



Schlussbericht

Verbund: 05A2020 - VLT-BLUEMUSE

Zuwendungsempfänger: Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP)
 Projektleitung: Dr. Peter Weilbacher
 E-Mail: pweilbacher@aip.de
 Förderkennzeichen: 05A20BAB
 Förderzeitraum: 01.07.2020 - 31.12.2023
 Zuwendung: 350.145,61 €
 Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt:
 Zusätzlicher Name:

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
	ESO	VLT	
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	1		
Habilitationen:	0		
Referierte Publikationen:	19		
Andere Veröffentlichungen:	7		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	2		
Masterarbeiten:	1		
Staatsexamen:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 01.07.2024 12:00 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: *Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP)*

Projektleitung: Dr. Peter Weilbacher (bis 2023: Prof. Dr. Martin Roth)

Verbund: Verbundprojekt 05A2020 BlueMUSE

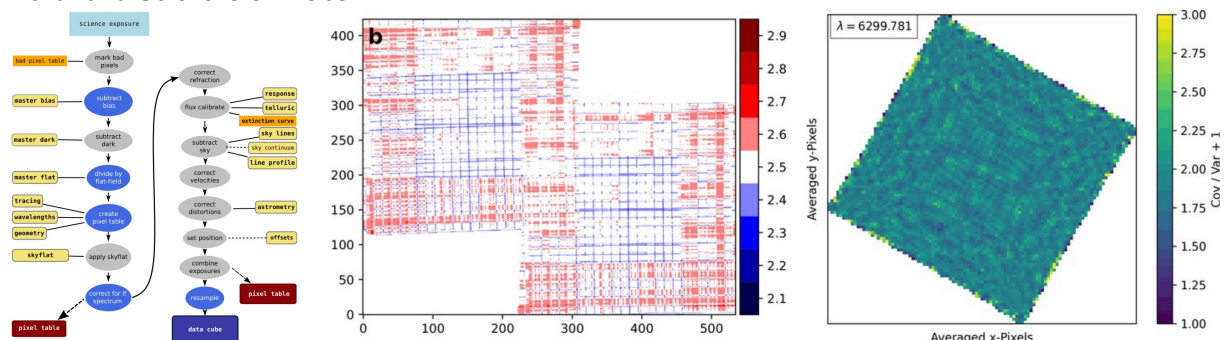
Thema: BlueMUSE: a 3rd Generation Instrument for the ESO-VLT

Zusammenfassung

BlueMUSE, der "Blue Multi-Unit Spectroscopic Explorer", ist ein in der Planung befindlicher neuer Integralfeldspektrograf, der eine große (1'x1') räumliche Abdeckung bei mittlerer spektraler Auflösung ($R \sim 4000$) bieten wird. BlueMUSE wird ein breites Spektrum an wissenschaftlichen Fragen adressieren und durch die Wellenlängenabdeckung bis an das blaue Ende des optischen Spektrums den existierenden MUSE-Spektrografen auf ideale Weise komplementär ergänzen können.

BlueMUSE wird von einem internationalen Konsortium entwickelt. Die Verbundpartner vom Institut für Astrophysik und Geophysik der Universität Göttingen (IAG) und dem Leibniz-Institut für Astrophysik in Potsdam (AIP) haben in dieser ersten Projektphase im Konsortium mitgearbeitet, grundlegende Eckpunkte des Instrumentendesigns festzulegen, die wissenschaftlichen Zielsetzungen in technische Spezifikationen und Anforderungen umzusetzen und wissenschaftliche Anwendungen auszuloten. Konkrete Aufgaben der deutschen Partner im Konsortium erstrecken sich auf die wissenschaftliche Software (Datenreduktion und Simulation) und die Kalibrationseinheit des Instrumentes. Für die Kalibrationseinheit konnte ein grundlegendes Design vorgestellt werden. Bei der Datenreduktion konzentrierte sich die Arbeit einerseits ebenfalls auf ein erstes Design, andererseits wurden mehrere Studien zur Mitführung von Kalibrationsinformation bis zum finalen Datenkubus durchgeführt und als Code Prototyp getestet.

Diese Arbeiten werden in anschließenden ErUM-Programmen in den konkreten Bau von BlueMUSE Hard- und Software einfließen.



