

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Verbund: 05A2020 - ICECUBE

Zuwendungsempfänger: Universität Münster
Projektleitung: Prof. Dr. Alexander Kappes
E-Mail: alexander.kappes@uni-muenster.de
Förderkennzeichen: 05A20PM2
Förderzeitraum: 01.07.2020 - 31.12.2023
Zuwendung: 546.154,24 €
Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt:
Zusätzlicher Name:

Genutzte Großgeräte:	Labor Universum	Gerät IceCube	Experiment
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	3		
Habilitationen:	0		
Referierte Publikationen:	80		
Andere Veröffentlichungen:	8		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	6		
Masterarbeiten:	4		
Staatsexamen:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 26.06.2024 16:46 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Abschlussbericht 2020 – 2023

Verbundprojekt 05A2020 - ICECUBE

1. Juli 2024

Astroteilchenphysik mit dem IceCube Neutrinoobservatorium

Zuwendungsempfänger: Bergische Universität Wuppertal FAU Erlangen-Nürnberg Humboldt-Universität zu Berlin Johannes Gutenberg-Universität Mainz Karlsruher Institut für Technologie Ruhr-Universität Bochum* RWTH Aachen Technische Universität München Technische Universität Dortmund Universität Münster	Förderkennzeichen: 05A20PX2 05A20WE2 05A20KH2 05A20UM2 05A20VK2 05A20PC2 05A20PA1 05A20WO5 05A20PEA 05A20PM2
Vorhabenbezeichnung: Astroteilchenphysik mit dem IceCube-Observatorium	
Laufzeit des Vorhabens: von 01.07.2020 bis 31.12.2023	
Berichtszeitraum: von 01.07.2020 bis 31.12.2023	

*Das Teilprojekt in Bochum wurde wegen Elternzeit der PI bis 06/2024 verlängert.

Diesbezüglich ist der Bericht vorläufig.

1 Zusammenfassung

Wissenschaftliche Highlights im Berichtszeitraum waren der Nachweis eines hochenergetischen Teilchenschauers in IceCube konsistent mit der Entstehung an der sog. Glashow-Resonanz sowie die Identifikation von NGC 1068 als zweite hochenergetische astrophysikalische Neutrinoquelle. Letztere ist die erste hochenergetische kosmische Neutrinoquelle, die alleine in Neutrinos identifiziert werden konnte. Im Rahmen des Projekts wurden wesentliche Fortschritte in der Entwicklung von Trigger- und Filter-Algorithmen erzielt. Diese Entwicklungen sind entscheidend, da sie Signaturen erkennen können, die bisher nicht erfasst wurden. Zudem haben die deutschen Universitäten in enger Zusammenarbeit mit DESY und KIT maßgeblich zur Entwicklung und Produktion optischer Sensoren sowie weiterer Schlüsselkomponenten beigetragen. Die Arbeiten unterstützen sowohl das geplante IceCube-Upgrade als auch zukünftige Erweiterungen. Die erzielten Ergebnisse wurden in zahlreichen wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht und haben bereits in ande-

ren Forschungsbereichen, wie der Informatik und Sensortechnologie, Anwendung gefunden. Trotz Herausforderungen durch die COVID-19-Pandemie konnten alle geplanten Ziele erreicht werden.

2 Bericht

2.1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das IceCube Neutrino-Observatorium beobachtet den Kosmos aus dem tiefen Eis des Südpols. In einem Kubikkilometer Eis weist IceCube nahezu masselose Neutrinos nach. Diese hochenergetischen Boten liefern Informationen über die energiereichsten astrophysikalischen Quellen wie explodierende Sterne, Gammastrahlenausbrüche sowie Phänomene mit Schwarzen Löchern und Neutronensternen.

Adressiert werden auch grundlegenden Fragen der Physik wie die Natur dunkler Materie und die Eigenschaften von Neutrinos. Die hohe Anzahl nachweisbarer Neutrino-Wechselwirkungen ermöglicht führende Beiträge auf diesen Gebieten. Das antarktische Neutrino-Observatorium, einschließlich IceTop auf der Oberfläche und DeepCore als dichtes Infill-Array, dient als vielseitiges Experiment mit dem auch die Eigenschaften der geladenen kosmischen Strahlung untersucht werden und sehr schwere Urknall-Relikte erforscht werden.

Die IceCube-Kollaboration besteht aus rund 300 Physikern aus 53 Institutionen in 12 Ländern. Dieses internationale Team leitet das wissenschaftliche Programm und viele seiner Mitglieder haben beim Design und Bau des Detektors mitgewirkt. Die Forschung der Kollaboration eröffnet ein neues Fenster zur Erforschung des Universums. Die Finanzierung des IceCube-Neutrino-Observatoriums in den USA erfolgt durch die National Science Foundation (NSF), mit bedeutender Unterstützung von Partnerorganisationen weltweit. Deutschland hat als zweitgrößter Partner einen sichtbaren und signifikanten Beitrag zu dem IceCube Neutrino Observatorium, wobei die Unterstützung des BMBF dabei eine Schlüsselrolle spielt.

2.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

IceCube ist ein hochmodernes Neutrino-Observatorium, das den Stand der Technik in der Astroteilchenphysik repräsentiert. Es besteht aus einem dreidimensionalen Gitter von mehr als 5.000 extrem lichtempfindlichen Sensoren, die in das Eis des Südpols eingebettet sind und ein Volumen von einem Kubikkilometer einschließen. Diese Sensoren erlauben die Detektion der extrem seltenen Wechselwirkungen von Neutrinos mit Materie und ermöglichen es den Forschern, Informationen über hochenergetische astrophysikalische Ereignisse und Prozesse zu sammeln. IceCube ist weltweit führend in der Erforschung von Neutrinos und hat bereits wichtige Erkenntnisse über die Natur dieser Teilchen und über die Quellen von Hochenergie-Neutrinos im Universum geliefert.

Die Sensoren von IceCube sind äußerst zuverlässig, und die Datenerfassung läuft mit einer Betriebsbereitschaft von über 99,8% rund um die Uhr. Es wurden verschiedene Trigger eingerichtet, um nach neuen Teilchen und Wechselwirkungen zu suchen. Fortschrittliche Rekonstruktionsverfahren und eine solide Detektorsystematik sind implementiert.

2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

In den letzten Jahren wurden beim IceCube-Experiment bedeutende Fortschritte erzielt. Neue Analysen und Forschungsergebnisse haben unser Verständnis von Neutrinos und hochenergetischen astrophysikalischen Ereignissen vertieft. Zum Beispiel wurden wichtige Entdeckungen über die Herkunft und Natur von Hochenergie-Neutrinos gemacht, die aus entfernten astrophysikalischen Quellen stammen könnten. Die Detektortechnologie wurde weiter verbessert, um die Empfindlichkeit des Experiments zu erhöhen und bisher unentdeckte Phänomene im Universum zu untersuchen. Die Zusammenarbeit innerhalb der IceCube-Kollaboration wurde gestärkt, wodurch die Effizienz der Datenerfassung und Analyse verbessert wurde. Außerdem wurden neue Forschungsrichtungen und Experimente innerhalb des IceCube-Programms initiiert, um verschiedene Aspekte der Astroteilchenphysik zu erforschen. Insgesamt hat IceCube in den letzten Jahren seine Position als eines der führenden Experimente in der Astroteilchenphysik weiter ausgebaut und wichtige Beiträge zum Verständnis des Universums geleistet. Die Kooperation mit anderen Experimenten wurde durch gegenseitige Memoranden verstärkt, was umfangreiche Multimessenger-Analysen ermöglicht hat. Die Arbeiten zur Niederenergieerweiterung IceCube Upgrade, deren Installation für die Saison 2025/26 geplant ist, sind im Zeitplan. Alle definierten Ziele wurden erfolgreich erreicht.

2.4 Verwendung der Zuwendung

Die bereitgestellten Finanzmittel für Personal und Investitionen sind bei den beteiligten Universitäten in vollem Umfang entsprechend der Bewilligung verwendet worden. Wegen der Corona-Pandemie und der folgenden Lieferkettenprobleme wurde der Arbeitsplan um ein halbes Jahr verlängert. Die wichtigsten Posten der Investitionen waren Sensoren zur Einbringung ins Eis, Oberflächendetektoren und Kalibrationsinstrumente. Die weiteren Details sind in den zahlenmäßigen Nachweisen der einzelnen Verbundpartner erfasst.

2.5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

2.5.1 Bergische Universität Wuppertal

Triggerentwicklung und Methoden zur Suche nach neuen Teilchen: Die Suche nach Teilchen und Effekten, die das Standardmodell erweitern, ist ein wichtiges Ziel des IceCube Experiments. Einige dieser Teilchen hinterlassen so lichtschwache Signaturen, dass sie mit den derzeitigen Software-Triggern von IceCube nicht erfasst werden, da sie für eine geringere Rechenleistung entwickelt wurden.

Die Entwicklung eines Triggers für subrelativistische magnetische Monopole, der im Gegensatz zu bisherigen IceCube-Triggern auch isolierte Einzelhits mit einbezieht, wurde fortgesetzt und ein erster Entwurf erarbeitet. Ein vom Detektor aufgezeichnetes Event, das bis zu mehreren Millisekunden lang sein kann, wird in $500 \mu\text{s}$ Zeitfenster geteilt und diese einzeln ausgewertet, um Rechenzeit zu reduzieren. Hierbei werden Hitpaare und Kombinationen von drei Hits auf ihre räumliche und zeitliche Konsistenz mit der Signalsignatur überprüft. Die Effizienz der Trigger konnte deutlich verbessert werden, die Rechenzeit muss allerdings noch weiter optimiert werden.

Die entwickelten Algorithmen wurden auch getestet, um einen Trigger für sogenannte Fractionally Charged Particles zu entwickeln. Diese tragen nur einen Anteil der Elementarladung. Um diese Teilchen von Muonen und Detektorrauschen zu unterscheiden, wurden Variablen konstruiert, wie

die Geschwindigkeitskonsistenz und der Anteil produzierter Einzelhits im Vergleich zu räumlich und zeitlich korrelierten Hitpaaren. Der sliding time window basierte Faint Particle Trigger (FPT) wird auf die IceCube DeepCore Hits angewandt. In einem Zeitfenster von 2,5 μ s werden vier Variablen berechnet, wobei das Detektorrauschen durch die Konsistenz von Geschwindigkeit und Richtung der Signalhits reduziert wird. Zusätzlich erfolgt im letzten Schritt eine Reduktion der atmosphärischen Myonen, die dominant korrelierte Hitpaare im IceCube erzeugen. Ein erster Testlauf mit dem FPT wurde 2023 durchgeführt. Die Trigger Rate und Verteilungen der Variablen der aufgenommenen Daten sind konsistent mit den Daten von Tests am SPTS (South Pole Test System). Daher konnte der neue Trigger mittlerweile dauerhaft implementiert werden. Eine Verdopplung der IceCube-Standardtriggereffizienz für diese Teilchen konnte erreicht werden.

Graph-Neuronale Netzwerke (GNNs) wurden erfolgreich als Methode der Ereignis-Klassifikation im IceCube-Experiment angewendet, insbesondere für die Identifikation von Neutrino-Ereignissen mit geringer Energie. Ein Graph wird aus den optischen Modulen erstellt, die in einem Ereignis getroffen wurden, wobei die geometrische Position der optischen Module als Grundlage für die Konstruktion des Graphen und die beobachtete Ladung, Zeit usw. des Ereignisses sowie die Position, Quanteneffizienz usw. des optischen Moduls als Knotenmerkmale verwendet werden. Diese werden dann von einem künstlichen neuronalen Netzwerk mit spezialisierter Architektur klassifiziert. Die Anwendung von Graph-Neuronalen Netzwerken auf die Suche nach fractionally charged particles wurde innerhalb des Berichtszeitraums begonnen.

In einer weiteren Arbeit wurden die Signaturen von Fractionally Charged Particles in der avisierten Hochenergie-Erweiterung IceCube-Gen2 simuliert. Trotz des großen Abstandes zwischen den Detektormodulen und dem lichtschwachen Signal können die Spuren der Teilchen detektiert werden. Bei Verwendung von WOMs anstatt der klassischen Module können die Teilchenspuren bis zu 30% häufiger und qualitativ besser detektiert werden.

Lumineszenz: Lumineszenz wird von Molekülen erzeugt, die ihre Anregungsenergie durch Emission von Photonen abgeben. Bisher wurde diese Form der Lichterzeugung bei der Kalibration von Neutrino-Teleskopen nicht berücksichtigt. Des Weiteren ermöglicht Lumineszenz den Nachweis exotischer Teilchen mit niedriger Geschwindigkeit wie langsame magnetische Monopole und Q-balls. Aus diesem Grund wurden die verschiedenen Merkmale der Lumineszenz im Wuppertaler Labor gemessen: die Lichtausbeute, das Emissionsspektrum und die Abklingzeit, abhängig von der Temperatur im Bereich von -45°C bis $+25^{\circ}\text{C}$ bei Bestrahlung mit Alpha- und Beta-Strahlung. Sowohl das Emissionsspektrum als auch die Abklingzeiten werden durch molekulare Übergänge bei der Photonemission geprägt. Darüber hinaus ermöglicht das Spektrum eine Unterscheidung zwischen Lumineszenz- und Cherenkov-Licht. Durch die Kombination beider Eigenschaften können die Übergänge bestimmt werden, die im Eis bei der Emission der Photonen auftreten. Diese Messungen stellen die weltweit ersten Messungen von Lumineszenz bei Temperaturen zwischen 0°C und -45°C dar.

Um das Eis am Südpol zu vermessen, wurde eine Sonde für das SPICEcore-Bohrloch am Südpol in direkter Nähe zu IceCube entwickelt. Lichtausbeute, Zerfallszeit und Spektrum wurden detailliert gemessen. Die Ergebnisse wurden in die Lichtsimulation von IceCube integriert und fließen nun in die IceCube-Simulationen ein. Die Ergebnisse zeigen, dass Lumineszenz als Nachweiskanal für exotische Teilchen im IceCube verwendet werden kann.

Suche nach magnetischen Monopolen mit Lumineszenz Die Existenz magnetischer Monopole könnte fundamentale Fragen des Standardmodells der Teilchenphysik und der Kosmologie lösen. Bisherige Suchen nach magnetischen Monopolen waren auf Geschwindigkeiten oberhalb von

0,5 c (Lichtgeschwindigkeit im Vakuum) beschränkt. Durch die Verwendung von Lumineszenzlicht wurde nun der Geschwindigkeitsbereich zwischen 0,1 c und 0,5 c zugänglich gemacht. Die finale Datenselektion wurde auf sieben Jahre IceCube-Daten angewendet, was zur Identifizierung von zwei Signaturen führte. Dies steht im Einklang mit der erwarteten Anzahl von Hintergrundereignissen. Schließlich wurde eine neue weltbeste Ausschlussgrenze ermittelt, die die bisherigen Experimente um fast zwei Größenordnungen übertrifft. Dadurch wird eine Lücke im großen Parameterraum für Monopole zwischen den bisherigen Ergebnissen von Neutrino-Teleskopen geschlossen.

Detektorentwicklung: Der mDOM Harness – das externe Haltesystem, um den Basis-Sensor des IceCube Upgrades im Eis-Bohrloch am Seil zu halten – wurde entwickelt. Zudem schützt die Haltestruktur den mDOM vor verschiedenen äußeren Einflüssen beim Einbringen in das Eis. Insbesondere wurde bei der Haltestruktur auf eine geringe Abschattung der Sensoren geachtet, damit das außerordentliche Detektionspotential dieser Module voll ausgenutzt werden kann. Es wurden drei verschiedene alternative Haltestrukturen konzipiert, sowie gebaut und umfassend getestet. Hierfür wurden verschiedene mechanische Teststände verwendet bzw. neu konzipiert (Materialtests, Drucktest, Belastung bis 4,25 T etc.). Das Zusammenspiel mit angrenzenden Bauteilen, wie dem Penetrator zum elektrischen Anschluss des Moduls, wurde ausgiebig getestet. Ein Stand für die Produktion des mDOM Harness in Wuppertal wurde entwickelt und gebaut. Der Herstellungsprozess und der Zusammenbau wurden standardisiert, um eine verlässliche Qualität zu gewährleisten. Die Produktion des mDOM Harness in Wuppertal wurde mit Hilfskräften durchgeführt. Für die Investitionen wurden eigene Mittel verwendet.

Das Wavelength Shifting Optical Module (WOM) ist eine Weiterentwicklung der IceCube-Module. In diesem Design skaliert die photo-sensitive Fläche mit der Länge eines Lichtwellenleiters statt mit der PMT Kathodenfläche. Zudem wird mit Hilfe eines Wellenlängenschiebers ein größerer Teil des Cherenkov-Spektrums detektiert. Zwölf WOMs werden für das IceCube Upgrade in Zusammenarbeit mit der U. Mainz entwickelt. Die externe Haltemechanik und Elektronik wurden in Wuppertal entwickelt und in Prototypen getestet. Durch platzsparende Unterbringung von Elektronik und optimierte externe Aufhängung können ca. 60% der Moduloberfläche als sensitive Fläche genutzt werden. Aufgrund des hohen Drucks im tiefen Eis muss das Modul in einem Druckgefäß untergebracht werden, das UV transparent und radioaktiv rein ist. Gläser verschiedener Firmen wurden auf diese Aspekte hin im Wuppertaler Dunkellabor untersucht. In Wuppertal wurden Messungen zur Quantenausbeute der PMTs des WOMs durchgeführt, sowie Dunkelratenmessungen bei Temperaturen von -50°C bis $+10^{\circ}\text{C}$ durchgeführt. Dazu wurde ein Messstand zur Bestimmung der Effizienz der PMTs weiterentwickelt. Ein Preliminary Design Review des WOM wurde durchgeführt. Die Untersuchung von dichroitischen Filtern wurde vorerst zurückgestellt, um die Verfügbarkeit von WOMs für das Upgrade sicherzustellen. Die Erkenntnisse zum WOM-Konzept wurden in einer Publikation zusammengefasst und veröffentlicht.

Aufgaben in der Kollaboration: Die Wuppertaler Arbeitsgruppe ist für den Betrieb und die Wartung des Triggers für extrem langsame Signaturen am Südpol verantwortlich sowie für den Monopol-Filter, der für verschiedene kinematische Bereiche die Daten online vorselektiert. Die Monopol-Filter wurden komplett überarbeitet, um die Prozessierung am Südpol zu beschleunigen und damit die Signalreinheit zu verbessern. Die Massenproduktion von IceCube-Simulationen wurde auf dem Wuppertaler Tier-2 HPC-Cluster betrieben. A. Pollmann war Leiter der IceCube-Arbeitsgruppe zum Nachweis von Physik jenseits des Standardmodells (BSM). K. Helbing ist Koordinator des Verbundes.

Bezüglich Öffentlichkeitsarbeit waren neben den üblichen Vorträgen bei Planetarien u.ä. Beiträge zum Winterseminar zur kosmischen Evolution *Vor und nach dem Urknall* mit interdisziplinären Diskussionen mit Philosophen, Theologen und Literaten für die interessierten Laien sicher besonders

fruchtbar.

2.5.2 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Prototypenentwicklung von mDOMs für das IceCube-Upgrade:

Der "Final Acceptance Test" der mDOMs wird in einem Dunkel-Teststand bei -40°C am DESY Zeuthen sowie einem optischen Teststand bei Raumtemperatur durchgeführt, für welchen Erlangen verantwortlich ist. Dieser Messstand ist Teil des finalen Akzeptanztests für die IceCube mDOMs, der nach der Integration und vor der Installation der mDOMs im Südpol-Eis durchgeführt wird.

