

**Abschlussbericht zu den in den wettbewerblichen Verfahren
der Leibniz-Gemeinschaft geförderten Vorhaben**
(einzureichen bis 6 Monate nach Abschluss des Vorhabens, max. 5 Seiten exklusive
Anlagen)

Titel des Vorhabens: "Combined Evolution of Star-Planet Systems" (CESSY)

Projektnummer/Aktenzeichen: P67/2018

Executive Summary

Fassen Sie hier bitte kurz die wichtigsten Punkte der einzelnen Kapitel des Abschlussberichts zusammen (max. 4500 Zeichen). Die Executive Summary kann dem Erfolgskontrollbericht ähneln, wird im Gegensatz zu diesem jedoch veröffentlicht.

Das Projekt "Combined Evolution of Star-Planet Systems" (CESSY) hatte das Ziel, die gemeinsame Entwicklung von Exoplaneten und ihren Zentralsternen zu untersuchen. In besonderem Fokus standen dabei die Auswirkungen von Stern-Planet-Interaktionen durch Gezeiten, die für Exoplaneten in engen Umlauforbits erwartet werden. Die weltweite Covid-19 Pandemie im zweiten bis vierten Projektjahr führte zu Einschränkungen bei der Teleskopverfügbarkeit und der Reisetätigkeit sowie zu starken Belastungen der Teammitglieder. Dennoch konnten die Meilensteine des Projekts generell erfüllt werden. Unser Haupt-Laboratorium waren weite Binärsystemen von Sternen, in denen einer der Sterne einen Exoplaneten in einer engen Umlaufbahn besitzt; die Sterne ohne bekannten Exoplaneten fungierten dabei als Kontrollgruppe. Wir konnten zum ersten Mal statistisch signifikant nachweisen, dass die Sterne mit engen Exoplaneten sowohl eine höhere magnetische Aktivität als auch eine schnellere Rotation aufweisen, was wir auf den Gezeiteinfluss der Exoplaneten auf ihre Zentralsterne zurückführen konnten. Damit ist uns der erste überzeugende Nachweis von Stern-Planet-Interaktionen auf Gezeitenbasis gelungen. Wir konnten die Natur der Stern-Planet-Interaktionen durch weitere Studien zum Gezeiten-Qualitätsfaktor von Sternen sowie der Stärke der Interaktion in Systemen mit einem eng orbitierenden Braunen Zwerg (d.h. einem Objekt mit größerer Masse als Exoplaneten) näher beleuchten. Wir konnten signifikante Fortschritte erzielen in der Untersuchung der Verdampfung von Exoplaneten-Atmosphären. Dazu führten wir numerische Berechnungen durch, die erstmals eine realistische Verteilung von Stern-Aktivitäts-Entwicklungen beinhalten; zusätzlich konnten wir das Energiebudget für die Verdampfung mit Hochenergie-Beobachtungen für hunderte von Stern-Planetensystemen quantifizieren, die Bestandteile von beobachtbaren Exoplaneten-Atmosphären bestimmen, sowie erste Hinweise auf von Planeten ausgelöste Explosionen in der Sternatmosphäre (Flares) veröffentlichen. Alle diese Aspekte wirken sich auf die potentielle Habitabilität von Exoplaneten aus. Innerhalb dieses Projekts veröffentlichten wir mehr als 25 peer-reviewed Publikationen und es wurden vier Masterarbeiten und vier Doktorarbeiten fertiggestellt. Mehrere Ergebnisse wurden in Pressemitteilungen sowie öffentlichen Vorträgen dem Laienpublikum nähergebracht. Die Gruppe der Mitarbeitenden an diesem Projekt zeichnete sich durch eine hohe Internationalität sowie eine etwa 50%-ige Frauenquote aus. Mehrere Maßnahmen zur Karriereförderung von jungen Forschenden wurden angeboten und rege angenommen, so z.B. ein jährlicher Workshop zur akademischen Karriereplanung, ein gemeinsames virtuelles Seminar mit einer anderen internationalen Forschungsgruppe, sowie regelmäßige Betreuung zu effektiven Konferenzbesuchen, Einwerben von Teleskop-Beobachtungszeit, und Einwerben von eigenen Drittmitteln. Die Kooperation mit auswärtigen Partnern musste pandemiebedingt größtenteils virtuell stattfinden und es ergaben sich einige Änderungen im betreffenden Personal bei den Partnern; dennoch erreichten wir mehrere erfolgreich publizierte Ergebnisse, zu denen die Partner beigetragen haben. Wir machten die zu den Publikationen dieses Projekts zugehörigen Daten zugänglich mittels der in der Astrophysik üblichen Daten- und Software-Archive. Die Kofinanzierung dieses Projekts durch das Heimatinstitut wurde erfüllt. Weiterführende wichtige Forschungsfragen sind der Einfluss

von Magnetfeldern auf Stern-Planeten-Systeme und Planetenatmosphären, sowie die Nachweisbarkeit von Biosignaturen in den kommenden Jahrzehnten; diese Fragen werden die geförderte Forschungsgruppe langfristig prägen.

