

IceCube Upgrade / mDOM-Montage

eine Halbzeitbilanz

Matthias Schust

Campus Seminar, DESY Zeuthen, 05.09.2024

Agenda

von IceCube über Upgrade zu Gen2



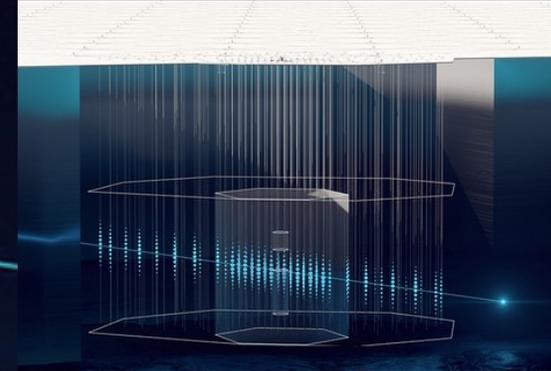
ICECUBE

- Volumen: 1 Kubikkilometer
- Tiefe im Eis: zwischen 1.450 und 2.450 Metern
- 86 Trossen mit 5.160 optischen Sensoren
- 100.000 Neutrino-Detektionen pro Jahr
- Fertigstellung: 2010, seitdem über 150 wissenschaftliche Publikationen



ICECUBE UPGRADE

- Volumen: 1 Kubikkilometer
- im Kern 7 weitere Trossen
- 700 neue optische Sensoren mit optimierter Lichtausbeute
- verbesserte Kalibrationssysteme (optisch und akustisch)
- im Bau; Fertigstellung: 2024



ICECUBE-GEN2

- Volumen: 8 Kubikkilometer
- 120 zusätzliche Trossen mit 12.000 optischen Sensoren
- 1 Million Neutrino-Detektionen pro Jahr
- 5-fach größere Empfindlichkeit
- deutlich erweiterter Energiebereich durch zusätzliches Radio-Array
- Fertigstellung: 2032



IceCube Laboratory
Data is collected here and sent by satellite to the data warehouse at UW-Madison



Digital Optical Module (DOM)
5,160 DOMs deployed in the ice

50 m

Ice Top

1450 m

2450 m

IceCube detector

86 strings of DOMs, set 125 meters apart

DeepCore

Antarctic bedrock

Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica
A National Science Foundation-managed research facility

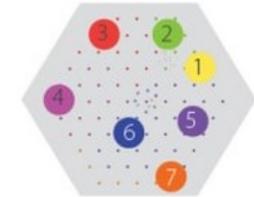


Detector Design

-  1 gigaton of instrumented ice
-  5,160 light sensors, or digital optical modules (DOMs), digitize and time-stamp signals
-  1 square kilometer surface array, IceTop, with 324 DOMs
-  2 nanosecond time resolution
-  IceCube Lab (ICL) houses data processing and storage and sends 100 GB of data north by satellite daily

Detector Construction

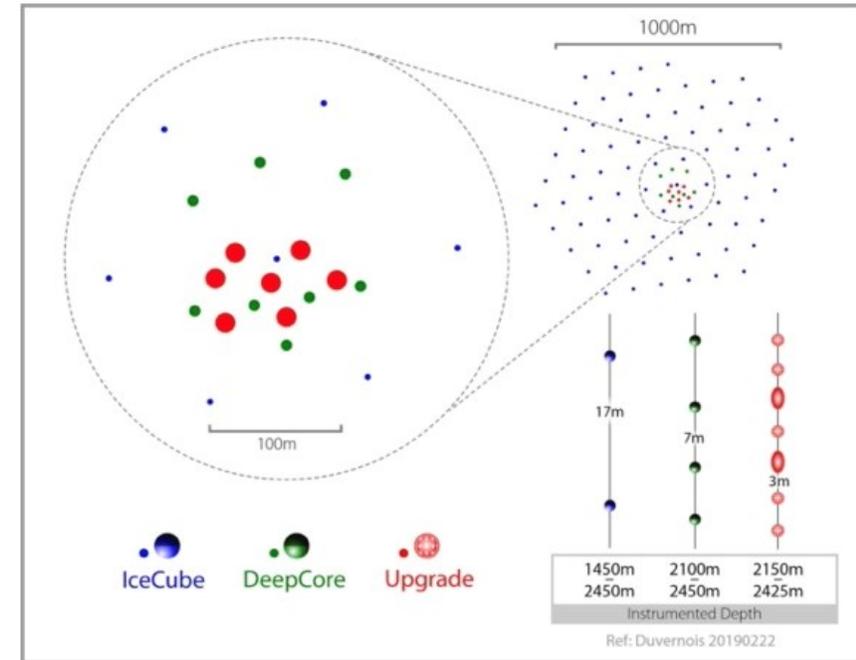
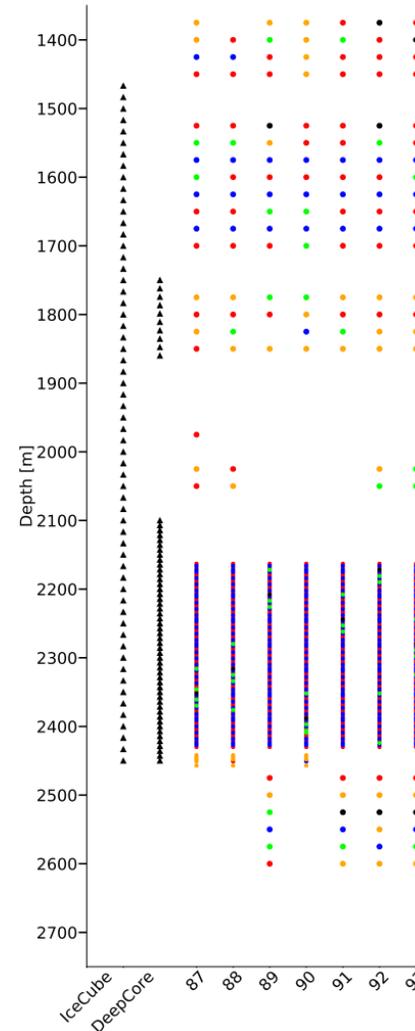
7 seasons of construction, 2004-2011



-  28,000 person-days to complete construction, or 77 years of continuous work
-  2.1 million kilograms of cargo was shipped, 0.5 million of which was the drill
-  48 hours to drill and 11 hours to deploy sensors per hole
-  4.7 megawatts of drill thermal power with 760 liters of water per minute delivered at 88 °C and 7,600 kilopascals

IceCube - Upgrade

- Einbringen neuartiger Module mit verbesserter Raumauflösung (24 Pixel (mDOM) vs. 1 Pixel (DOM)), auch als Erprobungsphase für gen2
- 7 „strings“ mit insgesamt über 800 optischen Modulen
- DESY: 224 mDOMs / Michigan State University (MSU): 200 mDOMs
- Chiba university (Japan): 300 D-Eggs
- weitere Sensoren entwickelt an Universitäten – Kameras, Akustik-Module usw.
- auch stärkere Erforschung der Eis-Charakteristik



- ▲ Gen1-DOM
- mDOM
- DEgg
- pDOM
- Special device
- Calibration device

String	87-88	89-93	TOTAL
mDOMs	116	286	402
D-Eggs	80	197	277
Calibration Devices	12	35	47
Special Devices	19	58	77
Total	227	576	803

Potential von Ugrade vs. gen1

simulierte Niederenergie-Neutrinoevents

event in IceCube Gen1

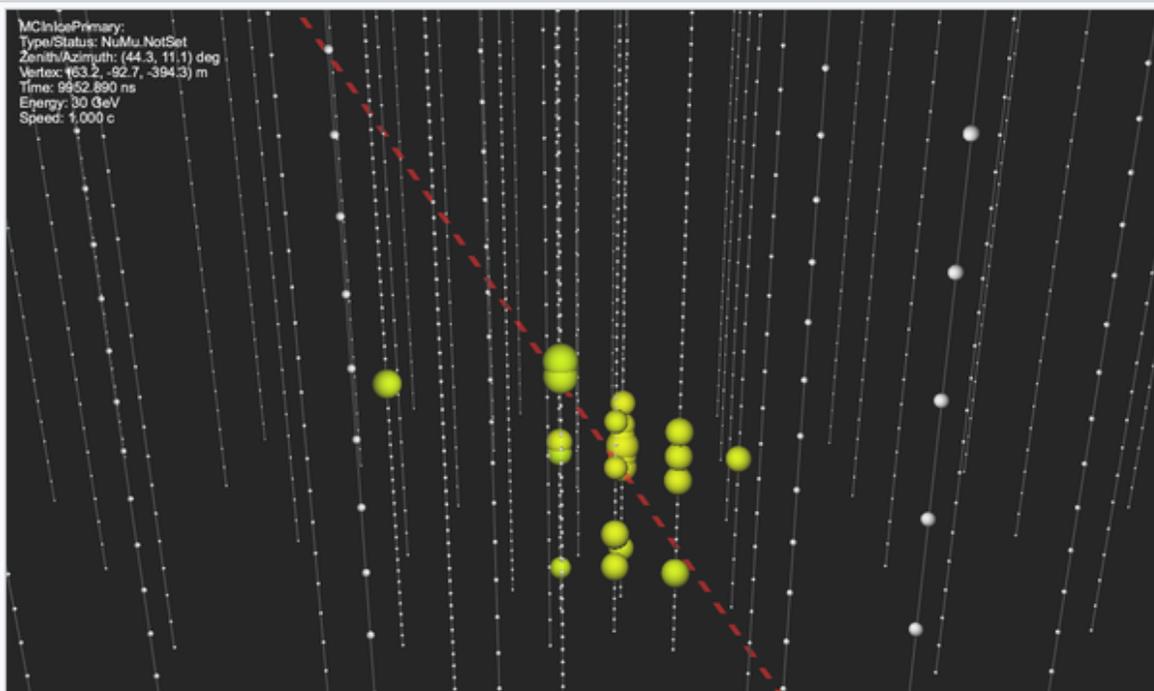


Fig. 1a. 30 GeV muon neutrino (down-going) interacting in DeepCore. This is a typical oscillation energy. Other versions: [gif](#), [video](#)

gleiches event mit IceCube Upgrade (simuliert)

