Astronomische Standortbestimmung mit einem selbstgebauten Pendelquadranten

Jugend forscht 2019

Jan-Miklas Gehla und Torben Huppertsberg

Carl-Fuhlrott-Gymnasium, Wuppertal

Projektbetreuer: Bernd Koch

13. Januar 2019

Inhaltsverzeichnis

THEORIE ZUR ORIENTIERUNG AM STERNENHIMMEL **2**

Allgemeines zur Himmelskugel **2**

Das Horizontsystem **2**

Das bewegliche Äquatorsystem **3**

BESTIMMUNG DES HÖHENWINKELS VON ALTAIR MIT PENDELQUADRANT **5**

Konstruktion des Pendelquadranten **5**

Messung des Höhenwinkels von Altair **6**

Aufbau und Kalibrierung des Pendelquadrantens mit Sucher **6**

Ablauf der Bestimmung des Höhenwinkels von Altair **7**

BERECHNUNG DER GEOGRAPHISCHEN KOORDINATEN AUS DEM HÖHENWINKEL ALTAIRS **8**

Bestimmung der geographischen Länge λ **8**

Bestimmung der geographischen Breite φ **11**

ERGEBNIS **12**

FEHLERDISKUSSION **13**

FAZIT **14**

Theorie zur Orientierung am Sternenhimmel

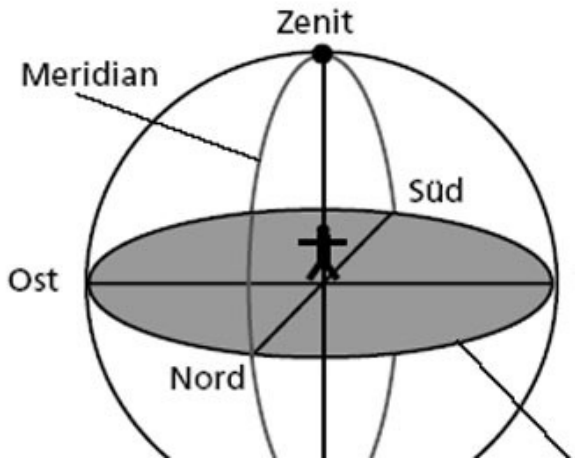
Allgemeines zur Himmelskugel

Für die Beschreibung der Bewegung von Himmelskörpern aus unserer Perspektive benötigen wir ein Koordinatensystem am Himmel. Daher nutzen wir eine scheinbare Himmelskugel, welche mathematisch einer geozentrischen Einheitskugel entspricht, zur Darstellung unseres Himmels und Rechenfläche für Koordinaten in der Astronomie. Bei dieser Himmelskugel handelt es sich um ein Modell in Form einer gedachten Hohlkugel, welches den Himmel über dem Beobachter auf der Erde so darstellt wie er ihm erscheint. Also werden hierbei Faktoren, durch die ein Stern tatsächlich eine andere Position hat als die an der er zu stehen scheint, außer Acht gelassen.

Man nutzt zwei Winkel der Kugelkoordinaten, während der dritte Winkel als Entfernung in der Regel nicht verwendet wird. Es ist für den Zweck der Beobachtung ausreichend die Richtung eines Sternes an der gedachten Himmelskugel anzugeben, da die Himmelskörper eine derart große Entfernung zur Erde haben.

Das Horizontsystem

Auf Grund der Rotation der Erde wirkt es für den Beobachter auf dieser so, als würden sich die Sterne über ihn hinwegbewegen. Da sich die Erde von Westen nach Osten um die eigene Achse dreht, bewegen sich die Sterne aus der Sicht des Beobachters von Osten nach Westen. Daraus resultiert ein Koordinatensystem für den Himmel um die Position der Sterne angeben zu können. Das uns vertrauteste astronomische Koordinatensystem ist das Horizontsystem, da es eins für jeden Punkt auf der Erde gibt. Dieses Koordinatensystem ermöglicht für jeden Beobachter die simpelste Angabe der Position von Himmelskörpern am Sternenhimmel, allerdings hat jeder sein eigenes und somit ist das große Problem des Horizontsystems, dass es nicht einheitlich ist.

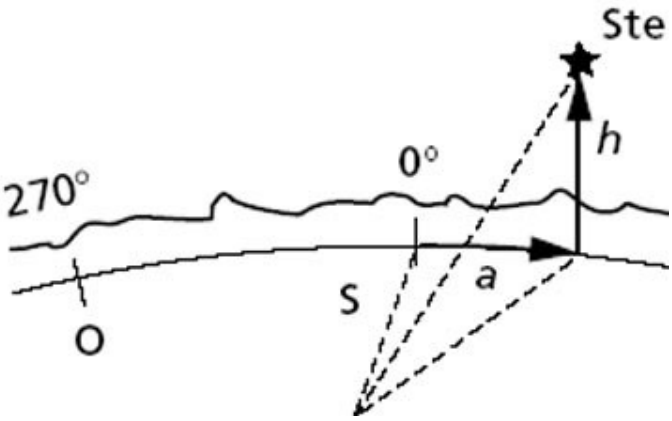


Bei diesem System ist der praktische Horizont des Beobachtungsortes, welcher auf einer gedachten Scheibe liegt, die Bezugsebene. Diese Bezugsebene lässt sich in die vier Himmelsrichtungen unterteilen, um eine grobe Richtungsangabe über die Position eines Himmelskörpers zu machen. Es wird allerdings eine präzisere Richtungsangabe gebraucht, weswegen man die Himmelsrichtungen in Winkelgeraden, genannt Azimut *a*, aufteilt.[1]

[1] http://www.mgf-kulmbach.de/material/gk/anfang/hor_1.jpg

Ausgehend von der Südrichtung (a=0°) zählt man in Uhrzeigerrichtung zuerst nach Westen (a=90°) über Norden (a=180°) nach Osten (a=270°). Wenn man nun eine imaginäre Linie von Süden über den Zenit der Himmelskugel nach Norden zieht, erhält man den sog. örtlichen Meridian des Horizontsystems.

