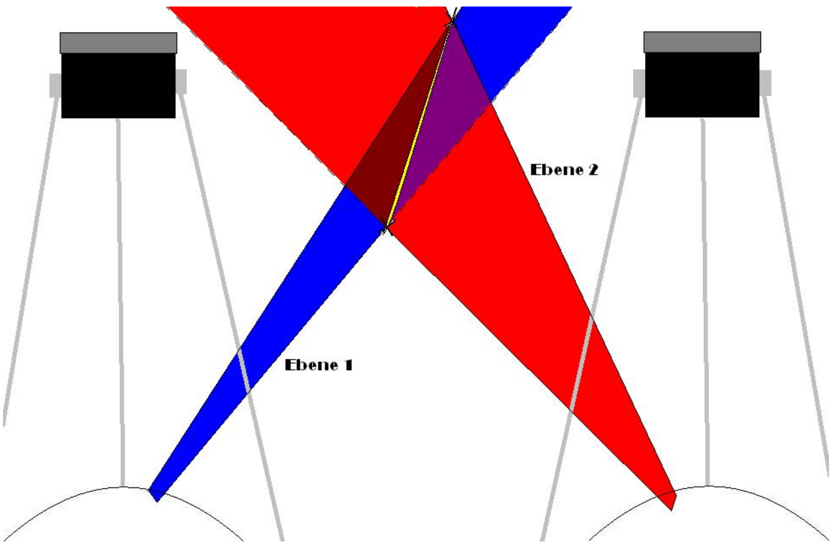
Auswertung von Feuerkugelaufnahmen

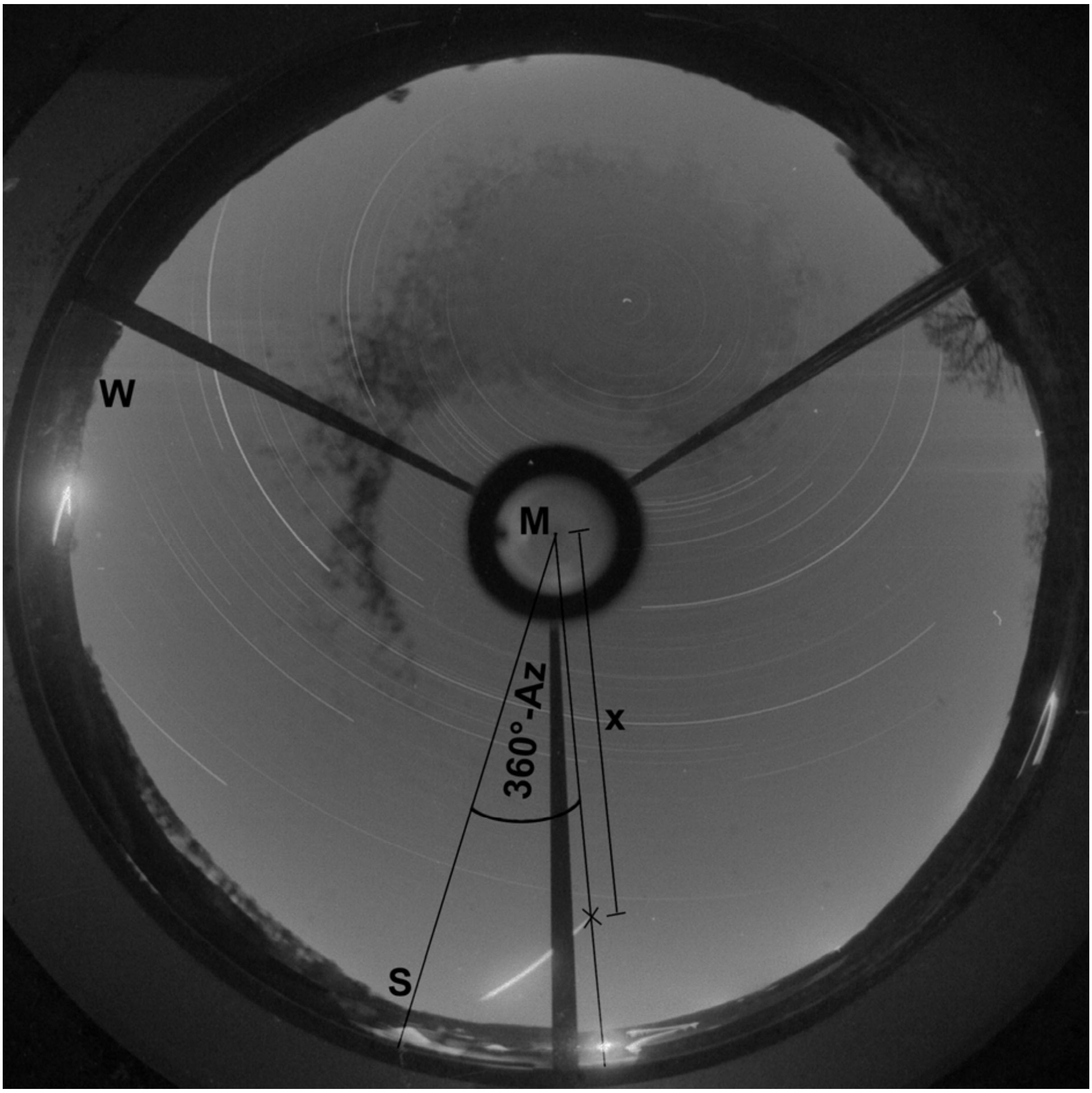
Meteorkameras haben die Funktion, durch Langzeitbelichtungen in der Nacht besonders helle Meteore, die „Feuerkugeln“, aufzuzeichnen und in Verbindung mit anderen Kameras die Möglichkeit zu bieten, die reale Flugbahn des Meteoroiden zu berechnen.
Die Kamera selber hängt in einem Gestell in definierter Höhe über einem gewölbten Spiegel, der es ermöglicht, den gesamten Himmel auf einmal abzubilden. Die Kamera belichtet mehrere Stunden lang. Da sie nicht nachgeführt wird und sich die Erde langsam vor dem Sternenhintergrund dreht, sieht man auf dem Foto Sternstrichspuren, die sich kreisförmig um den Polarstern anordnen, weil sich um diesen wegen seiner Nähe zum Himmelsnordpol alle Sterne einmal pro Sterntag zu drehen scheinen. Jeder Stern wird also als Kreisausschnitt dargestellt, dessen Anfangs- und Endpunkte die Position des Sterns zu Anfang und zum Ende der Belichtung anzeigen.
Meteorspuren dagegen haben beliebige annähernd gerade Bahnen und fallen aufgrund dieser und anderer Eigenschaften vor dem Sternhintergrund auf dem Bild auf.
Die Kameras belichten pro Nacht in der Regel nur ein Bild; die Zeiten für die Belichtung hängen von der Mondphase und natürlich von der Dämmerung ab. So kann man in einer Vollmondnacht nur etwa drei Stunden belichten, bevor das Bild so überbelichtet ist, dass man nichts mehr erkennen kann, in Neumondnächten dagegen wird gewöhnlich die ganze Nacht belichtet.
Um aus den Spuren auf den Fotos die reale Flugbahn und damit auch den etwaigen Aufschlagpunkt des Körpers zu ermitteln, der die Leuchterscheinung in der Atmosphäre verursacht hat, reichen im Prinzip schon zwei Kameras, die in einem geeigneten Abstand von etwa 100 km voneinander platziert sind.



