

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Verbund: 05A2020 - D-MeerKAT-II

Zuwendungsempfänger: Technische Universität München
Projektleitung: Prof. Dr. Rüdiger Westermann
E-Mail: westermann@tum.de
Förderkennzeichen: 05A20WO4
Förderzeitraum: 01.07.2020 - 31.10.2023
Zuwendung: 275.748,05 €
Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt: ensslin@MPA-Garching.MPG.DE
Zusätzlicher Name: Torsten Ensslin

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	1		
Habilitationen:	0		
Referierte Publikationen:	5		
Andere Veröffentlichungen:	15		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	0		
Masterarbeiten:	5		
Staatsexamen:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 08.05.2024 18:23 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Schlussbericht

– öffentlich –

Zuwendungsempfänger: Technische Universität München

Projektleitung: Prof. Rüdiger Westermann

Verbund: 05A2020-D-MeerKAT-II

Thema: Ein deutscher Beitrag zur Weiterentwicklung der Radioastronomie im Zentimeterwellenlängenbereich, Teilprojekt 7: MeerKAT Bildgebung und Signal Rekonstruktion

Zusammenfassung

MeerKAT ist das empfindlichste Radioteleskop im Zentimeterwellenbereich und wird vom südafrikanischen Radioastronomie-Observatorium (SARAO) betrieben. Es schließt die Lücke in der spektralen Abdeckung zwischen LOFAR und ALMA und ergänzt die astronomische Infrastruktur auf der südlichen Hemisphäre (E-ELT, LSST, CTA). MeerKAT soll schließlich in die Mittelfrequenzkomponente des Square Kilometre Array (SKA) integriert werden. Ein erster Prototyp der SKA-Mittelfrequenzkomponente ist das SKA-MPG-Teleskop, ein SARAO-MPG-Partnerschaftsprojekt.

Am BMBF-Verbundforschungsprojekt D-MeerKAT-II waren sieben Universitäten (Bielefeld, Bochum, Dortmund, Hamburg, Heidelberg, LMU und TU München) und vier Forschungsinstitutionen (MPIfR Bonn, MPA Garching, FZ Jülich, TLS Tautenburg) beteiligt. Ziel des Projektes war, verbesserte Methoden der datenintensiven Radioastronomie zur Entdeckung neuer astronomischer Strukturen zu entwickeln. Durch die Umsetzung und Integration dieser Methoden sollten die Beobachtungsmöglichkeiten des MeerKAT- und SKA-MPG-Teleskops verbessert werden. Des Weiteren sollte am Prototyp Datenzentrum am FZ Jülich eine effiziente und skalierbare Handhabung und Verarbeitung von Daten aufgebaut werden, beinhaltend auch die Entwicklung von neuen Methoden für Bildgebung und Kalibration. Darüber hinausgehend sollte ein On-the-fly Bildgebungsmodus entwickelt und die Beobachtungsmöglichkeiten des SKA-MPG-Teleskop erweitert werden.

Das Projekt war in mehrere Teilprojekte und Arbeitspakete unterteilt. Das Team an der TUM und am MPA hat an zwei Arbeitspaketen federführend gearbeitet. Im ersten Arbeitspaket “Richtungsabhängige Polarisationskalibration” ging es darum, atmosphärische als auch Antennen-basiert Effekte zu rekonstruieren, die einen signifikanten Einfluss auf die astronomischen Beobachtungen haben. Damit sollte die Qualität der rekonstruierten Bilder verbessert werden. Im zweiten Arbeitspaket “Multi-Frequenz Polarizationsbildgebung” sollte ein Bayes’scher Algorithmus entwickelt werden, der Polarisationsstrukturen im Raum und Frequenzbereich abbilden kann. Für beide Arbeitspakete sollten Bayes’sche Methoden entwickelt werden, die eine Quantifikation der Rekonstruktionsunsicherheit ermöglichen. Die entwickelten Methoden sollten auf dem Bayes’schen Bildgebungsalgorithmus **resolve** aufbauen und in diesen integriert werden. Die Forschungsinhalte der Gruppen von Prof. Rüdiger Westermann (TUM) im Bereich volumetrische Rekonstruktion und visuelle Datenanalyse und Dr. Torsten Enßlin (MPA) im Bereich Informations-Feldtheorie boten zur Erreichung der Ziele ideale Rahmenbedingungen.

In beiden Arbeitspaketen konnten signifikante Fortschritte erzielt werden. So wurde zum Beispiel in der Veröffentlichung des Doktoranden Jakob Roth [1] die Bayes’sche Bildrekonstruktionen

mit richtungsabhängiger Kalibration mit einem Bayes'schen Ansatz ohne Kalibration [2] und einer der besten alternative Rekonstruktionsmethoden [3] verglichen. Dabei wurde gezeigt, dass sich die Auflösung und Sensitivität des Bildes durch die Integration von richtungsabhängiger Kalibration signifikant verbessern lässt. Abb. 1 zeigt den Vergleich der Rekonstruktionsergebnisse der genannten Methoden und demonstriert die Verbesserung des Rekonstruktionsergebnis. Insbesondere zeigt der Vergleich den erzielten Fortschritt durch die signifikant verbesserte Auflösung des rekonstruierten Signals.

Abb. 2 zeigt einen weiteren Vergleich der Rekonstruktionsergebnisse für die Radiogalaxie Cygnus A. Hier werden die Ergebnisse einer Bayes'schen Polarisationsrekonstruktion mit dem Standard-Algorithmus CLEAN und der Bayes'sche Rekonstruktion mit **resolve** verglichen. Insbesondere kann mit dem neuen Verfahren die Unsicherheiten der Polarisationsrichtung quantifiziert werden, was mit CLEAN bisher nicht möglich ist.

