

Abschlussbericht / Final Report

Vorhaben-Nr. / Project No.: 1501606A, 1501606B

Vorhabentitel:

Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur nichtinvasiven Analyse des Inventarzustands für Transport- und Lagerbehälter bei verlängerter Zwischenlagerung

Project Title:

Development and testing of methods for the non-invasive analysis of the inventory status for transport and storage containers during extended interim storage

Autor(en)/Author(s): M. Wagner¹, S. Reinicke², S. Eisenhofer¹, S. Alt², A. Kratzsch², U. Hampel¹

Dienststellen der Autoren / Performing Organisations:

¹ Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Energietechnik, Professur für Bildgebende Messverfahren für die Energie- und Verfahrenstechnik

² Hochschule Zittau/Görlitz, Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik

Berichtsdatum / Publication Date: 30.04.2025

Das dem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz mit den Förderkennzeichen 1501606A und 1501606B gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gliederung

1	Kurzfassung / Abstract (HSZG, TUD).....	3
2	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis (HSZG/TUD)	4
2.1	Abkürzungen.....	4
2.2	Symbole (muss noch vervollständigt werden)	6
3	Projektbeschreibung (HSZG, TUD).....	7
3.1	Zielsetzung und Arbeitsprogramm	7
3.1.1	Gesamtziel des Vorhabens	7
3.1.2	Bezug zu den förderpolitischen Zielen	8
3.1.3	Arbeitsprogramm	9
3.2	Entstandene Veröffentlichungen	9
4	Stand von Wissenschaft und Technik / Vorbedingungen	11
4.1	CASTOR 440/84 aus den Kernkraftwerken Greifswald und Rheinsberg (HSZG)	11
4.2	Zustände des Behälterinventars (HSZG).....	13
4.3	Nicht-invasive radiographische Messverfahren.....	18
4.3.1	Diagnoseverfahren auf Basis von Gamma- und Neutronenstrahlung (HSZG)	18
4.3.2	Myonenbildgebung (TUD)	19
5	Messung des Gamma- und Neutronenfeldes (HSZG).....	21
5.1	Zielsetzung.....	21
5.2	Methodische Arbeiten zur Analyse von Gamma- und Neutronenstrahlungsfeldern	22
5.3	Experimentelle Untersuchungen.....	26
5.3.1	Aufbau und Funktionsweise des Traversiersystems	26
5.3.2	Bedienung des Traversiersystems	29
5.3.3	Duale Strahlungsmesstechnik (CLYC-Sensoren)	31
5.3.4	Bedienung der CLYC-Sensoren	33
5.3.5	Durchgeführte Experimente und Ergebnisse	36
6	Myonen-Bildgebung (TUD).....	42
6.1	Zielsetzung.....	42

6.2	Simulationsstudien	42
6.3	Methodische Entwicklung der Streubildgebung	46
6.4	Aufbau eines Myonendetektors	50
6.5	Durchgeführte Experimente	60
7	Verfahrenskonzept zur Behälterüberwachung (HSZG)	63
8	Zusammenfassung (TUD, HSZG)	66
9	Quellen	69
10	Anhang	71
10.1	Details zum Traversiersystem	71
10.1.1	Trägerstruktur	71
10.1.2	Schienensystem als mechanische Barriere zum CASTOR	73
10.1.3	Hauptantriebssystem mit radialer Sicherheitsabstandsmessung	74
10.1.4	Vertikales Verfahrssystem	76
10.1.5	Horizontale Verfahreinheit und Sensorkäfig	77
10.1.6	Elektrotechnik und Schaltschrank - Aufbau und Funktion	78
10.1.7	SPS und Prozessleittechnik	80
10.1.8	Betriebskonzept	81
10.1.9	Sicherheitskonzept - Not-Halt-Schleife	82
10.1.10	Gefährdungsanalyse - Gefährdungen für Personal	83
10.1.11	Gefährdungen bzw. Schädigungspotential für Zwischenlager	84
10.2	Details zu Strahlungsmessungen mit CLYC-Sensoren	87
10.2.1	Messungen im Zittauer Strahlenlabor	87
10.2.2	Vorstudie am CASTOR „Messung mit Stativ“ (April 2023)	95
10.2.3	Details zur Messkampagne am CASTOR im Behälterverbund	101
10.2.4	Details zur Messkampagne am vereinzeltten CASTOR	110

1 Kurzfassung / Abstract (HSZG, TUD)

Abgebrannte Brennelemente werden in der Bundesrepublik Deutschland nach anfänglicher Lagerung in Abklingbecken trockengelagert. Die trockene Zwischenlagerung erfolgt in Transport- und Lagerbehältern (TLB), hauptsächlich vom Typ CASTOR. Es besteht ein großes Interesse bei verlängerter Zwischenlagerung sowie vor und nach Transporten Informationen über den Zustand des Behälterinventars zu erhalten. Im Rahmen dieses Verbundvorhabens wurden zwei nicht-invasive Monitoringverfahren zur Überprüfung des Behälterinventars untersucht, weiterentwickelt und zum Einsatz gebracht. Die orts aufgelöste Gamma- und Neutronenradiographie der Mantelfläche erlaubt eine Abschätzung der inneren Aktivitätsverteilung. Für dieses Verfahren wurden Simulationen durchgeführt, um die Aussagekraft zu bewerten. Hauptaspekt war der Aufbau eines teilautomatisierten Messsystems. Mit diesem System wurde erstmals ein beladener Behälter im Zwischenlager gescannt. Als zweites Monitoringverfahren wurde die Myonenbildgebung analysiert. Diese ermöglicht eine Rekonstruktion der Materialverteilung im Inneren des Behälters. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde ein neuer Bildrekonstruktionsalgorithmus entwickelt, der objektunabhängig die Streudichteverteilung des gescannten Objekts berechnet. Daneben wurde ein robuster, modularer und ökonomischer Detektorprototyp entwickelt, der für den Einsatz im Zwischenlager geeignet ist.

2 Abkürzungs- und Symbolverzeichnis (HSZG/TUD)

2.1 Abkürzungen

AP	Arbeitspaket
BE	Brennelement
BM	Betriebsmittel
BuB	Bedien- und Beobachtung
CFD	Computational Fluid Dynamics
CNN	Convolutional Neural Network
CT	Computed Tomography
FEM	Finite Elemente Methode
FFT	Fast Fourier Transformation
GUI	General User Interface
HP	Heizpatrone
HS	Hotspot
HSZG	Hochschule Zittau/Görlitz
HZDR	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
KF	Kalibrierungsfaktoren
KNN	Künstliche Neuronale Netzwerke
MCNP	Monte-Carlo N-Particle Transport Code
MLP	Multilayer-Perzeptron
NI	National Instruments
PE	Polyethylen
Pt	Platin
PTFE	Polytetrafluorethylen
SDM	Schalldruckmessung
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TE	Thermoelement
TK	Tragkorb
TLB	Transport- und Lagerbehälter
TTL	Transistor-Transistor-Logik
TUD	Technische Universität Dresden
UV	Unterverteilung
VA	Versuchsanlage

VS Versuchsstand

2.2 Symbole (muss noch vervollständigt werden)

Lateinische Buchstaben

h_c	$Wm^{-2}K^{-1}$	Wärmeübertragungskoeffizient
p	Pa	Druck
p	–	Parameter
P	W	Leistung
\dot{q}	Wm^{-2}	Wärmestromdichte
Q	J	Wärmeenergie
\dot{Q}	W	Wärmestrom
T	$^{\circ}C$	Temperatur

Griechische Buchstaben

ε	–	Infrarot-Emissionskoeffizient
ρ	$kg\ m^{-3}$	Dichte

3 Projektbeschreibung (HSZG, TUD)

3.1 Zielsetzung und Arbeitsprogramm

3.1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Im abgeschlossenen Vorhaben DCS-MONITOR (BMW FKZ 1501518, Laufzeit 02/2015-06/2019) wurden durch die Antragsteller Machbarkeitsstudien zur nichtinvasiven Überwachung des Behälterinhalts unter Einsatz numerischer und laborexperimenteller Werkzeuge durchgeführt. Dabei wurden strahlungsbasierte Messverfahren, Thermographie, akustische Spektroskopie und technische Schwingungsanalyse auf ihre Eignung untersucht. Die bisherigen Analysen zeigten, dass das Photonen- und Neutronenfeld um den Behälter, die Myonenbildgebung und die passive akustische Spektroskopie für ein Monitoring des Behälterinventars prinzipiell geeignet sind, sich aber auch in ihrer Aussagekraft unterscheiden. Für die Thermographie wurde eine aus physikalischen Gründen mangelnde Aussagekraft festgestellt. Für die aktive Schwingungsdiagnostik wurden technische Hürden und Aussagekraft negativ bewertet. Bezgl. der passiven akustischen Spektroskopie ist es aus Expertensicht darüber hinaus strittig, ob es überhaupt zum Bersten von versprödeten Hüllrohren mit einer entsprechenden Schallemission im Behälter kommt.

Auf Basis dieser Ergebnisse ist es das Ziel des hier beantragten Vorhabens, die Ansätze der strahlungsfeldbasierten Diagnostik mit Gammastrahlung, Neutronen und Myonen vertieft zu untersuchen und in Richtung eines einsetzbaren Monitoringverfahrens speziell für CASTOR-Behälter zu qualifizieren. Dies schließt erstmals Feldstudien an realen Behältern und im Zwischenlager ein. Dazu wurde im Vorhaben DCS-Monitor II ein automatisiertes Messsystem zur Erfassung des lokal aufgelösten Gamma- und Neutronenstrahlungsflusses entwickelt. Das Vorhaben befasst sich nicht mit der Untersuchung von möglichen Veränderungs- oder Schädigungsmechanismen für die zwischengelagerten Brennelemente.

3.1.2 Bezug zu den förderpolitischen Zielen

Mit der Aufhebung der Priorisierung des Wirtsgestein Steinsalz für die direkte Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland durch das Standortauswahlgesetz im Jahr 2013 und der Ausdehnung der F&E-Arbeiten auf die Wirtsgesteine Tonstein und Granit (kristalline Gesteine) ist mit erheblich längeren Zeiträumen einer Zwischenlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Anfälle aus Kernreaktoren an den deutschen Kraftwerksstandorten zu rechnen. Diese werden sehr wahrscheinlich Zeiträume von mehr als 50 Jahren umfassen. Damit ergeben sich unmittelbar Fragestellungen zur Langzeitintegrität der Transport- und Lagerbehälter sowie zu Zustandsänderungen des Inventars. Derzeit sind verlässliche Prognosen zur Degradation der Werkstoffe, sowohl des Behälters (Behälterstahl, Neutronenabsorber, Tragkörbe, Deckel, Dichtungen, Verschlusssystem) sowie des nuklearen Inventars (Brennelemente) nicht möglich. Insofern gewinnen Methoden der langzeitlichen Zustandsüberwachung an Bedeutung. Diese sollten vorzugsweise nichtinvasiv sein. Ziel ist die Sicherstellung der Transportfähigkeit des bestrahlten Kernbrennstoffs zum Endlager nach einem verhältnismäßig langen Zwischenlagerungszeitraum.

In seiner fünften Auflage des Förderkonzeptes „Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle“ werden acht Forschungsziele definiert, darunter die *„Untersuchungen zur technischen Machbarkeit und zum Langzeitverhalten von Endlagerkomponenten, einschließlich Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Abfällen und Behältern unter zwischenlagerspezifischen Beanspruchungsbedingungen, ...“*. Die mit dem geplanten Vorhaben avisierten Forschungsarbeiten sind dem FuE-Bereich 1: „Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle und Behälter“, und dort insbesondere dem Themenfeld 3, FuE-Feld 1.3 (Gesamtsystem Zwischenlager): „Methodik des Alterungsmanagements und Entwicklung von Verfahren zum Monitoring während verlängerter Zwischenlagerzeiten“ zugeordnet. Die Arbeiten sind von grundlegendem Charakter und bedienen sich methodisch vorrangig numerischer Berechnungstools bzw. grundlegender Experimente zur Feststellung der Nutzbarkeit ausgewählter physikalischer Wirkprinzipien für die Behälterüberwachung. Langfristig tragen die Arbeiten damit zur Erhöhung der Sicherheit während der verlängerten Zwischenlagerung und nachfolgender Transporte bei.

Weiterhin fanden die Arbeiten an zwei Hochschulen statt und leisten damit unmittelbar einen substanziellen Beitrag zu Aufbau, Weiterentwicklung und Erhalt der wissenschaftlich-technischen Kompetenz und zur Nachwuchsförderung im Bereich der nuklearen Sicherheits- und Entsorgungsforschung in Deutschland. Darüber hinaus kommen im Rahmen des Projektes Studierende beider Einrichtungen für die Bearbeitung definierte Arbeitspakete zum Einsatz. Damit wird ein umfassender Wissenstransfer gewährleistet.

3.1.3 Arbeitsprogramm

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgte im Verbund der TU Dresden, Professur für Bildgebende Messverfahren für die Energie- und Verfahrenstechnik (TUD) und der Hochschule Zittau/Görlitz, Institut für Prozesstechnik, Prozessautomatisierung und Messtechnik, Fachgebiet Messtechnik/Prozessautomatisierung (HSZG). Basierend auf der Zielstellung des Projekts war das Arbeitsprogramm in folgende Punkte gegliedert:

1. *Kontinuierliche Analysen aktueller Forschungsergebnisse zu potenziellen Hüllrohr-schäden und Kernbrennstoffverteilungen bei verlängerter Zwischenlagerung (HSZG)*
2. *Methodische Arbeiten zur Analyse von Gamma-, Neutronen- und Myonenstrahlungsfeldern*
 - a. *Experimentplanung für reale Behälter (TUD)*
 - b. *Methodische Entwicklung der Streubildgebung mit Myonen (TUD)*
3. *Vorbereitung von Experimenten (TUD)*
 - a. *Aufbau eines automatisierten Gamma- und Neutronendetektorsystems (HSZG)*
 - b. *Aufbau eines Myonendetektors (TUD)*
4. *Experimentelle Studien an CASTOR-Behältern (HSZG, TUD)*
 - a. *Messung des Gamma- und Neutronenstrahlungsfeldes (HSZG)*
 - b. *Myonenbildgebung (TUD)*

3.2 Entstandene Veröffentlichungen

R. Rachamin, U. Hampel (2020). Feasibility assessment of using external neutron and gamma radiation measurements for monitoring the state of fuel assemblies in dry storage casks. *Annals of Nuclear Energy*, 135, 106975.

M. Wagner, S. Reinicke, A. Kratzsch & U. Hampel (2020). An analysis for detecting potential relocation of the inventory of dry storage containers during prolonged interim storage via changes in the wall temperature fields. *Nuclear Engineering and Design*, 366, 110749.

Wagner, M.; Kobelt, S.; Stephan, M.; Reinicke, S.; Hampel, U.; Methods for the non-invasive analysis of the inventory status for containers during extended interim storage (DCS-Monitor II); 5th Workshop on the Safety of the Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel, 09.-10.06.2021, Garching, Deutschland

Wagner, M.; Kobelt, S.; Reinicke, S.; Hampel, U.; Methods for Muon Imaging of Transport and Storage Caska for Spent Nuclear Fuel: Recent Results; 6th Workshop on the Safety of the Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel, 01-03.06.2022, Garching, Deutschland

Wagner, M.; Eisenhofer, S.; Reinicke, S.; Hampel, U.; Radiation-based non-invasive monitoring methods for transport and storage casks; 7th Workshop on the Safety of the Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel, 24.-26.05.2023, Garching, Deutschland

Eisenhofer, S.; Reinicke, S.; Wagner, M.; Hampel, U.; Methoden zur Überwachung des Inventarzustands für Transport- und Lagerbehälter für abgebrannte Brennelemente im Zwischenlager, Projektstatusgespräch 2023 zu BMUV-geförderten FuE-Projekten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle 06./07. November 2023, Karlsruhe

Helm, S. (EWN); Verlängerte Zwischenlagerung 40+, Vortrag zum Vorgehen bei der EWN; Fachworkshop Zwischenlagerung, 21./22. November 2023, Berlin

Eisenhofer, S.; Reinicke, S.; Wagner, M.; Hampel, U.; Radiation-based methods for monitoring of transport and storage casks, 8th Workshop on the Safety of the Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel, 15.-17.05.2024, Garching, Deutschland

Eisenhofer, S. et al., „Muon imaging of transport and storage casks“, Kerntechnik 2024, 11.-13.06.2024, Leipzig

Eisenhofer, S. et al., "Radiation-based monitoring of storage casks in interim storage facilities", 56. Kraftwerktechnisches Kolloquium, Dresden.

Wagner, M. et al., "A novel image reconstruction algorithm for muon scattering tomography of complex geometries", Muography Workshop 2024, Santa Fe, USA

Eisenhofer, S. et al., "Non-invasive imaging of transport and storage casks", Muography Workshop 2024, Santa Fe, USA

Wagner, M.; Eisenhofer, S.; Bieberle, A.; Hampel, U.; Algebraic image reconstruction for muon scattering computed tomography without tracing, Journal of Applied Physics, *eingereicht*

4 Stand von Wissenschaft und Technik / Vorbedingungen

4.1 CASTOR 440/84 aus den Kernkraftwerken Greifswald und Rheinsberg (HSZG)

Die CASTOR-Behälter übernehmen aufgrund ihrer Konstruktion die wesentlichen passiven Funktionen zur Einhaltung der Sicherheit im bestimmungsgemäßen Betrieb, im Auslegungsstörfall und bei äußerst unwahrscheinlichen Ereignissen. Sie halten selbst stärksten mechanischen Einwirkungen wie zum Beispiel Umweltkatastrophen und Flugzeugabstürzen stand. Alle CASTOR-Behälter sind durch eine ähnliche konstruktive Gestaltung charakterisiert (siehe Abbildung 1).

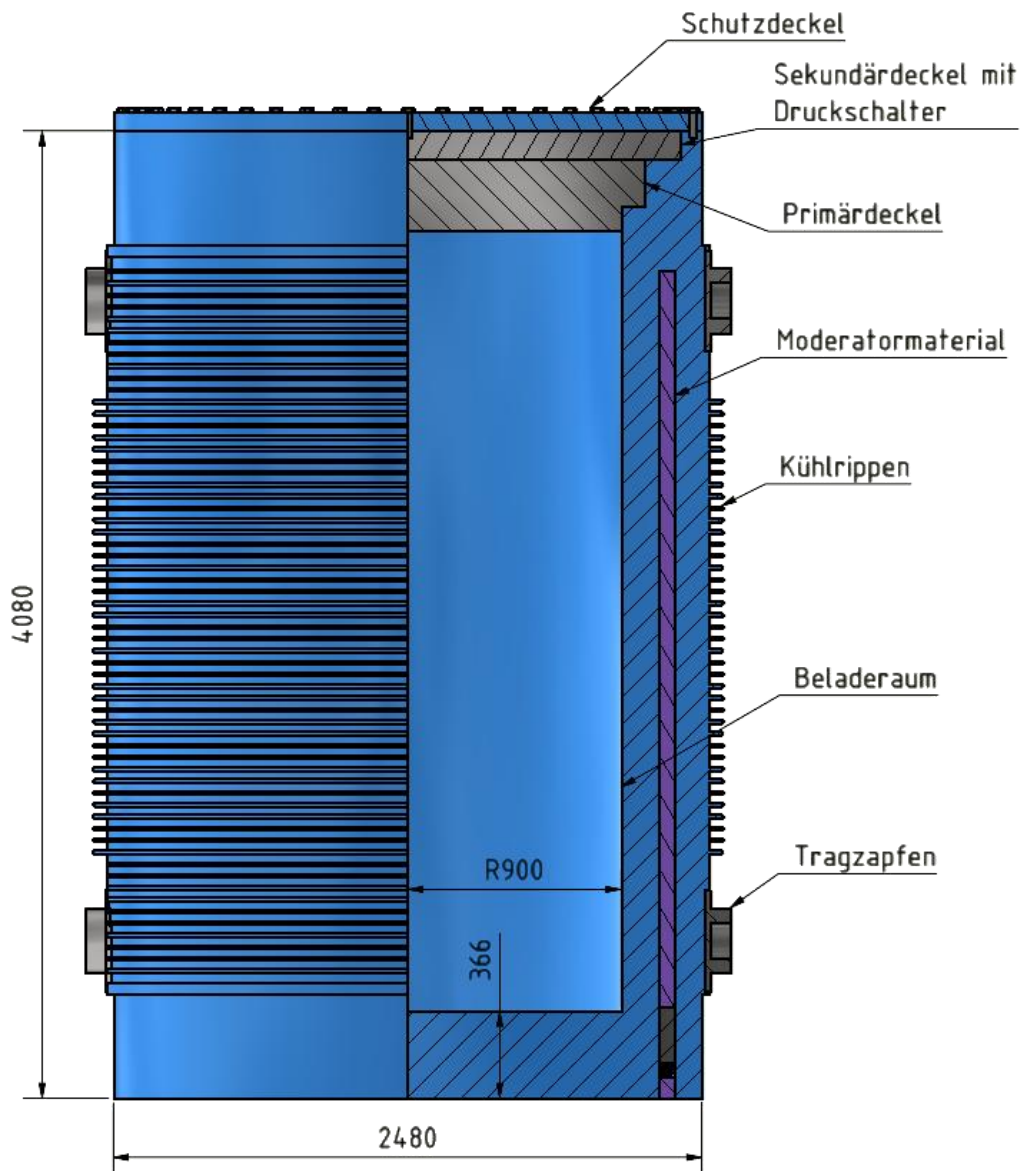


Abbildung 1: Querschnitt eines CASTOR 440/84 (CAD Modell) [1]

Sie bestehen aus einem dickwandigen zylindrischen Behälterkörper aus speziellem Gusseisen (Sphäroguss, GGG40) und haben eine sehr hohe Abschirmwirkung. Darüber hinaus ist die konkrete Ausführung der einzelnen Bauarten vom Inventar abhängig. Im Behälter sind die Inventare in einem Tragkorb fixiert. Aufgrund der Wärmeleistung des Behälterinventars besitzen die meisten CASTOR-Behälter Kühlrippen. Für Inventare mit sehr geringen Wärmeleistungen werden auch Behälter ohne Kühlrippen eingesetzt (z. B. CASTOR® KNK).

Jeder CASTOR-Behälter hat ein Doppeldeckel-Dichtsystem bestehend aus Primär- und Sekundärdeckel. Diese sind unabhängig voneinander mit dem Behälterkörper fest verschraubt. Zwischen Behälterkörper und Deckel befindet sich jeweils eine Metaldichtung. Der mit Helium gefüllte Sperrraum zwischen beiden Deckeln ist auf einen definierten Überdruck eingestellt, der kontinuierlich mit einem Druckschalter überwacht wird. Für den unwahrscheinlichen Fall, dass die Dichtheit einer der beiden Dichtungen nachlässt, entsteht ein Druckabfall, der über den Druckschalter an das Behälterüberwachungssystem gemeldet wird. Auch die Funktionsfähigkeit der Druckschalter selbst wird überwacht.

Zur Moderation der Neutronenstrahlung werden außerdem Moderatormaterialien in der Behälterwand oder zusätzlich boden- und deckelseitig eingesetzt (z.B. CASTOR V/19). Für Inventare mit geringer Neutronenstrahlung ist der Einsatz von Moderatormaterial nicht erforderlich (z.B. CASTOR® KNK). Beim CASTOR 440/84-Behälter sind keine Moderatorplatten im Boden- und Deckelbereich verbaut, aber 76 Moderatorstäbe aus PE-HD (D 65 mm) einreihig im Mantel (siehe Abbildung 1).

Der Betreiber EWN (Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH) lagert im Rahmen der Genehmigung nach §6 Atomgesetz (AtG) [2] 74 CASTOR® 440/84-Transport- und Lagerbehälter in der Halle 8 des Zwischenlagers Nord (ZLN) am Standort Lubmin/Rubenow. Der Korb der TLB ist für eine Standardbeladung von 84 Brennelementen (BE) mit 126 Brennstäben pro BE ausgelegt. Die Brennelemente beider Reaktortypen Rheinsberg und Lubmin vom Typ WWER-70 mit 70 MW elektrischer Leistung haben den gleichen hexagonalen Querschnitt. 58 TLB sind mit je 84 BE beladen. Zwei TLB enthalten auch weitere Kernbestandteile und nur 52 BE bzw. 19 BE. Ein TLB enthält 76 BE sowie geschweißte Stahlrohre an acht Positionen des Tragkorbes. Bei diesen TLB wurden leere Korbpositionen mit Pu-Be-Neutronenquellen, U-haltigen Ionisationskammern und Clusterstützrohren befüllt. [1]

4.2 Zustände des Behälterinventars (HSZG)

Der allgemeine Stand von Wissenschaft und Technik zu Zuständen bzw. Schädigungen des Behälterinventars wurde bereits im Vorgängerprojekt DCS-Monitor detailliert dargelegt. Im laufenden Vorhaben wurden aktuelle Forschungsergebnisse zum langzeitlichen Hüllrohrverhalten und möglicher Brennstoffverlagerungen bei Hüllrohrversagen analysiert und in den Halbjahres- und Jahresberichten dargelegt.

Im Vorhabenzeitraum haben sich diesbezüglich keine neuen, für das Vorhaben relevanten, Entwicklungen ergeben. Der allgemeine Stand von Wissenschaft und Technik zu Zuständen von Behälterinventar wird in diesem Kapitel noch einmal kompakt zusammengefasst.

Eine Vielzahl von Schädigungen und die dazu führenden Mechanismen sind in der Literatur bekannt und werden von Experten sowohl simulativ, als auch experimentell untersucht. Prinzipiell wird bei der Brennstabschädigung zwischen Schädigung des Brennstoffs (Risse, Spaltgaseinschlüsse, lokale thermische Aufheizungen, PCI-Fehler) und Schädigung des Hüllrohrs (Korrosion, Fretting, Verschmutzungsablagerung, Oxidschichtabplatzungen, Wasserstoffversprödung, Rissbildung bis zu Integritätsverlusten) unterschieden.

Tabelle 1: Schädigungen während des Reaktorbetriebs und Zwischenlagerung an Brennstäben und Brennelementen

Während des Reaktorbetriebs	Während der Zwischenlagerung
<p><u>Brennstab</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Poröse Randbereiche der Brennstoffpellets • Pellet-Hüllrohr-Wechselwirkungen (Pellet-Cladding-Interaction) • CRUD • Fretting • Korrosion durch Kühlmittel • Hydrideinlagerungen • Schattenkorrosion • Integritätsverlust <p><u>Brennelement</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Deformation von Brennelementen • Bruch von Strukturmaterialien • Fretting 	<p><u>Brennstab</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Kriechen • Re-Orientierung von eingelagerten Hydriden • Integritätsverlust

Folgende Zustände des Inventars von Transport- und Lagerbehältern sind in Betracht zu ziehen:

- *Möglicher Integritätsverlust einzelner Brennstäbe und Austritt von Brennstoff und gasförmigen Spaltprodukten*
- *Verlagerung von Brennstoff innerhalb des Brennelements/Tragkorbs*

Das Vorhandensein von Spaltgas zwischen Pellet und Hüllrohr spielt eine entscheidende Rolle und ermöglicht das Auftreten bestimmter Schädigungsmechanismen. So „verwachsen“ Hüllrohr und Brennstoff miteinander und es verschließt sich die Lücke zwischen Pellet und Hüllrohr (siehe Abbildung 2). Dies führt zum Aufbau einer inneren Zirkoniumoxid Schicht und zum Entstehen einer festen Pellet-Hüllrohr-Verbindung mit deutlichen Auswirkungen auf den Spannungszustand. Die Pellet-Hüllrohr-Verbindung stabilisiert zwar das Hüllrohr insbesondere im Bereich höherer Abbrände, begünstigt jedoch chemische Vorgänge und führt zu Radial- und Axialspannungen im Hüllrohr (siehe Abbildung 3).

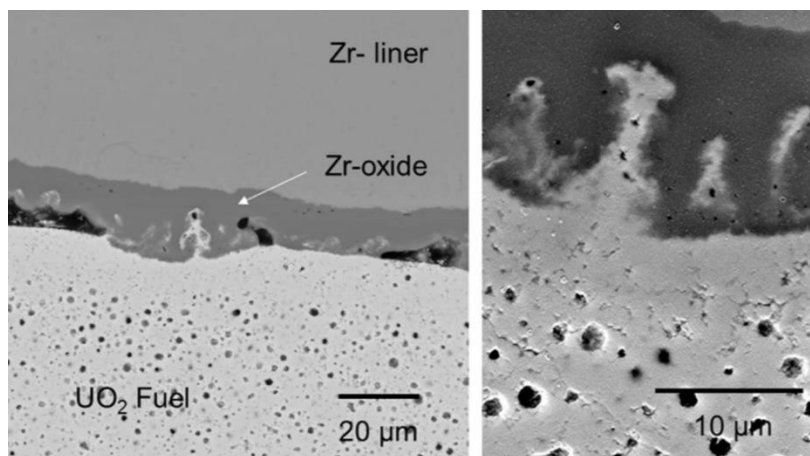


Abbildung 2: Verwachsen von Pellet und Hüllrohr [3]

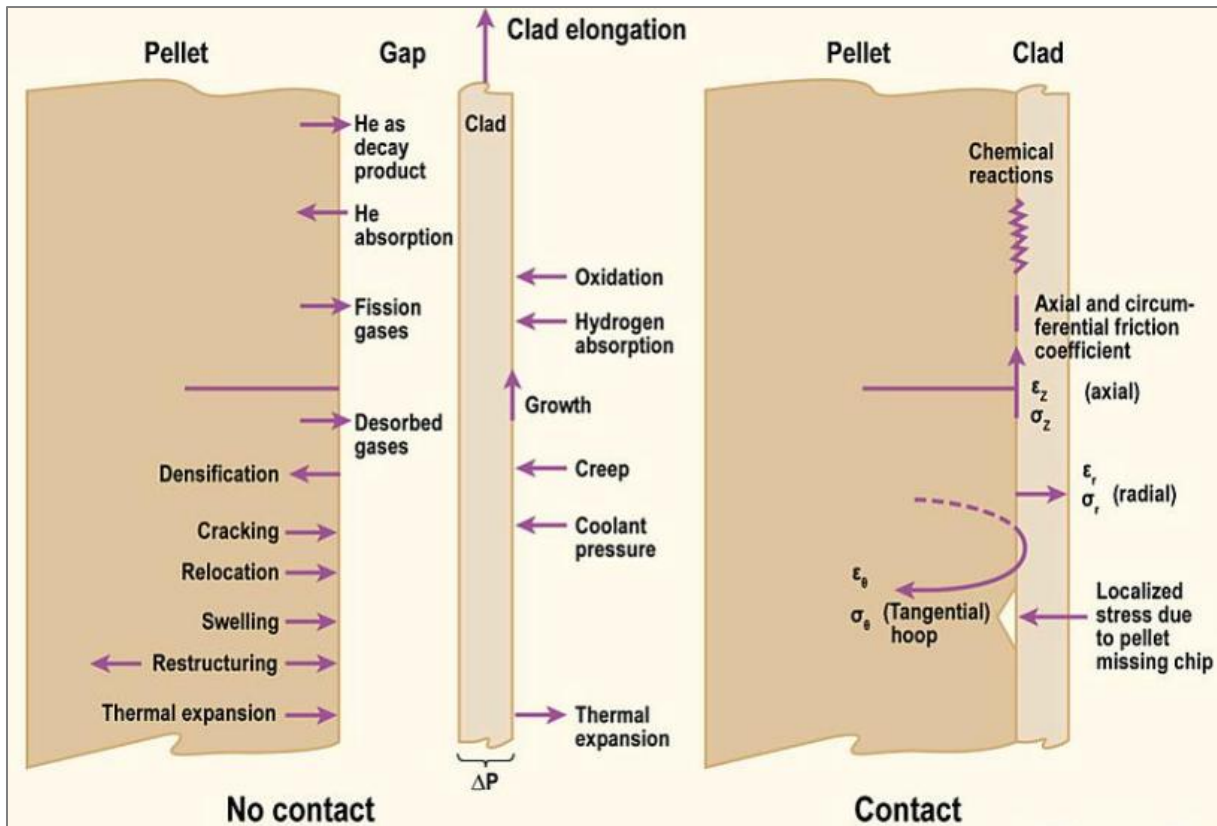


Abbildung 3: Prozesse und Verhalten in und an Brennstäben während der Bestrahlung mit offenem (links) und geschlossenem Pellet-Hüllrohr-Spalt (rechts) [4]

Eine weitere Thematik, der besonders viel Aufmerksamkeit geschenkt wird, da sie praktisch jedes Hüllrohr betrifft, ist die der Wasserstoffversprödung. Hierbei liegt das Hauptaugenmerk auf der Untersuchung des Wasserstoffdiffusionsverhalten in zirkoniumbasierten Hüllrohren und möglichen Auswirkungen auf die Hüllrohrintegrität. Die Wasserstoffdiffusion hängt maßgeblich vom Spannungszustand, der Temperaturhistorie und der Wasserstoffkonzentration ab. Diese Abhängigkeiten und langzeitliche Zustandsveränderungen der Hüllrohre werden beispielsweise in den Vorhaben SPIZWURZ [5] und LEDA [6] umfänglich untersucht. Nach aktueller Lage kann ein Integritätsverlust der Hüllrohre aufgrund von Wasserstoffversprödung nicht ausgeschlossen werden. Insbesondere wenn es zu mechanischen Krafteinwirkungen bei Transportvorgängen kommt.

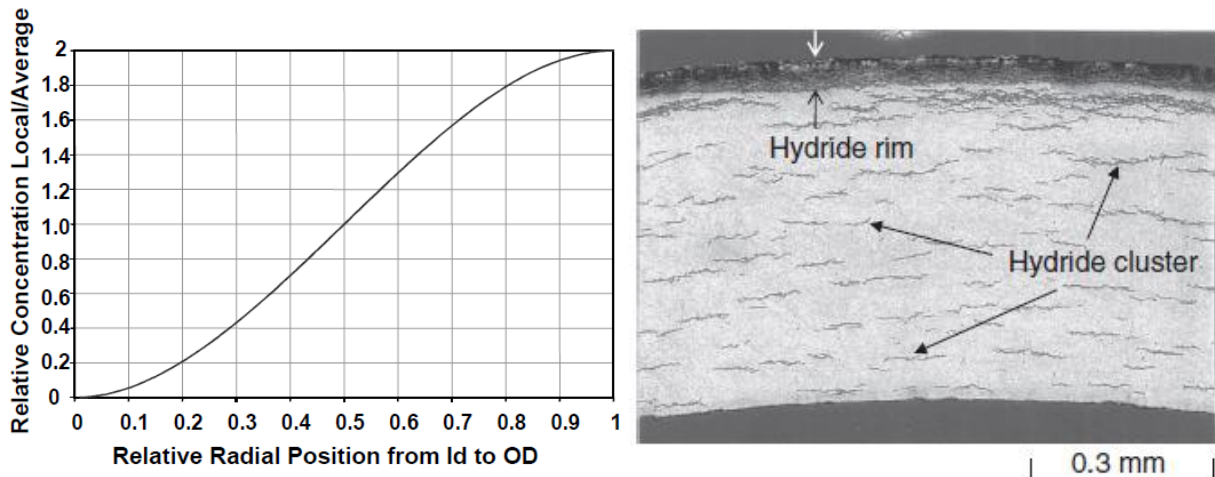


Abbildung 4: Mathematische Idealisierung der Hydridverteilung im Hüllrohr eines hochabgebrannten Brennstabes (ca. 60 GWd/MTU) mit einer mittleren Hydridkonzentration von ca. 600 ppm (links) [7]; Verteilung und Orientierung der Hydride ¹

Abbildung 5 stellt die wichtigen Etappen, welche zum Versagen des Materials führen, dar. Dabei entstehen am Rand der Probe (spröder Hydridrand) kleine Risse. In diesem Bereich ist die Ringspannung hoch und führt zum Anstieg der lokalen Spannung an der Spitze des Risses. Dabei erhöht sich die plastische Verformung an der Spitze bis zu einem maximalen Wert, der temperaturabhängig ist, bevor es zu einem duktilen bzw. wand-durchgehenden Bruch kommt.

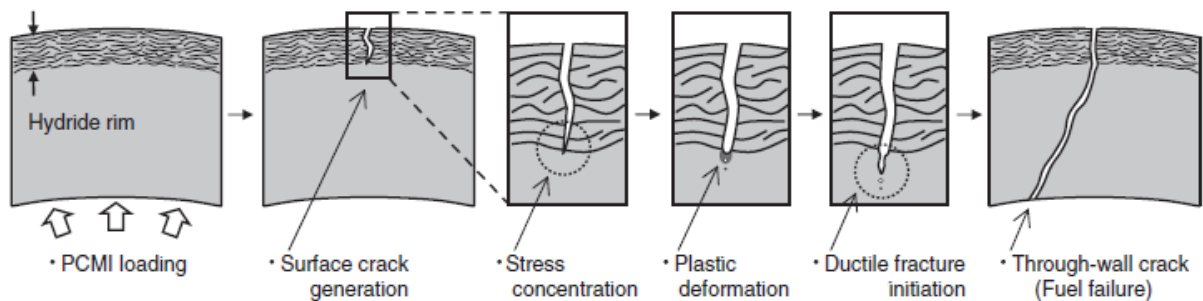


Abbildung 5: Darstellung der Etappen von Rissbildung bis zum Versagen des Materials

Abschließend soll Abbildung 3 einen Überblick über Prozesse von Behälterinventar während des Betriebs geben und die Komplexität des Zusammenspiels verschiedener Schädigungsmechanismen verdeutlichen. Es gibt bis dato keine Formel und keinen Simulationscode, die ein Gesamtbild eines Brennstabes vorhersagen können. Dazu kommt, dass Experten bei Ihren Untersuchungen sich nur auf eine oder wenige Schädigungsart(en) beschränken, bestimmte Annahmen und Abgrenzungen

¹ [TOMI]

treffen und unter Laborbedingungen Versuche durchführen. Für diese Randbedingungen gibt es präzise Simulationscodes und experimentelle Datenbasen. In der Praxis gibt es jedoch eine Vielzahl an Kreuzkombinationen, die wahrscheinlich jedes Brennelement und jeden Brennstab einzigartig macht. Die große Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten und die vergleichsweise geringe Wissensbasis über den tatsächlichen Zustand des Behälterinventars, die nur durch reihenweise Behälteröffnungen geschaffen werden könnte, machen präzise Voraussagen über das Inventar zum jetzigen Zeitpunkt sehr schwer.

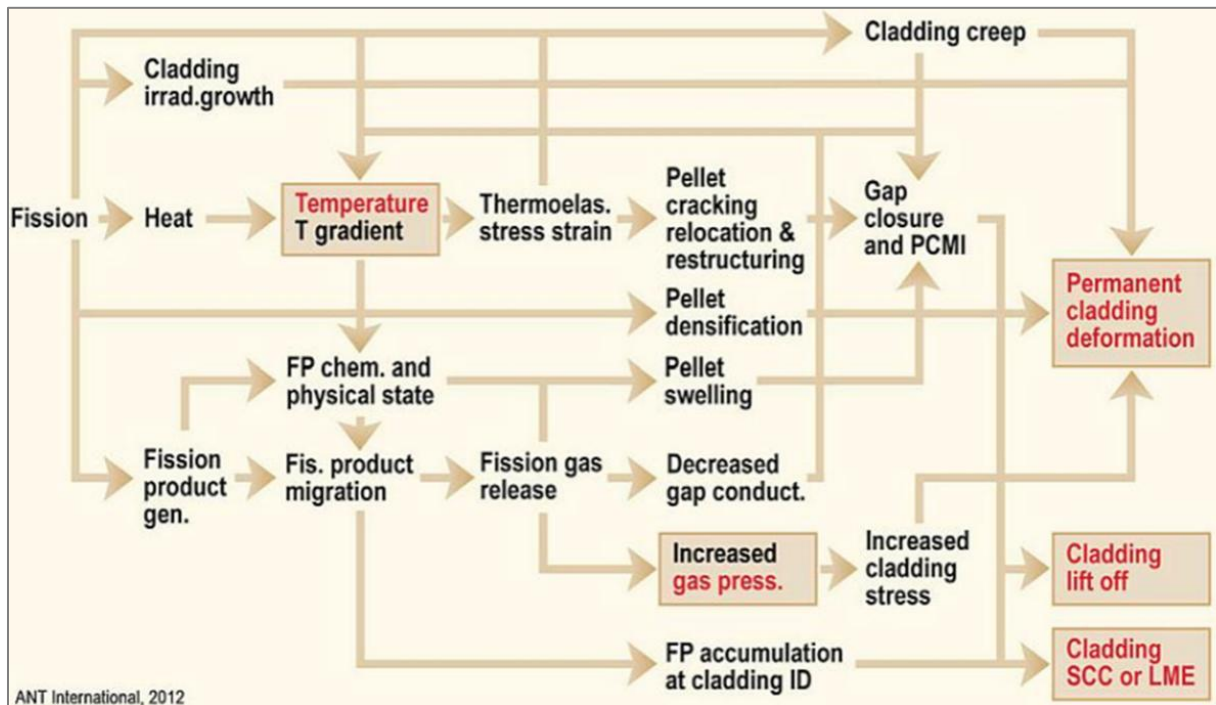


Abbildung 6: Wechselwirkung zwischen den Prozessen innerhalb eines in Betrieb befindlichen Brennstabs [8]

4.3 Nicht-invasive radiographische Messverfahren

4.3.1 Diagnoseverfahren auf Basis von Gamma- und Neutronenstrahlung (HSZG)

Abgebrannter Kernbrennstoff emittiert Gamma- und Neutronenstrahlung, von der ein geringer Anteil außerhalb des Behälters nachweisbar ist. Durch Messen des äußeren Strahlungsfeldes ist ein Rückschluss auf die Quellenverteilung im Behälter möglich. Dies wird unter anderem zur Kontrolle verpackter schwach- und mittelradioaktive Abfälle genutzt [8]. Diese Methoden sind aber nicht direkt auf CASTOR-Behälter übertragbar. Dokumentiert ist ebenfalls ein Forschungsvorhaben, bei dem der Nachweis von austretendem Kr-85-Gas aus den Hüllrohren über dessen Gammastrahlung genutzt wurde, wozu allerdings ein spezieller Behälter mit einer Aussparung im Deckel verwendet wurde.

Im Vorhaben DCS-Monitor wurde durch Monte-Carlo-Simulationen für einen CASTOR V/19-Behälter gezeigt, dass Änderungen der Aktivitätsverteilungen für die wandnah gelagerten Brennelemente durch eine Gammaradiographie an der Mantelfläche des Behälters registriert werden können. Die Abschirmungswirkung der äußeren Brennelemente verhindert jedoch eine ausreichende Sensitivität gegenüber Änderungen an den inneren Brennelementen. Die Neutronenradiographie besitzt hingegen eine ausreichende Sensitivität gegenüber den inneren Brennelementen. Nachteilig ist jedoch, dass hierfür Referenzmessungen notwendig sein werden, da hier die Strahlungssignaturen räumlich deutlich diffuser sind als bei der Gammaradiographie. Aus diesen Studien ergeben sich folgende offene Fragen:

- 1.) Welche Quereinflüsse gibt es im Zwischenlager (Strahlung von Nachbarbehältern)?
- 2.) Welche Messzeiten sind unter realen Bedingungen (Untergrundstrahlung, Detektorrauschen) zu erwarten?
- 3.) Wie gut kann ein Detektor Gamma- und Neutronenzählereignisse unterscheiden?

4.3.2 Myonenbildgebung (TUD)

Kosmische Myonen entstehen als Sekundärteilchen, wenn primäre kosmische Strahlung auf die obere Atmosphäre trifft. Myonen sind einfach geladene Teilchen mit einer Ruhemasse, die ca. 207-mal größer ist als die von Elektronen. Myonen zerfallen nach ca. 2,2 μs . Aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit und der daraus resultierenden Zeitdilatation können sie jedoch noch die Erdoberfläche erreichen. Der Myonenfluss auf Meereshöhe beträgt ca. $160 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Die Myonen Energie verteilt sich über ein breites Spektrum mit einer mittleren Energie von etwa 4 GeV. Aufgrund ihrer hohen Energie können Myonen sehr große und dichte Objekte durchdringen, was sie für die Bildgebung interessant macht, insbesondere wenn die Objekte für andere strahlungsbasierte Bildgebungsverfahren nicht zugänglich oder durchdringbar sind. Für die Bildgebung können zwei Effekte ausgenutzt werden. Zum einen kann der Energieverlust beim Durchdringen eines Objekts zu einer messbaren Absorptionswahrscheinlichkeit führen. Zum anderen führt die Mehrfach-Coulomb-Streuung zu einer Ablenkung des Myons. Eine der ersten bildgebenden Messungen mit Myonen wurde von Alvarez in den 1960er Jahren durchgeführt [9]. Dabei wurde der Myonenfluss einer der Pyramiden von Gizeh durchleuchtet, um nach verborgenen Kammern im Inneren zu suchen. Ähnliche Studien wurden später an anderen Pyramiden durchgeführt [10] [11]. Der gleiche bildgebende Ansatz wurde auch bei der Untersuchung von Vulkanen verwendet, um den Zustand der Magmakammern zu bestimmen [12]. In den letzten Jahren wurde die Bildgebung zunehmend auf komplexere Strukturen angewandt. In den letzten Jahren wurde die Bildgebung zunehmend auf komplexere Strukturen angewandt. So wurde sie beispielsweise eingesetzt, um festzustellen, ob es im Reaktor von Fukushima zu einer Kernschmelze gekommen war [13]. In all diesen Fällen wurde die Absorption von Myonen im Objekt gemessen. Bei kleineren Objekten kann die Myonenstreuung auch zur Bildgebung genutzt werden, indem die Bahn jedes Myons vor und nach dem Durchgang durch das Objekt gemessen wird. Aus dieser Winkeldifferenz lässt sich dann eine Verteilung der Streudichte rekonstruieren, die ein materialspezifischer Parameter ist. Dieser Ansatz wurde auch für Transport- und Lagerbehälter für hochradioaktive Abfälle verwendet [14] [15] [16] [17]. Diese Studien zeigten, dass prinzipiell die Identifikation von Brennelementen möglich ist. Im Vorhaben DCS-Monitor wurde zudem durch Monte-Carlo-Simulationen gezeigt, dass eine Brennstoffverlagerungen innerhalb des Behälters eine deutliche Signatur im Myonenfluss und -richtungsspektrum erzeugen. Aus diesen Studien ergaben sich folgende offene Fragen:

- 1.) Welche Quereinflüsse gibt es in einem realen Zwischenlager (insbesondere Streuung von Nachbarbehältern)?
- 2.) Welche Messzeiten sind unter realen Bedingungen (Untergrundstrahlung, Detektor-rauschen) zu erwarten?

- 3.) Wie gut kann ein realer Detektor Myonen von Gamma- und Neutronenzählereignisse unterscheiden?
- 4.) Welche Detektorkonfiguration ist optimal in Bezug auf Messzeit und Aufwand?
- 5.) Ist es möglich, mittels Lösung eines inversen Problems Nutzen aus den gestreuten Myonen zu ziehen? Lassen sich damit axiale Brennstoffverteilungen auflösen?

5 Messung des Gamma- und Neutronenfeldes (HSZG)

5.1 Zielsetzung

Die Intention für ein Monitoring von CASTOR-Behältern ist, an definierten räumlichen Positionen die Gamma- und Neutronenaktivitäten an der Außenwand zu detektieren, auszuwerten und mit den Dosisleistungen zum Zeitpunkt der Abfertigung und Einlagerung zu vergleichen. Mit diesem Messverfahren sollen potenzielle Veränderungen der bestimmungsgemäßen Eigenschaften des Inventars ermittelt werden. Derartige Messungen ermöglichen zwei sich ergänzende Vorgehensweisen:

1. *Durch Wiederholungsmessungen an den exakt gleichen Messpunkten zu späteren Zeitpunkten lassen sich Differenzbilder erstellen, mithilfe derer einerseits die erwartete Abnahme der Aktivität untersucht werden kann und andererseits potenzielle Brennstoff-Umverteilungen detektiert bzw. ausgeschlossen werden können.*
2. *Durch Vergleich von Mess- und Simulationsdaten kann das Simulationsskript evaluiert werden. Bei plausibler Übereinstimmung kann das Simulationsskript genutzt werden, um die Strahlungsfelder für verschiedene Inventar-Szenarien vorherzusagen.*

Um solche Messungen durchführen zu können, wurde von der HSZG ein automatisiertes Messsystem entwickelt. Ziel der Messkampagne ist es, einen 360°-Scan der austrittseitigen Strahlungsaktivität an der Behältermantelfläche durchzuführen um den behälter- und zeitspezifischen "Strahlung-Fingerabdruck" des TLB CASTOR 440/84 im Sinne einer Heatmap zu generieren. Die Ergebnisse der Messungen dienen:

- *dem Funktionstest des vollständigen Messsystems an einem realen CASTOR-Behälters unter den Messbedingungen in einem Zwischenlager*
- *zur Erstellung von Strahlungskarten (bzw. Heatmaps) für Gamma- und Neutronenstrahlung*
- *dem Vergleich zwischen aktuellen Messdaten und Messdaten bei der Abfertigung und Einlagerung des Behälters*
- *der Bewertung und Validierung der begleitenden Strahlungssimulationen (FLUKA)*
- *als Basisinformation für ggf. weitere Messungen.*

5.2 Methodische Arbeiten zur Analyse von Gamma- und Neutronenstrahlungsfeldern

In diesem Abschnitt werden basierend auf dem Vorgängervorhaben DCS-Monitor die weiterführenden Monte-Carlo-Simulationen besprochen. Zunächst erfolgte dabei eine vertiefte Analyse der Simulationen eines CASTOR V/19-Behälters.

Für die Monte-Carlo-Simulationen werden von der Vorgeschichte des Brennelements abhängige Neutronen- und Gamma-Spektren sowie die Materialzusammensetzung des Brennstabes benötigt. Der Abbrand an Brennstäben weist eine axiale Verteilung auf. Diese wurden basierend auf Daten aus [18] bestimmt. Für die Bestimmung der Materialzusammensetzung und der Gamma-Spektren wurde die Inventar Simulations-Plattform FISPACT-II als geeignet ausgewählt und verwendet. An FISPACT wird die initiale Zusammensetzung des Brennstabes übergeben, sowie die Leistung in W/cm^3 . Die Bestrahlung wird so lange fortgesetzt, bis der gewünschte Abbrand erreicht ist. Nach der Abkühlphase mit wählbarer Dauer werden die Gamma-Spektren, die Gamma- und Neutronen-Aktivität und die Zusammensetzung des Materials ausgegeben. Als Neutronen-Spektrum wird ein Watt-Spektrum verwendet, welches über die Wattparameter von der Materialzusammensetzung abhängt und über ein Matlab-Skript bestimmt wird. Da der Anteil der Neutronen aus spontaner Spaltung 99,76% bis 98,63% des Gesamtneutronenflusses beträgt [19], ist das Vernachlässigen der (a,n)-Reaktionen, die ebenfalls zur Neutronenproduktion beitragen, gerechtfertigt. Die bereits vorhandenen MCNP6-Eingangsdateien wurden für das Multithreading angepasst und ein Projektverzeichnis auf dem HPC-System Taurus der TU Dresden angelegt, um die Simulationen parallel ausführen zu können. Da die MCNP6-Quelldateien nicht vorliegen kann kein MPI verwendet werden, sodass nicht mehrere Knoten gleichzeitig für eine Simulation verwendet werden können. Für eine bessere Statistik wurde eine Wichtungs-Eingangsdatei erstellt. Wie bereits in DCS-Monitor I erfolgte dies über das Reduzieren der Materialdichten und deren stufenweises Erhöhen bis zur realen Dichte. Es wurde eine Wichtungs-Datei für die Gamma-Strahlung und eine für die Neutronenstrahlung erstellt. Beide wurden in allen darauffolgenden Simulationen verwendet. Mit Monte-Carlo-Simulationen mit der Monte-Carlo-Simulationssoftware MCNP6.2 wurden der Gamma- und Neutronenfluss außerhalb des CASTOR-Behälters in Abhängigkeit von der kinetischen Energie der Teilchen untersucht. Diese Simulationen verdeutlichten, dass Teilchen mit niedrigeren Energien ein Absacken des Brennstoffes um 9 cm aufgrund aufgeblähter Brennstäbe deutlicher zeigen. Dies ist in Abbildung 7 dargestellt. Zudem wurden Simulationen durchgeführt, bei denen ein gewöhnliches Uranoxid-Brennelement durch ein Dummy-Brennelement oder ein MOX-Brennelement ersetzt wurde. Für das MOX-Brennelement wurden die Spektren und die Zusammensetzung wie zuvor beschrieben über FISPACT erstellt. Wie bereits bei den Simulationen mit aufgeblähtem Brennelement zeigt sich, dass mit Gamma-Strahlung nur eine Veränderung in der äußersten Brennelement-Reihe

nachgewiesen werden kann. Abbildung 8 zeigt den Gammafluss außerhalb des CASTOR-Behälters bei einem Dummy-Brennelement im äußeren Bereich und im inneren Bereich. Über weitere Simulationen wurde überprüft, ob die chemische Bindung der Polyethylen-Atome wie zuvor angenommen vernachlässigt werden kann. Hierfür wurden die $S(\alpha, \beta)$ -Reaktion in den MCNP-Neutronen-Simulationen aktiviert. Die Differenz der Simulationen mit und ohne Berücksichtigung der chemischen Bindung beträgt etwa 1%, sodass sie weiterhin vernachlässigt werden kann.