Da die Sterne unterschiedlich hoch am Himmel stehen, braucht man zusätzlich zur Richtung eines Himmelskörpers seine Höhe *h* über dem idealisierten Horizont. Mit dieser zweiten Koordinate, welche ebenfalls in Winkelgraden gemessen wird, können dann genaue Angaben über die Position eines Himmelskörpers auf dem zweidimensionalen Modell der Himmelskugel gemacht werden. Die Höhe im Horizont beträgt 0° und im Zenit 90°. Befindet sich der Stern unter dem Horizont, so verwendet man eine Höhe mit negativem Vorzeichen. Also hat der Nadir, welcher dem Zenit gegenüber liegt, eine Höhe von -90°. Also ist es nun möglich mit der Koordinate (a|h) jeden Punkt auf der Himmelskugel exakt anzugeben.[2]



Um abschließend erneut auf die Bewegung der Himmelskörper zurückzukommen ergibt sich für die Bewegung der meisten Sterne im Horizontsystem, dass sie in der Osthälfte aufgehen und über ihren Hochpunkt auf dem örtlichen Meridian wandern bis sie in der Westhälfte untergehen.

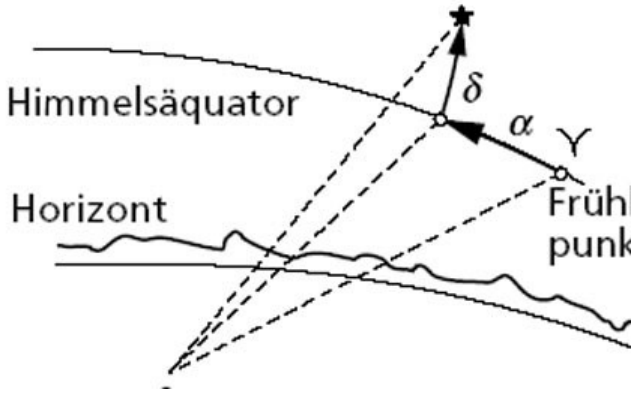
Das bewegliche Äquatorsystem

Der entscheidende Nachteil des Horizontsystems wurde oben bereits erwähnt. Für allgemein gültige Angaben am Sternenhimmel benötig man also ein festes System, welches für alle Orte auf der Erde gleichermaßen gilt. Dieses System ist das Äquatorsystem, dass sich die raumfeste Rotationsachse der Erde zu Nutze macht. Diese Rotationsachse durchstößt senkrecht die Äquatorebene, welche damit ebenfalls fest im Raum steht. Somit ist sie ein geeigneter Ersatz für den individuellen Horizont als Bezugsebene im Koordinatensystem. Im Endeffekt ergibt sich also der Himmelsäquator aus der Äquatorebene der Erde.
Nun kann man die erste von zwei Koordinaten zur Positionsbestimmung eines Sternes festlegen, da Sterne immer den gleichen Winkelabstand zum Himmelsäquator haben. Diesen konstanten Winkelabstand nennt man Deklination δ. Man zählt hierbei von 0° beim Himmelsäquator zu 90° beim Himmelsnordpol, welcher über dem geographischen Nordpol liegt. Nach Süden zählt man entsprechend negativ.

[2] http://www.mgf-kulmbach.de/material/gk/anfang/hor_3.jpg

Verglichen mit den geographischen Koordinaten ist die Deklination die geographische Breite φ. Die zweite Koordinate wird auf der Erde durch die geographische Länge λ angegeben, wobei der Nullmeridian durch Greenwich verläuft. Dementsprechend muss man im Äquatorsystem ebenfalls einen willkürlichen Nullpunkt auf dem Himmelsäquator bestimmen.

Dafür wurde der Punkt an dem sich die Sonne bei Frühlingsanfang, von der Erde aus betrachtet, befindet ausgewählt, der sog. Frühlingspunkt. Der Winkelabstand eines Sternes zum Frühlingspunkt auf dem Himmelsäquator wird Rektaszension *a* genannt. Die Rektaszension wir in Richtung der Erdrotation von Westen nach Osten gezählt, wobei man ein Stundenmaß von 0 bis 24 Stunden verwendet.



Mit diesen zwei Angaben kann nun jeder Punkt auf der Himmelskugel wie beim Horizontsystem mit einer Koordinate (a| $\boldsymbol{\delta}$) angegeben werden, mit dem entscheidenden Unterschied, dass diese Koordinate für alle Beobachter zu jeder Zeit identisch ist. Deshalb wird das Äquatorsystem in der Astronomie häufig verwendet.[3]

Fixsterne haben in Bezug auf die Standardepoche J2000.0 eine feste Rektaszension und Deklination. Dies gilt allerdings nicht für Sonne, Mond und Planeten, da diese Himmelskörper eine physikalisch bedingte Eigenbewegung haben, die sich zusätzlich zur scheinbaren Bewegung durch die Erdrotation bemerkbar macht. Des Weiteren lässt sich schlussfolgern, dass die Höhe des Himmelspols über dem Horizont der geographischen Breite φ des Beobachters entspricht. Dieser Umstand geht aus der Tatsache hervor, dass einem der Himmelsnordpol im Zenit erscheint, wenn man sich am Erdnordpol befindet bzw. am Horizont, wenn man sich am Äquator befindet. Aus dieser Tatsache lassen sich Aussagen für die nördliche Erdhalbkugel treffen, wie dass man die Höhe eines jeden Sterns über dem Südhorizont, also auf dem örtlichen Meridian, angeben kann. Man berechnet die Höhe mit:

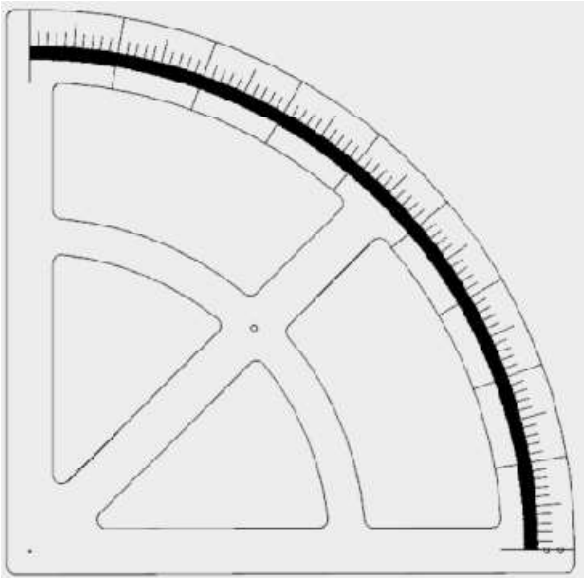
$$\mathbf{h = 90° - \varphi + \delta}$$

Wenn Sterne dieselbe Deklination wie der geographische Standort des Beobachters auf der Erde besitzen, dann erreichen sie ihre größte Höhe im Zenit über diesem Beobachter. Zum Beispiel erscheint einem Beobachter der Polarstern beinahe im Zenit, wenn er sich in der Nähe des Nordpols (φ=90°) der Erde befindet, da dieser eine Deklination von 89,25° besitzt. Außerdem geht ein Fixstern immer an einem Punkt auf bzw. unter. Diese Punkte liegen symmetrisch zum Meridian.

[3] http://www.mgf-kulmbach.de/material/gk/anfang/hor_9.jpg

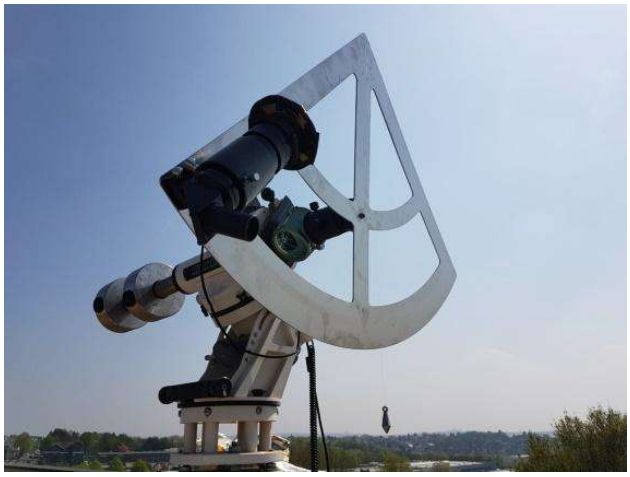
Bestimmung des Höhenwinkels von Altair mit Pendelquadrant

Konstruktion des Pendelquadranten

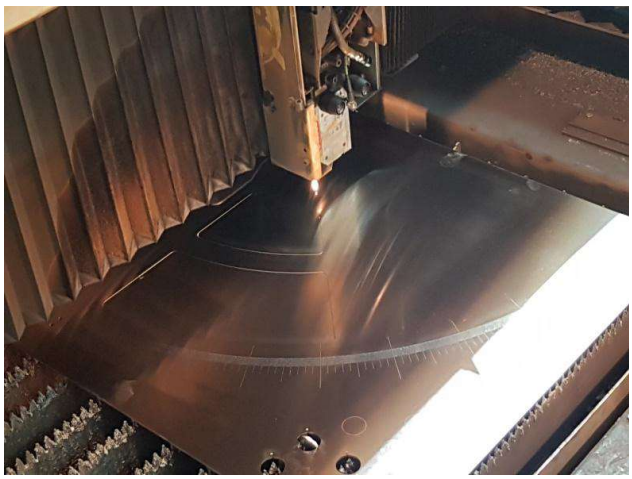


Wir nutzten für unseren Versuch der Bestimmung unseres Beobachtungsstandortes auf der Erde den Nachbau eines antiken Messinstruments. Der Pendelquadrant funktioniert nach einem sehr simplen Prinzip. Im rechten Winkel ist ein Pendel angebracht, welches seitlich herunter fällt und den Höhenwinkel, in welchem der Pendelquadrant ausgerichtet ist, an der Skala markiert. Um den Pendelquadranten korrekt auf ein Himmelsobjekt zu richten schaut man über die gerade Kante an der 90°-Markierung in Richtung der rechtwinkligen Ecke, welche auf ein Gestirn zielt. Aus diesem Grund sind auch zwei Bohrungen auf der 90° Markierung zu erkennen, an welchen ein kleines Fernrohr zur genaueren Anpeilung befestigt werden kann.

Für ein differenziertes Ablesen wurden 900 Markierungen unterschiedlicher Länge in die Edelstahlplatte mit einem Laser eingraviert. Dabei unterscheiden die kleinsten Markierungen nur 0,1°, während die größeren jeden Grad, bzw. jeden fünften und jeden zehnten Grad für ein schnelleres Ablesen markieren.



Die Aussparungen sind lediglich zur Gewichtseinsparung ausgeschnitten worden. Ebenfalls ist das Metall relativ dünn mit einer Stärke von 3mm, um den Umgang mit dem 60x60cm großen Gerät zu erleichtern. Auf Grund der fehlenden Stärke des Materials konnte kein Gewinde in das zentrale Loch zur Befestigung an ein Fotostativ geschnitten werden. Deswegen entschieden wir uns dafür eine Schraube mit einer Mutter zu befestigen, so dass diese oben auf dem Pendelquadranten etwas übersteht. Daraus resultiert das Problem, dass keine Winkel zwischen 44° und 46° abgelesen werden können, da das Pendel gegen die Mutter fällt.



Die Realisierung dieses Projekts gelang in Zusammenarbeit mit der Firma C.A. Picard, welche ihren präzisen Laserstrahlschneider zur Verfügung stellte. Zusammen programmierten wir unseren digitalen Entwurf in den Computer ein und schnitten, bzw. gravierten zwei Modelle unseres Pendelquadranten.

