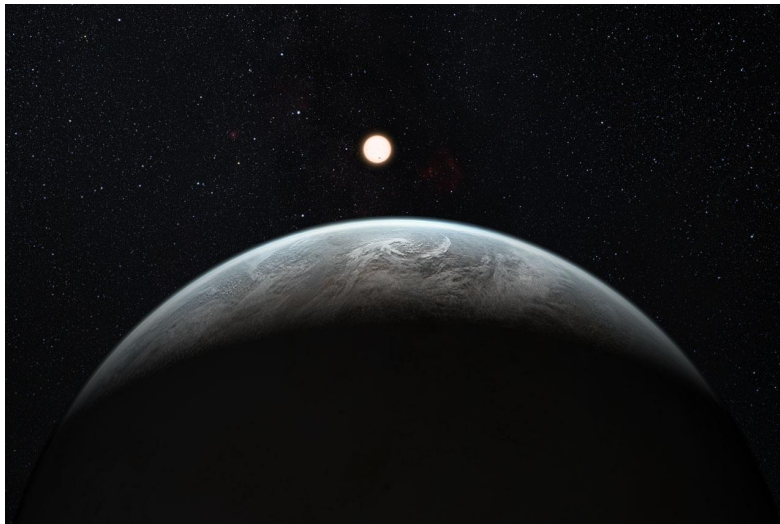


Autor: Dr. Markus Pössel

Auf den Spuren von Leben im All

Ohne Leben auf anderen Planeten kommt kaum eine Science-Fiction-Serie aus. Aber seit es Astronom*innen 1995 erstmals gelungen ist, einen Planeten um einen sonnenähnlichen Stern außerhalb unseres Sonnensystems nachzuweisen, hat die Suche nach Leben auf fernen Planeten eine ganz neue Wendung genommen. Wir kennen mittlerweile mehr als 5500 Exoplaneten, also Planeten, die andere Sterne umkreisen als die Sonne. (Wer die aktuelle Zahl sehen möchte, findet sie auf <https://exoplanet.eu>.) Wie könnten wir herausfinden, auf welchen davon es Leben gibt?

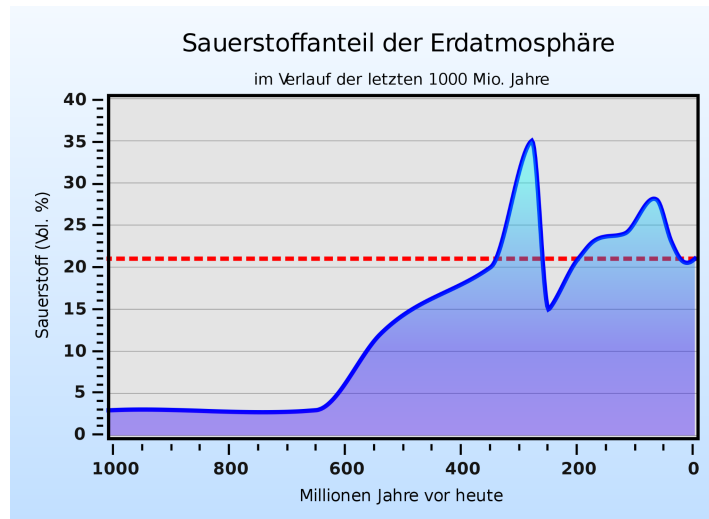


Exoplaneten sind so weit entfernt, dass wir von ihnen keine Detail-Fotos anfertigen können. Ansichten wie diese hier sind künstlerische Darstellungen. Bild: ESO/M. Kornmesser

Wie in Science-Fiction-Filmen wird es wohl nicht gehen. Die Entfernungen im All sind zu groß, als dass wir realistischerweise mit außerirdischen Besuchern rechnen können. Vielversprechender sind da schon die Versuche, Radiostrahlung ferner Zivilisationen aufzufangen ("SETI" – *Search for Extraterrestrial Intelligence*, Suche nach außerirdischer Intelligenz). Aber auch die waren bislang nicht erfolgreich.

Die Suche nach Leben auf Exoplaneten geht anders vor. Die Zusammensetzung der Atmosphäre unseres eigenen Planeten, der Erde, ist aus Sicht der Chemie sehr ungewöhnlich. In den ersten rund anderthalb Milliarden Jahren nach der Entstehung unseres Heimatplaneten gab es so gut wie keinen freien Sauerstoff in der Erdatmosphäre. Dann entstand Leben auf der Erde, darunter frühe Mikroorganismen (Bakterien), die aus Sonnenlicht mit Hilfe von Stoffen wie Kohlenstoffdioxid und Wasser Energie zum Leben gewannen – und dabei Sauerstoff als Abfallprodukt ausschieden.

Auch in der Erdatmosphäre war der Anteil an Sauerstoff anfangs verschwindend gering. Er stieg erst allmählich, ab einer Zeit vor knapp einer Milliarde Jahren dann deutlich stärker an. Ursache war die Entwicklung sauerstoffproduzierender Lebewesen. Eine Rekonstruktion der Entwicklung des Sauerstoffgehaltes in der Erdatmosphäre in der letzten Milliarde Jahren zeigt das folgende Diagramm:

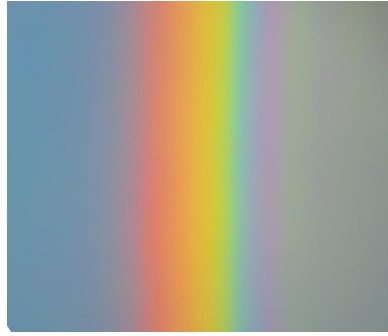


Erst der hohe Sauerstoffgehalt ermöglichte das Aufkommen von Lebewesen wie uns selbst, die Sauerstoff einatmen und aus den anschließenden chemischen Reaktionen Energie zum Leben gewinnen.

Würden umgekehrt außerirdische Forscher*innen die Atmosphäre unseres Heimatplaneten untersuchen, könnten sie aus der chemischen Zusammensetzung darauf schließen, dass es hier lebendige Wesen gibt. Vereinfacht gesagt: Klare Spuren von Sauerstoffmolekülen und insbesondere von Ozon (jeweils gleich drei Sauerstoffatome zu einem Molekül verbunden) in größeren Mengen erwartet man auf einem leblosen Planeten nicht. Dazu reagiert Sauerstoff zu heftig mit allen möglichen anderen Elementen. So viel Sauerstoff in der Atmosphäre gibt es nur, wenn immer wieder Sauerstoff freigesetzt wird – in unserem Falle von modernen Bakterien und von den Pflanzen auf der Erde. Könnten die außerirdischen Beobachter*innen sehen, dass es in der Erdatmosphäre eine so große Menge an Sauerstoff gibt, dann wäre das für sie ein starkes Anzeichen für Leben auf der Erde. Spuren von Wasser(dampf) in der Atmosphäre spricht ebenfalls für eine lebensfreundliche Welt: Wasser ist eine Voraussetzung für jegliche Art von Leben, wie wir es kennen.