Man kann sich das Ganze folgendermaßen grob vorstellen:
Die Leuchtspur, die auf dem Foto zu sehen ist und vorher am Himmel zu sehen war, fällt vom Himmel auf den Spiegel und von dort erst in die Kamera. Da, wo die Spur auf dem Spiegel liegt, lässt sich ein Anfangs- und ein Endpunkt der Spur festlegen. Auf diesen Punkten stehen jeweils Richtungsvektoren, die zu den wahren Anfangs- und Endpunkten am Himmel zeigen. Diese beiden spannen einen Ebene auf, auf der die Flugbahn tatsächlich gelegen haben muss. Das Ganze macht man auch mit einer zweiten Kamera, die den Meteor aus einer anderen Perspektive gesehen hat. Wieder erhält man eine Ebene, auf der die Flugbahn gelegen haben muss. Diese Informationen reichen, um durch einen Schnitt der beiden Ebenen die wahre Flugbahn zu berechnen. Ein weiterer Schnitt, nämlich einer der ermittelten Flugbahn mit der Erdoberfläche, liefert vereinfacht den Aufschlagpunkt. Tatsächlich schlagen gelegentlich außerirdische Körper auf der Erde ein, die bei ihrem Flug durch die Atmosphäre nicht vollständig verglüht sind. Mit dieser Rechenmethode wurden auch schon solche „Meteoriten“ gefunden.
Durch eine vollständige allgemeinverständliche Rechenmethode vom Foto bis zum Fundort leiten die folgenden vier Aufgaben.

Berechnung der horizontalen Koordinaten aus einem Foto

Im Folgenden wollen wir eine Formel entwickeln, die einem Punkt auf dem Foto einen Punkt am Himmel zuordnet.
Ein Punkt am Himmel lässt sich eindeutig durch seine Zenitdistanz ε und den Azimut Az angeben. Beides sind Winkel – die Zenitdistanz ist der Winkelabstand zwischen dem Punkt und dem Zenit, also dem Punkt senkrecht über dem Beobachter, und der Azimut ist der Winkel zwischen den Verbindungslinien Punkt – Zenit und Süden – Zenit. Der Azimut wird von Süden (0°) über Westen (90°) gezählt.
Auf dem Foto ist der Parabolspiegel als Kreis zu sehen, weil er genau von oben abgebildet wird. Das hat zur Folge, dass der Azimutwinkel nicht verzerrt dargestellt wird, die Zenitdistanz aber wegen der zweidimensionalen Projektion doch. Auf dem Foto lässt sich also eine der beiden Himmelskoordinaten, der Azimut, direkt ablesen. Die andere wird auf dem Spiegel als Abstand x des Punktes vom Spiegelmittelpunkt dargestellt.