1. Zielerreichung und Umsetzung der Meilensteine

Erläutern Sie bitte kurz die Umsetzung der wichtigsten Ziele und Meilensteine Ihres Vorhabens im Vergleich zur Planung im Antrag. Erläutern Sie gegebenenfalls die nur teilweise oder nicht erfolgreiche Umsetzung für einzelne Ziele / Meilensteine. Erläutern Sie bitte ebenfalls die wichtigsten Punkte des abschließenden zahlenmäßigen Verwendungsnachweises und des abschließenden Verwendungsplans im Vergleich zur ursprünglichen Finanzplanung.

Alle fünf Meilensteine konnten umgesetzt bzw. teilweise umgesetzt werden. Der erste Meilenstein zur Identifikation von neuen weiten Binärsystemen mit Gaia-Daten konnte umgesetzt werden; die Gaia-Daten stellten sich wie erwartet als von genügend hoher Qualität heraus, um deutlich mehr solcher Systeme zu identifizieren als vorher bekannt waren. Dazu wurden auch die Ergebnisse anderer Forschungsgruppen genutzt. Der zweite Meilenstein zur Aktivitätsvermessung von Stern-Planetensystemen mit weiten Binärsternen wurde umgesetzt. Dazu wurden größtenteils Daten von Röntgen-Weltraumteleskopen verwendet, die nicht von operationellen Schwierigkeiten während der Covid-19 Pandemie betroffen waren. Wir konnten erstmals erfolgreich einen signifikanten Sternaktivitäts-Unterschied nachweisen, der auf die Gezeitenkräfte zwischen Sternen und ihren Planeten von Typ "heiße Jupiter" zurückgeführt werden konnte. Der dritte Meilenstein zur Rotationvermessung von Stern-Planetensystemen mit weiten Binärsternen konnte teilweise umgesetzt werden. Die geplanten Datennahme mit den institutseigenen sowie institutsfremden Teleskopen war über weite Strecken nicht möglich, da Teleskope längerfristig geschlossen waren bzw. Wartungsreisen vom technischen Personal des Instituts aufgrund der Covid-19 Pandemie nicht durchgeführt werden konnten. Wir haben stattdessen mit Archivdaten gearbeitet und, soweit Daten vorhanden waren, eine gute Übereinstimmung des stellaren Rotationsverhaltens mit dem Aktivitätsverhalten gefunden. Der vierte Meilenstein zum besseren Verständnis der Stern-Planeten-Interaktionen wurde umgesetzt; zum einen konnte ein direkter erstmaliger Vergleich zu einem Stern-Brauner Zwerg-System gezogen werden, wobei der Braune Zwerg wie ein extrem schwerer Exoplanet wirkt; zum anderen konnte aus den Ergebnissen von Meilenstein drei eine neue Methode abgeleitet werden, um den sog. Gezeiten-Qualitätsfaktor von Sternen und damit die erwartbare Überlebensdauer von heißen Jupitern unter Gezeiteneinwirkung auf ihren Orbit zu bestimmen. Der fünfte Meilenstein konnte umgesetzt und aufgrund besonders erfolgsversprechender Zwischenergebnisse sogar ausgebaut werden. Zum einen haben wir wie geplant erstmals den Einfluss von verschiedenen Sternaktivitäts-Entwicklungen auf die Überlebensdauer von Exoplaneten-Atmosphären studieren können; zum anderen konnten wir wie geplant mit Simulationen die Sternwinde verschiedener kühler Sterne sowie ihre Auswirkungen auf die habitable Zone charakterisieren. Zusätzlich und außerplanmäßig fanden wir heraus, dass besonders schnell rotierende M-Zwergsterne zwar häufige magnetische Ausbrüche (Flares) zeigen, diese aber nicht wie bei der Sonne nahe am Sternäquator auftreten, sondern stattdessen an den Rotationspolen des Sterns. Damit sind etwaige Exoplaneten den atmosphären-beschädigenden Effekten solcher Flares kaum ausgesetzt, was bessere Chancen für die Entwicklung von Leben bedeuten kann.

