

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Schlussbericht

Verbund: 05A2021 - LNGS: Noble Gas Recovery System

Zuwendungsempfänger: Universität Münster  
Projektleitung: Prof. Dr. Christian Weinheimer  
E-Mail: weinheimer@uni-muenster.de  
Förderkennzeichen: 05A21PM1  
Förderzeitraum: 01.01.2021 - 30.06.2024  
Zuwendung: 747.387,10 €  
Projektträger: Projektträger DESY  
  
Zusätzlicher Kontakt: christian.huhmann@uni-muenster.de  
Zusätzlicher Name: Christian Huhmann

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

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 28.12.2024 18:06 für eine Veröffentlichung freigegeben.

# Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Universität Münster

Projektleitung: Prof. Dr. C. Weinheimer

Verbund: LNGS-Upgrade: Noble Gas Recovery System – Edelgas-Rückgewinnungssystem für LNGS

Thema: TP 1

## Zusammenfassung

### Bericht

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

Bei mehreren internationalen Großexperimenten im italienischen Untergrundlabor LNGS werden sehr kostbare Edelgase in großen Mengen in flüssiger Phase verwendet:

- Das Dunkle-Materie-Experiment DarkSide-50 [1] verwendet eine aktive Masse von 50 kg Argon, das aus tiefen unterirdischen Lagerstätten in Colorado gewonnen wird und als „Underground Argon“ (UAr) bezeichnet wird. Dieses UAr ist bzgl. des  $\beta$ -zerfallenden Isotops Ar-39 ( $t_{1/2} = 269$  yr) um mehr als den Faktor 1000 reduziert. Das sich im LNGS im Aufbau befindliche Nachfolgeexperiment DarkSide-20k [2] wird 50 Tonnen desselben UAr verwenden. Dieses sehr wertvolle UAr ist für diese Art von Experimenten mit seltenen Ereignissen sehr wichtig, denn normales Argon, das aus der Atmosphäre gewonnen wird („atmosphärisches Argon“), hat typischerweise eine Ar-39-Konzentration von etwa 1 ppq (1 Teil in  $10^{15}$ ), was einer Aktivität von 1 Bq/kg entspricht. Die Verwendung des normalen Argon würde Untergrundereignisse und eine zu hohe Zählraten mit der Gefahr von zufälligen Überlagerungen von Ereignissen mit sich bringen.
- Das Dunkle-Materie-Experiment XENONnT [3] verwendet natürliches Xenongas, das aus der Luft gewonnen wird. Allerdings kostet dieses sehr seltene Edelgas etwa mehrere Millionen Euro pro Tonne. Zwar enthält dieses kommerzielle Xenongas keine hohe Ar-39-Konzentration, dafür ist bei Xenon die Konzentration des  $\beta$ -zerfallenden Isotops Kr-85 ( $t_{1/2} = 10,8$  yr) viel zu hoch für die wissenschaftliche Fragestellung. Durch ein einzigartiges kryogenes Destillationsverfahren beim XENONnT-Experiment [4] wird Kr-85 weiter auf das Niveau von  $10^{-24}$  reduziert (Kr-in-Xe-Konzentrationen auf dem Niveau von 100 ppq zusammen mit einem Kr-85-Anteil in natürlichem Krypton von etwa  $1,5 \cdot 10^{-11}$ ), wodurch das kommerzielle Xenongas noch wertvoller wird. Für XENONnT ist ein internationales Nachfolgeexperiment DARWIN [5] bzw. XLZD [6] geplant, für das ebenfalls LNGS

ein mögliches Labor ist (Letter of Intent ist eingereicht).

- Das neutrinolose Doppelbetazerfallsexperiment LEGEND-200 [7] im LNGS verwendet instrumentiertes Argon als hochreines Abschirm- und Detektormedium. Die nächste Version des Experiments, LEGEND-1000 [8], für das ebenfalls LNGS ein mögliches Labor ist, sieht die Verwendung von UAr vor.

Trotz kryogener Lagermöglichkeiten für diese Edelgase in und bei den Experimenten im LNGS sollte mit diesem Projekt eine Möglichkeit geschaffen werden, die wertvollen Edelgase durch ein spezielles Kompressorsystem in Gasflaschen abfüllen zu können. Dies ist beispielsweise sehr wichtig bei der Beendigung eines dieser Experimente oder im Falle eines schwerwiegenden Problems, das die sichere Lagerung am Experiments beeinträchtigt. Zweitens sollte für den Fall einer externen Bearbeitung eines Edelgases, wie einer speziellen physikalischen oder chemischen Reinigung oder der Isotopenanreicherung für das DarkSide-20k-Experiment durch kryogene Destillation in der ARIA-Anlage auf Sardinien [9], eine sichere Methode für den Transport des Edelgases in Gasflaschen bei Drücken bis 400 bar bzw. 450 bar bereitgestellt werden.

Deshalb war das Ziel des Projekts die Konzeption, der Aufbau und die Inbetriebnahme eines Edelgas-Rückgewinnungssystem im italienischen Untergrundlabor LNGS, das von allen LNGS-Nutzern für die Rückführung von wertvollen Edelgasen wie Xenon oder das am radioaktiven Isotop Ar-39 arme „Untergrundargon“ in Gasflaschen genutzt werden kann. Zu den Nutzergruppen gehören die Kollaborationen der Experimente DarkSide (Argon), LEGEND (Argon) und XENON (Xenon).