Aufnahme des Meteoroiden Neuschwanstein vom 06.04.02, aufgenommen von der Kamerastation Tuifstädt des europäischen Feuerkugelnetzes. S bezeichnet den Südpunkt am Horizont und x die Entfernung von der Spiegelmitte mit x: [0 cm; 18 cm]. Da der Winkel Az von Süden über Westen gezählt wird und wegen seiner Größe schlecht einzuzeichnen war, steht dort der Gegenwinkel. Zu rechnen ist aber mit dem Winkel Az!

Aufgabe 1

Wie lautet die Formel, mit der man aus dem gemessenen Wert x die Zenitdistanz ε errechnen kann?

a) Bestimme die Funktionsgleichung f, der ein mittiger Querschnitt durch den Parabolspiegel entspricht (Radius: 18cm; Höhe des Scheitelpunktes: 8 cm)!
Tipp: Lege den Spiegel so in ein Koordinatensystem, dass die drei bekannten Punkte jeweils auf einer der Achsen liegen!

b) Bilde die erste Ableitung der Funktion! Diese entspricht der Tangente im Punkt x, an der der einfallende Strahl eines Himmelskörpers gespiegelt wird.

c) Fertige eine Skizze in einem Koordinatensystem an, auf welcher der Spiegel im Querschnitt und die Tangente an einem beliebigen Punkt P (z.B. bei einem Radius von 8 cm) zu sehen ist. Die optische Achse der Kamera soll der Y-Achse entsprechen. Die Kamera selber soll in einer Höhe von 100 cm aufgehängt werden, muss aber nicht abgebildet werden, weil der Rest sonst zu klein dargestellt werden muss.
Zeichne in dieselbe Skizze einen von P ausfallenden Strahl, der den Brennpunkt der Kamera in 100 cm Höhe trifft und ermittele daraus den einfallenden Strahl. (Einfalls- und Ausfallswinkel sollen hier nicht zum Lot sondern zur Tangente gemessen werden.)
Zeichne als letztes die zu P verschobenen Horizont- und Zenitlinien ein, um die Winkel bei P besser einzeichnen zu können.

d) Benenne nun die Winkel zwischen
- Der optischen Achse und der Zenitlinie mit α
- Dem einfallenden Strahl und der Tangente mit e
- Dem ausfallenden Strahl und der Tangente mit a
- Dem einfallenden Strahl und der Zenitlinie mit ε

Und die beiden Winkel zwischen der Tangente und der Zenitlinie mit γ und γ' (den kleineren mit γ)!

e) Berechne den Winkel α in Abhängigkeit von x!

Da der Steigungswinkel der Tangenten dem Arcustangens ihrer Steigung entspricht und die Steigung wiederum der ersten Ableitung von f, lässt sich γ berechnen durch: $\gamma = 90° - \arctan f'(x)$
Daraus folgt auch: $\gamma' = 90° + \arctan f'(x)$

f) Vollziehe diese Aussage nach und berechne dann unter Zuhilfenahme des Ergebnisses aus Aufgabenteil e) den Winkel a bzw. e in Abhängigkeit von x!

g) Berechne jetzt die Zenitdistanz ε aus γ' und e!
Vereinfache die Formel so weit wie möglich und ersetze, falls in ihr noch die Ausdrücke f(x) oder f'(x) vorkommen, diese durch die entsprechenden Funktionen!

Weil die Winkel immer positiv sein müssen, erhält jeder Summand der fertigen Formel Betragsstriche.
Mithilfe dieser Formel lässt sich jetzt also nur durch Ausmessen jeder Punkt auf dem Foto eindeutig einer Richtung am Himmel zuordnen.

