eingabeformularen sinnvoll strukturiert sind, lassen sich einzelne Programmteile genauso einfach wiederverwenden wie C++-Routinen. Hinzu kommt, daß für das zu behandelnde Problem nur eine relativ kleine Oberfläche mit wenigen Fenstern benötigt wird.
Die Entscheidung fiel daher für eine vollständige Implementierung unter C bei Verwendung des MOTIF-Toolkits.

5.2 Aufbau des Programms

Ein MOTIF-Programm besteht in den meisten Fällen aus einem Rahmenfenster, an dessen Oberseite eine Menüleiste die einzelnen Funktionen des Programms auflistet. Unter dem Menü liegt das Hauptfenster, sinngemäß der Arbeitsplatz des Anwendungsprogramms. An dessen unterem Rand können sich schließlich Statuszeilen, ein Kommandoprompt oder Hilfsinformationen anschließen.
Das hier behandelte Problem paßt sehr gut in dieses Schema. Während im Hauptfenster das zu vermessende Bild angezeigt wird, werden in der Menüleiste die Grundfunktionen wie Dateiverwaltung, Vermessung von Objekten und Generierung von Meßdatenfiles verwaltet. Am Fuß gibt ein Hilfsfenster über anstehende Aktionen Auskunft.

Folgende Menüpunkte lassen sich definieren:

- FILE-Menü: Hinter diesem Menü, das bei fast jeder Applikation zu finden ist, verbergen sich Funktionen wie das Laden von Bildern, das Speichern von Positionsmessungen und Aufnahmedaten sowie das Verlassen des Programms.
- STAR-Menü: Hier werden alle Routinen zusammengefaßt, die mit der Bildorientierung sowie der Identifizierung und Vermessung von Sternspuren zu tun haben.
- METEOR-Menü: Funktionen, die der Vermessung der Feuerkugel dienen, werden von diesem Menü aus angesprochen.

  Die Trennung von der Sternspurvermessung liegt in der in Abschnitt 3.6 beschriebenen unterschiedlichen Verfahrensweise für beide Objektklassen begründet.
- DATA-Menü: Für den Aufbau eines Feuerkugelarchivs ist es notwendig, daß allgemeine Informationen wie Datum, Beobachtungsort und -zeit, Filmtyp und andere Umstände der Aufnahme digital erfaßt werden. Die notwendigen Routinen werden in diesem Menü angeboten.
- EXPORT-Menü: Die Ergebnisse der Vermessung müssen in einem Format gespeichert werden, das als Schnittstelle zur weiteren Datenverarbeitung mittels der FIRBAL-Software dient. Dazu existiert dieser Menüpunkt.
- HELP-Menü: Grundsätzliche Fragen zur Funktionalität des Programms werden mittels einer Hilfsfunktion beantwortet, die nach den Forderungen des MOTIF Style Guide im Hauptmenü am rechten Rand abgesetzt positioniert wird. Spezielle Hilfestellungen zu einzelnen Aktionen, Meldungen oder Zuständen der Software werden an den verschiedenen Stellen im Programm selbst angeboten.

Nachdem die Grundfunktionen der grafischen Benutzeroberfläche definiert sind (Abbildung 44), können nun die Inhalte der einzelnen Menüs genauer spezifiziert werden.

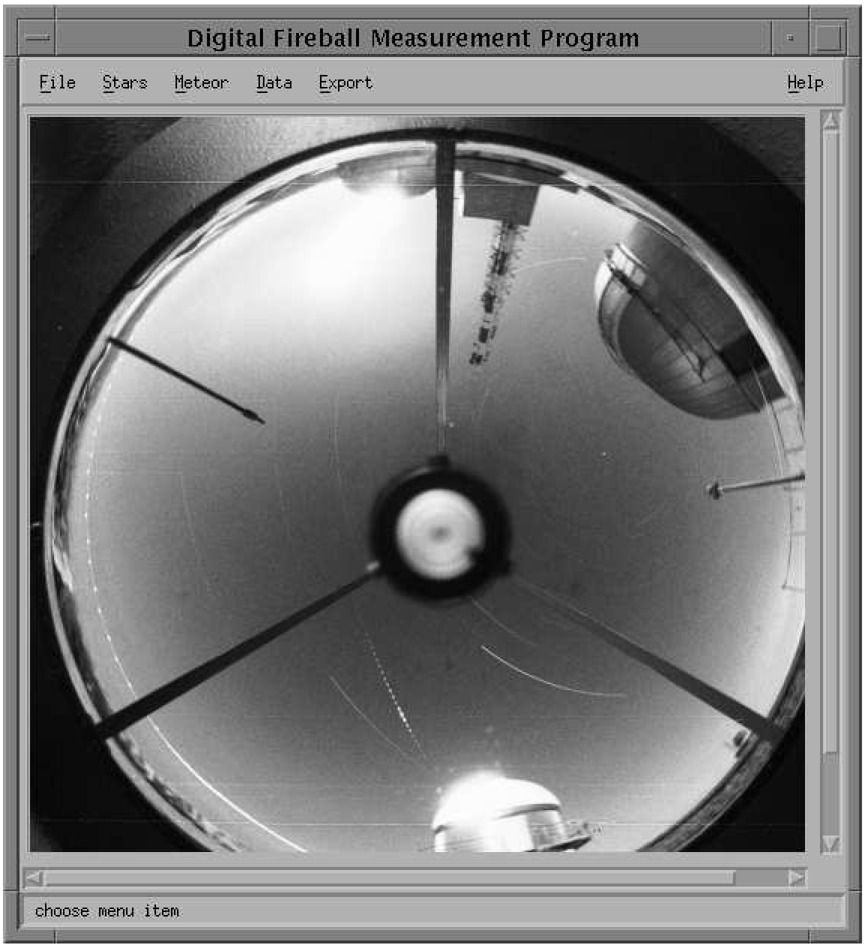

Abbildung 44: Hauptfenster mit den beschriebenen Menüeinträgen

5.2.1 Das FILE-Menü

Wenn man den Menüpunkt FILE anklickt oder die entsprechende Tastenkombination betätigt, klappt wie bei allen Menüpunkten ein *Pulldown-Menü* herunter (Abbildung 45), in dem die einzelnen Optionen zur Dateiverwaltung angeboten werden.

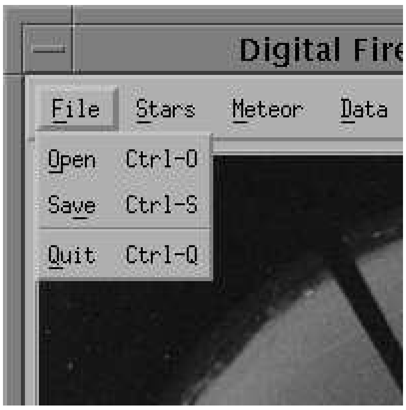

Abbildung 45: Pulldown-Menü mit den einzelnen Optionen zur Dateiverwaltung

Das File-Menü des Vermessungsprogramms muß sowohl das Laden von digitalisierten Negativen als auch von bereits erfaßten Meßwerten und Aufnahmedaten anbieten. Außerdem sollen modifizierte Aufnahmedaten und Meßwerte permanent gesichert werden.
Es bietet sich an, das digitalisierte Bild und die zugehörigen Daten als eine Einheit zu betrachten. Unabhängig vom konkret verwendeten Dateiformat wird ein Objekt (nicht im Sinne der objektorientierten Programmierung) geladen und gespeichert, welches sowohl das Bild als auch die Zusatzinformationen enthält. Damit kommt man mit den zwei Menüeinträgen OPEN und SAVE aus. Sobald das Objekt geladen wurde, erscheint das zugehörige Bild im Hauptfenster.
Am Ende einer Sitzung wird das Vermessungsprogramm über den Menüpunkt QUIT verlassen, der üblicherweise im File-Menü untergebracht ist.

5.2.2 Das STAR-Menü

Die Vermessung von Sternspuren ist einer der zentralen Punkte der Software. Sie kann sowohl automatisch als auch manuell erfolgen und muß möglichst effektiv sein, um den Arbeitsaufwand so weit wie möglich zu reduzieren.
Ein Menüpunkt dient dem Start der automatischen Sternsegmentierungs-, Identifizierungs- und Vermessungsroutinen (siehe Kapitel 3). Da diese Routinen je nach Leistungsfähigkeit der Hardware und Qualität des Bildes für mehrere Minuten autonom arbeiten, sollten sie im Hintergrund laufen. Der Nutzer kann die entsprechende Zeit z.B. dazu nutzen, die Aufnahmedaten der Feuerkugel zu erfassen.
Sollte die Bildqualität so schlecht sein, daß sich die Sternspuren nicht automatisch vermessen lassen, muß der Anwender die Möglichkeit haben, Sterne manuell anzuwählen, zu identifizieren und zu vermessen. Zusätzlich muß der Nutzer des Programms in die Lage versetzt werden, automatisch oder selber vermessene Sternspuren zu editieren, also die Position oder den Eintrag aus dem Sternkatalog zu ändern. Schließlich kann auch es notwendig werden, falsch identifizierte oder unbrauchbare Sternpositionen zu löschen.

Für alle genannten Aufgaben kann eine Eingabemaske (Abbildung 46) zum Einsatz kommen: Zunächst klickt der Nutzer mit der Maus einen Stern im Bild an, der neu vermessen, editiert oder gelöscht werden soll. Dann erscheinen alle zum Stern gespeicherten Informationen in einem speziellen Formular. Es enthält einen vergrößerten Ausschnitt des Bildes mit der Sternspur, in dem die aktuell gespeicherte Position mit einem Fadenkreuz angezeigt und per Mausklick modifiziert werden kann. Die Identifizierung des Objekts erfolgt über eine Liste mit dem Auszug aus dem PPM-Sternkatalog. Ein spezieller Knopf gibt an, ob es sich um den Anfang oder das Ende einer Sternspur handelt. Ein weiterer aktiviert die automatische Vermessung der Sternspur, auch wenn sie manuell im Bild angewählt wurde.
Je nach vorliegender Aktion verändert sich die Funktionalität der Knöpfe am Ende des Formulars: Neben den immer vorhandenen OK- und HELP-Buttons kann der aktuell ausgewählte Stern entweder gelöscht oder die Modifikation seiner Daten abgebrochen werden.

