



Ein Analogieexperiment zur Suche nach Exomonden

ALEXANDER KÜPPER – SEBASTIAN J. SPICKER

Unterrichtsvorschläge zur Thematik *Leben im Weltall* behandeln die Suche nach Exoplaneten oft anhand der Transitmethode. Dabei wird vernachlässigt, dass sich Leben auch auf Exomonden entwickelt haben könnte. Dieser Beitrag stellt ausgehend von einem Experiment zur Transitmethode vor, wie man mit wenigen Ergänzungen die Suche nach Exomonden experimentell behandeln kann. Exemplarische Auswertungen werden präsentiert und Möglichkeiten zur Weiterarbeit mit den gewonnenen Erkenntnissen werden genannt.

1 Motivation

Aus Sicht von Schüler/inne/n ist die Suche nach extra-terrestrischem Leben eine wichtige Aufgabe wissenschaftlicher Forschung (PERSSON, CAPOVA & LI, 2019), da diese Thematik für die Lernenden in hohem Maße interessant und relevant ist (ebd.; SJOBERG & SCHREINER, 2010). Fachdidaktische Veröffentlichungen bzw. Unterrichtsvorschläge greifen neben astrobiologischen Aspekten (z.B. IMPEY, 2021) dieses Interesse jedoch hauptsächlich in Bezug auf Methoden zur Suche nach extrasolaren Planeten (kurz Exoplaneten) auf (z.B. BORN, 2017; BARRERA, 2015; HOFFMANN, 2020; KÜPPER, MORAWIETZ, SCHILLINGS & SCHADSCHNEIDER, 2020). Die Transitmethode wird dabei in der Regel durch Experimente visualisiert bzw. erarbeitet. Auch wenn dieser Fokus für Lernende der Sekundarstufe I aufgrund der vergleichsweise geringen Komplexität sinnvoll erscheint, wird dabei vernachlässigt, dass sich Leben im Weltall nicht nur auf Exoplaneten entwickelt haben könnte, sondern auch Exomonde die optimalen Bedingungen für das Entstehen von Leben aufweisen könnten (TUSNSKI & VALIO, 2011; HIPPEKE, 2015); insbesondere dann, wenn sich der Exoplanet (und damit auch der Exomond) in der Habitablen Zone befindet (TUSNSKI & VALIO, 2011). Entsprechend suchen Astrophysiker/innen in den Weiten des Weltalls auch

nach Exomonden, wobei unterschiedliche Methoden genutzt werden (HELLER, 2018). Dieser Beitrag stellt im Anschluss an eine Darstellung der nötigen Theorie ausgehend von einem typischen Experiment zur Transitmethode (KÜPPER et al., 2020) vor, wie durch einige wenige Ergänzungen auch die Suche nach Exomonden im Unterricht experimentell thematisiert werden kann.

2 Ein kurzer Blick auf den theoretischen Hintergrund

Zur Suche nach Exomonden sind, wie bei der Suche nach Exoplaneten, photometrische Methoden geeignet, da Exomonde charakteristische Signaturen in der Lichtkurve des Sterns hinterlassen, wenn sich der Exoplanet und der Exomond vor dem Stern vorbeibewegen (SATO & ASADA, 2009; TUSNSKI & VALIO, 2011; HIPPEKE, 2015; HELLER, 2018): Einerseits Signaturen, die kurz vor Beginn bzw. am Ende des vom Exoplaneten verursachten Intensitätseinbruchs detektiert werden können. Diese Signaturen treten auf, wenn sich der Exomond von der Erde aus betrachtet früher als der Exoplanet vor die Sternenscheibe schiebt bzw. sie später als der Exoplanet wieder verlässt.

