

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Schlussbericht

Verbund: 05A2020 - ALMA

Zuwendungsempfänger: Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn  
Projektleitung: Prof. Dr. Frank Bertoldi  
E-Mail: bertoldi@astro.uni-bonn.de  
Förderkennzeichen: 05A20PD1  
Förderzeitraum: 01.07.2020 - 31.12.2023  
Zuwendung: 413.198,40 €  
Projektträger: Projektträger DESY  
  
Zusätzlicher Kontakt: muehle@astro.uni-bonn.de  
Zusätzlicher Name: Stefanie Mühle

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
	ESO	ALMA	
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	0		
Habilitationen:	0		
Referierte Publikationen:	0		
Andere Veröffentlichungen:	0		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	0		
Masterarbeiten:	0		
Staatsexamen:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 12.07.2024 22:07 für eine Veröffentlichung freigegeben.

# Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn  
Projektleitung: Prof. Dr. Frank Bertoldi

Verbund: Verbundprojekt 05A2020

Thema: **ALMA: Werkzeuge und Methoden für ALMA durch den Deutschen Knoten des European ALMA Regional Center Teilprojekt 1**

## Zusammenfassung

### *Teil II: Eingehende Darstellung (wird veröffentlicht)*

Das Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) ist das weltweit leistungsfähigste Instrument für Beobachtungen im Millimeter- und Submillimeterbereich. Um erfolgreich Beobachtungszeit zu akquirieren, sind neben wissenschaftlicher Exzellenz auch technische Expertise und maßgeschneiderte Werkzeuge erforderlich. Deutsche ALMA-Nutzer\*innen profitieren von der fachkundigen Beratung und Unterstützung durch den deutschen Knoten im europäischen ARC-Netzwerk sowie von den von ihm entwickelten passgenauen Werkzeugen für die optimale Nutzung von ALMA. Der VLBI-Beobachtungsmodus von ALMA führte bereits kurz nach der Implementierung zu spektakulären Forschungsergebnissen, die weltweit für Aufsehen sorgten, wie etwa die Abbildung des Schattens eines Schwarzen Lochs. Im Rahmen des EMACO-Projekts entwickelte der deutsche ARC-Knoten Werkzeuge zur detaillierten Modellierung der Daten komplexer Quellen unter Berücksichtigung der gegebenen Beobachtungsbedingungen und ergriff Maßnahmen zur langfristigen und einfachen Nutzung der vom Knoten entwickelten VLBI-Werkzeuge. Diese Werkzeuge ermöglichen es auch VLBI-unerfahrenen Astronom\*innen, VLBI-Daten mit ALMA zu beantragen und auszuwerten, sind aber auch für VLBI-Expert\*innen von großem Interesse. Darüber hinaus leistete der Knoten wichtige Beiträge zum Betrieb von ALMA und zur Entwicklung der deutschen ALMA-Community. Trotz der Corona-Pandemie hielt der Knoten seine umfangreichen und gut nachgefragten Angebote zur direkten Unterstützung und Schulung der ALMA-Nutzer\*innen in vollem Umfang aufrecht und entwickelte digitale Zugänge. Insbesondere die Trainingsprogramme Radio Astronomy und Radio Interferometry erfreuen sich weiterhin großer Beliebtheit. Mit dem interaktiven ALMA-Modell, das vom Knoten selbst entwickelt und realisiert wurde, gelingt es so gut, der Öffentlichkeit ALMA und die Faszination der Radiointerferometrie intuitiv zu vermitteln, dass die Nachfrage inzwischen die aktuellen Ressourcen des ARC-Knotens übersteigt.

# Bericht

## 1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) ist das größte bodengebundene Observatorium in der Astronomie, und das bei weitem leistungsstärkste Instrument der Welt für Millimeter- (mm) und Submillimeter-Beobachtungen. Es bietet eine um Größenordnungen bessere Empfindlichkeit, Auflösung und Abbildungsgenauigkeit als jedes andere bestehende Observatorium. Auf den längsten Basislinien übertrifft die Winkelauflösung von ALMA sogar die des Hubble Space Telescope (HST). ALMA liefert hochauflösende Bilder von Objekten des Sonnensystems, Protosternen und protoplanetaren Scheiben, Sternentstehungsgebieten und staubumhüllten Galaxien sowie kosmologisch wichtige Informationen über die Galaxienentwicklung. Bei globalen Very Long Baseline Interferometry (VLBI)-Kampagnen ermöglicht die extrem hohe Empfindlichkeit von ALMA spektakuläre Entdeckungen wie dem ersten Nachweis des Schattens eines Schwarzen Lochs im Zentrum von M87. Mit mehr als 3800 begutachteten Veröffentlichungen ist ALMA eine der produktivsten astronomischen Einrichtungen weltweit. Das Interesse der europäischen Forschungsgemeinschaft an der Nutzung von ALMA ist nach wie vor so groß, dass im Schnitt fünf- bis siebenmal mehr Beobachtungszeit beantragt wird als vergeben werden kann. Damit deutsche Astronominen und Astronomen bei der Bewerbung um innovative Forschungsprojekte mit ALMA erfolgreich sein können, ist es unabdingbar, dass sie für die Vorbereitung ihrer Projekte Zugang zu erstklassigen Werkzeugen haben und dass sie in der Lage sind, neue Beobachtungsmöglichkeiten zu nutzen und den Zugang zu den für die Datenanalyse erforderlichen Werkzeugen zu demonstrieren. Während mit ALMA aktuell sehr erfolgreich Spitzenforschung betrieben wird, arbeiten die ALMA-Projektpartner kontinuierlich daran, die Fähigkeiten von ALMA zu verbessern und zu optimieren. ALMA ist daher ein Instrument, das sich ständig weiterentwickelt und kontinuierlich neue Herausforderungen an die Nutzer\*innen und das Personal stellt.