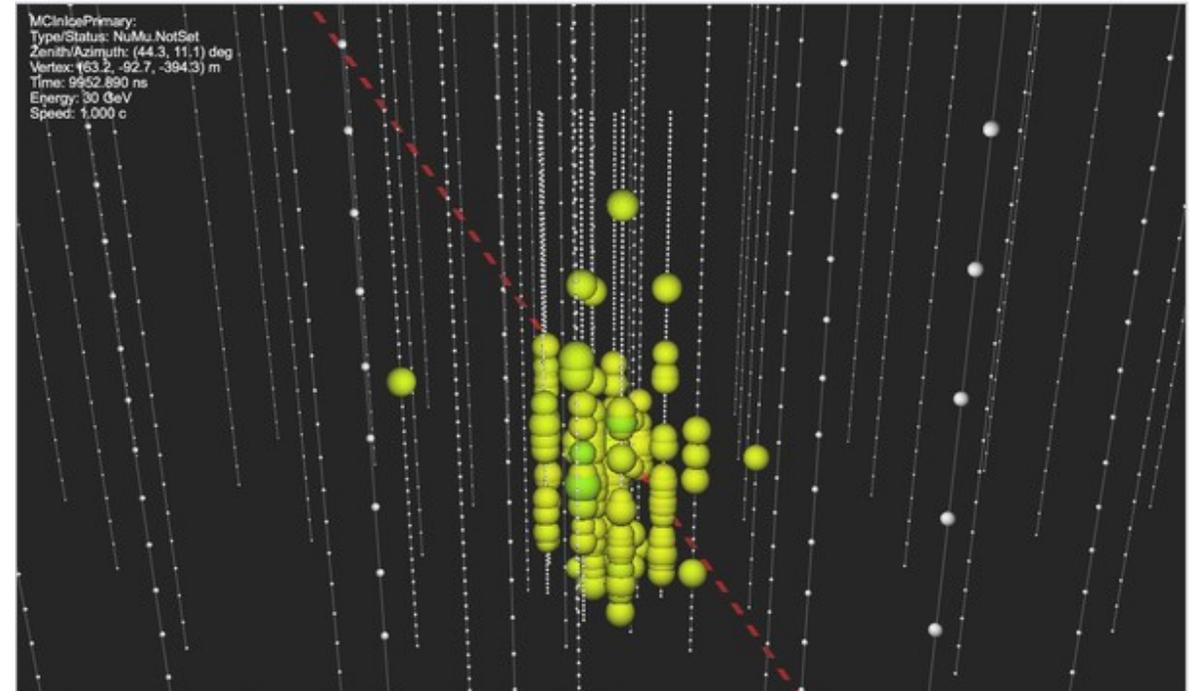


Fig. 1b. Same event as fig 1a but as observed by the Upgrade. This event clearly shows the large improvement in number of detected photons with the Upgrade. Other versions: [gif](#), [video](#)

Quelle: https://wiki.icecube.wisc.edu/index.php/Upgrade_Event_Displays_July_2019

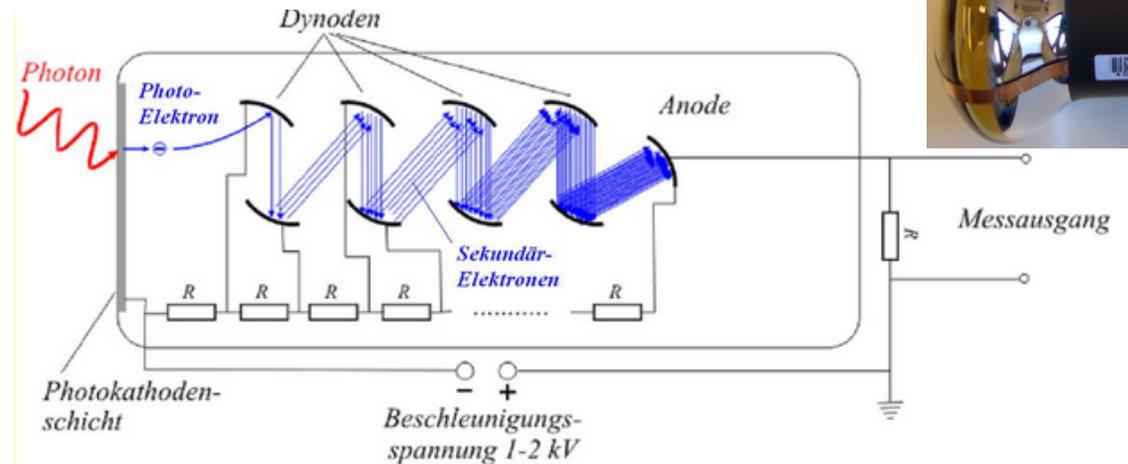
IceCube - Detektor

Sensoren

- Ziel: Beobachtung von Neutrinos aus astrophysikalischen Quellen
- Neutrinos = fast masselose Teilchen ohne elektrische Ladung, die sich von ihren Quellen bis zur Erde im Wesentlichen ohne Abschwächung und ohne Ablenkung durch Magnetfelder bewegen.
- Neutrinos werden nicht direkt beobachtet, aber wenn sie mit dem Eis in Wechselwirkung treten, erzeugen sie elektrisch geladene Sekundärteilchen, die ihrerseits Tscherenkow-Licht aussenden.
- Sensoren die das Licht erfassen = Photomultiplier (PMT)

Quelle: <https://icecube.wisc.edu/science/icecube/>

Funktionsweise eines Photomultiplier



Photomultiplier:

Ein Photomultiplier ist ein Lichtsensor, der in der Lage ist, Lichtsignale minimaler Intensität zu verstärken und in ein elektrisches Signal umzuwandeln.

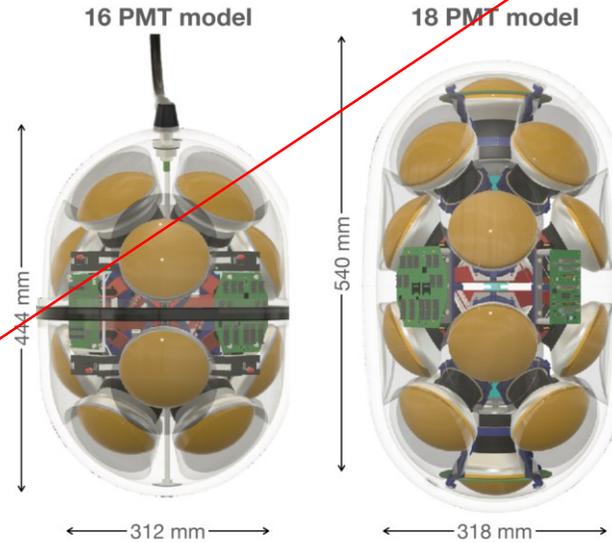
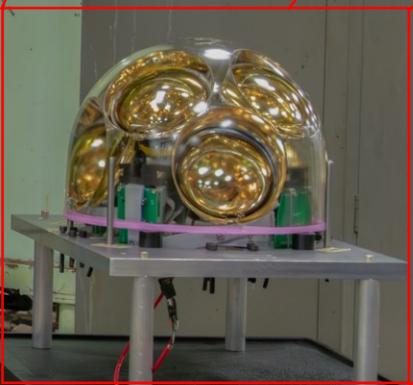
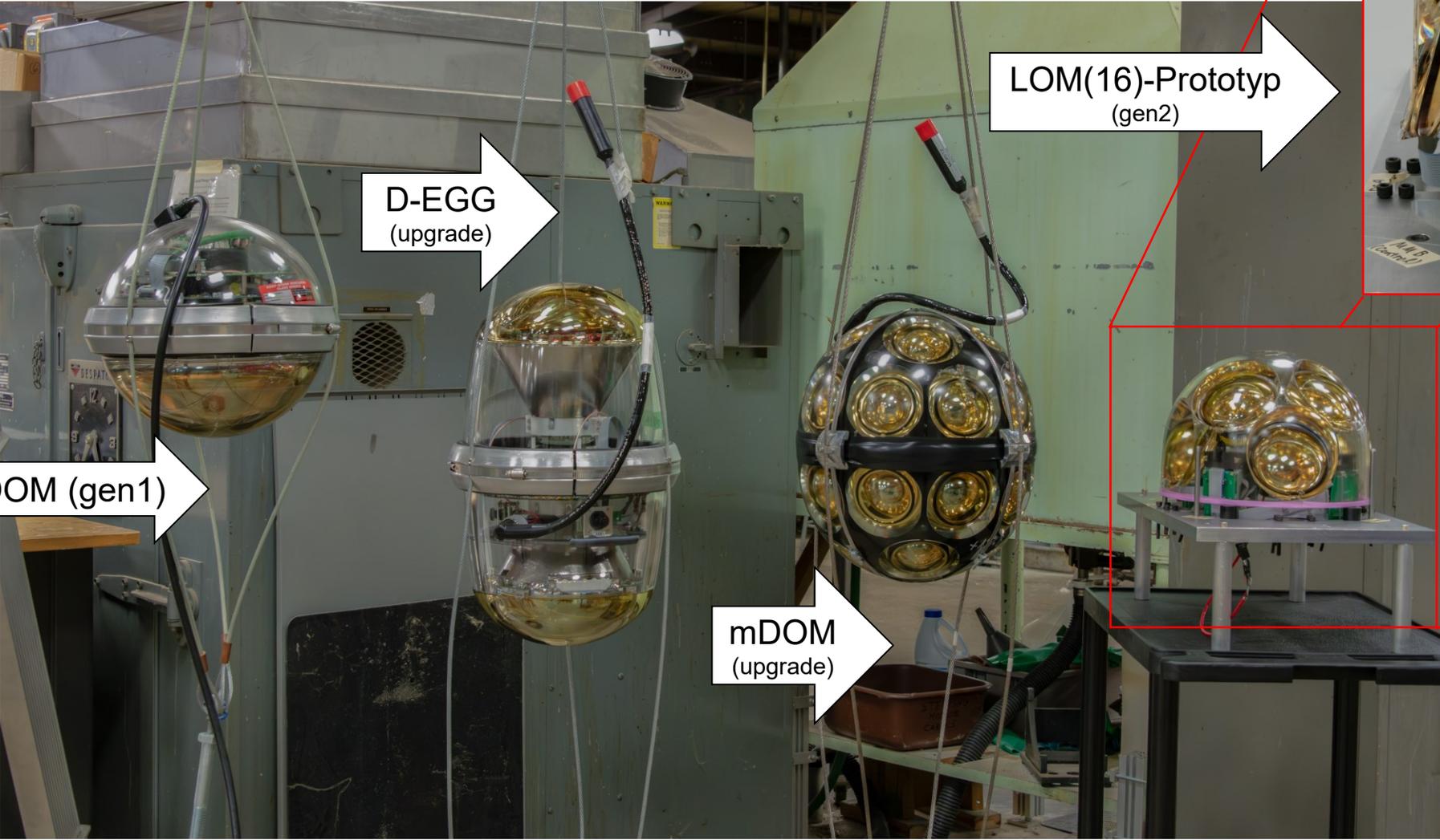
Funktionsweise:

Die Photonen (Licht) treffen auf die Photokathode und schießen Elektronen aus deren Oberfläche. Die freigesetzten Photo-Elektronen werden in einem elektrischen Feld beschleunigt und treffen auf weitere Elektroden (Dynoden), aus deren Oberfläche jedes auftreffende Elektron mehrere Sekundärelektronen herausschlägt. Somit nimmt die Anzahl der Elektronen von Dynode zu Dynode zu. Zum Schluss treffen die Elektronen auf eine Anode, wo das anfängliche Signal um das Milliardenfache verstärkt, in ein elektrisches Signal umgewandelt wird.