Dieses Projekt fand statt im Rahmen eines Abkommen zwischen dem italienischen Ministerium für Hochschulwesen und Forschung (MUR) und dem deutschen Ministerium für Bildung und Forschung (BMBF) zur Verbesserung der wissenschaftlichen Infrastruktur des italienischen Untergrundlabors LNGS statt.

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

Die Kompression von Edelgasen Gasflaschen ist im Prinzip ein industrieller Standard. Bei den sehr wertvollen Edelgasen UAr und Xenon (mit einem Kryptonanteil von nur 100 ppq) der oben genannten Experimente muss auf eine besondere Reinheit der Anlage geachtet werden, was eine spezielle Auswahl der verwendeten Geräte und Leitungen erfordert und die Charakterisierung der Gase durch spezielle Messverfahren empfehlenswert macht. Allerdings geht die Anforderung eines erreichbaren Enddrucks bei Argon von 400 bar bzw. 450 bar weit über den Standard von 200 bar hinaus und erfordert spezielle Kompressoren und Gasflaschen.

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

Das BMBF-finanzierte Verbundprojekt mit den Projektpartnern Universität Mainz und Universität Münster (Koordination) wurde in enger Zusammenarbeit mit den beteiligten experimentellen Kollaborationen DarkSide, LEGEND und XENON sowie mit dem italienischen Untergrundlabor LNGS durchgeführt. Während LEGEND-200 und XENONnT laufende Experimente sind, befand sich im Berichtszeitraum DarkSide-20k in der Projektplanungs- und Aufbauphase, so dass

sich die Anforderungen für die Argonkompression im Projektverlauf mehrmals änderten. Dies führte zu Verzögerungen und aufgrund der Erhöhung der Anforderungen zu einer Verteuerung des Projekts, was Abstriche bei der Ausführung von Teilprojekten mit sich brachte, ohne aber den Erfolg des Gesamtprojektes zu gefährden. Dies wird in Kapitel 5 näher dargelegt.

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

Die Verwendung der bewilligten Investitionsmittel ist in der folgenden Tabelle aufgeführt. Durch die Aufteilung der Anlage in zwei Kompressoren und die erhöhten Anforderungen an den Argonkompressor (8-stufig statt 6-stufig, Zusatzausstattung) ergab sich eine Änderung zur ursprünglichen Planung, die beim Projektträger beantragt und im Oktober 2023 bewilligt wurde.

Beschreibung	Hersteller - Gerät	Kosten inkl. MwSt.
8-stufige Argon-Kompressoranlage	HAUG - Sirius 44G 160-110-75-50 LM-W und Sirius Nanoloc 44G 40-25-16-13 LM-L mit Zusatzausstattung	495.561,22 €
Xenon-Kompressoranlage	HAUG - Mercure 22E 60-40 LM-L und Mercure 22E 26-16 LM-L	82.645,50 €
Verpackung & Transport	Firma HAUG, Schweiz nach Münsterland	3.492,65 €

Die hier aufgeführten gesamten Investitionskosten von 581.699,37 € sowie weitere Kosten (z.B. Lagerkosten und Transport der Kompressoren vom Münsterland zum italienischen Untergrundlabor LNGS, Kosten für mehrere Dienstreisen des beteiligten Ingenieurs und des Projektleiters) überstiegen signifikant die zugewiesenen Investitionsmittel und konnten nicht mit anderen Projektmitteln kompensiert werden. Die Universität Münster beteiligte sich daher mit Eigenmitteln von deutlich mehr als 20.000 €, um dieses wichtige BMBF-INFN-Projekt nicht zu gefährden.

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

Bei der Stellung dieses Antrags waren schon Vertreter der Experimente DarkSide, LEGEND und XENON sowie Vertreter des Untergrundlabors LNGS beteiligt. Trotzdem wurden im ersten Projektjahr detaillierte Diskussionen mit weiteren Experten dieser Kollaborationen sowie des Untergrundlabors LNGS geführt, weil es jetzt um Details der Spezifikationen und Randbedingung der Aufstellung der Anlage ging. Neben vielen Videokonferenzen gehörten auch Besuche und Diskussionen durch den Münsteraner Ingenieur, Christian Huhmann, und den Münsteraner Projektleiter, Prof. Dr. Christian Weinheimer, vor Ort im italienischen Untergrundlabor LNGS dazu. Bei diesen Gesprächen stellten sich im Wesentlichen vier neue Herausforderungen für das Projekt heraus:

1. Die Anforderungen der DarkSide Collaboration an ein Argon-Kompressorsystem sind doch höher als anfangs diskutiert. Der Einlassdruck soll im Bereich von 1-1,5 bar liegen, der Ausgangsdruck bei 450 bar. Damit muss das Kompressorsystem eine Kompression von mindestens einem Faktor 300 leisten (anstatt des dem Antrag zugrundeliegenden Faktors  $\approx 200$ ), was einen 8-stufigen Kompressor anstatt des geplanten 6-stufigen Kompressors erfordert. Zum Vergleich, der für Xenongas benötigte Kompressor benötigt nur eine Kompression von einem Faktor 30.