Hierbei werden die mDOMs auf ihre Grundfunktionalität überprüft, um einwandfreie Leistung im Einsatz zu sichern. Zusätzlich werden mit dem in Erlangen entwickelten optischen Messstand Zeitverhalten und Linearität der mDOM PMTs überprüft. Außerdem kann eine Kalibration der relativen Zeitoffsets der PMTs eines mDOMs durchgeführt werden. Während der Akzeptanzmessung wird gepulstes Laserlicht in ein Bündel optischer Fasern eingekoppelt. Dieses leitet die Photonen zu den Positionen der PMT-Eintrittsfenster weiter. Mithilfe einer speziell entwickelten Haltestruktur inklusive Faserhaltern wird garantiert, dass alle PMTs gleichzeitig zentral beleuchtet werden und deren Antwort auf das einfallende Licht aufgenommen und ausgewertet werden kann. Die mDOM-Haltestruktur für den Testaufbau wurde von der Mechanische Werkstatt des Physikalischen Instituts Erlangen entwickelt und gebaut.

Die Lichteinkopplung eines Lasers in die 24 optische Fasern, die im Teststand je einen der PMTs beleuchten, wurde getestet. Das Ziel war einen einstellbaren dynamischen Bereich von 0.1 bis über 50 pro Lichtpuls im Mittel detektierter Photoelektronen, eine gleichmäßige Ausleuchtung aller Fasern sowie eine zeitliche Breite der Lichtpulse unterhalb 1 ns zu realisieren. Auch wurden im Zuge der Finalisierung des mDOM-Designs Tests durchgeführt, die die notwendigen Anforderungen an PMTs und die zugehörigen Basen des mDOMs bestätigten. Darunter waren Messungen zur Lagerungs- und Betriebstemperatur sowie zur Linearität der Antwort der PMT + Base Kombination auf Erhöhung der einfallenden Lichtintensität. Außerdem wurden Messungen zur Sättigung der PMT + Base Kombination durchgeführt, die als Eingabeparameter für Detektorsimulationen verwendet werden.

Im August 2022 wurde der Messstand dann zum DESY Zeuthen transportiert, dort aufgebaut und in Betrieb genommen. Die durchgeführten Testmessungen waren erfolgreich und der Teststand wird seitdem genutzt, um fertig integrierte mDOMs zu vermessen. Während der Inbetriebnahme des Setups wurde auch der Akzeptanztest für die mDOM Kameras in das Setup integriert. Zudem wird die Grundkonfiguration des Teststandes für die finalen Akzeptanztests der an der Michigan State University produzierten mDOMs übernommen. Die Entwicklung des optischen Teils des "Final Acceptance Test" der mDOMs in Erlangen wurde damit gegen Ende des Berichtszeitraum abgeschlossen. (J. Reubelt)

Messungen mit dem finalen Analog-Front-End-Design für das Revision 1 Mainboard wurden erfolgreich abgeschlossen. Zudem wird das für die Messungen mit dem Analog-Front-End entwickelte Setup sowie die zugehörige Messprozedur und Analyse am DESY weiterhin für Messungen mit dem finalen Mainboard Design benutzt. Nach finalen Änderungen an der Auswertung sind diese Messungen nun abgeschlossen.

Weiterhin wurden remote mit einem Setup am DESY Messungen zum Temperaturverhalten und zum Verhalten anderer Messgrößen innerhalb des mDOMs durchgeführt. Im speziellen wurde die zeitliche Entwicklung der Temperatur innerhalb des mDOMs untersucht, wenn das mDOM auf eine

bestimmte Temperatur gekühlt ist, anschließend angeschaltet und im Normalbetrieb benutzt wird. Die verwendeten Anfangstemperaturen waren -27°C und -49°C , welches typische Temperaturen beim Betrieb im Eis sind. Für die Messungen wurden im ganzen mDOM verteilte Temperatursensoren ausgelesen und somit auch eine räumliche Temperaturverteilung bestimmt. Die Analyse der Daten lieferte eine Abschätzung für die Zeit bis zum Erreichen des thermischen Gleichgewichts und ist für eine stabile Operation der mDOMs nach Anschalten der Elektronik wichtig. Auch wurde die Datenauswertung finalisiert und die räumliche Temperatur- und Druckverteilung zwei verschiedener mDOMs verglichen. Zuletzt wurde auch die Stabilität der Hochspannungsversorgung und die Leistungsaufnahme untersucht. Der voll integrierte mDOM hat nun auch den "Final Design Review" bestanden und die mDOM-Produktion ist angelaufen. (J. Schneider)

Methodenentwicklung:

Eine Deep-Learning-basierte Rekonstruktionsmethode auf Basis eines Recurrent Neural Networks (RNN) in Verbindung mit einem Convolutional Neural Network (CNN) wurde weiterentwickelt und ist nun als Werkzeug für Standard-IceCube-Eventrekonstruktion voll verwendbar. Zudem wurden die Eigenschaften des Netzwerks leicht modifiziert, so dass es nun auch für CR Myon-Bündel korrekte Antworten liefert. Letztendlich wurde auch eine erste Hyperparametersuche für das Netzwerk durchgeführt, welche zu einer leichten Verbesserung der Auflösung geführt haben. Diese Arbeiten sind nun abgeschlossen und eine Dissertation zu dem Thema steht kurz vor der Einreichung. (G. Wrede).

Die Entwicklung an der verbesserten likelihood-basierten Myonrekonstruktion *SegmentedSplineReco* wurde abgeschlossen und in einem IceCube-Kollaborationspapier (in Kooperation mit DESY) veröffentlicht[46]. Desweiteren wurden Tests dieser neuartigen Myonrekonstruktionsalgorithmen mit dem Mondschatten abgeschlossen. Die Ergebnisse stimmen weitestgehend mit den Erwartungen überein, und zeigen vor allem, dass Deep-Learning basierte Rekonstruktionen bei der Anwendung auf Daten gute Übereinstimmung mit Simulationsergebnissen liefern. Dies führte auch zu einem Kollaborationsbeitrag zur ICRC in Kooperation mit Aachen. (T. Glüsenkamp, G. Wrede)

Erste Schritte zur Entwicklung einer neuartigen Methode zur Selektion von AGN-Quellkandidaten basierend auf ihren intrinsischen physikalischen Eigenschaften wurden unternommen. Ziel ist es, anhand verschiedener für die jeweilige Fragestellung relevanten Kriterien eine Untergruppe von AGN für eine Punktquellenanalyse zu selektieren, ohne dabei auf die klassische astronomische AGN-Klassifikation angewiesen zu sein. Diese ist nicht notwendigerweise selektiv für AGN, in denen nachweisbare Flüsse hochenergetischer Neutrinos produziert werden. (S. Schindler)

Im Bereich des maschinellen Lernens wurde weiterhin untersucht, wie sich Unsicherheiten auf Neutrino-Reaktionsparameter mit sogenannten "normalizing flows" berücksichtigen lassen. Die Entwicklung eines open-source Pakets wurde weiter verfolgt und neue Features (unter anderem Erweiterungen zum Gaussianization Flow, automatische Berechnung der Entropie von einzelnen Flow Bestandteilen, voller GPU support, Flow Initialisierungsoptimierungen) wurden eingearbeitet. Weiterhin wurde Dokumentation hinzugefügt. Erste Tests auf IceCube-Simulationsdaten sehen sehr positiv aus und eine Erprobung auf echten Daten wird derzeit durchgeführt. (T. Glüsenkamp)

Outreach und Service:

Es wurden mehrere IceCube-Masterclass-Veranstaltungen abgehalten, um Schülerinnen und Schülern den IceCube-Detektor und die damit verbundene Forschungsarbeit näher zu bringen. Gisela Anton war für einen Teil des Berichtszeitraums Mitglied des IceCube-Publikationskomitees. Thorsten Glüsenkamp war Leiter der Reconstruction and Systematics Arbeitsgruppe für einen Teil des Berichtszeitraums.

2.5.3 Humboldt-Universität zu Berlin

mDOM-Verifikation: Die mDOM-Arbeiten an der HU finden in enger Zusammenarbeit mit dem DESY statt. Die Doktorandin Nora Feigl hat zum 15. Februar 2021 mit Ihrer Promotions-Arbeit zur mDOM-Prüfung und Produktion begonnen. In der Designverifikationsphase wurden Prüf- und Messprotokolle für die Gerätecharakterisierung und die Automatisierung von Messroutinen, zur Datenanalyse und Speicherung der Ergebnisse in einer Datenbank, von dem mDOM Hardware Team am DESY erarbeitet. Es wurden zunächst alle grundlegenden Funktionen des mDOM-Mainboards, der PMT-Basen und der Kalibrierungssysteme getestet. Weiter wurden alle drei im mDOM integrierten Kameras für Test-Aufnahmen angesteuert. In einem ersten Schritt wurden die ersten zehn vollständig integrierten mDOM Testmodule geprüft und charakterisiert. Aus der Reihe an Anforderungen, die sicherstellen, dass das Design den Voraussetzungen entspricht, wurden von der Doktorandin Linearität und Dynamikbereich des Outputs sowie das Signal-zu-Rauschverhältnis der Analog-Front-End Kanäle des Mainboards geprüft (für das mDOM Mainboard und das integrierte Testmodul). Außerdem wurde ein Verfahren zur Helligkeitseinstellung der integrierten LED-Flasher automatisiert, bei dem die LEDs auf Einzelphotonenniveau gedimmt werden können um in-situ Messungen in diesem Bereich durchführen zu können. Dies ermöglicht einige Tests in einem stark vereinfachten Aufbau durchzuführen, sowie eine Kalibrierung bei kalten Temperaturen. Nora Feigl konnte mit dem Laboraufbau verifizieren, dass das Signal-zu-Rausch-Verhältnis für Einzelphotoelektronen-Ereignisse, sowie die Linearität der Sensoren im Bereich von 0,2-150 P.E. den Design-Anforderungen entspricht.

Des Weiteren hat Sie die Auswirkungen der radioaktiven Zerfälle in den mDOM-Glaskomponenten auf die Rekonstruktion von niederenergetischen Neutrinos untersucht. Sie nutzte dazu eine spezielle GEANT4-Simulation, die die radioaktiven Zerfälle und die daraus resultierenden Prozesse (Szintillation und Cherenkov-Effekt) im mDOM simuliert, bei denen Rauschphotonen erzeugt werden. Um die Auswirkungen einer von der Realität abweichenden Rauschsimulation abzuschätzen, zum Beispiel durch einen erhöhten Anteil radioaktiver Elemente in einzelnen Glaskomponenten, wurden Parameter verändert und die Ergebnisse der GEANT4-Simulation in die Detektorsimulation eingefügt. So konnten die möglichen Auswirkungen auf die Energie- und Richtungsrekonstruktion sowie auf das Signal-Rausch-Verhältnis untersucht werden. Darüber hinaus führte die Doktorandin Messungen mit einem integrierten mDOM durch, bei denen zunächst die Kalibrierung der Messschwelle auf 0,2 P.E. verbessert wurde. Anschließend wurden Messungen durchgeführt, um den erwarteten simulierten Rauschuntergrund bei verschiedenen Temperaturen zu validieren und die Streuung der einzelnen Photomultiplier vom mittleren Messwert zu bestimmen. Insbesondere wurde die zeitliche Verteilung der Abstände zwischen den einzelnen Photonenregistrierungen in den Photomultipliern analysiert und einzelne Features wie Afterpulse-Effekte charakterisiert.

Kalibration optischer Eis-Eigenschaften: Im Rahmen der Doktorarbeit von Jannes Brostean-Kaiser wurden Daten einer UV-Kalibrations-Sonde untersucht. Die Sonde wurde bereits in der vorherigen Förderperiode entwickelt für das SPICE Core Bohrloch am Südpol entwickelt, um Modelle für die Absorptions- und Streueigenschaften des Eises im mittleren UV Licht (250-300 nm) zu testen. Mithilfe dieser Messungen sollte das Potenzial des neuen wellenlängenschiebenden optischen Moduls WOM besser verstanden werden. Die Sonde brachte zudem im Winter 2019/20 erstmals Technologie des Wavelength shifting Optical Module (WOM) im Eis am Südpol zum Einsatz. Die Daten erlauben, die optischen Eiseigenschaften im UV-Wellenlängenbereich zu bestimmen, was wiederum für den zukünftigen Einsatz des WOM-Sensors wichtig ist. Die erste Analyse der Daten konnte abgeschlossen werden, mit dem Ergebnis, dass im UV Absorptionslängen von bis zu 100 m gemessen wurden. Das Ergebnis wurde auf der ICRC 2021 vorgestellt. Jannes Brostean-Kaiser

konnte seine Promotion erfolgreich abschließen.

2.5.4 Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Atmosphärischen Neutrinos: Der allgegenwärtige Fluss atmosphärischer Neutrinos bietet einzigartige Möglichkeiten die Eigenschaften von Neutrinos und deren Oszillationen zu studieren. Da die Effekte erst Nahe der Triggerschwelle des IceCube-DeepCore Detektors eintreten, können Sie nur mit begrenzter Auflösung beobachtet werden, was eine besonders bedachte Modellierung der systematischen Unsicherheiten erfordert. Im Gegenzug liefert die außerordentlich hohe Zahl der atmosphärischen Neutrinos die mit IceCube-DeepCore nachgewiesen werden eine hervorragende Sensitivität auf diese Effekte. Eine Studie (Doktorarbeit J. Sandroos), in der der Fluss der Neutrinos erstmals aus einer Entfaltung der IceCube-DeepCore Daten gemessen wurde, wurde zu Beginn der Förderperiode abgeschlossen. Da die atmosphärischen Neutrinos zum Teil die gesamte Erde durchqueren, können auch Effekte der (Erd-)materie auf die Oszillationen untersucht werden. Dies eröffnet unter anderem Rückschlüsse auf die noch unbekannt Anordnung der Massenzustände der Neutrinos. In einer Publikation konnte gezeigt werden (Masterarbeit J. Weldert) dass sich die Sensitivität des IceCube-Upgrade bei der Kombination mit ReaktorneutrinoDaten des JUNO-Experiments über das statistische Maß hinaus erhöht. Mit der Installation des IceCube-Upgrade ist somit eine Bestimmung der Neutrinomassenanordnung mit hoher Signifikanz noch in dieser Dekade zu erwarten. Weitere Beispiele von Materieeffekten sind sog. *Non-Standard Interactions (NSI)* die in vielen BSM-Szenarien hervorgesagt werden. In der in der vorangegangenen Förderperiode abgeschlossenen und nun veröffentlichten erste Studie zu NSI (Doktorarbeit T. Ehrhardt) konnten zum ersten Mal gleichzeitig alle flavourerhaltenden und flavourverändernden Parameter des NSI-Modells aus einer einzigen Messungen beschränkt werden. Die nachfolgende Analyse (Doktorarbeit E. Lohfink) verwendet den 10 Jahre umfassenden OscNext-Datensatz, der eine deutlich höhere Sensitivität verspricht. Dies erfordert gleichzeitig eine genauere Parametrisierung und verbesserte Minimierungsalgorithmen – aufgrund der außerordentlich hohen Dimensionalität des Parameterraums eine besondere Herausforderung. Während gezeigt werden konnte, dass diese Minimierung für einzelne freie Parameter erfolgreich gelingt, war ein Unblinding der Daten vor Ende des Berichtszeitraum nicht möglich. Die Studie soll in der nächsten Förderperiode weitergeführt werden.

Rekonstruktion bei niedrigen Energien: Eine weitere große Herausforderung bei der Analyse atmosphärischer Neutrinos ist die Rekonstruktion von Ereignissen in der Nähe der Triggerschwelle. Für diesen Zweck wurde eine neuartige, auf dem *likelihood-free inference* Prinzip basierende Rekonstruktionsmethode erfolgreich für den Einsatz in IceCube-DeepCore implementiert und hinsichtlich der erreichbaren Auflösung optimiert (Doktorarbeit Jan Weldert). Diese erfordert kein (approximatives) Modell von Wechselwirkung und Lichtausbreitung sondern kann direkt auf den simulierten Ereignissen trainiert werden. Neben einer Reduktion der Rechenzeit um mehrere Größenordnung lassen sich mit dem Ansatz Auflösungsschätzer generieren, die als Gewichte in der jeweiligen Analyse eingebracht werden können und zum Teil zu deutlichen Verbesserungen der Sensitivität führen. Der erhebliche Aufwand mit dem neue Rekonstruktionsmethoden für IceCube entwickelt werden, wirft die Frage auf, in wie weit die Auflösungen bei niedrigen Energien bereits durch die begrenzte Information in den wenigen, zum Teil vielfach gestreuten Photonen begrenzt ist. Mit einem eigens dafür entwickelten Ansatz ist es gelungen zu zeigen, dass im IceCube-Upgrade selbst für die perfekte Rekonstruktion eine Verbesserung der Zenithwinkelauflösung von nicht mehr als 30% gegenüber den aktuellsten Rekonstruktionsmethoden zu erwarten ist (Masterarbeit K. Dutta). Ein Publikation ist in Vorbereitung.

Kalibration und Eiseigenschaften: Das neu entwickelte Eismodell, welches durch eine Kombina-

tion aus doppelbrechenden Eigenschaften und richtungsabhängiger Absorption zum ersten Mal die Photon-Ankunftszeiten akkurat beschreibt, wurde als neuer Standard in der Kollaboration etabliert und zur Publikation in einem geologischen Fachjournal publiziert (M. Rongen). Aus vertiefenden Studien ergeben sich erste Ansätze die doppelbrechenden Effekte in der Lichtausbreitung mit den IceCube-Upgrade installierten *pencil beam* Kalibrationsquellen in-situ zu studieren (Praktikum M. Fournier). Für die kleine verbleibende Diskrepanz mit den Daten wird ein photoelastischer Effekt - eine druckabhängigen Veränderung der doppelbrechenden Eigenschaften - vermutet. Da photoelastischen Parameter von Eis nicht hinreichend bekannt sind wurden Versuche zu deren Messung entwickelt (Bachelor L. Bau). Hierbei stellte sich jedoch die Notwendigkeit der Kenntnis der Orientierung der Kristallachse heraus, wofür ein weiterer auf dem Polarisationsprinzip beruhender Messaufbau entwickelt wurde (Bachelor Y. Ebling). Zudem konnte das Modell für die Neigung der Eislagen weiter verbessert werden.

Methoden zum Supernovanachweis: Während einzelne Neutrino-Ereignisse aus einer Supernova unterhalb der Energieschwelle von IceCube liegen, können Supernova dennoch durch die vorübergehend auftretende außerordentlich hohe Rate (Neutrino-Burst) über ein ansteigen der Rauschrate im Detektor nachgewiesen werden. Eine Suche in den IceCube-Daten der vergangenen zehn Jahre nach Supernova-Neutrino-Bursts ergab keine signifikante Entdeckung (Doktorarbeit A. Fritz). Eine Obergrenze auf die Rate optisch nicht sichtbarer Supernovae in der Milchstraße wurde abgeleitet und publiziert (A. Fritz, L. Köpke). Während mit dieser Methode primär der Energiefluss der Neutrinos bestimmt wird, lässt sich über die Vermessung von Koinzidenzen in benachbarten Modulen die Korrelation der beiden Größen aufbrechen. Die hierzu begonnene Dissertation wurde krankheitsbedingt nicht fortgesetzt.

