

# Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Karlsruher Institut für Technologie (Universitätsaufgabe)
Projektleitung:	Prof. Dr. Kathrin Valerius
Verbund:	LNGS-Upgrade: Entwicklung mobiler Neutronen-Detektoren und einer Neutronen-Veto-Technologie mit Gd-beladenem Wasser
Thema:	Entwicklung eines mobilen Neutronen-Detektors (Teilprojekt 2)

## Zusammenfassung

Ziel dieses Projektes war die Entwicklung eines hochsensitiven mobilen Neutronendetektors, mit dessen Hilfe der Neutronenfluss im Untergrundlabor LNGS (Laboratori Nazionali del Gran Sasso) in Italien genauer und bei niedrigeren Energien vermessen werden kann, als dies bislang möglich war. Der Neutronenfluss im LNGS entsteht dabei im Wesentlichen durch natürliche Radioaktivität im Umgebungsgestein und in den Betonwänden der Laborhallen und zu einem wesentlich kleineren Teil durch wenige kosmische Myonen, die trotz der massiven Gesteinsabschirmung noch in das Labor eindringen. Teilchenreaktionen von Neutronen müssen in vielen Experimenten in Untergrundlaboren wie dem LNGS möglichst vermieden oder identifiziert werden, um eine Suche nach sehr seltenen Prozessen wie z.B. von neutrinosen doppelten Betazerfällen oder der Streuung von Dunkler Materie zu ermöglichen. Der Neutronendetektor sollte nach Abschluss des Projekts dem LNGS als Teil der wissenschaftlichen Infrastruktur des Labors zur weiteren Verwendung übergeben werden. Ein mobiles System erlaubt dabei, den Neutronenfluss flexibel an verschiedenen Experiment-stellen der 3 Hallen sowie in den Durchgängen des LNGS zu vermessen.

Das Vorhaben wurde in enger Abstimmung mit dem Kooperationspartner Universität Mainz durchgeführt. Es fanden regelmäßige Arbeitstreffen, typischerweise als online-Meetings statt, an denen auch Kolleg\*innen der italienischen Partner-Universität aus L'Aquila teilnahmen. Nach der ersten Konzeption eines Detektorsystems wurde auch das Direktorat des LNGS über den geplanten Bau und die Installation im LNGS informiert und die entsprechende Zustimmung zum Einbringen eines solchen mobilen Detektors eingeholt. Dabei wurden die spezifischen Anforderungen des Detektors (Stromversorgung, Datentransfer, Platzbedarf, Betreuung vor Ort) wie auch Sicherheitsvorschriften des Labors aufeinander abgestimmt.

Als optimale Lösung für einen kompakten, spektralen Neutronendetektor mit den obigen Randbedingungen ergab sich ein System aus 36 Plastikszintillatoren, die die Neutronenenergie wie auch den Neutroneneinfang an sie umgebenden Gadoliniumfolien nachweisen können. Die Szintillatormodule mit ihren Auslese-Sensoren (PMTs) wurden dann am KIT zusammengebaut, in einen mechanischen Rahmen eingebracht und mit PMT-Hochspannungsversorgung und speziell am KIT entwickelter Auslese-Elektronik versehen.

Ausgiebige Funktionstests einzelner Module wie auch des Gesamtsystems mit verschiedenen radioaktiven Quellen erfolgten zunächst am KIT. Nach Sicherstellung der korrekten Funktion der einzelnen Detektoren wie auch der Auslese-Elektronik wurde das Gesamtsystem am Neutronen-generator der ENEA (Department of Fusion and Technology for Nuclear Safety and Security) in Frascati, Italien, mit verschiedenen Neutronen-Quellen kalibriert. Schließlich erreichte der Neutronendetektor Ende 2024 das Untergrundlabor LNGS und konnte nach erfolgter Zulassung durch die Laboraufsicht Anfang 2025 in Betrieb genommen werden.

Wesentliches Ergebnis des Projekts ist der erfolgreiche Aufbau und die Inbetriebnahme eines mobilen Detektors zur spektralen Vermessung des Neutronenflusses und dessen Bereitstellung für das Untergrundlabor LNGS:

**ALMOND – An LNGS Mobile Neutron Detector**

Die Arbeiten hierzu wurden im Wesentlichen am KIT konzipiert und durchgeführt, die Kalibrationsphase erfolgte in enger Abstimmung mit Kollegen der ENEA in Frascati. Die Installation des Detektors am LNGS und dessen Messbetrieb wurde gemeinsam mit Kolleg\*innen der Universität L'Aquila und des LNGS erreicht, seit Januar 2025 nimmt ALMOND kontinuierlich Daten im Untergrundlabor LNGS. Hiermit konnte dem LNGS ein relevantes Element der wissenschaftlichen Infrastruktur zur Verfügung gestellt werden, das Experimenten der Astroteilchenphysik wichtige Parameter zur Untergrundunterdrückung bei der Suche nach seltenen Prozessen liefert.

# Bericht

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

Natürliche Radioaktivität aus der Umgebung stellt eine wesentliche Limitierung für Experimente dar, die nach extrem seltenen Prozessen suchen und sich deshalb in Untergrundlaboren wie den Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) befinden, um gegen kosmische Strahlung abgeschirmt zu sein. Dabei sind energetische Neutronen aus dem Gestein und den Betonwänden besonders relevant. Eine genaue Kenntnis dieser Komponente ist notwendig, um die Anforderungen an die Abschirmung und die Veto-Mechanismen bei unterirdischen Experimenten zu bestimmen. Neutronen wechselwirken mit Atomkernen und führen zu Kernrückstoßsignalen, wie sie insbesondere bei der direkten Suche nach dunkler Materie erwartet werden. Obwohl der Neutronenfluss im LNGS schon früher gemessen wurden, streuen die publizierten Ergebnisse beträchtlich und sind abhängig vom Ort innerhalb des Labors und wahrscheinlich auch vom Zeitpunkt der Messung, z. B. in Abhängigkeit vom Wasserstand im umgebenden Gestein und Beton, wobei Wasser ein Hauptmoderator für schnelle Neutronen ist. In Abbildung 1 sind die Neutronenmessungen im LNGS für thermische (Abb. 1 links) und schnelle Neutronen (Abb. 1 rechts) zusammengefasst.