Der Anwendbarkeit der entwickelten Methoden geht über den Kontext von D-MeerKAT hinaus. So wurde beispielsweise **resolve** auch auf Daten des optischen Interferometers GRAVITY angewendet und damit ein bisher unbekannter Stern entdeckt [4]. Darüber hinaus wird an der europäischen Südsternwarte (ESO) die Anwendbarkeit von **resolve** auf Daten des ALMA Radio Teleskops untersucht.

Dem D-MeerKAT Konsortium ist es auch in der zweiten Förderphase gelungen, zahlreiche Institutionen und Personen zur gemeinsamen Forschung an einem zentralen Forschungsgegenstand zusammenzubringen. Das Konsortium hat sich durch regelmäßigen Projekttreffen weiterentwickelt, was schließlich in der erfolgreichen Beantragung einer dritten Förderperiode mündete. Die internationale Kooperation mit den südafrikanischen Kolleg*innen wurde sowohl auf individueller Basis über eine Vielzahl von Einzelkontakten also auch im Rahmen der Treffen des D-MeerKAT Konsortiums vertieft.

Die Ergebnisse des D-MeerKAT Verbunds ermöglichen den beteiligten Universitäten und Instituten Zugang zum derzeit leistungsfähigsten Radioteleskop bei mittleren Radiofrequenzen und helfen, die Weiterentwicklung von MeerKAT zum SKA-Mid Teleskop voranzutreiben.

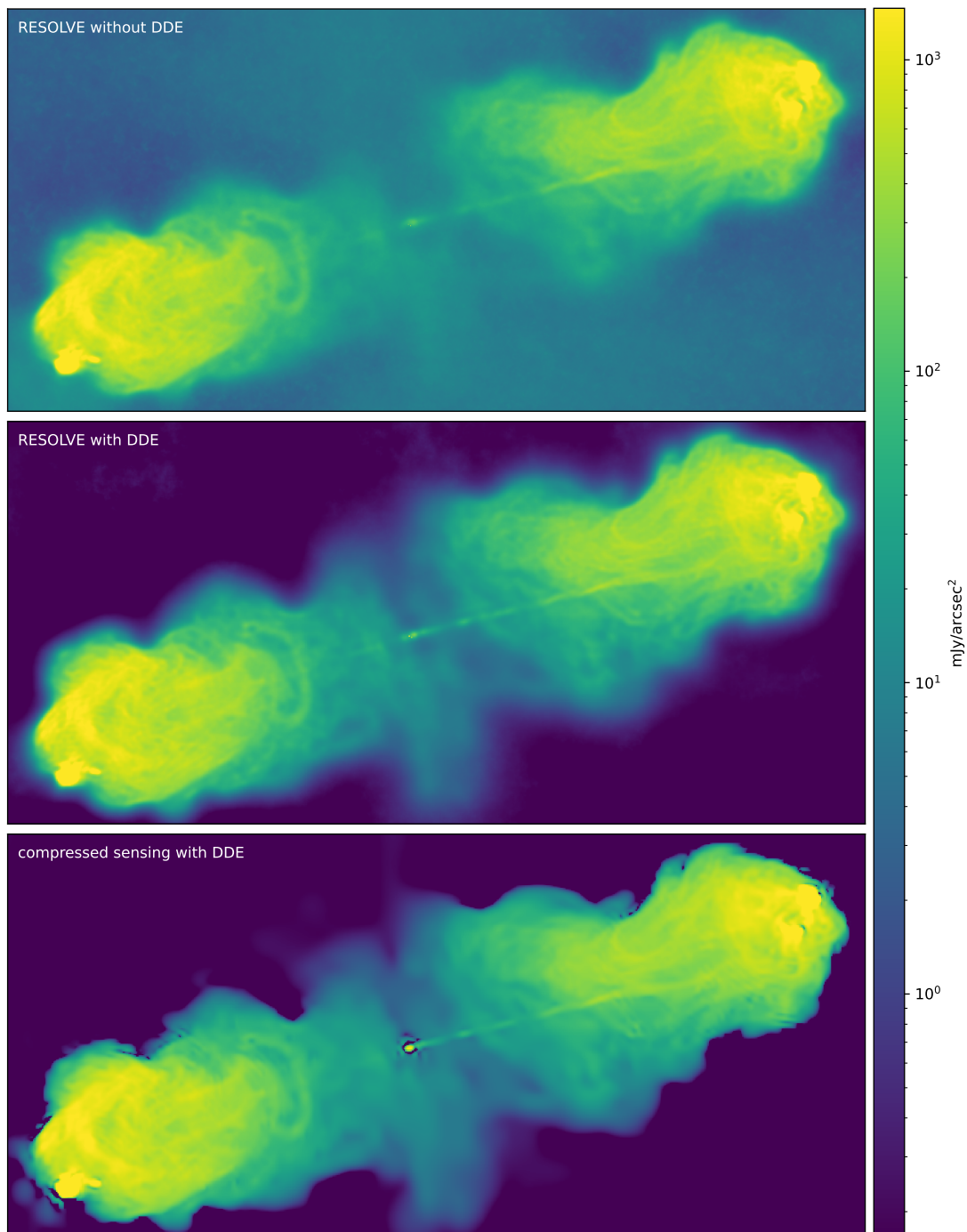


Abbildung 1: Himmel-Helligkeitsverteilung der Radiogalaxie Cygnus A, beobachtet bei 2052 MHz. Die Darstellung verwendet eine logarithmische Skala. Die obere Abbildung stammt aus der Publikation P. Arras u. a. 2021 und wurde mit `resolve` ohne richtungsabhängige Kalibration berechnet. Die mittlere Rekonstruktion wurde mit `resolve` und richtungsabhängiger Kalibration berechnet. Die untere Rekonstruktion wurde von A. Dabbech u. a. 2021 veröffentlicht und beinhaltet auch eine richtungsabhängige Kalibration, verwendet aber eine Compressed Sensing Methode anstelle einer Bayes'schen Methode.