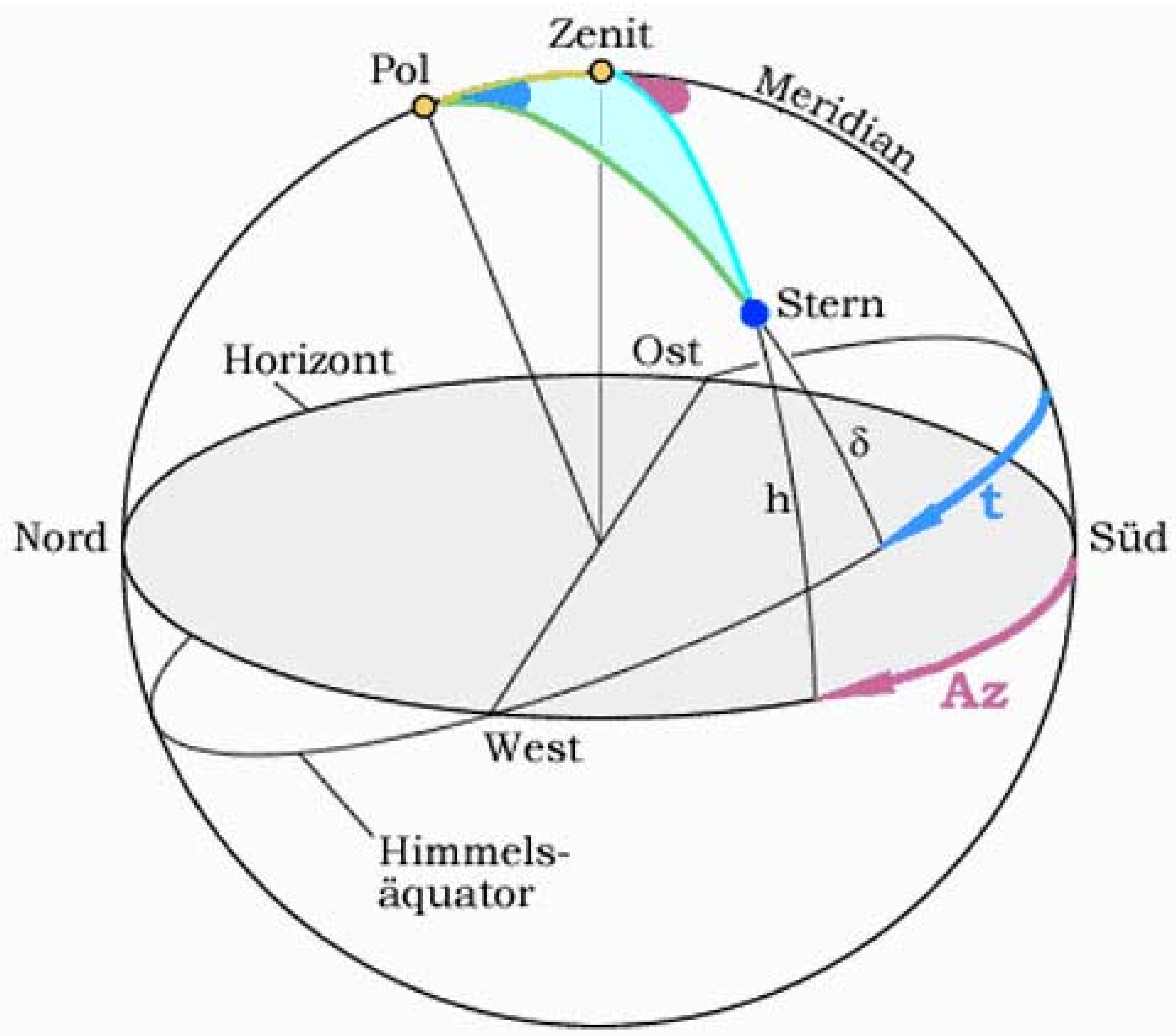
h) Ermittle Az und ε für den Anfangspunkt und den Endpunkt der Spur auf dem Foto durch Ausmessen und Berechnung!
Beachte: Misst man den Wert x auf dem Foto aus, müssen natürlich die Maßstäbe beachtet werden, weil der Spiegel auf dem Foto ja wahrscheinlich nicht dieselbe Größe hat, wie in der Realität. In die Formel wird also nicht die Zahl eingesetzt, die man ausgemessen hat, sondern dieselbe Zahl umgerechnet auf einen Spiegelradius von 18 cm.
Die Werte werden wahrscheinlich recht stark von der Realität abweichen, weil die Geometrie der Kamera (insb. Die Höhe des Objektivs) nicht genau auf die Kamerastation passt, die das Bild gemacht hat. Rechne deshalb in den folgenden Aufgaben mit diesen Werten weiter:
$Az_A = 335{,}34°$
$Az_E = 350{,}91°$
$\varepsilon_A = 65{,}84°$
$\varepsilon_E = 84{,}21°$
A und E bedeuten Anfang und Ende der Spur.

PS.: Solltet ihr wirklich eine Meteorkamera bauen wollen, müssen für die Rechnungen folgende Dinge bedacht werden:
Sowohl die Kamerahöhe über dem Spiegel, als auch die Maße und die Form des Spiegels sind in der Aufgabe festgelegt. Bei einem Eigenbau müssen diese Zahlen natürlich angepasst werden.
Falls statt eines Parabolspiegels ein Kugelspiegel verwendet wird, darf man natürlich auch nicht mehr von der allgemeinen Form einer quadratischen Funktion sondern von der einer Kreisfunktion ausgehen.

Umrechnung horizontaler in äquatoriale Koordinaten

Da das horizontale Koordinatensystem vom Beobachtungsort abhängt, können in ihm keine Beobachtungen von verschiedenen Stationen verglichen werden. In der zweiten Aufgabe werden deshalb die Koordinaten Azimut und Zenitdistanz in äquatoriale Koordinaten umgerechnet. Wem das äquatoriale Koordinatensystem bekannt ist, kann den folgenden Absatz überspringen.