Erstes Design der
BlueMUSE
Datenreduktionspipeline

FWHM des propagierten
instrumentellen Linienprofils
(6 teilüberlappende Belichtungen)

Kovarianzberechnung bei
einer Wellenlänge
(4 überlappende Belichtungen)

Bericht

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Heutige Spitzenforschung in der Astrophysik ist für Beobachtungen des Universums auf leistungsfähige Instrumente an Großteleskopen angewiesen. Diese Instrumente sind fast immer Unikate und werden für bestimmte wissenschaftlichen Zielsetzungen entwickelt und optimiert. Der Bau dieser Geräte ist komplex und treibt optische und mechanische Bauteile an ihre technischen Grenzen. Immer muss auch Software zur Bewältigung der Daten angepasst oder neu geschrieben werden. Auf diese Weise profitiert die Astronomie einerseits von neuen Technologien und treibt andererseits die Entwicklung in Hard- und Software voran. Für dieses Zusammenspiel bedarf es der Zusammenarbeit zwischen mehreren Instituten in internationalen Konsortien. Durch die Mitgliedschaft in der Europäischen Südsternwarte (ESO) hat Deutschland einen Anteil am weltweit führenden bodengebundenen Observatorium für optische und nahinfrarote Beobachtungen. Hier ist das in Entstehung begriffene Extremely Large Telescope (ELT) zu nennen, aber insbesondere auch das seit 25 Jahren sehr erfolgreich arbeitende Very Large Telescope (VLT), für das gerade mehrere neue Instrumente entwickelt werden. Das Rahmenprogramm "Erforschung von Universum und Materie" ermöglicht die Teilnahme an solchen Instrumentierungsprojekten für Institute in Deutschland. Als eines der erfolgreichsten bisher auf diese Weise geförderten Instrumente sei MUSE (Multi-Unit Spectroscopic Explorer) genannt, ein Integralfeldspektrograf mit großem Gesichtsfeld und somit ein Wegbereiter für BlueMUSE, bei dem die Partner des aktuellen Projektes ebenfalls beteiligt waren.

Das Projekt "BlueMUSE: ein Instrument der dritten Generation für das ESO-VLT" ist das erste Vorhaben, mit dem die Arbeit an einem Instrument der nächsten Generation für das VLT ermöglicht wurde. BlueMUSE wird eine Neuentwicklung eines Integralfeldspektrografen mit hoher Empfindlichkeit im blauen Licht, basiert aber auf dem Konzept von MUSE, bei dem eine Anzahl von voraussichtlich 20 Integralfeldeinheiten jeden Bildpunkt eines $1' \times 1'$ großen Gesichtsfeldes in Spektren zerlegt. Durch die Nutzung des blauen Wellenlängenbereiches werden völlig neue wissenschaftliche Untersuchungen ermöglicht, die bisher mit keinem Instrument möglich waren. Hierbei profitieren wir maßgeblich von der im MUSE-Projekt gewonnene Expertise.

Im Förderzeitraum haben das Institut für Astrophysik und Geophysik der Universität Göttingen (IAG) und das Leibniz-Institut für Astrophysik in Potsdam (AIP) gemeinsam Vorstudien zur Datenreduktionssoftware und zur Kalibrierung des Instrumentes vorgenommen. In Zusammenarbeit mit dem aus eigenen Mitteln finanzierten Partner an der Universität Potsdam (UP) entstand außerdem eine Vorstufe eines Programms zur Simulation von BlueMUSE Datenkuben.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

In den letzten zwei Jahrzehnten hat sich die Integralfeldspektroskopie (IFS; auch 3D-Spektroskopie genannt) vor allem in Europa zu einer der wichtigsten Technologien für astronomische Beobachtungen im optischen und nah-infraroten Frequenzbereich entwickelt; so sind am ESO-VLT mehrere 3D-Spektrografen installiert. Ältere 3D-Spektrografen wie z.B. das SAURON-Instrument sowie das in Potsdam entwickelte PMAS-Instrument haben jeweils neue Erkenntnisse gebracht, je nach Instrument von spezifischen Einsichten in bestimmte Gebiete (z.B. elliptische Galaxien) bis zu Neuigkeiten auf vielen Gebieten (Sternentstehungsregionen, planetarische Nebel, Spiralgalaxien, usw.).

MUSE hingegen hat mit seiner Inbetriebnahme in 2014 eine Steigerung des Multiplexfaktors durch Erhöhung der Informationsdichte innerhalb eines zusammenhängenden Gesichtsfelds von einigen hundert auf mehrere zehntausend Auflösungselemente und damit eine einzigartige Kombination aus Größe des Gesichtsfeldes und des Spektralbereichs bei gleichzeitig guter räumlicher und spektraler

Auflösung in bahnbrechender Weise erweitert. Anwendungen reichen von der Spektroskopie von Objekten in unserer Milchstraße bis hin zu Untersuchungen der Frühphasen der Galaxienentwicklung.

