

Refraktion in der Venusatmosphäre

Autor(en): **Hugentobler, U.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft**

Band (Jahr): **54 (1996)**

Heft 272

PDF erstellt am: **24.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-898098>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.



Refraktion in der Venusatmosphäre

U. HUGENTOBLER

Wie würde ein Sonnenuntergang auf der Venus aussehen? Die Frage ist doppelt hypothetisch: Erstens ist der Himmel über unserem Nachbarplaneten so wolkenverhangen, dass die Sonne nie sichtbar wird. An der Oberfläche ist es auch tagsüber so trüb wie auf der Erde an einem regnerischen Tag. Und zweitens, wer wollte sich schon in die Hölle auf der Oberfläche unseres Abendsternes verirren. Der Luftdruck am Boden der dichten Kohlendioxidatmosphäre beträgt 90 bar – soviel wie auf der Erde in 900 m Meerestiefe – und ein effizienter Treibhauseffekt sorgt für eine Temperatur von 480° Celsius. Diese extremen atmosphärischen Bedingungen reizen aber gerade zur Frage: Wie verhält es sich mit der Lichtbrechung in der Lufthülle der Venus?

Vergleichen wir zuerst die Venusatmosphäre mit derjenigen der Erde und des Mars.

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Planeten- und Atmosphären-daten für Erde, Venus und Mars einander gegenübergestellt. In Fig. 1 finden wir das mittlere Temperaturprofil als Funktion der Höhe für die Atmosphären der drei Planeten. Die Atmosphären von Venus und Mars werden in zwei verschiedene Temperaturbereiche unterteilt. In der unteren Schicht – in Analogie zur untersten Schicht der Erdatmosphäre Troposphäre genannt – nimmt die Temperatur mit der Höhe ab, bei Venus um rund 10°C pro km.

Dieser Atmosphärenbereich erstreckt sich bei Venus bis auf über 100 km, weit über die kompakte Wolkendecke, welche zwischen 45 und 60 km Höhe liegt. Dort, an der Tropopause, beginnt die Temperatur infolge der Erwärmung durch die Absorption kurzweiliger Sonnenstrahlung mit der Höhe wieder zuzunehmen. Bei Venus ist die Temperatur in dieser Thermosphäre wegen der langsamen Rotation sehr stark von der Tageszeit abhängig. Während die Thermosphäre auf der

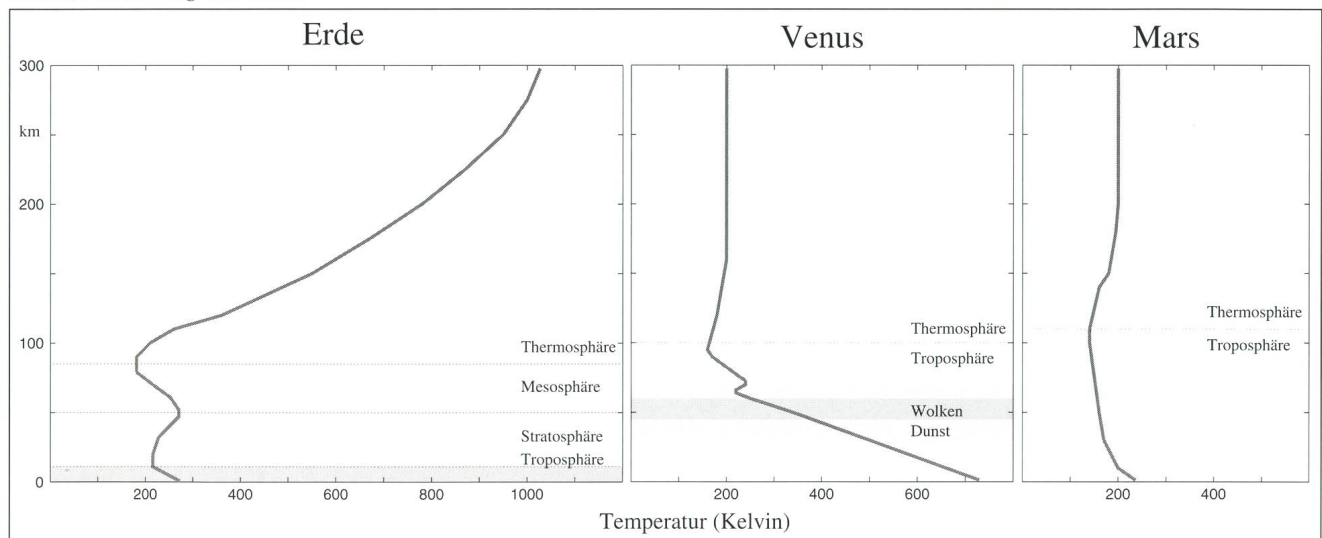
	Erde	Venus	Mars	
Entfernung von der Sonne	1	0.723	1.524	AE
Masse in Erdmassen	1	0.815	0.107	
Durchmesser	12754	12140	6790	km
Schwerebeschleunigung	9.81	8.88	3.73	m/s ²
Hauptbestandteil der Atm.	N ₂ (78%)	CO ₂ (97%)	CO ₂ (95%)	
mittleres Molekulargewicht	29	44	44	amu
mittlere Temperatur	15	480	-60	°C
Druck	1	88	0.0077	bar
Skalenhöhe	8.4	14.9	10.6	km
Dichte	1.23	63	0.016	kg/m ³
Refraktionsindex	1.000277	1.0142	1.0000036	