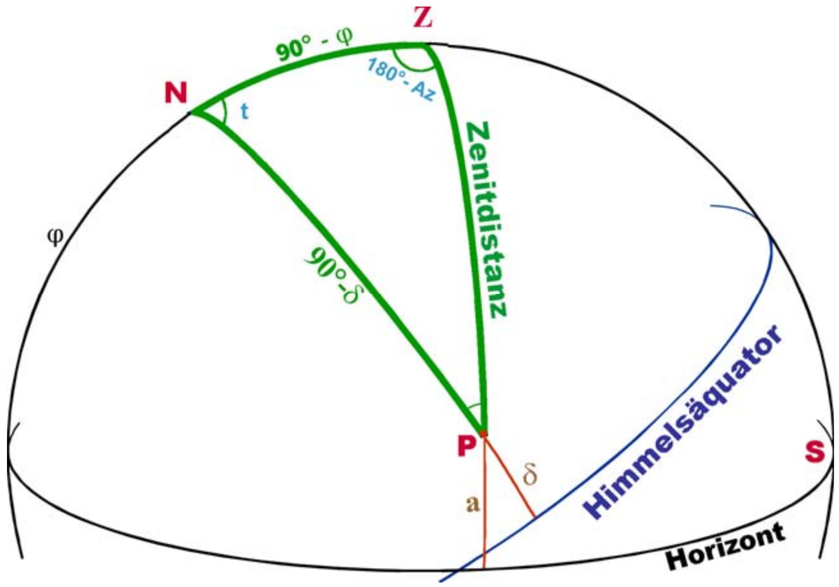
Aufgrund der Kugelgestalt der Erde ist es klar, dass Beobachter an unterschiedlichen Punkten auf der Erde verschiedene Himmel sehen. Ein Stern oder ein Punkt auf der Meteorspur lässt sich also nur bezogen auf einen bestimmten Ort in Azimut und Zenitdistanz darstellen und hat an einem anderen Ort ganz andere Koordinaten. Um Vergleichbarkeit zu schaffen, werden die Koordinaten in ein System umgerechnet, das nicht auf dem Horizont basiert, sondern auf dem an den Himmel projizierten Äquator und den ebenso projizierten Erdpolen. Die beiden Systeme sind je nach Beobachtungsort mehr oder weniger stark gegeneinander verkippt und stimmen nur überein, wenn man sich an einem Erdpol befindet. Der Zenitdistanz entspricht im äquatorialen System ein Winkelabstand vom Himmelspol. In diesem System wird allerdings mit dem Gegenwinkel gerechnet, also nicht mit dem Winkelabstand eines Punktes zum Himmelspol sondern mit dem Winkelabstand des Punktes zum Himmelsäquator. Diese Koordinate wird als Deklination δ bezeichnet.
Der Azimut aus dem horizontalen System entspricht hier der Rektaszension oder dem Stundenwinkel t, je nachdem ob man ein bewegtes System benötigt oder nicht (globales/ lokales Äquatorsystem). Bei einem Stern lässt sich zum Beispiel eine Rektaszension angeben. Die Rektaszensionskoordinaten ändern sich aber in Bezug auf den Beobachtungsort, weil sich die Erde vor dem Sternenhintergrund wegdreht. Man findet den Stern also nur, wenn man aus der Rektaszension den Stundenwinkel berechnet, der eine für den Beobachter feste Koordinate am Himmel angibt, die der Stern aber nur zu einer bestimmten Zeit hat. Der Stundenwinkel ist von einem bestimmten Beobachter aus betrachtet also fest und die Rektaszension von der Zeit abhängig. Das heißt, dass einer Richtung am Himmel immer ein Stundenwinkel zuzuordnen ist, die Rektaszension aber nur, wenn auch die Zeit bekannt ist. Bei unseren Beobachtungen erhalten wir deshalb den Stundenwinkel. **Aber:** Der Stundenwinkel ist wiederum ortsabhängig und muss deshalb am Ende in die Rektaszension umgerechnet werden, was kein Problem mehr darstellt, sobald die Durchgangszeit des Meteoroiden und damit die lokale Sternzeit bekannt ist. Für die Durchgangszeit gibt es zusätzliche Meteorüberwachungen.
Die Sternzeit ist ein Zeitmaß, das sich an der Drehung der Erde in Bezug auf die Sterne orientiert, während die bürgerliche Zeit sich an der Sonne orientiert. Die Sternzeit läuft etwas schneller als die Sonnenzeit – pro Tag knapp vier Minuten. Das Jahr hat deswegen ungefähr 365 Tage, weil die Erde sich bei ihrem Umlauf um die Sonne etwa 365mal dreht. Weil sie sich in dieser Zeit aber zusätzlich einmal um die Sonne gedreht hat, hat sie sich im Bezug auf die Sterne einmal mehr gedreht. Ein Jahr hat also etwa 366 Sterntage. Daraus folgt, dass die Sternzeit etwas schneller läuft. Das hat übrigens auch den Effekt, dass es, wenn ein Stern genau im Süden steht, eben diese 23, 93 Stunden dauert, bis er wieder dort steht, während das bei der Sonne genau 24 Stunden dauert. Die Sternzeit wird immer zum Herbstanfang mit der Universal time (der Sonnenzeit bezogen auf den nullten Längengrad bei Greenwich) synchronisiert und laufen dann immer weiter auseinander. Wie groß der Unterschied zwischen Sonnen- und Sternzeit ist, hängt deshalb vom Datum ab.



Horizontales und Äquatoriales Koordinatensystem in Bezug aufeinander

Aufgabe 2

Um das azimutale in das äquatoriale Koordinatensystem umzurechnen, benötigt man die sphärische Geometrie. Himmelsnordpol N, Zenit Z und gesuchter Punkt P bilden dabei ein sphärisches Dreieck.
Die Dreiecksseite NZ entspricht dann 90° abzüglich der geographischen Breite φ des Standortes, in diesem Fall der Kamerastation Tuifstädt. Die Seite PZ ist die Zenitdistanz ε, die in 6.1 berechnet wurde und die Seite NP entspricht 90° abzüglich der Deklination.
Der Winkel bei N ist der Stundenwinkel, aus dem die Rektaszension berechnet wird. Der Winkel bei Z ist 180° abzüglich des Azimuts Az, der ebenfalls in 6.1 ermittelt wurde (siehe Abb. 20a).