2. Das Untergrundlabor LNGS unterstützte bei der Antragsstellung klar ein mobiles System, um langwierige Zulassungsverfahren zu vereinfachen, bevorzugte bei den Diskussionen aber ein stationäres System, was zwar den elektrischen Anschluss und die Zuführung von Kühlwasser vereinfacht, die Zufuhr des rückzugewinnenden Edelgases deutlich verkompliziert, da die drei oben genannten Experimente in drei unterschiedlichen Hallen C (DarkSide), A (LEGEND) und B (XENON) lokalisiert sind.
3. Ein neues Problem für eine große Kompressoranlage für Argon und Xenon ist, dass auch eine temporäre Aufstellung am XENONnT-Experiment auf große Platzprobleme stößt, da neben dem XENONnT-Experiment die neue kryogene Testplattform aufgebaut wird, die ebenfalls durch das BMBF gefördert wird.
4. Die langwierige Findung eines gemeinsamen Kompromisses erforderte sehr viel Zeit, so dass im ersten Projektjahr 2021 kein Kompressor bestellt werden konnte. Damit war das dem Antrag zugrundeliegende Angebot der Firma Haug verfallen, die für die von uns gewünschte Kompressoranlage ein Alleinstellungsmerkmal aufweist.

Bei einer festen Installation der Kompressoreinheit liegt das Problem in den langen Rohrleitungen vom Kompressor zum Experiment. Aufgrund des niedrigen Anfangsdrucks der Experimente und des Ansaugdrucks der Kompressoren (1,2 – 1,5 bar bei DarkSide, 2 bar bei XENONnT) und der vorgesehenen hohen Durchflüsse von bis zu 60 Nm<sup>3</sup>/h (Einheit: Normkubikmeter pro Stunde) müssen die Rohrleitungen einen sehr großen Querschnitt aufweisen. Bei einer Länge von z.B. 50 m reicht selbst ein Durchmesser von 20 cm nicht aus, um einen zu großen Druckabfall zu verhindern. Außerdem müssten besondere Möglichkeiten geschaffen werden, um das wertvolle Argon- oder Xenongas, das sich in diesen großvolumigen Leitungen befindet, zurückzugewinnen. Sowohl die langen, großvolumigen Leitungen als auch die Rückgewinnungsmaßnahmen wären sicherlich mit erheblichen Kosten verbunden. Die einzigen Alternativen wären eine erste Verdichterstufe am jeweiligen Experiment und Hochdruckleitungen zum Hauptverdichter oder die ebenfalls kostspieligen vakuumisolierten LXe- oder LAr-Leitungen zum Verdichter mit speziellen LXe- und LAr-Verdampfern dort. Die von den Universitäten Münster und Mainz eingeworbenen BMBF-Mittel hätten diese zusätzlichen Kosten nicht tragen können.

Da bei einer Festinstallation der Verdichteranlage je eine erste Verdichterstufe an jedem Experiment hätte platziert werden müssen, schlugen wir deshalb vor, gleich zwei komplette Verdichteranlagen zu installieren, denn der Aufwand für Argon mit dem gewünschten Verdichtungsfaktor von 300 und für Xenon mit dem 10-fach kleineren Verdichtungsfaktor von 30 ist deutlich unterschiedlich. Auch die Größen sind deutlich unterschiedlich, denn ein reiner Xenon-Kompressor hat eine Aufstellfläche von ca. 2 m<sup>2</sup> und eine Höhe von deutlich weniger als 2 m. Das bedeutet, dass der Xenon-Kompressor beim XENONnT-Experiment stehen könnte, während z.B. das Xenon-Flaschenlager mobil gehalten werden könnte. Für die wesentlich größere Argon-Kompressoreinheit könnte dann ein geeigneter Standort für DarkSide gewählt werden, der nicht auf die kürzeste Entfernung zum XENONnT-Experiment Rücksicht nehmen müsste. Eine Nutzung des wertvollen Untergrundargons von LEGEND ist erst für die Ausbaustufe LEGEND-1000 geplant, die noch nicht sicher am LNGS stattfinden wird und wenn dann in der gleichen Halle wie das DarkSide-20k-Experiment. Natürlich stimmt die XENON-Kollaboration auch der Nutzung der Anlage für die Xenonkompression durch andere LNGS-Nutzergruppen zu, damit die Rückgewinnungsanlage weiterhin für alle LNGS-Nutzer, auch zukünftige, zugänglich bleibt. Ein weiterer Vorteil der Zweikompressorlösung ist, dass es keine Vermischung der Gase (Ar und Xe) in getrennten Anlagen geben würde.

Diesem Kompromissvorschlag, der im Wesentlichen aus der Anschaffung von zwei dedizierten Kompressoren, einem mit hoher Verdichtung für Argongas und einem kleineren mit geringerer Verdichtung für Xenongas, anstatt einer universellen Kompressoranlage besteht und allen oben genannten neuen Herausforderungen Rechnung trägt, stimmten neben den beteiligten Wissenschaftler\*innen der genannten Experimente und die LNGS-Ingenieure insbesondere auch der LNGS-Direktor und der Projektträger des BMBF zu.