Forschungs- und Entwicklungsarbeiten: Mit dem Ziel eines ersten Einsatzes im IceCube-Upgrade wurde das Wellenlängenschiebende Optische Module (WOM) gezielt weiterentwickelt. Es verwendet wellenlängenschiebende und lichtleitende Technologien um die Lichtsammelfläche von konventionellen Photomultipliern um ein Vielfaches zu steigern und die Sensitivität weiter in den UV-Bereich zu verschieben. Hierzu wird ein Rohr mit einer dünnen speziell für diesen Zweck entwickelten wellenlängenschiebenden Beschichtung versehen. Absorbierte Photonen werden in dieser Schicht re-emittiert und zu einem großen Teil durch fortlaufende Totalreflexion in Richtung der PMTs geleitet. Hierbei ergeben sich typische Lichtsammeleffizienzen von über 40% aller auf das Rohr fallenden Photonen – und damit eine drastische Steigerung der effektiven Lichtsammelfläche. Hierzu wurde zunächst mit Hilfe von umfangreichen Simulationsstudien gezeigt, dass das vorliegende Umsetzungskonzept tatsächlich das beste Signal-zu-Rausch-Verhältnis verspricht (Rongen). Das *dip-coating* Verfahren mit dem die Rohre beschichtet werden wurde optimiert und detaillierte Untersuchungen zur Schichtdicke und der Quanteneffizienz des Wellenlängenschiebers durchgeführt (Bachelorarbeit J. Hümmrich). Für die Vermessung der gecoateten Rohre wurden verschiedene Testverfahren entwickelt (Doktorarbeit J. Rack-Helleis) um insbesondere deren Lichtsammeleffizienz in Abhängigkeit von Position und Wellenlänge zu bestimmen und mit Modellrechnung zu vergleichen. Hierbei zeigen sich eine sehr gute Abschwächlänge von über 3 Metern entlang der Photonpfade und eine sehr gute Übereinstimmung des Abschwächverhalten entlang des Rohrs mit den Vorhersagen der Simulation. Die Zeitverteilung der gesammelten Photonen wurde in zwei aufeinanderfolgenden Bachelorarbeiten (L. Schlickmann, K. Mossel) für die einzelnen Komponenten experimentell bestimmt. Diese befindet sich ebenfalls in Einklang den Vorhersagen der Simulation, liefert jedoch kompletäre Information zur Abschwächungsmessung und erlaubt so die Trennung von Effekte der Absorption und der Streuung. Auch der GPU-basierte und spezielle für den WOM entwickelte Simulationscode ALGO wurde in fortlaufender Kollaboration mit Prof. Schömer (Informatik, JGU Mainz) weiter entwickelt. In einer Bachelorarbeit (M. Strauß) wurden die

gesonderten Effekte der Farbschicht wie z.B. erhöhte Absorption oder Brechung in weiterem Detail implementiert. Eine Simulationsstudie zum Einsatz von WOM-artigen Sensoren in einer zukünftigen IceCube-Gen2 Geometrie (Bachelor M. Thiel) kommt zu dem Schluss das sich das effektive Volumen des Detektors für Supernova-Neutrinos durch diese kostengünstige Technologie nahezu verdoppeln lässt.

Aufbauend auf diesem sehr guten Verständnis konnte das Konzept des WOM auch auf weitere Anwendungsfälle übertragen werden: so lassen sich mit dem gleichen Verfahren auch wellenlängenschiebende Fasern wie sie vielfach in physikalischen Experimenten oder industriellen Anwendungen verwendet werden herstellen. In einer Masterarbeit (B. Kessler) wurde gezeigt das auch hier die Lichtsammelleffizienz gegenüber kommerziell erhältlichen Produkten dramatisch verbessert wurde. Zudem wurde die Selbstabsorption des re-emittierten Lichts an den wellenlängenschiebenden Fasern als weiterer abschwächender Effekt identifiziert. Es wurde ein Patentantrag für die Erfindung gestellt (B. Kessler, J. Rack-Helleis, S. Böser).

Für die mDOMs wurde in Mainz die Produktion und Kalibration von 4500 kurzen gepulsten Kalibrationslichtquellen (Flashern) übernommen. Mit Unterstützung des PRISMA+ Detektorlabors konnten die Elektronikplatinen in Mainz bestückt werden. In einem dedizierten Labor wurden Arbeitsplätze und Teststände für die abschließende Fertigung und Charakterisierung eingerichtet und wissenschaftliche Hilfskräfte in deren Benutzung eingewiesen. Trotz großer Lieferschwierigkeiten konnte die gesamte Produktion innerhalb weniger Monate erfolgreich abgeschlossen werden. Mit 8% liegt die Ausschussrate in dem für großindustrielle Prozesse üblichen Rahmen.

Aufgaben in der Kollaboration und weitere Aktivitäten: S. Böser ist F&E Koordinator für optische Sensoren für den IceCube-Upgrade, M. Rongen ist Koordinator der Kalibrationsarbeitsgruppe. Der interdisziplinäre "IceCube Polar Science Workshop" wurde unter reger Beteiligung vieler Glaziologen mit großem Erfolg durchgeführt. Trotz starker Einschränkungen durch die Pandemie konnte eine IceCube-Masterclass drei mal erfolgreich durchgeführt werden, in 2021 noch virtuell, dafür in 2022 gleich zwei mal in Person. Neben mehreren Praktika und Sommerstudenten wurde auch eine Maturaarbeit der Kantonsschule Heerbrugg (Schweiz) durch die Arbeitsgruppe betreut.

Im Berichtszeitraum wurden an der JGU Mainz vier Dissertationen, zwei Masterarbeiten und sieben Bachelorarbeiten mit IceCube-Bezug erfolgreich abgeschlossen. Die JGU Mainz war federführend bei fünf [1, 5, 45, 68, 81] und maßgeblich an drei weiteren Publikationen [31, 77, 90] beteiligt.

2.5.5 Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Die Forschungsaktivitäten an der RWTH Aachen konzentrierten sich auf die Hardwareentwicklung für das IceCube-Upgrade, die Verbesserung der Oberflächen-Instrumentierung sowie Arbeiten zur Leistungsverbesserung des IceCube-Detektors. Die Covid-19-Pandemie führte zu unvermeidbaren Verzögerungen aufgrund des eingeschränkten Zugangs zum Südpol und mit der Pandemie verbundenen Lieferproblemen. Als Reaktion darauf musste der Zeitplan des IceCube Upgrade Projektes mehrfach während der Projektes aktualisiert werden. Trotz dieser Beeinträchtigungen, konnten entstandene Mehrkosten durch kostenneutrale Umwidmungen innerhalb des Projektes aufgefangen werden und so die Ziele des Aachener Projektes erreicht werden.

Im Berichtszeitraum wurden an der RWTH 2 Dissertationen, 25 Masterarbeiten und 24 Bachelorarbeiten erfolgreich abgeschlossen. Aachener Wissenschaftler waren federführend für 6 Publikationen der IceCube Kollaboration [14, 34, 43, 56, 63, 70] und weiteren 5 Publikationen [79, 82, 95, 98, 101] mit Projektrelevanz verantwortlich. C. Wiebusch war Mitglied des IceCube-Publikationskomitees.

R. Reimann wurde für seine Arbeit zur IceCube Punktquellensuche mit dem Dissertationspreis 2020 und Jöran Stettner für seine Messung des diffusen Neutrinoflusses mit dem Dissertationspreis 2021 des Global Neutrino Networks (GNN) ausgezeichnet. Aachener Wissenschaftler waren stark in der Öffentlichkeitsarbeit engagiert. Wichtige Projekte sind das AIS³ Projekt, die Durchführung der IceCube Masterclasses, Highlights der Physik, und die Nacht der Wissenschaften der RWTH, bei denen jeweils IceCube Exponate ausgestellt oder vorgeführt wurden. Im April 2023 wurde das IceCube Kollaborationsmeeting an der RWTH Aachen durchgeführt.

Im einzelnen wurden folgende Arbeiten an der RWTH durchgeführt:

1. **Erweiterung der Oberflächeninstrumentierung, IceAct:** Im Rahmen des IceAct Projekts werden kompakte abbildende Luft-Cherenkov-Teleskope für den Einsatz unter den extremen Umweltbedingungen des Südpols entwickelt. Ziele sind die verbesserte Kalibration von IceCube und IceTop und Verbesserung der Messungen der kosmischen Strahlung. Im Berichtszeitraum wurden zwei IceAct Teleskope am Südpol betrieben. Vier weitere Teleskope wurden in Aachen gebaut und getestet. Hierbei konnten zahlreiche Probleme u.A. bei der Klebung der Kameras, der Datenerfassung und der Kalibration identifiziert und behoben werden. Aufgrund der Zugangsbeschränkung zum Südpol konnte bisher die Installation am Südpol nicht erfolgen — dies soll nun aber schrittweise ab Winter 2023/24 erfolgen. Durch die fehlenden Zugangsmöglichkeiten, wurden die zwei bereits installierten IceAct Teleskope über den gesamten Berichtszeitraum in unveränderter Konfiguration betrieben. Trotz fehlender Wartung war ein sehr stabiler Betrieb mit etwa 75% duty-cycle während der vier südlichen Wintermonate möglich. Dies ist eine exzellente Bestätigung der Robustheit und des erwarteten Leistungsvermögens des Designs. Für die Datenanalyse wurde eine umfangreiche Analyseketten mit Kalibration, Rekonstruktion und Simulationen aufgebaut und in das Framework des IceCube Experimentes integriert. Mit der Analyse des gewonnenen Datensatzes wurde begonnen und erste Ergebnisse wurden auf der internationalen Cosmic Ray Konferenz präsentiert.
2. **IceCube Upgrade mDOM, PMT Akzeptanztests:** Für die Eingangs-Massentest der etwa 11.000 Photomultiplier für den Bau der mDOMs erfolgte der Aufbau einer Testanlage in einem bestehenden Kühlcontainer in Aachen und eines gleichen Aufbaus an der TU Dortmund. In den Messplätzen kommen auch die neu entwickelten mDOM Mainboards zum Einsatz, so dass beim Betrieb der Messplätze zahlreiche Probleme frühzeitig identifiziert und verbessert werden konnten. Die eigentlichen Massentests wurden während des Berichtszeitraums an beiden Standorten Dortmund und Aachen durchgeführt. Der größte Teil der regulären Tests wurde innerhalb weniger Wochen durchgeführt und ein Spitzendurchsatz von bis zu 1000 PMT pro Woche konnte erreicht werden. Dies zeigt eine gute Bereitschaft und Skalierbarkeit der Messplätze für zukünftige Tests für das geplante IceCube-Gen2 Projekt. Bei den Tests zeigten sich in vereinzelt Fällen Diskrepanzen mit den Spezifikationen die näher untersucht und in den meisten Fällen akzeptiert wurden. Als kritisches Ergebnis zeigte sich jedoch dass fast alle der PMTs deutlich zu hohe Rauschraten aufwiesen, was letztlich auf einen veränderten Herstellungsprozess zurückgeführt werden konnte. Auch diese Abweichung von der Spezifikation konnte letztlich in der Datenerfassung der mDOMs kompensiert werden, führte aber im Rahmen der Schadenregulierung zu einer Kostenreduktion der mDOMs, und bestätigt nachträglich die Wichtigkeit der aufwändigen Eingangstests. Eine Publikation der Beschreibung der Testanlagen und erzielten Ergebnisse ist in Vorbereitung.
3. **IceCube Upgrade Kalibration, Acoustic module (AM):** Für das Ziel einer von der Lichtpropagation in Eis unabhängigen Methode zur Positionskalibration der Detektorgeometrie wurde unter Federführung der RWTH das sogenannte Akustik-Modul (AM) entwickelt.

Hierbei handelt es sich um ein sogenanntes “*special device*” des IceCube Upgrades. Das AM sendet und empfängt akustische Pulse im Frequenzbereich 5-30 kHz und ermittelt über die Multilateration aller gemessenen Laufzeiten die Abstände zwischen den Modulen. Klares Ziel dieses Systems ist es neue Basistechnologie für IceCube-Gen2 zu entwickeln, aber es ergeben sich auch interessante Anwendungsmöglichkeiten in der Glaziologie. Bei der Hardwareentwicklung konnte in hohem Maße auf Technologien des BMWi (DLR) geförderten EnEx-RANGE Projektes aufgebaut werden [95]. Während des Berichtszeitraums wurde ein erster Prototyp mit akustischer Instrumentierung gebaut, getestet und durch die IceCube Kollaboration erfolgreich begutachtet. Alle relevanten Elektronikkomponenten (Transducer, Leistungstreiber, Receiver, DAQ, Steuerung und Kommunikation) wurden entwickelt und zur Produktionsreife geführt sowie die entsprechende Firmware entwickelt. Umfangreiche Testsysteme und Verfahren für Labor, Schwimmbad und Freiwasser wurden entwickelt und Tests erfolgreich durchgeführt. Mit dem erfolgreich abgeschlossenen finalen Production-Readiness Review findet zurzeit die finale Produktion aller Module statt. Insgesamt werden 12 Module produziert werden; die wissenschaftlich notwendige Erhöhung gegenüber den ursprünglich nur 8 bewilligten Modulen konnte durch Einsparungen und Umwidmungen in anderen Bereichen des Projektes realisiert werden. Parallel zu den Hardwarearbeiten wurde an der Entwicklung von optischen und akustischen Multilaterationsmethoden für die Geometriekalibration zur Vorbereitung des Einsatzes im IceCube Upgrade gearbeitet.

4. **IceCube Upgrade Kalibration, Acoustic Sensors für pDOMs:** Im Rahmen der Entwicklung des o.g. akustischen Kalibrationssystems wurden auch akustische Sensoren zum Einbau in die pDOM optischen Module des Upgrade Projektes entwickelt. Diese Sensoren basieren auf der gleichen Empfängerelektronik wie das AM. Für die Integration in die pDOMs mussten die elektronischen Schnittstellen, Datenauslese und Firmware für die Integration entwickelt werden sowie ein mechanisches Konzept zur Installation in die Glaskugeln und Ankopplung an die Hülle entwickelt werden. Alle Arbeiten wurden erfolgreich abgeschlossen. Gegenüber der ursprünglichen Planung von nur 15 Sensoren wurden 35 gebaut, so dass nun alle produzierten pDOMs mit akustischen Sensoren ausgestattet werden können. Die finalen Sensoren werden zurzeit an die Produktionsstätte der pDOMs in den USA geliefert.
5. **IceCube Upgrade Kalibration, miniMB:** Zusätzlich zum Bau der AMs übernahm die RWTH die Entwicklung einer einheitlichen Kontrolleinheit für alle speziellen Kalibrationsmodule (u.A. POCAM und AM) des Upgrades: das sogenannte Mini-Mainboard. Dieses wurde in mehreren Iterationen produziert und getestet. Insgesamt wurden von der finalen Version etwa 130 Module in den USA produziert und konnten nach eingehenden Tests an alle Kollaborationsmitglieder versendet werden. Die Arbeiten haben eine hohe Anschlussfähigkeit, da in der aktuellen Planung des IceCube-Gen2 Projektes das miniMB als Standard für alle in-ice Komponenten vorgesehen ist.
6. **IceCube Methodenentwicklung, Kalibration und Machine Learning:** Die Arbeiten beinhalten insbesondere Verbesserungen für die Messung kosmischer und atmosphärischer Neutrinos sowie die Überprüfung und Verbesserung der Richtungsrekonstruktion mit Hilfe des Mondschantens. Besonderer Fokus sind Likelihood- und Machine-Learning Verfahren. An der RWTH Aachen wird eine große Zahl von IceCube Software-Tools entwickelt und gepflegt. Besonders wichtig ist die Bereitstellung der Software-Tools für Likelihood Fits (“*NNM-fit*”) sowie die Simulation systematischer Unsicherheiten (“*Snowstorm*”). Neben diesem Schwerpunkt wurde das Multilaterationsverfahren zur Kalibration der IceCube Geometrie weiter entwickelt und die Methoden zur Suche nach sub-relativistischen magnetischen Monopolen, prompten atmosphärischen Neutrinos, und die Messung saisonaler Variationen atmosphärischer Neutrinos verbessert. Für die erstmalige Entdeckung eines Glashow Ereignis [56] war

die in Aachen entwickelte Rekonstruktion des Wechselwirkungsverteils auf Basis non-kausaler früher Pulse entscheidend.

7. **IceCube Methodenentwicklung, Astrophysikalische und atmosphärische Neutrinos:** Die Arbeiten beinhalten insbesondere Verbesserungen für die Messung galaktischer, extragalaktischer und atmosphärischer Neutrinos im Rahmen der sogenannten "*diffuse Muon-Neutrino Analyse*", die Bereitstellung eines Standard-Datensamples "*Northern Tracks*" für die Kollaboration, und in Zusammenarbeit mit DESY die Entwicklung der Methodik für einen "*globalen Fit*" aller Daten-Samples von IceCube. Der "*Northern Tracks*" Datensatz für die Messung kosmischer Myonenneutrinos wurde auf 12,5 Jahre Messzeit erweitert und beinhaltet inzwischen etwa 1 Million identifizierter Myon-Neutrino Ereignisse. Das Analyseverfahren wurde verbessert, indem die Beschreibung systematischer Unsicherheiten erweitert wurden. Zusätzlich wurde die Methode erfolgreich um ein richtungsabhängiges Template der galaktischen Ebene erweitert, womit die diffuse Neutrinoemission der Galaxie gemessen werden kann.
8. **IceCube: Datenprozessierung und Computing** Die RWTH Aachen beteiligte sich am IceCube Common Computing über die anteilige Nutzung eines HPC Clusters mit 27700 CPUs und 58 GPUs und einem Instituts-eigenen Computercluster für DeepLearning. Aachener Datensätze, insbesondere der experimentelle Myonenneutrino-Datensatz und produzierte Monte-Carlo Daten werden für Analysen der IceCube Kollaboration zur Verfügung gestellt.

2.5.6 Technische Universität München

Die Technische Universität München trug im Berichtszeitraum zu den folgenden Projekten des IceCube-Experiments bei: Datennahme, Methodenentwicklung, Analysen und F&E-Arbeiten.

Datenverarbeitung & Methodenentwicklung Die TUM-Gruppe hat im Berichtszeitraum neue Methoden für die Verarbeitung und Rekonstruktion von IceCube-Daten entwickelt, die die Sensitivität von IceCube für die Suche nach Neutrino-Punktquellen im Universum deutlich verbessert. Dies führte zu Hinweisen für den Nachweis von Neutrino-Produktion in der aktiven Galaxie NGC1068 [22]. Zusätzlich hat die Gruppe eine statistische Untersuchung von Hot Spots am Himmel, eine Suche nach möglichen niederenergetischen Neutrinos aus der Richtung aller hochenergetischen Neutrino-Alarmer, sowie eine Suche nach Neutrinos von Seyfert Galaxien durchgeführt.

Für die statistische Analyse der Neutrino-Daten mittels Maximum-Likelihood-Methoden hat die Gruppe das Open-Source-Software-Framework 'SkyLLH' entwickelt, welches für Suchen nach einzelnen und mehreren Neutrinoquellen (Stacking), sowie für 'Hot-Spot' Analysen verwendet werden kann. Das Framework ist modular und folgt der mathematischen Struktur der Likelihood-Funktionen, was dessen Verwendung für unterschiedliche Signal-Hypothesen und Detektoren erlaubt.

Seither wurden erhebliche Anstrengungen unternommen, um SkyLLH kontinuierlich zu verbessern. Das Software-Framework wurde verfeinert, um seine Leistung zu erhöhen, und wurde einer umfassenden Überarbeitung unterzogen, um mehrere Quellen und ein flexibles Fit-Parameter-Konzept zu unterstützen. SkyLLH wurde ursprünglich für die Suche nach IceCube-Punktquellen entwickelt, eignet sich jetzt aber für alle Himmelsdaten. Im vergangenen Jahr wurde eine Schnittstelle für die Analyse von Punktquellen unter Verwendung des öffentlichen IceCube 10 Jahres Datensatzes veröffentlicht, zusammen mit einem Tutorial und der Dokumentation.

Die überarbeitete Software wurde auch für die Erweiterung der IceCube-Suche nach astrophysi-

kalischen Neutrinoquellen am Nordhimmel verwendet. Im Rahmen dieser speziellen Analyse, eine Erweiterung der Analyse von NGC 1068, arbeitete die Gruppe an einer verbesserten Beschreibung der in der Analyse verwendeten Simulationen, um die Genauigkeit der Beschreibung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu verbessern. Dies führte zur Erstellung eines neuen Datensatzes für die Suche nach Neutrino-Punktquellen, der nun für die gesamte IceCube-Kollaboration verfügbar ist.

Ausserdem wurde eine neue Methode zur Suche von zeitabhängigen astrophysikalischen Neutrinoemissionen mithilfe von unbeaufsichtigtem, maschinellem Lernen realisiert. Die Methoden der Erwartungs-Maximierung (EM) wurde so angepasst, dass sie auf IceCube Daten angewendet werden kann, und damit in kürzester Zeit Signale mit hoher Genauigkeit identifiziert werden können.