Andererseits Charakteristika während des vom Exoplaneten verursachten Intensitätseinbruchs (TUSNSKI & VALIO, 2011; HELLER, 2018), welche auftreten, wenn sich der Exomond zu Beginn des Transits, von der Erde aus betrachtet, noch vor bzw. hinter dem Exoplaneten befindet bzw. während des Transits hinter den Exoplaneten tritt (ebd.). Die Häufigkeit und Charakteristik entsprechender Signale hängen von verschiedenen Faktoren ab. Beispiele sind die Umlaufzeit des Exoplaneten um den Stern, die Umlaufzeit des Exomonds um den Exoplaneten, die Radien von Stern, Exoplanet und Exomond, usw. (TUSNSKI & VALIO, 2011). Für den zeitabhängigen Intensitätsverlauf $I(t)$ während des Transits spielt im Falle eines Systems Exomond-Exoplanet neben der Querschnittsfläche des Sterns A_s und der Querschnittsfläche des Exoplaneten A_p auch die Querschnittsfläche des Exomonds A_m eine Rolle (SATO & ASADA, 2009; HELLER, 2018)

$$\text{und es gilt: } I(t) = \frac{A_s - (A_p + A_m - A_{pm}(t))}{A_s}$$

(SATO & ASADA, 2009). Dabei ist $A_{pm}(t)$ die Überlappung zwischen den Querschnittsflächen von Exoplanet und Exomond. Da sich der Exomond um den Exoplaneten bewegt ist diese Fläche ebenfalls zeitabhängig. Die Anzahl an charakteristischen Exomond-Signaturen wiederum hängt von der Transitdauer des Systems Exomond-Exoplanet und der Umlaufzeit des Exomonds um den Exoplaneten ab.

3 Ein Analogieexperiment zur Suche nach Exomonden

Ausgangspunkt der Erarbeitung einer Methode zur Suche nach Exomonden kann ein typisches Analogieexperiment zur Suche nach Exoplaneten sein, bei dem eine Kugel auf einem Stab (Exoplanet) mit einem langsam drehenden Motor um eine Lampe (Stern) bewegt wird (Abb. 1a; KÜPPER et al., 2020). Nachdem die Lichtkurve mit einem geeigneten Sensor (Kasten 1) aufgenommen und mit einem passenden Programm auf einem Tablet graphisch dargestellt wird, sehen die Lernenden in diesem Fall eine recht symmetrische Lichtkurve (Abb. 1b; aufgezeichnet mit Lehrmaterialien von Pasco).

Bei der Auswahl des Sensors ist zu beachten, dass viele Messungen pro Zeiteinheit durch den Sensor durchgeführt werden müssen (hohe Sample Rate), um die Exomond Signaturen abbilden zu können. Möglich sind z.B. die Nutzung des Lichtsensors eines *Android*-Smartphones oder ein *Arduino* – jeweils gemeinsam mit der kostenfreien App *phyphox* und den unter <https://astro-lab.app/transitmethode/> verlinkten Experimenten. Mit einem TI-Sensor-Tag CC2650 konnte aufgrund der ungeeigneten Sample Rate des Lichtsensors von lediglich 1,25 Hz keine aussagekräftige Messkurve angefertigt werden. Zum Vergleich: Der im Beitrag verwendete *Pasco* Lichtsensor hat eine Sample Rate von bis zu 20 Hz. Die im Beitrag gezeigten Lichtkurven wurde mit der *Pasco SPARKvue* App aufgenommen.