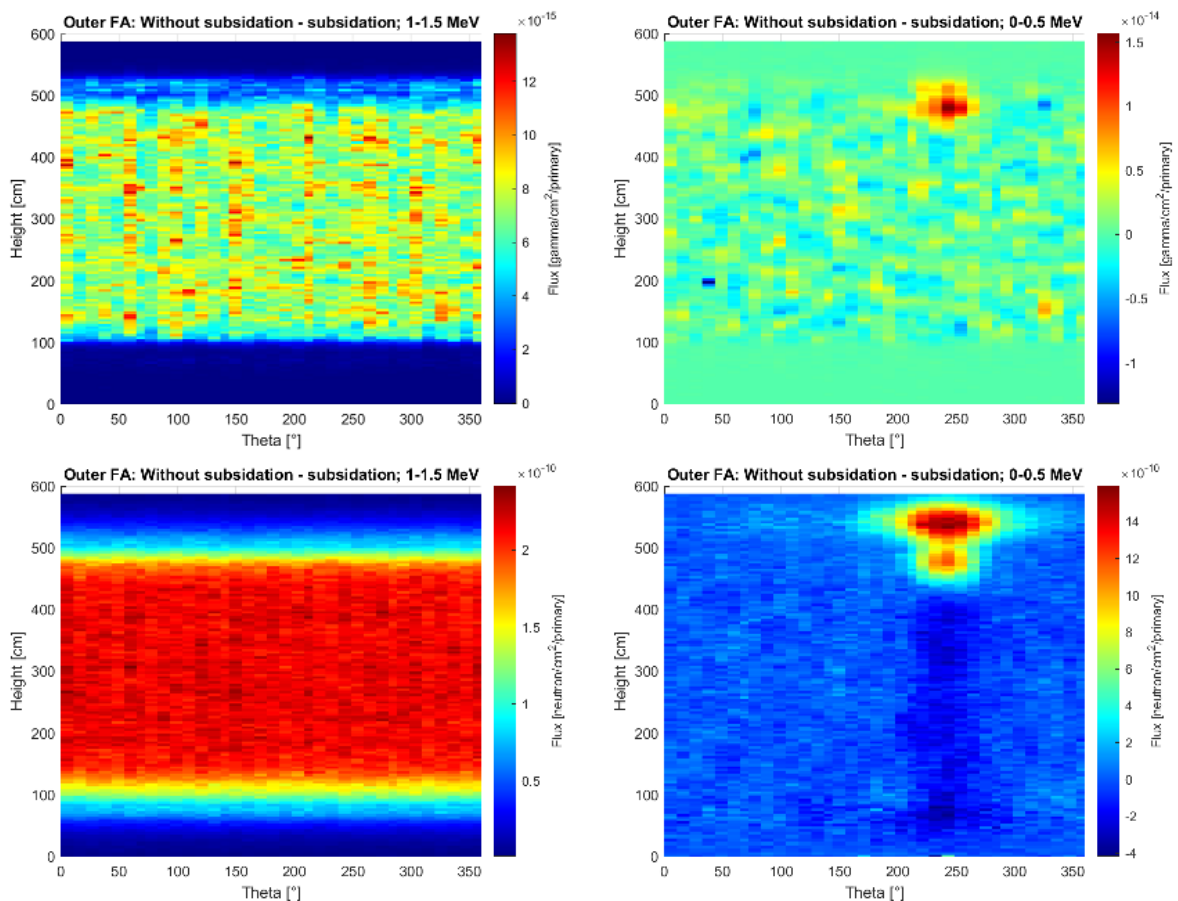


Abbildung 7. Differenz des Gamma (oben) - und Neutronenfluss (unten) zwischen aufgeblähtem (mit Absacken des Brennstoffs innerhalb der Brennstäbe um 9 cm) und normalem Brennelement außerhalb des CASTOR-Behälters für verschiedene Energiebereiche.

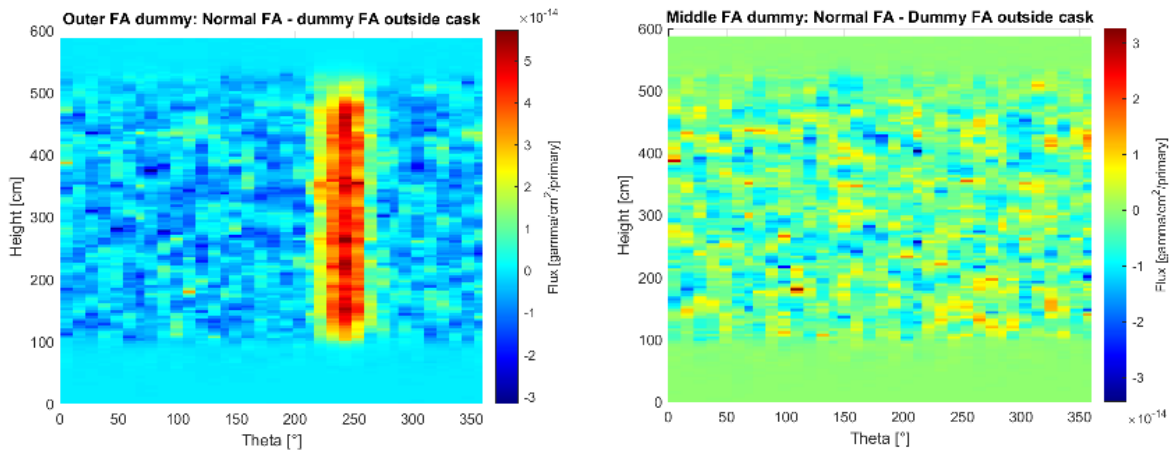


Abbildung 8. Differenz im Gammafluss zwischen Uranoxid-Brennelement und Dummy-Brennelement im äußeren Bereich (links) oder im mittleren Bereich (rechts).

Durch die während der Projektlaufzeit entstandene Kooperation mit EWN mussten neue Simulationsgeometrien für Behälter des Typs CASTOR 440/84. Im Zuge dessen wurde überprüft, ob eine Nutzung von frei verfügbaren Monte-Carlo-Codes anstelle von MCNP möglich ist. In die engere Auswahl fielen Geant4 und FLUKA. Da die Quellmodellierung in FLUKA für die Anforderungen des Projekts einfacher ist, wurde dieser Code gewählt. Zunächst wurde die CASTOR V/19-Geometrie nachgestellt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse für FLUKA und MCNP zu erzielen. Größte Herausforderung ist dabei in FLUKA die Wichtung für verschiedene Geometrieregionen zu finden. In Regionen hoher Wichtung werden Partikel vervielfacht, um die Simulation zu beschleunigen. Ohne dieses Vorgehen wären simulierte Flüsse für mehrere Stunden Messzeit aufgrund der benötigten Rechenzeit nicht umsetzbar. Typischerweise erhalten quellferne Regionen eine höhere Wichtung, da dorthin nur noch wenige Photonen und Neutronen gelangen. Die Wichtung der Regionen muss allerdings so erfolgen, dass keine Verfälschung der Richtungs- und Energiespektren auftritt. Da es hierfür keine Algorithmen gibt, muss dies empirisch erfolgen. Nach Fertigstellung der Wichtungsregionen zeigten die simulierten Strahlungsflüsse von MCNP und FLUKA nur noch quantitativ geringe Unterschiede, siehe Abbildung 9.

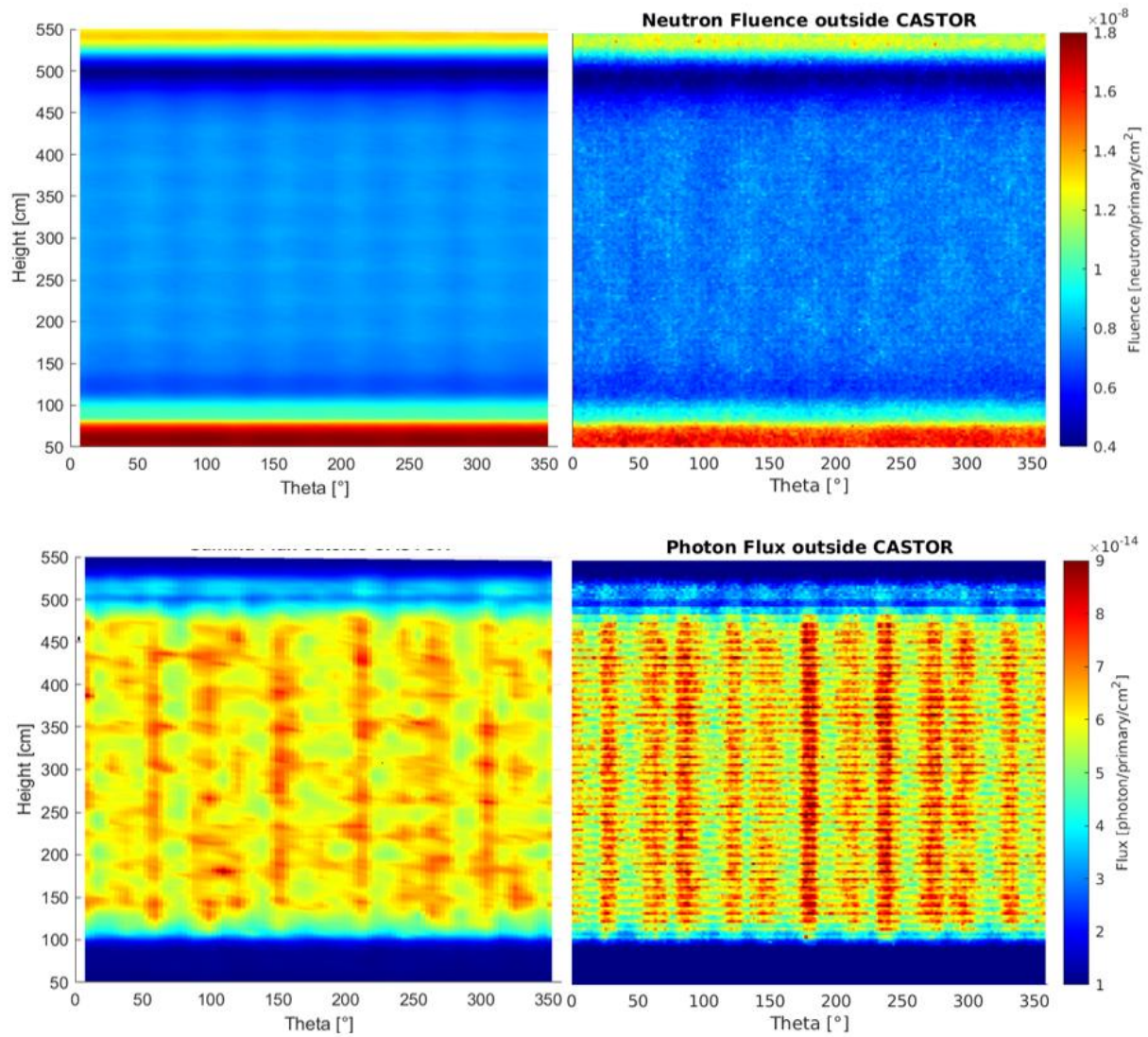


Abbildung 9. Verteilung des Neutronen- (oben) und Gammaflusses (unten) außerhalb der Seitenwand des CASTOR V/19, simuliert in MCNP (links) und FLUKA (rechts).

Im Anschluss wurde die Geometrie des CASTOR 440/84-Behälters in FLUKA auf Basis der von EWN bereitgestellten Geometriedaten implementiert (siehe Abbildung 10). Die Wichtung der Regionen wurde anhand der Erfahrungen mit der CASTOR V/19-Geometrie durchgeführt. Für generische Beladungszustände konnten plausible Strahlungskarten simuliert werden.

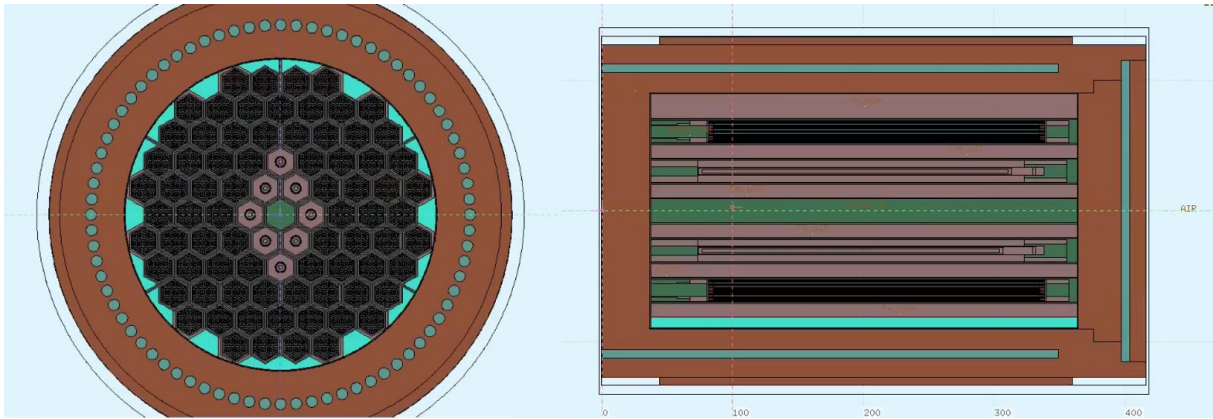


Abbildung 10. Radiale (links) und axiale (rechts) Geometrie für CASTOR 440/84 als Vorgabe für die FLUKA-Simulationen.

Da die Neuimplementierung der Geometrie erst in der zweiten Hälfte der Vorhabenlaufzeit möglich war, konnten keine Simulationen für realistische Beladungen durchgeführt werden. Neben den exakten Beladungsdaten sind dafür detaillierte Abbrandrechnungen nötig. Ein Vergleich zwischen Simulationen und Messdaten für einen konkreten Behälter waren daher im Vorhabenzeitraum nicht mehr möglich. Diese Arbeit wird in einem potenziellen Folgevorbahn weitergeführt.

5.3 Experimentelle Untersuchungen

5.3.1 Aufbau und Funktionsweise des Traversiersystems

Es wurde eine teilautomatisierte Traversiereinheit entwickelt, die die Aufgabe hat, zwei Gamma- und Neutronendetektoren orbital und vertikal um einen Transport- und Lagerbehälter (TLB) zu verfahren. Dabei können unterschiedliche CASTOR-Typen wie zum Beispiel der V/19 oder auch der 440/84 untersucht werden (siehe Abbildung 11).

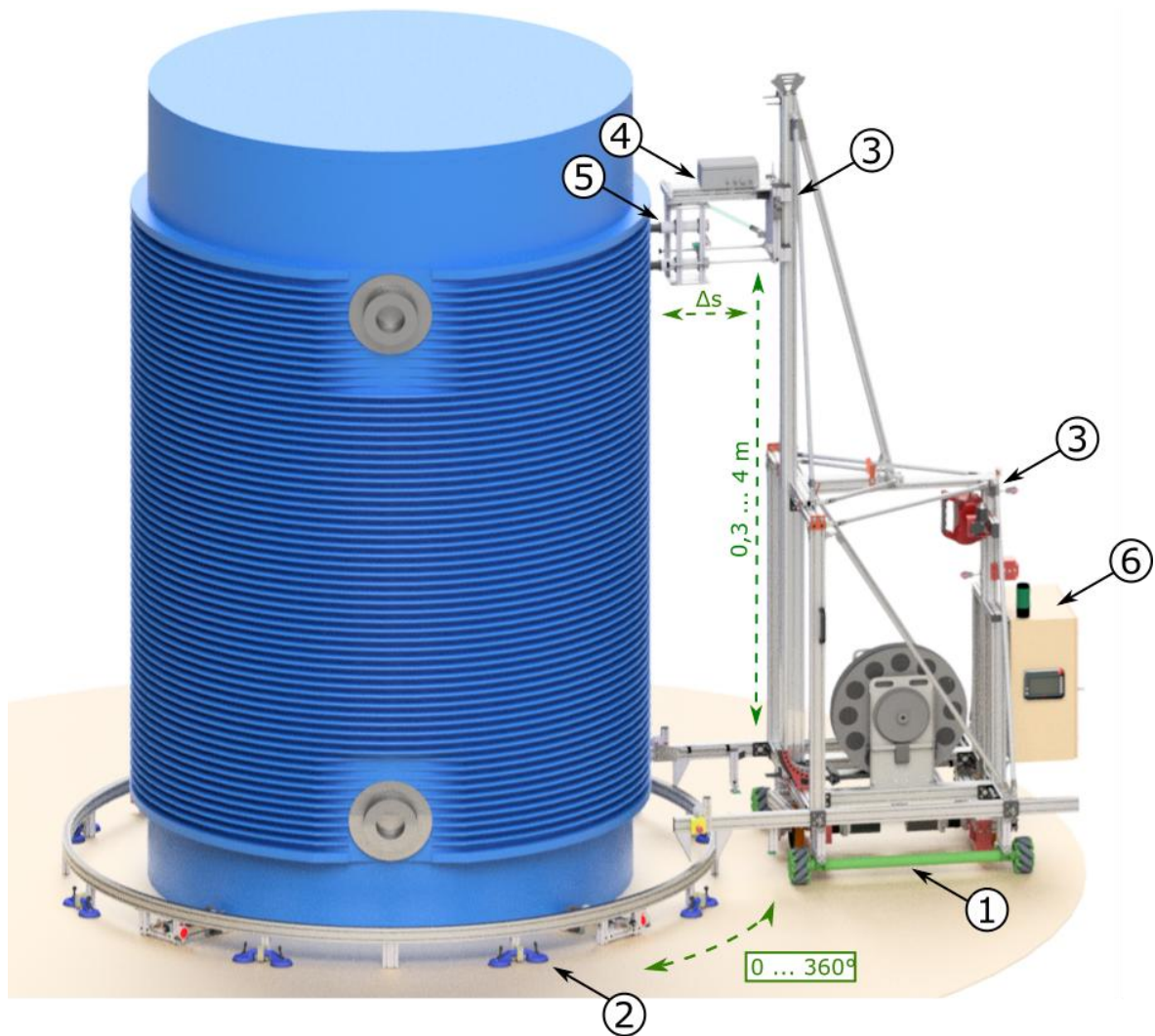


Abbildung 11: Exemplarische Darstellung eines CASTOR 440/84 und des mobilen Messsystems mit Teilsystemen (CAD-Model, siehe Tabelle 2).

Das ursprüngliche Design des mobilen Messsystems orientierte sich an der äußeren Geometrie des CASTOR V/19 für Brennelemente aus Druckwasserreaktoren (DWR) und ermöglicht es die Strahlungsdetektoren stufenlos entlang der Behälterwand zu positionieren.

Das Messsystem setzt sich aus den in Abbildung 11 und Tabelle 2 dargestellten Teilsystemen und Komponenten zusammen. Die Gesamtmasse des Systems beträgt ca. 375 kg.

Tabelle 2: Teilsysteme und Komponenten des Messsystems

Nr.	Bezeichnung	Komponenten
1	Grundgerüst und verfahrbare Trägerstruktur mit Hauptantriebssystem	Schrittmotoren, Getriebe, Antriebsräder, Sicherheitsbremsen, Abstandssensoren, OmniWheels
2	Schienensystem	Teilsegmente, Ausdrehstützen, Saugheber
3	Bewegungsapparat für vertikales Verfahren	Elektroseilwinde, Umlenkrollen, Drehgeber, Linearführung, Schlitten, Endlagenschalter
4	Horizontales Verfahrenssystem	Elektro-Linearführung, Endlagenschalter
5	CASTOR-Sensorik	Strahlungssonden (CLYC's), Pyrometer
6	Schaltschrank	Bedienelemente, Netzteile, SPS, Signalwandler

Zwei baugleiche Antriebssysteme im unteren Bereich der Trägerstruktur (1) bilden das Hauptverfahrenssystem (1). Das Antriebssystem ermöglicht die Bewegung des Messsystems auf einer Kreisbahn oder frei im Raum. Das Schienensystem (2) stellt eine mechanische Barriere zum CASTOR-Behälter dar und führt die Trägerstruktur beim orbitalen Verfahren. Mit Hilfe einer Elektroseilwinde (3) wird ein Schlitten beziehungsweise der Baugruppenträger für die Strahlungssensorik (4) entlang einer vertikalen Führungsschiene in der Höhe verfahren. Ein Kabelaufroller mit Federeinzug führt beim vertikalen Verfahren sämtliche elektrischen Verbindungen nach. Weiterhin ist eine elektrische Linearführung für die horizontale Bewegungen am Schlitten befestigt wodurch die Strahlungssensorik (5) in definierten Abständen zur Behälterwand positioniert werden kann. Alle elektrischen Verbindungen laufen im Schaltschrank (6) zusammen in dem alle Mess-, Steuer- und Regelaufgaben realisiert werden. Alle hier genannten Teilsysteme werden im Anhang ab Kapitel 10.1 genauer beschrieben.

5.3.2 Bedienung des Traversiersystems

Für die Interaktion mit der Versuchsstandsleittechnik - der Steuerung des Traversiersystems - wurde eine Weboberfläche „General User Interface“ (GUI) entworfen (siehe Abbildung 12 u.f.), auf welche per Browser (192.168.1.100, Benutzer: admin, PW: wago) zugegriffen werden kann.

Bedienung der Messanlage

Orbital Vertikal & Horizontal Logger

Orbitales Verfahren

Bewegungsmuster	4
Verfahrensmodus	0
Aktivierung der Stepper 1&2	
Error-Reset der Stepper 1&2	

Bewegungsmuster 4 - um Castor Verfahren (Kreisbahn)

Position [°]		v (Stepper 1)		v (Stepper 2)	
IST:	0.000	IST:	0	IST:	0
SOLL:	0.000	SOLL:	150	SOLL:	223

a (Stepper 1)		a (Stepper 2)	
IST:	300	IST:	446
SOLL:	300	SOLL:	446

Abstand A [cm]		Abstand B [cm]	
IST:	482	IST:	555
SOLL:	0	SOLL:	0

Taster 1 Quittierung Taster 2

Key-Schalter
1

Version	V1.0	Uhrzeit	13:32:45	Versuchszeit	0 s
---------	------	---------	----------	--------------	-----

Orbitales Verfahren

Stepper 1		Stepper 2		Abstand	
Busy		Busy		A	482 mm
Done		Done		B	555 mm
Error		Error			
Position	0.0 °	Position	0.0 °		
Geschwindigkeit	0	Geschwindigkeit	0		
Beschleunigung	300	Beschleunigung	446		

Status:

Not-Aus

Fehler

Antrieb

Bremsen

Abbildung 12: Benutzeroberfläche zur Bedienung des orbitalen Verfahrens

Die GUI ist in drei Bereiche/Spalten untergliedert wobei links allgemeine Elemente zur „Bedienung der Messanlage“, mittig das orbitale Verfahren und rechts das vertikale und horizontale Verfahren visualisiert werden. Im Bereich links unten befinden sich die in Kapitel 10.1.6 beschriebenen Bedienelemente an der Schaltschranktür und die Signalampel, damit auch aus der Ferne mit diesen Elementen interagiert werden kann. Unter dem Reiter „Orbital“ (siehe Abbildung 12) erscheinen sämtliche Betriebsparameter zur Benutzung des Hauptverfahrens, das heißt um das Traversiersystem auf dem Boden zu verfahren.

Folgende Bewegungsmuster sind wählbar, wobei das Bewegungsmuster 4 durch den Schlüsselschalter auf Stellung „1“, voreingestellt ist.

1. Seitliches Verfahren
2. Drehen um die eigene Achse
3. Kreisen um eine beliebige Mittelachse
4. Kreisen um einen CASTOR 440/84

Die Verfahrenswege der Bewegungsmuster können in der GUI unter dem Aktivierungsknopf eingestellt und per Klick auf die entsprechende Schaltfläche ausgelöst werden. Beim Verfahrensmodus wird zwischen dem Tipp-Betrieb, mit Absolut- oder Relativkoordinaten unterschieden. In der rechten Bildschirmhälfte wird die orbitale Position und der Status der Motoren visualisiert.

Der Reiter „Horizontal & Vertikal“ beinhaltet alle Bedienelemente zur Ausführung dieser Bewegungen (siehe Abbildung 13).

Bedienung der Messanlage

Orbital
Vertikal & Horizontal
Logger

Vertikales Verfahren

CLYC-Höhen [mm]		
1:	600.0	
2:	400.0	

CLYC 1 [mm]	CLYC 2 [mm]	Bezugsplatte [mm]
IST: 600.0	IST: 400.0	IST: 313.0
SOLL: 0.0	No selection	

Referenzfahrt
Positionierung

Horizontales Verfahren

Versatz [mm]	Kollimator [mm]
Delta: 182.0	Länge: 0.0

Hub [mm]	v [r/min]	Luftspalt X [mm]
IST: 0.0	IST: 0	IST: -185
SOLL: 0.0	SOLL: 300	SOLL: 0

Home
Positionierung
Regelung

●
●
●

Taster 1
Quittierung
Taster 2

Key-Schalter
2

Version V1.0
Uhrzeit 13:39:22
Versuchszeit 0 s

Vertikales und horizontales Verfahren

■ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Abbildung 13: Benutzeroberfläche zur Bedienung des vertikalen und horizontalen Verfahrensystems

Dazu müssen vorab die absoluten Sensorhöhen zum Boden definiert und Referenzfahrten zur Ermittlung der Endlagen durchgeführt werden, damit sämtliche Soll-Positionen in Bezug auf die untere bzw.

hintere Endlage gelten. Anschließend können per Sollwertvorgabe Werte für die vertikale und horizontale Position bestimmt und per Schaltfläche „Positionierung“ angefahren werden.

Beim horizontalen Verfahren gibt es die Besonderheit, dass ein Offset für die Verwendung von Kollimatoren einstellbar ist. Dieser Wert wird bei der Berechnung der Luftspaltes zwischen CASTOR-Wand und Vorderkante der CLYC-Sensoren berücksichtigt. Im rechten Bereich wird der Anlagenzustand grafisch visualisiert.

Unter dem Reiter „Logger“, dem letzten Reiter, wird das Mitloggen aller anlagenrelevanten Parameter in Form einer .csv-Datei gestartet. Dies ist notwendig um bei der Auswertung die Position der CLYC-Sensoren und ihre Temperatur nachvollziehen zu können. Ebenso kann in dem Reiter der zeitliche Verlauf aller aufgelegten Temperatursensoren von Umgebung, Schaltschrank und der CLYC's visualisiert werden um Trends bzw. eingeschwungene Zustände zu erkennen.

5.3.3 Duale Strahlungsmesstechnik (CLYC-Sensoren)

Zur Strahlungsdetektion werden üblicherweise Zählrohre oder Szintillatoren verwendet. Aufgrund ihrer kompakten Bauweise und des Verzichts auf preisintensives Helium-3 werden für das Messsystem Gamma- und Neutronen-empfindliche Szintillatoren eingesetzt. Cs₂LiYCl₆:Ce (CLYC:Ce) Szintillatoren eignen sich besonders, da sie eine gleichzeitige Erfassung von Gamma- und Neutronenstrahlung ermöglichen. Die Gruppe der mit 95% ⁶Li angereicherte CLYC-Sensoren zeichnet sich darüber hinaus durch eine großen Lichtausbeute für thermische Neutronen ($73000 \frac{\text{Photonen}}{\text{Neutron}}$) und bei Gammastrahlung ($22000 \frac{\text{Photonen}}{\text{MeV}}$) aus [20], wobei keine zusätzliche Kühlung benötigt wird. Über die ⁶Li(n, α)t-Reaktion treten die thermischen Neutronen mit hohem Wirkungsquerschnitt $\sigma(E_{\text{kin}} = 0,025 \text{ eV}) = 940 \text{ barn}$ in Wechselwirkung mit dem Szintillatorkristall. Die schnellen Neutronen ($E_{\text{kin}} \approx 3 \text{ MeV}$) wechselwirken über die ³⁵Cl(n,p)³⁵S- und ³⁵Cl(n,α)³²P-Reaktion. Der Wirkungsquerschnitt der ³⁵Cl(n,p)³⁵S-Reaktion $\sigma = 0,2 \text{ barn}$ und der Wirkungsquerschnitt der ³⁵Cl(n,α)³²P-Reaktion $\sigma = 0,01 \text{ barn}$ sind jedoch deutlich kleiner als der Wirkungsquerschnitt der thermischen Neutronen [21]. Entsprechend den Produktdaten des verwendeten zylindrischen CLYC-Szintillators der Firma Radiation Monitoring Devices (RMD - Modellnummer CLYC-25-PHI-25-P-114-H49) bieten die CLYC-Sensoren bei $E_{\text{photon}} = 662 \text{ keV}$ eine Energieauflösung von $< 5\% \text{ FWHM}$. Der verbaute CLYC-Szintillatorkristall besitzt einen Durchmesser $d = 25 \text{ mm}$ (1 Zoll) und ist fest mit einem Photomultiplier als Vorverstärker verbunden. Der Vorverstärker benötigt an den Verbindungssteckern eine Spannung von $\pm 24 \text{ V}$ und hat eine Leistungsaufnahme von $0,3 \text{ W}$. Der Vorverstärker wird auf die Kontakteleiste des dualen Einkanal-Analysators SMC 2100 / DS aufgesteckt (siehe Abbildung 14).

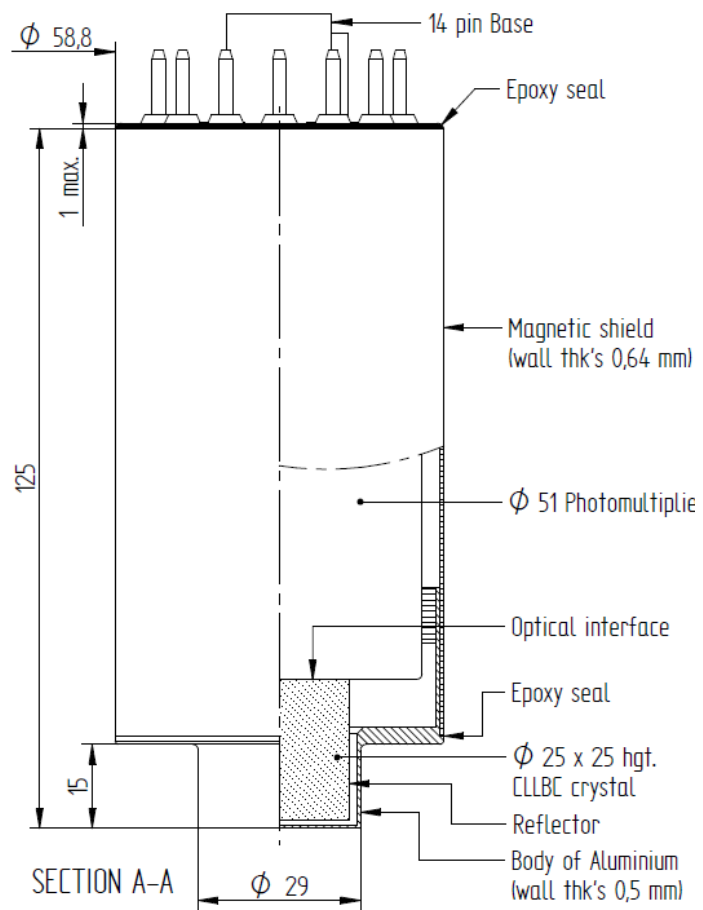


Abbildung 14: CLYC Neutron-Szintillator-Detektor mit Vorverstärker [22].

Der SMC 2100 ist ein Spektroskopieverstärker, der den positiven oder negativen Eingangsimpuls des Vorverstärkers $U_{ein} = 0 \text{ V} \dots 5 \text{ V}$ nochmals verstärkt. Die Verstärkung ist per Software von 1 bis 250 einstellbar. Der gaußförmige Ausgangsimpuls ist positiv und linear mit $U_{aus} = 0 \text{ V} \dots 5 \text{ V}$. Die beiden zugehörigen unabhängigen Einkanalanalysatoren sind zwischen 0 V und 5 V mit 12 Bit Auflösung einstellbar. Der SMC 2100 wird an eine Eingangsspannung 12 V ... 36 V DC angeschlossen. Dies führt zu einer Hochspannung von 0 V bis 2000 V, die per Software in 1 V Schritten eingestellt werden kann. Ihre Polarität ist positiv oder negativ und die Hochspannung ist kurzschlussfest.

Der SMC 2100 / DS wird an den fest am Szintillator verbauten Photomultiplier angeschlossen und bietet mit seinen zwei Fenstern die gleichzeitige energieselektive Messung von Gamma- und Neutronen. Ein Fenster kann für die Messung der Neutronenstrahlung und das andere Fenster für die Messung der Gammastrahlung verwendet werden. Die äquivalente Gamma-Energie der Neutronen $GEE = (E_n + Q_{M,I})f_q$ ergibt sich aus der Energie der Neutronen E_n , dem Q -Wert und dem Löschkoeffizient f_q des Detektors. Das Eingrenzen des Energiebereichs unterstützt die Unterscheidung zwischen Neutronen- und Gammasignalen, da das Signal der thermischen Neutronen zu einem Peak bei

3,0 – 3,5 MeV führt [21]. Nur ein sehr kleiner Anteil der Gammastrahlung befindet sich bei solch hohen Energien. Die Reaktionen der schnellen Neutronen haben einen Q-Faktor $Q_{M,I} = 0,615$ MeV beziehungsweise $Q_{M,I} = 0,937$ MeV und einen Löschfaktor $f_q = 0,9$ beziehungsweise $f_q = 0,5$. Die Peaks der schnellen Neutronen können sich, obgleich mit geringer Intensität, im Bereich der Gammaphotonen befinden [23].

Zur Abschwächung schräg einfallender Gammastrahlung und Moderation von Neutronenstrahlung wurde ein 50 mm hoher Aufsatz aus Blei (dunkelgrau) und PE-HD (beige) als eine Art Doppelrohr entwickelt (siehe Abbildung 15). Für die besagte Moderation wird ein PE-Stopfen mit 50 mm Außendurchmesser vorn aufgesteckt. Mit Hilfe eines Gewindestiftes wird der Kollimator am Gehäuse des CLYC-Sensors fixiert und gegen Verrutschen gesichert.

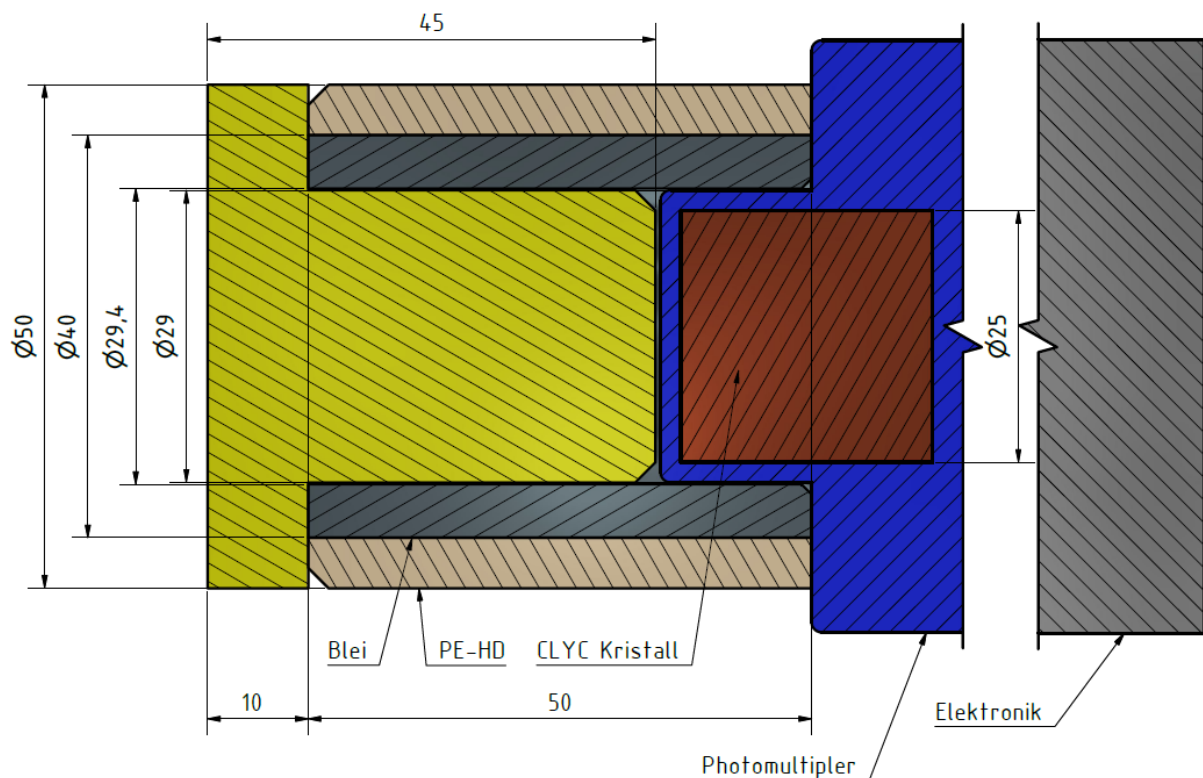


Abbildung 15: Skizze eines Querschnittes durch den CLYC-Sensor mit Kollimatoraufbau

5.3.4 Bedienung der CLYC-Sensoren

Für das Arbeiten mit den CLYC-Sensoren in Dual-Channel Ausführung bietet der Hersteller (Freiberg Instruments) seine eigens entwickelte Mess- und Auswertesoftware AM-SMCA01 an. Darin sind verschiedene Funktionen wie die Energie-Spektralanalyse, Impulsraten- und Start-Stop-Messung implementiert. Im Folgenden werden die Features erläutert, die für Messungen an CASTOR-Behältern benötigt wurden.

5.3.4.1 Energiespektralanalysen

Die Energiespektralanalyse ermöglicht die Messung der Impulsrate in Abhängigkeit vom eingestellten Analysator-Pegel des Moduls. Dieser Pegel ist ein Maß für den Energiereichtum der mit einem geeigneten angeschlossenen Detektor gemessenen Strahlung. Es ergibt sich ein Spektrum der Impulshöhenverteilung für die gemessene Nuklid-Probe. Es lassen sich maximal 3 Kurven gleichzeitig darstellen und auswerten. Die Y-Achse ist dabei in linearer oder logarithmischer Form darstellbar (siehe Abbildung 16). Der Benutzer hat im rechten Bereich die Möglichkeit zeitliche Randbedingungen und Parameter für die Messung zu definieren. Soll der maximal messbare Energiebereich des Sensors (0 bis 4 MeV) ausgenutzt werden, müssen die Parameter Verstärkung 5 und Hochspannung 525 V bei CLYC-1 und 610 V bei CLYC-2 betragen.

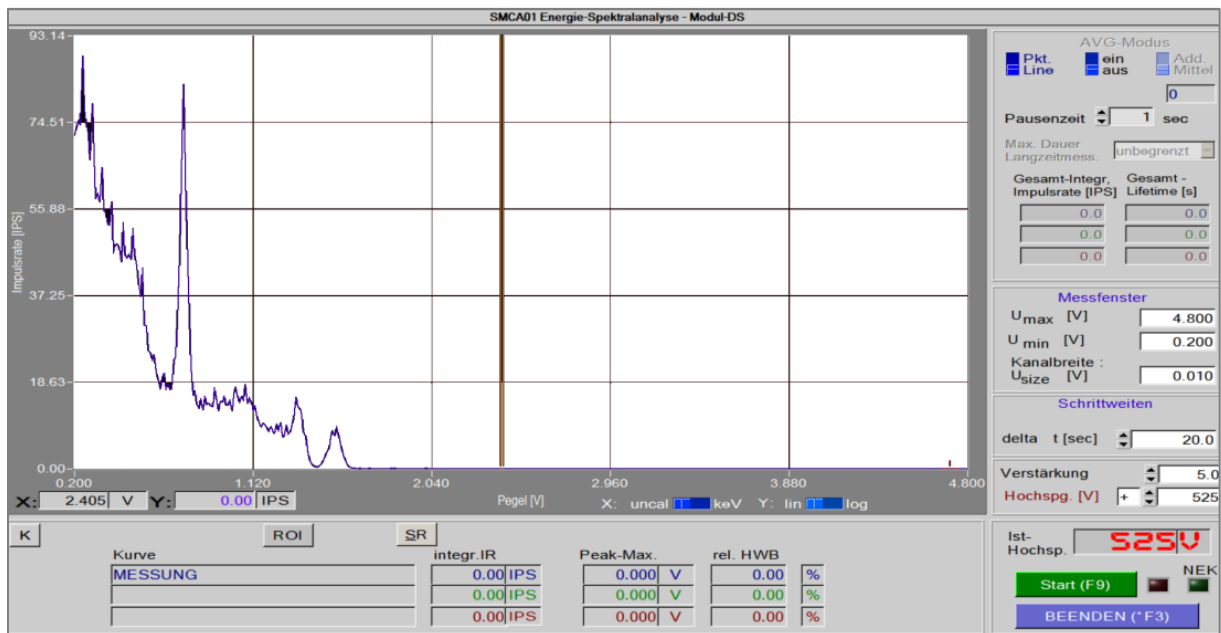


Abbildung 16: Benutzeroberfläche zur Aufnahme des Energiespektrums

Bei SMC-Typen mit mehreren Zählkanälen (hier 2 Kanäle) wird immer die maximale Kanalzahl genutzt, sodass in mehreren Kanälen gleichzeitig gemessen wird. Die Kurven bauen sich dabei im Display von außen nach innen auf. Es halbiert sich somit die Messzeit.

Nach Betätigung von [Start] erscheint entsprechend der gewählten Schrittweiten der Graph des Energiespektrums. Für das Beispiel in Abbildung 16 wurde eine Cs-137 und Co-60 Quelle vor den Szintillator platziert. Dementsprechend erscheinen das 662 keV Cäsium-Peak bei 0,76 V und die zwei Cobalt-Peaks bei 1,36 V und 1,54 V entsprechend 1173 keV und 1332 keV auf der Abszisse. Nach Ablauf der Messung kann die Datenreihe im *.txt-Format gespeichert werden.

5.3.4.2 Start-Stop-Messungen

Die Start-Stop-Messung ist eine sehr häufig gebrauchte Messfunktion, die zählende Messungen mit einstellbaren Betriebsarten und Parametern an radioaktiven Proben erlaubt (siehe Abbildung 17). Die beiden Grundbetriebsarten dieser Messfunktion sind durch eine Zeitvorwahl oder eine Impulsvorwahl charakterisiert. Die Vorwahlparameter bestimmen die Art und Weise der Beendigung einer diskreten Einzelmessung. Mit der Start-Stop-Messung sind Einzelwertmessungen und vollautomatische Messreihen möglich.

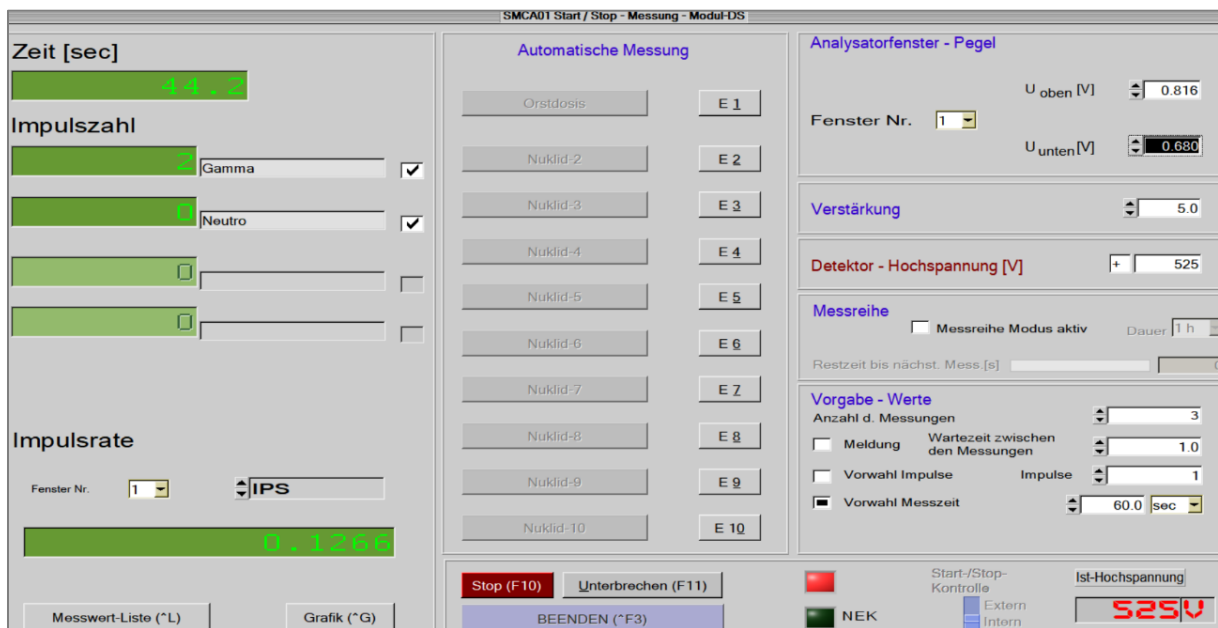


Abbildung 17: Benutzeroberfläche für Start-Stop-Messungen

Je nach angeschlossenem SMC-Typ kann die Messung in mehreren Zählkanälen (hier „Gamma“ und „Neutro“ genannt) quasimultan erfolgen. Die einzelnen erreichten Impulse werden getrennt angezeigt. Die Impulsrate wird immer nur für das aktuell ausgewählte Fenster (Zählkanal) dargestellt. Parametereinstellungen für untere und obere Analysator-Schwelle sind für jeden Zählkanal getrennt einstellbar. Vor dem Start der Messung sind bei mehrkanaligen Einheiten die zu benutzenden Kanäle entsprechend anzukreuzen. Jeder Messwert einer Messreihe wird laufend in einer temporären Listendatei abgelegt (Messwertsicherung). Die Sicherung erfolgt für jeden Zählkanal getrennt. Bei einer Messreihenaufnahme kann die Datei jederzeit abgespeichert werden. Ebenso gibt es beim Verlassen der Messfunktion noch die Gelegenheit zum Abspeichern der Messreihe.

5.3.5 Durchgeführte Experimente und Ergebnisse

5.3.5.1 Übersicht - Messungen mit CLYC-Sensoren

Die durchgeführten Gamma- und Neutronenmessungen mit den CLYC-Sensoren lassen sich in drei Phasen unterteilen (siehe Abbildung 18).

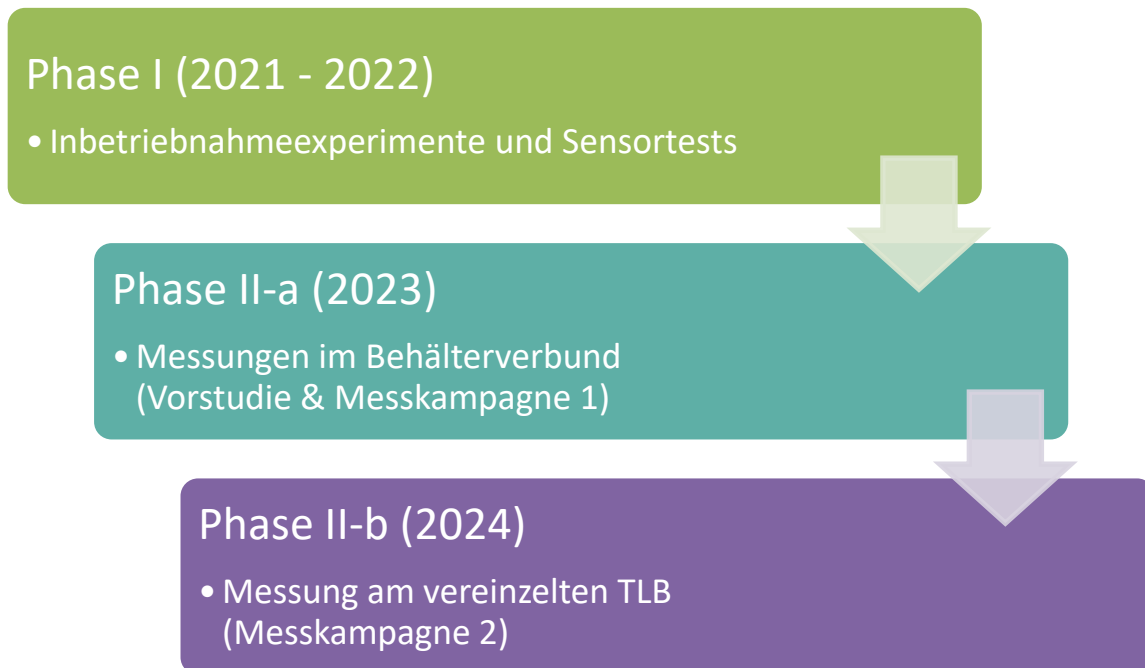


Abbildung 18: Schematische Übersicht der Gamma- und Neutronenmessungen

Phase 1 bestand aus der Inbetriebnahme und Experimenten für die Erprobung der CLYC-Sensoren (siehe Tabelle 3). Dies war notwendig, um in Phase 2 bestmöglich vorbereitet, Messungen am realen TLB durchführen zu können (siehe Tabelle 3). Mit dem Wissenstand aus Phase 1 wurde im April 2023 eine Vorstudie zur Messung des Energiespektrum eines von der EWN ausgewählten CASTOR-Behälters des Typs 440/84 zur Bestimmung der Gamma- und Neutronenmessbereich und der Messzeit für die spätere großangelegte Kampagne im Oktober 2023 durchgeführt. Aus technischen Gründen fanden die Messungen in Phase II-a alle im 2x2-Behälterverbund statt. Demzufolge wurden erhöhte Aktivitätswerte an den Messpositionen mit benachbarten Behältern aufgezeichnet. Die erhöhte Quereinstrahlung führte dazu, dass für den Behälterverbund keine eindeutigen Gamma- und Neutronenstrahlungskarten für den untersuchten TLB erstellt werden konnten. Aus diesem Grund wurde die Messkampagne 1 im Mai 2024 auf dem Inspektionsplatz bei gleichem Ablauf wiederholt. Aus Gründen der Relevanz wird hier im Textteil des Abschlussberichts vordergründig auf die Messkampagne MK2 am vereinzelt Behälter auf dem Inspektionsplatz in Phase II-b eingegangen. Weitere Informationen und Ergebnisse von Phase I und II sind im Anhang ab Kapitel 10.2.1 beigefügt.

Tabelle 3: Übersicht Experimente und Ergebnisse der Gamma- und Neutronenmessungen

Nr.	Experimente und Ergebnisse	Details
I	Inbetriebnahmephase im Zittauer Strahlenlabor	
V1	Aufnahme der Energiespektren verschiedener Probestrahler u.a. mit Co-60, Cs-137, Th-232 <ul style="list-style-type: none"> • <i>Funktionsnachweis für Gammastrahlung,</i> • <i>Ermittlung von Einstelldaten und Energiekalibrierung</i> 	Anhang 10.2.1.1
V2	Bestimmung der Detektorcharakteristik <ul style="list-style-type: none"> • <i>Aufnahme Detektorgüte zur Kontrolle der Einstelldaten</i> 	Anhang 10.2.1.2
V3	Messung von Neutronenstrahlung mit einer PuBe- und AmBe-Quelle <ul style="list-style-type: none"> • <i>Funktionsnachweis für thermische Neutronen</i> 	Anhang 10.2.1.3
V4	Messungen kombinierter Gamma- und Neutronenstrahlung entlang einer Barriere <ul style="list-style-type: none"> • <i>Durchführung Start-Stop-Messungen im Hinblick auf die Messkampagnen am realen Behälter</i> 	Anhang 10.2.1.4
V5	Abschirmung von Querstrahlung <ul style="list-style-type: none"> • <i>Funktionsnachweis der Kollimatorkonstruktion</i> 	Anhang 10.2.1.5
II	Messungen am TLB 440/84 im Zwischenlager Nord, Halle 8	
VS1	Vorstudie mit Stativ im Behälterverbund (4.4.2024) <ul style="list-style-type: none"> • <i>Aufnahme einzelner Energiespektren</i> • <i>Einstelldaten für Gamma- und Neutronenmessfenster</i> 	Anhang 10.2.2
MK1	Messkampagne im Behälterverbund (16. bis 27.10.2023) <ul style="list-style-type: none"> • <i>Aufnahme div. Energiespektren</i> • <i>Gamma- und Neutronen-Heatmaps</i> 	Anhang 10.2.3
MK2	Messkampagne am vereinzelt Behälter auf dem Inspektionsplatz (27.5. bis 13.6.2024) <ul style="list-style-type: none"> • <i>Aufnahme div. Energiespektren</i> • <i>Gamma-, Neutronen und Temperatur-Heatmaps</i> • <i>Nachweis der asymmetrischen Beladung</i> 	Anhang 10.2.3

5.3.5.2 Messungen an einem CASTOR 440/84 im Zwischenlager Nord

Die Messkampagne wurde bei den Entsorgungswerken für Nuklearanlagen GmbH (EWN) im Zwischenlager Nord (ZLN) im Mai 2024 auf dem Inspektionsplatz der Halle 8 durchgeführt. Das Messobjekt war ein von der EWN ausgewählter CASTOR der Bauart 440/84 mit inhomogener Beladung. Das heißt, das in ihm sowohl Brennelemente mit schwachem als auch mit starkem Abbrand eingelagert wurden. Der Behälter wurde im Rahmen der Messkampagne mit dem Hallenkran aus dem Verbund genommen und in die Mitte des Inspektionsplatzes gebracht. Ziel der Messkampagne war es, detaillierte Aktivitäts- und Temperaturverläufe 360° umlaufend an der Außenwand aufzuzeichnen, um daraus die Strahlungskarten/Heatmaps für Gamma-, sowie Neutronenstrahlung und Oberflächentemperatur zu generieren.