Zudem ist die Gruppe massgeblich an der Entwicklung der Methoden zur Messung von Neutrinooszillationen beteiligt. Einerseits entwickelt und unterhält die TUM in enger Kollaboration mit der JGU Mainz die Analysesoftware PISA, und andererseits ist die TUM federführend in der Entwicklung von Rekonstruktionsalgorithmen für DeepCore und das IceCube Upgrade. Darauf basierend hat die TUM Arbeitsgruppe in Zusammenarbeit mit der JGU Mainz, dem DESY, und weiteren internationalen Partnern die neuste Messung der Neutrinooszillationseigenschaften auf einem Datensatz von 8 Jahren veröffentlicht.

Mittels künstlicher Intelligenz hat die Gruppe eine Vielzahl von neuen innovativen Methoden zur Richtungs- und Energierekonstruktion von IceCube Daten entwickelt. Die Anwendung von sogenannten Graphnetzwerken und grossen Sprachmodellen auf Daten des IceCube Upgrades haben einen Durchbruch im Entfernen von Rauschen und der Rekonstruktion von Ereignissen gebracht. Basierend darauf konnten erste realistische Prognosen für die Sensitivität des Upgrades punkto Oszillationsmessungen erstellt werden.

IceCube Kalibration Die verbesserte Kalibrierung des IceCube-Detektors ist eines der Hauptziele von IceCube Upgrade. Insbesondere wird erwartet, dass ein verbessertes Wissen über die optischen Eigenschaften des Eises und die Leistung der einzelnen optischen Sensoren (DOMs) zu einer verbesserten physikalischen Reichweite bei niedrigen Energien führen wird, insbesondere für Studien zu Neutrino-Oszillationen. Zu diesem Zweck hat die Gruppe an der Technischen Universität München das Precision Optical Calibration Module (POCAM), die kalibrierte isotrope Lichtquelle, entwickelt.

Es ist geplant, 30 solcher Module zu produzieren, von denen 21 im IceCube Upgrade eingesetzt werden sollen. Es ist vorgesehen, dass die Geräte während des endgültigen Betriebs des Detektors im Eis eingesetzt werden und kalibriertes Licht während des Sensoreinsatzes und des Einfrierprozesses liefern.

Alle Titan-Druckzylinder für die POCAMs wurden von Nautilus bezogen, das Design der digitalen und analogen Elektronik wurde an der TUM fertiggestellt, ebenso die optischen Elemente der Module und das Erstellen der Baupläne wurde finalisiert. Das Design und die Produktionsverfahren wurden bei der abschließenden Designprüfung 2023 genehmigt.

Alle erforderlichen Teile und Komponenten wurden beschafft und die notwendigen elektronischen Platinen von EFG Elektronikfertigung zusammengebaut. Die elektronischen sowie mechanischen Komponenten für die endgültige Produktion von 30 Modulen sind an der TUM eingetroffen und bereit für den Zusammenbau. Gleichzeitig wurde die Aufhängung der POCAMs finalisiert, bestehend aus einer Haltevorrichtung und Drahtseilen. Die entsprechenden Komponenten wurden beschafft, bzw. wurde von der TUM Werkstatt hergestellt.

Die Abläufe für die Produktion, das Testen der fertigen Module sowie deren Kalibration werden wurden durchgespielt. In Zusammenarbeit mit der Firma Nautilus (Tiefseetechnik) und Seilerei Voigt (Drahtseile), werden Belastungs- und der Module bzw. Aufhängevorrichtungen durchgeführt. Zudem wurde eine Prozedur definiert, um während der Installation - also beim Herablassen des Detektorstrangs - Lichtpulse von der POCAM auszusenden. Dies wird in einem einmaligen Datensatz resultieren der Kalibrationspulse an unterschiedlichsten Stellen (Tiefen) im Detektor enthält, bevor die Module und deren finalen Position festfrieren.

Im Zusammenbau der Module wird besonderes Augenmerk auf die Kontrolle der Luftfeuchtigkeit gelegt, um die Kondensation von Wasserdampf in kalten Umgebungen zu vermeiden, was die Leistung der eingesetzten Geräte beeinträchtigen würde. Die Komponenten werden mit Stickstoff gespült und in einer speziellen Handschuhbox unter Stickstoffatmosphäre montiert. Darüber hinaus wird das Gehäuse vor dem Versand mehrfach evakuiert und mit Stickstoff gefüllt, um eine niedrige Luftfeuchtigkeit im Inneren der Geräte zu gewährleisten.

Es ist vorgesehen, dass jedes Gerät während der Produktion vollständig charakterisiert wird. Dazu gehören Intensitäts-, Zeit- und Wellenlängenmessungen in dem für Kalibrierungsvorgänge typischen Temperaturbereich sowie Winkelmessungen der Lichtemission. Darüber hinaus wird jedes der selbstkalibrierenden Photodioden (PD) mit einer speziell kalibrierten PD des NIST charakterisiert. Diese Messungen werden der Kollaboration in einer Produktions-/Testdatenbank zur Verfügung gestellt und bei der Datenanalyse der Kalibrierungsläufe in IceCube Upgrade verwendet.

Außerdem wurde eine vollständige Simulation der POCAM-Funktionalität durchgeführt. Mit dieser Simulation konnten wir das physikalische Potenzial, das wir dank der neuen, präziseren Kalibrierungen erhalten werden, im Detail untersuchen. Insbesondere haben wir die Analyse der atmosphärischen Neutrino-Oszillationen mit DeepCore reproduziert und gezeigt, dass die neuen Mischungsparameter nach der Kalibrierung mit den POCAMs mit deutlich verbesserter Genauigkeit gemessen werden.

Organisatorische Aufgaben Im Berichtszeitraum 2020-2023 war E. Resconi Mitglied des IceCube-Exekutivkomitees und L3-Koordinator für das IceCube Upgrade (Specialised Calibration Devices). H. Niederhausen sowie L. Schumacher waren technische Leiter der Arbeitsgruppe Neutrinoquelle. C. Haack war technischer Leiter der Arbeitsgruppe Rekonstruktion und Systematik. P. Eller war Leiter der IceCube-Oszillations-Arbeitsgruppe. M. Karl war Teil des sogenannten Strike Teams zur Kontrolle und Verbesserung der IceCube-Software. Im Berichtszeitraum wurden an der TUM 3 Promotionsarbeiten, 3 Masterarbeiten, 1 Diplomarbeit, und 8 Bachelorarbeiten mit Projektbezug erfolgreich abgeschlossen. TUM-Wissenschaftler waren für 12 Publikation mit Projektbezug verantwortlich.

2.5.7 Technische Universität Dortmund

Im Berichtszeitraum lag der Arbeitsschwerpunkt der Dortmunder IceCube Gruppe auf der Anwendung maschineller Lernverfahren. Die verwendeten Algorithmen wurden für die Rekonstruktion von Neutrinoereignissen aus der Milchstraße sowie für die Entfaltung von Neutrino Energiespektren genutzt.

Beobachtung hochenergetischer Neutrinos aus der Milchstraße

Die Beobachtung von Neutrinos aus astrophysikalischen Quellen ist eine der wissenschaftlichen Kernaufgaben des IceCube Neutrinoobservatoriums. Neben einem diffusen Fluss astrophysikalischer Neu-

trinos, konnten bislang Neutrinoereignisse aus Richtung der Punktquellen TXS 0506+056 und NGC 1068 nachgewiesen werden.

Im Berichtszeitraum konnten die Möglichkeiten des IceCube-Detektors hinsichtlich der Detektion astrophysikalischer Neutrinos noch einmal deutlich verbessert werden. Diese Verbesserungen resultieren maßgeblich aus der konsequenten Anwendung von Deep Learning Verfahren. Im Rahmen des Dissertationsprojektes von Mirco Hünnefeld konnte auf diese Weise zum einen die Effizienz der Selektion von Kaskaden-Ereignissen und zum anderen die Genauigkeit der Richtungs- und Energieauflösung signifikant gesteigert werden. Die Anwendung maschineller Lernmethoden ermöglicht dabei signifikante Verbesserungen hinsichtlich der Detektionseffizienz, was sich direkt in Form einer drastisch verbesserten nominellen Detektorlaufzeit äußert.

Im Ergebnis lieferte die Dissertation von M. Hünnefeld neben einer extrem sensitiven Auswahl an Neutrinoereignissen auch den Nachweis von Neutrinos aus unserer eigenen Galaxie d. Dies ist der erste Nachweis astrophysikalischer Neutrinos aus der Milchstraße.

Rekonstruktion atmosphärischer Neutrinospektren für unterschiedliche Zenitbereiche

Ein Großteil der von IceCube registrierten Neutrinoereignisse entstehen in der Wechselwirkung von Teilchen der kosmischen Strahlung mit Atomkernen in der Erdatmosphäre. Die Rekonstruktion der Energiespektren dieser sog. atmosphärischen Neutrinos liefert dabei Aufschlüsse über die zugrunde liegenden Interaktionsmechanismen sowie über die Zusammensetzung der atmosphärischen Neutrinos.

Im Berichtszeitraum ist es im Rahmen des Dissertationsprojektes von Leonora Kardum zum ersten Mal gelungen, die Energiespektren atmosphärischer Neutrinos in unterschiedlichen Zenitbändern zu entfalten. Dies wurde unter anderem durch die insgesamt größere Anzahl an zur Verfügung stehenden Neutrinoereignissen, aber auch durch die Anwendung modernster Entfaltungsalgorithmen ermöglicht. Besagte Entfaltungsalgorithmen wurden von der Dortmunder IceCube Gruppe entwickelt und nutzen maschinelle Lernverfahren für ein verbessertes Binning der Ereignisse im Observablenraum.

Im Berichtszeitraum wurden drei Dissertationen, sieben Masterarbeiten und acht Bachelorarbeiten mit IceCube Bezug abgeschlossen. Die TU Dortmund war federführend bei zwei IceCube Publikationen.

2.5.8 Universität Münster

Charakterisierung und Produktion von mDOMs für den Einsatz in IceCube Upgrade: Die Arbeitsgruppe ist federführend in der Entwicklung und Charakterisierung eines multi-PMT optischen Moduls (mDOM), das aus 24 3"-PMTs besteht. Im Rahmen der Designverifizierung des Moduls wurden verschiedene Tests durchgeführt, darunter ein Drucktest bis zu 700 bar und Temperaturtests bei 50°C für den Südpoltransport. Zusätzlich wurden Messungen zur optischen Ausrichtung der Flasher-LEDs durchgeführt. Mit den positiven Ergebnissen dieser und anderer Tests wurde die Entwicklung des mDOMs im Rahmen des offiziellen Final-Design-Reviews im Juni 2022 vollständig abgeschlossen. Somit konnte die Serienproduktion von mDOMs im Herbst 2022 am DESY Zeuthen und im Herbst 2023 in Michigan, USA (MSU), starten. Im Rahmen der Serienproduktion wird die Vormontage der Haltestrukturen in Münster durchgeführt. Über 50% der Strukturen wurden bereits vormontiert. Eine Messstation zur Untersuchung der optischen Eigenschaften von mDOM-Komponenten wurde in Betrieb genommen. Sie wurde weiterentwickelt, um in der mDOM-Produktion als Qualitätskontrolle die Transparenz regelmäßig entnommener Gelproben

zu messen.

Die Zeit- und Ladungsverteilung der erhöhten Dunkelraten bei mDOM-PMTs, die aufgrund erhöhter Kontamination mit radioaktiven Substanzen bei der Herstellung produziert werden, wurde gemessen und in Geant4 nachgebildet. Ebenso wurde die Untersuchung des Szintillationsverhaltens des mDOM-Druckbehälter-Glases um langlebige Komponenten erweitert. Darüber hinaus wurde eine Methode zur relativen In-situ-Zeitkalibration der PMTs innerhalb eines Moduls unter Verwendung von im Druckbehälter produziertem Cherenkov-Licht entwickelt. Diese Methode wurde mit Modulen im Labor mit gutem Erfolg getestet.

Entwicklungsarbeiten für ein multi-PMT Modul der nächsten Generation: Es wurden Untersuchungen zu einem neuen multi-PMT Moduldesign durchgeführt, das aus 16 4"-PMTs innerhalb eines Druckbehälters mit reduziertem Durchmesser (12,5" anstatt mDOMs 14") besteht. Dabei wurden zunächst zwei verschiedene Konfigurationen hinsichtlich ihrer Sensitivität verglichen. Die erste Konfiguration bestand aus "traditionellen" mDOM-Design mit Haltestruktur und Reflektoren. Die zweite Konfiguration verwendete freistehende "Gelkissen", um die PMTs an den Druckbehälter zu koppeln. Mithilfe von Geant4 Simulationen wurden die Geometrieparameter optimiert. Der Ansatz mit Gelkissen wurde als bevorzugte Lösung betrachtet, da er die Kosten der 3D-gedruckten Haltestruktur einspart, ohne Einbußen bei der optischen Sensitivität zu verursachen. Die praktische Herstellung der Gelkissen sowie deren Verhalten bei niedrigen Temperaturen und Unterdruck wurden im Labor mit Erfolg getestet. Zusätzlich wurden Drucktests bis zu 700 bar an dem entwickelten Druckbehälter erfolgreich durchgeführt. Darüber hinaus wurden 4"-Prototyp-PMTs von Hamamatsu und NNVT einer eingehenden Charakterisierung unterzogen und ihre Performance in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelt.

PMT Charakterisierung und Geant4-Simulation: Die Verstärkung und Zeitauflösung des mDOM-PMTs wurde in Abhängigkeit von der Wellenlänge der einfallenden Photonen gemessen. Alle relevanten PMT-Signalparameter wurden auch in Abhängigkeit von der Photon-Auftreffposition auf der PMT-Oberfläche für mehrere 3"-mDOM-PMTs und 4"-PMTs von Hamamatsu und NNVT untersucht. Mit diesem Setup wurden außerdem sowohl 10"-PMTs der IceCube-Gen1-DOMs als auch 8"-PMTs des "D-Egg"-Optikmoduls für das IceCube Upgrade gescannt. Somit konnten alle in IceCube und IceCube Upgrade verwendeten PMTs mit demselben Setup im Detail charakterisiert werden.

Ein mDOM-PMT wurde mitsamt seinem Dynodensystem mithilfe eines Computertomographie-Scans eines realen PMTs im COMSOL-Simulationsprogramm präzise nachgebildet. Dadurch war es möglich, das zeitliche Verhalten des simulierten PMTs in Abhängigkeit von der Wellenlänge des einfallenden Lichts sowie von der Position des Photonenauftreffpunkts auf der PMT-Oberfläche zu simulieren und zu analysieren.

Das Geant4-Framework wurde erweitert, sodass alle optischen Module im Detail simuliert werden können und wurde als ein öffentliches IceCube-Projekt auf GitHub zur Verfügung gestellt. Es wurde eine wesentlich verbesserte PMT-Geometrie implementiert, die Messungen des Reflexionsvermögens der internen Komponenten des PMTs berücksichtigt sowie den PMT-Response an die in den Scans gemessenen PMT-Parameter anpasst. Die Modulaufhängung der mDOMs wurde implementiert und für verschiedene Konfigurationen simuliert, womit der Sensitivitätsverlust durch Abschattung auf $\sim 12\%$ ermittelt wurde. Das mDOM-Modell wurde außerdem mit Flasher-LEDs ergänzt und das erwartete LED-Profil im Eis wurde simuliert. Mithilfe dieser Erweiterung konnten Simulationsstudien erfolgreich durchgeführt werden, um die Geometrie und die optischen Eigenschaften des "Bubble-Columns" in den Bohrlöchern zu bestimmen. Zur Evaluation der Möglichkeiten von Multi-PMT-Modulen wurden Myonen in Geant4 simuliert und eine Myonenrekonstruktion

für ein einzelnes Modul für den in Münster vorhandenen Wassertank entwickelt.

Um die Eigenschaften von PMTs besser zu verstehen, wurde ein spezieller Ellipsometer-Messaufbau entwickelt. Erste Messungen ermöglichten die Bestimmung der Schichtdicke der Photokathode eines mDOM-PMTs sowie die Ermittlung ihres komplexen Brechungsindex.

Analyse von IceCube- und Monte-Carlo-Daten: Der Parameterraum sogenannter skotogener minimaler Modelle wurde untersucht und anschließend mit IceCube-Daten analysiert, um nach Hinweisen auf Dunkle Materie aus der Sonne zu suchen. In diesem Zusammenhang wurden Parameterscans für zwei weitere minimale Z' -Modelle durchgeführt, und die Auswertung der IceCube-Daten zur Eingrenzung des Parameterraums dieser Modelle wurde eingeleitet.

Die Studien zur Detektion von MeV-Supernova-Neutrinos wurden für mDOMs in IceCube Upgrade und die 16-PMT Module der nächsten Generation erweitert. Für die weitere Untersuchung des Hintergrunds wurde der von Myonen in IceCube Upgrade induzierte LC-Hintergrund untersucht. Es wurde die Sensitivität des IceCube-Upgrade-Detektors auf niederenergetische, transiente Ereignisse von der Verschmelzung kompakter Binärsysteme untersucht. Hierfür wurde eine Selektion basierend auf Boosted Decision Trees entwickelt, mit der die Detektion von Neutrinos unterhalb von 10 GeV optimiert wurde.

Ein IceCube-Ereignisgenerator, der auf maschinellem Lernen basiert, wurde für einen zukünftigen IceCube-Gen2-Detektor mit multi-PMT Module angepasst. Dadurch konnten erste Untersuchungen zur Rekonstruktion von Kaskaden durchgeführt werden, einschließlich der Bestimmung der zu erwartenden Winkel- und Energieauflösung für hochenergetische Neutrinos. Darüber hinaus wurde begonnen, diese Architektur für die Rekonstruktion von Spuren anzupassen.

Weitere Aktivitäten: Im Berichtszeitraum wurden sechs Bachelor-, vier Master- und drei Doktorarbeiten erfolgreich abgeschlossen, sowie vier Vorhaben-relevante Veröffentlichungen zur Charakterisierung von PMTs [87], Detektion von MeV-Neutrinos von Supernovae [86] sowie zur indirekten Suche nach dunkler Materie mit IceCube [88, 89] außerhalb der Kollaboration in Peer-Review-Zeitschriften veröffentlicht. A. Kappes ist L3-Lead für die mDOM-Entwicklung. In Rahmen von Outreach-Aktivitäten wurde in Zusammenarbeit mit dem LWL-Planetarium in Münster regelmäßig ein IceCube-Film für die Halbkuppelprojektion einem breiten öffentlichen Publikum mit anschließendem Vortrag und Diskussion vorgeführt.