Tabelle 1: Planetendaten und atmosphärische Bedingungen an der Oberfläche für Erde, Venus und Mars.

Nachtseite kaum mehr nachweisbar ist, kann die Temperatur auf der Tagseite durchaus viele hundert Grad betragen. In Fig. 1 ist der Temperaturmittelwert zwischen Tag und Nacht eingezeichnet.

Auch beim Mars erstreckt sich die Troposphäre bis auf über 100 km und die mittlere Temperatur erreicht dort -130°C. In der Thermosphäre ist die Temperatur abhängig von der Sonnenaktivität, der Sonnendistanz und dem Staubgehalt der Atmosphäre. Aber auch in den unteren Atmosphärenschichten ist das Temperaturprofil stark variabel. So kann beispielsweise in einem Sandsturm die Temperatur bis in 50 km Höhe gleich sein wie am Boden.

Figur 1: Temperaturprofil der Atmosphären von Erde, Venus und Mars als Funktion der Höhe. Die Temperaturen in der Thermosphäre sind Mittelwerte von Tag und Nacht.





Die Atmosphäre der Erde ist komplizierter geschichtet: Die Troposphäre, wo sich das Wetter abspielt, reicht nur bis in rund 10 km Höhe. Darüber nimmt die Temperatur von etwa -60°C wieder bis auf ca. 0°C zu. Der Grund ist die Erwärmung der Ozonschicht in 40 km Höhe durch die Absorption von UV-Strahlung von der Sonne. Nach diesem lokalen Maximum nimmt die Temperatur wieder ab, um oberhalb von knapp 100 km in der Thermosphäre wieder zuzunehmen. Auch bei der Erde ist in dieser Höhe die Temperatur stark abhängig von der Tageszeit und kann mehr als 1000 K erreichen. Die Atmosphäre in dieser Höhe ist aber derart dünn, dass beinahe kein Wärmeübertrag auf einen dort kreisenden Satelliten erfolgt. Die Temperatur der dünnen Luft ist nur noch ein Mass für die Bewegungsenergie der wenigen anzutreffenden Atome und der Wärmehaushalt eines Satelliten wird vollständig durch das Strahlungsgleichgewicht dominiert.

Wenden wir uns nun der Refraktion zu. Die Refraktionseigenschaften eines Gases werden durch den Brechungsindex n beschrieben. Ein Vakuum hat Brechungsindex 1, für nicht allzu dichte Gase ist der Index nur wenig grösser als 1. Die Refraktivität $n-1$ eines Gases ist für eine feste Wellenlänge im wesentlichen proportional zu dessen Dichte. Diese wiederum hängt von der Temperatur (die Dichte ist umgekehrt proportional zur Temperatur) und dem Druck ab (die Dichte ist proportional zum Druck), aber auch vom mittleren Molekulargewicht des Gases. Sind also Druck, Temperatur und Zusammensetzung eines Gases bekannt, so kann der Brechungsindex angegeben werden.