Die große Frage ist dann natürlich: Wie kann man über Distanzen von Lichtjahren hinweg denn überhaupt nachweisen, welche chemischen Stoffe eine Atmosphäre enthält? Man kann ja nicht einfach hinfliegen, eine Probe entnehmen und direkt analysieren. Und auf herkömmlichen Fotos ist ja auch nicht direkt zu erkennen, woraus eine Atmosphäre besteht.

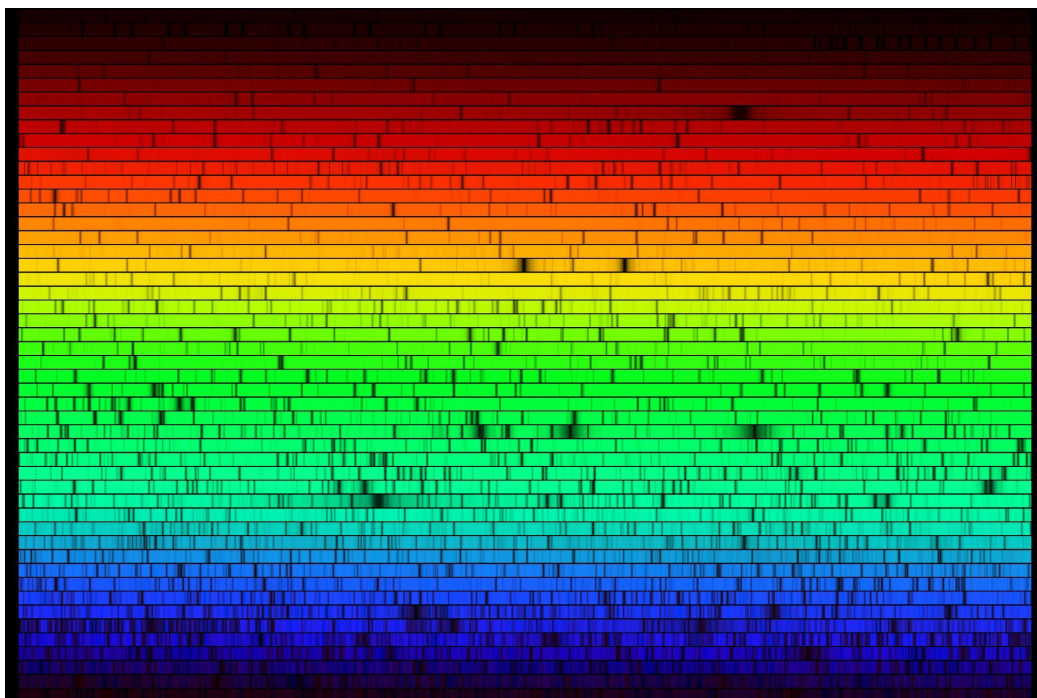
Um zu verstehen, wie wir trotzdem Lebensspuren (Sauerstoff!) in der Atmosphäre von Exoplaneten nachweisen könnten, müssen wir etwas ausholen. Am Anfang steht etwas, das wir alle kennen: in einem Regenbogen ist Licht in seine farbigen Bestandteile aufgespalten. Immer in derselben Reihenfolge sehen wir dort die bekannten Regenbogenfarben, wie in diesem Ausschnitt hier:



Ausschnitt eines Regenbogens (Bildausschnitt).
Nutzer Bautsch auf Wikimedia Commons. Public Domain.

Von links nach rechts können wir dort ausmachen: dunkelrot, hellrot, orange, gelb, grün, hellblau, dunkelblau und violett. Die Reihenfolge der Farben ist nicht zufällig, sondern immer dieselbe. Im Wellenmodell des Lichts kann man dem Licht jeder Farbe des Regenbogens einen Wellenlängenbereich zuordnen. Beim Regenbogen fächern Wassertröpfchen in der Luft das Licht so auf, dass die Anteile mit unterschiedlichen Wellenlängen im Foto an unterschiedlicher Stelle sichtbar werden. Das rote Licht ganz links hat eine Wellenlänge von etwa 780 Nanometer (780 Milliardstel Meter), das violette Licht ganz rechts eine Wellenlänge von etwa 380 Nanometer (380 Milliardstel Meter).

Denselben Effekt kann man mit bestimmten optischen Geräten künstlich erzeugen (etwa Glasprisma, Beugungsgitter). Das in verschiedene Farben bzw. Wellenlängenbereiche aufgefächerte Licht heißt Spektrum. Streckt man das Spektrum über große Teile des Bildes und schaut genau hin, kann man im Spektrum von Sonnenlicht einen interessanten Effekt sehen. Hier ist ein solches langgestrecktes, detailliertes ("hochaufgelöstes") Spektrum zu sehen – viel zu breit um es irgendwo zusammenhängend abzdrukken; der lange Streifen ist deswegen praktischerweise in Teile zerschnitten, die im Bild übereinander sichtbar sind:



Hochaufgelöstes Sonnenspektrum. Bild: N.A. Sharp/KPNO/NOIRLab/NSO/NSF/AURA unter Lizenz [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

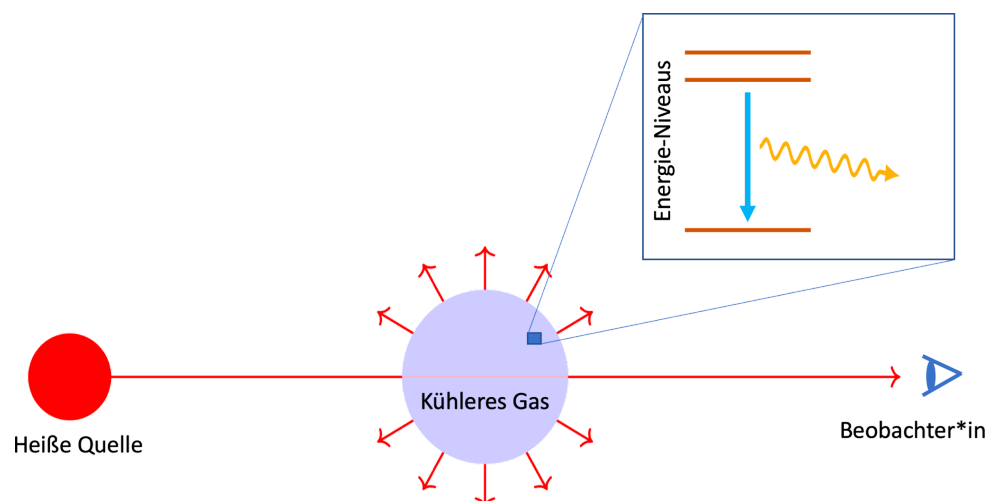
Da sind nämlich nicht einfach farbige Streifen untereinander, sondern zahlreiche dunkle Flecken. Jeder dunkle Fleck ist eine enge Wellenlängenregion – eine "Teilfarbe" – in der uns deutlich weniger Sonnenlicht erreicht als in den Bereichen daneben. Hier ist ein Teilbereich etwas größer abgebildet, aus dem gelben Teil des Spektrums:



Hochaufgelöstes Sonnenspektrum (Ausschnitt). Bild: N.A. Sharp/KPNO/NOIRLab/NSO/NSF/AURA unter Lizenz [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Das ist ein ganzes Muster aus Linien, einige breiter, einige weniger breit; einige sehr dunkel, einige nur ganz schwach zu erkennen. Das Entscheidende daran: Jede Linie, die hier sichtbar ist, gehört zu einer ganz bestimmten Sorte von Atom – einem ganz bestimmten chemischen Element. Und wenn man so ein Spektrum sieht und die entsprechenden Informationen hat, wo welche Linie für ein bestimmtes Element ist, kann man daran ablesen, ob das Gas, dessen Spektrum man da betrachtet, Atome der betreffenden Sorte enthält oder nicht. Die beiden besonders breiten Linien in diesem gelben Bereich gehören beispielsweise zum chemischen Element Natrium.

Was da passiert, ist in der folgenden Abbildung skizziert:

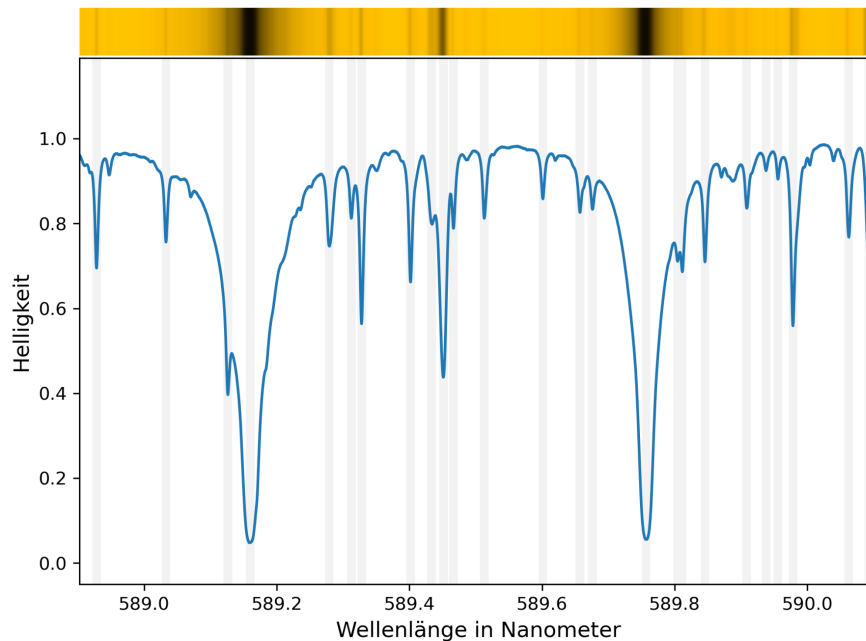


Das Licht einer (heißeren) Lichtquelle kommt von links, aber zwischen der Lichtquelle und der Beobachterin befindet sich ein (kühleres) Gas aus Atomen. Diese Atome absorbieren nur bei ganz bestimmten Wellenlängen. Das hängt mit ihrer inneren Struktur zusammen: Die Elektronen im Atom können nur ganz bestimmte Energiewerte annehmen (sich auf bestimmten "Energie-Niveaus" befinden). Bei diesen Wellenlängen wird das Licht von den Atomen des Gases absorbiert und anschließend in alle Richtungen wieder ausgesandt. Da sich das betreffende Licht dann auf alle Richtungen verteilt, kommt bei Beobachter*innen nur vergleichsweise wenig davon an – im Spektrum sehen Beobachter*innen bei der betreffenden Wellenlänge einen deutlich dunkleren Bereich. Dieser dunklere Bereich ist die Spektrallinie, oder konkreter in dieser speziellen Situation: die Absorptionslinie.

Das gibt uns die Möglichkeit, die chemische Zusammensetzung auch für Gase zu bestimmen, die so weit von uns entfernt sind, dass wir nicht einfach dort hingehen und eine Probe nehmen können! Wir analysieren das Spektrum solch eines Gases und erschließen aus den

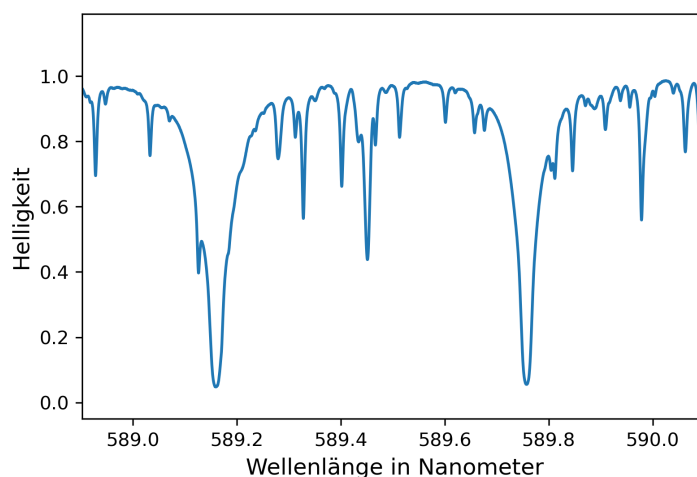
Absorptionslinien, ob eine bestimmte Atomsorte dort vorhanden ist (dann sind auch die entsprechenden Spektrallinien vorhanden!) oder nicht (dann fehlen die entsprechenden Spektrallinien).

Wenn in der Astronomie Spektren gezeigt werden, dann allerdings (leider?) nicht so wie in den farbenfrohen Bildern oben. Stattdessen liegen die Spektren als Diagramme vor. Den Zusammenhang kann man in der nachfolgenden Abbildung recht gut sehen. Sie zeigt wieder denselben Teil des gelben Sonnenspektrums wie oben, diesmal aber zusätzlich noch eine Helligkeitskurve:



Wie man an jenem Bild sehr schön sieht: Überall dort, wo im Foto eine dunkle Fläche ist, ist in der Helligkeitskurve ein (meist eher enger) Einschnitt, an dem die Helligkeit stellenweise deutlich abnimmt.