2.5.9 Karlsruher Institut für Technologie

Der Fokus der IceCube-Universitätsgruppe am KIT lag im Berichtszeitraum bei Arbeiten zur Kalibrierung der im Helmholtz-Bereich gefertigten Detektoren für die erweiterte Oberflächeninstrumentierung am Südpol. Dies beinhaltete sowohl die Charakterisierung der benutzten halbleiterbasierten Photosensoren als auch die finale Kalibration des kompletten Detektors und der Datenaufnahme im Labor als auch während des Betriebes am Südpol, innerhalb des Pierre-Auger-Observatoriums in Argentinien und des Telescope-Array-Experimentes in Utah, USA. Die beiden letzt genannten Stationen wurden zur Cross-Kalibration aufgebaut, da während der Covid-Pandemie kein Zugang zum Südpol möglich war. Außerdem wurden Rekonstruktions- und Analysemethoden für die neuen Detektoren entwickelt und auf erste Daten der Prototypstationen angewendet. Weiterhin sind (mithilfe von Deep-Learning-Techniken) Analysen zur Elementzusammensetzung hochenergetischer kosmischer Strahlung mit den IceCube-Daten durchgeführt worden. Zudem erfolgte eine Beteiligung der Gruppe in der Planungsphase für ein teilchenphysikalisches Experiment am CERN (Forward Physics Facility, FPF). Es wird erwartet, dass FPF wichtige Erkenntnisse zur Verbesserung der Simulationen ausgedehnter Luftschauer liefern wird. Im einzelnen wurden folgende Arbeiten am

KIT im Rahmen des Projektes durchgeführt:

Erweiterung der Oberflächeninstrumentierung, Szintillatoren (PhD Shefali): In enger Zusammenarbeit insbesondere mit dem Großforschungsteil des KIT, aber auch mit Wuppertal, Aachen, dem DESY, sowie Brüssel, Delaware und Madison wurden Oberflächendetektoren getestet und die Geräte und Aufbauten für die einzelnen Kalibrationsschritte konzipiert, hergestellt, vorbereitet und am KIT aufgebaut. Zur Kalibrations-Kette gehören sowohl die Kalibration der einzelnen SiPM-Auslesesensoren in der Dunkelkammer des KIT, die komplette Elektronik in und außerhalb einer Klimakammer bis zu -70 Grad Celsius, als auch eine End-zu-End Kalibration mit Myonen und Luftschauerermessungen vor Ort. In 2022 wurden 9 komplette Oberflächenstationen (mit je 8 Szintillationsdetektoren, 3 Radioantennen und einem hybriden DAQ-System) getestet sowie in einzelnen, definierten Schritten kalibriert, und versandfertig verpackt. Da aufgrund der Pandemie erst keine dieser Detektoren an den Südpol ausgeliefert und installiert werden konnten, wurden komplette Stationen gebaut, kalibriert und dann zu Testzwecken an verschiedenen Stellen aufgebaut, unter anderem am KIT, in Madison am Headquarter des IceCube Observatoriums, sowie in Argentinien und Utah integriert in die dortigen laufenden Experimente. Alle Kalibrationsdaten werden gespeichert und stehen der Kollaboration zur Verfügung. In Argentinien werden Cross-Kalibrationen durchgeführt, insbesondere mit dem dortigen sich in regulärem Betrieb befindlichen Antennenarray; in den USA dient die Station zur Weiterentwicklung der hybriden DAQ für das IceCube-Gen2 Projekt, das von der dort ansässigen IceCube-Gruppe in Zusammenarbeit mit dem KIT bearbeitet wird. Am Südpol konnten dann Anfang 2023 die Prototyp-Szintillatoren mit Panels des endgültigen Designs ersetzt werden, so dass jetzt eine 'Station 0' der Oberflächenerweiterung in Betrieb genommen wurde.

Elementzusammensetzung kosmischer Strahlung (PhD Julian Saffer): Parallel zur Kalibration werden sowohl Rekonstruktionsmethoden entwickelt, als auch Daten des bereits am Südpol aufgebauten Prototypen analysiert. Hier steht insbesondere die Rekonstruktion niederenergetischer ausgedehnter Luftschauer mithilfe von Machine Learning Methoden im Vordergrund der Arbeitsgruppe. Ziel ist es, Energiespektrum und Elementzusammensetzung für Luftschauer bei niedrigen Energien zu messen, um hier ein Überlapp mit direkten Balloon- und Satellitenmessungen möglich sind.

Weiterführende Arbeiten (Postdocs A. Leszczyńska bis Mitte 2022, D. Soldin, 2022-2023): Arbeiten zu der Erweiterung des IceCube Experimentes, u.a. als technische Koordinatorin der Arbeitsgruppe IceCube-Gen2 Surface Array verantwortlich für die Erstellung großer Teile des Technical Design Reports für das Oberflächen-Detektorfeld von IceCube-Gen2. KIT-ETP Postdoc Dennis Soldin kümmerte sich um Validitätstests hadronischer Wechselwirkungsmodelle, ist Initialautor des White Papers für FPF und war auch Koordinator der IceCube Cosmic Ray Working Group.

Öffentlichkeitsarbeit: Die Wissenschaftler der Gruppe waren stark in der Öffentlichkeitsarbeit engagiert. Wichtige Projekte waren hierbei die Wissenschaftstage in Karlsruhe, die Durchführung der IceCube Masterclasses, Highlights der Physik, Tag der offenen Tür am KIT, bei denen jeweils IceCube Exponate ausgestellt oder vorgeführt wurden.

Im Berichtszeitraum wurden am KIT-Universitätsbereich bei IceCube 3 Dissertationen, 4 Masterarbeiten und 8 Bachelorarbeiten mit direktem Projektzusammenhang erfolgreich abgeschlossen.

2.5.10 Ruhr-Universität Bochum

Seit Ende 2020 ist mit dem Lehrstuhl von Frau Prof. Dr. Anna Franckowiak ein zweiter Lehrstuhl an IceCube beteiligt und langfristig in Bochum angesiedelt, um Themen zur Realtime Analyse, Transient und Multimessenger Astrophysik, sowie galaktischer Neutrinosuche voranzutreiben.

Mond- und Sonnenschatten

Im Projekt soll der Mond- und Sonnenschatten optimiert werden, um eine energieabhängige Betrachtung zu erreichen, welche im Fall des Mondes genutzt werden kann, um Rekonstruktionsalgorithmen energieabhängig zu testen. Im Fall der Sonne kann das Sonnenmagnetfeld durch die weitere Komponenten der Energieabhängigkeit besser untersucht werden. Der Schwerpunkt der Bochumer Arbeitsgruppe im Jahr 2021 lag auf der Verbesserung der energieabhängigen Rekonstruktion und dessen Überprüfung mit Hilfe des Mondschattens. Hierzu wurde zum Einen das Prozessieren der Daten so angepasst, dass die relevanten Variablen zur Energieabhängigkeit mitgenommen werden und eine Methode zur Energieauflösung des Datensamples weiter optimiert. Die neuen Daten (2018/2019 und 2019/2020) wurden prozessiert und analysiert. In einem ersten Schritt wurde der Gesamtschatten untersucht und auf die Konsistenz der Erwartung bezüglich der Simulationen von Sonnen- und Mondschatten kontrolliert. Die neuen Schattenbilder sind konsistent im Rahmen des Vergleichs mit den Simulationen und die energieabhängige Analyse der Rekonstruktion ist nun in Vorbereitung. Im Jahr 2022 wurde in der Bochumer Arbeitsgruppe weiter an der Optimierung der energieabhängigen Rekonstruktion unter Zuhilfenahme des Mondschattens gearbeitet. Daten des Mondschattens wurden außerdem dazu genutzt, um die Rekonstruktion von Pass2 Daten zu testen. Im Rahmen der allgemeinen Filterumstellung zur Reduktion der Rate wurde im Jahr 2023 der Mond- und Sonnenfilter von der Bochumer Arbeitsgruppe angepasst. Eine Anforderung ist dabei, dass die Filterrate auf wenige Hertz reduziert wird.

Der bis dahin bestehende Schattenfilter wurde in den letzten Monaten entsprechend der notwendigen Bedingungen angepasst. Die Änderungen umfassen zum einen die Übersetzung des Schattenfilters von C++ auf Python, damit dieser einsteigerfreundlicher, übersichtlicher sowie verständlicher wird und die Einarbeitung für zukünftige Wissenschaftler erleichtert. Zum anderen wurde der Schattenfilter für die Nutzung optimiert und Anpassungen so vorgenommen, dass das Ziel einer wesentlich geringeren Ereignisrate erreicht wird.

Multimessenger Astronomie mit IceCube

Ein Simulationscode zur Teilchenpropagation und Wechselwirkung in Jets aktiver Galaxien zur Untersuchung von zeitabhängigen Signaturen wurde entwickelt. Ziel ist es, Neutrinoemission von Blazaren zu untersuchen und die Ergebnisse zu nutzen, um die zeitabhängige Suche mit IceCube zu optimieren. Die hadronische Emission kann in der aktuellen Version des Codes sowohl im diffusiven als auch ballistischen Regime zeitaufgelöst vorhergesagt werden und genutzt werden, Vorhersagen zu machen, die mit IceCube und Multimessenger Daten verglichen werden können.

Aufgaben in IceCube

Über den gesamten Projektverlauf lag die Verantwortung für den Mond- und Sonnenfilter bei der Bochumer Arbeitsgruppe. Prof. Dr. Julia Tjus war den gesamten Projektverlauf Mitglied des Publikationskomitees und für den Zeitraum 05/2022 bis 09/2023 Vorsitzende des Publikationskomitees. Prof. Dr. Franckowiak ist Mitglied des IceCube Realtime Oversight Komitees.

2.6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Ein zentrales Ziel des Förderprogramms war es, die Entwicklung von Schlüsselkomponenten und Basistechnologien voranzutreiben. Die im Rahmen dieses Verbundforschungsprojektes erbrachten Leistungen stellen einen wesentlichen Beitrag zur bevorstehenden Installation des IceCube Upgrades dar. Ein erheblicher Teil der optischen Sensoren wurde im Berichtszeitraum in Deutschland gefertigt. Die deutschen Gruppen waren maßgeblich an der Entwicklung und dem Bau dieser sowie weiterer Komponenten beteiligt und leisteten wesentliche Vorbereitungen zur Auswertung von Daten mit niedriger Energieschwelle. Eng damit verbunden sind weitere Fortschritte für zukünftige Hochenergie-Erweiterungen von IceCube und die Entwicklung neuer Oberflächendetektoren.

Darüber hinaus haben die durch die Verbundforschung geförderten Gruppen – häufig in leitender Position – maßgeblich zur erfolgreichen Erfassung, Filterung und Rekonstruktion sowie zur Simulation, Analyse und Interpretation der IceCube-Daten beigetragen. Auch die Entwicklung phänomenologischer Modelle wurde entscheidend vorangetrieben. Die in dieser Verbundperiode von den Arbeitsgruppen des Verbundforschungsprojektes erzielten Erfolge sind von grundlegender Bedeutung für den aktuellen und zukünftigen Erfolg von IceCube und seinen Erweiterungen.

2.7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Alle primären Ziele des Vorhabens sind der Grundlagenforschung zuzuordnen. Ein Großteil der erzielten Ergebnisse wurde bereits veröffentlicht. Die hohe Relevanz und Verwertbarkeit dieser Resultate wird durch die zahlreichen Verweise in Titeln und Abstracts anderer wissenschaftlicher Publikationen eindrucksvoll belegt. Zusätzlich stellt die IceCube-Kollaboration Datensätze für die allgemeine Nutzung zur Verfügung. Viele weitere Veröffentlichungen, die nicht unmittelbar aus der Kollaboration hervorgehen, basieren auf diesen öffentlich zugänglichen Daten.

Die in dieser Förderperiode entwickelten Komponenten, Messmethoden und erzielten Ergebnisse sind von zentraler Bedeutung für den erfolgreichen Betrieb des IceCube-Observatoriums und die zukünftigen Erweiterungen des Messprogramms. Darüber hinaus hat die Entwicklung von hochanspruchsvollen Methoden und Instrumenten positive Auswirkungen auf andere Forschungsbereiche. Dies zeigt sich in der intensiveren Zusammenarbeit mit Forschenden aus der Informatik sowie in der Anwendung der entwickelten Sensortechnologien in anderen Experimenten. Beispielsweise wurde eine Kooperation mit NVIDIA etabliert, KI-Methoden in Zusammenarbeit mit diversen Informatik-Fachgruppen entwickelt, und eine Abwandlung des WOM-Sensors wurde im SHiP-Experiment implementiert.

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

Bei der Identifikation potentieller Quellen der astrophysikalische Neutrino-Produktion ist die Sensitivität von IceCube zur Zeit konkurrenzlos. Verschiedene, zum Teil komplementäre Projekte befinden sich im Aufbau.

KM3NeT: Das Kubikkilometer-Neutrino-Teleskop bestehend aus den Neutrino-Teleskopen ARCA und ORCA, macht bedeutende Fortschritte. ARCA, vor der Küste Siziliens, zielt auf die Detektion hochenergetischer Neutrinos (TeV-PeV) ab und hat bisher 21 von geplanten 230 Detektionseinheiten installiert. ORCA, nahe Toulon, Frankreich, fokussiert sich auf Neutrinooszillationen und die Neutrinomassenhierarchie (1-100 GeV) und hat 18 von 115 Einheiten installiert. Beide Teleskope sind seit einigen Jahren in Betrieb und liefern wertvolle Daten zur Verfeinerung der Detektions-

techniken und des Verständnisses des Untergrundes.

Baikal-GVD: Der aktuelle Stand des Baikal-GVD-Experiments zeigt bedeutende Fortschritte. Seit 2016 wurden 3.456 optische Module an 96 vertikalen Strings installiert. 2022 und 2023 wurden Inter-Cluster-Strings hinzugefügt, um die Kalibrierung und Lichtausbreitung zu verbessern. Das Experiment hat bereits wichtige Neutrino-Ereignisse identifiziert und analysiert. Die kontinuierlichen Erweiterungen erhöhen die Detektorempfindlichkeit und tragen zur Neutrinoforschung bei.

P-ONE: Die Vorbereitungen und erste Installationen schreiten gut voran. Das Projekt zielt darauf ab, ein großes Neutrino-Teleskop in den tiefen Gewässern des Pazifischen Ozeans vor der Küste Kanadas zu errichten. Erste Testinstallationen und Kalibrierungen wurden erfolgreich abgeschlossen. Die Forschung konzentriert sich nun auf die Optimierung der Technologie und die Erweiterung der Infrastruktur, um die volle Einsatzbereitschaft in den kommenden Jahren zu erreichen.

Die Untersuchung der Eigenschaften der Neutrinos aus Oszillationen wird durch eine große Vielzahl von Experimenten weltweit betrieben, die sich jedoch vor allem durch ihre Komplementarität zu IceCube auszeichnen. Der in Planung befindliche Hyper-Kamiokande Detektor wird die Sensitivität von Super-Kamiokande vor allem zu höheren Energien erweitern. Zusammen mit dem IceCube-Upgrade wird so das derzeit unbeobachtete Energiefenster im atmosphärischen Fluss bei wenigen GeV geschlossen. Das im Aufbau befindliche Reaktor-Neutrino-Experiment JUNO sollte ursprünglich 2023 erste Daten liefern, hat aber Verzögerungen erlebt. Der Start der Datenerhebung wird voraussichtlich bald erfolgen. Zusammen mit dem IceCube-Upgrade wird sich eine hervorragende Sensitivität auf die Neutrinomassenhierarchie ergeben. Das Neutrinostrahl-Experiment DUNE ist weiterhin in Entwicklung. Die Messung der CP-verletzenden Phase bleibt ein zentrales Ziel, mit intensiv erforschter Technologie.

IceCube steht durch sein umfassendes Physikprogramm in Wettbewerb mit einer Vielzahl weiterer bedeutender Experimente. Während es bei der Erforschung Dunkler Materie in vielen Bereichen eine fruchtbare Ergänzung gibt, zeichnet sich IceCube besonders durch seine außergewöhnliche Sensitivität aus, die es zu einem führenden Instrument in der Suche nach Urknallrelikten macht. Im Bereich der Messung kosmischer Strahlungsmuster ragt IceCube ebenfalls heraus, da es die einzigartige Fähigkeit besitzt, hochenergetische Myonen im TeV-Bereich präzise zu analysieren.

2.9 Erfolge und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Da sich der Berichtszeitraum dieses Projektes mit der Laufzeit des Nachfolgeprojektes der jetzigen Förderperiode überschneidet, werden Arbeiten im Zwischenbericht des Folgeprojektes und in diesem Bericht aufgeführt, wenn sie eine Relevanz für beide Projekte haben.

2.9.1 Publikationen in Zeitschriften mit Qualitätskontrolle durch die IceCube Collaboration

..... 2023

1. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "In situ estimation of ice crystal properties at the South Pole using LED calibration data from the IceCube Neutrino Observatory", *The Cryosphere* **18** (2024), no. 1, 75–102, doi:10.5194/tc-18-75-2024
2. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Search for 10–1000 GeV Neutrinos from Gamma-Ray Bursts with IceCube," *Astrophys. J.* **964** (2024) no.2, 126 doi:10.3847/1538-4357/ad220b [arXiv:2312.11515 [astro-ph.HE]].

3. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "All-Sky Search for Transient Astrophysical Neutrino Emission with 10 Years of IceCube Cascade Events," [arXiv:2312.05362 [astro-ph.HE]]. Submitted preprint.
4. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Search for Continuous and Transient Neutrino Emission Associated with IceCube's Highest-energy Tracks: An 11 yr Analysis," *Astrophys. J.* **964** (2024) no.1, 40 doi:10.3847/1538-4357/ad18d6 [arXiv:2309.12130 [astro-ph.HE]].
5. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Search for Galactic Core-collapse Supernovae in a Decade of Data Taken with the IceCube Neutrino Observatory," *Astrophys. J.* **961** (2024) no.1, 84 doi:10.3847/1538-4357/ad07d1 [arXiv:2308.01172 [astro-ph.HE]].
6. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Searching for Decoherence from Quantum Gravity at the IceCube South Pole Neutrino Observatory," [arXiv:2308.00105 [hep-ex]]. Submitted preprint.
7. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Search for Extended Sources of Neutrino Emission in the Galactic Plane with IceCube," *Astrophys. J.* **956** (2023) no.1, 20 doi:10.3847/1538-4357/acf713 [arXiv:2307.07576 [astro-ph.HE]].
8. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Observation of high-energy neutrinos from the Galactic plane," *Science* **380** (2023) no.6652, adc9818 doi:10.1126/science.adc9818 [arXiv:2307.04427 [astro-ph.HE]].
9. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Search for Correlations of High-energy Neutrinos Detected in IceCube with Radio-bright AGN and Gamma-Ray Emission from Blazars," *Astrophys. J.* **954** (2023) no.1, 75 doi:10.3847/1538-4357/acdfcb [arXiv:2304.12675 [astro-ph.HE]].
10. R. Abbasi *et al.* (IceCube Collaboration), "Measurement of atmospheric neutrino mixing with improved IceCube DeepCore calibration and data processing," *Phys. Rev. D* **108** (2023) no.1, 012014 doi:10.1103/PhysRevD.108.012014 [arXiv:2304.12236 [hep-ex]].
11. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "IceCat-1: The IceCube Event Catalog of Alert Tracks," *Astrophys. J. Suppl.* **269** (2023) no.1, 25 doi:10.3847/1538-4365/acfa95 [arXiv:2304.01174 [astro-ph.HE]].
12. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "A Search for IceCube Sub-TeV Neutrinos Correlated with Gravitational-wave Events Detected By LIGO/Virgo," *Astrophys. J.* **959** (2023) no.2, 96 doi:10.3847/1538-4357/aceefc [arXiv:2303.15970 [astro-ph.HE]].
13. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Search for neutrino lines from dark matter annihilation and decay with IceCube," *Phys. Rev. D* **108** (2023) no.10, 102004 doi:10.1103/PhysRevD.108.102004 [arXiv:2303.13663 [astro-ph.HE]].
14. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Observation of seasonal variations of the flux of high-energy atmospheric neutrinos with IceCube," *Eur. Phys. J. C* **83** (2023) no.9, 777 doi:10.1140/epjc/s10052-023-11679-5 [arXiv:2303.04682 [astro-ph.HE]].
15. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Constraining High-energy Neutrino Emission from Supernovae with IceCube," *Astrophys. J. Lett.* **949** (2023) no.1, L12 doi:10.3847/2041-8213/acd2c9 [arXiv:2303.03316 [astro-ph.HE]].

16. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Limits on Neutrino Emission from GRB 221009A from MeV to PeV Using the IceCube Neutrino Observatory," *Astrophys. J. Lett.* **946** (2023) no.1, L26 doi:10.3847/2041-8213/acc077 [arXiv:2302.05459 [astro-ph.HE]].
17. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "D-Egg: a dual PMT optical module for IceCube," *JINST* **18** (2023) no.04, P04014 doi:10.1088/1748-0221/18/04/P04014 [arXiv:2212.14526 [astro-ph.IM]].
18. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "A Search for Coincident Neutrino Emission from Fast Radio Bursts with Seven Years of IceCube Cascade Events," *Astrophys. J.* **946** (2023) no.2, 80 doi:10.3847/1538-4357/acbea0 [arXiv:2212.06702 [astro-ph.HE]].
19. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Search for sub-TeV Neutrino Emission from Novae with IceCube-DeepCore," *Astrophys. J.* **953** (2023) no.2, 160 doi:10.3847/1538-4357/acdc1b [arXiv:2212.06810 [astro-ph.HE]].
20. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Searches for Neutrinos from Large High Altitude Air Shower Observatory Ultra-high-energy γ -Ray Sources Using the IceCube Neutrino Observatory," *Astrophys. J. Lett.* **945** (2023) no.1, L8 doi:10.3847/2041-8213/acb933 [arXiv:2211.14184 [astro-ph.HE]].
21. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Constraints on Populations of Neutrino Sources from Searches in the Directions of IceCube Neutrino Alerts," *Astrophys. J.* **951** (2023) no.1, 45 doi:10.3847/1538-4357/acd2ca [arXiv:2210.04930 [astro-ph.HE]].
- 2022
22. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068," *Science* **378** (2022) no.6619, 538-543 doi:10.1126/science.abg3395 [arXiv:2211.09972 [astro-ph.HE]].
23. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Graph Neural Networks for low-energy event classification & reconstruction in IceCube," *JINST* **17** (2022) no.11, P11003 doi:10.1088/1748-0221/17/11/P11003 [arXiv:2209.03042 [hep-ex]].
24. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "IceCube Search for Neutrinos Coincident with Gravitational Wave Events from LIGO/Virgo Run O3," *Astrophys. J.* **944** (2023) no.1, 80 doi:10.3847/1538-4357/aca5fc [arXiv:2208.09532 [astro-ph.HE]].
25. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Search for Astrophysical Neutrinos from 1FLE Blazars with IceCube," *Astrophys. J.* **938** (2022) no.1, 38 doi:10.3847/1538-4357/ac8de4 [arXiv:2207.04946 [astro-ph.HE]].
26. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Searching for High-energy Neutrino Emission from Galaxy Clusters with IceCube," *Astrophys. J. Lett.* **938** (2022) no.2, L11 doi:10.3847/2041-8213/ac966b [arXiv:2206.02054 [astro-ph.HE]].
27. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Searches for connections between dark matter and high-energy neutrinos with IceCube," *JCAP* **10** (2023), 003 doi:10.1088/1475-7516/2023/10/003 [arXiv:2205.12950 [hep-ex]].

28. R. Abbasi *et al.* [IceCube and Fermi Gamma-ray Burst Monitor], "Searches for Neutrinos from Gamma-Ray Bursts Using the IceCube Neutrino Observatory," *Astrophys. J.* **939** (2022) no.2, 116 doi:10.3847/1538-4357/ac9785 [arXiv:2205.11410 [astro-ph.HE]].
29. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Framework and tools for the simulation and analysis of the radio emission from air showers at IceCube," *JINST* **17** (2022) no.06, P06026 doi:10.1088/1748-0221/17/06/P06026 [arXiv:2205.02258 [astro-ph.HE]].
30. R. Abbasi *et al.* (IceCube Collaboration), "Search for Unstable Sterile Neutrinos with the IceCube Neutrino Observatory," *Phys. Rev. Lett.* **129** (2022) no.15, 15 doi:10.1103/PhysRevLett.129.151801 [arXiv:2204.00612 [hep-ex]].
31. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Low energy event reconstruction in IceCube DeepCore," *Eur. Phys. J. C* **82** (2022) no.9, 807 doi:10.1140/epjc/s10052-022-10721-2 [arXiv:2203.02303 [hep-ex]].
32. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Search for High-energy Neutrino Emission from Galactic X-Ray Binaries with IceCube," *Astrophys. J. Lett.* **930** (2022) no.2, L24 doi:10.3847/2041-8213/ac67d8 [arXiv:2202.11722 [astro-ph.HE]].
33. R. Abbasi *et al.* (IceCube Collaboration), "Density of GeV muons in air showers measured with IceTop," *Phys. Rev. D* **106** (2022) no.3, 032010 doi:10.1103/PhysRevD.106.032010 [arXiv:2201.12635 [hep-ex]].
34. A. Albert *et al.* [IceCube, Pierre Auger, Telescope Array, Auger and ANTARES], "Search for Spatial Correlations of Neutrinos with Ultra-high-energy Cosmic Rays," *Astrophys. J.* **934** (2022) no.2, 164 doi:10.3847/1538-4357/ac6def [arXiv:2201.07313 [astro-ph.HE]].
35. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Strong Constraints on Neutrino Nonstandard Interactions from TeV-Scale ν_u Disappearance at IceCube," *Phys. Rev. Lett.* **129** (2022) no.1, 1 doi:10.1103/PhysRevLett.129.011804 [arXiv:2201.03566 [hep-ex]].
36. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Search for neutrino emission from cores of active galactic nuclei," *Phys. Rev. D* **106** (2022) no.2, 022005 doi:10.1103/PhysRevD.106.022005 [arXiv:2111.10169 [astro-ph.HE]].
37. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Search for GeV-scale dark matter annihilation in the Sun with IceCube DeepCore," *Phys. Rev. D* **105** (2022) no.6, 062004 doi:10.1103/PhysRevD.105.062004 [arXiv:2111.09970 [astro-ph.HE]].
38. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Search for quantum gravity using astrophysical neutrino flavour with IceCube," *Nature Phys.* **18** (2022) no.11, 1287-1292 doi:10.1038/s41567-022-01762-1 [arXiv:2111.04654 [hep-ex]].
39. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Search for Relativistic Magnetic Monopoles with Eight Years of IceCube Data," *Phys. Rev. Lett.* **128** (2022) no.5, 051101 doi:10.1103/PhysRevLett.128.051101 [arXiv:2109.13719 [astro-ph.HE]].
40. R. Abbasi *et al.* [IceCube], "Search for High-energy Neutrinos from Ultraluminous Infrared Galaxies with IceCube," *Astrophys. J.* **926** (2022) no.1, 59 doi:10.3847/1538-4357/ac3cb6 [arXiv:2107.03149 [astro-ph.HE]].

41. R. Abbasi *et al.* [IceCube], “First all-flavor search for transient neutrino emission using 3-years of IceCube DeepCore data,” *JCAP* **01** (2022), 027 doi:10.1088/1475-7516/2022/01/027 [arXiv:2011.05096 [astro-ph.HE]].
42. R. Abbasi *et al.* [IceCube], “Detection of astrophysical tau neutrino candidates in IceCube,” *Eur. Phys. J. C* **82** (2022) no.11, 1031 doi:10.1140/epjc/s10052-022-10795-y [arXiv:2011.03561 [hep-ex]].
- 2021
43. R. Abbasi *et al.* [IceCube], “Improved Characterization of the Astrophysical Muon–neutrino Flux with 9.5 Years of IceCube Data,” *Astrophys. J.* **928** (2022) no.1, 50 doi:10.3847/1538-4357/ac4d29 [arXiv:2111.10299 [astro-ph.HE]].
44. R. Abbasi *et al.* [IceCube], “Search for Multi-flare Neutrino Emissions in 10 yr of IceCube Data from a Catalog of Sources,” *Astrophys. J. Lett.* **920** (2021) no.2, L45 doi:10.3847/2041-8213/ac2c7b [arXiv:2109.05818 [astro-ph.HE]].
45. R. Abbasi *et al.* (IceCube Collaboration), “All-flavor constraints on nonstandard neutrino interactions and generalized matter potential with three years of IceCube DeepCore data,” *Phys. Rev. D* **104** (2021) no.7, 072006 doi:10.1103/PhysRevD.104.072006 [arXiv:2106.07755 [hep-ex]].
46. R. Abbasi *et al.* [IceCube], “A muon-track reconstruction exploiting stochastic losses for large-scale Cherenkov detectors,” *JINST* **16** (2021) no.08, P08034 doi:10.1088/1748-0221/16/08/P08034 [arXiv:2103.16931 [hep-ex]].
47. R. Abbasi, *et al.* “A Convolutional Neural Network based Cascade Reconstruction for the IceCube Neutrino Observatory,” *JINST* **16** (2021), P07041 doi:10.1088/1748-0221/16/07/P07041 [arXiv:2101.11589 [hep-ex]].
48. R. Abbasi *et al.* [IceCube], “Search for GeV neutrino emission during intense gamma-ray solar flares with the IceCube Neutrino Observatory,” *Phys. Rev. D* **103** (2021) no.10, 102001 doi:10.1103/PhysRevD.103.102001 [arXiv:2101.00610 [astro-ph.HE]].
49. R. Abbasi *et al.* [IceCube], “LeptonInjector and LeptonWeighter: A neutrino event generator and weighter for neutrino observatories,” *Comput. Phys. Commun.* **266** (2021), 108018 doi:10.1016/j.cpc.2021.108018 [arXiv:2012.10449 [physics.comp-ph]].
50. R. Abbasi *et al.* [IceCube], “Follow-up of Astrophysical Transients in Real Time with the IceCube Neutrino Observatory,” *Astrophys. J.* **910** (2021) no.1, 4 doi:10.3847/1538-4357/abe123 [arXiv:2012.04577 [astro-ph.HE]].
51. R. Abbasi *et al.* [IceCube], “A Search for Time-dependent Astrophysical Neutrino Emission with IceCube Data from 2012 to 2017,” *Astrophys. J.* **911** (2021) no.1, 67 doi:10.3847/1538-4357/abe7e6 [arXiv:2012.01079 [astro-ph.HE]].
52. R. Abbasi *et al.* [IceCube], “The IceCube high-energy starting event sample: Description and flux characterization with 7.5 years of data,” *Phys. Rev. D* **104** (2021), 022002 doi:10.1103/PhysRevD.104.022002 [arXiv:2011.03545 [astro-ph.HE]].

53. H. A. Ayala Solares *et al.* [AMON Team, HAWC and IceCube], "Multimessenger Gamma-Ray and Neutrino Coincidence Alerts Using HAWC and IceCube Subthreshold Data," *Astrophys. J.* **906** (2021), 63 doi:10.3847/1538-4357/abcaa4 [arXiv:2008.10616 [astro-ph.HE]].
54. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube-Gen2], "IceCube-Gen2: the window to the extreme Universe," *J. Phys. G* **48** (2021) no.6, 060501 doi:10.1088/1361-6471/abbd48 [arXiv:2008.04323 [astro-ph.HE]].
55. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube], "Measurements of the time-dependent cosmic-ray Sun shadow with seven years of IceCube data: Comparison with the Solar cycle and magnetic field models," *Phys. Rev. D* **103** (2021) no.4, 042005 doi:10.1103/PhysRevD.103.042005 [arXiv:2006.16298 [astro-ph.HE]].
- 2020
56. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube], "Detection of a particle shower at the Glashow resonance with IceCube," *Nature* **591** (2021) no.7849, 220-224 [erratum: *Nature* **592** (2021) no.7855, E11] doi:10.1038/s41586-021-03256-1 [arXiv:2110.15051 [hep-ex]].
57. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube], "Cosmic ray spectrum from 250 TeV to 10 PeV using IceTop," *Phys. Rev. D* **102** (2020), 122001 doi:10.1103/PhysRevD.102.122001 [arXiv:2006.05215 [astro-ph.HE]].
58. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube], "Searching for eV-scale sterile neutrinos with eight years of atmospheric neutrinos at the IceCube Neutrino Telescope," *Phys. Rev. D* **102** (2020) no.5, 052009 doi:10.1103/PhysRevD.102.052009 [arXiv:2005.12943 [hep-ex]].
59. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube], "eV-Scale Sterile Neutrino Search Using Eight Years of Atmospheric Muon Neutrino Data from the IceCube Neutrino Observatory," *Phys. Rev. Lett.* **125** (2020) no.14, 141801 doi:10.1103/PhysRevLett.125.141801 [arXiv:2005.12942 [hep-ex]].
60. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube], "IceCube Search for Neutrinos Coincident with Compact Binary Mergers from LIGO-Virgo's First Gravitational-wave Transient Catalog," *Astrophys. J. Lett.* **898** (2020) no.1, L10 doi:10.3847/2041-8213/ab9d24 [arXiv:2004.02910 [astro-ph.HE]].
61. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube], "IceCube Search for High-Energy Neutrino Emission from TeV Pulsar Wind Nebulae," *Astrophys. J.* **898** (2020) no.2, 117 doi:10.3847/1538-4357/ab9fa0 [arXiv:2003.12071 [astro-ph.HE]].
62. A. Albert *et al.* [ANTARES and IceCube], "Combined search for neutrinos from dark matter self-annihilation in the Galactic Center with ANTARES and IceCube," *Phys. Rev. D* **102** (2020) no.8, 082002 doi:10.1103/PhysRevD.102.082002 [arXiv:2003.06614 [astro-ph.HE]].
63. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube], "In-situ calibration of the single-photoelectron charge response of the IceCube photomultiplier tubes," *JINST* **15** (2020) no.06, 06 doi:10.1088/1748-0221/15/06/P06032 [arXiv:2002.00997 [physics.ins-det]].
64. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube], "Characteristics of the diffuse astrophysical electron and tau neutrino flux with six years of IceCube high energy cascade data," *Phys. Rev. Lett.* **125** (2020) no.12, 121104 doi:10.1103/PhysRevLett.125.121104 [arXiv:2001.09520 [astro-ph.HE]].

65. A. Albert *et al.* [ANTARES and IceCube], “ANTARES and IceCube Combined Search for Neutrino Point-like and Extended Sources in the Southern Sky,” *Astrophys. J.* **892** (2020), 92 doi:10.3847/1538-4357/ab7afb [arXiv:2001.04412 [astro-ph.HE]].
66. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube], “A search for IceCube events in the direction of ANITA neutrino candidates,” doi:10.3847/1538-4357/ab791d [arXiv:2001.01737 [astro-ph.HE]].
67. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube], “Constraints on neutrino emission from nearby galaxies using the 2MASS redshift survey and IceCube,” *JCAP* **07** (2020), 042 doi:10.1088/1475-7516/2020/07/042 [arXiv:1911.11809 [astro-ph.HE]].
68. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube Gen2 and JUNO members], “Combined sensitivity to the neutrino mass ordering with JUNO, the IceCube Upgrade, and PINGU,” *Phys. Rev. D* **101** (2020) no.3, 032006 doi:10.1103/PhysRevD.101.032006 [arXiv:1911.06745 [hep-ex]].
69. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube], “Time-Integrated Neutrino Source Searches with 10 Years of IceCube Data,” *Phys. Rev. Lett.* **124** (2020) no.5, 051103 doi:10.1103/PhysRevLett.124.051103 [arXiv:1910.08488 [astro-ph.HE]].
70. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube], “Design and Performance of the first IceAct Demonstrator at the South Pole,” *JINST* **15** (2020) no.02, T02002 doi:10.1088/1748-0221/15/02/T02002 [arXiv:1910.06945 [astro-ph.IM]].
71. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube], “A Search for Neutrino Point-source Populations in 7 yr of IceCube Data with Neutrino-count Statistics,” *Astrophys. J.* **893** (2020) no.2, 102 doi:10.3847/1538-4357/ab7af9 [arXiv:1909.08623 [astro-ph.HE]].
72. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube], “A Search for MeV to TeV Neutrinos from Fast Radio Bursts with IceCube,” *Astrophys. J.* **890** (2020) no.2, 111 doi:10.3847/1538-4357/ab564b [arXiv:1908.09997 [astro-ph.HE]].
73. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube], “Search for PeV Gamma-Ray Emission from the Southern Hemisphere with 5 Years of Data from the IceCube Observatory,” *Astrophys. J.* **891**, 9 doi:10.3847/1538-4357/ab6d67 [arXiv:1908.09918 [astro-ph.HE]].
74. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube and PICO], “Velocity Independent Constraints on Spin-Dependent DM-Nucleon Interactions from IceCube and PICO,” *Eur. Phys. J. C* **80** (2020) no.9, 819 doi:10.1140/epjc/s10052-020-8069-5 [arXiv:1907.12509 [astro-ph.HE]].
75. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube], “Development of an analysis to probe the neutrino mass ordering with atmospheric neutrinos using three years of IceCube DeepCore data,” *Eur. Phys. J. C* **80** (2020) no.1, 9 doi:10.1140/epjc/s10052-019-7555-0 [arXiv:1902.07771 [hep-ex]].
76. M. G. Aartsen *et al.* [IceCube], “Neutrinos below 100 TeV from the southern sky employing refined veto techniques to IceCube data,” *Astropart. Phys.* **116** (2020), 102392 doi:10.1016/j.astropartphys.2019.102392 [arXiv:1902.05792 [astro-ph.HE]].

2.9.2 Weitere Publikationen mit unmittelbarer Projektrelevanz in Zeitschriften mit Qualitätskontrolle durch Teilnehmer des Projektes

..... 2023

77. P. Eller, A. T. Fienberg, J. Weldert, G. Wendel, S. Böser and D. F. Cowen, "A flexible event reconstruction based on machine learning and likelihood principles," *Nucl. Instrum. Meth. A* **1048** (2023), 168011 doi:10.1016/j.nima.2023.168011 [arXiv:2208.10166 [hep-ex]].
78. J.M. Alameddine, J. Albrecht, H. Dembinski, P. Gutjahr, K.H. Kampert, W. Rhode, M. Sackel, A. Sandrock, J. Soedingrekso, "Improvements in charged lepton and photon propagation for the software PROPOSAL", arXiv preprint arXiv:2311.13357, 2023.
79. G. Schwefer, P. Mertsch and C. Wiebusch, "Diffuse Emission of Galactic High-energy Neutrinos from a Global Fit of Cosmic Rays," *Astrophys. J.* **949** (2023) no.1, 16 doi:10.3847/1538-4357/acc1e2 [arXiv:2211.15607 [astro-ph.HE]].
80. J. Becker Tjus, W. Rhode, "Charmed Galaxies" (2023), EPJWC, 290, 10002. doi:10.1051/epjconf/202329010002
- 2022
81. B. Bastian-Querner, L. S. Binn, S. Böser, J. Brostean-Kaiser, D. Hebecker, K. Helbing, T. Karg, L. Köpke, M. Kowalski and P. Peiffer, *et al.* *Sensors* **22** (2022) no.4, 1385 doi:10.3390/s22041385 [arXiv:2112.12258 [astro-ph.IM]].
82. M. Bachlechner, T. Birkenfeld, P. Soldin, A. Stahl and C. Wiebusch, "Partition pooling for convolutional graph network applications in particle physics," *JINST* **17** (2022) no.10, P10004 doi:10.1088/1748-0221/17/10/P10004 [arXiv:2208.05952 [hep-ex]].
83. J. Becker Tjus, I. Jaroschewski, A. Ghorbanietemad, I. Bartos, E. Kun, and P. L. Biermann, "Neutrino Cadence of TXS 0506+056 Consistent with Supermassive Binary Origin", *The Astrophysical Journal*, vol. 941, no. 2, 2022.
84. J. Becker Tjus, M. Hörbe, I. Jaroschewski, P. Reichherzer, W. Rhode, M. Schroller, F. Schüsler, 2022, "Propagation of Cosmic Rays in Plasmoids of AGN Jets-Implications for Multimessenger Predictions", *Physics*, **4**, 473.
85. Eichmann B., Oikonomou F., Salvatore S., Dettmar R.-J., Becker Tjus J., 2022, *ApJ*, 939, 43. doi:10.3847/1538-4357/ac9588
- 2021
86. C. J. Lozano Mariscal, L. Classen, M. A. Unland Elorrieta and A. Kappes, "Sensitivity of multi-PMT optical modules in Antarctic ice to supernova neutrinos of MeV energy," *Eur. Phys. J. C* **81** (2021) no.12, 1058 doi:10.1140/epjc/s10052-021-09809-y [arXiv:2106.14199 [astro-ph.HE]].
87. M. A. Unland Elorrieta, R. S. Busse, L. Classen and A. Kappes, "Homogeneity of the photocathode in the Hamamatsu Photomultiplier Tube," *JINST* **16** (2021) no.11, P11038 doi:10.1088/1748-0221/16/11/P11038 [arXiv:2109.13868 [physics.ins-det]].
88. T. de Boer, R. Busse, A. Kappes, M. Klasen and S. Zeinstra, "Indirect detection constraints on the scotogenic dark matter model," *JCAP* **08** (2021), 038 doi:10.1088/1475-7516/2021/08/038 [arXiv:2105.04899 [hep-ph]].
89. T. de Boer, R. Busse, A. Kappes, M. Klasen and S. Zeinstra, "New constraints on radiative seesaw models from IceCube and other neutrino detectors," *Phys. Rev. D* **103** (2021) no.12, 123006 doi:10.1103/PhysRevD.103.123006 [arXiv:2103.06881 [hep-ph]].