Während ALMA vom Joint ALMA Observatory (JAO) in Chile betrieben wird, dienen die ALMA Regional Centers (ARC) in Europa, Nordamerika und Ostasien als Schnittstelle zwischen ALMA und den astronomischen Gemeinschaften. Der europäische ARC (EU-ARC, Hatziminaoglou et al. 2015, Msngr. 162,24) besteht aus einem zentralen Knoten bei der ESO in Garching, sowie sieben regionalen Knoten in den großen Kompetenzzentren der Radioastronomie. Die ARC-Knoten bieten eine umfassende Benutzerunterstützung, betreuen komplexe Projekte und Surveys, liefern neue Software- und Datenreduktionsmethoden, entwickeln ihre Wissenschaftsgemeinschaften und leisten zudem lokale Öffentlichkeitsarbeit. Alle diese Aufgaben gehen explizit über den Umfang der ARC-Kerndienste hinaus und werden nicht durch das ALMA-Projekt finanziert. Um die ALMA-Entwicklungsaktivitäten zu unterstützen und zu ergänzen und den Nutzer\*innen die bestmöglichen Werkzeuge und Methoden zur Datenbearbeitung zur Verfügung zu stellen, engagieren sich die europäischen ARC-Knoten außerdem in zahlreichen Studien und Entwicklungsprojekten. Der deutsche ARC-Knoten befindet sich an den astronomischen Universitätsinstituten in Bonn und Köln. Er ist seit den Anfängen der Konstruktionsarbeiten von ALMA ein fester Bestandteil des EU-ARC-Netzwerks und hat sich als Zentrum der ALMA-Expertise und Nutzer\*innenbetreuung für die astronomische Gemeinschaft in Deutschland und darüber hinaus etabliert.

## 2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Teilprojekt **VLBI für ALMA-Nutzer\*innen**: Seit seiner Implementierung im Frühjahr 2017 hat ALMAs mmVLBI-Modus bereits zu spektakulären und weltweit Aufsehen erregenden Forschungsergebnissen geführt. Seit den ersten Planungen hat der deutsche ARC-Knoten als Schnittstelle zwischen ALMA und den mmVLBI-Netzwerkbetreibern eine wichtige Rolle bei der Realisierung dieses speziellen Modus gespielt. Dementsprechend stammen jedes Jahr bis zu 38% weltweit akzeptierten Beobachtungsprojekte von deutschen VLBI-Forschenden. Die VLBI-Expertin des deutschen ARC-Knotens erkannte

jedoch schon früh, dass die Beantragung dieses neuen Beobachtungsmodus in der derzeitigen Implementierung für andere deutsche ALMA-Nutzer\*innen eine große Herausforderung darstellt, da für die Planung und Simulation von VLBI-Beobachtungen spezielle Software benötigt wurde, die oft veraltet und/oder schlecht dokumentiert war. Darüber hinaus unterscheiden sich die Abläufe für mmVLBI-Beobachtungen mit ALMA deutlich von denen der regulären ALMA-Beobachtungen. Im vom BMBF geförderten Projekt *Resources for VLBI Simulations and Estimates (ReVISE)* (2017-2020) entwickelte der deutsche ARC-Knoten daher Software-Werkzeuge, die mmVLBI+ALMA leicht zugänglich machen, und auch bei den VLBI-Expert\*innen auf großes Interesse stießen.

### 3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Die ALMA-Expert\*innen des deutschen Knotens in Bonn und Köln waren in den vergangenen 15 Jahren an zahlreichen Entwicklungsaktivitäten beteiligt. Sie wurden hauptsächlich durch Zuschüsse in Rahmen der Astronet-Ausschreibung und der BMBF-Verbundforschung finanziert, mit Beiträgen der Universitäten und EU FP7-Zuschüssen an das ESO ARC und an Radionet. Die Aktivitäten, die in den letzten drei Jahren am deutschen ARC-Knoten unterstützt wurden, lassen sich wie folgt unterteilen:

**ALMA-Techniken und -Entwicklung:** Jeder Knoten arbeitet an selbst definierten technischen Fragen, die für eine optimale Nutzung von ALMA entscheidend sind. Der deutsche Knoten konzentriert sich auf die in diesem Bericht skizzierten Themen, die den spezifischen Bedürfnissen der deutschen Forschenden entsprechen und die Fachgebiete des Knotens widerspiegeln.

**Dienstleistungen für den Betrieb von ALMA:** Der deutsche Knotenpunkt unterstützt den ALMA-Betrieb durch die Bewertung der Datenqualität für die von unserem Knotenpunkt unterstützten Projekte, die Entwicklung von Strategien zur Datenreduzierung sowie das Testen neuer Verfahren und neuer Softwareversionen, einschließlich Fehlerberichte und -behebungen.