Wenn die Astronom*innen untereinander kommunizieren und sich Spektren zeigen, dann zeigen sie sich meist nur solche Diagramme, nicht die dazugehörigen Fotos, also in unserem Falle nur jene Kurve hier:

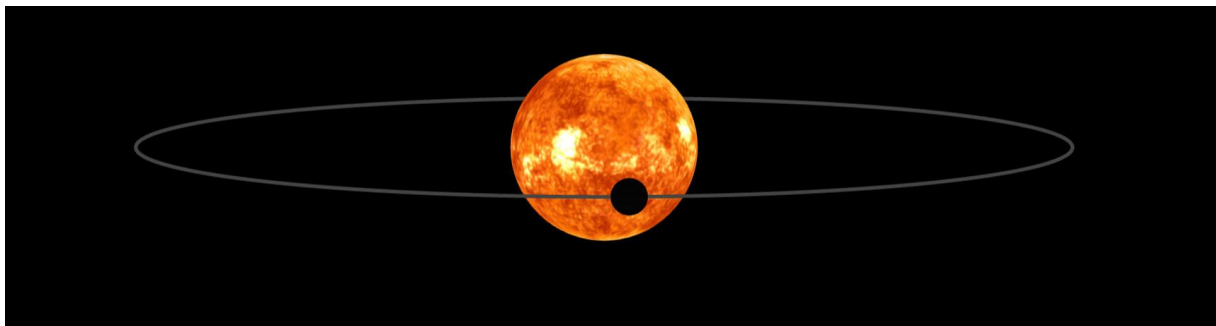


Die Spektrallinien kann man auf solchen Kurven meist sogar deutlich besser erkennen als auf den Fotos – zumindest wenn man weiß, worauf man achten muss.

Eine Möglichkeit, Exoplaneten (indirekt) nachzuweisen, ist die sogenannte Transitmethode. "Transit" bezieht sich dabei auf den Umstand, dass die Exoplaneten-Umlaufbahn in solchen Fällen zufällig so im Raum ausgerichtet ist, dass der Exoplanet aus Sicht irdischer Beobachter*innen immer wieder vor seinem Stern vorbeizieht und den Stern dabei jedes Mal ein bisschen verdunkelt. Die Situation kann man sich in der Transit-Methoden-App veranschaulichen:

<https://astro-apps.org/TransitMethod/index.html>

Hier ein Schnappschuss der App-Darstellung für einen Moment, in dem der Planet gerade (als Silhouette) vor seinem Stern zu sehen ist:



In Wirklichkeit sind Exoplaneten-Systeme viel zu weit entfernt, als dass man solche Bilder aufnehmen könnte. Was man allerdings tun kann, ist, die Helligkeiten von Sternen wieder und wieder ganz genau zu vermessen. In der obigen Situation, wo der Planet direkt davor steht, hat der Stern für irdische Beobachter*innen eine etwas geringere Helligkeit (Verminderung um einige Prozent, Promille oder noch weniger) als wenn der Planet gerade nicht davor steht. Überwacht ein irdisches Teleskop die Helligkeit und trägt man dann die gemessenen Werte gegen die Beobachtungszeit auf, wird deswegen eine Kurve wie diese hier dabei herauskommen:

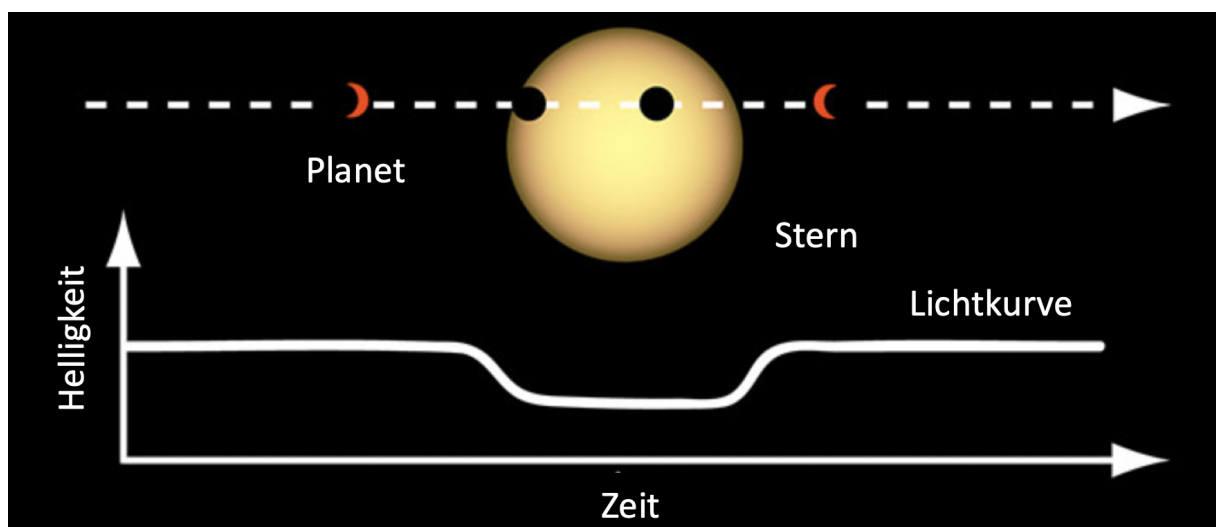
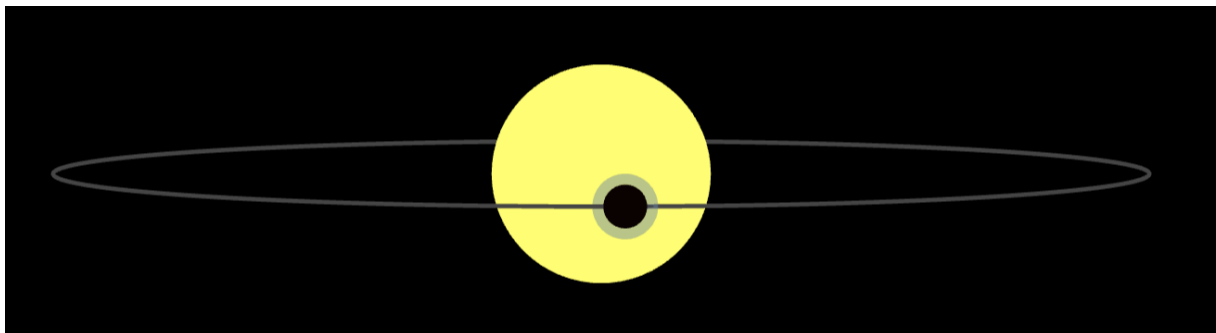


Bild: adaptiert von einer Abbildung der NASA/Ames

Der Helligkeitsabfall, wenn sich der Planet beginnt, vor den Stern zu schieben und der konstante etwas verringerte Helligkeitswert, solange der Planet komplett vor dem Stern steht, sind deutlich zu sehen. Wiederholt sich dieses Muster in regelmäßigen Abständen wieder und wieder, dann ist das ein starkes Anzeichen für die Anwesenheit eines Exoplaneten.