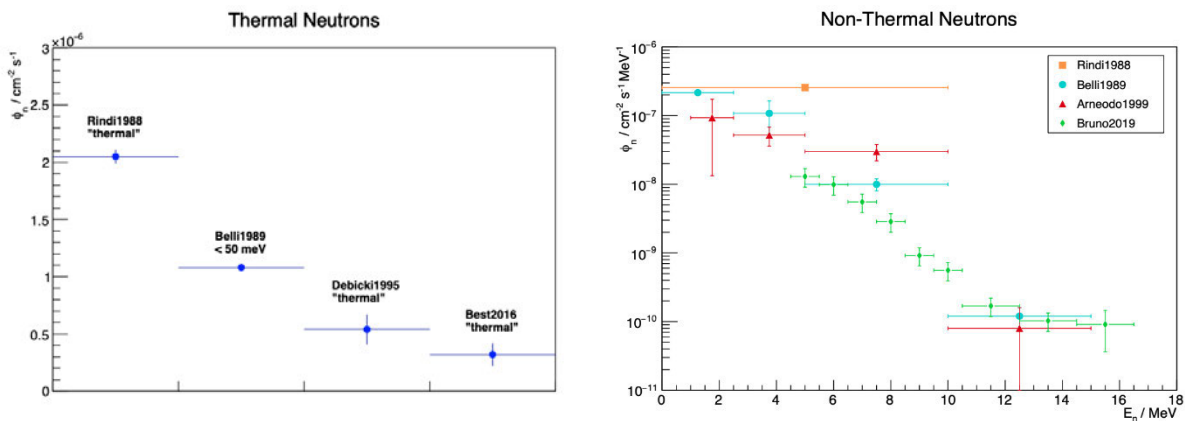


Abb 1: Vergleich der publizierten Flüsse thermischer (links) und nicht-thermischer (rechts) Neutronen für das LNGS

Ein wesentliches Problem bei einer kongruenten Beschreibung der Neutronenflüsse stellt die Tatsache dar, dass die Messungen nicht nur an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeiten durchgeführt wurden, sondern auch prinzipiell unterschiedliche Messmethoden und damit systematische Unsicherheiten aufweisen. Um diese Unsicherheit zu eliminieren, sollte ein mobiles Neutron-Detektorsystem konzipiert, gebaut und im LNGS in Betrieb genommen werden, mit dem dann unter gleichen Experiment-Bedingungen an verschiedenen Orten im LNGS der Neutronenfluss spektral vermessen werden kann.

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

Angesichts der geringen Neutronenflüsse in der Größenordnung von einigen  $10^{-6}$  n/cm<sup>2</sup>/s in einer Umgebung, die von einem Gamma-Untergrund dominiert wird, der fünf Größenordnungen größer ist, war von Anfang an offensichtlich, dass eine empfindliche Neutronenmessung auf relativ große Detektoren mit hoher Neutronennachweisschwindigkeit mit einer effektiven Fläche von ~0,1 bis 1 m<sup>2</sup> und einer ausgezeichneten Gammadiskriminierung angewiesen ist. Im Detail sollte der Neutronen-Detektor über folgende Spezifikationen verfügen: Hohe Nachweisschwindigkeit für Neutronen, exzellente Diskriminierung und Unterdrückung von Gamma-Untergrund, Echtzeitmessung von Neutron-Ereignissen, d.h. Einzel-Event-Information, gute Energieauflösung der kinetischen Energie der Neutronen, niedrige Nachweisschwelle für Neutronen-Energien, Mobilität des Systems zur Bestimmung des Neutronenflusses an

verschiedenen Messplätzen im LNGS, Robustheit und Einsatzfähigkeit über einen längeren Zeitraum, Konformität der eingesetzten Materialien mit den Sicherheits- und Umgangsregeln des LNGS und eine Machbarkeit des Gesamtsystems im Rahmen der Fördermittel.

Generell kamen dabei für den Nachweis von Neutronen folgende Messmethoden in Betracht: Proportionalzähler auf der Basis von  $^3\text{He}$ , mit Gadolinium geladene Wasser-Cerenkov-Zähler, Neutronen-Flugzeit-Spektrometer oder geladene Plastiksintillatoren (z.B. mit  $^6\text{Li}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{Gd}$ ). Aufgrund von Literaturstudien und Voruntersuchungen wurde ein Detektorkonzept ausgewählt und entwickelt, in dem die Vorteile eines Systems aus Plastiksintillatoren zum Nachweis der primären Neutronen-Energie mit dem hocheffizienten Einfang von thermischen Neutronen an  $\text{Gd}$  kombinieren werden können: einen modularen Aufbau aus Plastiksintillatoren, die jeweils von dünnen  $\text{Gd}$ -Folien umgeben sind. Das Messprinzip ist in Abb. 2 schematisch dargestellt. Ein energetisches Neutron streut bevorzugt an den freien Protonen des organischen Plastiksintillators, verliert seine Energie und wird letztendlich in der  $\text{Gd}$ -Folie eingefangen. Dabei werden Gamma-Quanten mit einer Gesamtenergie von ca. 8 MeV emittiert, die wiederum im Szintillator nachgewiesen werden. Ein Neutron-Signal besteht somit aus einer Sequenz eines prompten Rückstoß-Signals, das Information über die ursprüngliche Energie des Neutrons trägt, und eines verzögerten Signals, wenn das Neutron eingefangen wird. Die Signale werden dann durch Photomultiplier (PMTs) an jeweils einem Ende der Szintillatormodule ausgelesen. Diese Koinzidenz ermöglicht eine Unterdrückung des Gamma- Untergrunds, der etwa 6 Größenordnungen größer als der zu erwartende Neutronenfluss ist.

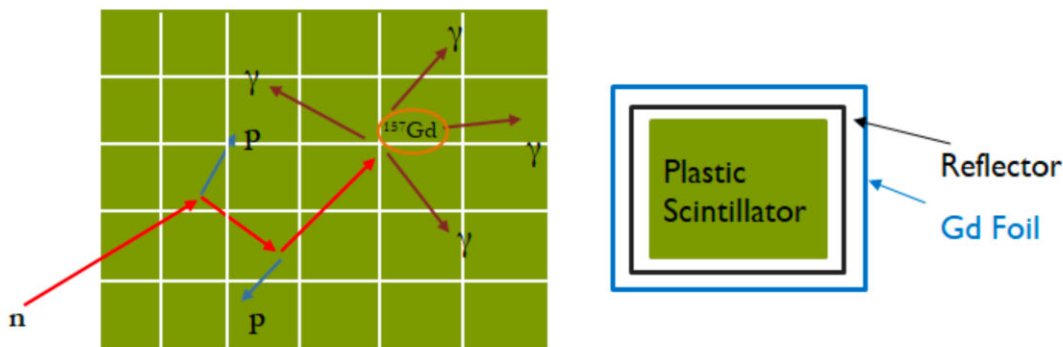


Abb. 2: Schematischer Neutronennachweis über die Streuung an Protonen und den Einfang an Gadolinium (links), jedes Einzelmodul ist von einem Reflektor und einer  $\text{Gd}$ -Folie umhüllt (rechts) und wird von einem Photomultiplier ausgelesen. Das Gesamtsystem besteht aus  $6 \times 6 = 36$  Szintillatormodulen.

Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau eines Einzelmoduls mit PMT und Reflektor- und  $\text{Gd}$ -Folie sowie das gesamte Szintillatorfeld aus  $6 \times 6$  Modulen mit abwechselnd angeordneten PMTs.

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

Aufgrund des Bescheids des Zuwendungsgebers vom 23.5.2022 über die Aufhebung der Kassensperre zur Beschaffung der Detektormaterialien konnten ab Juni 2022 die wesentlichen Komponenten wie Szintillatormodule, Photomultiplier (PMTs), Reflektorfolie und  $\text{Gd}$ -Folie bestellt werden. Für das Kleben mit optischem Zement der PMTs an die Szintillatormodule wurden am KIT spezielle Halterungen entworfen und gebaut, sodass nach der oben angegebenen Charakterisierung jedes PMTs direkt die Klebung und dann die Fertigstellung der einzelnen Module vorgenommen werden kann. Eine wesentliche Weiterentwicklung des Gesamtsystems gegenüber dem ursprünglichen Konzept bestand in der Ergänzung des Designs durch eine Blei-Abschirmung, die den Detektor hermetisch umgibt. Zweck dieser Abschirmung ist die signifikante Unterdrückung des Gamma-Untergrunds ohne wesentliche Beeinflussung der Neutronen-Messung.

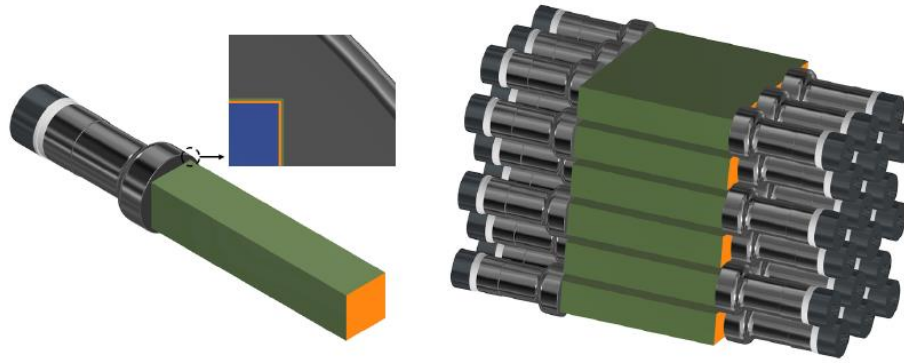


Abb. 3: Schematischer Aufbau des Detektors aus einzelnen Modulen (links), bestehend aus Plastikszintillator (blau), umgeben von Reflektor (orange) und Gd-Folie (grün) mit einem Photomultiplier an einer Stirnseite. Das Gesamtsystem besteht aus 6x6=36 Szintillatormodulen (rechts).

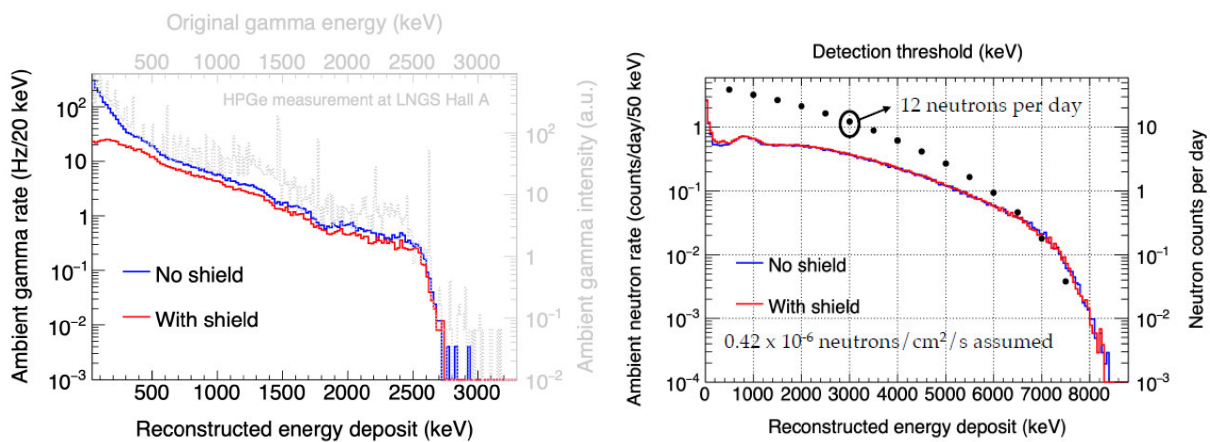


Abb. 4: links: simulierte Gamma-Spektren ohne (blau) und mit (rot) einer 4mm dicken Bleiabschirmung. Grau hinterlegt ist das im LNGS mit einem HPGe-Detektor vermessene Gamma-Spektrum, das für die Detektorantwort als Eingangsdaten verwendet wurde. Rechts: sichtbare simulierte Energieverteilungen der Neutronen ohne (blau) und mit (rot) der Bleiabschirmung sowie die erwartete Signalrate als Funktion der angelegten Analyseschwelle.

Abbildung 4 zeigt diesen Effekt am Beispiel einer 4mm dicken Bleiabschirmung. Insbesondere der niederenergetische Bereich des Gamma-Spektrums zwischen 50keV und 500keV kann unterdrückt werden (Abb. 4 links), was zu einer Gesamtreduktion des Gammaflusses um ca. 65% führt. Für die Nachweeffizienz der Neutronen hat diese Bleischicht kaum einen Effekt, wie in Abb. 2 rechts sichtbar ist. Mit einer Analyse-Schwelle von 3000keV werden ca. 12 Neutronensequenzen/Tag im Gesamtdetektor erwartet.

Zu Beginn des Jahres 2023 waren mit Ausnahme einiger Photomultiplier (PMTs) und deren Spannungsteiler alle Hardware-Teile des Detektorsystems geliefert, sodass notwendige Tests, Charakterisierungen der Einzelkomponenten wie auch deren Zusammenbau beginnen konnten. Abb. 5 (links) zeigt eines der 36 individuellen Szintillatormodule während des Aufbaus: der Szintillator ist mit Reflektor und Gd-Folie eingepackt und mit dem PMT mithilfe eines speziellen optischen Zements verklebt. An der Stirnseite ist noch der Reflektor zu sehen. Danach wurde jedes Modul nochmals mit Aluminiumfolie verpackt und auf Lichtdichtigkeit geprüft. Alle PMTs wurden in einer speziellen *black box* inklusive ihrer Spannungsteiler charakterisiert, d.h. es wurden sogenannte *single photo-electron* (SPE) Spektren aufgenommen. Ein Beispiel ist in Abb. 5 rechts gezeigt. Aus diesen SPE-Spektren konnten die individuellen gain-Kurven erstellt werden, sodass im Betrieb durch Einstellen der individuellen Hochspannungsvorsorgung für jeden PMT eine für alle Module gleiche Verstärkung von Szintillatorsignalen erreicht werden

kann. Nach erfolgreicher Charakterisierung der benötigten 36 PMTs und ihrer Spannungsteiler konnten in 2023 alle 36 Szintillatoren mit ihren PMTs verklebt, verpackt und dann individuell mit einer Cs-Quelle kalibriert werden.

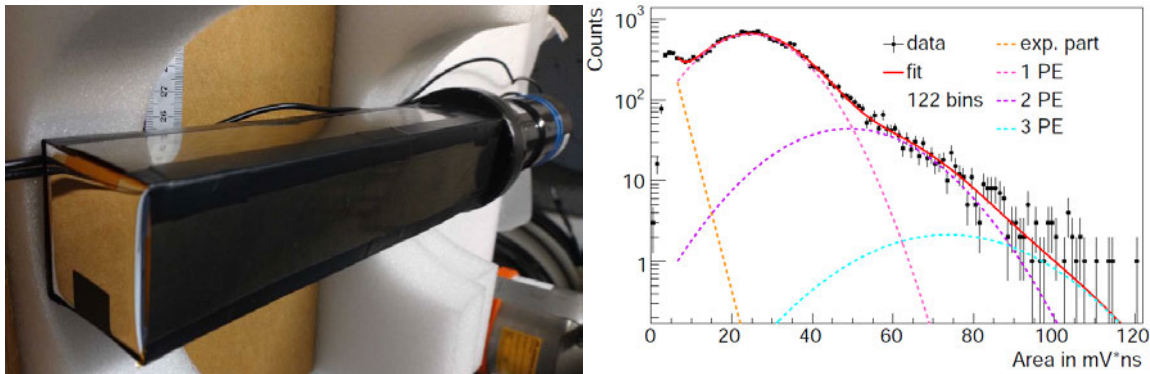


Abb. 5: Links: Realisiertes Einzel-Szintillatormodul mit angeklebtem PMT vor der lichtdichten Verpackung. Rechts: sogenanntes Single photo-electron Spektrum eines einzelnen PMTs, Datenpunkte mit Fit-Funktionen für 1, 2 und 3 Photoelektronen-Verteilungen. Aus der Position des 1-PE-Mittelwertes lässt sich die Verstärkung (gain) eines PMTs bei gegebener Hochspannungsversorgung ableiten.

Ein wesentlicher Teil des Gesamtprojekts bestand in der Entwicklung, dem Bau und dem Test der Datenaufnahme-Elektronik (DAQ). Dabei wurde zunächst das Konzept für die Steuerung, Auslese und Speicherung der Daten finalisiert, die Kommunikation mit und die Einbindung in die digitale LNGS-Infrastruktur in Absprache mit dem LNGS-Untergrundlabor festgelegt und die entsprechenden Hardwarekomponenten (u.a. PC, Festplatten, Switches) bestellt. Diese wurden in 2023 geliefert, getestet und in Betrieb genommen. Zentrales Element der DAQ ist ein Digitalisierungsboard mit 40 ADCs (16bit, 125MHz sampling-Rate) mit integrierter FPGA Logik zum Digitalisieren, Triggern und Verarbeiten einzelner Szintillatortpulse zu einem Ereignis, das dann an den Steuerungs-PC übergeben wird. Abbildung 6 zeigt das entwickelte Board in einer Test-Konfiguration sowie beispielhaft ein Ereignis mit den digitalisierten Amplituden sowie den Trigger-Zeitpunkten von 3 Einzelpulsen.

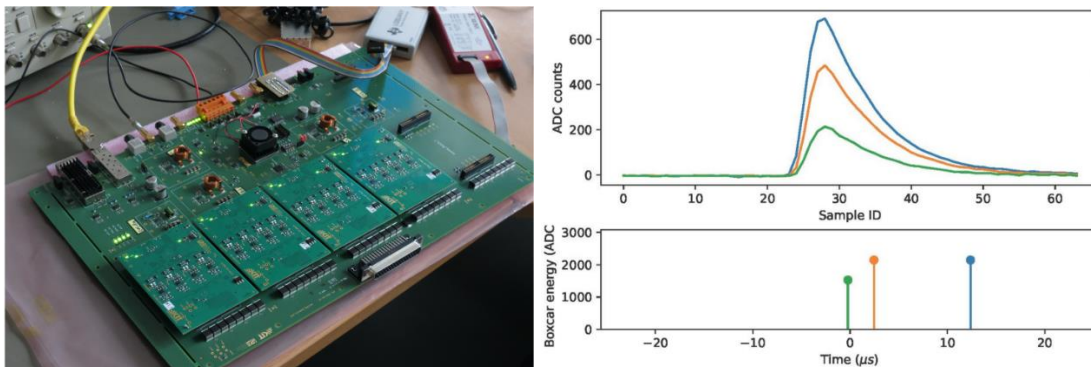


Abb. 6: Realisiertes Datenaufnahme-Board für maximal 40 Kanäle, hier in einer Testphase (5 ADC-boards mit je 8 16bit-ADCs und einer sampling Rate von 125MHz, in der Abb. sind 4 ADC boards bestückt). Rechts: Beispiel eines Ereignisses mit 3 Signal-Auslesen. Jede Signalspur wird mit einer Länge von 64 sampling-Punkten ausgelesen und ist hier zentriert dargestellt. Die zeitliche Verteilung der Signale innerhalb eines Ereignisses ist im unteren Bild dargestellt.

Neben der Kalibration der Detektormodule mit einer Cs-Quelle ist die korrekte Bestimmung der Rückstoßenergie durch einen Neutron-Proton-Stoß im Szintillator eine wesentliche Voraussetzung zur spektralen Vermessung des Neutronenflusses im LNGS. Um die Neutronen-Antwort des Szintillators zu

vermessen, wurde am KIT eine *time-of-flight* Kalibration mithilfe einer AmBe Neutronenquelle und einem hocheffizientem Gamma-Detektor (BGO Kristall) durchgeführt. Dabei wird das koinzident mit dem Neutron emittierte Gamma-Quant im BGO-Detektor nachgewiesen, während das Neutron eine Flugstrecke von 2 Metern im Labor zurücklegt und je nach seiner kinetischen Energie verzögert in einem Szintillatormodul nachgewiesen wird (Abb. 7 links). Die im mit Elektronen/Gamma-Signalen kalibrierten Szintillator nachgewiesene Energie (in  $\text{MeV}_{ee}$ , x-Achse Abb. 7 rechts) kann dann gegen die aus der Flugzeit bestimmte kinetische Energie des Neutrons (TOF Energy, y-Achse) aufgetragen werden, woraus sich der Quenching-Faktor für Kernrückstoßsignale bestimmen lässt. Abbildung 7 zeigt die mit dem neuen Aufbau und Szintillator aufgenommenen Messdaten (ALMOND, rot) im Vergleich mit früheren Messungen (FaNS mit einer  $^{252}\text{Cf}$ -Quelle) und einer phänomenologischen Erwartung (*Birks Parametrization*). Die hervorragende Übereinstimmung ist ein erstes Qualitätskriterium und erlaubt eine Transformation von Energie-Einträgen von Neutron-Rückstößen auf die deponierte Energie von Elektron-Rückstößen.

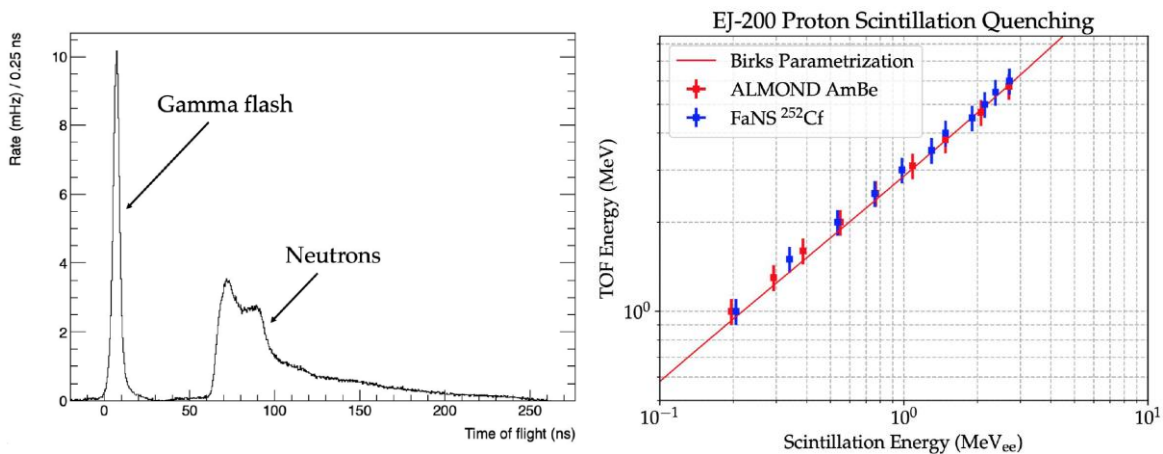


Abb. 7: Ergebnisse einer *time-of-flight* Messung von Neutron-Rückstößen in den Szintillatormodulen des Neutronendetektors (ALMOND: **A**n **L**NGS **M**obile **N**eutron **D**etector), links: Flugzeitverteilung von Neutronen relativ zum prompten Gamma-Signal, rechts: Extraktion des Proton-Szintillations-Quenching-Faktors *Scintillation Energy/TOF Energy*.

Als mobiler Neutronen-Spektrometer für den Einsatz im Untergrundlabor LNGS benötigt das Gesamtsystem ALMOND eine stabile mechanische Behausung, an der auch die Bleiabschirmung gegen die Gamma-Umgebungsstrahlung im LNGS befestigt werden kann. Abbildung 10(links) zeigt den am KIT mit Bosch-Profilen realisierten Aufbau der mechanischen Halterung inklusive des Detektorfeldes aus 6x6 Szintillatormodulen mit ihren jeweiligen PMTs. Die auf der Basis umfangreicher Simulationen optimierte und dann entworfene Bleiabschirmung aus 9 jeweils 16mm dicken Bleiplatten, eingefasst in 2 Aluminium-Platten von jeweils 2mm Dicke und mit entsprechenden Durchführungen zur Befestigung wie auch für die Signal- und Spannungsversorgungs-Kabel versehen, wurde in 2023 gefertigt und im final am LNGS um den aktiven Detektorbereich montiert (Abb. 10 rechts). In Abbildung 9(links) ist lediglich die Blei-Bodenplatte als tragendes Element montiert.

Nach umfangreichen Funktionstests des Gesamtsystems aus individuellen Szintillatormodulen und der Ausleselektronik wurden zwei Kalibrationskampagnen zum Neutronennachweis durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde ALMOND am KIT mithilfe einer AmBe-Neutronenquelle kalibriert. Bei der Einfangreaktion  $^9\text{Be} + \alpha \rightarrow ^{13}\text{C}^* \rightarrow ^{12}\text{C} + n + \gamma$  der Alpha-Teilchen aus dem Am- $\alpha$ -Zerfall entstehen energetische Neutronen in Koinzidenz mit einem Gamma-Teilchen mit  $E_\gamma=4.4\text{MeV}$ , das mit einem BGO-Detektor nachgewiesen werden kann (siehe Abb. 7). Als Kalibrationsereignisse wurden somit verzögerte Koinzidenzen aus BGO-Gammasignal, Neutron-Rückstoß und Neutronen-Einfang in ALMOND verwendet. Ein Beispiel einer solchen Sequenz ist in Abb. 8 gezeigt.

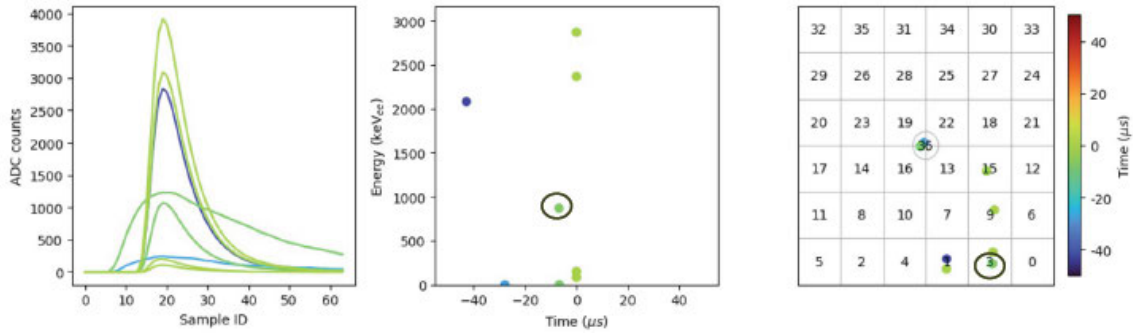


Abb. 8: Individuelle Signale einer Sequenz, die als Event in ALMOND registriert wurde. Links Pulsformen aus 64 digitalisierten Amplitudenpunkten in jeweils 16ns Abstand, in der Mitte jeweilige Energie und zeitliche Verteilung (Zeitnullpunkt ist der Trigger für die Eventauslese und entspricht dem Neutronen-Einfang), rechts räumliche Verteilung der Signale in den 36 Modulen (Nr. 0 bis 35; Modul 36 ist hier graphisch das in die Elektronik integrierte Signal des BGO-Detektors).

Ca. 35ns vor dem Neutronen-Rückstoß (umkreistes Signal) registriert der BGO ein Gamma-Signal (Modul 36 rechts). Diese Zeitdifferenz entspricht der Flugzeit des Neutrons von der Quelle zum ALMOND-Detektor. Nach 7μs folgt das aus mehreren Gamma-Signalen bestehende Neutron-Einfangsignal, das die gesamte Sequenz in der Datenaufnahme triggert.

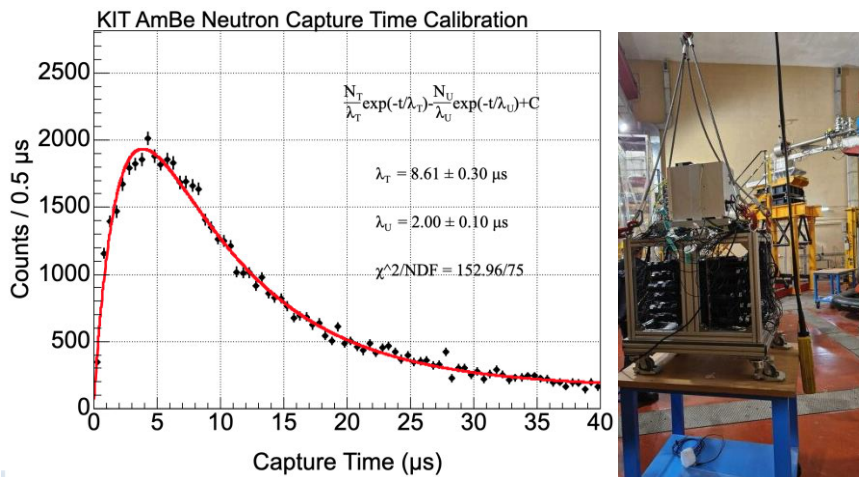


Abb. 9: Links: Zeitdifferenz zwischen dem prompten Neutron-Rückstoß und dem Neutronen-Einfang-Ereignis aus der Kalibration am KIT mit einer AmBe-Neutronenquelle. Rechts: Blick in die Experimentierhalle des FNG in Frascati mit dem Aufbau für die Kalibration: im Vordergrund ALMOND, im Hintergrund in ca. 7m Abstand die Neutronenquelle.

Abbildung 9 zeigt die Verteilung der Differenzzeiten zwischen dem prompten Rückstoß- und dem Einfang-Signal einer Neutron-Sequenz. Wie erwartet zeigt sich ein exponentielles Verhalten mit einer Abklingkonstante von 8.6μs. Der Anstieg bei sehr kurzen Differenzzeiten ist auf die Moderation des energetischen Neutrons zurückzuführen. Im Herbst 2024 konnte somit die vorläufige Kalibration von ALMOND am KIT erfolgreich abgeschlossen werden.

Nach Vorgesprächen bezüglich möglicher Neutronenquellen und der technischen Realisierung konnte im November 2024 das Gesamtsystem schließlich am Neutronengenerator der ENEA (Department of Fusion and Technology for Nuclear Safety and Security) in Frascati, Italien, mit verschiedenen Neutronen-Quellen kalibriert werden (siehe Abb. 9 rechts). Dabei wurden Testreihen mit einer DD-Neutronenquelle aufgenommen, bei denen der Neutronengenerator monoenergetische Neutronen von  $E_n=2.4\text{MeV}$  emittiert. Außerdem wurden Messungen mit einer AmB-Quelle (ähnlich der AmBe-Quelle

am KIT) in verschiedenen Abständen zum Neutronendetektor durchgeführt und Untergrundmessungen ohne jede Neutronenquelle aufgenommen. Die detaillierte Auswertung der Daten findet momentan im Rahmen einer Doktor- und einer Master-Arbeit statt.

Im direkten Anschluss an die Kalibrationsmessungen in Frascati wurde ALMOND an das LNGS gebracht und für die Messungen im Untergrundlabor vorbereitet. Nach Sicherstellung der vollen Funktionsfähigkeit nach dem Transport, nach finaler Montage der Bleiabschirmungen und der erfolgten Autorisierung durch das Direktorium des LNGS konnte ALMOND im Januar 2025 in das LNGS eingebracht werden und mit ersten Messungen beginnen.

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

Die Verwendung der Zuwendung erfolgte ausschließlich zum Zwecke des Projekts, die Gesamtausgaben ohne Projektpauschale blieben mit €370.654,92 leicht unterhalb der Summe laut Finanzierungsplan von €387.299,36. [REDACTED]

Investitionen und Sachmittel [REDACTED] wurden für die Beschaffung von Detektorkomponenten und den Aufbau des Gesamtsystems verwendet, darunter insbesondere für Photomultiplier mit niedriger intrinsischer Radioaktivität und passendem Hochspannungsteiler ([REDACTED]), für eine Ergänzung einer bereits bestehenden Hochspannungsversorgung ([REDACTED]), für die Gadolinium-Folie ([REDACTED]) und die Reflektorfolie ([REDACTED]) um die Szintillatormodule ([REDACTED]). Das Datenaufnahmesystem wie auch die mechanische Rahmenkonstruktion mit den Bleiabschirmungen wurde als Eigenbeitrag beigesteuert.

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

Ziel des Teilprojekts 2 innerhalb des geförderten Projekts „LNGS-Upgrade: Entwicklung mobiler Neutronen-Detektoren und einer Neutronen-Veto-Technologie mit Gd-beladenem Wasser“ war die Entwicklung eines mobilen Neutronen-Detektors. Dieses Ziel wurde uneingeschränkt erreicht. Mit Ende der Projektlaufzeit konnte der Neutronendetektor ALMOND an das LNGS gebracht werden und im Januar 2025 mit ersten Messungen im Untergrundlabor beginnen.

Abbildung 10 zeigt im rechten Bild eine erste Messposition zur Bestimmung des Neutronenflusses in der Halle A des LNGS. Zuvor wurde eine Messreihe mit speziellen Triggerbedingungen zur Vermessung des Gamma-Untergrunds aufgenommen. Diese Messung dient einerseits der Überprüfung bereits gemessener Gammaflüsse. Vorläufige Resultate zeigen einen Gammafluss von  $0.73 \text{ g/cm}^2/\text{s}$  in sehr guter Übereinstimmung mit früheren Messungen (Bucci et al. Eur.Phys.J. A41, 155(2009); Bellini et al., Astropart.Phys. 33(2010)169). Andererseits kann aus diesen Messungen der zu erwartende Untergrund an zufälligen Gamma-Koinzidenzen zu ca. 2 Ereignissen/Tag bestimmt werden. Mit einer erwarteten Neutronen-Koinzidenz-Rate von  $\sim 12/\text{Tag}$  für einen Neutronenfluss von  $10^{-6} \text{ n/cm}^2/\text{s}$  und einer deutlich unterschiedlichen Zeitstruktur zwischen promptem und verzögertem Signal ist ein Signal-zu-Untergrund-Verhältnis von deutlich besser als 6 erreichbar.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts nimmt ALMOND kontinuierlich Daten zur spektralen Vermessung des Neutronenflusses in LNGS, zunächst in der Halle A des Untergrundlabors. Im Rahmen bereits laufender Abschlussarbeiten wie auch geplanter wissenschaftlicher Arbeiten werden diese Daten in den nächsten Monaten analysiert mit dem Ziel der Publikation der Resultate in wissenschaftlichen Fachzeitschriften.



Abb. 10: links: Am KIT realisierter Aufbau des Detektors aus 36 Plastiksintillatormodulen, die abwechselnd von Photomultipliern (mit Seriennummern der PMTs und der zugehörigen Spannungsteiler) links und rechts der Module ausgelesen werden. Die Module samt PMTs befinden sich in einem mobilen Rahmen aus Bosch-Profilen. Im Bild sind die Seitenwände noch offen, die im LNGS (Abb. rechts) mit Blei-Platten eine Abschirmung gegen Gamma-Untergrund bilden. Rechts: Messposition (im Bild links vorne) im LNGS in der Nähe des CUPID-Experiments zur Suche nach Dunkler Materie. Detektorsystem mit PMT-Spannungsversorgung und der Datenaufnahme-Elektronik auf der Deckplatte der Szintillatormodule.

## 6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Planung, Bau, Kalibration und Installation des Neutronendetektorsystems ALMOND erforderten signifikante finanzielle Beiträge in Form von Personal- und Sachmitteln. Die eingesetzten Mittel wurden effizient und zielgerichtet verwendet. Mit diesem Projekt konnte die Infrastruktur des Untergrundlabors LNGS um eine bisher fehlende Komponente erweitert werden. Ohne die finanzielle Unterstützung durch den Zuwendungsgeber wäre dieser Beitrag nicht möglich gewesen.

## 7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Mit Abschluss des Projekts konnte wie geplant der Neutronendetektor ALMOND dem LNGS übergeben werden. Das Nachweissystem steht dem Untergrundlabor als deutscher Beitrag zur Labor-Infrastruktur zur Verfügung. Damit können Langzeitmessungen des Neutronenflusses an verschiedenen Orten des Labors durchgeführt werden. Dieser Neutronenfluss ist für viele Experimente im LNGS eine kritische Komponente des Untergrunds und somit für die wissenschaftlichen Ergebnisse dieser Experimente von Relevanz.

Die Verwertung dieser Infrastruktur für die teilchen- und astroteilchenphysikalische Grundlagenforschung erfolgt über Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und die entsprechende Referenz auf die Neutronenflussmessungen.

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

Die spektrale Vermessung von Neutronenflüssen ist in vielen Bereichen der Grundlagenforschung von hoher Relevanz. Kürzlich hat das High Efficiency Neutron Spectrometry Array (HENSA) Ergebnisse von Langzeitmessungen des Neutronenflusses im Untergrundlabor LSC Canfranc in Spanien veröffentlicht (S. Orrigo et al., EPJ C 82(2022) 814). Außerdem hat HENSA auch Messungen im Untergrundlabor LNGS durchgeführt, über die in einem Vortrag am LNGS im September 2024 berichtet wurde. HENSA vermisst den Neutronenfluss in 3 Bereichen, thermisch ( $0 < E < 3.2 \times 10^{-7}$  MeV), bei mittleren Energien ( $3.2 \times 10^{-7} < E < 0.1$  MeV) und für energetische Neutronen ( $0.1 < E < 20$  MeV). In letzterem Energieintervall

wurde in einer vorläufigen Analyse ein Neutronenfluss von  $2.6 \times 10^{-6}$  n/cm<sup>2</sup>/s gemessen. Während HENSA also insbesondere den thermischen und epithermischen Neutronenfluss bestimmen will, ist das Ziel von ALMOND der Energiebereich oberhalb 1 MeV. ALMOND wird in diesem Bereich mit signifikant besserer Auflösung und ohne komplizierte Entfaltung der aufgenommenen Daten den Neutronenfluss in LNGS vermessen.

Im Oktober 2024 wurde auf der Konferenz Low Radioactivity Techniques (LRT) ein weiteres Konzept zur Vermessung des Neutronenflusses am LNGS vorgestellt. Es handelt sich dabei um ein System aus 10 Detektoren aus Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub>-Kristallen, die mit verschiedenen Moderatoren (Bonner spheres) umgeben werden. Dieses Konzept unterscheidet sich wesentlich durch das hier realisierte, da die kinetische Energie der Neutronen über die verschiedenen Raten je nach Moderatordicke rekonstruiert werden muss und nicht wie in ALMOND direkt gemessen wird. Erste vorläufige Messungen mit einem Prototyp-Kristall wurden durchgeführt, das Gesamtsystem, insbesondere die Kristalle mit der notwendigen Reinheit müssen aber erst noch hergestellt und validiert werden.

## 9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

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

- Design of a mobile neutron spectrometer for the Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS), M. Solmaz et al., [JINST 18 P10022](#)

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

- M. Solmaz et al., ALMOND: An LNGS Mobile Neutron Detector, Parallelvortrag, Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Sektion Materie und Kosmos, 31.3.-4.4.2025, Göttingen
- F. Kratzmeier et al., Commissioning of ALMOND, a mobile neutron detector for LNGS, Parallelvortrag, Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Sektion Materie und Kosmos, 31.3.-4.4.2025, Göttingen
- M. Solmaz et al., ALMOND: An LNGS Mobile Neutron Detector, Poster, Tagung Astroparticle Physics in Germany – Long-Term Strategy 2024, 16.-18.10.2024, Karlsruhe
- F. Pompa, Towards the complete calibration of the LNGS mobile neutron spectrometer, Parallelvortrag, Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Sektion Materie und Kosmos, 4.-8.3.2024, Karlsruhe
- M. Solmaz et al., A mobile neutron spectrometer for the LNGS underground laboratory, Parallelvortrag, Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Sektion Materie und Kosmos, 20.-24.3.2023, Dresden
- M. Solmaz, A mobile neutron spectrometer for the LNGS underground laboratory, Poster, 14<sup>th</sup> UCLA Symposium on Dark Matter, 29.3.-1.4.2023, Los Angeles, USA

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

- [REDACTED] Promotion U L´Aquila und KIT, in Bearbeitung
- F. Kratzmeier: Commissioning and calibration of a mobile neutron spectrometer for LNGS, Masterarbeit, KIT, in Bearbeitung
- U. Pirling: Setup and Test Measurements of the Data Acquisition and Software for a Mobile Neutron Detector, Masterarbeit, KIT, November 2023
- F. Buchleither: Characterisation of Modules of a Mobile Neutron Detector for the LNGS, Bachelorarbeit, KIT, Oktober 2023

- M. Martini: PMT Gain Calibrations for the LNGS Neutron Detector, Bachelorarbeit, KIT, Juli 2023
- M. Müller: Untersuchung der Lichtausbeute in Szintillationsmodulen für einen Neutronendetektor im LNGS, Bachelorarbeit, KIT, Juni 2022
- F. Kratzmeier: Simulation of Neutron and Gamma Signatures in a Mobile Neutron Detector, Bachelorarbeit, KIT, Mai 2022