

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Schlussbericht

Verbund: 05A2020 - LOFAR

Zuwendungsempfänger: Universität Bielefeld  
Projektleitung: Prof. Dr. Dominik Schwarz  
E-Mail: dschwarz@physik.uni-bielefeld.de  
Förderkennzeichen: 05A20PB1  
Förderzeitraum: 01.07.2020 - 30.08.2023  
Zuwendung: 137.091,17 €  
Projektträger: Projektträger DESY  
  
Zusätzlicher Kontakt: reder@physik.uni-bielefeld.de  
Zusätzlicher Name: Susi von Reder

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
	Universum	LOFAR	
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	5		
Habilitationen:	0		
Referierte Publikationen:	26		
Andere Veröffentlichungen:	1		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	5		
Masterarbeiten:	7		
Staatsexamen:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 21.03.2024 18:01 für eine Veröffentlichung freigegeben.

# Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Universität Bielefeld
Projektleitung:	Prof. Dr. Dominik Schwarz
Verbund:	05A2020-D-LOFAR2.0
Thema:	Ermöglichung von Radioastronomie bei sehr niedrigen Frequenzen

## Zusammenfassung

LOFAR, das LOW Frequency ARray, ist ein neuartiges Radioteleskop, das den Himmel in einem bislang weitgehend unerforschten Frequenzband zwischen 30-240 MHz beobachtet. Die Universitäten Bielefeld, Bochum und Hamburg, und die Thüringer Landessternwarte haben mit Unterstützung des Forschungszentrums Jülich einen Verbund gebildet, um mit D-LOFAR2.0 einen entscheidenden deutschen Beitrag zur Weiterentwicklung von LOFAR zu liefern. Die wichtigsten wissenschaftlichen Ziele einer deutschen Beteiligung an LOFAR sind die Untersuchung von galaktischen und intergalaktischen Magnetfeldern, Sonnenaktivität, Pulsaren, Jets und Radiogalaxien sowie der Erforschung großräumiger kosmischer Strukturen und der Epoche der Re-Ionisierung.

In den vorangegangenen Förderperioden hat die Verbundforschung dazu beigetragen, dass mehrere deutsche Universitäten durch eigene Stationen fest im International LOFAR Telescope (ILT) verankert sind. Es befinden sich sechs deutsche LOFAR-Station im Regelbetrieb, die regelmäßig sowohl zu Aufnahmen des ILT als auch zu denen im sogenannten GLOW-Modus beitragen. Die Universität Bielefeld betreibt den GLOW-Aufnahmemodus gemeinsam mit dem Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn. Sie betreibt auch gemeinsam mit der Sternwarte Hamburg die LOFAR Station DE609. Darüber hinaus betreibt sie den GLOW-Speichen und Rechencluster am FZ Jülich, der durch die Verbundforschung in der vorhergegangenen Förderperiode finanziert wurde.

Das Projekt D-LOFAR2.0 diente zum einen dem Ausbau der deutschen LOFAR-Stationen auf LOFAR2.0 (neue Aufnahmeelektronik sowie neue Betriebssoftware), und zum anderen der Förderung der wissenschaftlichen Nutzung durch weitere Softwareentwicklungen, die den Zugang der deutschen Community erleichtern sollen. Der Ausbau auf LOFAR2.0 wird die Bandbreite und die derzeit aus technischen Gründen begrenzte Beobachtungseffizienz deutlich erhöhen, sowie LOFAR-Beobachtungen gegenüber Störungen von digitalen Rundfunksendern unempfindlicher machen. Die verbesserte Nutzbarkeit von LOFAR sollte mit Hilfe folgender bewilligter Arbeitspakete dieses Projektes erreicht werden:

AP 1 Datenhandhabung und Prozessierung

AP 2 Verbesserte Prozessierung von Daten im LOFAR Long Term Archive

AP 3 Bildgebung mit den LOFAR Low Band Antennen

AP 5 Projektmanagement und richtungsunabhängige Kalibration für LOFAR2.0

Das von der Universität Bielefeld geleitete Teilprojekt 4 hat sich mit dem wichtigsten Aspekt des Arbeitspakets 1 befasst, der Entwicklung (geleitet durch das niederländische Radioastronomieinstitut ASTRON) des Telescope Manager Specification Systems (TMSS) eine neuen Steuerungs- und Kontrollsoftware für den Betrieb von LOFAR. TMSS wurde im Juni 2023 erfolgreich als alleiniges Steuer- und Kontrollsystem von LOFAR in Betrieb genommen, nachdem es zuvor schon ein Jahr lang Teile des Betriebs übernommen hatte.

Die etablierte Infrastruktur wurde im Berichtszeitraum weiter betrieben (LOFAR-Station DE609 in Nordestedt in Kooperation mit Sternwarte Hamburg, zentraler Aufnahmebetrieb des GLOW-Mode in Kooperation mit MPIfR Bonn und FZ Jülich, sowie GLOW-Cluster am FZ Jülich). Am GLOW-Cluster konnten u.a. Projekte mit Kooperationspartnern aus dem Verbundprojekt D-MeerKAT-II etabliert werden.