90. S. Böser, C. Buck, C. Giunti, J. Lesgourgues, L. Ludhova, S. Mertens, A. Schukraft and M. Wurm, "Status of Light Sterile Neutrino Searches," *Prog. Part. Nucl. Phys.* **111** (2020), 103736 doi:10.1016/j.pnpnp.2019.103736 [arXiv:1906.01739 [hep-ex]].
91. M. Hieronymus, B. Schmidt and S. Böser, "Reconstruction of Low Energy Neutrino Events with GPUs at IceCube", In: Krzhizhanovskaya V. et al. (eds) *Computational Science – ICCS 2020. ICCS 2020. Lecture Notes in Computer Science*, vol 12137. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50371-0_9
92. M. Agostini *et al.* [P-ONE], "The Pacific Ocean Neutrino Experiment," *Nature Astron.* **4** (2020) no.10, 913-915 doi:10.1038/s41550-020-1182-4 [arXiv:2005.09493 [astro-ph.HE]].
93. S. Meighen-Berger, M. Agostini, A. Ibarra, K. Krings, H. Niederhausen, A. Rappelt, E. Resconi and A. Turcati, *Phys. Lett. B* **811** (2020), 135929 doi:10.1016/j.physletb.2020.135929 [arXiv:2005.07523 [hep-ph]].
94. F. Henningsen, M. Böhmer, A. Gärtner, L. Geilen, R. Gernhäuser, H. Heggen, K. Holzappel, C. Fruck, L. Papp and I. C. Rea, *et al.* "A self-monitoring precision calibration light source for large-volume neutrino telescopes," *JINST* **15** (2020) no.07, P07031 doi:10.1088/1748-0221/15/07/P07031 [arXiv:2005.00778 [astro-ph.IM]].
95. Weinstock, L., Zierke, S., Eliseev, D., Linder, P., Vollbrecht, C., Heinen, D., and Wiebusch, C. "The Autonomous Pinger Unit of the Acoustic Navigation Network in EnEx-RANGE: An autonomous in-ice melting probe with acoustic instrumentation", *Annals of Glaciology*, 1-10. doi:10.1017/aog.2020.67
96. P. Giommi, P. Padovani, F. Oikonomou, T. Glauch, S. Paiano and E. Resconi, "3HSP J095507.9+355101: a flaring extreme blazar coincident in space and time with IceCube-200107A," *Astron. Astrophys.* **640** (2020), L4 doi:10.1051/0004-6361/202038423 [arXiv:2003.06405 [astro-ph.HE]].
97. J. D. Bray, A. Williamson, J. Schelfhout, C. W. James, R. E. Spencer, H. Chen, B. D. Cropper, D. Emrich, K. M. L. Gould and A. Haungs, *et al.* "The SKA Particle Array Prototype: The First Particle Detector at the Murchison Radio-astronomy Observatory," *Nucl. Instrum. Meth. A* **973** (2020), 164168 doi:10.1016/j.nima.2020.164168 [arXiv:2005.07273 [astro-ph.IM]].
98. D. Heinen P. Linder, S. Zierke, and C. Wiebusch, "An efficient melting probe for glacial research", *Annals of Glaciology*, 1-4. doi:10.1017/aog.2020.28
99. P. Giommi, T. Glauch, P. Padovani, E. Resconi, A. Turcati and Y. L. Chang, "Dissecting the regions around IceCube high-energy neutrinos: growing evidence for the blazar connection," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **497** (2020) no.1, 865-878 doi:10.1093/mnras/staa2082 [arXiv:2001.09355 [astro-ph.HE]].
100. J. Biteau, E. Prandini, L. Costamante, M. Lemoine, P. Padovani, E. Pueschel, E. Resconi, F. Tavecchio, A. Taylor and A. Zech, "Progress in unveiling extreme particle acceleration in persistent astrophysical jets," *Nature Astron.* **4** (2020) no.2, 124-131 doi:10.1038/s41550-019-0988-4 [arXiv:2001.09222 [astro-ph.HE]].

101. D. Rysewyk, D. Lennarz, T. DeYoung, J. Auffenberg, M. Schaufel, T. Bretz, C. Wiebusch and M. U. Nisa, "Atmospheric Cherenkov Telescopes as a Potential Veto Array for Neutrino Astronomy," *Astropart. Phys.* **117** (2020), 102417 doi:10.1016/j.astropartphys.2019.102417 [arXiv:1908.10865 [astro-ph.IM]].
102. J. Becker Tjus, P. Desiati, N. Döpfer, H. Fichtner, J. Kleimann, M. Kroll and F. Tenholt, "Cosmic-ray propagation around the Sun: investigating the influence of the solar magnetic field on the cosmic-ray Sun shadow," *Astron. Astrophys.* **633** (2020), A83 doi:10.1051/0004-6361/201936306 [arXiv:1903.12638 [astro-ph.HE]].

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

Dissertationen

..... 2023

1. Leonora Kardum, *Unfolding the muon neutrino flux*, TU Dortmund, Germany, December 2023
2. Martin Antonio Unland Elorrieta, *Development, simulation, and characterisation of a novel multi-PMT optical module for IceCube Upgrade with emphasis on detailed understanding of photomultiplier performance parameters*, Universität Münster, Juli 2023
3. Alexander Luke Kyriacou, *Permittivity reconstruction and radio-propagation simulations to guide sub-surface radar exploration of ice*, Universität Wuppertal, August 2023
4. Mirco Hünnefeld, *Observation of High Energy Neutrinos from the Milky Way*, TU Dortmund, June 2023
5. Cristian Jesus Lozano Mariscal, *Ice calibration studies for IceCube Upgrade with multi-PMT optical modules, and studies of the sensitivity of future IceCube extensions to astrophysical neutrinos in the MeV and GeV range*, Universität Münster, Mai 2023
6. Raffaella Busse, *Exploring Neutrino Production in the Scotogenic Dark Matter Model and Testing it with Data from the IceCube Neutrino Observatory*, Universität Münster, Januar 2023
7. Elisa Lohfink, *Testing nonstandard neutrino interaction parameters with IceCube-DeepCore*, JGU Mainz, Januar 2023

..... 2022

8. Jan Weldert, *Likelihood-free inference for IceCube low energy reconstruction* JGU Mainz, Germany, October 2022
9. Roxanne Turcotte-Tardif, *Radio Measurements of Cosmic Rays at the South Pole*, KIT, Germany, October 2022
10. Simone Garappa, *Gamma-ray blazars as candidate sources of high-energy neutrinos*, HU Berlin, Germany, September 2022

11. Patrick Reichherzer, *Consideration of real-time effects for improved coordination of multi-messenger campaigns*, RU Bochum, Germany, July 2022
12. Alexander Fritz, *Kernkollaps-Supernovae: Eine Suche mit dem IceCube Neutrino-Observatorium* JGU Mainz, Germany, Juni 2022
13. Martina Karl, *Unraveling the origin of high-energy neutrino sources: follow-up searches of IceCube alert events*, TU Munich, Germany, May 2022
..... 2021
14. Felix Henningsen, *The self-monitoring precision calibration light source for the IceCube Upgrade* TU Munich, Germany, December 2021.
15. Robert Stein, *Search for Multi-Messenger Transients with IceCube and ZTF* HU Berlin, Germany, November 2021.
16. Marie Johanna Oehler, *The Prototype Station for the IceCube Surface Array Enhancement*, KIT Karlsruhe, October 2021, <https://doi.org/10.5445/IR/1000142813>
17. Frederik Lauber, *Search for Low Relativistic Magnetic Monopoles at the IceCube Neutrino Observatory*, U Wuppertal, Germany, September 2021 DOI: 10.25926/gph1-vf51 <http://elpub.bib.uni-wuppertal.de/servlets/DocumentServlet?id=15462>
18. Jan Soedingrekso, *Systematic Uncertainties of High Energy Muon Propagation using the Leptonpropagator PROPOSAL*, TU Dortmund Jul 2021
19. Lisa Johanna Schumacher, *Search for the common sources of high-energy cosmic neutrinos and ultra-high-energy cosmic rays*, RWTH Aachen, Germany, April 2021 DOI: 10.18154/RWTH-2021-04560 <https://publications.rwth-aachen.de/record/818667>
20. Federica Bradascio, *Searches for cross-correlations between IceCube neutrinos and Active Galactic Nuclei selected in various bands of the electromagnetic spectrum* HU Berlin, Germany, April 2021.
21. Stephan Meighen-Berger, *Precision background modeling for neutrino telescopes* TU Munich, Germany, April 2021.
22. Theo Glauch *The Origin of High-Energy Cosmic Particles: IceCube Neutrinos and the Blazar Case*, TU München, Germany, Februar 2021
23. Jöran Stettner *Measurement of the energy spectrum of astrophysical Muon-Neutrinos with the IceCube Observatory* RWTH Aachen, Germany, Januar 2021. DOI: 10.18154/RWTH-2021-01139 <https://publications.rwth-aachen.de/record/811376/files/811376.pdf>
..... 2020
24. Joakim Sandroos, *Unfolding the atmospheric neutrino flux using the IceCube/DeepCore neutrino telescope*, Doktorarbeit, Mainz, Nov 2020
25. Mario Hörbe *High-Energy Particle Emission from Plasmoids in Jets of Active Galactic Nuclei*, RU Bochum, Germany

26. Thomas Kittler *Simulation and Reconstruction of Muon Tracks with the multi-PMT Digital Optical Module in Comparison to the PINGU Digital Optical Module for the IceCube-Gen2 High-Energy Array*, FAU Erlangen-Nürnberg, Germany, Aug 2020
27. Thomas Huber, *IceScint: A Scintillation Detector Array for the Icecube Surface Enhancement*, KIT, Germany, Jul 2020
28. Matthias Huber, *Multi-Messenger correlation study of Fermi-LAT blazars and high-energy neutrinos observed in IceCube*, TU München, Germany, Jul 2020

Master Arbeiten

..... 2023

1. Joëlle Savelberg, *The Integration and Calibration of the Acoustic Module for the IceCube Upgrade*, RWTH Aachen, Dezember 2023
2. Silvia Latseva, *Background Rejection for the Search for Sub-Relativistic Magnetic Monopoles in IceCube*, RWTH Aachen, November 2023
3. Lea Schlickmann, *Commissioning and Testing of IceAct Imaging Air Cherenkov Telescopes for IceCube*, RWTH Aachen November 2023
4. Oliver Gries, *On the geometry calibration with Acoustic Modules for the IceCube Upgrade*, RWTH Aachen November 2023
5. Oliver Janik, *Using Adversarial Attacks to Fool IceCube's Deep Neural Networks*, RWTH Aachen Oktober 2023
6. Tara Haji Azim, *Investigation of Correlated Noise-Events during Acceptance Testing of the mDOM PMTs for the IceCube Upgrade*, RWTH Aachen November 2023
7. Adam Rifaie, *Time synchronization of the Acoustic Modules for the IceCube Upgrade*, RWTH Aachen Oktober 2023
8. Matthias Thiesmeyer, *Application of an Evolutionary Algorithm for the Binning Optimization of the Likelihood Analysis of Astrophysical Muon Neutrinos with IceCube*, RWTH Aachen Oktober 2023
9. Charlotte Benning, *Verification Testing of the Acoustic Module for the IceCube Upgrade*, RWTH Aachen Oktober 2023
10. Sharif El Mentawi, *Exploring the joint detection of neutrinos and gravitational waves from short gamma-ray bursts with IceCube-Gen2 and the Einstein Telescope*, RWTH Aachen Oktober 2023
11. Shuyang Deng, *Twelve Years Observation of Seasonal Variations of the Atmospheric Neutrino Flux with IceCube*, RWTH Aachen, Oktober 2023
12. Annika Wolf, *Simulation studies of the sensitivity of IceCube for slow magnetic monopoles*, RWTH Aachen, September 2023

13. Kaustav Dutta, *Intrinsic Resolution Limits in Low Energy Events with IceCube Upgrade and DeepCore*, JGU Mainz, September 2023
14. Ludwig Neste, *Prompt Atmospheric Muons: An Analysis Concept with IceCube*, TU Dortmund, September 2023
15. Willem Achtermann, *Replication of a photomultiplier in COMSOL Multiphysics to study PMT performance parameters for the mDOM in IceCube*, Universität Münster, Juli 2023
16. Johannes Kollek, *Point Source Search for a Neutrino Contribution at Neutrino Alert Positions*, TU Dortmund, June 2023
17. Andreas Robert Nöll, *Construction, Characterization, and Optimization of IceAct Imaging Air Cherenkov Telescopes*, RWTH Aachen, April 2023
18. Janina Bolles, *Unfolding the Cosmic Ray Energy Spectrum Using Stopping Muons in IceCube*, TU Dortmund, March 2023
19. Mark Meyers, *Feature extraction and image analysis for the IACTs HAWC's Eye and IceAct*, RWTH Aachen Januar 2023
- 2022
20. Noah Goehlke, *An IceCube Surface Array Enhancement station for the deployment at Telescope Array*, KIT, November 2022
21. Jonas Hellrung, *Studien zur Messung des galaktischen und extra-galaktischen Flusses astrophysikalischer Myonenneutrinos*, RWTH Aachen Oktober 2022
22. Georg Schwefer, *Model Improvements and Sensitivity Study towards detecting High-Energy Neutrinos from the Galaxy*, RWTH Aachen, April 2022
23. Francisco Javier Vara Carbonell, *Gel pad sensitivity studies and muon reconstruction in a water basin in Geant4 for IceCube multi-PMT optical modules*, Universität Münster, April 2022
24. Christian Dappen, *Search for Sub-relativistic Magnetic Monopoles in IceCube*, RWTH Aachen, Januar 2022
- 2021
25. Berit Schlüter, *Setup and commissioning of an ellipsometer for the investigation of photocathodes of photomultiplier tubes*, Universität Münster, Dezember 2021
26. Lucas Witthaus, *Unfolding the atmospheric muon spectrum using stopping muons in IceCube*, TU Dortmund December 2021
27. Lilly Peters, *Constraining generalized Dark Matter-Nucleon Interactions based on Dark Matter Capture in the Sun with IceCube*, RWTH Aachen, October 2021.
28. Hannah Erpenbeck, *Seasonal Variations of the Atmospheric Neutrino Flux Measured by IceCube*, RWTH Aachen, September 2021.
29. Tobias Andreas Pertl, *Development and characterization of IceCube Upgrade calibration instrumentation*, TU Munich, September 2021.

30. Sally-Ann Browne, *Studies of the muon content in extensive air showers with the IceCube/IceTop surface array*, KIT Karlsruhe, September 2021.
31. Mark Weyrauch, *Simulation Study for the IceCube-Gen2 Surface Array*, KIT Karlsruhe, August 2021.
32. Jan-Henrik Schmidt-Dencker, *Constraining New, Heavy, Long-Lived Charged Particles using the IceCube Neutrino Observatory*, TU Munich, July 2021.
33. Marcel Schroller, *Simulating Hadronic Signatures from Jets of Supermassive Binary Black Holes*, Ruhr-Universität Bochum, June 2021
34. Maximilian Sackel, *First electromagnetic interaction model in CORSIKA8 using the Monte Carlo simulation tool PROPOSAL*, TU Dortmund June 2021
35. Johan Wulff, *Analysis of the Energy-Dependent Cosmic-Ray Moon and Sun Shadows with IceCube Data*, Ruhr-Universität Bochum, June 2021
36. Pascal Gutjahr, *Study of muon deflection angles in the TeV energy range with IceCube*, TU Dortmund, May 2021
37. Philipp Fürst, *Improving the sensitivity of the astrophysical neutrino flux measurement in IceCube: Energy estimation and uncertainties*, RWTH Aachen, März 2021.
38. Daniel Suárez García, *Modeling of a multi-PMT optical sensor for IceCube-Gen2 in GEANT4 and Monte Carlo studies to optimize its sensitivity*, Universität Münster, März 2021
39. Franziska Maria Tischbein, *Investigation of the Performance and Data Quality of the IceAct Telescopes*, RWTH Aachen, Feb. 2021.
40. Pablo Ruiz Cuevas, *Investigation of Deep-learning algorithms for the identification of tau-neutrino signatures in IceCube*, TU Munich, Feb. 2021.
- 2020
41. Karolin Hymon, *Measurements of seasonal variations of the unfolded atmospheric neutrino spectrum with IceCube*, RU Bochum, Dec 2020
42. Sebastian Schindler, *Comparison of Directional Reconstruction Algorithms of Muons using the Moon Shadow in IceCube*, Fau Erlangen-Nürnberg, Nov. 2020.
43. Yuriy Popovych, *Development of testing procedures for the optical and electronic components of the IceAct Air Cherenkov Telescopes*, RWTH Aachen, Nov. 2020.
44. Simon Hauser, *Measurement of Seasonal Variations of the Atmospheric Neutrino Flux with IceCube using an Unbinned Likelihood*, RWTH Aachen, Oct. 2020.
45. Sukeerthi Dharani, *Search for Sub-Relativistic Magnetic Monopoles in Icecube*, RWTH Aachen, Oct. 2020.
46. Maximilian Bubeck, *Development of a Wavelength-shifting Optical Module*, Mainz, Oct 2020
47. Anja Jessica Schmidt, *Mini-IceScint: Scintillation detectors with SiPM readout for the measurement of cosmic muons in the advanced physics lab course*, KIT, Oct 2020.