Im Vergleich zur ursprünglichen Finanzplanung haben sich einige kleinere Unterschiede ergeben. Diese kamen vor allem durch Verzögerungen bei Einstellungen durch die Covid-19 Pandemie zustande. Auch die zeitliche Verteilung der Reisemittel musste angepasst werden, da in mehreren Projektjahren die relevanten Konferenzen pandemiebedingt nur virtuell stattfinden konnten.

2. Aktivitäten und Hindernisse

Schildern Sie bitte die durchgeführten Arbeiten und Aktivitäten der Projekt- bzw. Verbundpartner. Gehen Sie auch auf möglicherweise aufgetretene wissenschaftliche Fehlschläge und Probleme in der Vorhabenorganisation oder technischen Durchführung ein, die zu Verzögerungen, zu Abweichungen vom ursprünglichen Konzept oder Arbeitsplan oder zum Nichterreichen der Zielsetzungen geführt haben. Erläutern Sie während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritte auf dem Forschungsgebiet bei anderen Stellen und deren Einfluss auf das Vorhaben. Nehmen Sie kurz Stellung zur Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten.

Das größte Hindernis für das Projekt stellte die im zweiten Projektjahr einsetzende weltweite Covid-19 Pandemie dar. Direkte Auswirkungen auf das Projekt ergaben sich durch Institutsschließzeiten, Umstellung auf Home Office, fehlende Kinderbetreuung, nicht stattfindende Konferenzen, nicht operierende Teleskope, nicht mögliche Reisetätigkeit, sowie die generelle mentale und körperliche Belastung aller Teammitglieder.

Die durchgeführten Arbeiten entsprechen größtenteils denen, die im Vorhabensantrag beschrieben wurden. Es wurden neue Beobachtungsdaten aufgenommen, soweit möglich; hierbei ergaben sich durch die Pandemie und damit verbundene längerfristige Teleskopschließungen die bereits in Abschnitt 1 beschriebenen Einschränkungen bei der Beobachtung von Stern-Rotationsperioden mit bodengebundenen Teleskopen. Beobachtungen mit Weltraumteleskopen konnten wie geplant durchgeführt werden. Die Nutzung von Archivdaten sowie die Durchführung von numerischen Untersuchungen konnte ebenfalls wie geplant durchgeführt werden.

Die Zusammenarbeit mit externen Partnern musste pandemiebedingt größtenteils auf virtuelle Zusammenarbeit anstelle von Besuchen in Person umgestellt werden. Dabei ergaben sich aber auch neue Möglichkeiten, die genutzt werden konnten, so z.B. ein von uns neu ins Leben gerufenes virtuelles gemeinsames Seminar mit der Exoplaneten-Forschungsgruppe der Universität Aarhus. Dabei wurde das Seminar mit Prof. Simon Albrecht aus Aarhus durchgeführt anstatt wie ursprünglich geplant mit Dr. Victor Silva Aguirre, da letzterer die akademische Wissenschaft während der Pandemie verlassen hat.

Zu neu bekannt gewordenen Ergebnissen anderer Gruppen ist zu sagen, dass wir neue Erkenntnisse an jeder relevanten Stelle in unsere Forschung haben einfließen lassen. Diese haben generell unsere Arbeit bereichert.

Alle durchgeführten Arbeiten waren für das Forschungsprojekt notwendig und angemessen.

3. Ergebnisse und Erfolge

Stellen Sie bitte zentrale Ergebnisse und Erfolge in den Bereichen Forschung (Publikationen, wissenschaftliche Veranstaltungen, abgeschlossene Qualifikationsarbeiten, Drittmittelwerbung, etc.) und Transfer (Beratung, Technologietransfer, Presse/Öffentlichkeitsarbeit) dar. Welche Aktivitäten zur weiteren Verwertung der Projektergebnisse sind geplant? Die Basisinformationen hierzu tragen Sie bitte in die Excel-Vorlage ein. Erläutern Sie diese Basisinformationen hier bitte textlich.

Im Rahmen des Projektes wurden zahlreiche Publikationen erfolgreich veröffentlicht (mehr als 30 referierte Publikationen sowie drei nicht-referierte Beiträge in Konferenzbänden bzw. White Paper-Bänden). Besondere Highlights sind dabei der erste statistisch signifikante Nachweis, dass Exoplaneten durch Gezeitenkräfte die magnetische Aktivität und Rotation ihrer Zentralsterne verändern können (Ilic et al. 2023); die Entwicklung und Veröffentlichung des Codes PLATYPOS (PLAneTarY PhOtoevaporation Simulator), der die Verdampfung von Exoplaneten-Atmosphären unter realistischer Aktivitätsentwicklung der Zentralsterne simuliert (Ketzer & Poppenhaeger 2023); sowie realistische Simulationen von Sternwinden von 21 Sternen und deren Auswirkung auf habitable Zonen (Chebly et al. 2023).