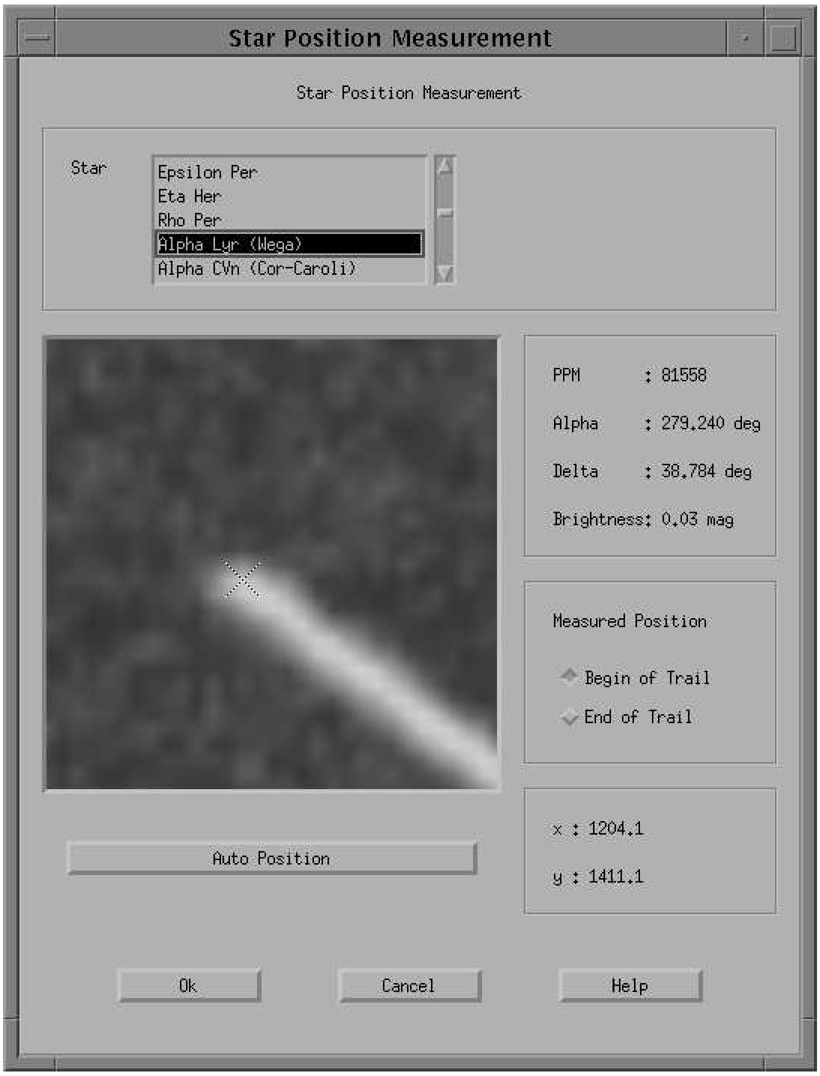

Abbildung 46: Eingabemaske zum Vermessen von Sternspuren

Für die Kontrolle der automatisch identifizierten und vermessenen Sternspuren ist es sinnvoll, in einer Schleife alle gefundenen Sterne überprüfen zu lassen. Das erspart dem Nutzer das sequentielle Anklicken der einzelnen Sterne.

5.2.3 Das METEOR-Menü

Die Vermessung des Meteors erfolgt analog der manuellen Vermessung von Sternspuren. Es bestehen gleiche Anforderungen im Hinblick auf das Editieren und Löschen von Positionen. Die entsprechenden Menüeinträge sind daher identisch.
Die Eingabemaske zur Meteorspurvermessung sieht etwas anders aus (Abbildung 47). Zwar gibt es wieder eine Ausschnittsvergrößerung des Originalbildes, in der die genaue Position vermerkt ist und modifiziert werden kann, alle anderen Informationen entfallen jedoch. Es muß lediglich angegeben werden, welcher Teil der Meteorspur vermessen wurde.

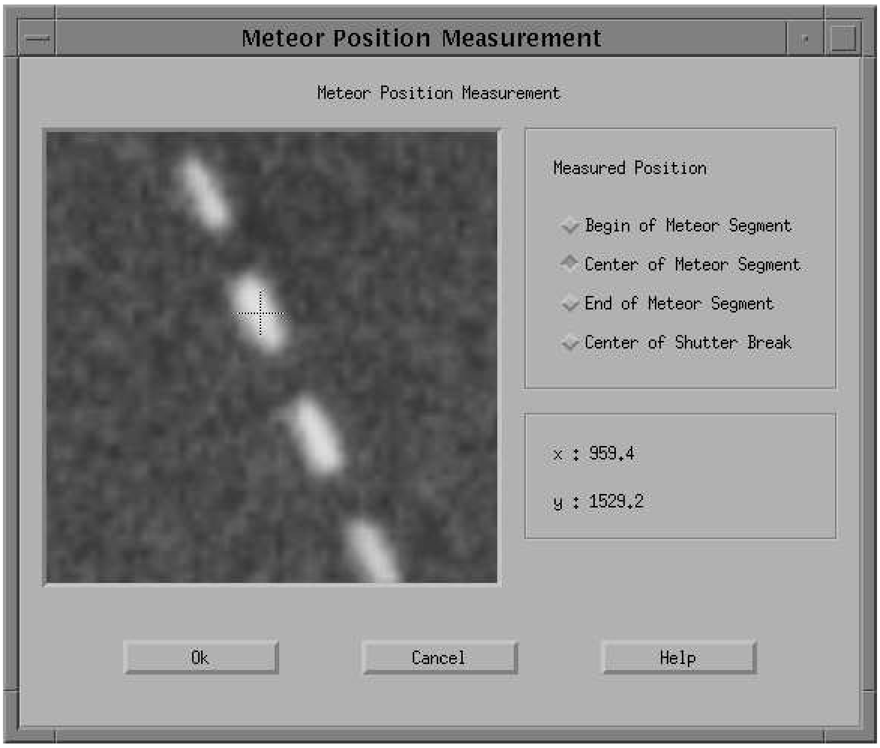

Abbildung 47: Eingabemaske zur Vermessung von Meteorspuren

Um die Konformität der Benutzeroberfläche zu gewährleisten wird auch für Meteore eine Funktion angeboten, mit der alle erfaßten Positionen sequentiell überprüft werden können.

5.2.4 Das DATA-Menü

Dieses Menü benötigt keine weitere Untergliederung. Zu jeder Feuerkugelfotografie ist nur ein Satz an Stamminformationen notwendig, der unter diesem Hauptmenüeintrag angezeigt und modifiziert werden kann. Die Eingabemaske bietet komfortable Bedienelemente zur Erfassung der Feuerkugeldaten (Abbildung 48).

Das Datenmenü enthält Informationen wie z.B. die Belichtungszeit, die bei der automatischen Identifizierung von Sternen von Interesse sind. Wenn diese Daten zum Zeitpunkt der automatischen Erkennung von Sternspuren bereits einfaßt wurden, fließen sie als Seiteninformation in die entsprechenden Algorithmen ein. Liegen noch keine Einträge vor, so müssen alle Parameter automatisch ermittelt oder der Nutzer explizit zur ihrer Eingabe aufgefordert werden.

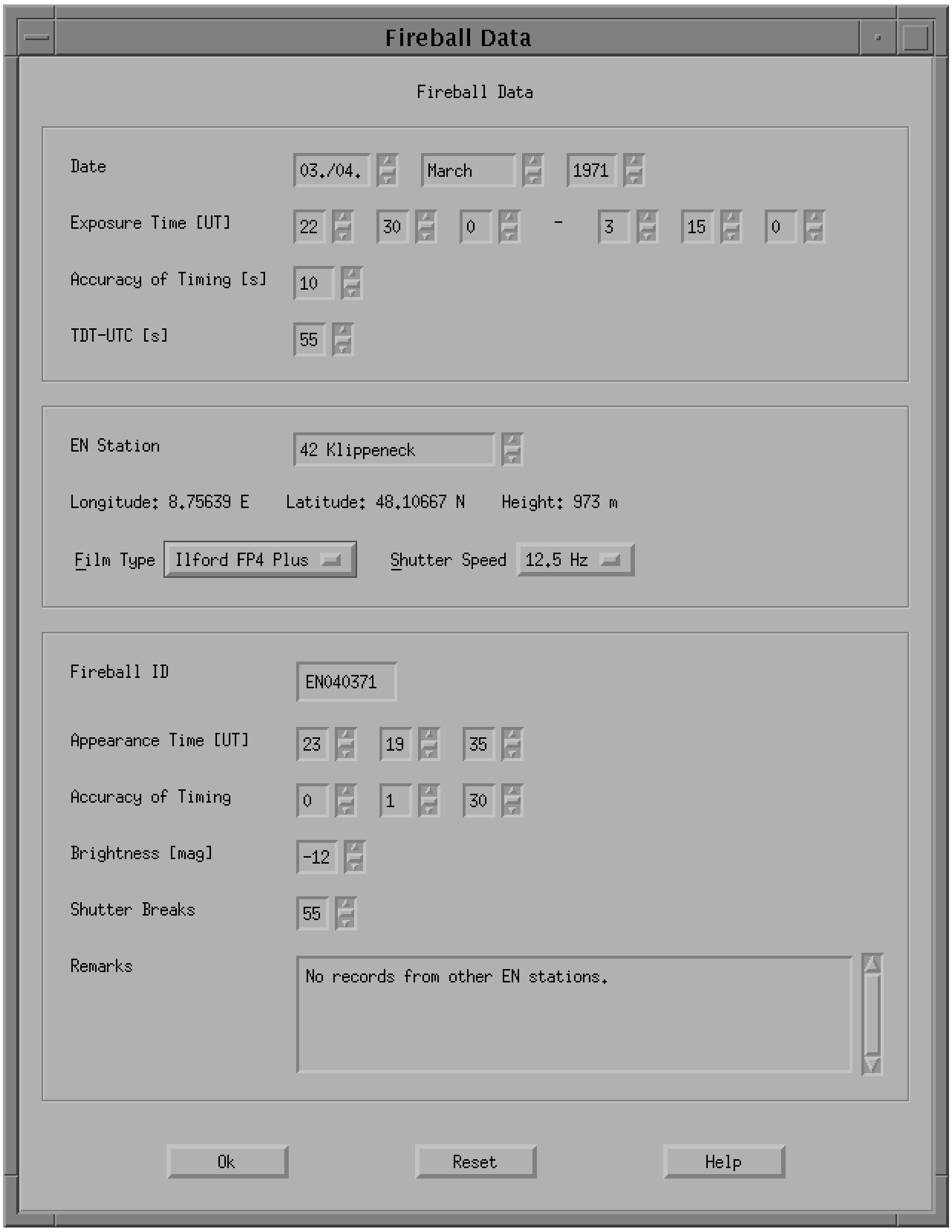

Abbildung 48: Eingabemaske zur Erfassung der Feuerkugelstammdaten

5.2.5 Das EXPORT-Menü

Auch dieses Menü benötigt keine weitere Untergliederung. Sind alle Daten einer Feuerkugel erfaßt und genügend Stern- und Meteorpositionen vermessen, kann das entsprechende Inputfile für FIRBAL generiert werden. Ist dies nicht der Fall, muß der Nutzer darüber informiert werden, welche Informationen noch fehlen.