# Bericht

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

In früheren Projekten wurde mit der Entwicklung des Telescope Manager Specification Systems (TMSS) begonnen, einer neuen zentralen Steuerungssoftware in zeitgemäßer Architektur für LOFAR. Die Universität Bielefeld war und ist fest in das damit betraute Entwicklerteam mehrerer ILT-Partner eingebunden.

Aufgabe dieses Projekts war es zunächst, diese Software zur Produktionsreife zu bringen und den Funktionsumfang soweit auszubauen, dass sie die bisher eingesetzte Steuerungssoftware im Tagesbetrieb ablösen kann. Des Weiteren sollte der Funktionsumfang insbesondere im Hinblick auf LOFAR2.0 ausgebaut werden.

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

Deutschland ist mit insgesamt sechs Stationen im International LOFAR Telescope (ILT) vertreten: Effelsberg (MPIfR Bonn), Unterweilenbach (MPA Garching), Tautenburg (TLS Tautenburg), Bornim (AIP Potsdam), Jülich (RUB Bochum, FZ Jülich) und Norderstedt (Universität Bielefeld, Universität Hamburg).

In den Vorgängerprojekten wurde für den Einzelstationsbetrieb der sogenannte GLOW-Modus etabliert, der über eigene Interfaces in den deutschen Stationen eine weitgehend automatisierte zentrale Steuerung, Datennahme und Vorverarbeitung ermöglicht. Hierfür betreibt die Universität Bielefeld den GLOW-Cluster, der aus netzwerktechnischen Gründen am Forschungszentrum Jülich aufgestellt ist. Den laufenden Betrieb im GLOW-Modus bestreiten die Universität Bielefeld und das MPIfR Bonn in enger Kooperation. Außerdem betreibt die Universität Bielefeld die Webpräsenz für GLOW und vertritt derzeit seine Interessen im Board des ILT.

Der GLOW-Cluster konnte in der vorangegangenen Projektphase um eine Komponente zum Hochleistungsrechnen erweitert werden, die der deutschen Radioastronomie Rechen- und Speicherressourcen zur Weiterverarbeitung von Daten der Teleskope LOFAR und MeerKAT zur Verfügung stellt.

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

Die Arbeiten an TMSS werden kontinuierlich iterativ im agilen Entwicklungsprozess Scrum geplant und durchgeführt. Im Entwicklerteam sind neben der Universität Bielefeld insbesondere Kollegen vom niederländischen Partnerinstitut ASTRON vertreten, sowie vom italienischen ILT-Partner INAF. Zu Beginn der Förderperiode waren außerdem noch externe Dienstleister beteiligt.

Im Fokus standen zunächst Arbeiten an den Grundfunktionen, am Nutzerinterface, dem Rechtemanagement und der Unterstützung wesentlicher Wissenschaftsfälle. Nach erfolgter wissenschaftlicher Abnahme erfolgte dann zunächst ein Parallelbetrieb mit der bisherigen Kontrollsoftware, bis diese durch den Ausbau des TMSS-Funktionsumfangs schließlich obsolet wurde und abgeschaltet wurde. Mittlerweile unterstützt TMSS eine Vielzahl wichtiger Aufnahmestrategien und verfügt auch über ein funktionierendes System für die dynamische Planung der Aufnahmen. Dieses kann flexibel und vollautomatisch auf Anforderungen und sich ändernde Rahmenbedingungen reagieren und übernimmt viele zuvor manuell ausgeführte Arbeiten. Seit der Inbetriebnahme werden außerdem kontinuierlich Fehler behoben und in enger Abstimmung mit den Nutzern Verbesserungen an der Software vorgenommen, um diese besser auf die Arbeitsabläufe abzustimmen.

Darüber hinaus wurde damit begonnen, TMSS mit einer LOFAR2.0 Test Station zu integrieren, um die Software von Anfang an für die Ansteuerung von LOFAR2.0 nutzen zu können. Anfang 2023 wurde hierfür auch das Scrum-Team neu aufgestellt.

Im Berichtszeitraum wurde außerdem die unter Punkt 2 beschriebene Infrastruktur weiterbetrieben. Beim Einzelstationsbetrieb wurde dabei besonders die Zusammenarbeit mit den italienischen und französischen ILT-Partnern auf wissenschaftlicher wie technischer Ebene intensiviert. Der HPC-Cluster wird von einem zunehmend wachsenden Nutzerkreis, insbesondere aus verschiedenen Projekten des Verbundprojekts D-MeerKAT-II, gerne angenommen. Hier konnten vor Kurzem auch die stark nachgefragten Speicherressourcen ausgebaut werden.

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

Herr Dr. Jörn Künsemüller wurde im Februar 2014 an der Universität Bielefeld als Softwareingenieur eingestellt. Seine Stelle wird zu einem erheblichen Anteil aus diesem Projekt bezahlt. Er bearbeitet eigenverantwortlich das Arbeitspaket 1 des Verbundprojekts D-LOFAR2.0.