**Persönliche Unterstützung für die Nutzer\*innen:** Deutsche Astronom\*innen profitieren in allen Phasen eines ALMA-Projekts vom Fachwissen und der Infrastruktur des deutschen ARC-Knotens, von der Antragsvorbereitung über die Datenreduktion und -analyse bis hin zur Archivrecherche. Dazu gehören ein persönlicher Ansprechpartner pro Projekt, persönliche Unterstützung bei Besuchen am deutschen Knoten und eine hocheffiziente IT-Infrastruktur. Häufige interne und externe Schulungen der Mitarbeitenden stellen sicher, dass die deutsche ALMA-Forschungsgemeinschaft stets eine Benutzerunterstützung von höchster Qualität erhält.

**Entwicklung der Benutzer-Gemeinschaft und Schulungen:** Seit der Eröffnung von ALMA im Jahr 2013 organisiert der deutsche Knoten pro Jahr mindestens zwei Veranstaltungen, darunter die traditionellen deutschen ALMA Community Days, unterhält eine informative Homepage und veröffentlicht einen regionalen Newsletter. Seine jährlichen interaktiven Schulungsprogramme *Radio Astronomy* und *Radio Interferometry* sind als Masterkurse an der Universität Bonn anerkannt und beliebte Tutorien unter Astronom\*innen in Deutschland und darüber hinaus. Eine beträchtliche Anzahl von Teilnehmenden hat die Kurse bereits per Video-Streaming verfolgt und dient nun als Multiplikator\*innen in ganz Deutschland. Durch die Einbindung von Promovierenden vor Ort in kleine, klar definierte Aufgaben erwerben diese wertvolle berufliche Fähigkeiten für den Einsatz innerhalb und außerhalb der Wissenschaft.

**Öffentlichkeitsarbeit und Förderung der Diversität:** Die Mitarbeitenden des Knotens organisieren und beteiligen sich an öffentlichen Veranstaltungen wie öffentlichen Vorträgen, Lehrerfortbildungsveranstaltungen und der Pressearbeit. Für die zentrale Mitmach-Ausstellung des größten deutschen Wissenschaftsfestivals *Highlights der Physik* entwickelte der deutsche ARC-Knoten im Jahr 2019 ein interaktives Spielzeug-Interferometer-Array aus LEGO-Bausteinen, Mikrocontrollern und Pythonprogrammen. Durch die Veränderung des Aufbaus und die Beobachtung der Auswirkungen in Echtzeit lernen die Besucher intuitiv die Grundprinzipien der Interferometrie. Seit 2019 ist das LEGO-ALMA ein fester Bestandteil aller nachfolgenden *Highlights der Physik* geworden und wird auch für viele weitere

öffentliche Veranstaltungen angefragt, u.a. dem Tag der offenen Tür des BMBF in Berlin im August 2023. Da Frauen im MINT-Bereich noch immer unterrepräsentiert sind, folgt die leitende ALMA-Expertin des deutschen ARC-Knoten häufig Einladungen, bei Mädchen und jungen Frauen für ihr Fachgebiet zu werben, und organisiert seit vielen Jahren u.a. den Bereich Astronomie der Schnupper-Uni für Oberstufenschülerinnen an der Universität Bonn.

#### **4 Verwendung der Zuwendung (wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, z. B. Investitionen, Personalmittel)**

Die bewilligten Mittel wurden größtenteils für Personal eingesetzt, sowie für Reisen, um die erzielten Ergebnisse auf Konferenzen, Workshops und Tutorien vorzustellen. Die bewilligten Computermittel ermöglichten es uns, einen weiteren Server mit ausreichend Festplattenplatz anzuschaffen, der für die Softwareentwicklung und das Testen unerlässlich war.

#### **5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele**

##### **5.1 Zugang zum mmVLBI-Modus mit ALMA in CASA und Online (Exploitation of mmVLBI with ALMA in CASA and Online, EMACO)**

Die Einbindung von ALMA in die globalen VLBI-Netzwerke GMVA und EHT hat die Empfindlichkeit und Abbildungsqualität der mmVLBI-Netzwerke entscheidend verbessert. Seit 2020 können in diesem Modus auch Quellen mit Flüssen  $<0.5$  Jy beobachtet werden, was diese Beobachtungstechnik für weitere Forschungsfelder und komplexere Quellen interessant werden lässt. Das Ziel des Projekts EMACO war die Entwicklung von Werkzeugen zur detaillierten Modellierung der Daten komplexer Quellen unter Berücksichtigung der gegebenen Beobachtungsbedingungen, sowie Maßnahmen zur langfristigen und einfachen Nutzung der von uns entwickelten VLBI-Werkzeuge.

Im Zentrum der EMACO-Entwicklung steht das Softwarepaket *modelvlbi*, ein Python-Code, der auf github entwickelt worden ist und der PEP8-Konvention entspricht. Im ersten Schritt liest *modelvlbi* alle wichtigen Beobachtungsparameter eines VLBI-Projekts aus öffentlich zugänglichen Dateien aus, die im Rahmen der Vorbereitung von mmVLBI-Beobachtungen von den mmVLBI-Netzwerkbetreibern mit dem Softwarepaket SCHED erzeugt werden. Im Gegensatz zu den vereinfachenden Annahmen im Vorgängerprojekt ReVISE bestimmt *modelvlbi* die tatsächlich an der Beobachtung beteiligten Teleskope und deren Frequenzbereiche und rekonstruiert die tatsächlich verwendete Beobachtungssequenz. Die dafür nötigen Dateien stehen ab dem Tag der VLBI-Beobachtungen zur Verfügung. Nutzer\*innen des mmVLBI-Beobachtungsmodes können somit bereits Wochen vor der Korrelation und Auslieferung der mmVLBI-Daten realistische Datensätze aus unterschiedlichen Ausgangsmodellen erzeugen und untersuchen.