Das BlueMUSE-Projekt verfolgt eine ähnliche Idee und wird stark auf die mit MUSE gewonnene Erfahrung aufbauen. Es wird aber komplementär zu MUSE das blaue Ende der optischen Spektralbereichs abdecken und dabei höhere spektrale Auflösung haben. Damit ergeben sich neue Möglichkeiten, nahe Objekte (in unserer Milchstraße und nahen Galaxien) zu verstehen, aber auch Galaxien und das sie umgebende Gas in großer Entfernung (etwa bei höheren Rotverschiebungen zwischen 2 und 3) zu studieren, die mit MUSE nicht abgedeckt werden können.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Das Projekt ist in ein internationales Konsortium eingebunden, das vom Centre de Recherche Astrophysique de Lyon (CRAL) geleitet wird und Institute in Frankreich (Paris Saclay), Portugal (Porto), Schweiz (Genf und Lausanne), Großbritannien (Durham), Australien (Sydney) und Schweden (Stockholm) umfasst. Neben den im Verbundprojekt eng kooperierenden Instituten (Institut für Astrophysik und Geophysik Göttingen, IAG, und Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam, AIP) ist auch die Universität Potsdam (Golm) als bisher nicht finanzierter Partner involviert. Das AIP leitet dabei gegenüber der BlueMUSE-Projektleitung die Berichtspflichten der Arbeitspakete der deutschen Partner.

In der aktuellen Phase A treffen sich alle Konsortiumsteilnehmer zu regelmäßigen Konferenzen ("Gate-Meetings"). Die Verbundpartner treffen sich darüber hinaus auch in den nach wie vor stattfindenden MUSE "Busy Weeks" und auf internationalen Konferenzen, sowie nach Notwendigkeit zu direkten gegenseitigen Besuchen. Bei allen diesen Gelegenheiten wird die Koordinierung der Arbeit für das ErUM-Projekt statt, wobei die "Gate"-Meetings auch der Erfolgskontrolle dienen.

Bei diesen Treffen wird auch der wissenschaftliche Nachwuchs von Studierenden in die Präsentationen so weit wie möglich involviert. Die nächste Generation von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern wird auf diese Weise direkt mit den technologischen Herausforderungen konfrontiert und in den Bau eines neuen Großinstrumentes einbezogen. Dies wird auch der zukünftigen Nutzung von Integralfeldspektrographen und BlueMUSE zugutekommen.

Das Projekt ist in sechs Arbeitspakete gegliedert (Entwicklung von Spezifikationen, Datenreduktionssoftware, Datensimulation, Kalibrationseinheit, Wissenschafts- und Betriebsplan und Projektmanagement). Die Verteilung der Arbeitspakete zwischen den ErUM-Partnern IAG und AIP ist so geregelt, dass jeder im Projekt Beschäftigte klar abgegrenzte Aufgaben hat, die durch die im Konsortium notwendigen Arbeiten gegeben sind. Durch die langjährige Kooperation der Beteiligten ist eine enge Abstimmung auf unterschiedlichen Kommunikationswegen immer gegeben.

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

Am Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP) sind insgesamt 350.145,61 € für dieses Projekt genehmigt und entsprechend verausgabt worden. Der größte Teil (85%) entfiel auf die Personalkosten zur Finanzierung der Mitarbeiterstellen, der im Teilprojekt 1 beschäftigten Wissenschaftler und wissenschaftlichen Hilfskräfte am AIP. Ca. 6% der Mittel wurden für Dienstreisen mit Verbindung zum BlueMUSE-Projekt aufgewendet. Der Restbetrag (ca. 9%) entfiel auf die Position sonstige Verwaltungsausgaben. Investitionen wurden nicht getätigt.

5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

Das vorrangige Ziel des Vorhabens war der Beginn der Arbeit am BlueMUSE-Instrument und die Sicherung der deutschen Beteiligung im Konsortium. Dieses Ziel wurde erreicht, sowohl AIP als auch IAG (und der nicht finanzierte Partner UP) sind in wesentliche Arbeitspakete eingebunden und haben

sich in den Arbeiten der Vorstudienphase (Phase A) profilieren können. Die UP konnte sich durch signifikante Beiträge bei Arbeitspaket 3 als wertvoller Partner innerhalb der BlueMUSE Kollaboration empfehlen und soll perspektivisch langfristig eingebunden werden, nicht zuletzt mit Blick auf die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses.