Die Reisemittel wurden vor allem für die Fahrten zu Projektpartnern, insbesondere für Koordinations-treffen von Dr. Jörn Künsemüller bei ASTRON, für Konferenzbesuche, und zu Arbeiten am GLOW-Cluster verwendet. Darüber hinaus wurden Reisen von mit LOFAR-Daten arbeitenden Projekt Studierenden der Arbeitsgruppe, z.B. zum Jahrestreffen der LOFAR Community, finanziert, sowie Reisen des Projektleiters zu Sitzungen der ILT-Steuergruppen.

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

Die Entwicklungsarbeiten an TMSS sind im Großen und Ganzen nach Plan verlaufen und die Software konnte wie erwartet als die neue zentrale Steuerungs- und Kontrollsoftware von LOFAR in Betrieb genommen werden. Die aktuell benötigten Wissenschaftsfälle werden unterstützt und das neue System bewährt sich im Tagesgeschäft. Es gibt vereinzelte Funktionalitäten, wie der Quality-Assurance-Workflow und das dynamischen Scheduling, bei denen nach Nutzer-Feedback noch Verbesserungen nötig scheinen, die wesentlichen Projektziele für TMSS wurden aber vollumfänglich erreicht.

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

Die neue Steuerungssoftware TMSS stellt LOFAR2.0, das bis mindestens 2030 in seinem Gebiet führend sein soll, auf ein technisch modernes und solides Fundament. Mit der Software wurde ein über die Jahre technisch deutlich überholtes System abgelöst, das nur mit erheblichem Aufwand zu warten und zu betreiben war. Eine nachhaltige Lösung zur Ansteuerung von LOFAR2.0 wäre damit kaum zu realisieren gewesen, hätte einen nicht vertretbaren Personalaufwand im Tagesbetrieb erfordert und man würde mit LOFAR2.0 trotzdem weit hinter den wissenschaftlichen Möglichkeiten bleiben, die das neue System bietet. Insofern ist die Entwicklung als zwingend notwendig anzusehen, um einen anhaltenden wissenschaftlichen Nutzen aus den hier getätigten Investitionen zu ziehen.

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

TMSS ermöglicht es, LOFAR in den kommenden Jahren sicher und effizient betreiben zu können. Es erhöht die Aufnahme-Effizienz bei gleichzeitig reduziertem personellen Betriebsaufwand und erlaubt es durch seine Flexibilität, die Möglichkeiten der LOFAR2.0 Hardware umfänglich nutzen zu können.

Mit dem GLOW-Modus verfügt die deutsche Beteiligung an LOFAR über ein System, mit dem ihre Stationen auch im Einzelstationsbetrieb zentral gesteuert werden können und das es erlaubt, verschiedene Arten von Beobachtungen automatisiert durchzuführen und vorzuverarbeiten. Die deutschen Stationen werden wöchentlich im GLOW-Modus für Forschungsprojekte von GLOW-Mitgliedern und im Rahmen von ILT-Anträgen genutzt. Die HPC-Komponente dient als prototypisches Datenzentrum und stellt der deutschen Radioastronomie dringend benötigte Rechen- und Speicher-Ressourcen zur Verfügung.

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

Für den Betrieb von LOFAR2.0 soll auch die Beobachtungsbeantragungs-Software Northstar überarbeitet, bzw. abgelöst werden. Hier ist möglicherweise eine engere Anbindung an TMSS von Vorteil, wodurch sich weitere Anforderungen ergeben können.

Für den Einzelstationsbetrieb gibt es Bestrebungen, die Projekte und Aufnahmeziele international besser und vor allem systematisch zu koordinieren. Hier gibt es erste Ansätze, jedoch fehlt es an Kapazität, um dies zügig und unter Einbeziehung aller Partner voranzutreiben.

Parallel zur Entwicklung von TMSS wurde die LOFAR2.0 Stationselektronik entwickelt und getestet. Nachdem die technischen Tests abgeschlossen wurden, laufen derzeit erste wissenschaftliche Tests. Die Ausschreibung zur Beschaffung der neuen Hardware ist abgeschlossen und im Laufe 2024 werden zwei vollständige Teststationen mit dem ersten Lauf aus der industriellen Produktion aufgebaut und getestet, bevor für 2025 die Umrüstung aller LOFAR Stationen auf LOFAR2.0 Stationselektronik erfolgt.

Ebenso parallel dazu wurden erste Schritte zur Verbesserung der High Band Antennen Front Ends unternommen. Im Entwicklungsprojekt DANTE, an dem sich auch die Universität Bielefeld beteiligt, soll LOFAR2.0 die Fähigkeit erhalten durch eine Nachrüstung der High Band Antennen zwei verschiedene Himmelsregionen zeitgleich zu beobachten (Dual Beam), wodurch die Beobachtungszeit verdoppelt werden könnte. Sowohl die neue Stationselektronik, als auch die Perspektive auf Dual Beam Beobachtungen machen auch eine Aufrüstung des LOFAR Netzwerks notwendig. Es soll in den nächsten Jahren, zuerst im LOFAR Core, später überall auf 100 GE Netztechnologie umgestellt werden.