Dieser Kompromiss führte aber zu erheblichen Mehrkosten, die mit den vom BMBF bewilligten Mitteln nur finanziert werden konnten, wenn an anderer Stelle gekürzt wird. Damit mussten die Diagnose durch eine Gaschromatografie-Anlage und das kleine Flaschenlager entfallen, damit diese Mittel in die Kompressoren gesteckt werden können. Beides war kein wirkliches Problem für die XENON-Kollaboration, die ohnehin ein eigenes Flaschenlager anschaffen wollte und bereits ein Quadrupol-Massenspektrometer für die Gasanalyse am Experiment besitzt. Die Universität Münster verfügt am LNGS über ein aus DFG-Mitteln vor mehr als 10 Jahren angeschafftes Xenon-Gasanalytiksystem basierend auf einem Quadrupolmassenfilter und einer Flüssigstickstoff-Kühlfalle, das sie allen Xenongas-Nutzern zur Verfügung stellen würde. Die DarkSide-Kollaboration kann nach eigenen Aussagen auf ein kleines Argonflaschenlager verzichten. Der LNGS-Direktor versprach ein Analysesystem für Argon zur Verfügung zu stellen, falls das benötigt werden sollte. Damit können alle ursprünglich geplanten Anforderungen auch in der Zwei-Kompressor-Lösung erfüllt werden.

Die Grundidee des LNGS-Upgrade-Projekts einer allen LNGS-Nutzern zur Verfügung stehende Edelgas-Rückgewinnungsanlage bleibt auch mit der hier vorgeschlagenen Zwei-Kompressor-Lösung nach wie vor bestehen. Denn jeder Kompressor ist selbst eine Multinutzer-Anlage, es gibt nur eine für die Argon-Nutzer (DarkSide, LEGEND-200), eine für die Xenon-Nutzer (XENONnT derzeit, vielleicht XLZD/DARWIN in Zukunft).

Nach der gemeinsam mit allen Beteiligten inkl. dem Projektträger gefällten Entscheidung, zwei getrennte Anlagen für Xenon und Argon einzusetzen, wurden von uns im Mai 2022 entsprechend aktualisierte Angebote bei der Firma Haug angefragt. Parallel wurden Gespräche mit weiteren Herstellern von Kompressoren geführt und Angebote eingeholt. Die geforderten Spezifikationen (insbesondere der niedrige Ansaugdruck und die Anlagengröße) konnten jedoch lediglich von der Firma Haug erfüllt werden. Außerdem bieten alle übrigen Hersteller Membrankompressoren an, bei denen die Gefahr eines Membranbruchs besteht und dadurch eine Kontamination des Gases. Nur die Firma Haug bietet für diesen hohen Enddruck ölfreie Kolbenkompressoren an. Dr. Petr Chaguine, von der Universität Mainz an das LNGS deligiert, bildete eine wichtige Schnittstelle zu den Ingenieuren und Technikern des Labors vor Ort. Er war unter anderem daran beteiligt, die Platzverhältnisse in der engen Umgebung des unterirdischen Labors zu definieren und technische Schnittstellen zu diskutieren. Mitte Juli 2022 erhielten wir dann endlich die finalen Angebote der Firma Haug. Im August 2022 wurden schließlich beide Anlagen von der Universität Münster bestellt. Bei einem Treffen im November 2022 mit Vertretern der Firma Haug in Münster wurde abschließend die genaue Betriebsweisen und -moden der Kompressoranlagen besprochen und festgelegt.

Im Dezember 2022 äußerte die DarkSide-Kollaboration den Wunsch, den Argon-Kompressor nicht nur am LNGS, sondern auch und insbesondere zuerst beim ARIA-Projekt [9] für DarkSide (und später eventuell bei ARIA für LEGEND) einzusetzen. Beim ARIA-Projekt in Cagliari (Sardinien) soll das in Cortez (USA) gewonnene sogenannte Untergrund-Argon (um ca. einen Faktor 1000 reduziert bzgl. des radioaktiven Isotops Ar-39) mittels Destillation weiter gereinigt werden. Für den weiteren Transport zum LNGS soll das Gas auf 450 bar in Druckgasflaschen verdichtet

werden. Hierfür wird ein entsprechender Kompressor benötigt. Das Untergrundlabor LNGS war mit einer temporären Aufstellung des Kompressors beim ARIA-Projekt einverstanden. Um die Möglichkeiten des Einsatzes sowohl am LNGS als auch die Eignung für das ARIA-Projekt zu besprechen, fand im März 2023 ein Treffen bei der Firma Haug in St. Gallen mit dem Münsteraner Ingenieur, Christian Huhmann, und Vertretern der DarkSide-Kollaboration und des ARIA-Projekts statt. Dabei wurden insbesondere die notwendigen Anforderungen der beiden Standorte abgeglichen (z. B. Förderleistung, Ansaugdruck, Puffervolumen, Platzbedarf, Laufzeiten). In einigen Punkten wird sich das ARIA-Projekt den bereits definierten Spezifikationen der Anlage anpassen (z.B. Ansaugdruck, SPS-Schnittstelle). Außerdem konnten bei dem Besuch die Fertigung und die Entwicklungsabteilung der Firma besichtigt und weitere Ansprechpartner für den folgenden Konstruktions- und Fertigungsprozess kennengelernt werden.