Für Arbeitspaket 1 "Entwicklung von Spezifikationen" konnten wichtige Instrumentenparameter im Zusammenspiel mit gewünschten Eigenschaften spezifiziert werden. In Bezug auf Arbeitspaket 2 "Datenreduktionssoftware" konnten wichtige Studien zu Propagierung von Kovarianzen, des instrumentellen Linienprofils und von rechteckigen Spaxeln studiert und als Prototyp-Code implementiert werden. Arbeitspaket 3 "Datensimulation" hat zum Ende des Projektes in erste Simulationen eines Kugelsternhaufens mit BlueMUSE geführt, der als vollständiger und realistischer Datenkubus vorliegt. Arbeitspaket 4 "Kalibrationseinheit" konnte Studien zur Kalibration von BlueMUSE vorlegen und sowohl international als auch im Konsortium präsentieren. Arbeitspaket 5 "Wissenschafts- und Betriebsplan" hat umfangreiche Arbeiten zu den wissenschaftlichen Programmen und deren Auswirkungen auf die Instrumentenparameter ausgeführt. Die Projektpartner waren dabei in alle drei Unterkategorien der Untersuchung (aufgelöste Sternpopulationen, nahe Galaxien und das hochrotverschobene Universum) eingebunden. Arbeitspaket 6 "Projektmanagement" konnte zwischen den Projektpartnern, gegenüber dem Projektträger und im Konsortium erfolgreich durchgeführt werden.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Alle durchgeführten Arbeiten waren im Arbeitsplan vorgesehen und konnten in der Projektlaufzeit (inkl. kostenneutraler Verlängerung bis 31.12.2023 wegen Auswirkungen der Corona-Pandemie) erfolgreich abgeschlossen werden. Alle durchgeführten Arbeiten sind für den Erfolg des Projekts notwendig gewesen und wurden mit der BlueMUSE-Projektleitung sowie intern innerhalb der Verbundpartner abgestimmt.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Innerhalb des Konsortiums ist der Nutzen der Arbeit unmittelbar dadurch gegeben, dass Kalibration und Datenreduktion am Ende ein nutzbares astronomisches Instrument ermöglichen. Die Simulation zeigt schon heute, wie die Daten am Teleskop in ca. 8 Jahren aussehen werden. Dieses Tool wird in der nächsten Förderperiode auch eine detaillierte Optimierung der verschiedenen wissenschaftlichen Zielsetzungen möglich machen.

Einige Aspekte sind über BlueMUSE hinaus für andere astronomische Instrumente nützlich. So wird z.B. der Algorithmus für Behandlung rechteckiger Spaxel auch im ELT-Instrument METIS eingesetzt werden. Andere zukünftige Instrumente (z.B. MAVIS für das VLT) werden diese oder ähnliche Verfahren einsetzen. Gleiches gilt für die Propagation des Linienprofils und die Behandlung der Kovarianzen. Das spezielle Problem der Kalibration am blauen Ende des optischen Spektrums bei mittlerer spektraler Auflösung kann sich ebenfalls in anderen Instrumenten in naher Zukunft wiederfinden.

Eine Anwendung außerhalb der Astrophysik lässt sich momentan nicht konkret voraussehen. Eine solche sollte aber nicht a priori ausgeschlossen werden, wie das ErUM Vorhaben MUSE-Transfer zeigt.

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

Innerhalb der Projektlaufzeit hat sich MUSE zum weltweit am stärksten nachgefragten bodengebundenen Instrument entwickelt und dabei von allen ESO-Instrumenten zu den meisten Publikationen geführt. Dies lässt auch für das ähnliche BlueMUSE-Instrument auf eine erfolgreiche Zukunft schließen.

Für den Zeitraum der späten 2030er Jahre hat sich in den letzten Jahren das Projekt "Wide-Field Spectroscopic Telescope (WST)" entwickelt, das neben einem Multiobjektspektrografen auch einen MUSE/BlueMUSE-ähnlichen Integralfeldspektrografen an einem neuen 12m-Teleskop umfassen wird. Dieser wird auf den Erfahrungen von sowohl MUSE als auch BlueMUSE aufbauen und ein deutlich größeres Gesichtsfeld abdecken.

Es sind unseres Wissens nach momentan keine anderen ähnlich leistungsfähigen Instrumente in Planung, die BlueMUSE Konkurrenz machen könnten. Alle anderen Integralfeldspektrografen mit ähnlichem Konzept (z.B. KCWI oder MAAT) haben ein viel kleineres Gesichtsfeld und daher eine andere wissenschaftliche Zielsetzung.