Am Ende der Förderperiode hat die Europäische Kommission LOFAR ERIC als European Research Infrastructure Consortium genehmigt. LOFAR ERIC wurde dann im Januar im ersten Treffen des LOFAR ERIC Councils mit Leben erfüllt und wird im Laufe des ersten Halbjahres 2024 vom ILT den Betrieb von LOFAR übernehmen.

## 9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

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

Gloude-mans, A. J., Duncan, K. J., Röttgering, H. J. A., Shimwell, T. W., Venemans, B. P., Best, P. N., Brü-ggen, M., Calistro Rivera, G., Drabent, A., Hardcastle, M. J., Miley, G. K., Schwarz, D. J., Saxena, A., Smith, D. J. B., Williams, W. L.: Low frequency radio properties of the  $z > 5$  quasar population. *Astron. Astrophys.* 656 (2021) A137.

Hardcastle, M. J., Shimwell, T. W., Tasse, C., Best, P. N., Drabent, A., Jarvis, M. J., Prandoni, I., Röttgering, H. J. A., Sabater, J., Schwarz, D. J.: The contribution of discrete sources to the sky temperature at 144 MHz. *Astron. Astrophys.* 648 (2021) A10.

Mandal, S., Prandoni, I., Hardcastle, M. J., Shimwell, T. W., Intema, H. T., Tasse, C., van Weeren, R. J., Algera, H., Emig, K. L., Röttgering, H. J. A., Schwarz, D. J., Siewert, T. M., Best, P. N., Bonato, M., Bondi, M., Jarvis, M. J., Kondapally, R., Leslie, S. K., Mahatma, V. H., Sabater, J., Retana-Montenegro, E., Williams, W. L.: Extremely deep 150 MHz source counts from the LoTSS Deep Fields. *Astron. Astrophys.* 648 (2021) A5.

Kondapally, R., Best, P. N., Hardcastle, M. J., Nisbet, D., Bonato, M., Sabater, J., Duncan, K. J., McCheyne, I., Cochrane, R. K., Bowler, R. A. A., Williams, W. L., Shimwell, T. W., Tasse, C., Croston, J. H., Goyal, A., Jamrozy, M., Jarvis, M. J., Mahatma, V. H., Röttgering, H. J. A., Smith, D. J. B., Wołowska, A., Bondi, M., Brienza, M., Brown, M. J. I., Brü-ggen, M., Chambers, K., Garrett, M. A., Gürkan, G., Huber, M., Kunert-Bajraszewska, M., Magnier, E., Mingo, B., Mostert, R., Nikiel-Wroczyński, B., O'Sullivan, S. P., Paladino, R., Ploeckinger, T., Prandoni, I., Rosenthal, M. J.,

Schwarz, D. J., Shulevski, A., Wagenveld, J. D., Wang, L.: The LOFAR Two-meter Sky Survey: Deep Fields Data Release 1. III. Host-galaxy identifications and value added catalogues. *Astron. Astrophys.* 648 (2021) A3.

Sabater, J., Best, P. N., Tasse, C., Hardcastle, M. J., Shimwell, T. W., Nisbet, D., Jelic, V., Callingham, J. R., Röttgering, H. J. A., Bonato, M., Bondi, M., Ciardi, B., Cochrane, R. K., Jarvis, M. J., Kondapally, R., Koopmans, L. V. E., O'Sullivan, S. P., Prandoni, I., Schwarz, D. J., Smith, D. J. B., Wang, L., Williams, W. L., Zaroubi, S.: The LOFAR Two-meter Sky Survey: Deep Fields Data Release 1. II. The ELAIS-N1 LOFAR deep field. *Astron. Astrophys.* 648 (2021) A2.

Tasse, C., Shimwell, T., Hardcastle, M. J., O'Sullivan, S. P., van Weeren, R., Best, P. N., Bester, L., Hugo, B., Smirnov, O., Sabater, J., Calistro-Rivera, G., de Gasperin, F., Morabito, L. K., Röttgering, H., Williams, W. L., Bonato, M., Bondi, M., Botteon, A., Brügger, M., Brunetti, G., Chyży, K. T., Garrett, M. A., Gürkan, G., Jarvis, M. J., Kondapally, R., Mandal, S., Prandoni, I., Repetti, A., Retana-Montenegro, E., Schwarz, D. J., Shulevski, A., Wiaux, Y.: The LOFAR Two-meter Sky Survey: Deep Fields Data Release 1. I. Direction-dependent calibration and imaging. *Astron. Astrophys.* 648 (2021) A1.

Alonso, D., Bellini, E., Hale, C., Jarvis, M. J., Schwarz, D. J.: Cross-correlating radio continuum surveys and CMB lensing: constraining redshift distributions, galaxy bias, and cosmology. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 502 (2021) 876.

Agar, C. H., Weltevrede, P., Bondonneau, L., Griesmeier, J.-M., Hessels, J. W. T., Huang, W. J., Karastergiou, A., Keith, M. J., Kondratiev, V. I., Künsemöller, J., Li, D., Peng, B., Sobey, C., Stappers, B. W., Tan, C. M., Theureau, G., Wang, H. G., Zhang, C. M., Cecconi, B., Girard, J. N., Loh, A., Zarka, P.: A broad-band radio study of PSR J0250+5854: the slowest spinning radio pulsar known. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 508 (2021) 1102.