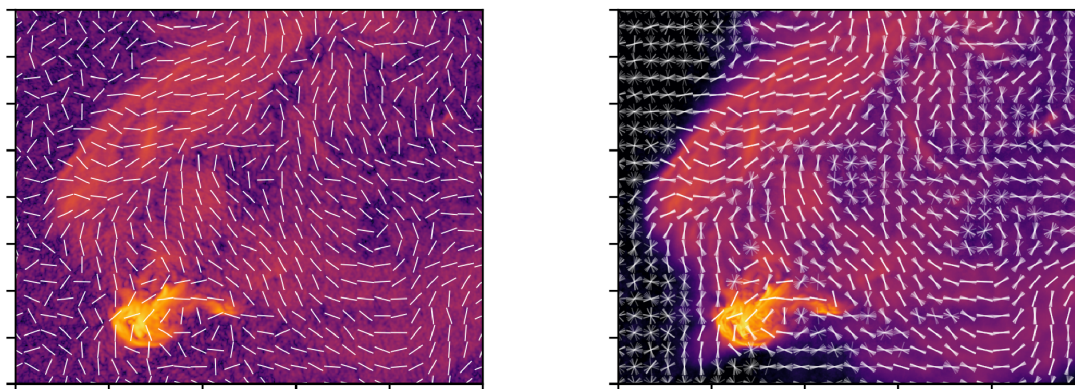


Abbildung 2: Himmel-Helligkeitsverteilung ausgehend von der Radiogalaxie Cygnus A, die bei 13360 MHz beobachtet wurde. Die Darstellung verwendet eine logarithmische Farbskala zur Darstellung der totalen Intensität. Die linke Abbildung wurde mit dem CLEAN Algorithmus berechnet. Die rechte Abbildung mit `resolve`. Die weißen Balken stellen die Richtung der linearen Polarisation dar. In der Rekonstruktion mit `resolve` sind mehrere Posterior-Sample dargestellt, sodass die Unsicherheiten der Polarisationsrichtung erkennbar wird. Für die CLEAN Rekonstruktion ist dies nicht möglich.

Bericht

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

MeerKAT ist der SKA-MID-Vorläufer in der südafrikanischen Karoo-Region. Es wurde 2018 eingeweiht und besteht aus 64 Parabolspiegeln mit einem Durchmesser von 13,5 m, die über 8 km verteilt und zu einem Interferometer verbunden sind. MeerKAT wird schließlich in das Instrument für mittlere Frequenzen des Square Kilometre Array (SKA) integriert werden. Ein erster Prototyp für diese SKA-Komponente ist das SKA-MPG-Teleskop

Um die riesigen Datenmengen dieser Anlagen voll auszuschöpfen und den wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn zu maximieren, sind spezielle Vorbereitungen erforderlich. Insbesondere müssen instrumentelle Effekte mit hoher Präzision quantifiziert und optimale Algorithmen zur Aufbereitung und Darstellung der Daten für wissenschaftliche Analysen entwickelt werden. Das D-MeerKAT-I Konsortium war in Deutschland maßgeblich für die Weiterentwicklung der Zentimeterwellen-Radioastronomie verantwortlich, indem es sich an der Entwicklung von MeerKAT und des SKA-MPG-Teleskops beteiligte. Das D-MeerKAT-II Konsortium hat an diese Arbeiten angeknüpft, um folgende Ziele zu erreichen: Zum einen sollte ein zukunftsorientiertes und skalierbares Rechenzentrum für große Mengen radioastronomischer Forschungsdaten aufgebaut werden. Des Weiteren sollten neue Bildgebungsmethoden basierend auf dem Bayes'schen Ansatz entwickelt werden. Darüber hinaus sollte die Durchsuchung von Radiodaten und die Identifikation von transienten Objekten sowie "on-the-fly"-Interferometrie ermöglicht werden. Und schlussendlich sollte das SKA-MPG-Teleskop für eine spektro-polarimetrische Durchmusterung, den robotischen Betrieb sowie für Very Long Baseline Interferometry vorbereitet werden.

Das Team an der TUM und dem MPA hat im Speziellen an der Entwicklung von Bayes'schen Bildgebungs- und Kalibrationsmethoden gearbeitet. Dazu boten die Arbeitsgruppen am Informatik-Lehrstuhl von Prof. Rüdiger Westermann von der Technischen Universität München und der Informationsfeldtheoriegruppe von Dr. Torsten Enßlin am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching die perfekten Voraussetzungen.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Es konnte an viele Vorarbeiten aus der D-MeerKAT-I Kollaboration sowie Arbeiten der Informationsfeldtheorie-Gruppe von Dr. Torsten Enßlin angeknüpft werden. Speziell soll hier die Arbeit von Dr. Philipp Frank aus der Informationsfeldtheoriegruppe erwähnt sein, die wichtige Beiträge zu Bayes'sche Inferenz [5] geleistet hat. Außerdem soll Dr. Martin Reinecke erwähnt sein, der seine Expertise in die Implementierung effizienter Algorithmen eingebracht hat.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Im Laufe des Projekts wurden eine Vielzahl von Kollaborationen vertieft. Besonders Augenmerk hierbei lag auf einer Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern in Südafrika, die unmittelbaren Zugang zu dem Teleskop MeerKAT und seinen Daten haben. Hier sind besonders Prof. Oleg Smirnov und Dr. Landman Bester zu nennen, die für die Rhodes Universität und das *South Africa Radio Astronomy Observatory* (SARAO) arbeiten. In Zusammenarbeit mit diesen konnte bereits in D-MeerKAT-I ein erstes gemeinsames Forschungsprojekt zum Abschluss gebracht werden [2]. Mit D-MeerKAT-II wurde die Kollaboration vertieft und monatliche online Treffen etabliert. Diese Kollaboration ist für die deutsche Radioastronomie-Gemeinschaft von großem Wert, weil durch den persönlichen Kontakt zu Wissenschaftlern vor Ort Detailwissen über das Teleskop und seine Daten kommuniziert werden können.