Im Einzelnen führt *modelvlbi* die folgenden Hauptschritte aus: 1) Aus den Dateien zur Steuerung der Einzeleleskope im VLBI-Netzwerk extrahiert *modelvlbi* die exakten Frequenzbereiche, Kanalbreiten und Beobachtungszeiten jedes einzelnen Teleskops im Verbund. Im Gegensatz zu anderen Planungs- und Modellierungswerkzeugen werden dabei alle für die Kalibration benötigten Zeiträume und sogar die Fahrzeiten jedes Teleskops berücksichtigt. Dabei erlaubt eine feingliedrige Datenverarbeitung, Wetterveränderungen und anderen die Empfindlichkeit einer Antenna beeinträchtigenden Faktoren Rechnung zu tragen. 2) Für die Modellierung spezifizieren die Anwender\*innen in einer Textdatei den Fluss und die Modellparameter der beobachteten Objekte. Die in *modelvlbi* standardmäßig eingebundenen Modelle umfassen unter anderem eine Punktquelle, eine ausgedehnte Quelle mit gaußförmiger Helligkeitsverteilung sowie eine ausgedehnte homogene Scheibe, wobei die Ausdehnung in beiden Dimensionen variiert werden kann. Sollte der aktuelle Fluss einer Quelle nicht bekannt sein, kann er dank eines kleinen Hilfsprogramms aus einer umfangreichen ALMA-Datenbank extrahiert werden. Vor

der Verwendung der Eingaben prüft *modelvlbi* die Textdatei auf Vollständigkeit und stoppt den Prozess bei Bedarf mit einer entsprechenden Warnung. 3) Aus den eingegebenen Modellen und den exakten Beobachtungszeiten jeder Antenne erzeugt *modelvlbi* einen Datensatz (Measurement Set), der die in den Korrelatorzentren zu produzierenden Datensätze inklusive des zeitabhängigen Rauschens genau modelliert.

Um das entwickelte Softwarepaket *modelvlbi* einer möglichst großen Zielgruppe zugänglich zu machen, ist ein Grundprinzip der Entwicklung, dass Anwender\*innen zur Nutzung der Software keine weiteren Softwarepakete installieren müssen, sondern einige der in einer Standard-CASA-Installation enthaltenen Simulator-Funktionen genutzt werden. Leider sind einige Parameter dieser Funktionen unzureichend dokumentiert, so dass jeder Entwicklungsschritt sorgfältig überprüft und mit unterschiedlichen Optionen getestet werden musste. Während einer dieser intensiven Testphasen von *modelvlbi* entdeckten die Expert\*innen am deutschen ARC-Knoten, dass in einer dieser implementierten Funktionen Modellierungsdaten bei sehr langen Basislinien ( $u, v > 5400\text{km}$ ) verworfen werden. In einer fruchtbaren Zusammenarbeit mit dem CASA-Entwicklungsteam in den USA konnte das Problem im Frühjahr 2022 auf eine Fouriertransformation im innersten Kern der CASA-Software zurückverfolgt werden. Vermutlich war zu dem Zeitpunkt, als diese Routine in C++ geschrieben wurde, noch nicht absehbar, dass diese damals als AIPS++ bekannte Software in den kommenden Jahrzehnten eine dramatische Erweiterung ihrer Nutzung erfahren sollte und dass daher statt der genaueren 3D-Transformation die weniger CPU-aufwendige 2D-Transformation verwendet wurde. Leider ist der betreffende Code so tief im Kern der Software verankert, dass eine Lokalisierung und Änderung der betreffenden Transformation aufwendiger wäre als eine komplette Neuentwicklung der betreffenden Funktion. Da eine solche zusätzliche Entwicklungsarbeit im Rahmen der Förderperiode nicht realisierbar war und auch das CASA-Entwicklungsteam keine Ressourcen hat, diese Aufgabe zeitnah in Angriff zu nehmen, wurde Code von *modelvlbi* in einem ersten Schritt modularisiert, so dass die betroffene Funktion an nur einer einzigen Schnittstelle aufgerufen wird, wo sie sehr einfach durch eine verbesserte Funktion ersetzt werden kann. Die Entwicklung der verbesserten Funktion selbst war Teil des Verbundforschungsantrags des deutschen ARC-Knotens für die Förderperiode 2023-2026.