Bondonneau, L., Griesmeier, J.-M., Theureau, G., Cognard, I., Brionne, M., Kondratiev, V., Bilous, A., McKee, J. W., Zarka, P., Viou, C., Guillemot, L., Chen, S., Main, R., Pilia, M., Possenti, A., Serylak, M., Shaifullah, G., Tiburzi, C., Verbiest, J. P. W., Wu, Z., Wucknitz, O., Yerin, S., Briand, C., Cecconi, B., Corbel, S., Dallier, R., Girard, J. N., Loh, A., Martin, L., Tagger, M., Tasse, C.: Pulsars with NenuFAR: Backend and pipelines. *Astron. Astrophys.* 652 (2021) A34.

Tiburzi, C., Shaifullah, G. M., Bassa, C. G., Zucca, P., Verbiest, J. P. W., Porayko, N. K., van der Wateren, E., Fallows, R. A., Main, R. A., Janssen, G. H., Anderson, J. M., Bak Nielsen, A.-S., Donner, J. Y., Keane, E. F., Künsemöller, J., Osłowski, S., Griesmeier, J.-M., Serylak, M., Brügger, M., Ciardi, B., Dettmar, R.-J., Hoeft, M., Kramer, M., Mann, G., Vocks, C.: The impact of solar wind variability on pulsar timing. *Astron. Astrophys.* 647 (2021) A84.

Tiwari, P., Zhao, R., Zheng, J., Zhao, G.-B., Bacon, D., Schwarz, D.J., Galaxy power spectrum and biasing results from the LOFAR Two-metre Sky Survey (first data release), *Astrophys. J.* 928 (2022) 38

Shimwell, T.W., Hardcastle, M.J., Tasse, C., Best, P.N., Röttgering, H.J.A., Williams, W.L., Botteon, A., Drabent, A., Mechev, A., Shulevski, A., van Weeren, R.J., et al. (inkl. Schwarz, D.J.) [LOFAR SKSP Collaboration]: The LOFAR Two-metre Sky Survey - V. Second data release. *Astron. Astrophys.* 656 (2022) A1

Morabito, L.K., Jackson, N.J., Mooney, S., Sweijen, F., Badole, S., Kukreti, P., Venkattu, D., Groeneveld, C., Kappes, A., Bonnassieux, E., Drabent, A., et al. (inkl. Schwarz, D.J.) [LOFAR SKSP Collaboration]: Sub-arcsecond imaging with the International LOFAR Telescope. I. Foundational calibration strategy and pipeline. *Astron. Astrophys.* 658 (2022) A1

Jackson, N., Badole, S., Morgan, J., Chhetri, R., Prusis, K., Nikolajevs, A., Morabito, L., Brentjens, M., Sweijen, F., Iacobelli, M., Orru, E., et al. (inkl. Schwarz, D.J.) [LOFAR SKSP Collaboration]: Sub-

arcsecond imaging with the International LOFAR Telescope. II. Completion of the LOFAR Long-Base-line Calibrator Survey. *Astron. Astrophys.* 658 (2022) A2

Simonte, M., Andernach, H., Brueggen, M., Schwarz, D.J., Prandoni, I., Willis, A.G.: Giant radio galaxies in the LOW-Frequency ARray Two-metre Sky Survey Boötes deep field. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 515 (2022) 2032

Wu, Z., Verbiest, J. P. W., Main, R. A., Gießmeier, J.-M., Liu, Y., Osłowski, S., Moosichal Ambalappat, K., Nielsen, A.-S. B., Künsemöller, J., Donner, J. Y., Tiburzi, C., Porayko, N., Serylak, M., Künkel, L., Brügggen, M., Vocks, C.: Pulsar scintillation studies with LOFAR. I. The census. *Astron. Astrophys.* 663 (2022) A116

Wang, J., Shaifullah, G. M., Verbiest, J. P. W., Tiburzi, C., Champion, D. J., Cognard, I., Gaikwad, M., Graikou, E., Guillemot, L., Hu, H., Karuppusamy, R., Keith, M. J., Kramer, M., Liu, Y., Lyne, A. G., Mickaliger, M. B., Stappers, B. W., Theureau, G.: A comparative analysis of pulse time-of-arrival creation methods. *Astron. Astrophys.* 658 (2022) A181

Bilous, A. V., Gießmeier, J. M., Pennucci, T., Wu, Z., Bondonneau, L., Kondratiev, V., van Leeuwen, J., Maan, Y., Connor, L., Oostrum, L. C., Petroff, E., Verbiest, J. P. W., Vohl, D., McKee, J. W., Shaifullah, G., Theureau, G., Ulyanov, O. M., Cecconi, B., Coolen, A. H., Corbel, S., Damstra, S., Dénes, H., Girard, J. N., Hut, B., Ivashina, M., Konovalenko, O. O., Kutkin, A., Loose, G. M., Mulder, H., Ruiter, M., Smits, R., Tokarsky, P. L., Vermaas, N. J., Zakharenko, V. V., Zarka, P., Ziemke, J.: Dual-frequency single-pulse study of PSR B0950+08. *Astron. Astrophys.* 658 (2022) A143

Callingham, J. R., Shimwell, T. W., Vedantham, H. K., Bassa, C. G., O'Sullivan, S. P., Yiu, T. W. H., Bloot, S., Best, P. N., Hardcastle, M. J., Haverkorn, M., Kavanagh, R. D., et al. (incl. Schwarz, D. J.): V-LoTSS: The circularly polarised LOFAR Two-metre Sky Survey. *Astron. Astrophys.* 670 (2023) A124.