Messung des Höhenwinkels von Altair

Das Ziel der Messung ist es, den Standort auf der Erde zu bestimmen. Um den Standort berechnen zu können, muss man den Höhenwinkel des Sterns Altair zum Horizont messen und den Tageszeitpunkt der Messung festhalten. Unsere Messung wurde mit einem Pendelquadranten um die Kulmination von Altair durchgeführt.

Die Messung wurde mit folgenden Materialien durchgeführt:

Pendelquadrant, Pendel (Angelschnur & Lot), Kugelkopf, motorisierte Teleskophalterung auf der Sternenwarte, Sucher, Laser- Wasserwaage, DIN A4 Blatt, Uhr.

Aufbau und Kalibrierung des Pendelquadrantens mit Sucher

Der Versuch wurde an der Sternwarte des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums in Wuppertal durchgeführt. Um den Versuch durchzuführen nutzten wir einen selbstkonstruierten Pendelquadranten, dessen Herstellung schon vorab beschrieben wurde. An einer der sechs motorisierten Teleskopmontierungen der Sternwarte wurde der Pendelquadrant aufgebaut. Anstelle des Teleskops wird eine Halterung mit Schraube für das Befestigen des ¼ Zoll Fotogewindes unseres Kugelkopfes angebracht. Anschließend kann der Kugelkopf auf die Halterung geschraubt und der Pendelquadrant an der Stativplatte des Kugelkopfes festgeschraubt werden. Um den Pendelquadranten an der Stativplatte zu fixieren, haben wir eine normale M5 Schraube benutzt. Ein Sucher wird seitlich parallel an die obere waagerechte Kante des Pendelquadranten zur Anpeilung eines Gestirns angebracht. Die Parallelstellung vom Sucher zum Pendelquadranten ist dabei besonders wichtig, da nur ein leichter Fehler ausreicht um das Ergebnis zu verfälschen.

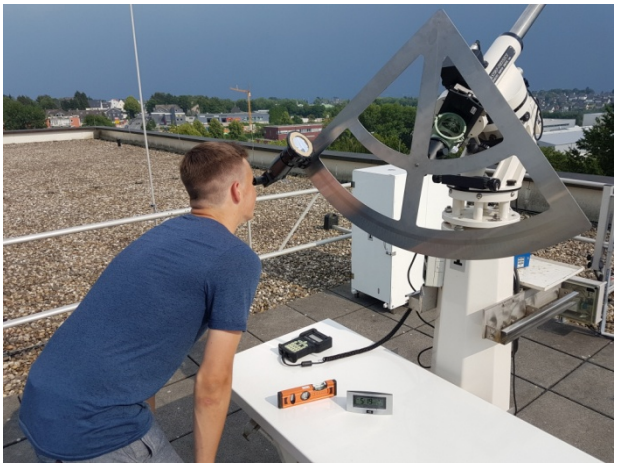
Wir richteten den Pendelquadranten zuerst mit Hilfe einer Laser-Wasserwaage waagerecht aus. Im Anschluss markierten wir den Punkt des Laserpointers auf einer 25 Meter entfernt liegenden Wand mit einem Blatt Papier, auf welchem zentral eine Markierung war. Nun wird der Sucher justiert, bis das Fadenkreuz mittig auf jenen Punkt zielt.

Ablauf der Bestimmung des Höhenwinkels von Altair

Nun mussten wir den Sucher mit Hilfe der Fernbedienung auf den Stern Altair richten, so dass dieser genau mittig auf dem Fadenkreuz sitzt. Anschließend haben wir von 20:31 Uhr MESZ zwei Stunden lang regelmäßig den Höhenwinkel von Altair, welcher von dem Pendel markiert wurde, auf der Skala abgelesen. In der ersten halben Stunde lasen wir den Höhenwinkel jede zehn Minuten einmal ab und notierten ihn zusammen mit der Uhrzeit von www.uhrzeit.org. Anschließend erhöhten wir die Häufigkeit des Ablesens von 21:00-22:00 Uhr MESZ auf alle fünf Minuten, um während der Kulmination von Altair genauer zu messen. Daraufhin haben wir die letzte halbe Stunde nach 22:00 Uhr MESZ wieder alle 10 Minuten abgelesen.

Die Nachführung des Pendelquadrantens, um Altair mit dem Fadenkreuz anzupeilen, geschah automatisch in siderischer Geschwindigkeit durch die motorisierte Vorrichtung an welcher unser Messgerät befestigt war. Von Zeit zu Zeit mussten wir den Kugelkopf etwas kippen, um die Schrägstellung des Pendelquadranten auszugleichen, welche dadurch zu Stande kam, dass die Vorrichtung nicht azimuthal nachgeführt werden konnte. Dadurch hing das Pendel nicht direkt seitlich an der Skala herunter und das Ablesen wurde erschwert, bis hin zu unmöglich. Nach der Korrektur durch abkippen des Kugelkopfes, musste Altair schließlich wieder angepeilt werden, so dass der Pendelquadrant anschließend wieder automatisch nachgeführt werden konnte.

Beendet wurde unsere Messung gezwungenermaßen durch eine vorher bereits beschriebene Eigenschaft unseres Pendelquadrantens. Die Schraube, welche die Befestigung an den Kugelkopf ermöglichte, war ab 22:30 Uhr MESZ dem Pendel im Weg, weil Altair in einem ca. 45° Winkel am Himmel stand.



Die Mutter blockiert das Pendel

Berechnung der geographischen Koordinaten aus dem Höhenwinkel Altairs

Bestimmung der geographischen Länge λ

Für die Bestimmung der geographischen Länge λ wird der Zeitpunkt seiner Kulmination bestimmt. Da die Kulmination für alle Orte, welche auf einem identischen Längengrad liegen, zeitgleich stattfindet, lässt sich hiermit die gesuchte Koordinate bestimmen. Hierfür braucht man den bekannten Zeitpunkt für die Kulmination von einem anderen Längengrad aus betrachtet, um dann die zeitliche Differenz zu nutzen.