Kasten 1. Technische Anmerkungen zur Sensor-Auswahl



Abb. 1a. Aufbau eines Analogieexperimentes zur Suche nach Exoplaneten

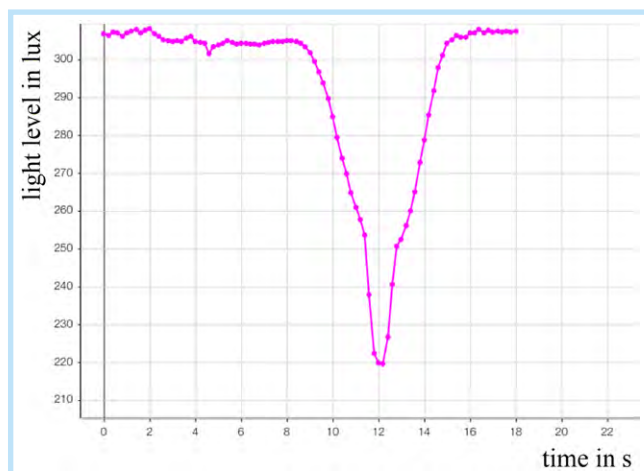


Abb. 1b. Lichtkurve im Analogieexperiment zur Suche nach Exoplaneten

Zur Messung der Signaturen von Exomonden wird das Analogieexperiment wie folgt abgewandelt: Anstatt einer Kugel an einem Stab, die sich um die Lampe bewegt, wird nun zusätzlich ein kleiner, batteriebetriebener Motor (z.B. ein Discokugel-Motor) genutzt (Abb. 2).



Abb. 2. Discokugel-Motor zur Realisierung der Bewegung des Exomonds um den Exoplaneten

Dieser Motor wird für die zusätzliche Bewegung einer kleineren Kugel (Exomond) um eine größere Kugel (Exoplanet) benötigt. Durch diesen abgewandelten Aufbau können nun zwei unterschiedliche Bewegungen im Analogieexperiment realisiert werden: (1) Bewegung des Exoplaneten um den Stern und (2) Bewegung des Exomonds um den Exoplaneten (und damit auch um den Stern). Mit diesem Aufbau wird ebenso die Lichtkurve aufgenommen. Man beachte dabei, dass ein Teil des Diskokugel-Motors vom Sensor aus betrachtet ebenso zu einer Intensitätsverringerung führt. Bei einer qualitativen Betrachtung im Analogieexperiment schmälert diese zusätzliche Verdunkelung jedoch das Entdecken und Verstehen von Exomond-Signaturen nicht, da die Lichtkurve zu Beginn/Ende des Transits lediglich steiler fällt bzw. steigt und die charakteristischen Signaturen trotzdem gut erkennbar sind. Wenn eine quantitative Auswertung des Experiments favorisiert wird, gilt es diese Modellkritik jedoch explizit in den Blick zu nehmen (vgl. Fazit und Möglichkeiten zur Weiterarbeit).

Ferner bietet es sich an für die Deutung der Lichtkurve(n) an, die Bewegung des Systems Exomond-Exoplanet im Analogieexperiment zusätzlich aus der Perspektive des Lichtsensors mit einem weiteren Gerät (z.B. Smartphone) zu filmen.

4 Deutung von experimentell aufgezeichneten Exomond-Lichtkurven

In einem ersten Auswertungsschritt können die Lernenden die Lichtkurve eines einzelnen Exoplaneten mit der aus dem System Exomond-Exoplanet resultierenden Lichtkurve vergleichen. Sie stellen fest, dass die Lichtkurve im System Exomond-Exoplanet weniger symmetrisch als die Lichtkurve einer Messung ohne Exomond (Abb. 1b, 3a und 4a) ist. Insbesondere gibt es zusätzliche Intensitätseinbrüche (vgl. exemplarische Markierungen in den Abbildungen 3a und 4a). Da der Unterschied im Analogieexperiment in der Existenz eines zusätzlichen Exomonds liegt, können die Unterschiede in der Lichtkurve direkt auf den Exomond zurückgeführt werden.

Eine genaue Deutung der Unterschiede allein aus der Lichtkurve heraus erscheint für Lernende der Sekundarstufe I ohne Vorerfahrung äußerst komplex. Wenn jedoch zusätzlich Videoaufnahmen der Bewegung aus Sicht des Sensors aufgezeichnet werden, kann diese zusätzliche Darstellungsform dabei helfen den Cognitive Load zu reduzieren (vgl. BECKER, KLEIN, GÖSSLING & KUHN, 2020) und die Lichtkurve zu deuten. Ferner können mit Hilfe der Aufnahmen Kriterien aufgestellt werden, wie man an einer Lichtkurve die Existenz

eines möglichen Exomonds erkennen kann. Dieser Prozess soll im Folgenden anhand der beiden Lichtkurven in den Abbildungen 3a und 4a erläutert werden. Ähnliche Überlegungen sollten auch von den Lernenden angestellt werden, wobei geeignete Scaffolding-Maßnahmen unterstützend eingesetzt werden können.