Darüber hinausgehend wurde die bereits bestehende Verbindung zu Dr. Richard Perley vertieft, der für das *National Radio Astronomy Observatory* (NRAO) in den Vereinigten Staaten arbeitet. Dr. Richard Perley war bereits ein integraler Bestandteil des D-MeerKAT-I Projekts und an der Veröffentlichung [2] beteiligt. In D-MeerKAT-II war Dr. Richard Perley erneut direkt involviert und an der Publikation [1] beteiligt.

Das MeerKAT Konsortium hat sich intern über persönliche Treffen sowie Videokonferenzen ausgetauscht. Das Online-Format der D-MeerKAT Science Days hat es ermöglicht, auch südafrikanische Kollegen enger einzubinden.

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

Die Zuwendungen wurden für die Finanzierung des Postdoktoranden Dr. Philipp Arras und des Doktoranden Jakob Roth verwendet.

5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

Die Arbeit war in zwei Aufgabenpakete unterteilt.

1. Es sollte ein Bayes'sches Verfahren zur richtungsabhängige Polarisationskalibration entwickelt werden. Ein solche Methode benötigt einen effizienten und differenzierbaren Algorithmus zur Evaluation der radio-interferometrischen Messgleichung. Basierend auf der „image domain gridding“ Methode [6] wurde ein solcher Algorithmus von Jakob Roth, Dr. Philipp Arras und Dr. Martin Reinecke implementiert. Diese Methode wurde mit dem Bayes'schen Bildgebungsalgorithmus `resolve` kombiniert, wodurch richtungsabhängige Kalibration für die Bildgebung der totalen Helligkeitsverteilung ermöglicht wurde. `resolve` mit richtungsabhängiger Kalibration wurde auf VLA Cygnus A Daten angewandt und konnte signifikante Verbesserungen der Bildqualität erzielen. Eine Publikation hierzu wurde in *Astronomy & Astrophysics* veröffentlicht [1]. Des Weiteren unterstützte Jakob Roth die Arbeit von Jongseo Kim, um den `resolve` Algorithmus für richtungsunabhängige Polarisationskalibration zu erweitern. Eine Erweiterungen auf richtungsabhängige Polarisationskalibration wird von Jakob Roth zur Zeit nicht angestrebt, da der damit verbundene größere Rechenaufwand gegenüber dem Nutzen für MeerKAT Bildgebung als deutlich zu hoch eingeschätzt wird. Stattdessen arbeitet Jakob Roth an beschleunigten Bildgebungsmethoden.

Hierbei wurden bereits sehr gute Ergebnisse erzielt. Im Rahmen vom D-MeerKAT-III Projekt führt Jakob Roth diese Entwicklung fort und arbeitet an einer diesbezüglichen Publikation.

2. Weiterhin sollte ein Algorithmus für Multi-Frequenz-Polarisationsbildgebung entwickelt werden. Hierzu konnte ein Prototyp für Bildgebung einzelner Frequenzen aus dem D-MeerKAT-I Projekt durch Dr. Philipp Arras in *resolve* integriert werden. Erste Ergebnisse sind in der Dissertation von Dr. Philipp Arras erschienen [7]. Weitere Ergebnisse liegen intern vor, und eine Publikation ist in Vorbereitungen. Eine Erweiterung für die Multi-Frequenz-Bildgebung ist in Kombination mit den von Jakob Roth entwickelten schnellen Bildgebungsverfahren geplant.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Teilprojekt 7 hätte ohne Mittel der Verbundforschung nicht finanziert und damit nicht durchgeführt werden können. Der angemessene Einsatz der Mittel wird durch die erzielten Ergebnisse, die Erfolge in der Ausbildung von wissenschaftlichem Nachwuchs und die unten dargestellten Publikationen der Ergebnisse dokumentiert.

Die im Rahmen des Projekts entwickelten Verfahren sind notwendig, da der radiointerferometrischen Gemeinschaft bisher Datenanalyse-Verfahren fehlen, die auf Bayes'scher Statistik basieren und dadurch eine konsistente Behandlung der Daten und ihrer Unsicherheiten ermöglichen. Die Entwicklung der Bayes'schen Verfahren ist insbesondere auf Grund der zugrundeliegenden komplexen mathematischen Modelle schwierig, und deren effizienten Realisierung durch Software-Systeme bedingt einen hohen Programmieraufwand. Dies ist insbesondere der Grund dafür, dass solche Verfahren bisher noch nicht im großen Stil eingesetzt werden. Im Laufe der Projektphase konnte die Anwendbarkeit der IFT-Bildgebung in der Radioastronomie auf komplizierte Kalibrationsmodelle und Polarisationsbildgebung erweitert werden.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Modelle und Methoden, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind, bilden die Basis für eine Vielzahl weiterer Publikationen.

So können beispielsweise die in D-MeerKAT-I und D-MeerKAT-II entwickelten Methoden auch auf die Daten des Event Horizon Teleskops (EHT) angewendet werden. Insbesondere wurde *resolve* auf EHT Daten des schwarzen Loches M87 angewendet. Die Ergebnisse wurden in *Nature Astronomy* publiziert [8]. Eine Publikation zur Anwendung von den im MeerKAT Projekt entwickelten Methoden auf EHT Daten des schwarzen Loches Sagittarius A* befindet sich zur Zeit im Begutachtungsprozess [9].

Außerdem wurde *resolve* auf Daten des optischen Interferometers GRAVITY angewendet und damit ein bisher unbekannter Stern im galaktischen Zentrum entdeckt. Die Ergebnisse wurden in *Astronomy & Astrophysics* publiziert [4].

Unter der Leitung von Dr. Fabrizia Guglielmetti an der ESO wurden Studien zur Anwendbarkeit von *resolve* auf Daten des ALMA Teleskops durchgeführt. Dazu wurden mehrere Konferenzbeiträge mit vielversprechenden Ergebnissen veröffentlicht [10–12].