Die Venusatmosphäre ist zwar viel heisser als diejenige der Erde, aber die entsprechende Verkleinerung der Dichte wird bei weitem kompensiert durch den hohen Druck und das höhere Molekulargewicht der Kohlendioxidatmosphäre im Vergleich zur Stickstoff-Sauerstoff-Atmosphäre der Erde. Die Dichte der Atmosphäre an der Oberfläche der Venus beträgt 63 kg/m^3 verglichen mit 1.23 kg/m^3 auf der Erde. Damit ist dort die Dichte 51mal höher, womit auch die Refraktion um etwa denselben Faktor grösser ist. Für nicht zu grosse Zenitdistanzen kann man die folgende, genäherte Refraktionsformel für Venus angeben

$$R = 48.5' \tan z \quad (1)$$

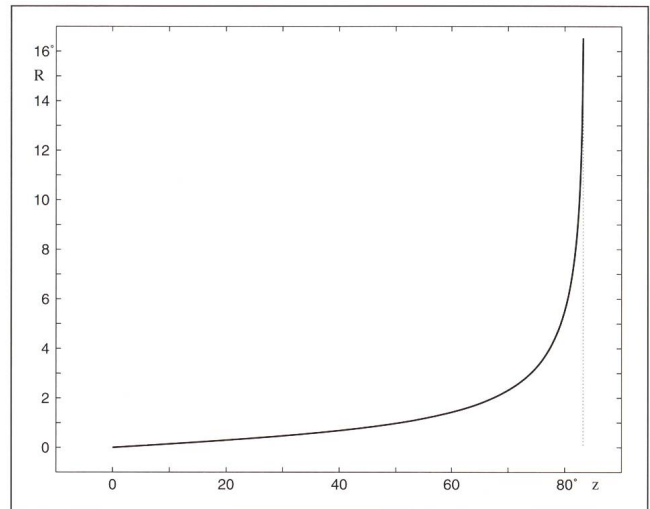
wo z die scheinbare Zenitdistanz bedeutet. Bei der Erdatmosphäre beträgt der Vorfaktor $57''$. Formel (1) zufolge beträgt die Refraktion in der Venusatmosphäre in 45° Zenitdistanz bereits 1.6mal mehr als bei der Erde am Horizont!

Beim Mars beträgt die Atmosphärendichte am Boden nur rund 16 g/m^3 , die Luft ist so dünn wie auf der Erde in 30 km Höhe. Die Refraktion in der Marsatmosphäre ist entsprechend rund 75mal kleiner als in der Erdatmosphäre. Am Horizont auf dem Mars beträgt sie lediglich $13''$. In Tabelle 2 ist die Refraktion für verschiedene Zenitdistanzen auf Erde, Venus und Mars angegeben für mittlere atmosphärische Bedingungen.

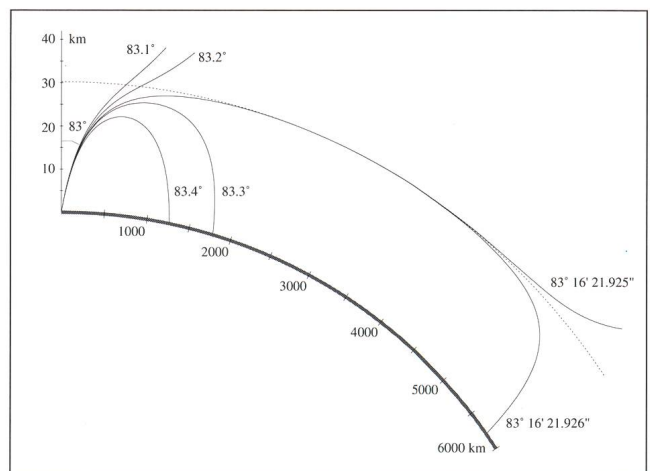
Wie bei der Erde darf auch auf der Venus die Formel (1) nicht für zu grosse Zenitdistanzen verwendet werden, da sie nur für eine planparallel geschichtete Atmosphäre gültig ist. Bis Zenitdistanzen von 55° liefert die Näherungsformel Resultate, welche weniger als eine Bogenminute von der tatsächlichen Refraktion abweichen, bei 70° beträgt die Abweichung aber bereits mehr als $5'$. Nähert sich der Sichtstrahl dem Horizont, so muss für die Berechnung seiner Brechung die Krümmung der Planetenoberfläche berücksichtigt werden und die Dichte der Atmosphäre längs des ganzen Sehstrahles geht in die Rechnung ein.