48. Maximilian Karl Scharf, *On the Performance of an Acoustic Geometry Calibration System for the IceCube Upgrade*, RWTH Aachen, Sep. 2020.
49. Ilja Jaroschewski, *Investigation of neutrino emission from supermassive black hole mergers and starburst galaxies*, RU Bochum, Jul 2020
50. Oliver de Bruijn, *Determining the temporal correlation between gravitational wave and neutrino emission due to the spin-flip phenomenon in supermassive black hole binaries*, RU Bochum, Jul 2020

Bachelor Arbeiten

..... 2023

1. Moritz Robin Strauß, *Detaillierte Modellierung von Absorption im Wellenlängenschiebenden Optischen Modul (WOM)*, JGU Mainz, September 2023
2. Lasse Düser, *Directional Reconstruction of Air Shower Images using Graph Convolutional Networks for the Imaging Air Cherenkov Telescope IceAct*, RWTH Aachen, September 2023
3. Rosalinde van Monsjou, *Data Analysis of the IceAct Telescopes with Respect to Light Pollution Caused by Atmospheric LIDAR Measurements at the South Pole*, RWTH Aachen, September 2023
4. Tobias Kramer, *Study of Seasonal Variations of Atmospheric Neutrinos in Icecube Using an ECMWF Based Atmospheric Model*, RWTH Aachen, Juli 2023
5. Laura Lehmann, *Energy calibration of the scintillation detectors of the IceCube Surface Array Enhancement*, KIT Juni 2023, ETP-Bachelor-KA/2023-09
6. Lydia von der Weiden, *Bau und Charakterisierung der pico-Sekunden Pulser und Lichtsysteme für die PMT-Acceptance Tests des IceCube Upgrade*, TU Dortmund, March 2023
7. Philipp Fein, *Local Muon Density Measurements in Particle Air Showers with IceCube / IceTop*, KIT März 2023, ETP-Bachelor-KA/2023-11
8. Thomas Lobmaier, *Hexagonal Convolutional Neural Networks for Cosmic-Ray Air-Shower Reconstruction at IceCube*, KIT Februar 2023, ETP-Bachelor-KA/2023-01
9. Lars Schmidt, *Untersuchungen der wellenlängenabhängigen Photo-Detektions-Effizienz der Photomultiplier für die mDOMs des IceCube Upgrades*, RWTH Aachen, Januar 2023
10. Erik Büchau, *Untersuchung der wellenlängenabhängigen Photodetektionseffizienz der Photomultiplier der mDOMs des IceCube Upgrades*, RWTH Aachen, Januar 2023
11. Leon Hamacher, *Rekonstruktion von Luftschaubildern mit Hexagonal Convolutional Neural Networks für IceAct*, RWTH Aachen, Januar 2023
12. Till Baden, *Rekonstruktion von Luftschaubildern mit Graph Convolutional Neural Networks für IceAct*, RWTH Aachen, Januar 2023
13. Yann Ebling, *Determination of c-axes of birefringent crystals using a rotational sample stage*, JGU Mainz, Januar 2023

14. Dominik Wirtz *Untersuchung zum Ladeverhalten der Kondensatorbänke des Akustik-Moduls für das IceCube Upgrade*, RWTH Aachen, Dezember 2022
15. Philipp Behrens, *Untersuchungen korrelierter Rauschsignale von Photomultipliern im PMT Messplatz für das IceCube Upgrade*, RWTH Aachen, September 2022
16. Paul Zimmer, *Testmessungen mit den akustischen Empfängern der pDOMs des IceCube Upgrades*, RWTH Aachen, September 2022
17. Katarina Winkler, *Untersuchungen von adversarial attacks auf ML basierte Spurrekonstruktionen in IceCube*, RWTH Aachen, September 2022
18. Nicolai Weitkemper, *Ordinal Classification with Neural Networks in DSEA*, TU Dortmund, September 2022
19. Samuel Haefs, *Lösung inverser Probleme: Entfaltung von Energiespektren mit neuronalen Netzen mit DSEA*, TU Dortmund, August 2022
20. Janis Averbeck, *Nachbau eines Photomultipliers in COMSOL Multiphysics ® und Untersuchung der Elektronenrajektorien zwischen Photokathode und erster Dynode*, Universität Münster, August 2022
21. Luca Bau, *Design of a lab experiment to characterize the stress-optical properties of ice*, JGU Mainz, July 2022
22. Jonathan Meßner, *High-energy atmospheric muons with IceCube-Gen2*, KIT Juli 2022, ETP-Bachelor-KA/2022-10
23. Martin Schönfeld, *PROPOSAL-Simulationsstudien zur Myographie in stillgelegten Bergbaustollen*, TU Dortmund, May 2022
24. Maja Freienhofer, *Vermessen der Referenz-PMTs und Bestimmen der Lichtverteilung im Teststand für die mDOM-PMTs des IceCube-Upgrades in Dortmund*, TU Dortmund, May 2022
25. Anna-Sophia Tenbruck, *Implementation von LEDs in eine Geant4-Simulation des mDOM-Sensors für das IceCube Upgrade und Simulationsstudien zu deren Emissionsprofil*, Universität Münster, April 2022
26. Jonas Hümmrich, *Optisch aktive wellenlängenschiebende Beschichtungen*, JGU Mainz, Februar 2022
27. Patrick Schaile, *Blazar Stacking - Sensitivity Analysis for IceCube Neutrino Observatory*, TU Munich, Germany, 2022
28. Kristian Tchiorniy, *The Search for High Energy Neutrino Sources at the IceCube Neutrino Observatory: Interplay Between Diffuse and Sub-Threshold Signal*, TU Munich, Germany, 2022
29. Alexandra Scholz, *Dark Matter Annihilation in NGC 1068*, TU Munich, Germany, 2022
30. Andreas Willeke, *Search for High Energy Neutrinos from Supernova iPTF 14hls*, RU Bochum, Germany, Februar 2022

31. Kyra Mossel, *Vertieftes Verständnis der Zeitantwort des Wellenlängenschiebenden Optischen Moduls (WOM)*, JGU Mainz, Januar 2022
 2021
32. Janus Gurth *Optimization of a graph neural network for IceCube DeepCore reconstruction*, TU Munich, Dec. 2021
33. Matthias Moser, *Study of the Radio Emission Frequency Spectra of Cosmic-Ray Air Showers with the IceCube Surface Enhancement Prototype Station*, KIT Dezember 2021, ETP-Bachelor-KA/2021-14
34. Hendrik Pfau, *Studies of Air-Showers Muons with IceCube-Gen2*, KIT November 2021, ETP-Bachelor-KA/2021-16
35. Maximilian Thiel, *Simulating the Supernova-Sensitivity of the Wavelength-Shifting Optical Module*, JGU Mainz, Oktober 2021
36. Kristian Tchiorniy *The Search for High Energy Neutrino Sources at the IceCube Neutrino Observatory: Interplay Between Diffuse and Sub-Threshold Signal*, TU Munich, October 2021
37. Tobias Kerscher *Investigation of Machine Learning Algorithms to Predict the Synchrotron Peak of Blazars*, TU Munich, October 2021
38. Nick Schmeißer *Simulation neuer Sensoren zur Detektion exotischer Teilchen in IceCube Gen2*, U Wuppertal, Sep. 2021
39. Joëlle Savelberg *Charakterisierung von Referenz-Photomultipliern für die Akzeptanzprüfung von PMTs für die mDOMs des IceCube Upgrades*, RWTH Aachen, Sep.2021
40. Ines Bahloul, *Aufbau und Inbetriebnahme eines Messstandes zur Untersuchung der wellenlängenabhängigen optischen Eigenschaften von Komponenten des mDOM-Sensors*, Universität Münster, September 2021
41. Konstantin Mrozik, *Feasibility Study for a Deep Learning Based Muon-Neutrino Selection in IceCube*, TU Dortmund August 2021
42. Lars Bollmann, *Validation of simulated electromagnetic air showers in CORSIKA 8*, TU Dortmund, August 2021
43. Cengiz Kuruoglu *Bau und Test eines Luft-Cherenkov-Teleskops für das IceAct-Projekt*, RWTH Aachen, Aug 2021
44. Silvia Latseva *Analyse der IceAct-Daten im Lichte der Messungen der Südpol-Wetterstation*, RWTH Aachen, Aug. 2021
45. Oliver Janik *Untersuchungen zum Einfluss von atmosphärischen Bedingungen auf das IceAct-Teleskop am Südpol*, RWTH Aachen, Aug. 2021
46. Elias Buunk *Parameterstudie des Emissionsspektrums der Seyfert-Starburst-Galaxie NGC 1068*, Aug 2021
47. David Brielbeck, *Using Neural Networks to support in reconstructing Events in IceCube*, JGU Mainz, Juli 2021

48. Lea Schlickmann, *Zeitantwort des Wellenlängenschiebenden Optischen Moduls (WOM)*, JGU Mainz, Juli 2021
49. David Rech, *Characterisation of the Data Acquisition System for the Radio Antennas of the IceCube Surface Array Enhancement*, KIT July 2021, ETP-Bachelor-KA/2021-10
50. Tim Kopka, *Parameter-space studies of Dark Matter annihilations in the Sun in the scotogenic minimal model*, Universität Münster, Juni 2021
51. Anna Eimer, *Measurement of PMT dark rates for the IceCube mDOM*, Fau Erlangen-Nürnberg, Mai 2021.
52. Ömer Nuhoglu, *Characterisation of the Data Acquisition System of the IceCube Surface Detector Enhancement*, KIT May 2021, ETP-Bachelor-KA/2021-09
53. Kruteesh Desai *Solar Atmospheric High Energy Neutrinos and SACSIm*, TU Munich, March 2021
54. Jan Phillip Jäkel, *Ordinal Classification in DSEA*, TU Dortmund, February 2021
55. Charlotte Benning *Test der Linearität der Photomultiplier für das mDOM des IceCube Upgrades*, RWTH Aachen, Feb. 2021
56. Moritz Schlechtriem, *Simulationsstudien zum Einfluss der Modulaufhängung auf die Photon-Sensitivität des mDOM-Sensors im IceCube Upgrade*, Universität Münster, Januar 2021
..... 2020
57. Fynn Peters, *Studien zur Wellenlängenabhängigkeit von Performance-Parametern von Photomultipliern des Typs Hamamatsu R12199-01HA*, Universität Münster, Dezember 2020
58. Andreas Nöll, *Test of the Mini-Mainboard for the Acoustic Module of the IceCube Upgrade*, RWTH Aachen, Dec 2020.
59. Yannick Hartych, *Berechnung des diffusen Neutrinoflusses von kompakten aktiven Galaxien*, RU Bochum, Oct 2020.
60. Marco Scheiter, *Messungen der relativen Photodetektionseffizienz von Photomultipliern für das IceCube Upgrade Projekt*, RWTH Aachen, Sep 2020.
61. Jonas Reimann, *Simulationen zur Messung von Luftschauern mit dem IceAct Luft-Tschrenkov-Teleskop*, RWTH Aachen, Aug 2020.
62. Leon Korr, *Aufbau eines Messplatzes zur optischen Kalibration der IceAct Teleskope*, RWTH Aachen, Aug 2020.
63. Anthony Achtermann, *Inbetriebnahme des Teststandes und Untersuchung der Pulscharakteristik der Photomultiplier für die mDOMs des IceCube Upgrades*, RWTH Aachen, Jul 2020.
64. Hannah Smets, *Inbetriebnahme des Teststandes und Dunkelratenmessung für das mDOM des IceCube Upgrades*, RWTH Aachen, Jul 2020.
65. Sandra Borzek, *Inbetriebnahme des Teststandes und Dunkelratenmessung für das mDOM des IceCube Upgrades*, RWTH Aachen, Jul 2020.

66. Anna Magdalena Schubert, *Limits on Astrophysical Neutrino Emission from IceCube Alert Positions*, TU München, Jul 2020
67. Leonard Geilen, *Development of a fully-automated calibration system for IceCube Upgrade flasher instrumentation*, TU Munich, Jul 2020

Kurzbericht

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger: Universität Münster

Projektleitung: Prof. Dr. Alexander Kappes

Verbund: IceCube

Thema: Astroteilchenphysik mit dem IceCube-Observatorium

1. Ziel und Inhalt des Projektes

Das IceCube Neutrino Observatorium, installiert im tiefen antarktischen Eis am Südpol, ist mit seinem 1 km³ instrumentierten Eises weiterhin das sensitivste Teleskop für die Detektion hochenergetischer Neutrinos und läuft seit seiner Fertigstellung im Jahr 2011 mit einer Uptime von über 99%. Neutrinos werden mit über 5000 hochempfindlichen optischen Sensoren detektiert und rekonstruiert, die das Cherenkov-Licht von in Neutrino-Wechselwirkungen entstehenden geladenen Teilchen aufzeichnen. Ziel des Projektes war es, die Fähigkeiten des IceCube-Detektors sowohl hinsichtlich der Astronomie mit Neutrinos, insbesondere auch im Hinblick auf die Vernetzung mit anderen Instrumenten weltweit, sowie der Erforschung der Eigenschaften von Neutrinos weiter auszubauen. Des Weiteren stand die Entwicklung von innovativen Sensoren für die zur Installation 2025/26 vorgesehene Detektorerweiterung IceCube Upgrade sowie weitere zukünftige Detektorerweiterungen im Mittelpunkt. IceCube Upgrade wird dabei die Fähigkeiten von IceCube bei Energien unterhalb von ca. 10 GeV deutlich erweitern (z.B. Neutrino-Oszillationen, Unitarität der Neutrino-Mischungsmatrix) aber auch wesentlich zur Verbesserung der Kalibration des gesamten Detektors beitragen.

In Münster waren wir federführend an der Finalisierung des Designs des mDOM-Sensors für IceCube Upgrade beteiligt und haben in der Serienproduktion der insgesamt 430 Sensoren die Montage der Haltestrukturen übernommen. Basierend auf den Erfahrungen mit dem mDOM-Design hat die Gruppe in Münster zudem wichtige Beiträge zur Entwicklung des LOM-Sensors für zukünftige Detektorerweiterungen hin zu hohen Energien geleistet. Des Weiteren haben wir detaillierte Untersuchungen an PMTs durchgeführt und die optischen Eigenschaften anderer Sensorkomponenten vermessen, was wesentlich zu der weiteren Verbesserung der Detektorsensitivität beitragen wird. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten in Münster war die Methodenentwicklung für die Ereignisselektion und Rekonstruktion mit mDOMs and LOMs sowie zur Kalibration des Eises mit mDOMs. Ebenso wurde eine Analyse von IceCube-Daten hinsichtlich Neutrino-Signalen von der Sonne von dunkler Materie durchgeführt.

2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Der erstmalige Nachweis von hochenergetischen Neutrinos erfolgt im Jahr 2013 mit dem IceCube-Detektor, gefolgt vom ersten überzeugenden Hinweis auf eine individuelle kosmische Quelle hochenergetischer Neutrinos (TXS0506+056) in 2017. Im Projektzeitraum konnte dann schließlich erstmals eine punktförmige Quelle alleine mit Neutrinos (NGC1068, 2022) identifiziert und ein diffuser Neutrinofluss aus der galaktischen Ebene (2023) gemessen werden. Auf dem Gebiet der Neutrinooszillation konnten die Unsicherheiten auf die Oszillationsparameter atmosphärischer Neutrinos mit der DeepCore-Erweiterung weiter

verbessert werden, so dass sie mit den Ergebnissen dedizierter Oszillationsexperimente konkurrenzfähig sind. Die Suche nach Punktquellen wurde mit innovativen Methoden, federführend in Deutschland, fortgesetzt. Dabei spielen Suchen nach bestimmten Quellklassen wie Blazare oder Gamma Ray Bursts eine wichtige Rolle. Dies gilt auch für gemeinsame Beobachtungen mit Detektoren für kosmische und elektromagnetische Strahlung in diversen Energiebereichen sowie mit Gravitationswellendetektoren, da auf diese Weise die Aussagekraft von Beobachtungen erhöht werden kann. Die Unsicherheit auf die rekonstruierte Richtung von hochenergetischen Neutrinos konnte weiter reduziert werden.

Alle deutschen Gruppen beteiligten sich entweder an der Entwicklung und/oder Studien zu IceCube Upgrade mit niedriger Energieschwelle oder einer möglichen zukünftigen Hochenergieerweiterung von IceCube. Das Design des in Deutschland entwickelten mDOM-Sensors wurde finalisiert und unter Beteiligung verschiedener deutscher Institute mit der Serienproduktion für die für 2025/26 geplante Installation im Eis am Südpol begonnen. Deutsche Gruppen waren ebenso an der Entwicklung und Produktion von Kalibrationseinheiten für IceCube Upgrade (POCAM), von Veto-Detektoren auf der Eisoberfläche (IceAct und IceScint) sowie eines multi-PMT Moduls (LOM) mit deutlich reduziertem Durchmesser zur Kosten- und CO₂-Ersparnis für zukünftige Hochenergieerweiterungen von IceCube beteiligt.

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

IceCube ist ein einzigartiges Großgerät der Grundlagenforschung. Aus diesem Grund liegt der gesellschaftliche Nutzen, neben dem Erkenntnisgewinn, überwiegend in der exzellenten Ausbildung von Physiker:innen in einem herausfordernden High-Tech-Bereich und in der Entwicklung und Bereitstellung der nötigen innovativen Techniken und Verfahren. IceCube ist hier auf besondere Weise prädestiniert: die harsche Umgebung mit stark eingeschränkten Reparaturmöglichkeiten und Internetzugang sowie der Notwendigkeit energieeffizient zu arbeiten, verlangt eine exzellente Qualitätskontrolle, leistungsoptimierte elektronische Komponenten, die Entwicklung von stromsparenden Verfahren im Computing Bereich und eine sehr gute Fernüberwachung. Die Tatsache, dass der Detektor 99,8% der Zeit rund um die Uhr betrieben werden kann, zeigt den Erfolg dieser Maßnahmen.

Eine weitere Besonderheit ist die starke Vernetzung mit anderen Experimenten, die ihren Ausdruck u.a. in mehreren gemeinsamen Publikationen mit anderen Neutrino-Experimenten und diversen Experimenten der Astronomie und Astroteilchenphysik, von optischen Teleskopen bis hin zu Gravitationswellendetektoren, finden. Zudem findet inzwischen ein intensiver Austausch mit Glaziologen und Klimatologen statt, die durch Publikationen und gemeinsame Treffen dokumentiert sind. In den meisten Fällen sind die entsprechende Kollaborationen in Grundsatzvereinbarungen (MoU's) schriftlich festgelegt. IceCube versendet zudem auch in Echtzeit Nachrichten an die Öffentlichkeit, sobald z.B. Kandidaten für interessante astrophysikalische Neutrinos beobachtet werden.

Bei der mDOM-Entwicklung, an der Münster federführend beteiligt ist, wurde Mitte 2022 die finale Designphase erfolgreich abgeschlossen und im Herbst 2022 mit der Serienproduktion am DESY begonnen. In Münster werden die Haltestrukturen für alle mDOMs montiert. Das mDOM besteht im Gegensatz zu früheren Sensoren aus einer großen Anzahl von kleinen Photomultipliern (multi-PMT Modul). Zum Ende der Entwicklungsphase traten bei Unterdruck und kalten Temperaturen noch Problem mit Ablösungen und Blasen im optischen Gel auf, die aber mit Änderungen am Design der Haltestruktur sowie Optimierung der Fertigungsprozesse gelöst werden konnten. Gleichzeitig wurde die in Münster entwickelte detaillierte Geant4-Simulation des mDOM weiter verfeinert und mit Messungen an vollständigen Modulen kalibriert sowie eine in-situ Methode zur Zeitkalibration der mDOMs entwickelt.

Die bei der mDOM-Entwicklung gesammelten Erfahrungen fließen in die Arbeiten zur Entwicklung eines multi-PMT Modul (LOM) für zukünftige Hochenergieerweiterungen von IceCube ein, mit der im Vorhabenzeitraum begonnen wurde. Das LOM (Durchmesser 12“) muss dabei deutlich schmaler sein als das mDOM (Durchmesser 14“), da zur Kosten, CO₂ und Zeitersparnis die Löcher bei einem großflächigen Detektor deutlich schmaler sein werden. Aufgrund des damit einhergehenden geringen Volumens im Druckbehälter ergeben sich große Herausforderungen, eine größere Anzahl von PMTs zusammen mit der Elektronik und Haltestrukturen unterzubringen. Zur Kostenersparnis wird auf eine Haltestruktur wie beim mDOM verzichtet und mit sogenannten Gelkissen die optische Kopplung der PMTs an den Druckbehälter erzielt. Dies erfordert eine komplett neue Mechanik sowie eine erneute Optimierung der Position und Orientierung der PMTs, zu der Münster wesentliche Beiträge geleistet hat. Ebenso ist Münster einer der führenden Standorte in der Kollaboration zur Charakterisierung von PMTs. Von zwei Herstellern wurden speziell für das LOM 4“ PMTs entwickelt, die in Münster ausführlich getestet wurden. Beide PMT-Typen stellten sich dabei als geeignet für die LOMs heraus. Zum genaueren Verständnis von PMTs haben wir in Münster zudem ein hochdetailliertes Model aus CT Scans eines PMTs in einem Finite-Elemente-Programm (COMSOL Multiphysics) erstellt, mit dem wir die Signalentstehung besser verstehen wollen. Mit einem im Rahmen des Vorhabens selbst gebauten Ellipsometer haben wir begonnen, die optischen Eigenschaften der PMT-Photokathode orts aufgelöst zu untersuchen.

Bei der Analyse hat die Gruppe in Münster in den IceCube-Daten nach Anzeichen der Annihilation von dunkler Materie in der Sonne gesucht und dabei den Parameterraum für bestimmte Dunkle-Materie-Modelle wesentlich einschränken können. Des Weiteren wurden Studien zur Sensitivität von zukünftige Detektorerweiterungen auf niederenergetischer (MeV) Neutrinos von Supernovae durchgeführt. Durch Ausnutzung von lokalen Signalkoinzidenzen innerhalb eines mDOMs bzw. LOMs konnte gezeigt werden, dass sich damit die Sensitivität von IceCube deutlich steigern lässt. Allerdings berücksichtigen diese Studien noch nicht den Untergrund von Myonen, die in der Atmosphäre produziert werden. Dies soll in einem zukünftigen Projekt unter Zuhilfenahme von Machine-Learning (ML) Methoden angegangen werden. Auf ML-Methoden beruht auch ein IceCube-Ereignisgenerator, der in Münster für eine zukünftige Hochenergieerweiterung von IceCube angepasst wurde. Mit Studien zur Auflösung und Rekonstruktion von Ereignissen wurde begonnen.