Skizze zur Umrechnung des horizontalen ins äquatoriale Koordinatensystem

Die Zenitdistanz ε und der Azimutwinkel Az sind aus Aufgabe 1 bekannt. Die geographische Breite φ lässt sich grob auf den meisten Landkarten ablesen, ist aber im Internet auch genauer zu finden oder auch mit einem Navigationsinstrument nachzumessen. Hier können die geographischen Koordinaten der Kamerastation Tuifstädt verwendet werden, von der das Bild ganz oben kommt:

Östliche Länge: 10° 33' 42,3'', nördliche Breite: 48° 44' 44,1'', Höhe über NN 510 m

a) Berechne daraus über die Formeln der sphärischen Trigonometrie die Deklination δ für den Anfangs- und den Endpunkt der Spur!

b) Berechne auch den Stundenwinkel t für den Anfangs- und den Endpunkt der Spur!
Hinweis: Bei einem der möglichen Rechenwege wird am Ende ein Arcuskosinus berechnet. Der Arcuskosinus ist eingeschränkt die Umkehrfunktion zu dem Kosinus – eingeschränkt deshalb, weil periodische Funktionen, wie der Kosinus nicht vollständig invertierbar sind. Weil der Kosinus achsensymmetrisch ist, ergibt cos(a) und cos(-a) dasselbe. Berechnet man aber den Arcuskosinus, gibt der Taschenrechner nur a aus. Richtig sind hier aber die negativen Stundenwinkel für Anfangs- und Endpunkt, was bei dem besagten Lösungsweg nur aus der Anschauung hervorgeht!

c) Für t erhält man auf diese Weise einen ganz normalen Winkel. Da der Stundenwinkel in Stunden, Minuten und Sekunden angegeben wird, muss t noch mit dem Faktor $\frac{1\text{h}}{15°}$ multipliziert werden, weil einer Stunde 15° entsprechen. Man erhält t'.
Um von dem Stundenwinkel auf die Rektaszension α zu kommen, benötigt man die genaue lokale Sternzeit, Θ; dann ist $\alpha = \Theta - t'$. (Die lokale Sternzeit betrug in dem auf dem Foto festgehaltenen Fall 10:02:12 oder als Dezimalzahl 10,0367h.) Auch α wird in Stunden, Minuten und Sekunden angegeben.
Berechne die Rektaszension für den Anfangs- und den Endpunkt der Spur und schreibe sie sowohl als Dezimalzahl als auch in Stunden, Minuten und Sekunden auf!

Transformation in ein geozentrisches Koordinatensystem

Im dritten Teil der Auswertung sollen die Beobachtungsstandorte und die Punkte am Himmel in ein gemeinsames vektorielles Koordinatensystem transformiert werden, das den Erdmittelpunkt als Ursprung und die Polachse als dritte Achse verwendet. Auch dieses System ist ein Bewegtes, das um die dritte Achse rotiert. Die erste Achse geht durch den Frühlingspunkt. Statt des Längengrades muss zur Beschreibung eines Punktes auf der Erdoberfläche deshalb auch der Winkel ζ verwendet werden, welcher der lokalen Sternzeit entspricht.

Ein Punkt auf der Erdoberfläche lässt sich in diesem System also über seine geozentrische Breite, den Winkel ζ an diesem Punkt und den Erdradius inklusive der Höhe über NN (r + h) des Punktes berechnen.

Es gibt einen kleinen Unterschied zwischen geographischen und geozentrischen Koordinaten: Das geographische Koordinatensystem, dessen Koordinaten man z.B. im Atlas findet, geht davon aus, dass die Erde eine Kugel ist, das geozentrische Koordinatensystem dagegen von einem Ellipsoid, was der Realität näher kommt. Es bietet sich deshalb an, mit zwei Korrekturformeln den Erdradius am Beobachtungsort und oft auch die geozentrische Breite aus der geographischen Breite zu berechnen:
Die geozentrische Breite φ' lässt sich durch die geographische Breite φ folgendermaßen berechnen:

$$\varphi' = \varphi - 0{,}1924240867° \cdot \sin(2\varphi) + 0{,}000323122° \cdot \sin(4\varphi) - 0{,}0000007235° \cdot \sin(6\varphi) \quad ^{*}$$

Der Erdradius r, gemessen vom Erdmittelpunkt bis zu einem von der Breite abhängigen Punkt am Meeresspiegel, wird berechnet durch:

$$r = \sqrt{40680669{,}86 \cdot \frac{1 - 0{,}0133439554 \cdot \sin^2 \varphi}{1 - 0{,}006694385096 \cdot \sin^2 \varphi}} \; . \quad ^{*}$$

So erhält man die Koordinaten in dem weltweit anerkannten World Geodetic System 1984 (WGS84). Man muss natürlich immer darauf achten, ob die Koordinaten, die man findet, schon in dieses System transformiert sind oder nicht. GPS-Geräte liefern zum Beispiel Daten in diesem System.