Die Erde rotiert ostwärts bis zur nächsten Kulmination in 23h 56m 4s einmal 360° um die eigene Achse. Daraus folgt, dass jede Stunde die Erde um 15,041° rotiert. Wegen des eben hergestellten Zusammenhangs können wir die zeitliche Differenz in Stunden mit 15,041° multiplizieren und erhalten so die Längengraddifferenz zu unserem Längengrad.

$$(\lambda - \lambda_0) * 23{,}9345 \text{ Std.} = -(t - t_0) * 360°$$ oder

$$\lambda = \lambda_0 - (t - t_0) * 15{,}041°$$

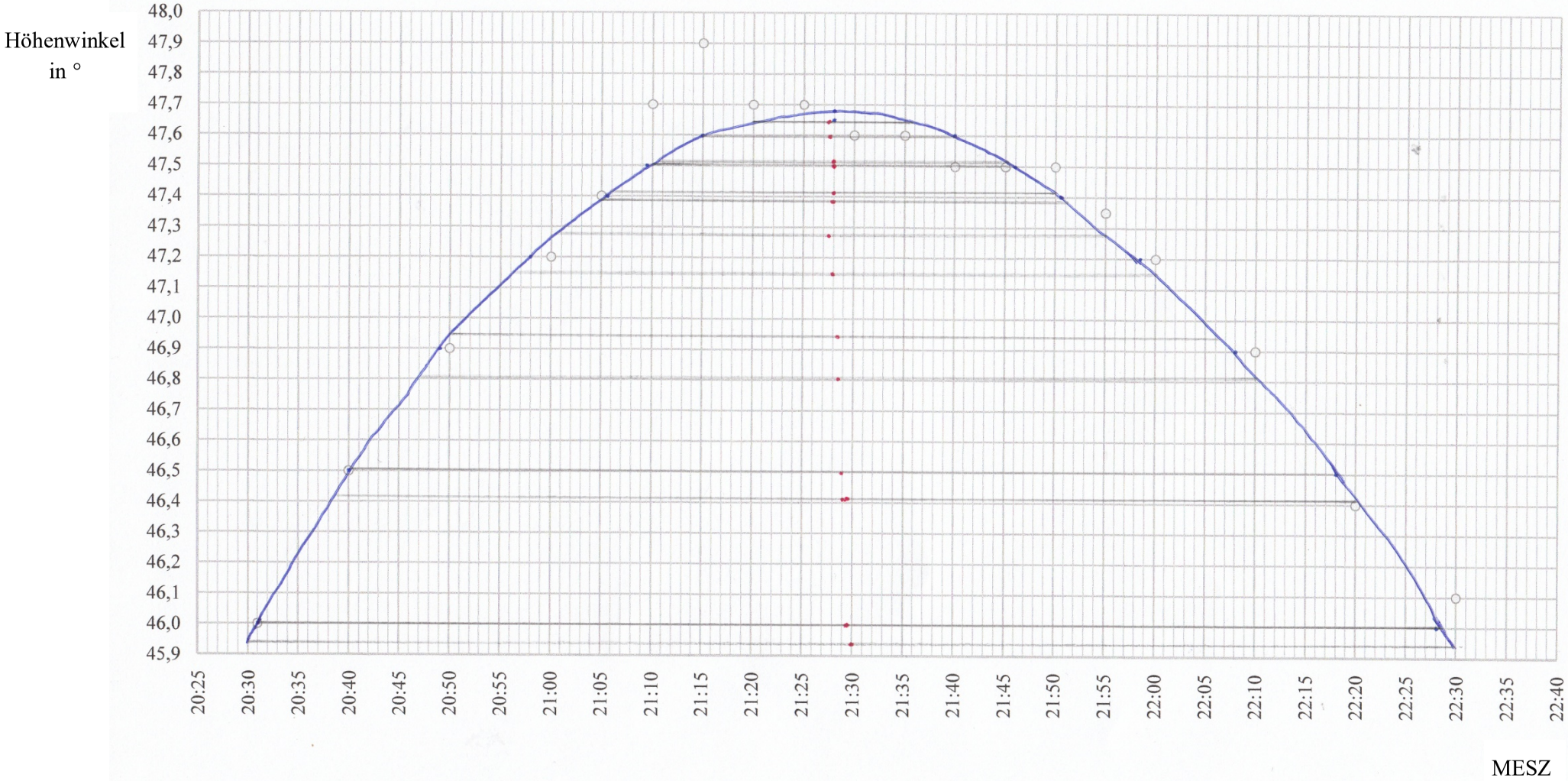
λ_0 = 0ter Längengrad von dem die Mittagszeit bekannt ist
t_0 = Mittagszeit des 0ten Längengrades λ_0
λ = gesuchter Längengrad unseres Beobachtungspunktes
t = gemessene Mittagszeit des gesuchten Längengrades λ

Um nun den Zeitpunkt der Kulmination von Altair am 19.09.18 mit unseren beschriebenen Möglichkeiten so genau wie möglich zu bestimmen, trugen wir die gemessenen Höhenwinkel gegen die Zeit in einem Koordinatensystem auf. Anschließend legten wir zeichnerisch eine möglichst passende Ausgleichskurve, welche dem achsensymmetrischen Höhenverlauf Altairs nahekommt, durch unsere Punkte. In der Fehlerdiskussion sprechen wir die Ursachen für fehlerhafte Werte, bzw. der asymmetrischen Ausgleichskurve an.

Darauf folgte die Bestimmung der zeitlichen Mittelwerte aus je einem durch die Ausgleichskurve korrigierten Wert auf der einen Seite des Hochpunktes und einen durch graphische Interpolation bestimmten gegenüberliegenden Punkt mit dem gleichen Höhenwinkel auf der anderen Seite. Es ergaben sich durch diese Methode 19 Mittelwerte, welche den Zeitpunkt der Kulmination darstellen. Um eine höhere Genauigkeit zu erreichen bestimmten wir den Mittelwert der 19 Mittelwerte und die Standardabweichung.