5.3 Allgemeine Funktionalität

In den vorhergehenden Abschnitten wurde das Aussehen und die grundlegende Funktionalität der einzelnen Menüs spezifiziert. Das Programm richtet sich nach dem MOTIF Style Guide und ist damit für den geübten MOTIF-Nutzer schnell zu erlernen und intuitiv zu benutzen. Zusätzliche Funktionen sollen die Nutzerfreundlichkeit der Software weiter verbessern.
So ist der Anwender vor allen kritischen Operationen, z.B. dem Löschen von Messungen oder Verlassen des Programms ohne Datensicherung, mit einem entsprechenden Dialog zu warnen, damit nicht versehentlich Daten verloren gehen. Die falsche Bedienung des Programms ist weitestgehend auszuschließen, indem z.B. einzelne Menüpunkte deaktiviert werden, wenn die Voraussetzungen ihrer Anwahl nicht gegeben sind. Sollten trotzdem fehlerhafte Eingaben zustande kommen, ist der Nutzer mit entsprechenden Ausschriften zu informieren.
Das Vermessungsprogramm beinhaltet ein zweistufiges Hilfssystem. Am unteren Rand des Hauptfenstern erscheint ein kurzer Hinweis, welche Aktion gerade vom Nutzer erwartet wird. Zusätzlich gibt es sowohl im Hauptmenü als auch in den einzelnen Eingabemasken separate Hilfsfunktionen. Diese Hilfestellung ist *kontextsensitiv*. Die in einem gesonderten Fenster ausgegebenen Informationen beziehen sich immer auf den Abschnitt des Programms, von dem die Hilfe angefordert wurde.
MOTIF-Programme können über *Ressourcen* an die jeweiligen persönlichen Bedürfnisse des Benutzers angepaßt werden. Das Programm selbst legt nur ein unbedingtes Minimum an Vorgaben fest.

5.4 Implementierung der Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche wurde entsprechend den unter Punkt 5.2 gemachten Spezifikationen in C implementiert. Im folgenden Abschnitt sollen einige der dabei aufgetretenen Probleme und deren Lösung diskutiert werden.

Bei der Programmierung kam MOTIF in der Version 1.2 zum Einsatz. Inzwischen ist auch MOTIF 2.0 verfügbar, jedoch bringt die neue Version für die gegebene Problemstellungen keine Vorteile.
Zur Erzeugung der Widgets konnten im wesentlichen die *Convenience Functions* von MOTIF genutzt werden. Lediglich das *list-Widget* wurde in seiner Funktionalität verändert. Es bestand die Aufgabe, aus einer vorgegebenen Liste von Optionen eine Auswahl zu treffen. Das von MOTIF dafür vorgesehene *Option-Menü* erwies sich als ungeeignet, weil in Einzelfällen bis zu 200 Einträge möglich waren. Verwendet man das List-Widget in seiner Grundform und beschränkt die Zahl der angezeigten Elemente auf eins (Abbildung 49), entspricht es nahezu der gesuchten Funktionalität. Man kann dann jedoch die *Scroll Bars* betätigen, ohne daß das jeweils angezeigte Listenelement wirklich aktiviert wird. Durch Ergänzen zusätzlicher *Callbacks* konnte dieser Mangel beseitigt werden.

Abbildung 49: Modifiziertes List-Widget

Im FILE-Menü verbirgt sich hinter OPEN eine *file selection box* (Abbildung 50). Dieses komfortable Dialogwidget wird vom MOTIF-Toolkit angeboten und beinhaltet bereits die komplette Funktionalität wie das interaktive Auswählen von Files, das Setzen von Dateifiltern und den Wechsel von Verzeichnissen.

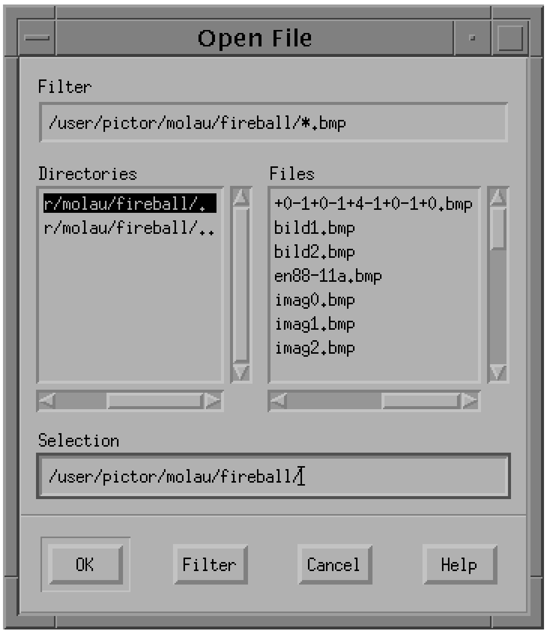

Abbildung 50: Dialog zum Öffnen von Dateien

Als Dateiformat für das gescannte Bild wurde das weit verbreitete BMP-Bitmapformat von MS-WINDOWS in unkomprimierter Form gewählt. Es genügt trotz seiner Einfachheit den gestellten Ansprüchen vollauf und ist leicht zu implementieren. Außerdem wird es von der zur Steuerung des Diascanners verwendeten Software ADOBE PHOTOSHOP unterstützt. Die Meßwerte und Zusatzinformationen zur Feuerkugelaufnahme werden in einem einfach strukturierten Textfile mit gleichem Namen wie das Bild und der Endung FIR abgelegt. Das ermöglicht es, ohne Vermessungsprogramm einen Blick auf die Meßwerte zu werfen und die Daten mit einem einfachen Texteditor zu modifizieren.
Zur Archivierung können gängige Kompressionsprogramme eingesetzt werden, die sowohl das Bild als auch das Datenfile verlustfrei auf einen Bruchteil der Originalgröße schrumpfen lassen. Die dabei erreichten Kompressionsraten entsprechen nahezu den aus der Informationstheorie folgenden Grenzwerten.

Wie bereits in Kapitel 5 bemerkt, bietet das MOTIF-Toolkit keine Funktionen zur Unterstützung der Arbeit mit Farbbildern an. Man muß also auf die Basisroutinen von XLIB bzw. XTINTRINSICS zurückgreifen. Die dort vorhandenen Funktionen sind sehr flexibel, weil sie eine breite Palette von Hardwarekonfigurationen unterstützen sollen. Das heißt jedoch auch, daß viele Aufgaben dem Programmierer übertragen werden.
Zwei Probleme waren konkret zu lösen, die Einstellung einer passenden Farbabbildung und die Darstellung des Graustufenbildes.

Die Auswahl von Farben geschieht in XLIB in einem zweistufigen Vorgang. Zunächst muß man eine von sechs möglichen *visual-Klassen* wählen, die von der benutzten Hardware unterstützt wird. Ein Test verschiedener Systeme (SUN und SGI Workstations, DEC VAX Systeme, PC) ergab, daß die Klasse *PseudoColor* die einfachste ist, die von allen Rechnern angeboten wird. Gegenwärtig ist fast jeder Computer mindestens mit einer 8-Bit-Farbgrafikkarte ausgestattet, so daß diese Klasse nahezu überall verfügbar ist. Die Benutzung von PseudoColor erschien daher am sinnvollsten.
X bietet dann in der zweiten Stufe drei verschiedenen Methoden, wie man Farbabbildungen für seine Applikationen erzeugen kann:

- gemeinsame Farbzellen
- private Farbzellen
- Standardfarbabbildungen

Da im gegebenen Fall nur Graustufenbilder mit 8 Bit Tiefe dargestellt zu werden brauchen, bietet sich eine Standardfarbabbildung an. Leider ist die entsprechende Klasse *XA_RGB_GRAY_MAP* nicht auf allen überprüften Systemen vorhanden, weshalb diese Farbabbildung verworfen werden mußte.
Farbzellen sind eine Ressource, die von allen am X-Server angemeldeten Applikationen genutzt werden. Sie sind also nur in beschränktem Umfang für einzelne Anwendungen verfügbar.
Gemeinsame Farbzellen sind zu bevorzugen, wenn man wenige Farben für die Gestaltung von Fenstern reservieren möchte. Bei einem Bild benötigt man jedoch ein ganzes Set von Farbtabelleneinträgen, so daß man auf private Farbzellen zurückgreifen muß.
Das Vermessungsprogramm versucht, so viele Farbzellen wie möglich für sich zu reservieren. Sollten weniger als 32 Farbzellen bereitgestellt werden können, so bricht es mit einer entsprechenden Information ab, weil dann keine vernünftige Darstellung der Graustufenbilder möglich ist. In diesem Fall müssen andere 'farbintensive' Applikationen (z.B. Bildbetrachter wie XV) beendet und das Programm neu gestartet werden.
Sind ausreichend Farbzellen verfügbar, so werden sie gleichmäßig mit Graustufenwerten zwischen schwarz und weiß initialisiert. Das Programm berechnet eine *lookup table*, in der für jeden der originalen 256 Graustufenwerte die entsprechend ähnlichste Farbzelle eingetragen wird. Bei der späteren Darstellung eines Bildes auf dem Monitor wird jeder Bildpunkt zuerst

entsprechend dieser Tabelle modifiziert und dann gesetzt. Damit kommen zwar in den seltensten Fällen alle 256 Graustufen zur Anzeige, was jedoch aus physiologischen Gründen vom Nutzer nicht wahrgenommen wird.
Für die Ausgabe des Bildes auf dem Monitor steht die Funktion *XPutImage* zur Verfügung, die bei richtiger Einstellung der Farbabbildung die Graustufenbilder wunschgemäß darstellt.