Um die langfristige Nutzbarkeit der vom deutschen Knoten entwickelten Softwarepakete *simVLBI* und *modelVLBI* zu sichern, war im Projekt EMACO vorgesehen, die unter CASA 5 entwickelte Software auf die grundlegend reformierte Version CASA 6 zu portieren. Diese Umstellung gelang durch moderate Anpassungen in den Codes und Bibliotheken und wurde erfolgreich in CASA 6.1 und CASA 6.2 getestet. Im Zusammenarbeit mit dem britischen ARC-Knoten war im Rahmen des EMACO-Projekts außerdem die Entwicklung eines vereinfachten Zugangs zu den Software-Paketen durch ein Webseitenformular vorgesehen. Leider wurde dieser Plan durch die vielfältigen Maßnahmen zur Eindämmung der Corona-Pandemie stark erschwert. Bis Mitte 2021 verhinderten Reisebeschränkungen den Forschungsaufenthalt am britischen ARC-Knoten. Im Juli 2021 verließ der Experte für das erfolgreiche Webportal *Observing Support Tool (OST)* den britischen ARC-Knoten, um für ein anderes Großprojekt zu arbeiten. Die Nachbesetzung seiner Stelle erwies sich pandemiebedingt und auf Grund der hohen Spezialisierung als große Herausforderung. Als Anfang 2022 absehbar war, dass sich der Start der intensiven Zusammenarbeit auf dem Gebiet des Webinterfaces weiter verzögern würde, wurde die Entwicklungsstrategie für dieses Arbeitspaket daher angepasst. In Folge dessen arbeitete sich die VLBI-Expertin des deutschen Knotens selbständig in die Programmiersprachen html und php ein und erprobte in verschiedenen Testläufen, wie Internetformulare erzeugt und eingegebene Daten der unterschiedlichsten Formate in maschinenlesbare Tabellen umgewandelt werden können. Diese Dateien dienen im nächsten Schritt als Input für die von deutschen Knoten entwickelten Softwaretools *simvlbi* und *modelvlbi*. Für die automatisierte Auslösung des Datenverarbeitungsprozesses in CASA ist weiterhin die Zusammenarbeit mit dem neuen OST-Experten des britischen ARC-Knotens essentiell.

Leider konnte auf Grund eines Ende 2022 erneut aufgetretenen Personalengpasses im britischen Knoten sowie der ab April 2023 geplanten Elternzeit des OST-Experten der Arbeitsaufenthalt am britischen Knoten nicht mehr innerhalb der Förderperiode erfolgen, so dass der Prozess aktuell noch nicht komplett automatisiert ist.

Es bleibt festzuhalten, dass abgesehen von diesem letzten Automatisierungsschritt im Teilprojekt Webinterface alle wesentlichen Entwicklungen des Arbeitspakets abgeschlossen werden konnten, trotz der gravierenden Auswirkungen der Corona-Pandemie auf die Arbeitswelt und das persönliche Leben der Expert\*innen des deutschen ARC-Knotens.

## **5.2 Nutzer\*innenunterstützung, Öffentlichkeitsarbeit und weitere Beiträge zu ALMA**

Die Maßnahmen zur Bekämpfung der Corona-Pandemie wirkten sich auch auf die Arbeit des deutschen ARC-Knotens in den Bereichen Nutzerunterstützung und Öffentlichkeitsarbeit aus. Mit dem ersten Lockdown und der Home-Office-Pflicht vom 18. März 2020 bis zum 30. Juni 2021 änderten sich die Arbeitsbedingungen für fast alle Mitarbeiter\*innen des Knotens drastisch: Informelle Begegnungen und Treffen mit ALMA-Nutzer\*innen waren kaum noch möglich, geplante Aktionen für Forschende und Dienstreisen wurden abgesagt oder auf unbestimmte Zeit verschoben.

Als Konsequenz entwickelte der ARC-Knoten alternative Kanäle der Nutzerunterstützung wie Schaltkonferenzen, Selbstlernvideos und virtuelle Netzwerke. Wo immer möglich, wurden Veranstaltungen in ein virtuelles Format überführt und die Eigenschaften dieses Formats optimal genutzt.

So konnte die leitende Expertin des ARC-Knotens für die von ihr mitorganisierte Online Schnupper- Uni 2021 der Universität Bonn am 18.02.2021 für den Fachbereich Astronomie Frau Dr. Suzanna Randall, eine Kollegin im europäischen ARC-Netzwerk und angehende Astronautin, als Role Model gewinnen und dank des Online-Formats erstmals auch junge Schülerinnen und Schüler aus weiter entfernten Regionen Deutschlands begrüßen.

Der traditionell im März/April durchgeführte Community Day zur Vorbereitung von Beobachtungsanträgen wurde in den Jahren 2020-2022 durch Selbstlernvideos ersetzt, die zusammen eine Länge von über 270 Minuten hatten, alle Aspekte der Vorbereitung von Beobachtungsanträgen abdeckten und von den Nutzer\*innen jederzeit abgerufen werden konnten. Ergänzend dazu organisierte der deutsche Knoten Online-Meetings der deutschen ALMA-Nutzer\*innen sowie individuelle Beratungsangebote per Zoom-Videokonferenz.

Auch die anderen Dienstleistungen des deutschen ARC-Knotens, wie die Beratung bei der Anpassung der 52 in Runde 7 bewilligten Projekte an die Wiederaufnahme des Beobachtungsbetriebs im Frühjahr 2021, die kritische Begleitung der Beobachtungen und die Unterstützung bei der Verarbeitung großer ALMA-Datensätze, wurden mit Online-Tools aufrechterhalten.