Besitzt der Exoplanet eine (einigermaßen lichtdurchlässige) Atmosphäre, verändert sich die Situation bei einem Planeten-Transit ein wenig. Vorab: Die Atmosphäre eines Planeten wie der Erde hat keine große Ausdehnung – im Maßstab eines handelsüblichen Globus mit 30 Zentimetern Durchmesser wäre die Atmosphäre weniger als einen Millimeter dick. In der oben verlinkten Transit-Methoden-App lässt sich eine vereinfachte Atmosphäre durch Setzen eines entsprechenden Hakens dazuschalten. Zieht der Planet vor seinem Stern vorbei, ist er von einem dünnen, farbigen Ring umgeben: das entsprechende Sternenlicht wird nicht komplett abgeschattet, aber eingefärbt, während es durch die Atmosphäre zur Beobachterin auf der Erde läuft. Könnte man nicht nur eine Helligkeitsmessung vornehmen, sondern die Situation im Detail abbilden (was in der Praxis nicht möglich ist), und wäre die Atmosphäre viel dicker als in Wirklichkeit, sähe das in etwa so aus:¹



Um den Planeten herum sieht man einen etwas eingefärbten Ring. Das ist derjenige Bereich, wo die Atmosphäre zumindest einen Teil des Lichts absorbiert. Und es ist genau die Situation, die wir oben im Zusammenhang mit der Spektroskopie besprochen hatten: Gas (nämlich das der Planeten-Atmosphäre) wird von hinten durchleuchtet (durch den Stern), und wir beobachten, welcher Teil des Lichts am anderen Ende herauskommt. Wenn wir von einem Stern, vor dem gerade ein Exoplanet vorbeizieht, ein Spektrum aufnehmen, können wir erschließen, woraus die Exoplaneten-Atmosphäre besteht!

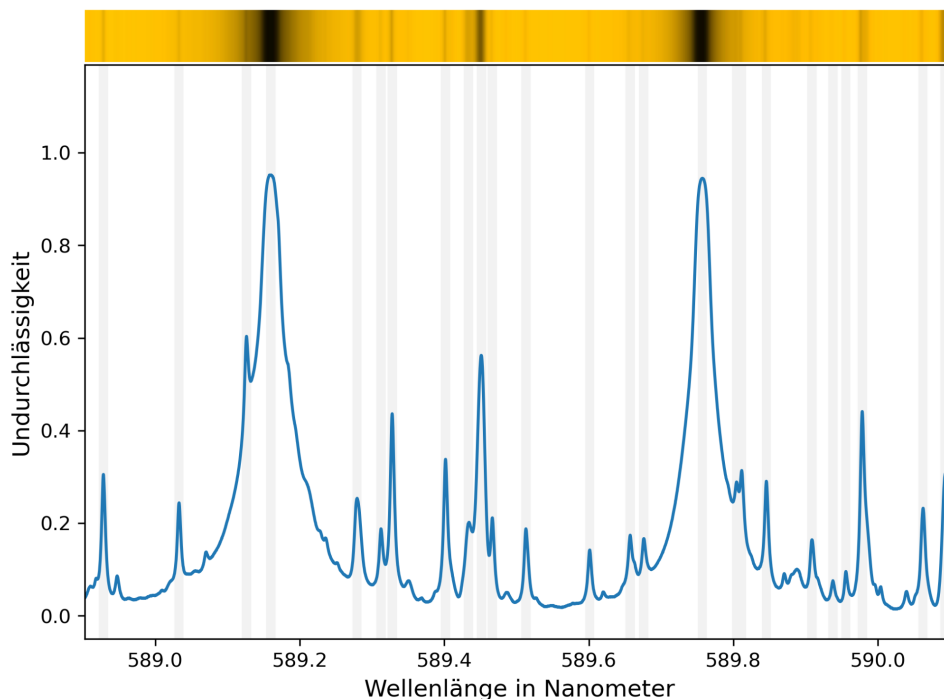
Das Licht, das uns durch die Atmosphäre hinweg erreicht, ist allerdings nur ein sehr kleiner Anteil des gesamten Lichts, das wir von solch einem System empfangen. Um ein gutes Spektrum aufzunehmen, müssen wir dafür sorgen, dass es zu möglichst wenig Störeffekten kommt. Das ist von der Erde aus (die ja ihre eigene Atmosphäre besitzt) nicht zu schaffen. Weltraumteleskope, die weit außerhalb der Erdatmosphäre stationiert sind und von dort aus weitgehend ungestört beobachten können, sind für solche empfindlichen Messungen gut geeignet.

¹ Einstellungen in der App für dieses Bild: Haken "Atmosphäre vorhanden" gesetzt; Haken "vereinfachte Texturen verwenden" gesetzt; Dicke der Atmosphäre 0.1 Sternradien, Dichte der Atmosphäre 0.5.

Die Spektrallinien im Bereich des sichtbaren Lichts sind diejenigen einzelner Atome – in der Sprache der Physik: sie entstehen, wenn Elektronen eines Atoms auf höhere Energieniveaus angeregt werden und dabei Licht ganz bestimmter Wellenlängen absorbieren. Für die Zusammensetzung einer Planetenatmosphäre ist allerdings noch wichtiger, welche Moleküle wir dort antreffen – also welche Verbindungen von zwei oder mehr Atomen. Auch Moleküle absorbieren bei genau definierten Wellenlängen elektromagnetische Strahlung. Genau jene Strahlung regt die Atome eines Moleküls dann zum Beispiel an, relativ zueinander zu rotieren oder zu schwingen. Die entsprechenden Spektrallinien von Molekülen liegen im Bereich der Infrarotstrahlung (genauer im Bereich der mittleren Infrarotstrahlung). Andere Molekül-Spektrallinien hängen mit den unterschiedlichen Arten und Weisen zusammen, wie Moleküle im Ganzen rotieren können.

Allerdings enthält eben auch die Erdatmosphäre Moleküle wie jene, nach denen wir in den Atmosphären von Exoplaneten suchen. In einigen Teilbereichen im Mittel- und Ferninfraroten ist die Erdatmosphäre selbst fast komplett undurchsichtig. Das ist ein weiterer Grund, Weltraumteleskope zu benutzen um Exoplaneten-Atmosphären-Spektren aufzunehmen. Das James-Webb-Weltraumteleskop ist als Infrarot-Teleskop ausgelegt, das mit entsprechenden Instrumenten (wie NIRSpec und MIRI) hervorragende Infrarotspektren in denjenigen Infrarotbereichen aufnehmen kann, die für die Suche nach Molekülen besonders geeignet sind.