Gajovic L, Welzmueller F, Heesen V, de Gasperin F, Vollmann M, Brueggen M, Basu A, Beck R, Schwarz DJ, Bomans D, Drabent A.: Weakly interacting massive particle cross section limits from LOFAR observations of dwarf spheroidal galaxies. *Astron. Astrophys.* 673 (2023) A108.

de Gasperin F, Edler HW, Williams WL, Callingham JR, Asabere B, Brügggen M, Brunetti G, Dijkema TJ, Hardcastle MJ, Iacobelli M, Offringa A, et al. (incl. Schwarz DJ): The LOFAR LBA Sky Survey II. First data release. *Astron. Astrophys.* 673 (2023) A165.

Böhme L, Schwarz DJ, de Gasperin F, Röttgering HJA, Williams WL: Matching LOFAR sources across radio bands. *Astron. Astrophys.* 674 (2023) A189.

Hardcastle MJ, Horton MA, Williams WL, Duncan KJ, Alegre L, Barkus B, Croston JH, Dickinson H, Osinga E, Röttgering HJA, Sabater J, et al. (incl. Schwarz DJ): The LOFAR Two-Metre Sky Survey: VI. Optical identifications for the second data release *Astron. Astrophys.* 678 (2023) A151.

Porayko, N. K., Mevius, M., Hernández-Pajares, M., Tiburzi, C., Olivares Pulido, G., Liu, Q., Verbiest, J. P. W., Künsemöller, J., Krishnakumar, M. A., Bak Nielsen, A.-S., Brügggen, M., Graffigna, V., Dettmar, R.-J., Kramer, M., Osłowski, S., Schwarz, D. J., Shaifullah, G. M., Wucknitz, O.: Validation of global ionospheric models using long-term observations of pulsar Faraday rotation with the LOFAR radio telescope. *Journal of Geodesy*, 97 (2023) 116.

Wu, Z., Coles, W. A., Verbiest, J. P. W., Ambalappat, K. M., Tiburzi, C., Gießmeier, J.-M., Main, R. A., Liu, Y., Kramer, M., Wucknitz, O., Porayko, N., Osłowski, S., Nielsen, A.-S. B., Donner, J. Y., Hoeff, M., Brügggen, M., Vocks, C., Dettmar, R.-J., Theureau, G., Serylak, M., Kondratiev, V., McKee, J. W., Shaifullah, G. M., Kravtsov, I. P., Zakharenko, V. V., Ulyanov, O., Konovalenko, O. O., Zarka, P., Cecconi, B., Koopmans, L. V. E., Corbel, S.: Pulsar scintillation studies with LOFAR: II. Dual-frequency scattering study of PSR J0826+2637 with LOFAR and NenuFAR. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 520 (2023) 5536.

van der Wateren, E., Bassa, C. G., Cooper, S., Grießmeier, J.-M., Stappers, B. W., Hessels, J. W. T., Kondratiev, V. I., Michilli, D., Tan, C. M., Tiburzi, C., Weltevrede, P., Bak Nielsen, A.-S., Carozzi, T. D., Ciardi, B., Cognard, I., Dettmar, R.-J., Karastergiou, A., Kramer, M., Künsemöller, J., Osłowski, S., Serylak, M., Vocks, C., Wucknitz, O.. The LOFAR Tied-Array All-Sky Survey: Timing of 35 radio pulsars and an overview of the properties of the LOFAR pulsar discoveries. *Astron. Astrophys.* 669 (2023) A160.

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

Bisi, M. M., Fallows, R. A., Matyjasiak, B., Rothkaehl, H., Vermeulen, R., Baldovin, C., Mevius, M., Ruitter, M., Vilmer, N., Carley, E., Verbiest, J., Gallagher, P., Carozzi, T., Kruger, P., Robertson, S. C., Barnes, D., Chang, O., Lindqvist, M., Olberg, M.: LOFAR4SpaceWeather (LOFAR4SW) – Increasing European Space-Weather Capability with Europe’s Largest Radio Telescope: Summary and Beyond the First Major Project. AGU Fall Meeting Abstracts, 2022 (2022) SH46B-03

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

Hack, B.: Auswirkung des Sonnenwinds auf Pulsar Timing. Universität Bielefeld, Bachelorarbeit, 2021.

Seidel, F.L.: Der Einfluss der Heliosphäre auf Pulsar Timing Messungen. Universität Bielefeld, Bachelorarbeit, 2021.