Die Firma Haug begann im Anschluss an das Treffen mit der finalen Auslegung der Kompressoren sowie der Erstellung detaillierter PIDs und Layout-Zeichnungen zu den Anlagen. Es fanden regelmäßig Videokonferenzen mit der Firma Haug statt, um verschiedene technische Details zu klären. Insbesondere Situationen eines möglichen Gasverlustes müssen identifiziert (Fehlbedienung, Sicherheitsbestimmungen) und verschiedene Randbedingungen auf Betreiberseite festgelegt werden (Puffervolumen, elektrische Anschlüsse, etc.). An dieser Stelle möchten wir auch berichten, dass wir uns im Mai 2023 nochmals mit dem Project Director des LEGEND200-Experiments, Dr. Bernhard Schwingenheuer, abgesprochen haben, wobei es ebenfalls um diese Sicherheitsaspekte bzgl. Gaskontamination bzw. -verlust auch im Zusammenhang mit der Notstromversorgung ging. Im Laufe der Gespräche wurde klar, dass einige Dinge, die im Vorfeld mit dem damaligen Verantwortlichen der Firma Haug abgesprochen hatten („das können wir so machen“), sich jetzt als Sonderleistung mit Mehrkosten herausstellten (unser langjähriger Ansprechpartner aus dem Vertrieb der Firma Haug hat aufgrund Pensionierung gewechselt, außerdem hatte die Geschäftsleitung der Firma Haug zwischenzeitlich gewechselt).

Wir wollten aber das Projekt jetzt nicht mehr scheitern lassen, auch wenn der Projektträger uns keinen Mittelaufwuchs in Aussicht stellen konnte, so dass wir – nach Rücksprache mit dem Projektträger – die Dokumente für den Argon-Kompressor im Oktober 2023 freigaben (die entsprechenden Dokumente für den einfacheren Xenon-Kompressor wurden schon im April 2023 freigegeben). Die Münsteraner Gruppe, die die Projektmittel für die Hardware erhalten hatte, hat sich deshalb bereiterklärt, die durch das Projekt nicht gedeckten Mehrkosten für die Kompressoren und den Transport von mehr als 20.000 Euro durch Mittel der Universität Münster zu tragen. Wir haben LNGS und Projektträger in Kenntnis gesetzt, dass wir damit zwar das Projekt retten, aber keine weiteren Mittel mehr haben, um die Installation am LNGS durchzuführen. Der LNGS-Direktor begrüßte sehr, dass wir das Projekt nicht aus Kostengründen aufgaben und sagte zu, eine Lösung für die Installation im italienischen Untergrundlabor LNGS zu finden.

Etwa zeitgleich im Oktober 2023 wurden wir in Kenntnis gesetzt, dass der Kompressor nun doch nicht sofort vom DarkSide-Experiment beim ARIA-Projekt in Sardinien in der spezifizierter Form benötigt wird, da die DarkSide-Kollaboration sich für einen Flüssig-Argon-Transport anstatt des Druckflaschentransports umentschieden hat. Natürlich wird der Kompressor weiterhin sowohl von der DarkSide- und der LEGEND-Kollaboration benötigt werden.

In 2024 erfolgte die Fertigungstellung der beiden Kompressoranlagen für Xenon und Argon bei der Firma Haug. Im Rahmen eines Factory Acceptance Tests (FAT) fand jeweils die Abnahme der beiden Anlagen vor Ort im Werk St. Gallen statt:

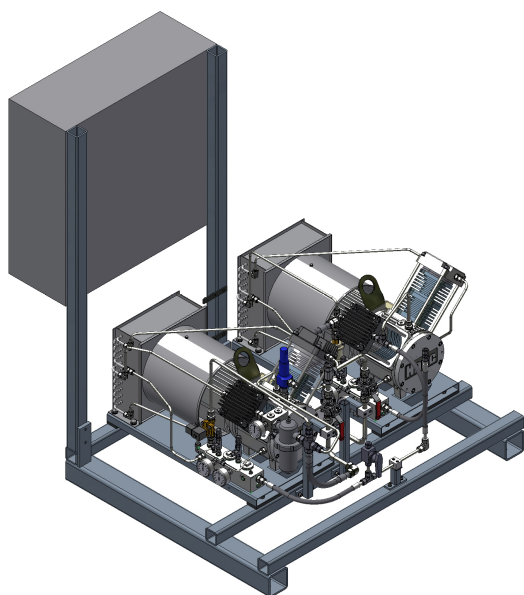


Abbildung 1: Zweistufige Xenon-Kompressoranlage als Computerzeichnung (links) und Foto bei dem Factory Acceptance Test (rechts).