Wie bereits im Abschnitt 5.2.2 erläutert wurde, ist die automatische Erkennung und Vermessung von Sternspuren ein Vorgang, der für einige Minuten autonom im Hintergrund ablaufen kann, während der Benutzer im Vordergrund beispielsweise die Aufnahmedaten der Feuerkugel erfaßt. Parallelität ist in *Multitasking*-Betriebssystemen wie UNIX generell unproblematisch. Bei grafischen Benutzeroberflächen muß ihr jedoch besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.
MOTIF bietet für diesen Fall das Konzept der *Work Procedures* an. Eine Funktion, die im Hintergrund laufen soll, kann als Arbeitsroutine deklariert werden. Sie wird dann jedes mal aufgerufen, wenn sich das Programm im Leerlauf befindet. Leider ist dieses Konzept nur für Routinen geeignet, die die Steuerung schon nach kurzer Zeit wieder an die Programmhauptschleife zurückgeben. Wenn man eine rechenintensive Bildverarbeitungsfunktion als Arbeitsprozedur anmeldet, würde das Vermessungsprogramm bis zur Rückkehr aus der Prozedur auf keinerlei Nutzereingaben reagieren, was ein unzumutbarer Zustand wäre.
Von der Benutzung der üblichen UNIX-Funktionen *fork* und *exec* zur Generierung neuer Prozesse, die dann autonom arbeiten und die Ergebnisse nach ihrer Beendigung an das Hauptprogramm übergeben, wird generell abgeraten. Weil eine Verbindung zum *X-Server* nur exklusiv von einem Prozeß genutzt werden kann, müßte der neue Prozeß eine eigene Verbindung zum Server aufbauen, um mit dem Benutzer kommunizieren zu können (z.B. zur Bestätigung von Zwischenergebnissen). Das mögliche Auftreten von Signalen würde die Programmierung besonders erschweren, da hier schier unüberschaubare Kombinationen zu beachten wären.
Es fand sich eine einfache Lösung des Problems, die ähnlich den Work Procedures die Leerlaufzeit im Hintergrund des Vermessungsprogramms nutzt und trotzdem auf Nutzereingaben im Vordergrund reagiert. Dazu wird einfach in der inneren Schleife aller Bildverarbeitungsroutinen getestet, ob *X-Events* in der Warteschlange des Servers vorliegen. Ist dies der Fall, werden erst alle Ereignisse aus der Schlange bearbeitet, bevor die Routine im Hintergrund weiterläuft.
Auf diese Art und Weise lassen sich die einzelnen Schritte der automatischen Vermessung ganz unproblematisch sequentialisieren. Außerdem können die automatischen Routinen jederzeit mit dem Anwender über den bereits initialisierten Kanal zum X-Server kommunizieren. Dazu werden alle im Vordergrund geöffneten Fenster und die Menüleiste deaktiviert und die Anfrage an den Nutzer im Fensterstapel ganz nach vorne gestellt.
Ebenfalls leicht zu verwirklichen ist ein Statusfenster, welches den aktuellen Stand der automatischen Vermessung angibt und die Möglichkeit zum Abbruch der Prozedur bietet. Im Hauptfenster läßt sich das aktuelle Zwischenergebnis der Bildverarbeitung anzeigen. Sollten

Probleme auftreten, kann der Anwender sofort erkennen, aus welchen Grund bestimmte Prozeduren nicht erfolgreich zum Ziel gelangten.

5.5 Ablauf einer Arbeitssitzung

Die Vermessung einer Feuerkugelaufnahme verläuft wie folgt: Zunächst öffnet der Bearbeiter das digitalisierte Bild und lädt damit implizit die evtl. bereits erfaßten Meßwerte und Aufnahmedaten. Es schließt sich die Vermessung der Feuerkugel und der Referenzsterne an. Während die Position der einzelnen Meteorsegmente manuell bestimmt wird, stehen für die Sternspuren je nach Qualität der Aufnahme drei verschiedene Verfahren zur Auswahl.

- Bei der vollkommen manuellen Vermessung klickt der Vermesser im Bild den gewünschten Stern an. In der Eingabemaske, die daraufhin erscheint, muß er dann den zugehörigen Eintrag aus dem Sternkatalog auswählen und die exakte Position der Sternspur mit dem Cursor im vergrößerten Bild manuell vorgeben.
- Die halbautomatische Vermessung beginnt damit, daß von Hand die Positionen von Himmelspol und Zenit sowie der Radius des Bildfeldes im Ausgangsbild markiert werden. Wählt der Bearbeiter dann eine Sternspur aus, kann er deren Position per Knopfdruck automatisch subpixelgenau berechnen. Ist zuvor bereits ein anderer Stern identifiziert worden und auch die Belichtungszeit bekannt (entweder aus den Aufnahmedaten der Feuerkugel oder aus mindestens je einem vermessenen Sternspuranfang und -ende), so wird auch der richtige PPM-Katalogeintrag automatisch voreingestellt. Der Auswerter hat also auch für Aufnahmen mit geringer Qualität fast den gesamten Komfort der automatischen Vermessung zur Verfügung.
- Für sehr gute Aufnahmen steht schließlich die vollautomatische Segmentierung, Identifizierung und Vermessung zu Verfügung. Der Benutzer ruft die entsprechende Funktion auf und kann während der Arbeitszeit der Prozeduren die Aufnahmedaten der Feuerkugel erfassen. Wenn die Routinen fragliche Werte ermitteln oder zu keinem Ergebnis kommen, z.B. wenn sich auf Grund weniger Sternspuren der Himmelspol nicht bestimmen läßt, so unterbrechen sie den Auswerter und bitten um Bestätigung bzw. erfragen die unbekannten Werte. Schließlich wird mitgeteilt, wieviel Sternspuren automatisch erkannt und vermessen wurden. Die Meßwerte können daraufhin manuell überprüft werden, neue Messungen lassen sich hinzufügen und unbrauchbare löschen.

Vor, während oder nach der Vermessung von Sternspuren und Meteorsegmenten werden die Aufnahmedaten der Feuerkugel mit Hilfe der entsprechenden Eingabemaske erfaßt.
Der Auswerter kann die Arbeitssitzung jederzeit unterbrechen und die eingegebenen Werte abspeichern. Sind alle Daten erfaßt, wird abschließend das Eingabefile für FIRBAL generiert, das als Schnittstelle zur weiteren Auswertung der Daten dient.

6 Programmtests und Gesamtbewertung

Der ausführliche Test und die Bewertung des Programms stellen einen wichtigen Bestandteil der Diplomarbeit dar. Im wesentlichen konzentrierte sich die Tätigkeit auf drei Schwerpunkte.

- individuelle Tests der Routinen zur Bildverarbeitung
- Test der einzelnen Funktionen der Benutzeroberfläche
- Gesamttest des Programms und Einschätzung der erzielten Ergebnisse

Die einzelnen Routinen der automatischen Sternspurvermessung arbeiteten erst nach mehreren Probeläufen fehlerfrei. Beim Gesamttest aller Prozeduren zeigte sich, daß die vollkommen automatische Segmentierung, Identifizierung und Vermessung der Sterne eine gute Aufnahme mit vielen Sternspuren erfordert. Es müssen ca. 20 Sterne im Bild vorhanden sein, damit das Koordinatensystem ermittelt und die Objekte identifiziert werden können. Leider wird diese Bedingung in der Praxis nur in wenigen Fällen erfüllt. Oft ist der Himmel durch Mondlicht oder Bewölkung so stark aufgehellt, daß nur wenige Sternspuren auf den Aufnahmen zu erkennen sind.
Als Konsequenz wurden die einzelnen Routinen der automatischen Erkennung verstärkt mit Bestätigungen der Zwischenergebnisse durch den Benutzer versehen. Außerdem wurden alle Prozeduren, die auch bei der manuellen Vermessung von Bedeutung sind, dem Anwender direkt zugängig gemacht (siehe Kapitel 5.5).

Statistische Tests haben gezeigt, daß sowohl die automatische als auch die manuelle Positionsmessung für helle Objekte einen mittleren Fehler von weniger als 0,5 Pixel hat. Bei schwachen Sternspuren kann der Fehler auf ein Pixel ansteigen. Damit ist die erzielte räumliche Genauigkeit bei der verwendeten Auflösung des Diascanners (siehe Kapitel 3.1) im Mittel besser als 10 µm. Das entspricht der Auflösung des verwendeten Filmmaterials, so daß das Ziel der digitalen Vermessung in bezug auf die Genauigkeit erreicht ist. Mögliche Verzerrungen bei der Digitalisierung des Bildes wurden von diesen Tests nicht berücksichtigt.

Ein vollständiger Vergleich der digitalen mit der derzeitigen manuellen Methode würde verlangen, daß ein und dasselbe Negativ einer Feuerkugel vermessen, die Bahn der Feuerkugel berechnet und die Ergebnisse verglichen werden. Leider konnte dieser Test nicht vorgenommen werden, da das Programm FIRBAL im Moment noch nicht zur Verfügung steht. Der Vergleich muß also an der STERNWARTE ONDREJOV durchgeführt werden und ist eine wichtige Aufgabe für die Zukunft.

Untersucht man die Effektivität der erreichten Lösung, so kommt man zu folgendem Ergebnis: Die Digitalisierung eines Negatives samt Transfer der Daten zu einer UNIX-Workstation nimmt etwa zehn Minuten in Anspruch. Die vollautomatische Vermessung aller Sternspuren auf einem

entsprechend guten Negativ dauert auf einer schnellen Workstation etwa fünf Minuten. Zur manuellen Vermessung der Sternspuren benötigt man durchschnittlich zehn Minuten. Hinzu kommen je nach Länge der Spur etwa fünf Minuten Arbeitszeit zum Vermessen des Meteors, sowie weitere fünf Minuten zur Eingabe der Aufnahmedaten. Die Vermessung einer Feuerkugelaufnahme dauert also im Durchschnitt weniger als 45 Minuten. Bezieht man diesen Wert wie im Kapitel 1.8 beschriebenen auf fünf Stationen, so beträgt der Arbeitsaufwand für die Vermessung eines kompletten Satzes von Feuerkugelaufnahmen etwa vier Stunden.
Gerade hier zeigt sich die Relevanz der Diplomarbeit sehr deutlich. Arbeiten, die vorher mehrere Tage in Anspruch nahmen, können nun innerhalb von Stunden ohne bisher erkennbare Verluste an Genauigkeit durchgeführt werden. Jetzt wird es möglich, eine große Zahl von Aufnahmen zu vermessen und später mit Hilfe von FIRBAL geozentrische und heliozentrische Koordinaten zu ermitteln. Die Arbeit kann dabei, wie Abbildung 51 zeigt, als Alternative zur bisherigen manuellen Vermessung aufgefaßt werden.