Die Messkampagne wurde vom 27. Mai bis zum 13. Juni 2024 durchgeführt. Für die Dauer der Messungen wurde der CASTOR zum Inspektionsplatz gebracht und mit PE-Wänden abgeschirmt. Die Rest- bzw. Querstrahlung der anderen Behälter im Zwischenlager wurde mit der Nulleffektmessung dokumentiert. Die austrittseitigen Gamma- und Neutronenaktivitäten, sowie die Oberflächentemperatur des CASTOR 440/84 wurden 360° umlaufend an insgesamt 400 Messpunkten teilautomatisiert erfasst (= 25 Messwinkel * 8 Messhöhen * 2 CLYC-Sensoren). Die Messzeit für jeden Messpunkt betrug 3 min. Bei der Analyse der Daten der ersten Testmessungen zeigte sich, dass bei längeren Messungen keine Änderungen des Energiespektrums mehr auftreten und damit Gammaphotonen und Neutronen gesichert unterschieden werden können. Detaillierte Angaben zur Versuchsprozedur und dergleichen wurden im Anhang unter Punkt 10.2.3 aufgenommen. Mit Hilfe der Erkenntnisse aus der Messkampagne im Behälterverbund (Oktober 2023) konnte bei der Durchführung der Messkampagne der Arbeitsablauf optimiert, Messfehler reduziert und das Bedienpersonal durch weitere Automatisierungsschritte entlastet werden. Die Hauptschritte der Messkampagne umfassten:

- *Die Kalibrierung der Sensoren mit Th-232-Quellen und Spektralaufnahmen um Energiefenster für Gamma- und Neutronenstrahlung festzulegen.*
- *Die Bestimmung von Kalibrierfaktoren zur Korrektur der unterschiedlichen Sensitivität der CLYC-Sensoren.*
- *Orbitalmessungen in 15°-Schritten sowie detaillierte Messungen in 5°-Schritten entlang der Behälterhöhe, um Strahlungskarten (Heatmaps) zu erstellen.*
- *Eine Aufnahme der Gamma- und Neutronenaktivität am Messplatz ohne CASTOR (Nulleffektmessung).*

Die Messkampagne wurde erfolgreich durchgeführt. Die aufgenommene und interpolierte Datenbasis ermöglicht das Erstellen der behälter-spezifischen „Fingerprints“ in Form von Heatmaps (zum Versuchszeitpunkt, siehe Abbildung 19 bis

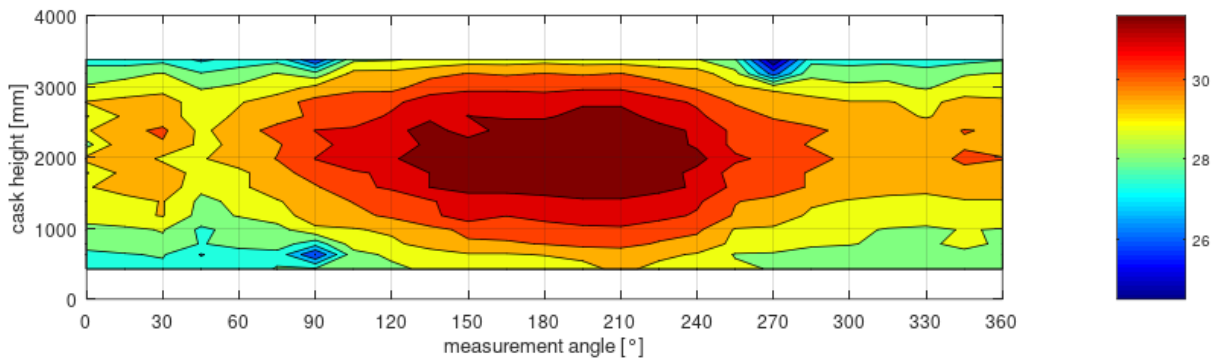


Abbildung 21. Mit Hilfe der erzeugten Gamma-Strahlungskarte ist die Platzierung von Brennelementen mit vergleichsweise hohem Abbrand im Behälter nachweisbar und stimmt mit der Beladedokumentation überein. Die Neutronenaktivität (siehe Abbildung 20) herrscht zwar vor, ist aber diffuser durch die Streueffekte und besitzt nicht die Aussagekraft der Gammastrahlung. Ebenso verhält es sich mit der Oberflächentemperatur (siehe Abbildung 21). Auch sie wirkt durch die massive Behälterwand geglättet. Trotzdem sind Neutronen und Oberflächentemperatur wichtige Faktoren zum Nachweis der Schutzziele des Behälters.

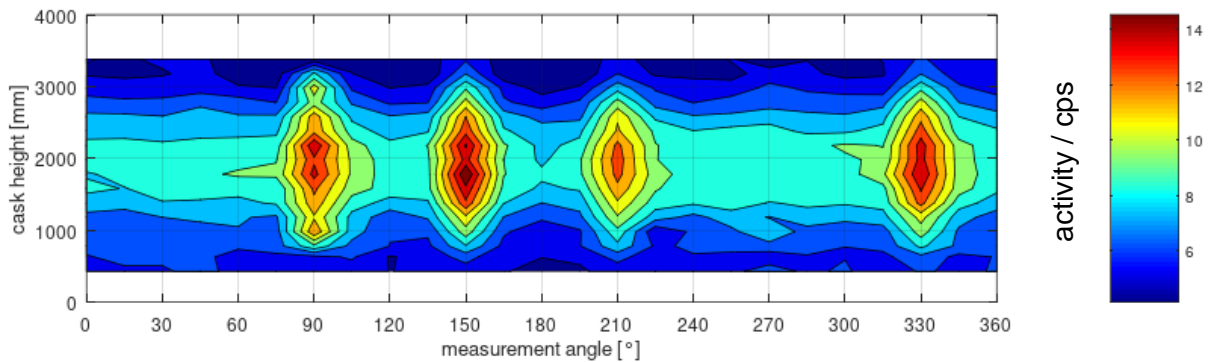


Abbildung 19: Gamma-Strahlungskarte (500 bis 740 keV)

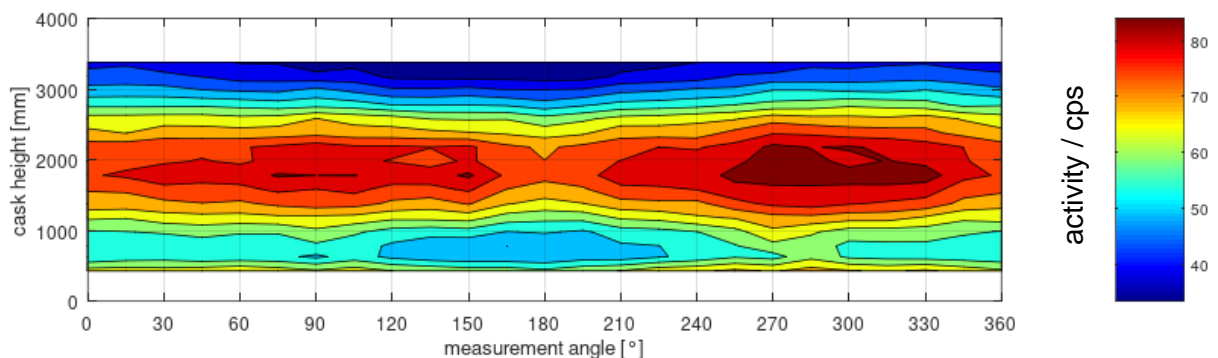


Abbildung 20: Neutronen-Strahlungskarte

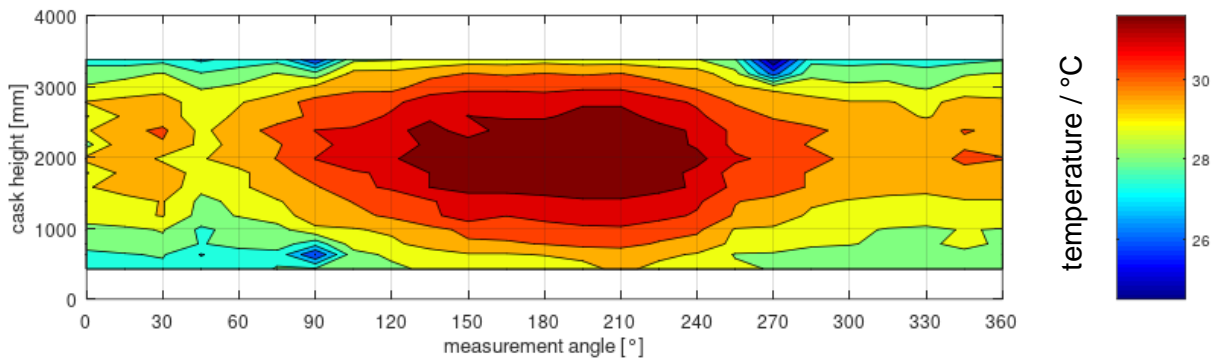


Abbildung 21: Wärmesignatur der Behälteroberfläche

Im Rahmen einer weiterführenden Messreihe wurde in 5°-Schritten orbital auf halber Behälterhöhe umlaufend die Aktivitäten aufgenommen (siehe Abbildung 22). Auch hier bilden sich 4 deutliche Gamma-Peaks bei den Brennelementen mit hohem Abbrand bei 90°, 150°, 210° und 330°) ab. Trotz der feineren Messwinkelauflösung ist der Informationsgehalt nicht höher als bei 15°-Schritten zu bewerten.

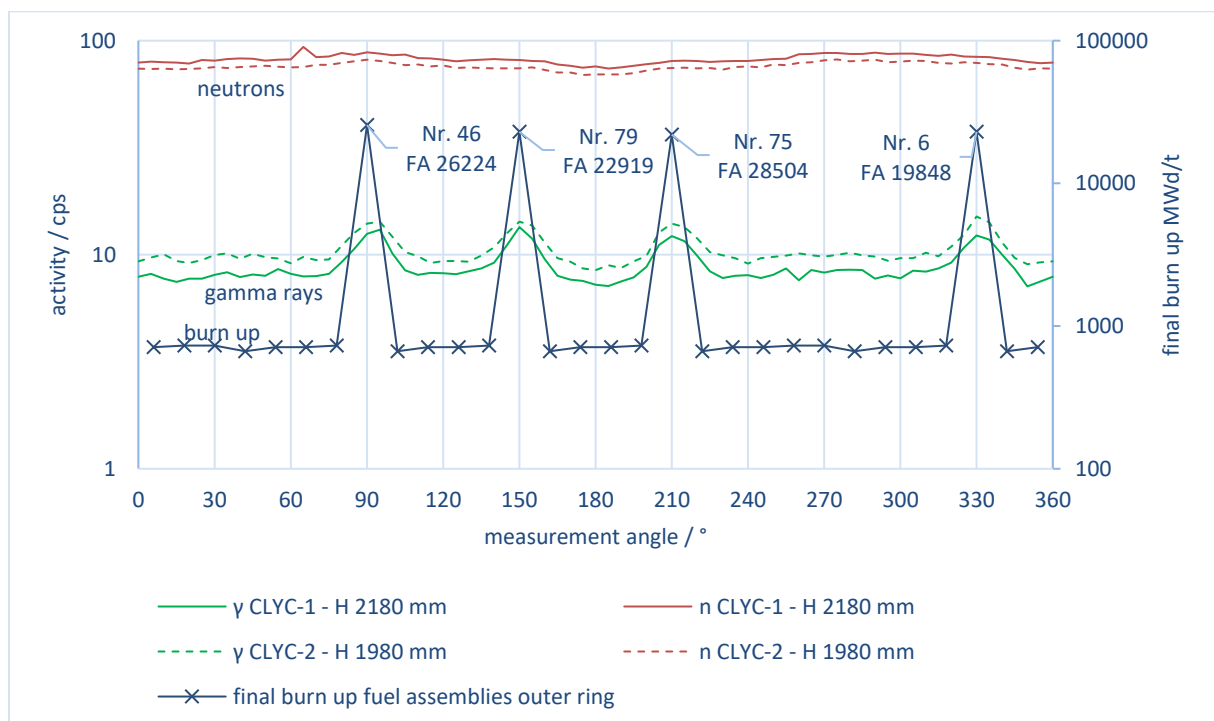


Abbildung 22: Gemittelter Gamma- und Neutronenfluss in Korrelation mit den BE-spezifischen Abbränden in 5°-Messschritten

5.3.5.3 Zusammenfassung

Es hat sich gezeigt, dass das Messsystem sensitiv genug ist um die asymmetrische Beladung des ausgewählten TLB nachzuweisen (siehe Abbildung 23). Wie zu erwarten war, gibt die Gammastrahlung (siehe Abbildung 19) richtungsorientiertere Informationen als die vielfach gestreute Neutronenstrahlung (vgl. Abbildung 20

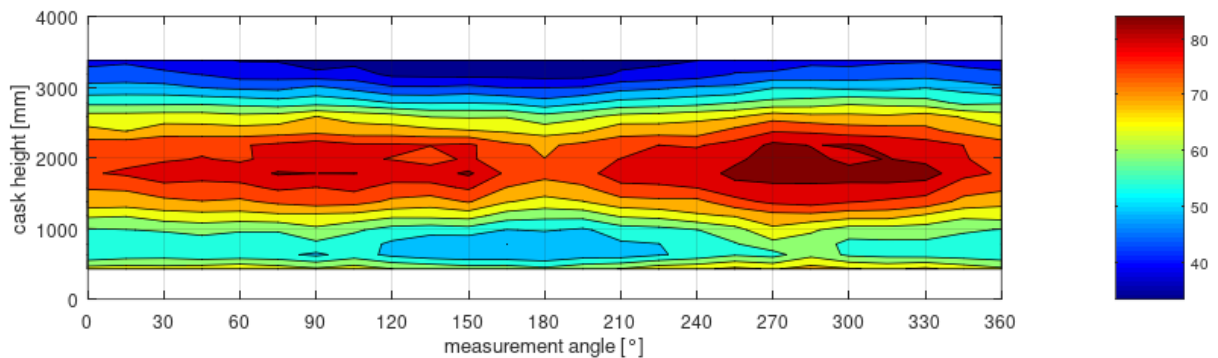


Abbildung 20), ist jedoch viel schwächer ausgeprägt. Die Vor-Ort-Energiekalibrierung mit der Th-232 Feldquelle hat sich als sinnvoll bewiesen, zumal damit die Konsistenz der Arbeitsweise der Detektoren nach der Messkampagne geprüft werden konnte. Trotzdem bleibt bei Strahlungsmessungen aufgrund vieler Faktoren immer eine Restunsicherheit. Mit Hilfe eines Sensortauschs zur Bestimmung entsprechender Kalibrierfaktoren wurde dem bestmöglich entgegengewirkt. Außerdem hat sich gezeigt, dass ein Messraster von 15°-Schritten ausreichend ist um Brennelemente mit großen Aktivitätsunterschieden mit Hilfe der Gammastrahlung erkennen zu können. 5°-Schritte lieferten zwar ein feineres Gesamtbild, würden die Messprozedur erheblich verlängern. Die Oberflächentemperaturen können selbstverständlich keine tieferen Einblicke durch die ca. 30 cm dicke Behälterwand liefern, korrelieren aber mit dem Abbrand der Brennelemente und tragen zum Nachweis der Schutzziele des TLB bei. Die Erkenntnisse aus der Kampagne, wie z.B. die Notwendigkeit der Sensorkalibrierung und die Feinheit der Winkelauflösung, werden die Methodik für zukünftige Messungen weiter verbessern.

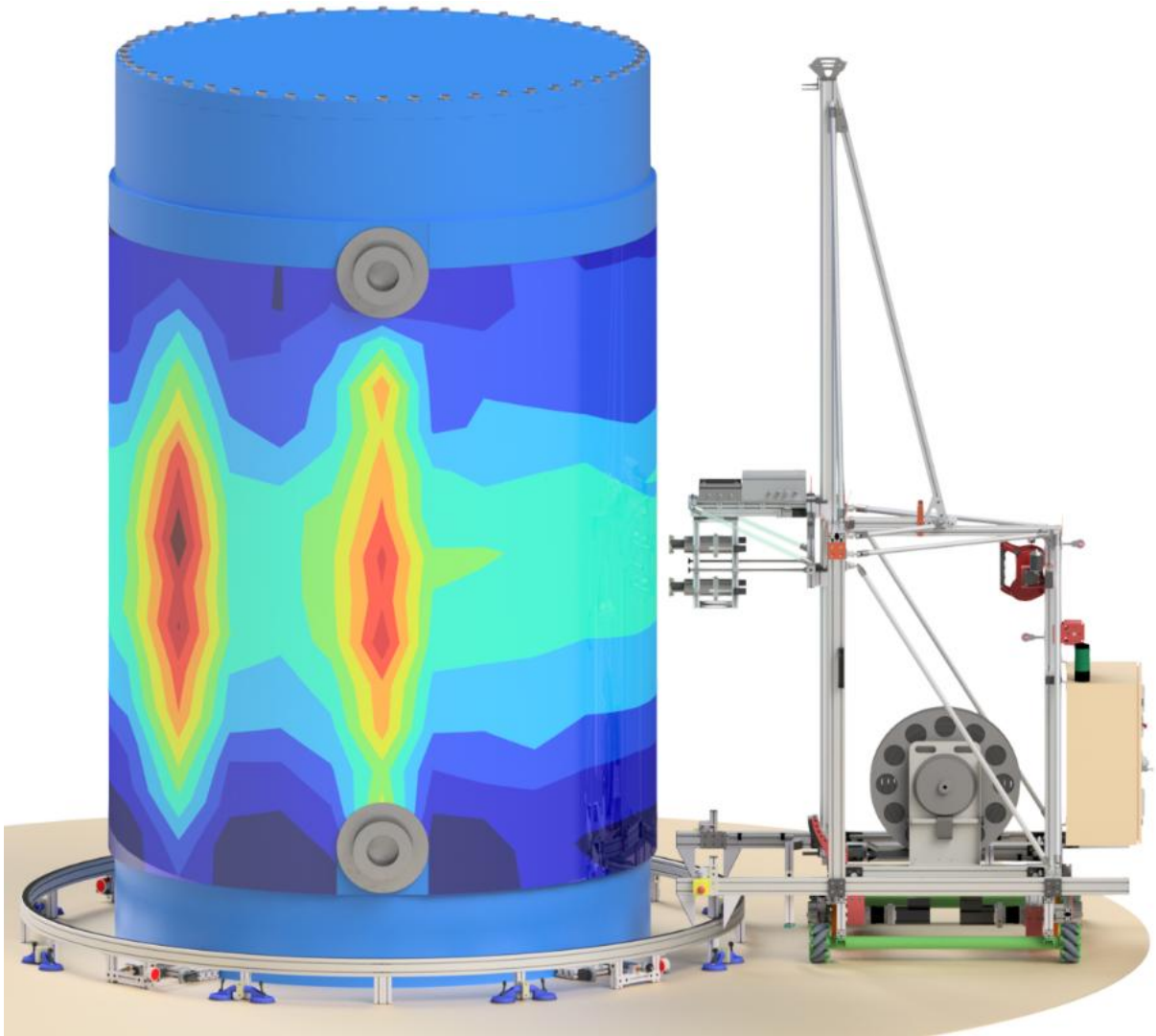


Abbildung 23: Gerendertes CAD-Modell des CASTOR 440/84 am angedeuteten Inspektionsplatz mit dem Traversiersystem mit projizierter Gamma-Heatmap aus den Messergebnissen

6 Myonen-Bildgebung (TUD)

6.1 Zielsetzung

Die Antragsteller verfolgen zunächst den Ansatz der Transmissionsbildgebung mit Myonen. Hierbei soll der Umstand ausgenutzt werden, dass geometrische Veränderungen der Brennelemente sehr wahrscheinlich die Längsoporosität der Brennelemente ändern und diese Änderungen sich gut im senkrechten Transmissionsbild wiederfinden. Dies konnte für einfache Veränderungsmuster in der ersten Förderphase numerisch bewiesen werden. Die entscheidenden technischen Vorteile des Verfahrens liegen darin, dass einerseits der starke senkrechte Myonenfluss optimal genutzt wird und andererseits, anders als bei seitlich angeordneten Streudetektoren, eine relativ geringe Detektorfläche erforderlich ist. Damit gestalten sich Kosten und Scanzeit günstig. Effektiv werden die Myonen im Behälter gestreut und die sich ergebende Trajektorienänderungen kann koinzident erfasst und bei der Analyse der Inventargeometrie mit verwertet werden. Für die Entwicklung geeigneter Rekonstruktionsverfahren werden Monte-Carlo-Simulationen für verschiedene Geometrien durchgeführt. Der Bildgebungsansatz wird für einen stehenden und liegenden Behälter bewertet.

- *Weiterhin wird ein Myonentracker entwickelt, aufgebaut und getestet, der eine Reihe von Eigenschaften erfüllen muss, um sich für einen Einsatz im Zwischenlager zu qualifizieren:*
- *Myonenbahnen müssen mit einer räumlichen Auflösung von 1 mm und einer Winkelauflösung von 1° detektiert werden können*
- *Aufgrund der erforderlichen Transportabilität (Messung an verschiedenen Behältern und Positionen) muss der Detektor robust und modular aufgebaut sein.*

6.2 Simulationsstudien

Für eine Abschätzung, inwieweit kosmische Myonen für die Bildgebung des Inventars von Transport- und Lagerbehältern geeignet sind, sind Simulationen nötig, die möglichst realitätsnah die Streuung und Absorption von Myonen in beliebigen Objekten berechnen. Hierfür wurde der Monte-Carlo-Code G4beamline genutzt [24], der auf den Bibliotheken von Geant4 basiert. In diesem Code ist bereits das natürliche Richtungs- und Energiespektrum kosmischer Myonen implementiert. Es wurden in Zusammenarbeit Benchmark-Tests durchgeführt. Hierfür wurden einfache Materialblöcke, aber auch eine Behältergeometrie, mit vorgegebenen Myonenenergien und -richtungen mithilfe der Codes Geant4 und FLUKA virtuell durchstrahlt. Für Myonen ab Energien von 1 GeV waren die Streubilder für alle Codes identisch.

Um abschätzen zu können, welche Bildauflösungen möglich sind, werden Bildrekonstruktionsverfahren benötigt, die in der Lage sind, aus den registrierten Myonenbahnen eine Streudichteverteilung des Objekts zu berechnen. Die Verfahren können in verschiedene Gruppen unterteilt werden. Bei direkten Verfahren wird das Objekt in Voxel oder Pixel unterteilt. Für jedes Myon wird seine Bahn innerhalb des Objekts auf der Grundlage der gemessenen Bahnen vor und hinter dem Objekt geschätzt. Jedem Pixel, das auf der geschätzten Bahn liegt, wird ein Streuwinkel zugewiesen. Aus den zugewiesenen Winkeln wird dann für jedes Pixel die Varianz berechnet. Diese ist in etwa proportional zur Streudichte. Der bekannteste Algorithmus in dieser Gruppe ist PoCA [25]. Hier wird für jedes Myon ein einziger Streupunkt angenommen, der im zweidimensionalen Fall im Schnittpunkt der Geraden liegt, die sich aus den beiden gemessenen Myonenbahnen ergeben. Im dreidimensionalen Fall ist es der Punkt mit dem geringsten Abstand zu beiden Bahnen. Bei den statistischen Verfahren ist die Grundidee ähnlich wie bei den direkten Methoden. Für jedes Myon wird seine Streuinformation den Objektpixeln entlang der geschätzten Bahn zugeordnet. Der Hauptunterschied besteht darin, dass die Streuinformationen nicht direkt auf das Objekt zurückprojiziert werden, sondern für alle registrierten Myonen mit einem Maximum-Likelihood-Ansatz verknüpft werden [26]. Dies führt zu einem großen linearen Gleichungssystem. Ab einer bestimmten Mindestanzahl registrierter Myonen liefern diese Methoden bessere Bilder als die direkten Methoden, bei denen die Myonen unabhängig voneinander betrachtet werden.

Es wurden verschiedene einfache Objektgeometrien (Kugeln, Blöcke) implementiert, um die Streufunktionen zu analysieren. Eine erste komplexere Geometrie war vertikales 3x3-Brennstabbbündel, bestehend aus 4 m langen UO₂-Stäben mit einem Durchmesser von 11 mm. Die virtuellen Detektoren wurden in der Simulation 50 cm über und unter dem Bündel platziert. Bei einem idealen Detektorsystem (unbegrenzte Ortsauflösung) kann das Stabbbündel bei ausreichend langer Messzeit deutlich aufgelöst werden, siehe Abbildung 24. Die dargestellten Bilder entsprechen der vertikalen Mittelung der PoCA-Volumenrekonstruktion. Für einen Detektor mit 1 mm horizontaler Ortsauflösung und einem Ebenenabstand von 20 cm (für die Winkelbestimmung der Myonenbahnen) kann das Bündel ebenfalls aufgelöst werden, jedoch mit erhöhter Unschärfe. Als gutes Kriterium für die Bildschärfe hat sich die Bildvarianz herausgestellt. Der Varianzverlauf zeigt, dass mit einem realen Detektor auch bei sehr langen Messzeiten von mehreren Tagen die ideale Objektauflösung nicht erreicht werden kann. Bei einer einfachen Radiographie der Myonenabsorption ohne Berücksichtigung der Myonenbahnen kann das Brennstabbbündel nicht aufgelöst werden.

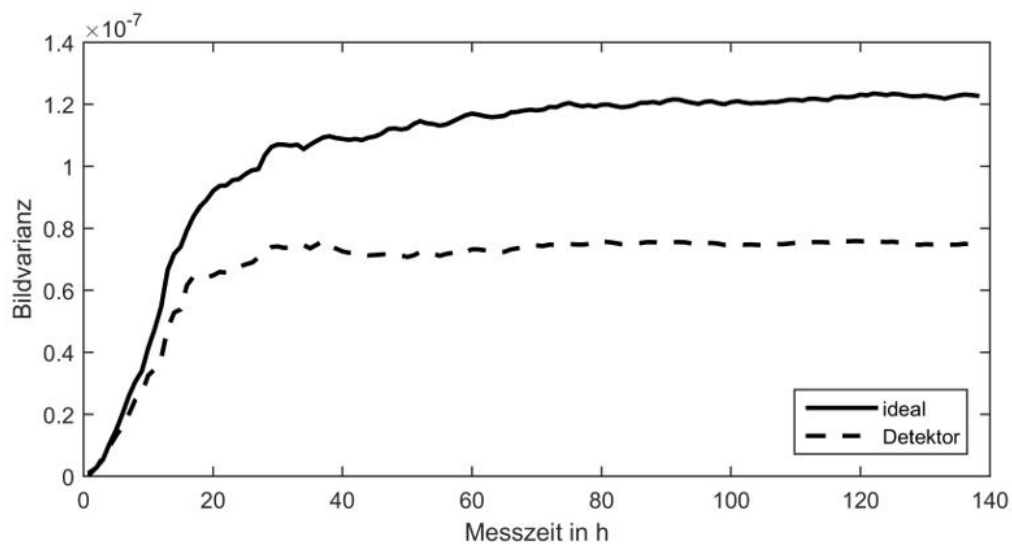
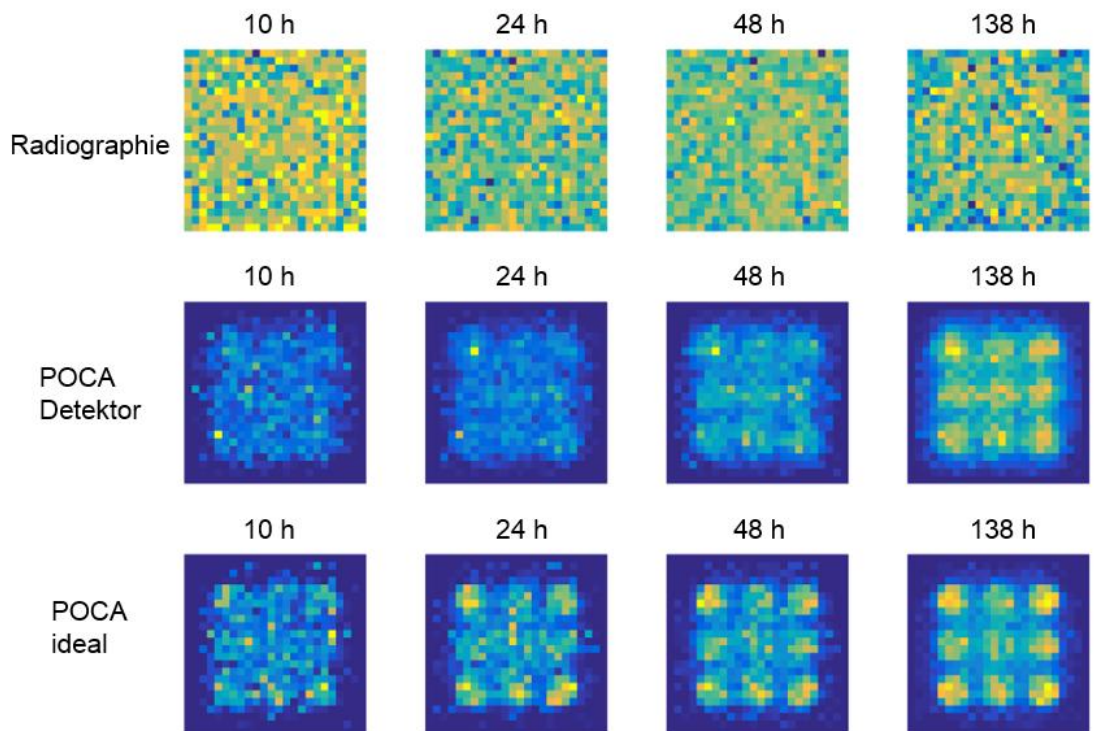


Abbildung 24. Bildspalten: Bilder für 10, 24, 48 und 138 h Messzeit. Erste Bildreihe: Radiographie der Myonenabsorption. Zweite Reihe: POCA, begrenzte Detektorauflösung. Dritte Reihe: POCA, ideal. Unten: Bildvarianz über der Messzeit für POCA-Rekonstruktion von simulierten Daten ohne Einschränkung der Detektorauflösung („ideal“) und für eine begrenzte Detektorauflösung.

Im Weiteren wurde ein Modell eines CASTOR V/19-Behälters in G4beamline erstellt. Es wurde angenommen, dass eine bildgebende Messung durch Positionierung von planaren Detektoren ober- und unterhalb des Behälters möglich ist. Hierbei können durch den höheren Fluss deutlich mehr Myonen

innerhalb einer definierten Messzeit genutzt werden als bei Messungen, bei denen die Detektoren um die Mantelfläche herum positioniert sind. Nachteilig ist die geringe vertikale Auflösung. Für die Bildrekonstruktion wurden neben dem bereits getesteten PoCA-Algorithmus weitere Algorithmen implementiert. Sowohl der MLS- als auch der MLSD-Algorithmus [26] gehören zur Gruppe der statistischen Verfahren und basieren auf dem Maximum-Likelihood-Ansatz (ML). Sie unterscheiden sich lediglich im Einbau der Messdaten in das lineare Gleichungssystem. Bei beiden Algorithmen wird für jedes Myon eine wahrscheinliche Bahn durch das diskretisierte Volumen angenommen. Hierfür wurden drei verschiedene Bahnmodelle implementiert: der direkte Weg des Myons zwischen Ein- und Austritt des Myons (ohne Beachtung der Ein- und Austrittsrichtung), die Annahme eines einzelnen Streueignisses im Volumen (wie bei PoCA) und eine Spline-basierte Bahn. Mit G4beamline wurden das Behältermodell in den verschiedenen Detailstufen für 12 Stunden Messzeit simuliert. Für die 12 Stunden Messzeit wurden ca. $3,3 \times 10^6$ Myonen registriert, die alle Detektoren passierten und damit für die Rekonstruktion nutzbar sind. Dabei wurden die Detektoren als ideal auflösend angenommen. Für die Rekonstruktion wurde eine relativ grobe Diskretisierung mit einer horizontalen Voxelbreite von 6 cm und eine Voxelhöhe von 4,5 cm gewählt. Ein Brennstabbündel wird somit horizontal durch 4×4 Voxel abgedeckt. Diese relativ grobe Diskretisierung ist zwei Aspekten geschuldet: Zum einen benötigt die Systemmatrix des linearen Gleichungssystems bereits für dieses Problem mehrere Gigabyte und zum anderen steigt aufgrund der begrenzten Statistik das Rauschen und das Auftreten von Artefakten stark an. Als Regularisierung wurde ein „Region clustering“ gewählt. Alle Voxel, die vollständig in homogenen Materialbereichen liegen, deren Lage exakt bekannt ist (Behälterwand, Deckel, PE-Platten), wurden im Gleichungssystem zusammengefasst. Als Untersuchungsfall wurde eine Brennstoffverlagerung gewählt, bei der der Brennstoff in den Hüllrohren verbleibt, aber um 9 cm bei Brennstäben des mittleren Brennelements absackt. In Abbildung 25 sind die vertikal gemittelten Rekonstruktionsvolumina für PoCA und MLSD dargestellt. Bei MLSD zeichnen sich die Brennelemente deutlich schärfer und rauschfreier ab. Am angefügten Diagramm sind die normierten rekonstruierten Werte für das mittlere Brennelement dargestellt, gemittelt über die 16 horizontal zugehörigen Voxel. Das Profil zeigt im mittleren Bereich um bis zu 20 % höhere Werte als an den Enden. Der Unterschied zwischen dem Referenzfall und der Brennstoffverlagerung bildet sich nur sehr schwach ab. Eine Identifikation wäre somit nur durch eine Referenzmessung möglich. Für PoCA konnte keine Sensitivität bezüglich der Brennstoffverlagerung festgestellt werden, für MLS eine deutlich schwächere als bei MLSD. Damit wurde gezeigt, dass für diesen Bildgebungsansatz innerhalb von Tagen Brennelemente gesichert identifiziert werden können.

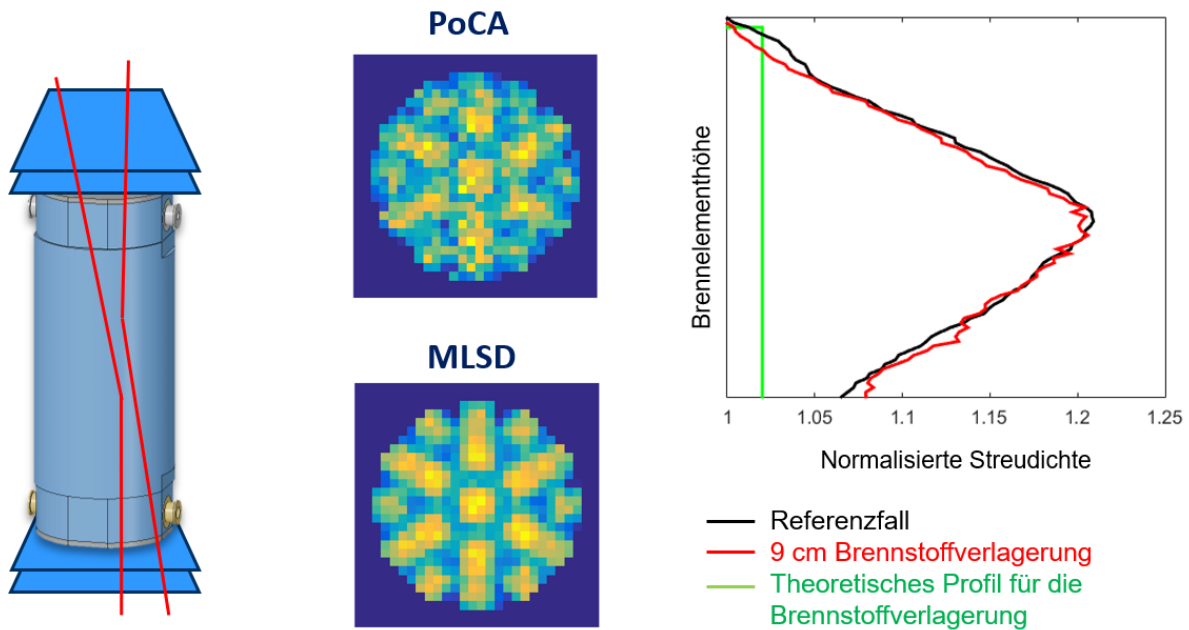


Abbildung 25. Links: Schema der Simulation. Die virtuellen Detektoren (blau) wurden ober- und unterhalb des Behälters positioniert. Mitte: Vertikal gemittelte Volumina, rekonstruiert mit PoCA (oben) und MLSD (unten). Rechts: Normalisierte (auf den kleinsten auftretenden Wert) rekonstruierte Streudichte für das mittlere Brennelement. Zwischen dem Normalzustand (Referenz) und der Brennstoffverlagerung ist im oberen Bereich eine kleine Differenz zwischen den Profilen zu erkennen.

6.3 Methodische Entwicklung der Streubildgebung

Aufgrund der Objektgröße werden TLB von einer großen Anzahl von Myonen innerhalb von Tagen getroffen, sodass sich die Anwendung von algebraischen Rekonstruktionsverfahren anbietet. Dabei werden die Streuinformationen aller einfallenden Myonen mit ähnlicher Bahn (in Bezug auf Winkel und Position) zu einem Projektionswert zusammengefasst. Das bedeutet, dass, im Gegensatz zu den oben beschriebenen Algorithmen PoCa und MLSD, nicht für jedes Myon, sondern für jeden Projektionswert eine Gleichung aufgestellt wird. Dieser Ansatz führt ebenfalls zu einem linearen Gleichungssystem für die Streudichte. Verschiedene Ansätze zur Berechnung des Projektionswertes und der Objektpixelgewichte werden in [27] diskutiert. Bei kleinen und homogenen Objekten können alle Algorithmen bei ausreichender Statistik (d. h. langer Messzeit) scharfe Bilder der Objekte erzeugen. Der Nachteil aller Algorithmen ist jedoch, dass die Myonenbahn im Objekt geschätzt werden muss (PoCA und MLSD), bzw. dass Streuprozesse außerhalb einer definierten Projektionsregion ebenfalls dem Projektionswert zugerechnet werden (algebraische Verfahren [27]). Dies kann zu systematischen Abbildungsfehlern wie Unschärfen führen, insbesondere bei größeren (mehrere Meter) und inhomogenen Objekten. Ein Ansatz zur Optimierung der Spurabschätzung und damit zur Reduzierung dieser Fehler wurde von

Chatzidakis [28] beschrieben. Ziel dieser Arbeit war es ein algebraisches Verfahren zu entwickeln, das auch für komplexe Geometrien wie das Behälterinventar geeignet ist, dabei aber keine größeren Anforderungen an das Auflösungsvermögen des Detektors und die Länge der Messzeit stellt.

Durchdringt ein Myon ein homogenes Objekt der Länge L , durchläuft es mehrere Coulombstreuungsgänge. Der resultierende Streuwinkel $\Delta\theta$ ist näherungsweise normalverteilt mit dem Erwartungswert $\mu = 0$. Die Wahrscheinlichkeitsdichte für $\Delta\theta$ hat daher die Form

$$f(\Delta\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta\theta}} e^{-\frac{\Delta\theta^2}{2\sigma_{\Delta\theta}^2}}. \quad (1)$$

Der Parameter $\sigma_{\Delta\theta}$ der Normalverteilung hängt von der Strahlungslänge L_0 des Materials ab. Eine vereinfachte Formel für diese Beziehung wurde von Rossi [29] entwickelt:

$$\sigma_{\Delta\theta} = \frac{15 \text{ MeV}}{c\beta p} \sqrt{\frac{L}{L_0}}, \quad (2)$$

wobei $\beta = v/c$ die Geschwindigkeit des Myons dividiert durch die Lichtgeschwindigkeit ist und p der Impuls des Myons. Darauf basierend kann die Streudichte λ für einen normalisierten Impuls p_0 definiert werden, die proportional zu $\sigma_{\Delta\theta}^2$ ist [26]:

$$\lambda = \frac{1}{L} \left(\frac{p}{p_0}\right)^2 \sigma_{\Delta\theta}^2. \quad (3)$$

Die Zielgröße für die Bildrekonstruktion ist die Streudichte, die von der Ordnungszahl und der Dichte des Materials sowie vom Myonenimpuls abhängt. Der Myonenimpuls kann jedoch mit den gängigen Detektorsystemen nicht bestimmt werden. Der Einfachheit halber wird daher im Folgenden $p_0 = p$ angenommen, so dass der Faktor $(p/p_0)^2$ entfällt und sich somit die Beziehung $\lambda L = \sigma_{\Delta\theta}^2$ ergibt. Die folgenden Herleitungen gelten jedoch ohne Einschränkung auch dann, wenn der Faktor einbezogen wird. Durchdringt ein Myon nacheinander N Materialien mit einer jeweiligen Dicke L_i und einer Streudichte λ_i , so gilt aufgrund der Invarianz der Normalverteilung gegenüber Faltung:

$$\sigma_{\Delta\theta}^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_{i,\Delta\theta}^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_i L_i. \quad (4)$$

Das Ziel der weiteren Herleitungen ist es, einen Rekonstruktionsalgorithmus zu finden, der die Streuinformationen nur derjenigen Myonen kombiniert, die eine vordefinierte Objektregion nicht oder mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit verlassen. Diese Region mit der Breite d wird als Projektionsregion bezeichnet. Diese Bedingung ist stochastisch eng mit der Tatsache verbunden, dass nur Myonen mit einem kleinen Streuwinkel berücksichtigt werden, d. h. $|\Delta\theta| < \varepsilon$. Bei der Messung von N_0 transmittierten Myonen, die zu einer Projektionsregion gehören, d. h. die auf die abgedeckte Objektregion

treffen und eine Bahn parallel zur Projektionsrichtung haben, gibt es N Myonen, die diese Bedingung erfüllen. Das Verhältnis N/N_0 entspricht dann der Wahrscheinlichkeit $P(|\Delta\theta| < \varepsilon)$, d.h.

$$\frac{N}{N_0} = P(|\Delta\theta| < \varepsilon) = \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} f(\Delta\theta) d\Delta\theta \quad (5)$$

Mit der Wahrscheinlichkeitsdichte f aus Gleichung (1). Da die Grenze ε für den Streuwinkel sehr klein gewählt wird und f symmetrisch zu $\Delta\theta = 0$ ist, kann das Integral approximiert werden als

$$\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} f(\Delta\theta) d\Delta\theta \approx 2\varepsilon f(0) = 2\varepsilon \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta\theta}}. \quad (6)$$

Für eine Projektionsregion, die N Materialabschnitte überdeckt, folgt aus den Gleichungen (4-6) dann

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i L_i = \frac{2\varepsilon^2 N_0^2}{\pi N^2}. \quad (7)$$

Die Anzahl und Anordnung der Projektionsbereiche sollten so festgelegt werden, dass sie alle möglichen Winkel der einfallenden Myonen abdecken und das Objekt vollständig abdecken. Eine naheliegende Anordnung von Projektionen ist die Parallelstrahlgeometrie, wie sie z. B. in medizinischen Computertomographen der 1. und 2. Generation verwendet wird [30]. Die Projektionen sind durch einen Winkel α definiert, der dem Winkel der einfallenden Myonen entspricht. Für jeden diskreten Winkel α werden die Projektionsbereiche so angeordnet, dass sie nahtlos aneinandergrenzen und parallel zueinander sind. Die Anzahl der Projektionsbereiche für jeden Winkel hängt von seiner definierten Breite d ab. Jedes Objektpixel wird von mehreren Projektionsfeldern abgedeckt, so dass ein lineares Gleichungssystem der Form

$$\mathbf{L}\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q} \quad (8)$$

aufgestellt werden kann. Die Matrix \mathbf{L} enthält die durchschnittliche Weglänge entlang der Projektionsrichtung in allen Pixeln für jedes Projektionsgebiet. Der Vektor $\boldsymbol{\lambda}$ enthält die für jedes Pixel zu berechnenden Streudichten. Der Vektor \mathbf{Q} enthält die gemessenen Projektionswerte gemäß Gleichung (7).

Aspekte des Algorithmus:

1. *Jedes Myon wird in eine von zwei Gruppen eingeteilt: „gestreut“ und „kaum gestreut“. Dies bedeutet eine Verringerung der verwendeten Informationen im Vergleich zu anderen Algorithmen, die den spezifischen Streuwinkel jedes Myons berücksichtigen. Der Vorteil ist jedoch, dass nur die Streuinformation innerhalb der Projektionsregion in den Projektionswert eingeht, wenn geeignete Parameter gewählt werden.*

2. *Wenn der Akzeptanzwinkel ε und die Breite d der Projektionsregion sehr klein gewählt werden, um Näherungsfehler zu reduzieren, wird auch die Anzahl N der Myonen, die die Projektionsregion nicht verlassen, sehr klein sein. Daher sind lange Messungen erforderlich, um eine ausreichende Statistik für eine genaue Berechnung des Quotienten N_0/N zu erstellen.*

In der entstandenen Journalpublikation [31] werden detailliert Parameterstudien zur optimalen Wahl des Grenzwinkels ε und der Projektionsbreite d vorgestellt, welche in Abhängigkeit von der Objektgröße und Materialzusammensetzung die optimalen Werte für diese Parameter zeigen. Für quantitative Bildrekonstruktionen von Objekten mit ca. 3 m Größe sollte $d > 20 \text{ mm}$ und $\varepsilon < 0,2^\circ$ gewählt werden. An einem virtuellen Phantom wurde der Algorithmus mit dem Ansatz von Liu [27] verglichen, wobei der neu entwickelte Algorithmus deutlich besser hinsichtlich der erreichbaren Bildschärfe abschneidet.

Dieser Bildrekonstruktionsalgorithmus wurde für die Untersuchung einer bildgebenden Messung an einem horizontal gelagerten und entlang der Längsachse drehbaren CASTOR V/19-Behälter angewendet. Dafür wurden Simulationsdatensätze in G4beamline erstellt. Es wurde angenommen, dass der Detektor eine aktive Fläche besitzt, die eine Projektionsebenendicke von ca. 30 cm erzeugt. Die Simulationen wurden für Behälterdrehungen in $0,5^\circ$ -Schritten für eine Messzeit von bis zu 12 Stunden pro Projektion durchgeführt. Für die Rekonstruktion wurde zunächst der Algorithmus aus [27] implementiert. Hierbei zeigte sich, dass eine Verlängerung der virtuellen Messzeit zwar zu einer Verringerung des Rauschens führt, aber kaum zu einer schärferen Abbildung der Inventarstruktur. Eine deutliche Verbesserung konnte bereits erreicht werden, indem der projizierte Streuwinkel nicht als Mittelwert, sondern als Median für die zugehörigen Myonen berechnet wurde. Diese Korrektur, die einzelne hohe Streuwinkel von niederenergetischen Myonen geringer wichtet, wurde bereits erfolgreich in anderen algebraischen und statistischen Rekonstruktionsverfahren angewendet. Eine Auflösung bis hin zur Brennstabdarstellung erscheint dennoch nicht möglich. In Abbildung 26 sind die rekonstruierten Schnittbilder für den modifizierten Ansatz von Liu und dem neuen Algorithmus für 72 Projektionen mit je 12 Stunden Messzeit dargestellt. Hierbei zeigt sich ein deutlich schärferes Bild für den neuen Ansatz. Eine klare Trennung von direkt nebeneinander angeordneten Brennelementen ist im Gegensatz zum anderen Ansatz möglich. Erwartungsgemäß führt der neue Ansatz jedoch zu einem erhöhten Rauschen. Das dritte Bild der Abbildung 26 zeigt die Rekonstruktion für den neuen Ansatz mit auf die Projektionsdaten aufgeprägtem Messfehler. Der Winkelfehler betrug bis zu 1° und der Ortsfehler bis zu 2 mm. Eine daraus resultierende Unschärfe ist kaum sichtbar. Ähnlich wie in [27] sind diese Ergebnisse übertragbar auf den Fall des aufrechtstehenden Behälters bei Nutzung schräg einfallender Myonen und mit der Annahme einer homogenen Materialverteilung über den Großteil der Längsachse.

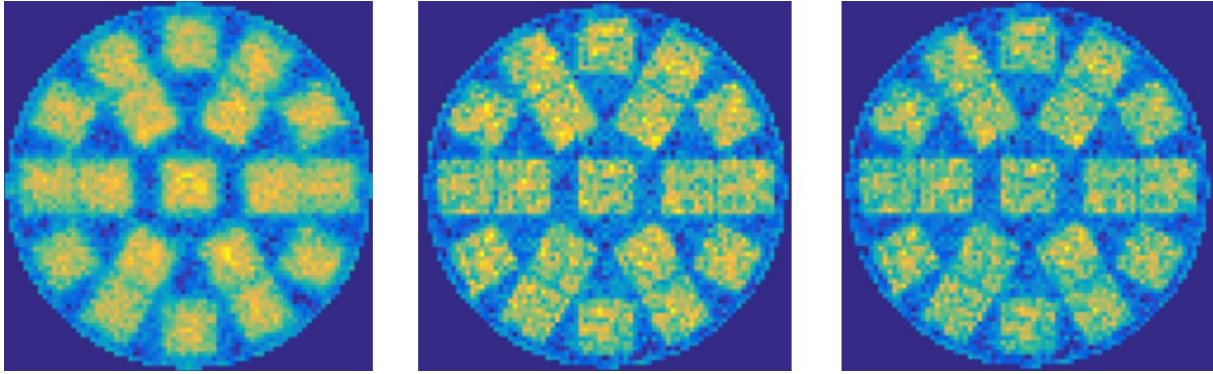


Abbildung 26. Bildrekonstruktionen für die Myonentomographie an einem waagrecht gelagertem CASTOR V/19-Behälter. Links: Modifizierte Methode von Liu. Mitte: Neu entwickelter Rekonstruktionsalgorithmus. Rechts: Neu entwickelter Rekonstruktionsalgorithmus mit auf die simulierten Messwerte aufgeprägtem Rauschen.

6.4 Aufbau eines Myonendetektors

In Zusammenarbeit mit dem FZ Jülich erfolgte die Inbetriebnahme vorhandener Straw-Tube-Tracker-Module. Hierfür wurde eine geeignete Verstärkerschaltung entwickelt, die eine Analyse der Pulse, die durch Ionisationen in den Röhren entstehen, erlaubt. Durch das Verschalten von horizontal und vertikal zueinander liegenden Röhren, war es über Koinzidenzanalysen möglich, Pulse, die durch Myonen erzeugt wurden, von jenen der Hintergrundstrahlung zu unterscheiden. Mit diesen Analysen hinsichtlich Pulsformen, höhen, -dauer und -frequenz konnte ein Basiskonzept für eine Analogelektronik für Gasdetektoren erstellt werden. Als Konzept für einen Myonendetektor, der in einem Zwischenlager zum Einsatz kommen kann, wurde jedoch der Straw-Tube-Tracker verworfen. Hauptgrund hierfür ist vor allem die hohe Kanalanzahl und die damit verbundenen Kosten. Ein weiterer Aspekt ist die fehlende Modularität, die sich aus der notwendigen dichten Anordnung der Straw-Tubes ergibt.