Der praktische Datenreduktionskurs Radiointerferometrie, der bis zum Sommer 2022 jährlich von April bis Juli stattfand, wurde auf ein rein digitales Format umgestellt, mit Treffen per Videokonferenz, der Erstellung vielfältiger Online-Materialien und dem Zugang zu den leistungsstarken Servern des ARC-Knotens über ein virtuelles Netzwerk, das über einen Webbrowser genutzt werden kann. Bei der Gestaltung des digitalen Kurses kam den Lehrenden die jahrelange Erfahrung des Knotens in der Einbindung externer Teilnehmer\*innen in Online-Schulungen zugute. Eine anschließende Befragung sowohl der lokalen Studierenden als auch der externen Teilnehmer\*innen ergab in beiden Gruppen eine sehr hohe Zustimmung zur Gestaltung und Durchführung des Kurses. Seit Herbst 2022 kann der Kurs aufgrund von Mittelkürzungen im deutschen ARC-Knoten ab der Förderperiode 2020-2023 leider nur

noch als Selbstlernkurs auf Basis der damals erstellten Online-Materialien angeboten werden. Auch der Masterkurs Radioastronomie, den die Expert\*innen des deutschen ARC-Knotens seit 2017 jährlich von Oktober bis Februar anbieten, fand zwei Jahre lang komplett online statt und wurde in dieser Zeit sowohl von deutschen als auch von ausländischen Astronom\*innen verstärkt nachgefragt. Seit 2022 findet dieser Kurs wieder als Präsenzveranstaltung statt, wobei dank der hervorragenden technischen Ausstattung eine gewinnbringende Teilnahme per Videokonferenz weiterhin möglich ist und sich nach wie vor großer Beliebtheit bei Astronom\*innen aus anderen Regionen Deutschlands erfreut.

Auch der individuelle Nutzersupport, der Anfang 2022 noch vollständig online erfolgte, konnte im Laufe des Jahres 2022 durch zahlreiche persönliche Treffen bereichert werden und im Oktober 2022 unterrichteten Mitarbeiter\*innen des ARC-Knotens im Rahmen eines einwöchigen Trainings in Bologna wieder vor Ort die Nutzung des ALMA-Archivs.

Neben dem Training und der direkten Unterstützung von ALMA-Nutzer\*innen trug der deutsche ARC-Knoten weiterhin zum Betrieb von ALMA und zur Erweiterung der Nutzungsmöglichkeiten bei. Mit der Aussetzung des Beobachtungsbetriebs am ALMA-Observatorium für ein knappes Jahr (März 2020 bis März 2021) und der entsprechenden Verschiebung des Call for Proposals im April 2020 ging die Nachfrage nach Unterstützung bei der Antragstellung und Betreuung der 52 in Zyklus 7 betreuten Projekte kurzzeitig zurück. Alle anderen Aktivitäten des ARC-Knotens liefen jedoch weiter, wenn auch in teilweise veränderter Form. Dazu gehörten neben der konkreten Unterstützung bei der Datenreduktion und -analyse der ALMA-Daten auch die Weiterbildung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Themen u.a. Nutzung der ALMA-Pipeline zur Datenreduktion, Unterstützung der Forschenden bei der Erstellung von öffentlichen Datenprodukten aus den Large Programs, Begutachtung von Weblogs) und die regelmäßigen Videokonferenzen mit den Managementteams der anderen europäischen Knoten und der weltweiten ALMA-Zentren.

Die vom Knoten mitorganisierten Konferenzen und Workshops wie das Symposium Radio2020 im Oktober 2020 fanden weiterhin statt, allerdings vollständig online. Daneben arbeiteten die Expert\*innen des Knotens in verschiedenen Arbeitsgruppen innerhalb des ALMA-Netzwerks mit. Unter anderem entwickelten die Mitarbeitenden des Knotens seit September 2020 in der Arbeitsgruppe „High-level archive data products“ Programme zur Erzeugung von wissenschaftlich hochwertigen Produkten, die vor allem Forschenden im Bereich hoher Rotverschiebungen zugutekommen. Als Koordinatorin der mmVLBI-Expertengruppe im europäischen ALMA-Netzwerk organisierte die VLBI-Expertin des deutschen Knotens im Februar 2021 das Training der VLBI-Analysten als Online-Workshop und koordinierte anschließend die Qualitätssicherung und Auswertung der im Rahmen der VLBI-Kampagne gewonnenen ALMA-Daten.

Weitere Mitglieder des deutschen ARC-Knotens beteiligten sich an der Außendarstellung im europäischen ARC-Netzwerk. Eine leitende Mitarbeiterin des Knotens ist Gründungsmitglied und Mitglied des Lenkungsausschusses der Weiterbildungsinitiative Interactive Training in Reduction and Analysis of Interferometric data (I-TRAIN) des europäischen ARC-Netzwerks, die während der Pandemiejahre bis zu zwei Online-Seminare pro Monat angeboten hat und auch heute noch regelmäßig Schulungen durchführt. Die interaktiven Sitzungen decken ein breites Spektrum von Themen ab, die für ALMA-Nutzer\*innen von Interesse sind und ihnen bei der Arbeit mit interferometrischen Daten helfen. Der deutsche ARC-Knoten war zuletzt im Januar 2024 (Thema mmVLBI) und im Februar 2024 (Thema XCLASS) federführend an I-TRAIN-Schulungen beteiligt.