	scheinbare Zenitdistanz									
	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	
Erde	10.1"	20.8"	33.0"	48.0"	68.1"	98.8"	156"	313"	1980"	
Venus	516"	1066"	1693"	2465"	3510"	5140"	8330"	19900"	∞	
Mars	0.13"	0.27"	0.43"	0.62"	0.88"	1.26"	1.98"	3.78"	13.1"	

Tabelle 2: Refraktion für verschiedene scheinbare Zenitdistanzen auf Erde, Venus und Mars.



Figur 2: Refraktion in der Venusatmosphäre als Funktion der scheinbaren Zenitdistanz. Bei einer Zenitdistanz von rund 83° wird die Refraktion unendlich. Das bedeutet, dass der scheinbare Horizont sich 7° über dem mathematischen befindet.



Figur 3: Wege von Lichtstrahlen, welche bei einem Beobachter aus unterschiedlichen Zenitdistanzen eintreffen. Strahlen, welche aus $z < 83.2^{\circ}$ kommen, stammen von ausserhalb der Atmosphäre während solche aus $z > 83.3^{\circ}$ von einem Punkt am Boden herkommen. Die x-Achse zeigt die Krümmung der Venusoberfläche, während die Höhe 40mal überhöht ist. Die angegebenen Zahlenwerte stimmen nur für eine Wellenlänge und für eine durchsichtige und turbulenzfreie Atmosphäre.



Mithilfe der Temperaturverteilung in der Atmosphäre, des Druckes am Boden und der Schwerebeschleunigung des Planeten sowie der idealen Gasgleichung und der Gleichung für das hydrostatische Gleichgewicht kann die Dichte der Atmosphäre für jede Höhe berechnet werden. Damit hat man auch den Brechungsindex als Funktion der Höhe zur Verfügung und der Weg eines Lichtstrahles durch die Atmosphäre kann durch Integration der entsprechenden Differentialgleichungen berechnet werden (siehe z.B. R. BEHREND, ORION 259, S. 267).

Auf diese Weise erhält man die in Figur 2 dargestellte Refraktionsfunktion, welche für kleine scheinbare Zenitdistanzen z mit der Funktion (1) übereinstimmt. Zwei Dinge fallen auf: Erstens die Einteilung der y -Achse in Grade und zweitens die erstaunliche Tatsache, dass die Refraktion bei etwa 83° scheinbarer Zenitdistanz gegen Unendlich strebt, für den mathematischen Horizont mithin gar keine Refraktion mehr angegeben werden kann.

Was bedeutet eine unendliche Refraktion? In Figur 3 sind verschiedene Wege von Lichtstrahlen durch die Venusatmosphäre dargestellt unter der Annahme, dass diese transparent ist. Die x -Achse gibt die Entfernung von unserem hypothetischen Beobachter an und ist im richtigen Massstab wie die Venusoberfläche gekrümmt. Die y -Achse gibt die Höhe über dem Boden an, allerdings 40fach überhöht. Lichtstrahlen, welche den Beobachter aus einer Zenitdistanz von 83.2° oder weniger erreichen, stammen von ausserhalb der Atmosphäre. (Die «Aufwärtskrümmung» der gezeichneten Lichtstrahlen wird durch die Überhöhung vorgetäuscht). Lichtstrahlen aus Zenitdistanzen grösser als 83.3° hingegen kommen vom Venusboden).

Ein Lichtstrahl von ausserhalb der Venusatmosphäre (wäre sie transparent) kann unseren Venusreisenden an der Oberfläche unter keinem grösseren Zenitwinkel als 83.3° erreichen. Der scheinbare Horizont liegt damit 6.7° über dem mathematischen! Unser Beobachter wird also (bei einer transparenten Atmosphäre) nicht das Gefühl haben, auf einer Kugel zu stehen. Vielmehr hätte er den Eindruck, sich am tiefsten Punkt einer Senke zu befinden. Wo er auch steht, in jede Richtung scheint der Boden mit einer Steigung von $6.7^\circ \approx 12\%$ dem Horizont hinauf zuzustreben, für Radtouren auf der Venus sicher eine psychologische Hürde.