Am 30.04.2024 fand zunächst die Abnahme des Xenon Kompressors statt. In Anwesenheit von Christian Huhmann (Universität Münster) und Dr. Petr Chaguine (Universität Mainz) wurde der Kompressor an einem Teststand mit Stickstoff in Betrieb genommen. Dabei konnte erfolgreich gezeigt werden, dass alle geforderten Spezifikationen erreicht werden, insbesondere der Durchfluss, Ansaugdruck und Enddruck. Des Weiteren wurde die Verrohrung inkl. der Instrumentierung und der Sicherheitseinrichtungen überprüft. Es fand außerdem ein Review aller technischen Dokumente statt (Verrohrung- & Instrumentations-Diagramme (P&ID), technische Zeichnungen, Betriebsanleitung, Testprotokolle).

Der FAT der Argonanlage fand am 27.06.2024 statt. Zuvor hatten einige Produktionsschwierigkeiten bei der Firma Haug für Verzögerungen gesorgt. Die achtstufige Kompressoranlage für hochreines Argon mit dem sehr hohen Enddruck von 450 bar und einer Förderleistung von 60 Nm<sup>3</sup>/h ist auch für die Firma Haug etwas nicht Alltägliches und eine absolute Sonder- und Einzelanfertigung. Es stellte sich z.B. heraus, dass der firmeneigene Teststand nicht zur Inbetriebnahme dieser Anlage geeignet war und u.a. Vereisungen stattfanden, bevor der Enddruck erreicht werden konnte. Größere Umbaumaßnahmen am Teststand waren notwendig. An der Abnahme vor Ort in St. Gallen nahmen Christian Huhmann (Universität Münster) und ein Vertreter vom LNGS teil. Es konnte erfolgreich gezeigt werden, dass alle geforderten Spezifikationen erreicht werden, insbesondere Durchfluss, Ansaugdruck und Enddruck des jeweiligen Kompressors der Zweikompressoranlage (mit insgesamt 8 Kompressionsstufen). Beim gemeinsamen Betrieb beider Kompressoren wird später noch ein Feinabstimmung notwendig werden. Dies erfolgt über die Motorgeschwindigkeit (Frequenzumrichter) und die Ansaugdrücke der beiden Kompressoren. Des Weiteren wurde die Verrohrung inkl. der Instrumentierung und der Sicherheitseinrichtungen überprüft. Es fand außerdem ein Review aller technischen Dokumente statt (P&ID, Zeichnungen, Betriebsanleitung, Testprotokolle).

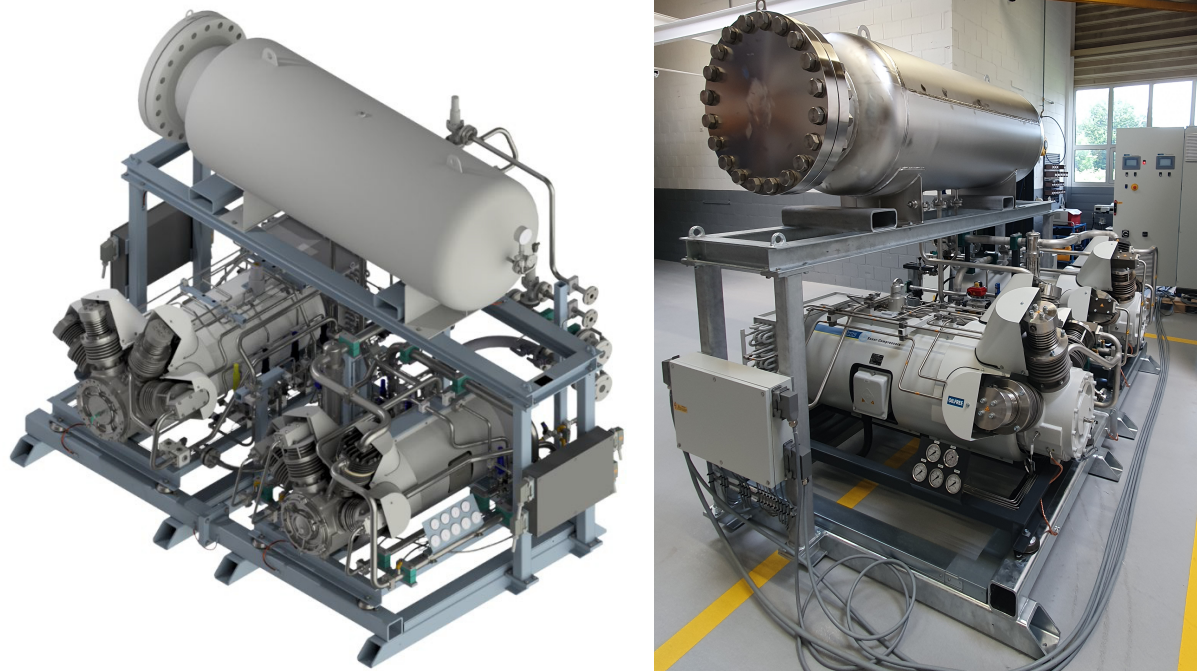


Abbildung 2: Zweistufige Argon-Kompressoranlage mit ansaugseitiges Druckausgleichvolumen als Computerzeichnung (links) und Foto bei dem Factory Acceptance Test (rechts).