Ende 2022 wurde von der Projektleiterin eine mit dem Projektthema thematisch verwandte Konferenz am AIP veranstaltet; der "Thinkshop on high-resolution spectroscopy of exoplanet atmospheres and biomarkers". Diese Konferenz hatte ca. 100 Teilnehmende und fand reges internationales Interesse. Die Konferenz hatte eine starke Beteiligung nicht nur von internationalen Expert*innen, sondern auch von Studierenden und Early Career Researchers.

Im Rahmen des Projekts wurden vier Masterarbeiten sowie vier Dissertationen fertiggestellt und erfolgreich verteidigt. Eine weitere Dissertation wurde kurz vor Ende der Projektlaufzeit eingereicht und wird voraussichtlich vor Jahresende verteidigt werden.

Mehrere Ergebnisse aus dem Projekt wurden in Pressemitteilungen des AIP der Öffentlichkeit vorgestellt. Des Weiteren wurden Forschungsergebnisse in öffentlichen Vorträgen, so z.B. im Zeiss-Planetarium Berlin im Jahr 2023, der breiten Öffentlichkeit näher gebracht.

Zur weiteren Verwertung ist zu sagen, dass das Projekt inhaltliche Fortschritte erbracht hat, die zu einem ERC Consolidator-Antrag der Projektleiterin geführt haben (dieser befindet sich derzeit unter Begutachtung). Des Weiteren werden die erzielten Erkenntnisse in die Targetauswahl für Exoplanetenbeobachtungen mit dem Extremely Large Telescope und dessen hochaufgelösten Spektrographen "ANDES" einfließen, welcher ca. 2035 seine Beobachtungen beginnen soll.

4. Chancengleichheit, Karriereförderung und Internationalisierung

Gehen Sie hier bitte kurz auf Ihre Initiativen und Maßnahmen zur Sicherung der Chancengleichheit in Bezug auf Geschlecht und Internationalisierung, insbesondere bei der Personalentwicklung und Personalgewinnung, ein. Bitte erläutern Sie auch ggf. getroffene Maßnahmen zur Karriereförderung von jungen Forscherinnen und Forschern. Die Basisinformationen hierzu tragen Sie bitte in die Excel-Vorlage ein. Erläutern Sie diese Basisinformationen hier bitte textlich.

Zur Sicherung der Chancengleichheit wurden bei Stellenausschreibungen Auswahlkomitees eingesetzt, die von Seiten des AIPs zuvor hinsichtlich "Unconscious Bias" geschult wurden. Das AIP trägt seit mehreren Jahren den "Total Equality Award" und setzt Maßnahmen zur Diversitätsverbesserung am Institut um. Die Gruppe der Mitarbeitenden an diesem Projekt zeichnete sich durch eine hohe Internationalität sowie eine über 50%-ige Frauenquote aus.

Zur Karriereförderung von jungen Forschenden wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen: die Projektleiterin veranstaltete einen jährlichen Workshop zur akademischen Karriereplanung, der rege besucht wurde; es wurde ein gemeinsames virtuelles Seminar mit der Exoplanetengruppe in Aarhus/Dänemark ins Leben gerufen, um den Forschenden zusätzliche Anschlussmöglichkeiten an das akademische Feld in einem niederschweligen Rahmen zu bieten; Angebote der Potsdam Graduate School zur Soft Skills wurden aktiv genutzt; und es fand regelmäßige Betreuung zu effektiven Konferenzbesuchen, Einwerben von Teleskop-Beobachtungszeit, sowie Einwerben von eigenen Drittmitteln statt.

5. Strukturen und Kooperationen

Beschreiben Sie bitte die konkrete Ausgestaltung der Kooperationen im abgeschlossenen Projekt inkl. möglicher Hindernisse und Herausforderungen. Erläutern Sie ggf. Veränderungen der Governance Ihres Vorhabens und/oder die Aufnahme neuer Partner bzw. Kooperationsbeziehungen. Sind in der Projektlaufzeit neue Kooperationsbeziehungen zu institutionellen Partnern aufgenommen worden, erläutern Sie bitte kurz den wissenschaftlichen Nutzen für Ihr Vorhaben. Sollten die Veränderungen Zusatzvereinbarungen zur oder Änderungen der bestehenden Kooperationsvereinbarung mit sich gebracht haben, fügen Sie diesem Bericht bitte entsprechende Kopien bei. Die Basisinformationen hierzu tragen Sie bitte in die Excel-Vorlage ein. Erläutern Sie diese Basisinformationen hier bitte textlich.