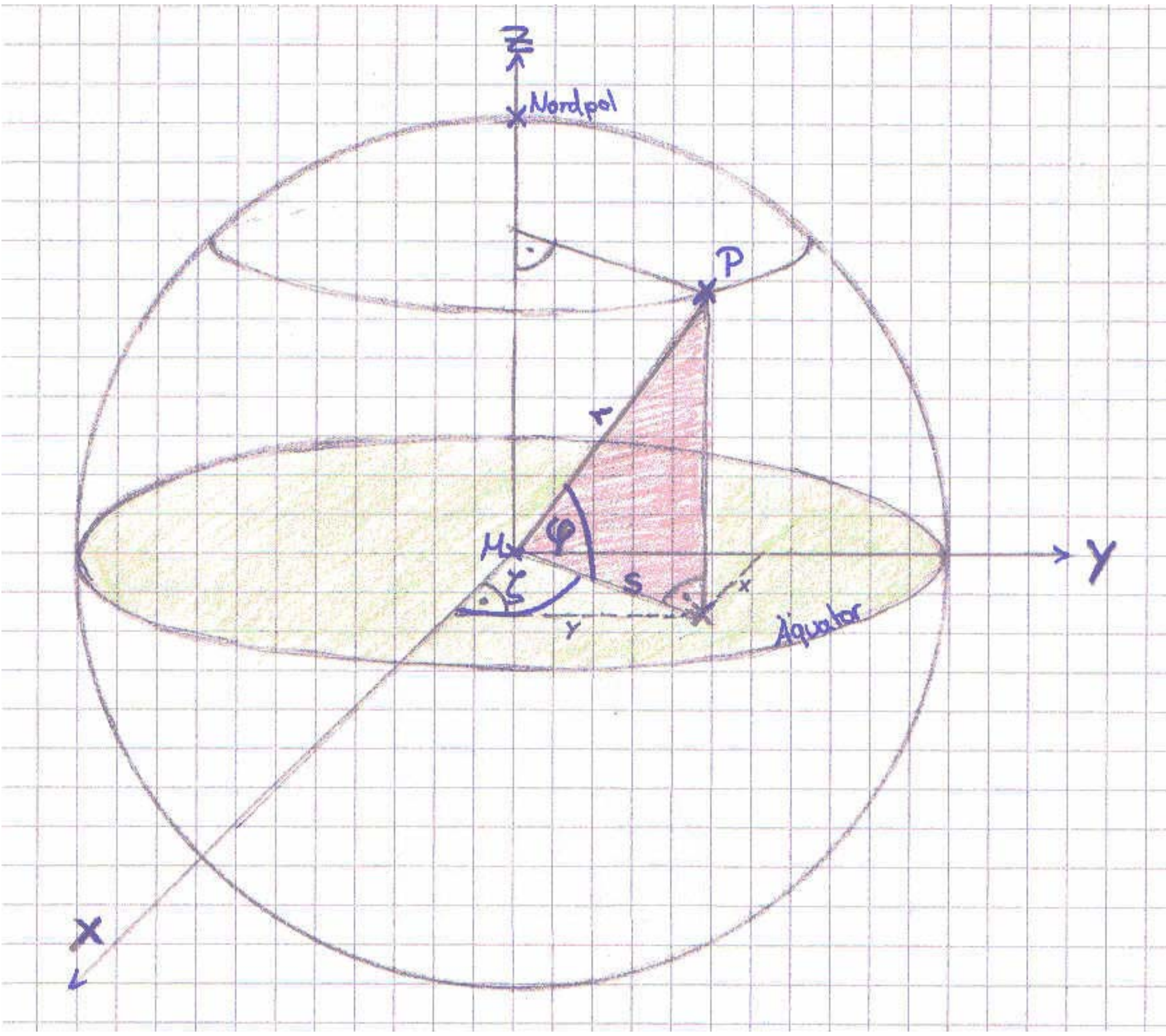
---

* Die Formeln für φ' und *r* stammen aus einem Handout zum Gastvortrag „Die photographische Beobachtung der Meteore“ auf dem Sternfreunde-Seminar, Wiener Planetarium, 1986, von Zdeněk Ceplecha.

Aufgabe 3)

a) Berechne r aus φ! Die angegebenen Daten sind bereits im WGS84 angegeben. Deshalb muss φ' nicht berechnet werden. r müsste zwar eigentlich aus dem unkorrigierten φ errechnet werden, das wir nicht kennen, aber das macht nur einen minimalen Unterschied.

b) Berechne mithilfe der folgenden Skizze den Ortsvektor eines Punktes P auf der Erdoberfläche!



c) Berechne den Vektor für den Standort der Kamerastation Tuifstädt! Denke daran, die Streckeneinheit nicht zu verändern. Rechnest du hier mit km, werden ganz am Ende der Rechnungen auch km herauskommen.