In Abbildung 3a wurden insgesamt drei Bereiche in den Farben blau, grün und rot markiert. Die Abbildungen 3b, 3c und 3d zeigen ergänzende Screenshots der zu den Bereichen gehörenden Videoaufnahmen. In der Lichtkurve in Abbildung 3a erkennt man zum Beispiel im grünen Bereich, dass die Intensität zunächst wieder ansteigt, anschließend kurzzeitig absinkt und dann erneut ansteigt. Dieser Kurvenverlauf lässt sich mit Hilfe des Videos (Abb. 3c) so verstehen, dass sich der Exomond vor den Exoplaneten schiebt. Die Überlappung zwischen den Querschnittsflächen von Exoplanet und Exomond erhöht sich, was zu einem Anstieg der Intensität führt. Die Überlappung verringert sich anschließend wieder, weil der Exomond wieder neben den Exoplaneten tritt. Die Intensität sinkt dabei leicht, jedoch nicht wieder zurück auf den Ausgangswert, weil das System Exomond-Exoplanet kurz danach die Sternenscheibe verlässt (siehe auch Analyse des zweiten Diagramms in Abb. 4a). Auf ähnliche Weise lässt sich auch der blau markierte Bereich erklären (Abb. 3b). Interessant ist zusätzlich auch der rot markierte Bereich. Man erkennt einen geringen Intensitätseinbruch außerhalb des regulären, ohne Exomond zu erwartenden Intensitätseinbruchs. Auch dies lässt sich mit Hilfe des Videos (Abb. 3d) verstehen. Zu Beginn des Ausschnitts befindet sich