Stattdessen wurde das Konzept der Driftkammern favorisiert und weiterentwickelt. Der Wirkmechanismus ist der gleich wie bei den Straw Tubes. Ein elektrostatisches Feld befördert Sekundärelektronen, die durch Ionisation des im Kammervolumen befindlichen Gases entstehen, zu einem Anodendraht befördert. In dessen Nähe werden sie aufgrund der hohen Feldstärke stark beschleunigt und erzeugen wiederum neue Elektronen. Diese Lawine erzeugt letztendlich den messbaren Puls. Driftkammern besitzen einen rechteckigen Querschnitt mit einem großen Abstand zwischen Anode und Kathode. Dazwischen wird ein möglichst homogenes elektrisches Feld aufgebaut, dass zu einem Elektronendrift mit einer nahezu konstanten Geschwindigkeit der Elektronen führt. Aus der Driftzeit kann dann auf den Ionisationspunkt zurückgeschlossen werden. Prinzipiell sind Kammergrößen von mehr

als $50 \times 50 \text{ cm}^2$ möglich, wobei theoretisch eine räumliche Auflösung von 1 mm erreichbar ist. Die Detektorentwicklung lässt sich in vier Teilbereiche unterteilen:

- *Frontenddesign, das eine hohe Wechselwirkungseffizienz und Ortsauflösung ermöglicht.*
- *Analoge Elektronik, die für von Myonen hervorgerufene Ionisationen gleichmäßige Pulsformen erzeugt.*
- *Digitale Elektronik, die aus den analogen Signalen einen Zeitstempel mit einer Genauigkeit von ca. 10 ns erzeugt.*
- *Datenauswertungssoftware, die aus den Zeitstempeln Myonenbahnen erzeugen kann.*

In der ersten Version wurde ein Kammerdesign gewählt, das eine Driftstrecke von jeweils 5 cm um einen mittig platzierten Anodendraht vorsah. Die Kammerdicke beträgt 1 cm, die Kammerlänge 30 cm. Die Kathodenstützstellen, die ein homogenes elektrisches Feld erzeugen, wurden nicht als Drähte ausgeführt, sondern als Leiterbahnen auf einer Platine, siehe Abbildung 27.

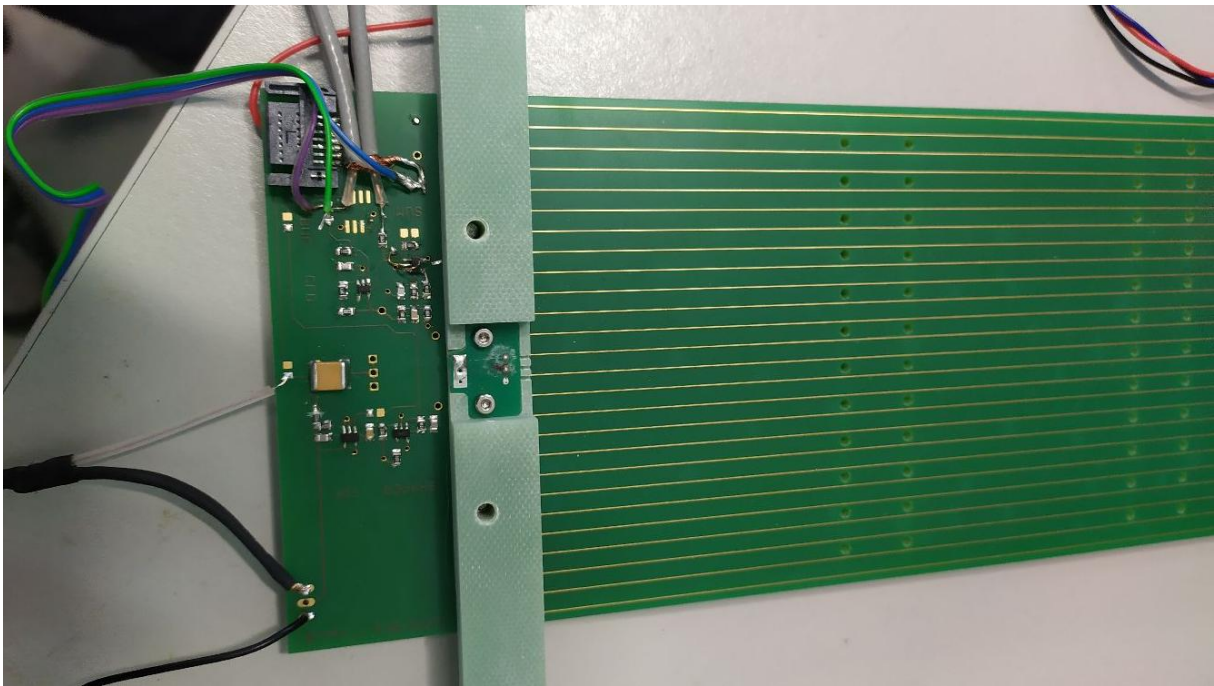


Abbildung 27. Teilausschnitt der unteren Platine einer Driftkammer mit teilbestückter Elektronik, den Leiterbahnen für das Driftfeld sowie der Trägerstrebe. Der Anodendraht ist – nicht sichtbar – mittig gespannt.

Eine Kammer wird dabei von zwei solcher Platinen als Ober- und Unterseite geformt. Die Ränder blieben zunächst offen. Für die Auslegung der Leiterbahnabstände, -dicken sowie wie für die Potenzialverteilung wurden zweidimensionale Simulationen des elektrischen Feldes in COMSOL durchgeführt,

siehe Abbildung 28. Ziel war dabei einerseits, ein möglichst homogenes Driftfeld zu erzeugen, was zu einer homogenen Driftgeschwindigkeit der Elektronen führt. Andererseits sollten Toträume vermieden werden, in denen erzeugte Elektronen aufgrund der Feldgeometrie auf die Kathodenplatinen treffen, anstatt zum Anodendraht zu driften.

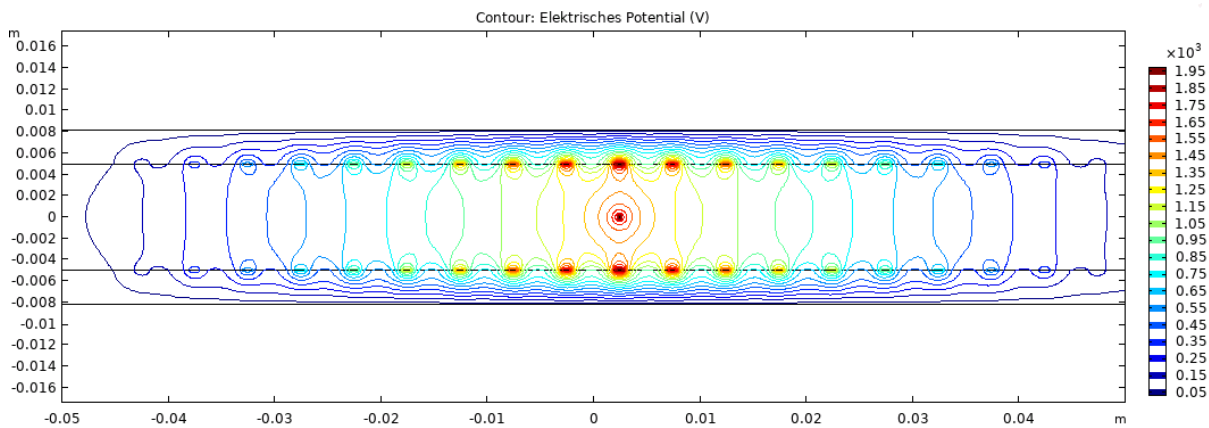


Abbildung 28. 2D-Simulation des elektrischen Potentials in einer Driftkammer mit einem entsprechend beschalteten Widerstandnetzwerks. Leicht außermittig positioniert ist der Anodendraht.

Für eine ausreichend genaue Bestimmung der Driftzeit wurde ein Constant Fraction Discriminator (CFD) realisiert, welcher es ermöglicht einem Puls unabhängig von dessen Signalhöhe einen präzisen Zeitstempel zuzuordnen. Dies war notwendig, da die Pulshöhe für ein registriertes Myon schwanken kann. Dies würde bei einem simplen, schwellwertbasierten Trigger für die gewählte Geometrie zu nicht korrekten Zeitstempeln führen. Für die Quantifizierung der Eigenschaften der Driftkammern wurde der in Abbildung 29 skizzierte Versuchsaufbau realisiert. Unter der Driftkammer wird ein kleiner Szintillator positioniert. Dieser reagiert bauartbedingt auf Ionisationsereignisse deutlich schneller und insbesondere immer gleich schnell, unabhängig vom Ort der Ionisation. Im Gegensatz dazu ist bei einer Driftkammer die Zeit zwischen Ionisation und Messsignal abhängig von der Driftstrecke. Mit der zeitlichen Differenz zwischen dem Szintillatorsignal und dem Signal der Driftkammer ist daher der Ionisationspunkt bestimmbar. Die Auflösung wird dabei zunächst von der Größe des Szintillationskristalls bestimmt, sofern die auslösende, ionisierende Strahlung nicht zusätzlich kollimiert werden kann. Da Gasdetektoren insbesondere für geladene Teilchen empfindlich sind, wurde eine hochenergetische Betastrahlungsquelle (Sr-90) verwendet. In den 3,2 mm dicken Platinen sind in definierten Abständen Löcher vorgesehen. Durch diese können die Elektronen der Sr-90-Quelle sowohl ungehindert in die Driftkammer gelangen als auch den darunter positionierten Szintillationskristall erreichen. Die Dicke der

Platine bewirkt eine gute Abschirmung der Quelle. Gemessene Ereignisse, die – innerhalb eines Zeitfensters von wenigen μs – gleichzeitig in beiden Detektoren auftreten, können daher exakt der Position des jeweiligen Lochs in der Platine zugeordnet werden.

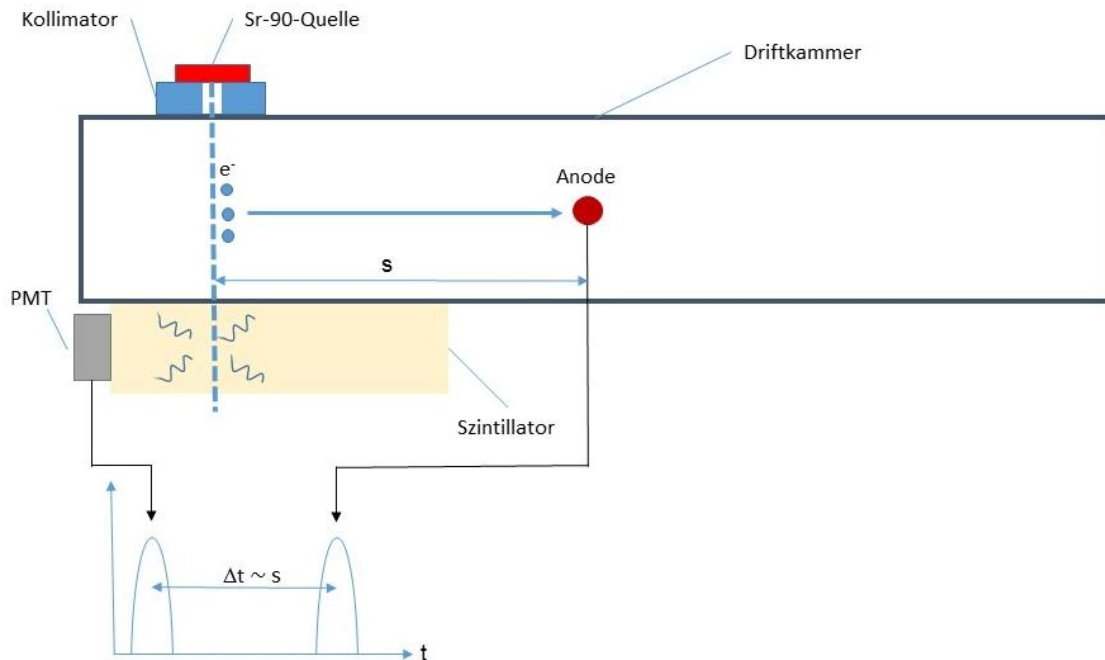


Abbildung 29. Prinzipskizze zur quantitativen Evaluierung des Driftverhaltens.

Die registrierten Koinzidenzergebnisse sind als Histogramm in Abbildung 30 dargestellt. Auf der x-Achse ist dabei die Zeitdifferenz zwischen dem Ereignis in der Driftkammer und dem im Szintillator abgetragen. Diese kann vom Betrag näherungsweise als Driftzeit interpretiert werden. In diesem Histogramm sind insgesamt sechs Peaks erkennbar. Es wurde auf einer Kammerhälfte an sechs Löchern im Abstand von ca. 2 – 44 mm zum Anodendraht (bei einer halben Kammerbreite von 50 mm) gemessen. Jeder einzelne Peak steht daher für eine Einzelmessung, wobei der linke Peak mit der größten Zeitdifferenz für den äußersten Messpunkt steht. In diesem Diagramm zeigen sich nun mehrere Effekte:

- Die Driftgeschwindigkeit ist nicht völlig linear, in Anodendrahtnähe ist sie etwas größer – der Abstand zwischen den einzelnen Peaks wird geringer.
- Je größer die Driftzeit (bzw. dazu analog die Driftstrecke), um so breiter werden die Peaks. Auf größerer Strecke wird die erzeugte Elektronenwolke durch Diffusion im Gas größer, die Unsicherheit nimmt zu.

- Die Anzahl der Koinzidenzereignisse pro Peak bzw. Einzelmessung sind vergleichbar. Dies deutet darauf hin, dass die Sensitivität der Kammer über weite Bereiche der Kammer näherungsweise konstant ist.
- Die 2 σ -Breite der Peaks liegt im Bereich von 100-200 ns.

Es lässt sich eine mittlere Driftgeschwindigkeit von ca. 1,3 cm/ μ s bei einer maximalen Kathodenspannung von -1500 V bestimmen. In Anodendrahtnähe muss sie zwangsweise ansteigen und beträgt bis zu 3,0 cm/ μ s. Diese Werte stimmen gut mit den simulierten Werten überein. Im Vergleich mit weiteren Histogrammen zeigte sich, dass – wie zu erwarten – bei einer höheren Kathodenspannung die Driftgeschwindigkeit steigt und daher die Zeitdifferenzen zwischen den Peaks geringer werden. Die Streubreite lag oberhalb der mit der Elektronik erreichbaren Genauigkeit. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass es trotz der Kollimierung noch zu einer Streuung des Strahlungskegels kommt. Außerdem wird der Flugwinkel der Elektronen durch die Ionisationseffekte in der Driftkammer verändert. Auf Grund der deutlich höheren Energie der Myonen spielt dieser Effekt bei Myonen keine Rolle.

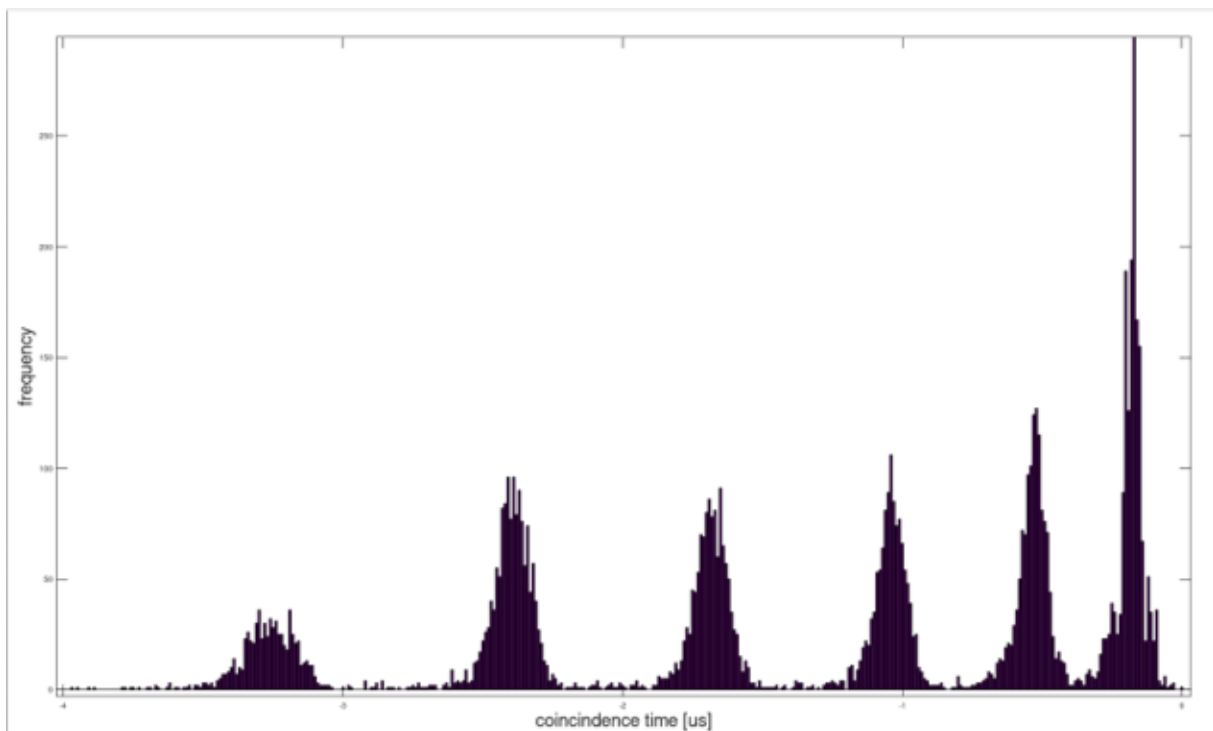


Abbildung 30. Gemessene Driftzeitverteilungen für verschiedene Quellpositionen. Siehe Text für Erläuterung.

Auf Basis dieser Untersuchungen wurde ein erster 5-lagiger Prototyp mit insgesamt 17 Driftkammern aufgebaut (Abbildung 31). Die Kammern werden durch eine rückseitige Platine („Backplane“) mit den

Hochspannungen für Anodendraht und Driftfeld versorgt. Die Niedervoltversorgung und Datenausgabe erfolgt über einen Flachbandanschluss, welcher die Datenkabel aller Kammern bündelt. Der gesamte Prototyp ist in einem gasdichten Gehäuse integriert. Zusätzlich zum Zählgas ein- und -auslass wurde ein Lüfter für eine bessere Gasverteilung installiert. Zudem kann mit zwei Sauerstoffsensoren (durch die Abwesenheit von Sauerstoff der Umgebungsluft) die Reinheit des Zählgases überwacht werden.



Abbildung 31. Foto des Myonendetektor-Prototyps, bestehend aus 17 Driftkammern, die in fünf horizontalen Lagen angeordnet sind. Das Driftkammergestell ist in ein gasdicht verschließbares Gehäuse integriert.

Es wurden mehrere Langzeitmessungen mit dem Prototyp durchgeführt. Die Datenaufzeichnung erfolgte mit der Digitalelektronik. Im Mittel wurden ca. 35 Ionisationsereignisse pro Sekunde und Kammer registriert, die mit der Digitalelektronik erfasst werden können. Für die Identifikation von Myonen in den aufgezeichneten Pulsen wurde ein Programm implementiert, das nach Pulsen innerhalb eines Koinzidenzzeitfensters in allen fünf Detektorlagen sucht. Aufgrund der ermittelten mittleren Driftgeschwindigkeit von ca. $1 \text{ cm}/\mu\text{s}$ wurde das Zeitfenster auf $10 \mu\text{s}$ gesetzt – das Zweifache der theoretischen Driftzeit für Ionisationsereignisse am Driftkammerrand. Wird innerhalb dieses Zeitfensters in jeder Lage genau ein Puls registriert und lässt die geometrische Anordnung der ausgelösten Kammern eine geradlinige Ionisationsspur theoretisch zu, wird das Ereignis als Myon klassiert. Bei allen Langzeitmessungen betrug die so ermittelte Myonenzählrate ca. 50 % des in der Literatur beschriebenen natürlichen Myonenflusses. Die paarweise Koinzidenzhäufigkeit zwischen zwei Kammern korrelierte in den Messungen mit der überdeckten horizontalen Fläche der zwei Kammern. Für die Pfadbestimmung der Myonen wurden zwei verschiedene Ansätze genutzt, um sie miteinander zu vergleichen. Beim ersten Ansatz wurde für jedes Myon ein Gleichungssystem gelöst, das aus den gemessenen Driftzeitdifferenzen zwischen den Kammern die Ionisationspunkte in den ausgelösten Kammern und die als konstant angenommene Driftgeschwindigkeit bestimmt. Durch lineare Regression wird die bestmögliche Gerade zu diesen Ionisationspunkten ermittelt. Beim zweiten Ansatz wurde in COMSOL eine Datenbank aus möglichen Myonenpfaden erstellt, die den Prototypen diskret abdecken. Es konnte bereits gezeigt werden, dass die Driftzeiten durch die elektrostatische Simulation der Driftkammer in guter Näherung bestimmt werden können. Dafür wurden Ionisationspunkte entlang einer Myonenbahn festgelegt und Driftzeiten bis zum Anodendraht berechnet. Diese korrelierten im Mittel mit den experimentell bestimmten Driftzeiten von definierten Ionisationen mittels einer Sr-90-Quelle. Darauf aufbauend wurden Driftzeiten für eine große Anzahl geometrisch möglicher Myonenpfade durch den Prototyp bestimmt, indem alle Kombinationen von Eintrittspunkten an der Ober- und allen Austrittspunkten an der Unterseite des Prototyps mit einer Auflösung von $0,5 \text{ mm}$ betrachtet wurden. Aus der Simulation ergibt sich so für jeden Pfad in Abhängigkeit der Elektronenbeweglichkeit ein Vektor mit den Driftzeiten der jeweils getroffenen Kammern. Aus den realen Messdaten eines Koinzidenzereignisses kann mit der Methode der kleinsten Quadrate aus dieser „Myonen-Datenbank“ der am besten passende Pfad bestimmt werden. In Abbildung 32 sind die aus der Datenbank ermittelten Pfade von 200 zufällig ausgewählten Myonen dargestellt. Im Hintergrund sind schematisch die ausgelösten Driftkammern mit Anodendraht eingezeichnet. Blau gefärbte Pfade besitzen Abweichungen zwischen gemessenen und virtuellen Driftzeiten von maximal 100 ns , was einer Auflösung von ca. 1 mm entspricht. Je mehr die Farbe des Pfads ins Rote geht, desto größer die Abweichungen und desto unplausibler sind die gemessenen Driftzeitdifferenzen. Die plausiblen Pfade konzentrieren sich auf den Bereich, der in

allen Kammern entfernt vom Kammerrand und Anodendraht ist. In diesem Bereich erzielte der Detektor die angestrebte Ortsauflösung von 1 mm. Die erwartete gleichmäßige Abdeckung der fünf aktiven Driftkammern kann jedoch nicht beobachtet werden. Die alternative Pfadermittlung mit Ansatz 1 über Gleichungssysteme lieferte das gleiche Muster. Für eine Ursachenbestimmung wurden kleine Szintillationsdetektoren oberhalb und unterhalb des Prototyps angebracht. Zusätzlich wurde ein Mehrkanal-Digitizer eingesetzt, um Pulse direkt mit einer Auflösung von 8 ns zu sampeln. Hierbei konnte nachgewiesen werden, dass in der Analogelektronik der CFD, welcher die Bestimmung von amplitudenunabhängigen Pulszeitstempeln ermöglicht, für sehr große (nah am Anodendraht) und sehr kleine Pulse (nah am Kammerrand) zu ungenau ist, was zu einer verfälschten Berechnung des Ionisationspunktes führt. Weiterhin konnte trotz erzwungener Strömungen keine gleichmäßige Gasverteilung in dem Gehäuse erzielt werden, was zu unterschiedlichen Driftgeschwindigkeiten in den Kammern führte.

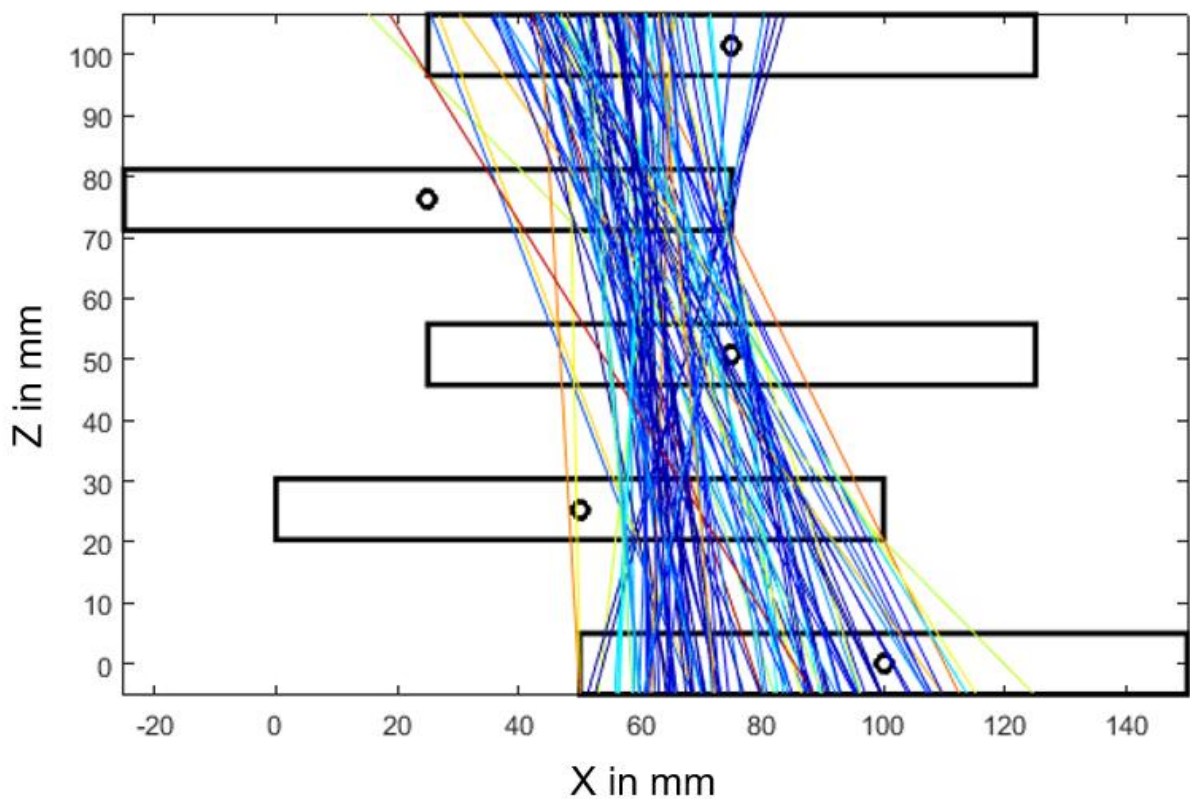


Abbildung 32. Rekonstruierte Pfade aus 200 zufällig ausgewählten Myonen, die mit dem Detektorprototypen gemessen wurden. Die aktiven Driftkammern sind schematisch schwarz dargestellt.

Da diese technologischen Hürden mit dem existierenden Detektordesign nicht überwunden werden konnten, erfolgte ein Re-Design. Hierfür wurde die Geometrie der Driftkammer und insbesondere des elektrischen Feldes hinsichtlich der Kriterien Sensitivität und Homogenität final optimiert. Folgende

Kammerparameter wurden in den Simulationen neu bewertet: Kammerhöhe, Kathodenspannung, Dicke des Kathodenboards, Anzahl Kathodenleiterbahnen, Breite der Kathodenleiterbahnen, Einfluss der äußeren Massefläche des Kathodenboards. Auf Basis dieser optimierten Parameter wurden neue Kathodenboarddesigns erstellt, die zudem eine Driftstrecke von bis zu 25 cm ermöglichen. Die benötigte höhere Spannungsfestigkeit der Kammern konnte experimentell nachgewiesen werden. Für das neue Myonenteleskop werden diese Kammern nicht mehr zusammen in einem Koffer mit gemeinsamer Gasatmosphäre integriert, sondern modular als Einzelkammern mit additiv gefertigten Rahmen, siehe Abbildung 33. Es wurde nachgewiesen, dass die Kammern so über Tage hinweg hinsichtlich der Elektronik und Gasatmosphäre stabil betrieben werden können. Kriterien für die Stabilität waren dabei die Ionisationszählrate sowie das Driftverhalten. Der Anodendraht liegt nun nicht mehr in der Mitte der Kammer, sondern an einer Seite. Das verringert prinzipiell das mögliche aktive Volumen pro Kanal, verbessert aber dafür die erreichbare Genauigkeit der zu bestimmenden Myonenpfade, durch den Wegfall potenzieller Uneindeutigkeiten, die sich für bestimmte Myonenpfade ergaben. Zudem ermöglicht das neue Design ein Aneinanderreihen von Kammern ohne Überstände im Randbereich. Es wurden zwei Teleskope aufgebaut mit jeweils 12 übereinander gestapelten Kammern, jeweils sechs für die Pfadbestimmung in x- und y-Richtung. Zusätzlich wurden Szintillationsplatten (Maße: 250 mm x 250 mm x 10 mm) über und unter dem Driftkammerstapel angebracht. Diese sind derart mit Siliziumphotomultipliern ausgestattet, dass sie instantan bei einem Myonendurchgang einen Puls erzeugen. Dieser dient als Trigger und Zeitstempel für die Messung der Driftzeit in jeder Kammer. Zunächst konnten mit diesem Aufbau keine ausreichende Wechselwirkungseffizienz und Ortsauflösung erreicht werden. Dies lag an Produktionsmängeln der eingesetzten Komponenten (mangelhafte Gasdichtheit der Rahmen, zu große Streuung im Verhalten der Operationsverstärker). Nach Neubeschaffung wurde eine finale Evaluierungsmessung durchgeführt. Hierfür wurden zwei kleinere Triggerdetektoren (Maße: 150 mm x 150 mm x 10 mm) mittig über und unter den Driftkammern positioniert. In den verbleibenden Randbereichen mit einer Breite von 50 mm dürften daher keine rekonstruierten Myonenpfade zu sehen sein. Das Resultat der Messung ist in Abbildung 34 zu sehen. Die Abdeckung der inneren 150 mm ist weitestgehend homogen. Auch das Richtungsspektrum entspricht der Erwartung. Vereinzelt gibt es Pfade, die leicht außerhalb (nicht zwischen $X = 50 \dots 200$ mm) des eingegrenzten Gebiets liegen. Der Anteil dieser Pfade beträgt weniger als 2 %. Die Farben der Pfade spiegeln die Güte der linearen Regression wider. Als Kriterium wurde das Maximum der Abstände zwischen einem berechneten Ionisationspunkt und der Regressionsgerade gewählt (blau entspricht 0 mm, dunkelrot entspricht > 5 mm). Bei ca. 70 % der Pfade war dieser Wert kleiner als 2 mm. Mit diesem Aufbau können als Myonenpfade mit den geforderten Ortsauflösungsanforderungen bestimmt werden.

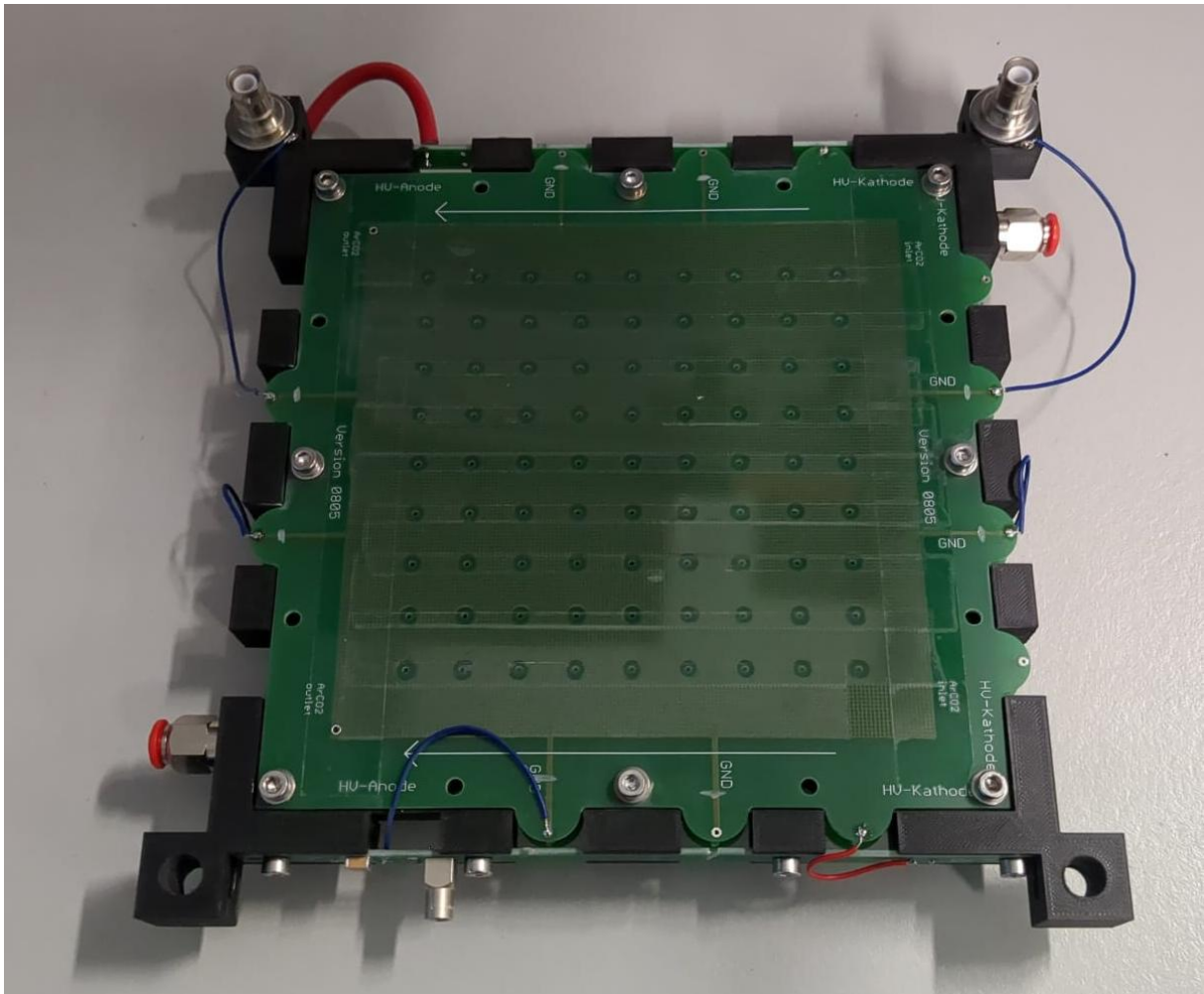


Abbildung 33. Foto einer Einzelkammer für das neue Myonenteleskop. Die Kammer besteht aus zwei Kathodenboards (grün) und einem umgebenden Rahmen (schwarz), Gaszuführungen und -abführungen sowie aus den Hochspannungsanschlüssen. Die sensitive Fläche beträgt ca. 25 cm.

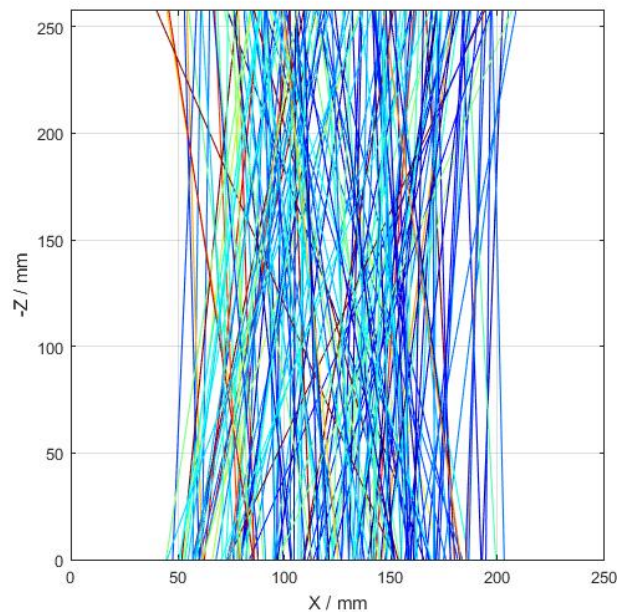


Abbildung 34. Berechnete Myonenpfade der finalen Evaluierungsmessung mit dem neuen Myonenteleskop. Siehe Text für Erläuterungen.

6.5 Durchgeführte Experimente

Aufgrund der technologischen Herausforderungen bei der Detektorentwicklung konnte im Vorhabenzeitraum nur ein Myonenteleskop voll funktionstüchtig fertiggestellt werden. Zwei weitere werden zum Zeitpunkt der Berichterstellung in Betrieb genommen. Da für eine Streubildgebung mindestens zwei Myonenteleskope benötigt werden, wurde eine Radiographie von zwei übereinander gestapelten Bleisteinen durchgeführt (siehe Abbildung 35). Die Steine besitzen eine Länge von ca. 22 cm, überdecken also nahezu die gesamte aktive Länge des Detektors. Die Breite beträgt ca. 5 cm, die Höhe insgesamt 18 cm. Die Messzeit betrug 4 h, in der ca. 16.000 Myonentracks für die Radiographie hinzugezogen wurden. In Abbildung 36 sind die Ergebnisse als zweidimensionale Projektionen dargestellt. Beim Fluss bildet sich in y-Richtung ein deutliches Tal aus, was durch das Wegstreuen von Myonen verursacht wird, während in orthogonaler Richtung der Fluss relativ konstant bleibt aufgrund der homogenen Materialverteilung. Am deutlichsten bildet sich die Lage der Bleisteine beim Anteil kleiner Winkel der Myonenbahnen aus. Als Wert für den Grenzwinkel wurde hier 7° gewählt. Dieser Parameter ist im mittleren Bereich auf einer Breite von ca. 6 cm deutlich kleiner. Schärfere Abbildungen sind bei Radiographien aufgrund der ungerichteten Quelle nicht möglich. Mit dieser Messung wurde die Funktion des Myonenteleskops nachgewiesen.

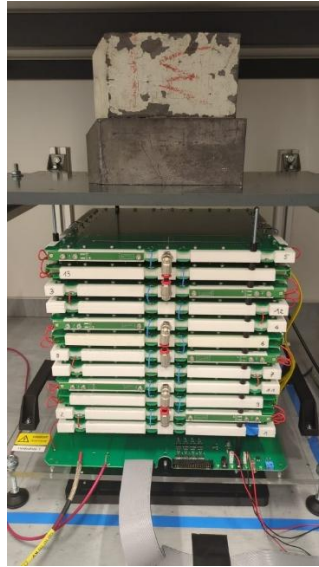


Abbildung 35. Versuchsaufbau zur Radiographie von zwei übereinander gestapelten Bleisteinen.

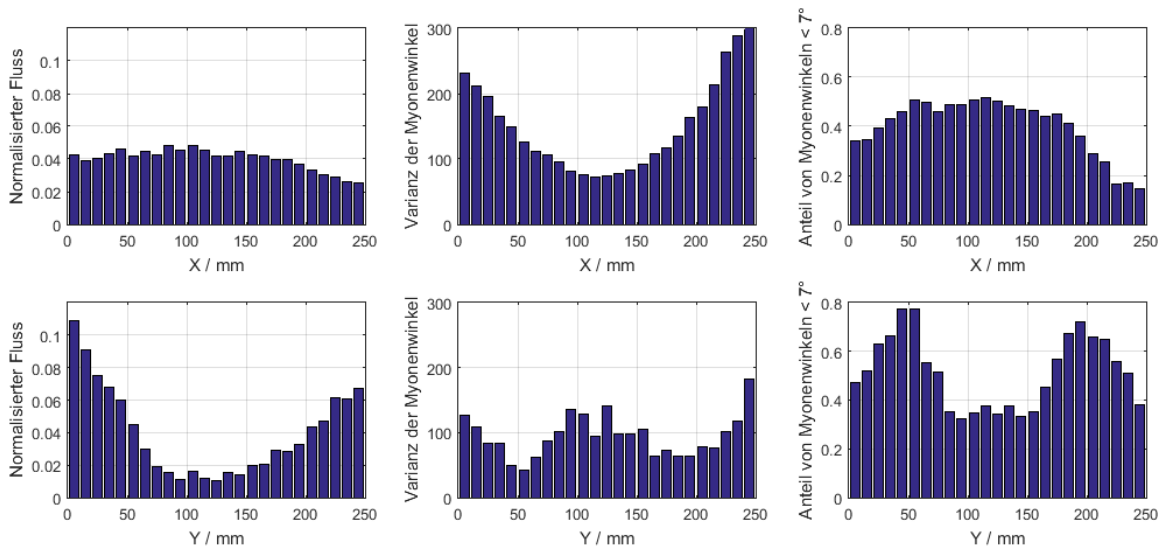


Abbildung 36. Resultate der Radiographie. Dargestellt sind der Myonenfluss (linke Spalte), die Varianz der Winkel der registrierten Myonen (mittlere Spalte) und der Anteil der Bahnen mit einem Winkel kleiner als 7° (rechte Spalte). Die Werte sind entlang der y-Dimension gemittelt und aufgelöst nach x (obere Reihe) und andersherum (untere Reihe).

Nach Inbetriebnahme der weiteren Teleskope werden Streubildgebungen am Modell-CASTOR der HSZG (Maßstab ca. 1:7) durchgeführt. Der Versuchszustand ist bereits aufgebaut (Abbildung 37). Die Ergebnisse werden im Rahmen des Vorhabens RIMNUS veröffentlicht werden.

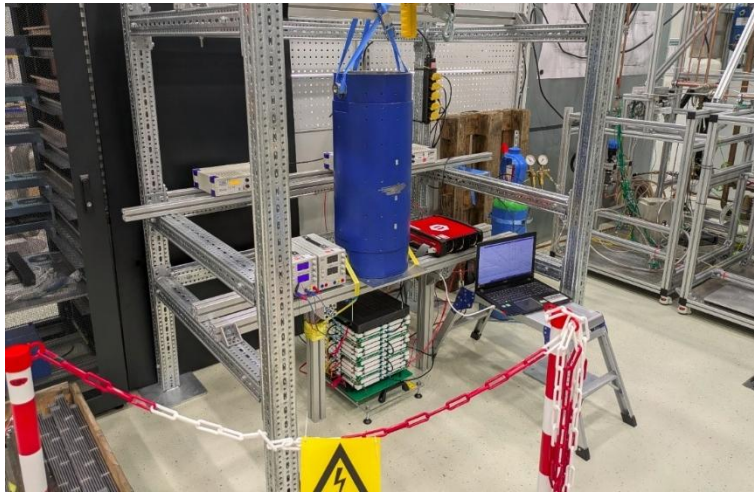


Abbildung 37. Versuchsstand zur Streubildgebung am Modell-CASTOR.

7 Verfahrenskonzept zur Behälterüberwachung (HSZG)

Die Ergebnisse der bisher abgeschlossenen Untersuchungen zeigen, dass das Monitoring über Gamma- und Neutronenstrahlung und Myonen-Bildgebung technisch realisierbar und aussagekräftig sind. Es wurde ein Monitoring-Konzept mit folgender übergeordneter Zielstellung erarbeitet:

1. *Nachweis der Schutzziele durch wiederkehrende Prüfungen*
2. *Differenzanalysen und Vergleich aktueller Messdaten zum Zeitpunkt der Abfertigung und Einlagerung*

Das Konzept (siehe Abbildung 38) sieht periodisch wiederkehrende Messungen an CASTOR-Behältern im ZLN insbesondere vor und nach dem Transport in die neue Lagerhalle auf dem Betriebsgelände der EWN im Rahmen des Forschungsprojektes ESTRAL [32] mittels Gamma- und Neutronenstrahlungsanalyse vor. Darüber hinaus sollten auch CASTOREn zu Beginn ihrer Zwischenlagerung vermessen werden. Die Messmethode Myonentreibildgebung soll für die Erlangung detaillierter Aussagen bei festgestellten möglichen Zustandsänderungen, Ungewissheiten bzw. vermuteten Schädigungen zum Einsatz kommen.

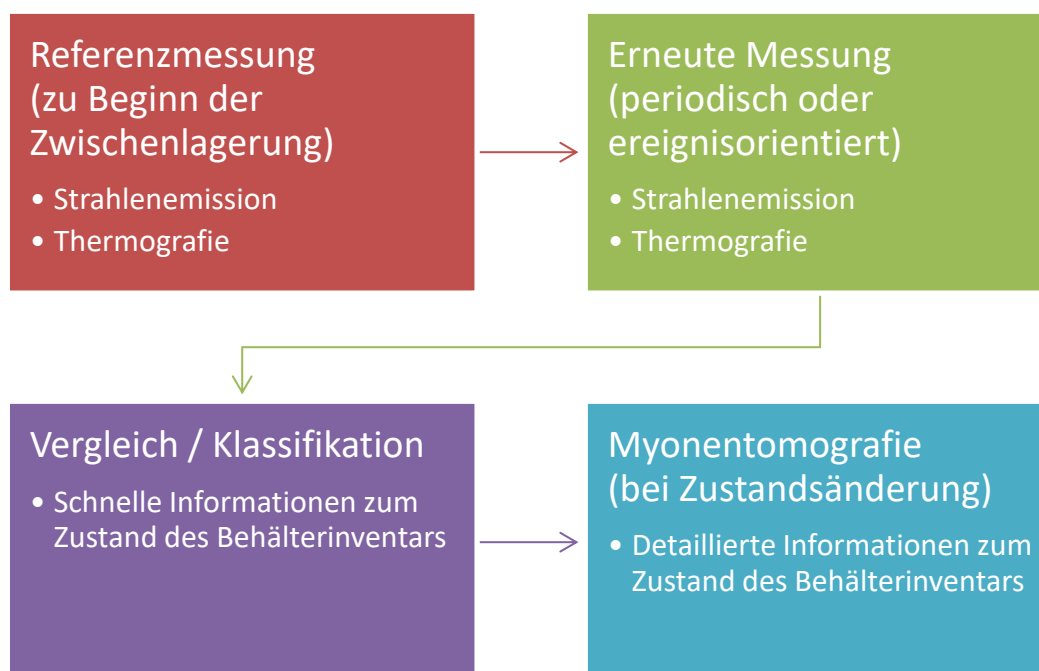


Abbildung 38: Monitoringkonzept für TLBs im Zwischenlager

Mit den gewonnenen Erkenntnissen bei der Durchführung von Feldstudien im ZLN beim Arbeiten mit dem mobilen Messsystem und CLYC-Sensoren mit Dual-Channel-Analyzer sollte die Prozedur und der Messansatz dahingehend optimiert werden, dass:

- *Das Messsystem als formschlüssiger Aufsatz auf CASTOR-Behälter per Hallenkran gesetzt wird. Dieser soll drehbar sein und die Strahlungssensoren auf einer Plattform herunterlassen (siehe Abbildung 39).*
- *Die umlaufenden 360°-Messungen vollautomatisch ablaufen um das Bedienpersonal zu entlasten.*
- *Energiespektren von 0 bis 4 MeV anstatt gefensterter Start-Stop-Messungen aufgenommen werden sollte um Informationsverlust zu vermeiden. Für akzeptable Messzeiten muss dazu Auswertelektronik der CLYC-Sensoren von Dual-Channel auf Multi-Channel (MCA) umgerüstet werden.*
- *Das Konzept zur Abschirmung und Kollimierung weiterentwickelt wird um Messungen im Behälterverbund zur ermöglichen damit:

 - *Quereinflüsse bestmöglich vermieden werden.*
 - *Lastspiele beim Verfahren der TLB's mit dem Hallenkran nicht stattfinden.*
 - *Das Siegel der Behältergruppe und die Anbindung an die Druckschalterüberwachung nicht entfernt werden muss (Meldepflichtig bei Euratom)**
- *Eine universelle Schnittstelle in der Leittechnik vorgesehen wird um andere Strahlungssensoren bei Bedarf ins System integrieren zu können.*
- *Die Behälteroberflächentemperatur als Zusatzinformation zum Nachweis der TLB-Schutzziele geloggt werden soll*

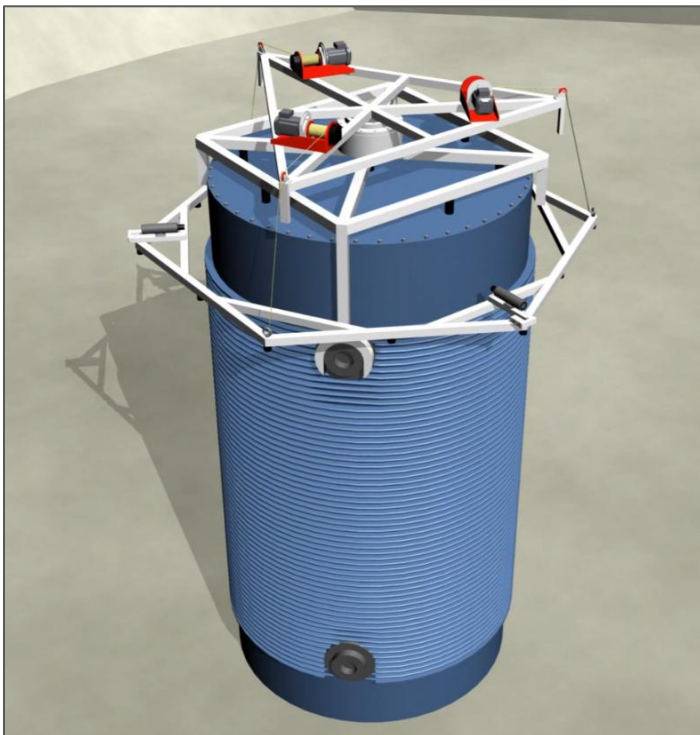


Abbildung 39: Entwurf eines Messroboters zum Aufsetzen auf TLB's (Maya Professional)

Für die Weiterentwicklung des Monitoring-Konzepts und dessen Ertüchtigung für das Zwischenlager Nord sollten folgende Fragestellungen berücksichtigt werden.

- 1. Wie kann die Messprozedur optimiert werden, sodass eine ausreichend (wiederhol)genaue Positionierung der Sensoren am Behälter möglich ist?*
- 2. Kann eine Kollimationsgeometrie entwickelt werden, die auch eine Messung im Lagerverbund trotz der Quereinflüsse ermöglicht?*
- 3. Kann die Sensitivität des Monitorings erhöht werden, um auch Informationen über die Aktivitätsverteilungen der inneren Brennelemente abzubilden?*

8 Zusammenfassung (TUD, HSZG)

Im Vorhaben wurden zwei nicht-invasive Bildgebungsverfahren für das Monitoring des Inventars von Transport- und Lagerbehältern für hochradioaktive Abfälle weiterentwickelt.

Die Gamma- und Neutronenradiographie ist ein etabliertes Messverfahren mit einer hohen Aussagekraft für den Zustand von Brennelementen, die nahe der Behälterwand gelagert sind. Die Herausforderungen für eine sinnvolle Anwendung sind dabei die exakte Positionierung der Sensoren mit einer hohen Wiederholgenauigkeit, die Abschirmung gegenüber Umgebungseinflüssen und die Interpretation der Ergebnisse mithilfe von begleitenden Simulationen. Im Rahmen des Vorhabens wurde ein teilautomatisiertes Messsystem entwickelt, aufgebaut und im Zwischenlager Nord in zwei Messkampagnen zum Einsatz gebracht. Die wesentlichen Ergebnisse sind

- *Erstmals wurde an einem beladenen Behälter im Zwischenlager der räumlich aufgelöste Gamma- und Neutronenfluss gemessen.*
- *Eine Messzeit von wenigen Minuten pro Messpunkt reichte aus, um randnahe Brennelemente mit höherer Aktivität anhand der Gammastrahlungsverteilung zu identifizieren, wenn der Behälter von Quereinflüssen geschirmt am Inspektionsplatz stand.*
- *Für eine Messung im Lagerverbund muss der Sensor anders abgeschirmt werden, da hierbei die Quereinflüsse zu groß waren.*
- *Ein Vergleich zwischen Simulations- und Messdaten wurde nicht durchgeführt, da die hierfür benötigten Abbrandrechnungen nicht im Rahmen des Vorhabens nicht möglich waren. Die Simulationsgeometrie wurde in FLUKA bereits umgesetzt und evaluiert.*

Aus den erzielten Ergebnissen ergeben sich weitere wissenschaftliche Fragestellungen für potenzielle Folgevorhaben:

- 1.) *Wie kann die Messprozedur optimiert werden, sodass eine ausreichend (wiederhol)genaue Positionierung der Sensoren am Behälter möglich ist?*
- 2.) *Kann eine Kollimationsgeometrie entwickelt werden, die auch eine Messung im Lagerverbund trotz der Quereinflüsse ermöglicht?*
- 3.) *Kann die Sensitivität des Monitorings erhöht werden, um auch Informationen über die Aktivitätsverteilungen der inneren Brennelemente abzubilden?*



Abbildung 40: Oberer Teil des Messsystems mit Szintillationsdetektor während der Messung am Behälter im Lagerverbund (links) und unterer Teil des Messsystems mit Schienenführung (rechts) als Screenshots aus dem NDR-Beitrag über die Messungen im Zwischenlager [33].

Im Vergleich zu diesen radiografischen Verfahren ist die Myonenbildgebung für derartige Anwendungen kein etabliertes Messverfahren. Im Rahmen des Vorhabens wurde eine Reihe von Simulationen durchgeführt, die einerseits dazu dienten das Auflösungsvermögen und die Messzeiten dieser Verfahren zu untersuchen, andererseits um einen geeigneten Bildrekonstruktionsalgorithmus zu entwickeln. Eine weitere Herausforderung war die Entwicklung eines geeigneten Detektorprototyps. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeiten sind:

- *Es wurde ein algebraischer Bildrekonstruktionsalgorithmus entwickelt, dessen Auflösungsvermögen unabhängig von der Objektgeometrie ist.*
- *Innerhalb von Stunden (bei senkrechter Durchstrahlung) bzw. Tagen (bei waagerechter Lagerung des Behälters) können Brennelemente eindeutig identifiziert werden. Nur bei Waagerechter Lagerung ist jedoch gute Auflösung entlang der Längsachse möglich.*
- *Es wurde ein modulares, robustes und ökonomisches Myonenteleskop, das aus Driftkammern besteht, entwickelt und in Betrieb genommen. Das Auflösungsvermögen entspricht den Anforderungen. Aufgrund technologischer Schwierigkeiten war ein Einsatz im Zwischenlager nicht möglich.*

Daraus ergaben sich Fragestellungen, die im Vorhaben RIMANUS weiter untersucht werden:

- 1.) *Sind die mithilfe von Simulationen prognostizierten Auflösungen des Objekts und Messzeiten beim Einsatz im Zwischenlager realistisch?*
- 2.) *Ist durch geeignete Detektoranordnungen und weiter verbesserte Rekonstruktionsalgorithmen die Auflösung einzelner Brennstäbe bei realistischen Messzeiten möglich?*

3.) *Eignet sich die Myonentomographie für ein wiederkehrendes Monitoring von einer großen Anzahl von Behältern?*

9 Quellen

- [1] EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH, „ewn-gmbh.de,“ [Online]. Available: <https://www.ewn-gmbh.de/>. [Zugriff am 07 10 2024].
- [2] Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz), 4.12.2022.
- [3] R. A. Clark, M. A. Conroy, T. G. Lach, E. C. Buck, K. L. Pellegrini, B. K. McNamara und J. M. Schwantes, „Distribution of metallic fission-product particles in the cladding liner of spent nuclear fuel,“ *npj Materials Degradation volume 4*, 2020.
- [4] A. Strasser, F. Garzarolli und P. Rudling, Processes Going on in Nonfailed Rod During Accident Conditions (LOCA and RIA), Skultuna, Sweden: Advanced Nuclear Technology International, 2010.
- [5] M. Grosse, F. Boldt, M. Herm, C. Roessger, J. Stuckert, S. Weick und D. Nahm, „The SPIZWURZ project–Experimental investigations and modeling of the behavior of hydrogen in zirconium alloys under long-term dry storage conditions,“ in *Nuclear Engineering and Technology*, 2024, pp. 824-831.
- [6] BGZ, „Das Forschungsprogramm der BGZ,“ 2023.
- [7] A. R. J. Machiels, Spent Fuel Transportation Applications – Assessment of Cladding Performance, San Diego (USA): Electrical Power Research Institute (EPRI), 2007.
- [8] P. Rudling, C. Patterson, R. Adamson, F. Garzarolli, A. Strasser und T. Turnbull, High Burnup Fuel Design Issues and Consequences, Mölnlycke: Advanced Nuclear Technology International, 2012.
- [9] L. W. Alvarez et al., „Search for Hidden Chambers in the Pyramids: The structure of the Second Pyramid of Giza is determined by cosmic-ray absorption,“ *Science*, Bd. 167(3919), pp. 832-839, 1970.
- [10] R. Alfaro et al., „A muon detector to be installed at the Pyramid of the Sun,“ *Revista mexicana de física*, Bd. 49, pp. 54-59, 2003.
- [11] K. Morishima et al., „Discovery of a big void in Khufu’s Pyramid by observation of cosmic-ray muons,“ *Nature*, Bd. 552(7685), pp. 386-390, 2017.
- [12] H. K. Tanaka et al., „Cosmic-ray muon imaging of magma in a conduit: Degassing process of Satsuma-Iwojima Volcano, Japan,“ *Geophysical Research Letters*, Bd. 36(1), 2009.
- [13] H. Miyadera et al., „Imaging Fukushima Daiichi reactors with muons,“ *Aip Advances*, Bd. 3(5), 2013.
- [14] D. Poulson et al., „Cosmic ray muon computed tomography of spent nuclear fuel in dry storage casks,“ *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Bd. 842, pp. 48-53, 2017.
- [15] J. M. Durham et al., „Verification of spent nuclear fuel in sealed dry storage casks via measurements of cosmic-ray muon scattering,“ *Physical Review Applied*, Bd. 9(4), p. 044013, 2018.
- [16] T. Braunroth et al., „Muon radiography to visualise individual fuel rods in sealed casks,“ *EPJ Nuclear Sciences & Technologies*, Bde. %1 von %27, 12, 2021.
- [17] J. Niedermeier et al., „Impact of Modeling Assumptions on Muon Scattering Images of Loaded Dry Storage Casks,“ *Nuclear Science and Engineering*, Bde. %1 von %21-13, 2024.
- [18] J. C. Wagner und M. D. DeHart, „Review of Axial Burnup Distribution Considerations for Burnup Credit Calculations,“ ORNL/TM-1999/246, 1999.

- [19] R. Rachamin und U. Hampel, „Feasibility assessment of using external neutron and gamma radiation measurements for monitoring the state of fuel assemblies in dry storage casks,“ *Annals of Nuclear Energy*, Bd. 135, 2020.
- [20] N. Khan and R. Machrafi, “Neutron and Gamma-ray Detection using a Cs2LiYCl6 Scintillator,“ *EPJ Web of Conferences 66*, 2014.
- [21] A. Giaz, N. Blasi, C. Boiano, S. Brambilla, F. Camera, C. Cattadori, S. Ceruti, F. Gramegna, T. Marchi, I. Mattei, A. Mentana, B. Million, L. Pellegrini, M. Rebai, S. Riboldi, F. Salamida und M. Tardocchi, „Fast neutron measurements with 7Li and 6Li enriched CLYC scintillators,“ *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, pp. 51-61, 2016.
- [22] SCIONIX, „25.4B25.4/2M-E2-CLYC-NEG,“ *Data Sheet*, November 2016.
- [23] N. Blasi, S. Brambilla, F. Camera, S. Ceruti, A. Giaz, L. Gini, F. Groppi, S. Manenti, A. Mentana, B. Million und S. Riboldi, „Fast Neutron Detection Efficiency of 6Li and 7Li Enriched CLYC Scintillators using an Am-Be source,“ *Journal of Instrumentation, Volume 13*, 2018.
- [24] T. J. Roberts und D. M. Kaplan, „G4beamline simulation program for matter-dominated beamlines,“ *In 2007 IEEE Particle Accelerator Conference (PAC)*, Bd. IEEE, pp. 3468-3470, 2007.
- [25] L. J. Schultz et al., „Image reconstruction and material Z discrimination via cosmic ray muon radiography,“ *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Bde. %1 von %2687-694, p. 519(3), 2004.
- [26] L. J. Schultz et al., „Statistical reconstruction for cosmic ray muon tomography,“ *IEEE transactions on Image Processing*, Bd. 16(8), pp. 1985-1993, 2007.
- [27] Z. Liu et al., „Muon tracing and image reconstruction algorithms for cosmic ray muon computed tomography,“ *IEEE Transactions on Image Processing*, Bd. 28(1), pp. 426-435, 2018.
- [28] S. Chatzidakis et al., „A generalized muon trajectory estimation algorithm with energy loss for application to muon tomography,“ *Journal of Applied Physics*, Bd. 123(12), 2018.
- [29] B. Rossi, *High Energy Particles*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1952.
- [30] A. C. Kak und M. Slaney, *Principles of computerized tomographic imaging*, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2001.
- [31] M. Wagner, S. Eisenhofer, A. Bieberle und U. Hampel, „Algebraic image reconstruction for muon scattering computed tomography without tracing,“ *Journal of Applied Physics*, Bd. eingereicht, 2025.
- [32] EWN, „www.ewn-gmbh.de,“ EWN, [Online]. Available: <https://www.ewn-gmbh.de/projekte/estral>. [Zugriff am 18 10 2024].
- [33] NDR, „ndr.de,“ NDR, 06 06 2024. [Online]. Available: <https://www.ndr.de/fernsehen/sendungen/nordmagazin/Messroboter-untersuchen-Castorbehälter-in-Lubmin,nordmagazin118858.html>. [Zugriff am 16 10 2024].
- [34] P. Kaufholz, „Wasserstoffdiffusion in zirkoniumbasierten Hüllrohrmaterialien,“ in *3. Fachworkshop Zwischenlagerung*, Berlin, 2023.

10 Anhang

10.1 Details zum Traversiersystem

10.1.1 Trägerstruktur

Die Trägerstruktur bildet das Grundgerüst des mobilen Messsystems. Zu Transport- und Handhabungszwecken besteht es aus drei modularen Teilen, dem Unter-, Mittel- und Oberteil (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Trägerstrukturelemente – Eigenmassen und Dimensionen

Komponente	Unterteil	Mittelteil ²	Oberteil
Masse	125 kg	60 kg	25 kg
Länge	1.900 mm	1.100 mm	760 mm
Breite	1.500 mm	1.300 mm	650 mm
Höhe	1.800 mm	2.200 mm	2.200 mm

Das Design der Trägerstruktur mit Querversteifungen garantiert einen schwingungsarmen und somit reproduzierbaren Versuchsbetrieb. Folgende Eigenschaften wurden bei der Gestaltung priorisiert:

- *Hohe Festigkeit und Quersteifigkeit,*
- *Geringe Eckmaße zur besseren Transportierbarkeit und*
- *Spiegelsymmetrischer Aufbau für optimale Schwerpunktverteilung zur Kipphemmung.*

Für größtmögliche Modularität und Adaptierbarkeit wurde die Trägerstruktur aus handelsüblichen Aluminiumkonstruktionsprofilen mit allseitigen 8 mm Nuten gefertigt. Das Unterteil (siehe Abbildung 41) bildet das Grundgerüst der Anlage. Sämtliche weiteren Komponenten, wie zum Beispiel das Haupt- oder Vertikalverfahrenssystem sind daran installiert. Zur Nivellierung und manuellen Bewegung des Unterteils verfügt es über vier freilaufende Stützräder und Ausdrehstützen. Die Baugruppen zum Aufbau Mittel- und Oberteil (siehe Abbildung 42) werden für die messtechnische Abdeckung der gesamten Behälter-Höhe bis 6 m benötigt. Diese Höhenerweiterungen sind optional und für Messhöhen bis 1,85 m nicht zwingend erforderlich. Des Weiteren wurde auf Kabelstrukturen in den oberen Segmenten verzichtet. Sämtliche elektrische Signale werden über Leitungen, die am Unterteil in Kabelrohren

² Nur benötigt, bei CASTORen > 4 m (z.B. CASTOR V/19)

geführt werden, übertragen. Somit entfällt der Verkabelungsaufwand beim Koppeln und Entkoppeln des Messsystems mit den Höhererweiterungen.

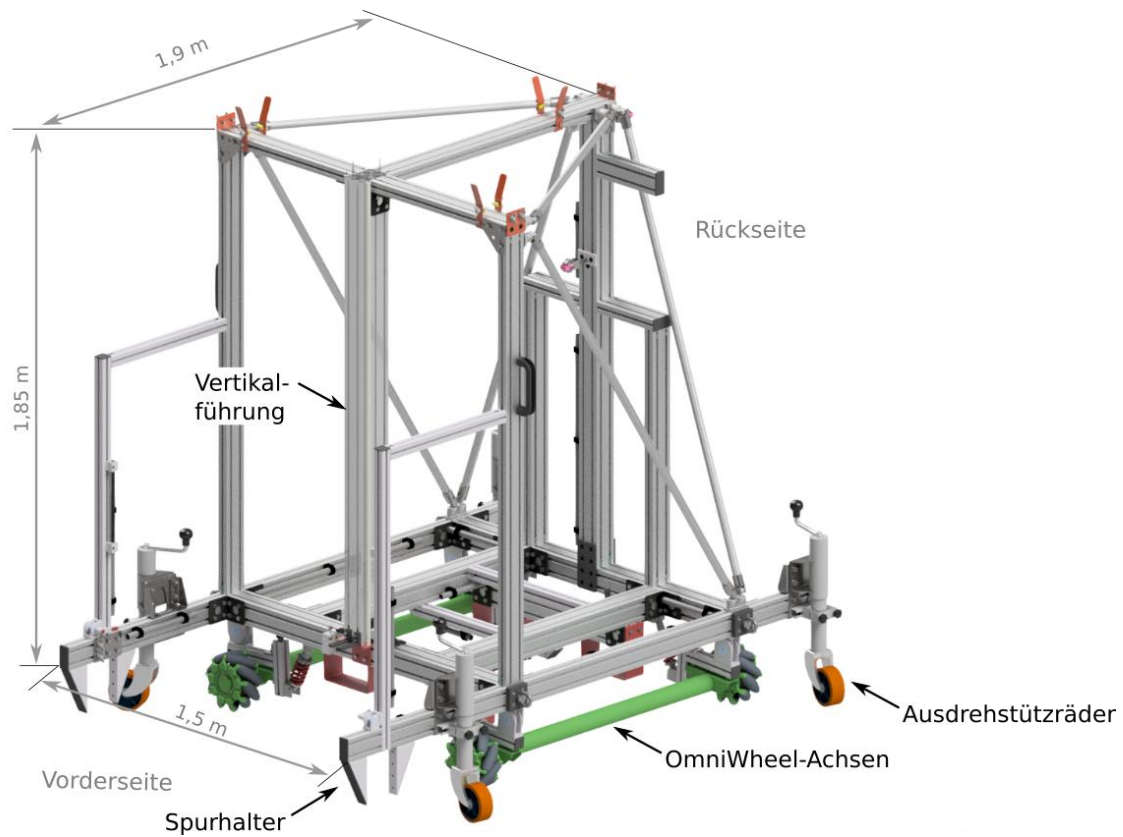


Abbildung 41: Aufbau des Trägerstruktur-Unterteils ohne Elektrokomponenten (CAD-Model)

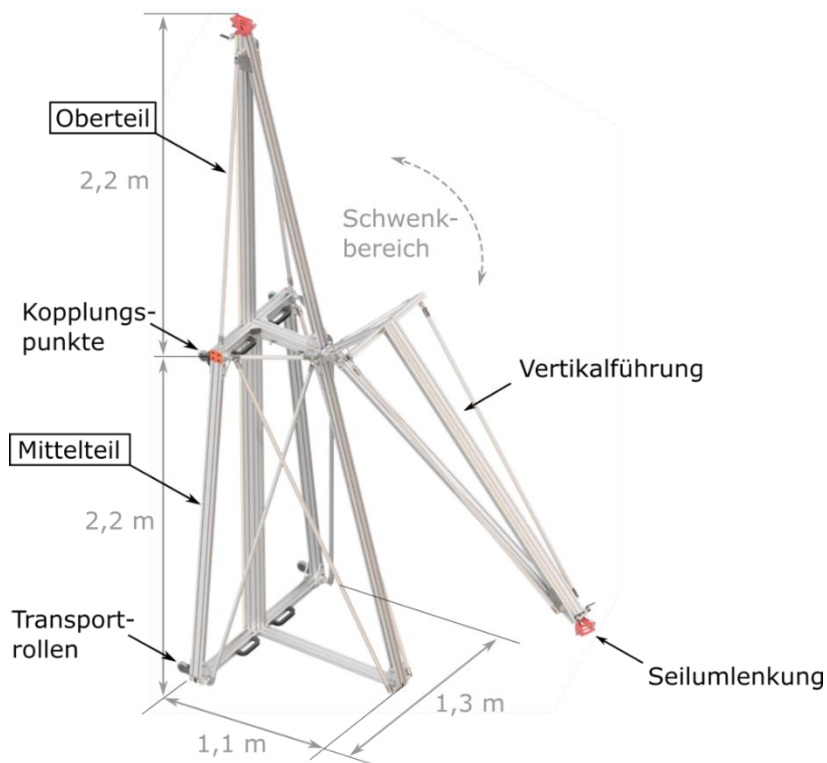


Abbildung 42: Aufbau von Trägermittel- und Oberteil (CAD-Model)

10.1.2 Schienensystem als mechanische Barriere zum CASTOR

Das Schienensystem stellt eine Ergänzung der Trägerstruktur dar und hat die Aufgabe, mechanisch einen festen radialen Abstand des Messsystems zum Behälter zu gewährleisten. Es besteht es aus vier baugleichen 90°-Teilesegmenten, deren Masse je 15 kg beträgt und die vor Ort mit wenigen Arbeitsschritten um den Behälter herum zusammengesetzt werden. Hierfür sind an den Schienensegmenten Stoßverbindungen mit Zentrierstiften angebracht, an denen die Schienensegmente miteinander verbunden werden (Abbildung 43).

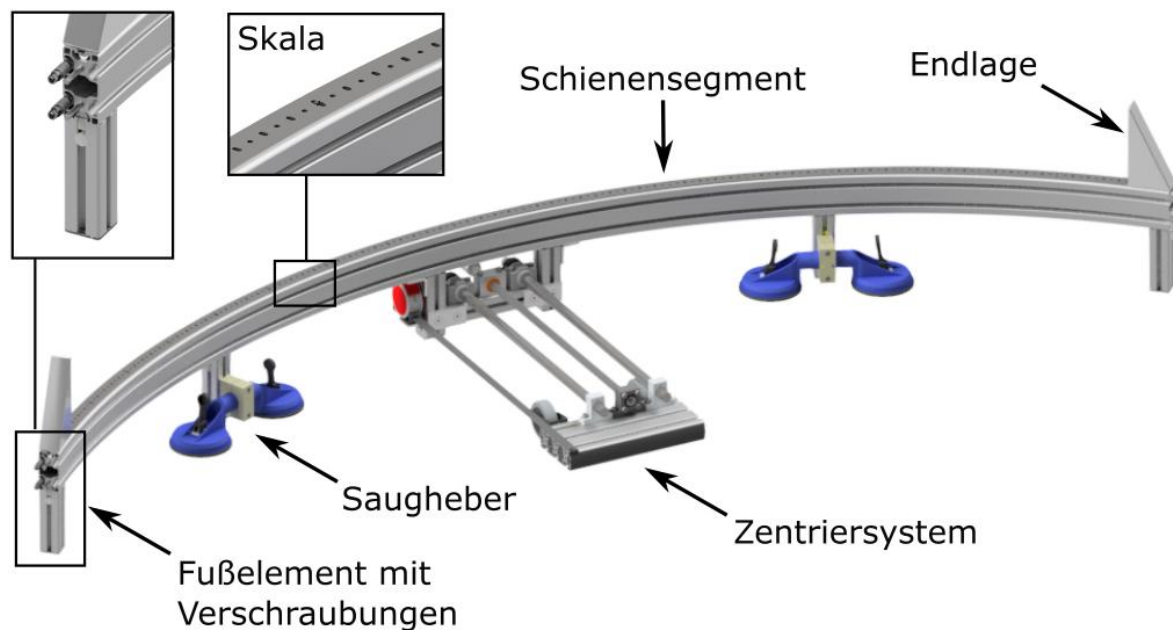


Abbildung 43: Aufbau eines Schienensegments (CAD-Modell)

Die zusammengesetzte Schienenkreisbahn besitzt einen Außendurchmesser von 3,35 m. Das Schienensystem wird mit Hilfe der gummierten Ausdrehstützen konzentrisch zur Behälter-Mittelachse ausgerichtet und anschließend mit den Saugelementen werkzeuglos am Boden befestigt. Zum Ausrichten des Messsystems und der Ermittlung der relativen Ist-Position zum CASTOR wurde eine Skala an der Oberseite der Schienensegmente befestigt, deren kleinster Winkelschritt 0,5° beträgt. Zwei Laserpointer fungieren als Lot und markieren die Position. Etwaige Sensorleitungen des CASTORs werden unterhalb der Freiräume zwischen den Fußelementen geführt. Sollte es Bereiche im Behälterumfang geben, die unzugänglich sind, können mechanische Endlagen zur Kreisbahnbegrenzung gesetzt werden. Gegeben falls ist es auch denkbar nicht alle Segmente zu errichten. Bei Kontakt wirken diese auf die seitlichen Not-Aus-Taster des Messsystems.

10.1.3 Hauptantriebssystem mit radialer Sicherheitsabstandsmessung

Das Hauptverfahrenssystem der Anlage besteht aus zwei individuell ansteuerbaren Antriebseinheiten. Jede Einheit besitzt einem leistungsstarken Closed-Loop Schrittmotor der ein Planetengetriebe mit Untersetzung $i = 25$ antreibt (siehe Abbildung 44). Das Getriebe ist über eine Wellenkupplung mit Passfedernut mit der Antriebswelle verbunden. Diese überträgt das Drehmoment formschlüssig über eine weitere Passfeder an das Antriebsrad. Zur Befestigung der Antriebseinheiten an der Trägerstruktur wurden Schrittmotorhalterungen und Lagerbockbleche beschafft. Aus Sicherheitsgründen verfügt jede Verfahrenseinheit über eine federbetätigte Sicherheitsbremse mit Fail-Safe Logik, welche die Anlage im Fehlerfall in den sofortigen Stillstand versetzt.

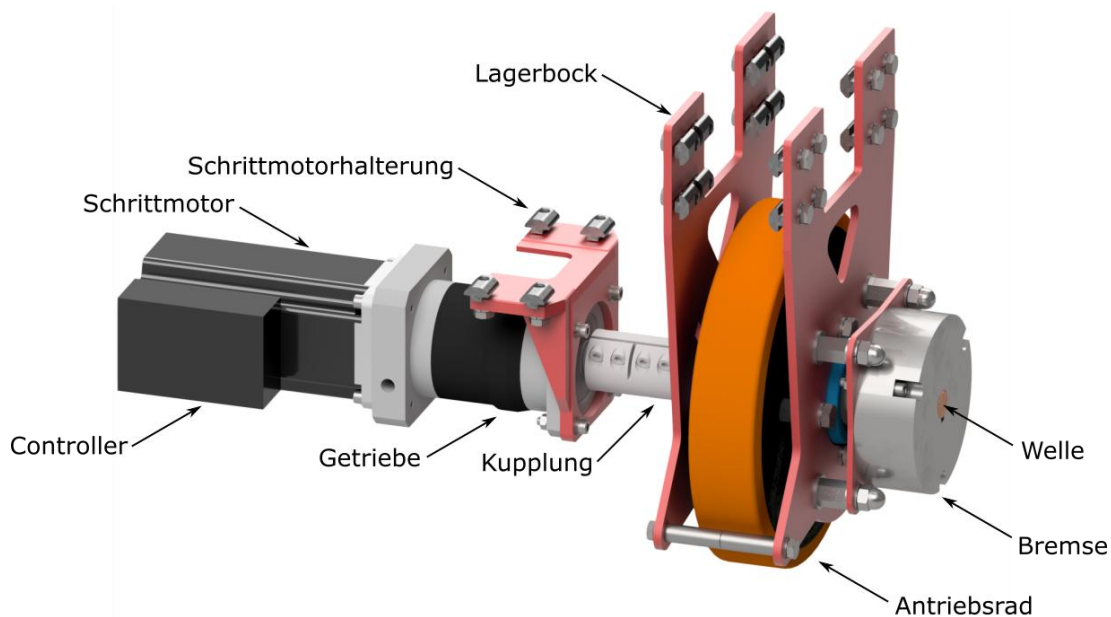


Abbildung 44: Hauptverfahrenssystem (CAD-Model)

Das Antriebssystem ist so konstruiert, dass die Abstände bzw. Radien der Antriebsräder beim orbitalen Verfahren bezüglich der Behältermittelachse 2,1 und 3,1 m betragen. Durch diese geometrische Randbedingung und der pulsformigen Ansteuerung der Motor-Controller in einem Taktverhältnis von 2 zu 3 resultiert eine Kreisbahn als Fahrstrecke des Messsystems (siehe Abbildung 45). Das vordere/behälternahe Antriebsrad bewegt sich dabei auf einem \varnothing 4,2 m Orbit und das hintere/behälterferne auf einem \varnothing 6,2 m Orbit um die Mittelachse. Andere Verfahrensmuster sind ebenfalls möglich. Bei einem Taktverhältnis von beispielsweise 1 zu 1 bewegt sich das Messsystem beispielsweise geradlinig bzw. seitlich. Solche Bewegungsmuster sind jedoch ausschließlich im manuellen Betriebsmodus der Anlage abrufbar und nicht für den automatisierten Betrieb in einem Zwischenlager vorgesehen.

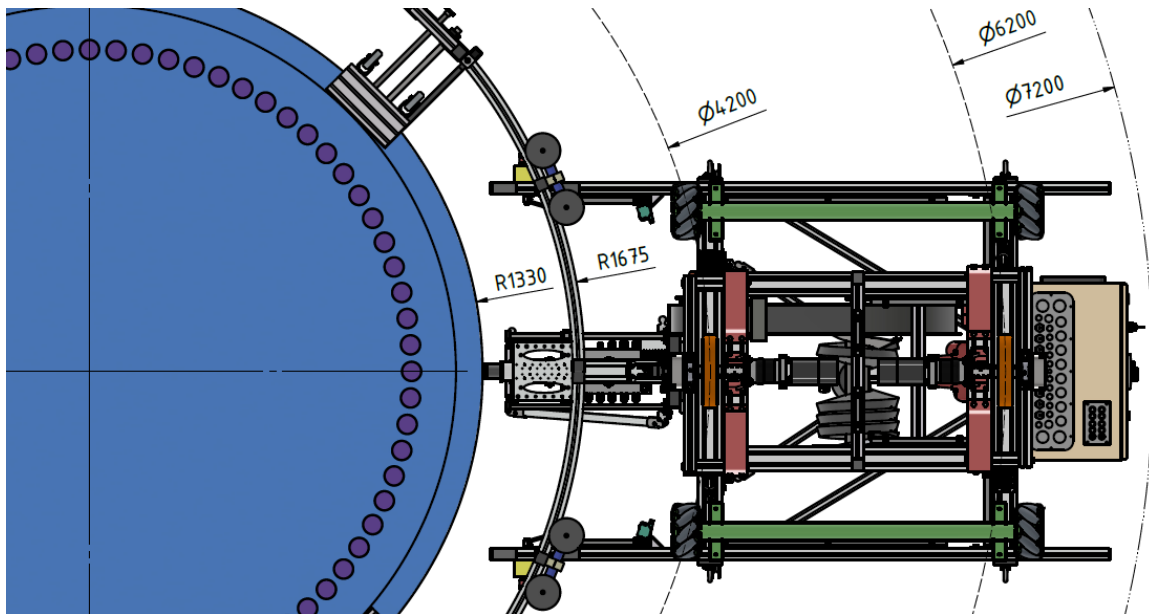


Abbildung 45: Skizze der Abstände beim orbitalen Verfahren um einen TLB (Sicht von unten)

Des Weiteren wird das Verfahren mit dem Antriebssystem durch zwei Laserdistanzsensoren welche senkrecht auf das Schienensystem ausgerichtet sind überwacht (siehe Abbildung 46). Der Messbereich der Sensoren beträgt 50 bis 550 mm. Die Abstände werden als 4-20 mA Signale von der SPS überwacht und sollten im Idealfall stets identisch sein. Bei etwaigen Schief lagen, das heißt die Mittelebene des Messsystems zeigt nicht mehr auf die Mittelachse des TLB, wechselt die SPS ab einer Grenzbereichsverletzung von ± 15 mm in den Alarm-Modus und benachrichtigt das Bedienpersonal akustisch und visuell. Wird der Warnbereich weiter verletzt, wird bei ≥ 30 mm der sofortige Stillstand der Anlage erwirkt um etwaige Kollisionen mit dem Schienensystem, welches den CASTOR schützt zu verhindern.

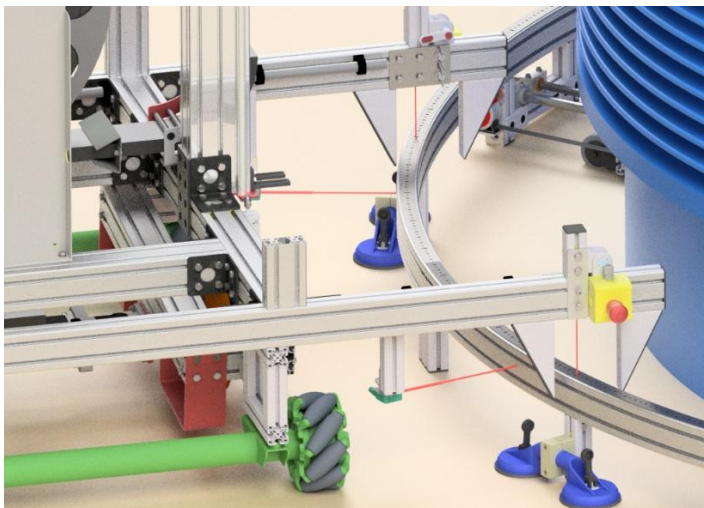


Abbildung 46: Laserabstundmessung (li., CAD-Model) und Distanzsensor von Pepperl+Fuchs (re.)

10.1.4 Vertikales Verfahrssystem

Das vertikale Verfahrssystem positioniert die Strahlungssensorik auf gewünschten Messhöhen entlang der Behälterwand. Dazu wird ein Schlitten mit einem Zugseil auf der Linearführung bewegt (siehe Abbildung 47). Die segmentierten Führungswellen zentrieren sich dabei für einen möglichst glatten Übergang mit speziell angefertigten Kegelstiften an den Stoßstellen der Trägerstrukturen. Der Hub der vertikalen Verfahreinheit beträgt 3.580 mm. Das Zugseil wird an der Spitze umgelenkt und durch eine Seilwinde mit Elektroantrieb auf- und abgewickelt. Durch den physischen Aufbau des Unterteils ergibt sich konstruktiv ein fester Mindestabstand von 420 mm der Schlittenunterkante zum Boden. Der Kabelaufroller auf dem Chassis der Trägerstruktur beinhaltet und führt unterbrechungsfrei die elektrischen Leitungen aller Elektrotechnikkomponenten, die sich vertikal bewegen können. Eine spezielle Umlenkrolle mit Drehgeber ist für die Höhenmessung im Bereich über dem Schaltschrank angebracht. Weiterhin werden obere und untere Endlagen sensorisch registriert und auch mechanisch sichergestellt.

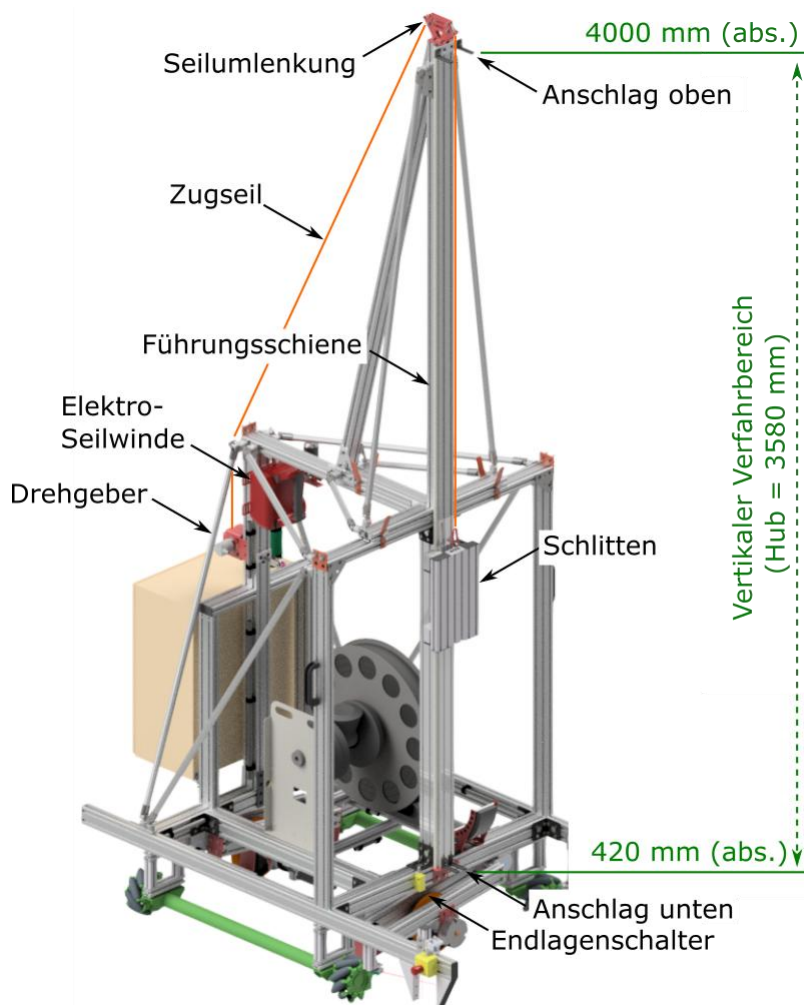


Abbildung 47: Komponenten des vertikalen Verfahrsystems (CAD-Modell)

10.1.5 Horizontale Verfahreinheit und Sensorkäfig

Das letzte Glied in der kinematischen Kette des Traversiersystems ist das horizontale Verfahrsystem welches den Käfig mit zwei CLYC-Sensoren und zwei Pyrometern vor- und zurückbewegt (siehe Abbildung 48). Eine Elektro-Linearverfahreinheit mit 300 mm Hub und integriertem Controller ermöglicht das Einnehmen definierter Abstände zur Behälterwand. Mit Hilfe der Endlagenvorrichtung wird die Messposition in nächster Nähe zu den TLB-Rippen detektiert und die Bewegung gestoppt.

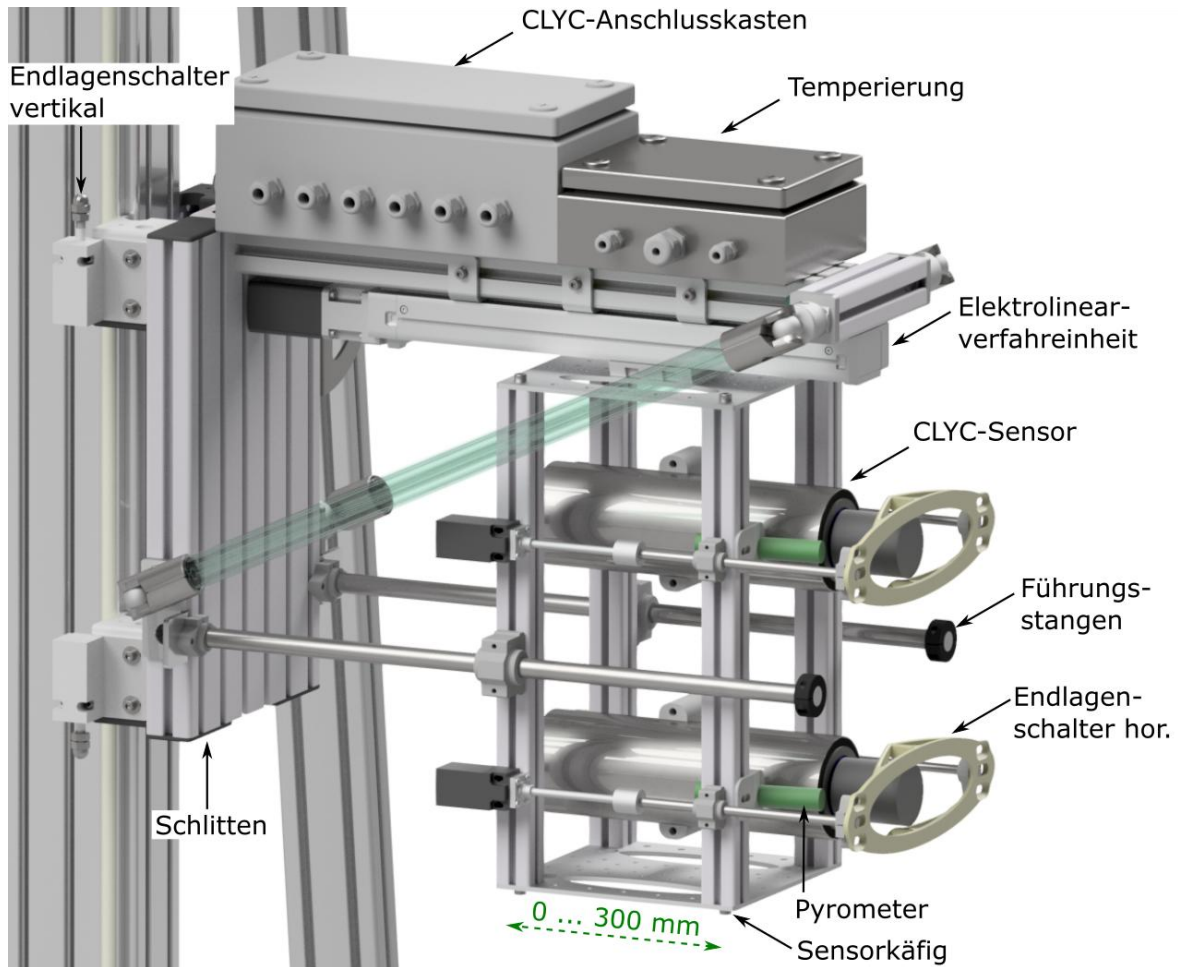




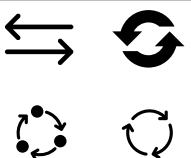
Abbildung 48: Komponenten des horizontalen Verfahrsystem in vorderer Endlage (CAD-Modell)

10.1.6 Elektrotechnik und Schaltschrank - Aufbau und Funktion

Der Schaltschrank (UV01) zur Anlagensteuerung ist ein Stahlblechgehäuse mit Tür (siehe Abbildung 49). Er besitzt im unteren Teil Kabeleinführungen für die elektrische Einspeisung, sowie Sensor- und Aktoranschlüsse. Alle Ein- und Ausgangsschnittstellen der in den Schaltschränken montierten Elektrotechnikkomponenten wurden auf Klemme gelegt. UV01 besitzt eine abschaltbare Einspeisung (230 V/AC L, N, PE), welche durch einen abschließbaren rot/gelben Hauptschalter auf der Schaltschranktür realisiert wird. Aus dieser Einspeisung wird mit einem Netzteil die 24 V/DC Versorgungsspannung erzeugt. Die Stromkreisbildung (24 V-CPU, 24 V-E/A-Klemmen SPS, 24 V-Feld und 24 V-Reserve) erfolgt nach separaten Sicherungen (Leitungsschutzschalter). Gespeist wird unter anderem die Prozessleittechnik (PLT), die hier in Form einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) der Firma *Wago Kontakttechnik* umgesetzt ist. Mit ihren Ein- und Ausgabekarten werden schrankinterne Signale, wie zum Beispiel die Signalampel, zur Visualisierung des Anlagenzustands, direkt verdrahtet und geschaltet. Schaltschrankübergreifende Signale zur Schnittstellenbildung wurden ebenfalls auf Klemmen gelegt.

Mit Hilfe der in Abbildung 49 gezeigten Elemente tritt der Benutzer in Interaktion mit dem Schaltschrank bzw. der Anlage. Fronteinbauten wie der Hauptschalter schalten die Anlage ein und aus. Durch den Schlüsselschalter wird die Freigabe verschiedener Verfahrensmodi für den Betrieb erteilt. Es gilt folgende Zuordnung der Schalterstellung (siehe Tabelle 5)

Tabelle 5: Schlüsselschalterstellungen und Bedeutung

Stellung	Freigabe der Bewegungsmuster	
0	Keine Freigabe → Stillstand der Anlage	
1	Nur Voreingestellte CASTOR 440/84-Kreisbahn	
2	Seitliches Verfahren, Drehung um eigene Achse, Voreingestellte Kreisbahn, Beliebige Kreisbahn	

Die Ein/Aus-Tasterkombinationen schalten die Sicherheitsbremsen und Spannungsversorgung der Verfahrssysteme zu und geben Rückmeldung mit der eingebauten LED. Weitere Anlagenzustände wie „Messbetrieb aktiv“, „Messung beendet“ oder etwaige Grenzbereichsverletzungen und Fehler meldet

die Signallampe visuell und akustisch. Wurde die Anlage manuell oder per automatischer Schutzfunktion in den Not-Halt versetzt bzw. neu gestartet, muss der Taster zur Quittierung des Sicherheitschaltgerätes betätigt werden.

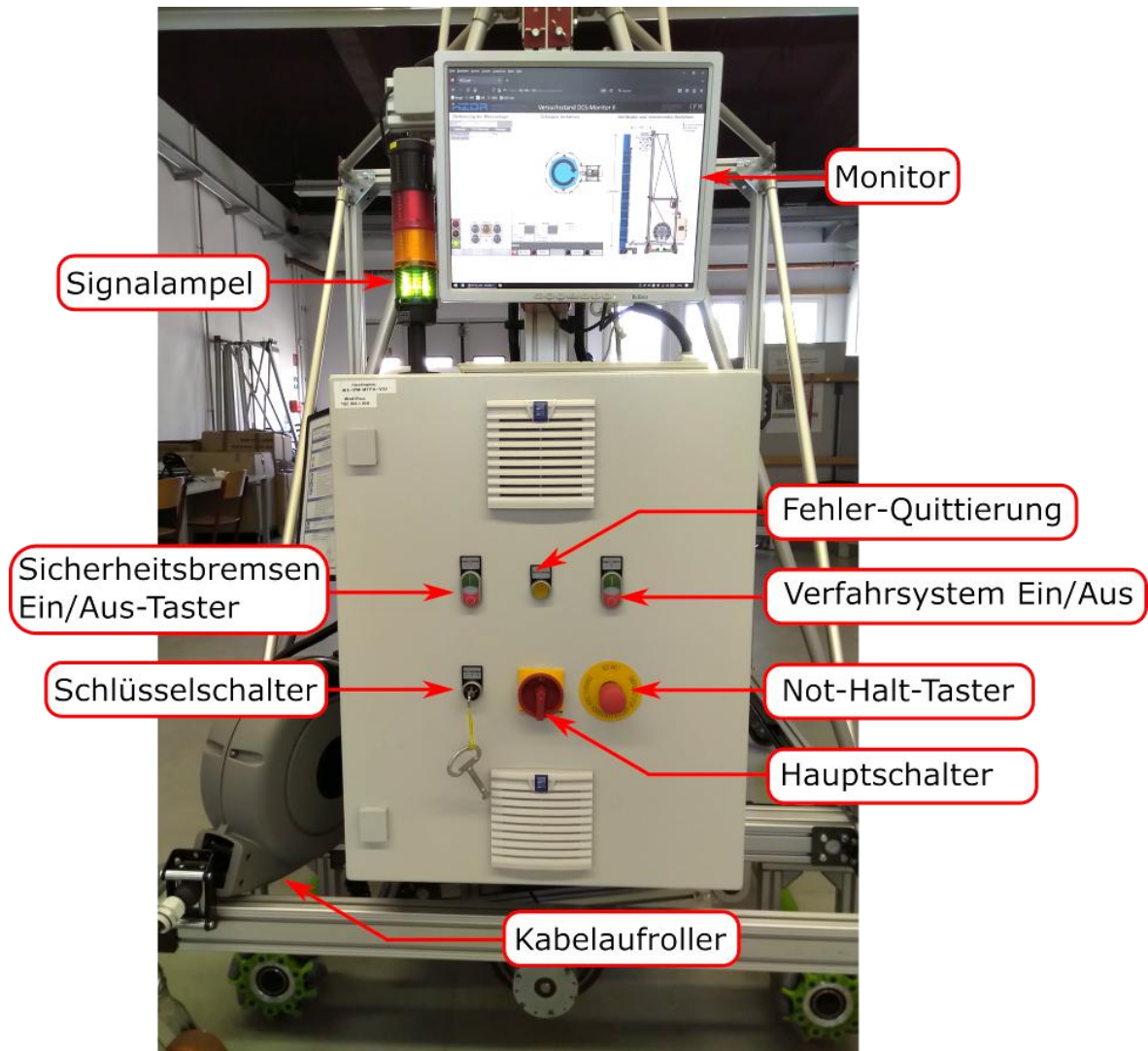


Abbildung 49: Schaltschrank mit Bedienelementen

10.1.7 SPS und Prozessleittechnik

Zur Ausführung von Mess-, Steuer- und Regelaufgaben wurde eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) von *WAGO Kontakttechnik GmbH* beschafft. An diese im Schaltschrank installierte Rechen- einheit werden alle prozessrelevanten Sensoren und Aktoren direkt oder über Relais gemäß dem Schema in Abbildung 50 angeschlossen. Die Hardware ist mit der Codesys V3-Software ausgestattet. Ein Mini-PC welcher in der Innenseite der Schaltschranktür montiert ist, bildet die Kommunikations- schnittstelle zwischen der Prozessleittechnik, dem Strahlungsmesssystem und einem externen Laptop. Dabei erfolgt der Zugriff auf den Mini-PC über eine Remoteverbindung, wobei alle Rechensysteme durch (Power-)Lan verbunden sind.

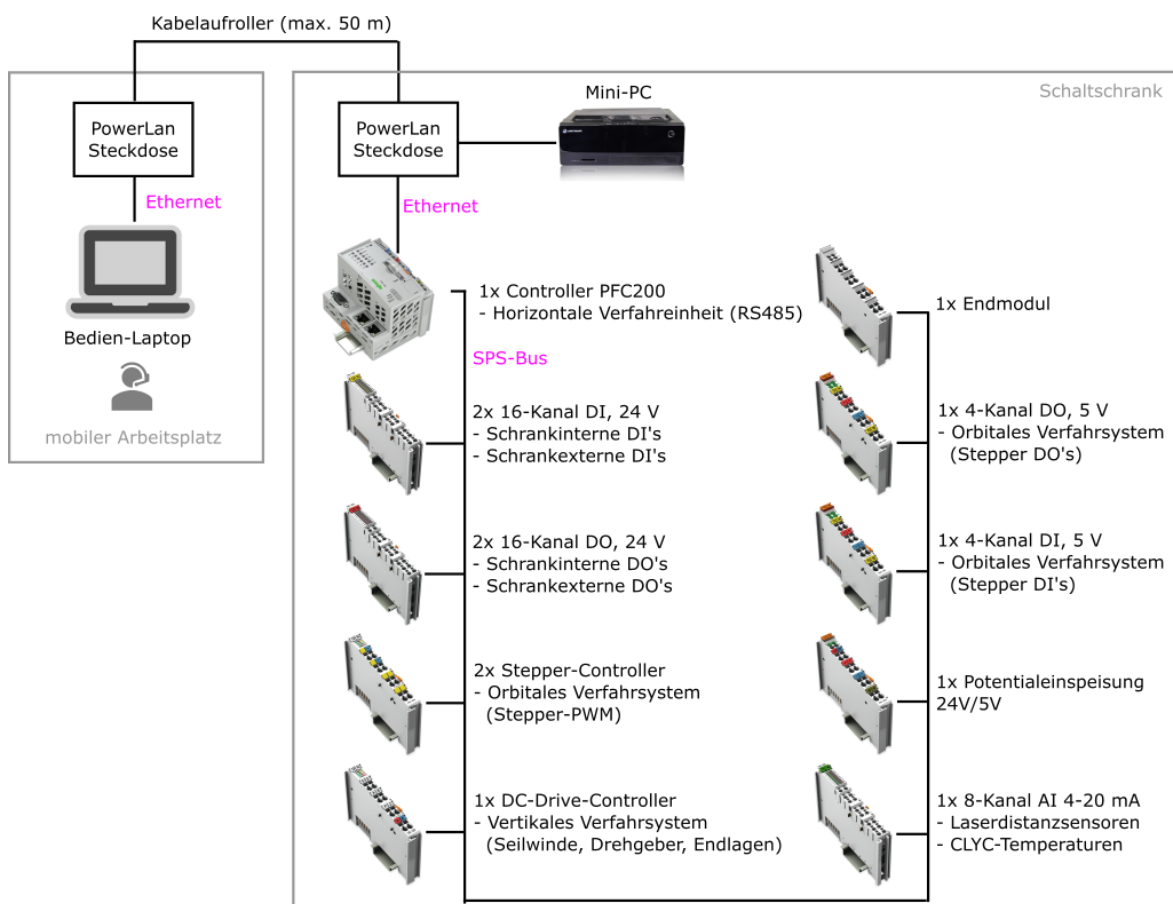


Abbildung 50: Struktur der Leittechnik (WAGO) und Signalbelegung der Ein- und Ausgabekarten

10.1.8 Betriebskonzept

Für das bestimmungsgemäße Arbeiten mit dem Messsystem wurde ein Betriebskonzept erarbeitet. Dieses definiert sichere Zustände in denen die Anlage arbeitet bzw. verweilt bis bestimmte Prozeduren ausgelöst werden, um in einen anderen Zustand zu wechseln (siehe Abbildung 51).

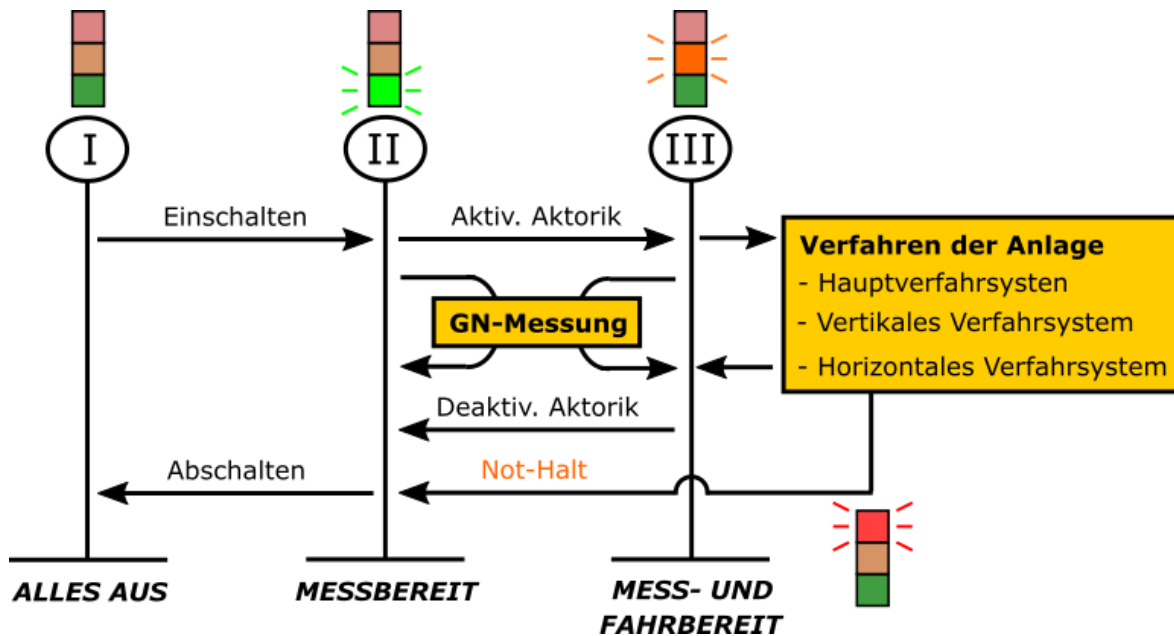


Abbildung 51: Betriebskonzept mit Zuständen und Prozeduren des Messsystems

Der Ablauf bzw. das Arbeiten mit dem Messsystem im Rahmen des Betriebskonzepts funktioniert wie folgt. Ausgangspunkt ist die stromlose Anlage. Wird der Hauptschalter betätigt, booten Leittechnik und Mini-PC. Ab diesem Punkt kann auf die CLYC-Sensoren zugegriffen. Nach der Wahl des Betriebsmodus (Schlüsselschalter an der Schaltschranktür) wechselt die Anlage in den Zustand „Messbereit“ und die Signalampel leuchtet grün. Nun kann im Stillstand die Aktorik zugeschaltet werden. Wurde dies über die die Ein-Aus-Tasterkombinationen oder die Fernsteuerung veranlasst, befindet sich die Anlage im Modus „Mess- und Betriebsbereit“, symbolisiert durch das leuchtende orangene Segment der Signalampel. Da ab diesem Moment Bewegungen ausführbar sind, sollte sich kein Personal neben der Anlage aufhalten. Nun können die CLYC-Sensoren an die gewünschten Messpositionen bewegt werden um anschließend oder schon währenddessen die Gamma- und Neutronenaktivitäten zu loggen. Wird beim Verfahren ein Grenzbereich verletzt (Abstandsmessung) oder erkennt der Benutzer eine gefährdende Situation, überführt die Not-Halt-Prozedur die Anlage in den Stillstand, wobei das rote Segment der Signalampel erst nach der Fehlerquittierung erlischt. Das Betriebskonzept, die Elektrotechnikplanung und die Signalliste der Versuchsanlage stellen das Grundgerüst zur Programmierung der Leittechnik mit ihrer Sensorik und Aktorik dar.

10.1.9 Sicherheitskonzept - Not-Halt-Schleife

Das betreiben elektrotechnischer Anlagen erfordert stets ein Sicherheitskonzept. Sicherheitsziel ist der Schutz von Inventar und Personal von Zwischenlagern im Fehlerfall. Erreicht wird das Sicherheitsziel durch sofortigen Anlagenstillstand und die Arretierung beweglicher Anlagenteile ausgelöst durch den Benutzer oder die übergeordnete Leittechnik. Dazu wurde das mobile Messsystem an folgenden Stellen mit rot-gelben Not-Halt-Tastern instrumentiert (siehe Abbildung 52)

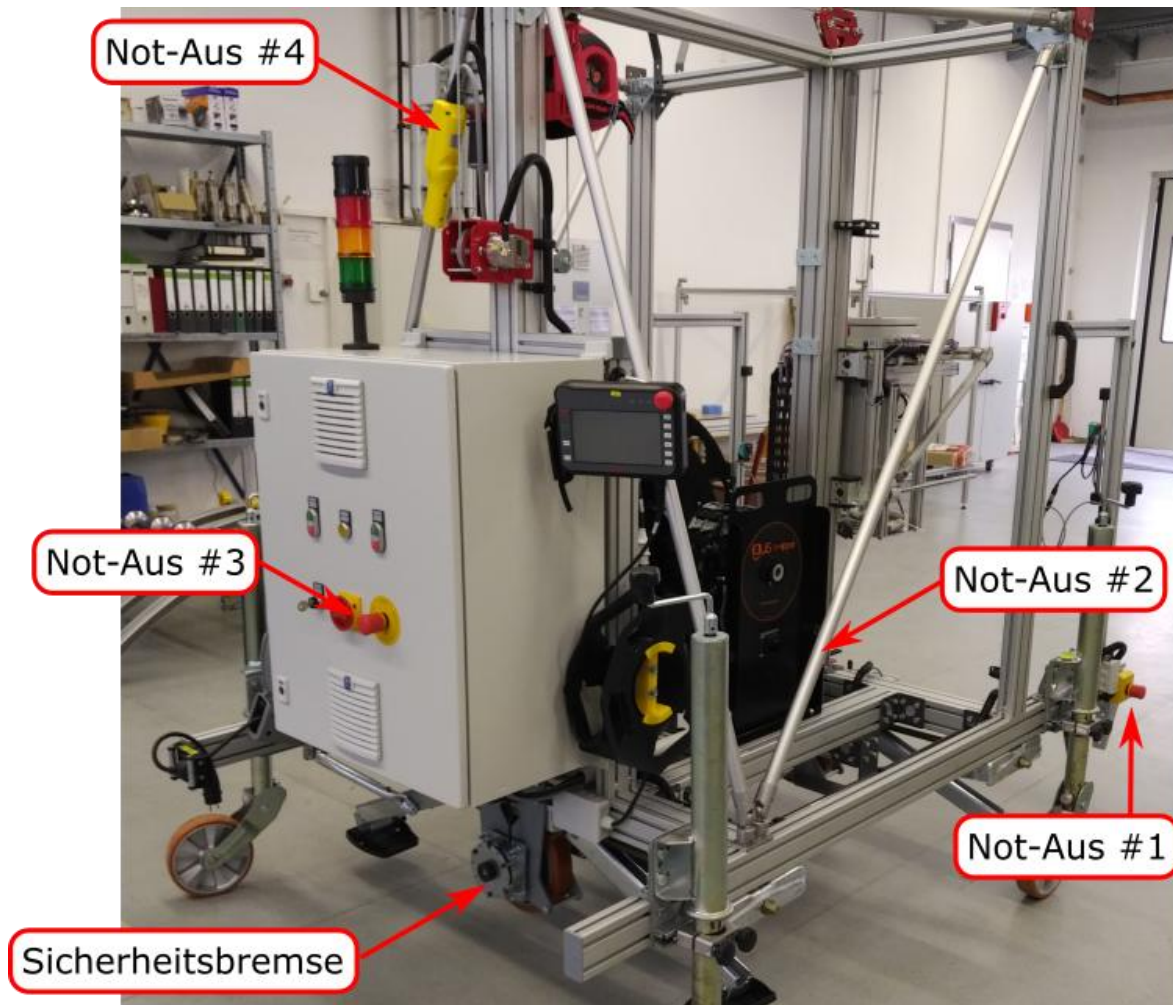


Abbildung 52: Messsystemunterteil mit Sicherheitseinrichtungen











Alle 4 Auslösekontakte der Not-Halt-Taster sind in Reihenschaltung an ein Sicherheitsschaltgerät im Schaltschrank angeschlossen. Die Besonderheit bei der Installation der Taster, welche an den Seiten der Trägerstruktur angebracht sind ist, dass neben dem Benutzer auch spezielle Betätigungselemente auf dem Schienensystem die Schalthandlung auslösen können. Diese dienen als optionale Grenzbe-reichswächter. Ein zusätzlicher Schaltkontakt in der Auslösekette ermöglicht es der Leittechnik im Fehlerfall automatisiert die Not-Halt-Funktion auszuführen. Die Logik der Verdrahtung als Öffner würde







die Anlage auch bei Drahtbruch eines Not-Halt-Schalters in den Stillstand versetzen. Dazu unterbricht das Sicherheitsschaltgerät alle bewegungsrelevanten Stromkreise und blockiert das Hauptverfahrenssystem durch federbetätigte Sicherheitsbremsen (siehe Abbildung 52). Entsprechende optische und akustische Signale signalisieren dies und die Quittierung muss vom Benutzer durchgeführt werden um die Anlage wieder in den fahrbereiten Zustand zu überführen.

10.1.10 Gefährdungsanalyse - Gefährdungen für Personal

Die Betriebsanweisung der Versuchsanlage ist stets zu beachten. Darüber hinaus wurde eine Gefährdungsbeurteilung durchgeführt um etwaige Gefahren zu erkennen und zu minimieren. Tabelle 6 zeigt mögliche Gefährdungen für den Menschen die beim Umgang mit dem Messsystem auftreten können. Dazu ist anzumerken, dass die aufgezeigten Risiken durch den Einsatz von qualifiziertem und vorab unterwiesenen Personal, dass eine ruhige und besonnene Arbeitsweise an den Tag legt, auf ein vertretbares Restrisiko verringert werden. Die Arbeiten mit und am Messsystem sollten stets von mindestens zwei eingewiesenen Personen durchgeführt werden.

Tabelle 6: Gefährdungsanalyse in Bezug auf das Betriebspersonal

Gefährdung durch	Schutzmaßnahme
 <p>Strahlungsexposition von Personal durch CASTOR-nahe Arbeiten</p>	 <p>Qualifiziertes Personal, Unterweisung, pers. Dosimeter tragen, Minimierung des zeitl. Aufwands</p>
 <p>Thermischer Schaden von Personal und Ausrüstung durch Berührung heißer TLB-Oberflächen</p>	 <p>Unterweisung, Tragen von pers. Schutzausrüstung (PSA)</p>
 <p>Quetschen von Körperteilen (bes. Hände/Finger) bei Montagearbeiten</p>	 <p>Unterweisung, Achtsamkeit, Tragen von PSA</p>
 <p>Stolpern über Schienensystem oder elektrische Leitungen</p>	 <p>Unterweisung, Achtsamkeit, Laufen verboten</p>
 <p>Gefahr durch schwebende Lasten bei (De-)Montagearbeiten</p>	 <p>Nicht unter schwebenden Lasten aufhalten, Schutzhelm tragen</p>

Gefährdung durch		Schutzmaßnahme	
	Gefahr durch Flurförderzeugen beim Transport des Messsystems		Warnweste tragen, Betriebswege beachten
	Gefahr durch elektrische Spannung		Bei Fehlersuchen oder Reparaturen freischalten
	Quetschgefahr beim Bewegen des Messsystems oder Teilsystemen		Kein Aufenthalt seitlich des Messsystems, Achtsamkeit

10.1.11 Gefährdungen bzw. Schädigungspotential für Zwischenlager

Im Folgenden werden Schädigungsszenarien für den zu untersuchenden und ggf. benachbarte CAS-TOR-Behälter aufgezeigt und Maßnahmen zur Risikominimierung benannt.

Tabelle 7: Gefährdungsanalyse in Bezug auf das Zwischenlagerinventar

Szenario	Schutzmaßnahme
Kippen des Messsystems	Schwerpunktoptimierte Bauweise, Achtsamkeit in Bezug auf die Stützräder bzw. beim Bewegen der Anlage
Unkontrolliertes Verfahren der Anlage oder Anlagenteilen	Kopplung an das Schienensystem, Fixierung der Laufräder, Sicherheitskonzept (Not-Halt) und mobiler Not-Aus
Kollision / Zerkratzen der Außenwand durch die Strahlungssensorik	Abstandsmessung, Mobiler Not-Aus

Das Kippen des Messsystems stellt das denkbar ungünstigste Szenario mit dem höchsten Schadenspotential dar. Um diese Gefahr grundlegend zu minimieren wurde dies bereits beim Design des Messsystems bedacht. Durch den weitestgehend spiegelsymmetrischen Aufbau und die vergleichsweise hohe Eigenmasse des Trägerstruktur-Unterteils befindet sich der Schwerpunkt in der in Abbildung 53 dargestellten Lage relativ bodennah. Je nach Hub der Strahlungssensorik befindet sich der Massenschwerpunkt auf einer absoluten Höhe von 1000 bis 1180 mm. Diese Berechnung des Massenschwerpunktes

wurde für das vollständig errichtete Messsystem vorgenommen. Das heißt die Massen von Unter- und Oberteil wurden berücksichtigt.

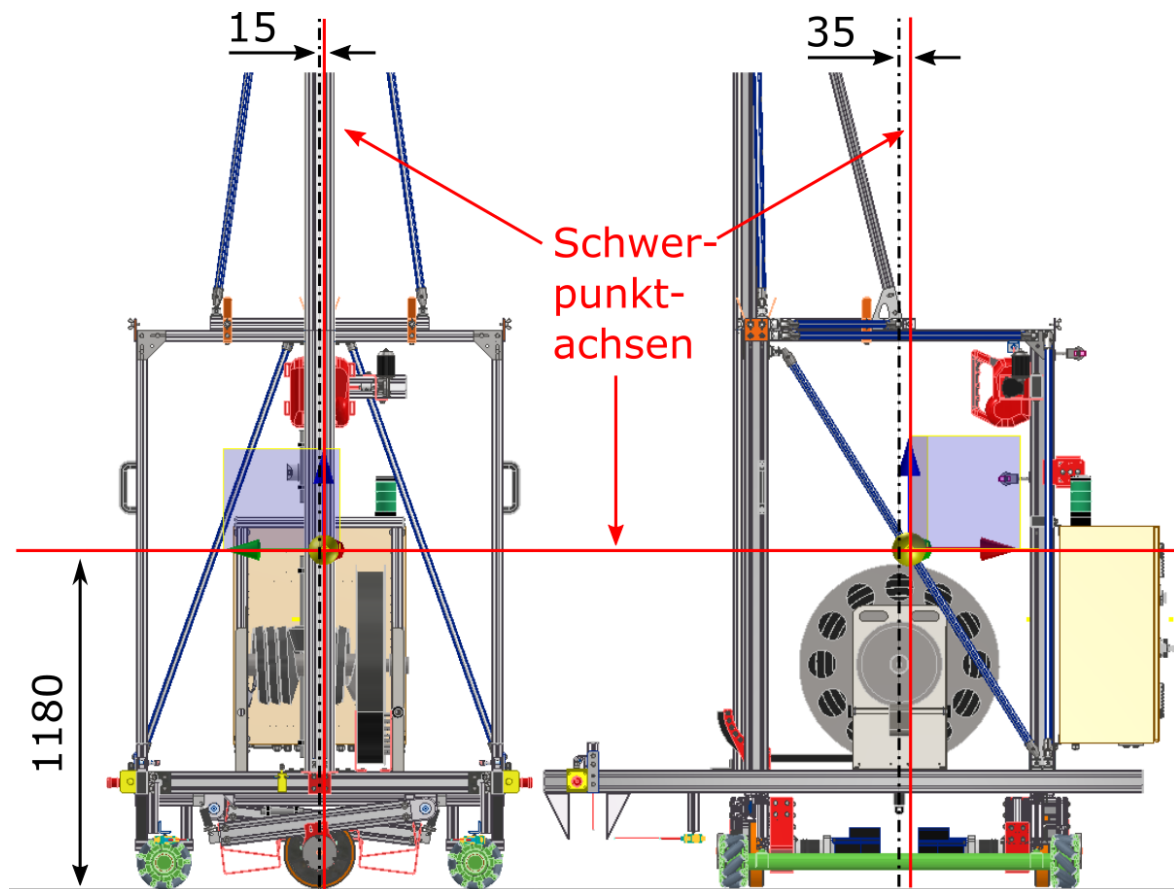


Abbildung 53: Lage des Massenschwerpunkts des Messsystems (CAD-Modell - Ausschnitt)

Im Folgenden wird der höchst mögliche Massenschwerpunkt als ungünstigster Fall angenommen. Das heißt der Sensorschlitten ist maximal angehoben und befindet sich in oberer Endlage. Es ist voranzustellen, dass das Kippen nur stattfinden kann, wenn Räder blockiert oder verkeilt wären (siehe Abbildung 54). Andernfalls würde das Verfahrenssystem wegrollen und die Not-Halt-Kette den sofortigen Stop auslösen. Wäre diese Blockade trotz Achtsamkeit des Personals tatsächlich vorhanden, müsste dazu noch eine Kraft oberhalb des Schwerpunktes angreifen. Die blockierte Achse stellt hierbei den Dreh- und Angelpunkt dar.

Ab einem Kippwinkel von 26° bzw. erhöhen sich die Stützräder auf der anderen Seite um mehr als 500 mm, befände sich der Massenschwerpunkt über dem Drehpunkt. Erst bei dieser Überschreitung, fände das seitliche Kippen statt. Die Erkennbarkeit von Blockaden und die vergleichsweise geringe Ausführungsgeschwindigkeit von Bewegungen begünstigt das Erkennen dieser Gefahr und verringert die Auftretswahrscheinlichkeit auf ein vertretbares Restrisiko.

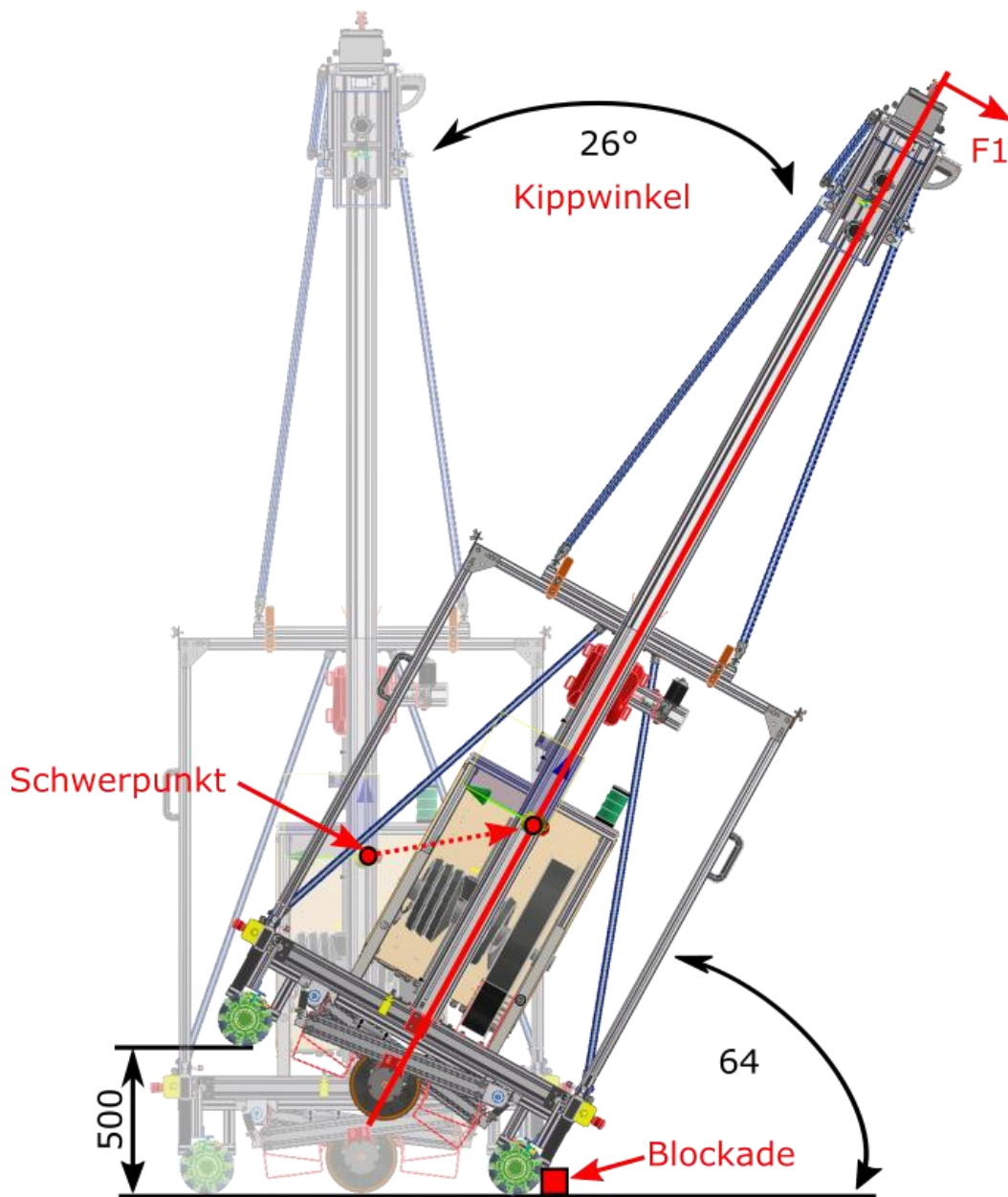


Abbildung 54: Betrachtung des seitlichen Kippens des Messsystems (CAD-Modell)

10.2 Details zu Strahlungsmessungen mit CLYC-Sensoren

10.2.1 Messungen im Zittauer Strahlenlabor

10.2.1.1 V1 - „Energiekalibrierung“

Die Messergebnisse von CLYC-Sensoren werden unter anderem von der Umgebungstemperatur beeinflusst. Da auch Zwischenlager jahreszeitlichen Temperaturschwankungen unterliegen, wurde eine Temperierung um die CLYC-Sensoren gebaut um die Sensortemperaturen später konstant auf 20°C zu halten. Des Weiteren wurde im Zittauer Strahlenlabor eine Energiekalibrierung der CLYC-Sensoren mit Cs-137 und Co-60-Quellen durchgeführt. Abbildung 55 zeigt den Versuchsaufbau. Mit Hilfe der Lage der Fotopieaks kann die Sensorspannung in V einem Energiewert in keV umgerechnet werden (siehe Abbildung 57).

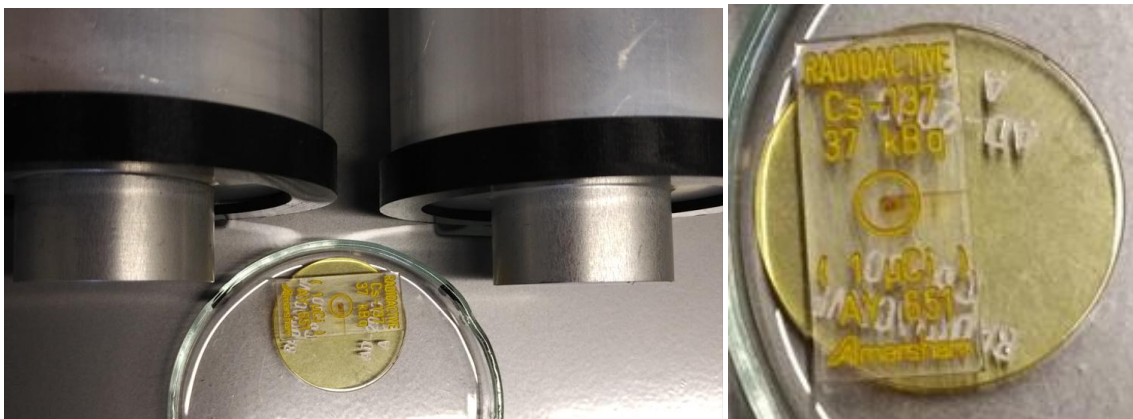


Abbildung 55: V1 - Messaufbau zur Spektralanalyse einer Cs-137- und Co-60-Quelle

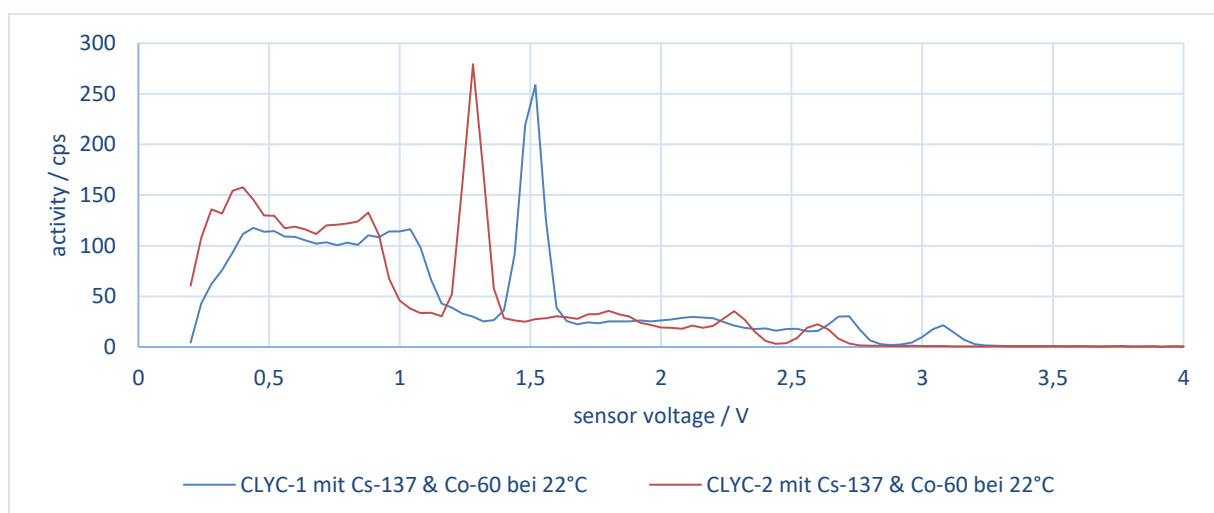


Abbildung 56: V1 - Kombiniertes Spektrum einer Cs-137- und Co-60-Quelle in Bezug auf die Sensorspannung

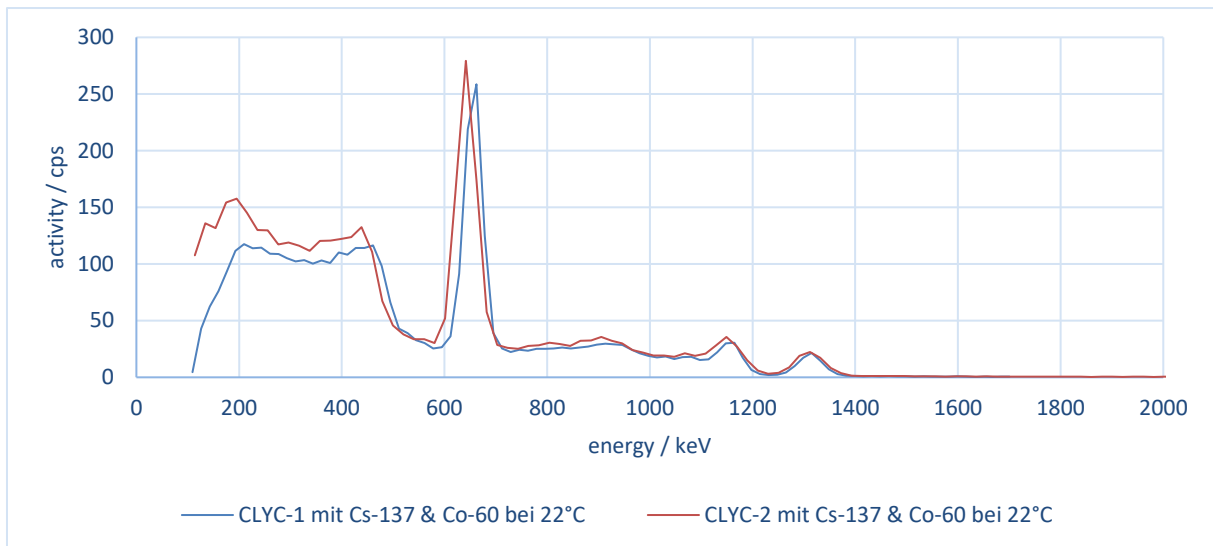


Abbildung 57: V1 - Kombiniertes Spektrum einer Cs-137- und Co-60-Quelle mit umgerechnetem Energiebereich

Die Linearität der Messwerterfassung wurde über das 1332 keV Co-Peak hinaus mit Na-24 aus aktiviertem Kochsalz überprüft (siehe Abbildung 58). Abbildung 59 ordnet die Sensorspannungen bestimmter Foto-Peaks ihren Energiewerten zu. Der Verlauf Geraden wird bis zur maximalen Sensorspannung von 5 V bzw. dem Energiebereich bis 4 MeV als linear angenommen. Weiterführende Versuche mit Neutronenquellen (AmBe und PuBe) zeigen, dass die Lage des thermischen Neutronenpeaks, wie vom Hersteller angegeben, bei ca. 3,2 MeV liegt.



Abbildung 58: V1 - Probestrahler: aktiviertes Kochsalz (links) und Na-22 (rechts)

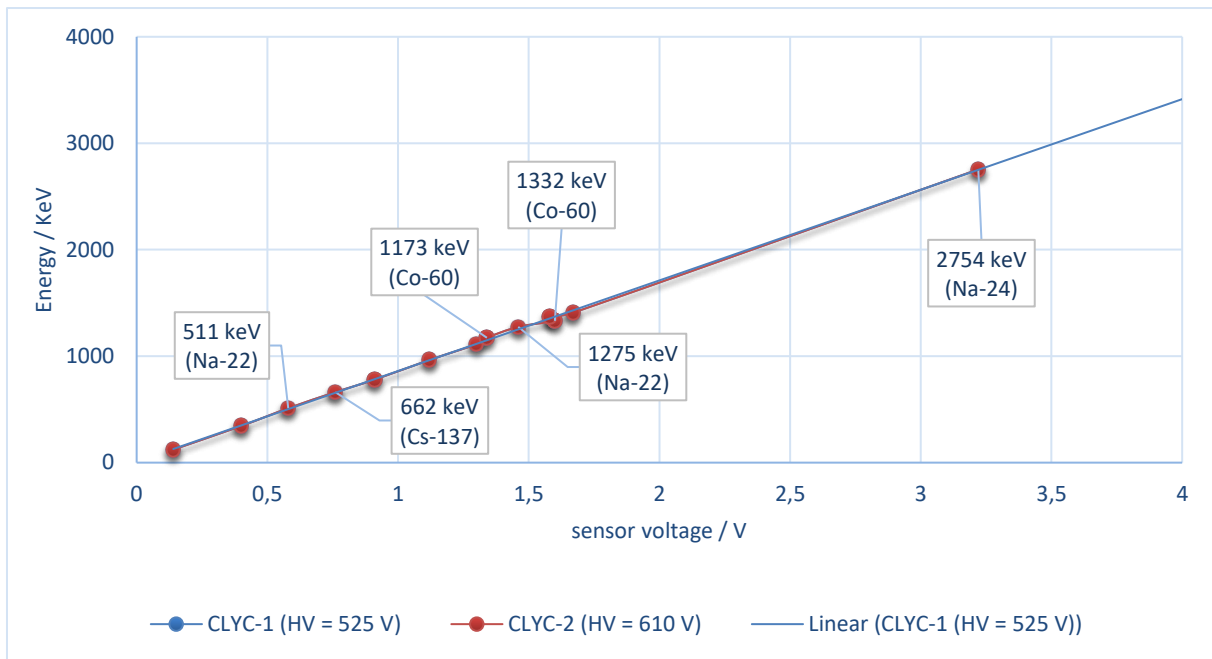


Abbildung 59: V1 - Linearitätsnachweis der Energie bis 2754 keV für CLYC-1 und CLYC-2

10.2.1.2 V2 - „Detektorcharakteristik“

Bei der Inbetriebnahme der CLYC-Sensoren wurden im ersten Schritt Parameter für die Detektorhochspannung und Verstärkung beider Sensoren bestimmt, sodass die Sensorspannung von 0 bis 5 V einer Energie von 0 bis 4 MeV entspricht. Folgende Werte wurden experimentell bestimmt.

- *Hochspannung CLYC-1 = 700 V, Verstärkung = 1*
- *Hochspannung CLYC-2 = 730 V, Verstärkung = 1*

Dabei war es die Herausforderung eine Hochspannung zu bestimmen, die dieses Kriterium erfüllt und den Messbereich nicht unter 4 MeV reduziert bzw. „abschneidet“ um noch Aufnahmefähig für die thermischen Neutronen (ca. 3,2 MeV) zu bleiben inklusive eines gewissen Puffers. Hochspannung und Verstärkung beeinflussen sich gegenläufig. Wird beispielsweise die Verstärkung erhöht, muss die Hochspannung reduziert werden um das zu betrachtende Energiefenster konstant zu halten.

Im Hinblick auf die Detektorcharakteristik bzw. Gütekennlinie ist es wichtig, dass sich der Hochspannungswert auf dem sogenannten Plateau befindet um eine stabile Arbeitsweise zu garantieren. Abbildung 60 zeigt beide Gütekennlinien in einem Diagramm. Die steilen Anstiege, Plateaus und Endanstiege sind deutlich herausgebildet. Während die Hochspannung von CLYC-2 mit 730 V sicher auf dem Plateaubereich liegt, ist der Wert von CLYC-1 der bestmögliche Kompromiss aus Plateau und Anstieg. Da Verstärkungen < 1 nicht möglich waren, sind 700 V der sicherste Wert um die oben beschriebenen Anforderungen einzuhalten.

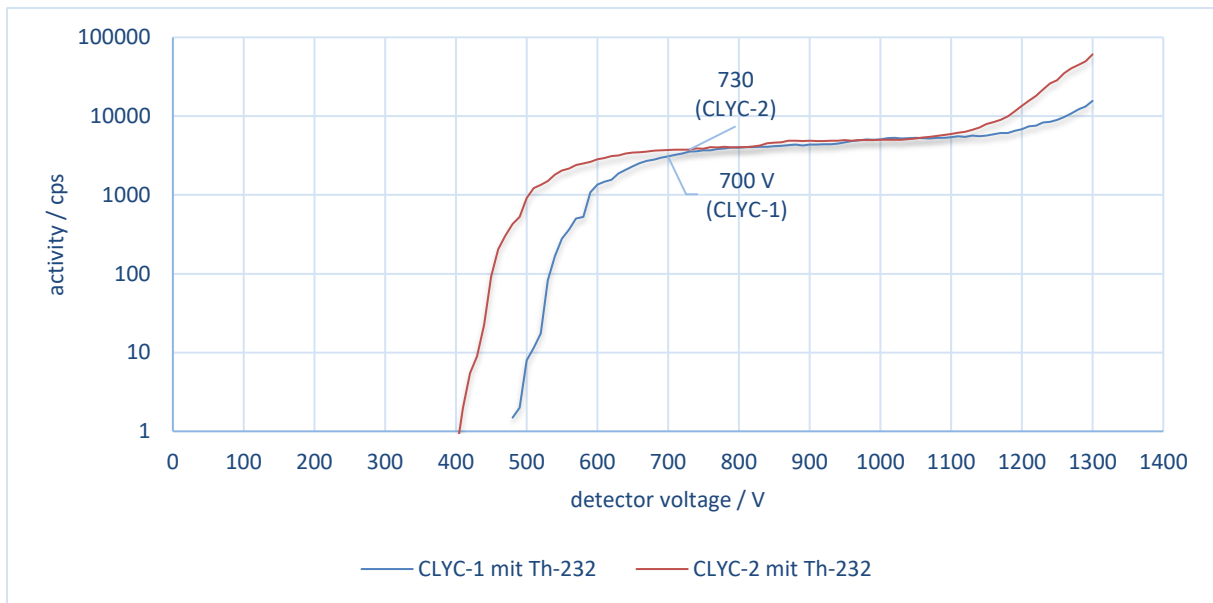


Abbildung 60: V2 - Detektorcharakteristik bzw. Gütekennlinien von CLYC-1 und CLYC-2

10.2.1.3 V3 - „Messung von moderierter Neutronenstrahlung“

Im nächsten Experiment zur Beprobung der CLYC-Sensoren wurden erstmalig Neutronenquellen untersucht. Dabei wurde eine Plutonium-Beryllium (PuBe) und eine Americium-Beryllium (AmBe) mit unterschiedlicher Anzahl an PE-Platten (schwarz) mit hoher Dichte zur Moderation der Neutronen verwendet. Abbildung 61 zeigt den Messaufbau mit 5 PE-Platten.

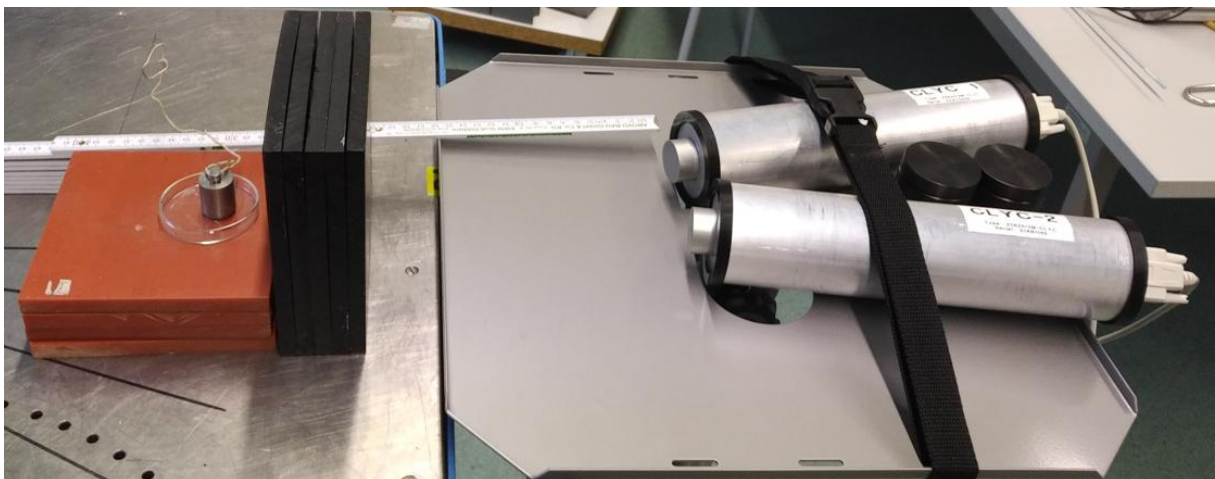


Abbildung 61: V3 - Messaufbau zur Detektion von moderierter Neutronenstrahlung mit PuBe (links)

Abbildung 63 und die folgende zeigt Ausschnitte aus den mit CLYC-1 aufgenommenen Energiespektren. Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, erscheint das thermische Neutronenpeak bei ca. 3,2 MeV, wobei es leichte Unterschiede je nach verwendeter Quelle gibt.

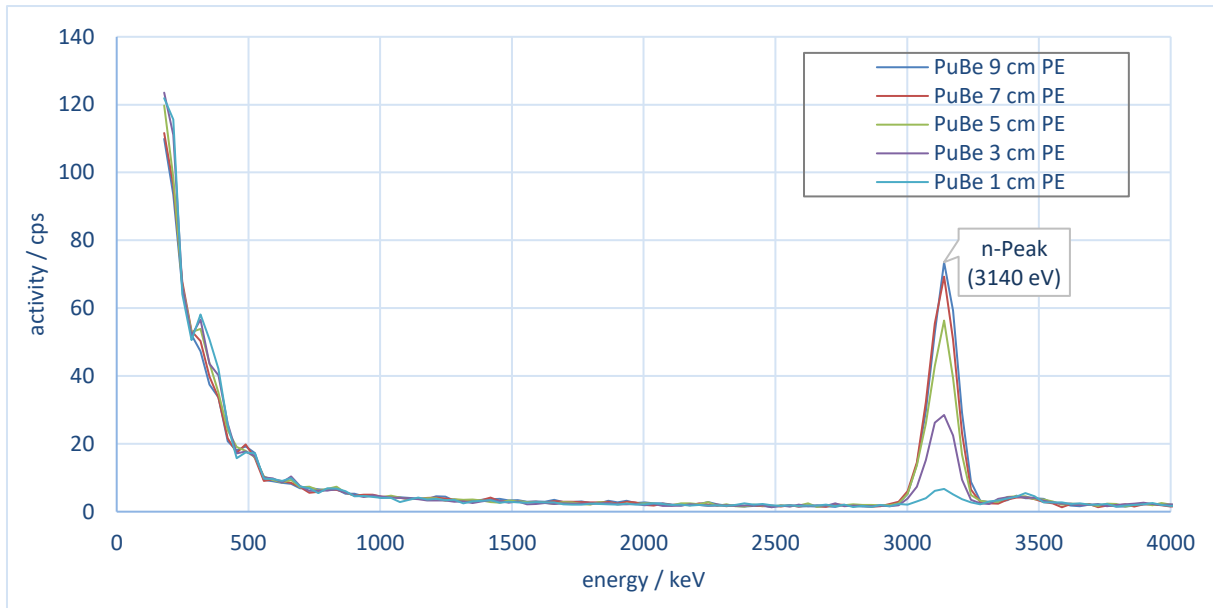


Abbildung 62: V3 - Ausschnitt aus dem Spektrum der Neutronenstrahlung von PuBe in Abhängigkeit der Moderatordicke

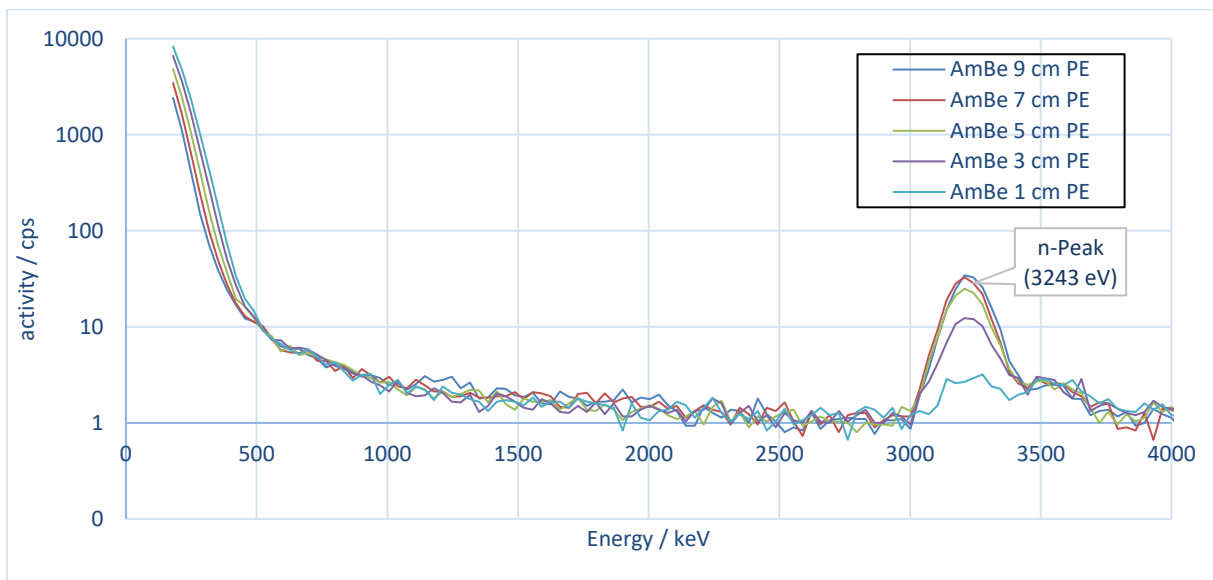


Abbildung 63: V3 - Ausschnitt aus dem Spektrum der Neutronenstrahlung AmBe (unten) in Abhängigkeit der Moderatordicke

Da die CLYC-Sensoren nur auf thermische Elektronen ansprechen, steigt die messbare Aktivität mit der Moderatordicke, sodass die besten Messergebnisse bzw. „Ausbeute“ ab 7 cm PE zu verzeichnen sind (vgl. Abbildung 64). Dieser Wert war wiederum wichtig für das Design des Kollimators mit Moderationsfunktion. Weiterhin konnte mit diesem Experiment die Neutronensensitivität mit CLYC-Sensoren bestätigt werden.

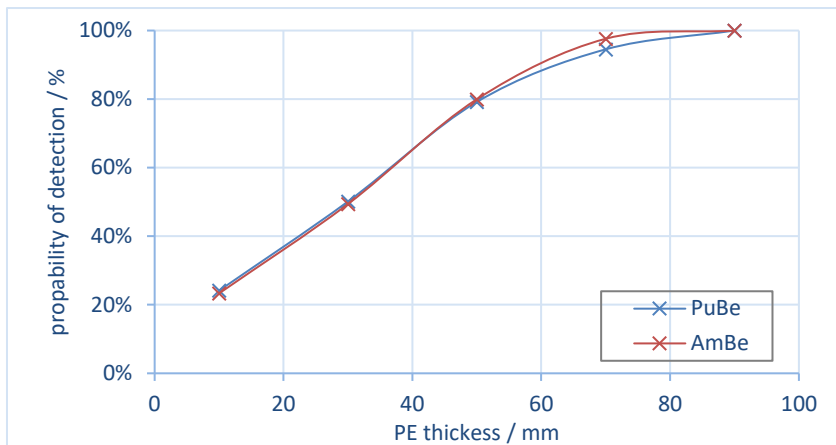


Abbildung 64: V3 - Darstellung des Einflusses der Moderatordicke auf das Messergebnis

10.2.1.4 V4 - „Messung von Gamma- und Neutronenstrahlung entlang einer Barriere“

In nächsten Experiment wurde die Sensorik entlang einer Barriere aus PE bewegt um, ähnlich wie bei der CASTOR-Außenwand, punktuell die Aktivitäten in zwei Messbereichen zu messen. Dazu wurde eine Gamma- (Cs-137) und eine Neutronenquelle (PuBe). Abbildung 65 zeigt den Versuchsaufbau. Die Barriere hat gleichzeitig den Zweck der Moderierung der Neutronen. Zusätzlich wurde der Kollimator auf die CLYC-Sensoren gesteckt. Um die Fenstergrenzen für den Gamma- und Neutronenbereich festzulegen wurde als erstes eine Spektralaufnahme in der Ausgangsposition (bei 70 cm absolut) durchgeführt (siehe Abbildung 66). Das 662 keV-Peak von Cäsium und das Peak der Neutronen bei 3,2 MeV bilden sich deutlich aus und dienen zur Festlegung der Fenstergrenzen (gestrichelte Linien).



Abbildung 65: V4 - Messaufbau zur Erfassung von GN-Strahlung entlang einer Barriere

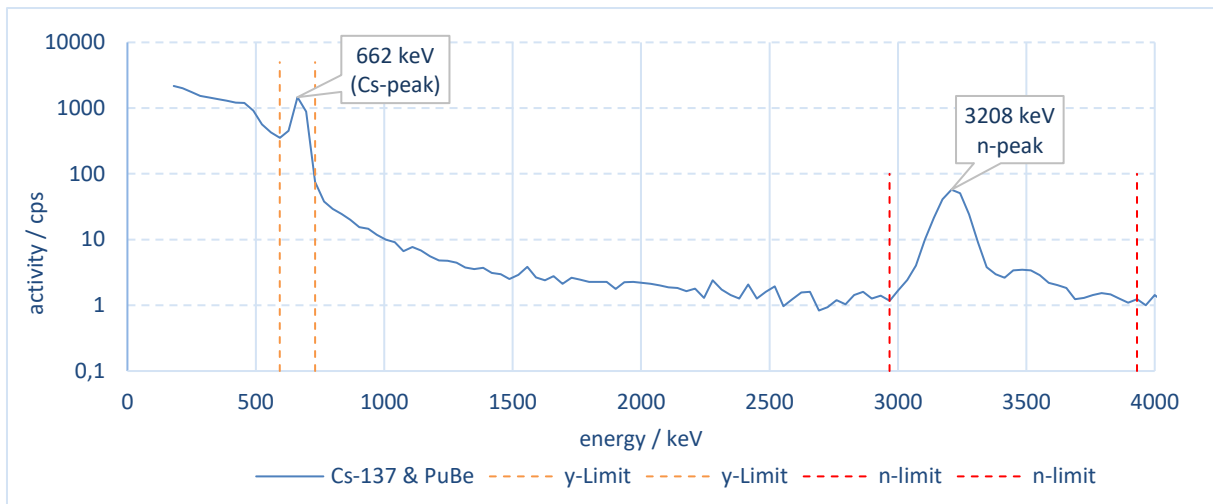


Abbildung 66: V4 - Energiespektrum von kombinierter Gamma- und Neutronenstrahlung entlang einer PE-Barriere

Messfenster:

- *Gammastrahlung: 0,68 bis 0,84 V bzw. 590 bis 730 keV*
- *Neutronenstrahlung: 3,44 bis 4,56 V bzw. 2965 bis 3930 keV*

Innerhalb dieser Grenzen wurden die Aktivitäten für die Gamma- und Neutronenstrahlung in 10 cm Abständen mit jeweils 3 Kontrollmessungen aufgenommen und in Abbildung 67 gemittelt dargestellt. Wie zu erwarten bilden sich für beide Strahlungsarten glockenförmige Kurven aus, wobei des Messraster im Bereich von -10 bis 10 cm enger gefasst sein sollte.

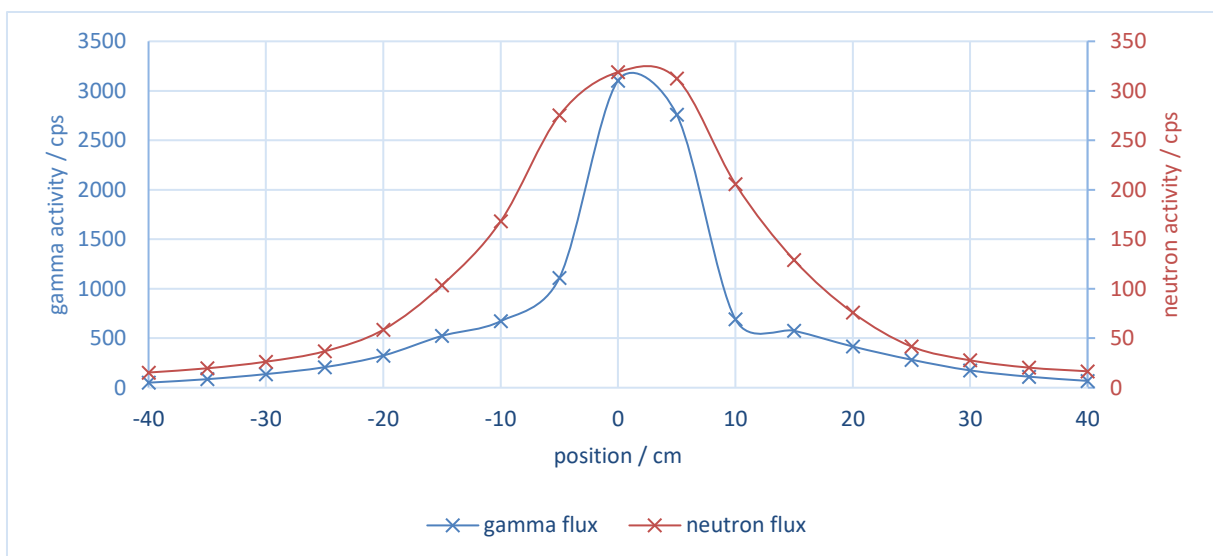


Abbildung 67: V4 - Aktivitätsverläufe entlang der Barriere

An dieser Stelle ist festzuhalten, dass das Experiment keinen Anspruch auf die Quantität der Messwerte erhebt. Es wurde einzig das Messen in 2 Kanälen (Gamma und Neutronen) hinsichtlich der Qualität der Aktivitätsverläufe geprüft und als zufriedenstellend bewertet.

10.2.1.5 V5 - „Abschirmung von Querstrahlung“

Mit den Erkenntnissen aus den Versuchen mit Neutronenquellen wurde ein Kollimator mit Blei- und PE-Anteil gefertigt. Dabei dient der Bleianteil zum Abschirmen schräg einfallender Gammastrahlung und das PE im Stopfen vorrangig der Moderation schneller Neutronen. Um den Einfluss schräg einfallender Strahlungsarten zu untersuchen, wurde das folgende Experiment durchgeführt (siehe Abbildung 68). Dabei befand sich die Mitte des Szintillators im Ursprung des Koordinatensystems und der Behälter für die Gamma- und Neutronenquellen wurde in 30°-Schritten von -120° bis 120° mit gleichbleibendem Abstand um das Zentrum herumbewegt. Die Aktivitäten in den Messfenstern wurden wie im vorangegangenen Experiment geloggt (siehe Abbildung 69).

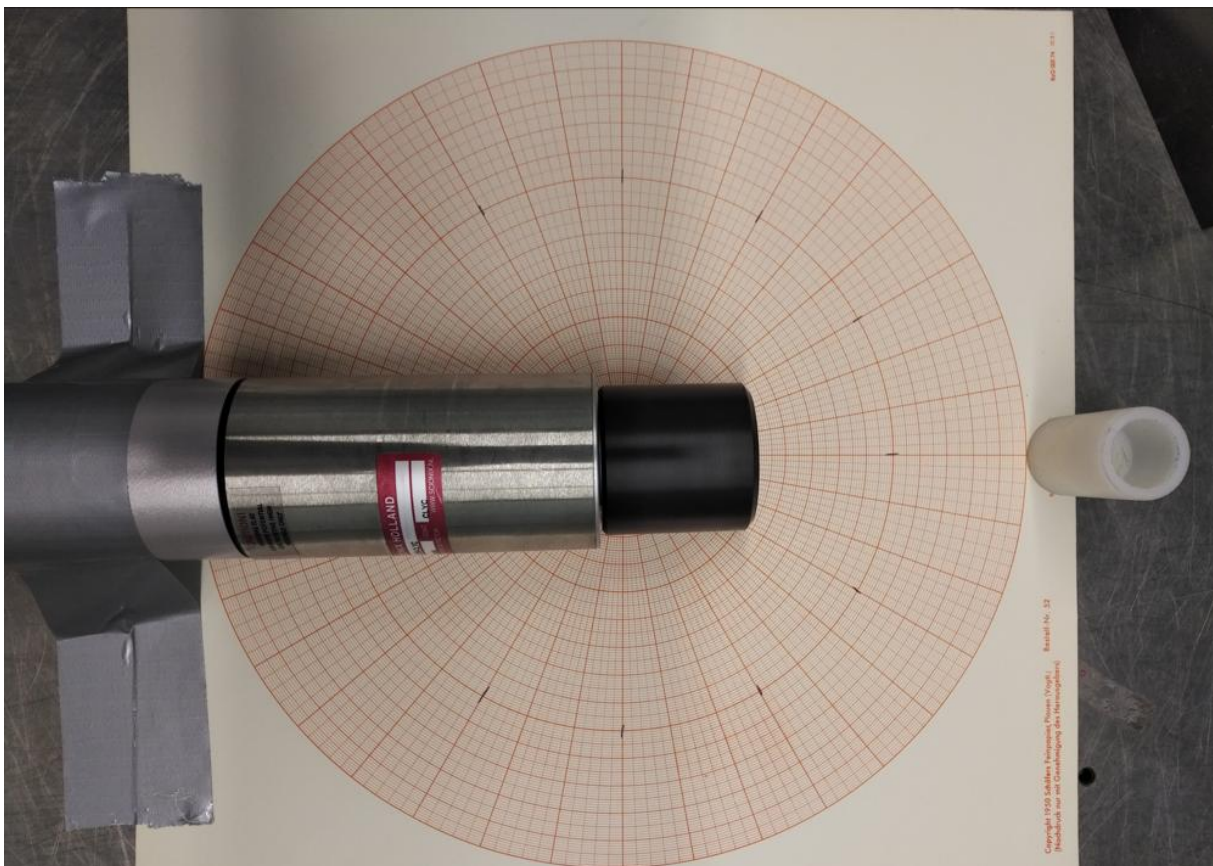


Abbildung 68: V5 - Messaufbau für den Kollimatortest

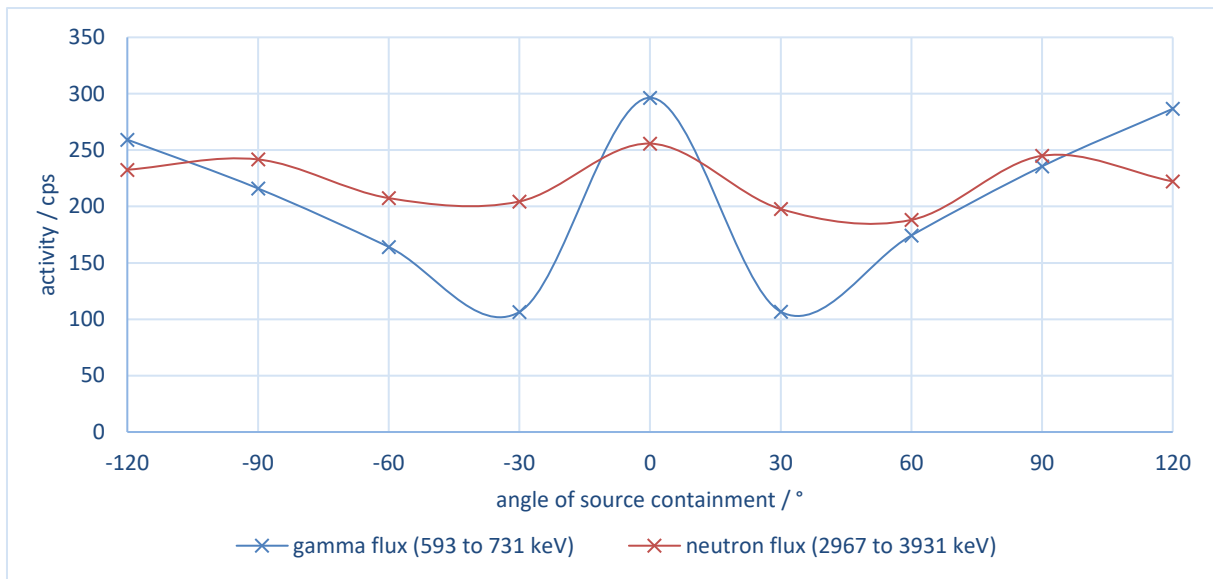


Abbildung 69: V5 - Aktivitätsverläufe für den Kollimatorortest in Abhängigkeit des Quellenwinkels

Abbildung 69 zeigt die spiegelsymmetrischen Verläufe der Aktivität im Gamma- und Neutronenbereich. Dem Diagramm zufolge tritt bei der Gammastrahlung die größte Dämpfung von ca. 15° bis 60° auf, da hier die Gammaquanten den größten Wirkungsquerschnitt mit dem Blei zu bewältigen haben. Dies schirmt den Bereich von quer einfallenden Gammaquanten am CASTOR-Behälter sehr gut ab. Da im Kollimator keine Cadmium- oder vergleichbare Anteile verarbeitet wurden, kann im bei der Neutronenstrahlung nicht von Dämpfung gesprochen werden. Hier ist lediglich die Dicke des Moderators maßgebend für das Messergebnis.

10.2.2 Vorstudie am CASTOR „Messung mit Stativ“ (April 2023)

10.2.2.1 Randbedingungen

Das Ziel der Vorstudie mit zwei CLYC-Sensoren an einem Stativ war die Aufnahme des austrittseitigen Energiespektrums bei unterschiedlicher Kollimierung und Messbereich zur Bestimmung geeigneter Messzeiten und Messfenster im Start-Stop-Modus. Diese Ergebnisse sind wichtig für eine 360°-Messung mit dem automatisierten Gamma- und Neutronenmesssystem.

Die Messung wurde am 4.4.2023 bei der Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH (EWN) in Lubmin durchgeführt. Das Messobjekt war ein von der EWN ausgewählter CASTOR 440/84. Der Behälter wurde im Rahmen dieser Messung nicht bewegt und verblieb im 2x2-Verbund (siehe. Abbildung 70).



Abbildung 70: Gerendertes CAD-Modell des Messaufbaus mit CASTOR 440/84 (1), CLYC-Sensoren (2) und Stativ (3) im Verbund

Gemäß der Zielsetzung des Experiments war es die Aufgabe, das austrittseitige Energiespektrum mit Hilfe der CLYC-Sensoren kollimiert und unkollimiert aufzuzeichnen. Als Messpunkt diente die Markierung für die wiederkehrende Prüfung (WKP) über dem CASTOR-Typenschild auf halber Behälterhöhe (siehe Abbildung 71). Auf dieser Höhe ist die höchste Aktivität zu erwarten. Vorab wurde an diesem Punkt eine schnellere Messung zur Erfassung der Aktivität für breitere Energiebereiche durchgeführt. Die Erkenntnisse dienten zur Abschätzung der Schrittweite und Messzeit je Schritt für die anschließenden zeitintensiveren Messungen. Für die Messung ohne Kollimatoren wurden die Sensoren zwischen die Rippen positioniert. Für die kollimierten Messungen musste die Sensoren um die Kollimatorlänge vom CASTOR weggerückt werden.

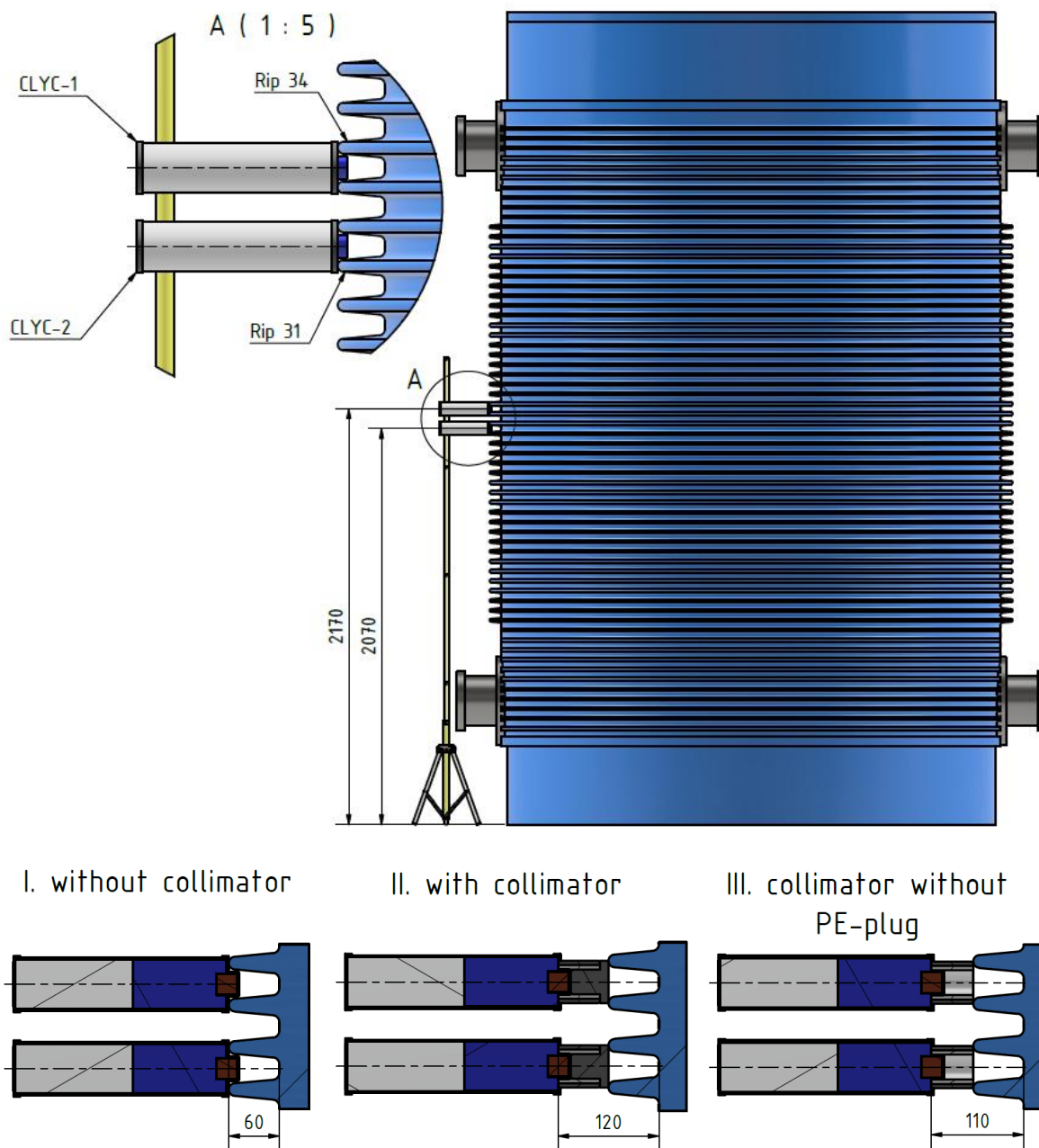


Abbildung 71: Vorstudie - Seitenansicht des Messaufbaus (CAD-Modell) und Anordnung der CLYC-Sensoren mit Bezug zu den CASTOR-Rippengrund

10.2.2.2 Versuchsprozedur

Der Versuchsablauf und die Randbedingungen sind in Tabelle 8 dokumentiert. Die Energiespektren wurden ebenso gemäß den Vorgaben in Tabelle 8 aufgenommen.

Tabelle 8: Versuchsprozedur und Einstellwerte der CLYC-Sensoren

Nr.	Messung	Einstellungen
1	Energiespektren (0 bis 4 MeV) Vorabmessung, ohne Kollimatoren	CLYC-1: K = 5; HV = 525 V, CLYC-2: K = 5; HV = 610 V, Messfenster: 0,2 V bis 4,8 V Kanalbreite: 0,08 V; $\Delta t = 30$ s
2	Energiespektren (0 bis 4 MeV) ohne Kollimatoren	CLYC-1: K = 5; HV = 525 V, CLYC-2: K = 5; HV = 610 V, Messfenster: 0,4 V bis 4,8 V Kanalbreite: 0,04 V; $\Delta t = 30$ s
3	Energiespektren (0 bis 2 MeV) ohne Kollimatoren	CLYC-1: K = 10; HV = 525 V, CLYC-2: K = 10; HV = 610 V, Messfenster: 0,4 V bis 4,8 V Kanalbreite: 0,04 V; $\Delta t = 30$ s
4	Energiespektren (0 bis 4 MeV) mit Kollimatoren komplett	CLYC-1: K = 5; HV = 525 V, CLYC-2: K = 5; HV = 610 V, Messfenster: 0,4 V bis 4,8 V Kanalbreite: 0,04 V; $\Delta t = 30$ s
5	Energiespektren (2 bis 4 MeV) mit Kollimatoren jedoch ohne PE-Stopfen	CLYC-1: K = 5; HV = 525 V, CLYC-2: K = 5; HV = 610 V, Messfenster: 2,56 V bis 4,88 V Kanalbreite: 0,04 V; $\Delta t = 30$ s

10.2.2.3 Ergebnisse

Die Vorstudie wurde erfolgreich durchgeführt. Das Energiespektrum des CASTOR 440/84 wurde aufgezeichnet und Messzeiten, sowie Messfenster für Gammastrahlung und Neutronen für die Messkampagne mit dem automatisierten Messsystem bestimmt.

Mit Hilfe der Energiekalibrierung aus Kapitel 10.2.1.1 lässt sich die Sensorspannung als Energie auf der Abszisse darstellen (siehe Abbildung 72). Die Messdaten zeigen ein deutliches, von Neutronen verursachtes Peak bei ca. 3,2 MeV, welches durch den PE-Anteil im Kollimator und Stopfen und des PE-Moderationsrohrs in der Behälterwand zusätzlich verstärkt wird. Das „Neutronen“-Messfenster sollte demnach den Bereich von 2,9 MeV bis 3,6 MeV abdecken.

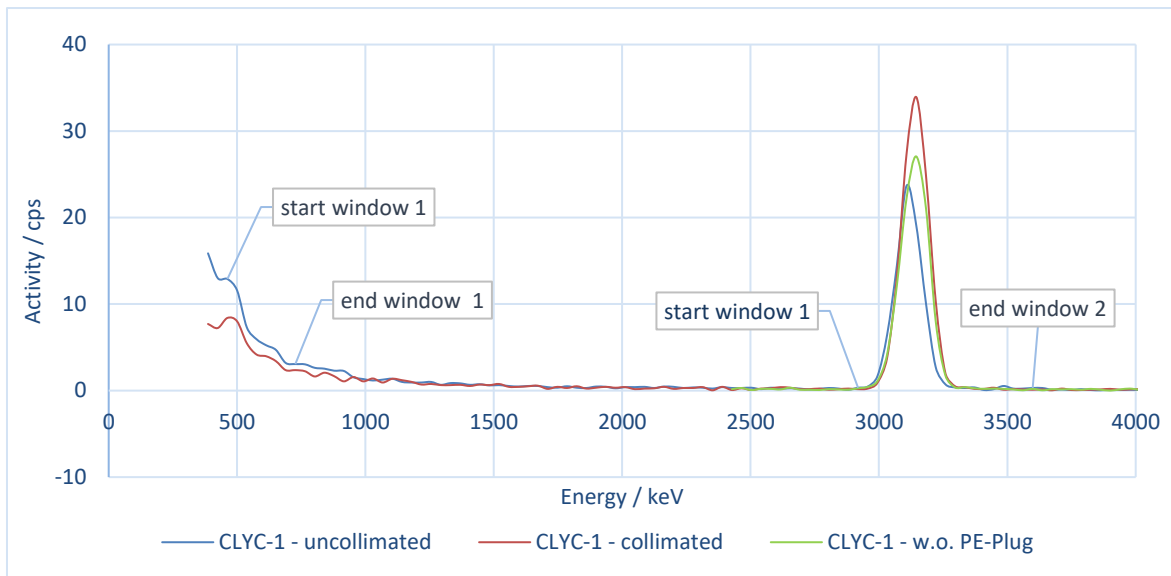


Abbildung 72: Vorstudie - Energiespektren von CLYC-1 mit Andeutung der Fenstergrenzen

Die Gammastrahlung erscheint verwaschen bzw. stark durch die Behälterwand geschwächt und ohne gut erkennbare Peaks. Der Informationsgehalt ist in diesem Bereich somit deutlich niedriger als der der Neutronen. Um den ohnehin vorhandenen zweiten Kanal der CLYC-Sensoren auszunutzen, könnte ein Messfenster von beispielsweise 500 keV bis 740 keV gelegt werden welches die 511 keV-Positronen-Vernichtungslinie und das Cs-137 Vollenergiepeak bei 662 keV einschließt.

Unter Berücksichtigung der Messfenster lassen sich die Aktivitätswerte je Messpunkte und Sensor aus den Energiespektren zu Gesamtaktivitäten aufsummieren (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9: Ergebnisse einer Start-Stop-Messung mit Messfenstern

<i>Messfenster</i>		<i>Sensor</i>	<i>Aktivität / cps</i>		
			<i>Ohne Kollimator</i>	<i>Mit Kollimator</i>	<i>Ohne PE-Stopfen</i>
1	„Gamma“ 500 keV - 740 keV (0,52 V - 0,76 V)	CLYC-1	41	29,7	Keine Daten ³
		CLYC-2	43,4	28,8	Keine Daten
2	„Neutronen“ 2.900 keV - 3.600 keV (3,08 V - 3,8 V)	CLYC-1	82,3	119,1	100,4
		CLYC-2	87,5	127,2	96,5

³ Für diese Messung liegen ausschließlich Daten von 2,56 V bis 4,88 V vor.

Abbildung 72, sowie Tabelle 9 spiegeln den dämpfenden Einfluss des Bleirohrs im niederenergetischen Bereich und heben die Aktivität des Neutronen-Peaks je nach Stärke des PE's an. Daher sollten für zukünftige Messungen die Kollimatoren mit PE-Stopfen verwendet werden.

Für die zukünftige Vergleichbarkeit der Messdaten müssen selbstverständlich stets die selben Messstellen (Messwinkel, Absoluthöhe und Abstand zum Rippengrund) bei identischen Sensoreinstellungen (Grenzwerte für Messfenster 1 & 2, Verstärkung und Hochspannung, Messzeit und Kollimator-Setup) untersucht werden.

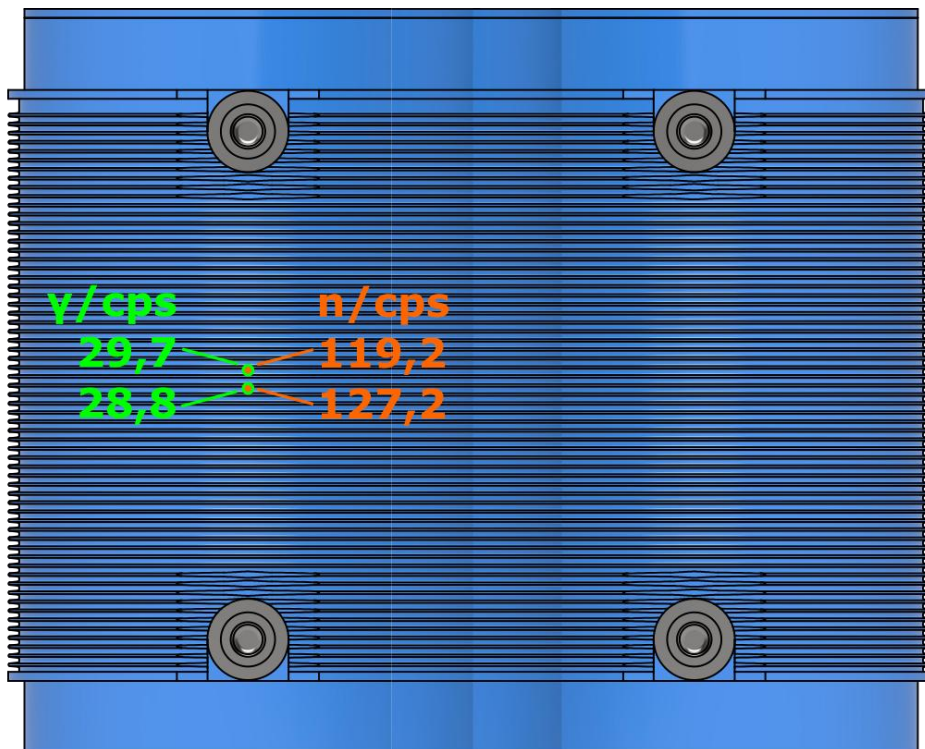


Abbildung 73: Abgewickelter CASTOR 440/84 mit Aktivitäten als Vorlage den „atomic fingerprints“ des Testbehälters

10.2.3 Details zur Messkampagne am CASTOR im Behälterverbund

10.2.3.1 Randbedingungen

Die Messung wurde bei der Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH (EWN) im Zwischenlager Nord (ZLN) durchgeführt. Das Messobjekt ist ein von EWN ausgewählter CASTOR der Bauart 440/84. Der Behälter wurde im Rahmen der Messkampagne mit dem Hallenkran um 180°- hin- und anschließend wieder zurückgedreht. Dabei verblieb der Behälter stets im 2x2-Verbund (vgl. Abbildung 81).

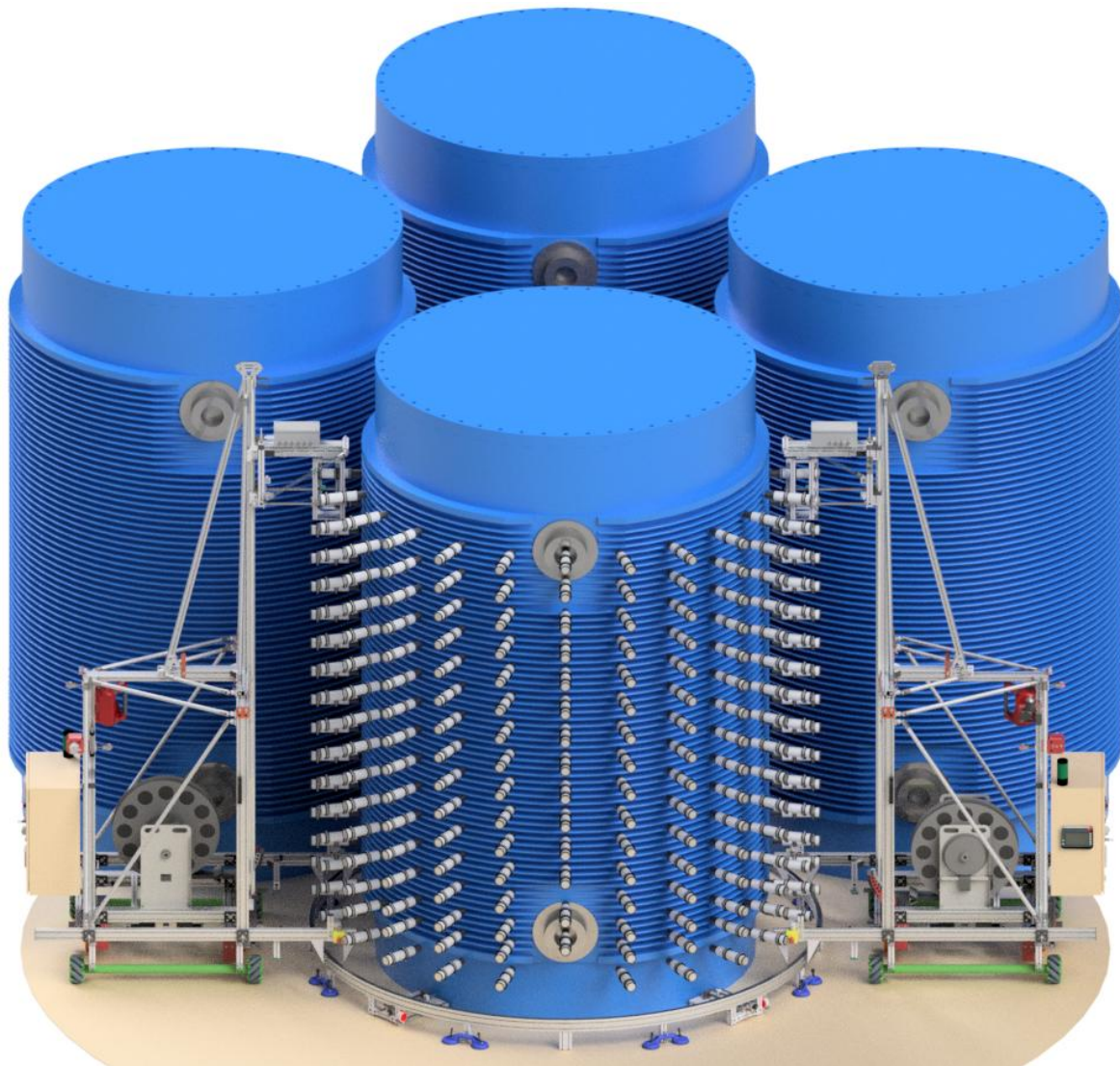


Abbildung 74: Gerendertes CAD-Modell des Messaufbaus um den CASTOR 440/84-Behälter mit dem Messsystem in Endpositionen und CLYC-Sensoren

10.2.3.2 Überblick zur Versuchsprozedur

Für die punktuelle Aufnahme von Strahlungsintensitäten mussten zunächst die Messfenster für den Gamma- und Neutronenbereich bestimmt und das Energiespektrum des TLB im Sinne der Messung vom 4. April 2023 („Messung mit Stativ“) wiederholt werden. Ergänzend dazu wurde das Energiespektrum in 4 m Entfernung zum Behälter aufgezeichnet. Mit den ermittelten Grenzen der elektrischen Spannung für die Identifizierung von Gammaquanten und Neutronen wurden anschließend Start-Stop-Messungen gemäß des Messplanes durchgeführt (siehe Tabelle 10). Es wurden in 15° Schritten (siehe Abbildung 80) orbital insgesamt 24 Messwinkel eingenommen und auf je 8 Messebenen in Höhe der Rippenzwischenräume gemessen. Bei allen Messungen wurde stets mit einem kombinierten Blei- und Kunststoffkollimator und PE-Stopfen gearbeitet. Mobile, 5 cm dicke PE-Wände schirmten die CLYC-Sensoren, außer bei Messungen in den Randlagen zu benachbarten CASTOR-Behältern, von Neutronen ab.

Im Anschluss an die Start-Stop-Messungen wurde das Energiespektrum bei Messwinkel = 90°⁴ erneut aufgezeichnet. Tabelle 11 fasst die vollständigen Messplan zusammen. Der Versuchsablauf und die Randbedingungen sind in der zugehörigen Arbeitsanweisung dokumentiert.

Tabelle 10: Versuchsprozedur und Einstelldaten der CLYC-Sensoren

Nr.	Messung	Sensor-Einstelldaten
1	Energiespektren (0 bis 4 MeV) <ul style="list-style-type: none"> • Sensoren in 4 m Abstand zu den nächsten TLB's 	<ul style="list-style-type: none"> • CLYC-1: K = 5; U = 525 V, 20° C • CLYC-2: K = 5; U = 610 V, 20° C • Messfenster: 0,4 V bis 4,8 V • Kanalbreite: 0,04 V; $\Delta t = 30$ s
2	Energiespektren (0 bis 4 MeV) <ul style="list-style-type: none"> • Messwinkel = 0° • Sensorhöhe CLYC-1 = 2070 mm • Sensorhöhe CLYC-2 = 1870 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • CLYC-1: K = 5; U = 525 V, 20° C • CLYC-2: K = 5; U = 610 V, 20° C • Messfenster: 0,4 V bis 4,8 V • Kanalbreite: 0,04 V; $\Delta t = 30$ s
3	Start-Stop-Messungen Messwinkel und Sensorhöhen laut Messplan (siehe Abbildung 2)	<ul style="list-style-type: none"> • CLYC-1: K = 5; U = 525 V, 20° C • CLYC-2: K = 5; U = 610 V, 20° C • Messzeit: 180 s
3	Energiespektren (0 bis 4 MeV) <ul style="list-style-type: none"> • Messwinkel = 0° • Sensorhöhe CLYC-1 = 1770 mm • Sensorhöhe CLYC-2 = 1570 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • CLYC-1: K = 5; U = 525 V, 20° C • CLYC-2: K = 5; U = 610 V, 20° C • Messfenster: 0,4 V bis 4,8 V • Kanalbreite: 0,04 V; $\Delta t = 30$ s

⁴ Am Markierungspunkt deckelseitig

10.2.3.3 Messprogramm 1 - Aufnahme von Energiespektren – Impulshöhenanalysen

Wie in der Vorgabetabelle bestimmt, wurden zu Beginn der Messkampagne die Energiespektren bei 90° und 2070 bzw. 1870 mm Messhöhe, sowie in 4 m Entfernung zum Behälter aufgezeichnet (siehe Abbildung 75). Ein Durchlauf zur Aufzeichnung der Spektren dauerte ca. 45 min. Um Stillstandszeiten des Messsystems im weiteren Verlauf der Messungen zu vermeiden, wurden weitere Spektren bei 20°, 15°, 315° und final bei 90° erneut aufgezeichnet.

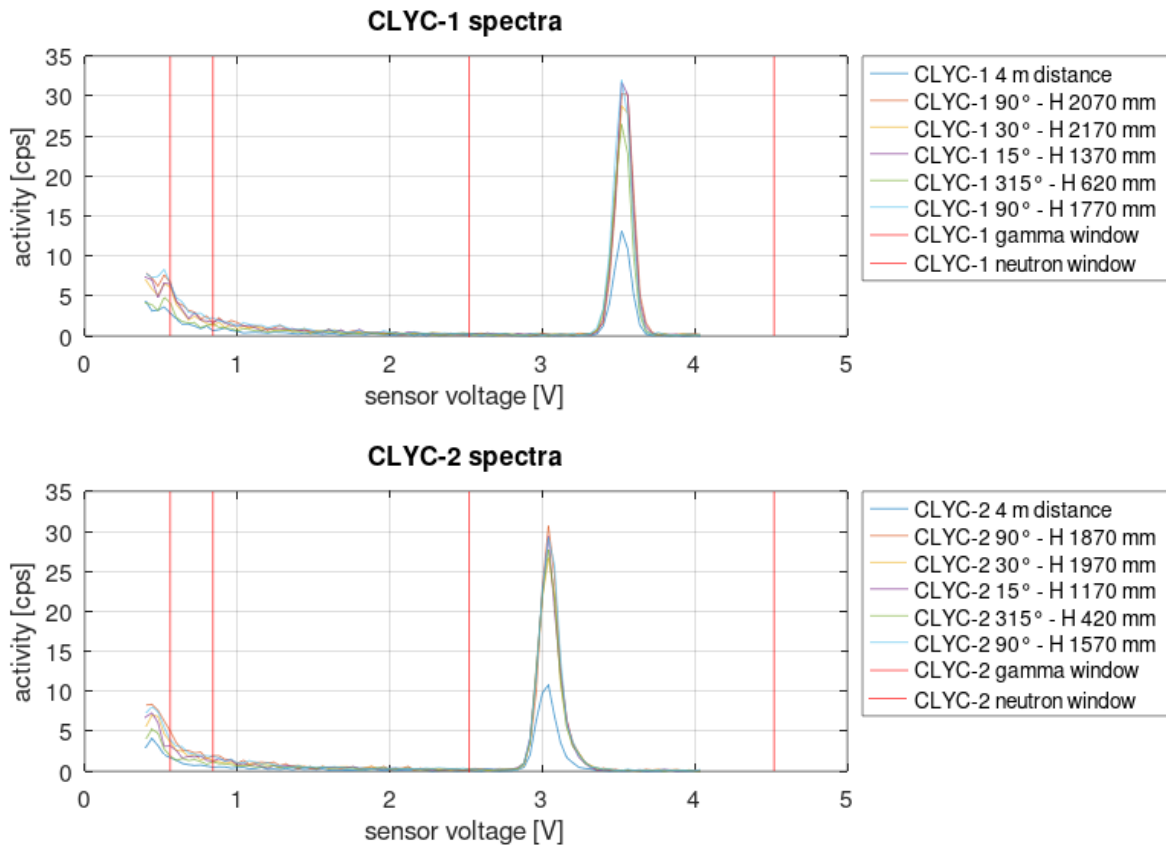


Abbildung 75: Energiespektren an verschiedenen Messpositionen aufgenommen mit CLYC-1 (oben) und CLYC-2 (unten)

Beim Vergleich der Spektren beider CLYC-Sensoren fällt die Verschiebung des Neutronenpeaks um ca. 0,5 V Sensorspannung auf, die sich bis in das Gamma-Messfenster fortsetzt. Vorab wurden die Einstell-daten beider Sensoren so festgelegt, dass der Neutronenpeak bei ca. 3,6 V Sensorspannung erscheint. Gründe für eine solche Verschiebung können Alterungserscheinungen in der Elektronik und/oder äußere Temperatureinflüsse auf Szintillatoren, Fotomultiplier und Elektronik sein.

Da die Sensoren nachweislich bei 20° C temperiert wurden, ist der Temperatureinfluss auszuschließen. Da jedoch eine Kalibrierung vor Messkampagne im Zittauer Strahlenlabor stattfand (siehe Kapitel 10.2.1), keine Referenzquelle für eine Vorort-Kalibrierung bzw. Überprüfung der Einstell-daten zur Verfügung stand und sich dieser Offset systematisch gezeigt hat, wurden die Einstell-daten weiterverwendet.

Im Nachgang wurde die Kalibrierung der Sensoren wiederholt. Diese Verschiebung des Neutronenpeaks wirkt sich bei hinreichend großer Aufspreizung des Neutronen-Messfensters (siehe Abbildung 75 – rote Linien) nur nachteilig auf den Gamma-Bereich aus. Dadurch verzeichnet CLYC-2 stets weniger Aktivität bei gleichen Messgrenzen als CLYC-1. Dies konnte jedoch mit einem Kalibrierfaktor kompensiert werden. Alternativ hätten jedem Sensor individuellen Einstelldaten für die Messfenster zugewiesen werden können. Dies hätte sich durch empirische Versuche nachteilig auf den Zeitplan ausgewirkt.

Anhand der Energiespektren wurden die Messfenster (vgl. Abbildung 75 – rote Linien) wie folgt determiniert:

1. *Sensorspannung des Gamma-Messfensters:* $U_{min} = 0,56 \text{ V}, U_{max} = 0,84 \text{ V}$
2. *Sensorspannung des Neutronen-Messfensters:* $U_{min} = 2,52 \text{ V}, U_{max} = 4,52 \text{ V}$

Dies entspricht einem Energiebereich von 500 bis 740 keV und 2,2 bis 3,8 MeV und umschließt sowohl das 511 keV Vernichtungspeak, als auch das Cs-137 Foto-Peak und den 3,2 MeV-Bereich der thermischen Neutronen.

10.2.3.4 Messprogramm 2 – Abgleich der CLYC-Sensoren

Bei der Aufnahme der Aktivitäten entlang der ersten Messwinkel (90° und 75°) wurde ein sägezahnartiger Verlauf bei der Gammastrahlung gemessen (siehe Abbildung 76 – blaue Kurve). Grund dafür ist die im vorherigen Kapitel beschriebene Verschiebung der Sensorspannung. Um diesen Verlauf zu korrigieren, mussten zunächst Kalibrierfaktoren für den Gamma- und Neutronenbereich bestimmt werden. Dazu wurde die Aktivität auf jeder Messhöhe individuell mit dem CLYC-Sensor 1 und 2 erfasst (siehe Abbildung 76). Die Kalibrierfaktoren (KF, engl. „CF“) für CLYC-2 ergeben sich aus der Verrechnung der Messergebnisse von CLYC-1 und CLYC-2.

$$CF_{CLYC-2,Gamma} = \frac{Aktivität_{CLYC-2,Gamma}}{Aktivität_{CLYC-1,Gamma}} = 1,24 = 24 \%$$

$$CF_{CLYC-2,Neutronen} = \frac{Aktivität_{CLYC-2,Neutronen}}{Aktivität_{CLYC-1,Neutronen}} = 1,01 = 1 \%$$

Abbildung 76 – orangene Linie zeigt den Einfluss der Kalibrierfaktoren insbesondere im Bereich der Gammastrahlung. Der Verlauf der modifizierten Messwerte entspricht dem üblichen Cosinus-artigen Verlauf der Aktivität und erscheint schlüssig.

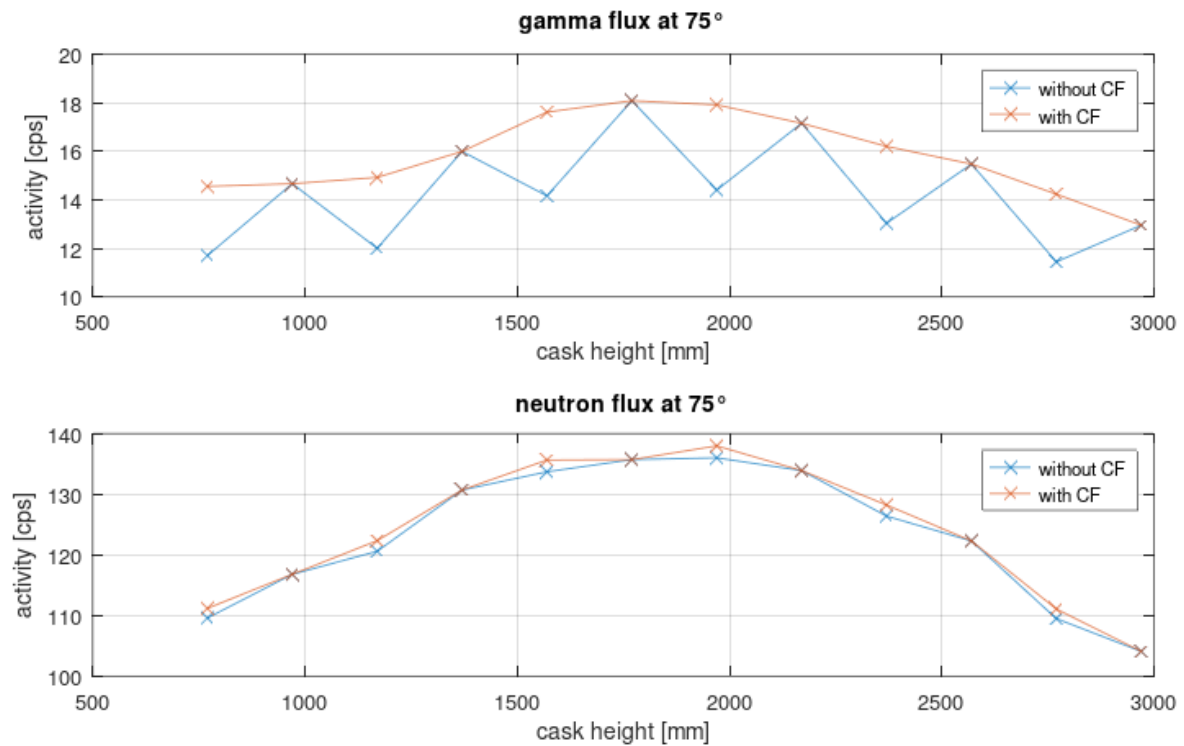


Abbildung 76: Aktivitätsverlauf mit und ohne Kalibrierfaktoren („CF“) entlang der Behälterhöhe gemessen bei 75°

10.2.3.5 Messprogramm 3 - 360°-Aufnahmen der Gamma- und Neutronenaktivität

Unabhängig von den Kalibrierfaktoren wurden weiterhin in 15°-Schritten die Aktivitäten für alle Messebenen im Start-Stop-Betrieb teilautomatisiert aufgenommen (siehe Abbildung 77). Die Kurven weisen weitestgehend den gleichen qualitativen Verlauf auf. Die Richtigkeit einiger punktueller Abweichungen (z.B. im Bereich der Gamma-Aktivität auf Behälterhöhe 1000 bis 1300 mm) sollte durch den vergleichsweise niedrigen Aktivitätswert und fehlende Kontrollmessungen kritisch geprüft werden. Eventuell handelt es sich an diesen Stellen um Messfehler.

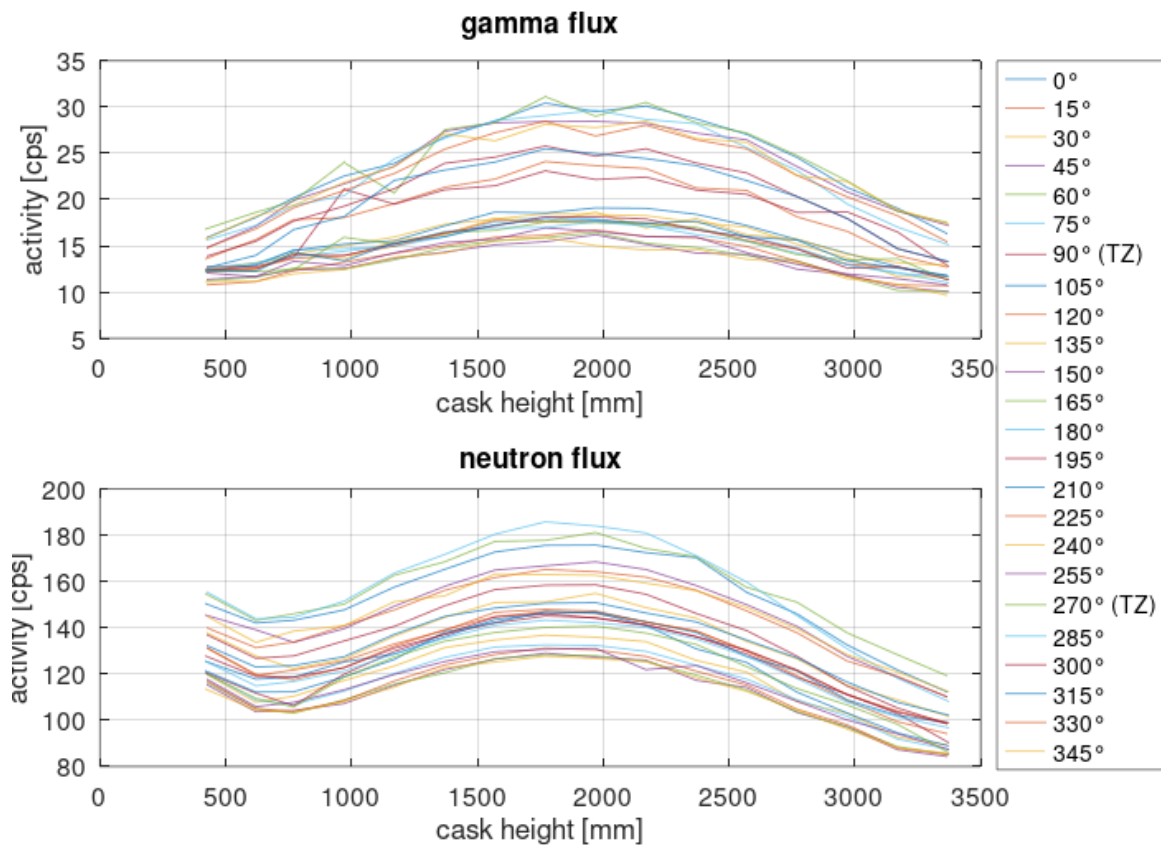


Abbildung 77: Aktivitätsverläufe entsprechend der Messhöhe für alle Messwinkel des Gammafensters (oben) und Neutronenfensters (unten)

10.2.3.6 Ergebnisse

Die Messkampagne wurde erfolgreich durchgeführt. Die austrittseitigen Gamma- und Neutronenaktivitäten des CASTOR 440/84 wurden im Umfang von 360° teilautomatisiert an insgesamt 400 Messpunkten erfasst (= 25 Messwinkel * 8 Messhöhen * 2 CLYC-Sensoren). Mit dieser Datenbasis konnte der behälterspezifische „Strahlungs-Fingerabdruck“ zum Versuchszeitpunkt erstellt werden (vgl. Abbildung 78). Für die Messungen verblieb der CASTOR im 2x2-Behälterverbund und wurde einmal um 180° um seine Längsachse gedreht und um 180° zurückgedreht.

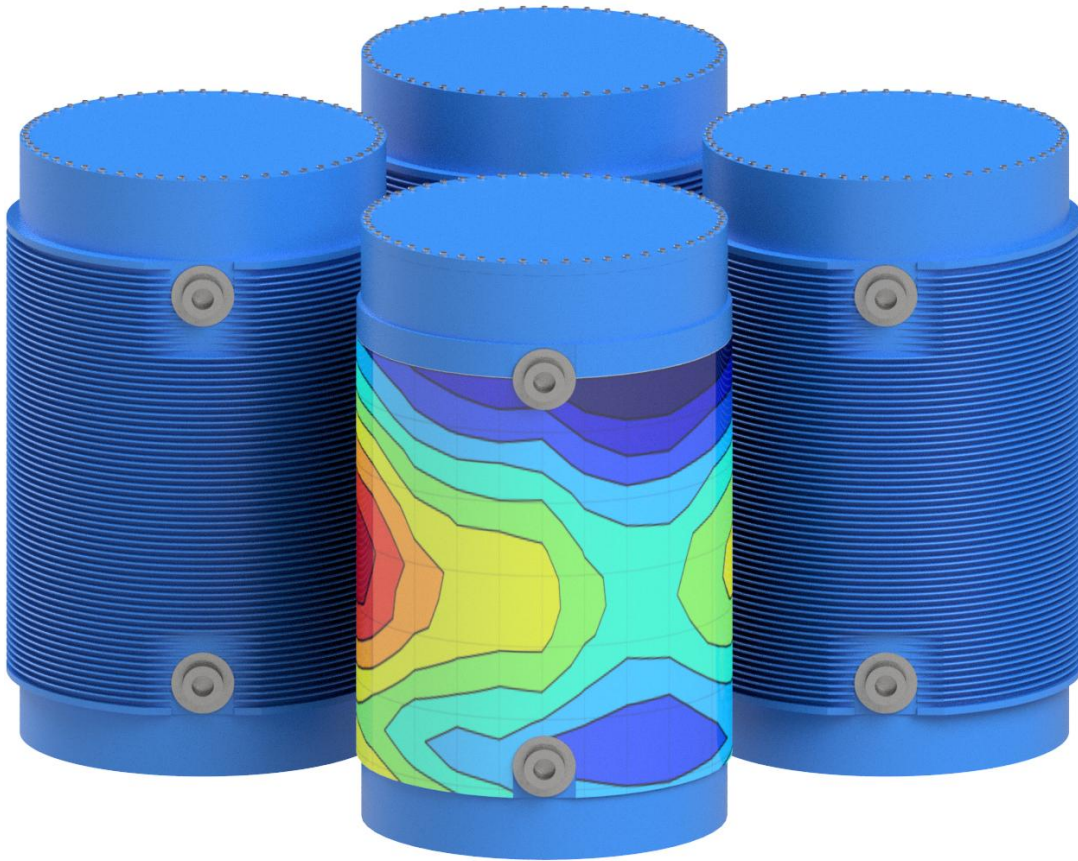


Abbildung 78: Gerendertes CAD-Modell des TLB mit projizierter Neutronen-Heatmap im CASTOR-Verbund

Die aufgenommenen und mit Kalibrierfaktoren verrechneten Aktivitäts-Messwerte ergeben folgende Strahlungskarten bzw. Heatmaps für den Gamma- und Neutronenbereich (siehe Abbildung 79). Die Messdaten weisen deutliche Maxima in den Bereichen 150° bis 210° und 330° , 345° , 0° und 15° - den Messwinkeln in Randlage zu Nachbarbehältern – auf. Diese Quereinflüsse verringern sich mit zunehmendem Abstand in Richtung der Mittelachsen bei den Tragzapfen (90° = EWN-Markierungspunkt und 180°).

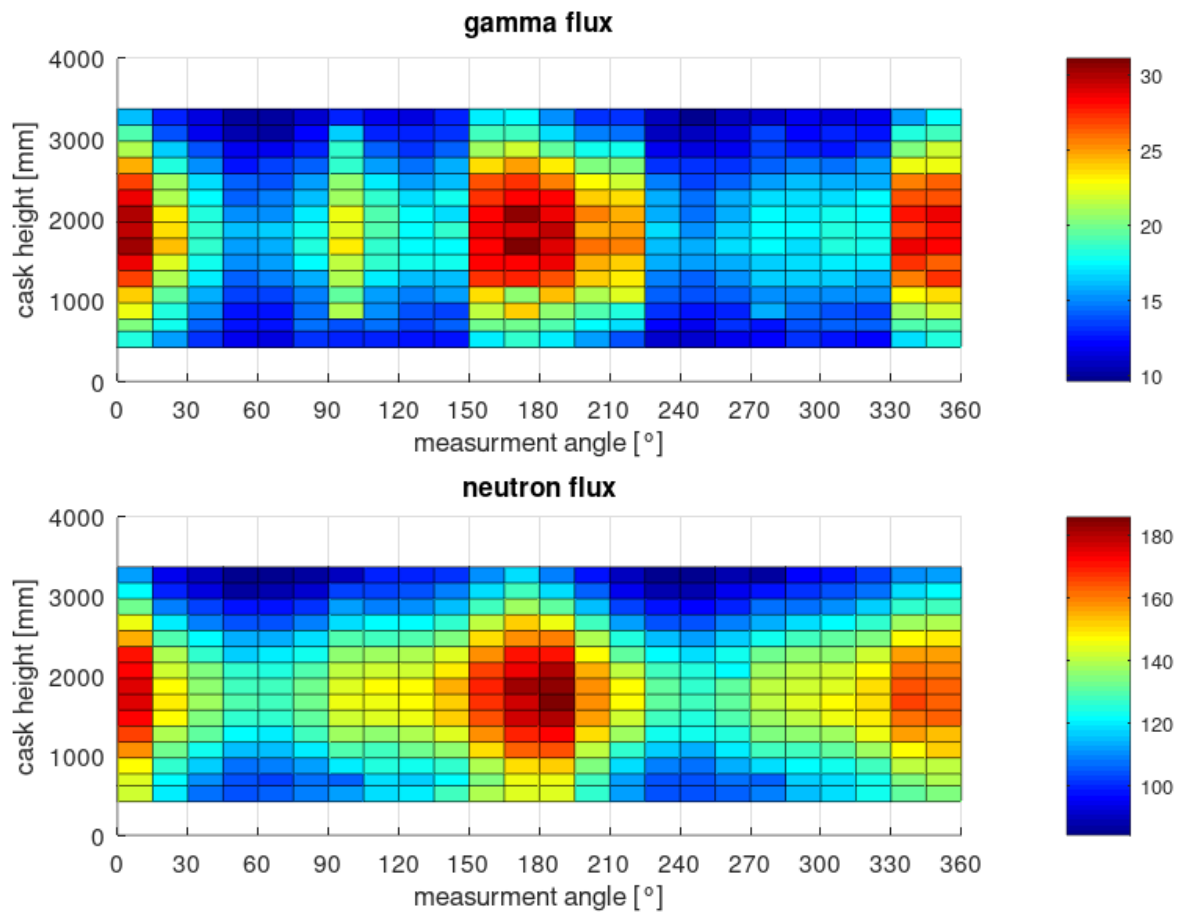


Abbildung 79: Strahlungskarte im Bereich der Gammastrahlung (oben) und Neutronenstrahlung (unten)

Abbildung 80 verdeutlicht den geometrischen Zusammenhang in Form einer Skizze. Es ist davon auszugehen, dass die Messdaten nur in den Messwinkeln von 45° bis 135° bzw. 225° bis 315° bei gedrehtem TLB, eine gewisse Aussagekraft besitzen. Grund dafür ist die Abschirmung durch den TLB selbst, wobei auch in diesem Bereich Quereinflüsse des nächsten 2x2-Behälterverbundes wirken. Dies wird aus dem Spektrum (siehe Abbildung 75), welches in 4 m Entfernung zur nächsten CASTOR-Behältergruppe aufgenommen wurde, geschlussfolgert. Hier beträgt die Aktivität ca. 30 % im Vergleich zur Behälterwand. Es wird empfohlen, die Messkampagne an einem abgeschirmten Platz zu wiederholen.

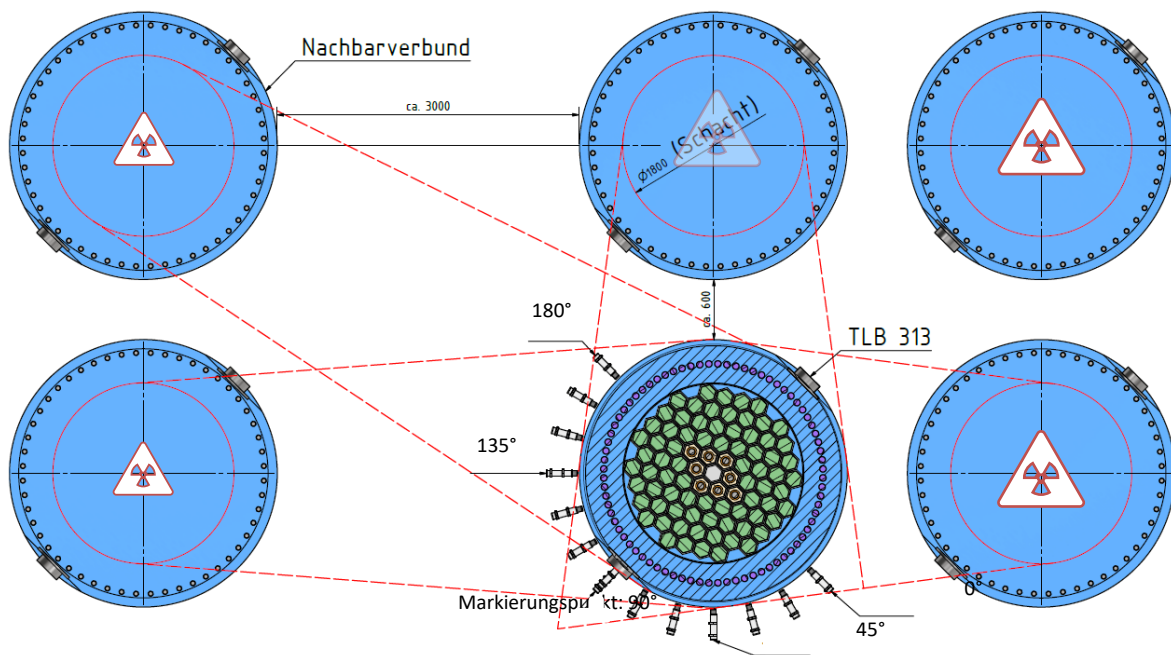


Abbildung 80: Skizze der Zuordnung der Messwinkel und den möglichen Einfluss benachbarter CASTORen (Draufsicht, CAD-Modell)

Diese Fehlerquelle in Bezug auf das Strahlungsbild des CASTOR ist im Rahmen dieser Messkampagne nicht kompensierbar. Das Drehen des CASTOR um jeweils 90° mit dem Hallenkran war aufgrund der begrenzten Lastspiele der Tragzapfen keine Option.