Im selben System lassen sich nun auf ähnliche Weise die Einheitsvektoren zu jeder Richtung eines Punktes am Himmel mit den äquatorialen Koordinaten α und δ berechnen:

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} \cos\alpha \cdot \cos\delta \\ \sin\alpha \cdot \cos\delta \\ \sin\delta \end{pmatrix}.$$

Rekonstruktion der Flugbahn

Im vierten und letzten Teil der Rechnung wird in dem vektoriellen Koordinatensystem aus Aufgabe 3 eine Ebene aufgespannt, die die drei Punkte Kamera, Anfangspunkt und Endpunkt der Spur enthält. Anfangs- und Endpunkt sind zwar noch nicht bekannt, aber die Richtungsvektoren, die zu ihnen hin zeigen, sind durch Rektaszension und Deklination festgelegt. Auf dieser Ebene liegt die tatsächliche Meteoroidenbahn.

Aufgabe 4)

a) Stelle eine allgemeine Ebenengleichung auf, die von (r + h), φ', ζ, der Rektaszension des Anfangs- und Endpunktes α_A und α_E und der Deklination beider Punkte δ_A und δ_E abhängt!

b) Stelle die Ebenengleichung für unser Beispiel auf!

Um nun auf die wahre Flugbahn des Meteoroiden zu kommen, muss die gesamte Rechnung für den Standort einer anderen Kamera gemacht werden, die denselben Meteor aufgenommen hat. Man erhält dann eine zweite Ebene, die von der anderen Gruppe berechnet wird.
Der Schnitt beider Ebenen bedeutet die Gerade, auf welcher der Meteoroid sich während seines Leuchtflugs bewegt hat.

c) Berechne die Normalenvektoren $\vec{n}$ und $\vec{m}$ der beiden Ebenen und daraus die Koordinatenformen der Ebenen!

d) Berechne die Schnittgerade der Ebenen!

Den Aufschlagpunkt des Meteoriten könnte man nun als Schnittpunkt der ermittelten Gerade mit der Erdoberfläche verstehen, wenn sich die Bahn des Meteoroiden nicht auf den letzten ca. 15 Höhenkilometern (je nach Eintrittswinkel mehr oder weniger drastisch) verändern würde. In etwa dieser Höhe tritt der Körper in die unterste Schicht der Atmosphäre ein, die ihn auf einmal sehr stark abbremst. Von da an ändert der Körper seine Bahn sehr schnell bis hin zu einer fast Senkrechten. Da Er in dieser Phase nicht mehr leuchtet, ist das nur sehr schwer zu simulieren. Das Mittel der Wahl ist hier deshalb der Schnitt der Geraden mit einer Kugel, deren Radius um mindestens 15 km größer ist als der Erdradius.

e) Die Gleichung für eine Kugeloberfläche lautet $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$. Dabei ist $r = r_{Erde} + 15\text{km}$. Die Komponenten x, y und z der Geradengleichung können für x, y und z der Kugeloberflächengleichung eingesetzt werden. Man erhält eine quadratische Gleichung, deren beiden Lösungen den beiden Schnitten der Geraden mit der Kugeloberfläche entsprechen. Eine davon gibt den gesuchten Punkt Q an. Ermittele diesen!
Hinweis: Q ist natürlich der Punkt mit den Koordinaten, die den Koordinaten der Kamerastationen ähnlicher sind.

Dieser Punkt ist Bestandteil der wahren Bahn und schon sehr nah am Aufschlagspunkt. Außerdem schafft er gute Anfangsbedingungen für eine anschließende Simulation, (die sich dieser Methode entzieht), weil man von dort den Eintrittswinkel und aufgrund des Shutters in der Kamera (siehe SuW-Beitrag) die Geschwindigkeit kennt. Auch die Masse lässt sich aus der Leuchtkraft ermitteln. So lässt sich der Aufschlagpunkt dann noch viel genauer schätzen, als es hier getan wird. Damit die ganze Rechnung aber mit einem greifbaren Ergebnis endet, berechnen wir hier zuletzt den Submeteorpunkt S, also den Punkt auf dem Erdboden, der unter dem in e) ermittelten Punkt Q liegt.

f) Bei der Berechnung von S kann die Höhe über NN vernachlässigt werden. Deshalb lässt sich S ungefähr durch den Schnittpunkt der Kugeloberfläche $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ mit $r = r_{Erde}$ und der Verbindung zwischen Erdmittelpunkt und dem in e) ermittelten Punkt Q errechnen. Ermittle S!

g) Rechne S in geographische Koordinaten zurück und finde heraus, wo dieser Punkt liegt! φ' lässt sich direkt ausrechnen, die geographische Länge L aber nur aus der lokalen Sternzeit. Die Umrechnungsformel dazu lautet:

$$L = (\zeta - GMST) \cdot \frac{360°}{23{,}93447h}$$ mit GMST = Greenwich Mean Star Time = 9,334506h

In der Nähe vom Schloss Neuschwanstein ist der abgebildete Meteoroid im April 2002 zu Boden gekommen. Und? Kommt es raus? Dann könnt ihr euch auf die Suche machen. Wahrscheinlich wurden die meisten Bruchstücke des Meteoritenfalls noch nicht gefunden ☺

Große Abweichungen kommen vermutlich daher, dass das Ereignis von einer sehr ungünstigen Konstellation von Kameras aufgenommen wurde. Die beiden Beispiele blicken fast in dieselbe Richtung auf die Spur.