Quelle: https://www-zeuthen.desy.de/exps/physik_begreifen/chris/Photomultiplier.html

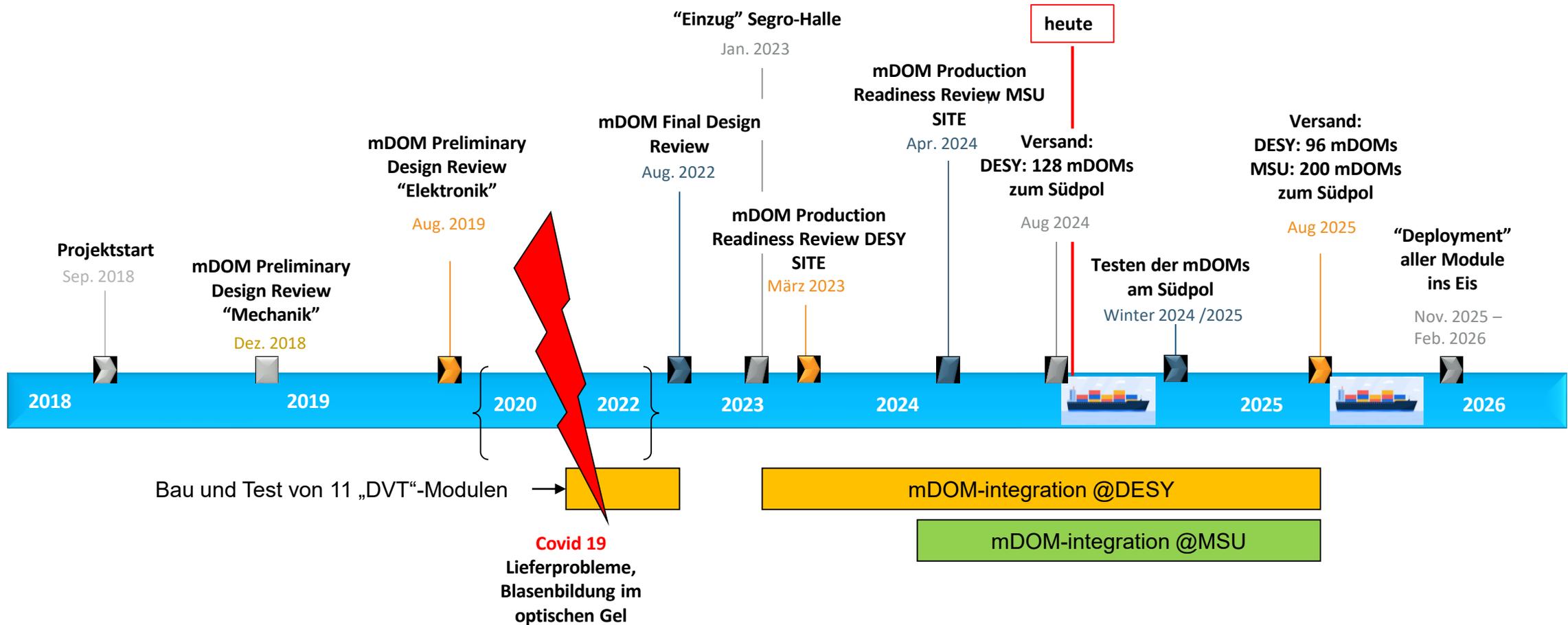
IceCube-Upgrade

Übersicht über die einzelnen Module



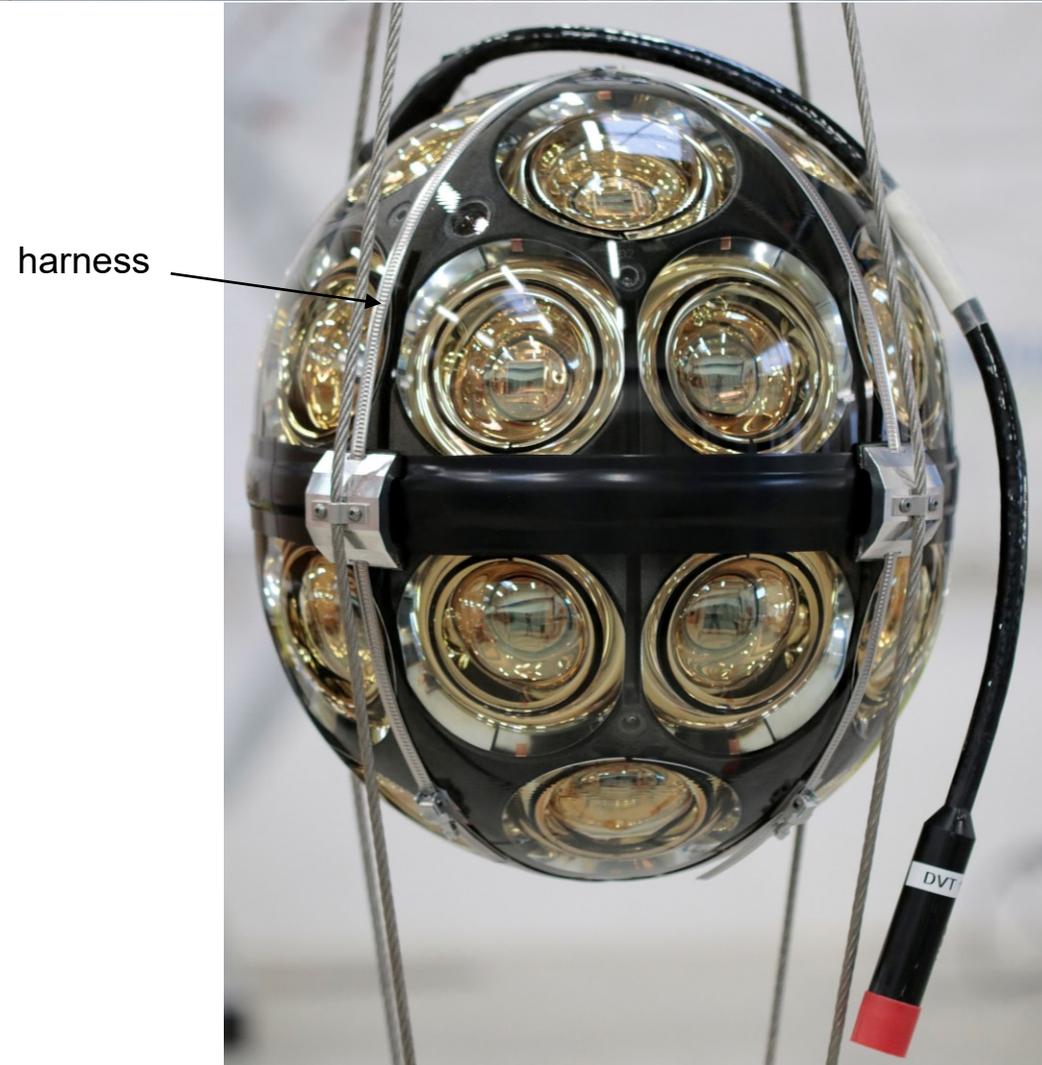
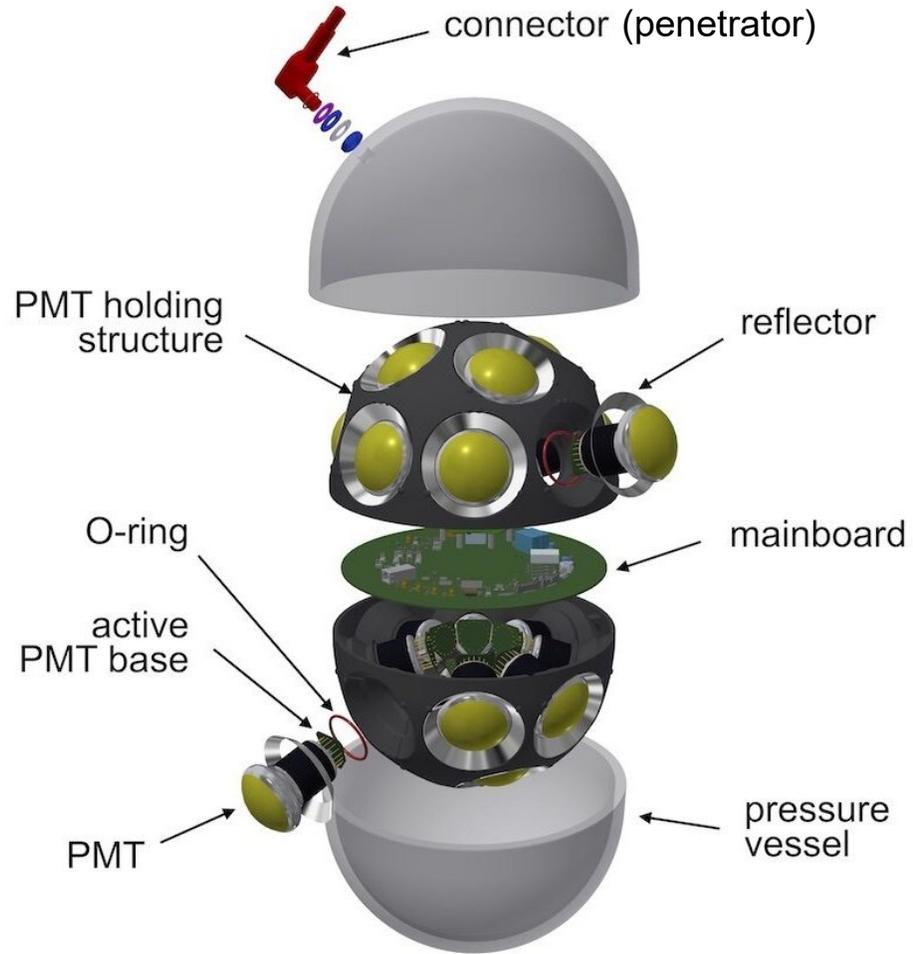
Projektmeilensteine

IceCube Upgrade (mDOM)



multi-PMT Digital-Optisches Modul (mDOM)

Design und Montage

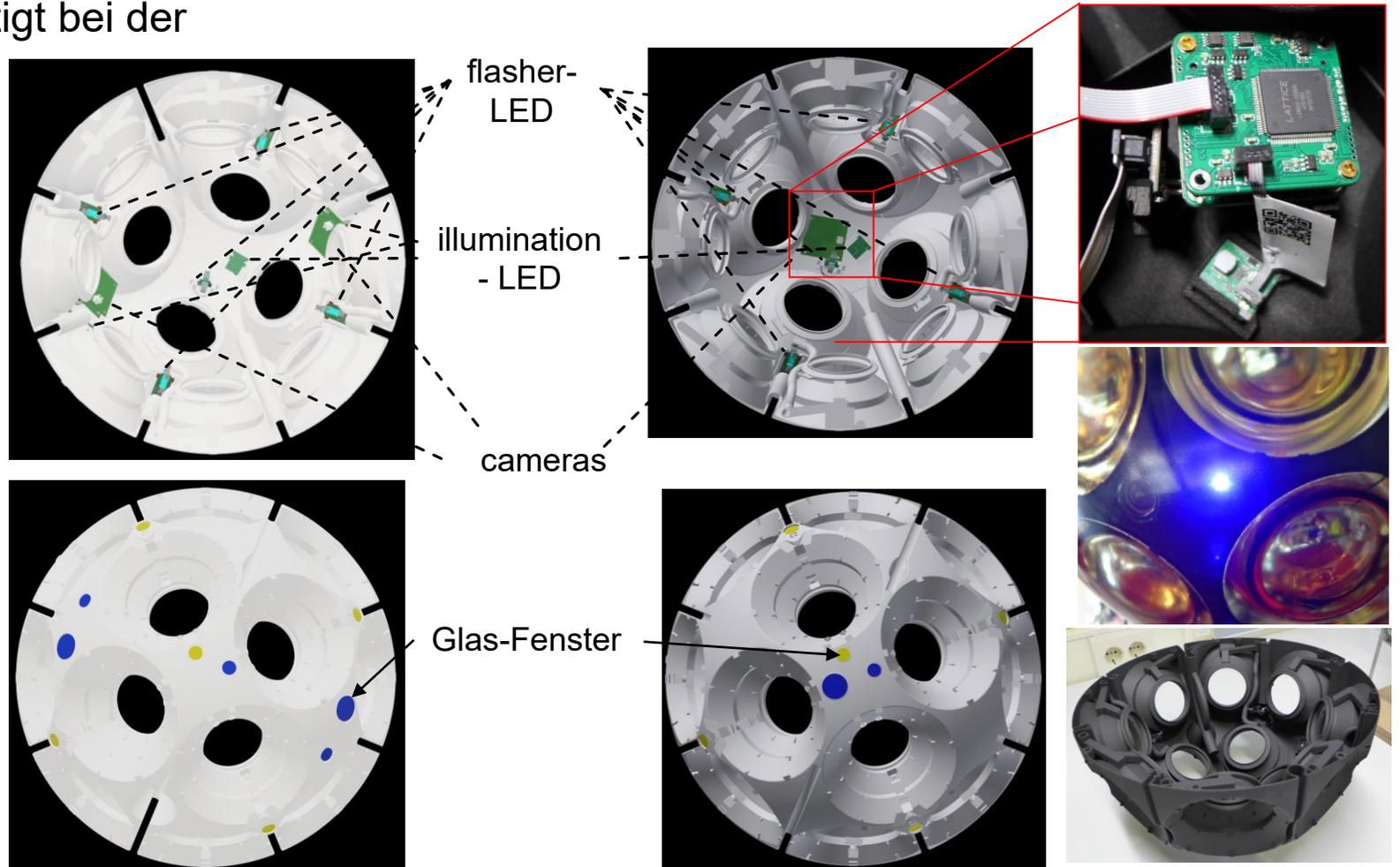


Wie wird ein mDOM gebaut?