Der Einfluss der Nachbar-CASTORen ist in den Strahlungskarten deutlich zu erkennen und kann mit der zugrundeliegenden Datenbasis nicht kompensiert werden. Des Weiteren wirkt sich der Nachbarverband nachteilig auf das Messergebnis aus. Aufgrund dieser Tatsache sollte die Messkampagne mit selbiger Versuchsprozedur auf einer separaten und abgeschirmten Stellfläche mit 360°-Zugang für das Messsystem wiederholt werden. Der Erkenntnisgewinn bei der Durchführung der Messkampagne sollte den Arbeitsablauf optimieren, Messfehler reduzieren und das Bedienpersonal durch weitere Automatisierungsschritte entlasten.

10.2.4 Details zur Messkampagne am vereinzeltten CASTOR

10.2.4.1 Randbedingungen

Die Messung wurde bei den Entsorgungswerken für Nuklearanlagen GmbH (EWN) im Zwischenlager Nord (ZLN) auf dem Inspektionsplatz der Halle 8 durchgeführt. Das Messobjekt ist ein von EWN ausgewählter CASTOR der Bauart 440/84 mit asymmetrischer Beladung. Der Behälter wurde im Rahmen der Messkampagne vereinzelt, also mit dem Hallenkran aus dem Verbund genommen und am Ende wieder zurückgestellt (vgl. Abbildung 81).

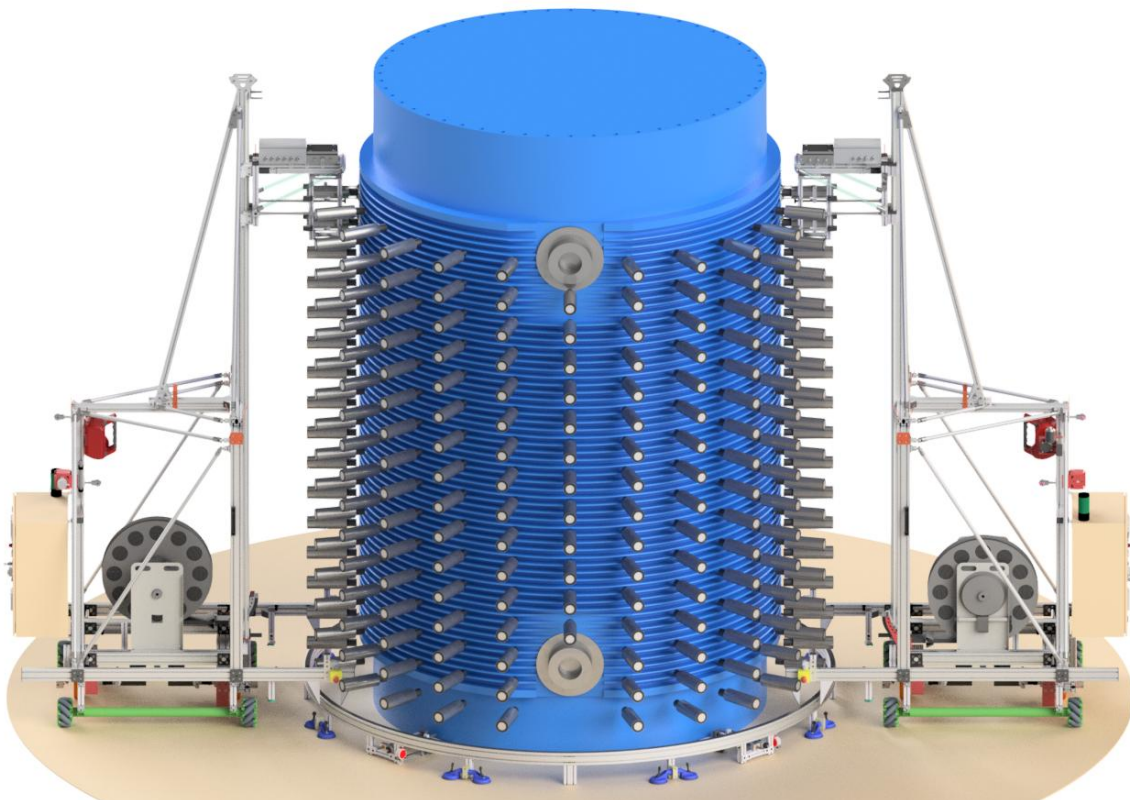


Abbildung 81: Gerendertes CAD-Modell des Messaufbaus um den CASTOR 440/84-Behälter mit dem Messsystem in oberer Endposition und angedeuteten CLYC-Sensoren

10.2.4.2 Überblick zur Versuchsprozedur

Vor dem eigentlichen Messprogramm wurde das Spektrum der Th-232-Feldquellen mit beiden CLYC-Sensoren zur Energiekalibrierung aufgezeichnet (Tabelle 11 – Punkt 1). Für die spätere punktuelle Aufnahme von Strahlungsintensitäten mussten zunächst die Messfenster für den Gammabereich bestimmt werden. Die Messfenster für die Neutronenstrahlung wurden als nächstes bei der Aufnahme des Energiespektrums (Punkt 2) am TLB im Sinne der Messung vom 4. April 2023 („Messung mit Stativ“) festgelegt.

Mit den vor Ort ermittelten Grenzen der elektrischen Spannungen für die Identifizierung von Gammaquanten und Neutronen wurden anschließend Start-Stop-Messungen gemäß des Messplanes durchgeführt. Es wurden in 15° Schritten orbital insgesamt 24 Messwinkel eingestellt und auf je 8 Messebenen in Höhe der Rippenzwischenräume gemessen (Punkt 4). Vorab wurde jedoch bei Messwinkel 0° die Aktivitätsmessung mit vertauschten CLYC-Sensoren durchgeführt für die spätere Bestimmung von Kalibrierfaktoren (Punkt 3). Bei allen Messungen wurde stets mit einem kombinierten Blei- und Kunststoffkollimator und PE-Stopfen gearbeitet.

Im Anschluss an das Start-Stop-Messprogramm wurde eine Aktivitätsmessung umlaufend in 5°-Schritten auf halber CASTOR-Höhe zur Einflussanalyse des Messwinkels durchgeführt (Punkt 5). Zuletzt wurde der Bodenbereich des Behälters gesondert und im angehobenen Zustand untersucht um den Einfluss des Hallenbodens auf den Aktivitätsanstieg im Bereich der BE-Füße zu untersuchen.

Nach dem Abtransport des Behälters vom Inspektionsplatz in den Verbund wurde abschließend der Nulleffekt am Messplatz auf verschiedenen Messhöhen aufgenommen um Aussagen über den Strahlungshintergrund treffen zu können (Punkt 7).

Tabelle 11 fasst die vollständigen Messplan der Kampagne zusammen.

Tabelle 11: Prozedur des Messkampagne

Nr.	Messprogramm	Sensoreinstellungen
1	Spektralaufnahme von Th-232-Feldquellen zur Energiekalibrierung und Bestimmung der Fenstergrenzen für den Gamma-Bereich	CLYC-1: K = 1; U = 700 V; 30°C CLYC-2: K = 1; U = 730 V; 30°C Messfenster: 0,02 bis 2 V Kanalbreite: 0,02 V, 20 s
2	Spektralaufnahmen (bis 4 MeV) am TLB <ul style="list-style-type: none"> • 0°, $H_{CLYC-1}=1780\text{ mm}$, $H_{CLYC-2}=1980\text{ mm}$ • 0°, $H_{CLYC-1}=1980\text{ mm}$, $H_{CLYC-2}=1780\text{ mm}$ • 75°, $H_{CLYC-1}=630\text{ mm}$, $H_{CLYC-2}=530\text{ mm}$ • 90°, $H_{CLYC-1}=2180\text{ mm}$, $H_{CLYC-2}=1980\text{ mm}$ • 145°, $H_{CLYC-1}=1780\text{ mm}$, $H_{CLYC-2}=1580\text{ mm}$ • 180°, $H_{CLYC-1}=1780\text{ mm}$, $H_{CLYC-2}=1580\text{ mm}$ 	CLYC-1: K = 1; U = 700 V; 30°C CLYC-2: K = 1; U = 730 V; 30°C Messfenster: 0,4 bis 4,8 V Kanalbreite: 0,04 V, 30 s
3	Ermittlung von Kalibrierfaktoren der Sensoren durch Aktivitätsmessungen im Start-Stop-Modus bei auf allen Messebenen bei Messwinkel 0°	CLYC-1: K = 1; U = 700 V; 30°C CH1: 0,7 bis 1 V; Ch2: 3 bis 4,8 V

		CLYC-2: K = 1; U = 730 V; 30°C Ch1: 0,63 bis 0,93 V Ch2: 3 bis 4,8 V Messzeit: je 150 s
3	Umlaufende Aktivitätsmessungen in 15°-Schritten auf den Höhen 430, 630, 780, 980, 1180 ... (+ 200 mm) ... 3380 mm zur Generierung der Heatmaps	wie (3)
4	Umlaufende Aktivitätsmessungen in 5°-Schritten auf Höhe CLYC-1 = 2180 mm und CLYC-2 = 1980 mm	wie (3)
5	Aktivitätsmessungen zur Abstandsuntersuchung auf Höhe CLYC-1 = 1780 mm und CLYC-2 = 1580 mm	wie (3)
6	Aktivitätsmessungen bei 0° mit angeobenem TLB zur gesonderten Untersuchung von Strahlungspeaks im Bodenbereich	wie (3)
7a	Spektralaufnahme des Nulleffekt am Inspektionsplatz bei CLYC-1 = 2180 mm und CLYC-2 = 1980 mm	wie (2)
7b	Aktivitätsmessungen zur Aufnahme des Nulleffekts am Inspektionsplatz auf Sensorhöhen wie 3)	wie (3)

10.2.4.3 Messprogramm 1 - Energiekalibrierung und Festlegung der Gamma-Messfenstergrenzen

Die Messkampagne vom Oktober 2023 machte deutlich, dass die CLYC-Sensoren vor jedem Einsatz kalibriert werden sollten. Dazu wurde das Spektrum von Th-232 Schweißelektroden zu Beginn der Messungen aufgenommen (siehe Abbildung 82). Zur Kontrolle wurde die Kalibrierungsmessung zum Ende der Messkampagne wiederholt. Aus den Diagrammen geht hervor das sich die Lage der Peaks in Bezug auf die Sensorspannung bzw. eingestellten Grenzwerte nicht geändert hat. Das Gamma-Messfenster besitzt weiterhin seine Gültigkeit.

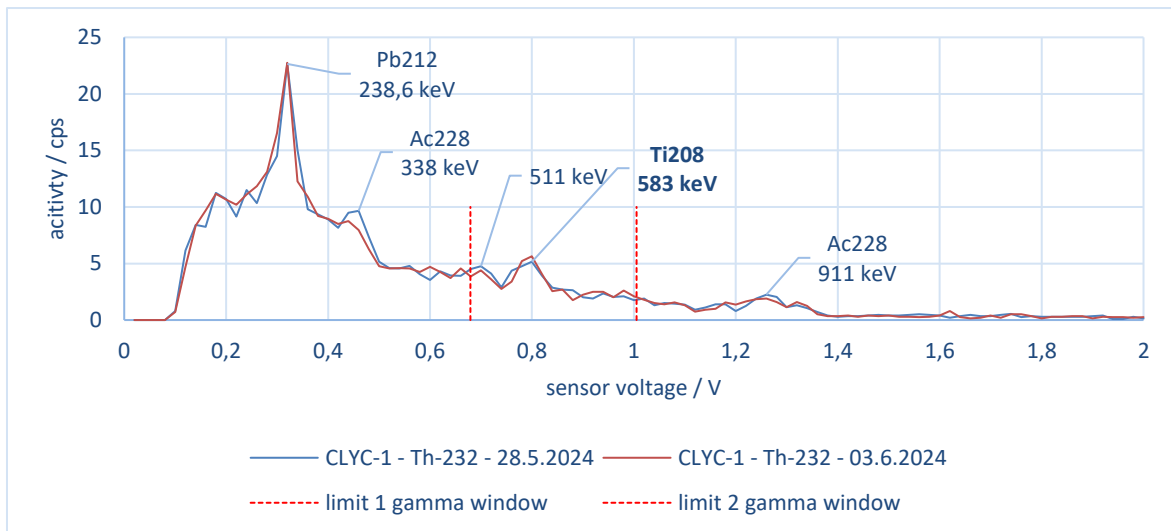


Abbildung 82: Spektralaufnahme der Th-232 Feldquellen zur Energiekalibrierung von CLYC-1

Die aus der Literatur bekannte Peaks dienen dabei als Marker für bestimmte Sensorspannungen. Das 583 keV Peak von Ti-208 liegt im Messbereich der später zu messenden Gammastrahlung (500 bis 740 keV) um die 662 keV des Cs-137-Peaks und wurde für die Grenzwertbestimmung verwendet.

Mit $U_{\text{Sensor}} = 0,792 \text{ V}$ (CLYC-1) bzw. $0,736 \text{ V}$ (CLYC-2) für die 583 keV resultieren folgende Grenzen.

Formel zur Berechnung der Sensorspannungen des Messfensters „Gamma“:

$$U_{\text{Grenze_Sensor}} = U_{\text{Sensor}} * \frac{E_{\text{Grenze}}}{583 \text{ keV}}$$

Obere und untere Sensorspannung für CLYC-1:

$$U_{UG_{CLYC-1}} = 0,792 \text{ V} * \frac{500 \text{ keV}}{583 \text{ keV}} = 0,7 \text{ V}$$

$$U_{OG_{CLYC-1}} = 0,792 \text{ V} * \frac{740 \text{ keV}}{583 \text{ keV}} = 1,0 \text{ V}$$

Obere und untere Sensorspannung für CLYC-2:

$$U_{UG_{CLYC-2}} = 0,736 \text{ V} * \frac{500 \text{ keV}}{583 \text{ keV}} = 0,63 \text{ V}$$

$$U_{OG_{CLYC-2}} = 0,736 \text{ V} * \frac{740 \text{ keV}}{583 \text{ keV}} = 0,93 \text{ V}$$

10.2.4.4 Messprogramm 2 - Aufnahme von Energiespektren

Für die Bestimmung des Neutronen-Messfensters wurde nach der Kalibrierungsmessung mit den Th-232-Elektroden eine Spektralaufnahme bei 90° und 1780 mm (Messhöhe CLYC-1) bzw. 1580 mm (Messhöhe CLYC-2) durchgeführt. Nebenbei wurde bei diesem Messpunkt die „Messung mit dem Stativ“ vom April 2023 für eventuelle Vergleiche wiederholt. Im weiteren Verlauf der Messkampagne wurden weitere Spektren aufgenommen um Stillstandszeiten bestmöglich zu nutzen (siehe Abbildung 83 u.f.).

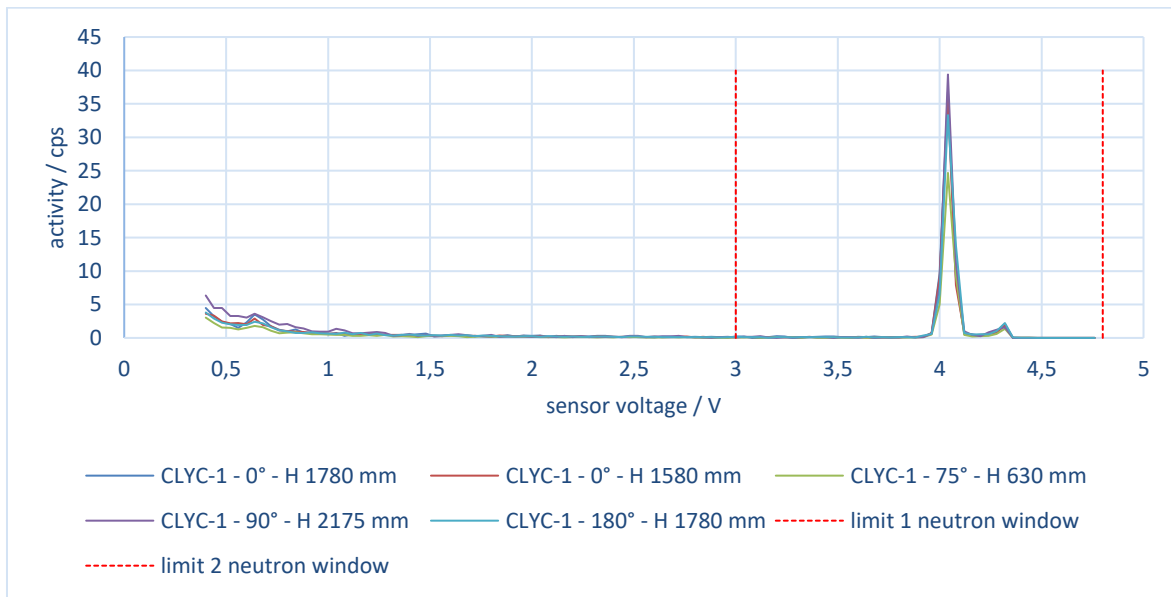


Abbildung 83: Spektralaufnahmen am CASTOR an verschiedenen Messpunkten mit CLYC-1

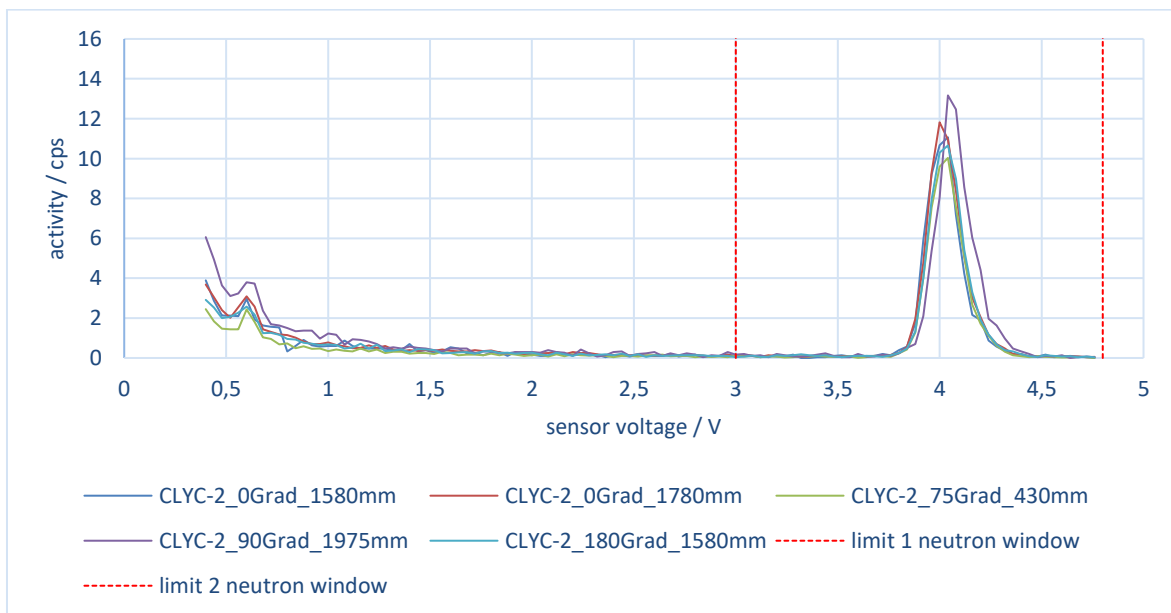


Abbildung 84: Spektralaufnahmen am CASTOR an verschiedenen Messpunkten mit CLYC-2

Der Qualitative Verlauf der Energiespektren bleibt stets der gleiche, wobei die Aktivitäten je nach Messhöhe oder Winkel am Behälter etwas höher oder niedriger ausfallen. Es ist auffällig, dass das Peak der thermischen Neutronen bei ca. 4 V (3,2 MeV) sich von Sensor zu Sensor unterscheidet. Bei CLYC-1 erscheint das Neutronenpeak schmäler und gestreckter, wobei es bei CLYC-2 gedehnter und flacher darstellt. Dieses Phänomen scheint eine charakteristische Sensoreigenschaft zu sein und ist auf die Szintillatoren zurückzuführen.

Die Grenzen für die Neutronen-Messfenster wurden konservativ auf 3 bis 4,8 V für beide CLYC-Sensoren gelegt.

10.2.4.5 Messprogramm 3 - Abgleich der CLYC-Sensoren (Kalibrierfaktoren)

Das Wachstum ist bei der Züchtung jedes Szintillationskristalls ebenso einzigartig wie speziell. Somit wird jeder CLYC-Sensor nie den exakten physikalischen Wert liefern. So gibt auch CLYC-1 bei gleichem Messaufbau nie den gleichen Messwert wie CLYC-2 aus. Für die Ermittlung von Kalibrierfaktoren (KF) zur Eliminierung dieser sensorabhängigen Abweichungen wurde bei Messwinkel 0° eine Aktivitätsmessung allen 8 Messhöhen durchgeführt und anschließend mit getauschten CLYC's wiederholt (siehe Abbildung 85 u.f.).

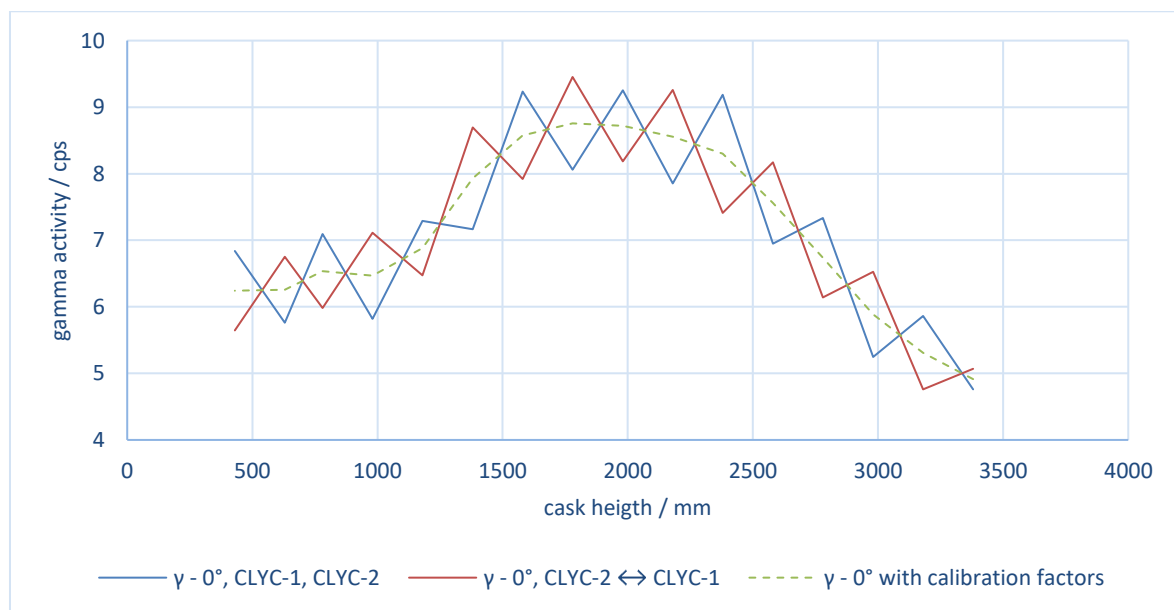


Abbildung 85: Verlauf der Aktivitäten im Gamma-Messfenster bei Messwinkel 0°

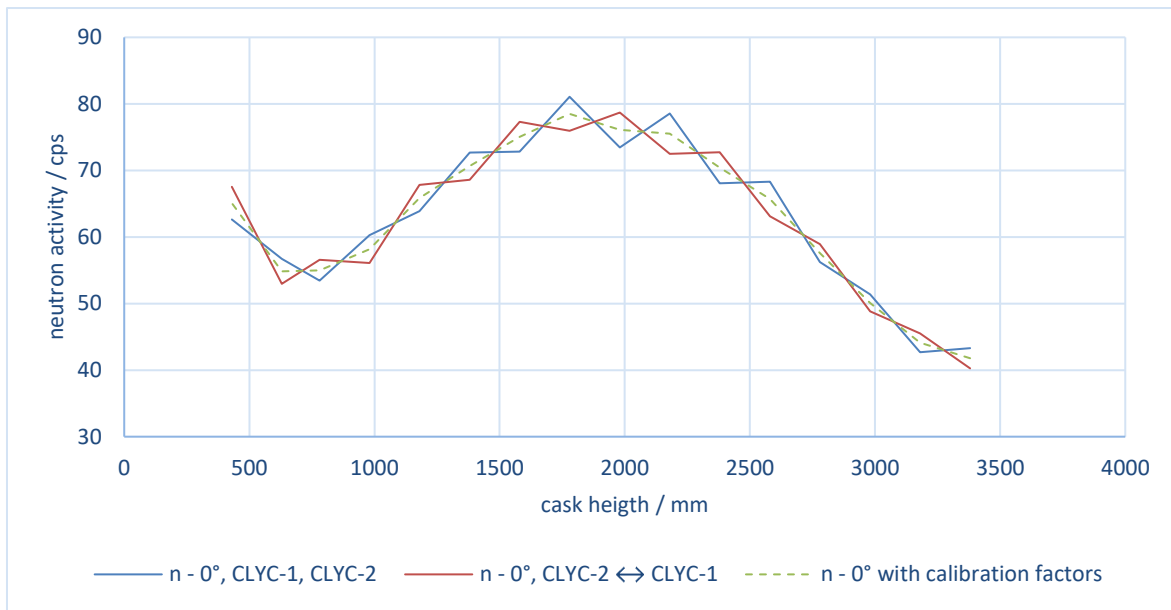


Abbildung 86: Verlauf der Aktivitäten im Neutronen-Messfenster bei Messwinkel 0°

Jeder Sensor befand sich somit einmal an jedem Platz. Aus den sägezahnartigen blauen und orangen Aktivitätsverläufen geht hervor, dass CLYC-2 am selben Messpunkt tendenziell mehr Gammastrahlung erfasst als CLYC-1. Bei der Neutronenstrahlung verhält es sich genau umgekehrt. In der Annahme, dass der reale Messwert in der Mitte liegt, wurden Mittelwerte und daraus Kalibrierfaktoren für jeden Sensor abgeleitet. Es resultierenden die gestrichelt grünen Kurven (vg. Abbildung 85 u.f.). Tabelle 12 zeigt die berechneten Korrekturfaktoren.

Tabelle 12: Empirisch ermittelte Kalibrierfaktoren

Sensor	Gamma-Messfenster	Neutronen-Messfenster
CLYC-1	1,090275054	0,966937906
CLYC-2	0,922207394	1,03214469

10.2.4.6 Messprogramm 4 - Umlaufende Start-Stop-Messungen in 15°-Schritten

Das Hauptziel der Messkampagne war es die Aktivitäten im Gamma- und Neutronenbereich, sowie die Oberflächentemperaturen messtechnisch zu erfassen. Dabei wurde in vertikalen 200 mm Schritten und orbitalen 15°-Schritten der CASTOR einmal umrundet und jeweils zwischen 2 Rippenpeaks gemessen. Abbildung 87 bis Abbildung 89 zeigen die Verläufe aller 25 Messwinkel. Der 0°- bzw. 360°-Messwinkel wurden zu Kontrollzwecken doppelt, das heißt am Anfang und am Ende dieser Prozedur aufgezeichnet.

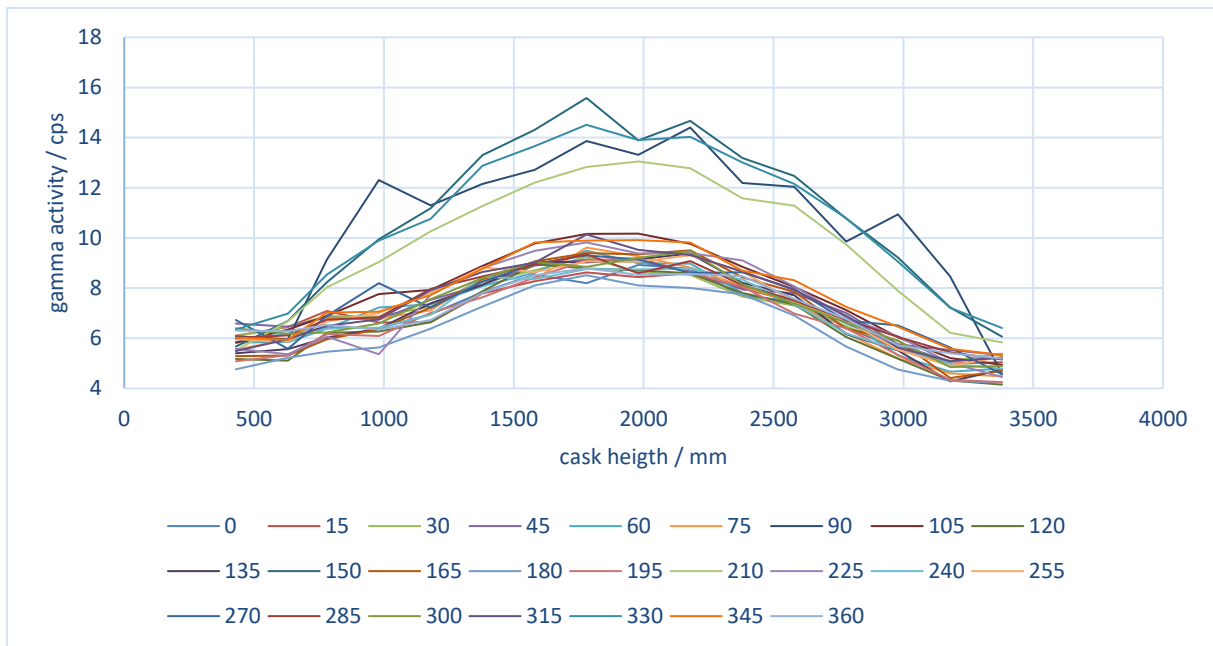


Abbildung 87: Verlauf der Aktivitäten im Gamma-Messfenster für 16 Messhöhen in 15°-Schritten

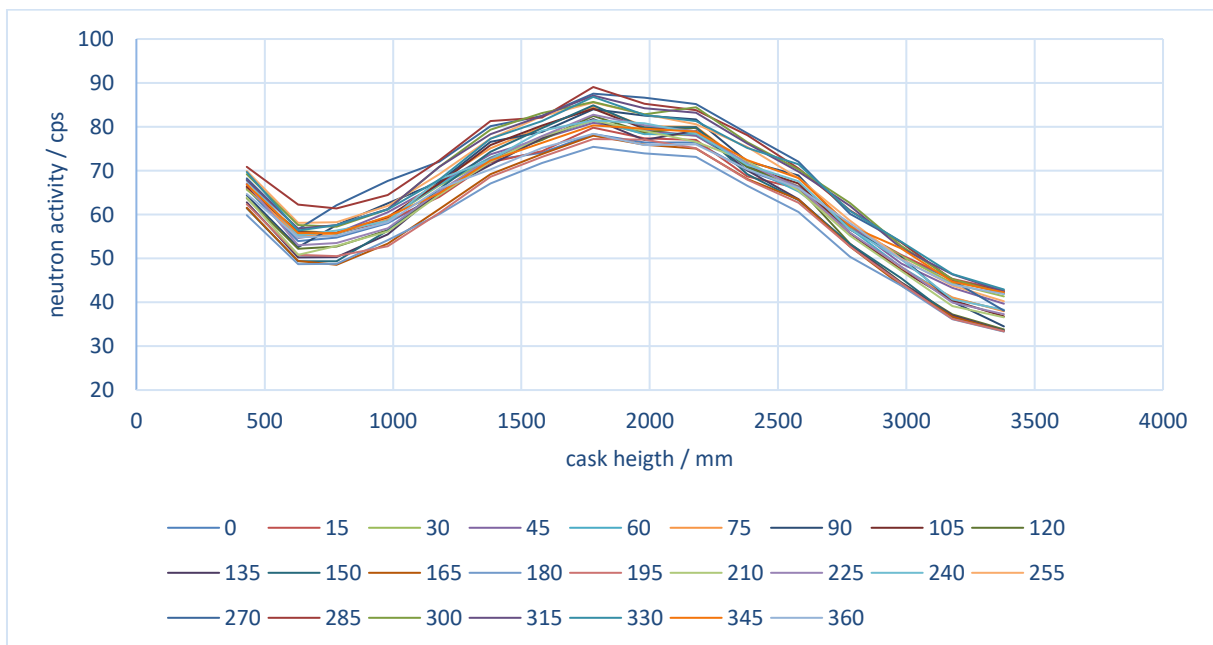


Abbildung 88: Verlauf der Aktivitäten im Gamma-Messfenster für 16 Messhöhen 15°-Schritten

Alle Verläufe der Gamma- und Neutronenaktivitäten erscheinen cosinusförmig und plausibel, unterscheiden sich jedoch um einen gewissen Offset in Abhängigkeit des Winkels. Das Aktivitätspeak liegt stets auf halber Behälterhöhe bei ca. 2 m. Allerdings gibt es bei der Gammastrahlung 4 Kurven mit besonders hohem Offset. Des Weiteren ist im Bereich der BE-Füße (400 bis 600 mm) ebenfalls ein Anstieg bei der Neutronenaktivität zu verzeichnen.

Die Temperaturverläufe (siehe Abbildung 89) weisen ebenfalls einen cosinusförmigen Verlauf auf. Auch hier treten die Maxima auf halber TLB-Höhe auf. Die deutlichen Minima im Kopf- und Bodenbereich bei 90° und 270° ist auf Messungen an den Tragzapfen zurückzuführen, welcher aufgrund seiner Geometrie weiter herausragt und dadurch kühler ist.

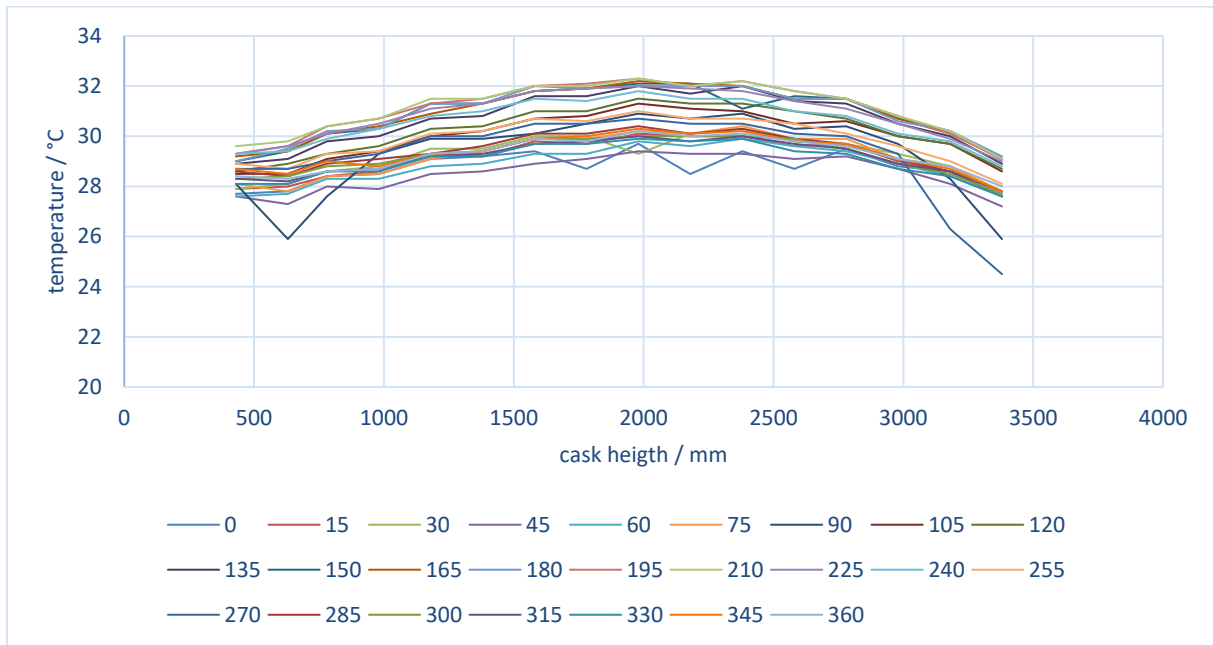


Abbildung 89: Verlauf der Oberflächentemperaturen für 16 Messhöhen in 15°-Schritten

10.2.4.7 Messprogramm 5 - Umlaufende Start-Stop-Messungen in 5°-Schritten

Um Aussagen zur Auflösung der Messwinkelschritte treffen zu können wurde eine weitere Messreihe in 5°-Schritten auf halber TLB-Höhe, dem Bereich der BE-Mitten mit der höchsten Aktivität, durchgeführt. Auch hier wurde der CASTOR einmal umrundet und jeweils zwischen 2 Rippenpeaks gemessen. Tabelle 13 zeigt auszugsweise den Messplan.

Tabelle 13: Messplan zur Umrundung in 5°-Schritten

Mess-ebene	Messhöhe in mm	Sensor	0°	5°	10°	...	360°
Nr. 5	2180	CLYC-1	γ, n, T	γ, n, T	γ, n, T	...	γ, n, T
	1980	CLYC-2	γ, n, T	γ, n, T	γ, n, T		γ, n, T

Abbildung 90 stellt den Verlauf der Messwerte dieser Prozedur mit 2 x 73 Messpunkten dar. Während die Neutronenaktivität (orange) relativ gleichbleibend um die 75 cps schwankt, zeigen sich vier deutliche lokale Maxima bei der Gammastrahlung (grün). Ebenso korrelieren die erhöhten Temperaturwerte

um den Bereich der 3 eng beieinanderliegenden Maxima bei 90°, 150° und 210°. Dieser Sachverhalt wurde im Hinblick auf die Beladedokumentation des CASTORs und seiner Brennelement-Historien genauer untersucht.

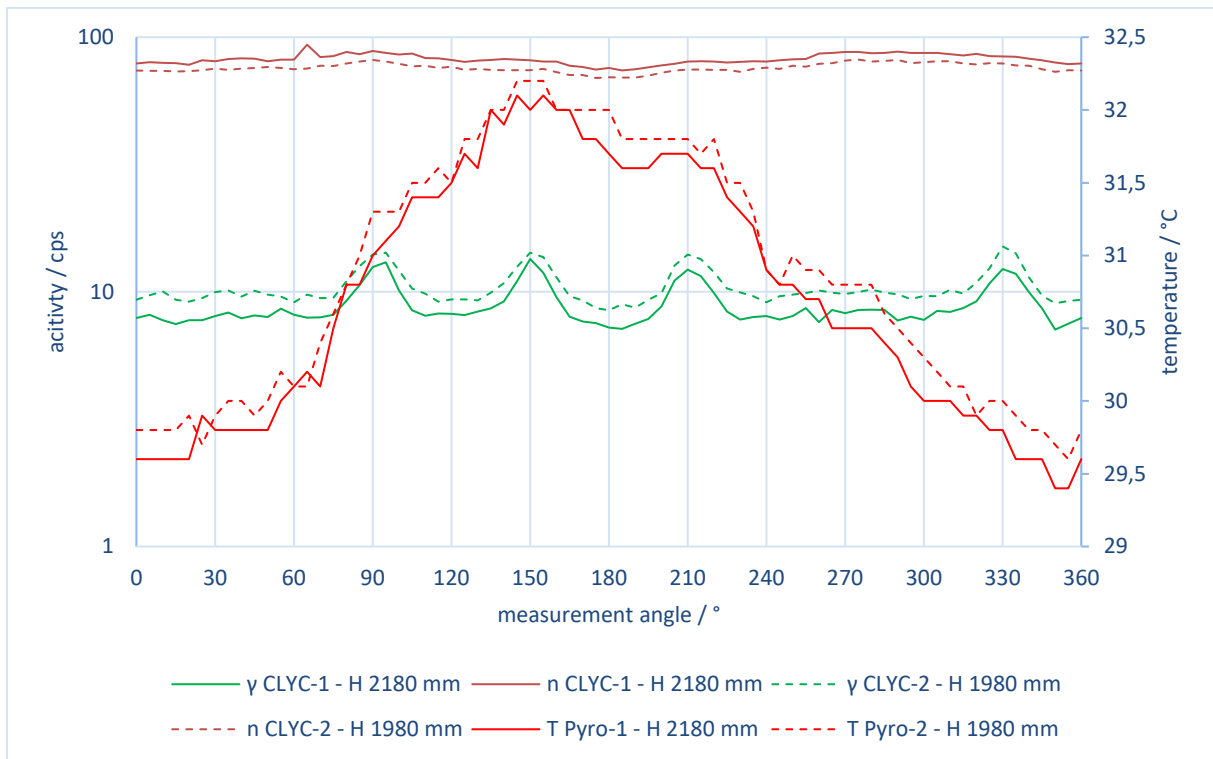


Abbildung 90: Verlauf der Gamma- und Neutronenaktivitäten, sowie der Oberflächentemperaturen in 5°-Schritten

10.2.4.8 Messprogramm 6 - Abstandsabhängige Aktivitätsmessung

Als ergänzend anzusehende Messreihe wurde der Einfluss des Messabstands von Behälterwand zur Kollimatorkante aufgenommen. Ziel war es Aussagen zur Messunsicherheit in Bezug auf die Positionierung der CLYC-Sensoren treffen zu können. Dazu wurden Start-Stop-Messungen mit beiden CLYC-Sensoren auf Messebene 4 (1580 mm, 1780 mm) ab Kontakt mit den Behälterrippen (0 mm Abstand) bis ca. 200 mm Abstand durchgeführt. Abbildung 91 u.f. zeigen, dass die Aktivität bei zunehmendem Abstand zum Behälter wie zu erwarten, abnimmt, wobei dies bei der Neutronenstrahlung (vgl. Abbildung 90) deutlicher zu erkennen ist. An ist anzumerken, dass es sich beim CASTOR und der Messanordnung um eine Volumenquelle handelt und nicht etwa um eine Punktquelle bei der der Abstand bekannter Weise quadratisch eingeht. Bei der Gammastrahlung kommt hinzu, dass bei relativ kurzen Entfernungen zu den Rippen, sich das Messfenster, welches durch die Geometrie des Blei-Anteils im Kollimator vorgegeben ist, vergrößert.

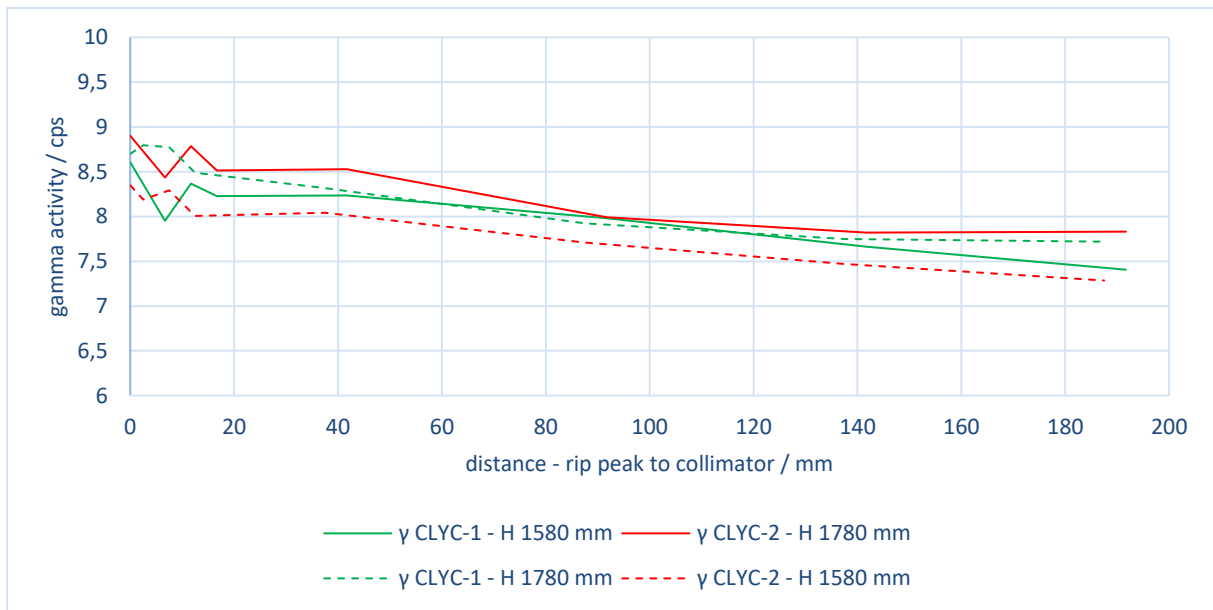


Abbildung 91: Verlauf der Gammaaktivitäten in Abhängigkeit des Sensorabstands zu den Behälterrippen

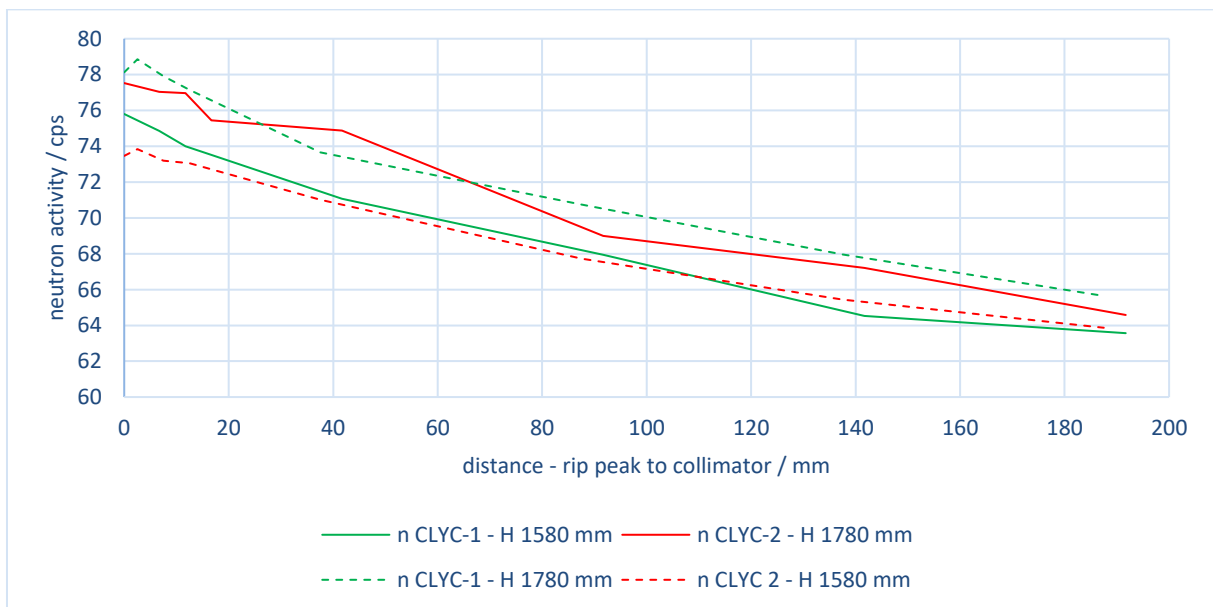


Abbildung 92: Verlauf der Neutronenaktivitäten in Abhängigkeit des Sensorabstands zu den Behälterrippen

10.2.4.9 Aufnahme des Nulleffektes am Messplatz

Für die Bewertung des Untergrund-Strahlungsniveaus am Messplatz ohne CASTOR wurden nach Abschluss der regulären Messungen eine Nulleffektmessung ein Energiespektrums (siehe Abbildung 93) und die Gamma- und Neutronenaktivität für jede der 8 Messhöhen aufgenommen (siehe Abbildung

94). Dabei befanden sich die CLYC-Sensoren auf der imaginären Mittelachse des CASTORs mit Blickrichtung zur den anderen CASTOREn welche ca. 8,5 m entfernt hinter einer 3 m hohen PE-Wand standen. Aufgrund des erhöhten Zeitaufwandes wurde nicht jeder der 24 Messwinkel auf seine Untergrundstrahlung untersucht. Mit diesem Versuchsaufbau konnten aber die konservativsten Werte für den Nulleffekt ermittelt werden.

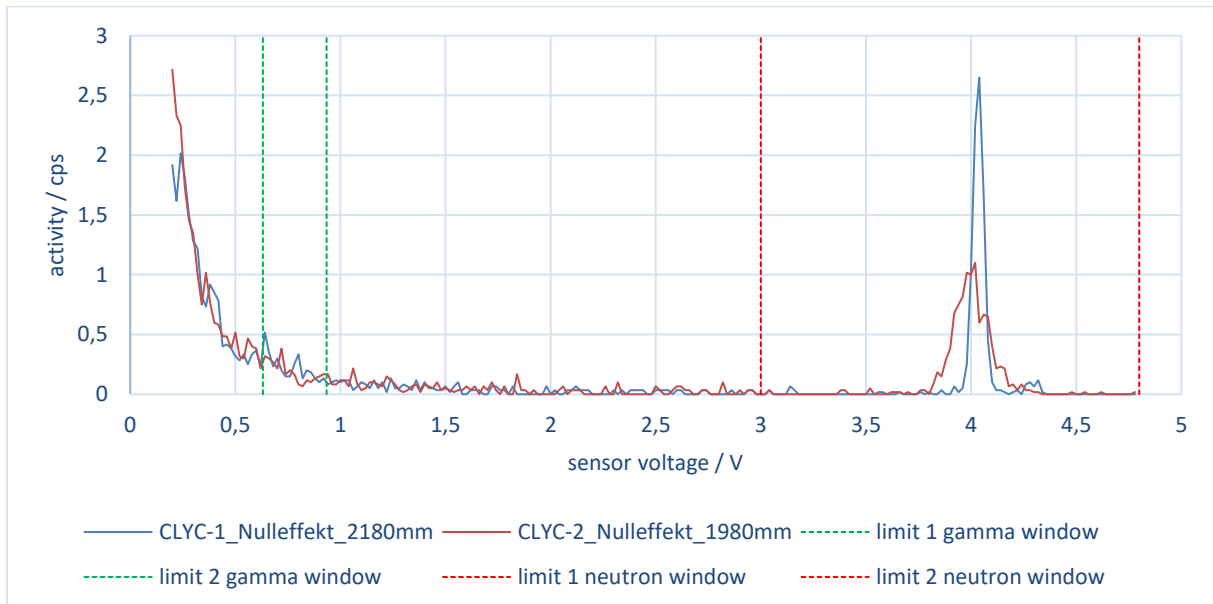


Abbildung 93: Spektralaufnahme ohne CASTOR (Nulleffekt) am Messplatz auf Höhe 2180 mm (CLYC-1) und 1980 mm (CLYC-2)

Aus den Messwerten der Start-Stop-Messung (vgl. Abbildung 94) geht hervor, dass unabhängig von der Messhöhe stets eine konstante Gamma- und Neutronenuntergrundstrahlung auftritt. Inwieweit die Aktivitätswerte als Offset betrachtet werden können, bleibt zu prüfen, denn der zu untersuchende CASTOR bzw. das Messsystem fungierten an einigen Messwinkel zusätzlich als Abschirmung.

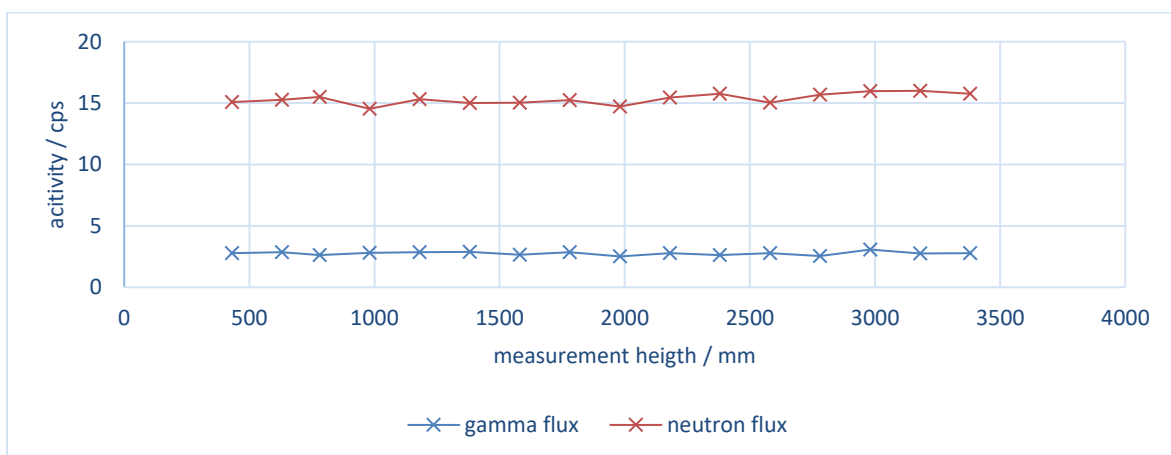


Abbildung 94: Aktivitätsmessung ohne CASTOR (Nulleffekt) zur Bestimmung des Untergrundes für jede Messebene