Einige der aktuellen Forschungsarbeiten in D-MeerKAT-III basieren auf den in D-MeerKAT-II entwickelten Methoden und den Erkenntnissen, die sich aus der Forschung in D-MeerKAT-II ergeben haben.

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

Im Laufe des Projekts veröffentlichte die Gruppe um Prof. Yves Wiaux einige Arbeiten, die Ähnlichkeit zu unseren Entwicklungen aufweisen. Insbesondere wurde eine Arbeit zu richtungs-

abhängiger Kalibration veröffentlicht [3]. In [1] vergleichen wir unsere Methode mit den vorgestellten Ergebnissen und sehen signifikante Verbesserungen durch den Bayes'schen Ansatz unsere Methode. Außerdem wurden Publikationen zur Parallelisierung der Bildgebungsmethoden veröffentlicht [13, 14]. Im Gegensatz zu unserem Bayes'schen Ansatz, der auf Informationsfeldtheorie basiert, verwenden die zitierten Arbeiten „compressed sensing“.

Deshalb wurde unsere Arbeit auf einer Vielzahl von Konferenzen sehr positiv aufgenommen.

9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

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

Die Ergebnisse des Projekts wurden in mehreren referierten Publikationen präsentiert. Die noch während D-MeerKAT-I submentierten bzw. geplanten Publikationen [8] und [15] wurden inzwischen von *Nature Astronomy* und *Astronomy & Astrophysics* referiert und veröffentlicht. Des Weiteren wurden auch die Arbeiten [1] und [4] in *Astronomy & Astrophysics* publiziert. Die Publikation [16] wurde in *The Astronomical Journal* veröffentlicht. Außerdem wurden die referierten Konferenzproceedings [10–12, 17] veröffentlicht. Die Publikation [9] wurde zur Begutachtung eingereicht.

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

Über die referierten Veröffentlichungen hinausgehend wurden im Rahmen von D-MeerKAT-II die Software Bibliotheken `resolve` und `nifty` substanziell weiterentwickelt. Beide Bibliotheken sind OpenSource und über folgende URLs zugreifbar:

- `nifty` (Numerical Information Field TheorY): <https://github.com/NIFTy-PPL/NIFTy>,
- `resolve`: <https://gitlab.mpcdf.mpg.de/ift/resolve>,

Außerdem wurden die Ergebnisse der Publikationen [1] der wissenschaftlichen Gemeinschaft via Zenodo elektronisch zur Verfügung gestellt [18].

Weiterhin wurde unsere Forschung im Rahmen von Konferenzen und Workshops mit der wissenschaftlichen Gemeinschaft geteilt. Philipp Arras wurde zu folgenden Vorträgen eingeladen:

- Vortrag bei "Was die Welt im Innersten zusammenhält: Gottesfrage und Naturwissenschaften", July, 2021
- Seminar, June 2021, Center for Astrophysics, Cambridge, Massachusetts, USA
- Vortrag beim Origin Data Science Lab Journal Club, June 2020, Garching, Deutschland

Jakob Roth wurde zu folgenden Vorträgen eingeladen:

- MPIfR Thursday Seminar, July 2023, online
- NRAO Friday Colloquium, August 2023, Socorro, New Mexico, USA

Philipp Arras hat bei folgenden Konferenzen und Workshops Vorträge beigetragen:

- MPA Institutes Seminar, July 2022, Garching, Deutschland
- AT-AP-RASC 2022: 3rd URSI Atlantic Radio Science Meeting, Juni 2022, Gran Canaria, Spain
- Radio Imaging Workshop, May 2022, Ballito, South Africa

- D-MeerKAT Collaboration meeting, Juni 2020, video conference
- LOFAR MKSP Annual Meeting, Juni 2020, video conference

Jakob Roth hatte Vorträge auf den folgenden Konferenzen und Workshops:

- Conceptual Advances in Deep Learning for Research on Universe and Matter, September 22, Wiehl, Deutschland
- VLTI and ALMA Synthesis Imaging Workshop, Januar 2023, Garching, Deutschland
- D-MeerKAT Science Day, April 2023, online
- 1st ErUM-IFT Collaboration Meeting, November 2023, Garching, Deutschland
- ErUM-Data Workshop on Inverse Problems, Dezember 2023, Garching, Deutschland

Im Rahmen des Projekts wurden folgende Workshops organisiert, auf denen die entwickelten Methoden der wissenschaftlichen Gemeinschaft vorgestellt wurden:

- NIFTy7+GRAVITY Workshop, Aug 2021, MPE Garching, maßgeblich von Philipp Arras gehalten
- `resolve` Workshop, Oct 2022, MPIfR Bonn, maßgeblich von Philipp Arras gehalten
- `resolve` Workshop, Oct 2023, MPIfR Bonn, maßgeblich von Jakob Roth gehalten

Außerdem haben Dr. Philipp Arras und Jakob Roth zu folgenden Kursen beigetragen, die als Lehrveranstaltungen an der LMU angeboten werden:

- Signal reconstruction with Python, September 2020
- Signal reconstruction with Python, September 2021
- Signal reconstruction with Python, September 2022
- Signal reconstruction with Python, September 2023

Des Weiteren wurden folgende populärwissenschaftliche Artikel auf der Webseite des MPA veröffentlicht:

- MPA Highlight <https://www.mpa-garching.mpg.de/905919/h1202101?c=92335>, Januar 2021
- MPA Highlight <https://www.mpa-garching.mpg.de/1029092/h1202201>, Januar 2022

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

Im Rahmen der Förderung durch D-MeerKAT-II wurden folgende Masterarbeiten betreut:

- „Multi-frequency Imaging of HydraA using RESOLVE“, LMU, Dezember 2021.
- „Filament Generative Model for Bayesian Imaging“, LMU, Januar 2022.
- „Multifrequenz-Radiointerferometrie von ESO 137-006 mit Informationsfeldtheorie“, LMU, November 2022.
- „Multifrequency Radio Imaging of Abell 2256 with Information Field Theory“, LMU, November 2022.