Als im September 2022 das Wissenschaftsfestival Highlights der Physik nach zweijähriger Pause wieder stattfand, organisierte der deutsche Knoten auf Einladung der DPG einen sehr gut besuchten Stand in Regensburg, um der breiten Öffentlichkeit mit Hilfe von LEGO-ALMA und weiterem Anschauungsmaterial die Faszination der Radiointerferometrie und die mit ALMA gewonnenen spektakulären wissenschaftlichen Erkenntnisse näher zu bringen. Seitdem hat der ARC-Knoten ALMA, das Prinzip

der Radiointerferometrie und die neuesten spektakulären Erkenntnisse der Radioastronomie auf zahlreichen öffentlichen Veranstaltungen bekannt gemacht. Bei der jährlichen Schnupperuni der Universität Bonn erfreut sich die vom ARC-Knoten betreute Astronomie weiterhin großer Beliebtheit. Zum Ende der Förderperiode überstieg die Nachfrage der Organisatoren öffentlicher Veranstaltungen die personellen Kapazitäten des deutschen ARC-Knotens bei weitem.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der deutsche ARC-Knoten auch in den Jahren der Corona-Pandemie seine Dienstleistungen und Services in gewohnt hoher Qualität aufrechterhalten hat und seine Schulungsangebote so gefragt waren wie nie zuvor. Die Notwendigkeit von Heimarbeitsplätzen und Online-Besprechungen hat darüber hinaus sowohl die Vernetzung der Projektpartner untereinander als auch Initiativen innerhalb des europäischen ALMA-Netzwerks gefördert. Die während der Pandemie erprobten neuen Formate erleichtern die Einbindung von Nutzer\*innen aus weiter entfernten Regionen Deutschlands und sollen beibehalten werden, um die gesamte deutsche Wissenschaftsgemeinschaft bei der aktuellen Nutzung von ALMA und im Hinblick auf kommende Veränderungen bestmöglich zu unterstützen.

## **6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die Teilnahme Deutschlands am EU-ARC erfordert beträchtliche Eigenmittel, insbesondere für die grundlegenden ARC-Dienstleistungen zur Projektabwicklung und die individuelle Betreuung der Nutzer\*innen. Für die Durchführung der Entwicklungsprojekte sind wir auf eine Förderung aus dem Verbundforschungsprogramm angewiesen, da das Vorhaben aus den Mitteln unserer Universitätshaushalte nicht finanzierbar ist. Eine Teil- oder Vollfinanzierung des Vorhabens durch ein Forschungsrahmenprogramm der EU ist nicht möglich, da das Projekt in keines der derzeit ausgeschriebenen Förderprofile passt. RadioNet bietet nur finanzielle Unterstützung für ALMA-Nutzer\*innen, die zur persönlichen Betreuung einen ARC-Knoten besuchen möchten.

## **7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die hier entwickelten Werkzeuge und die Betreuungsinfrastruktur des ARC-Knotens kommen im Wesentlichen den ALMA-Nutzer\*innen zugute. Ein Ziel der Aktivitäten ist es, den Kreis der deutschen Nutzer\*innen zu erweitern. Unsere Trainingskurse, Workshops und Tutorien sollen auch Wissenschaftler\*innen, die noch nie ALMA benutzt haben und sich von dem komplexen Instrument abgeschreckt fühlen, an ALMA-Beobachtungen heranführen. Diese Angebote werden durch die Möglichkeit individueller Betreuung sowohl in der Antrags- als auch in der Auswertungsphase ergänzt. Darüber hinaus sollen die im Rahmen des ARC-Knotens entwickelten Werkzeuge auch Nicht-Expert\*innen den Einstieg in höchstauflösende Beobachtungen via mmVLBI ermöglichen.

## **8 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Es gibt keine öffentlich zugängliche konkurrierenden Projekte oder Erkenntnisse, die für uns relevant sind.

## **9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

9.1 Referierte Publikationen (z. B. in Fachzeitschriften oder -büchern und referierte Konferenzproceedings)

9.2 Andere Veröffentlichungen (z. B. Konferenzbeiträge wie Vorträge und Poster, unreferierte Proceedings, Conference Notes)

9.3 Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Diplom, Staatsexamen, Promotion, Habilitation)

Die rein technischen Arbeiten dieses Projekt eignen sich selten für dedizierte Examensarbeiten. In Bonn sind dennoch stets mehrere Doktorand\*innen an ARC-Aktivitäten beteiligt und gewinnen damit tiefen Einblick in das ALMA-Projekt und die von und für ALMA entwickelte Software und etablieren sich als Experten in der mm-Interferometrie Community.

## Kurzbericht

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger:	Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Projektleitung:	Prof. Dr. Frank Bertoldi
Verbund:	Verbundprojekt 05A2020
Thema:	ALMA: Werkzeuge und Methoden für ALMA durch den Deutschen Knoten des European ALMA Regional Center, Teilprojekt 1