9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

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

1. Häberle, M., Neumayer, N., Bellini, A., Libralato, M., Clontz, C., Seth, A. C., Nitschai, M. S., Kamann, S., Alfaro-Cuello, M., Anderson, J., Dreizler, S., Feldmeier-Krause, A., Kacharov, N., Latour, M., Milone, A., Pechetti, R., van de Ven, G., Voggel, K., 2024, arXiv, arXiv:2404.03722: "oMEGACat II -- Photometry and proper motions for 1.4 million stars in Omega Centauri and its rotation in the plane of the sky"
2. Pechetti, R., Kamann, S., Krajnović, D., Seth, A., van de Ven, G., Neumayer, N., Dreizler, S., Weilbacher, P. M., Martens, S., Wragg, F., 2024, MNRAS, 528, 4941: " ω Centauri: a MUSE discovery of a counter-rotating core"
3. Paduano, A., Bahramian, A., Miller-Jones, J. C. A., Kawka, A., Galvin, T. J., Rivera Sandoval, L., Kamann, S., Strader, J., Chomiuk, L., Heinke, C. O., Maccarone, T. J., Dreizler, S., 2024, ApJ, 961, 54: "Ultradeep ATCA Imaging of 47 Tucanae Reveals a Central Compact Radio Source"
4. Saracino, S., Kamann, S., Bastian, N., Gieles, M., Shenar, T., Reindl, N., Müller-Horn, J., Usher, C., Dreizler, S., Hénault-Brunet, V., 2023, MNRAS, 526, 299: "A closer look at the binary content of NGC 1850"
5. Nitschai, M. S., Neumayer, N., Clontz, C., Häberle, M., Seth, A. C., Husser, T.-O., Kamann, S., Alfaro-Cuello, M., Kacharov, N., Bellini, A., Dotter, A., Dreizler, S., Feldmeier-Krause, A., Latour, M., Libralato, M., Milone, A. P., Pechetti, R., van de Ven, G., Voggel, K., Weisz, D. R., 2023, ApJ, 958, 8: "oMEGACat. I. MUSE Spectroscopy of 300,000 Stars within the Half-light Radius of ω Centauri"
6. Vaz, D., Brinchmann, J., Zoutendijk, S. L., Boogaard, L. A., Kamann, S., Read, J. I., Roth, M. M., Weilbacher, P. M., Steinmetz, M., 2023, A&A, 678, A59: "The MUSE-Faint survey. IV. Dissecting Leo T, a gas-rich relic with recent star formation"
7. Latour, M., Hämmerich, S., Dorsch, M., Heber, U., Husser, T.-O., Kamann, S., Dreizler, S., Brinchmann, J., 2023, A&A, 677, A86: "SHOTGLAS. II. MUSE spectroscopy of blue horizontal branch stars in the core of ω Centauri and NGC6752"
8. Chase, O., Ciardullo, R., Roth, M. M., Jacoby, G. H., 2023, ApJ, 950, 59: "The Effect of Superpositions on the Planetary Nebula Luminosity Function"
9. Monreal-Ibero, A., Weilbacher, P. M., Micheva, G., Kollatschny, W., Maseda, M., 2023, A&A, 674, A210: "UM 462, a local green pea galaxy analogue under the MUSE magnifying glass"