Gizinski, M.: LOFAR Data Quality Studies with PSR J0034-0534, Universität Bielefeld, Bachelorarbeit, 2022

Johannesmann, D.: Dipole Cosmology. Universität Bielefeld, Bachelorarbeit, 2023.

El Nager, T.: The Production of Axions in the Magnetosphere of Neutron Stars. Universität Bielefeld, Bachelorarbeit, 2023

Böhme, L.: Cross-matching Radio Sources from Different Sky Surveys. Universität Bielefeld, Masterarbeit, 2021.

Löwe, N.: Analysing the Rotating Vector Model of Pulsar Radio Emission. Universität Bielefeld, Masterarbeit, 2021.

Pestka, C.: Enabling Next-Generation Real-Time Pulsar Astronomy via Accelerated Processing on Tensor Cores. Universität Bielefeld, Masterarbeit, 2021.

Krause, P.: About the stability of the original black-widow pulsar B1957+20. Universität Bielefeld, Masterarbeit, 2022

Pashapourahmadabadi, M.: One- and Two-point Source Statistics from the Lofar Two-metre Sky Survey (LoTSS) Second Data Release. Universität Bielefeld, Masterarbeit, 2022

Sowinski, M.: An Investigation of the Feasibility of Automated Pulsar Moding Identification. Universität Bielefeld, Masterarbeit, 2022

Dierks, S.: Simulation of Radio Source Number Counts. Universität Bielefeld, Masterarbeit, 2023

Siewert, T.M.: Testing the foundations of cosmology with the radio sky. Universität Bielefeld, Dissertation, 2021.

Wang, J.: Optimising Analysis Standards for Pulsar Timing Arrays and Gravitational Wave Detection. Universität Bielefeld, Dissertation, 2021

Donner, J. Studies of the Ionized Interstellar Medium at Low Radio Frequencies using LOFAR. Universität Bielefeld, Dissertation, 2022

Liu, Y.: Interstellar Scintillation Studies of EPTA Pulsars. Universität Bielefeld, Dissertation, 2022

Wu, Z.: Pulsar Scintillation Studies with LOFAR. Universität Bielefeld, Dissertation, 2022

## Kurzbericht

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger:	<b>Universität Bielefeld</b>
Projektleitung:	<b>Prof. Dr. Dominik Schwarz</b>
Verbund:	<b>05A2020-D-LOFAR2.0</b>
Thema:	<b>Ermöglichung von Radioastronomie bei sehr niedrigen Frequenzen</b>

### 1. Ziel und Inhalt des Projektes

LOFAR, das LOw Frequency ARray, ist ein neuartiges Radioteleskop, das den Himmel in einem bislang weitgehend unerforschten Frequenzband zwischen 30-240 MHz beobachtet. Die Universitäten Bielefeld, Bochum und Hamburg, und die Thüringer Landessternwarte haben mit Unterstützung des Forschungszentrums Jülich einen Verbund gebildet, um mit D-LOFAR2.0 einen entscheidenden deutschen Beitrag zur Weiterentwicklung von LOFAR zu liefern. Die wichtigsten wissenschaftlichen Ziele einer deutschen Beteiligung an LOFAR sind die Untersuchung von galaktischen und intergalaktischen Magnetfeldern, Sonnenaktivität, Pulsaren, Jets und Radiogalaxien sowie der Erforschung großräumiger kosmischer Strukturen und der Epoche der Re-Ionisierung.

In den vorangegangenen Förderperioden hat die Verbundforschung dazu beigetragen, dass mehrere deutsche Universitäten durch eigene Stationen fest im International LOFAR Telescope (ILT) verankert sind. Es befinden sich sechs deutsche LOFAR-Stationen im Regelbetrieb, die regelmäßig sowohl zu Aufnahmen des ILT als auch zu denen im sogenannten GLOW-Modus beitragen. Die Universität Bielefeld betreibt den GLOW-Aufnahmemodus gemeinsam mit dem Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn. Sie betreibt auch gemeinsam mit der Sternwarte Hamburg die LOFAR Station DE609. Darüber hinaus betreibt sie den GLOW-Speicher und Rechencluster am FZ Jülich, der durch die Verbundforschung in der vorhergegangenen Förderperiode finanziert wurde.

Das Projekt D-LOFAR2.0 dient zum einen dem Ausbau der deutschen LOFAR-Stationen auf LOFAR2.0 (neue Aufnahmeelektronik sowie neue Betriebssoftware), und zum anderen der Förderung der wissenschaftlichen Nutzung durch weitere Softwareentwicklungen, die den Zugang der deutschen Community erleichtern sollen. Der Ausbau auf LOFAR2.0 wird die Bandbreite und die derzeit aus technischen Gründen begrenzte Beobachtungseffizienz deutlich erhöhen, sowie LOFAR-Beobachtungen gegenüber Störungen von digitalen Rundfunksendern unempfindlicher machen. Die verbesserte Nutzbarkeit von LOFAR sollte mit Hilfe folgender bewilligter Arbeitspakete dieses Projektes erreicht werden:

AP 1 Datenhandhabung und Prozessierung

AP 2 Verbesserte Prozessierung von Daten im LOFAR Long Term Archive

AP 3 Bildgebung mit den LOFAR Low Band Antennen

AP 5 Projektmanagement und richtungsunabhängige Kalibration für LOFAR2.0

Das von der **Universität Bielefeld** geleitete **Teilprojekt 4** hat sich mit dem wichtigsten Aspekt des **Arbeitspakets 1** befasst, der Entwicklung (geleitet durch das niederländische Radioastronomieinstitut ASTRON) des Telescope Manager Specification Systems (TMSS) eine neuen Steuerungs- und Kontrollsoftware für den Betrieb von LOFAR. TMSS wurde im Juni 2023 erfolgreich als alleiniges Steuer- und Kontrollsystem von LOFAR in Betrieb genommen, nachdem es zuvor schon ein Jahr lang Teile des Betriebs übernommen hatte.

Die etablierte Infrastruktur wurde im Berichtszeitraum weiter betrieben (LOFAR-Station DE609 in Norderstedt in Kooperation mit Sternwarte Hamburg, zentraler Aufnahmebetrieb des GLOW-Mode in Kooperation mit MPIfR Bonn und FZ Jülich, sowie GLOW-Cluster am FZ Jülich). Am GLOW-Cluster konnten u.a. Projekte mit Kooperationspartnern aus dem Verbundprojekt D-MeerKAT-II etabliert werden.

## **2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens**

In früheren Projekten wurde bereits mit der Arbeit an einer neuen zentralen Steuerungssoftware in zeitgemäßer Architektur begonnen. Dr. Jörn Künsemöller war von Anfang an als Entwickler in das zuständige Scrum-Team (weitere Mitglieder: Astron, INAF, externe Dienstleister) eingebunden. Im Projektzeitraum wurde die erste Entwicklungsphase des Telescope Manager Specification System (TMSS) im Juni 2022 abgeschlossen, die wichtigsten Aufnahmemodi des ILT implementiert und wissenschaftlich abgenommen, sowie in den Regelbetrieb als primäres Aufnahmewerkzeug des ILT übernommen. Wesentliche Entwicklungen im Berichtszeitraum waren die Erreichung der Produktionsreife verschiedener zentraler Wissenschaftsfälle (u.a. LBA/HBA Surveys, Pulsar Timing), sowie erhebliche Fortschritte beim dynamischen Scheduling. Desweiteren wurden zahlreiche Verbesserungen vorgenommen und Fehler behoben, die sich aus dem Einsatz im Tagesgeschäft ergeben bzw. gezeigt haben (u.a. Zugriffsrechte, Metadaten, Usability, Performance). In einer zweiten Entwicklungsphase die parallel zum Regelbetrieb läuft werden kontinuierlich weitere Funktionalitäten in TMSS integriert, was zu einer deutlichen Verbesserung der Beobachtungseffizienz, der besseren Planbarkeit von Beobachtungen und der Besseren Integration aller Komponenten des Systems (z.B. auch dem Archiv) führt.

Ein zweiter Aspekt waren Planungen für das sogenannte LOFAR Data Valorisation Projekt, die gemeinsam mit ASTRON und den Verbundpartnern Ruhr-Universität Bochum und dem FZ Jülich voran getrieben wurden. Dabei sollen die in den drei Standorten des LOFAR Long Term Archives (SurfSARA, FZ Jülich und Poznan) liegenden Daten für einen größeren Nutzerkreis leichter zugänglich gemacht werden (Verbesserte Kuratation, Dokumentation und Komprimierung der Daten, Verfügbarmachung standardisierter Datenprodukte).

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

Das im Rahmen dieses Projekts entwickelte Steuer- und Kontrollsystem TMSS weist entscheidende Verbesserungen gegenüber dem alten System auf indem es modernen Softwarestandards folgt und leichter auf neue Hardwarearchitekturen und neue Betriebssystemversionen aktualisiert werden kann. Es erhöht die Beobachtungseffizienz und vereinfacht den Betrieb, wodurch Mitarbeiter\*innen des Observatoriums mehr Zeit für die Forschung und die Entwicklung neuer Funktionalitäten gewinnen. Die geleisteten Vorarbeiten für das LOFAR Data Valorisation Projekt werden dazu beitragen, dass im LOFAR Long Term Archive effizienter mit den verfügbaren Ressourcen umgegangen wird und dass die Nutzer leichter Zugang zu den Daten bekommen.

In Kooperation mit den weiteren GLOW-Partnern, insbesondere in Kollaboration mit dem Verbundprojekt D-MeerKAT2, wurde der GLOW-Cluster zu einem prototypischen Datenzentrum für die Radioastronomie weiterentwickelt. Im Rahmen von PUNCH4NFDI soll der Cluster mit anderen nationalen Datenzentren vernetzt werden. Die mit diesem Prototyp gesammelten Erfahrungen sollen in den Ausbau des LOFAR LTA am FZ-Jülich in ein LOFAR Science Data Centre und später in eine nationale/europäische Infrastruktur für ein regionales SKA Science Data Centre einfließen. In diesen Zusammenhängen ist mit weiteren Entwicklungsschritten zu rechnen.