Schlussendlich folgt die Berechnung der geographischen Länge nach der oben beschriebenen Formel. Im Anschluss folgen zuerst die graphische Darstellung der Messwerte, bzw. der Ausgleichskurve und anschließend eine Exceltabelle mit den Berechnungen für den Zeitpunkt der Kulmination.

Höhenwinkel Altair



		Anhand der Ausgleichskurve	interpolierter Zeitpunkt (t´)			
Uhrzeit in MESZ (t)	Höhenwinkel in °	korrigierter Höhenwinkel in °	auf gegenüberliegender Seite	Mittelwerte Zeit (t+t´)/2	MITTELWERT ZEIT	
20:31:00	46,00	46,00	22:28:00	21:29:30	21:28:09	
20:40:00	46,50	46,50	22:18:00	21:29:00		
20:50:00	46,90	46,95	22:06:30	21:28:15	STANDDARDABWEICHUNG	
21:00:00	47,20	47,26	21:55:00	21:27:30	`+/-`	00:00:48
21:05:00	47,40	47,39	21:51:00	21:28:00		
21:10:00	47,70	47,50	21:46:00	21:28:00		
21:15:00	47,90	47,60	21:40:00	21:27:30		
21:20:00	47,70	47,65	21:35:00	21:27:30		
21:25:00	47,70	47,67	21:30:00	21:27:30		
21:30:00	47,60	47,67	21:25:00	21:27:30		
21:35:00	47,60	47,65	21:20:00	21:27:30		
21:40:00	47,50	47,60	21:15:00	21:27:30		
21:45:00	47,50	47,51	21:11:00	21:28:00		
21:50:00	47,50	47,41	21:06:00	21:28:00		
21:55:00	47,35	47,28	21:00:00	21:27:30		
22:00:00	47,20	47,15	20:56:00	21:28:00		
22:10:00	46,90	46,81	20:47:00	21:28:30		
22:20:00	46,40	46,42	20:39:00	21:29:30		
22:30:00	46,10	45,95	20:30:00	21:30:00		

Aus den Mittelwerten und der Standardabweichung schließt man, dass die Kulmination von Altair nach unserer Messung um 21:28:09 Uhr MESZ +/- 48 Sekunden stattgefunden hat.

Der bekannte Zeitpunkt der Kulmination von Altair ist der vom Beobachtungsstandort des Nullmeridians in Greenwich. Dazu haben wir mit dem Computerprogramm Stellarium gearbeitet, um den gesuchten Zeitpunkt für Greenwich herauszufinden. Da unsere Beobachtung am 19. September 2018 stattfand und an diesem Datum Altair vom Nullmeridian aus beobachtet um 21:57:02 Uhr MESZ kulminiert, ergibt das für unseren Längengrad folgendes:

λ = 0° – (21:28:09 Uhr – 21:57:02 Uhr) * 15,041° = 7,2407°

Des Weiteren muss die Streuung unserer Werte in Form der Standardabweichung berücksichtigt werden. Es ergibt sich ein Fehlerintervall mit +/- 48 Sekunden für unseren Längengrad, das gemäß der bereits verwendeten Formel berechnet wird.

λ_+ = 0° – (21:28:57 Uhr – 21:57:02 Uhr) * 15,041° = 7,4423°

λ_- = 0° – (21:27:21 Uhr – 21:57:02 Uhr) * 15,041° = 7,0407°

Bestimmung der geographischen Breite φ

Für die Bestimmung der geographischen Breite φ macht man sich den zuvor hergestellten Zusammenhang zwischen der Höhe eines Gestirns h, seiner Deklination δ und des eigenen Breitengrades φ zu nutzen.

h = 90° - φ + δ oder
φ = 90° - h + δ

Die Deklination δ von Altair beträgt nach J2000 8,87036° und wird in die Formel eingesetzt. Anschließend benötigen wir den maximalen Höhenwinkel unseres beobachteten Gestirns während seiner Kulmination; da ein einfaches Ablesen des Hochpunktes der Ausgleichskurve unserer Messwerte zu unpräzise wäre, beziehen wir 4 Messwerte um die vermutete Kulmination herum mit ein.

Dazu berechnen wir für unsere gemessenen Werte von 21:20:00Uhr MESZ bis 21:35:00Uhr MESZ jeweils die geographische Breite und mitteln diese.

MESZ	Höhenwinkel h	Geographische Breite	φ
21:20:00Uhr	47,7°	90° - 47,7 + 8,87036°	=51,17°
21:25:00Uhr	47,7°	90° - 47,7 + 8,87036°	=51,17°
21:30:00Uhr	47,6°	90° - 47,6 + 8,87036°	=51,27°
21:35:00Uhr	47,6°	90° - 47,6 + 8,87036°	=51,27°

Der Mittelwert beträgt **51,22°**, welcher unserer gemessenen geographischen Breite φ entspricht. Um wie bei der geographischen Länge die Streuung unserer Werte zu berücksichtigen, berechnen wir zunächst die Höhendifferenz Δh zwischen unseren Messwerten und den korrigierten Punkten auf der Ausgleichskurve.

MESZ	Höhenwinkel h	korr. Höhenwinkel h´	Höhendifferenz Δh
21:20:00Uhr	47,7°	47,65°	0,05°
21:25:00Uhr	47,7°	47,67°	0,03°
21:30:00Uhr	47,6°	47,67°	-0,07°
21:35:00Uhr	47,6°	47,65°	-0,05°

Aus den Höhendifferenzen berechnen wir nun eine Standardabweichung, womit wir die Streuung in unsere Berechnung einbeziehen. Die Standardabweichung beträgt umgerechnet in ° **+/- 0,06°**. Schlussendlich ergibt unsere Messung eine geographische Breite von **51,22° +/- 0,06°**.