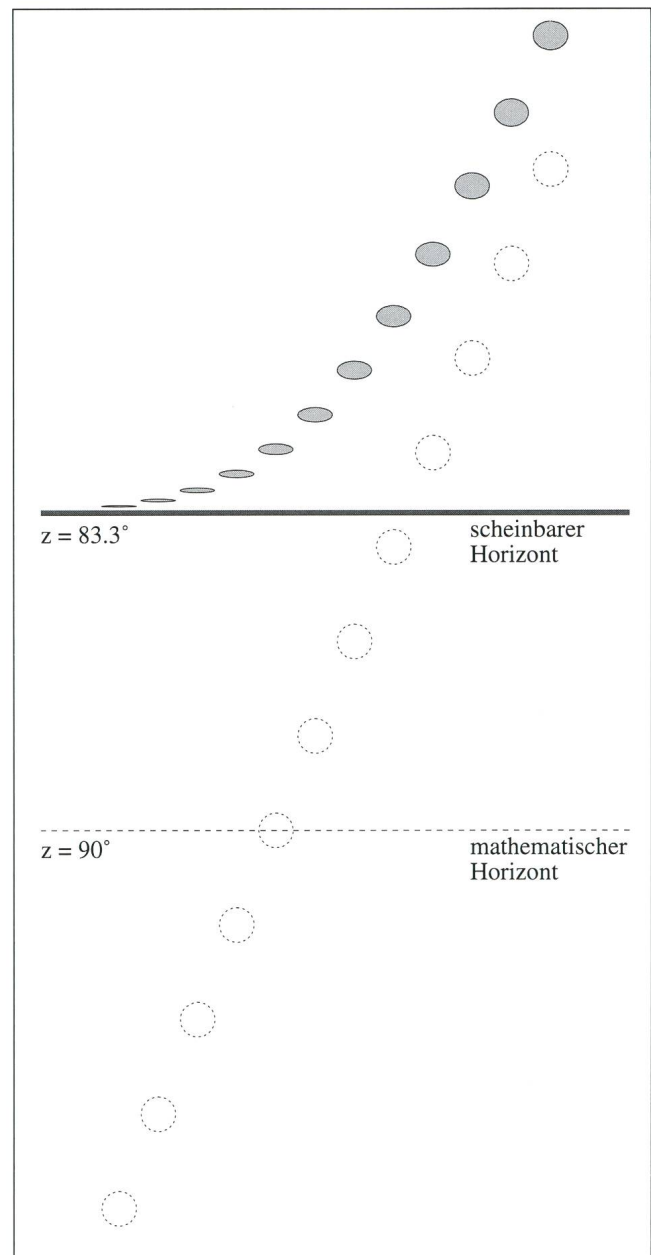
Die Figur zeigt, dass man auf der Venus sehr weit hinter den mathematischen Horizont blicken kann. Der Lichtstrahl, welcher mit $83^\circ 16' 21.926''$ angeschrieben ist, stammt aus einer Entfernung von 5800 km. (Wäre unsere Erdatmosphäre so beschaffen, so könnten wir knapp am Horizont die Küste Neufundlands oder Grönlands sehen.) Ein Lichtstrahl, der beim Beobachter mit einer Zenitdistanz von $83^\circ 16' 21.925''$ eintrifft, kommt aber bereits vom Himmel. (Die genauen Zahlenwerte hängen stark vom gewählten Satz von Parametern für die Venusatmosphäre ab und gelten nur für eine Wellenlänge, das qualitative Bild ändert sich jedoch nicht.) Innerhalb dieser Millibogensekunde, welche zwischen den scheinbaren Zenitdistanzen dieser beiden Lichtstrahlen liegt, drängen sich alle Lichtstrahlen zusammen, die aus noch grösseren Distanzen stammen. Theoretisch kann ein Lichtstrahl sogar einmal oder mehrmals um den Planeten laufen, bevor er beim Beobachter eintrifft. Dieser kann sich also im Prinzip mehrfach multipliziert weit hinten am scheinbaren Horizont erkennen.