PMT-Haltestruktur

Vormontage an der WWU Münster

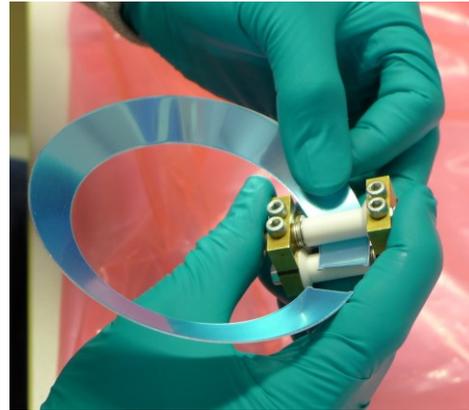
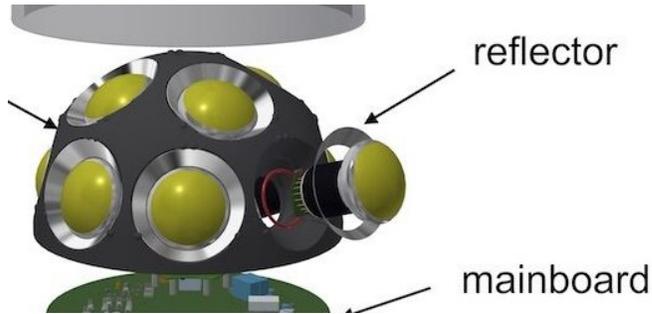
- 24 Satz an Haltestrukturen, gefertigt bei der Firma „ThinkTec3D“ werden pro Monat nach Münster geliefert, dort weiter verarbeitet und zu DESY geschickt
- hergestellt aus Polyamid mittels Multi Jet Fusion Verfahren (hp 3D-Druck-Verfahren)



Reflektorringe

biegen und kleben

- Reflektorringe aus Aluminium dienen der Vergrößerung der sensitiven Fläche



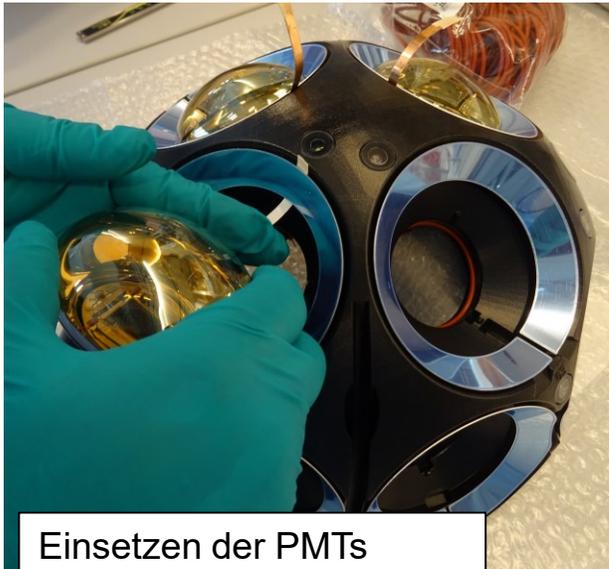
Aufbringen von Silikon als Kleber



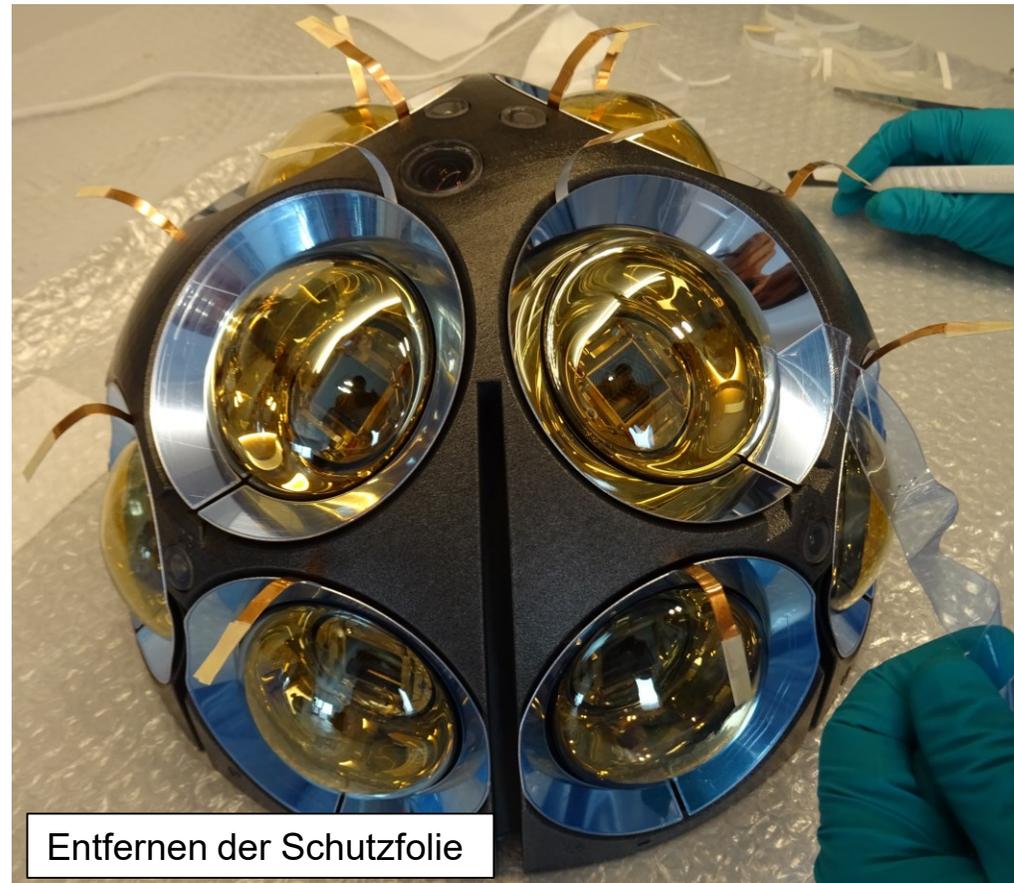
3D gedruckte Vorrichtungen fixieren die Reflektorringe und halten sie in Position, während der Kleber aushärtet

Einsetzen der PMTs

- o-ringe dienen der Abdichtung und Fixierung der PMTs
- PMTs, vorsortiert nach Spannungsklassen werden in die vorgesehenen Öffnungen gedrückt und ausgerichtet