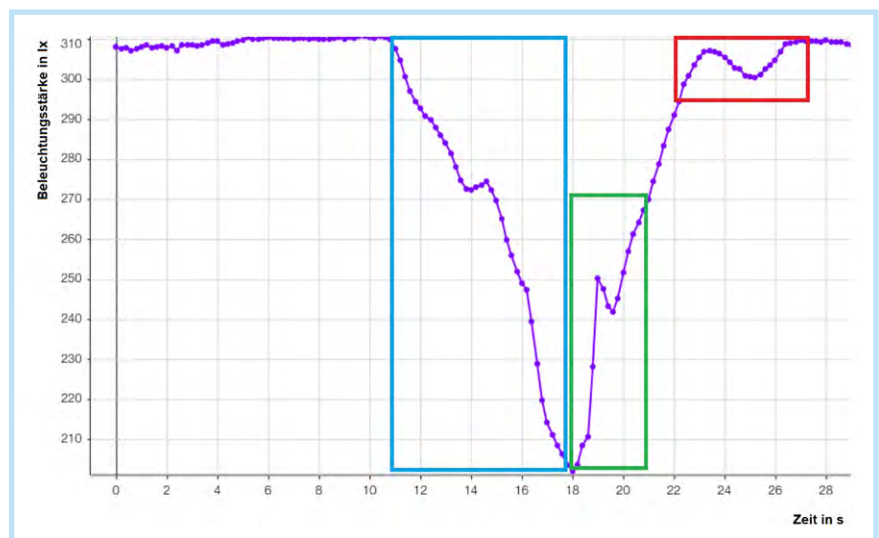


Abb. 3a. Mögliche Lichtkurve des Systems Exomond-Exoplanet 1

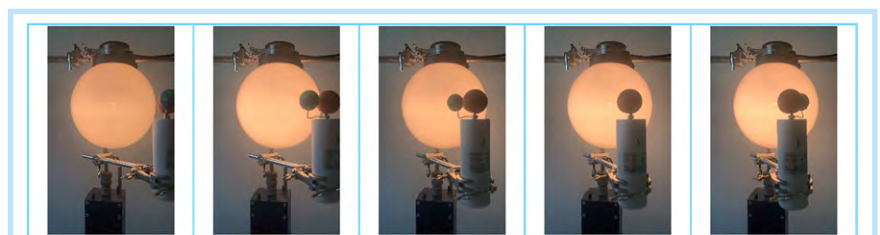


Abb. 3b. Gefilmte Bewegung von Exoplanet und -mond im blauen Abschnitt



Abb. 3c. Gefilmte Bewegung von Exoplanet und -mond im grünen Abschnitt

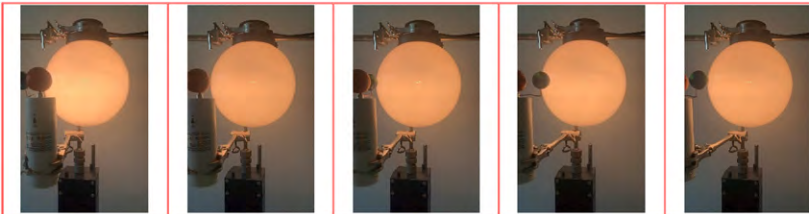


Abb. 3d. Gefilmte Bewegung von Exoplanet und -mond im roten Abschnitt

der Exoplanet nicht mehr vor dem Stern und der Exomond ist hinter dem Exoplaneten. Nun tritt der Exomond auf der rechten Seite wieder hinter dem Exoplaneten hervor. Dabei bewegt er sich kurzfristig partiell vor dem Stern vorbei. Entsprechend kommt es zu einer Verringerung der Intensität.

Eine weitere mögliche Lichtkurve ist in Abbildung 4a dargestellt, in der die Lichtintensität im orangen Bereich zunächst wieder ansteigt und anschließend kurzzeitig sinkt. Dies lässt sich mit Hilfe des Videos so verstehen, dass sich im tiefsten Punkt bei t_1 Exomond und Exoplanet vom Sensor aus gesehen nebeneinander befinden. Nun schiebt sich der Exomond hinter