Selbstverständlich sind solche Überlegungen nur lustige Gedankenspiele, da neben Absorption und Streuung auch Turbulenzen solche Weitblicke verunmöglichen, ganz abge-

sehen davon, dass sich eine Millibogensekunde auch mit den besten optischen Instrumenten nicht auflösen lässt. Turbulenzen, welche in der heissen Venusatmosphäre viel grösser sind als auf der Erde, werden die Sichtweite auf unter 100 km beschränken. Die Absorption und Streuung verkleinert sie nochmals auf wenige Kilometer.

Wie weit sind wir auf der Erde von einem solchen Zustand entfernt? Die Rechnung zeigt, dass eine Erhöhung des Luftdruckes um weniger als einen Faktor sechs ausreichen

Figur 4: Sonnenuntergang auf der Venus für eine transparent und turbulenzfrei angenommene Atmosphäre. Die einzelnen Bilder zeigen die Sonne in Abständen von 16 Stunden. Gestrichelt sind die Positionen der unrefraktierten Sonne gezeichnet, ausgefüllt die scheinbaren Positionen. Die scheinbare Sonne wird immer flacher, verschwindet aber nicht unter dem Horizont.





würde, um einen Lichtstrahl auf Meereshöhe um die Erde laufen zu lassen. Die Krümmung des horizontal laufenden Lichtstrahles infolge Refraktion wäre dann nämlich gleich der Erdkrümmung, und wir hätten den Eindruck, auf einer flachen Erde zu leben. (Bei speziellen atmosphärischen Bedingungen kann ein solches Phänomen tatsächlich auftreten, siehe z.B. den Artikel von G. FISCHER über die arktische Luftspiegelung im ORION 230, S. 230). Auf Venus sind die Bedingungen 30 km über dem Boden so, dass ein Lichtstrahl um den Planeten laufen könnte (gestrichelte Linie in Figur 3). Eine solche Lichtbahn ist jedoch hochgradig instabil: Kleinste Turbulenzen werden den Lichtstrahl zum Verlassen seiner Bahn bringen, nach oben oder nach unten.

Zurück zur eingangs gestellten Frage: Wie würde ein Venusreisender einen Sonnenuntergang beschreiben, falls die Atmosphäre transparent wäre? Die sehr kleine, retrograde Rotation der Venus von siderisch 243 Tagen ergibt eine Tageslänge (synodische Rotation) von rund 117 Erdentagen. Dies hat zur Folge, dass es auf einer atmosphärenlosen Venus am Äquator fast 5 1/2 Stunden dauern würde, bis die rund 0.7° grosse Sonnenscheibe am Osthorizont untergegangen ist.

Unser Beobachter innerhalb der (transparent angenommenen) Venusatmosphäre berichtet nun aber, dass die Sonne gar nicht untergeht! Vielmehr nähert sie sich dem scheinbaren Horizont immer langsamer und wird dabei immer flacher. In Figur 4 ist dieses Phänomen dargestellt für etwa 20° nördliche Venusbreite. Die gestrichelt gezeichneten Sonnenscheiben repräsentieren das unrefraktierte Sonnenbild im zeitlichen Abstand von rund 16 Stunden. Die grosse

Refraktion führt nun dazu, dass die scheinbare Sonnenscheibe immer flacher wird und sich dem scheinbaren Horizont zwar immer mehr nähert, ihn aber nicht erreicht. Im letzten Bild von Figur 4 ist die wirkliche Sonne bereits 8° unterhalb des mathematischen Horizontes, fast 3 Tage nachdem sie diesen überschritten hat. Das refraktierte Abbild steht jedoch $9'$ über dem scheinbaren Horizont und seine (monochromatische) vertikale Ausdehnung beträgt lediglich noch $2'$ verglichen mit einer horizontalen Ausdehnung von $44'$. Zudem wird die Sonne vertikal in ein $9'$ breites Spektrum auseinandergezogen mit blau oben und rot unten. Infolge Turbulenzen wird sich das Sonnenbild aber lange vorher aufgelöst haben.