Einsetzen der PMTs



Entfernen der Schutzfolie

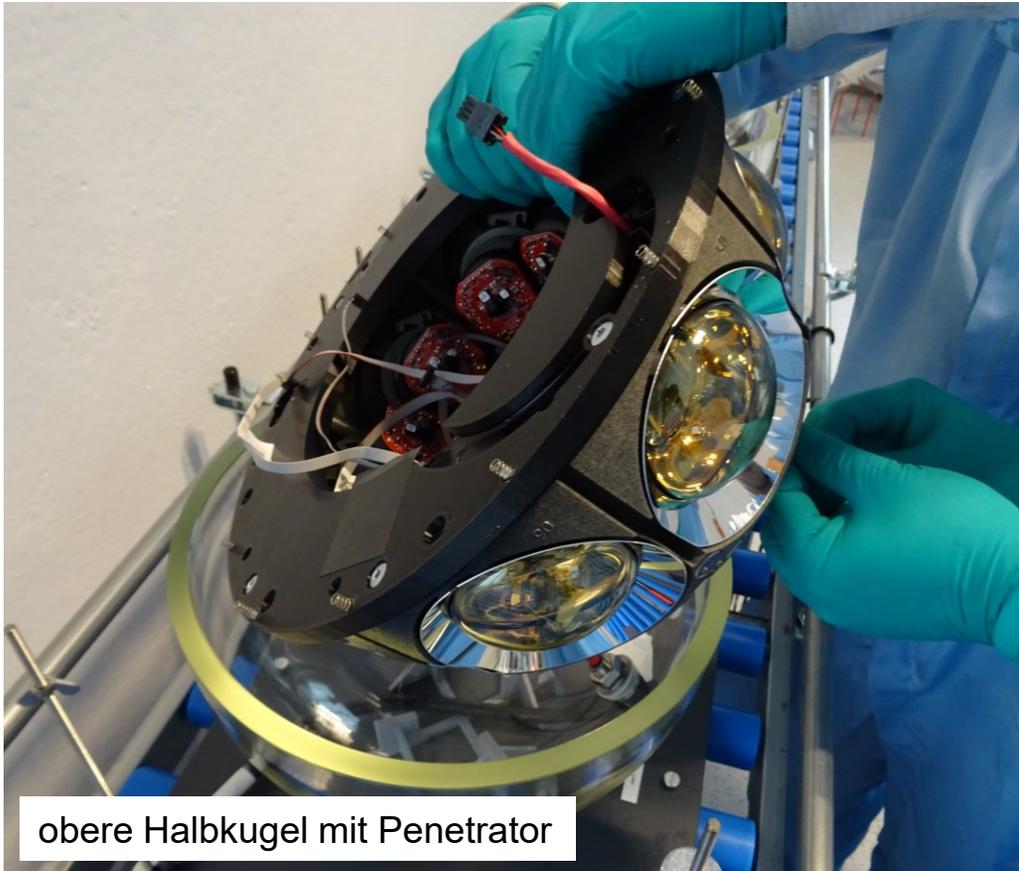


Kürzen und ankleben des Kupferbands

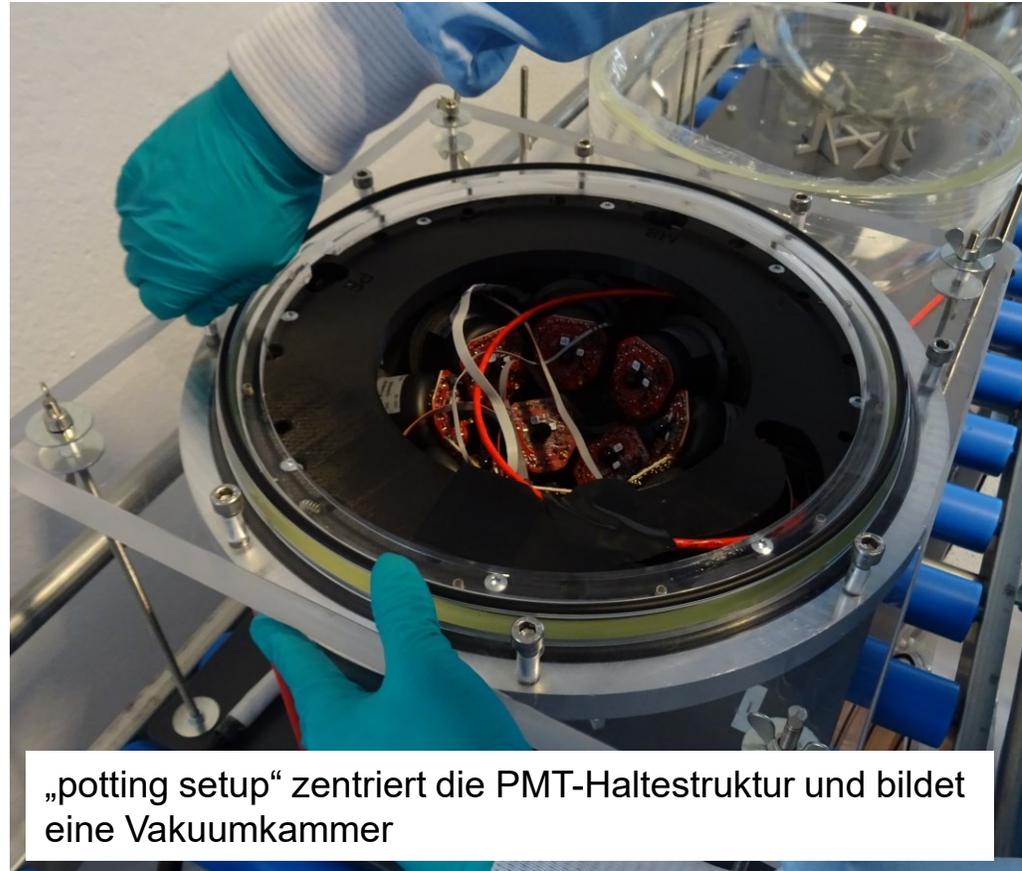
Vorbereitung der Halbkugeln

für den Verguss mit Silikon-Gel

- Glasdruckbehälter reinigen und Penetrator-Kabel montieren
- „Potting setup“ montieren, um Vakuum erzeugen zu können



obere Halbkugel mit Penetrator

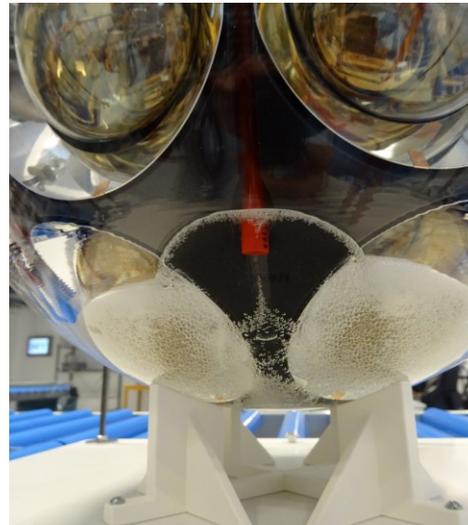


„potting setup“ zentriert die PMT-Haltestruktur und bildet eine Vakuumkammer

Verguss mit optischem Silikon-Gel

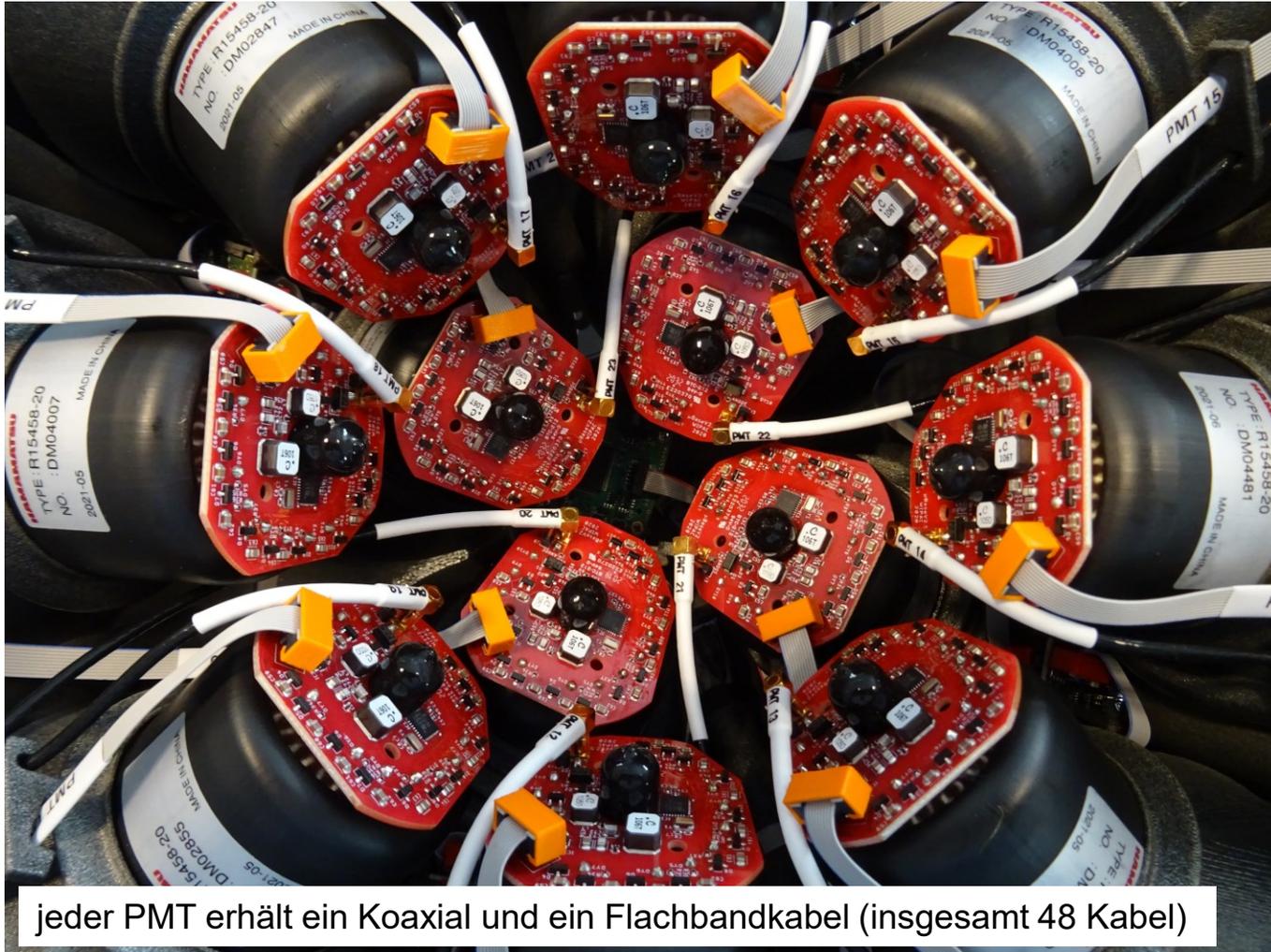
„gel-pouring“

- Ziel: Befüllen des Bereichs zwischen PMT und äußerem Glas-Druckbehälter mit Silikon-Gel um Totalreflektion der Photonen zu unterbinden
- kompliziertes mehrstufiges Verfahren für 6 Halbmodule parallel:
 - Entgasen der Komponenten für mind. 24h
 - 1. Gel-Schuss unter Vakuum (ca. 75% der Gesamtmenge)
 - Entgasen des Gels (automatisiert und schrittweise bis 2 mbar)
 - 2. Gel-Schuss - manuell
 - Entgasen des Gels
 - Belüften und Aushärten für 72h
- notwendig, um Blasen im ausgehärtetem Gel zu vermeiden

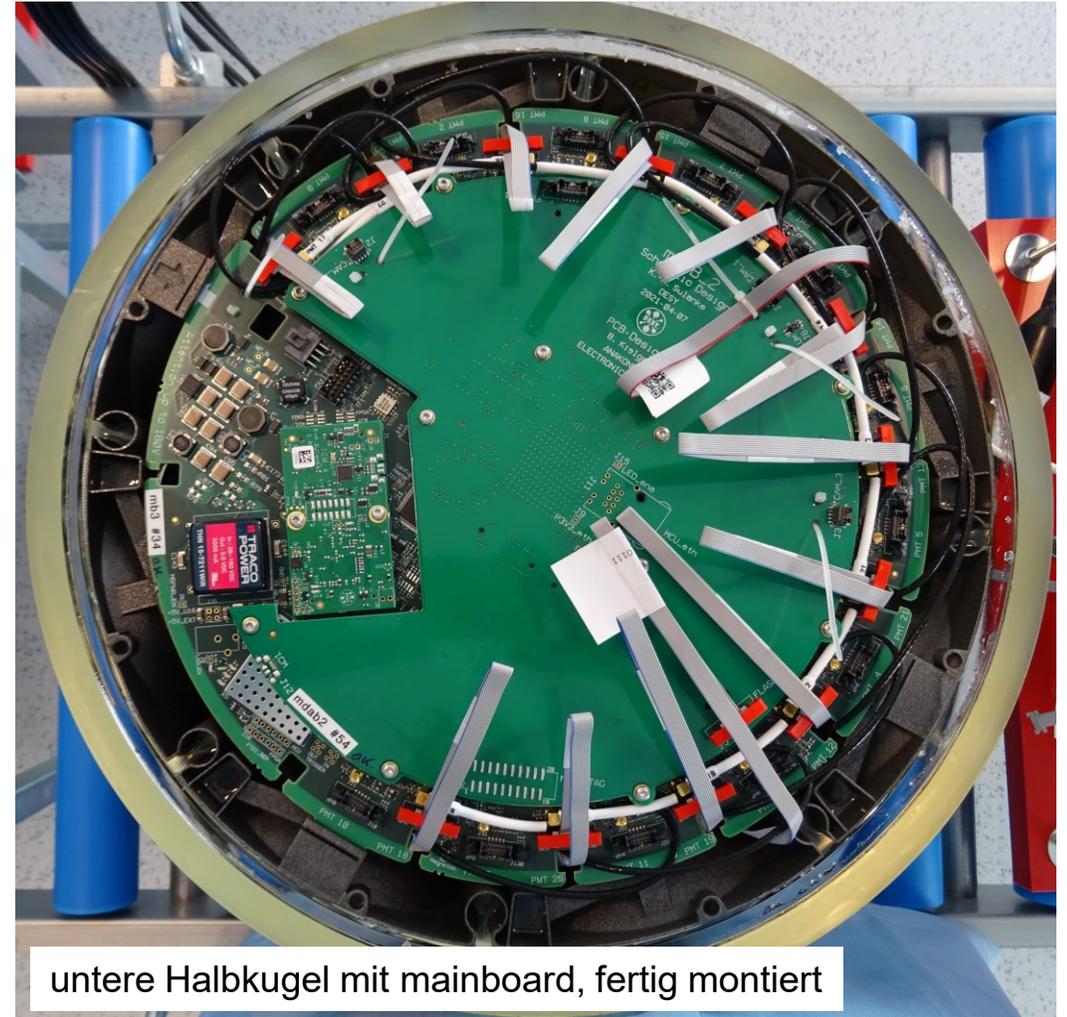


Verkabelung und Montage des Mainboards

nach dem Aushärten des Gels



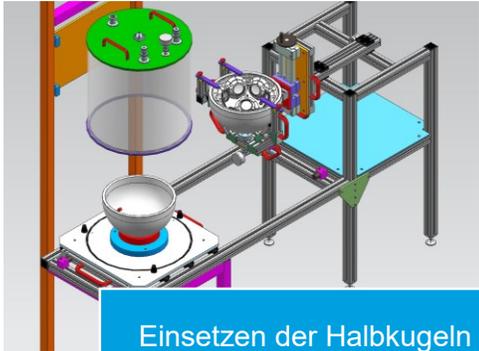
jeder PMT erhält ein Koaxial und ein Flachbandkabel (insgesamt 48 Kabel)