### 1 Ziel und Inhalt des Projektes

#### Teil I: Kurzbericht

Das Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) ist das weltweit leistungsfähigste Instrument für Beobachtungen im Millimeter- und Submillimeterbereich. Um erfolgreich Beobachtungszeit einzuwerben, sind neben wissenschaftlicher Exzellenz auch technische Expertise und maßgeschneiderte Werkzeuge erforderlich. Deutsche ALMA-Nutzer\*innen profitieren von der fachkundigen Beratung und Unterstützung durch den deutschen Knoten im europäischen ARC-Netzwerk sowie von den von ihm entwickelten passgenauen Werkzeugen für die optimale Nutzung von ALMA. Der VLBI-Beobachtungsmodus von ALMA hat bereits kurz nach der Implementierung zu spektakulären Forschungsergebnissen geführt, die weltweit für Aufsehen gesorgt haben, wie etwa die Abbildung des Schattens eines Schwarzen Lochs. Im Rahmen des EMACO-Projekts hat der deutsche ARC-Knoten Werkzeuge zur detaillierten Modellierung der Daten komplexer Quellen unter Berücksichtigung der gegebenen Beobachtungsbedingungen entwickelt und Maßnahmen zur langfristigen und einfachen Nutzung der vom Knoten entwickelten VLBI-Werkzeuge ergriffen. Diese Werkzeuge ermöglichen auch VLBI-unerfahrenen Astronom\*innen die Beantragung und Auswertung von VLBI-Daten mit ALMA, sind aber auch für VLBI-Expert\*innen von großem Interesse. Darüber hinaus leistete der Knoten wichtige Beiträge zum Betrieb von ALMA und zur Entwicklung der deutschen ALMA-Community. Trotz der Corona-Pandemie hielt der Knoten seine umfangreichen und gut nachgefragten Angebote zur direkten Unterstützung und Schulung der ALMA-Nutzer\*innen in vollem Umfang aufrecht und entwickelte digitale Zugänge. Mit dem interaktiven ALMA-Modell, das der Knoten selbst entwickelt und realisiert hat, gelingt es ihm so gut, der Öffentlichkeit ALMA und die Faszination der Radiointerferometrie intuitiv zu vermitteln, dass die Nachfrage inzwischen die aktuellen Ressourcen des ARC-Knotens übersteigt.

## 2 Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Neben der Entwicklung der Werkzeuge für den mmVLBI-Modus (s. Punkt 3) unterstützte der deutsche ARC-Knoten den Betrieb von ALMA, u. a. in der Qualitätssicherung und in der Auswertung der im Rahmen der VLBI-Kampagnen gewonnenen Daten. Daneben entwickelte der Knoten die deutsche ALMA-Forschungsgemeinschaft weiter, führte eine Reihe sehr gut besuchter Schulungen durch und trug wesentlich zum Erfolg der europaweiten Weiterbildungsinitiative Interactive Training in Reduction and Analysis of Interferometric data (I-TRAIN) bei. Durch die Einbindung von Promovierenden vor Ort in kleine, klar definierte Aufgaben erwerben diese wertvolle berufliche Fähigkeiten für den Einsatz innerhalb und außerhalb der Wissenschaft. In individuellen Beratungen und Arbeitsbesuchen profitierten deutsche Astronom\*innen in allen Phasen ihrer ALMA-Projekte vom Fachwissen und der hocheffizienten Infrastruktur des deutschen ARC-Knotens, von der Antragsvorbereitung über die Datenreduktion und -analyse bis hin zur Archivrecherche. Das interaktive ALMA-Modell des Knotens zusammen mit den Erläuterungen der Mitarbeitenden bei den Highlights der Physik 2019 war so ein durchschlagender Erfolg, dass der Knoten seit dem Auslaufen der Corona-Beschränkungen zu zahlreichen öffentlichen Veranstaltungen eingeladen wurde, um der Öffentlichkeit die ALMA und die faszinierende Welt der Radiointerferometrie näher zu bringen, u.a. am Tag der offenen Tür des BMBF in Berlin in August 2023.

## 3 Darstellung der wesentlichen Ergebnisse und deren konkreter Nutzen sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Seit seiner Implementierung im Frühjahr 2017 hat ALMAs mmVLBI-Modus bereits zu spektakulären und weltweit Aufsehen erregenden Forschungsergebnissen geführt, an denen deutsche VLBI-Expert\*innen dank der Unterstützung des deutschen ARC-Knotens großen Anteil hatten. Mit der Entwicklung des Softwarepakets *modelVLBI* ist es nun auch deutschen Astronom\*innen ohne VLBI-Expertise möglich, höchstauflösende Beobachtungen unter realistischen Bedingungen zu modellieren und damit erfolgreich mmVLBI-Beobachtungen mit ALMA einzuwerben und effizient auszuwerten. Neben der Nutzung der für alle ALMA-Daten vorgesehenen Datenreduktionssoftware *Common Astronomy Software Applications (CASA)* sind für die Anwendung von *modelVLBI* keine Spezialkenntnisse notwendig.

Mit der Portierung der vom deutschen ARC-Knoten entwickelten VLBI-Werkzeuge *simVLBI* und *modelVLBI* zur grundlegend reformierten CASA-Version 6 wurde sichergestellt, dass die Softwarepakete langfristig einfach nutzbar bleiben.

Durch seine Aktivitäten für die astronomische Forschungsgemeinschaft unterstützt der deutsche ARC-Knoten die deutschen Astronom\*innen dabei, Zugang zu ALMA zu bekommen und die gewonnenen Daten bestmöglich zu nutzen. Daneben erhöht der Knoten durch seine Öffentlichkeitsarbeit die wissenschaftliche Bildung und die Akzeptanz astronomischer Großprojekte.

Als integraler Bestandteil des europäischen ARC-Netzwerks trägt der deutsche Knoten wesentlich zu Betrieb und Weiterentwicklung von ALMA bei und fördert den wissenschaftlichen Austausch innerhalb Europas und darüber hinaus. Der seit 12 Jahren vom BMBF geförderte Forschungsverbund mit der Universität zu Köln hat zu einer engen Vernetzung der astronomischen Forschung und Entwicklung sowie zu zahlreichen Synergien an beiden Universitäten geführt.