- „Imaging the RX-J1347 cluster and detecting the Sunyaev-Zel’dovich effect from ALMA data using Information Field Theory“, Universität Madrid, Januar 2023.

Die Projektförderung bildete die finanzielle Grundlage für den erfolgreichen Abschluss der Promotion von Dr. Philipp Arras. Für Jakob Roth ergab sich durch die Förderung die Möglichkeit, weiterhin an seinem Promotionsvorhaben festzuhalten. Wir rechnen damit, dass Herr Roth seine Promotion im Sommer 2024 abschließen wird.

Literatur

- [1] Jakob Roth u. a. „Bayesian radio interferometric imaging with direction-dependent calibration“. In: *Astronomy & Astrophysics* 678, A177 (Okt. 2023), A177. DOI: 10.1051/0004-6361/202346851. arXiv: 2305.05489 [astro-ph.IM].
- [2] Philipp Arras u. a. „Comparison of classical and Bayesian imaging in radio interferometry. Cygnus A with CLEAN and resolve“. In: *Astronomy & Astrophysics* 646, A84 (Feb. 2021), A84. DOI: 10.1051/0004-6361/202039258.
- [3] A Dabbech u. a. „Cygnus A jointly calibrated and imaged via non-convex optimization from VLA data“. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 506.4 (Juli 2021), S. 4855–4876. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1093/mnras/stab1903. eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/506/4/4855/39625064/stab1903.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stab1903>.
- [4] GRAVITY Collaboration u. a. „Deep images of the Galactic center with GRAVITY“. In: *Astronomy & Astrophysics* 657, A82 (Jan. 2022), A82. DOI: 10.1051/0004-6361/202142459. arXiv: 2112.07477 [astro-ph.GA].
- [5] Philipp Frank, Reimar Leike und Torsten A. Enßlin. „Geometric Variational Inference“. In: *Entropy* 23.7 (2021). ISSN: 1099-4300. DOI: 10.3390/e23070853. URL: <https://www.mdpi.com/1099-4300/23/7/853>.
- [6] Sebastiaan van der Tol, Bram Veenboer und André R Offringa. „Image Domain Gridding: a fast method for convolutional resampling of visibilities“. In: *Astronomy & Astrophysics* 616 (2018), A27.
- [7] Philipp Adam Arras. „Radio Interferometry with Information Field Theory“. forthcoming. Diss. LMU Munich, 2021.
- [8] Philipp Arras u. a. „Variable structures in M87* from space, time and frequency resolved interferometry“. In: *Nature Astronomy* 6 (Jan. 2022), S. 259–269. DOI: 10.1038/s41550-021-01548-0. arXiv: 2002.05218 [astro-ph.IM].
- [9] Jakob Knollmüller, Philipp Arras und Torsten Enßlin. „Resolving Horizon-Scale Dynamics of Sagittarius A*“. In: *arXiv e-prints*, arXiv:2310.16889 (Okt. 2023), arXiv:2310.16889. DOI: 10.48550/arXiv.2310.16889. arXiv: 2310.16889 [astro-ph.HE].
- [10] Fabrizia Guglielmetti u. a. „Bayesian and Machine Learning Methods in the Big Data Era for Astronomical Imaging“. In: *Physical Sciences Forum*. Bd. 5. Physical Sciences Forum. Dez. 2022, 50, S. 50. DOI: 10.3390/psf2022005050. arXiv: 2210.01444 [astro-ph.IM].
- [11] Lukasz Tychoniec u. a. „Bayesian Statistics Approach to Imaging of Aperture Synthesis Data: RESOLVE Meets ALMA“. In: *Physical Sciences Forum*. Bd. 5. Physical Sciences Forum. Dez. 2022, 52, S. 52. DOI: 10.3390/psf2022005052. arXiv: 2210.02408 [astro-ph.IM].
- [12] Fabrizia Guglielmetti u. a. „A BRAIN Study to Tackle Image Analysis with Artificial Intelligence in the ALMA 2030 Era“. In: *Physical Sciences Forum* 9.1 (2023). ISSN: 2673-9984. DOI: 10.3390/psf2023009018. URL: <https://www.mdpi.com/2673-9984/9/1/18>.

- [13] A. Dabbech u. a. „First AI for Deep Super-resolution Wide-field Imaging in Radio Astronomy: Unveiling Structure in ESO 137-006“. In: *The Astrophysical Journal Letters* 939.1, L4 (Nov. 2022), S. L4. DOI: 10.3847/2041-8213/ac98af. arXiv: 2207.11336 [astro-ph.IM].
- [14] Pierre-Antoine Thouvenin u. a. „Parallel faceted imaging in radio interferometry via proximal splitting (Faceted HyperSARA): I. Algorithm and simulations“. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 521.1 (Mai 2023), S. 1–19. DOI: 10.1093/mnras/stac1521. arXiv: 2003.07358 [astro-ph.IM].
- [15] L. I. Scheel-Platz u. a. „Multicomponent imaging of the Fermi gamma-ray sky in the spatio-spectral domain“. In: *Astronomy & Astrophysics* 680, A2 (Dez. 2023), A2. DOI: 10.1051/0004-6361/202243819. arXiv: 2204.09360 [astro-ph.HE].
- [16] J. Roth u. a. „Fast-cadence High-contrast Imaging with Information Field Theory“. In: *The Astronomical Journal* 165.3, 86 (März 2023), S. 86. DOI: 10.3847/1538-3881/acabc1. arXiv: 2212.07714 [astro-ph.IM].
- [17] Margret Westerkamp u. a. „Inferring Evidence from Nested Sampling Data via Information Field Theory“. In: *Physical Sciences Forum* 9.1 (2023). ISSN: 2673-9984. DOI: 10.3390/psf2023009019. URL: <https://www.mdpi.com/2673-9984/9/1/19>.
- [18] Jakob Roth u. a. *Bayesian radio interferometric imaging with direction-dependent calibration*. Juli 2023. DOI: 10.5281/zenodo.8178695. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8178695>.