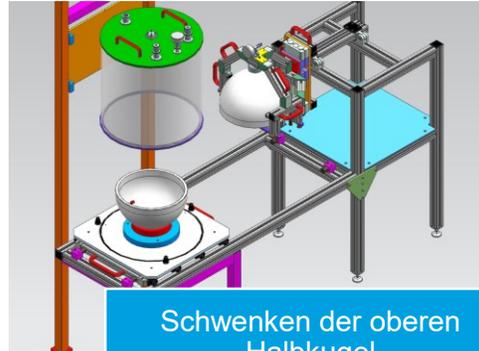
untere Halbkugel mit mainboard, fertig montiert

Hochzeit

zwischen oberer und unterer Halbkugel mit Hilfe einer Fügevorrichtung



Einsetzen der Halbkugel



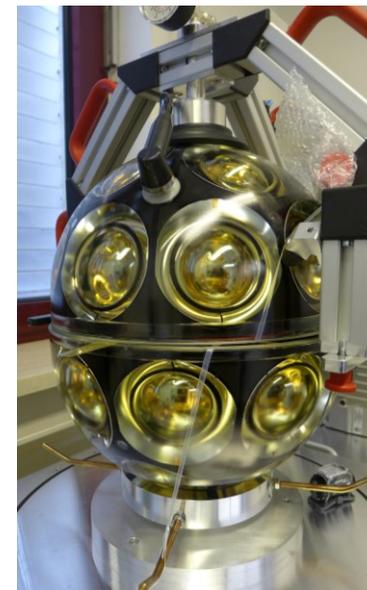
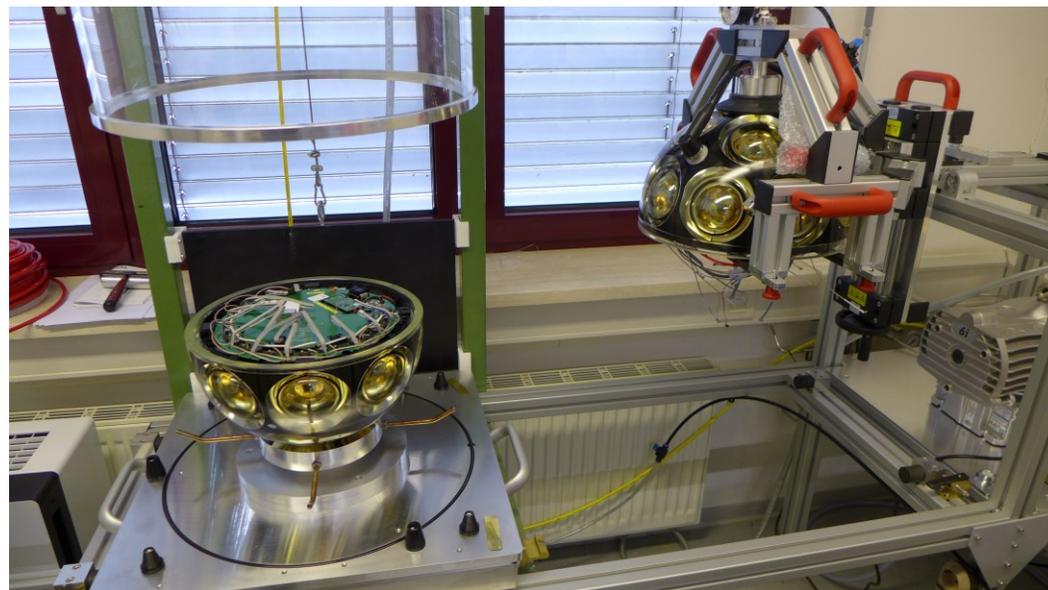
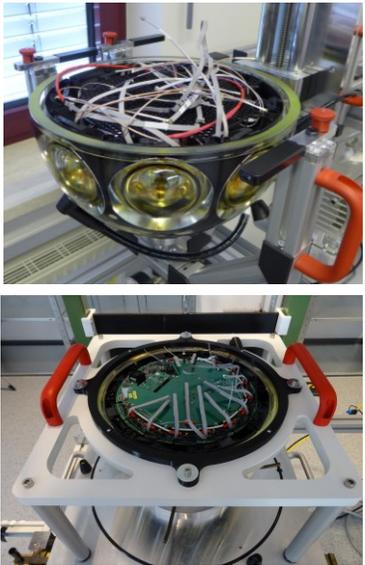
Schwenken der oberen Halbkugel



Verkabeln und Fügen von oberer und unterer Halbkugel

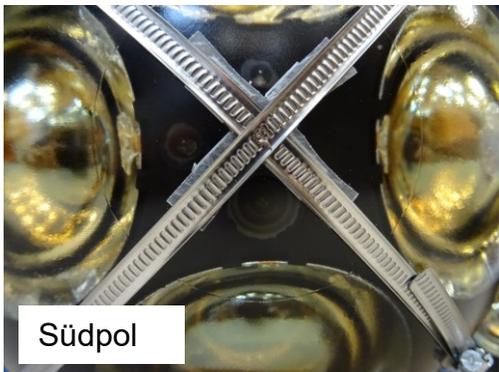
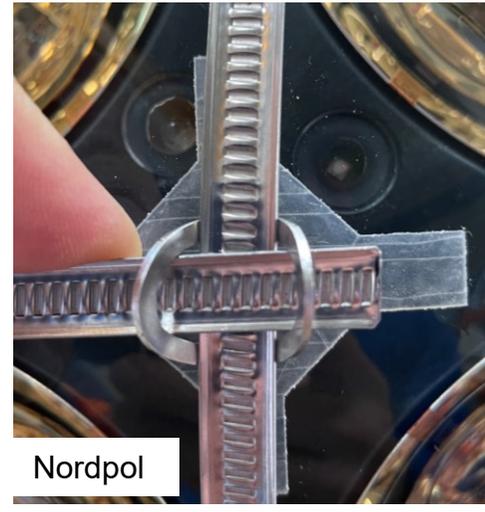
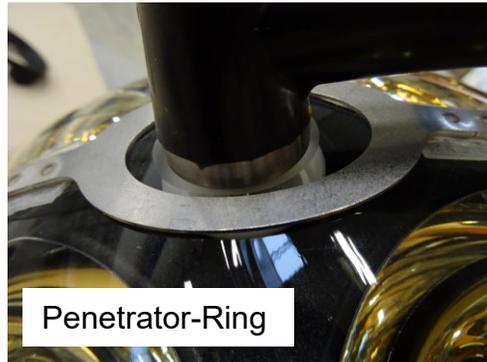


Spülen mit Stickstoff, evakuieren und Abdichten



„Harness“-Montage

- Schneckenschraubband zur Fixierung von 4 Aluminium-Brücken am Äquator als Aufnahmepunkte für Stahlseile – außerhalb des Reinraums



Harness load-test

und verpacken



Anhängen einer Last (ca. 1130kg)



prüfen der Seilspannung
auf gleichmäßige Verteilung



absetzen des mDOM in
den Versandkarton



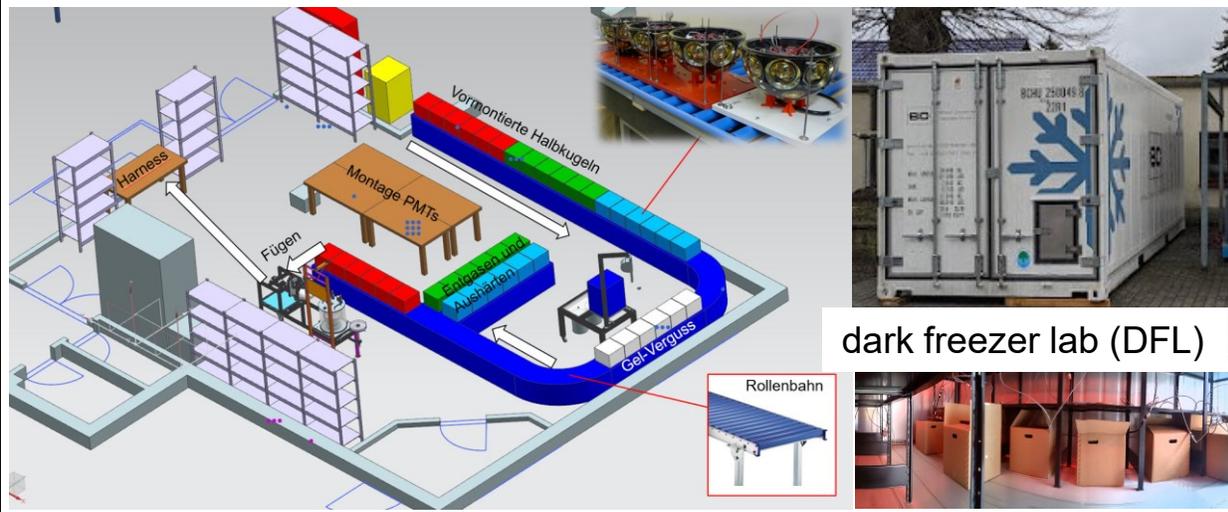
DESY und MSU

ein Vergleich: der Prozess



- Entwicklung der Produktions- und testing-prozesse
- Wissenstransfer zur MSU
- Reinraum in der SEGRO-Halle und FAT-facility in Zeuthen
- festes Personal (2 Mechaniker / Elektroniker)
- FAT: je 24mDOMs sind 3 Wochen im dark freezer lab bei -40°C („DFL FAT“) und werden anschließend einzeln dem „optical FAT“ unterzogen
- anschließend load test und finales Verpacken in der SEGRO-Halle

- MSU übernimmt die Prozesse und passt diese an die örtlichen Gegebenheiten an
- enger Austausch und Weiterentwicklung der Prozesse
- wechselndes Personal (Studierende)
- Reinraum und FAT-facility direkt nebeneinander
- FAT muss noch implementiert werden



dark freezer lab (DFL)



Reinraum



dark freezer lab (DFL)



- wir bauen mit 2 Vollzeitkräften (FTE) bis zu 4,5 mDOMs pro Woche
- hier nur ein paar Gesichter, der Dank gilt Allen die am Projekt beteiligt waren...