Beide Anlagen wurden Ende September 2024 nach Deutschland eingeführt und als Geräte der Universität Münster inventarisiert. Für den Transport wurden beide Anlagen mit Stickstoff und leichtem Überdruck gefüllt. Dies dient zum einen der Reinheit, zum anderen der Lagerfähigkeit der Anlagen. Langer Stillstand unter Luft kann sich negativ auf die Lebensdauer der hochpräzise gefertigten Zylinder und Kolben auswirken. Bei Lagerzeiten von mehr als einem Jahr wird vor Inbetriebnahme zunächst eine Wartung empfohlen. Im November 2024 erfolgte der Weitertransport nach Italien ans LNGS, wo sie am 06.11.2024 erfolgreich direkt im Untergrundlabor angeliefert und vom italienischen Untergrundlabor LNGS übernommen wurden, die seitdem für die sachgemäße Lagerung, Wartung und Betrieb die Verantwortung tragen.

## 6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Dieses Projekt fand statt im Rahmen eines Abkommen zwischen dem italienischen Ministerium für Hochschulwesen und Forschung (MUR) und dem deutschen Ministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dient zur Verbesserung der wissenschaftlichen Infrastruktur des italienischen Untergrundlabors LNGS statt. Das hier bearbeitete Projekt verbessert die wissenschaftliche Infrastruktur im italienischen Untergrundlabor LNGS für alle Nutzer von Edelgasen deutlich und erleichtert damit insbesondere die Suche nach Dunkler Materie und dem neutrinolosen doppelten Betazerfall signifikant.

## 7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das hier bearbeitete Projekt verbessert die wissenschaftliche Infrastruktur im italienischen Untergrundlabor LNGS für alle Nutzer von Edelgasen deutlich und erleichtert damit insbesondere die Suche nach Dunkler Materie und dem neutrinolosen doppelten Betazerfall signifikant.

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

Ursprünglich war das vornehmlich europäische Zukunftsprojekt DARWIN [5] als Xenon-basiertes Nachfolgeprojekt des XENONnT-Experiment zur Suche nach Dunkler Materie und anderen seltenen bzw. exotischen Ereignissen geplant. Durch den Zusammenschluss der Kollaborationen XENON, LZ (LUX-ZEPLIN) und DARWIN entstand kürzlich die XLZD-Kollaboration, die das Xenon-basierte Observatorium XLZD [6] mit einem breiten Physikprogramm (Suche nach Dunkler Materie, Suche nach dem neutrinolosen doppelten Betazerfall des Isotops Xe-136, solare Neutrinos, Axionen, etc.), aufbauen will. Da das italienische Untergrundlabor eines der möglichen Ort für den XLZD-Detektor ist, erhöht die Wichtigkeit dieses Projekts weiter.

## 9 Erfolge und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Aufgrund des speziellen Charakters (Bereitstellung von wissenschaftlichen Geräten, die von einer Firma konstruiert und gebaut wurden) wurden und werden keine Publikationen angefertigt.

### 9.1 Abschlussarbeiten

Aufgrund des speziellen Charakters (Bereitstellung von wissenschaftlichen Geräten, die von einer Firma konstruiert und gebaut wurden) wurden keine Abschlussarbeiten angefertigt.

## Literatur

- [1] P. Agnes *et al.* [DarkSide Collaboration],  
“DarkSide-50 532-day dark matter search with low-radioactivity argon”,  
Phys. Rev. D 98 (2018) 102006
- [2] A. Zani [DarkSide-20k Collaboration],  
“The DarkSide-20k experiment”,  
JINST **19** (2024) C03058
- [3] E. Aprile *et al.* [XENON Collaboration],  
“The XENONnT Dark Matter Experiment”,  
Eur. Phys. J.C 84 (2024) 784
- [4] E. Aprile *et al.* [XENON Collaboration],  
“Removing krypton from xenon by cryogenic distillation to the ppq level”,  
Eur. Phys. J. C 77 (2017) 275

- [5] J. Albers et al. [DARWIN Collaboration],  
“DARWIN: towards the ultimate dark matter detector”,  
JCAP 2016, 11 (2016) 017
- [6] J. Aalbers *et al.* [XLZD Collaboration],  
“The XLZD Design Book: Towards the Next-Generation Liquid Xenon Observatory for Dark  
Matter and Neutrino Physics”,  
arXiv:2410.17137
- [7] N. Abgrall et al. [LEGEND Collaboration],  
“The Large Enriched Germanium Experiment for Neutrinoless Double Beta Decay (LE-  
GEND)”,  
AIP Conf.Proc. 1894 (2017) 1, 020027, arXiv:1709.01980
- [8] N. Abgrall *et al.* [LEGEND Collaboration], “The Large Enriched Germanium Experiment  
for Neutrinoless  $\beta\beta$  Decay: LEGEND-1000 Preconceptual Design Report”,  
arXiv:2107.11462
- [9] E. Aaron *et al.* [DarkSide-20k Collaboration], “Measurement of isotopic separation of argon  
with the prototype of the cryogenic distillation plant Aria for dark matter searches”,  
Eur. Phys. J. C 83 (2023) 453

## Kurzbericht

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger: Universität Münster

Projektleitung: Prof. Dr. C. Weinheimer

Verbund: LNGS-Upgrade: Noble Gas Recovery System – Edelgas-Rückgewinnungssystem für LNGS

Thema: TP 1

### 1 Ziel und Inhalt des Projektes

Bei mehreren internationalen Großexperimenten wie DarkSide-50 bzw. DarkSide-20k oder LEGEND-200 oder XENONnT im italienischen Untergrundlabor LNGS werden sehr kostbare Edelgase in großen Mengen in flüssiger Phase verwendet. Beispiele sind Xenon oder sogenanntes Untergrundargon, dessen Anteil des radioaktiven Isotopes Ar-39 etwa 1000-fach geringer ist.