Ergebnis

Mit den erfolgten Berechnungen unseres Beobachtungsstandortes aus den Messungen des Höhenwinkels von Altair am 19.09.18 über eine Zeitspanne von 2 Stunden mit einem Pendelquadranten haben wir die folgenden Koordinaten erhalten:

N 51° 13´ 12´´, O 7° 14´ 26.52´´

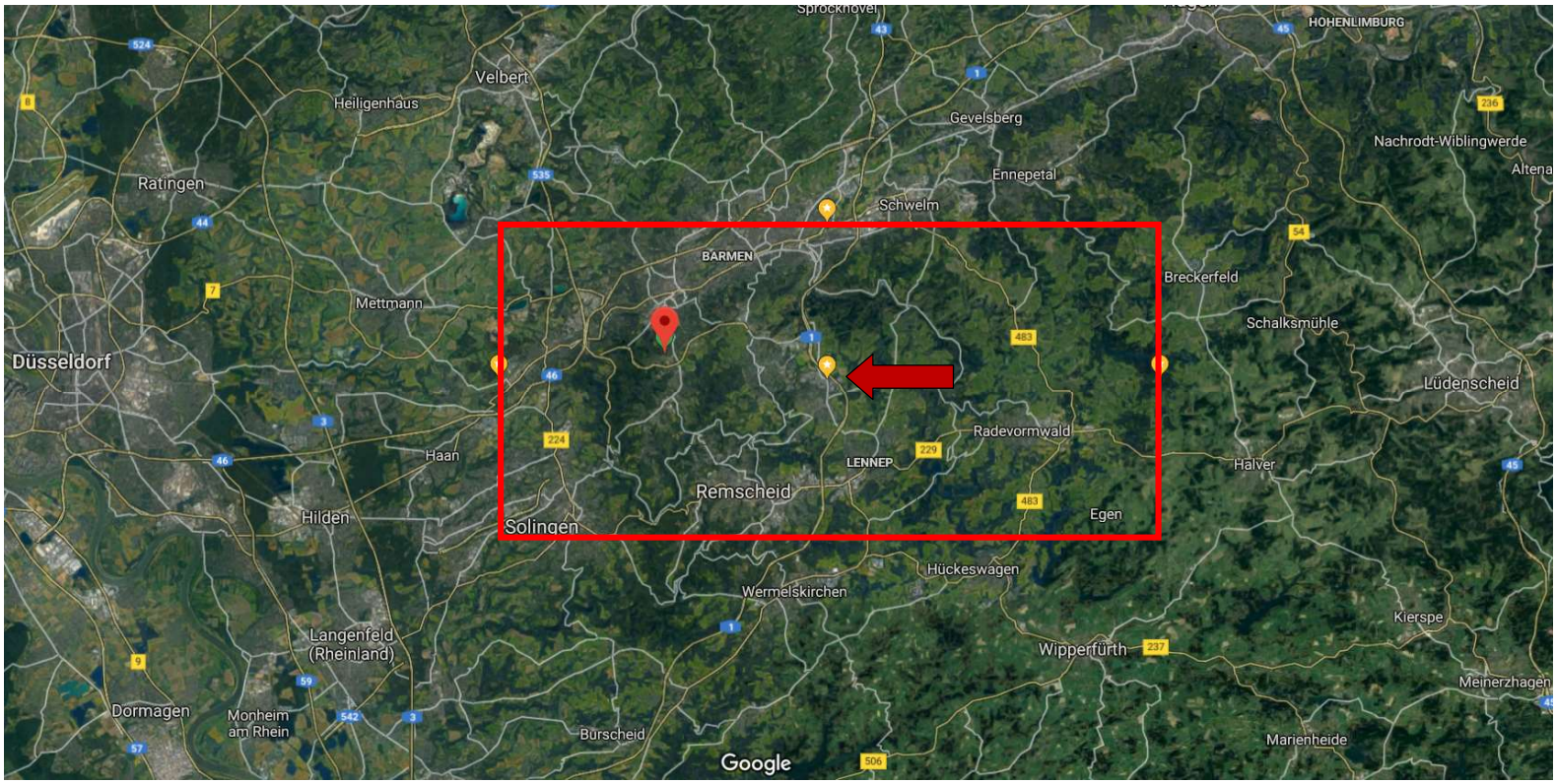
Fehlerintervall:

+ **N 51° 16´ 48´´, O 7° 26´ 32.28´´**
- **N 51° 9´ 36´´, O 7° 2´ 26.52´´**

Die richtigen Koordinaten[4] sind:

N 51° 13´ 49.5´´, O 7° 08´ 29.0´´

Die Luftlinie[5] zwischen unserem errechneten Standort und dem tatsächlichen beträgt: **7,02 km**



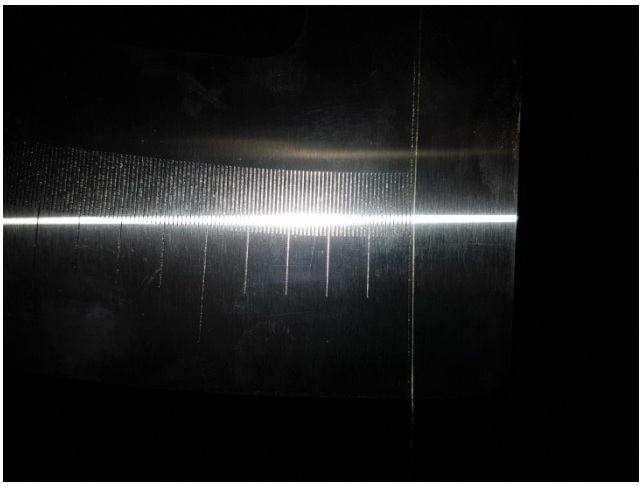
Die Stecknadel steht auf dem Bild für unseren Standort bei der Messung des Höhenwinkels von Altair, während der rote Pfeil auf den Ort zeigt, welchen wir als solchen errechnet haben. Das Rechteck um diesen Ort symbolisiert unser Fehlerintervall.