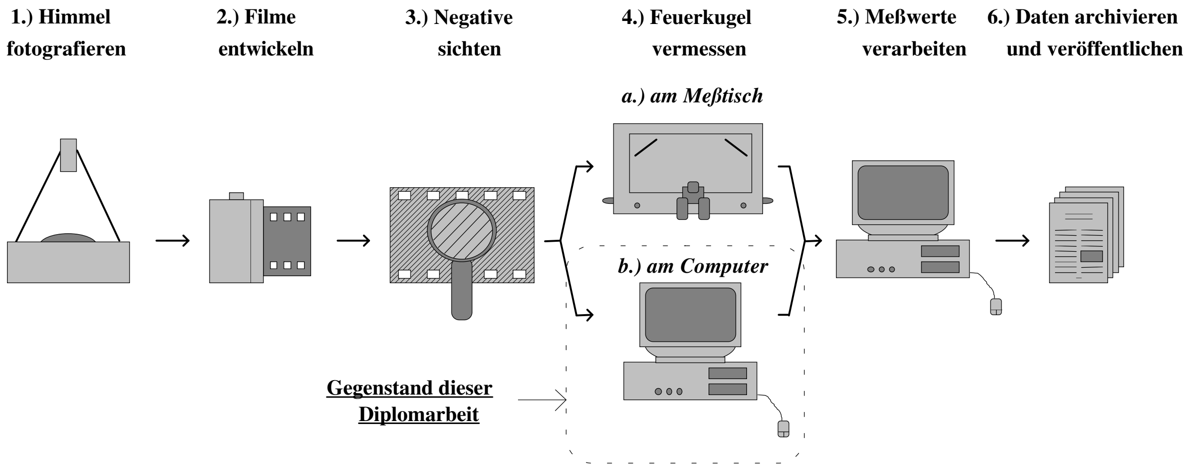

Abbildung 51: Einordnung der Diplomarbeit in das EUROPEAN FIREBALL NETWORK

Der erste Teil des Arbeitsprozesses beim EUROPEAN FIREBALL NETWORK bleibt unverändert. Die Filme werden von den einzelnen Kamerastationen zwecks Entwicklung zur DLR nach Berlin gebracht und später vom Netzwerkkoordinator gesichtet. Dann können sie entweder manuell am Meßtisch in Ondrejov vermessen oder am INSTITUT FÜR PLANETENERKUNDUNG digitalisiert und am Computer verarbeitet werden. Das Ergebnis ist in beiden Fällen ein Eingabefile für FIRBAL, welches von den entsprechenden Spezialisten ausgewertet wird.
Auf Grund der Portabilität der Software muß die Vermessung der Feuerkugelaufnahmen nicht am Institut selbst erfolgen. Die digitalisierten Negative lassen sich auf einem geeigneten Medium (ZIP-Laufwerk, Wechselplatte) speichern. Zu gegebener Zeit werden sie an einem beliebigen PC mit LINUX und MOTIF oder entsprechenden Workstations vermessen.

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit kann damit als gelöst betrachtet werden.

Eine Anforderung an die Diplomarbeit ist die leichte Modifizierbarkeit der Software, damit sie auch für ähnliche Problemstellungen genutzt werden kann. Ein Beispiel hierfür wäre die Vermessung von all-sky-Fotografien, die mit den tschechischen Fischaugenkameras und ähnlichen Geräten im ARBEITSKREIS METEORE gewonnen werden. Die entsprechende Erweiterung des Programms ist unproblematisch. Es muß lediglich die Verzeichnungsfunktion geändert, ein umfangreicherer Auszug aus dem PPM-Sternkatalog erstellt und die Liste der Kamerastationen bzw. verwendeten Filmtypen erweitert werden. Alle anderen Routinen können unverändert übernommen werden.

Etwas umfangreicher wären die Änderungen im Falle der Vermessung nachgeführter Fotografien oder Videoaufnahmen. Der Hauptunterschied besteht darin, daß die Sterne in diesen Fällen nicht mehr als Strichspur sondern punktförmig erscheinen. Das führt u.a. dazu, daß Routinen wie die beschriebene Segmentierung von Sternspuren (Kapitel 3.2) oder ihre automatische Vermessung (Kapitel 3.5.1) nicht funktionieren. Für diese Fälle müßten also jeweils eigene Prozeduren mit neuen Algorithmen entwickelt werden. Ein großer Teil von Funktionen der grafischen Benutzeroberfläche könnte ohne weiteres angepaßt und genutzt werden. Damit wäre auch die geforderte Flexibilität der Software gewährleistet.

Schließlich ist die Diplomarbeit in die derzeitigen Aktivitäten im Rahmen des EUROPEAN FIREBALL NETWORK einzuordnen. Wie in der Einführung (Kapitel 1.8) bereits angedeutet, befindet sich das Netzwerk momentan in einer kritischen Phase. Zwar kann eine große Zahl von Beobachtungen gewonnen werden, jedoch wird nur ein Bruchteil der Aufnahmen ausgewertet und steht damit für weitere wissenschaftliche Analysen zur Verfügung. Der entscheidende Engpaß, die aufwendige manuelle Vermessung der Negative, wird mit den vorliegenden Ergebnissen beseitigt. So kann schon bald die Bearbeitung der Archive des EN in Angriff genommen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Feuerkugelnetz sowie speziell die digitale Vermessung auf zwei astronomischen Konferenzen vorgestellt: der „ASTEROIDS, COMETS, METEORS“-Konferenz im Juli 1996 in Versailles und dem „ANNUAL METEORITICAL SOCIETY MEETING“ im selben Monat in Berlin. Auf beiden Tagungen wurde deutlich, daß Wissenschaftler, die sich mit der Problematik der Kollisionsgefahr und der Herkunft von Meteoriten beschäftigen, sehr an den Daten des europäischen Feuerkugelnetzes interessiert sind.

Es bleibt zu hoffen, daß das EN durch die nun möglichen Auswertungen in Zukunft die Erforschung der interplanetaren Kleinstkörper mit wichtigen Daten bereichert.

7 Ausblick

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde eine Software geschaffen, um eine komfortable und schnelle Vermessung von Feuerkugelaufnahmen zu ermöglichen. Wie in jedem Programm sind weitere Verbesserungen durchaus möglich.
Vordringlich scheint hier zunächst der bereits erwähnte Gesamttest vom Negativ bis zu heliozentrischen Meteoroidenorbits zu sein. Danach wird sich zeigen, inwieweit die ermittelte Präzision mit den Ergebnissen der manuellen Vermessung am Meßtisch konkurrieren kann.
Eine wesentliche Verbesserung stellt zukünftig die Unterstützung der Vermessung von Planetenspuren dar. In vielen Aufnahmen sind so wenig Sternspuren erkennbar, daß man auch auf die häufig vorhandenen, weil helleren Spuren von Planeten zurückgreifen muß. Der Unterschied zu den Sternen ist, daß Planeten keine konstanten äquatorialen Koordinaten und Helligkeiten besitzen. Eine einfache Erweiterung des Programms könnte darin bestehen, vom Nutzer die Koordinaten zum Zeitpunkt der Aufnahme zu erfragen. Eine komfortablere Variante würde beinhalten, daß Routinen zur automatischen Berechnung von Planetenpositionen implementiert werden. Es handelt es sich dabei um Standardverfahren, die in zahlreichen Büchern beschrieben sind (z.B. Montenbruck & Pfleger [1994]). Eventuell kann man sogar auf bereits vorhandene Programmbibliotheken zurückgreifen.
Die automatische Vermessung des Polarsterns wäre eine andere denkbare Erweiterung. Da die Position des Himmelspols bereits im Rahmen des äquatorialen Koordinatensystems bestimmt wurde, genügt die Suche nach einem hellen Objekt in dessen unmittelbarer Umgebung. Die automatische Vermessung seiner Position ist hingegen problematisch, da der Polarstern keine genügend lange Spur auf dem Negativ erzeugt. Damit verliert das in Kapitel 3.5.1 beschriebene Helligkeitsmodell seine Gültigkeit.
Ein weiterer Aspekt, der bisher außer acht gelassen wurde, ist die Erstellung eines einzelnen Eingabefiles für FIRBAL aus den Messungen einer Feuerkugel von mehreren Stationen. Bisher ist es lediglich möglich, die Daten einer Station in dem File unterzubringen. Die Berechnung der heliozentrischen Orbits beruht jedoch auf der Triangulation von Positionsmessungen verschiedener Aufnahmeorte. Die entsprechende Prozedur könnte entweder Bestandteil des jetzt geschaffenen Programms oder ein Zusatzprogramm werden, das bereits vorhandene FIRBAL-Eingabefiles verknüpft.

Damit so bald wie möglich mehr Feuerkugeldaten zur Verfügung stehen, hat die Nutzung des Vermessungsprogramms zweifelsohne höchste Priorität.

8 Thesen

Das EUROPEAN FIREBALL NETWORK leistet einen bedeutenden Beitrag zu Erkundung der Materie im inneren Sonnensystem. Es liefert wichtige Daten zum Massenfluß in Erdnähe und zur Wahrscheinlichkeit von Kollisionen kosmischer Objekte mit der Erde.

Die Auswertung der Daten des Feuerkugelnetzes kann nur dann effektiv erfolgen, wenn die Aufnahmen computergestützt digital vermessen werden. Als Hardware ist ein hochauflösender Diascanner und eine Workstation der Aufgabenstellung angemessen.

Die Vermessung kann teilweise automatisch erfolgen, benötigt aber auch interaktive Eingaben eines Operators. Die mit einer grafischen Benutzeroberfläche versehene Software versetzt auch angelernte Auswerter in die Lage, die Aufnahmen präzise zu vermessen.