Wegen der undurchsichtigen Venusatmosphäre – starke Absorption und Streuung in Bodennähe und dichte Wolkenschichten um 55 km Höhe – lassen sich keine der beschriebenen Phänomene wirklich beobachten. Ein Venusreisender würde wohl mit ganz anderen Eindrücken zurückkehren. Wer hätte aber gedacht, dass die uns Amateurastronomen so wohlbekannt Refraktion Anlass zu solch ungewohnten Phänomenen bieten kann. Um unerwartete und spektakuläre Phänomene zu finden, müssen wir unsere wagemutigen hypothetischen Beobachter also nicht unbedingt auf Neutronensterne schicken oder in Schwarze Löcher stürzen lassen. Schon vor unserer Haustüre finden wir Bedingungen, welche stark gekrümmte Lichtpfade zur Folge haben können. Kommen wir damit aber wieder zurück auf die Erde und geniessen hier einen farbenprächtigen Sonnenuntergang.

URS HUGENTOBLE
Astronomisches Institut, Universität Bern.

Auf den Spuren des Grossen Kometen von 1811

M. GRIESSER

Die Bahn des im vergangenen Sommer entdeckten Kometen «Hale-Bopp» (C/1995 O1), der sich im Frühjahr 1997 zu einem ausnehmend prächtigen Himmelsphänomen entwickeln könnte, zeigt grosse Ähnlichkeiten mit jener des Kometen 1811 I. Dieser ist in den Annalen als eine der eindrucklichsten Kometenerscheinungen der letzten Jahrhunderte verzeichnet. Als er sich im Herbst 1811 mit breitem Schweif am Abendhimmel zeigte, fand er in weiten Kreisen der Bevölkerung ängstliche Beachtung – so auch im Zürcher Oberland. Der Autor ist einigen heute fast vergessenen Aufzeichnungen dieser legendären Himmelserscheinung nachgegangen ...

Glanzvoll am Herbsthimmel

Der Komet 1811 I wurde am 25. März 1811 von *Honoré Flaugergues* (1755 – 1835), einem in Viviers, 50 Kilometer nördlich von Avignon in Südfrankreich, lebenden Friedensrichter und Amateurastronomen, entdeckt. Er bewegte sich damals in den Abendstunden als Objekt 5. Grösse tief am Südhimmel im Sternbild Puppis (Hinterdeck des Schiffes) neben dem wesentlich auffälligeren Grossen Hund. Am 11. April fand ihn unabhängig von Flaugergues der berühmte französische «Kometenjäger» *Jean Louis Pons* (1761-1831).

Das neue Gestirn verhielt sich in den kommenden Wochen unauffällig mit fast gleichbleibender Helligkeit, tauchte nach

dem 16. Juni in die Dämmerung ein und wurde ab dem 20. August über dem Kopf des Löwen mit langsam ansteigender Leuchtkraft am Morgenhimmel weiter verfolgt. Am 12. September erreichte der Komet im südlichen Teil des Grossen Bären sein Perihel in 1.04 AE, wobei die Entfernung zur Erde zum gleichen Zeitpunkt rund 1,6 AE betrug. Anfang Oktober wurde er zirkumpolar und erreichte bei seiner geringsten Erddistanz von 1.1 AE Mitte Oktober im Grenzgebiet der Sternbilder Herkules und Bootes etwa die Helligkeitsklasse 0. Für den 15. Oktober beschrieb ihn William Herschel mit einem 24 Grad langen und etwa sieben Grad breiten gekrümmten Schweif. Zeitgenössische Zeichnungen zeigen den mit blossen Auge sichtbaren Schweif zwar nur rund 15 Grad lang, doch mit aussergewöhnlicher Breite und intensiver Koma.

512 Tage lang sichtbar

Bis zum Dezember wuchs der Schweif am westlichen Abendhimmel auf gegen 70 Grad, verlor dann aber rasch an Leuchtkraft und Länge. Bereits Mitte Januar verabschiedete sich der dann im Wassermann stehende Komet für das unbewaffnete Auge und stand noch vor Ende Monat in Konjunktion zur Sonne. Am 17. August 1812 wurde er schliesslich im Grenzgebiet zwischen dem Steinbock und dem