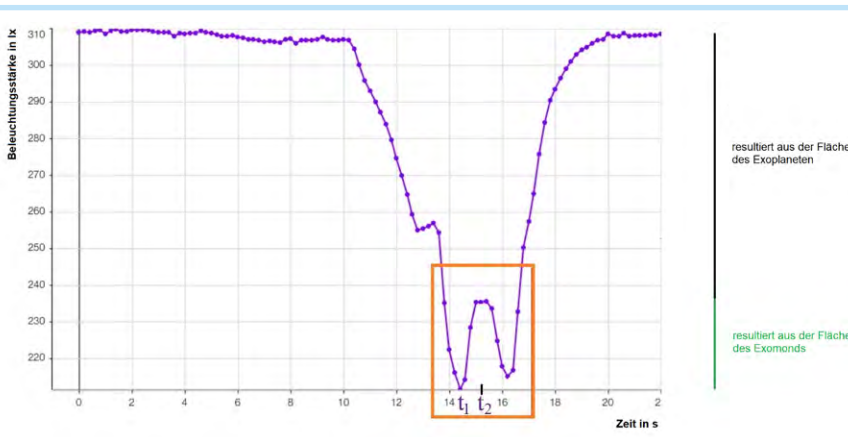


Abb. 4a. Mögliche Lichtkurve des Systems Exomond-Exoplanet 2

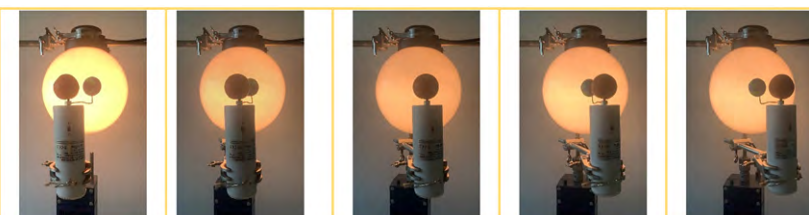


Abb. 4b. Bewegung von Exoplanet und -mond im orange markierten Abschnitt

den Exoplaneten. Bei t_2 ist der Exomond vollständig hinter dem Exoplaneten, sodass nur noch der Exoplanet den Stern verdunkelt. Entsprechend steigt die Lichtintensität in der Lichtkurve an. Anschließend tritt der Exomond wieder aus dem Schatten des Exoplaneten heraus. Die sichtbare Fläche des Systems Exomond-Exoplanet vergrößert sich, was wiederum zu einer Verringerung der Lichtintensität führt. In dieser Lichtkurve kann genau gedeutet werden, welcher Anteil der Transittiefe vom Exoplaneten und welcher Anteil vom Exomond stammt.

5 Fazit und Möglichkeiten zur Weiterarbeit

Während die Thematisierung der Transitmethode gegen Ende der Sekundarstufe I, insbesondere bei der Verwendung von Scaffolding-Maßnahmen, für alle Lernenden geeignet erscheint, ist die Thematisierung der Suche nach Exomonden komplexer und daher eher für leistungsstärkere Schüler/innen geeignet. Somit eignet sich die Thematik vor allem als Exkurs im Anschluss an die Thematisierung der Transitmethode zur Suche nach Exoplaneten und bietet entsprechend Differenzierungspotenzial. Dabei können eine zeitlich möglichst synchrone Aufnahme der Lichtkurve und ergänzende Videoaufnahme gewinnbringend zur

Deutung des Lichtkurven-Verlaufs eines Exomond-Exoplaneten Systems genutzt werden.

Ausgehend von diesem, im Analogieexperiment zu Exomonden, erworbenen Wissen gibt es diverse Möglichkeiten zur weiteren Vertiefung. Einige dieser Möglichkeiten werden im Folgenden skizziert:

- (1) Ein Grundproblem bei der Suche nach Exomonden ist das Rauschen der Daten, da die charakteristischen Signaturen im Rauschen untergehen können (TUSNSKI & VALIO, 2011; HELLER, 2018). Diesen Aspekt können die Lernenden im Analogieexperiment erarbeiten, indem sie die Größe des Exomonds im Experiment systematisch verändern und beschreiben, wann der Exomond noch detektiert werden kann. Auch kann der Einfluss verschiedener Messinstrumente bzw. Sensoren auf Detektierbarkeit der Charakteristika im Experiment untersucht werden (vgl. auch Kasten 1).

- (2) Auch das Verhältnis von Transitdauer und Umlaufzeit des Exomonds um den Exoplaneten spielt eine entscheidende Rolle für das Aussehen der Lichtkurve. Während bei dem hier beschriebenen Experiment die Umlaufzeit des Exomonds mit dem Discokugel-Motor konstant ist, lässt sich die Transitdauer durch Erhöhung der Bahngeschwindigkeit am langsam drehenden Motor verändern. Bei Betrachtung verschiedener, aufeinanderfolgender Transits kann beispielsweise untersucht werden, unter welcher Voraussetzung die Exomond-Exoplanet-Lichtkurve (näherungsweise) immer gleich aussieht. Dies ist der Fall, wenn die Umlaufzeit des Exomonds ein Vielfaches der Umlaufzeit des Exoplaneten ist.
- (3) Insbesondere Schüler/innen, denen komplexere Mathematisierung liegt, können ausgehend von der

$$\text{Formel } I(t) = \frac{A_s - (A_p + A_m - A_{pm}(t))}{A_s}$$

(SATO & ASADA, 2009) und den im Experiment aufgenommenen Daten Aussagen über den Radius des Exomonds treffen. Dabei eignet sich insbesondere eine Messung wie in Abbildung 4a, da hier bei vorgegebenem Radius des Sterns sowohl der Radius des Exoplaneten, als auch der Radius des Exomonds bestimmt werden können. Man beachte dabei, dass $A_{pm}(t_1) = 0$ gilt und damit