Eine letzte Komplikation: Im obigen Beispiel für eine Spektrums-Kurve war die y-Achse die Helligkeit – je mehr Licht uns bei einer bestimmten Wellenlänge erreichte, umso größer der Wert der Kurve an jener Stelle. Bei der Transit-Spektroskopie von Exoplaneten findet man typischerweise eine andere Darstellung: dort ist aufgetragen, wie undurchlässig die Atmosphäre bei der jeweiligen Wellenlänge ist. Ein entsprechendes Diagramm für den oben betrachteten gelben Bereich sähe aus wie folgt:



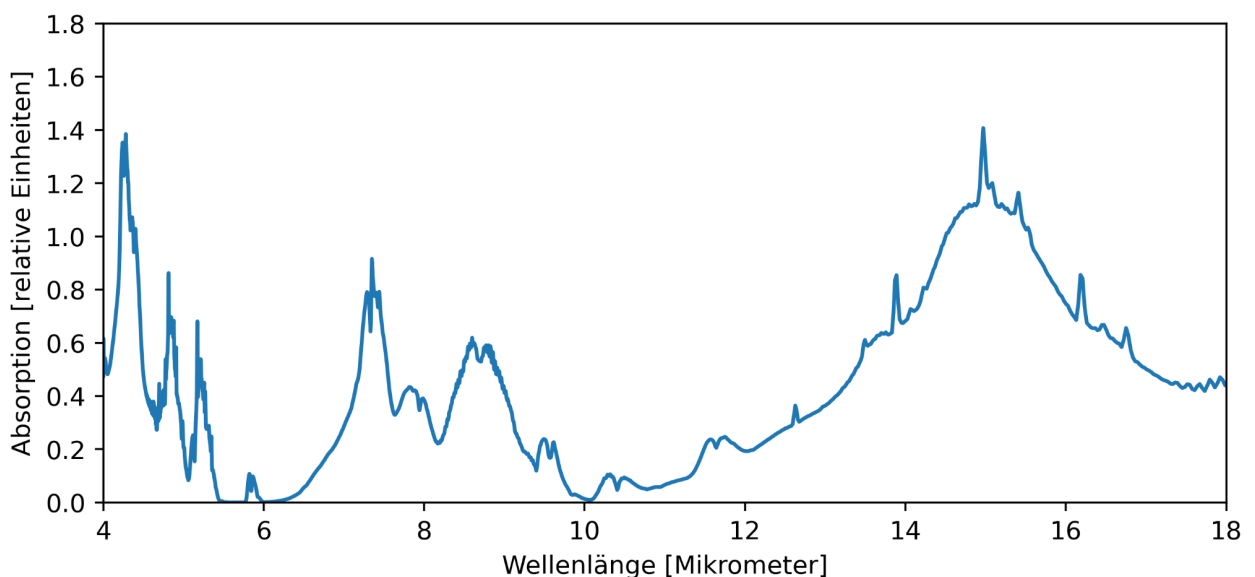
Diesmal sind die *Spitzen* der Kurve dort, wo das Spektrums-Bild dunkel ist. Dort ist das Absorptionsvermögen des Gases besonders groß, und es kommt entsprechend wenig Licht durch. Wo die Kurve weiter unten bleibt, ist das Absorptionsvermögen des Gases klein, und viel Licht kommt durch – das Spektrum ist dort heller (in diesem speziellen Bereich: leuchtend gelb).

Damit haben wir jetzt alle Bausteine beisammen, um im Prinzip verstehen zu können, wie Astronom*innen in Zukunft Leben auf Exoplaneten nachweisen wollen:

1. Nimm einen lebensfreundlichen Planeten, dessen Umlaufbahn zufällig so orientiert ist, dass er von der Erde aus gesehen vor seinem Stern vorbeiläuft.
2. Messe (mit einem Weltraumteleskop) Spektren des Sterns, insbesondere im Infrarotbereich – und zwar sowohl wenn der Planet vor seinem Stern vorbeiläuft und seine Atmosphäre "durchleuchtet" wird als auch, zum Vergleich, wenn der Planet ganz woanders steht.
3. Rekonstruiere aus den winzigen Änderungen im Spektrum, die auftreten, wenn der Planet vor dem Stern vorbeiläuft, das Absorptionsverhalten der Planetenatmosphäre.
4. Rekonstruiere aus dem Absorptionsverhalten der Planetenatmosphäre, welche Arten von Molekülen dort mit welcher Häufigkeit vorkommen.
5. Beurteile anhand der chemischen Zusammensetzung der Planetenatmosphäre, ob es auf jenem Planeten Leben gibt.

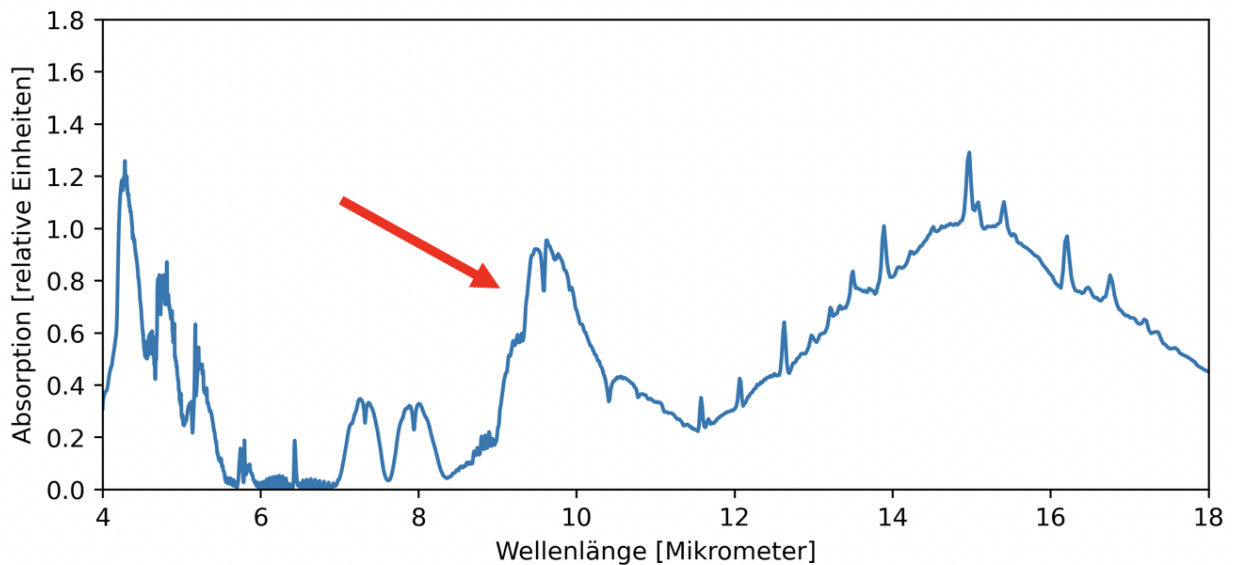
In Wirklichkeit sind alle diese Auswertungsschritte einigermaßen kompliziert. Gerade der letzte Schritt, nämlich was im Einzelnen die Atmosphäreigenschaften sind, bei denen man mit großer Wahrscheinlichkeit auf die Anwesenheit von Leben schließen kann, ist noch vieles unsicher und wird entsprechend eifrig erforscht.