10. Soemmitro, A. A., Roth, M. M., Weilbacher, P. M., Ciardullo, R., Jacoby, G. H., Monreal-Ibero, A., Castro, N., Micheva, G., 2023, A&A, 671, A142: "MUSE crowded field 3D spectroscopy in NGC 300. IV. Planetary nebula luminosity function"
11. Martens, S., Kamann, S., Dreizler, S., Göttgens, F., Husser, T.-O., Latour, M., Balakina, E., Krajnović, D., Pechetti, R., Weilbacher, P. M., 2023, A&A, 671, A106: "Kinematic differences between multiple populations in Galactic globular clusters"
12. Bacon, R., Brinchmann, J., Conseil, S., Maseda, M., Nanayakkara, T., Wendt, M., Bacher, R., Mary, D., Weilbacher, P. M., Krajnović, D., Boogaard, L., Bouché, N., Contini, T., Epinat, B., Feltre, A., Guo, Y., Herenz, C., Kollatschny, W., Kusakabe, H., Leclercq, F., Michel-Dansac, L., Pello, R., Richard, J., Roth, M., Salvignol, G., Schaye, J., Steinmetz, M., Tresse, L., Urrutia, T., Verhamme, A., Vitte, E., Wisotzki, L., Zoutendijk, S. L., 2023, A&A, 670, A4: "The MUSE Hubble Ultra Deep Field surveys: Data release II"
13. Micheva, G., Roth, M. M., Weilbacher, P. M., Morisset, C., Castro, N., Monreal Ibero, A., Soemmitro, A. A., Maseda, M. V., Steinmetz, M., Brinchmann, J., 2022, A&A, 668, A74: "MUSE crowded field 3D spectroscopy in NGC 300. III. Characterizing extremely faint HII regions and diffuse ionized gas"
14. Shivaeei, I., Boogaard, L., Díaz-Santos, T., Battisti, A., da Cunha, E., Brinchmann, J., Maseda, M., Matthee, J., Monreal-Ibero, A., Nanayakkara, T., Popping, G., Vidal-García, A., Weilbacher, P. M., 2022, MNRAS, 514, 1886: "The UV 2175Å attenuation bump and its correlation with PAH emission at $z \sim 2$ "
15. Cairós, L. M., González-Pérez, J. N., Weilbacher, P. M., Manso Sainz, R., 2022, A&A, 664, A144: "Warm ionized gas in the blue compact galaxy Haro 14 viewed by MUSE. The diverse ionization mechanisms acting in low-mass starbursts"
16. Paduano, A., Bahramian, A., Miller-Jones, J. C. A., Kawka, A., Göttgens, F., Strader, J., Chomiuk, L., Kamann, S., Dreizler, S., Heinke, C. O., Husser, T.-O., Maccarone, T. J., Tremou, E., Zhao, Y., 2022, MNRAS, 510, 3658: "The MAVERIC Survey: The first radio and X-ray limits on the detached black holes in NGC 3201"
17. Thater, S., Krajnović, D., Weilbacher, P. M., Nguyen, D. D., Bureau, M., Cappellari, M., Davis, T. A., Iguchi, S., McDermid, R., Onishi, K., Sarzi, M., van de Ven, G., 2022, MNRAS, 509, 5416: "Cross-checking SMBH mass estimates in NGC 6958 - I. Stellar dynamics from adaptive optics-assisted MUSE observations"
18. González-Torà, G., Urbaneja, M. A., Przybilla, N., Dreizler, S., Roth, M. M., Kamann, S., Castro, N., 2022, A&A, 658, A117: "MUSE crowded field 3D spectroscopy in NGC 300. II. Quantitative spectroscopy of BA-type supergiants"
19. Göttgens, F., Kamann, S., Baumgardt, H., Dreizler, S., Giesers, B., Husser, T.-O., den Brok, M., Féick, R., Krajnovic, D., Weilbacher, P. M., 2021, MNRAS, 507, 4788: "Central kinematics of the Galactic globular cluster M80"
20. Cairós, L. M., González-Pérez, J. N., Weilbacher, P. M., Manso Sainz, R., 2021, A&A, 654, A142: "MUSE observations of the blue compact dwarf galaxy Haro 14. Data analysis and first results on morphology and stellar populations"
21. Latour, M., Calamida, A., Husser, T.-O., Kamann, S., Dreizler, S., Brinchmann, J., 2021, A&A, 653, L8: "A stellar census in globular clusters with MUSE. A new perspective on the multiple main sequences of ω Centauri"

22. Roth, M. M., Jacoby, G. H., Ciardullo, R., Davis, B. D., Chase, O., Weilbacher, P. M., 2021, ApJ, 916, 21: "Toward Precision Cosmology with Improved PNLF Distances Using VLT-MUSEI. Methodology and Tests"
23. Pagotto, I., Krajnović, D., den Brok, M., Emsellem, E., Brinchmann, J., Weilbacher, P. M., Kollatschny, W., Steinmetz, M., 2021, A&A, 649, A63: "Optical emission lines in the most massive galaxies: Morphology, kinematics, and ionisation properties"
24. Castro, N., Crowther, P. A., Evans, C. J., Vink, J. S., Puls, J., Herrero, A., Garcia, M., Selman, F. J., Roth, M. M., Simón-Díaz, S., 2021, A&A, 648, A65: "Mapping the core of the Tarantula Nebula with VLT-MUSE. II. The spectroscopic Hertzsprung-Russell diagram of OB stars in NGC 2070"
25. Bacon, R., Mary, D., Garel, T., Blaizot, J., Maseda, M., Schaye, J., Wisotzki, L., Conseil, S., Brinchmann, J., Leclercq, F., Abril-Melgarejo, V., Boogaard, L., Bouché, N. F., Contini, T., Feltre, A., Guiderdoni, B., Herenz, C., Kollatschny, W., Kusakabe, H., Matthee, J., Michel-Dansac, L., Nanayakkara, T., Richard, J., Roth, M., Schmidt, K. B., Steinmetz, M., Tresse, L., Urrutia, T., Verhamme, A., Weilbacher, P. M., Zabl, J., Zoutendijk, S. L., 2021, A&A, 647, A107: "The MUSE Extremely Deep Field: The cosmic web in emission at high redshift"
26. Richard, J., Claeysens, A., Lagattuta, D., Guaita, L., Bauer, F. E., Pello, R., Carton, D., Bacon, R., Soucail, G., Lyon, G. P., Kneib, J.-P., Mahler, G., Clément, B., Mercier, W., Variu, A., Tamone, A., Ebeling, H., Schmidt, K. B., Nanayakkara, T., Maseda, M., Weilbacher, P. M., Bouché, N., Bouwens, R. J., Wisotzki, L., de la Vieuville, G., Martinez, J., Patrício, V., 2021, A&A, 646, A83: "An atlas of MUSE observations towards twelve massive lensing clusters"