$$I(t_1) = \frac{A_s - (A_p + A_m)}{A_s} \quad \text{für } t_2 \text{ gilt } A_{pm}(t_2) = A_m, \text{ also}$$

$$I(t_2) = \frac{A_s - A_p}{A_s}. \quad \text{Im vorgestellten Experiment muss}$$

hierbei jedoch auch der Einfluss der Discokugel-Motorfläche vor der Kugelleuchte beachtet werden, welcher die Mathematisierung erschwert. Bei Verwendung einer längeren Drehachse lässt sich dieses Problem jedoch umgehen. Alternativ ist es möglich zusätzlich eine Messkurve des Motors ohne Exoplanet-Exomond-System aufzunehmen und die Messwerte miteinander zu vergleichen bzw. mit einem Tabellenkalkulationsprogramm zu analysieren und den Einfluss des Motors herauszurechnen. Ein solches Vorgehen erscheint jedoch eher für Lernende der Sekundarstufe II, z.B. im Rahmen einer Facharbeit, sinnvoll.

Literatur

BARRERA, A. (2015). Analyzing planetary transits with a smartphone. *The Physics Teacher*, 53, 179–181.

BECKER, S., KLEIN, P., GÖSSLING, A. & KUHN, J. (2020). Using mobile devices to enhance inquiry based learning processes. *Learning and Instruction*, 69, 101350.

BORN, R. (2017). *PocketLab Voyager: How to Discover an Exoplanet*. <https://archive.thepocketlab.com/educators/lesson/pocketlab-voyager-how-discover-exoplanet> (02.11.2022).

HELLER, R. (2018). On the Detection of Extrasolar Moons and Rings. In H.J. DEEG & J.A. BELMONTE (Hg.), *Handbook of Exoplanets* (S. 835–851). Cham: Springer.

HIPKE, M. (2015). On the Detection of Exomoons: A Search in KEPLER Data for the Orbital Sampling Effect and the Scatter Peak. *The Astrophysical Journal*, 805(51).

HOFFMANN, S. M. (2020). Exoplaneten entdecken und vermessen im Klassenzimmer. *MNU-Journal*, 73(2), 146–152.

IMPEY, C. (2021). Astrobiology Education: Inspiring Diverse Audiences with the Search for Life in the Universe. In O.A.C. TORRES, T. PETERS, J. SECKBACH & R. GORDON (Hg.), *Astrobiology: Science, Ethics and Public Policy* (S. 135–156). Hoboken: Wiley.

KÜPPER, A., MORAWIETZ, O., SCHILLINGS, J. & SCHADSCHNEIDER, A. (2020): Exoplanets at School – an educational program about hunting and analyzing exoplanets – meets the FREI project. In N. BANNISTER, Á. O'BRIEN & A. KINNAIRD (Hg.), *Conference Proceedings of the 3rd Symposium on Space Educational Activities* (S. 12–16). Leicester: University of Leicester.

PERSSON, E., CAPOVA, K. & LI, Y. (2019). Attitudes towards the scientific search for extraterrestrial life among Swedish high school and university students. *International Journal of Astrobiology*, 18(3), 280–288.

TUSNSKI, L. R. M. & VALIO, A. (2011). Transit model of planets with moon and ring systems. *The Astrophysical Journal*, 743(1), 1–16.

SATO, M. & ASADA, H. (2009). Effects of Mutual Transits by Extrasolar Planet-Companion Systems on Light Curves, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 61(4), L29–L34.

SJOBERG, S. & SCHREINER, C. (2010). *The ROSE projekt – an overview and key findings*. Roseproject. <http://roseproject.no/network/countries/norway/eng/nor-Sjoberg-Schreiner-overview-2010.pdf> (02.11.2022)

Dr. ALEXANDER KÜPPER ist Lehrer für Mathematik und Physik am Gymnasium der Stadt Frechen. kuepper@gymnasium-frechen.de

SEBASTIAN J. SPICKER, ist IT-Spezialist an der Hochschule für Musik und Tanz Köln. sebastian.spicker@hfmt-koeln.de ■