Die digitale Bildverarbeitung ist ein Anwendungsgebiet mit komplexen Algorithmen. Echtzeitbildverarbeitung ist beim heutigen Stand der Technik nur in wenigen Fällen möglich. Durch sinnvolle Wahl der Bildparameter (Auflösung, Farbtiefe) läßt sich der Aufwand jedoch deutlich verringern.

Eine intuitive und komfortable Benutzeroberfläche ist ein wesentliches Merkmal moderner Software. Grafische Oberflächen zeichnen sich durch leichte Bedienbarkeit aus und können die Interaktion zwischen dem Programm und seinem Nutzer wesentlich vereinfachen. Die Einhaltung von look&feel-Standards sorgt für eine schnelle Erlernbarkeit.

Kontextsensitive Hilfe ist dazu geeignet, komplexe Softwarepakete übersichtlich zu dokumentieren.

Zusammen mit den Aufnahmedaten und Meßwerten stellt die digitale Speicherung der verlustfrei komprimierten Feuerkugelaufnahmen ein angemessenes Archivierungsverfahren dar. Es ermöglicht den schnellen Zugriff auf die Originaldaten und deren Transport über Computernetzwerke.

9 Glossar

Ähnlichkeit Zwei geometrische Figuren sind einander ähnlich, wenn sie nach einfacher linearer Größenskalierung identisch sind.

äquatoriales Koordinatensystem Ein astronomisches Koordinatensystem zur Beschreibung der Position von Himmelsobjekten. Die *Rektaszension* gibt den Winkelabstand eines Objekts ausgehend vom *Frühlingspunkt* entlang des *Himmelsäquators* an. Die *Deklination* ist der senkrecht dazu gemessene Winkelabstand vom *Himmelsäquator*. Fixsterne und andere Objekte mit vernachlässigbarer Eigenbewegung haben in diesem Referenzsystem feste Koordinaten.

all-sky-Kamera Eine Fotokamera, die mit einem speziellen konkav gewölbten Spiegel ausgestattet ist und damit den gesamten Himmel abbilden kann (Gesichtsfelddurchmesser 180°). Der Kamerakörper ist an Befestigungsstreben über dem Spiegel angebracht und bedeckt einen Teil des Himmels. Die Aufnahmequalität ist geringer als bei einer Kamera mit *Fischaugenobjektiv*.

Asteroiden Andere Bezeichnung für *Planetoiden*.

Auflösungsvermögen Das Fähigkeit eines Films, sehr eng beieinanderliegende, kontraststarke Bilddetails noch sauber getrennt darzustellen. Zur Bestimmung wird ein Muster aus schwarzen und weißen Linien benutzt, die nach entsprechender Verkleinerung auf dem Fotonegativ noch aufgelöst erscheinen müssen. Dementsprechend erfolgt die Angabe des Auflösungsvermögen in Linien pro Millimeter.
Bei der Digitalisierung von Bildern wird die nicht SI-konforme Einheit dpi (dots per inch) verwendet. Sie gibt die Zahl der Bildpunkte pro Inch an. 100 Linien pro Millimeter entsprechen etwa 2.500 dpi.

Azimut Eine Koordinate im *horizontalen Koordinatensystem*.

Bolide Andere Bezeichnung für *Feuerkugeln*.

Deklination Eine Koordinate im *äquatorialen Koordinatensystem*.

Dirac-Stoß (Dirac's Delta-Funktion) Eine kontinuierliche Funktion, die nur an einer Stelle den Wert 1, ansonsten jedoch immer den Wert 0 besitzt. In der Praxis beschreibt sie einen einzelnen, beliebig kurzen Impuls einer physikalischen Größe.

Ekliptik Bahnebene der Planeten um die Sonne und damit auch der Großkreis, der die scheinbare Bahn der Sonne unter den Fixsternen markiert.

Euklidischer Abstand Der geometrische Abstand zwischen 2 Punkten in einem mehrdimensionalen Koordinatensystem.

European Fireball Network (EN) Ein fotografisches Netz zur Himmelsüberwachung, welches seit 1961 in Mitteleuropa besteht. Außer der Fotografie von *Feuerkugeln* dient es der Bestimmung des Auftreffpunktes von *Meteoriten* sowie der Ermittlung der Masseverteilung im erdnahen Raum. *MORP* und das *Prairie-Network* waren zwei weitere Netze dieser Art.

Faltung Eine bestimmtes Integral zweier integrierbarer Funktionen.

Farbtiefe Die Zahl der Bits, die zur Speicherung eines Bildpunktes in einem Rasterbild verwendet werden. Übliche Werte sind 8 Bit (entsprechen 256 möglichen Farbwerten) und 24 Bit (entsprechen ca. 16,8 Millionen möglichen Farben).

Fast-Fourier-Transformation (FFT) Eine spezielle Form der *Fourier-Transformation*, die angewandt werden kann, wenn die Zahl der Wertepaare der zu zerlegenden Funktion einer Zweierpotenz entspricht. Der Rechenaufwand verringert sich dabei.

Fourier-Transformation Ein Algorithmus, der eine beliebige Funktion in eine äquivalente Summe von sinusförmigen Funktionen zerlegt. Das Verfahren hat eine quadratische Komplexität.

Feuerkugel Ein helles *Meteor*, manchmal auch als *Bolide* bezeichnet.

Fischaugenobjektiv (fish-eye lens) Ein spezielles Weitwinkelobjektiv mit extrem großem Gesichtsfeld. Es ermöglicht in den meisten Fällen die Abbildung des gesamten Himmels (Gesichtsfeld 180°). Die Qualität von Aufnahmen einer Fischaugenkamera ist höher als die einer *all-sky-Kamera.*

Frequenzraum Die Darstellungsform eines Signals (hier: eines Bildes) in Form eines Satzes von sinusförmigen Funktionen. Im Gegensatz zum *Ortsraum* werden hierbei Helligkeitsfrequenzen betrachtet.

Frühlingspunkt Der Schnittpunkt zwischen *Ekliptik* und *Himmelsäquator*, den die Sonne von Süden nach Norden durchläuft. Er bildet den Ursprung des *äquatorialen Koordinatensystems*.

Gauß-Funktion Eine Exponentialfunktion, die grundlegende Bedeutung in Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung hat.

Gegenschein Ein schwaches Leuchten, das in bestimmten Nächten auf dem der Sonne gegenüberliegenden Punkt am Himmel beobachtet werden kann. Es wird im Gegensatz zum helleren *Zodiakallicht* durch Rückstreuung des Sonnenlichts an interplanetarem Staub verursacht.

Gradientenverfahren Ein iteratives Verfahren zur Optimierung der Kostenfunktion eines komplexen Gleichungssystems. Ein gegebenes Set von Parametern wird jeweils so modifiziert, daß der größte Abstieg in der Kostenfunktion benutzt wird. Das Verfahren terminiert, wenn keine Änderung der Kostenfunktion mehr zu erreichen ist.

Grenzhelligkeit Die Helligkeit eines Objekts, das mit einem bestimmten Verfahren gerade noch wahrgenommen werden kann.

Größenklasse Das in der Astronomie gebräuchliche logarithmische Maß für die Helligkeit von Himmelsobjekten. Zwei Sterne, die sich in ihrer Leuchtkraft um den Faktor 100 unterscheiden, haben eine Helligkeitsdifferenz von fünf Größenklassen.
Aus historischen Gründen erhalten hellere Objekte kleinere numerische Werte.

heliozentrischer Orbit Die Bahn eines Objekts um die Sonne.

Himmelsäquator Die Projektion des Erdäquators an die gedachte Himmelskugel. Der Himmelsäquator bildet die Basis des *äquatorialen Koordinatensystems*.

Himmelspol Der Punkt, an dem die verlängerte Erdachse die gedachte Himmelskugel durchstößt. Der Himmelspol besitzt eine *Deklination* von 90°.

Histogramm Die Verteilung der vorkommenden Werte eines Wertebereiches in einem gegebenen Objekt, meistens die Häufigkeit der verschiedenen Helligkeitswerte in einem Graustufenbild.

Höhe Eine Koordinate im *horizontalen Koordinatensystem*.

horizontales Koordinatensystem Ein astronomisches Koordinatensystem zur Beschreibung der Position von Himmelsobjekten. Das *Azimut* gibt den horizontalen Winkelabstand eines Objekts vom Südmeridian an, die *Höhe* beschreibt den vertikalen Winkelabstand vom Horizont. Durch die Erdrotation und die daraus resultierende scheinbare Drehung des Himmels haben astronomische Objekte im Gegensatz zum *äquatorialen Koordinatensystem* variable horizontale Koordinaten.

Hough-Transformation Ein Verfahren zur Bestimmung der Anwesenheit und Lage bestimmter Objekttypen (z.B. Kreise, Linien) in einem Rasterbild. Dazu werden Bildeigenschaften in einem geeigneten Parameterraum dargestellt. Nachfolgend wird nach Maxima in dem Raum gesucht.

hysterisis linking Ein Verfahren, mit dem (z.B. durch *non-local maximum supression*) getrennte Bildelemente in Rasterbildern verbunden werden. Dabei kommen zwei Schwellwerte zum Einsatz, die zusammen mit der lokalen Umgebung eines Pixel dessen Wert bestimmen.

interplanetary dust particle (IDP) Andere Bezeichnung für einen *Mikrometeoriten* bzw. *Mikrometeoroiden*.

Koma Eine Hülle aus Staub und Gas um der Kern eines *Kometen* in Sonnennähe.

Kometen Einige hundert Meter bis Kilometer große Himmelskörper, die die Sonne im allgemeinen auf stark elliptischen Bahnen umkreisen. Sie besitzen eine poröse Struktur und sind aus festen Teilchen sowie gefrorenen Gasen aufgebaut. Nähert sich ein Komet der Sonne, heizt er sich auf, Staub und Gas strömen ab und bilden die *Koma*. Der *Sonnenwind* bläst die *Koma* weg und erzeugt den *Schweif* des Kometen.
Kometen sind eine wichtige Quelle von *Meteoroiden*. Nähert sich die Erde einer Kometenbahn, ist eine *Meteorstrom* zu beobachten.

kontextsensitive Hilfe Die angebotene Hilfeinformation bezieht sich auf den aktuellen Zustand des Programms.