Die Kernarbeiten des Projekts wurden wie geplant von dem am AIP beheimateten Team durchgeführt. In der ursprünglichen Projektplanung waren Kollaborationen sowie Kollaborationsbesuche mit Kolleg*innen im internationalen Ausland geplant. Durch die Covid-19 Pandemie konnte jedoch zu den Kernphasen des Projektes keine Reisetätigkeit durchgeführt werden. Daher wurden die inhaltlich relevanten Kollaborationen mit virtuellen Treffen und Austauschformen durchgeführt. Dies war erfolgreich: es wurden mehrere gemeinsame Veröffentlichungen mit ursprünglich geplanten Collaborators erreicht (z.B. mit Dr. Wolk, Dr. Smith (Harvard-CfA)); zusätzlich wurden neue Kollaborationen umgesetzt, ebenfalls mit erfolgreich veröffentlichten gemeinsamen Ergebnissen (z.B. mit Prof. Dr. Stelzer (Tübingen), Prof. Dr. Agueros (Columbia University), und Dr. Garaffo (Harvard-CfA)).

Der wissenschaftliche Nutzen für das Projekt ergab sich typischerweise aus einer breiteren Expertise zur Nutzung bestimmter astrophysikalischer Instrumente. Formale Kooperationsvereinbaren wurden nicht getroffen.

6. Qualitätssicherung

Beschreiben Sie bitte kurz Ihre Maßnahmen zur Qualitätssicherung, insbesondere hinsichtlich der Einhaltung guter wissenschaftlicher Praxis sowie bei der Verfügbarmachung (Open Access) ihrer Forschungsergebnisse. Geben Sie zudem bitte an, ob im Projekt Tierversuche durchgeführt werden und wenn ja, erläutern Sie kurz Ihre Maßnahmen zum Tierschutz.

Die Qualitätssicherung insbesondere zur guten wissenschaftlichen Praxis wurde betrieben, indem die Forschungsergebnisse durch öffentliche Kataloge und Archive zugänglich gemacht wurden. Dazu wurden vor allem die Archive der ESA sowie das Strasbourg Astronomical Data Center (CDS) benutzt. Einzelne Datensätze und Codes wurden über Github sowie Zenodo zugänglich gemacht. Es wurden keine Tierversuche durchgeführt.

7. Zusätzliche Ressourcen

Bitte schätzen Sie die Höhe der Mittel ab, die im Rahmen des Projekts als „In-kind“ Leistungen an ihrem Institut, den beteiligten Leibniz-Instituten und/oder den universitären Kooperationspartnern erbracht wurden. Differenzieren Sie dabei nach Personalmitteln (z.B. in Personenmonaten, wissenschaftliche und nichtwissenschaftliche Mitarbeiter) und Sachmitteln.

Für die Förderformate mit Kofinanzierung (d.h. Leibniz-Professorinnenprogramm, Leibniz-Junior Research Groups, Leibniz WissenschaftsCampi, Leibniz-Forschungsverbünde) geben Sie bitte auch die Höhe der Kofinanzierung durch die Leibniz-Einrichtung(en) und (sofern zutreffend) der Verbundpartner an.

Für dieses Professorinnenprogramm beläuft sich die Kofinanzierung des AIP laut Antrag auf 766440 EUR über die Projektlaufzeit; diese wurde vollständig erbracht.

8. Ausblick

Beschreiben Sie bitte die wichtigsten zukünftigen Forschungsfragen und -felder.

Die zukünftigen Forschungsfragen, die sich aus den Ergebnissen dieses Projekts ableiten, sind: Welchen Einfluss haben magnetische (und nicht gezeiten-getriebene) Stern-Planeten-Interaktionen auf die Entwicklung von Exoplaneten-Atmosphären? Wie wahrscheinlich ist es, dass Planeten in der bewohnbaren Zone um M-Zwergsterne noch Atmosphären besitzen? Wie hoch sind unsere Chancen, Biosignaturen detektieren zu können, in Abhängigkeit von Typ des Zentralsterns?

Dieser Bericht wird veröffentlicht. Wenn zur Wahrung berechtigter Interessen des Zuwendungsempfängers oder Dritter oder aus anderen sachlichen Gesichtspunkten bestimmte Einzelheiten aus dem Bericht vertraulich zu behandeln sind (z. B. Wahrung der Priorität bei Schutzrechtsanmeldungen), so muss darauf an dieser Stelle ausdrücklich hingewiesen werden.

Es liegen keine Gründe vor, die der Veröffentlichung entgegenstehen.