Trotz kryogener Lagermöglichkeiten für diese Edelgase in und bei den Experimenten im LNGS sollte mit diesem Projekt eine Möglichkeit geschaffen werden, die wertvollen Edelgase durch ein spezielles Kompressorsystem in Gasflaschen abfüllen zu können. Dies ist beispielsweise sehr wichtig bei der Beendigung eines dieser Experimente oder im Falle eines schwerwiegenden Problems, das die sichere Lagerung am Experiment beeinträchtigt. Zweitens sollte für den Fall einer externen Bearbeitung eines Edelgases, wie einer speziellen physikalischen oder chemischen Reinigung oder der Isotopenanreicherung für das DarkSide-20k-Experiment durch kryogene Destillation in der ARIA-Anlage auf Sardinien, eine sichere Methode für den Transport des Edelgases in Gasflaschen bei Drücken bis 400 bar bzw. 450 bar bereitgestellt werden.

Deshalb war das Ziel des Projekts die Konzeption, der Aufbau und die Inbetriebnahme eines Edelgas-Rückgewinnungssystem im italienischen Untergrundlabor LNGS, das von allen LNGS-Nutzern für die Rückführung von wertvollen Edelgasen wie Xenon oder das am radioaktiven Isotop Ar-39 arme „Untergrundargon“ in Gasflaschen genutzt werden kann. Zu den Nutzergruppen gehören die Kollaborationen der Experimente DarkSide (Argon), LEGEND (Argon) und XENON (Xenon).

Dieses Projekt fand statt im Rahmen eines Abkommen zwischen dem italienischen Ministerium für Hochschulwesen und Forschung (MUR) und dem deutschen Ministerium für Bildung und Forschung (BMBF) zur Verbesserung der wissenschaftlichen Infrastruktur des italienischen Untergrundlabors LNGS statt.

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

Das BMBF-finanzierte Verbundprojekt mit den Projektpartnern Universität Mainz und Universität Münster (Koordination) wurde in enger Zusammenarbeit mit den beteiligten experimentellen Kollaborationen DarkSide, LEGEND und XENON sowie mit dem italienischen Untergrundlabor LNGS durchgeführt. Während LEGEND-200 und XENONnT laufende Experimente sind, befand sich im Berichtszeitraum DarkSide-20k in der Projektplanungs- und Aufbauphase, so dass sich die Anforderungen für die Argonkompression im Projektverlauf mehrmals änderten. Dies führte zu Verzögerungen und aufgrund der Erhöhung der Anforderungen zu einer Verteuerung des Projekts, was zwar Abstriche bei der Ausführung von Teilprojekten mit sich brachte, nicht aber den Erfolg des Gesamtprojektes zu gefährdete.

Es konnten zwei spezielle Kompressoranlagen für die Edelgase Argon (inkl. „Untergrundargon“) und Xenon spezifiziert, von einer Spezialfirma beschafft und zum italienischen Untergrundlabor LNGS gebracht werden, die es erlauben, die speziellen Eigenschaften (höchste Reinheit, insbesondere Armut an radioaktiven Isotope Ar-39 oder Kr-85) bei der Kompression in Gasflaschen zu bewahren. Diese Spezifikationen wurden an die Bedürfnisse der internationalen Kollaborationen DarkSide, LEGEND und XENON mit den zurzeit laufenden Experimenten LEGEND-200 und XENONnT sowie den im Aufbau befindlichen Experimenten DarkSide-20k und den geplanten Experimenten LEGEND-1000 und XLZD angepaßt. So erlaubt beispielsweise die 8-stufiger Kompressoranlage die Kompression von Argon auf Drücke von bis zu 450 bar.

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

Es konnten zwei spezielle Kompressoranlagen für die Edelgase Argon (inkl. „Untergrundargon“) und Xenon spezifiziert, von einer Spezialfirma beschafft und zum italienischen Untergrundlabor LNGS gebracht werden, die es erlauben, die im Experiment verwendeten wertvollen Edelgase in Flaschen füllen zu können. Dabei werden die speziellen Eigenschaften (höchste Reinheit, insbesondere Armut an radioaktiven Isotope Ar-39 oder Kr-85) bei der Kompression bewahrt.

Damit verbessert das hier bearbeitete Projekt die wissenschaftliche Infrastruktur im italienischen Untergrundlabor LNGS für alle Nutzer von Edelgasen deutlich und erleichtert damit insbesondere die Suche nach Dunkler Materie und dem neutrinolosen doppelten Betazerfall signifikant.