Kurzbericht

– öffentlich –

Zuwendungsempfänger: Technische Universität München

Projektleitung: Prof. Rüdiger Westermann

Verbund: 05A2020-D-MeerKAT-II

Thema: Ein deutscher Beitrag zur Weiterentwicklung der Radioastronomie im Zentimeterwellenlängenbereich, Teilprojekt 7: MeerKAT Bildgebung und Signal Rekonstruktion

1 Ziel und Inhalt des Projekts

MeerKAT ist das empfindlichste Radioteleskop im Zentimeterwellenbereich und wird vom südafrikanischen Radioastronomie-Observatorium (SARAO) betrieben. Es schließt die Lücke zwischen LOFAR und ALMA bezüglich der spektralen Abdeckung und ergänzt die astronomische Infrastruktur auf der südlichen Hemisphäre (E-ELT, LSST, CTA). MeerKAT soll letztendlich in die Mittelfrequenzkomponente des Square Kilometre Array (SKA) integriert werden. Ein erster Prototyp der SKA-Mittelfrequenzkomponente ist das SKA-MPG-Teleskop, ein SARAO-MPG-Partnerschaftsprojekt.

Am BMBF-Verbundforschungsprojekt D-MeerKAT-II waren sieben Universitäten (Bielefeld, Bochum, Dortmund, Hamburg, Heidelberg, LMU und TU München) und vier Forschungsinstitute (MPIfR Bonn, MPA Garching, FZ Jülich, TLS Tautenburg) beteiligt. Ziel des Projektes war, verbesserte Methoden der datenintensiven Radioastronomie zur Entdeckung neuer astronomischer Strukturen zu entwickeln. Durch die Umsetzung und Integration dieser Methoden sollten die Beobachtungsmöglichkeiten des MeerKAT- und SKA-MPG-Teleskops verbessert werden.

Das Projekt war in mehrere Teilprojekte und Arbeitspakete unterteilt. Das Team an der TUM und am MPA hat an zwei Arbeitspaketen federführend gearbeitet. Im ersten Arbeitspaket "Richtungsabhängige Polarisationskalibration" ging es darum, atmosphärische als auch Antennen-basiert Effekte zu rekonstruieren, die einen signifikanten Einfluss auf die astronomischen Beobachtungen haben. Damit sollte die Qualität der rekonstruierten Bilder verbessert werden. Im zweiten Arbeitspaket "Multi-Frequenz Polarizationsbildgebung" sollte ein Bayes'scher Algorithmus entwickelt werden, der Polarisationsstrukturen im Raum und Frequenzbereich abbilden kann. Für beide Arbeitspakete sollten Bayes'sche Methoden entwickelt werden, die eine Quantifikation der Rekonstruktionsunsicherheit ermöglichen. Die entwickelten Methoden sollten auf dem Bayes'schen Bildgebungsalgorithmus **resolve** aufbauen und in diesen integriert werden. Die Forschungsinhalte der Gruppen von Prof. Rüdiger Westermann (TUM) im Bereich volumetrische Rekonstruktion und visuelle Datenanalyse und Dr. Torsten Enßlin (MPA) im Bereich Informations-Feldtheorie boten zur Erreichung der Ziele ideale Rahmenbedingungen.

2 Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Die Teilprojekt-Stelle war zuerst mit dem Doktoranden Philipp Arras besetzt. Nach seiner erfolgreichen Promotion wurde die Stelle dann mit dem Doktoranden Jakob Roth besetzt.

Wie in der Projekt-Beantragung beschrieben, wurde ein Großteil der Zeit für die Entwicklung Bayes'scher Bildgebungs- und Kalibrationsmethoden verwendet. So wurde zum Beispiel ein Bayes'scher Bildrekonstruktionsalgorithmus mit richtungsabhängiger Kalibration entwickelt. In einer der Veröffentlichungen werden die erzielten Rekonstruktionsergebnisse mit denen existierender Verfahren insbesondere ohne richtungsabhängige Kalibration verglichen. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Auflösung und Sensitivität des rekonstruierten Signals durch die neue Bayes'sche Methode signifikant verbessert wird. Abb. 1 zeigt die Rekonstruktion der Radiogalaxie Cygnus A mit der entwickelten Methode im Vergleich zu einer Rekonstruktion aus A. Dabbech u. a. MNRAS 2021 und einer Bayes'schen Rekonstruktion ohne richtungsabhängige Kalibration aus P. Arras u. a. A&A 2021. Im Vergleich ist der erzielte Fortschritt durch die höhere Auflösung der Bayes'schen Rekonstruktion mit richtungsabhängiger Kalibration deutlich erkennbar.

Darüber hinausgehend wurde an einem Bayes'schen Algorithmus zur Polarisationsbildgebung gearbeitet. Auch in diesem Bereich wurden Fortschritte erzielt, die in der Dissertation von Dr. Philipp Arras dargestellt sind.

3 Konkreter Nutzen sowie Anwendungsmöglichkeiten

Der konkrete Nutzen der entwickelten Methoden, Algorithmen und Infrastruktur erstreckt sich vom speziellen Bereich der Bayes'schen Bildgebung über Bildgebung in der Radioastronomie im Allgemeinen bis hin zu medizinischer Bildgebung. Durch die Ergebnisse des D-MeerKAT-II Verbundprojekts erlangen die beteiligten Universitäten und Institutionen Zugang zum derzeit leistungsfähigsten Radioteleskop bei mittleren Radiofrequenzen. Dies hilft insbesondere die Weiterentwicklung von MeerKAT zum SKA-Mid Teleskop voranzutreiben. Die Modelle und Methoden, die im Rahmen des Projekts entstanden sind, bilden die Basis für eine Vielzahl von wissenschaftlichen Publikationen.