K/T-Ereignis Ein katastrophaler Einschlag eines kilometergroßen *Meteoriten* an der Grenze zwischen Kreidezeit und Tertiär, der mit dem Aussterben der Saurier in Verbindung gebracht wird.

Laplace-Funktion Die zweite Ableitung der *Gauß-Funktion*.

Leoniden Ein bekannter *Meteorstrom*, der durch den *Kometen P/Temple-Tuttle* erzeugt wird. Die Leoniden weisen alle 33 Jahre ein Aktivitätsmaximum auf, wobei dann häufig *Meteorstürme* zu sehen sind. Der *Radiant* der Leoniden befindet sich im Sternbild Löwe (lat.: Leo).

lookup table Ein Feld, in dem die vorherberechneten Werte einer komplexen Funktion gespeichert sind. Das Argument der Funktion dient als Index.

look&feel-Standard Ein Standard, der das generelle Aussehen und das Verhalten von Anwendungsprogrammen unter einer bestimmten grafischen Benutzeroberflächen definiert.

Median Der größte Wert in einer Reihe von Zahlen, der kleiner als die Hälfte aller Werte ist. Im Gegensatz zum arithmetischen Mittel ist der Median wenig gegen einzelne stark streuende Werte anfällig.

Meteor Eine Leuchterscheinung am Himmel (volkstümlich: *Sternschnuppe*), die beim Eintritt eines *Meteoroiden* in die Erdatmosphäre hervorgerufen wird. Besonders helle Meteore werden *Feuerkugeln* genannt.

Meteorit Ein Objekt extraterrestrischen Ursprungs auf der Erdoberfläche, das den Flug durch die Atmosphäre überstanden hat. Vor der Kollision mit der Erde war es ein *Meteoroid*.

Meteorite Observation and Recording Program (MORP) Ein Feuerkugelnetz ähnlich dem *European Fireball Network*, das von 1971 bis 1985 in Kanada betrieben wurde.

Meteoritenschauer Der gleichzeitige Fall mehrerer *Meteorite*, die aus dem Zerfall eines größeren *Meteoroiden* beim Flug durch die Erdatmosphäre hervorgegangen sind.

Meteoroid Ein kleines kosmisches Objekt (meistens im Millimeter- bis Meterbereich), das auf einem unabhängigen *heliozentrischen Orbit* die Sonne umkreist. Kollidiert es mit der Erde, erzeugt es ein *Meteor* und in seltenen Fällen den Fall eines *Meteoriten*.

Meteorstrom Eine Gruppe von *Meteoren*, die alle von einem gemeinsamen Punkt (dem *Radianten*) auszugehen scheinen. Ein Meteorstrom wird vom Durchgang der Erde durch einen Schwarm *Meteoroide* hervorgerufen, welcher meistens das Ergebnis der Ausgasungen eines *Kometen* ist.

Meteorsturm Eine außergewöhnliche Aktivität eines *Meteorstroms* mit mehreren sichtbaren *Meteoren* pro Sekunde.

Methode der kleinsten Quadrate (least squares fit) Ein Verfahren zur Optimierung eines oder mehrerer unbekannter Parameter in einem Gleichungssystems. Eine gefundene Lösung ist dann optimal, wenn die Summe der Fehlerquadrate aller Wertepaare minimal ist.

Mikrometeorit Ein sehr kleines extraterrestrisches Teilchen (einige Milligramm schwer), das den Flug durch die Erdatmosphäre überstand, weil es bereits in großen Höhen genügend abgebremst wurde. Mikrometeoriten sind auch unter dem Namen *interplanetary dust particle* bekannt.

Momente x.ter Ordnung Statistische Messungen an Rasterbildern, die bestimme Eigenschaften geometrischer Objekte (z.B. Kompaktheit, Größe, Umfang) beschreiben.

Multitasking Eine Eigenschaft moderner Betriebssysteme, welche die parallele Abarbeitung verschiedener Prozesse zur gleichen Zeit bedeutet. Es kann sich dabei entweder um echte Parallelität (ein Rechner besitzt mehrere parallel arbeitende Prozessoren) oder Pseudoparallelität (zu einem bestimmten Zeitpunkt sind zwar verschiedene Prozesse gestartet, es wird jedoch jeweils nur einer von ihnen abgearbeitet) handeln.

Near-Earth Objects (NEOs) Eine Klasse von Objekten, die die Erdbahn kreuzen bzw. ihr sehr nahe kommen und damit unter Umständen mit unserem Planeten kollidieren können.

Near-Earth Asteroid Rendezvous (NEAR) Eine Raumsonde der amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA, die im Februar 1996 gestartet wurde. Sie wird im Januar 1999 den erdnahen *Planetoiden* 433 Eros erreichen und in einen Orbit einschwenken. Von dort aus wird die Oberfläche und der Aufbau des *Planetoiden* erforscht.
Auf dem Weg zu Eros wird die Raumsonde im Juni 1997 am *Planetoiden* 233 Mathilde vorbeifliegen.

non-local maximum supression Ein Verfahren, mit dem aus Liniensegmenten aufgebaute Bildelemente in Rasterbildern auf eine minimale Breite von einem Pixel reduziert werden. Dazu werden iterativ in der Umgebung (*4-connectivity* oder *8-connectivity*) eines Pixels alle Bildpunkte außer dem hellsten gelöscht.

Öffnungsverhältnis Der Quotient aus der freien Öffnung und der Brennweite einer Optik.

Oortsche Kometenwolke Eine Wolke von Milliarden *Kometen*, die am äußersten Rand unseres Sonnensystems vermutet wird. Durch gegenseitige gravitative Störungen dieser Objekte oder nahe vorüberziehende Sterne werden einzelne *Kometen* in das innere Sonnensystem katapultiert und dann für uns sichtbar.

Ortsraum Eine Darstellungsart, in der die Bildinformation im Gegensatz zum *Frequenzraum* durch räumliche Lagebeziehungen gegeben ist (Rasterbild).

Perseiden Der bekannteste *Meteorstrom*, der jährlich um den 12. August viele *Meteore* erzeugt. Hervorgerufen wird er durch den *Kometen P/Swift-Tuttle*, sein *Radiant* befindet sich im Sternbild Perseus.

Planetoiden Eine Klasse von Objekten (auch *Asteroiden* genannt), die sich hauptsächlich zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter um die Sonne bewegen. Asteroiden weisen Größen zwischen einigen hundert Metern und tausend Kilometern auf. Sie gelten neben *Kometen* als Ursprungskörper für *Meteoroide*.

Plattenkonstanten Umgangssprachliche Bezeichnung für ein Verfahren zur Bestimmung von Objektpositionen in astronomischen Fotografien. Anhand bekannter Positionen von Referenzobjekten wird die Abhängigkeit zwischen linearer Bildposition und dem Koordinatensystem lokal ermittelt. Aus der Lage eines zu vermessenden Objektes können dann seine astronomischen Koordinaten abgeleitet werden.

Polarlicht Ein Leuchten der Erdatmosphäre nahe den Polen. Hervorgerufen werden Polarlichter durch geladene Teilchen des *Sonnenwindes*, die nach starken Sonneneruptionen über den Magnetpolen der Erde in die Atmosphäre eindringen können und diese zum Leuchten anregen.

Polarstern Der hellste Stern im Sternbild der Kleinen Bärin (Alpha Ursae Minoris), der nur etwa ein Grad vom *Himmelspol* entfernt ist.

PPM-Sternkatalog Ein Sternkatalog, der ca. 400.000 Sterne beinhaltet und sich durch sehr genaue Positions- und Eigenbewegungsangaben (PPM = positions and proper motions) auszeichnet.

Prairie-Network Ein Feuerkugelnetz ähnlich dem *European Fireball Network*, das von 1964 bis 1974 in den USA betrieben wurde.

P/Swift-Tuttle Ein periodischer *Komet* mit einer Umlaufzeit von 132 Jahren, Erzeuger des *Meteorstroms* der *Perseiden*.

P/Temple-Tuttle Ein periodischer *Komet* mit einer Umlaufzeit von 32,9 Jahren, Erzeuger des *Meteorstroms* der *Leoniden*.

P/Wild 2 Ein periodischer *Komet* mit 6,2 Jahren Umlaufzeit, Ziel der *Stardust*-Raumflugmission.

P/Wirtanen Ein periodischer *Komet* mit 5,5 Jahren Umlaufzeit, Ziel der *Rosetta*-Raumflugmission.

quadratische Interpolation Ein Verfahren zur Abschätzung von Werten, die zwischen zwei bekannten Werten einer Funktion liegen.

Radiant Der Punkt am Himmel (auch Ausstrahlungspunkt genannt), von dem die *Meteore* eines *Meteorstroms* auszugehen scheinen. Ein *Meteorstrom* wird nach dem Sternbild bezeichnet, in dem sein Radiant liegt.

Rektaszension Eine Koordinate im *äquatorialen Koordinatensystem*.

Ressourcen Extern gespeicherte Parameter, die die Funktion und das Aussehen eines Programms steuern.

Rosetta Eine Raumsonde der europäischen Raumfahrtbehörde ESA, die voraussichtlich im Jahr 2003 gestartet wird. Nach dem Vorbeiflug an zwei *Planetoiden* soll sie 2011 den *Kometen P/Wirtanen* erreichen, in eine Umlaufbahn einschwenken und ein Jahr später zwei Lander zur Naherkundung auf seiner Oberfläche absetzen.

Schmidt-Kamera Ein Spiegelteleskop mit einem kugelförmig geschliffenen Hauptspiegel und einer speziellen Korrektionsplatte zur Beseitigung der Bildfehler.

Schweif Die aus der *Koma* eines *Kometen* durch den *Sonnenwind* davongetragen Staubpartikel und Gase bilden den Staub- und Gasschweif.

Shutter Eine rotierende Sektorscheibe, die vor einer *all-sky-Kamera* oder einem *Fischaugenobjektiv* zur Meteorfotografie angebracht wird. Sie unterbricht die Belichtung mehrmals pro Sekunde kurzzeitig und ermöglicht die Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit eines fotografierten *Meteors*.

Sonnenkorona Die äußerste Atmosphärenschicht der Sonne, die den fließenden Übergang zum interplanetaren Raum darstellt. Die sehr heiße und dünne Korona ist auf Grund ihrer geringen Helligkeit nur bei totalen Sonnenfinsternissen zu sehen.