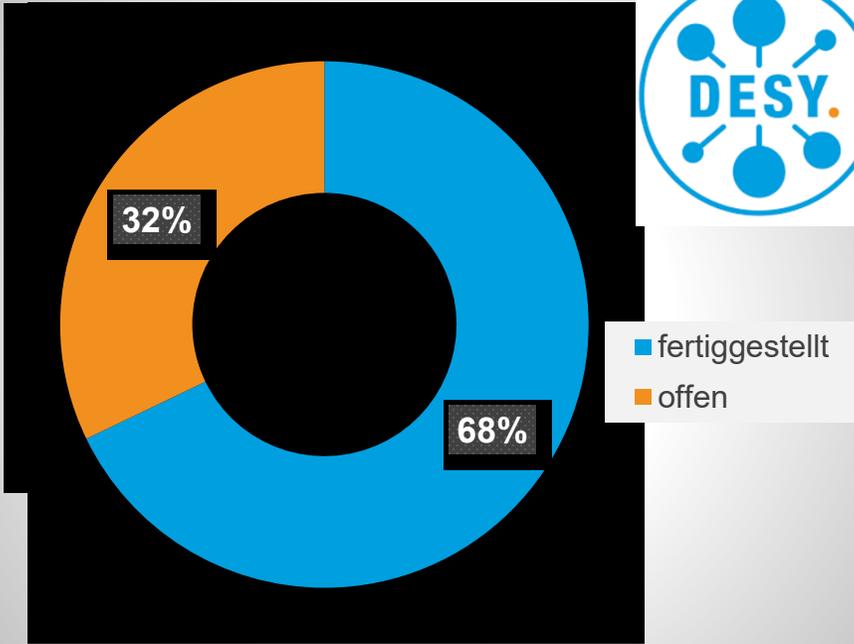
DANKESCHÖN für eure wichtige Arbeit!!!



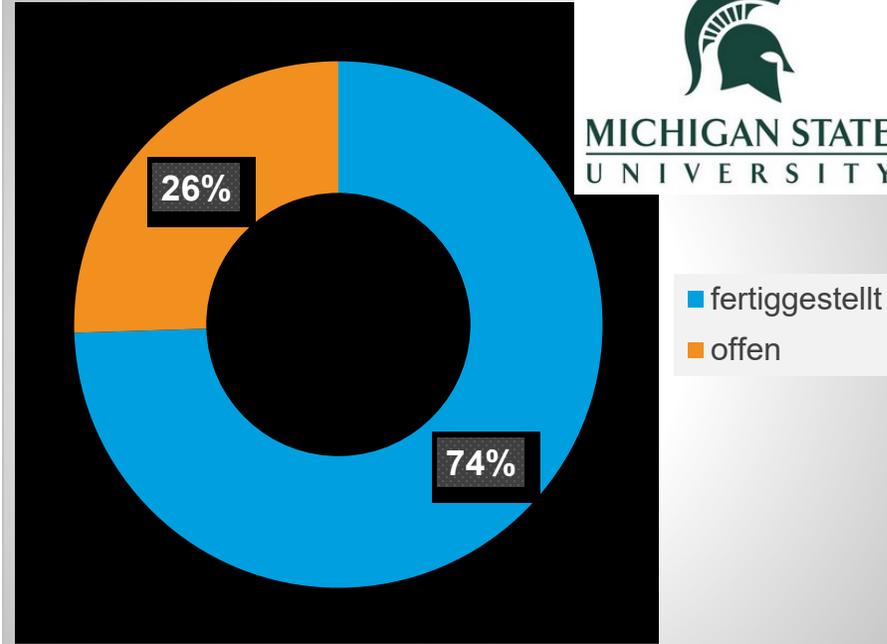
- MSU baut mit bis zu 16 Teilzeit-Kräften (Studierende) = ca. 7 FTE bauen bis zu 9 mDOMs pro Woche
- wechselndes Personal



Projektfortschritt



- 152 von 224 mDOMs fertiggestellt
- 136 Module im FAT getestet
- 128 Module versendet



- 149 von 200 mDOMs fertiggestellt
- 0 Module im FAT getestet
- 0 Module versendet

mDOMs gehen auf die Reise...

Segro-Halle Anfang August 2024



16 Paletten mit je 8mDOMs



ab nach Hamburg...

mDOMs auf dem Weg nach Neuseeland...

und in den DESY-Schlagzeilen...

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
Ein Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft

Suche:



[DESY HOME](#) | [FORSCHUNG](#) | [AKTUELLES](#) | [ÜBER DESY](#) | [KARRIERE](#) | [KONTAKT](#)



02.09.24

Erste Sensoren für IceCube-Upgrade unterwegs in die Antarktis

Die Erweiterung des Neutrinooteleskops IceCube hat mit der Verschiffung der ersten 128 bei DESY gebauten Sensoren in Richtung Antarktis einen wichtigen Meilenstein erreicht...



Neue Ausgabe



ANTWERP



BEANR



ATD

2024-09-02 21:40 (UTC)

1 day ago

TANGER MED



MAPTM



ETA

2024-09-06 08:59 (UTC)

1 day

Time Travelled	1 day	AVG Wind	8 knots
Remaining Time	1 day	MAX Wind	17 knots
Distance Travelled	536.97 nm	MIN Temp	16.2°C / 61.16°F
Remaining Distance	989.04 nm	MAX Temp	19.6°C / 67.28°F
AVG Speed	13.5 Knots	Draught	13.2 m
MAX Speed	19.6 Knots	Position Received	9 h, 43 m ago

Longitude	-5.46356°
Latitude	49.05264°
Status	Under way using engine
Speed	16.7 Knots
Course	235.6°
Area	Celtic Sea
Station	T-AIS
Position Received	9 h, 43 m ago



Stand 04.09.24 13:00

Quelle: <https://www.myshiptracking.com/vessels/440328000-mmsi-440328000-imo->

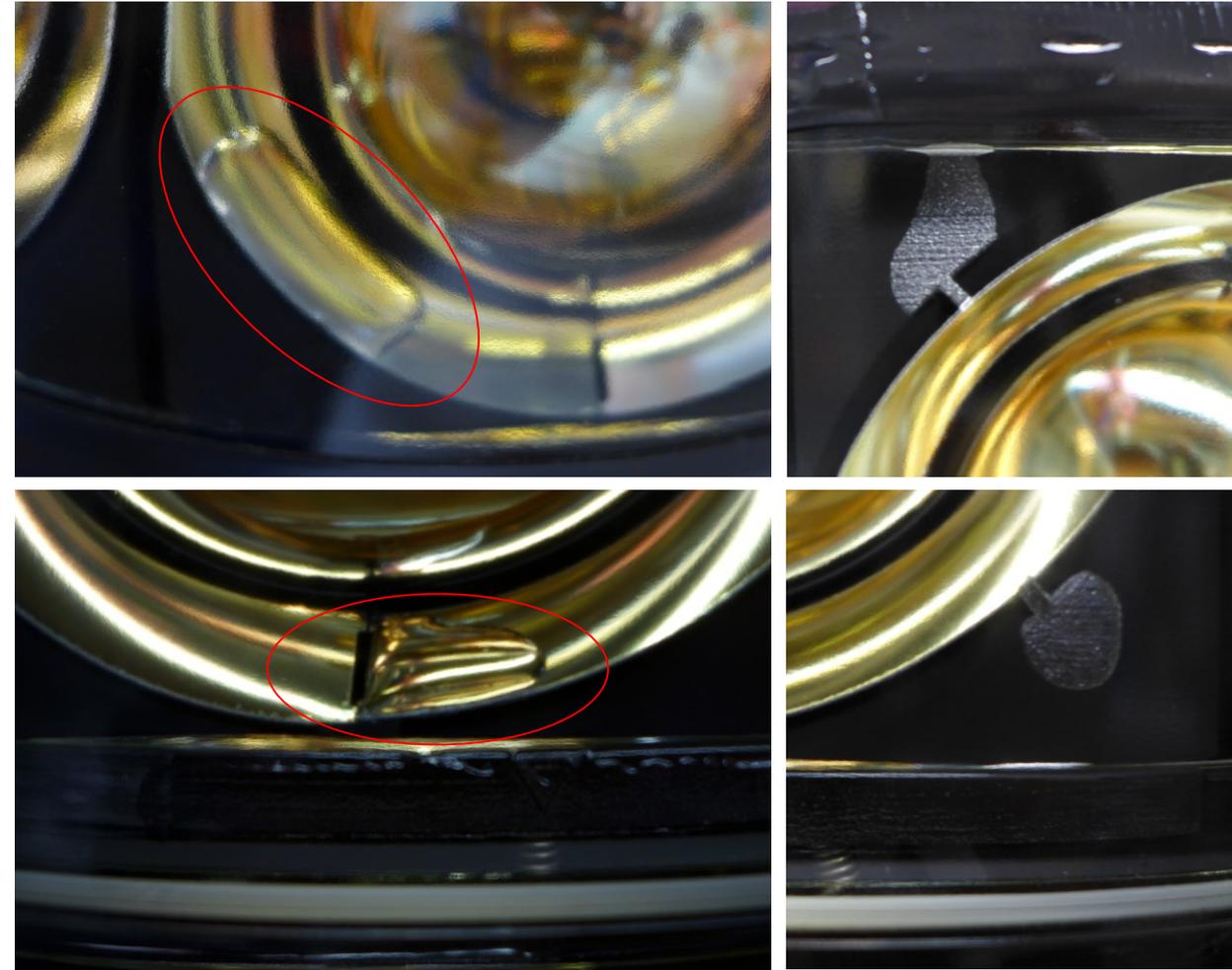
Artikel: https://www.desy.de/aktuelles/news_suche/index_ger.html?openDirectAnchor=3405&two_columns=0

Herausforderungen während der Produktion

Blasenproblematik

bei den DVT-Modulen

- Bildung von Blasen im optischen Gel 2-3 Tage nach dem die ausgehärteten Halbmodule durch Vakuum gefügt wurden
- umfangreiche und zeitaufwändige Suche nach dem Grund
- zu hohe Gaslast in den Komponenten und mechanische Spannungen beim Abkühlen auf -40°C führten zu umfangreichen Änderungen
 - im Design und der Fertigungstechnologie der Haltstrukturen
 - des Gieß- und Entgasungsprozesses



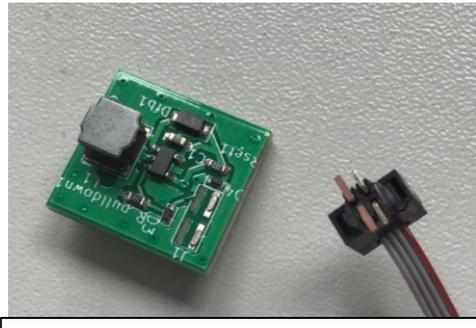
wer mDOMs baut...