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

1. Weilbacher, P. M., Martens, S., Wendt, M., Roth, M. M., Dreizler, S., Kelz, A., Bacon, R., Richard, J., 2022, SPIE, 12189, 1218912: "The BlueMUSE data reduction pipeline: lessons learned from MUSE and first design choices"
2. Roth, M. M., Weilbacher, P. M., Kelz, A., Madhav, K., Hernandez, E., Richard, J., Giroud, R., Bacon, R., 2022, SPIE, 12184, 121845S: "The BlueMUSE calibration unit: phase-A studies"
3. Martens, Sven, 2023 Proceedings of "Two in a Million - The interplay Between Binaries and Star Clusters", 50: "The Binary Content of Multiple Populations in Globular Clusters"
4. Herenz, E. C., Micheva, G., Weilbacher, P. M., Monreal-Ibero, A., Hayes, M., Anders, F., & Rivinius, T. 2023 RNAAS, 7, 99: "On the Recent Discovery of Coronal [Fe X] λ 6374 Emission in the Low-metallicity Dwarf Galaxy SDSS J0944-0038"
5. Castro, N., Roth, M. M., Weilbacher, P. M., Micheva, G., Monreal-Ibero, A., Kelz, A., Kamann, S., Maseda, M. V., Wendt, M., MUSE Collaboration, 2021, Msngr, 182, 50: "Mapping the Youngest and Most Massive Stars in the Tarantula Nebula with MUSE-NFM"
6. Weilbacher, P.M., Wendt, M., Martens, S., Vidante, C., Roth, M.M., Dreizler, S., Richard, J.: 2023 July, EAS Kraków: "Maximizing MUSE: Fixing data artifacts and planning for BlueMUSE", EAS Kraków, July 2023
7. Weilbacher, P.M., Monreal Ibero, A., Castro, N., Gunawardhana, M.L.P., Castro-Rodríguez, N., 2023 July, EAS Kraków: "Observing feedback in the most luminous HII regions"
8. Roth, M.M., et al., 2023 January, SPIE Photonics West, Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXVII: "Astrophotonics: photonic integrated circuits for astronomical instrumentation"

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

Promotionen

1. Herrero Alonso, Yohana, 2023: "*Properties of high-redshift galaxies in different environments*" (Uni Potsdam)
2. Goettgens, Fabian, 2021: „*Massively parallel spectroscopy of sources in Galactic globular clusters*“ (Uni Göttingen)

Masterarbeiten

1. Gharapurkar, Radha, 2023: "*Clustering of [OII]-selected galaxies in MUSE Surveys of Deep Fields*" (AIP / Uni Potsdam)
2. Müller-Horn, Johanna, 2023: "*Spectroscopic binaries in the globular cluster 47 Tuc with MUSE*" (Uni Göttingen)
3. Meerwart, Leon, 2022: „*Detectability of Predicted Binary Systems in the Cores of Galactic Globular Clusters with MUSE*“ (Uni Göttingen)
4. von Holt, Leon, 2022: "*Abundance variations of multiple populations in globular clusters*" (Uni Göttingen)

Bachelorarbeiten

1. Jonathan Langentepe-Kong, 2022: "*Characterising extended Lyman-alpha emission around high-redshift galaxies with MUSE – Exploration of a new approach*" (AIP / Uni Potsdam)
2. Schaible, Anna Lena, 2021: "*Predictions of a galactic outflow model for spectral mapping observations*" (AIP in Kooperation mit Uni Stuttgart)
3. Döring, Michael, 2023: "*Detektion von Emissionslinienobjekten im SMC Kugelsternhaufen NGC 419*" (Uni Göttingen)

Kurzbericht

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger: *Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP)*

Projektleitung: Dr. Peter Weilbacher (bis 2023: Prof. Dr. Martin Roth)