Sonnenwind Ein Strom von Elementarteilchen, der permanent von der Sonne ausgeht und sich mit 300 bis 700 $^{km}/_{s}$ in den interplanetaren Raum ausbreitet. Er ist für die Ausbildung von *Kometenschweifen* verantwortlich und erzeugt bei Sonneneruptionen *Polarlichter* in der Erdatmosphäre.

Spacewatch-Teleskop Ein Forschungsprojekt zur automatischen Suche nach Erdbahnkreuzern (*Near-Earth Objects*). Zum Einsatz kommt eine großformatige CCD-Kamera an einem 0,9m-Spiegelteleskop auf dem Kitt Peak in Arizona, USA.

sporadisches Meteor Ein *Meteor*, daß keinem bekannten *Meteorstrom* zugeordnet werden kann.

Standardabweichung Die mittlere Abweichung einer Zufallsvariablen vom Erwartungswert.

Stardust Geplante Raumsonde der amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA. Nach dem Start im Jahr 1999 soll sie den *Kometen P/Wild 2* anfliegen und auf dem Weg dorthin interstellaren Staub aufnehmen. Auch Kometenmaterial wird beim Vorbeiflug im Jahr 2004 aufgelesen und dann in einer speziellen Rückkehrkapsel 2006 auf die Erde gebracht.

Sternschnuppe Volkstümliche Bezeichnung für ein *Meteor*.

Sternzeit Ein astronomisches Zeitmaß zur Berechnung der Position von astronomischen Objekten. Sie entspricht der *Rektaszension* der Objekte, die gerade im Süden stehen. Ein Sterntag ist vier Minuten kürzer als ein normaler Sonnentag. Zum Frühlingsbeginn stimmen Sternzeit und Sonnenzeit überein.

Stundenwinkel Der Winkelabstand eines astronomischen Objekts von der Südrichtung, gemessen entlang des *Himmelsäquators*.

Super-Schmidt-Kamera Eine *Schmidt-Kamera* mit besonders großem *Öffnungsverhältnis* (besser als f/1,0). Durch ihre Lichtstärke kann sie bei kleinerem Gesichtsfeld bedeutend schwächere Meteore als *all-sky*- oder *Fischaugenkameras* fotografieren.

Varianz Eine andere Bezeichnung für die *Standardabweichung*.

Zenit Der Punkt am Himmel, der direkt über dem Beobachter liegt, also im *horizontalen Koordinatensystem* eine *Höhe* von 90° besitzt.

Zodialkallicht Ein schwaches Leuchten, das zu bestimmten Zeiten in der Dämmerung horizontnah entlang der *Ekliptik* beobachtet werden kann. Es wird im Gegensatz zum noch schwächeren *Gegenschein* durch Vorwärtsstreuung des Sonnenlichts am interplanetaren Staub verursacht.

4-connectivity Eine Nachbarschaftsbeziehung zwischen Bildpunkten in einem binären Rasterbild. Nur die Bildpunkte stehen in Beziehung zueinander, bei denen die zwei horizontalen und vertikalen Nachbarn denselben Wert besitzen.

8-connectivity Eine Nachbarschaftsbeziehung zwischen Bildpunkten in einem binären Rasterbild. Nur die Bildpunkte stehen in Beziehung zueinander, bei denen alle acht Nachbarn denselben Wert besitzen.

10 Literaturreferenzen

- Borovicka J., Spurny P. und Kleclikova J., 1995:
  A new positional astrometric method for all-sky cameras.
  Astron. Astrophys. Suppl. Series 112, 173-178.
- Brown P., Ceplecha Z., Hawkes R. L., Wetherill G. W., Beech M., Mossmann K., 1994:
  The orbit and atmospheric trajectory of the Peekskill meteorite from video records.
  Nature 367, 624-626.
- Ceplecha Z., 1961:
  Multiple fall of Pribham meteorite photographed. 1. Double station photographs of the fireball and their relations to the found meteorite.
  Bull. Astron. Inst. Czechosl. 12, 21-47.
- Ceplecha Z. und McCrosky R. E., 1976:
  Fireball end heights: A diagnostic for the structure of meteoritic material.
  J. Geophys. Res. 81, 6257-6275.
- Ceplecha Z., 1987:
  Geometric, dynamic, orbital and photometric data on meteorids from photographic fireball networks.
  Bull. Astron. Inst. Czechosl. 38, 222-234.
- Ceplecha Z., 1991:
  Meteors depend on meteoroids.
  In: D. Heinlein, D. Koschny (Hrsg.), Proc. of the IMC 1990, Violau, IMO, Veitsbronn, Germany, 13-21.
- Ceplecha Z., 1992:
  Influx of interplanetary bodies onto Earth.
  Astron. Astrophys. 263, 361-366.
- Chyba C. F., Thomas P. J. und Zahnle K. J., 1993:
  The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid.
  Nature 361, 40-44.
- Halliday I., Blackwell A. T. und Griffin A. A., 1978:
  The Innisfree meteorite and the Canadian camera network.
  J. Roy. Astron. Soc. Canada 72, 15-39.

- Halliday I., Griffin A. A. und Blackwell A. T., 1996:
  Detailed data for 259 fireballs from the Canadian network and inferences concerning the influx of large meteoroids.
  Meteoritics & Planetary Science 31, 185-217.
- Heinlein D. und Oberst J., 1996:
  Aktueller Stand des DLR-Feuerkugelnetzes.
  Sternschnuppe 8, 4-5.
- Hughes D. W., 1992:
  The meteorite flux.
  Space Science Rev. 61, 275-291.
- Jenniskens P., Borovicka J., Betlem H., ter Kuile C., Bettonvil F. und Heinlein D., 1992:
  Orbits of meteorite producing fireballs: The Glanerbrug - a case study.
  Astron. Astrophys. 255, 373-376.
- Jobse K.,1988:
  Meteor observing by video.
  WGN, IMO J. 16, 119.
- Mc Crosky R. E., Posen A., Schwarz G. und Shao C.-Y., 1971:
  Lost City meteorite - its recovery and a comparision with other fireballs.
  J. Geophys. Res. 76, 4090-4108.
- Molau S., 1995:
  MOVIE - actual observations and latest results.
  In: P. Roggemans, A. Knöfel (Hrsg) Proc. of the IMC 1995, IMO, Mechelen, 11-24.
- Molau S. und Nitschke M., 1996:
  Computer based meteor search - a new dimension in video meteor observation.
  WGN, IMO J. 22, 119-123.
- Montenbruck O. und Pfleger T., 1994:
  Astronomie mit dem Personalcomputer.
  2. Auflage, Springer Verlag Berlin.
- Morrison D., Chapman C. R. und Slovic P., 1994:
  The impact hazard.
  In: T. Gehrels (Hrsg), Hazards due to comets and meteors, University of Arizona Press, Tucson, 59-91.

- Neukum G. und Ivanov B. A., 1994:
  Crater size distributions and impact probabilities on Earth from lunar, terrestrial-planet, and asteroid cratering data.
  In: T. Gehrels (Hrsg), Hazards due to comets and meteors, The University of Arizona Press, 359-416.
- Oberst J., 1989:
  The meteoroid population in the Earth-Moon system as inferred from spatial-temporal resolution of impacts detected by the lunar seismic network.
  Dissertation, The University of Texas at Austin.
- Pope K.O., 1994:
  Impact winter and the Cretaceous/Tertiary extinction: results of a Chicxulub asteroid impact model.
  Earth & Planetary Science Letters 128, 719-725.
- Rabinowitz D. L., 1993:
  The size distribution of Earth-Approaching Asteroids.
  Astrophys. J. 407, 412-427.
- Rendtel J., 1991:
  Photographic handbook.
  IMO Monograph No. 3, IMO, Potsdam.
- Rendtel J., Arlt R. und McBeath A., 1995:
  Handbook for visual meteor observers.
  IMO Monograph No.2, IMO, Potsdam.
- Spurny P., 1996:
  private Korrespondenz
- Tagliaferry E., Spalding R., Jacobs C. und Worden S. P., 1994:
  Detection of meteoroid impacts by optical sensors in Earth orbit.
  In: T. Gehrels (Hrsg), Hazards due to comets and meteors, University of Arizona Press, Tucson, 199-220.
- Wetherill G. W. und Re Velle D. O., 1981:
  Which fireballs are meteorites? A study of the Prairie Network photographic meteor data.
  Icarus 40, 308-328.
- Whipple F. C., 1955:
  Meteors.
  Publ. Astron. Soc. Pacific 67, 367-386.

11 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

12 Hilfsmittel

- *Einführung in das X Window System*
  O. Jones (1991), Prentice-Hall International, London, England.
- *Encyclopedia of Physical Science and Technology*
  Robert A. Meyers (Hrsg.), 2. Auflage, Academic Press Inc., San Diego, California.
- *Handbook for Visual Meteor Observers*
  J. Rendtel, R. Arlt und A. Mc Beath, 2. Auflage (1995), IMO, Potsdam, Deutschland.
- *Höhere Mathematik: Formeln und Hinweise*
  W. Göhler, 10. Auflage (1987), Verlag Harri Deutsch, Thun, Deutschland.
- *IDL Reference Guide*
  Research Systems, Inc. (1993), USA.
- *Image Analysis - Vorlesungsscript*
  E. Hancock (1994), University of York, England.
- *Image Based Measurement Systems*
  F. van der Heijden (1994), John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England.
- *Motif Programming Manual*
  D. Heller und P. Ferguson, 2. Auflage (1994), O'Reilly & Associates, Inc., USA.
- *Referenzhandbuch Dateiformate*
  G. Born, 3. Auflage (1994), Addison-Wesley, Bonn, Deutschland.
- *Vicar User's Guide*
  JPL, California Institute of Technology (1989), Pasadena, USA.
- *X Window System: The Complete Reference to Xlib, XProtocol, ICCCM, XLFD*
  R. W. Schleifer und J. Gettys (1990), Digital Press, USA.
- *X Window System Toolkit: The Complete Programmer's Guide and Specification*
  P. J. Asente und R. R. Swick (1990), Digital Press, USA.
- *Xlib Programming Manual*
  A. Nye, 2. Auflage (1992), O'Reilly & Associates, Inc., USA.
- *diverse Homepages in World-Wide-Web*

13 Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Chemnitz, den 17. Dezember 1996 Sirko Molau