... macht auch mal was kaputt

- jeder Fehler wird in einem „nonconforming material report“ dokumentiert und einem review panel gemeldet



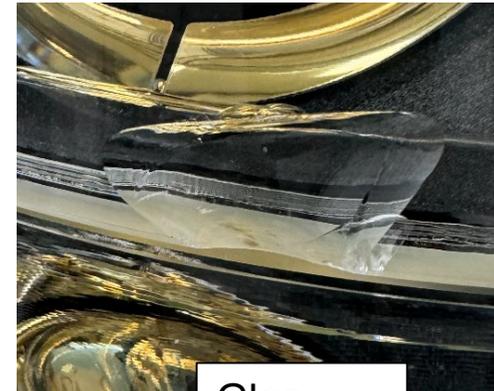
gerissene Kupferbänder



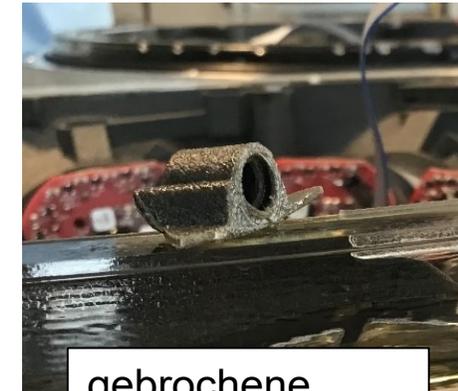
defekte Steckverbinder



Gel-Leckagen



Glas-
schäden



gebrochene
Haltestrukturen



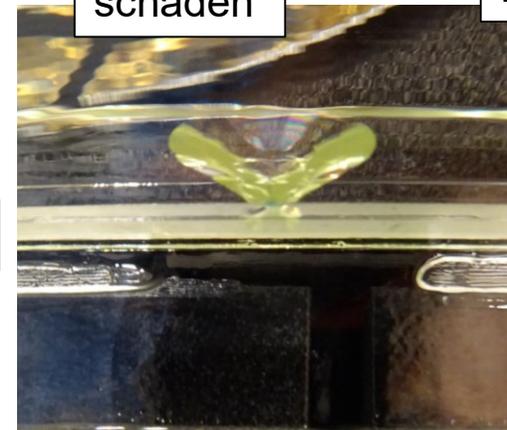
mechanische
Schäden am
Harness



Blasen im Gel



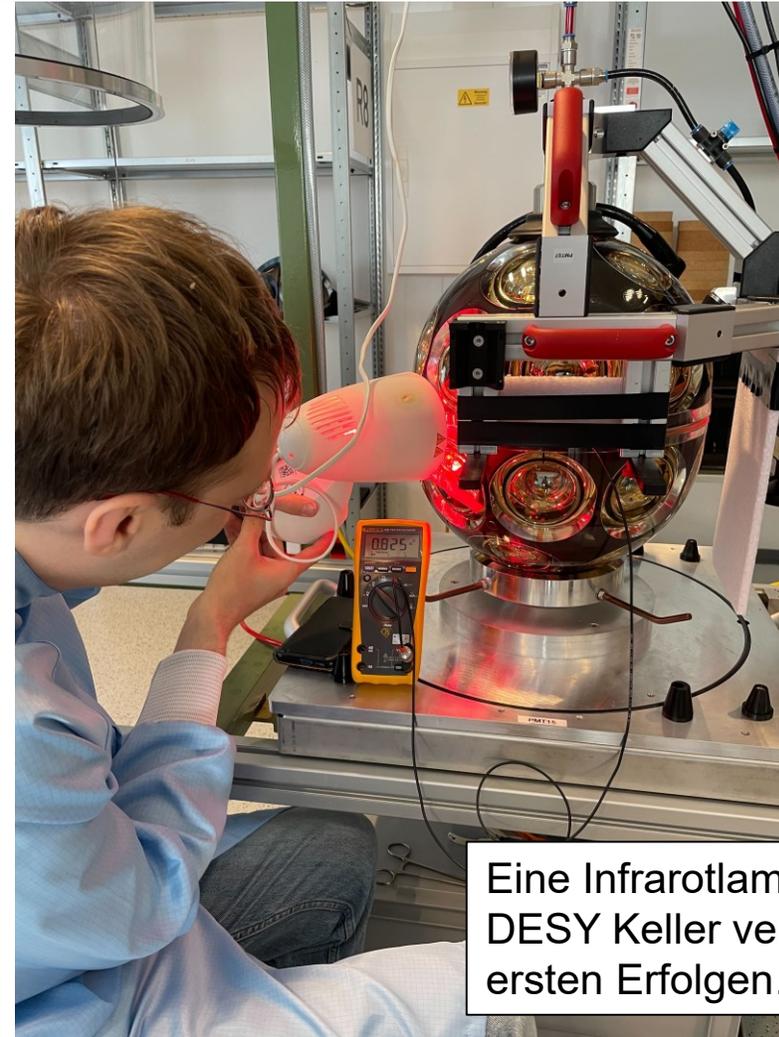
loses Penetrator-Kabel



und wir kamen ins Schwitzen...

erneutes Öffnen fast aller fertigen Module kurz vor Auslieferung

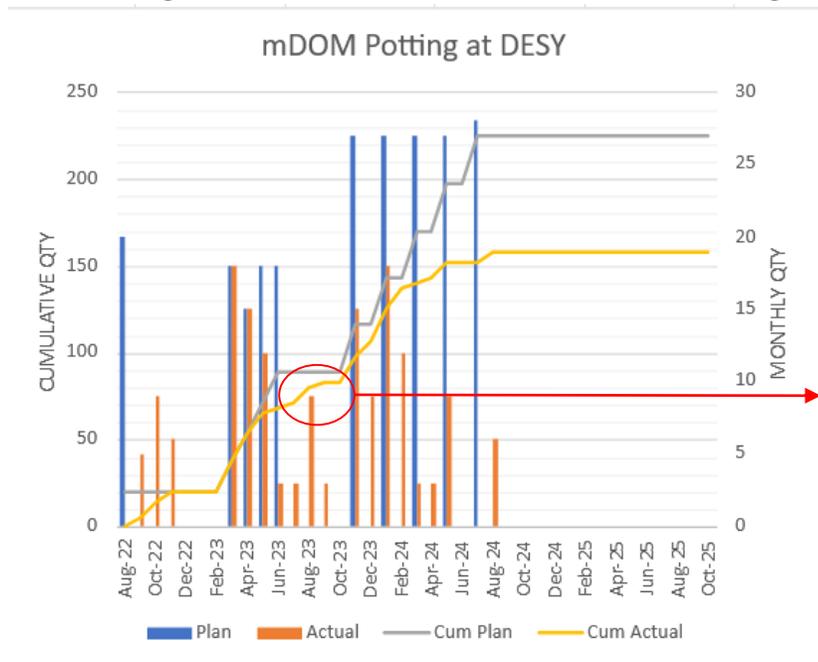
- Mitte Juni wurde bei Tests mit dem Hauptkabel festgestellt, dass die Kommunikation mit den tiefer liegenden Modulen nicht funktionieren wird
- Maßnahme: Aufheben des Schreibe-schutzes des „golden image“ auf dem ICM-Board, um spätere Umprogrammierung zu ermöglichen.
 - durch Anstrahlen eines Photosensors auf dem mainboard mit infrarot-Licht
 - Folge: bei 96 fertigen mDOMs musste der Harness demontiert und das Dichtband entfernt werden (mit 2 Personen!)
 - anschließend wurde neu abgedichtet und Harness montiert



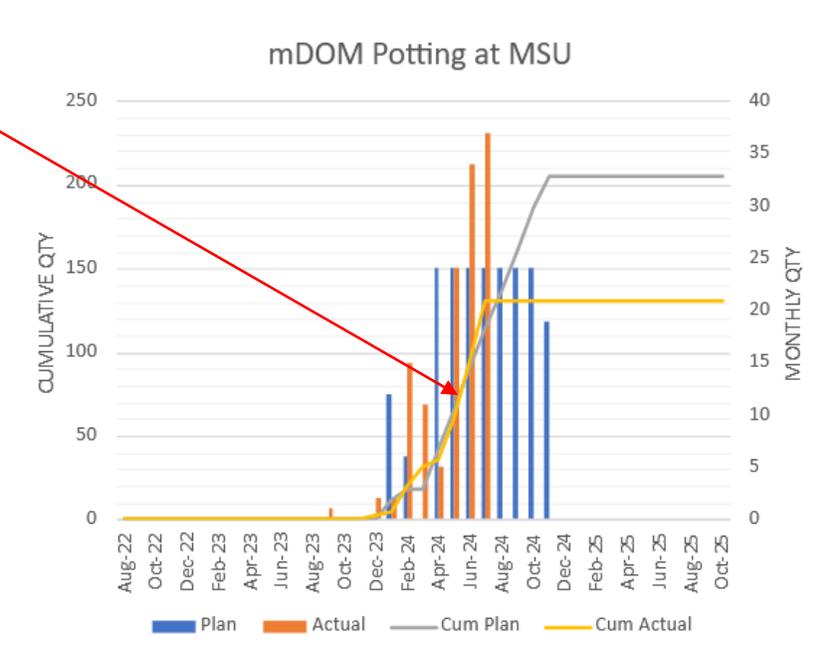
Eine Infrarotlampe aus dem DESY Keller verhilft zu ersten Erfolgen...

Verzögerungen im Produktionsablauf

- unregelmäßige /verspätete Lieferung von mainboards
 - mDOM-Halbkugeln vorproduziert, ohne mainboard verschlossen und später wieder geöffnet
- unregelmäßige /verspätete Lieferung von PMT-Haltestrukturen in geringerer Stückzahl
- DESY liefert alle Komponenten an die MSU → „Senkrecht-Start“ der MSU-Produktion führt zu leeren Lagern bei DESY
- „Reibungsverluste“ durch örtliche „Auslagerung“ der Produktion



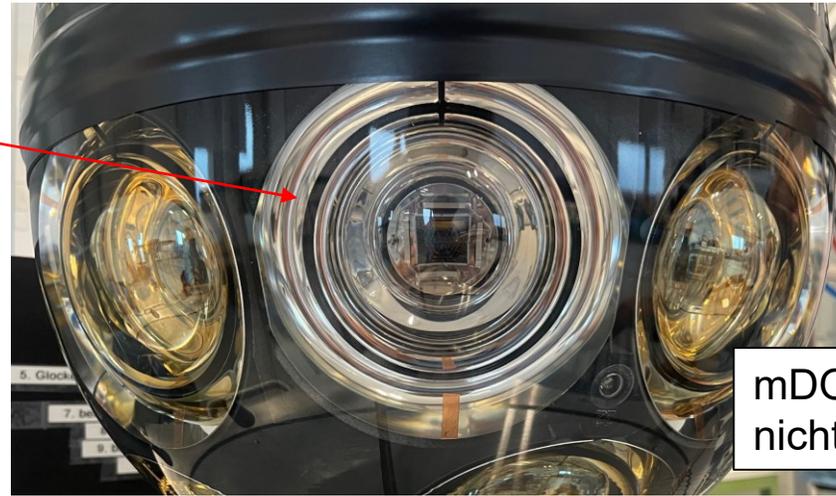
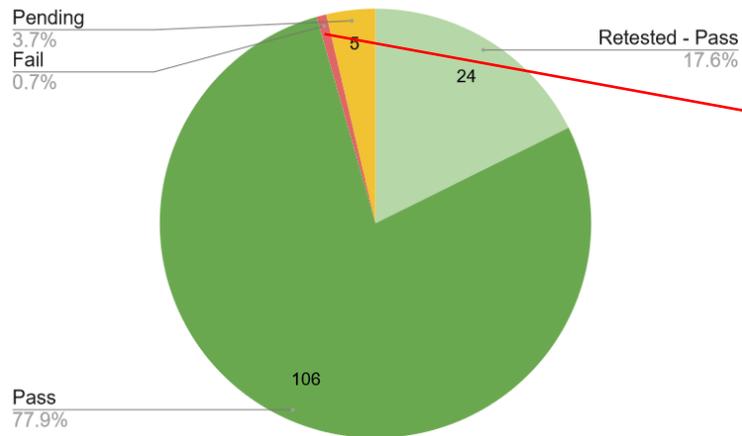
ca.2 Monate Produktionsausfall durch defekte Gel-Dosieranlage



Zwischenfazit

des final acceptance test

- von **136** getesteten mDOMs ist nur **1** durchgefallen, 130 haben bestanden



mDOM_D124 hat den Test nicht bestanden

- Vermutung: PMT ist implodiert und hat weitere Kanäle beschädigt – Öffnung des Moduls wird mit Spannung erwartet
- mDOM_D81-83: Blasen im optischen Gel – „Schönheitsfehler“
- mDOM_D147-150: Penetrator-Kabel lose. Einsatz als Testmodule möglich.

So kann es weiter gehen...

Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit

Fragen?

Kontakt

DESY. Deutsches
Elektronen-Synchrotron

www.desy.de

Matthias Schust
Z-AP-EW-ME
Matthias.Schust@desy.de
+49 33762/77217