Verbund: Verbundprojekt 05A2020 BlueMUSE

Thema: BlueMUSE: a 3rd Generation Instrument for the ESO-VLT

1. Ziel und Inhalt des Projektes

Heutige Spitzenforschung in der Astrophysik ist für Beobachtungen des Universums auf leistungsfähige Instrumente an Großteleskopen angewiesen. Diese Instrumente sind fast immer Unikate und werden für bestimmte wissenschaftlichen Zielsetzungen entwickelt und optimiert. Der Bau dieser Geräte ist komplex und treibt optische und mechanische Bauteile an ihre technischen Grenzen. Immer muss auch Software zur Bewältigung der Daten angepasst oder neu geschrieben werden. Auf diese Weise profitiert die Astronomie einerseits von neuen Technologien und treibt andererseits die Entwicklung in Hard- und Software voran. Für dieses Zusammenspiel bedarf es der Zusammenarbeit zwischen mehreren Instituten in internationalen Konsortien. Durch die Mitgliedschaft in der Europäischen Südsternwarte (ESO) hat Deutschland einen Anteil am weltweit führenden bodengebundenen Observatorium für optische und nahinfrarote Beobachtungen. Hier ist das in Entstehung begriffene Extremely Large Telescope (ELT) zu nennen, aber insbesondere auch das seit 25 Jahren sehr erfolgreich arbeitende Very Large Telescope (VLT), für das gerade mehrere neue Instrumente entwickelt werden. Das Rahmenprogramm "Erforschung von Universum und Materie" ermöglicht die Teilnahme an solchen Instrumentierungsprojekten für Institute in Deutschland. Als eines der erfolgreichsten bisher auf diese Weise geförderten Instrumente sei MUSE (Multi-Unit Spectroscopic Explorer) genannt, ein Integralfeldspektrograf mit großem Gesichtsfeld, bei dem die Partner des aktuellen Projektes ebenfalls beteiligt waren.

Das Projekt "*BlueMUSE: ein Instrument der dritten Generation für das ESO-VLT*" ist das erste Vorhaben, mit dem die Arbeit an einem Instrument der nächsten Generation für das VLT ermöglicht wurde. BlueMUSE wird eine Neuentwicklung eines Integralfeldspektrografen mit hoher Empfindlichkeit im blauen Licht, basiert aber auf dem Konzept von MUSE, bei dem eine Anzahl von etwa 20 Integralfeldeinheiten jeden Bildpunkt eines 1'x1' großen Gesichtsfeldes in Spektren zerlegt. Durch die Nutzung des blauen Wellenlängenbereiches werden völlig neue wissenschaftliche Untersuchungen ermöglicht, die bisher mit keinem Instrument möglich waren.

Im Förderzeitraum haben das Institut für Astrophysik und Geophysik der Universität Göttingen (IAG) und das Leibniz-Institut für Astrophysik in Potsdam (AIP) gemeinsam Vorstudien zur Datenreduktionssoftware und zur Kalibrierung des Instrumentes vorgenommen. In Zusammenarbeit mit dem aus Eigenmitteln finanzierten Partner an der Universität Potsdam (UP) entstand außerdem eine Vorstufe eines Programms zur Simulation von BlueMUSE Datenkuben.

2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Zum Abschluss des Projektes konnten mehrere wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. Zum einen konnte gezeigt werden, dass die Berechnung und Speicherung von Kovarianzen trotz der großen Datenmenge, die von BlueMUSE zu erwarten ist, möglich sein wird. Zweitens konnte demonstriert werden, dass die Mitführung des instrumentellen Linienprofils funktioniert. Drittens konnte schlüssig gezeigt werden, woher wohlbekannte Artefakte in MUSE-Kuben stammen, und dass einige davon prinzipiell korrigierbar sind. Für BlueMUSE ergeben sich daraus Hinweise auf Justage und Kalibrierung des Instrumentes, sowie neue Ansätze der Prozessierung der Daten. Weiterhin wurden erste Ideen zum Design der Datenreduktionssoftware erstellt. Eine Studie zur Kalibrationseinheit wurde ebenfalls erstellt.

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

BlueMUSE wird von einem Konsortium aus Europa und Australien, unter Leitung des CRAL Lyon, als Instrument für die ESO entworfen. Die deutschen Partner AIP, IAG sowie UP (Letztere ohne Zuwendung) konnten sich im Wesentlichen bei zwei Arbeitspaketen, der Kalibrationseinheit und der wissenschaftlichen Software, einbringen. Bei der Software konnte auf Basis des MUSE-Instrumentes die Datenreduktionssoftware mit Prototyp-Code so erweitert werden, dass die Propagierung von Daten, die für die weitergehende Analyse der Datenkuben wichtig sind (vor allem Kovarianzen und das Linienprofil), getestet werden konnte. Außerdem konnte die Auswirkung von rechteckigen Spaxeln auf die Datenreduktion studiert werden.

Diese Arbeiten werden in anschließenden ErUM-Programmen in den konkreten Bau von BlueMUSE Hard- und Software einfließen.