Wir nehmen für die nachfolgenden Übungsaufgaben ein stark vereinfachtes Modell. Für jeden der (hypothetischen) Beispielplaneten haben wir ein Infrarot-Spektrum vorliegen, das den Wellenlängenbereich zwischen 4 und 18 Mikrometern abdeckt. Das sieht dann zum Beispiel so aus wie hier:



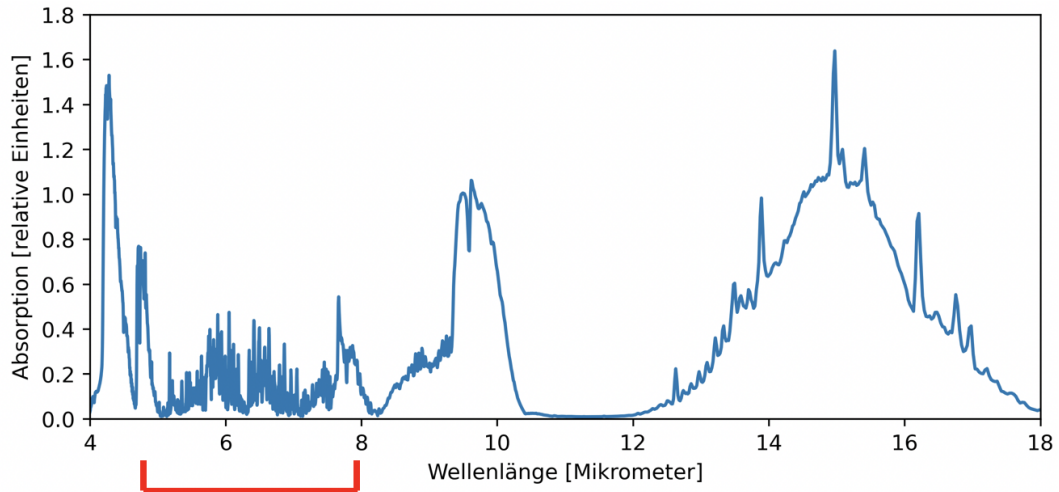
Der breite "Berg" mit dem Gipfel zwischen 14 und 16 Mikrometern ist Absorption durch Kohlenstoffdioxid. Auf der Erde ist diese Absorption für einen Großteil des Treibhauseffekts und für einen Großteil des menschengemachten Klimawandels verantwortlich.

Um zu beurteilen, ob auf einem Planeten Leben möglich ist, schauen wir uns vereinfacht die folgenden zwei "Spuren" in solch einem Absorptions-Spektrum an. Die erste Spur ist die Anwesenheit von größeren Mengen an Ozon (O_3). Ozon ist in der Atmosphäre recht kurzlebig – wenn nicht immer wieder neuer Sauerstoff freigesetzt wird, dann verschwindet das Ozon der Atmosphäre in kurzer Zeit. Ozon absorbiert im Infrarotbereich stark bei Wellenlängen rund um 9,6 Mikrometern. Das folgende Spektrum zeigt einen ausgeprägten Ozon-Berg bei der Absorption:

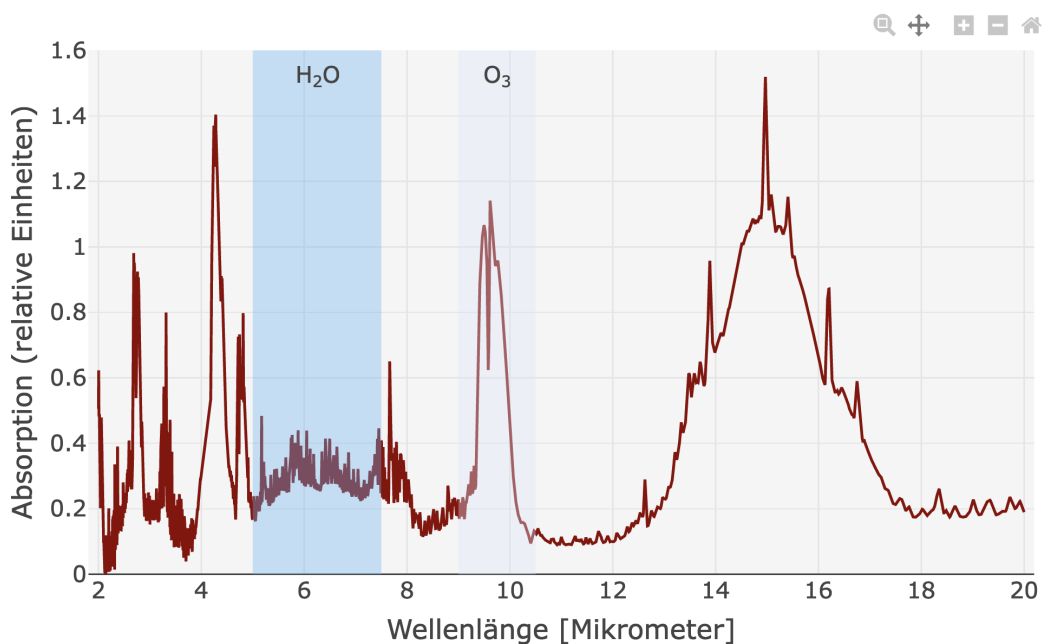


Für eine derart große Menge an atmosphärischem Ozon ist eine naheliegende Möglichkeit, dass der dafür benötigte Sauerstoff durch Lebewesen erzeugt wird. Es gibt aber auch alternative Möglichkeiten, die ohne die Anwesenheit von Lebewesen auskommen. Bei der Suche nach Leben in Exoplaneten-Spektren werden deswegen noch eine Reihe weiterer Kriterien herangezogen, um zu beurteilen, womit wir es zu tun haben: einer durch Lebewesen geprägten Atmosphäre oder einer durch unbelebte chemische Prozesse geprägten Atmosphäre. Wir vereinfachen an dieser Stelle stark und nutzen nur ein zusätzliches Kriterium: die Anwesenheit von Wasserdampf in der betreffenden Atmosphäre. Flüssiges Wasser ist die Voraussetzung für Leben, wie wir es kennen – und wo es auf der Planetenoberfläche flüssiges Wasser gibt, da findet sich auch Wasserdampf in der Atmosphäre.

Wasser in der Atmosphäre verrät sich im Infrarotbereich des Spektrums durch eine Folge von vielen spitzen Bergen bei Wellenlängen zwischen etwa 5 und 8 Mikrometern – ein wildes Zickzack an Absorption in dem entsprechenden Bereich des Spektrums, wie hier gut sichtbar:



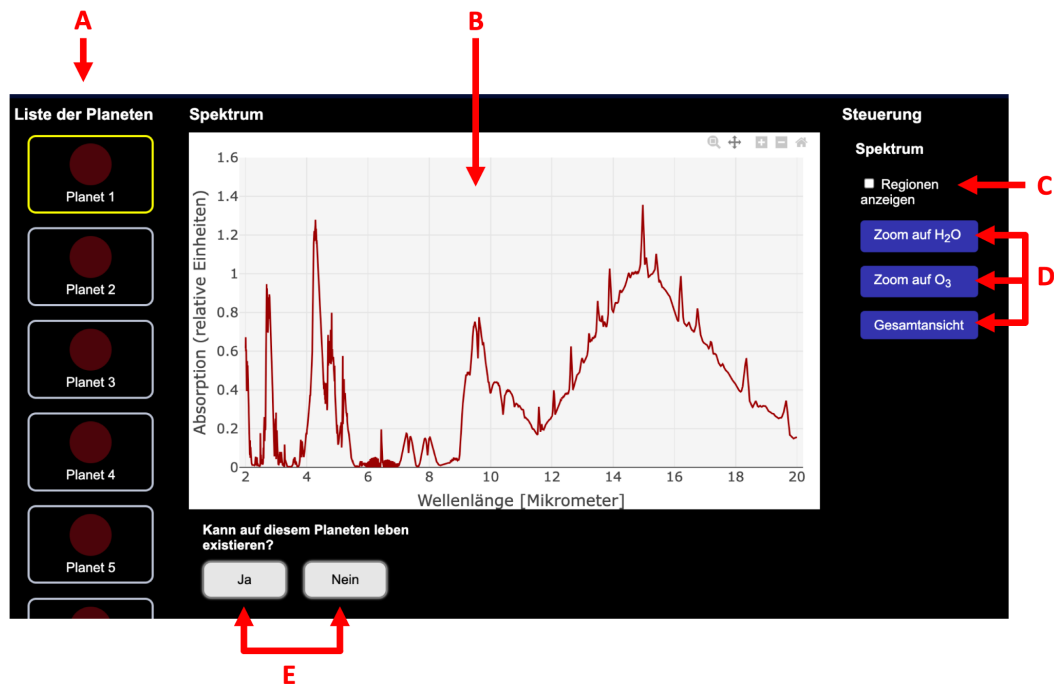
Unser vereinfachtes Kriterium für eine Atmosphäre, die auf Leben auf dem Planeten hinweist, ist daher: klare Zeichen für Ozon ("Ozon-Berg" um 9,6 Mikrometer) und Wasser ("Wasser-Zickzack" zwischen 5 und 8 Mikrometer). Hier ist ein Beispiel für ein Spektrum, das beide Kriterien erfüllt, nämlich sowohl Spuren von Ozon als auch Spuren von Wasser aufweist:



Das Beispiel stammt aus der browserbasierten Exoplaneten-Spektren-App, mit der Schüler*innen diese Art von Identifikation üben können:

<https://astro-apps.org/ExoplanetSpectra/?lang=de>

Der entscheidende Teil der App-Oberfläche sieht aus wie hier dargestellt:



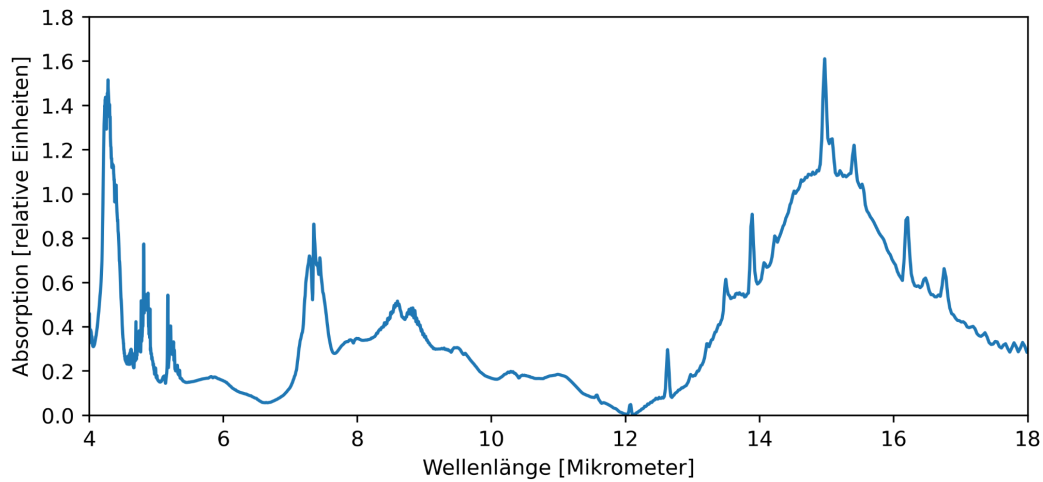
In Spalte A sind dabei die verschiedenen Planeten, deren Spektren zur Auswahl stehen – klicken auf das entsprechende Kästchen ruft das entsprechende Spektrum auf, das dann in der Mitte bei B zu sehen ist. Setzt man bei C den Haken, werden die für Ozon und Wasser wichtigen Wellenlängenbereiche direkt markiert. Mit den drei Knöpfen D kann man in den Wasser-Bereich oder auf den Ozon-Bereich hineinzoomen oder mit "Gesamtansicht" wieder das gesamte Spektrum zeigen. Ziel des Spiels ist es, nach Untersuchung der Spektrums-Eigenschaften zu entscheiden, ob auf jenem Planeten Leben existieren sollte oder nicht. Wir legen dazu wie gesagt das Kriterium "Ozon und Wasser" an. Diesem Kriterium können die Schüler*innen für jedes Spektrum bei E ein Votum abgeben. Die App gibt direkt nach dem Votum eine Rückmeldung, ob die Einschätzung richtig oder falsch war.

Nach dieser Vorbereitung können die Schüler*innen das hier angehängte Arbeitsblatt bearbeiten.

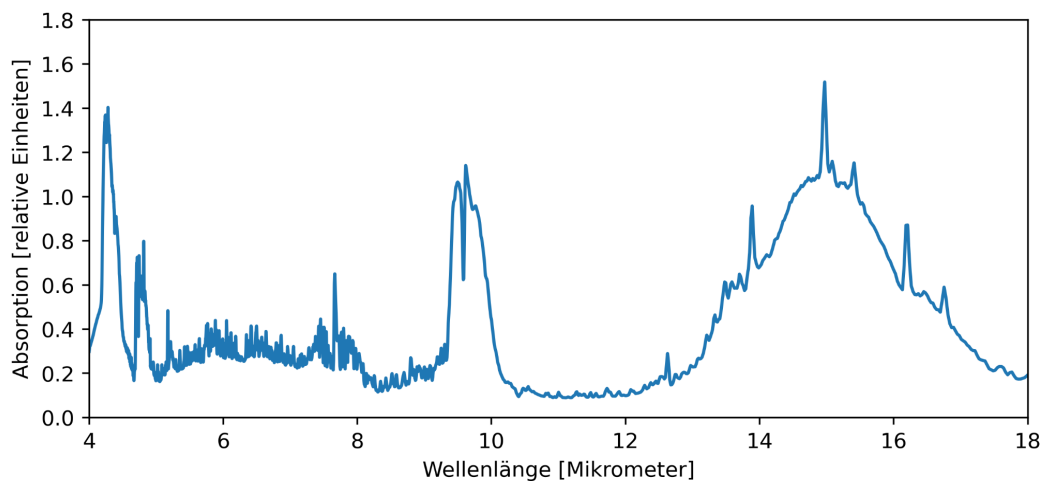
Arbeitsblatt Exoplaneten-Spektren und Leben

Beurteilen Sie die nachfolgenden Infrarot-Spektren: Auf welchen dieser Planeten gibt es vermutlich Leben?

(a)



(b)



(c)