So können beispielsweise die in D-MeerKAT-I und D-MeerKAT-II entwickelten Methoden auch auf die Daten des Event Horizon Teleskops (EHT) angewendet werden. Insbesondere wurde `resolve` auf EHT Daten des schwarzen Loches M87 angewendet. Die Ergebnisse wurden in *Nature Astronomy* publiziert. Eine Publikation zur Anwendung der im Rahmen von MeerKAT entwickelten Methoden auf EHT Daten des schwarzen Loches Sagittarius A* befindet sich zur Zeit im Begutachtungsprozess.

Weiterhin wurde `resolve` auf Daten des optischen Interferometers GRAVITY angewendet. Dadurch konnte ein bisher unbekannter Stern im galaktischen Zentrum entdeckt werden. Die Ergebnisse hierzu wurden in *Astronomy & Astrophysics* publiziert.

Unter Leitung von Dr. Fabrizia Guglielmetti an der ESO wurden Studien zur Anwendbarkeit von `resolve` auf Daten des ALMA Teleskops durchgeführt. Dazu wurden mehrere Konferenzbeiträge mit vielversprechenden Ergebnissen veröffentlicht.

In weiterführenden Untersuchungen im Rahmen von D-MeerKAT-III wird die Anwendbarkeit und Erweiterung der entwickelten Methoden untersucht.

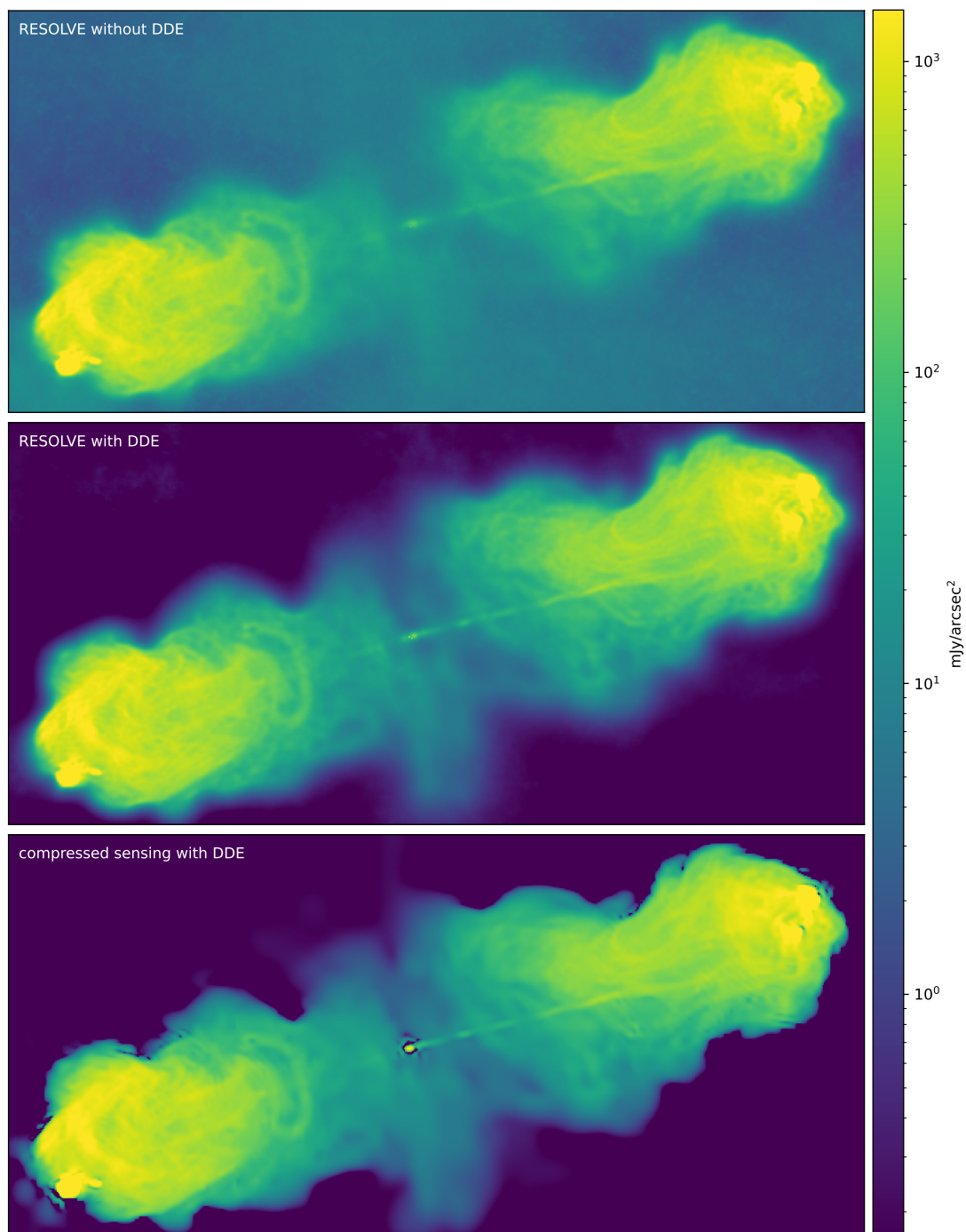


Abbildung 1: Himmel-Helligkeitsverteilung der Radiogalaxie Cygnus A, beobachtet bei 2052 MHz. Die Darstellung verwendet eine logarithmische Skala. Die obere Abbildung stammt aus der Publikation P. Arras u. a. 2021 und wurde mit `resolve` ohne richtungsabhängige Kalibration berechnet. Die mittlere Rekonstruktion wurde mit `resolve` und richtungsabhängiger Kalibration berechnet. Die untere Rekonstruktion wurde von A. Dabbech u. a. 2021 veröffentlicht und beinhaltet auch eine richtungsabhängige Kalibration, verwendet aber eine Compressed Sensing Methode anstelle einer Bayes'schen Methode.