[4] *https://www.google.de/maps*
[5] *https://www.luftlinie.org/*

Fehlerdiskussion

Durch das Ergebnis wird ersichtlich, dass unsere Methode offenbar Fehler aufweist, die zu einer Ungenauigkeit führen. Auf diese möglichen Fehlerquellen möchten wir im Folgenden aufmerksam machen.

Wie wir bereits vorher erwähnten, stellte sich eine Problematik bei der Herstellung des Pendelquadranten heraus. Der Versuch unser Messgerät so handlich und leicht wie möglich zu gestalten, kollidierte mit der Idee einer subtilen Vorrichtung, die zum Befestigen des Pendelquadranten dienen sollte. Dadurch waren wir gezwungen eine Schraube mit Mutter zu verwenden, welche aber das Vermessen in einem speziellen Höhenwinkel unmöglich macht. Deshalb konnten während unseres Experiments nur begrenzt Messwerte erhoben werden.



Außerdem mussten wir für die Anbringung eines Pendels im rechten Winkel des Pendelquadrantens ein Loch schneiden. Da dieses Loch durch die Bearbeitung mit dem Laserstrahlschneider allerdings nicht einen so geringen Durchmesser wie der Faden selbst haben konnte, musste das Pendel per Hand eingeklebt werden. Als wir nachdem die oberste Kante waagerecht eingestellt war, unsere Vorrichtung auf einen Nullpunktfehler überprüft haben, stellten wir einen solchen, wie auf dem Bild zu sehen, von -0,1° fest. Dieser Fehler wurde später aus unseren Messwerten ausgerechnet, indem wir jeden Höhenwinkel mit 0,1° addierten.

Die mit Abstand herausforderndste Aufgabe war die Parallelstellung des Suchers mit dem Pendelquadranten. Dabei ist möglichst große Präzession gefordert, da man bei Betrachtung des Gestirns durch den Sucher die identische Höhe mit dem Pendelquadranten anpeilen möchte, damit das Pendel korrekt auf die Skala fällt. Nach einigen Überlegungen entschieden wir uns für die zuvor beschriebene Methode, bei welcher wir mit einer Laser-Wasserwaage vom Messgerät aus einen künstlichen Punkt bei 0° markieren und diesen mit dem Fadenkreuz des Suchers anpeilen. Damit können wir bestmöglich sicherstellen, dass das Pendel auf 0° fällt, wenn auch das Fadenkreuz des Suchers auf 0° ausgerichtet ist. Natürlich ist auch diese Methode nicht fehlerfrei und bietet einen Spielraum für Abweichung, da unsere gesetzte Markierung nur ca. 25m entfernt war und ein Fixstern in der Theorie scheinbar unendlich weit weg ist.

Des Weiteren gibt es eine offensichtliche wie auch prägende Fehlerquelle: der Wind. Da es während des Ablaufs unseres Versuchs immer einen leichten Wind und auch Böen gab, ist dieser als Quelle der größten Abweichungen auszumachen. Das Pendel, welches durch ein Lot geradlinig nach unten fällt,

wird leicht in Schwingung versetzt und lässt sich dabei erschwert ablesen. Beispielsweise Messwerte wie unserer um 21:15 Uhr MESZ wurden maßgeblich durch Windböen verfälscht. Die meiste Zeit gelang es uns durch Festhalten des Pendels und kurz vor der Messung dieses loszulassen, die Werte sauber abzulesen.

Zusätzlich zu den praktischen Fehlerquellen beim Versuch gibt es auch theoretische, welche wir hier erläutern möchten. Offensichtlich weicht unser Ergebnis in der geographischen Länge deutlich weiter ab, als in der geographischen Breite. Das Fehlerintervall ist ebenfalls nicht quadratisch, sondern rechteckig. Eine Erklärung dafür ist, dass wir zur Bestimmung der geographischen Länge all unsere Messwerte genutzt haben, um Zeitpunkte für die Kulmination herauszufinden, welche anschließend gemittelt worden sind. Da einige dieser Werte eine größere Abweichung von der Ausgleichskurve aufweisen, als es die vier Messwerte um die Kulmination herum, die zur Bestimmung der geographischen Breite gemittelt wurden, tun, sind auch die Koordinaten in der Länge ungenauer. Ebenso verhält es sich bei den Fehlerintervallen, weil die Standardabweichung bei der Bestimmung der geographischen Länge wegen einer größeren Anzahl an Messwerten höher war.

Abschließend beschäftigten wir uns mit der astronomischen Refraktion, welche wir als Fehlerquelle in Betracht zogen. Allerdings fällt diese bei einem Winkel von über 45° so gering aus, dass sie weit kleiner ist als 0,1°, was unsere kleinste mögliche Einheit beim Ablesen des Höhenwinkels ist. Daher ergibt es keinen Sinn die Refraktion in unserem Ergebnis zu verrechnen.

Fazit

Alles in allem können wir sehr zufrieden mit unserem errechneten geographischen Standort sein. Das Ergebnis entspricht unserer Erwartungshaltung und kommt für eine veraltete Methode sehr nah an die richtigen Koordinaten heran. Die Abweichung bzw. das Fehlerintervall haben wir zuvor in die Fehlerdiskussion eingebracht und erläutert, wobei klar wurde, dass einige Faktoren unabänderlich bei dieser Herangehensweise das Ergebnis beeinflussen, während andere noch durch weitere Verbesserungen des Verfahrens eliminiert werden können.

Im Gegensatz zu einer bereits erfolgten Positionsbestimmung über den Höhenverlauf der Sonne, bei welcher die Parallelstellung nicht mit einer Laser-Wasserwaage erfolgte, ist das Ergebnis deutlich präziser.

Zum Ende hin lässt sich sagen, dass eine überarbeitete Methode wie die unsere heutzutage natürlich nicht mit Positionsbestimmungen eines GPS mithalten kann, aber immer noch die Anforderungen für eine bis auf 5km genaue Standortbestimmung mindestens erfüllt.

Mit freundlicher Unterstützung von: