

Westfälische Volkssternwarte und Planetarium Recklinghausen

Stadtgarten 6, 45657 Recklinghausen, Tel. und Fax (02361) 23134
Sekretariatszeiten: Montag, Mittwoch und Freitag von 8.30 - 12.30 Uhr
www.sternwarte-recklinghausen.de info@sternwarte-recklinghausen.de

Sonnenuntergangsbeobachtungen als astronomisches Urlaubsprojekt

von Burkard Steinrücken, Westfälische Volkssternwarte und Planetarium Recklinghausen

Wie man im Urlaub mit Kleinbildkamera, Fernglas, Wanderkarte und Armbanduhr aus systematischen Sonnenuntergangsbeobachtungen eigene Erkenntnisse zur Lage der Sonnenbahn, der Lichtbrechung in Horizontnähe, die Verlängerung des lichten Tages durch die Lichtbrechung und die Größe der Erde gewinnt, wird in diesem Aufsatz geschildert.

Die Genauigkeit des Messverfahrens von 1-2 Bogenminuten reicht sogar aus, um über den Urlaubsort astronomisch nicht unerhebliche und vermutlich noch unerhobene Daten über das Ausmaß der atmosphärischen Refraktion in Horizontnähe zu erhalten. Einige bereits erfolgte Untersuchungen auf diesem Gebiet lassen eine starke Variation der horizontnahen Effekte in Abhängigkeit vom Beobachtungsort erwarten [1]. Mit der einfachen Methode, die hier geschildert wird, kann jeder Leser eigene Beiträge zum schönen Forschungsgebiet der Horizontastronomie beisteuern und Daten zur atmosphärischen Optik sammeln.

Einleitung

Der Strandurlaub bietet hervorragende Möglichkeiten, sich neben der verdienten Erholung auch unterhaltsamen und schönen astronomischen Projekten zu widmen, die im Alltagsleben wegen des streng nach mittleren Zeiten geregelten Tagesablaufs und wegen der starken Bebauung in den Städten nicht ohne weiteres möglich sind.

In diesem Aufsatz wird ein kleines Urlaubsprojekt beschrieben, in dem mit der Kleinbildkamera der abendliche Sonnenuntergang über einen Zeitraum von neun Tagen systematisch dokumentiert wird. Bei der späteren Auswertung der Fotoserie am Heimatort lässt sich z.B. der wandernde Untergangsort der Sonne aufgrund ihrer Deklinationsveränderung untersuchen.

Schon die große Variation der Natur beim Hervorbringen von Sonnenuntergangs- und Abendstimmungen überrascht, wenn man später auf die Ergebnisse dieser Fotoserie blickt.

Bei den Aufnahmen wurde jeweils die sekundengenaue Uhrzeit ermittelt. Damit wird die Bestimmung der horizontnahen Refraktion und die dadurch bedingte Verlängerung des lichten Tages möglich. Der geografische Standort wird einer Wanderkarte entnommen, die im örtlichen Tourismusbüro oft kostenlos erhältlich ist. Die Kimmtiefe, die Absenkung des Meereshorizontes der gekrümmten Erde unter den mathematischen Horizont, lässt sich ebenfalls aus einer Aufnahme ermitteln, wenn der Aufnahmezeitpunkt bekannt ist. Dieser Wert kann für eine etwaige Bestimmung der Erdgröße herangezogen werden.

Die Möglichkeit der Auswertung der Messungen und die Weiterverarbeitung der Bilder am Computer rettet die Urlaubsstimmung noch in den Alltag hinüber und lässt die Beobachtungsmomente immer wieder im Geist auferstehen. Aber auch ohne Auswertung des „Datenmaterials“ ist der Wert der systematischen Sonnenuntergangsbeobachtungen für das

astronomische Grundverständnis groß. Die zeitliche und räumliche Verlagerung des Sonnenuntergangs von wenigen Minuten und wenigen Winkelgraden von Tag zu Tag wird bewusst erlebt und diese Bewusstheit für den Sonnenlauf entwickelt sich sogar zu einem zwischenzeitlichen Ordnungsprinzip für die Gestaltung des Urlaubstages. Hat man in den Vortagen bereits zwei oder drei Sonnenuntergänge beobachtet und notiert, so will man auch die nächsten erhaschen und richtet sich schnell nach den zu erwartenden Untergangszeiten aus.

Es ist interessant zu erleben, wie das auf die mittlere Sonnenzeit und die Äquinoktialstunden getrimmte Gemüt sich auf die von Tag zu Tag wandelnde Temporalzeit, die auf der Teilung des lichten Tages in zwölf Stunden basiert, umzustellen vermag und gewillt ist. Auch diese zeitweilige Umstellung auf das kulturgeschichtlich ursprünglichere Temporalzeitgefühl vermag den Urlaubseffekt, das gewollte Hinauslösen aus den strengen, durch menschliche Konvention herbeigeführten Bindungen des Alltags, zu steigern.

Beobachtungstechnik

Die Aufnahmen der Sonnenuntergänge entstanden während eines Italienurlaubs im April 2001 an der Etruskerküste der italienischen Riviera in der Nähe des Ortes San Vincenzo. Insgesamt konnte an neun Tagen der Sonnenuntergang beobachtet und fotografiert werden. Wichtig ist ein gleichbleibender Aufnahmeort, in diesem Fall ein Standort im Garten des Urlaubsdomizils am Hang eines kleinen Hügels. Von dort war der Bereich des Meereshorizontes, in den die Sonne im April versinkt, gut einsehbar. In einigen hundert Metern Entfernung stehen Bäume, deren Wipfel bis an die Horizontlinie heranragen. Diese Baumwipfel und auch die Antennen eines in der Baumgruppe befindlichen Hauses wurden als Bezugspunkte für einen späteren Vergleich der Sonnenuntergangsorte auf den Fotografien benutzt.

Es war also darauf zu achten, dass diese Bezugsmarken im Bildausschnitt eines jeden Fotos lagen. Bei der angestrebten Winkelgenauigkeit von einer Bogenminute muss die Beobachtungsposition jeden Tag auf ca. 10 - 20 cm reproduziert werden, da ansonsten die Bezugsmarken um mehr als die gewünschte Winkeltoleranz im Azimuth gegen den Meereshorizont verlagert werden, was die Vergleichbarkeit der einzelnen Bilder bezüglich ihrer azimuthalen Ausrichtung stark verschlechtert.

Bilder der tiefstehenden und versinkenden Sonne entstanden kurz vor dem Aufsetzen der Sonnenscheibe auf die Kimmlinie (den sichtbaren Meereshorizont) und während ihres Versinkens im Horizont. Das Aufsetzen des unteren wie des oberen Sonnenrandes wurde mit dem Fernglas beobachtet. Mit der Armbanduhr, die mit Hilfe der Fernsehrichten synchronisiert und auf ihren täglichen Gang überprüft wurde, ließen sich die Kontaktzeiten des oberen und unteren Sonnenrandes sekundengenau bestimmen. Bei der Fernglasbeobachtung, die bei der im Horizont stehenden und damit stark abgeschwächten Sonne gefahrlos möglich ist, wurde auch auf den Grünen Strahl geachtet und sein Vorkommen notiert.

An einigen Tagen wurde auch die Temperatur gemessen. Da aber eine Bestimmung des Luftdrucks nicht möglich war, wird bei der Auswertung nicht auf die Einflüsse von Luftdruck und Temperatur auf die Refraktion eingegangen.

Die Aufnahmen entstanden mit einem 135 mm - Teleobjektiv. Bei Verwendung einer größeren Brennweite lassen sich natürlich bessere Ergebnisse erzielen, aber im Sinne des Urlaubsgedankens sollten nur jene apparative Möglichkeiten vorausgesetzt werden, die dem „deutschen Standardurlauber“ ohne weiteres zugebilligt werden können. Die Abbildung 1 enthält sechs ausgewählte Aufnahmen, die die Sonne in etwa gleicher Höhe zeigen und im Abstand von jeweils einem Tag (bis auf eine wetterbedingte Lücke) gewonnen wurden. Die freihändig erstellten Aufnahmen wurden am Computer eingescannt und mit einer Bildbearbeitungssoftware beschnitten und so orientiert, dass die Horizontlinie immer waagrecht verläuft und die Bezugsmarken senkrecht übereinanderstehen. Dies gewährleistet eine identische Orientierung der Aufnahmen im

Horizontalsystem, vorausgesetzt die oben geschilderten Anforderungen an den Beobachtungsstandort wurden eingehalten.

Die Verlagerung der Sonnenbahn um ein merkliches Ausmaß von ca. $0,4^\circ - 0,5^\circ$ pro Tag nach Norden ist deutlich sichtbar. Die Verlagerung im Azimuth hängt zum einen von der Beobachtungsposition ab (höher im Norden schneidet die tägliche Sonnenbahn flacher in den Horizont, so dass sich gleiche Unterschiede in der Deklination in größeren Azimuthschritten äußern, als das für Italien der Fall ist), zum anderen von der Jahreszeit.

Während der Sonnenwenden ist die Veränderung der Deklination von Tag zu Tag gering und im Rahmen der möglichen Genauigkeit auch im Azimuth unmerklich. Während der Äquinoktien, wenn die tägliche Deklinationsänderung der Sonne mit ca. $0,40^\circ$ maximal ist, verlagert sich die Sonnenbahn am Beobachtungsort im Azimuth um ca. $0,55^\circ$. Der Abbildung 1 kann eine etwaige tägliche Azimuthverlagerung von $0,45^\circ$ entnommen werden, wenn als Winkelmaß die waagerechte Erstreckung der Sonnenscheibe von $0,53^\circ$ zugrundegelegt wird.

Bereits ohne die genaue Kenntnis der Aufnahmedaten lässt sich damit schlussfolgern, dass die Aufnahmeserie kurz vor oder nach dem Frühlingsäquinoktiums entstand, wenn die maximalen täglichen Azimuthschritte nicht ganz erreicht werden und der Sonnenuntergangsort sich in nördlicher Richtung verlagert.

Bestimmung der Kimmtiefe

Alle gelungenen Zeitmessungen des Kontaktes des Sonnenunter- und Oberrandes sind in der Tabelle 1 eingetragen. Mit Hilfe der Zeitangaben lässt sich mit einer astronomischen Software zur Berechnung der Ephemeriden die jeweilige Deklination der Sonnenmitte berechnen. Zusammen mit der Kenntnis der geografischen Koordinaten des Beobachtungsortes (siehe Tabelle 1) sind dann alle Größen zur Berechnung der Horizontalkordinaten der wahren Sonne gegeben. Die Berechnung dieser Größen gehört zum Standardrepertoire einer Astronomiesoftware, wie sie z.B. im Fachhandel der Amateurastronomie erworben werden kann.

Wer die Berechnungen selbst durchführen möchte, sei auf die Literatur verwiesen, z.B. [2,3]. Bei der Berechnung der wahren Sonnenposition für einen gedachten Beobachter im Geozentrum wird der lichtbrechende Effekt der irdischen Atmosphäre nicht berücksichtigt. Die geringfügige Horizontalparallaxe der Sonne von $9''$ wird auch ignoriert. Sie führt bei dieser Methode zu keinen messbaren Auswirkungen.

Das Ergebnis der Berechnung ist eine eigentlich unbeobachtbare Sonnenhöhe („wahre Höhe“ bzw. „geozentrische Höhe“), die sich nur dann in der Natur einstellen würde, wenn es keine Atmosphäre bzw. keine Lichtbrechung in ihr gäbe (siehe Abb. 2). Die Lichtbrechung wirkt sich nur auf die Höhe der tatsächlich beobachteten Sonne aus, nicht auf ihr Azimuth.

Der berechnete Wert der Sonnenhöhe soll nun mit dem beobachteten Wert verglichen werden. Die Differenz dieser beiden Höhenwerte gibt sofort Aufschluss über das Ausmaß der Lichtbrechung, denn bei der Beobachtung ist dieser Effekt eingeschlossen, bei der Berechnung wird er ignoriert.

Die tatsächliche Höhe lässt sich durch die Wahl des Beobachtungskriteriums, nämlich das Aufsetzen des Ober- oder Unterrandes der Sonne auf den Meereshorizont, auch ohne Winkelmesser bestimmen. Der sichtbare Meereshorizont verläuft in einem leicht berechenbaren Höhenwinkel, wenn nur die Standhöhe des Beobachtungsortes über dem Meeresspiegel bekannt ist (sog. „Augeshöhe“). Die Winkelhöhe des Meereshorizontes ist immer kleiner Null, da sich die kugelförmige Erde in der Ferne unterhalb einer gedachten, mit der Wasserwaage eingerichteten Horizontebene wegkrümmt. Je höher der Beobachter steht, desto tiefer vermag er auf den entfernten Rand der Erdkugel hinabzublicken. Die Formel zur Ermittlung der Kimmtiefe, der negativen Höhe des Meereshorizontes, lässt sich geometrisch ableiten. Die Abbildung 3 zeigt die Beziehung der relevanten Größen Erdradius R , Augeshöhe H , Kimmentfernung S und Kimmtiefe K untereinander. Ausgewertet wird das Dreieck in Abbildung 3 b, welches aus der Erdmitte, dem angepeilten Horizontpunkt und dem Beobachtungsort B besteht. Die Kimmentfernung S

berechnet sich näherungsweise zu $S \approx K \cdot R$. Die Kimmtiefe K ist auch der Winkel zwischen der Hypotenuse des rechtwinkligen Dreiecks (Verbindung Beobachter – Erdmitte, Länge $R + H$) und der Kathete, die von der Erdmitte an den Horizontpunkt ragt (Länge R). Die elementare Trigonometrie liefert:

$$S^2 + R^2 = (H + R)^2$$

mit $S \approx K \cdot R$ gilt

$$R^2(K^2 + 1) = (H + R)^2$$

\Leftrightarrow

$$K^2 = \left(\frac{H + R}{R} \right)^2 - 1 = \frac{H^2 + 2HR}{R^2} = H \cdot \left(\frac{\frac{H}{R} + 2}{R} \right)$$

\Leftrightarrow

$$K = \sqrt{H} \cdot \sqrt{\frac{\frac{H}{R} + 2}{R}} \approx \sqrt{2H/R}$$

mit $R = 6371 \text{ km}$ (Erdradius) folgt

$$K \approx 1,93' \cdot \sqrt{H[\text{in m}]}$$

Trägt man noch der kleinen Anhebung der Kimm durch die terrestrische Refraktion Rechnung (angedeutet in Abbildung 3 c), erhält man folgendes Endergebnis:

$$K \approx 1,78' \cdot \sqrt{H[\text{m}]}$$

Ist nun die Höhe des Beobachtungsstandortes bei einem etwaigen Wert von 60 m nur auf +/- 10 m bekannt, so äußert sich dies in einem Fehler in der Kimmtiefe von rd. 1 Bogenminute. Im hier geschilderten Fall ist die Höhe des Standortes der Wanderkarte noch nicht mal mit dieser Toleranz zu entnehmen, und die Ermittlung eines exakten Höhenwertes aus einer topographischen Karte hätte den Weg zum örtlichen Vermessungsamt notwendig gemacht; ein Umstand, den man sich zumindest im Urlaub ersparen sollte. Die Kimmtiefe muss deshalb auf einem anderen Wege ermittelt werden.

Mit der vorausgesetzten „Standardurlauberausrüstung“ geschieht dies auf folgende Weise. Man fotografiert die Sonne etwa eine Stunde vor ihrem Untergang wenn sie noch in einer Höhe von ca. 5°-10° über dem Horizont steht. Die von Ort zu Ort variablen Effekte der Refraktion im Horizont, die es hier zu untersuchen gilt, haben sich in dieser Höhe längst verflüchtigt, so dass bei der späteren Auswertung ein allgemein gültiger Standardwert für den kleinen Refraktionseinfluss der Sonne in dieser Höhe gewählt werden kann.

Die Aufnahme erfolgt in Richtung der noch hell strahlenden Sonne, so dass die Sonne abgeblendet werden muss, ohne dass der Meereshorizont unkenntlich wird. Dies kann durch die Überdeckung des Objektivs mit einem unbelichteten entwickelten Streifen Diafilm geschehen. Bei starker Ablendung des Objektivs und der zusätzlichen Teilüberdeckung mit dem dunklen Filmstreifen gelingt eine Aufnahme, die sowohl die Sonnenscheibe als auch den Horizont auf den Film bannt. Der sekundengenaue Aufnahmezeitpunkt wird wieder notiert. Die Abbildung 4 zeigt eine solche

Aufnahme, die bereits mit Hilfslinien zur Bestimmung der wirklichen Sonnenhöhe über dem Horizont versehen ist. Als Winkelmaß wird wieder der Sonnendurchmesser gewählt. Die Berechnung der Sonnenhöhe mit Refraktion geschieht schnell mit einer Astronomie-Software oder der oben angeführten Höhenformel. Der Beobachtungsort und die Aufnahmezeit sind ja bekannt. Eine gute Astronomie-Software wird die Refraktion mitberücksichtigen. Bei der eigenhändigen Berechnung schlägt man dem erhaltenen wahren Höhenwert noch den Refraktionswert zu, der für den berechneten Höhenwert H_w (wahre Höhe) mit folgender Formel ermittelt wird [2].

$$R = \frac{1,02'}{\tan\left(H_w + \frac{10,3}{H_w + 5,11}\right)}$$

Die drei auswertbaren Aufnahmen nach Art der Abbildung 4 liefern Ergebnisse für die Kimmtiefe von 13, 14 und 15 Bogenminuten. Die aus der Not entstandene fotografische Kimmtiefenbestimmung ist damit nicht so genau wie die Zeitmessung der Sonnenkontakte auf dem Meereshorizont, so dass die ursprüngliche Absicht, eine Präzision von 1 Bogenminute zu garantieren, nicht mehr ganz erfüllt werden kann.

Bestimmung der Erdgröße aus der Kimmtiefe

Mit dem experimentell ermittelten Wert von $14' \pm 1'$ wird gleich der Wert der Horizontrefraktion bestimmt. Zuvor aber noch der Hinweis, dass sich aus der fotografisch gewonnenen Kimmtiefe die Erdgröße berechnen lässt, wenn auch die Augeshöhe bekannt ist. Vielleicht weiß der Vermieter ja um diesen Höhenwert! Man sollte ihn danach fragen, um mit der oben abgeleiteten Formel für die Kimmtiefe $K \approx \sqrt{2H/R}$, die nach dem Erdradius umzustellen ist, die Größe unseres Planeten zu ermitteln. Im hier geschilderten Fall ließ sich die Höhe des Standortes über dem Meeresspiegel anhand der spärlichen Höhenlinien der Wanderkarte grob zu 100 m schätzen. Damit erhält man für den Erdradius den Wert von 12000 km, der um ca. 50% daneben liegt, aber zumindest die richtige Größenordnung liefert. Setzt man den Erdradius als bekannt voraus und verwendet die fotografische Kimmtiefe, so erhält man eine Augeshöhe von ca. 60 m.

Bestimmung der Horizontrefraktion

Die Kimmtiefe von $14'$ ist die Höhe des Sonnenober- oder -unterrandes zum Zeitpunkt des jeweiligen Kontaktes. Die zu diesem Zeitpunkten berechneten Höhenwerte der Sonne (ohne Refraktion) gelten für die Mitte der Sonne. Dies ist noch zu beachten, wenn nun für jeden Messwert nach $R = K - H_w \pm \text{Sonnenradius}$ die Refraktion bestimmt wird. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 eingetragen. Die Daten der zweiten Zeile wurden mit einem Ephemeridenprogramm berechnet. Sie können auch einem astronomischen Jahrbuch entnommen werden. In Spalte 3 und 4 sind die Berechnungsergebnisse für die wahre Höhe des Sonnenunter- und -oberrandes eingetragen. Diese Werte sind wegen der präzisen Zeitbestimmung mindestens auf eine Bogenminute genau. Die Ergebnisse für die Refraktion findet man in den Spalten 5 und 6. Da die Kimmtiefe in die Rechnung eingeht, sind auch die Endergebnisse höchsten auf eine Bogenminute genau; vermutlich liegt der Fehler eher bei 2 Bogenminuten.

Die Schwankung der Horizontrefraktion von Tag zu Tag ist erstaunlich gering und die Beobachtungen des Unterrandes führen mit einer Ausnahme zu den gleichen Ergebnissen wie die Oberrandbeobachtungen. Der Grüne Strahl, der im Moment des völligen Versinkens oft emporsteigt, macht bei der Oberrandmessung die genaue Festlegung eines Kontaktes schwierig. Im Falle der Unterrandbeobachtungen wird die Zeitnahme durch eine evtl. „Fußbildung“ der

aufsitzenden Sonne erschwert, wenn ihr unmittelbar vor dem Kontakt von der Kimm eine Lichtbrücke entgegenwächst. Dieses Phänomen, das an manchen Tagen zu beobachten ist, macht dann die sekundengenaue Bestimmung der Kontaktzeiten unmöglich. In diesen Fällen ist neben der Kontaktzeit auch der Beginn des Phänomens der „Fußbildung“ in Klammern notiert. Verwendet man diesen Klammerwert zur Berechnung der Refraktion, so ergibt sich ein Refraktionswert, der ebenfalls wieder in Klammern angegeben ist.

Der mittlere Wert von $37' \pm 2' = 0,62^\circ \pm 0,03^\circ$ liegt etwas über den in der Literatur zu findenden Standardwerten von $0,55^\circ - 0,57^\circ$ (siehe [1] und die darin enthaltenen Angaben). Die fragwürdige Kimmtiefenmessung, die auf nur drei Aufnahmen beruht und den Sonnendurchmesser mit einem nur unscharf abgebildeten Sonnenrand als Maß für eine Winkelmessung von ca. 10 Sonnenscheiben benutzt (siehe Abb. 4), mag die Ursache dieser Abweichung sein.

Bemerkenswert an den hier erhaltenen Ergebnissen für die Horizontrefraktion ist die große Übereinstimmung der Werte über den gesamten Beobachtungszeitraum. Schaefer und Liller [1] bestimmten auf analoge Weise die Horizontrefraktion für verschiedene Orte und erhielten zum Teil stark schwankende Werte, die in einigen Fällen, z.B. Hawaii und Cerro Tololo, von Tag zu Tag stark veränderlich waren und zwischen Extremwerten von $0,27^\circ$ und $1,11^\circ$ lagen (Hawaii). Die Abbildung 5, die aus [1] entnommen ist, zeigt die Messwerte für die sieben verschiedenen Beobachtungsorte von Schaefer, Liller und anderen. Die Grafik wurde um ein gleichartiges Diagramm für die sechs Oberrandmessungen von San Vincenzo ergänzt.

Bei einzelnen Orten schwanken die täglichen Werte der Messungen von Schaefer und Liller um ca. $0,2^\circ$ um den Mittelwert. Die Mittelwerte der sieben Beobachtungsorte liegen im Bereich von $0,3^\circ$ bis $0,7^\circ$. Bei besonders hoch liegenden Beobachtungsorten ist eine stärkere Schwankung zu erwarten, weil wegen der dann großen Kimmtiefe die Sonne erst tief unterhalb des mathematischen Horizontes im Meer versinkt und die Refraktion und ihre Schwankung bei Tiefstständen extremal werden. Diese plausible Grundannahme bestätigt sich für Cerro Tololo (2215 m), nicht jedoch für Hawaii, wo der Extremwert von $1,11^\circ$ bei einer Messung in 40 m Augeshöhe erhalten wurde und die zwei Beobachtungen vom Mauna Kea (4205 m) zu sehr kleinen Werten ($0,27^\circ$ und $0,49^\circ$) führten.

Schaefer und Liller ermittelten, dass diese Schwankungen durch Inversionswetterlagen mit unüblicher vertikaler Schichtung von atmosphärischen Lagen unterschiedlicher Temperatur begründet sein können. Ein Computerprogramm, das dies berücksichtigt, vermag die starken Schwankungen gut zu erklären [4]. Das gänzliche Fehlen starker Schwankungen bei bestimmten Beobachtungsorten trotz vieler gelungener Messungen (z.B. Vina del Mar mit 77 Messwerten), ist im Lichte dieser Überlegungen aber wiederum auffällig. Bei der Beobachtung von diesem Ort stellte sich innerhalb enger Grenzen von $0,05^\circ$ (Standardabweichung) ein Mittelwert von $0,51^\circ$ ein. Offenbar hängt die Schwankung der Refraktion auch vom Beobachtungsort und den dort anfindbaren allgemeinen meteorologischen Konditionen stark ab, und insofern kann eine Messreihe mit ortsüblichen Refraktionswerten durchaus einen Beitrag auf dem bislang wenig erforschten Gebiet der horizontnahen Lichtbrechungseffekte und ihrer Abhängigkeit von lokalen Gegebenheiten liefern. Auch die Häufigkeit des Grünen Strahls im Moment des letzten Verschwindens der Sonne hängt nach Schaefer und Liller stark vom Beobachtungsort ab.

Aus der hier vorgestellten Messreihe lässt sich folgern, dass San Vincenzo an der etruskischen Riviera in Italien - gerühmt für seine schönen Sonnenuntergänge! - ein Ort mit gering schwankender Horizontrefraktion von durchschnittlich $0,62^\circ$ ist und das Phänomen des Grünen Strahls häufig auftritt.

Verlängerung des lichten Tages durch die Refraktion

Die Messaufnahmen zur Bestimmung der Kimmtiefe eignen sich ebenfalls zur Bestimmung des Azimuthes der Bezugsmarken im Vordergrund (Baumwipfel und Antennen; Abb. 4). Die Astronomie-Software liefert nach der Eingabe des Beobachtungsortes und der Beobachtungszeit sofort das Azimuth der Sonnenmitte. Fällt man das Lot der Sonnenmitte auf den Meereshorizont und verwendet man die Winkelgröße der Sonne wieder als Maß für die Bestimmung von allen Winkeldistanzen auf der Fotografie, ist der Absolutwert der Bezugsmarkenazimuthe schnell errechnet.

Mit den Werten für die Kimmtiefe und die Bezugsmarkenazimuthe lässt sich der Bildausschnitt einer Sonnenuntergangsfotografie dem Horizontal- und Äquatorialsystem für San Vincenzo anpassen. Die Formeln der Sphärischen Astronomie ermöglichen nun die Berechnung einer Sonnenbahn mit oder ohne Berücksichtigung der Refraktion für den fraglichen Bildausschnitt¹.

Am Computer lässt sich die berechnete Bahn mit Hilfe der Bezugsmarken auf die Fotografie montieren und mit der tatsächlich beobachteten Sonnenbahn vergleichen. Die Abbildung 6 zeigt das Resultat. Dargestellt ist eine Fotosequenz des Sonnenuntergangs am 17. April 2001. Die weißen Linien markieren die Bahn der wahren Sonne, wie sie zu beobachten gewesen wäre, wenn es keine Lufthülle bzw. keine Lichtbrechung gäbe. Die grauen Linien, die die Sonne flankieren, entstammen ebenfalls der Berechnung. Zu ihrer Ermittlung wurde eine gebräuchliche Refraktionsformel zugrundegelegt (z.B. [2,5]). Den Punkten der weiß gezeichneten wahren Sonnenbahn wurde dann der rechnerische Refraktionswert zugeschlagen. Es zeigt sich eine – im Rahmen der Genauigkeit des Verfahrens – sehr gute Übereinstimmung der berechneten und beobachteten Sonnenbahn.

Die Abbildung 7, ein Ausschnitt der Abbildung 6, kann nun zur Bestimmung der etwaigen Verlängerung des lichten Tages für den Beobachtungsort und das -datum herangezogen werden. Dazu wird jeweils der Untergangspunkt des Sonnenoberrandes der wahren und der scheinbaren Sonne festgelegt, und deren Winkelabstand entlang der Bahn der wahren Sonne (weiße Linien) in Einheiten des Sonnendurchmessers abgeschätzt. Für die Wanderung einer Strecke, die ihrem eigenen Durchmesser entspricht, benötigt die Sonne ca. 2 Minuten². Da beide Untergangspunkte, der wahre und der scheinbare, längs des Stundenkreises um etwa einen Sonnendurchmesser auseinander liegen, bleibt die Sonne aufgrund der Lichtbrechung in der Lufthülle ca. zwei Minuten länger sichtbar, als wenn es keine Lichtbrechung gäbe. Die gleiche Überlegung gilt auch für den Sonnenaufgang auf der Ostseite des Himmels, so dass der lichte Tag in San Vincenzo um ca. 4 Minuten länger andauert als eine Sphärische Astronomie, die nur „wahre“ Gestirnspositionen kennt, vorgibt.

So beurteilt, besitzt der Ausdruck „Äquinoktium“, also „Tag-Nacht-Gleiche“, für jene Tage, an denen die wahre Sonne auf dem Himmelsäquator steht, keinen praktischen Sinn, denn die Refraktion bewirkt die Verlängerung des lichten Tages (Sonnenmitte über dem wahren Horizont mit Höhe 0°) um einige Minuten auf Kosten der Nacht (Sonnenmitte unterhalb des wahren Horizontes).

¹ Die berechneten Koordinaten der Sonnenbahn wurden noch einer Zentralprojektion mit der Fotomitte als Projektionszentrum unterzogen, denn die Fotografie stellt eine Abbildung der Himmelskugel auf die Filmebene dar. Es zeigt sich aber, dass bei der Verwendung eines Objektivs mit 135 mm Brennweite der Bildausschnitt nur einige Winkelgrade umfasst und sich die durch die Zentralprojektion bedingte Verzerrung der Koordinatenlinien und der berechneten Sonnenbahn hier kaum auswirkt, so dass auf die Zentralprojektion der Berechnungsergebnisse in diesem Fall auch verzichtet werden kann.

² Dies gilt streng genommen nur für die äquinoktiale Sonne. Die Sommer- oder Wintersonne benötigt für diese Strecke bis zu 10 Sekunden länger. Wegen der einfachen Abschätzung anhand der Abbildung bleibt dies hier unberücksichtigt.

Literatur

[1] B. E. Schaefer & W. Liller: Refraction near the Horizon; Publ. Astr. Soc. Pac. 102, 796 – 805, July 1990

[2] J. Meeus: *Astronomical Algorithms*; 2nd ed., William Bell 1990, p. 106

[3] H. Karttunen, P. Kröger, H. Oja, M. Poutanen, K. J. Donner (Hrsg.):

Astronomie – Eine Einführung; Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York 1987

[4] B. E. Schaefer: Refraction by Earth's Atmosphere; *Sky & Telescope*, March 1989, 311 - 313

[5] A. D. Wittmann: Astronomical refraction: formulas for all zenith distances; *Astron. Nachr.* 318 (1997) 5, 305 – 312

[6] Die Berechnungen wurden mit der Astronomie-Software *The Sky 4.0* durchgeführt.

Tabelle 1: Messdaten der Sonnenuntergangszeiten

Beobachtungsort: San Vincenzo / Italien (43° 3,4' Nord, 10° 34,6' Ost)

Alle Zeitangaben in MESZ.

Datum	Sonnen- unterrand	Sonnen- oberrand	Temperatur °C	Wetter	Grüner Strahl
8. 4. 2001	19:50:35	19:53:38	-	Regen am Standort, Wolkendecke in 5° Höhe	ja
10. 4. 2001	19:52:55	19:55:55	-	Wolkendecke in 0,3-0,5° Höhe	ja
12. 4. 2001	19:55:17	19:58:17	-	klarer Himmel	ja
16. 4. 2001	19:59:56 einige Sek. früher ?	20:02:50	17,5	extremes Abendrot, diffuse Bewölkung, freie Sicht auf Horiz.	nein
17. 4. 2001	20:01:05 ca. 10s vorher „Fußbildung“	20:04:03	13,4	klarer Himmel, sehr schmaler Wolken- streifen kn. ü. Kimm	ja
19. 4. 2001	20:03:26	20:06:29	14,3	klarer Himmel	nein

Tabelle 2: Auswertung

Scheinbare Höhe H_s der Beobachtung: $-14' \pm 1'$ (Kimmtiefe); Refraktion $R = H_s - H_w$

Berechnung der wahren Höhe H_w mit *The Sky* – Astronomie Software

Datum	Sonnen- deklination & -radius	Sonnen- unterrand wahre Höhe	Sonnen- oberrand wahre Höhe	R(Unterrand)	R(Oberrand)
8. 4. 2001	7° 25' 16'	-35'-16' = -51'	-67'+16' = -51'	37'	37'
10. 4. 2001	8° 10' 16'	-35'-16' = -51'	-67'+16' = -51'	37'	37'
12. 4. 2001	8° 54' 16'	-35'-16' = -51'	-67'+16' = -51'	37'	37'
16. 4. 2001	10° 20' 16'	-35'-16' = -51' (-51 -5s)	-66'+16' = -50'	37' (37' -5s)	36'
17. 4. 2001	10° 41' 16'	-35'-16' = -51' (-50 -10s)	-67'+16' = -51'	37' (36' -10s)	37'
19. 4. 2001	11° 23' 16'	-35,7'-16' = -52'	-68'+16' = -52'	38'	38'

Abbildungsverzeichnis und Bildunterschriften

Abbildung 1:

Vergleichende Darstellung von sechs Sonnenuntergängen im April 2001. Die Aufnahmen entstanden von einem gleichbleibenden Standort und sind anhand der im Vordergrund sichtbaren Bezugsmarken so zusammengestellt, dass sie exakt den gleichen Horizontausschnitt in identischer Kompassrichtung zeigen.

Abbildung 2:

Zur Unterscheidung der wahren und scheinbaren Sonne bzw. Sonnenhöhe. Die Höhenangaben in der Astronomie beziehen sich auf den mathematischen Horizont mit einer Zenitdistanz von 90° . Als „wahre Höhe“ wird der Höhenwinkel bezeichnet, der bei der astronomischen Rechnung, die sich auf das Geozentrum bezieht, herauskommt. Die Refraktion hebt die Sonne scheinbar an (hier übertrieben dargestellt). Die tatsächlich sichtbare Sonne wird deshalb als „scheinbare Sonne“ bezeichnet.

Abbildung 3:

Der erhöhte Beobachter B blickt auf die kugelförmige Erde hinab. Der entfernte Meereshorizont liegt damit tiefer als der mathematische Horizont. Das in 3 b herausgezeichnete Dreieck ermöglicht die Bestimmung der Kimmtiefe K auf geometrischen Weg (siehe Text). Abbildung 3 c verdeutlicht die Einflüsse der terrestrischen Refraktion auf die Lage der Kimm. Das Licht der Kimm erreicht den Beobachter auf gekrümmtem Weg. Der Beobachter sieht sie im Vergleich zur geometrischen Position ein wenig angehoben.

Abbildung 4:

Bei starker Abblendung des Objektivs und zusätzlicher Teilüberdeckung der Objektivöffnung durch einen Filter lässt sich eine Aufnahme gewinnen, die sowohl die hoch stehende helle Sonne und die Kimm scharf abbildet. Ist der Aufnahmeort und -zeitpunkt bekannt, kann man Höhe und Azimuth der Sonne berechnen und anschließend die Kimmtiefe und die Azimuthe der Bezugsmarken bestimmen. Hilfslinien auf der Fotografie ermöglichen eine schnelle Auswertung.

Abbildung 5:

Horizontrefraktion in Grad an acht verschiedenen Orten.

San Vincenzo: diese Arbeit; alle anderen aus Schaefer & Liller, Ref. [1].

Abbildung 6:

Aufnahmeserie der untergehenden Sonne vom 17. 4. 2001 mit berechneten Bahnen der wahren Sonne (ohne Refraktion; weiße Linien) und der scheinbaren Sonne (mit Refraktion; graue Linien). Je tiefer die Sonne steht, desto mehr weicht sie von der Bahn ab, die sich ohne Lichtbrechung einstellen würde. Beim sichtbaren Untergang ist die wahre Sonne längst unter die Kimm herabgesunken.

Abbildung 7:

Die Verlängerung des lichten Tages durch die Horizontrefraktion lässt sich mit Hilfe dieser Abbildung leicht abschätzen. Vergleicht man die Untergangsorte und Stundenkreissegmente des wahren und scheinbaren Sonnenoberrandes, erhält man das für Italien im April gültige Ergebnis einer Verlängerung des lichten Tages beim Untergang als auch beim Aufgang um jeweils ca. zwei Minuten.



Abbildung 1

Die scheinbare und wahre Höhe der Sonne

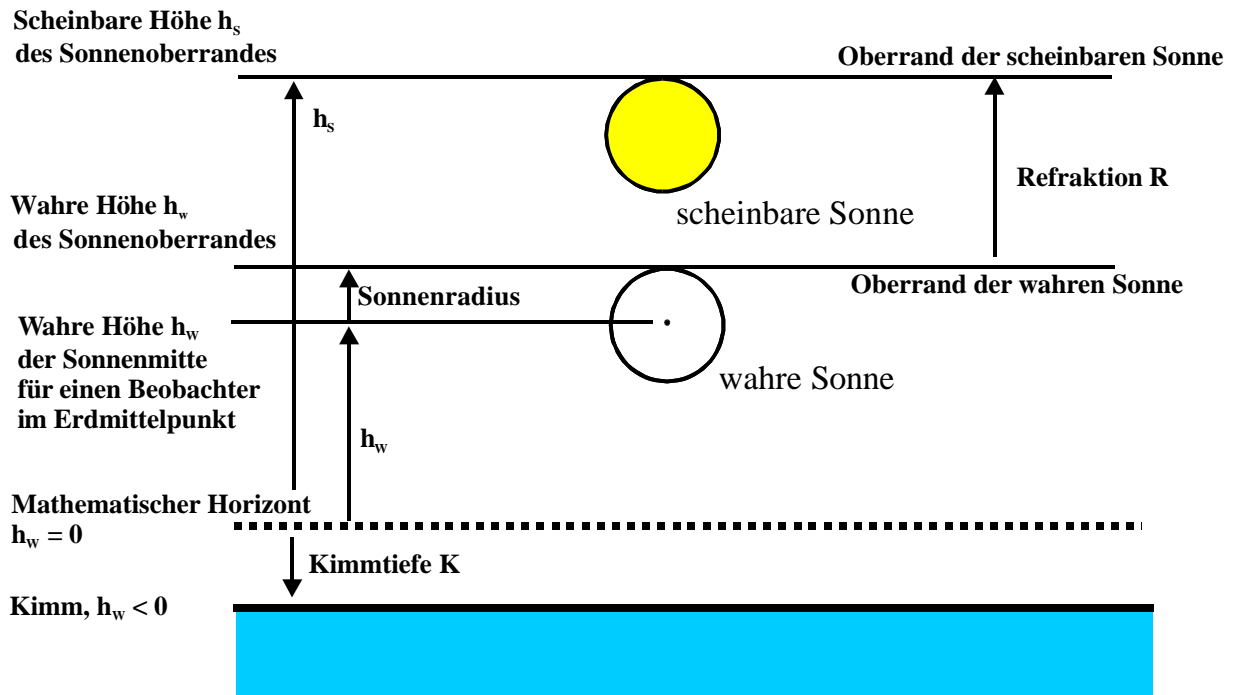


Abbildung 2

Zur Berechnung der Kimmtiefe

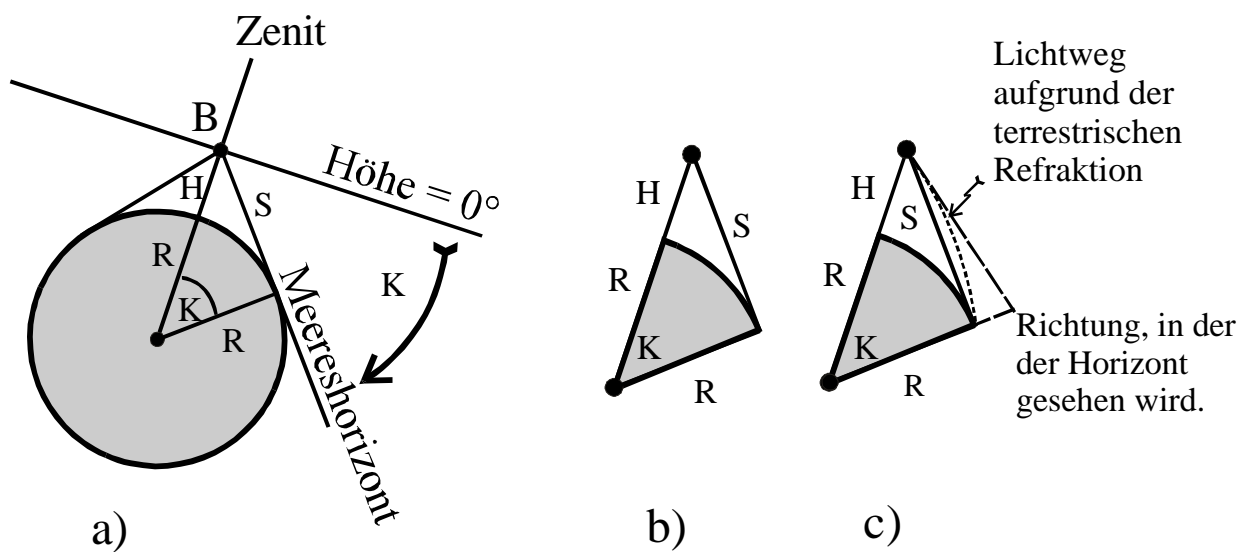


Abbildung 3

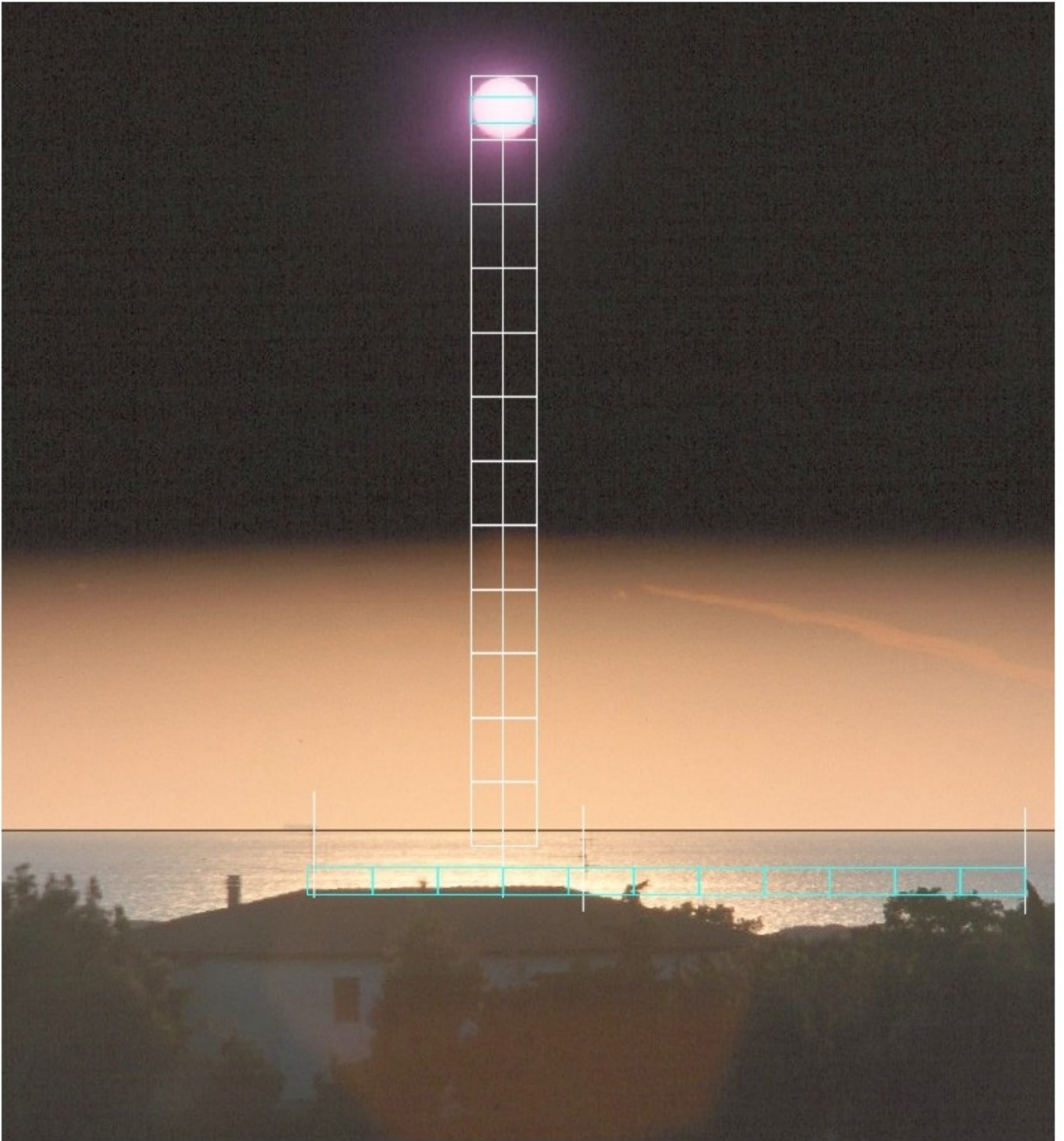


Abbildung 4

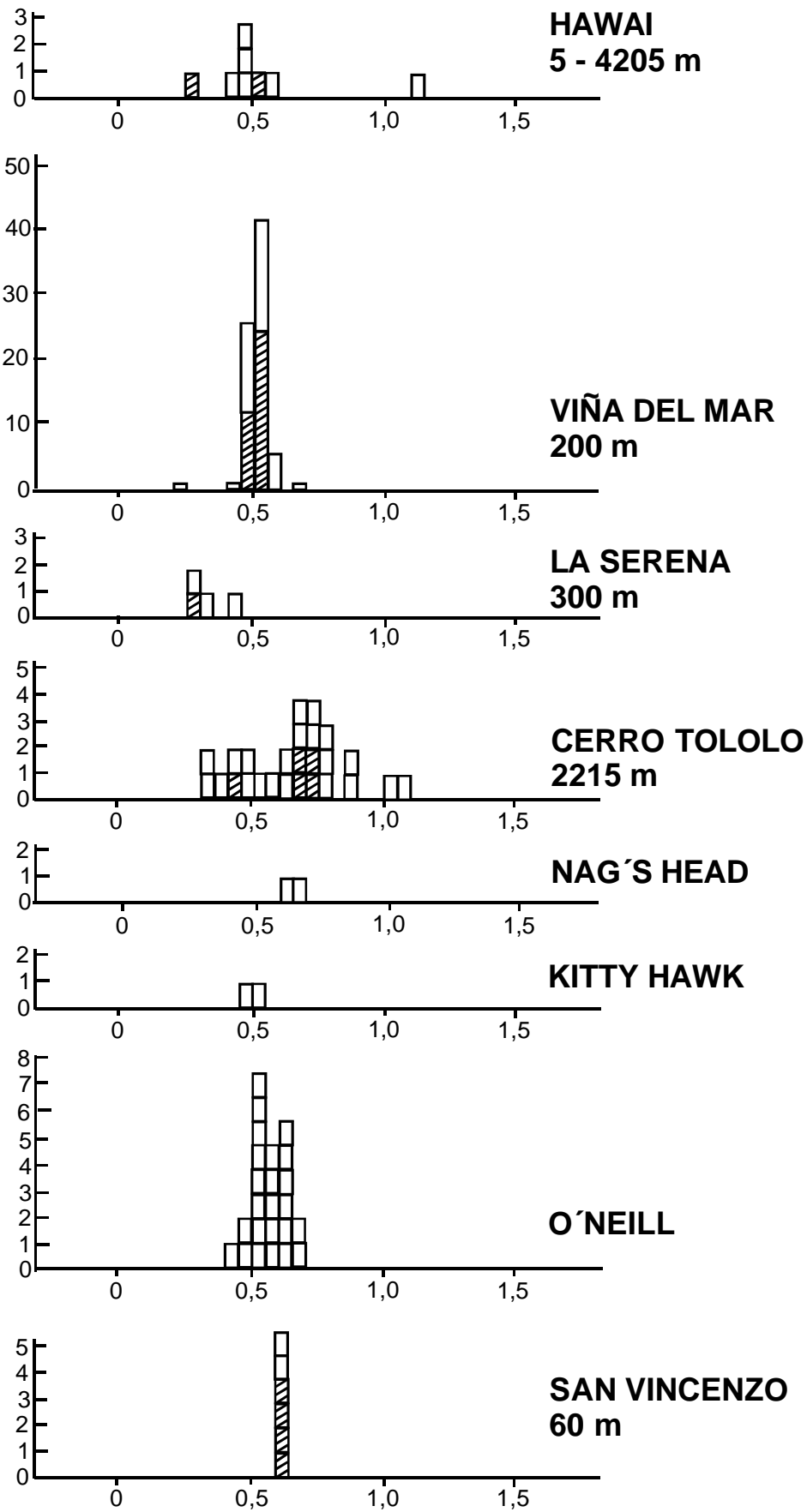


Abbildung 5



Abbildung 6

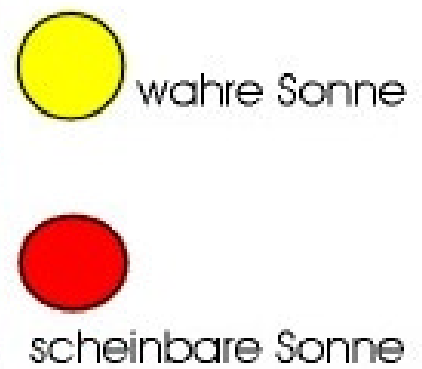
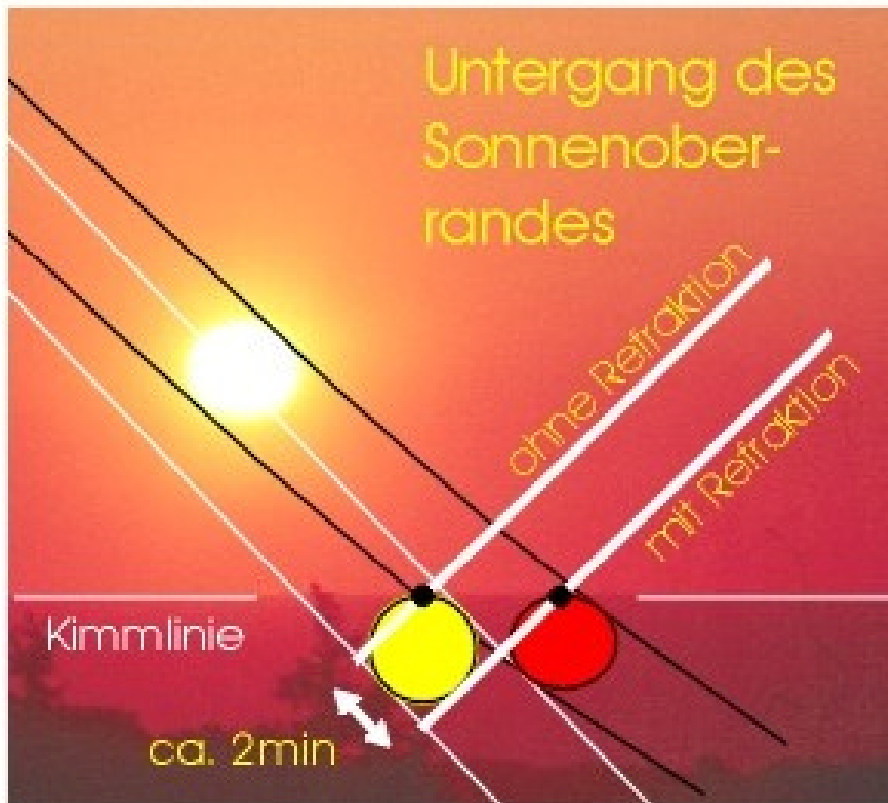


Abbildung 7