

**Zerstörungsfreie Verfahren
zur Inspektion von
Behältern im Kontext der
Lagerung und Entsorgung
(wärmeentwickelnder)
radioaktiver Abfälle**

**Zerstörungsfreie Verfahren
zur Inspektion von
Behältern im Kontext der
Lagerung und Entsorgung
(wärmeentwickelnder)
radioaktiver Abfälle**

Abschlussbericht

Konrad Arnswald
Thomas Braunroth
Marta Meloni

Juli 2026

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Eigenforschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) unter dem Förderkennzeichen 4723E03290 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMUKN übereinstimmen.

Deskriptoren

Bestrahlte Brennelemente, Behälterprüfung, Bildgebung, Inventarprüfung, Myographie, TLB, Verlängerte Zwischenlagerung, Zerstörungsfreie Prüfverfahren, ZfP, Zwischenlagerung

Kurzfassung

In Deutschland ist die Aufbewahrung bestrahlter Kernbrennstoffe auf 40 Jahre begrenzt. Aufgrund des zeitintensiven Prozesses bis zur Errichtung und Inbetriebnahme eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle und bestrahlte Brennelemente wird zumindest in weiten Teilen eine verlängerte Zwischenlagerung, d. h. eine über die 40 Jahre hinaus gehende trockene Zwischenlagerung, notwendig sein. Die Notwendigkeit einer verlängerten Zwischenlagerung ist auch in anderen Ländern absehbar, so dass es sowohl national als auch international viele Forschungs- und Entwicklungsprojekte (beispielsweise zur Untersuchung des Langzeitverhaltens) gibt, die sich mit sicherheitstechnischen Aspekten auseinandersetzen. Hierzu gehören auch die Entwicklung und Weiterentwicklung technischer Verfahren zur Prüfung von Behältern und Inventaren. Im vorliegenden Bericht werden etablierte und innovative Verfahren für die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) zusammengestellt und im Kontext materialschädigender Prozesse diskutiert. Hierbei wird auch Bezug zu (laufenden) nationalen und internationalen Projekten genommen, hierzu gehört beispielsweise das *Extended Storage Collaboration Project* (ESCP) des *Electric Power Research Institute* (EPRI, USA).

Ein besonderer Fokus liegt auf der Myonen-gestützten Bildgebung. Hierzu werden im Anschluss an eine Zusammenfassung der physikalischen Grundlagen die möglichen Messverfahren und geeignete Detektortypen zusammengestellt. Im Anschluss werden etablierte Rekonstruktionsverfahren erläutert und das Spektrum der Einsatzmöglichkeiten der Myonen-gestützten Bildgebung erläutert. Darauf aufbauend werden aktuelle Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten im Bereich der Myonen-gestützten Bildgebung verfolgt. Dies umfasst zunächst nationale als auch internationale Forschungsvorhaben wie DCS-Monitor oder MUTOMCA. Zudem werden Weiterentwicklungen von Detektorsystemen und Rekonstruktionsverfahren vorgestellt und die Nutzung und Nutzbarkeit künstlicher Intelligenz im Kontext der Myonen-gestützten Bildgebung betrachtet. Die Nutzung dieses bildgebenden Verfahrens im Zwischenlagerkontext wird grundsätzlich durch die Neutronen- und Photonenfelder (Störstrahlung) erschwert, wobei eine Abhängigkeit zum Detektionsverfahren besteht. Ausgehend von physikalischen Prozessen wird diese Abhängigkeit dargelegt und diskutiert.

Im Anschluss werden simulationsbasierte Machbarkeitsbetrachtungen für die Myonen-gestützte Bildgebung zur Behälter- und Inventarprüfung durchgeführt. Ausgehend von einem realitätsnahen Modell für einen Transport- und Lagerbehälter (TLB) für verglaste radioaktive Abfälle wird mit Hilfe von Geant4 untersucht, ob partiell (mit verglasten radio-

aktiven Abfällen) gefüllte Kokillen erkannt werden können. Hierbei wird auch betrachtet, welche Auswirkungen der Startwert von Zufallsgeneratoren in Monte-Carlo-Codes aufweist. Des Weiteren werden für Modelle eines Behälters für Brennelemente eines Druckwasserreaktors (DWR) die Simulationsergebnisse mehrerer Monte-Carlo-Codes miteinander verglichen.

Der Bericht endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

Abstract

In Germany, the storage of spent nuclear fuel is limited to 40 years. Due to the time-consuming process involved in constructing and commissioning a final repository for high-level radioactive waste and irradiated fuel elements, extended interim storage - i.e., dry interim storage beyond the 40-year limit - will be necessary, at least for a large part of the inventory. The need for extended interim storage is also foreseeable in other countries, leading to many national and international research and development projects (such as those investigating long-term behavior of relevant materials) that address safety-related aspects. This includes the development and refinement of technical methods for inspecting containers and inventories. This report compiles established and innovative methods for non-destructive testing (NDT) and discusses them in the context of material-damaging processes. It also references (ongoing) national and international projects, including, for example, the Extended Storage Collaboration Project (ESCP) of the *Electric Power Research Institute* (EPRI, USA).

A particular focus is placed on muon-based imaging. To this end, following a summary of the fundamental physics, the possible measurement methods and suitable detector types are outlined. Subsequently, established reconstruction methods are explained, and the range of potential applications for muon-based imaging is illustrated. Building on this, current research and development activities in the field of muon-based imaging are reviewed. This initially includes both national and international research projects such as DCS-Monitor or MUTOMCA. Furthermore, advancements in detector systems and reconstruction methods are presented, and the use and applicability of artificial intelligence in the context of muon-based imaging are explored. The use of this imaging method in the context of interim storage is fundamentally compromised by neutron and photon fields (scatter radiation), with a dependency on the detection method. Based on physical processes, this dependency is presented and discussed.

Subsequently, simulation-based feasibility studies are conducted for muon-based imaging for the purpose of container and inventory inspection. Using a realistic model of a transport and storage container for vitrified radioactive waste, Geant4 is employed to investigate whether partially filled molds (containing vitrified radioactive waste) can be identified. In this context, the effects of the seed value of random number generators in Monte Carlo codes are also examined.

Furthermore, for models of a container for pressurized water reactor fuel assemblies, the simulation results of several Monte Carlo codes are compared with each other.

The report closes with a summary and an outlook.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Die zerstörungsfreie Prüfung von Behältern- und Inventaren für hochradioaktive Abfälle und bestrahlte Brennelemente.....	5
2.1	Übersicht über die für die Zwischenlager genutzten Behälter und Abschätzung ihrer Anzahl	5
2.2	Darlegung der regulatorische Randbedingungen und der Anforderungen an Transport- und Lagerbehälter	6
2.3	Materialschädigende Prozesse an Behältern und eingelagerten radioaktiven Inventaren.....	9
2.3.1	Generische Behälter und Inventarbeschreibung	10
2.3.2	Mechanische Verschleißerscheinungen.....	11
2.3.3	Korrosion	11
2.3.4	Strahlungsbedingte Alterungseffekte und daraus resultierende potenzielle Sekundärschädigungen	12
2.3.5	Temperaturbedingte Alterungsprozesse	14
2.4	Etablierte Messverfahren für die zerstörungsfreie Behälter- und Inventarprüfung und deren Anwendungsgebiete.....	14
2.4.1	Optische Prüfung/Sichtprüfung	14
2.4.2	Wirbelstromprüfung	15
2.4.3	Schallemissionsprüfung.....	17
2.4.4	Ultraschalluntersuchung	18
2.4.5	Ultraschallprüfung mit Gruppenstrahlertechnik	21
2.4.6	Laserbasierte Ultraschallprüfung	22
2.4.7	Langstreckenultraschallprüfung mit geführten Wellen.....	23
2.4.8	Infrarot-Thermographie (IRT).....	24
2.4.9	Passive Radiographie mit Neutronen- und Gammastrahlung.....	25
2.4.10	Aktive Radiographie mit hochenergetischen Photonen und Neutronen....	26
2.5	Nationale und internationale Bestrebungen zur Entwicklung und Weiterentwicklung innovativer zerstörungsfreier Prüfverfahren.....	27

3	Myonen-basierte Bildgebung und deren Nutzung im Kontext der Behälter- und Inventarprüfung	39
3.1	Erzeugung atmosphärischer Myonen und deren physikalische Eigenschaften	39
3.2	Myographische Messverfahren	44
3.2.1	Transmissionsverfahren.....	44
3.2.2	Absorptionsverfahren.....	45
3.2.3	Streuwinkelverfahren	46
3.2.4	Myonen-induzierte Neutronenfreisetzung bei spaltbaren Materialien	46
3.3	Detektion von Myonen und etablierte Detektorkonzepte	47
3.3.1	Szintillationsdetektoren	47
3.3.2	Gasgefüllte Detektoren	49
3.3.3	Kernemulsionsplatten	51
3.3.4	Cherenkov Detektoren	52
3.3.5	Halbleiterdetektoren.....	54
3.4	Etablierte Rekonstruktionsverfahren für die Myonen-basierte Bildgebung mit zwei Detektionsflächen.....	54
3.4.1	Bestimmung eines effektiven Streuwinkels	55
3.4.2	PoCA-Algorithmus	55
3.4.3	Gefilterte Rückprojektion.....	56
3.4.4	Algebraische Rekonstruktionsverfahren.....	57
3.4.5	Maximum-Likelihood-Verfahren	58
3.5	Einsatzfelder der Myographie	63
3.5.1	Geologische Untersuchungen.....	63
3.5.2	Zerstörungsfreie Untersuchungen in der Industrie	64
3.5.3	Zerstörungsfreie Untersuchungen historischer Bauwerke	66
3.5.4	Proliferations- und Grenzkontrollen.....	66
3.5.5	Zerstörungsfreie Prüfung von Behältern für radioaktive Abfälle und eingeschlossenen Inventaren	67
3.6	Aktuelle Forschung und Entwicklung mit Bezug zum Messverfahren im Allgemeinen sowie zur Behälterprüfung im Speziellen	69
3.6.1	Arbeiten der Technischen Universität (TU) Dresden und von Verbundpartnern (DCS-Monitor und RIMANUS).....	69

3.6.2	Internationales Verbundvorhaben MUon TOMography for CAsks (MUTOMCA).....	70
3.6.3	Weiterentwicklung von Detektionssystemen	72
3.6.4	Weiterentwicklung von Rekonstruktionsverfahren.....	73
3.6.5	Nutzung von Künstlicher Intelligenz (KI)	74
3.7	Betrachtung strahlungsbedingter Störsignale.....	79
3.7.1	Wechselwirkungsmechanismen von Myonen, Gammastrahlung und Neutronen mit Materie	80
3.7.2	Relevanz von Störstrahlung für bestimmte Detektortypen.....	84
3.8	Zusammenfassung	86
4	Simulationsbasierte Machbarkeitsbetrachtungen für die Myonen-basierte Bildgebung von Behältern für hochradioaktive Abfälle und eingeschlossenen Inventaren	89
4.1	Machbarkeitsbetrachtungen für einen detaillierten Transport- und Lagerbehälter für verglaste Abfälle in Anlehnung an den Typ CASTOR® HAW 28M.....	90
4.1.1	Entwicklung eines realitätsnahen Behälters für verglaste radioaktive Abfälle und dessen Eigenschaften.....	90
4.1.2	Informationen zu den Simulationen und zur Darlegung der zu untersuchenden Fragestellungen.....	94
4.1.3	Projektionsbilder in Abhängigkeit der Myonenenergie.....	97
4.1.4	Projektionsbilder in Abhängigkeit der Lage der abweichenden Kokille im Behälter und relativ zur Richtung der einfallenden Myonen.....	102
4.1.5	Betrachtung der Erkennbarkeit einer Restverfüllung	106
4.1.6	Auswirkungen des Startwertes von Generatoren zur Erzeugung von Pseudozufallszahlen	108
4.1.7	Zusammenfassung	110
4.2	Vergleich von Geant4- und MCNP-basierten Simulationsergebnissen für einen generischen TLB in Anlehnung an den Typ CASTOR® V/19 ..	111
4.2.1	Beschreibung eines generischen Modells in Anlehnung an den TLB vom Typ CASTOR® V/19	112
4.2.2	Beschreibung der Simulation	115
4.2.3	Vergleich der Simulationsergebnisse	115

4.3	Simulationsergebnisse für einen generischen TLB für bestrahlte Brennelemente von DWR	118
4.4	Betrachtung der Nutzbarkeit von KI-Methoden im Kontext der Myonen-gestützten Bildgebung	120
4.4.1	Ergebnisse.....	122
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	125
A	Anhang A: Übersicht über die Behälterinventare einzelner Zwischenlager für hochradioaktive Abfälle und Brennelemente	155
B	Anhang B: Simulationsergebnisse für detailliertes Behältermodell für verglaste radioaktive Abfälle.....	157
B.1	Simulationsergebnisse für Kokille mit ID 5 ohne Restverfüllung	158
B.2	Simulationsergebnisse für Kokille mit ID 5 mit Restverfüllung	167
B.3	Simulationsergebnisse für Kokille mit ID 12 ohne Restverfüllung	176
B.4	Simulationsergebnisse für Kokille mit ID 12 mit Restverfüllung	185
B.5	Simulationsergebnisse für Kokille mit ID 19 ohne Restverfüllung	194
B.6	Simulationsergebnisse für Kokille mit ID 19 mit Restverfüllung	203
B.7	Simulationsergebnisse für Kokille mit ID 26 ohne Restverfüllung	212
B.8	Simulationsergebnisse für Kokille mit ID 26 mit Restverfüllung	221

1 **Einleitung**

Materialien können durch Aktivierung (z. B. mit Neutronen) oder Kontamination (z. B. Anhaftung radioaktiver Partikel) radioaktiv werden. Prinzipiell kann Radioaktivität gewünscht sein, beispielsweise wenn die von radioaktiven Materialien ausgehende Strahlung zielgerichtet für medizinische Zwecke oder für Materialprüfungen genutzt werden soll. In den allermeisten Fällen ist sie allerdings ein unerwünschtes Nebenprodukt, das insbesondere in der kerntechnischen Industrie durch den Betrieb von Reaktoren, aber auch in der Forschung, entsteht. Bei geringfügiger Kontamination können ggf. durch den in der Strahlenschutzverordnung geregelten Verwaltungsakt der Freigabe Materialien aus dem Geltungsbereich des Atom- bzw. Strahlenschutzrechts entlassen und dem konventionellen Wertstoffkreislauf zugeführt werden /SSV 24/. Zudem besteht die Möglichkeit einer Nachnutzung von (kontaminierten) Stoffen und Gegenständen im Geltungsbereich des Atom- bzw. des Strahlenschutzgesetzes. Sind allerdings weder die Voraussetzungen für eine Freigabe erfüllt, noch eine Nachnutzung möglich, sind die Stoffe und Gegenstände als radioaktiver Abfall zu behandeln und perspektivisch in ein geeignetes Endlager für radioaktive Abfälle zu überführen. Dies trifft insbesondere auf hochradioaktive Abfälle zu, zu denen insbesondere auch bestrahlte Brennelemente und radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung gehören /BMUV 23/.

Im Regelfall werden bestrahlte Brennelemente in Deutschland nach ihrer Nutzung zunächst für mindestens fünf Jahre in Nasslagerbecken aufbewahrt, bevor sie in geeignete Transport- und Lagerbehälter (TLB) eingelagert und anschließend in ein Zwischenlager (Trockenlagerung) verbracht werden. Dort verbleiben sie bis zur Inbetriebnahme eines Endlagers für hochradioaktive (wärmeentwickelnde) Abfälle. In § 6 Abs.5 des Atomgesetzes (AtG) wird festgehalten, dass die Aufbewahrung von Kernbrennstoffen in (nicht-staatlichen) kerntechnischen Anlagen (hierzu gehören auch die Zwischenlager) auf 40 Jahre ab Beginn der ersten Einlagerung eines Behälters befristet sein soll. Eine Verlängerung des Aufbewahrungszeitraums darf zudem nur aus unabweisbaren Gründen¹ und nach der vorherigen Befassung des Deutschen Bundestages erfolgen² /ATG 25/.

¹ Unabweisbare Gründe liegen vor, wenn weiterhin ein Bedarf für eine Zwischenlagerung besteht. Dieser Grund ist insbesondere dann gegeben, wenn die eingelagerten TLB nicht an ein Endlager übergeben werden können.

² Diese Voraussetzungen sind für die Aufbewahrung von Kernbrennstoffen in dezentralen Zwischenlagern heranzuziehen.

Neben den zwei zentralen Zwischenlagern (Zwischenlager Ahaus und Brennelemente-Zwischenlager Gorleben (BZG)), dem Zwischenlager Nord (ZLN), dem Zwischenlager Jülich werden zwölf standortnahe dezentrale Zwischenlager betrieben. Für die zentralen Zwischenlager laufen die erteilten Genehmigungen zwischen dem Jahr 2034 (BZG /BASE 23/) und dem Jahr 2039 (ZLN /BASE 25a/) aus. Bezogen auf die standortnahen Zwischenlager wird das Brennelemente-Zwischenlager Lingen im Jahr 2042 das erste sein, dessen Genehmigung nach aktuellem Stand auslaufen wird /BASE 25b/.

In § 1 Abs. 5 Standortauswahlgesetz wurde für die Festlegung des Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle das Jahr 2031 angestrebt /SAG 23/. In einem Positionspapier der Entsorgungskommission (ESK) aus dem Jahr 2023 prognostiziert die ESK für das Genehmigungsverfahren und die Errichtung für ein solches Endlager von etwa 50 Jahre /ESK 23a/. Für die Einlagerungsperiode wird zudem mit einem Zeitraum von 30 Jahren gerechnet (siehe auch /BGZ 25/), so dass insgesamt eine Zwischenlagerung von bis zu 80 Jahren für einen nennenswerten Teil der TLB erwartet wird /ESK 23a/. Neuere Abschätzungen der für die Standortsuche verantwortlichen Bundesgesellschaft für Endlagerung gehen davon aus, dass die Standortentscheidung zwischen 2046 und 2068 getroffen werden kann /SEI 24/, wodurch sich unter Berücksichtigung der ESK-Abschätzungen die behälterabhängige Notwendigkeit einer Zwischenlagerung auf bis zu 115 Jahren verlängern könnte. Eine verlängerte Zwischenlagerung – d. h. eine über 40 Jahre hinausgehende Zwischenlagerung – ist somit für den Großteil der bestrahlten Brennelemente (und ebenso für verglaste radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung) unvermeidbar. Deutschland steht mit den Herausforderungen, die eine verlängerte Zwischenlagerung nach sich zieht, nicht allein. Auch in anderen Ländern, wie z. B. den Vereinigten Staaten von Amerika, Schweden, Frankreich oder Japan, ist absehbar, dass eine verlängerte Zwischenlagerung notwendig sein wird. Obschon landesspezifische Randbedingungen die jeweiligen Herausforderungen wesentlich beeinflussen, verspricht eine internationale Zusammenarbeit Vorteile, so dass sich beispielsweise Netzwerke wie das *Extended Storage Collaboration Project* (ESCP) gebildet haben.

Für eine weitere, über die 40 Jahre hinausgehende Aufbewahrung ist eine Genehmigung erforderlich. In dem zugehörigen Genehmigungsverfahren ist der Nachweis zu erbringen, dass – auch hinsichtlich der TLB und der eingelagerten Inventare – die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (W&T) erforderliche Schadensvorsorge und nach neuen Erkenntnissen erforderliche Sicherung gewährleistet sind. Die zuständigen Genehmigungsbehörden und weitere Beteiligte haben hierfür vorab festzulegen, welche

Nachweise zu erbringen sind und wie diese (z. B. hinsichtlich Konzept und Technik) erbracht werden können.

Der bis dato angenommene Zeitraum von 40 Jahren wurde auch für die Konzepte und Designs, die den TLB zugrunde liegen, herangezogen. Eine längere Aufbewahrung der Inventare in diesen TLB ist grundsätzlich möglich, sofern durch eine geeignete Nachweisführung sichergestellt werden kann, dass die Sicherheitsanforderungen an diese TLB auch über einen längeren Aufbewahrungszeitraum erfüllt werden.

Die eingelagerten TLB sind regelmäßig zu prüfen und zu untersuchen, um nachzuweisen, dass grundlegende Schutzziele wie der sichere Einschluss der Radioaktivität und die sichere Einhaltung der Unterkritikalität jederzeit erfüllt sind.

Für die Prüfung der Behälter und der eingelagerten Inventare kann auf eine Vielzahl technischer Messverfahren zurückgegriffen werden. Im Zuge der verlängerten Zwischenlagerung besteht derzeit ein großes Interesse an innovativen zerstörungsfreien Prüfverfahren, mit denen sowohl die Behälterintegrität als auch der Zustand der eingelagerten Inventare (oftmals mit höherer Präzision bzw. Zuverlässigkeit im Vergleich zu etablierten Verfahren) untersucht bzw. eingeschätzt werden können. Zu diesen innovativen Messverfahren, die sich derzeit in unterschiedlichen Reifestadien befinden, gehören beispielsweise die Ultraschallprüfung mit geführten Wellen und die Myonen-gestützte Bildgebung (Myographie).

Im vorliegenden Bericht werden zunächst in Kapitel 2 zerstörungsfreie Verfahren zur Prüfung von Behältern und Inventaren betrachtet. Ausgehend von regulatorischen Randbedingungen und einer Darlegung des Prüfbedarfs unter Berücksichtigung von Alterungsmechanismen werden hierzu im Anschluss etablierte Prüfverfahren vorgestellt und deren Anwendungen diskutiert. Zudem wird im Zuge der Auseinandersetzung mit Alterungsmechanismen auf Herausforderungen eingegangen, die für eine verlängerte Zwischenlagerung relevant sind.

In Kapitel 3 liegt der Fokus auf der Myonen-gestützten Bildgebung. Ausgehend von einer detaillierten Darlegung des messtechnischen Konzepts werden grundlegende Bildgebungsansätze dargelegt und etablierte Rekonstruktionsverfahren vorgestellt. Darüber hinaus werden geeignete Detektionsverfahren (auch unter Berücksichtigung von Störstrahlung) vorgestellt, Einsatzfelder der Myographie skizziert und aktuelle Forschung- und Entwicklung (F&E) betrachtet.

In Kapitel 4 werden simulationsbasierte Machbarkeitsbetrachtungen betrachtet. Hierbei wird einerseits untersucht, inwieweit für einen TLB für verglaste radioaktive Abfälle partiell gefüllte Kokillen erkannt werden können. Andererseits werden, anhand von TLB für Brennelemente eines DWR, Simulationsergebnisse mehrerer Monte-Carlo-Codes (MCNP, Geant4 und FLUKA) miteinander verglichen.

Der Bericht endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 5.

Der vorliegende Bericht ist das Ergebnis eines Eigenforschungsvorhabens, das mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) unter der Forschungskennzahl 4723E03290 durchgeführt wurde.

2 Die zerstörungsfreie Prüfung von Behältern- und Inventaren für hochradioaktive Abfälle und bestrahlte Brennelemente

In diesem Kapitel werden zerstörungsfreie Prüfverfahren thematisiert, die sich für die Behälter- und Inventarprüfung bereits etabliert haben oder derzeit erforscht und entwickelt werden. Zur Darlegung des Kontexts wird zunächst ein Überblick über die unterschiedlichen Behältertypen und deren Verwendungen in den nationalen Zwischenlagern gegeben (siehe Abschnitt 2.1). Im Anschluss werden wesentliche regulatorische Rahmenbedingungen für die Behälter- und Inventarprüfung zusammengefasst und Schwerpunkte der Behälterprüfungen identifiziert (siehe Abschnitt 2.2). Daraufhin werden wesentliche Alterungsmechanismen erläutert und zudem die Auswirkungen einer verlängerten Zwischenlagerung auf die Relevanz dieser Alterungsmechanismen eingeschätzt (siehe Abschnitt 2.3). Darauffolgend werden etablierte Messverfahren für die zerstörungsfreie Prüfverfahren betrachtet (siehe Abschnitt 2.4). Neben einer Beschreibung des Messverfahrens werden insbesondere auch Anwendungen im Kontext wiederkehrender Prüfungen (WKP) an TLB und Inventaren betrachtet. Abschließend werden in Abschnitt 2.5 Aktivitäten zur Entwicklung innovativer zerstörungsfreier Prüfverfahren betrachtet.

2.1 Übersicht über die für die Zwischenlager genutzten Behälter und Abschätzung ihrer Anzahl

In den zwei zentralen Zwischenlagern, dem Zwischenlager Nord, dem Zwischenlager Jülich und den vierzehn dezentralen Zwischenlagern (einschließlich des sich derzeit im Genehmigungsverfahren befindlichen Zwischenlagers in Brunsbüttel) werden zurzeit 17 unterschiedliche Behältertypen zwischengelagert, die in Tab. 2.1 zusammengestellt sind. Diese Zusammenstellung zeigt zunächst deutliche Unterschiede bezüglich der Anzahl einzelner Behältertypen. Beispielsweise tragen die Behälter vom Typ CASTOR® V/19 und vom Typ CASTOR® THTR/AVR mehr als die Hälfte zur Behältergesamtanzahl bei. Zudem unterscheiden sich die verschiedenen Behälter auch hinsichtlich der Größe bzw. der Masse. Aus Sicht der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) innenliegender Komponenten, nimmt die Verfahrenseignung mit zunehmender Behältergröße bzw. -masse in der Regel deutlich ab, so dass insbesondere ein Interesse an Messverfahren für massive und dickwandige Behälter besteht. Hierzu gehören aus nationaler Sicht neben dem CASTOR® V/19 auch der CASTOR® V/52, der CASTOR® HAW 20/28 CG bzw. 28M und der CASTOR® 440/84.

Tab. 2.1 Übersicht über die in den Zwischenlagern eingelagerten Behältertypen
(Stand: Ende 2025)

Detailinformationen zu den Belegungen der einzelnen Zwischenlager sind dem Anhang A zu entnehmen. Zur groben Kategorisierung des Gewichts (jeweils im beladenen Zustand) werden die drei Klassen „schwer“ (> 100 Mg), „mittel“ (> 10 Mg und < 100 Mg) und „leicht“ (< 10 Mg) genutzt.

Behältertyp	Gewichtskategorie	Anzahl
CASTOR® V/19	schwer	561
CASTOR® THTR/AVR	mittel	457
CASTOR® V/52	schwer	293
MOSAİK® (für Kernbauteile)	leicht	138
CASTOR® HAW 20/28 CG	schwer	79
CASTOR® 440/84	schwer	61
CASTOR® HAW 28M	schwer	38
TN 24 E	schwer	38
CASTOR® MTR 2	mittel	18
CASTOR® 440/84 mvK	schwer	16
TN 85	schwer	12
CASTOR® KNK	mittel	8
CASTOR® KRB-MOX	mittel	3
CASTOR® IIa	schwer	1
CASTOR® Ic	schwer	1
TS 28V	schwer	1
Summe:		1.725

2.2 Darlegung der regulatorische Randbedingungen und der Anforderungen an Transport- und Lagerbehälter

Das in Deutschland angewendete kerntechnische Regelwerk umfasst eine Vielzahl an Gesetzen, Verordnungen, Vorschriften, Regeln und weiterer Dokumente.

Die kerntechnische Regelwerkspyramide (siehe Abb. 2.1) stellt dieses Regelwerk zum einen in einer hierarchischen Struktur dar, zum anderen gibt sie sowohl Auskunft über die erlassenden Behörden bzw. Institutionen als auch über die jeweiligen Verbindlichkeiten der Vorschriften bzw. Regeln.

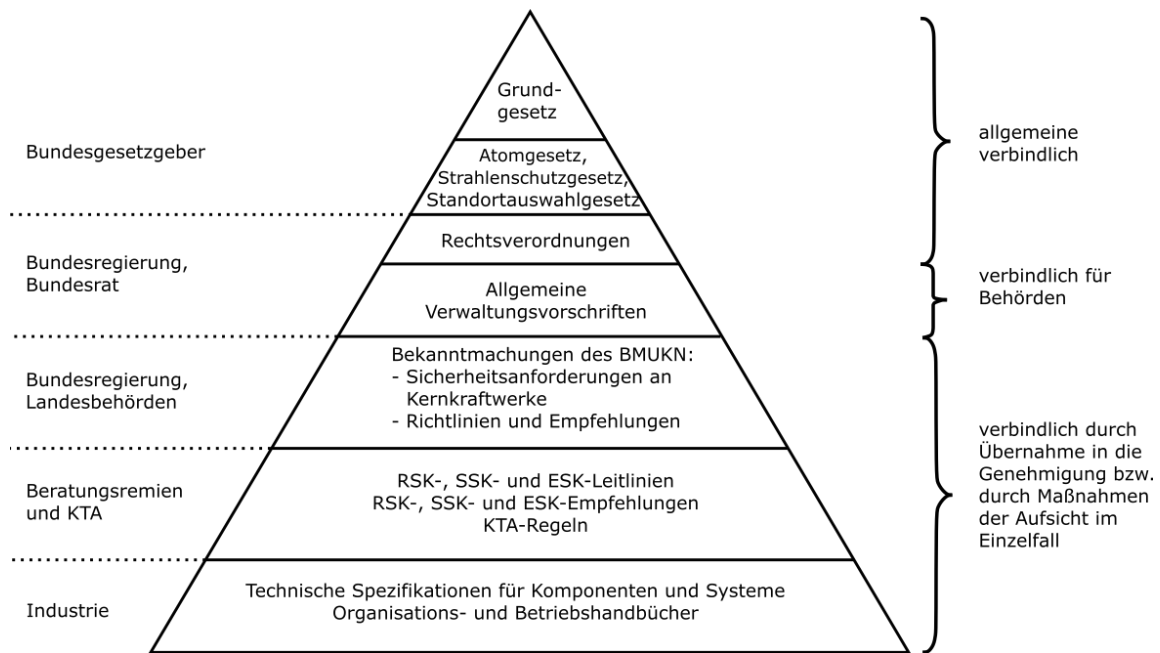


Abb. 2.1 Nationale Regelwerkspyramide

Die kerntechnische Regelwerkspyramide ist eine zusammenfassende Darstellung der Vorschriften bzw. Regelungen, der erlassenden Behörden bzw. Gruppen (links) und der jeweiligen Verbindlichkeiten (rechts).

Von übergeordneter Bedeutung ist § 6 des AtG, in dem die Genehmigung zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen geregelt ist. Genehmigungsbedürftig sind nach § 6 Abs. 1 AtG die nicht-staatliche Aufbewahrung von Kernbrennstoffen und nach § 6 Abs. 3 AtG die Aufbewahrung von bestrahlten Brennelementen aus der Energieerzeugung auf bereits existierenden Kernkraftwerksgeländen (dezentrale Zwischenlager). In § 6 Abs. 2 AtG werden die Bedingungen aufgeführt, bei deren Erfüllung eine Genehmigung zu erteilen ist. Zu diesen gehört beispielsweise eine nach dem Stand von W&T erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Aufbewahrung der Kernbrennstoffe. Diese Bedingung richtet sich sowohl an das Zwischenlager als solches als auch an die eingelagerten Inventare und TLB. Es ist somit im Genehmigungsverfahren ein Konzept darzulegen, das den kontinuierlichen bzw. wiederkehrenden Nachweis der Einhaltung der Schutzziele erlaubt. Grundsätzlich soll die Genehmigung für nicht-staatliche Zwischenlager auf 40 Jahre befristet werden.

Die sicherheitsrelevanten Anforderungen für die trockene Zwischenlagerung werden in einer zentralen Empfehlung der ESK mit dem Titel „Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern“ unter Berücksichtigung des Stands von W&T konkretisiert /ESK 23b/. Hierzu

werden zunächst grundlegende Schutzziele festgehalten, an denen sich die vorzusehenden Maßnahmen zu orientieren haben:

- Sicherer Einschluss der radioaktiven Stoffe.
Dies ist durch den Behälter und weiteren (innenliegenden) Barrieren, z. B. die Brennstoffmatrix und Hüllrohre bei intakten Brennelementen oder die Glasmatrix und die Kokillen bei verglasten Spaltproduktlösungen), zu gewährleisten.
Für den Nachweis des sicheren Einschlusses der radioaktiven Stoffe sind neben dem Zusammenwirken der Barrieren auch nuklidspezifische Eigenschaften zu betrachten.
- Sichere Abfuhr der Zerfallswärme
Dies ist beispielsweise durch den Behälter und dessen Aufbau (z. B. Kühlrippen) zu gewährleisten. Durch die Wärmeabfuhr soll insbesondere sichergestellt werden, dass keine Behältertemperaturen auftreten, die sich negativ auf die Strahlungsabschirmung oder die Dichtheit des Behälters auswirken könnten.
- Sichere Einhaltung der Unterkritikalität
Dies ist beispielsweise durch Beschränkungen des einzulagernden Inventars (z. B. hinsichtlich der Anreicherung oder des Abbrands), durch die Geometrie des Tragkorbs im TLB oder durch Neutronenmoderatoren/Neutronenabsorbern zu gewährleisten.
- Vermeidung unnötiger Exposition, Begrenzung und Kontrolle der Exposition des Betriebspersonals der Bevölkerung

In den ESK-Leitlinien werden darüber hinaus auch grundlegende Anforderungen an WKP und Überwachungsmaßnahmen dargelegt, die sinngemäß auch auf TLB zu übertragen sind. Hervorgehoben wird die kontinuierliche Überwachung der Funktionstüchtigkeit der Doppeldeckel-Dichtsysteme.

Die Ausgestaltung der WKP erfolgt im Genehmigungs- bzw. Aufsichtsverfahren. Zu den WKP an Behältern gehören insbesondere

- die Dichtheitsüberwachung des Behälters,
- die Temperaturüberwachung,
- die Dosisleistungsüberwachung,
- die Kontaminationsüberwachung,

- die Prüfung der äußeren mechanischen Unversehrtheit und
- Sonderprüfungen.

2.3 Materialschädigende Prozesse an Behältern und eingelagerten radioaktiven Inventaren

Behälter für bestrahlte Brennelemente und wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle müssen mehrere passive Sicherheitsfunktionen erfüllen. Hierzu gehören:

- **Einschluss der radioaktiven Stoffe**
Der Behälter hat eine Barrierefunktion und muss in Ergänzung zu weiteren Barrieren (hierzu gehören für bestrahlte und intakte Brennelemente die Brennstoffmatrix und die Hüllrohre) den Austritt radioaktiver Stoffe verhindern. Dies wird beispielsweise durch ein Doppeldeckeldichtsystem in Verbindung mit einer (kontinuierlichen) Druckmessung für den zwischenliegenden Bereich gewährleistet.
- **Sichere Abfuhr der Zerfallswärme**
Das Design der Behälter muss sicherstellen, dass Behälter und Inventare nur zulässige Temperaturen erreichen. Hierzu muss ein auslegungsgerechter Wärmetransport sichergestellt werden, der beispielsweise durch Kühlrippen gewährleistet werden kann.
- **Sichere Einhaltung der Unterkritikalität**
Eine Unterkritikalität kann durch mehrere Vorkehrungen sichergestellt werden. Hierzu gehören beispielsweise eine festgelegte geometrische Anordnung der radioaktiven Stoffe (z. B. durch einen Tragkorb im Falle bestrahlter Brennelemente), die Nutzung von Neutronenabsorbern im Tragkorb oder eine Begrenzung der Neutronenmoderation im Behälterinneren (z. B. durch möglichst geringe Wassermengen).
- **Vermeidung unnötiger Expositionen**
Durch den Behälter und dessen Geometrie muss sichergestellt werden, dass unnötige Expositionen vermieden werden. Dies wird insbesondere durch eine ausreichende Abschirmung der ionisierenden Strahlung gewährleistet. Dies wird einerseits erreicht durch dickwandige Strukturen, andererseits durch Neutronenabsorber im Behältermantel sowie ggfs. im Boden- bzw. Deckelbereich des Behälters.

Zudem muss für TLB gewährleistet sein, dass sie nach einer vorgegebenen Lagerungsperiode auch weiterhin transportierbar sind. Dies stellt beispielsweise Ansprüche an Tragzapfen und die grundsätzliche Behälterintegrität.

Alterungsprozesse bergen das Potenzial, sich negativ auf die multifunktionalen Schutzbarrieren des Behälters auszuwirken. Zudem nehmen Alterungsprozesse auch Einfluss auf das eingeschlossene radioaktive Inventar und können sich negativ auf die Inventarintegrität auswirken. Zur Darlegung des Prüfbedarfs ist es daher sinnvoll, sich zunächst mit Alterungseffekten und typischen Strukturgrößen von Alterungseffekten auseinanderzusetzen. Zu Illustrationszwecken orientiert sich diese Betrachtung im Folgenden an TLB des Typs CASTOR®, die von der Gesellschaft für Nuklear-Service mbH hergestellt werden. Hinsichtlich der eingelagerten Inventare werden generische Brennelemente und in Kokillen eingeschlossene verglaste radioaktive Abfälle für die Relevanzbetrachtung herangezogen.

2.3.1 Generische Behälter und Inventarbeschreibung

Die Sicherheitsfunktionen, die ein Behälter zu erfüllen hat, nehmen bestimmenden Einfluss auf dessen Design, so dass behälterübergreifend grundlegende Aspekte zu erkennen sind. Hierzu gehören:

- **Dickwandige Monolithstruktur**
Der Monolith hat eine hohlzylindrische Grundstruktur, die auf der Unterseite geschlossen ist. Als Material wird häufig ein korrosionsbeständiger Stahl oder Sphäroguss genutzt.
- **Kühlrippen auf der Außenseite des Behälters**
- **Tragkorb**
- **Doppeldeckeldichtungssystem**
- **Neutronen-absorbierende Elemente in der Behälterwand und im Deckelsystem**
- **Transportvorkehrungen, z. B. in Form optionaler Puffer oder Tragezapfen**

Materialschädigungen an einem Behälter oder am Inventar, die z. B. auf Alterungsprozesse zurückzuführen sind, haben grundsätzlich das Potenzial, sich negativ auf Funktion und Gebrauchsdauer auszuwirken.

Alterungsprozesse an dem Behälter oder am Inventar können auf unterschiedliche Parameter bzw. physikalische/chemische Prozesse zurückgeführt werden. Im Folgenden werden wesentliche Alterungsprozesse betrachtet, die sich im Kontext der Zwischenlagerung negativ auf die Schutzfunktionen bzw. die Transportierbarkeit der Behälter und auf den Zustand der Inventare auswirken können.

2.3.2 Mechanische Verschleißerscheinungen

Mechanischer Verschleiß kann durch spezifikationsüberschreitende Krafteinwirkungen verursacht werden. Die Behälter unterliegen grundsätzlich keiner tribologischen Beanspruchung, ein mechanischer Verschleiß ist aber z. B. aufgrund von Transportvorgängen und damit verbundener Handhabungen (z. B. Befestigung an einem Kran oder Aufsetzen des Behälters auf den Boden) möglich. Diese können zu einem lokalen Abrieb an Kontaktflächen (z. B. an den Tragezapfen oder am Tragkorb) aufgrund von Mikrobewegungen des eingeschlossenen Inventars relativ zur Tragkonstruktion) führen. Da diese Prozesse zeitlich allerdings nur sehr begrenzt stattfinden, sind die damit verbundenen Verschleißerscheinungen praktisch zu vernachlässigen.

Als Sekundäreffekt zu thermischen Prozessen ist ein mechanischer Verschleiß an Behälterstrukturen grundsätzlich möglich. Die Relevanz hängt stark von den Komponenten und deren Konstruktion sowie von der Lage im Behälter ab. Aufgrund der vergleichsweise hohen Temperaturen und der Konstruktion ist der Tragkorb potenziell am stärksten betroffen. Grundsätzlich ist ein mechanischer Verschleiß als Sekundäreffekt und nicht als lebensdauerbestimmend einzuschätzen.

Für das eingelagerte Inventar ist mechanischer Verschleiß aufgrund fehlender Relativbewegungen (Ausnahme: Transportvorgänge) und konstanter Lastsituationen praktisch zu vernachlässigen. Ein Schwing-/Reibverschleiß (engl.: *fretting*) an den Hüllrohren (im Falle von Brennelementen) ist ursächlich auf den Betrieb und die Nasslagerung zurückzuführen. In der trockenen Zwischenlagerung ist keine wesentliche Verschlechterung zu erwarten.

2.3.3 Korrosion

Korrosion kann durch eine Vielzahl an Faktoren ausgelöst oder begünstigt werden. Hierzu gehören beispielsweise Feuchtigkeit, Materialunreinheiten, elektrochemische Effekte oder chemische Zersetzungsprozesse.

Als oberflächennaher Effekt kann Korrosion auf der Mantelfläche des monolithischen Behälters auch unter Berücksichtigung des durch die Kühlrippen verursachten Höhenprofils leicht durch Sichtprüfungen erkannt werden. Zur Erkennung von Korrosion auf der Unterseite des Behälters ist ggf. der Behälter als Ganzes anzuheben. Auch hier kann durch (fernhandelte) Sichtprüfungen Korrosion leicht erkannt werden. Grundsätzlich verläuft atmosphärische Korrosion langsam, salzhaltige Luft (z. B. in Meeresnähe) kann den Prozess allerdings deutlich beschleunigen.

Korrosionen im Innenbereich des Behälters sind hingegen aufgrund der als gering anzunehmenden Korrosionsstärke deutlich schwerer zu erkennen. Infolge ihrer Sicherheitsfunktionen ist Korrosion an Metalldichtungen (sowohl lokale Korrosion als auch Kontaktkorrosion) sicherheitsrelevant. Für den Tragkorb nehmen die Restfeuchte und Verunreinigungen Einfluss auf die Relevanz von Korrosion. Ein hierfür zu berücksichtigender Effekt ist die Materialzusammensetzung. Zudem sind lokale Ungenzen und Materialübergänge (z. B. Schweißnähte) im Allgemeinen anfälliger für Korrosion als homogene Flächen. Durch das Design und die Materialauswahl (z. B. Beschichtungen und Nutzung korrosionsbeständiger Materialien) und die Auslegungsspezifikation (z. B. beschränkte Akzeptanz für Restfeuchte und Füllung mit inertem Gas), kann die Relevanz für Korrosion im Innenbereich deutlich reduziert werden. Auch für das eingeschlossene Inventar stellt eine zwischenlagerbedingte Korrosion grundsätzlich keinen limitierenden Faktor dar.

2.3.4 Strahlungsbedingte Alterungseffekte und daraus resultierende potenzielle Sekundärschädigungen

Strahlungsbedingte Alterungseffekte sind zuvorderst auf die im Inventar eingeschlossene Aktivität zurückzuführen. Sofern die Schutzfunktionen des Inventars (z. B. Dichtheit der Hüllrohre oder der Kokillen) intakt sind und radioaktive Korrosionsprodukte auf den Außenseiten der Brennstäbe (engl.: *Chalk River Unidentified Deposits, CRUD*) vernachlässigt werden, können nur Neutronen und Gammastrahlung mit dem Behälter wechselwirken, da die sonstige partikelgetragene Radioaktivität lokal abgeschirmt wird. Aufgrund der hohen Reichweiten der Neutronen- und Gammastrahlung können materialschädigende Prozesse grundsätzlich in allen Behälterkomponenten stattfinden, aufgrund der Abschirmwirkung nimmt die Relevanz allerdings nach außen ab.

Sofern die Schutzfunktionen des Inventars nicht mehr erfüllt sind (z. B. durch lokale Schäden an einem Hüllrohr) oder wenn sich korrosionsbedingte Ablagerungen auf der

Außenseite der Brennstäbe angelagert haben, sind zudem auch Wechselwirkungen freigesetzter Alpha- bzw. Beta-Teilchen mit Teilen des Behälters denkbar.

Kurzreichweitige Alpha- und Beta-Strahlung können nur lokal zu Materialschädigungen führen, z. B. durch Radiolyse (chemische Zersetzungen) von Wasser (Restfeuchte). Zur Quantifizierung der Radiolyse wird der sogenannte G-Wert herangezogen, der die Anzahl freigesetzter Moleküle, Atome, Elektronen bezogen auf eine 100 µm-Wegstrecke quantifiziert. So weist beispielsweise Wasser für den Beschuss mit Alpha-Teilchen mit einer Energie von 5 MeV einen G-Wert für H₂ von etwa 1,2 auf. Dies entspricht etwa 6E4 H₂-Molekülen bis zur vollständigen Abbremsung der Alpha-Teilchen. Der G-Wert hängt von der Strahlungsart und dem betroffenen Material ab. Wasser, organische Stoffe und Polymere sind von Radiolyse betroffen, für Metalle ist der Effekt hingegen zu vernachlässigen. Nichtsdestotrotz können auch Wechselwirkungen der Partikel-gebundenen Strahlungen mit Metallen zu Schäden führen, beispielsweise in Form von Gitterdefekten. Im Kontext der Zwischenlagerung ist die Relevanz von Schäden an den Behältern ausgelöst durch Alpha- und Beta-Strahlung allerdings als gering einzuschätzen.

Für die Gammastrahlung ist, bezogen auf die typischerweise eingesetzten Metalle, die emittierte Gammaenergie zu gering, um wesentliche Schäden zu verursachen. Hingegen sind für Polymere – hierzu gehört u. a. Polyethylen (genutzt für die Neutronenabsorption) oder elastische Dichtmaterialien zur Fugenverschiebung) – die Energien der Gammastrahlung ausreichend, um Kohlenstoffketten aufzubrechen, wodurch ggf. neue Kreuzverbindungen entstehen können. Diese Prozesse wirken sich nachteilig auf die Elastizität aus und können zu einer Materialversprödung führen. Zudem ist lokal eine Materialabspaltung denkbar, was Radiolyse begünstigen kann. Direkt oder indirekt freigesetzter Wasserstoff kann zudem in benachbarte Metalle eindringen und dort zu einer Versprödung führen. Auch ein Druckaufbau durch eine Gasbildung kann grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden. Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung hat untersucht, welchen Effekt Gammastrahlung mit einer Dosis bis zu 600 kGy auf sehr lange Molekülketten hat /KÖM 18/. Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass strukturelle Änderungen zwar beobachtet werden konnten, diese Änderungen sich aber nur geringfügig auf die Abschirmwirkung für Neutronen auswirken.

Das Strahlungsspektrum von *CRUD* (hierzu gehören insbesondere Metalloxide) kann alle Strahlungsarten umfassen. Die Anlagerung von *CRUD* (z. B. im Bodenbereich des Behälters) kann lokal Lochkorrosion begünstigen. Aufgrund des weitestgehend fehlen-

den Sauer- und Wasserstoffes und einer korrosionsbeständigen Nickelbeschichtung ist dies allerdings unwahrscheinlich.

2.3.5 Temperaturbedingte Alterungsprozesse

Hohe Temperaturen können plastische Verformungen bedingen. Für Gusseisen ist mit solchen z. B. ab einer Temperatur von etwa 400 °C zu rechnen. Solche hohen Temperaturen sind aber an den Behälteroberflächen nicht zu erwarten. Auch für die Tragkonstruktion sind thermisch-bedingte Verformungen grundsätzlich denkbar. Bei der Tragkonstruktion (Tragkorb) handelt es sich um ein verschweißtes und aus mehreren Materialien (unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten) zusammengesetztes Objekt, so dass Temperaturänderungen insbesondere in Bereichen der Schweißnähte Rissbildungen fördern können. Plastische Verformungen am Tragkorb könnten z. B. dazu führen, dass sich die Schachtdimensionen derart verändern, dass es zu einer mechanischen Krafteinwirkung auf das eingeschlossene Inventar kommt. Durch ungleichmäßige Verformungen könnten auch Scherkräfte auf die Brennelemente ausgeübt werden. Ein Bericht der *Nuclear Regulatory Commission* (NRC, USA) stuft thermische Alterungsprozesse an bohrtem Stahl allerdings als unwahrscheinlich ein /NRC 19/.

2.4 Etablierte Messverfahren für die zerstörungsfreie Behälter- und Inventarprüfung und deren Anwendungsgebiete

Im Folgenden werden etablierte Messverfahren für die ZfP von Behältern und Inventaren beschrieben und deren Anwendungsgebiete und somit deren praktische Limitierungen erläutert.

2.4.1 Optische Prüfung/Sichtprüfung

Die optische Prüfung oder auch Sichtprüfung ist die einfachste Art zerstörungsfrei zu prüfen. Sie basiert auf der Untersuchung eines Objekts oder Materials mit dem bloßen Auge oder unter Verwendung zusätzlicher sichtverbessernder Werkzeuge (z. B. Linsen, Fiber-Optik-Lichtleiter, Kameras und spezielle Lichttechnik /MEY 16/) zur Erhöhung der Prüfleistung (Auflösung).

Optische Prüfungen werden in verschiedenen Industriesektoren routinemäßig durchgeführt. Dazu gehören der Transportsektor, die Luftfahrt und der Energiesektor /MEY 13/. In kerntechnischen Anlagen werden Sichtprüfungen zur Inspektion von Druckbehältern

und Rohrleitungen durchgeführt, um Schäden, wie z. B. Risse, festzustellen. Auch in Bezug auf die Prüfung von Behältern für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle kann die optische Prüfung zur Erkennung von Rissen genutzt werden. Einer Studie zufolge konnten Risse mit einer Rissöffnungsverschiebung (engl.: *crack opening displacement*) von über 100 µm zuverlässig erkannt werden /MEY 13/. Die Rissöffnungsverschiebung gibt die Breite eines Risses an dem Punkt an, an welchem er die Oberfläche eines Materials durchbricht. Die mittlere Rissöffnungsverschiebung bei Spannungsrisskorrosionen beträgt allerdings nur 16 bis 30 µm, so dass diese praktisch mit optischen Prüfmethoden nicht effektiv nachgewiesen werden können /MEY 13/.

In einer Publikation des *Electric Power Research Institute* (EPRI, USA) wurde die Oberfläche eines kürzlich beladenen Lagerbehälters mit der eines zweiten Behälters verglichen, der zehn Jahre zuvor beladen wurde /EPRI 19/. Dabei konnten keine signifikanten Unterschiede oder Alterungseffekte festgestellt werden.

2.4.2 Wirbelstromprüfung

Die Wirbelstromprüfung (engl.: *Eddy Current Testing*) ist ein elektromagnetisches zerstörungsfreies Prüfverfahren für elektrisch leitende Materialien. Über eine mit Wechselstrom betriebene Prüfspule wird ein alternierendes Magnetfeld erzeugt, das im Prüfobjekt einen Kreisstrom induziert. Dieser Kreisstrom erzeugt ein sekundäres Magnetfeld, welches dem primären Magnetfeld entgegenwirkt und einen Abfall des Blindwiderstands in der Prüfspule zur Folge hat. Diese Änderung der Spulenimpedanz kann über die Spannung oder das Stromsignal gemessen werden und gibt so Auskunft über den Stromfluss und somit über die Leitfähigkeit im Prüfobjekt /GAR 11/. Die induzierten Wirbelströme verlaufen in erster Ordnung auf der Objektoberfläche, können das Objekt aber bis zu einer gewissen Tiefe durchdringen. Diese Eindringtiefe hängt von der elektrischen Leitfähigkeit des Prüfobjekts, der magnetischen Permeabilität und der Frequenz des Oszillatorsignals ab /MEY 16/. Typische Eindringtiefen liegen im Bereich weniger Millimeter. Das Prinzip der Erzeugung von Wirbelströmen ist in Abb. 2.2 dargestellt.

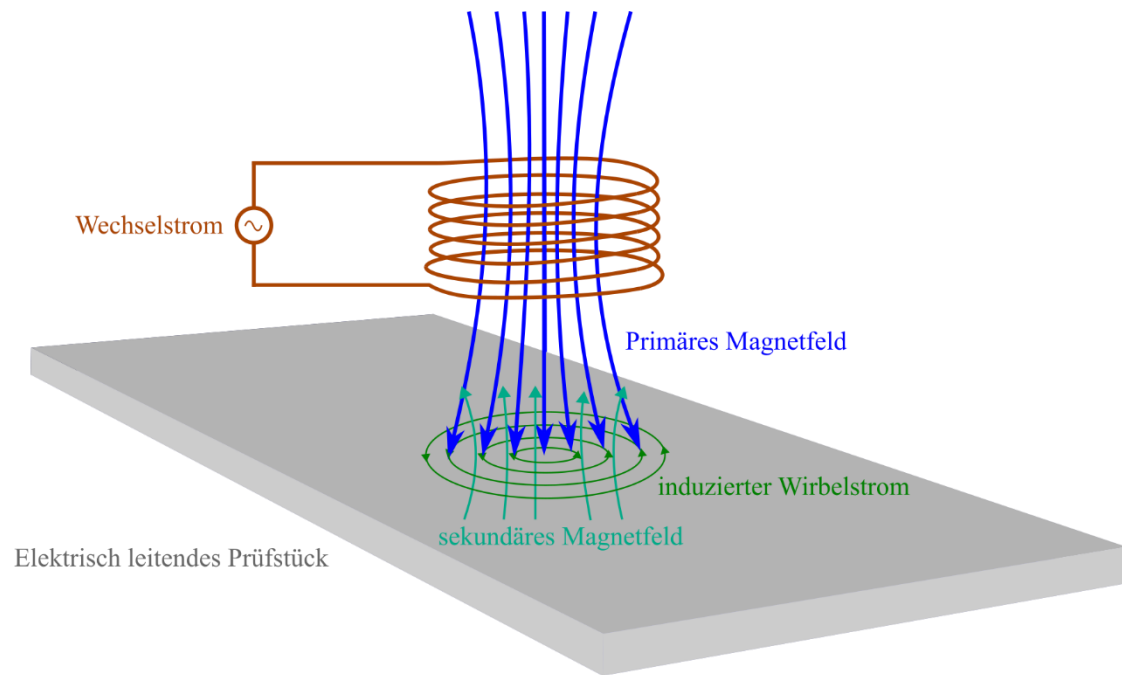


Abb. 2.2 Schematische Darstellung der Wirbelstromprüfung

Befinden sich Risse oder Fehlstellen auf der untersuchten Oberfläche, so wird der Wirbelstromfluss an diesen Stellen behindert, was einen Abfall der Flussdichte des sekundären Magnetfelds zur Folge hat. Infolgedessen ändert sich die Impedanz der Spule, und das Oszillatorsignal wird auf Basis der geänderten Impedanz moduliert. Mit Hilfe eines geeigneten Quadraturamplitudendemodulators kann das Signal des Defekts extrahiert werden /GAR 11/.

Der Einsatz von Wirbelstromprüfungen ist in der Industrie weitverbreitet. Es ist ein kostengünstiges und schnelles Verfahren. Die verwendeten Sensoren sind unempfindlich gegenüber Dreck, Staub, Feuchtigkeit und Öl und können in einem großen Temperaturbereich (bis zu 1.200 °C) betrieben werden /GAR 11/, /TIA 98/. Es findet praktisch in allen Bereichen Anwendung, in denen die Integrität von elektrisch leitenden Materialien überprüft werden muss.

Wirbelstromprüfungen werden auch zur Untersuchung von Behältern für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle eingesetzt. Im Fokus steht u. a. die Überprüfung von (oberflächennahen) Schweißnähten in Verbindung mit Spannungsrisskorrosionen /KUN 12/. Fehlstellen können mit einer hohen Genauigkeit diagnostiziert werden, um deren Lage,

Form und Größe zu quantifizieren sind aber weitere volumetrische Verfahren notwendig /EPRI 16/.

2.4.3 Schallemissionsprüfung

Die Schallemissionsprüfung ist ein passives Akustikprüfverfahren, das darauf beruht, den bei der Degradierung eines Objekts oder Materials erzeugten Schall zu detektieren. Wenn Material sich aufgrund von Hitze, Druck, Korrosion oder einer ausgeübten Kraft verschiebt, dehnt, ermüdet oder verformt wird, wird Energie freigesetzt, die sich in Form von elastischen Wellen kugelförmig im Material ausbreitet. Diese Schallwellen können mit dem menschlichen Gehör in der Regel nicht wahrgenommen werden, aber mit einem geeigneten Detektorsystem (i. d. R. bestehend aus einem oder mehreren piezoelektrischen Wandlern) erfasst werden. Eine schematische Darstellung einer einfachen Schallemissionsmessung ist in Abb. 2.3 gezeigt. Mit Hilfe zusätzlicher Detektoren kann die Quelle der Schallemissionen lokalisiert werden. Schallemissionsmessungen können nicht nur die Ereignisse aufzeichnen, die zum vollständigen Versagen einzelner Bauteile führen, sondern sind in der Lage, Vorboten dieses Ereignisses zu identifizieren oder den allgemeinen Zustand des Materials festzustellen und eröffnen so die Möglichkeit, Fehlfunktionen und Unfällen vorzugreifen. Vor der Messung entstandene Fehlstellen können allerdings nicht erkannt werden, es sei denn, sie emittieren weiterhin Schallwellen /EPRI 17a/.

Wird die Schallemissionsprüfung genutzt, um die strukturelle Integrität eines Materials zu beurteilen, spricht man von Bruchschallemission (engl.: *burst acoustic emission*). Die aufgenommenen Bruchereignisse können dabei in Relation zur Messzeit oder zur Last des Prüfstücks gesetzt werden, um dessen strukturelle Integrität zu bewerten /EPRI 17a/. Eine weitere mögliche Art der Prüfung ist die kontinuierliche Schallemission (engl.: *continuous acoustic emission*). Hier nimmt der Detektor Signale über einen längeren Zeitraum auf. Mit Hilfe von statistischen Analysemethoden wie z. B. der Wurzel aus der mittleren quadratischen Abweichung oder Frequenzanalysen (Fouriertransformation) können zeitabhängige Entwicklungen in der Materialstruktur untersucht werden.

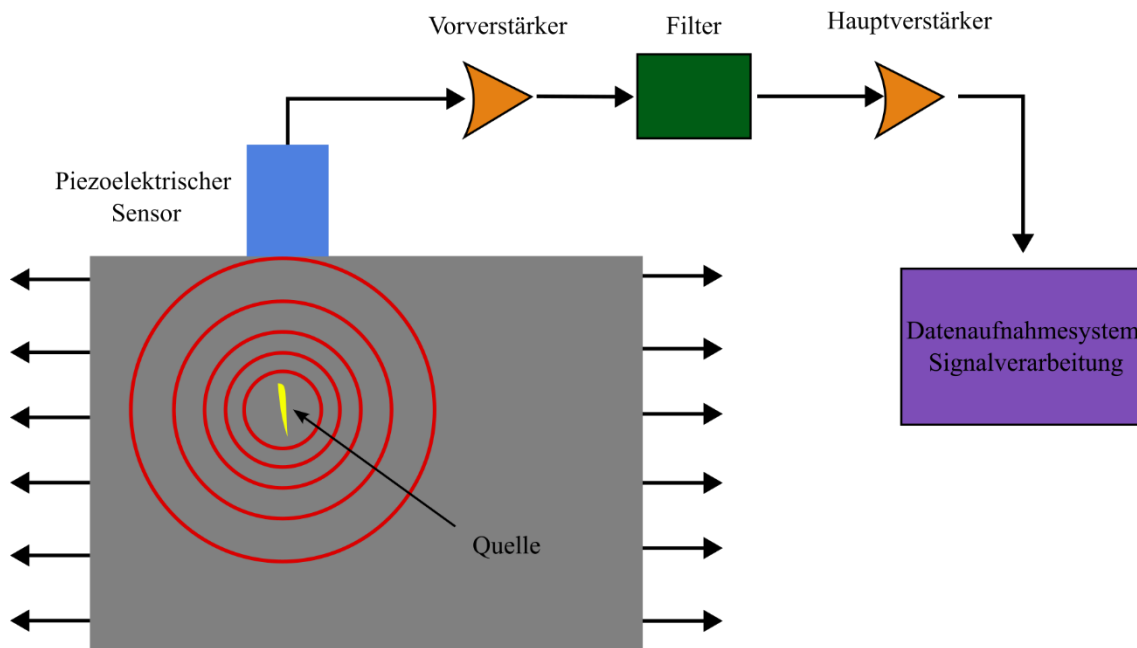


Abb. 2.3 Schematische Darstellung des Schallemissionsdetektionsprinzips

Schallemissionsprüfungen werden in zahlreichen Industriezweigen genutzt. Die Bruchschallemission wird u. a. zur Prüfung von Druckbehältern, Lagertanks, Anlagenrohrleitungen und Pipelines, Betonstrukturen und Gebäuden sowie Kränen und anderen Schwerlasthebegeräten genutzt. Kontinuierliche Schallemissionsprüfungen werden z. B. an Druckbehältern und zur Detektion von Ventilleckagen durchgeführt /EPRI 17a/, /KWO 01/.

Auch in der Nuklearindustrie sind Schallemissionsprüfungen unverzichtbar. Sie werden etwa zur Untersuchung von DWR /BEN 81/ oder von Absperrventilen /LEE 06/ verwendet.

2.4.4 Ultraschalluntersuchung

Die Ultraschalluntersuchung ist ein bewährtes Volumenverfahren, um Unregelmäßigkeiten in einem Bauteil zu erfassen. Bei der konventionellen Ultraschalluntersuchung werden Ultraschallwellen in ein Prüfstück emittiert, und ihre Wechselwirkung mit Fehlstellen wird genutzt, um Mängel zu erkennen und zu bewerten und so die Unversehrtheit des Prüfteils sicherzustellen. Eine Ultraschalluntersuchung kann entweder im Kontakt- oder im Immersionsverfahren durchgeführt werden. Im Kontaktverfahren wird der Ultraschallkopf direkt mit dem Prüfling/Werkstück in Kontakt gebracht, während beim Immersionsverfahren sowohl Ultraschallkopf als auch das zu prüfende Bauteil in ein Koppelmedium (z. B. Wasser) getaucht werden. Bei den meisten Kontaktprüfungen wird eine dünne

Schicht Kopplungsmittel auf die Prüffläche aufgetragen, um die Übertragung der Ultraschallwellen in das Material zu verbessern /HON 20/.

Ultraschallwellen werden in zwei Kategorien unterteilt: (i) Volumenwellen und (ii) geführte Wellen. Volumenwellen sind entweder Longitudinal- oder Scherwellen /ROS 00/. Bei den geführten Wellen gibt es eine größere Vielfalt, wobei die in der Ultraschalluntersuchung am häufigsten verwendeten Wellen Oberflächenwellen (Rayleigh) und Plattenwellen (Lamb) sind /DEC 14/. Geführte Wellen benötigen einen Wellenleiter zur Kanalisierung, d. h. eine bestimmte Geometrie wie eine Oberfläche oder eine plattenförmige Struktur, durch die die Welle geführt werden kann. Die meisten Ultraschalluntersuchungen werden mit Volumenwellen durch Longitudinal- oder Scherwellen durchgeführt. Unter bestimmten Bedingungen können sich diese beiden Wellenarten ineinander umwandeln. Bei Wechselwirkung mit einer Grenzfläche können Ultraschallwellen reflektiert, gebrochen, gebeugt oder gestreut werden. Ultraschallwellen werden auf unterschiedliche Weise erzeugt und empfangen. Die häufigste Art der Erzeugung und des Empfangs von Ultraschallwellen ist die Verwendung eines piezoelektrischen Wandlers, der zugleich als Sender und Empfänger genutzt wird. Andere Methoden zur Erzeugung von Ultraschallwellen sind elektromagnetische akustische Wandler /THO 19/, kapazitive mikromechanische Ultraschallwandler /RAM 10/, /LA 17/, magnetostriktive Wandler /KIM 15/ und Laser-Ultraschall (siehe Abschnitt 2.4.6) /HON 20/.

Das Verfahren ist in Abb. 2.4 schematisch dargestellt. Ein Pulsgenerator erzeugt ein elektrisches Signal, welches vom Prüfkopf (piezoelektrischer Wandler) in einen Schallimpuls umgewandelt wird. Die Ultraschallwellen breiten sich im Prüfobjekt aus und werden an Grenzflächen reflektiert. Reflektierte Ultraschallwellen werden vom Prüfkopf detektiert und vom Empfänger in ein elektrisches Signal umgewandelt. Reflexionen an einem Materialfehler (siehe orange Kante in Abb. 2.4) werden früher vom Prüfkopf erfasst als Schallwellen, die das Objekt vollständig durchdringen. Es entsteht ein zusätzliches Signal anhand dessen Position im Zeitspektrum man auf die Tiefe der Verwerfung im Material schließen kann.

Ultraschalluntersuchungen haben in der Industrie ein weites Anwendungsgebiet. Sie können u. a. für Metalle, Kunststoffe, Verbundstoffe, Glas, Keramiken, Gummi und Beton genutzt werden und dienen der Untersuchung von strukturellen Schweißnähten, Stahlträgern, Schmiedeteilen, Pipelines und Tanks, Flugzeugtriebwerken und -tragwerken, Fahrzeugkarosserien, Eisenbahnschienen, Turbinen und anderen schweren Maschinen, Schiffs- und Bootsrümpfen, Gussteilen sowie weiteren Anwendungen /EVI 23/.

Die Ultraschalluntersuchung zeichnet sich durch eine große Eindringtiefe und eine hohe Sensitivität aus und ermöglicht es in bestimmten Fällen auch die Größe, Orientierung und Form von Defekten abzuschätzen. Limitiert wird dieses Prüfverfahren durch die Oberflächen des Prüfstücks. Raue, inhomogene Oberflächen erschweren die Diagnose. Zudem müssen Aufbau und Material des zu untersuchenden Prüfstücks gut bekannt sein, da sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen in unterschiedlichen Materialien stark unterscheiden kann. Des Weiteren muss ein Koppelmedium eingesetzt werden, um den Übergang von Luft in das zu untersuchende Material zu verbessern.

Im Hinblick auf die Untersuchung von TLB für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle, kann die Ultraschalluntersuchung auf verschiedene Weisen eingesetzt werden. Sie ist imstande, den Zustand des Behältermaterials zu erfassen und Materialfehler zu erkennen /MEY 16/. Eine weitere mögliche Anwendung ist die Untersuchung von Schraubengewinden, um die Integrität der Versiegelung des Behälterdeckels sicherzustellen /LIT 20/.

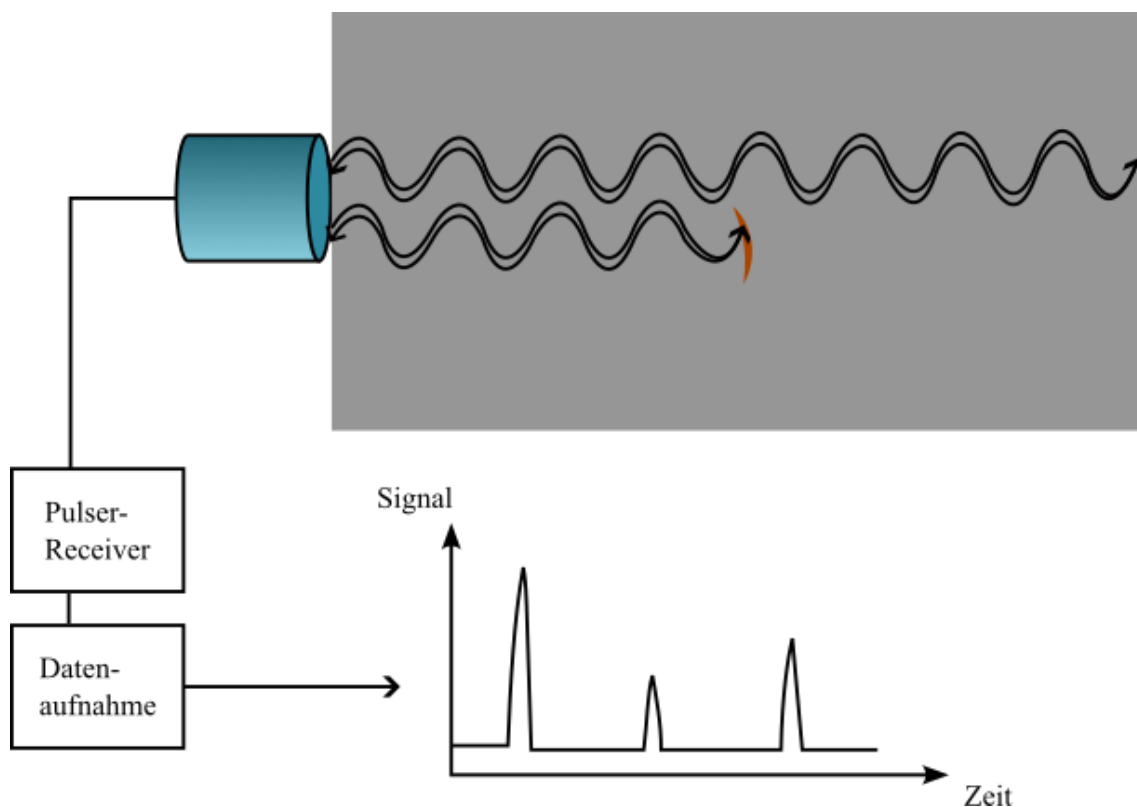


Abb. 2.4 Schematische Darstellung der Ultraschalluntersuchung

2.4.5 Ultraschallprüfung mit Gruppenstrahlertechnik

Die Ultraschallprüfung mit Gruppenstrahlertechnik (*Phased-Array-Ultrasonic Testing*, PAUT) stellt eine Weiterentwicklung der konventionellen Ultraschalluntersuchung dar, mit dem Ziel die Signalfokussierung und -steuerung in gewünschten Winkeln und Positionen zu verbessern /HOS 19/. Dazu werden mehrere Ultraschallsonden in einer festen Anordnung zusammengefasst und phasengesteuert betrieben. Jedes Element kann einzeln angesteuert werden, und über eine Phasenverschiebung der ausgesendeten Ultraschallsignale wird eine Wellenfront erzeugt, deren Ausbreitungsrichtung von der Phasenverschiebung und der Anordnung der einzelnen Elemente abhängt. Die fokussierenden und richtungsgebenden Effekte sind in Abb. 2.5 für eine lineare Anordnung skizziert.

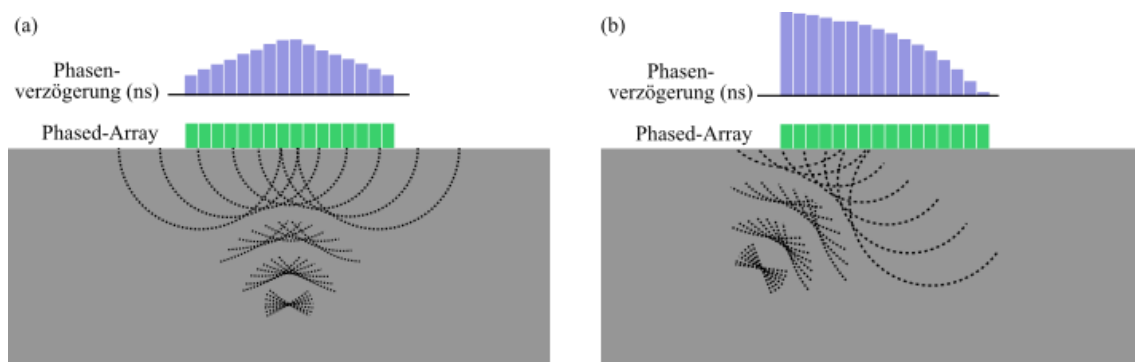


Abb. 2.5 Schematische Darstellung der Ultraschallprüfung mit Gruppenstrahlertechnik in einer linearen Anordnung

Durch entsprechende Phasenverzögerung können (a) fokussierende und (b) richtungsgebende Effekte erzielt werden. Vergleiche /HON 20/.

Im direkten Vergleich der PAUT mit der aus einem Element bestehenden konventionellen Methode konnten reflektierte Signale von Materialdefekten und der Rückwand besser erkannt werden /HOS 19/. Zur Prüfung von Behältern für bestrahlte Brennelemente findet das Verfahren Anwendung zur Detektion und Darstellung von Fehlstellen im Behältermaterial. Mit Hilfe des *Synthetic Aperture Focussing Technique* (SAFT) Algorithmus für Ultraschallprüfungen von grobkörnigen Materialien /STE 07/ konnte in einer Studie eine hohe räumliche Auflösung dieser Materialfehler in einem von der russischen Firma Bergbau- und Chemiekombinat entworfenen Behälter /GAV 12/ für bestrahlte Brennelemente aus RBMK-1000 Reaktoren erzielt werden /SAL 15/. In einer weiteren Studie wurde eine Probe des in diesem Behälter verwendeten rostfreien Stahls genutzt, um mithilfe einer PAUT einzigartige und charakteristische Ultraschall-Fingerabdrücke der untersuchten Probe zu extrahieren /SED 15/. Diese Methode könnte in Zukunft dazu

verwendet werden die Sicherung der Behälter zu gewährleisten bzw. eine unerlaubte Öffnung der Behälter zu erfassen.

2.4.6 Laserbasierte Ultraschallprüfung

Im Gegensatz zur konventionellen Ultraschalluntersuchung wird bei der Laserbasierten Ultraschallprüfung ein gepulster Laserstrahl genutzt, der auf der Oberfläche des zu untersuchenden Objekts über thermoelastische Effekte Ultraschallwellen erzeugt. Diese durchdringen das Objekt und werden an Grenzflächen reflektiert. Reflektierte Ultraschallwellen können an der Objektoberfläche mit einem zweiten kontinuierlichen Laserstrahl unter Verwendung eines optischen Empfängers detektiert werden. Der optische Empfänger kann sowohl auf einem interferometrischen wie auch auf einem nicht-interferometrischen Gerät aufbauen. Angewendete nützliche nicht-interferometrische Verfahren basieren z. B. auf der Erfassung der durch die Ultraschallspannung verursachten Änderung des Reflexionsvermögens. Die Erfassung der Änderung des Reflexionsvermögens liegt in der Größenordnung der Ultraschallverformung und ist besonders bei hohen Frequenzen nützlich, da die Verformung bei einer bestimmten Verschiebung proportional zur Frequenz zunimmt /MON 20/. Aus den unterschiedlichen Laufzeiten können, wie bei der konventionellen Ultraschallprüfung, Unregelmäßigkeiten im Objekt erkannt und dargestellt werden. Anders als in der konventionellen Methode wird hier aber kein Koppelmedium benötigt, so dass Signalverluste reduziert werden. Ein Vergleich von Laser-Ultraschallprüfung und der konventionellen Ultraschallprüfung ist in Abb. 2.6 skizziert.

Die Tatsache, dass zur laserbasierten Ultraschallprüfung in der Regel zwei Laser und ein Detektionsinterferometer verwendet werden, lässt die Methode auf den ersten Blick als kostenintensiv erscheinen. Jedoch findet sie in der Industrie zunehmend Anwendung, beispielsweise zur Überprüfung von Polymer-Matrix-Verbundstoffen beim Bau von Kampfflugzeugen, zur Waddickenbestimmung von heißen Stahlrohren während der Verarbeitung und zur Charakterisierung dünner Schichten in der Mikroelektronik. Viele weitere Anwendungen sind bereits im Labor entwickelt worden oder werden als Prototypen in der Industrie auf ihren Nutzen untersucht /MON 20/.

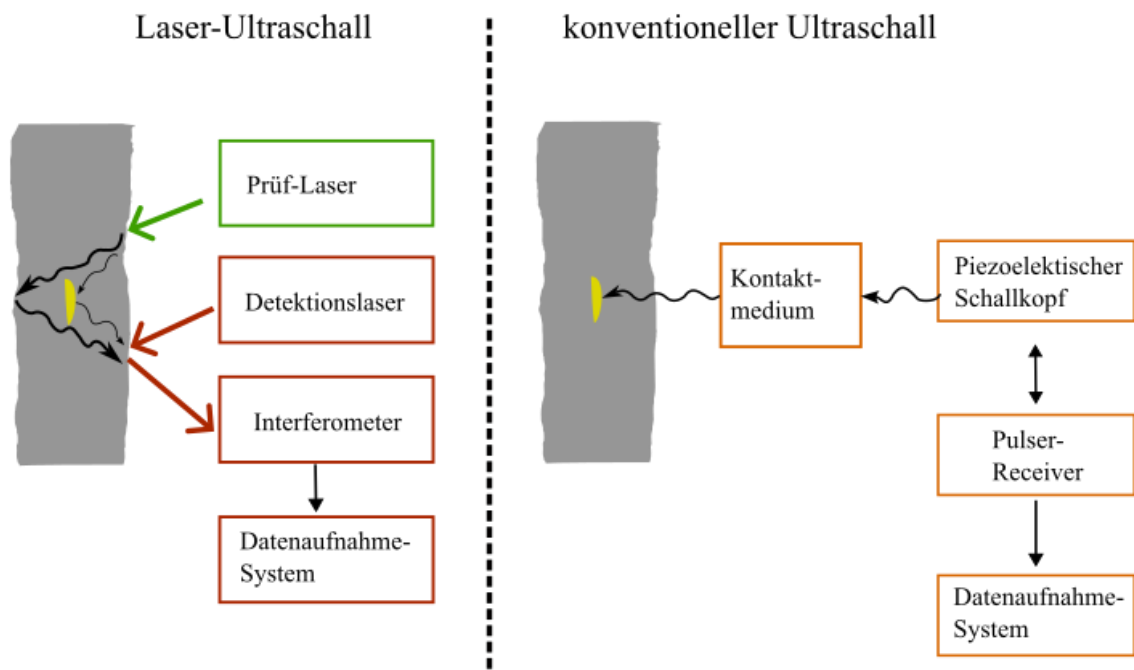


Abb. 2.6 Laser-Ultraschall und konventionelle Ultraschallprüfung im Vergleich
/MON 20/

2.4.7 Langstreckenultraschallprüfung mit geführten Wellen

Geführte Ultraschallwellen bieten Prüfmöglichkeiten im Nah- und Fernbereich für eine Reihe von Materialien und Strukturen. Anstelle der in der konventionellen Ultraschalluntersuchung genutzten Volumenwellen mit Frequenzen, die abhängig von der Ausdehnung des zu untersuchenden Objekts zu wählen sind, werden in diesem Verfahren die Ultraschallwellen entlang der äußeren Struktur des zu untersuchenden Objekts geführt und können einen Frequenzbereich von 20 kHz bis 15 MHz abdecken /OLI 21/. Der Randbereich (z. B. Rohrwände oder Tankwände) dient so als Wellenleiter für die Durchführung von Inspektionen. Geführte Ultraschallwellen im Niederfrequenzbereich erlauben es, Fernuntersuchungen über Entfernungen von mehr als 100 Metern durchzuführen, wobei die Sensitivität mit sinkender Frequenz abnimmt /OLI 21/, /EPRI 17b/.

Aus der Wechselwirkung der Ultraschallwellen mit dem äußeren Wellenleiter ergeben sich einige Konsequenzen: Zum einen können im Gegensatz zu den bei der konventionellen Ultraschallprüfung genutzten Volumenwellen nicht nur Longitudinal- und Schermoden angeregt werden, sondern eine unendliche Anzahl unterschiedlicher Moden. Diese Moden entstammen konstruktiven und destruktiven Interferenzen an den Objektgrenzen reflektierter Ultraschallwellen. Des Weiteren erfahren diese sich ausbreitenden

Wellen eine Dispersion, die mit dem Produkt der zurückgelegten Wegstrecke im Testobjekt und der Frequenz der Ultraschallwellen korreliert /MEY 16/.

Die Langstreckenultraschallprüfung mit geführten Wellen kann auch für die Inspektion von trockenen Lagerbehältern verwendet werden. Zwar ist die große Reichweite des Niederfrequenzultraschalls für diese Anwendung nicht erforderlich, es bieten sich aber Möglichkeiten für Untersuchungen mit hoher Empfindlichkeit für die Durchführung von Inspektionen in verdeckten oder unzugänglichen Bereichen, wie z. B. unter Schienen (bei horizontalen Behältern) oder hinter Stützen oder Abstandshaltern (bei vertikalen Behältern) /EPRI 17b/.

Eine andere Anwendung sieht den Einsatz von geführten horizontalen Scherwellen zur Untersuchung von Schweißnähten in einem HI-STORM 100 System von Holtec International vor /CHO 18/. Schweißnähte sind besonders anfällig für Chlorid-induzierte Spannungsrisskorrosionen (*Chloride Stress Corrosion Cracking*, CISCC) und stellen eine Schwachstelle der Behältersicherheit dar. In dieser Studie konnten die Behälterschweißnähte unter Verwendung eines Elektromagnetischen-Akustik-Wandlers erkannt und lokalisiert werden. Außerdem konnte das Messsystem in einer Machbarkeitsstudie durch 10,6 mm lange, 0,8 mm breite und 5,6 mm tiefe Einkerbungen simulierte Spannungsrisse in einer Stahlplatte in einer Entfernung von 12 cm nachweisen /CHO 18/.

2.4.8 Infrarot-Thermographie (IRT)

Die Infrarot-Thermographie (IRT) ist ein kontaktloses bildgebendes Verfahren, das den thermischen Zustand eines Objekts auf Basis ausgesendeter elektromagnetischer Strahlung im nicht sichtbaren Infrarotbereich visualisiert. Dabei wird die Wellenlänge der in ein Kameraobjektiv einfallenden Infrarotstrahlung gemessen, räumlich abgebildet und ein zweidimensionales Wärmebild erzeugt. Je nach Infrarotkamera können auch große Detektionsgebiete in Echtzeit dargestellt werden, was die Prüfung großer Objekte gegenüber anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren deutlich verkürzt.

Unterschieden wird zwischen aktiver und passiver Thermographie. Während in der passiven Thermographie die Temperaturunterschiede zwischen den betrachteten Materialien und deren Umgebung gemessen werden, wird in der aktiven Thermographie Wärmeenergie auf das Zielobjekt übertragen, so dass dessen Materialeigenschaften beim Aufheizen und Abkühlen analysiert werden können. Die aktive Thermographie lässt sich in verschiedene Untergruppen aufteilen, in denen unterschiedliche Konzepte der Ener-

gieübertragung verfolgt werden. Dazu gehören u. a. die Puls-Thermographie, die Lock-In-Thermographie oder die Puls-Phasen-Thermographie /BAG 13/.

IRT-Prüfungen finden in weiten Teilen der Industrie Anwendung. Zu diesen gehören die Luftfahrt, Raumfahrt, Medizin, Petrochemie, Energie, Maschinenbau, und viele weitere Bereiche /ZHU 11/. Auch in der Nuklearindustrie werden IRT-Prüfungen durchgeführt. Im *Savannah River National Laboratory* (USA) wurde die IRT-Prüfung zur Verarbeitung und Lagerung von radioaktivem Material sowie zur Überwachung technischer und elektrischen Komponenten eingesetzt /BAG 13/, /GLE 04/. Im Herstellungsprozess von Kernbrennstoff-Transportbehältern kann das Verfahren zur Echtzeitüberwachung des Abkühlungsprozesses der Bleiabschirmung genutzt werden, um auftretende Temperaturgradienten zu kontrollieren und so ungewollte Blasenbildung zu vermeiden /MAD 05/.

In einer Machbarkeitsstudie zur Feststellung von Inventarverlagerung in einem CASTOR® V/19 Behälter konnten nur geringe Unterschiede (< 1 K) zwischen zwei realistischen Szenarien anhand simulierter Wand-Temperaturfelder festgestellt werden. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass sich das Verfahren somit nicht zur Zustandsüberwachung über längere Lagerzeiten eignet /WAG 20/.

2.4.9 Passive Radiographie mit Neutronen- und Gammastrahlung

Die passive Radiographie mit Neutronen- und Gammastrahlung stützt sich auf die Messung des äußeren Strahlungsfeldes eines Behälters mit radioaktivem Inventar. Dazu wird der Gamma- und Neutronenfluss gemessen und orts-/energieaufgelöst dargestellt. Aus der Verteilung des Strahlungsflusses können Rückschlüsse auf den Behälter und das Inventar gezogen werden.

Im Rahmen des Projekts DCS-Monitor wurden Monte-Carlo-Studien mit MCNP durchgeführt, anhand derer untersucht wurde, inwieweit sich radiographische Messungen der Gamma- und Neutronenstrahlung zur Erkennung (einzeln) defekter Brennelemente in einem TLB eignen /RAC 20/. Die Studie zeigt, dass ein äußeres defektes Brennelement auf Basis des Neutronen- und Gammaflusses nachweisbar sei, während für ein inneres Brennelement die Absorption der Gammastrahlung durch den Behälter bzw. die äußeren Brennelemente zu hoch ist, so dass nur die Neutronen eine geeignete Signatur darstellen. Grundsätzlich hängt dieses Verfahren stark von der Aktivität des Kernbrennstoffs ab, so dass bei langen Lagerzeiten eine Abnahme der Sensitivität zu erwarten ist.

In einer weiteren Machbarkeitsstudie wurde das äußere Neutronenfeld von drei ^{252}Cf -Quellen in einem TN-32 Behältermodell (im Maßstab 1:10) gemessen und hinsichtlich eines Nachweises einer modellierten Brennstoffentfernung bzw. -verschiebung untersucht /LIM 22/. Die gemessene Neutronenflussverteilung zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen einer Behälterbeladung mit einer und mit zwei Quellen, das Hinzufügen einer dritten Quelle ergab jedoch keine signifikanten Änderungen dieser Verteilung. Anhand der Linienprofile der detektierten schnellen Neutronen konnte festgestellt werden, dass sich die erreichbare räumliche Auflösung dieses Aufbaus nicht zum Nachweis einer Brennstoffentfernung/-verschiebung auf Brennstabniveau eignet.

2.4.10 Aktive Radiographie mit hochenergetischen Photonen und Neutronen

Aktive radiographische und tomographische Methoden nutzen eine externe Strahlungsquelle. Zur Produktion hochenergetischer Photonen wird in der Regel ein Elektronenstrahl verwendet, der an einem Blech aus einem Material mit hoher Kernladungszahl (z. B. Wolfram) abgebremst wird. Die dabei freigesetzte Bremsstrahlung kann, nachdem sie das zu untersuchende Objekt passiert hat, von einem geeigneten Detektorsystem erfasst werden. Anhand der gemessenen Strahlungsintensität können Rückschlüsse auf die Zusammensetzung des Objekts gezogen werden. Der Messaufbau für eine radiotomographische Untersuchung mit hochenergetischen Photonen ist in Abb. 2.7 dargestellt.

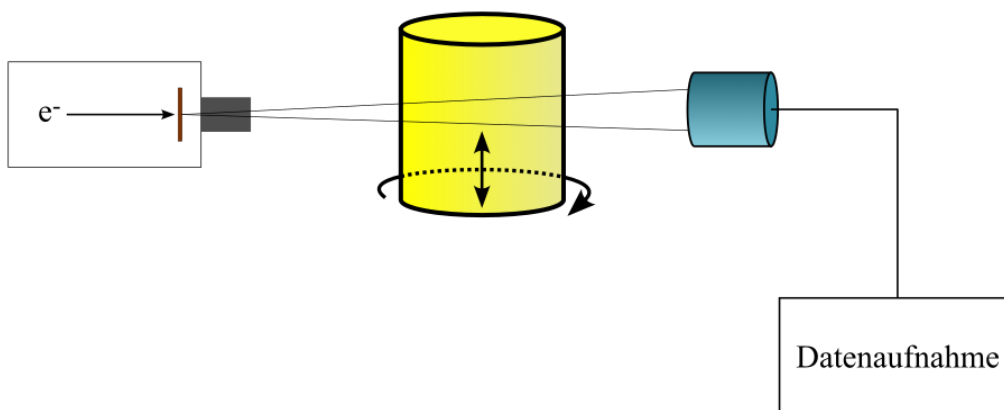


Abb. 2.7 Skizze einer Röntgentomographischen Messung

Das Messprinzip findet vor allem in der Medizin zu Bildgebungszwecken Anwendung. Mit Hilfe von computertomographischen Untersuchungen können Veränderungen der Körperstruktur wie z. B. innere Verletzungen (Knochenbrüche, Blutungen, etc.) oder ein Tumorwachstum diagnostiziert werden. Abseits der Medizin wird die Röntgenbildgebung industriell vor allem in diversen Sicherheitsanwendungen eingesetzt. Dazu gehören Scanner an Gepäckband- und Lebensmittelkontrollen, Produktkontrollen in der Luftfahrt

und Automobilindustrie sowie die Kontrolle von Hochdruckrohren in der Öl- und Gasindustrie. Je nach Anwendungsfall kann anstelle einer Röntgenröhre auch eine hochradioaktive Gammaquelle eingesetzt werden. Je dichter und größer die zu untersuchenden Strukturen sind, desto höher muss die Energie der Photonen sein, um das zu untersuchende Objekt mit hinreichend hoher Intensität zu passieren. In der Nuklearindustrie werden radiographische und -tomographische Methoden mit hochenergetischer Bremsstrahlung (1 bis 20 MeV) genutzt, um den Zustand von radioaktivem Abfall in Abfallgebinden zu charakterisieren /PÉR 18/ und den Inhalt von Lagerbehältern mit bestrahlten Brennelementen sicherzustellen /MIL 20/.

Zur Untersuchung massiver Objekte können auch Neutronen eingesetzt werden. Diese haben aufgrund ihrer Ladungsneutralität eine hohe Eindringtiefe in die Materie. Die Neutronentomographie ermöglicht die 2D- oder 3D-Darstellung der Verteilung des Abschwächungskoeffizienten in Materie, so dass innere Strukturen und Materialzusammensetzungen sichtbar gemacht werden können. Die Neutronenradiographie ist ein Transmissionsverfahren für heterogene Materialien, bei dem der Streu- und/oder der Absorptionskontrast zwischen verschiedenen Elementen genutzt wird. In der Neutronenbildgebung können sehr hohe räumliche Auflösungen von zehn bis einigen hundert Mikrometern erzielt werden /WAN 20/.

Aktuelle Forschungsarbeiten untersuchen den Nutzen der Neutronenbildgebung zur zerstörungsfreien Prüfung von Lagerbehältern für bestrahlte Brennelemente /LIU 22/. Mit Hilfe von Monte-Carlo-gestützten Simulationen und unter Verwendung von einem auf maschinellem Lernen basierenden Bildrekonstruktionsalgorithmus wurde die Erkennbarkeit von fehlenden Brennstäben in einem GE-14-Brennelement innerhalb eines HI-STAR-100 Behälters untersucht. Ausgehend von einer Neutronenintensität von 1×10^{10} Neutronen pro Sekunde konnten Brennelemente mit mindestens 75 % fehlender Brennstäbe in unter zwei Stunden signifikant nachgewiesen werden.

2.5 Nationale und internationale Bestrebungen zur Entwicklung und Weiterentwicklung innovativer zerstörungsfreier Prüfverfahren

Auch aufgrund der in vielen Ländern absehbaren Notwendigkeit einer verlängerten Zwischenlagerung sind derzeit sowohl national als auch international zahlreiche F&E-Tätigkeiten zu beobachten, die sich mit Neu- und Weiterentwicklungen von Prüfverfahren auseinandersetzen, die oftmals auch eine Verbesserung der Präzision und Zuverlässigkeit beabsichtigen. In diesem Kapitel werden drei wesentliche Forschungsprogramme

vorgestellt, die sich auf nationaler und internationaler Ebene mit innovativen Lösungen für die zerstörungsfreie Prüfung auseinandersetzen.

2.5.1.1 Forschungsprogramm der BGZ (national)

Die BGZ Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH (BGZ) ist als Gesellschaft im Eigentum des Bundes für den Betrieb von Zwischenlagern für schwach-, mittel- und hochradioaktive Abfälle verantwortlich. Hinsichtlich der absehbaren über 40 Jahre hinausgehenden Zwischenlagerung ist die BGZ als Betreiber und Genehmigungsinhaber somit verpflichtet, die Einhaltung der Schutzziele, die sich für die Zwischenlagerung ergeben, auch für die verlängerte Zwischenlagerung gemäß dem Stand von W&T nachzuweisen. Hierzu verfolgt die BGZ ein Forschungsprogramm, dass u. a. den Forschungsbedarf und Forschungsaktivitäten der BGZ umfasst und regelmäßig fortgeschrieben und aktualisiert wird /BGZ 25/. Die Forschungsaktivitäten beschäftigen sich u. a. mit Untersuchungen von Alterungseffekten, dem Langzeitverhalten und zerstörungsfreien Prüfverfahren.

Das Dosisleistungs- und Temperaturmessprogramm OBSERVE ist ein Projekt der BGZ und der WTI Wissenschaftlich-Technischen Ingenieurberatung GmbH. Es hat die Überprüfung der Abschirm- und Wärmeabfuhereigenschaften und den Vergleich von Messwerten für Oberflächendosen und -temperaturen individueller beladener Behälter mit rechnerischen Erwartungswerten zum Ziel. Eine Machbarkeitsstudie wurde bereits abgeschlossen, das Messprogramm wird zurzeit geplant. Dieses ist darauf ausgerichtet, die gesamte Mantelfläche ausgewählter Behälter messtechnisch (Dosis und Temperatur) über einen längeren Zeitraum zu erfassen, um so Aussagen über Alterungseffekte des Behälters und des Inventars treffen zu können. Zudem sollen so numerische Vorhersagen validiert werden.

Das zusammen mit dem Lehrstuhl für Nukleartechnik der Technischen Universität München durchgeführte Forschungsprojekt VisCas beschäftigt sich mit der Visualisierung von Brennstäben in beladenen Behältern. Ziel dieses Vorhabens ist eine Untersuchung des theoretischen Auflösungsvermögens von experimentellen Umsetzungen der Myographie und die Erstellung sowie Untersuchung geeigneter Simulationsmethoden (siehe z. B. /NIE 25a/, /NIE 25b/, /NIE 25c/). In diesem Rahmen beteiligt sich die BGZ auch an dem Forschungsprojekt MUTOMCA (*MUon TOMography for CAsks*) (vgl. Abschnitt 3.6.2).

2.5.1.2 EPRI Extended Storage Collaboration Program (ESCP, International)

Das ESCP ist eine 2009 gegründete Initiative des EPRI mit dem Ziel, Forschung und Entwicklung im Kontext der verlängerten Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente sowie dem anschließenden Transport in ein Endlager voranzutreiben. Zentrale Zwecke des ESCP sind die Förderung der internationalen Zusammenarbeit und der Austausch gewonnener Erkenntnisse. Im Rahmen von Alterungsmanagement-Programmen stehen zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Inspektion von Lagerbehältern für die Trockenlagerung im Fokus. Diese müssen jedoch speziell angepasst oder weiterentwickelt werden, damit sie in zugangsbeschränkten Bereichen, bei hohen Oberflächentemperaturen und einem eventuell hohen Strahlungsaufkommen zuverlässig Ergebnisse liefern /EPRI 17c/. Neue Erkenntnisse aktueller Arbeiten werden in technischen Langzeitberichten zusammengefasst /EPRI 17c/ sowie auf den jährlich stattfindenden ESCP-Veranstaltungen vorgestellt. Diese Konferenz richtet sich an die Fachöffentlichkeit und adressiert ein breites Spektrum an wissenschaftlichen Fragestellungen der verlängerten Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und verglaster hochradioaktiver Abfälle. Im Folgenden sind die aktuellen F&E-Tätigkeiten des ESCP mit Bezug auf die zerstörungsfreie Behälterprüfung zusammenfassend dargestellt.

2.5.1.2.1 ESCP-Meeting Oktober 2023

Das ESCP-Meeting fand vom 23. bis 26. Oktober 2023 als hybride Veranstaltung statt.

Dan Xiang von der Firma X-wave Innovations, Inc. stellte in seinem Vortrag „*A Non-Contact, Intelligent Sensor Network System for Long-Term Health Monitoring of Spent Nuclear Fuel Dry-Storage Canisters and Fuel Assemblies*“ ein innovatives Ultraschallsensorsystem vor, das eine kontaktlose und kontinuierliche Überwachung von Behälter- und Brennelementkomponenten während der verlängerten Zwischenlagerung gewährleisten soll /XIA 23/. In diesem Zuge wurde ein Prototyp vorgestellt, der in ersten Machbarkeitsstudien eine kontinuierliche Behälterüberwachung auch im Feldtest ermöglicht hat. Weitere Anstrengungen wurden unternommen, um ein modernes Datenerfassungs- und -analyse Toolkit basierend auf Maschinellern Lernen zu schaffen, das eine verbesserte Signalanalyse ermöglicht.

2.5.1.2.2 ESCP-Meeting Oktober 2024

Das ESCP-Meeting fand vom 21. bis 24. Oktober 2024 mit insgesamt 237 Teilnehmern als hybride Veranstaltung statt.

Das Veranstaltungsprogramm umfasste u. a. Updates der NRC, des EPRI, des *Department of Energy* (USA), Westinghouse, Framatome, GE, OECD/NEA und der BGZ. Außerdem wurden Forschungsergebnisse in den Sub-Komitees Alterungsmanagement, Brennstoff und Modellierung & Benchmarks vorgestellt. Aktuelle Entwicklungen mit Bezug auf die zerstörungsfreie Behälterprüfung wurden in einer Reihe von Vorträgen thematisiert.

Randall Granaas vom Kernkraftwerk San Onofre (engl.: *San Onofre Nuclear Generating Station*, SONGS) berichtete von visuellen Inspektionen von Holtec UMAX und TN NUHOMS Behältersystemen, die im Zeitraum von 2019 bis 2024 stattgefunden haben. Diese zeigten einen guten Gesamtzustand der Brennstofflagersysteme. Eine beispielhafte Auswertung der Strahlenschutzüberwachung einer Inspektion eines Behälters im unterirdischen Holtec-Lagersystem ergab eine Kollektivdosis von 226 μSv , die vollständig vom Team zum Anheben und Absenken des Deckelsystems getragen wurde. Für das Team, das die visuelle Prüfung durchführte, konnte keine arbeitsbedingte Dosis nachgewiesen werden. Bis 2026 sind sechs weitere Inspektionen dieser Art geplant.

Gabriel Grant vom Southern Dry Storage berichtete in seiner Präsentation von Herausforderungen bei einer visuellen Inspektion eines HI-STORM-Systems. Diese wurde am 14. November 2023 mithilfe eines Roboters aufgenommen, der die Behälteroberfläche im schmalen Belüftungsschacht zwischen Behälter und Betoneinfassung visuell prüfen sollte. Der Roboter blieb jedoch aufgrund einer sich gebildeten Kabelschleife über 65 Tage lang stecken und konnte zunächst nicht entfernt werden. Die für diese Messung entfernte Abschirmung gegen Gammastrahlung und der Belüftungsmonitor konnten für diese Periode wieder in Betrieb genommen werden, so dass über diesen Zeitraum ein sicherer Betrieb weiterhin gewährleistet war. Das Kabel konnte schließlich durch ein spezielles Werkzeug neu ausgerichtet und die Inspektion in einem langsameren Tempo als ursprünglich geplant beendet werden. Der Behälter zeigte keine Hinweise auf Chlorid-induzierte Spannungsrisskorrosionen. Aus diesem Vorfall konnte für zukünftige Inspektionen der Rückschluss gezogen werden, dass ein größeres Augenmerk auf das Aufrechterhalten der Betriebsfähigkeit auch bei auftretenden Problemen wie einem feststeckenden Inspektionsgerät gelegt werden muss. Außerdem sollten die Wechselwirkun-

ngen aller Teile der Inspektionsausrüstung mit der Behältergeometrie besser berücksichtigt werden, um negative Wechselwirkungen zu vermeiden.

Shannon Chu (EPRI) gab einen Überblick zu laufenden Arbeiten in EPRI's *Mitigation and Inspection Research*-Programm. Im Bereich der visuellen Oberflächenprüfung wurden ein Roboter der Firma RTT sowie das MViQ-System mit einer Quarzfasersonde von Waygate Technologies getestet und mit der verbesserten visuellen Prüfung (EVT-1) aus früheren EPRI-Studien verglichen. Dabei stand vor allem die Erkennung von Rissen und Ermüdungsbrüchen im Vordergrund. Die Vortragende schloss mit einer Übersicht über von EPRI veröffentlichte Inspektionsstudien aus den Jahren 2016 bis 2020. Neue Ergebnisse sollen im Frühjahr 2025 publiziert werden.

Ralf Schneider-Eickhoff von der BGZ berichtete in seinem Vortrag von dem Dosisleistungs- und Temperaturmessprogramm OBSERVE. Nachdem in Phase I des Projekts eine Machbarkeitsstudie abgeschlossen wurde, ist Phase II auf die Entwicklung, Herstellung und Testung eines Messsystems ausgerichtet. Dafür wurden die Transport- und Lagerbehälter CASTOR® V/19 (für DWR-Brennelemente) und CASTOR® HAW28M (für verglaste hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung) als Referenzbehälter ausgewählt. Es sollen Szenarien identifiziert werden, die eine mögliche Änderung der Dosisleistung und Temperaturverteilung auf der Behälteroberfläche zur Folge haben. Dazu werden Sensitivitätsstudien auf Basis von MCNP und ANSYS durchgeführt. Beispiele für solche Änderungen, die sensitiv nachgewiesen werden können, sind eine Änderung in der Anordnung des Moderatormaterials (10 cm große Lücke im Ring der Moderatorstäbe) sowie eine massive Brennstoffverschiebung (50 kg Brennstoff eines MOX-Brennelements) im Behälter. Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines solchen Ereignisses wurde nicht diskutiert. Der Messaufbau sieht vor, dass für die Neutronen- und Gammadosisleistungsmessungen Messsonden mit je 30 cm Abstand in der Vertikalen und einer Winkelauflösung von 15° auf der Behältermantelfläche platziert werden. Die Messung der Dosisleistung soll spektral aufgelöst werden.

Russel Love vom Unternehmen Guidedwave berichtete in seinem Vortrag von aktuellen Entwicklungen im Bereich der robotergestützten Langstreckenultrashalluntersuchung mit geführten Wellen sowie der akustischen Emissionsüberwachung von Lagerbehältern für Brennelemente und flüssige radioaktive Abfälle. Diese Art der zerstörungsfreien Prüfung ermöglicht den Nachweis von Korrosion, Rissen und anderen schädigenden Mechanismen in großen oder schwerzugänglichen Objekten. Insbesondere sollen mit diesen Prüfungen komplementäre Behälterzustandsinformationen zusätzlich zur visuellen

Prüfung zur Verfügung gestellt werden. Der Vortragende ergänzte auf Nachfrage, dass mit der akustischen Emissionsprüfung die Entstehung eines 20 µm großen Risses in einem Trockenlagerbehälter für abgebrannte Brennelemente nachgewiesen werden kann, da eine große Menge an Energie bei dem Prozess freigesetzt wird. Ob ein solcher Riss mit der Langwellenultraschallprüfung mit geführten Wellen detektiert werden kann, ist mehr von der Tiefe des Risses abhängig als von der Größe der Rissöffnungsverschiebung.

Stephanie Doll vom Unternehmen *Washington River Protection Solutions* (WRPS) stellte in ihrem Vortrag Ergebnisse ihrer Arbeit zu zerstörungsfreier Evaluierung und Sanierung von Hanfords Doppelschalen-Tanks vor. Diese umfassen Korrosionskontrolle, Sichtungen, Strukturanalysen und Entwicklung von Sanierungstechnologie. Es wurden periodische Sichtprüfungen und Ultraschalluntersuchungen durchgeführt. Neue Ansätze verfolgen den Einsatz von Langstreckenultraschall mit geführten Wellen sowie die Nutzung von elektromagnetisch-akustischen Wandlern für eine kontaktlose Prüfung. Die verschiedenen Ansätze zur zerstörungsfreien Prüfung werden von WRPS in den Projekten RAVIS (engl.: *Remote Air-slot Volumetric Inspection System*), RREVIS (engl.: *Robotic Remote Electro-Magnetic Acoustic Transducer Volumetric Inspection System*) und VSGS (engl.: *Volumetric Sidewall Guided Wave and Magnetostrictive Scanning System*) verfolgt.

2.5.1.2.3 ESCP-Meeting Oktober 2025

Das ESCP-Meeting 2025 fand vom 27. bis 30. Oktober als hybride Veranstaltung mit 225 Teilnehmern statt.

Steve Edwards von Duke Energy präsentierte in seinem Vortrag „*Recent Inspection Results from McGuire, Oconee, and Robinson*“ die Ergebnisse von drei Inspektionskampagnen zum Alterungsmanagement, die im Vorjahr durchgeführt wurden /EDW 25/. Die visuellen Inspektionen wurden mit robotergestützten Kameras durchgeführt. Er begann mit einer Baseline-Inspektion der NAC UMS (*Universal Multipurpose Systems* des Herstellers *NAC International*) am Standort McGuire. Baseline-Inspektionen umfassen die erreichbaren Außenoberflächen des Trockenlagerbehälters einschließlich der Schweißnähte sowie zugängliche Metallkomponenten auf der Innen- und Außenoberfläche der vertikalen Betonbehälter. Es konnten keine Probleme oder Anzeichen von Alterungsdegradation festgestellt werden. Die zweite Inspektion fand an den im Oconee Brennelementelager befindlichen TN NUHOMS Systemen statt, wo ebenfalls keine Alterungs-

probleme festgestellt wurden. Es konnten jedoch einige Kratzer mit geringer Tiefe (weniger als 0,4 mm) und Staubablagerungen ausgemacht werden. Die dritte Inspektion betraf das Robinson-Werk, wo die internen und externen Bedingungen der Behälter als zufriedenstellend bewertet wurden. Es wurden vereinzelt Regenwasserrückstände nachgewiesen. Für Korrosion oder Alterungsdegradation an den Beton- und Stahlbehältern gab es keine Hinweise. Insgesamt zeigten alle drei Inspektionskampagnen, dass die Systeme in gutem Zustand sind und keine weiteren Maßnahmen oder kürzere Inspektionsintervalle erforderlich sind.

Steve Mroz von Vistra zeigte in seinem Vortrag „*Recent Inspection Results from Davis Besse*“ /MRO 25/ die Ergebnisse der zweiten Alterungsmanagementinspektion für die Davis-Besse-Anlage. Die Erstinspektion der Anlage im September 2020 war ohne nennenswerten Befund. Die diesjährige Inspektion umfasste die externen und internen Komponenten des horizontalen Lagermoduls (engl.: *Horizontal Storage Module*, HSM) sowie die äußere Oberfläche des Transportbehälters. Es wurden Chloridproben entnommen, um die Korrosionsgefahr zu bewerten, da die Anlage in einem Gebiet mit potenzieller Chloridbelastung liegt. Die Ergebnisse der Chloridproben lagen mit weniger als 10 mg/m² in einem akzeptablen Bereich unterhalb der zulässigen Grenzwerte. Die visuellen Inspektionen mit Kameras der Typen VT-3 und VT-1 und einem RTT-Roboter zeigten, dass die externen und internen Oberflächen des HSM in gutem Zustand waren, mit nur geringfügigen Farbabplatzungen, die jedoch die Akzeptanzkriterien nicht überschritten. Es wurden keine signifikanten Mängel festgestellt, die eine sofortige Korrektur erforderten.

Karan Mauskar von Orano präsentierte in seinem Beitrag „*Aging Management Inspections of Dry Shielded Canisters (DSCs) & Horizontal Storage Modules (HSMs) – Orano Experience 2025 Update*“ /MAU 25/ die Ergebnisse der Inspektionen des neuen HSM-Systems und der damit verbundenen Alterungsmanagementprogramme. Die Inspektionen umfassten sowohl externe als auch interne Bewertungen der HSM und DSC. Es wurden verschiedene Inspektionsgeräte verwendet, darunter Roboter und Kameras, um den Zustand der Systeme zu überprüfen. Die Ergebnisse zeigten, dass die externen und internen Oberflächen der HSM in einem sehr guten Zustand waren, mit nur geringfügigen Korrosionserscheinungen und Wasserablagerungen, die jedoch keine Auswirkungen auf die Funktionalität hatten. Der Dozent berichtete, dass es keine Anzeichen altersbedingter Degradation oder Spannungsrisskorrosion gab und dass die Chloridwerte der entnommenen Proben sehr niedrig waren, was auf ein geringes Risiko für Korrosion hinweist. Er betonte, dass die Inspektionen über 13 Nuklearanlagen hinweg durchgeführt

wurden und dass keine Beobachtungen die Sicherheitsfunktionen der Systeme in Frage stellten.

Dan Hogan von *NAC International* berichtete in seiner Präsentation „*Results from the Palo Verde and Connecticut Yankee Aging Management Inspections*“ /HOG 25/ von durchgeführten Altersmanagementinspektionen von Lagersystemen an den Standorten Palo Verde und Connecticut Yankee. Es wurden in beiden Anlagen Sichtprüfungen mit VT-3 und VT-1 Kameras und einem Roboter-Crawler des Herstellers RTT durchgeführt. Die Inspektionen konzentrierten sich auf die äußeren und inneren Oberflächen des VCC (*Vertical Concrete Cask*) sowie der äußeren Oberflächen des TSC (*Transportable Storage Canister*). Die Inspektion von Palo Verde ergab, dass sowohl die TSC als auch die VCC in sehr gutem Zustand waren, ohne Anzeichen altersbedingter Degradation. Ähnliche Ergebnisse wurden auch bei der Connecticut Yankee Inspektion festgestellt, wo ebenfalls keine altersbedingte Degradation festgestellt wurde. Es wurde angemerkt, dass es einige Wasserflecken gab, die durch Regenwasser verursacht wurden, es wurden jedoch keine Anzeichen von Korrosion oder anderen Schäden festgestellt. Die Inspektionen zeigten, dass die Systeme weiterhin ihre Sicherheitsfunktionen erfüllen und keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich sind.

Cody Borigo von Guidedwave präsentierte in seinem Vortrag „*Robotic Guided Wave Scanning Technologies for Spent Fuel Dry Storage Canister Evaluation*“ /BOR 25a/ neue Technologien zur volumetrischen Inspektion von Trockenlagerbehältern, insbesondere zur Erkennung von CISCC. Er stellte die phasengerichtete Anordnung mit geführten Wellen (engl.: *Guided Wave Phased Array*, GWPA) und das trockengekoppelte Magnetostruktive Scanning (engl.: *Dry-Coupled Magnetic Structure Scanning*, DCMS) Verfahren. Beide Verfahren ermöglichen eine Inspektion von Bereichen, die mit herkömmlichen visuellen Methoden schwer zugänglich sind. Das GWPA-Verfahren verwendet einen kleinen Sensor, der Ultraschallwellen erzeugt und diese in einem flachen Winkel in das Inspektionsobjekt einbringt, um Anomalien zu erkennen. Das DCMS-Verfahren hingegen bewegt den Sensor entlang der Oberfläche, um eine fokussierte Bildgebung zu ermöglichen. Beide Methoden wurden in einer Machbarkeitsstudie getestet, um ihre Eignung für die Inspektion von Trockenlagerbehältern zu bewerten. Die Ergebnisse der Tests zeigten vielversprechende Anzeichen für die Fähigkeit, Anomalien zu erkennen, und es wurde ein Plan für die Weiterentwicklung und den Einsatz dieser Technologien in der Zukunft skizziert. Ziel ist es, bis 2026 einsatzbereite Prototypen zu entwickeln und bis 2028 qualifizierte Inspektionen durchzuführen.

Maik Stuke von der BGZ berichtete in seinem Vortrag „*Towards High Resolution Muography*“ über Fortschritte und Herausforderungen der BGZ im Bereich der Myonenradio-graphie zur Bildgebung von Behältern der Bauart CASTOR® V/19 samt Inventar. Er be-merkte, dass eine bestmögliche Platzierung der Detektoren für gute Rekonstruktion entscheidend ist. Dies soll über präzise Monte-Carlo-Simulationen auf Basis von Geant4 zur Optimierung des Messaufbaus sichergestellt werden. Neben der Durchführung von Simulationen sind weitere experimentelle Messungen in den Zwischenlagern erforder-lich, um die Machbarkeit und Genauigkeit der Methode zu verifizieren. Die Arbeiten der BGZ an einem Rekonstruktionsalgorithmus dauern noch an. In einem nächsten Schritt soll ein experimenteller Aufbau entworfen werden.

Im Rahmen des Subkommittee-Meetings Alterungsmanagement wurden zwei Vorträge zur zerstörungsfreien Behälterprüfung gehalten. Byungsik Yoon von EPRI hat in seinem Vortrag „*NDE Capability Demonstration for Dry Storage System Welded Canister*“ /YOO 25/ die Notwendigkeit und den Prozess zur Demonstration der zerstörungsfreien Prüfverfahren für geschweißte Behälter in Trockenlagerungssystemen in den Vorder-ground gestellt. Er betonte die Bedeutung von ZfP-Verfahren, um die Integrität der Behäl-ter zu gewährleisten und potenzielle Sicherheitsrisiken zu minimieren. Zu den bereits etablierten Prüfverfahren gehören visuelle Inspektionen sowie Ultraschall- und Wirbel-stromprüfungen. Yoon stellte fest, dass die Inspektionen nicht nur die Erkennung von Rissen und anderen Defekten umfassen sollten, sondern auch die Bewertung der Schweißnähte und der umliegenden Bereiche. Es wurden Ergebnisse von Tests präsen-tiert, die durchgeführt wurden, um die Effektivität der ZfP-Verfahren zu bewerten. Diese Tests umfassten sowohl Laboruntersuchungen als auch Feldversuche, um sicherzustellen, dass die Methoden unter realistischen Bedingungen funktionieren. Die Ergebnisse zeigten, dass ZfP-Verfahren in der Lage sind, Defekte zuverlässig zu erkennen und die Integrität der Behälter zu bewerten. Abschließend betonte Yoon die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Verbesserung der ZfP-Verfahren und der Schulung des Personals, um sicherzustellen, dass die Inspektionen effektiv und effizient durchgeführt werden können. Er schloss mit der Aufforderung, die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Ak-teuren in der Branche zu fördern, um die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Trockenla-gerbehältern zu gewährleisten.

Im Anschluss gab Hatice Akkurt im Vortrag „*ESCP Aging Management Working Group Meeting: Key Recommendations and Status Update*“ /AKK 25/ ein Update der Arbeits-gruppe Alterungsmanagement. Die Arbeitsgruppe hat das Ziel, die Alterungsmechani-smen von Behältern für bestrahlte Brennelemente zu bewerten und geeignete Maß-

nahmen zur Überwachung und Inspektion zu entwickeln. Es wurden zehn zentrale Empfehlungen formuliert, die sich auf die Evaluierung von Daten, die Sammlung von Temperatur- und Strahlungsdaten sowie die Standardisierung von Probenahmeverfahren konzentrieren. Diese Empfehlungen zielen darauf ab, die Effizienz und Konsistenz der Inspektionen zu verbessern. Die Gruppe hat betont, dass die Analyse von Inspektionsdaten und die Überprüfung der gesammelten Informationen von entscheidender Bedeutung sind, um fundierte Entscheidungen über Inspektionsintervalle und -methoden zu treffen. Es wurde auf die Fortschritte bei der Entwicklung von Technologien zur Inspektion und Überwachung hingewiesen, einschließlich der Verwendung von ZfP-Verfahren und der Notwendigkeit, diese Verfahren in die Praxis umzusetzen. Zu bereits etablierten Methoden zählen neben der robotergestützten Sichtprüfung, die Wirbelstromprüfung und die Ultraschallprüfung mit Koppelmedium. Die fortschrittliche Laserultraschallprüfung birgt weiterhin Herausforderungen und hat noch keine Einsatzreife. Die Arbeitsgruppe plant, die gesammelten Daten und Erkenntnisse zu nutzen, um die Alterungsmanagementstrategien weiter zu verfeinern und anzupassen, um die Sicherheit und Effizienz der Lagerung abgebrannter Brennelemente zu gewährleisten. Insgesamt betonte der Vortragende die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Überwachung und Anpassung der Strategien im Alterungsmanagement, um den Herausforderungen in der Lagerung von abgebrannten Brennelementen gerecht zu werden.

2.5.1.3 EPRI Nondestructive Evaluation Program (international)

Das Programm des EPRI zur zerstörungsfreien Prüfung identifiziert und entwickelt Lösungen, mit denen Materialveränderungen in derzeit verwendeten Komponenten zuverlässig und kosteneffizient untersucht und charakterisiert werden können, und berücksichtigt künftige Komponenten, die neue Prüfanforderungen mit sich bringen könnten /ELE 24a/. Die Forschungsergebnisse werden auch als Grundlage für technische Analysen, den flexiblen Betrieb von Kraftwerken, Entscheidungen über die Verlängerung der Lebensdauer von Anlagen sowie für Vorschriften und behördliche Maßnahmen im Zusammenhang mit Prüfungen vor und während des Betriebs und Materialmanagementprogrammen verwendet.

Die Aktivitäten dieses Programms sollen das Verständnis und den Wissenstransfer zu innovativen ZfP-Verfahren für Strukturuntersuchungen und Zustandsüberwachungen stärken, um so den Bedarf an ungeplanten Wartungsarbeiten zu minimieren und gleichzeitig die Sicherheit und Effizienz von Komponenten erhöhen /ELE 24a/.

Das ZfP-Programm entwickelt und bewertet Prüfverfahren, Methoden und analytische Ansätze, die eine kosteneffiziente und zuverlässige Prüfung und Zustandsbewertung von Komponenten und Systemen unterstützen. Die Ergebnisse von ZfP-Prüfungen werden verwendet, um den Zustand von Komponenten genau zu charakterisieren und Entscheidungen über den Betrieb und die Wartung von Anlagen zu treffen.

Zu den von EPRI untersuchten Materialien und Systemen gehören neben Auskleidungen/Behälter für bestrahlte Brennelemente auch Druckbehälter und Rohrleitungen, Einbauten in Kernreaktoren, erdverlegte und oberirdische Rohrleitungen und Tanks, Komponenten aus rostfreiem Stahl im Schleuderguss- und statischen Gussverfahren, kohlenstofffaserverstärkte Polymere, Rohrleitungen aus hochdichtem Polyethylen, Betonkonstruktionen, Dampfturbinenkomponenten, Kesselrohre, Windturbinenschaufeln und -komponenten sowie verschiedene andere sicherheitskritische Systeme und zugehörige Materialien /ELE 24a/.

Zu den bewerteten ZfP-Verfahren gehören

- Ultraschallverfahren,
- visuelle Methoden,
- elektromagnetische Methoden,
- fortgeschrittene radiografische Methoden,
- Modellierungs- und Simulationsmöglichkeiten zur Validierung und Optimierung der Fähigkeiten aller ZfP-Technologien und
- Technologien für künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen, die die Auswertung großer Datenmengen im Zusammenhang mit bestimmten Untersuchungen rationalisieren können.

Eine Auswahl an aktuellen Ergebnissen des Programms sind:

- Die Veröffentlichung von „*PRE-SW: Assisted Data Analysis - Eddy Current: Bobbin (ADA-EC) v0.2*“ /ELE 24b/, einer Beta-Software für die unterstützte Analyse von Wirbelstromspulendaten
- Die Veröffentlichung von „*Wireless Ultrasonic Sensors to Support In-Service Inspection*“ /ELE 23a/, die sich mit der Untersuchung des Einsatzes von drahtlosen Ultra-

schallsystemen für die Prüfung von Kernkraftwerkskomponenten vor deren Inbetriebnahme auseinandersetzt

- Die Veröffentlichung des Berichts „*Nondestructive Testing Methods for Evaluation of Steel Liners Embedded in Concrete*“ /ELE 23b/, in dem die Möglichkeiten und Grenzen verfügbarer ZfP-Verfahren für eingebettete Stahlauskleidungen dargestellt wird

3 Myonen-basierte Bildgebung und deren Nutzung im Kontext der Behälter- und Inventarprüfung

Hochenergetische Myonen, die beispielsweise auf natürliche Weise in der Erdatmosphäre durch Wechselwirkungen der kosmischen Strahlung mit Atomen und Molekülen in der Atmosphäre entstehen, eignen sich aufgrund ihrer Wechselwirkungseigenschaften in Materie für die zerstörungsfreie Untersuchung von massiven und großvolumigen Prüfkörpern. Ein wesentlicher Vorteil ergibt sich aus der ständigen Verfügbarkeit dieser atmosphärischen Myonen, allerdings führt der geringe Myonenfluss von etwa 100 Myonen/s/m² zu langen Messzeiten. Trotz dieses Nachteils besteht ein reges Interesse an der Nutzung atmosphärischer Myonen für die Prüfung von TLB und der eingeschlossenen Inventare, was sich in einer Vielzahl an Veröffentlichungen zu Machbarkeitsbetrachtungen, Feldmessungen und messverfahrensspezifischer Untersuchungen in den vergangenen Jahren widerspiegelt.

Im Folgenden werden zunächst in Abschnitt 3.1 die Grundlagen der Myographie dargestellt, bei denen u. a. die Erzeugung und Eigenschaften atmosphärischer Myonen sowie die Wechselwirkung von Myonen mit Materie erläutert werden. Im Anschluss wird in Abschnitt 3.2 zunächst beschrieben, wie Myonen für zerstörungsfreie bildgebende Zwecke genutzt werden können, bevor in den folgenden Abschnitten 3.3 und 3.4 der Nachweis von Myonen und die Bildgenerierung betrachtet werden. In Abschnitt 3.5 werden Einsatzfelder der Myonen-gestützten Bildgebung zusammengestellt. Aktuelle F&E-Arbeiten werden in Abschnitt 3.6 präsentiert. Im Kontext der Behälterprüfung wird in Abschnitt 3.7 der Einfluss der inventarbedingten Störstrahlung eingeschätzt. Das Kapitel endet mit einer Zusammenfassung in Abschnitt 3.8.

3.1 Erzeugung atmosphärischer Myonen und deren physikalische Eigenschaften

Die Erde ist fortwährend der aus allen Richtungen kommenden primären kosmischen Strahlung ausgesetzt. Der integrierte Teilchenfluss der kosmischen Strahlung liegt bei etwa 100 Teilchen/s/m², zeigt eine Ortsabhängigkeit und hängt zudem von externen Effekten und Prozessen (z. B. Sonnenaktivität) ab. Die primäre kosmische Strahlung besteht zum Großteil aus Protonen (etwa 89 %) und Heliumkernen (10 %) /CERN 23/. Deutlich geringere Beiträge zum Teilchenfluss liefern u. a. schwerere Atomkerne oder Positronen.

In Abhängigkeit ihres Ursprungs wird eine Unterteilung in solare Strahlung, galaktische Strahlung und extragalaktische Strahlung vorgenommen:

- Die solare Strahlung trägt den größten Beitrag zur primären kosmischen Strahlung bei und lässt sich im Wesentlichen auf den Sonnenwind und Sonnenflecken zurückführen. Die Zusammensetzung der solaren Strahlung wird dominiert von Protonen und Heliumkernen mit Energien im Bereich von 1 GeV.
- Die galaktische kosmische Strahlung trägt deutlich weniger zur kosmischen Strahlung bei. Sie ist charakterisiert durch Teilchen mit Energien oberhalb von 1 GeV und umfasst im Vergleich zur solaren Strahlung auch schwere Isotope bis hin zu Eisen.
- Die extragalaktische kosmische Strahlung macht nur einen sehr geringen Anteil aus und umfasst Teilchen mit sehr hohen Energien bis etwa 10^{20} eV. Die Zusammensetzung ist vergleichbar zur galaktischen kosmischen Strahlung und umfasst sowohl Protonen als auch schwere Isotope.

Diese Untergliederung motiviert sich durch jeweils charakteristische Teilchen-, Energie- und Intensitätsverteilungen (vgl. Abb. 3.1).

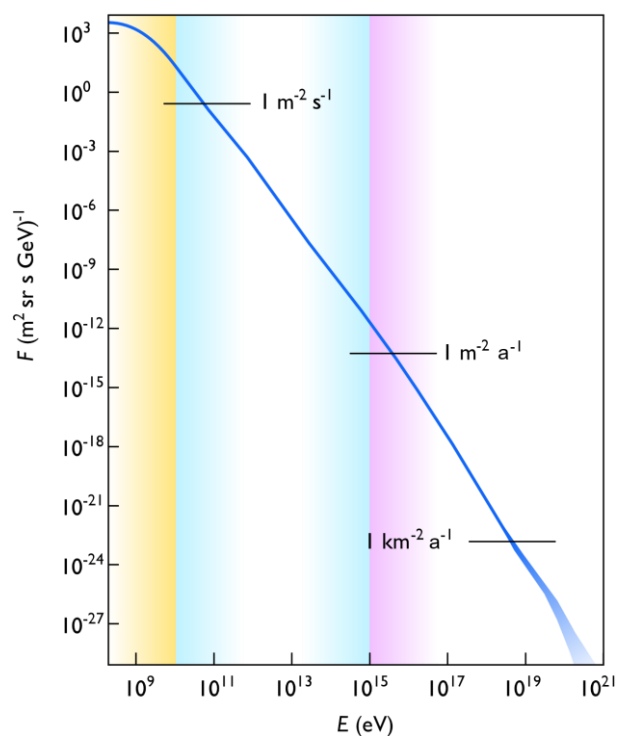


Abb. 3.1 Teilchenfluss der kosmischen Strahlung (CC 3.0) /LAF 19/

Der niederenergetische Teil des Spektrums (gelb) ist wesentlich auf die solare Aktivität zurückzuführen, während zu dem blauen (violetten) Bereich galaktische (extragalaktische) kosmische Strahlen beitragen.

Trifft die primäre kosmische Strahlung auf Atome bzw. Moleküle in der Erdatmosphäre, so werden durch unterschiedliche Wechselwirkungsmechanismen (z. B. Spallationsreaktionen) Teilchenschauer mit einer großen Anzahl von Sekundärteilchen initiiert, die die sekundäre kosmische Strahlung bilden. Viele der Sekundärteilchen sind kurzlebig, so dass sie innerhalb kurzer Zeit zerfallen und weitere Teilchen erzeugen. Aufgrund des Energieverlusts beim Durchtritt durch die Atmosphäre, erreichen nicht alle Sekundärteilchen die Erdoberfläche. In Abhängigkeit der bei der Wechselwirkung entstehenden Teilchenart werden die Bestandteile der sekundären kosmischen Strahlung wie folgt kategorisiert:

- Hadronische Komponente

Die hadronische Komponente besteht aus Hadronen (subatomare Teilchen, die über die starke Wechselwirkung zusammengehalten werden) und umfasst im Wesentlichen Protonen, Neutronen, Mesonen (z. B. Pionen oder Kaonen) sowie Kernfragmente. Zum Teil sind diese Teilchen kurzlebig und folgen charakteristischen Zerfallsprozessen.

- Elektromagnetische Komponente

Die elektromagnetische Komponente besteht aus Elektronen, Positronen oder auch Gammastrahlung.

- Myonische Komponente

Die myonische Komponente besteht aus Myonen (μ^-), Anti-Myonen (μ^+) und entsprechenden Neutrinos. Myonen entstehen insbesondere im Zuge des Zerfalls sehr kurzlebiger Mesonen und weisen selbst nur eine sehr kurze Lebensdauer von etwa 2,2 Mikrosekunden auf. Trotz dieser kurzen Lebensdauer kann ein Großteil des Myonenspektrums aufgrund von relativistischen Effekten auch noch auf Meeresspiegelhöhe nachgewiesen werden. Viele Eigenschaften der Myonen sind mit denen von Elektronen vergleichbar. Durch die höhere Ruhemasse der Myonen ($105,7 \text{ MeV}/c^2$ im Vergleich zu $0,511 \text{ keV}/c^2$ für Elektronen) ist der bremsstrahlungsbedingte Energieverlust beim Durchtritt durch Materie allerdings deutlich geringer, was in einer höheren Reichweite resultiert.

In der sekundären kosmischen Strahlung bilden Myonen bzw. Anti-Myonen einen Hauptbestandteil und werden aufgrund ihres Entstehungsortes oft auch als atmosphärische Myonen bezeichnet. Der differenzielle Teilchenfluss beläuft sich für die atmosphärischen Myonen auf etwa $100 \text{ Myonen}/\text{m}^2/\text{s}$ (Meeresspiegel).

Die Verteilung der atmosphärischen Myonen zeigt eine starke Energie- und Winkelabhängigkeit. Der differenzielle Teilchenfluss als Funktion des Winkels Θ relativ zum Zenit folgt dabei einer annähernd mit $\cos^2(\Theta)$ zu beschreibenden Verteilung. In Abhängigkeit des Absolutimpulses zeigt der differenzielle Fluss ein Maximum bei etwa 1 GeV/c und einem starken Abfall mit steigendem Impuls.

Myonen gehören wie Elektronen, Tauonen und die zugehörigen Neutrinos zu der Elementarteilchenklasse der Leptonen und unterliegen somit nicht der starken Wechselwirkung. Der Energieverlust dE/dx , den Myonen beim Durchtritt durch Materie erleiden, lässt sich allgemein durch folgende Formel beschreiben:

$$-\frac{dE}{dx} = a_{Ion}(E) + E [b_{br}(E) + b_{pb}(E) + b_{ni}(E)] \quad (3.1)$$

Hierbei bezeichnet a_{Ion} den Energieverlust aufgrund von Ionisation, atomarer Anregung und dem Herausschlagen von Elektronen, b_{br} den Energieverlust durch Emission von Bremsstrahlung, b_{pb} den Energieverlust durch Paarbildung und b_{ni} den Energieverlust durch photonukleare Wechselwirkungen. Diese vier Prozesse sind energie- und materialabhängig. Tabellierte Parameterwerte für ausgewählte Energien und Materialien sind z. B. in den Referenzen /LOH 85/, /GRO 01/ hinterlegt. Bis zu einer Energie von etwa 100 GeV dominiert der Beitrag a_{Ion} , für höhere Energien werden insbesondere die Beiträge der Bremsstrahlung und der Paarbildung zunehmend relevanter (vgl. Tab. 3.1).

Tab. 3.1 Beiträge zum Energieverlust dE/dx für verschiedene Initialenergien E im Targetmaterial Uran

Die Werte für den totalen Energieverlust und die Beiträge sind in GeV cm²/g angegeben und wurden der Referenz /LOH 85/ entnommen. Der jeweils stärkste Beitrag ist hervorgehoben.

E	-dE/dx	Ionisation	Bremsstrahlung	Paarbildung	Photonukleare Wechselwirkung
1	$0,12 \cdot 10^{-2}$	$0,12 \cdot 10^{-2}$	$0,13 \cdot 10^{-5}$	$0,49 \cdot 10^{-6}$	$0,36 \cdot 10^{-6}$
10	$0,16 \cdot 10^{-2}$	$0,15 \cdot 10^{-2}$	$0,35 \cdot 10^{-4}$	$0,42 \cdot 10^{-4}$	$0,37 \cdot 10^{-5}$
100	$0,32 \cdot 10^{-2}$	$0,18 \cdot 10^{-2}$	$0,58 \cdot 10^{-3}$	$0,86 \cdot 10^{-3}$	$0,34 \cdot 10^{-4}$
1.000	$2,08 \cdot 10^{-2}$	$0,19 \cdot 10^{-2}$	$0,74 \cdot 10^{-2}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$	$0,34 \cdot 10^{-3}$

Begründet durch die mit steigender Energie abnehmende Intensität, ist für die Bildgebung mit atmosphärischen Myonen der Energiebereich von 1 GeV bis etwa 10 GeV von besonderer Relevanz. Der hier den Energieverlust dominierende Beitrag wird gut durch

die Bethe-Bloch-Theorie /NAV 24/ beschrieben, wonach der ionisationsbedingte mittlere Energieverlust wie folgt bestimmt werden kann:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Ion} = 2\pi N_A \alpha^2 \lambda_e^2 \left(\frac{Z}{A}\right) \left(\frac{m_e}{\beta^2}\right) \left[\ln \left(\frac{2m_e \beta^2 \gamma^2 E'_{max}}{I^2(Z)} \right) - 2\beta^2 + \left(\frac{E'^2_{max}}{4E_\mu^2} \right) - \delta \right] \quad (3.2)$$

Hierbei bezeichnet N_A die Avogadrozahl, α die Feinstrukturkonstante, λ_e die Compton-Wellenlänge des Elektrons, Z die Atomzahl des Materials, A die Massenzahl des Targets, m_e die Elektronenmasse, β die Geschwindigkeit relativ zur Lichtgeschwindigkeit, γ den Lorentzfaktor, I das mittlere Ionisationspotenzial des Materials, E'_{max} den maximalen Energieübertrag auf ein Elektron, E_μ die Energie eines Myons und δ den Dichteeffekt.

Aufgrund der Materialabhängigkeit des Energieverlustes ist auch die Reichweite $X(E)$ der Myonen bei einer vorgegebenen Energie materialabhängig. Sie berechnet sich über:

$$X(E) = \int_{E_{min}}^E \left(\frac{dE'}{dx} \right)^{-1} dE' \quad (3.3)$$

In Gesteinsmaterial ($\langle Z \rangle = 11$, $\langle Z/A \rangle = 0,5$, $\rho = 2,65 \text{ g/cm}^3$) haben Myonen mit einer Energie von 1 GeV beispielsweise eine Reichweite von etwa 2 m. Diese steigt für höhere Energien von 10 GeV bzw. 100 GeV auf etwa 18 m bzw. 154 m an /SCA 23/.

Neben dem Energieverlust ist die elastische Coulomb-Streuung ein weiterer wesentlicher Wechselwirkungsprozess. Für hinreichend dicke Materialdicken lässt sich diese näherungsweise durch die Mehrfach-Coulomb-Streuung (engl.: *Multiple Coulomb Scattering*, MCS) beschreiben. Bei konstanten Randbedingungen ist diese in einer Ebene durch eine Normalverteilung mit einer materialspezifischen Standardabweichung σ_θ gegeben /SCA 23/:

$$\sigma_\theta = \frac{13.6 \text{ MeV}}{c \beta p} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0,0038 \frac{x Z^2}{X_0 \beta^2} \right] \quad (3.4)$$

Hierbei bezeichnet β die Geschwindigkeit v relativ zur Lichtgeschwindigkeit c , p den Absolutimpuls, x die Materialstärke und X_0 die Strahlungslänge. Die Strahlungslänge ist eine Eigenschaft des Materials und verhält sich wie folgt:

$$\frac{1}{X_0} \propto \frac{Z(Z+1)}{A} \ln \left(\frac{287}{\sqrt{Z}} \right) \quad (3.5)$$

Hierbei beschreibt A die (effektive) Massenzahl und Z die (effektive) Kernladungszahl des Materials. Ohne äußere Kräfte ist der mittlere Ablenkungswinkel $\langle \Delta\theta \rangle$ gleich Null, wohingegen die Standardabweichung der Winkelverteilung eine materialspezifische Größe ist. Zudem ist festzuhalten, dass atmosphärische Myonen aufgrund des Energiespektrums nicht monochromatisch sind. Dies hat zur Folge, dass, bezogen auf das vollständige atmosphärische Myonenspektrum, die Winkelverteilung nicht durch eine einfache Normalverteilung, sondern durch eine Faltung von Normalverteilungen mit der Energieverteilung beschrieben wird.

3.2 Myographische Messverfahren

Die hohen Reichweiten der energiereichen atmosphärischen Myonen in Materie erlauben in Verbindung mit materialspezifischen Abbrems- und Streu-Eigenschaften die Nutzung für bildgebende Zwecke, beispielsweise im Kontext der zerstörungsfreien Materialprüfung oder für die Erkennung von Dichteanomalien bei großvolumigen Objekten. Voraussetzung hierfür ist die Detektion der Myonen in einer geeigneten Weise. Dies kann beispielsweise durch eine über einen bestimmten Zeitraum integrierende Messung oder eine ereignisweise Detektion bei gleichzeitiger Messung gewünschter physikalischer Parameter erreicht werden. Im Folgenden werden die wesentlichen drei Messverfahren erläutert. Zudem wird ein weiteres Messverfahren vorgestellt, das sich an die Erkennung von spaltbaren Materialien richtet.

3.2.1 Transmissionsverfahren

Das vom Messprinzip einfachste Konzept greift auf ein Detektionssystem zurück, das über einen bestimmten Zeitraum positions- und winkelaufgelöst den Myonenfluss hinter einem zu untersuchenden Objekt misst (Belichtungsprinzip). Typischerweise ist die Fläche des Detektionssystems deutlich kleiner als die Querschnittsfläche des Messobjekts. In der Regel wird der inklusive des Messobjektes gemessene Fluss mit demjenigen Fluss verglichen, der ohne das Objekt zu erwarten ist. Die bildgebende Information ist somit die Transmissionsrate in Abhängigkeit von Polar- und Azimuthwinkel (θ, φ) :

$$T(\theta, \varphi) = \frac{\Delta t_{Ref} N_T(\theta, \varphi)}{\Delta t_{Target} N_{Ref}(\theta, \varphi)} \quad (3.6)$$

Hierbei bezeichnen Δt_{Ref} und Δt_{Target} die Zeiträume der Referenzmessung (ohne Messobjekt) bzw. der Messung einschließlich des Messobjekts. Die Größen $N_{Ref}(\theta, \varphi)$ und $N_T(\theta, \varphi)$ bezeichnen die in diesen Zeitfenstern nachgewiesenen Ereignisse.

Für Messungen mit diesem Verfahren müssen die eingesetzten Detektoren über sehr gute Trackingeigenschaften, d. h. gute Winkel- und Positionsauflösung, verfügen. Für Messobjekte, die eine deutlich größere Querschnittsfläche als die Detektorfläche aufweisen, können mit diesem Messprinzip zweidimensionale Projektionsbilder erzeugt werden. Durch die Kombinationen mehrerer Einzelmessungen bzw. wenn die Detektions- und Messfläche vergleichbar sind, können mit diesem Verfahren auch dreidimensionale Bilder generiert werden.

Das Messprinzip wurde in der Vergangenheit beispielsweise für geologische Fragestellung (z. B. Untersuchung von Vulkanaktivitäten) oder für archäologische Fragestellungen (z. B. Untersuchung von Pyramiden) genutzt (vgl. Abschnitt 3.5.1 und Abschnitt 3.5.3).

3.2.2 Absorptionsverfahren

Auch diese Methode nutzt den Energieverlust als bildgebende Information. Für den Messaufbau werden jedoch zwei Detektoren genutzt, die relativ zur Achse der einfallenden Myonen sowohl vor (Eingangsdetektor) als auch hinter (Ausgangsdetektor) dem Messobjekt platziert werden.

Der Eingangsdetektor muss zur Positions- und Richtungsbestimmung über sehr gute Trackingeigenschaften verfügen. Der Ausgangsdetektor dient primär als Vetodetektor zur Identifizierung von Partikeln, die im Messobjekt absorbiert wurden. Die Größen der Detektionsflächen liegen im Bereich der Querschnittsfläche des Messobjektes. Im Vergleich zum Transmissionsverfahren, richtet sich das Absorptionsverfahren somit an kleinere Messobjekte, in denen ein wesentlicher Teil der einfallenden Myonen absorbiert wird. Demnach ist es primär für Objekte mittlerer Größe oder kleine Objekte mit hoher Dichte gedacht.

Das Verfahren wurde in der Vergangenheit z. B. für die Untersuchung von Lagerbehältern für bestrahlte Brennelemente genutzt. Zumeist werden zweidimensionale Projektionsbilder erzeugt, es können aber – ggfs. durch Nutzung weiterer Messungen an anderen Messorten – dreidimensionale Bilder erzeugt werden.

3.2.3 Streuwinkelverfahren

Wie das Absorptionsverfahren nutzt auch das Streuwinkelverfahren (mindestens) zwei Detektoren, die jeweils vor bzw. hinter dem Messobjekt platziert werden. Ein wesentlicher Unterschied liegt allerdings in dem Zweck des ausgehenden Detektors und den damit verbundenen messtechnischen Anforderungen. Als bildgebende Information werden die objekt-induzierten Änderungen der Myonen-Flugbahn genutzt. Die verwendeten Detektoren müssen daher unabhängig von der Platzierung sehr gute Trackingeigenschaften zur Bestimmung der ereignisspezifischen Position und Richtung aufweisen.

Die Standardabweichung für die Streuwinkelverteilung für den Fall monochromatischer Myonen lässt sich näherungsweise beschreiben durch:

$$\sigma_{\theta} \approx \frac{b}{pc} \sqrt{l\lambda} \quad (3.7)$$

Hierbei hat b den Zahlenwert 13,6 MeV/c, l ist die zurückgelegte Wegstrecke, und λ ist die sogenannte lineare Streudichte ($\lambda = \rho/X_0$).

Durch den Durchgang durch Materie verlieren die Myonen sukzessive an Energie. Dies hat aufgrund der Impulsabhängigkeit Auswirkungen auf die Streuwinkel – anschaulich gesprochen wird die Verteilung mit steigender Eindringtiefe zunehmend breiter. Besonders kritisch wird dies im Niederenergiebereich, da sich dort aufgrund des starken Anstiegs des Energieverlustes pro Wegstrecke auch die Energie auf kurzen Wegstrecken sehr stark ändert. Praktisch führt dies dazu, dass der untere Bereich des Objektes die gemessene Streuwinkelverteilung stärker beeinflusst. Das Streuwinkelverfahren ist aus diesem Grund zuvorderst für verhältnismäßig kleine Messobjekte oder Messobjekte mittlerer Größe mit geringer effektiver Dichte geeignet, bei denen der gesamte Energieverlust und die Absorptionswahrscheinlichkeit begrenzt sind. Grundsätzlich können mit diesem Verfahren bei Einsatz geeigneter Rekonstruktionsverfahren sowohl zwei- als auch dreidimensionale Bilder erzeugt werden.

3.2.4 Myonen-induzierte Neutronenfreisetzung bei spaltbaren Materialien

In Ergänzung zu den rein myographischen Verfahren, bei denen die Myonen direkt nachgewiesen werden und zur Bilderzeugung genutzt werden, gibt es ein weiteres Messverfahren, das sich primär an den Nachweis von spaltbarem Material richtet. Dieses Verfahren nutzt zunächst aus, dass negativ geladene Myonen im Zuge ihrer Absorption im

Coulombfeld eines Kerns eingefangen werden können und anstelle eines Elektrons in eine Elektronenschale gebunden werden. Für Kerne mit hoher Kernladungszahl Z wird meist dann über einen Prozess der schwachen Wechselwirkung ein Proton des Kerns zu einem Neutron gewandelt:



Das so erzeugte Neutron kann in spaltbaren Materialien Spaltungen induzieren, wodurch weitere Neutronen, Photonen und Spaltfragmente freigesetzt werden können. Dieses Verfahren wurde erfolgreich in einem Pilotexperiment in Los Alamos (USA) getestet /GUA 15/.

3.3 Detektion von Myonen und etablierte Detektorkonzepte

In der Myonen-gestützten Bildgebung werden zurzeit hauptsächlich drei verschiedene Detektorarten eingesetzt, die sich in ihrem Detektionsprinzip wesentlich unterscheiden:

- Szintillationsdetektoren
- gasgefüllte Detektoren
- Kernemulsionsplatten

Neben diesen existieren noch weitere Ansätze – hierzu gehören beispielsweise Cherenkov-Detektoren oder Halbleiterdetektoren, die für bildgebende Zwecke jedoch nur in Spezialfällen genutzt werden. Je nach Anwendungsfall existieren für diese Detektorarten mehrere Detektionssysteme, die sich in ihrer Größe, im räumlichen Auflösungsvermögen, in Komplexität der Detektorherstellung und -auslese sowie in den Herstellungskosten unterscheiden /BON 20/. Im Folgenden wird ein Überblick über die einzelnen Detektorkonzepte gegeben.

3.3.1 Szintillationsdetektoren

Ein Szintillator ist ein Körper mit einer bestimmten Materialzusammensetzung, in dem durch Wechselwirkung mit einfallenden Teilchen (wie z. B. Myonen) Szintillationslicht erzeugt wird. Diese Lichtimpulse werden anschließend in einem Photodetektor verstärkt und ausgelesen.

Als Detektionsmaterial eignen sich unterschiedliche Materialien. Für feste Szintillatoren werden in der Regel Kunststoffe (z. B. auf Polystyrol- oder Polyvinyltoloulobasis mit geeigneten Zusätzen) und dotierte anorganische Materialien (z. B. NaI(Tl) oder CsI) genutzt. Kunststoffszintillatoren und anorganische Szintillatoren unterscheiden sich hinsichtlich ihres Detektionsverhaltens. Im Vergleich zu anorganischen Szintillatoren haben Kunststoffdetektoren zwar eine geringere Lichtausbeute, verfügen dafür allerdings über ein besseres Zeitverhalten (kürzere Anstiegs- und Abklingzeiten im Bereich weniger Nanosekunden). Für myographische Messungen werden aufgrund des besseren Zeitverhaltens, der geringeren Kosten und der leichten Größenskalierbarkeit Kunststoffszintillatoren oftmals bevorzugt.

Die Grundgeometrie der Szintillatoren kann hierbei bedarfsorientiert gewählt werden, meist weisen sie einen rechtwinkligen oder dreieckigen Querschnitt auf. Mehrere dieser Grundkörper werden anschließend in einer Rastergeometrie zusammengefasst, so dass sie sich für die Positionsbestimmung in einer Ebene eignen. Das Positionsaufauflösungsvermögen hängt hier wesentlich von den Dimensionen der Grundgeometrie ab. Häufig werden Körper mit rechteckigem Querschnitt genutzt, bei hohen Anforderungen an die Positionsaufauflösung werden auch Szintillatoren mit dreieckigem Querschnitt verwendet. In diesen werden Impulse meist in zwei benachbarten Szintillatoren erzeugt, so dass in Verbindung mit einem Wichtungsalgorithmus Positionsaufauflösungen im Bereich von einem 1 mm erzielt werden können. Anschließend werden zwei oder mehr dieser positionssensitiven Detektoren zu einem Myonen-Tracker zusammengefügt, mit dem sowohl die Position als auch die Impulsrichtung der Myonen bestimmt werden kann. Zwischen den Detektionsflächen können Strahlungsabschirmungen platziert werden. Diese erlauben einerseits eine Reduzierung der elektromagnetischen Komponente, andererseits ermöglichen sie durch Auswertung des Streuverhaltens in dieser Strahlungsabschirmung eine rudimentäre Abschätzung der Impuls der Myonen.

Szintillator-basierte Myonentracker können gut skaliert werden, so dass auch großflächige Tracker mit Flächen im Bereich hunderter m² möglich sind. Weitere Vorteile stellen je nach Konfiguration und verwendeten Komponenten geringe Grundkosten, ihre Robustheit (wartungsarm) und ihre Flexibilität (leicht rekonfigurierbar) dar. Die Hardwarekosten liegen im Bereich von 50.000 €/m². Ein wesentlicher Kostenpunkt sind hierbei die genutzten Photodetektoren. Hierzu gehören beispielsweise Photovervielfacherröhren (engl.: *Photomultiplier Tube*, PMT) oder Multianoden-Photovervielfacherröhren. Seit einigen Jahren werden auch Silizium-Photovervielfacher (engl.: *Silicon Photomultiplier*, SiPM) /PIA 18/ eingesetzt, die vergleichsweise kostengünstig sind /BON 20/.

Im Vergleich zu Gasdetektoren verfügen Szintillatoren in der Regel über eine bessere Zeitauflösungen, allerdings ist das Positionsaufklärungsvermögen oftmals schlechter. Die Ortsauflösung kann jedoch mit Hilfe von Szintillator-Faserebenen verbessert werden. Solche Faserdetektoren können aus mehreren orthogonalen Ebenen parallel angeordneter dünner Szintillationsfasern mit einer Querschnittsfläche von ca. 1 mm² bestehen. Ein Beispiel für diese Detektorgattung bildet das kommerzielle Lynkeos Myonenbildgebungssystem in der Wiederaufarbeitungsanlage Sellafield (Großbritannien). Es wurde zur Charakterisierung von radioaktivem Abfall entworfen und besteht aus zwei Modulen mit je 1024x1024 orthogonal angeordneten Szintillatorfasern mit einem Durchmesser von 2 mm. Das System wurde entwickelt und optimiert, um 500-Liter-Fässer für mittelradioaktive Abfälle (engl.: *Intermediate Level Waste*, ILW) zu untersuchen und tomographisch darzustellen [MAH 18], [IAEA 22].

Für die Pfadrekonstruktion werden geometrieabhängige Parameter genutzt, hierzu gehören beispielsweise die Positionsaufklärung, die Größe der sensitiven Fläche, der Abstand der Szintillatormodule innerhalb der Tracker sowie der Abstand zwischen den Myonen-Trackern.

3.3.2 Gasgefüllte Detektoren

Das Detektionsprinzip gasgefüllter Detektoren beruht auf Gasionisationen, die von geladenen Teilchen (wie z. B. Myonen, Elektronen oder Protonen) beim Durchqueren des Detektors verursacht werden. Zwischen zwei Elektroden wird eine Potenzialdifferenz aufgebaut, die für eine Trennung und einen Transport der freien Elektronen und Ionen hin zu den Elektroden sorgt. Von besonderem Interesse sind aufgrund ihrer geringen Masse die Elektronen, die auf ihren Weg zur Anode je nach Stärke des ausgebildeten elektrischen Feldes weitere freie Elektronen erzeugen können (Elektronenlawine). In Abhängigkeit der Geometrie und des elektrischen Feldes können diese gasgefüllten Detektoren für den Nachweis geladener Teilchen oder auch zur Identifizierung dieser Teilchen genutzt werden.

Für gasgefüllte Detektoren gibt es ein breites Spektrum an unterschiedlichen Detektortypen, mit jeweils spezifischen Verwendungszwecken. Für die Myographie werden beispielsweise Driftkammern, Mehrdraht-Proportionalkammern (engl.: *Multi-Wire Proportional Chamber*, MWPC) und Widerstandsplattenkammern (engl.: *Resistive Plate Chamber*, RPC) eingesetzt. Derzeit noch selten werden zudem GEM-Detektoren und Micromegas Detektoren eingesetzt (vgl. Abschnitt 3.6.3).

In Driftkammern wird als aktives Medium ein Gasgemisch wie z. B. Argon/CO₂ oder Argon/Methan verwendet. Zwischen zwei Kathodenplatten liegen parallel verlaufende Drähte, die die Anode bilden. Die Anodendrähte haben einen geringen Durchmesser im Bereich von 50 µm. Dies führt im Nahbereich der Drähte zu einem stark ansteigenden elektrischen Feld und somit zu einer starken Beschleunigung der Elektronen. Die dadurch verursachte Elektronenlawine führt zu gut messbaren Signalen. Die Elektronik des Detektors misst, wann das nachzuweisende Teilchen die Kammer durchquert und wann das Signal an einem Anodendraht ankommt. Aus der Zeitdifferenz erhält man unter Berücksichtigung der Driftgeschwindigkeit den Abstand zur Drahtachse. Driftkammern haben eine sehr gute Ortsauflösung im Bereich von 100 µm. Großflächige und kostengünstige Detektoren sind möglich. Nachteilig verhalten sich die relativ langen Driftzeiten (und damit verbundene Totzeiten), die notwendige Gasversorgung und die Notwendigkeit einer Hochspannungsversorgung.

MWPC ähneln den Driftkammern vom grundsätzlichen Aufbau, nutzen aber eine deutlich höhere Anzahl an Drähten, die in einem geringen Abstand zueinander platziert werden (typische Drahtabstände liegen im Bereich von 1 mm). Die Ionisationsprozesse erfolgen in Drahtnähe, die Positionsermittlung erfolgt über die Lage des Drahts, für den das größte Messsignal ermittelt wurde. Dadurch ist im direkten Vergleich mit Driftkammern die Positionsauflösung geringer (im Bereich des Drahtabstandes), jedoch erfolgt die Signalverarbeitung deutlich schneller (Signalzeiten im Bereich von 10 ns im Vergleich zu 100 bis 1000 ns für Driftkammern). Zudem stellt das Messprinzip geringere Anforderungen an die Elektronik.

Der Aufbau von RPC unterscheidet sich grundlegend von Driftkammern und MWPC. Sie bestehen aus Hochwiderstandsmaterialien (z. B. Glas oder Bakelit), die ein Gasvolumen umschließen. Die obere und untere Kupferschicht liegen auf unterschiedlichen Potenzialen, so dass sich im Gasvolumen ein homogenes elektrisches Feld ausbildet. Geladene Teilchen, die das aktive Detektorvolumen durchqueren erzeugen Elektronen-Ionen-Paare entlang ihrer Flugbahn. Elektronen werden zur Anode beschleunigt, wobei die Höhe des an der Anode generierten Messsignals vom Abstand des geladenen Teilchens zur Anode abhängt: Je größer der Abstand zur Anode, desto mehr Sekundärionisationen können erzeugt werden, die zu dem Messsignal beitragen können. RPC werden aufgrund ihrer guten Zeitauflösung primär für Flugzeitmessungen eingesetzt. In myographische Messungen werden sie als Trigger-Detektor eingesetzt. Die Positionsauflösung ist im Vergleich zu Driftkammern und MWPC deutlich schlechter und liegt im Bereich einiger mm bis weniger cm.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass insbesondere Driftkammern und MWPC aufgrund ihrer Positionsauflösungsvermögen für myographische Messungen eingesetzt werden. Im Vergleich zu Szintillatoren ergeben sich aus der Hochspannungsversorgung und der Gasversorgung Nachteile, die insbesondere für Feldmessungen berücksichtigt werden müssen. In Tab. 3.2 werden repräsentative Parameter der betrachteten Gasdetektortypen zusammengefasst.

Tab. 3.2 Übersicht wesentlicher Parameter unterschiedlicher Typen gasgefüllter Detektoren

	Driftkammer	MWPC	RPC
Typische Gase	Ar/CO ₂ Ar/Methan	Ar/CO ₂ Ar/Methan	Tetrafluorethan mit Zusätzen von Isobutan und SF ₆
Positionsauflösung	~ 100 µm	10 µm	Einige mm bis wenige cm
Betriebsspannung	~ 2 bis 5 kV	~ 1 bis 3 kV	~ 5 bis 10 kV
Signalzeiten	~ 100 - 1.000 ns	~ 10 ns	~ 1 ns
Verwendung	Positions- und Richtungsbestimmung	Positions- und Richtungsbestimmung	Trigger

Laufende F&E-Projekte beschäftigen sich derzeit u. a. mit der Weiterentwicklung bestimmter Typen gasgefüllter Detektoren und mit der Nutzbarmachung weiterer Detektor-konzepte (vgl. Abschnitt 3.6).

3.3.3 Kernemulsionsplatten

Kernemulsionsplatten sind dicke Fotoplatten mit einer sehr gleichmäßigen und feinen Körnung. Die Fotoplatten bestehen meist aus AgBr-Kristallen (Schichtdicke im Bereich von 100 µm), die in einem Gel verteilt sind. Geladene Teilchen, die die Platten durchqueren, hinterlassen Spuren (aus Ag⁺-Ionen) im Material. Nach Abschluss der Messung werden die Fotoplatten chemisch entwickelt. Hierbei führt jedes erzeugte Ion zu einem lokalen Wachstum von metallischem Ag und macht so das Bild dauerhaft. Die entwickelten Filme werden anschließend mikroskopisch ausgewertet und erlauben so eine Bestimmung von Positionen und Richtungen einzelner Flugbahnen.

Detektorsysteme mit Kernemulsionsplatten nutzen oft dünne Trägerkonstruktionen aus Plastik, die beidseitig mit Kernemulsionsplatten belegt werden. In der Praxis können so Richtungsauflösungen im Bereich von 1 mrad erreicht werden.

Kernemulsionsplatten weisen für die Myonen-gestützte Bildgebung einige positive Eigenschaften aus. Sie haben ein gutes räumliches Auflösungsvermögen (typischerweise im Mikrometer-Bereich). Werden mehrere Platten hintereinander eingesetzt, kann auf Basis eines einfachen Trackings eine Winkelauflösung von wenigen mrad erreicht werden. Zudem sind Anschaffungskosten gering, und das Detektionssystem benötigt keine externe Energieversorgung, was insbesondere für Feldmessungen von Vorteil ist. Allerdings haben Kernemulsionsplatten in der Myonen-gestützten Bildgebung gegenüber anderen aktiven Detektionssystemen auch einige Nachteile. So muss z. B. sichergestellt werden, dass die Platten erst zu Beginn einer Messung installiert werden, da sie fortwährend Ereignisse geladener Teilchen aufzeichnen, die nicht „gelöscht“ werden können, was auch eine kontinuierliche Überwachung (Monitoring) verhindert. Die Fotoplatten sind zudem empfindlich gegenüber Umwelteinflüssen (z. B. Temperatur³, Feuchtigkeit), was die Einsatzmöglichkeiten weiter einschränkt. Außerdem ist eine aufwendige Datenauslese mit eigens dafür konzipierten automatisierten optischen Mikroskopsystemen erforderlich, die nur in wenigen Laboren weltweit verfügbar sind.

3.3.4 Cherenkov Detektoren

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in einem lichtdurchlässigen Material ist abhängig von dessen Brechungszahl und kann in Abhängigkeit von der Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 wie folgt bestimmt werden:

$$c_n = c_0/n \quad (3.9)$$

Das Prinzip von Cherenkov-Detektoren basiert auf der Detektion von Cherenkov-Licht, das emittiert wird, wenn relativistische Teilchen mit einer Geschwindigkeit $v > c_n$ durch ein Material propagieren. Die Emissionsrichtung des Cherenkov-Lichts, charakterisiert durch den Winkel ϑ relativ zum Impulsvektor, ist abhängig von der Energie des Myons:

$$E_\mu = 0,105 \sqrt{\frac{1-\cos^2\vartheta}{n^2}} \quad (3.10)$$

³ Kernemulsionsplatten können am besten im Temperaturfenster von 5 bis etwa 30 °C betrieben werden. Ab etwa 40 °C beginnt die Emulsion zu schmelzen, oberhalb dieser Temperatur sind Kernemulsionsplatten somit ungeeignet.

Mit einer digitalen Kamera (Pixelauflösung), die im Brennpunkt eines Cherenkov-Teleskops platziert ist, können so charakteristische Myonenringbilder aufgenommen werden. Durch Nutzung eines geeigneten Musterkennungsalgorithmus können daraus die Richtung und Energie des Myons bestimmt werden.

Diese Art der Detektoren ist verhältnismäßig komplex und massiv, zudem können Messungen nur im Dunkeln erfolgen. Das Messverfahren erlaubt eine gute Separation von sonstigen Sekundärteilchen der kosmischen Strahlung und ermöglicht es so, die Anzahl falsch-positiver Ereignisse zu reduzieren.

Bae und Chatzidakis haben im Jahr 2022 ein Konzept eines Myonenspektrometers zur Energiebestimmung vorgestellt, dass kompakt sein soll und auf der Nutzung mehrerer druckbeaufschlagter Gaszellen basiert, die als Cherenkov-Strahler fungieren [BAE 22]. Das Funktionsprinzip ist in Abb. 3.2 skizziert und basiert auf der Abhängigkeit des Brechungsindex eines Gases in Abhängigkeit des Gasdrucks und der Temperatur. Die Autoren erwarten mit einem solchen Spektrometer, das zusammen mit positionsauflösenden Detektoren betrieben werden kann, Impulsaufösungen im Bereich von 20 %. Dies ist ausreichend, um die Bildqualität deutlich zu erhöhen.

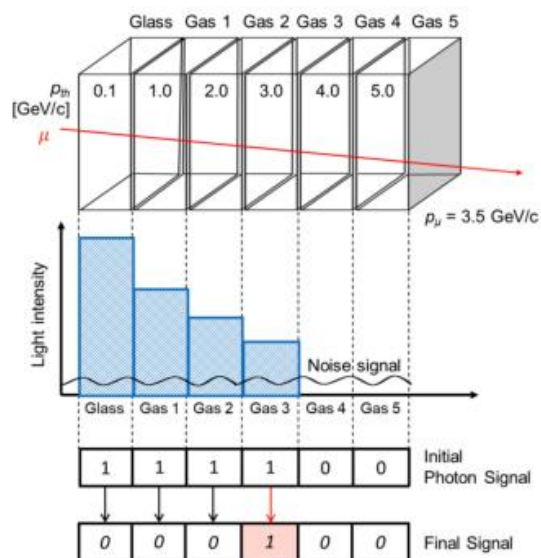


Abb. 3.2 Funktionsprinzip eines Myonenspektrometers mit Hilfe mehrerer Cherenkov-Strahler (CC 4.0) [BAE 22]

3.3.5 Halbleiterdetektoren

Halbleiterdetektoren funktionieren ähnlich einer Diode, an die eine Gleichspannung in Sperrrichtung angelegt ist, so dass im Regelfall kein Strom fließt. Einfallende ionisierende Strahlung erzeugt im Material Elektronen-Loch-Paare, die durch das elektrische Feld zu den Elektroden wandern und dort einen Stromimpuls erzeugen. Zu den geeigneten Detektormaterialien gehören beispielsweise dotiertes Silizium oder hochreines Germanium. Halbleiterdetektoren sind im Vergleich zu Szintillatoren und gasgefüllten Detektoren sehr kostenintensiv, was insbesondere für großflächige Detektoren oftmals ein Ausschlusskriterium ist. Aufgrund ihrer hohen Ortsauflösung im μm -Bereich und der dadurch möglichen präzisen Spurrekonstruktion finden sie trotzdem für Spezialanwendungen (z. B. Messungen in begrenzten Raumbereichen) Nutzen.

3.4 Etablierte Rekonstruktionsverfahren für die Myonen-basierte Bildgebung mit zwei Detektionsflächen

In diesem Abschnitt werden Rekonstruktionsverfahren betrachtet, die für die Auswertungen von Messdaten oder simulierten Daten für das Absorptionsverfahren und das Streuwinkelverfahren (vgl. Abschnitt 3.2) genutzt werden können. Zur Vereinfachung wird von einem idealisierten Detektionssystem mit zwei Detektoren ausgegangen. Ein Eingangsdetektor wird oberhalb des Messobjektes platziert, während ein zweiter Detektor (Ausgangsdetektor) unter dem Messobjekt positioniert wird. Die Geometrie und die relevanten Parameter sind in Abb. 3.3 skizziert.

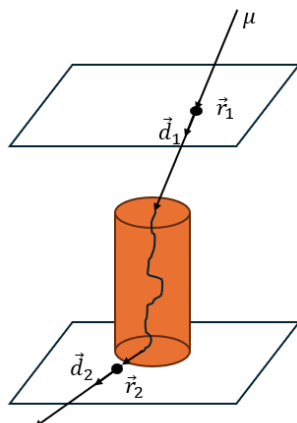


Abb. 3.3 Darstellung der relevanten Richtungs- und Positionsparameter

Die Parameter $\vec{r}_1$ und $\vec{r}_2$ bezeichnen die Positionskoordinaten am oberen bzw. unteren Detektor, während $\vec{d}_1$ und $\vec{d}_2$ die entsprechenden Richtungsvektoren benennen.

3.4.1 Bestimmung eines effektiven Streuwinkels

Der einfachste Rekonstruktionsansatz für das Streuwinkelverfahren bestimmt aus den gemessenen Positionsdaten $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ und Richtungsinformationen $\vec{d}_1, \vec{d}_2$ einen integralen effektiven Winkel θ_{eff} . Hierfür gibt es zwei Ansätze:

$$\theta_{eff} = \angle(\vec{d}_1, \vec{r}_2 - \vec{r}_1) \quad (3.11)$$

$$\theta_{eff} = \angle(\vec{d}_1, \vec{d}_2) \quad (3.12)$$

Der zweite Ansatz führt bei ausgedehnten Objekten meist zu größeren Winkelabschätzungen, kann aber anfälliger für Schwankungen sein, da die letzten Wechselwirkungsprozesse im Objekt statistisch überrepräsentiert sein können. Beide Ansätze sind sehr leicht umzusetzen. Die integrale Zuordnung eines Winkels zu dem teils sehr komplexen Streuverhalten unter Vernachlässigung materieller Unterschiede (ausgedrückt beispielsweise durch die Dichte) bedingt aber eine unvollständige und nur näherungsweise Beschreibung, die das Auflösungsvermögen limitiert.

Diese Rekonstruktion führt zu Projektionsbildern, die einer bestimmten Ebene zugeordnet werden. Dreidimensionale Bilder können hiermit nicht erzeugt werden.

3.4.2 PoCA-Algorithmus

Die Grundidee des *Point-of-Closest Approach* (PoCA) Algorithmus, der erstmals von Schultz beschrieben wurde, geht davon aus, dass das Streugeschehen in dem zu untersuchenden Objekt von einem Ereignis dominiert wird /SCH 04/. Der Ort, der diesem Ereignis zugeordnet werden kann, wird anschließend als bildgebende Information herangezogen. Hierzu werden zunächst die beiden Parametrisierungen der einfallenden und ausgehenden Teilchentrajektorien herangezogen:

$$\vec{R}_1(t_1) = \vec{r}_1 + t_1 \vec{d}_1, t_1 \in \left[0, \frac{z_2 - z_1}{d_{z,1}}\right) \quad (3.13)$$

$$\vec{R}_2(t_2) = \vec{r}_2 - t_2 \vec{d}_2, t_2 \in \left[0, \frac{z_2 - z_1}{d_{z,2}}\right) \quad (3.14)$$

Anschließend werden die Parameter $\tilde{t}_1$ und $\tilde{t}_2$ ermittelt, für die der Abstand zwischen $\vec{R}_1$ und $\vec{R}_2$ minimiert wird. Abschließend wird der Punkt $\vec{r}$ als Mittelpunkt zwischen $\vec{R}_1(\tilde{t}_1)$ und $\vec{R}_2(\tilde{t}_2)$ ermittelt:

$$\vec{r} = \vec{R}_1(\tilde{t}_1) + 0,5 \left(\vec{R}_2(\tilde{t}_2) - \vec{R}_1(\tilde{t}_1) \right) \quad (3.15)$$

Diesem Punkt wird der effektive Streuwinkel μ (oder eine dazu proportionale Größe) zugeordnet:

$$\mu = \varphi(\vec{d}_1, \vec{d}_2) \quad (3.16)$$

Wenn Impulsinformationen an den Referenzflächen vorliegen oder abzuschätzen sind, können diese zur Bestimmung eines modifizierten Streuwinkels μ_{mod} herangezogen werden:

$$\mu_{mod} = \frac{p_2}{p_1} \varphi(\vec{d}_1, \vec{d}_2) \quad (3.17)$$

In der Praxis können mit diesem Verfahren sowohl Projektionsbilder als auch tomographische Bilder erzeugt werden. Bei der Erstellung dreidimensionaler Bilder wird für jedes Ereignis genau ein Ereignis mit der Stärke μ einem Volumenelement (*Voxel*) zugeordnet.

Der PoCA-Algorithmus wird wegen seiner Einfachheit und den daraus resultierenden niedrigen Umsetzungsanforderungen verwendet. Im Vergleich zu einer einfachen Abschätzung des Streuwinkels kann er in Abhängigkeit des Messobjekts zu einer höheren Bildqualität führen und liefert insbesondere für kleine Objekte mit homogener Zusammensetzung gute Ergebnisse. Mit zunehmender Objektgröße und Objekten mit komplexeren Geometrien und Zusammensetzungen trifft die Grundhypothese auch näherungsweise nicht mehr zu und die Bildqualität nimmt ab.

3.4.3 Gefilterte Rückprojektion

Die gefilterte Rückprojektion (engl.: *Filtered Back Projection*, FBP) ist ein klassisches Rekonstruktionsverfahren für die Computertomographie, das auch für die Myographie genutzt werden kann. Bei einer Rückprojektion wird allgemein jeder Messwert entlang seiner Einfallsrichtung verteilt.

Die FBP erfolgt in drei Schritten:

- In einem ersten Schritt wird jede Projektion Fourier-transformiert, d. h. das Signal wird in den Frequenzraum umgewandelt. Niedrige Frequenzen korrelieren mit langsamen Änderungen im Bild, wie sie z. B. für nahezu homogene Objekten auftreten. Hohe Frequenzen treten bei schnellen Dichteänderungen auf, z. B. bei Materialgrenzen oder bei Hohlräumen.
- In einem zweiten Schritt wird ein Hochpassfilter auf das Fourier-transformierte Bild angewendet. Hierdurch werden Kanten stärker betont und Unschärfen reduziert.
- Abschließend erfolgen die Rückprojektionen und die Überlagerung aller betrachteten Einzelrichtungen. Als Ergebnis erhält man ein Bild der inneren Dichteverteilung.

3.4.4 Algebraische Rekonstruktionsverfahren

Algebraische Rekonstruktionsverfahren (engl.: *Algebraic Reconstruction Technique, ART*) betrachten das Rekonstruktionsproblem als lineares Gleichungssystem. Hierzu wird das zu untersuchende Objekt zunächst in Voxel zerlegt. Jedem Voxel werden drei Parameter (Dichte, Absorptionskoeffizient und Streuwahrscheinlichkeit) zugeordnet, die zunächst einen unbekannten Wert haben. Jede Myonenspur liefert eine Gleichung:

$$\sum_j a_{ij} x_j = b_i \quad (3.18)$$

Hierbei bezeichnet a_{ij} die Weglänge bzw. das Gewicht der Spur i im Voxel j , x_j den Wert des Voxels j und b_i bezeichnet den bestimmten Parameter. Das resultierende Gleichungssystem ist groß. In Abhängigkeit der Anzahl an Ereignissen kann es über- oder unterbestimmt sein. Zudem sind die Messdaten mit Unsicherheiten behaftet.

Ausgehend von einer Schätzung $x_j^{(0)}$ wird in einem iterativen Verfahren anschließend die Abschätzung bis zum Erreichen eines Abbruchkriteriums sukzessive verbessert. Hierzu kann z. B. auf die Kaczmarz-Methode zurückgegriffen werden, bei der jede Gleichung nacheinander nach dem folgendem Schema überarbeitet wird /KAC 37/:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \lambda \frac{b_i - a_i x^{(k)}}{\|a_i\|^2} a_i^T \quad (3.19)$$

Der Parameter λ ist der Schrittweitenparameter, mit dem beeinflusst werden kann, wie stark die aktuelle Lösung korrigiert wird. In der Praxis wird häufig ein Wert zwischen

0 und 2 verwendet. Kleinere Werte führen zu einer langsamen, aber stabilen Rekonstruktion, während große Werte schwankungsanfälliger sind.

Konzeptionell wurde ART nach dessen grundlegender Einführung durch Kaczmarz erweitert. Aus Sicht der Bildgebung gehören das simultane iterative Rekonstruktionsverfahren (engl.: *Simultaneous Iterative Reconstruction Technique*, SIRT) /GIL 72/ und das simultane algebraische Rekonstruktionsverfahren (engl.: *Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique*, SART) /AND 84/ zu wesentlichen Vertretern dieser Erweiterungen.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen SIRT und ART liegt in der Verarbeitung: Während ART die Spuren sequentiell verarbeitet, werden diese mit SIRT gleichzeitig verarbeitet. Bezogen auf myographische Messungen führt SIRT in der Regel zu rauschärmeren Bildern, die Iterationen verlaufen stabiler.

SART kann als Kombination von ART und SIRT betrachtet werden. Im Vergleich zu SIRT werden nicht alle Spuren gleichzeitig bearbeitet, sondern mehrere (vergleichbare) Spuren zu einer Projektionsgruppe zusammengefasst.

3.4.5 Maximum-Likelihood-Verfahren

Statistische Verfahren beabsichtigen eine realistische Beschreibung der Trajektorie anhand weniger Messdaten, z. B. Positions- und Impulsrichtungsinformation. Zudem können weitere Informationen als unterstützende Referenzpunkte hinzugenommen werden. Im Gegensatz zu deterministischen PoCA-Verfahren gehen statistische Verfahren von einer Vielzahl an Interaktionen aus, so dass die Grundprämisse physikalisch realistischer ist. Anschaulich gesprochen, nutzen statistische Methoden ein iteratives Verfahren, um eine glatt verlaufende Trajektorie zu ermitteln, die in Einklang mit den Eingangsparametern ist und gleichzeitig eine vorgegebene Prüfgröße minimiert.

Eine Umsetzung dieser Methode stellt die *Maximum Likelihood Scattering and Displacement-Expectation-Maximization* (MLSD-EM) dar, die von Schultz und Kollegen entwickelt wurde /SCH 07/. Im Vergleich zum PoCA-Algorithmus ist dieses Verfahren deutlich komplexer und bedarf der Einführung einiger relevanter Größen, die sich im Folgenden an der Referenz /SCH 07/ orientiert.

Das Streuverhalten von Myonen in einem Objekt der Höhe H ist in Abb. 3.4 skizziert, in der auch wesentliche Parameter illustriert werden. Für die Extrapolation der Myonenspur von (x_0, y_0) zu (x_p, y_p) ergibt sich für die Pfadlänge L :

$$L = h \sqrt{1 + \tan^2(\theta_{x,0}) + \tan^2(\theta_{y,0})} \quad (3.20)$$

Das Volumen wird mit in Voxel ($j = 1, \dots, N$) aufgeteilt versehen. Für Kleinwinkelstreuungen ergeben sich für die Streuung $\Delta\theta$ und den lateralen Versatz Δx :

$$\Delta\theta = \sum_j \Delta\theta_j \quad (3.21)$$

$$\Delta x = \sum_j (\Delta x_j + T_j \Delta\theta_j) \quad (3.22)$$

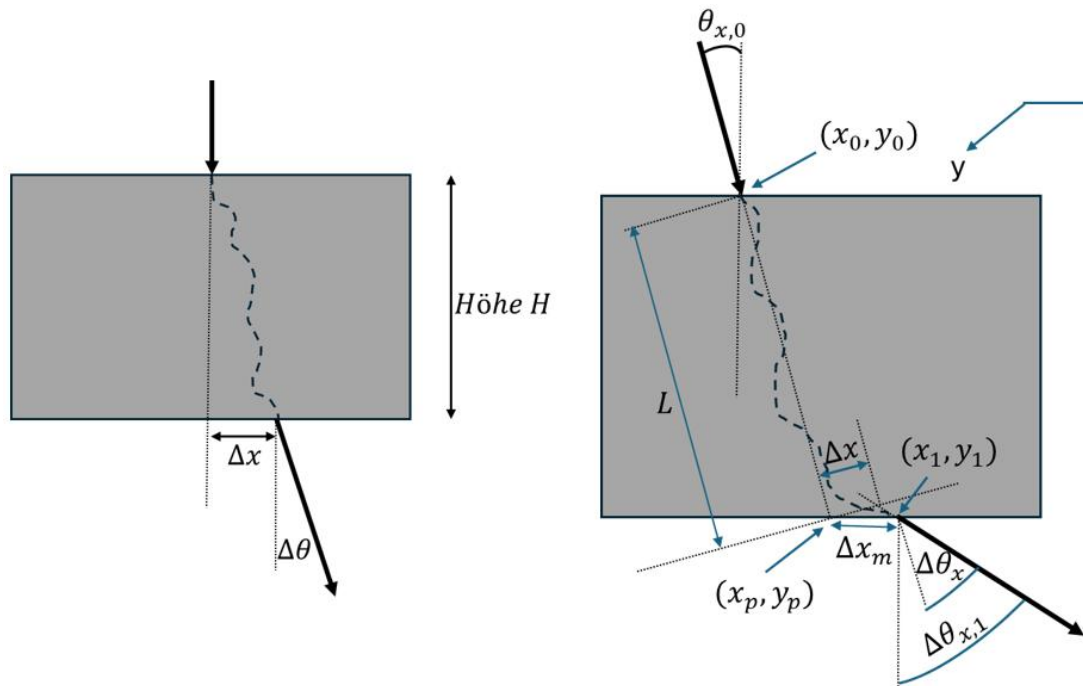


Abb. 3.4 Illustration wesentlicher Parameter für das MLSD-EM Verfahren (Rekonstruktionen von /SCH 07/)

Der Parameter T_{ij} beschreibt die Pfadlänge vom Ausgangspunkt des j -ten Voxels zum Ausgangspunkt des rekonstruierten Volumens. Die Summe wird über die Menge aller Voxel gebildet, durch die die Trajektorie führt und j bezeichnet die entsprechende Laufvariable.

Die Kovarianz für das i -te Myon im j -ten Voxel wird beschrieben durch:

$$\Sigma_{ij} = \lambda_j A_{ij} p_{r,i}^2, \text{ mit } A_{ij} = \begin{bmatrix} L_{ij} & L_{ij}^2/2 \\ L_{ij}^2/2 & L_{ij}^3/3 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Der Parameter L_{ij} bezeichnet die Pfadlänge des i -ten Myons im j -ten Voxel und hat für den Fall, dass der j -te Voxel nicht getroffen wird, den Wert 0.

Daraus ergibt sich für die aufsummierte Kovarianz für das i -te Myon:

$$\Sigma_i = p_{r,i}^2 \sum_j \lambda_j, \text{ mit } W_{ij} = \begin{bmatrix} L_{ij} & \frac{L_{ij}^2}{2} + L_{ij} T_{ij} \\ \frac{L_{ij}^2}{2} + L_{ij} T_{ij} & \frac{L_{ij}^3}{3} + L_{ij}^2 T_{ij} + L_{ij} T_{ij}^2 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Aus Stabilitätsgründen wird bei ausgedehnten Objekten der PoCA genutzt und der Datenvektor D_i für jedes Myon ($i = 1, \dots, M$) wie folgt definiert:

$$D_i = \begin{pmatrix} \Delta\theta_i \\ \Delta x_i \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

Die Wahrscheinlichkeit des Dichteprofiles λ ergibt sich zu:

$$P(D|\lambda) = \prod_i P(D_i|\lambda) \quad (3.26)$$

Hierbei ist $P(D_i|\lambda)$ wie folgt definiert:

$$P(D_i|\lambda) = \frac{1}{2\pi\sqrt{|\Sigma_i|}} \exp\left(-\frac{1}{2} D_i^T \Sigma_i^{-1} D_i\right) \quad (3.27)$$

Ziel des Verfahrens ist es nun, eine Abschätzung $\hat{\lambda}$ für das Dichteprofil zu bestimmen, so dass die zugehörige Wahrscheinlichkeit maximiert wird. Hierzu wird auf den *Estimate-Maximize* (EM) Algorithmus zurückgegriffen, der pro Iteration zwei Schritte umfasst.

Zunächst wird zwischen beobachteten Daten D (Messdaten) und verdeckten Daten H (Streuwinkel und Versatz für jedes Myon und jeden Voxel) unterschieden, die zueinander konsistent sind:

$$D = \{D_i | 1 \leq i \leq M\} \quad (3.28)$$

$$H = \{H_{ij} | 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N\} \quad (3.29)$$

Darauf aufbauend wird eine Testfunktion definiert, die den Erwartungswert der logarithmischen Wahrscheinlichkeitsdichte für D und H in Abhängigkeit des Parametervektors $\lambda^{(n)}$ beschreibt:

$$Q = \mathbb{E}_{H|D, \lambda^{(n)}} [\log(P(D, H|\lambda))] \quad (3.30)$$

Da die verdeckten Daten H die beobachteten Daten D eindeutig bestimmen, ergibt sich:

$$Q(\lambda; \lambda^{(n)}) = \mathbb{E}_{H|D, \lambda^{(n)}} [\log(P(H|\lambda))] \quad (3.31)$$

Jede Iteration des MLEM-Verfahrens umfasst nun zwei Schritte:

- Schritt 1: Schätze die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(H|D, \lambda^{(n)})$ für verborgenen Informationen.
- Schritt 2: Maximiere die Testfunktion Q in Abhängigkeit der Verteilung, die sich aus dem ersten Schritt ergibt.

Nach einer Iteration erhält man so $\lambda^{(n+1)} = \arg \max_{\lambda} Q(\lambda; \lambda^{(n)})$.

Für die Dichteverteilung der Streuung eines einzelnen Myons gilt:

$$P(H_{ij}|\lambda) = \frac{1}{2\pi\sqrt{|\Sigma_{ij}|}} \exp\left(-\frac{1}{2} H_{ij}^T \Sigma_{ij}^{-1} H_{ij}\right) \quad (3.32)$$

Da die unbedingte Verteilung der Streuwerte in jedem Pixel unabhängig von der Streuung in anderen Pixeln ist, ergibt sich die Wahrscheinlichkeit des zusammengesetzten Satzes der verborgenen Daten als Produkt der Wahrscheinlichkeit der Einzelelemente. Daraus folgt für die logarithmische Wahrscheinlichkeitsdichte:

$$\log(P(H|\lambda)) = \sum_j \sum_{i(L_{ij} \neq 0)} \left(-\log \lambda_i - \frac{H_{ij}^T A_{ij}^{-1} H_{ij}}{2\lambda_j p_{r,i}^2} \right) + C \quad (3.33)$$

Hierbei bezeichnet C eine Konstante. Daraus ergibt sich für die Testfunktion:

$$Q(\lambda|\lambda^{(n)}) = C + \sum_j Q_j(\lambda_j|\lambda_j^{(n)}), \text{ mit } Q_j(\lambda_j|\lambda_j^{(n)}) = -M_j \log \lambda_j - \frac{1}{2\lambda_j} \sum_{i(L_{ij} \neq 0)} S_{ij}^{(n)} \quad (3.34)$$

Der Parameter $S_{ij}^{(n)}$ ist als Erwartungswert wie folgt definiert:

$$S_{ij}^{(n)} = \mathbb{E}_{H|D, \lambda^{(n)}} [p_{r,i}^{-2} H_{ij}^T A_{ij}^{-1} H_{ij}] \quad (3.35)$$

Eine längere Rechnung zeigt, dass sich $S_{ij}^{(n)}$ wie folgt bestimmen lässt:

$$S_{ij}^{(n)} = 2\lambda_j^{(n)} + p_{r,i}^2 (\lambda_j^{(n)})^2 (D_i^T \Sigma_{D_i}^{-1} D_i - \text{Spur}(\Sigma_{D_i}^{-1} W_{ij})) \quad (3.36)$$

Durch die Forderung, dass die partielle Ableitung von Q nach λ verschwindet, ergibt sich somit die neue Abschätzung:

$$\lambda_j^{(n+1)} = \frac{1}{2M_j} \sum_{i(L_{ij} \neq 0)} S_{ij}^{(n)} \quad (3.37)$$

Die programmiertechnische Umsetzung des Algorithmus erfolgt entlang der folgenden Schritte:

1. Bestimme aus den Messdaten für jedes Myon i ($i = 1, \dots, M$) die Parameter $\Delta\theta_{x,i}$, $\Delta\theta_{y,i}$, Δx_i , Δy_i und $p_{r,i}^2$.
2. Bestimme bzw. schätze folgende Größen zur Beschreibung der Spur für jedes Myon und jeden Voxel ($j = 1, \dots, N$): L_{ij} und T_{ij}
3. Bestimme für jede Myon-Voxel-Kombination die Wichtungsmatrix W_{ij}
4. Initialisiere die Streuwinkeldichte in jedem Voxel mit einem Schätzwert $\lambda_{j,old}$
5. Führe bis zum Erreichen eines Abbruchkriteriums iterativ folgende Schritte aus:
 - a) Bestimme für jedes Myon den Parameter $\Sigma_{D_i}^{-1}$
 - b) Berechne für jede Myon-Voxel-Kombination den Wert für S_{ij}
 - c) Berechne $\lambda_{j,new}$
 - d) Setze $\lambda_{j,old} = \lambda_{j,new}$

3.5 Einsatzfelder der Myographie

Die Anwendungsfelder der Myographie finden sich in unterschiedlichen Disziplinen zu unterschiedlichen Zwecken. Hierzu gehören insbesondere geologische Untersuchungen, zerstörungsfreie Untersuchungen in der Industrie, zerstörungsfreie Untersuchungen von historischen Bauwerken („Kulturerbe“), Proliferationskontrollen bei Frachtgütern und die zerstörungsfreie Prüfung von Behältern für radioaktive Abfälle. In den folgenden Abschnitten werden fragestellungsbezogenen Anwendungen der Methode illustriert.

3.5.1 Geologische Untersuchungen

Untersuchungen an Vulkanen, Lava und Magma (Vulkanologie), beispielsweise zur Überwachung aktiver Vulkane und zur Vorhersage von Eruptionen, gehören zu den wichtigsten Einsatzfeldern der Myographie. Die Dichte stellt ein Schlüsselparameter für das Verständnis von Vulkanen da, da sie einerseits mit mechanischen Prozessen verknüpft werden kann und andererseits Auskunft zum Füllstand von Magmakammern geben kann. Mit Hilfe der Myographie werden Dichteverteilungen gemessen, woraus sich (oftmals durch Vergleich mit simulierten Daten auf Basis von geologischen Modellannahmen) Rückschlüsse auf die Geodynamik ziehen lassen. Erstmals wurde im Jahr 2007 die Myonen-basierte Bildgenerierung für einen Vulkan in Japan (Mount Asama) eingesetzt, wodurch die Lage und Ausdehnung verfestigter Lava erkannt werden konnte /TAN 09/. Dieser Vulkan ist 2006 ausgebrochen, der Bereich um den Vulkan konnte im Anschluss nicht mit konventionellen geophysikalischen Methoden untersucht werden. Weitere Anwendungen folgten seitdem, beispielsweise für den Vulkan Sakrajima in Japan /OLÁ 22/, den Vulkan Puy de Dôme in Frankreich /AMB 15/, den Vulkan Etna in Italien /LOP 20/ sowie für den Vulkan Stromboli in Italien (vgl. Abb. 3.5) /TIO 19/.

Die vulkanologischen Anwendungen konzentrieren sich insbesondere auf einer Abbildung von Magma-Bewegungen, Pfropfenbildungen, hydrothermalen Deformationen, Ablagerung von Tephra sowie Erosionsprozessen /TAN 23/.

Weitere geologische Anwendungsbeispiele finden sich z. B. in der Exploration oder in der Untersuchung von Gletschern. So nutzten Schouten und Kollegen beispielsweise Szintillationsdetektoren zur Erkennung von Uranvorkommen an einem kanadischen Standort /SCH 18/. Nishiyama und Kollegen untersuchten in den Alpen das unter Gletschern vorhandene Grundgestein /NIS 17/.

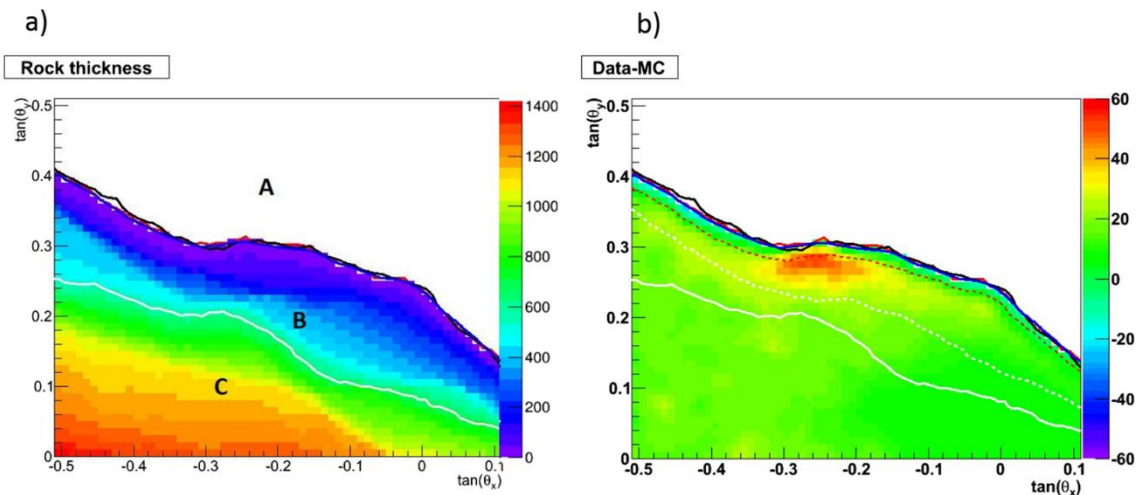


Abb. 3.5 Dichteprofil für einen Teil des Vulkans Stromboli in Italien (Quelle: /TIO 19/, CC 4.0 International)

Das linke Bild zeigt ein gemessenes Profil (Emulsionsdetektor). Hierbei können drei Raumbereiche identifiziert werden: Der Bereich A entspricht dem freien Himmel, B entspricht der oberflächennahen Schicht und C dem Tiefengestein. Das rechte Bild zeigt einen Vergleich zwischen Messung und Monte-Carlo-Simulation. Deutlich zu erkennen ist ein roter Bereich im Bereich A, für den im Vergleich zum angenommen digitalen Höhenmodell eine deutlich geringere Dichte gemessen wurde.

Für geologische Anwendungen werden oftmals Emulsionsdetektoren /NIS 17/, /TIO 19/ und Szintillationsdetektoren /TAN 09/, /AMB 15/, /LOP 20/ eingesetzt.

3.5.2 Zerstörungsfreie Untersuchungen in der Industrie

Für Anwendungen im industriellen Umfeld können zunächst charakteristische Randbedingungen festgehalten werden /MAR 22/. Hierzu gehören zum einen die Dimensionen der zu untersuchenden Objekte, die von einigen zehn cm bis zu einigen Metern reichen. Zu den typischen Materialien gehören u. a. Stahlsorten, Beton, feuerfeste Materialien und Kohlenstoff. Oftmals sind die zu untersuchenden Objekte nur bedingt zugänglich, zudem können die örtlichen Gegebenheiten (z. B. Umgebungstemperatur im Bereich von bis zu 60 °C) die Auswahl und Platzierung der Detektoren beeinflussen. Im Vergleich zu geologischen Anwendungen ist von Vorteil, dass oftmals präzise Beschreibungen der Objekte in Form technischer Zeichnungen existieren. Dies erlaubt eine Fixierung der Geometrie, die rekonstruierten Bilder können so zur Identifizierung von verhältnismäßig kleinen Variationen, die durch wenige Parameter beschrieben werden können, genutzt werden.

Die Myonen-basierte Bildgebung wurde u. a. für regelmäßige Kontrolle von Hochöfen evaluiert und eingesetzt, mit dem Ziel einzelne Komponenten des Schmelzprozesses (z. B. Koks und Schlacken) zu identifizieren /NAG 05/. In Anlagen der kerntechnischen Industrie wurde es beispielsweise zur Visualisierung innerer Strukturen des Reaktors G2 in Frankreich (vgl. Abb. 3.6) /PRO 23/ oder des havarierten Kernkraftwerks Fukushima I /FUJ 13/ genutzt.

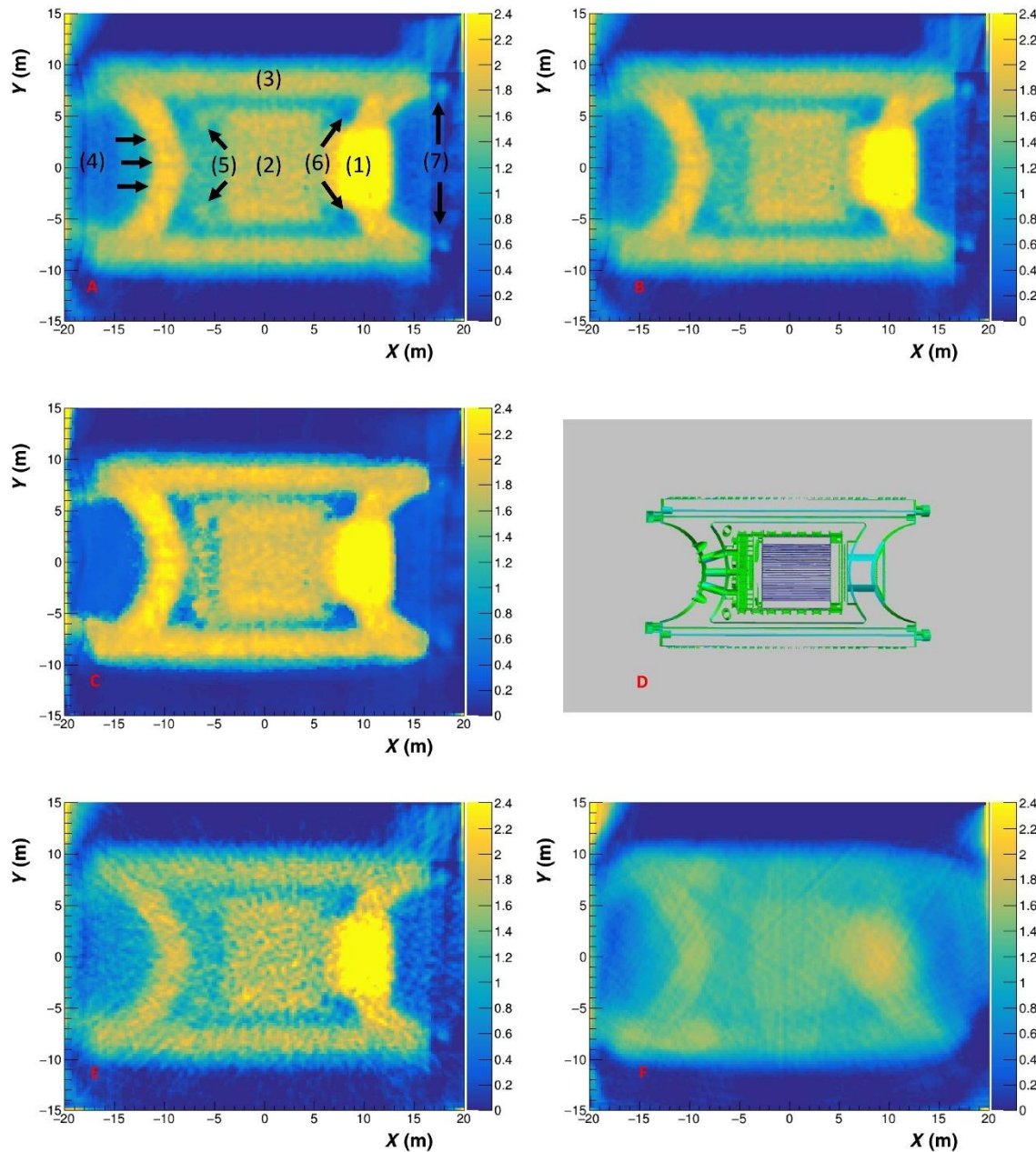


Abb. 3.6 Schnittbild des G2 Reaktors in Frankreich /PRO 23/ (CC4.0 Lizenz)

Die Farbcodierung bezieht sich auf Dichteangaben in g/cm^3 . Die Bilder stellen den gleichen Schnitt dar, die aber hinsichtlich der genutzten Methode bzw. Datengrundlage variieren. Die Bilder A und B unterscheiden sich in ihrer Klasseneinteilung (*binning*). Für das Bild C wurde ein diskretes algebraisches Rekonstruktionsverfahren eingesetzt. Das Bild D entspricht

einem Schnitt des CAD-Modells. Das Bild E korrespondiert zu einer kürzeren Messzeit während für das Bild F weniger Projektionen genutzt wurden.

3.5.3 Zerstörungsfreie Untersuchungen historischer Bauwerke

In der Archäologie wird die Myonen-gestützte Bildgebung zur Untersuchung historischer Bauwerke – hierzu zählen beispielsweise Pyramiden, Tempel oder Gräber – genutzt. Die Anwendungen zielen oftmals darauf ab große Leerräume (z. B. versteckte Kammern) zu lokalisieren, geben aber auch Aufschluss über die Konstruktion dieser Bauwerke bzw. über ereignisorientierte Modifikationen dieser Bauwerke (z. B. Änderungen der Konstruktionen zur Erhöhung der Stabilität, da die ursprüngliche Konstruktion aufgrund von Erdbeben zu Rissbildungen o. ä. geführt hat /TAN 20/).

Zu den ersten archäologischen Anwendungen der Myonen-gestützten Bildgebung zählt die Studie von Alvarez und Kollegen, in denen verborgene Kammern in den Gizeh-Pyramiden gesucht wurden /ALV 70/. Seitdem wurde eine Vielzahl an weiteren Studien veröffentlicht, die auf diese Methode zurückgreifen. Hierzu gehören beispielsweise tomographische Messungen an Teilen der Chinesischen Mauer /LIU 23/ oder an Teilen des Prambanan Tempels in Indonesien /HAN 14/.

3.5.4 Proliferations- und Grenzkontrollen

Die Erkennung und Erkennbarkeit von spaltbarem Material wie angereichertes Uran oder Plutonium in Frachtcontainern hat, auch im Zuge des zunehmenden weltweiten Handelsvolumens, in den vergangenen Jahren zu systematischen Anwendungen und Erprobungen der Myonen-gestützten Bildgebung geführt. Traditionelle Erkennungsverfahren und bildgebende Verfahren, die beispielsweise bei Entladungen oder Grenzübergängen eingesetzt werden, wie die Röntgen- bzw. Gamma-Radiographie, sind für die Erkennung abgeschirmter spaltbarer Materialien ungeeignet. Inspektionsmethoden auf Basis des Streuverhaltens von Myonen stellen hier eine Möglichkeit zur Umgehung dieses Problems dar und erlauben es, auch gut abgeschirmte Materialien (ggfs. mit hoher Kernladungszahl) zu erkennen. Das Unternehmen *Decision Sciences* bietet technische Lösungen wie das System DISCOVERY an, für das Driftröhrendetektoren eingesetzt werden und mit dem tomographische Aufnahmen erstellt werden können /DEC 26/. Eins dieser Systeme wird am Grenzübergang zwischen den Vereinigten Staaten und Mexiko eingesetzt. Mit diesem System war es beispielsweise innerhalb von etwa fünf Minuten möglich, größere Mengen Marihuana zu erkennen, die in Stahlrollen versteckt wurden

/IAEA 22/. Weitere dieser großflächigen Systeme sind beispielsweise in Singapur und in den Vereinigten Arabischen Emiraten im Einsatz /BOR 25b/.

3.5.5 Zerstörungsfreie Prüfung von Behältern für radioaktive Abfälle und eingeschlossenen Inventaren

Wesentliche Aspekte der zerstörungsfreien Prüfung von Behältern für radioaktive Abfälle mit myographischen Methoden betreffen die Abfallcharakterisierung (ggfs. in Ergänzung zu etablierten Methoden wie die Radiographie), die Erkennung von Materialschädigungen bzw. -änderungen sowie die Prüfung der Belegung von Behältern im Kontext der nuklearen Sicherheitsüberwachung (engl.: *nuclear safeguards*).

Die in Gebinden eingeschlossenen (und konditionierten) schwach- und mittelradioaktiven Abfälle haben keine vordefinierte Geometrie, jede Beladung ist hinsichtlich ihrer räumlichen und radiologischen Verteilung zunächst einzigartig. Aufgrund dieser von außen nicht direkt ersichtlichen räumlichen Verteilung sind für eine hinreichend präzise zerstörungsfreie Charakterisierung tomographische Methoden notwendig. Ein Anwendungsbeispiel ist die Untersuchung von 500-Liter-Fässern für mittelradioaktive Abfälle in Sellafield (Großbritannien). Das hierfür eingesetzte Detektionssystem *Muon Imaging Systems* (MIS) wurde von *Lynkeos Technology* entwickelt und ist seit dem Jahr 2018 im Betrieb /IAEA 22/. Die Detektoren nutzen positionsauflösende Szintillationsfasern mit einem Durchmesser von 2 mm. Zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit und zur Untersuchung des Auflösungsvermögens wurden vorab mehrere Testmessungen durchgeführt. Hierfür wurden u. a. Probekörper aus Uran (Zylinder mit einem Durchmesser von 2 cm und einer Höhe von 3 cm) bzw. aus Blei (Würfel mit $9 \times 4 \times 2 \text{ cm}^3$) in ein bearbeitetes 500-Liter-Fass (Füllung aus Beton und MgO) eingeschlossen, die Myonen-tomographisch erkannt werden konnten /CLA 22/. Ein weiteres Beispiel ist die Untersuchung der Eignung der Myonentomographie zur Materialidentifikation in Behältern mit Hilfe einer Multivarianzanalyse /FRA 16/.

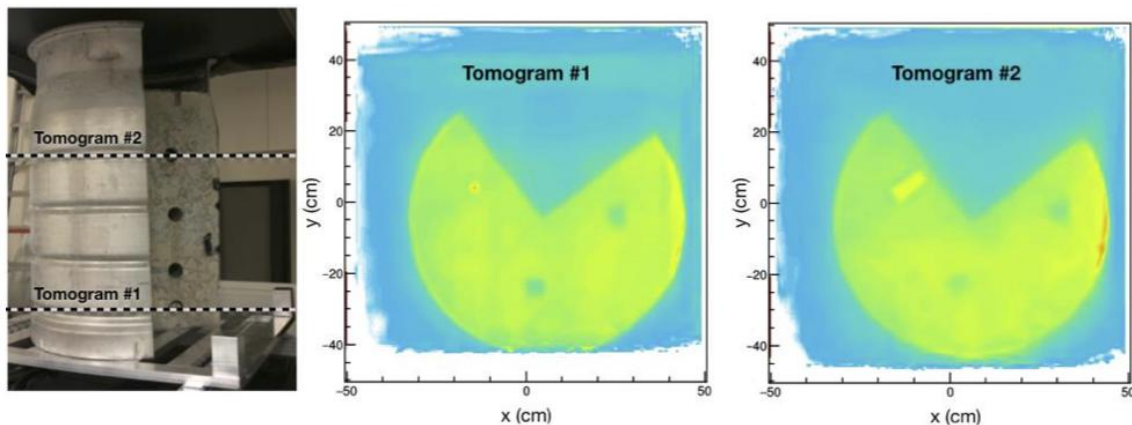


Abb. 3.7 Aufbau einer Myonen-tomographischen Testmessung an einem 500-Liter-Fass in Sellafield /CLA 22/ (CC 4.0 Lizenz)

Das linke Bild zeigt den Messaufbau. Das mittlere Bild zeigt ein Bild für einen 10 cm hohen Schnitt aus dem unteren Bereich, in dem das Uran als heller Kreis zu identifizieren ist. Das rechte Bild zeigt ein Bild für einen 10 cm hohen Schnitt aus dem oberen Bereich, in dem das Bleiobjekt (heller Bereich) gut zu erkennen ist.

In einigen Ländern wurden schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Stahlcontainern eingelagert, die mit Bitumen verfüllt wurden. Durch Wechselwirkung der eingeschlossenen Strahlung mit dem Bitumen bildet sich über die Zeit Wasserstoff, der zu Blasenbildung führt und mit der Zeit zu einem Anschwellen des Behälters führen kann. In Studien konnte für einen entsprechenden Behälter gezeigt werden, dass Gasblasen mit einem Volumen von mehr als 2,2 Liter mit hoher Wahrscheinlichkeit Myonen-tomographisch nachgewiesen werden können /DOB 18/.

Abschließend sind die zahlreichen experimentellen Untersuchungen und Simulationsstudien hervorzuheben, die sich mit der Frage auseinandersetzen, inwieweit die Myonen-basierte Bildgebung in der Lage ist, das in TLB eingeschlossene Brennelement- und Brennstabinventar abzubilden, beispielsweise um die Übereinstimmung mit Belegungsplänen zu prüfen. Diese Art von Studien wurden für unterschiedliche Behältertypen durchgeführt, zu denen beispielsweise der Westinghouse MC-10 /DUR 18/, CASTOR® V/52 /ALR 21/ und der CASTOR® V/19 /POU 17/, /ANC 19/, /BRA 21/, /NIE 25a/ gehören. Grundsätzlich kommen diese Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass die nach wenigen zehn Stunden erreichte Statistik ausreichend ist, um die Anwesenheit bzw. das Fehlen einzelner Brennelemente nachzuweisen. Grundsätzlich erscheint dies auch für partielle Brennelemente möglich, auch wenn hier – auch aufgrund der deutlich längeren Messzeiten – die experimentelle Verifikation derzeit fehlt.

3.6 Aktuelle Forschung und Entwicklung mit Bezug zum Messverfahren im Allgemeinen sowie zur Behälterprüfung im Speziellen

Auch bedingt durch die in vielen Ländern absehbaren verlängerten Zwischenlagerperioden sind sowohl national als auch international F&E-Bestrebungen zu beobachten, die auch die Myographie umfassen. Hierzu werden zunächst in Ergänzung zu den bereits in Abschnitt 2.5.1.1 beschriebenen Forschungsaktivitäten nationale und internale F&E-Vorhaben vorgestellt, die sich in einem breiteren Kontext mit der Myographie beschäftigen, bevor in den anschließenden Abschnitten einzelne Aspekte hervorgehoben werden.

3.6.1 Arbeiten der Technischen Universität (TU) Dresden und von Verbundpartnern (DCS-Monitor und RIMANUS)

Die TU Dresden (Professur für Bildgebende Messverfahren für die Energie- und Verfahrenstechnik) beschäftigt sich zusammen mit den Verbundpartnern Hochschule Zittau/Görlitz und dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) seit mehr als zehn Jahren mit bildgebenden Verfahren für die Prüfung von TLB.

Im Rahmen des vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Forschungsvorhabens DCS-Monitor I (Vorhabensnummer: 1501518A/1501518B, Laufzeit: Februar 2016 bis Juli 2019) führte der Verbund zunächst Machbarkeitsstudien durch. Hierbei wurden insgesamt vier Messkonzepte evaluiert:

- Thermographie (vgl. Abschnitt 2.4.8)
- Messung der Gamma- und Neutronen-Strahlungsfelder (vgl. Abschnitt 2.4.9)
- Myographie
- akustische Methoden (vgl. Abschnitt 2.4.3)

Im Kontext der Myographie wurde ausgehend von Simulationsstudien gezeigt, dass sich Brennelemente unter Annahme eines realistischen Myonenspektrums Brennelemente durch eine Messung über etwa 1,5 Tage auflösen ließen. Darüber hinaus zeigten die Simulationsbetrachtungen, dass sich auch realistische Brennstoffverlagerungen mit der Methode auflösen ließen. Zusammenfassend wurde festgehalten, dass sich die Methode für eine Behälterüberwachung eignen sollte /WAG 20/.

Die Arbeiten wurden im ebenfalls durch das Bundeswirtschaftsministerium geförderten Vorhaben DCS-Monitor II (Vorhabensnummer: 1501606A/1501606B, Laufzeit: April 2020 bis März 2024) fortgesetzt /WAG 25/. Der Verbund konzentrierte sich in diesem Vorhaben auf die Messung von Gamma- und Neutronen-Strahlungsfeldern und die Myographie. Zur Messung der Strahlungsfelder wurde ein Messsystem mit kollimierten CLYC-Detektoren und einem automatisierten Positionierungssystem entwickelt und unter realen Bedingungen im Zwischenlager Nord mit positiven Ergebnissen evaluiert. Für die myographischen Untersuchungen wurde ein großflächiger Driftkammerdetektor (vgl. Abschnitt 3.3.2) entwickelt und Prototypen hergestellt und evaluiert. Dieser besteht aus zwei Szintillationsebenen und zwölf positionsauflösenden Driftkammern (Argon/CO₂-Gemisch, 82 %/18 %). Die aktive Fläche eines Detektors beträgt 25x25 cm², ein Detektor hat ein Außenvolumen von 40x40x30 cm³. Das Positions- und Winkelauflösungsvermögen liegt bei etwa 1 mm bzw. 1°. Der Detektor wurde im Laborumfeld getestet und die Funktionstüchtigkeit nachgewiesen /WAG 26/. Darüber hinaus wurde ein algebraisches Rekonstruktionsverfahren entwickelt und an einem virtuellen Phantom getestet /WAG 25/.

Die Arbeiten werden derzeit in den Forschungsvorhaben DCS-Monitor III (Fortsetzung der Arbeiten zur Messung der Gamma- und Neutronenstrahlungsfelder) und RIMANUS (Fortsetzung der Arbeiten zur Myographie. Förderzeitraum: 2023 bis 2027, gefördert durch das Bundesumweltministerium) weitergeführt.

3.6.2 Internationales Verbundvorhaben MUon TOMography for CAsks (MUTOMCA)

Das seit dem Jahr 2020 laufende internationale Projekt MUTOMCA untersucht die Eignung der Myographie für die Überprüfung von beladenen TLB für bestrahlte Brennelemente. An diesem Vorhaben beteiligen sich das *Istituto Nazionale Di Fisica Nucleare* (INFN, Italien), das Forschungszentrum Jülich, die BGZ und die europäische Atomgemeinschaft (EURATOM).

Im Rahmen des Vorhabens wurde Anfang 2023 ein erster Feldtest im Zwischenlager Grafenrheinfeld durchgeführt. Dabei wird ein Detektorraufbau bestehend aus zwei – seitlich platzierten – Driftröhrendetektoren verwendet. Die Detektoren umfassen jeweils 183 Driftröhren, die in sechs Detektionsschichten angeordnet sind. Die zylindrischen Aluminiumröhren der Driftröhren haben eine Länge von 4,5 m und einen Durchmesser von 5 cm. Die Wandstärke beträgt 1,5 mm. Als Gas wird ein Ar/CO₂-Gemisch

(85 % : 15 %) verwendet, die Betriebsspannung beträgt etwa 3 kV. Das Detektordesign soll eine präzise Messung entlang der y-Achse und eine näherungsweise Bestimmung entlang der z-Achse ermöglichen. Zur besseren Bestimmung der z-Koordinate wurden zusätzlich zwei Driftzellendetektoren (*INFN Muon Detectors*) verwendet, die jeweils über 286 Driftzellen in vier Lagen verfügen /BON 23/. Für Referenzmessungen hinsichtlich der Detektorausrichtung wird das Detektorsetup außerdem um einen kleinen Driftzellendetektor oberhalb des zu untersuchenden Behälters erweitert /LOR 23/.

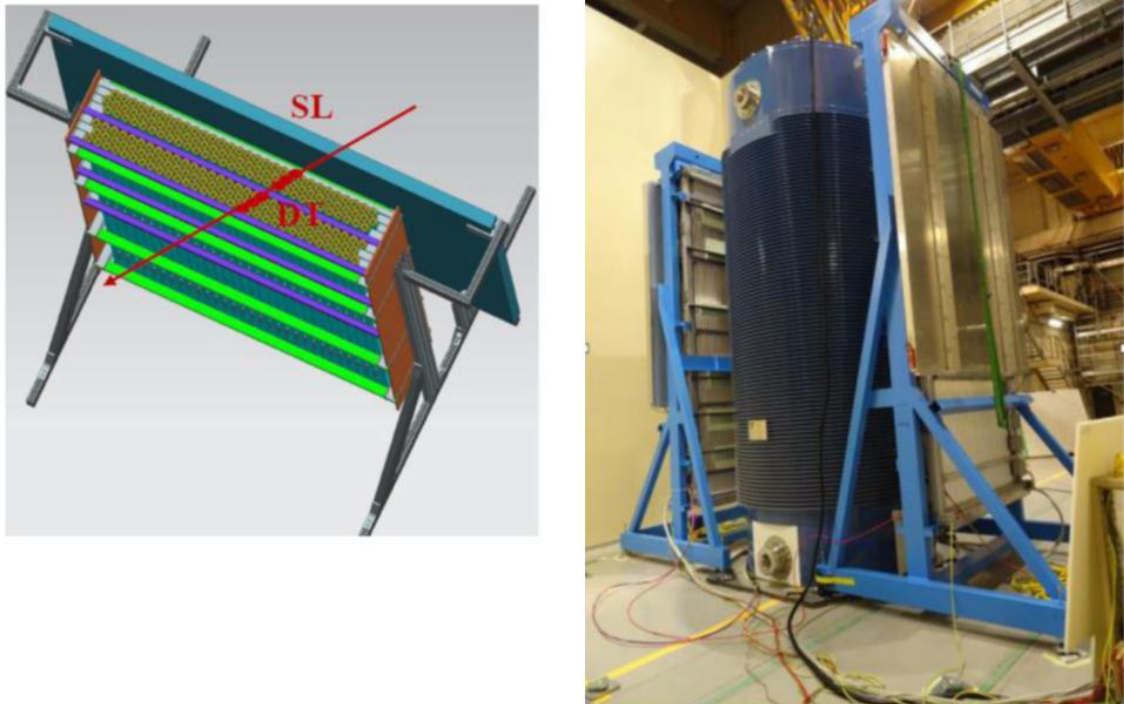


Abb. 3.8 Detektorsetup für die Feldmessungen in Grafenrheinfeld im Rahmen des MUTOMCA Vorhabens (CC4.0) /AND 25/

Links: Schematische Zeichnung eines Detektormoduls. Zu erkennen sind die einzelnen Driftrohren und die zusätzlichen Myonendetektoren des INFN (SL). Rechts: Foto der Feldmessung.

Im Rahmen der Feldstudie wurden Messungen an einem beladenen TLB der Bauart CASTOR® V/19 sowie an einem baugleichen Behälter, der aber mit drei nicht näher spezifizierten Dummy-Elementen an den mittleren Positionen beladen war, über einen Zeitraum von 18 Tagen (TLB mit Dummies) bzw. elf Tagen (beladener TLB) durchgeführt. Dabei wurden insgesamt etwa $1E7$ (TLB mit Dummies) bzw. etwa $6E6$ (beladener TLB) Spuren aufgenommen. Ein praktisches Problem, das bei den Messungen an dem beladenen TLB auftrat, war die Detektion zufälliger Ereignisse (Gamma- und Neutronenstrahlung), die auf die im TLB eingeschlossene Radioaktivität zurückgeführt werden kann. Je nach Einstellungen der Trigger-Elektronik wurde eine bis zu 30-fach erhöhte

Trigger-Rate (im Vergleich zu einer Umgebungsmessung ohne TLB) beobachtet /BON 23/. Dieses Problem soll in zukünftigen Messungen bzw. weiteren Analysen des aufgenommenen Datensatzes entsprechend berücksichtigt werden /NIE 23/, /LOR 23/, /BON 24/, /AND 25/.

3.6.3 Weiterentwicklung von Detektionssystemen

Weiterentwicklungen im Bereich der Detektoren konzentrieren sich neben grundsätzlichen Verbesserungen u. a. auf Bestrebungen zur Kostenreduzierung, Modularität, Verbesserung der Portabilität, Kompaktheit und auf die Adaption moderner Detektorkonzepte für die Myographie.

Die Detektorentwicklungen im Rahmen der DCS-Monitor bzw. des RIMANUS-Vorhabens motivieren sich beispielsweise durch den praktischen Bedarf an einem modularen, robusten und günstigen Detektor für Messungen im Zwischenlagerumfeld (vgl. Abschnitt 3.6.1).

Derzeit für myographische Messungen selten genutzte Detektortypen sind Micromegas⁴-Detektoren /GIO 96/. Diese bestehen typischerweise aus einem gasgefüllten Driftbereich, einer feinen metallischen Mikronetz-Elektrode und einem darunterliegenden Verstärkungsbereich. Durch Ionisation entstehende Elektronen driften zur Netzelektrode, passieren diese und werden anschließend im Verstärkungsbereich lawinenartig vervielfacht. Die resultierenden Elektronen werden in einem Auslesestreifen oder Pixeln gemessen. Micromegas vereinen mehrere positive Eigenschaften anderer gasgefüllter Detektoren, hierzu gehören u. a. sehr gute Ortsauflösungen und eine Eignung für hohe Zählraten. Zudem sind großflächige Bauweisen möglich. Verwendung finden diese Detektoren im Forschungsumfeld, beispielsweise werden sie am CERN für den ATLAS-Detektor verwendet /MAR 24/. In den vergangenen Jahren wurden vereinzelt Micromegas-Detektoren für unterschiedliche myographische Messungen eingesetzt /LEF 23/, /WAN 25/. Für die Feldstudie von Wang und Kollegen wurden Micromegas-Detektoren mit Querschnittsflächen von 40x40 cm² eingesetzt. Das räumliche Auflösungsvermögen des Systems betrug 190 µm, zudem wurden die Kompaktheit und die Stabilität unter wechselnden Bedingungen hervorgehoben. /WAN 25/. Für myographische Messungen mit Micromegas-Detektoren werden auch Methoden des maschinellen Lernens verwendet,

⁴ Micromegas ist ein Akronym für MICRO-Mesh Gaseous Structure.

beispielsweise zur Spurrekonstruktion oder zur Analyse der Auslesesignale eingesetzt /LEF 24/.

3.6.4 Weiterentwicklung von Rekonstruktionsverfahren

Weiterentwicklungen für die Rekonstruktionsverfahren fokussieren sich auf unterschiedliche Aspekte. Hierzu gehören beispielsweise die Nutzung weiterer Informationen für die Rekonstruktion und die Weiterentwicklung bestimmter Rekonstruktionsverfahren im eigentlichen Sinne.

Bae und Kollegen haben das Rekonstruktionsverfahren MMST (engl: *Momentum-Informed Muon Scattering Tomography*) eingeführt, bei dem auch Impulsinformationen für die Bilderzeugung herangezogen werden. Das Verfahren nutzt zunächst einen PoCA-Algorithmus zur Bestimmung von Streuposition, verwendet aber anstelle des Streuwinkels die sogenannten *M-Werte* als bildgebende Information, in denen sowohl Impulsinformationen als auch Streuwinkel berücksichtigt werden. In Geant4-gestützten Monte-Carlo-Simulationen für einen TLB konnten die Autoren zeigen, dass im Vergleich zum PoCA-Verfahren der MMST-Algorithmus eine deutlich höhere Bildqualität ermöglicht (vgl. Abb. 3.9) /BAE 24/.

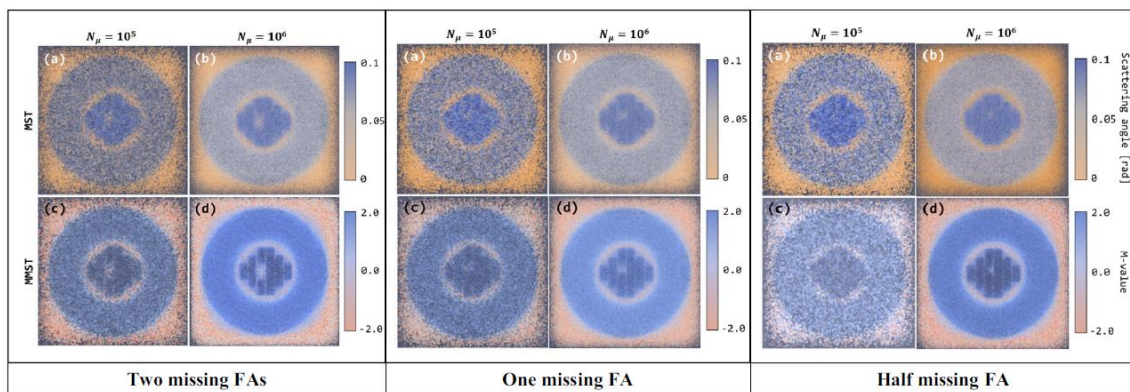


Abb. 3.9 Simulationsergebnisse für einen TLB für bis zu 24 Brennelemente zum Vergleich des PoCA- und des MMST-Algorithmus (CC 4.0) /BAE 24/

Die Bilder zeigen Simulationsergebnisse mit 1E5 bzw. 1E6 Ereignissen für zwei fehlende Brennelemente (links), ein fehlendes Brennelement (Mitte) sowie für ein zur Hälfte fehlendes Brennelement (rechts). Gegenübergestellt werden rekonstruierte Projektionsbilder für den PoCA-Algorithmus (oben) und den MMST-Algorithmus (unten). Die im direkten Vergleich höhere Qualität der MMST-generierten Bilder ist deutlich zu erkennen.

Wagner und Kollegen haben im Rahmen des Vorhabens DCS Monitor II (vgl. Abschnitt 3.6.1) ein algebraisches Rekonstruktionsverfahren entwickelt. Im Vergleich zu

iterativen Rekonstruktionsverfahren wird bei diesem Verfahren keine Abschätzung der Myonenspur im Prüfobjekt angestrebt. Bei diesem Verfahren werden Myonen in Abhängigkeit des gemessenen Streuwinkels mit Hilfe eines Steuerparameters in zwei Kategorien (schwach gestreute Myonen und stark gestreute Myonen) eingeteilt. Die generierten Bilder zeigen eine Abhängigkeit von diesem Parameter. Dies kann bei geeigneter Wahl dieses Parameters und bei ausreichender Statistik die Bildqualität im Vergleich zu anderen Rekonstruktionsverfahren erhöhen (vgl. Abb. 3.10) /WAG 25/.

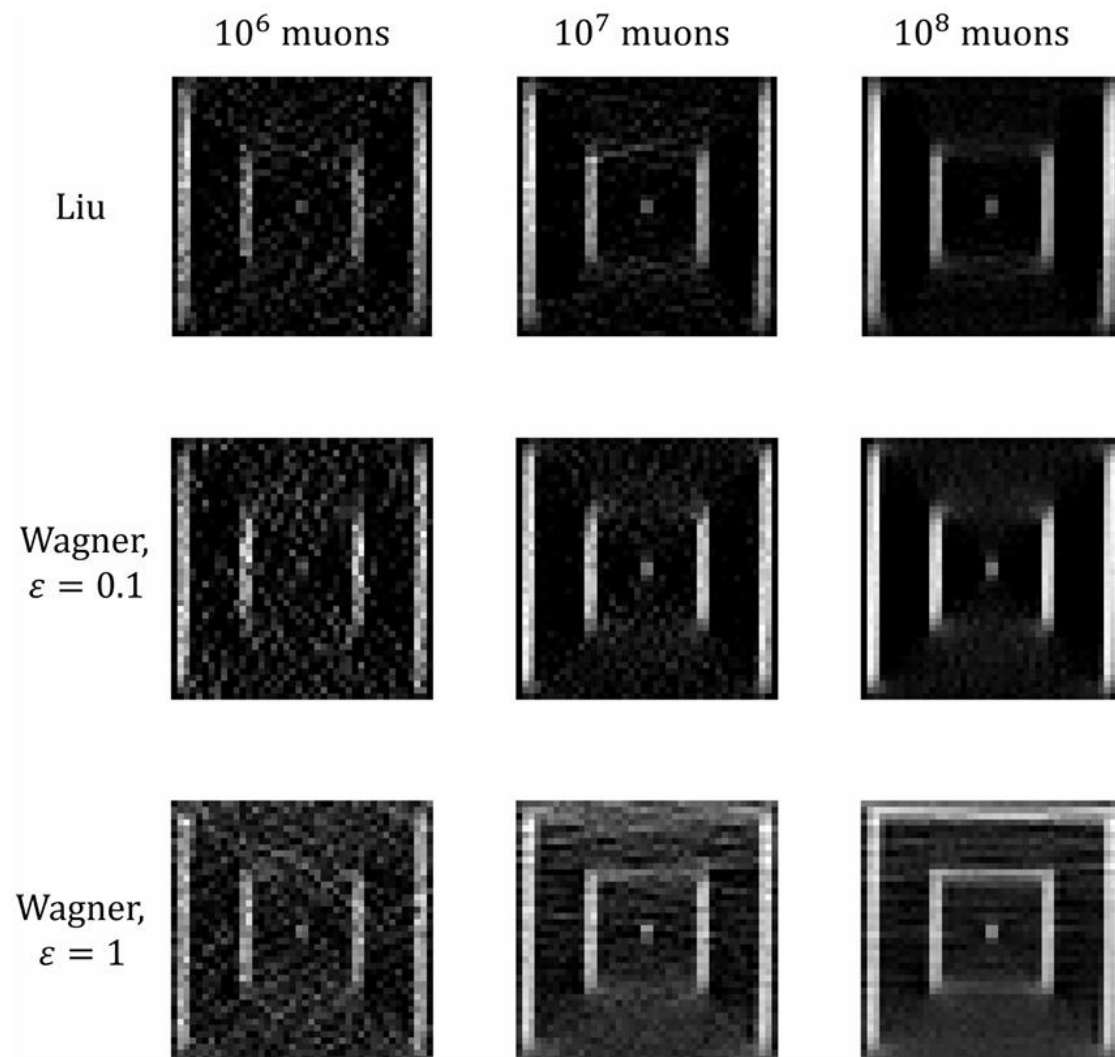


Abb. 3.10 Rekonstruierte Projektionsbilder auf Basis der Rekonstruktionsverfahren von Liu und Wagner für ein virtuelles Phantom (CC 4.0) /WAG 25/

3.6.5 Nutzung von Künstlicher Intelligenz (KI)

Methoden der KI, meist in Form des maschinellen Lernens, wurden in der nahen Vergangenheit insbesondere als Hilfsmittel für die Auslesung und Interpretation von Detektordaten sowie für die Bildrekonstruktion bzw. für die Bildauswertung evaluiert. Unter

maschinellern Lernen werden dabei rechnergestützte Verfahren verstanden, die aus Beispieldaten Muster und Zusammenhänge automatisch erlernen, ohne dass alle Regeln explizit vorgegeben werden müssen. Insbesondere neuronale Netze, also mathematische Modelle, die lose an die Funktionsweise biologischer Nervensysteme angelehnt sind, finden zunehmend Anwendung in der Rekonstruktion, Interpretation und Optimierung myographischer Bildgebungssysteme.

Ein zentraler Anwendungsbereich von KI in der Myonen-gestützten Bildgebung ist die Verbesserung der Bildrekonstruktion aus den gemessenen Myonen-Spuren. Während klassische Verfahren die Streuung einzelner Myonen lokal approximieren, erlauben lernbasierte Modelle eine globale Auswertung vieler Ereignisse unter Berücksichtigung komplexer Korrelationen. Lim und Kollegen stellen mit dem sogenannten „ μ -Net“ ein zweistufiges neuronales Verfahren vor, das zunächst geometrische Informationen aus Myonen-Spuren extrahiert und diese anschließend zur voxelbasierten Bildrekonstruktion nutzt. Dabei kommt ein tiefes neuronales Netz zum Einsatz, das aus vielen hintereinandergeschalteten Rechenoperationen besteht und speziell für die Verarbeitung räumlicher Bilddaten geeignet ist. Die Autoren zeigen, dass die so erzeugten Rekonstruktionen eine deutlich höhere Bildschärfe und ein verbessertes Signal-zu-Rausch-Verhältnis aufweisen als klassische Verfahren, selbst bei begrenzter Ereigniszahl und unvollständiger Impulsinformation der Myonen /LIM 23/.

Ähnliche Ergebnisse berichten Pezzotti und Kollegen, die neuronale Netze zur strukturellen Diagnose großer Objekte einsetzen. Durch das Lernen aus simulierten Referenzszenarien gelingt es, Bildartefakte zu reduzieren und die notwendige Messzeit signifikant zu verkürzen. Diese Arbeiten verdeutlichen, dass KI-basierte Rekonstruktionsansätze nicht lediglich bestehende Algorithmen beschleunigen, sondern qualitativ neue Rekonstruktionsmöglichkeiten eröffnen /PEZ 25/.

Neben der direkten Bildrekonstruktion gewinnt die Rekonstruktion realistischer Myonenbahnen zunehmend an Bedeutung. Klassische Ansätze modellieren die Myonenstreuung oft stark vereinfacht, was insbesondere bei stark abschirmenden Objekten, wie etwa einem Transport- und Lagerbehälter, zu systematischen Fehlern führt.

Ughade und Chatzidakis schlagen mit dem sogenannten μ TRec-Algorithmus ein Bayes'sches Rekonstruktionsverfahren vor, das die Myonentrajektorie als Wahrscheinlichkeitsverteilung beschreibt und physikalische Streuprozesse explizit berücksichtigt. Obwohl dieser Ansatz primär statistisch motiviert ist, bildet er eine wichtige Brücke zu

KI-Methoden, da er zeigt, wie physikalisches Vorwissen und datengetriebene Optimierung kombiniert werden können. In simulationsbasierten Studien zur Untersuchung von Trockenlagerbehältern für abgebrannte Brennelemente wird eine verbesserte Detektion fehlender Brennelemente im Vergleich zum klassischen PoCA-Verfahren nachgewiesen /UGH 24/.

Diese Entwicklung unterstreicht einen allgemeinen Trend hin zu sogenannten physik-informierten Lernverfahren, bei denen bekannte physikalische Gesetzmäßigkeiten und Größen gezielt in lernende Modelle integriert werden, um deren Stabilität und Interpretierbarkeit zu erhöhen.

Ein weiterer wichtiger Anwendungsbereich ist die Klassifikation von Materialien auf Basis ihrer Streueigenschaften. Ziel ist es, aus den gemessenen Myonendaten Rückschlüsse auf die effektive Ordnungszahl oder Materialzusammensetzung zu ziehen.

Wang und Kollegen zeigen, dass sogenannte Transferlern-Methoden hierbei besonders effektiv sind. Beim Transferlernen wird ein neuronales Netz zunächst mit umfangreichen Datensätzen aus verwandten Problemstellungen trainiert und anschließend mit wenigen spezifischen Beispielen an die Zielanwendung angepasst. Dadurch kann auch bei begrenzter Datenverfügbarkeit eine hohe Klassifikationsgenauigkeit erreicht werden. Die Autoren berichten über Genauigkeiten von über 95 % bei der Unterscheidung verschiedener Materialien, einschließlich Materialien hoher Ordnungszahlen /WAN 26/, die für Anwendungen im kerntechnischen Bereich besonders relevant sind.

Diese Arbeiten sind insbesondere für die zerstörungsfreie Prüfung von Lagerbehältern für radioaktive Abfälle von Bedeutung, da sie perspektivisch eine automatisierte Inventarverifikation ermöglichen.

Die Qualität der myographischen Bilder hängt stark von der Kenntnis physikalischer Größen, insbesondere des Myonenimpulses, ab. Da dieser in vielen Detektorsystemen nicht direkt gemessen werden kann, wurden in den letzten Jahren vermehrt ML-basierte Regressionsverfahren untersucht.

Bury und Lagrange vergleichen unterschiedliche neuronale Netzarchitekturen zur Schätzung des Myonenimpulses aus Streudaten und Detektorsignalen. Die Ergebnisse zeigen, dass lernbasierte Modelle in der Lage sind, auch unter realistischen Detektoreffekten robuste Impulsschätzungen zu liefern. Die Einbindung dieser Schätzungen in nach-

gelagerte Rekonstruktionsverfahren führt zu einer messbaren Verbesserung der Bildqualität und der Detektionswahrscheinlichkeit von Anomalien /BUR 25/.

Ein verwandter Trend ist die Integration physikalischer Parameter direkt in die Rekonstruktion, etwa durch MMST-Algorithmen, die zeigen, dass die explizite Nutzung von Impulsinformationen die Bildqualität und Fehlerlokalisierung in Trockenlagerbehältern deutlich verbessert (z. B. Erhöhung der Detektionswahrscheinlichkeit bei fehlenden Brennelementen von 79 auf 98 %) /BAE 24/.

Neben der Auswertung und Rekonstruktion von Myonendaten werden Methoden der KI zunehmend auch zur Optimierung der Detektorkonzeption und der gesamten Messkette der Myonenbildgebung eingesetzt. Ziel ist es, Detektor-Geometrien, Sensoreigenschaften und Rekonstruktionsalgorithmen nicht getrennt, sondern als zusammenhängendes System zu betrachten und systematisch zu verbessern.

In der zuvor erwähnten Arbeit von Bury und Lagrange wird gezeigt, dass neuronale Netze nicht nur zur Schätzung physikalischer Größen – insbesondere des Myonenimpulses – geeignet sind, sondern gleichzeitig empfindlich auf Änderungen der Detektorauflösung, der Messunsicherheiten und der geometrischen Anordnung reagieren. Durch die explizite Einbindung realistischer Detektoreffekte in den Trainingsprozess kann der Einfluss unterschiedlicher Detektorkonfigurationen quantitativ bewertet werden /BUR 25/. Die Autoren demonstrieren, dass verbesserte Impulsschätzungen, die aus lernbasierten Modellen resultieren, unmittelbar zu einer höheren Rekonstruktionsqualität in der Myonenstreutomographie führen. Damit wird indirekt gezeigt, dass maschinelles Lernen als Werkzeug zur systematischen Bewertung und Optimierung von Detektorauslegungen eingesetzt werden kann, ohne dass jede Konfiguration separat durch klassische Monte-Carlo-Studien vollständig ausgewertet werden muss. Obwohl die Forschungsarbeit primär auf die Schätzung physikalischer Größen fokussiert ist, stellt sie einen methodischen Referenzpunkt für KI-gestützte Detektoroptimierung dar. Sie zeigt erstmals konsistent, dass lernbasierte Modelle als Bindeglied zwischen Detektordesign, Messunsicherheiten und Bildrekonstruktionsqualität fungieren können.

Als weiteres Beispiel für die Nutzung des maschinellen Lernens in der Datenerfassung können die Arbeiten von Lefevre und Kollegen herangezogen werden /LEF 24/. Micromegas-Detektoren verfügen über eine Vielzahl an Auslesestreifen, die aus Kosten- und Aufwandsgründen zu einer geringeren Anzahl an elektronischen Kanälen verbunden werden (Multiplexing). Für Micromegas-Detektoren bezeichnet Demultiplexing die

Rekonstruktion der tatsächlichen Teilchenspür mit Hilfe eines geeigneten Verfahrens bzw. eines Algorithmus, für den gemessene Parameter wie Signalhöhe, Nachbarkanäle oder die zeitliche Struktur genutzt werden. Die Autoren nutzten Monte-Carlo-Simulation zur Simulation der Detektorantwort auf eingehende Teilchen, auf die im Anschluss ein Multiplexing angewendet wurde. Anschließend wurde ein ML-Ansatz für das Demultiplexing entwickelt, für dessen Konditionierung die simulierten Daten genutzt wurden.

Eine direkte, vollautomatische Optimierung der Detektorgeometrie mittels KI befindet sich zwar weiterhin im Forschungsstadium, die Ergebnisse legen jedoch nahe, dass maschinelles Lernen künftig eine zentrale Rolle in der anwendungsorientierten Auslegung von Detektorsystemen spielen wird.

Im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung nuklearer Anlagen und Trockenlagerbehälter werden Myonen-tomographische Verfahren bereits seit mehreren Jahren untersucht. Die Integration von KI-Methoden befindet sich hier jedoch noch überwiegend im simulationsbasierten Stadium. Arbeiten wie μ TRec zeigen erstmals explizit das Potenzial KI-naher Verfahren für die Detektion fehlender Brennelemente in realitätsnahen Szenarien. Das DLR hat in dem einjährigen Projekt CACTUS eine Machbarkeitsstudie durchgeführt, bei der für ein TLB-Modell in Anlehnung an den CASTOR® V/19 u. a. untersucht wurde, ob einzelne Brennstäbe aufgelöst werden können. Hierzu wurden Simulationsrechnungen mit Geant4 durchgeführt. Eine U-Net Architektur wurde genutzt, die Konditionierung des ML-Algorithmus erfolgte durch Ausblenden einzelner Pixel. Die An- bzw. Abwesenheit einzelner Brennstäbe wurde anschließend aus dem Verhalten benachbarter Pixel hergeleitet. Für ideale simulierte Daten konnte gezeigt werden, dass die Statistik einer 75-stündigen Messung zu einer für einzelne Brennstäbe ausreichenden Auflösung führt. Perspektivisch halten die Autoren die Notwendigkeit einer experimentellen Validierung fest /BAR 25/.

Übersichtsarbeiten zur nuklearen Inspektion ordnen KI-gestützte Myonenbildgebung als vielversprechende Ergänzung bestehender Verfahren ein, weisen jedoch gleichzeitig auf offene Fragen hinsichtlich Robustheit, Generalisierbarkeit und regulatorischer Akzeptanz hin /ZHU 25/.

Trotz der erzielten Fortschritte bestehen weiterhin zentrale Herausforderungen. Dazu zählen insbesondere die Übertragbarkeit von simulationsbasiert trainierten Modellen auf reale Messdaten, die Interpretierbarkeit lernbasierter Entscheidungen sowie die robuste Integration physikalischer Informationen. Es ist abzusehen, dass sich zukünftige For-

schung verstärkt auf hybride Ansätze konzentrieren wird, die datengetriebene Methoden mit physikalisch fundierten Modellen kombinieren.

Zusammenfassend zeigt der aktuelle Stand der Forschung, dass KI-Methoden das Potenzial besitzen, die Möglichkeiten der Myographie grundlegend zu erweitern. Insbesondere in den Bereichen Bildrekonstruktion, Materialklassifikation, Abschätzung physikalischer Größen und Systemoptimierung konnten in den letzten drei Jahren signifikante Fortschritte erzielt werden. Für anspruchsvolle Anwendungen wie die zerstörungsfreie Prüfung von Trockenlagerbehältern für radioaktive Abfälle stellen KI-gestützte Verfahren einen vielversprechenden, jedoch noch weiter zu validierenden Ansatz dar.

3.7 Betrachtung strahlungsbedingter Störsignale

Bestrahlte Brennelemente enthalten neben dem ursprünglichen Kernbrennstoff auch viele Spaltprodukte und Transurane, durch deren Zerfall Neutronen, Alpha-, Beta- und Gammastrahlung direkt oder indirekt freigesetzt werden. Befinden sich bestrahlte Brennelemente im Behälter, wird die von den Brennelementen freigesetzte Alpha- und Beta-Strahlung lokal bereits absorbiert und kann so für intakte TLB nicht nach außen gelangen. Für Gammastrahlung wird die Reduzierung der Intensität nach Durchgang durch eine Materialschicht durch ein exponentielles Schwächungsgesetz beschrieben:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.38)$$

Hierbei bezeichnet I die Intensität hinter der Abschirmung, I_0 die ursprüngliche Intensität, μ den Schwächungskoeffizient und x die Schichtdicke. Der Schwächungskoeffizient ist abhängig von der Energie der Gammastrahlung und vom verwendeten Material⁵. Für Stähle ($\rho \approx 7,8 \text{ g/cm}^3$) beträgt die Halbwertsdicke⁶ für Gammastrahlung mit einer Energie von 1 MeV (Massenschwächungskoeffizient für Eisen $\mu/\rho \approx 0,06 \text{ cm}^2/\text{g}$) etwa 1,5 cm /NIST 10/. Typische Mantelstärken von Transport- und Lagerbehältern liegen im Bereich von 20 bis 40 cm, dies entspricht etwa 10 bis 25 Halbwertsdicken entspricht. Trotz dieser sehr guten Abschirmwirkung (Abschwächungsfaktoren im Bereich $1\text{E}3$ bis $1\text{E}7$), sind

⁵ Die Materialabhängigkeit zeigt sich insbesondere hinsichtlich der Dichte des Materials und dessen effektive Kernladungszahl (vgl. Abschnitt 3.7.2).

⁶ Die Halbwertsdicke ist definiert als diejenige Materialstärke, für die sich die Intensität auf die Hälfte der Ursprungsintensität reduziert. In Abhängigkeit des linearen Schwächungskoeffizienten μ wird die Halbwertsdicke $d_{1/2}$ bestimmt durch $d_{1/2} = \ln(2) / \mu$.

aufgrund der hohen Gamma-Aktivität hohe Dosisleistungen außerhalb des Behälters zu erwarten⁷. Auch für die Neutronen ergeben sich aus den verwendeten Neutronenmoderatoren und Neutronenabsorbern (z. B. Polyethylen und Bor) sehr gute, aber endliche, Abschirmwirkungen. Das Strahlungsfeld eines beladenen Behälters ist aufgrund von Streuungen und anisotropen inneren Strukturen im Allgemeinen nicht isotrop (siehe z. B. /BFS 03/).

Für eine myographische Messung sind Gammastrahlungs- und Neutronen-bedingte Störsignale zu berücksichtigen, da auch diese grundsätzlich zu Messsignalen in den verwendeten Detektoren führen können. Besonders kritisch sind solche Ereignisse zu bewerten, die von den eigentlich gewünschten Messsignalen nicht oder nur mit hohem messtechnischem Aufwand zu diskriminieren sind. Ziel dieses Abschnitts ist eine Einschätzung der Relevanz strahlungsbedingter Störsignale. Hierzu ist es zunächst notwendig, Photonen- und Neutronenflüsse in der Nähe der Behälteroberfläche abzuschätzen.

3.7.1 Wechselwirkungsmechanismen von Myonen, Gammastrahlung und Neutronen mit Materie

Myonen, Gammastrahlung und Neutronen unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihres Wechselwirkungsverhaltens mit Materie.

Myonen gehören zur Familie der Leptonen und unterliegen somit nicht der starken Wechselwirkung. Sie wechselwirken mit Materie hauptsächlich durch inelastische Coulomb-Wechselwirkungen (elektromagnetische Prozesse), die zu Ionisationen oder Anregungen führen. Coulomb-Streuungen an Kernen sind deutlich seltener, führen aber im Vergleich zu elektromagnetischen Wechselwirkungen mit Elektronen zu größeren Richtungsänderungen. Bei sehr hohen Myonenenergie finden zudem radiative Prozesse statt. Hierzu gehört die Emission von Bremsstrahlung im Coulomb-Feld von Atomkernen, die Erzeugung von Elektron-Positron-Paaren im Coulomb-Feld von Atomkernen (Paarbildung) und photonukleare Wechselwirkungen (Interaktion mit einzelnen Nukleonen der Atomkerne). Die Anzahl der Wechselwirkungen ist eine statistische Größe, die von Energie, Material und Weglänge abhängt. Ionisationen und Anregungen sind im Regelfall die

⁷ Der CASTOR® V/19 ist für eine Aktivität von 1.9×10^{18} Bq ausgelegt /GNS 23a/. Unterstellt man zur Vereinfachung, dass diese Aktivität zu $2/3$ auf einen punktförmigen Gammastrahler mit einer Energie von etwa GeV zurückzuführen ist, und nimmt 25 Halbwertsdicken für die Materialstärke an, so ergibt sich trotzdem ein Photonenfluss von etwa 4×10^{10} Photonen/s, die den Behälter verlassen.

dominierenden Prozesse, führen aber nur zu kleinen Energieüberträgen im Bereich von 10 eV bis keV pro Wechselwirkung. Coulomb-Streuungen am Kern treten deutlich seltener auf (Faktor 10^3 bis 10^5).

Gamma-Strahlung interagiert mit Materie durch den photoelektrischen Effekt, den Compton-Effekt und die Paarbildung. Die Wirkungsquerschnitte dieser drei Prozesse hängen von der Kernladungszahl des Materials Z und der Energie der Gammaquanten E_γ ab:

- Photoeffekt: $\sigma \propto Z^5 E_\gamma^{-3,5}$
- Comptoneffekt: $\sigma \propto Z^2 f(E_\gamma)$, wobei $f(E_\gamma)$ fallende Funktion mit E_γ
- Paarbildung: $\sigma \propto Z^2 \ln E_\gamma$, mit $E_\gamma^{min} = 2m_e c^2 \left(1 + \frac{m_e}{M}\right) \approx 1.022 \text{ MeV}$

Bei niedrigen Energien dominiert der Photoeffekt, bei dem ein Photon mit einem gebundenen Elektron wechselwirkt. Das Photon wird bei diesem Prozess vollständig absorbiert und das Elektron aus dem Atom herausgeschlagen. Bei dem Compton-Effekt stößt ein Photon an ein quasifreies Elektron der Atomhülle, wobei das Gammaquant einen Teil seiner Energie an das Elektron abgibt und durch die Wechselwirkung abgelenkt wird. Zwischen Streuwinkel und Energieübertrag besteht eine eindeutige Korrelation. Bei hochenergetischen Gammaquanten (Energie $> 1,022 \text{ MeV}$) tritt zudem die Paarbildung auf, bei der sich das Photon im Coulomb-Feld in ein Elektron-Positron-Paar umwandelt.

Neutronen erzeugen im Gegensatz zu geladenen Teilchen keine quasi-kontinuierlichen Ionisationsspuren. In leichten Materialien (geringe Kernladungszahl, insb. wasserstoffhaltige Materialien) dominieren elastische Streuprozesse an Atomkernen. Bei schweren Kernen kann durch inelastische Streuprozess der Kern angeregt werden, wobei die Anregungsenergie oftmals durch die Emission von Gammaquanten abgegeben wird. Zudem können Neutronen Kernreaktionen (z. B. (n, γ) , (n, p) oder Spaltungen) induzieren.

In diesem Abschnitt werden zunächst qualitative Abschätzungen für Photonen- und Neutronenflüsse in der Nähe der Behälteroberfläche durch vereinfachte Rechnungen ermittelt und Ergebnisse von numerischen Rechnungen zusammengestellt. Im Anschluss werden diese ermittelten Werte als Eingangsparameter für Simulationsrechnungen herangezogen, um so zu einer Einschätzung zu gelangen, inwieweit solche Störsignale myographische Messungen beeinflussen können und um ggfs. eine Abhängigkeit vom Detektionskonzept zu ermitteln.

3.7.1.1 Qualitative Abschätzungen

Gemäß des IAEA Safety Standards SSR-6 betragen die Grenzwerte für ein Versandstück (hierzu zählen auch TLB, die in der Regel zu den Typ B bzw. Typ B(U) Versandstücken gehören) an der Oberfläche 2 mSv/h und in einem Abstand von einem Meter 0,1 mSv/h /IAEA 25/.

Für eine punktförmige Gammaquelle besteht zwischen der Dosisleistung und der Aktivität folgender Zusammenhang:

$$\dot{H} = \frac{\Gamma \cdot A}{r^2} \quad (3.39)$$

Hierbei bezeichnet A die Aktivität, r den Abstand zur Punktquelle und Γ die isotopenspezifische Gammadosisleistungskonstante. Beispielwerte für die Dosisleistungskonstante sind 0,35 mSv*m²/(h*GBq) für Co-60 und 0,08 mSv*m²/(h*GBq) für Cs-137. Nimmt man nun in Einklang mit SSR-6 für einen radialen Abstand von 1 m eine Dosisleistung von 0,1 mSv/h und eine Punktgeometrie an, so ergibt sich für Cs-137 eine Aktivität von 1,25 GBq. Unter Berücksichtigung der Radialsymmetrie ergibt sich somit für einen Abstand von 1 cm (realistischer Abstand zwischen Detektor und Messobjekt) zur Punktquelle ein Photonenfluss von etwa 1E8 Photonen/(cm²*s).

Da die biologische Wirkung von Neutronen eine signifikante Energieabhängigkeit zeigt, ist die obige Formel nicht analog auf Neutronen zu übertragen. Für Neutronen wird zur Bestimmung der Umgebungs-Äquivalentdosis $\dot{H}(10)$ oftmals die folgende Formel herangezogen:

$$\dot{H} = \phi \cdot k(E) \quad (3.40)$$

Hierbei bezeichnet $\dot{H}(10)$ die Umgebungs-Äquivalentdosis (in Sv/s), ϕ den Neutronenfluss (in n cm⁻² s⁻¹) und $k(E)$ einen energieabhängigen Konversionsfaktor. Der Umrechnungsfaktor ist energieabhängig und beträgt beispielsweise etwa 4,2E-10 Sv cm⁻² für Neutronen mit einer Energie von 1 MeV /ICRP 96/. Somit ergibt sich für eine oberflächennahe Dosisleistung von 2 mSv/h ein Neutronenfluss von etwa 1,3E3 n cm⁻² s⁻¹. Auch diese Abschätzung ist als konservativ einzuschätzen, da u. a. explizit angenommen wurde, dass der Grenzwert für die Dosisleistung vollständig auf die Neutronenstrahlung zurückzuführen ist.

In Summe ergeben sich somit ein konservativ abgeschätzter Photonenfluss von $1\text{E}8 \text{ Photonen cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bzw. Neutronenfluss von $1,3\text{E}3 \text{ Neutronen cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, die für die Einschätzung strahlungsbedingter Störsignale heranzuziehen sind.

3.7.1.2 Monte-Carlo-gestützte Abschätzungen

In einer südkoreanischen Studie aus dem Jahr 2014 wurde für ein abgebranntes DWR-Brennelement mit einem Abbrand von etwa 45.000 MWD/MTU die gesamte Gammaquellstärke je Brennelement zu etwa $3,52\text{E}15 \text{ Photonen s}^{-1}$ und die Neutronenquellstärke zu $2,1\text{E}8 \text{ Neutronen s}^{-1}$ bestimmt /KO 14/.

Rachamin und Hampel haben MCNP-gestützte Transportrechnungen durchgeführt, um für ein CASTOR®-ähnliches Behältermodell für DWR-Brennelemente den Gammafluss auf der Behälteraußenseite abzuschätzen. Der hierbei ermittelte Photonenfluss lag im Bereich von $1\text{E}8$ bis $1\text{E}9 \text{ Photonen cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und reduzierte sich auf etwa $1\text{E}6$ bis $1\text{E}8 \text{ Photonen cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ für einen Abstand von 1 m zur Behälteraußenseite /RAC 20/.

Kim und Kollegen haben für einen TLB vom Typ TN-32 mit Hilfe von ORIGEN-ARP (Quellterm) und MCNP (Transportrechnungen) Neutronenflüsse auf der Behälteraußenseite ermittelt. Für die Transportrechnungen wurde eine vollständige Beladung mit 32 DWR-Brennelementen angenommen, die jeweils einen Anreicherungsgrad von 4,5 % Gewichts-%, einen Abbrand von 45.000 MWD/MTU und eine Abkühlzeit von 10 Jahren hatten. Für die Ober- und Unterseite des Behälters wurde ein durchschnittlicher Neutronenfluss von etwa $1\text{E}3 \text{ Neutronen/(cm}^2\text{s)}$ ermittelt. Der berechnete durchschnittliche Neutronenfluss an der Mantelseite war mit $0,5\text{E}3 \text{ Neutronen cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ etwa halb so groß. Das Energiespektrum der emittierten Neutronen zeigte bis etwa 3 MeV einen deutlichen Anstieg und fiel für größere Energien rasch ab /KIM 19/.

3.7.1.3 Zusammenfassung

Sowohl für Photonen und Neutronen sind die qualitativen Abschätzungen und die Monte-Carlo-basierten Abschätzungen zueinander kompatibel. Für Photonen und Neutronenfluss sind $1\text{E}8 \text{ Photonen cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bzw. $1\text{E}3 \text{ Neutronen cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ realistische Größenordnung für den Flächenfluss in Nähe der Behälteroberfläche. Das Energiespektrum der Photonen ist komplex und hängt von mehreren Faktoren wie Abbrand, Anreicherung, Behältergeometrie und Messort ab. Für Neutronen erscheint im Median eine Energie im

niedrigen einstelligen MeV-Bereich realitätsnah, für Photonen erscheint im Median eine Photonenenergie im Bereich einiger hundert keV realistisch.

Grundsätzlich sind sowohl publizierte empirische Studien als auch Simulationsstudien wünschenswert, die das Neutronen- und Photonenfeld detailliert als energie- und orts- aufgelöste Flüsse beschreiben. Aufgrund der sehr guten Abschirmwirkung des Behälters für Gamma- und Neutronenstrahlung ist für Monte-Carlo-gestützte Transportrechnungen ein *event-biasing* zwingend notwendig (Varianzreduktion), um Ergebnisse in realistischen Zeiträumen zu erzeugen. Diese Signifikanzreduktion ist anspruchsvoll. Falsche Herangehensweisen führen in der Regel zu falschen Ergebnissen mit großen Abweichungen zur tatsächlichen Situation. Eine Validierung, zumindest von Teilergebnissen, ist somit für vertrauenswürdige Ergebnisse notwendig.

3.7.2 Relevanz von Störstrahlung für bestimmte Detektortypen

Die Anfälligkeit unterschiedlicher Detektortypen gegenüber Störstrahlung ist abhängig von Detektionsprinzipien und den verwendeten Materialien. In Szintillationsdetektoren wird die direkte oder indirekte Erzeugung von Szintillationslicht nachgewiesen. Gasgefüllte Detektoren nutzen Ionisationsprozesse, während für Halbleiterdetektoren die direkte Ladungssammlung ausgenutzt wird.

In Szintillationsdetektoren für die Myographie werden oftmals geeignete Kunststoffe (z. B. Trägersubstanzen Polystyrol (C_8H_8) /OLÁ 22/ oder Polyvinyltoluol (C_9H_{10})_n /CAS 21/ in Verbindung mit Zusatzstoffen) genutzt, für Spezialanwendungen kommen auch anorganische Kristalle (z. B. NaI) zum Einsatz. Im Vergleich zu gasgefüllten Detektoren ist das aktive Detektorvolumen deutlich dichter und im Regelfall somit auch deutlich schwerer. Dies führt im direkten Vergleich zu einer deutlich höheren Empfindlichkeit für Gammastrahlung. Die Neutronenabhängigkeit von Szintillationsdetektoren ist abhängig vom Detektordesign und dem Detektionsmaterial. Wechselwirkungen zwischen Neutronen und Materie erfolgen über die starke Wechselwirkung. Da Neutronen keine Ladung besitzen, finden keine Coulomb-Wechselwirkungen statt – direkte Ionisationsprozesse treten somit nicht auf. Ein wichtiger Prozess ist die elastische Streuung, die besonders bei Materialien mit geringer Massenzahl A (Szintillationsdetektoren auf Kunststoffbasis) stark ausgeprägt ist. Durch den Prozess des Neutroneneinfangs wird das Neutron im Detektionsmaterial absorbiert, in Abhängigkeit der Massen- und Kernladungszahlen A, Z können im Anschluss Sekundärprozesse (z. B. Emission von Alphastrahlung, Betastrahlung) auftreten. Der Wirkungsquerschnitt zeigt eine deutliche

Abhängigkeit von der Kernstruktur des Wechselwirkungspartners, so dass kein einfacher Zusammenhang zur Kernladungs- oder Massenzahl besteht. Manche Isotope, wie beispielsweise B-10 oder Gd-155, weisen sehr hohe Wirkungsquerschnitte für einen Neutroneneinfang auf. Abhängig von der Dotierung des Detektormaterials kann der Neutroneneinfang somit ein relevanter Wechselwirkungsprozess sein. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Szintillationsdetektoren eine moderate bis hohe Empfindlichkeit für Neutronen aufweisen.

Für gasgefüllte Detektoren werden abhängig vom Detektortyp unterschiedliche Gase als Detektionsmaterial eingesetzt. Für Driftkammern wird oftmals Argon in Verbindung mit CO₂ als Quenchgas eingesetzt, auch Helium in Verbindung mit Isobutan wird genutzt. Die Wahl des Gases beeinflusst Parameter wie die Driftgeschwindigkeit, die Ionisationsenergie oder das Diffusionsverhalten. Unabhängig vom genauen Detektortyp hat das aktive Detektorvolumen in gasgefüllten Detektoren im Allgemeinen nur eine niedrige Dichte. Driftkammern werden typischerweise mit Arbeitsdrücken im Bereich von 1 atm betrieben, was im Falle von Argon bei Standardnormalbedingungen zu einer Dichte im Bereich von etwa 1,8 kg/m³ führt. Im Vergleich zu einem Festkörperdetektor ist die Zahl der Targetkerne somit deutlich geringer.

Myonen gehören zu den minimal ionisierenden geladenen Teilchen, sie generieren entlang ihrer Trajektorie kontinuierlich Ionisationen. Die Nachweiswahrscheinlichkeit von Myonen in Gasdetektoren ist somit sehr hoch und beträgt nahezu 100 %. Gammastrahlungen sind ungeladen und erzeugen somit keine direkten Ionisationen, diese können nur durch Sekundärprozesse auftreten. Die Nachweiswahrscheinlichkeit für Gammastrahlung ist somit gering. Auch Neutronen können in Gasdetektoren nur indirekt, beispielsweise durch Rückstoßionisationen oder Aktivierung, nachgewiesen werden. Die Wahrscheinlichkeiten hierfür hängt von der Wahl des Gases ab. Aufgrund der geringeren Anzahl an Targetkernen ist im Vergleich zu Szintillationsdetektoren die Nachweiswahrscheinlichkeit im Regelfall geringer.

Halbleiterdetektoren weisen aufgrund der niedrigen Energie zur Erzeugung von Elektronen-Loch-Paaren in Verbindung mit der im Vergleich zu Plastiksintillatoren höheren Kernladungszahl eine hohe Empfindlichkeit für Gammastrahlung auf. Neutronen können die Kristallstruktur des Detektormaterials schädigen und somit die Detektorperformance dauerhaft beeinträchtigen. Aufgrund der hohen Kosten von Halbleiterdetektoren sollten diese möglichst keinen Neutronenfeldern ausgesetzt werden. Auch Aktivierungen des

Detektormaterials können die Detektorperformance langfristig beeinträchtigen (zusätzlicher Hintergrund).

Eine qualitative Einschätzung der Empfindlichkeit der unterschiedlichen Detektorkonzepte ist in Tab. 3.3 hinterlegt. Halbleiterdetektoren sind aufgrund ihrer hohen Empfindlichkeit praktisch ausgeschlossen, in Summe ergeben sich für Gasdetektoren die niedrigsten Empfindlichkeiten.

Tab. 3.3 Empfindlichkeit unterschiedlicher Detektortypen für Gamma- und Neutronenstrahlung

	Gammastrahlung	Neutronenstrahlung
Szintillatoren	hoch	moderat bis hoch
Gasdetektoren	gering bis moderat	Moderat
Halbleiterdetektoren	hoch	Kritisch

Neben den Empfindlichkeiten sind für die Auswahl des Detektionskonzepts weitere Faktoren zu berücksichtigen. Hierzu gehört beispielsweise das Zeitverhalten, um beispielsweise zufällige Koinzidenzen ausreichend zu unterdrücken. Im Vergleich zu etablierten Gasdetektoren haben Kunststoffszintillatoren in der Regel das bessere Zeitauflösungsvermögen, so dass diese derzeit zumindest als Trigger-Detektor für Messungen an TLB sinnvoll genutzt werden können. Perspektivisch ist es denkbar, dass fortschrittliche Gasdetektoren (z. B. Micromegas) hier eine Alternative darstellen können.

3.8 Zusammenfassung

Seit mehreren Dekaden werden atmosphärische Myonen für Bildgebungszwecke eingesetzt. Obwohl der niedrige Teilchenfluss von etwa $100 \text{ Myonen m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ einen wesentlichen Nachteil darstellt, ermöglichen atmosphärische Myonen aufgrund der ständigen Verfügbarkeit, des zum Teil sehr hohen Durchdringungsvermögens und dem material-spezifischen Wechselwirkungsverhaltens einzigartige Anwendungen. Einsatzfelder finden sich beispielsweise in der Geologie und der Untersuchung historischer Bauwerke. Es existieren auch industrielle Anwendungen, bei denen sehr genaue Informationen zu den Prüfobjekten (beispielsweise in Form technischer Zeichnungen) für ein besseres Auflösungsvermögen genutzt werden können.

Für die Bildgebung haben sich mehrere Messmethoden etabliert. Bezogen auf die Prüfung von TLB wird in der Regel das Streuwinkelverfahren genutzt. Myonen können mit

unterschiedlichen Detektionsmethoden nachgewiesen werden. Szintillationsdetektoren auf Kunststoffbasis haben im Regelfall ein sehr gutes Zeitverhalten und eignen sich somit insbesondere für die Nutzung in Trigger-Detektoren. Gasgefüllte Detektoren haben im Vergleich das bessere Positionsauflösungsvermögen, was sich positiv auf die Bildqualität auswirkt. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Detektoren spezifische Eigenschaften haben und die Wahl des Detektors im Idealfall in Abhängigkeit des Messzwecks erfolgen sollte.

Im Bereich der Rekonstruktionsverfahren existieren neben einfachen Methoden wie dem PoCA-Algorithmus auch anspruchsvollere algebraisch- und statistisch-iterative Verfahren, bei denen ausgehend von den wenigen Messwerten die Myonenspur näherungsweise rekonstruiert wird. Die Güte der Rekonstruktion hängt hierbei stark vom Messobjekt ab. Untersuchungen zeigen, dass die Messung von Impulsinformationen die Bildqualität deutlich erhöhen kann. Hierfür werden geeignete Detektoren benötigt, die zum aktuellen Zeitpunkt noch Gegenstand von F&E sind. Zudem könnten perspektivisch – beispielsweise für Untersuchungen von TLB – moderne Micromegas-Detektoren gute Zeit- und Positionsaufösungen bei gleichzeitig hoher Messrate vereinen.

Auch in der Myographie ist derzeit ein großes Interesse an KI-Methoden zu beobachten, beispielsweise zum Zwecke der Bildrekonstruktion oder der Objektklassifizierung. Derzeit erscheinen insbesondere Physik-informierte Lernverfahren als vielversprechend, experimentelle Validierungen sind allerdings noch zu erbringen.

4 Simulationsbasierte Machbarkeitsbetrachtungen für die Myonen-basierte Bildgebung von Behältern für hochradioaktive Abfälle und eingeschlossenen Inventaren

In diesem Kapitel werden Simulationsrechnungen erläutert und deren Ergebnisse beschrieben, die zur Untersuchung ausgewählter Fragestellungen im Kontext der Myonen-gestützten Behälter- und Inventarprüfung durchgeführt wurden. Hierbei werden folgende Problemstellungen betrachtet:

- Untersuchung der Erkennbarkeit partiell mit hochradioaktiven Abfällen gefüllter Glas-
kokillen für einen realitätsnahen Behälter in Anlehnung an den TLB vom Typ
CASTOR® HAW28M (vgl. Abschnitt 4.1)
- Vergleich von Simulationsergebnissen, die mit zwei unterschiedlichen Monte-Carlo-
Codes erstellt wurden (vgl. Abschnitt 4.2)
- Untersuchungen an generischen Behältermodellen für Sensitivitätsbetrachtungen
und den Austausch mit Dritten (vgl. Abschnitt 4.3)
- Betrachtung der Nutzbarkeit von KI-Methoden an einem ausgewählten Fallbeispiel
(vgl. Abschnitt 4.4)

Die Simulationsrechnungen wurden zum überwiegenden Teil mit einem auf Geant4 ba-sierenden Code durchgeführt, der im Rahmen des diesem Bericht zugrundeliegenden Forschungsvorhabens funktional und bezüglich des Umfangs im Vergleich zu einer früheren Version /GRS 24/ wesentlich weiterentwickelt wurde. Geant4 ist ein Toolkit für die Simulation des Transports von Teilchen in Materie, das seit mehreren Dekaden an der Großforschungseinrichtung CERN gepflegt und weiterentwickelt wird. Es wird bei-spielsweise zur Planung und Analyse von teilchen- und kernphysikalischen Experimen-ten genutzt. In der Hochenergiephysik werden Myonen regelmäßig zur Kalibration von Detektoren (z. B. Spurdetektoren) eingesetzt, so dass eine akkurate Beschreibung der Wechselwirkung von Myonen mit Materie zwingende Voraussetzung für eine Nutzung von Simulationsrechnungen als Planungshilfen ist. Auch, da Geant4 u. a. für die Vorbe-reitung und Entwicklung von Detektoren für den Large Hadron Collider am CERN genutzt wurde bzw. wird, werden hohe Ansprüche an eine korrekte Beschreibung der Myonen-Materie-Wechselwirkung gestellt /CERN 26/. Zudem werden für Geant4 im Rahmen der Qualitätssicherung regelmäßig Validierungsuntersuchungen durchgeführt /GEA 26/. Die GRS hat für eine Auswahl an Materialien, die typischerweise für Transport- und Lager-behälter genutzt werden, das simulierte Abbremsvermögen und das Streuverhalten mit

empirischen Daten verglichen und hierbei eine gute bis sehr gute Übereinstimmung beobachtet /BRA 21/.

4.1 Machbarkeitsbetrachtungen für einen detaillierten Transport- und Lagerbehälter für verglaste Abfälle in Anlehnung an den Typ CASTOR® HAW 28M

Veröffentlichte Arbeiten und Studien zur Myonen-gestützten Bildgebung an TLB konzentrierten sich bis dato auf TLB für bestrahlte Brennelemente. Publikationen zu Machbarkeitsbetrachtungen für TLB für hochradioaktive verglaste Abfälle sind der GRS derzeit nicht bekannt, obschon sich für solche verglasten radioaktiven Abfälle durchaus Anwendungen ergeben, für die die Myographie einen Mehrwert darstellen könnte. Hierzu gehört beispielsweise die Frage, ob partiell mit hochradioaktiven Abfällen gefüllte Kokillen als solche erkannt werden können und wie sich die Energie und Richtung der Myonen sowie die Position der Kokille im Gebinde auf die Erkennbarkeit auswirken.

In Deutschland wird für die Zwischenlagerung verglaster radioaktiver Abfälle oftmals der TLB vom Typ CASTOR® HAW 20/28 CG /BFS 03/ bzw. vom Typ CASTOR® HAW 28M /GNS 23b/ genutzt (vgl. Tab. 2.1). Der Behälter CASTOR® HAW 20/28 CG stellt hier einen älteren Bautyp dar, der seit den späten 1990er Jahren für Rücktransporte aus La Hague verwendet wird. Der Behältertyp CASTOR® HAW 28M repräsentiert eine Weiterentwicklung. Obschon sich die beiden Behältertypen in den Grundzügen ähneln, gibt es wesentliche Unterschiede. Im direkten Vergleich verfügt der TLB CASTOR® HAW 28M über eine verbesserte Neutronenabschirmung, höhere Wärmeabfuhr und etwas größere Abmessungen. Der CASTOR® HAW 20/28 CG kann 20 bzw. 28 Kokillen aufnehmen, der CASTOR® HAW 28M ist für 28 Kokillen ausgelegt.

4.1.1 Entwicklung eines realitätsnahen Behälters für verglaste radioaktive Abfälle und dessen Eigenschaften

In Anlehnung an den TLB CASTOR® HAW 28M wurde ausgehend von dem zugehörigen Datenblatt /GNS 23b/, Abschätzungen und weiteren frei verfügbaren Informationen /GRS 20// ein realitätsnahes Behältermodell für verglaste Abfälle und generische Kokillenmodelle erstellt und in Geant4 umgesetzt. Eine Visualisierung dieses Behälters ist in Abb. 4.1 dargestellt.

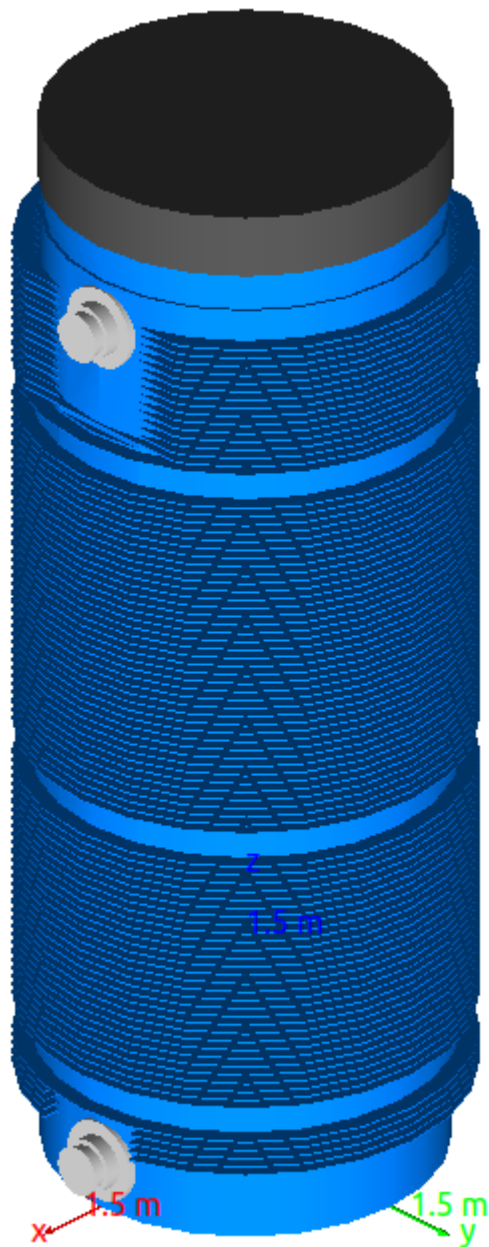


Abb. 4.1 Visualisierung des realitätsnahen Behälters für bis zu 28 Kokillen in Anlehnung an den CASTOR® HAW 28M

Analog zu der Referenz des CASTOR® HAW 28M umfasst das realitätsnahe Behältermodell die folgenden Einzelkomponenten:

- Monolithischer Grundkörper mit Kühlrippen
- Bodenplatte
- Polyethylenplatte im Bodenbereich

- Polyethylenstäbe im Behältermantel (aufgeteilt in zwei Ringen)
- Primärdeckel, versehen mit Polyethylenelementen
- Sekundärdeckel, versehen mit Polyethylenelementen
- Schutzdeckel
- Tragezapfen
- Korb zur Fixierung der Kokillen im Inneren des Behälters
- Edelstahlkokillen
- Verglastes (radioaktives) Abfallmaterial

Die einzelnen Komponenten des Behälters können in Abb. 4.2 identifiziert werden. Der Behälter hat in der Leerkonfiguration ein Gewicht von etwa 104,9 Mg und ist somit geringfügig schwerer als das Referenzmodell mit einem Leergewicht von etwa 100 Mg /GNS 23b/. Mit einer Kokillenmasse von 474 kg (vollständig gefüllt mit verglastem Abfallmaterial, das Leergewicht beträgt etwa 80 kg) ergibt sich so eine Gesamtmasse von 118,1 Mg. Detaillierte Informationen zu den angenommenen Materialien und den Massen der Einzelkomponenten finden sich in Tab. 4.1 und Tab. 4.2.

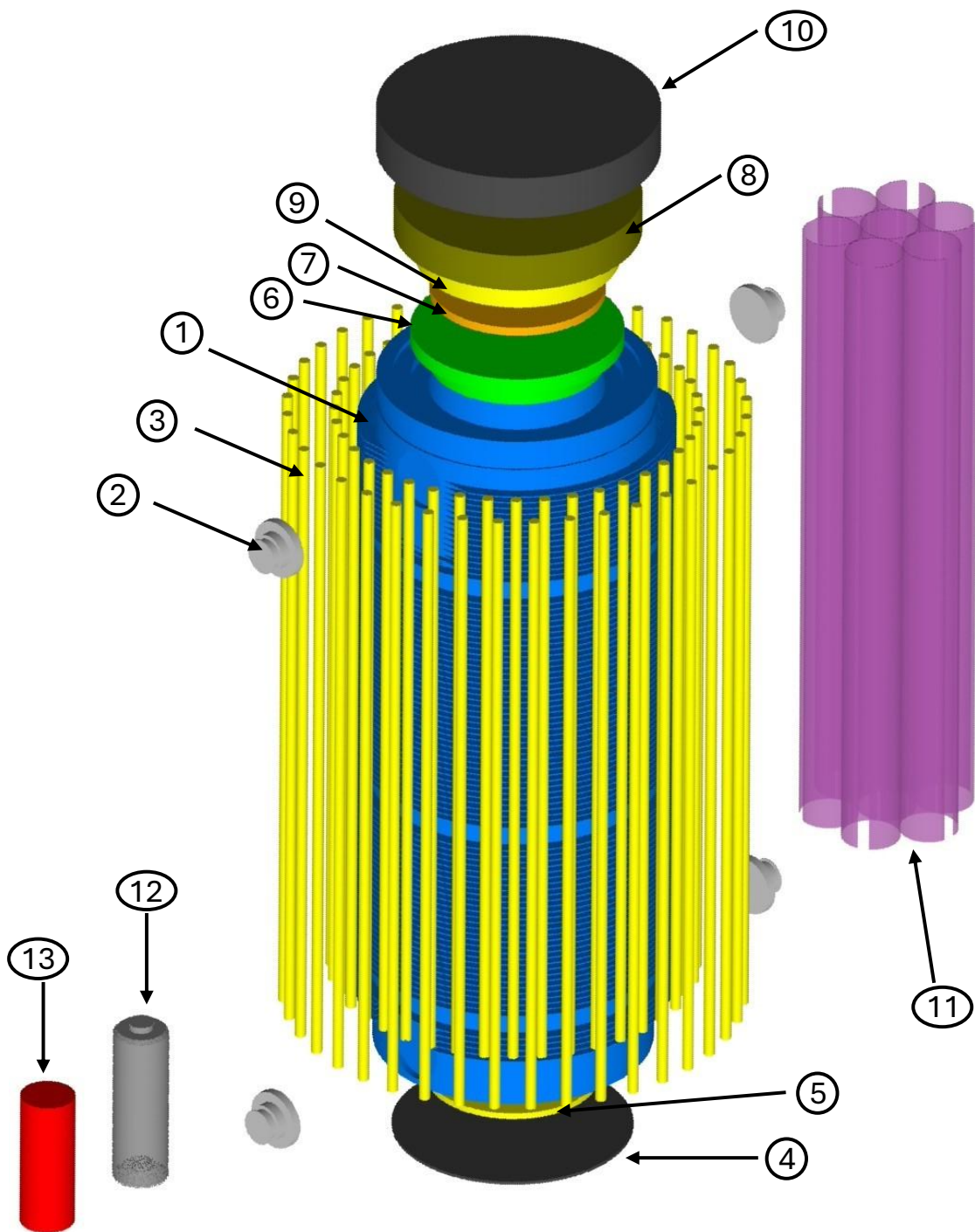


Abb. 4.2 Explosionsbild des generischen Behälters für 28 Kokillen, des Tragkorbs und einer Kokille

Komponenten des Modells: Monolith (1), Tragezapfen (2), Polyethylenstäbe (3), Bodenplatte (4), untere Moderator/Absorberplatte (5), Primärdeckel (6), Polyethylenplatte (7, 9), Sekundärdeckel (8), Schutzplatte (10), Korb (11), Kokille (12), verglaste hochradioaktive Abfälle (13)

Tab. 4.1 Angenommene Materialien für das generische Behältermodell für verglaste radioaktive Abfälle

Material	Dichte
Borosilikatglas	2,23 g/cm ³
Edelstahl	8,00 g/cm ³
Kupfer	8,96 g/cm ³
Polyethylen	0,94 g/cm ³
Sphäroguss	7,10 g/cm ³
Verglaste radioaktive Abfallmaterial	2,75 g/cm ³

Tab. 4.2 Informationen zu Materialien und Massen für die Einzelkomponenten des generischen Behälters für verglaste radioaktive Abfälle

Komponente	Material	Masse
Monolith	Sphäroguss	89,0 Mg
Tragezapfen	Edelstahl	0,7 Mg (Gesamtgewicht der vier Tragezapfen)
Moderatorstäbe im Behältermantel	Polyethylen	2,1 Mg (Gesamtgewicht aller Moderatorstäbe)
Bodenplatte	Edelstahl	0,5 Mg
Moderatorplatte im Bodenbereich	Polyethylen	0,1 Mg
Primärdeckel	Edelstahl	3,9 Mg
Moderator an Primärdeckel	Polyethylen	0,1 Mg
Sekundärdeckel	Edelstahl	3,5 Mg
Moderator an Sekundärdeckel	Polyethylen	0,2 Mg
Schutzplatte	Edelstahl	2,2 Mg
Tragkorb	Kupfer	2,6 Mg
Kokillenkanister	Edelstahl	0,1 Mg (je Kokille)
Basismaterial der Verglasung	Borosilikatglas	-
Verglaste radioaktive Abfälle		0,4 Mg (Maximalgewicht je Kokille)

4.1.2 Informationen zu den Simulationen und zur Darlegung der zu untersuchenden Fragestellungen

Durch Simulationsrechnungen wird untersucht, ob partiell mit verglasten radioaktiven Abfällen gefüllte Kokillen (Füllpegel entspricht etwa der Hälfte des Füllpegels der Normfüllung), die gegebenenfalls mit Borosilikatglas bis zu dem Normpegel aufgefüllt werden

(vgl. Abb. 4.3), grundsätzlich mit Hilfe der Myonen-gestützten Bildgebung erkannt und lokalisiert werden können. Zudem wird evaluiert, inwieweit Abhängigkeiten von der Energie der Myonen und der Lage der von der Referenz abweichenden Kokille relativ zur Ausbreitungsrichtung der Myonen bestehen. Außerdem wird geprüft, welche Auswirkungen die Wahl des Startwertes des Zufallsgenerators⁸ (englisch: *seed*) Auswirkungen auf die Ergebnisse hat. Für diese Untersuchungen werden anstelle des natürlichen Myonenspektrums die folgenden idealisierten Randbedingungen angenommen:

- Die Myonen haben eine feste Energie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.
- Die Myonen haben eine fest definierte Ausbreitungsrichtung entlang der x - und y -Achse sowie entgegen der z -Achse.

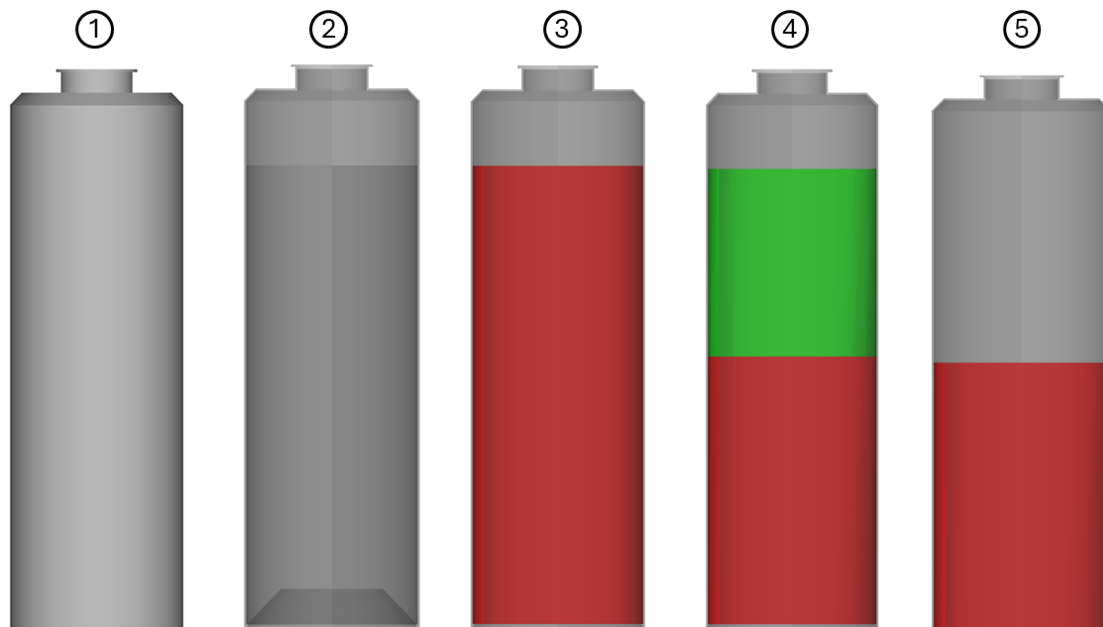


Abb. 4.3 Betrachtete Kokillen und Füllmaterialien

Von links nach rechts: Kokille von außen (1), Transparente Leerkokille (2), vollständig mit verglasten radioaktiven Abfällen (rot) gefüllte Kokille (3), mit verglasten Abfällen (rot) und Restverfüllung mit Borosilikatglas (grün) gefüllte Kokille (4) und partiell mit verglastem radioaktivem Abfall (rot) gefüllte Kokille ohne Restverfüllung (5)

⁸ Der Startwert einer Monte-Carlo-Simulation ist der Initialwert für den Pseudozufallsgenerator, mit dem die komplette Folge aller später erzeugten pseudo-zufälligen Zahlen bestimmt wird. Der gleiche Startwert führt für identische Randbedingungen somit zu identischen Ergebnissen. Diese Reproduzierbarkeit ist insbesondere für wissenschaftliche Untersuchungen und sicherheitstechnische Betrachtungen von Bedeutung.

Das Koordinatensystem wird beschrieben durch ein rechtshändiges, kartesisches Koordinatensystem. Die z -Achse fällt hierbei mit der Symmetrieachse des Behälters zusammen, und die x -Achse verläuft entlang der Verbindungslinie zwischen den Tragezapfen (vgl. Abb. 4.4). Für folgende Kokillen wird eine partielle Füllung mit bestrahlten Brennelementen unterstellt:

- Kokille auf der untersten Ebene bei $\varphi = 270^\circ$ (ID 5)
- Kokille auf der zweituntersten Ebene bei $\varphi = 270^\circ$ (ID 12)
- Kokille auf der drittuntersten Ebene bei $\varphi = 270^\circ$ (ID 19)
- Kokille in der obersten Eben bei $\varphi = 270^\circ$ (ID 26)

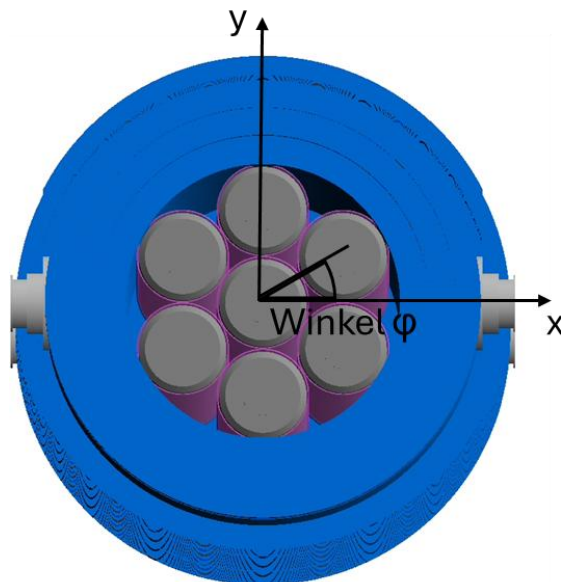


Abb. 4.4 Draufsicht auf den generischen Behälter für verglaste radioaktive Abfälle zur Illustration der Lage der Kokillen in der (x, y) -Ebene sowie des gewählten Koordinatensystems

Die 28 Kokillen verteilen sich auf vier Ebenen mit jeweils sieben Kokillen. Für die i -te Ebene hat die zentrale Kokille um $(x, y) = (0, 0)$ die laufende Nummer (ID) $7 \cdot i$. Ausgehend von $\varphi = 30^\circ$ werden die Kokillen entgegen dem Uhrzeigersinn fortlaufend nummeriert.

Je Durchlauf werden 25 Mio. Myonen simuliert. Die Myonen werden homogen über eine rechteckige Fläche generiert, deren Größe in Abhängigkeit der Ausbreitungsrichtung zwischen $6,3 \text{ m}^2$ (Ausbreitung entgegen der z -Achse) und $16,1 \text{ m}^2$ (Ausbreitung entlang der x - oder y -Achse) beträgt. Dies entspricht einem durchschnittlichen Flächenfluss von 400 Myonen/cm^2 bzw. 155 Myonen/cm^2 ,

Die Analyse basiert auf einem Vergleich zwischen einer Simulation, für die eine Referenzgeometrie (vollständige Befüllung aller Kokillen) angenommen wurde, und einer Simulation, für die eine abweichende Geometrie unterstellt wurde. Die Abweichung betrifft jeweils nur eine einzelne Kokille und ggfs. einen abweichenden Startwert. Für den analytischen Vergleich werden Projektionsbilder herangezogen, zu dessen Pixel Winkelverteilungsspektren korrespondieren. Die Pixelgröße beträgt $1 \times 1 \text{ cm}^2$. Diese Winkelverteilungsspektren werden paarweise für jeden Pixel mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test (KST) statistisch ausgewertet. Der KST erlaubt Aussagen über die Signifikanz der Abweichungen zwischen zwei beliebig gearteten Verteilungen. Die vollständigen Ergebnisse sind zur besseren Lesbarkeit im Anhang hinterlegt (vgl. Anhang B0). Im Folgenden werden wesentliche Ergebnisse zusammengefasst und erläutert.

4.1.3 Projektionsbilder in Abhängigkeit der Myonenenergie

Zur Untersuchung der Frage, ob die beschriebenen abweichenden Kokillen in Abhängigkeit der Myonenenergie zu erkennen sind, werden im Folgenden exemplarisch Simulationsergebnisse für monodirektionale Myonen, die sich entlang der x-Achse ausbreiten, betrachtet. Die folgenden drei Behälterkonfigurationen werden hierfür betrachtet:

- Referenzgeometrie
Vollständig beladener Behälter mit 28 vollständig gefüllten Kokillen
- Vergleichsgeometrie I
Diese entspricht der Referenzgeometrie mit Ausnahme der Kokille mit ID 5 (unterste Ebene, $\varphi = 270^\circ$), die nur hälftig mit verglasten radioaktiven Abfällen gefüllt ist.
- Vergleichsgeometrie II
Diese entspricht der Referenzgeometrie mit Ausnahme der Kokille mit ID 26 (oberste Ebene, $\varphi = 270^\circ$), die nur hälftig mit verglasten radioaktiven Abfällen gefüllt ist.

Für die Monte-Carlo-Simulationen wurde jeweils derselbe Startwert unterstellt. Die Projektionsbilder in der (y, z) -Ebene sind für die betrachteten Energien in den Abb. 4.5 bis Abb. 4.7 illustriert. Unabhängig von den betrachteten Energiewerten sind auf Basis der Projektionsbilder die lokalen Abweichungen in der betroffenen Region nahezu nicht zu erkennen. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass Myonen mit einer Energie von 1 GeV für die betrachtete Belichtungsachse in weiten Teilen des Behälters vollständig abgebremst werden und somit für die Bildgebung unzureichend sind. Die höheren Energien von 5 GeV und 10 GeV sind hingegen ausreichend kontrastreich um lokale geo-

metrische Strukturen wie die Tragezapfen oder die Deckelkonstruktion räumlich aufzulösen.

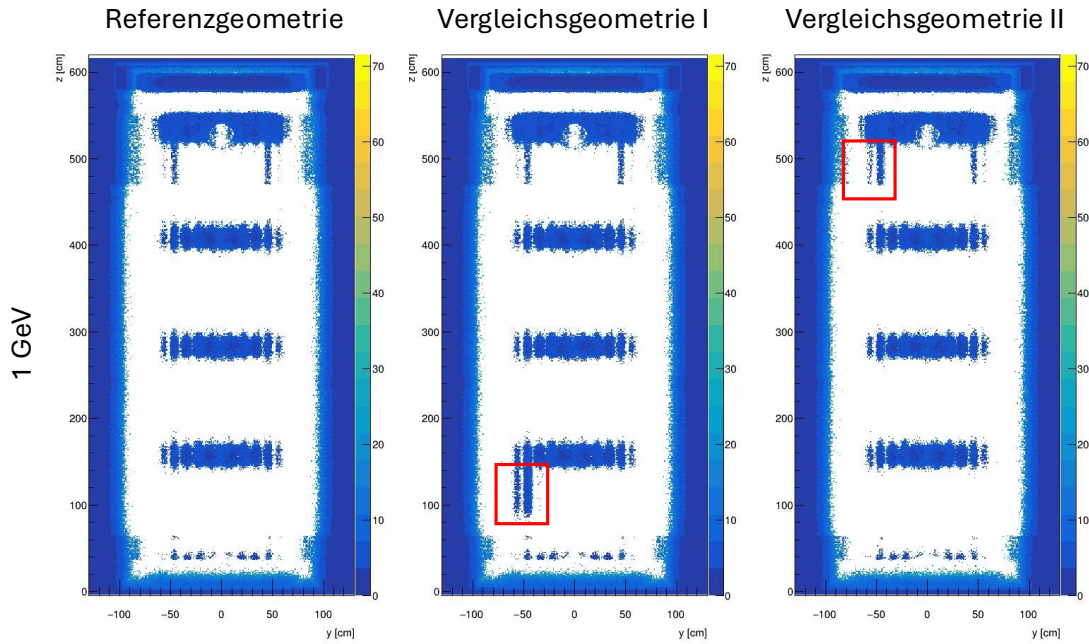


Abb. 4.5 Projektionsbilder in der (y, z) -Ebene für drei Inventarkonfigurationen für mono-direktionale Myonen (x -Achse) mit einer Energie von 1 GeV

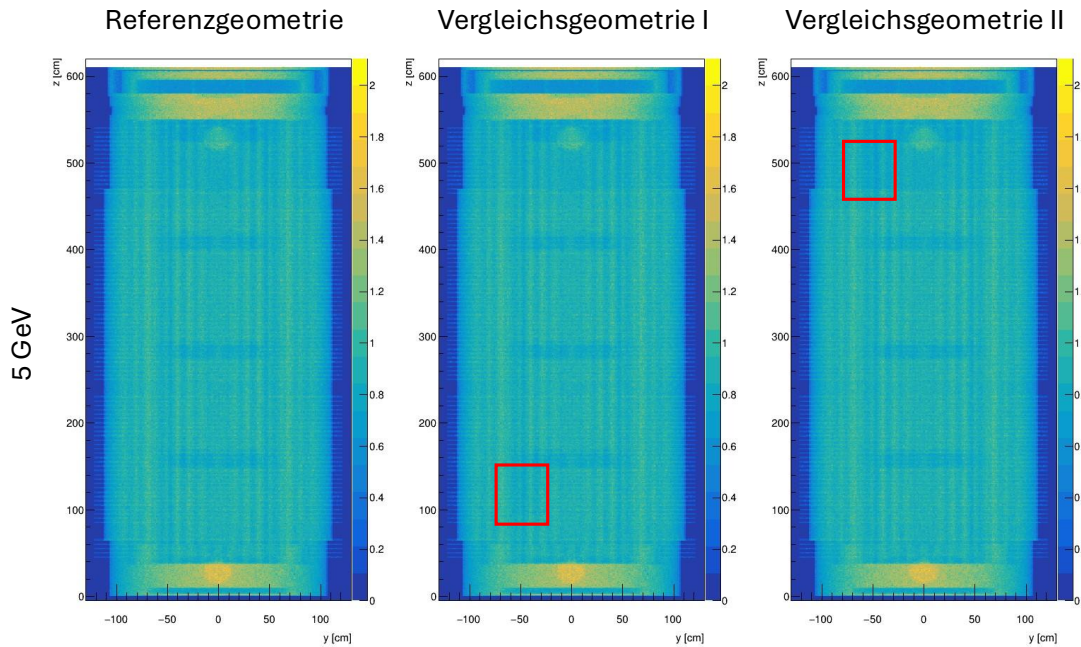


Abb. 4.6 Projektionsbilder in der (y, z) -Ebene für drei Inventarkonfigurationen für mono-direktionale Myonen (x -Achse) mit einer Energie von 5 GeV

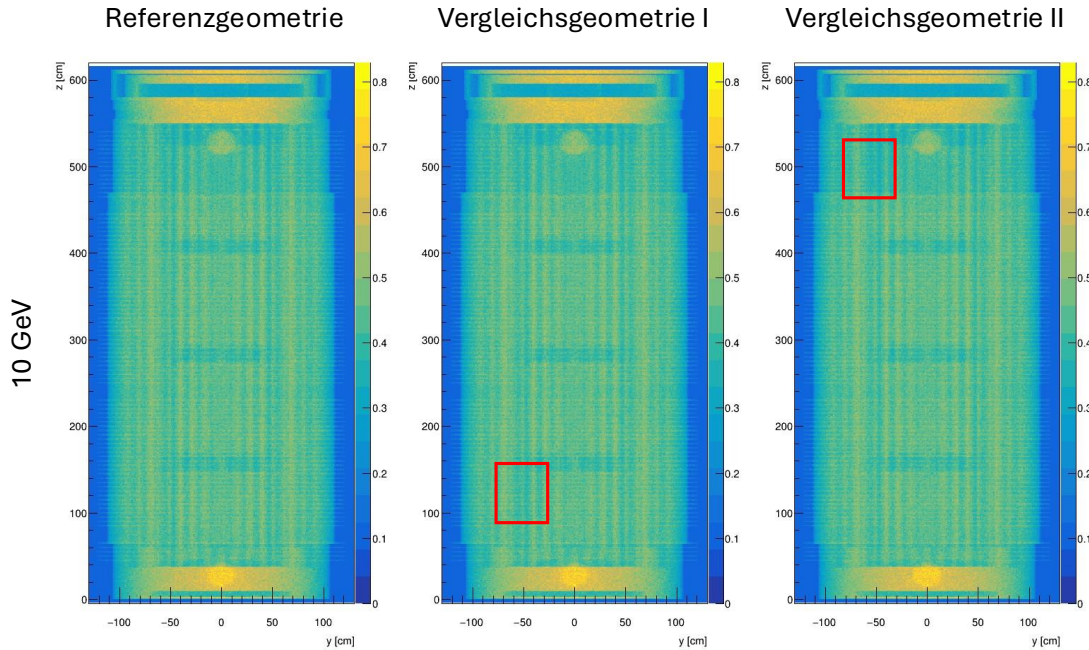


Abb. 4.7 Projektionsbilder in der (y, z) -Ebene für drei Inventarkonfigurationen für mono-direktionale Myonen (x -Achse) mit einer Energie von 10 GeV

Für eine detailliertere Auseinandersetzung, ob sich für die gegebenen Randbedingungen die Projektionsbilder der Vergleichsgeometrien von der Referenzgeometrie (energieabhängig) unterscheiden, werden die Differenzbilder bestimmt und der KST (Signifikanzniveau $\alpha = 1\%$) angewendet. Die Werte des KST wurden derart normalisiert, dass Zahlenwerte oberhalb von eins den Rückschluss erlauben, dass die beiden miteinander verglichenen Verteilungen statistisch signifikant voneinander abweichen. Die Differenzbilder beziehen sich auf den jeweiligen Medianwert der Streuwinkelverteilung. Für den KST wurden die pixelweisen Streuwinkelverteilungen berücksichtigt. Die Ergebnisse für den Vergleich der Referenzgeometrie mit der Vergleichsgeometrie 1 und 2 sind in Abb. 4.8 und Abb. 4.9 dargestellt.

Zunächst ist festzustellen, dass in den Differenzbildern für beide Vergleiche lokale Unterschiede zu erkennen sind, die sich auf die unterschiedlichen Kokillenfüllungen zurückführen lassen. Dies trifft auf alle betrachteten Myonenenergien zu, jedoch ist für das Szenario mit 1 GeV Myonen nur eine unregelmäßige Struktur zu erkennen. Diese Struktur wird für die höheren Energien regelmäßiger und erhält zudem an Schärfe. Die statistische Signifikanz der Abweichungen kann mit dem KST aufgezeigt werden. Dieser führt zu dem Ergebnis, dass für das Szenario mit 1 GeV Myonen die Abweichungen für beide Vergleiche mit Ausnahme weniger Pixel zu gering sind, um für das vorgegebene

Signifikanzniveau den Schluss zu ziehen, dass sich die zugrundeliegenden Winkelverteilungen statistisch signifikant voneinander unterscheiden.

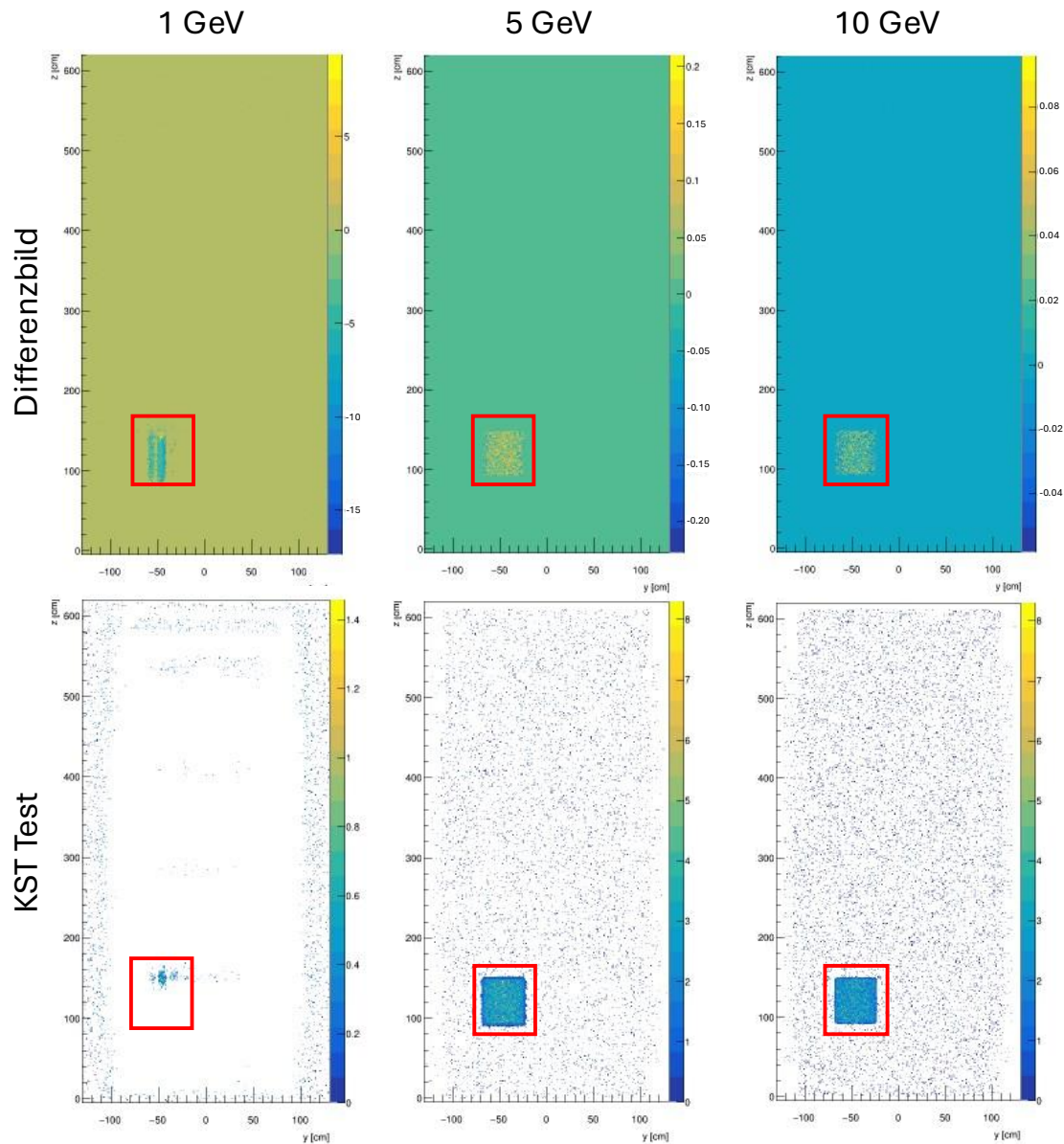


Abb. 4.8 Vergleich der Referenzgeometrie mit der Vergleichsgeometrie I auf Basis des Differenzbilds (oben) und des KST (unten) für drei unterschiedliche Myonenenergien (von links nach rechts)

Die Beleuchtung erfolgte entlang der x-Achse. Die Werte des KST wurden derart normalisiert, dass Zahlenwerte oberhalb von eins den Rückschluss erlauben, dass die beiden miteinander verglichenen Verteilungen statistisch signifikant voneinander abweichen.

Für die höheren Energien von 5 GeV und 10 GeV zeigt der KST sowohl für die Vergleichsgeometrie I als auch für die Vergleichsgeometrie II für nahezu alle Pixel der betroffenen Region statistisch signifikante Abweichungen. Die ermittelten Zahlenwerte sind

vergleichbar, der betroffene Bereich wird für die Szenarien mit 10 GeV Myonen allerdings schärfer herausgestellt.

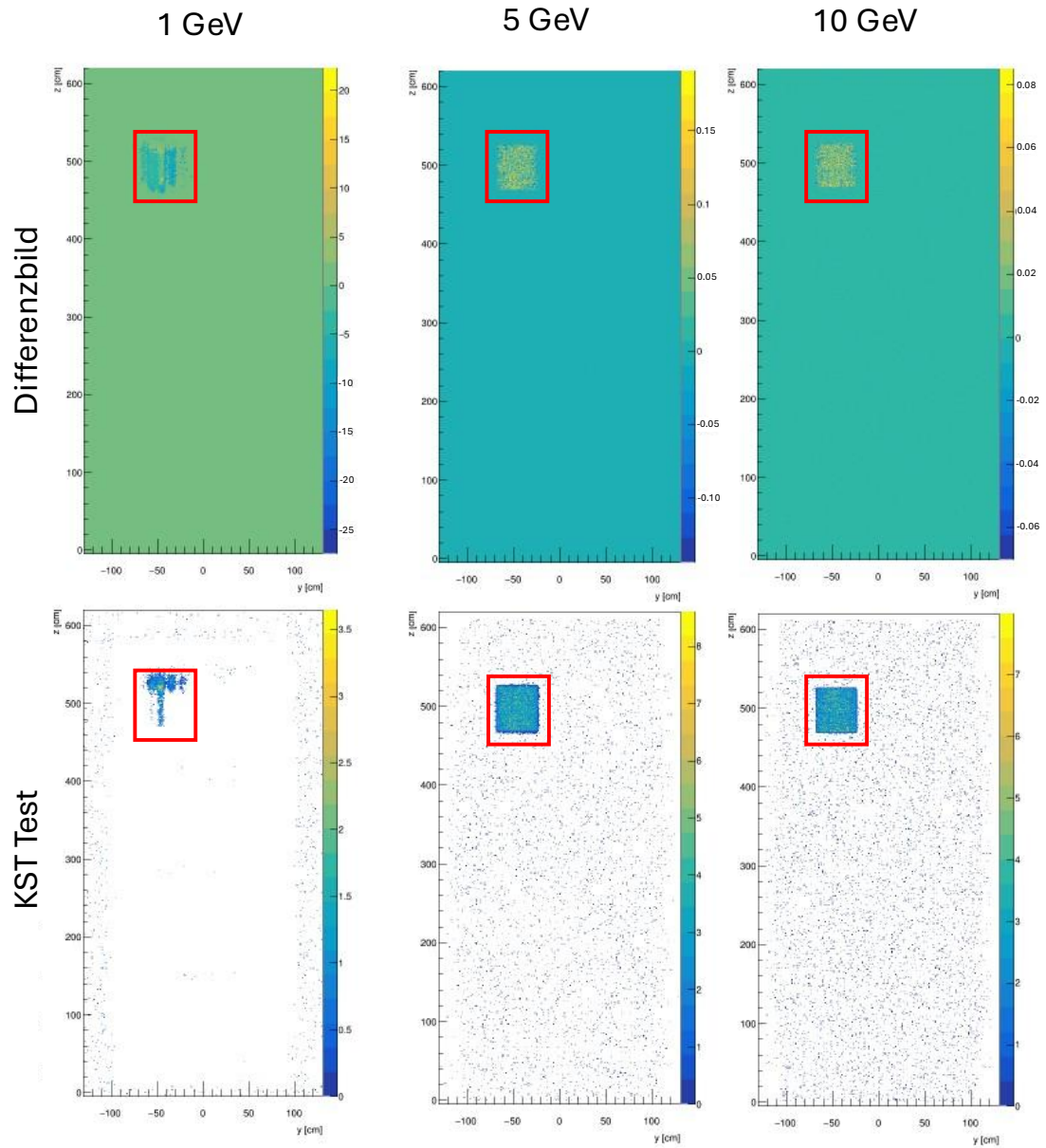


Abb. 4.9 Vergleich der Referenzgeometrie mit der Vergleichsgeometrie II auf Basis des Differenzbilds (oben) und des KST (unten) für drei unterschiedliche Myonenenergien (von links nach rechts)

Die Beleuchtung erfolgte entlang der x-Achse. Die Werte des KST wurden derart normalisiert, dass Zahlenwerte oberhalb von eins den Rückschluss erlauben, dass die beiden miteinander verglichenen Verteilungen statistisch signifikant voneinander abweichen.

Aus Sicht der Bildgebung ist als Ergebnis festzuhalten, dass für die betrachteten Sichtachsen eine Schwellenergie überschritten werden muss, die oberhalb von 1 GeV liegt. Zudem kann beobachtet werden, dass höhere Myonenenergien unter den gezeigten

nen Randbedingungen nicht zwingend die Erkennung abweichender Strukturen erleichtern, die Strukturen jedoch schärfer aufgelöst werden können.

4.1.4 Projektionsbilder in Abhängigkeit der Lage der abweichenden Kokille im Behälter und relativ zur Richtung der einfallenden Myonen

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass die Bildqualität der generierten Projektionsbilder von der Lage der abweichenden Kokille relativ zur Richtung des Myonenfluss abhängen wird. Um dies zu erörtern, werden zunächst Simulationsergebnisse für eine Geometrie, bei der für die Kokille mit ID 12 eine partielle Füllung unterstellt wird, mit jenen für die Referenzgeometrie verglichen. Betrachtet werden hierbei monoenergetische Myonen mit einer Energie von 5 GeV bzw. 10 GeV und einer Belichtung entlang der x - bzw. y -Achse (vgl. Abb. 4.10).

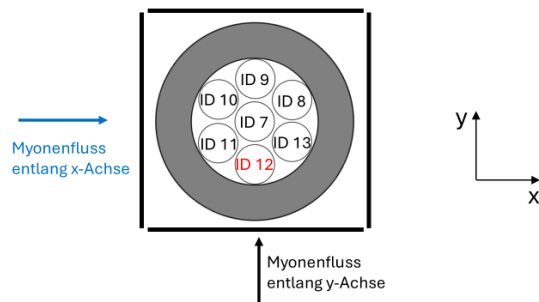


Abb. 4.10 Illustration der Position der abweichenden Kokille (ID 12, rot) im Gebinde und der betrachteten Beleuchtungsachsen

Geometrisch ist zu erkennen, dass bei einer Beleuchtung entlang der y -Achse Myonen die abweichende Kokille auf kürzestem Wege erreichen, wohingegen für eine Beleuchtung entlang der x -Achse die geometrische Strecke durch die Behälterwand größer ist und zudem die abweichende Kokille entlang der Beleuchtungsachse partiell durch die Kokille mit ID 11 beschattet wird.

Die Ergebnisse des KST sind in Abb. 4.11 hinterlegt. Hierbei ist zunächst festzuhalten, dass für die betrachteten Fälle der KST die Abweichungen in den betroffenen Bereichen als signifikant einschätzt. Im direkten Vergleich ist ersichtlich, dass die KST-Werte im betroffenen Bereich im Fall der Belichtung entlang der y -Achse um etwa 30 % größer sind. Dies erklärt sich durch die oben aufgeführte geometrische Betrachtung.

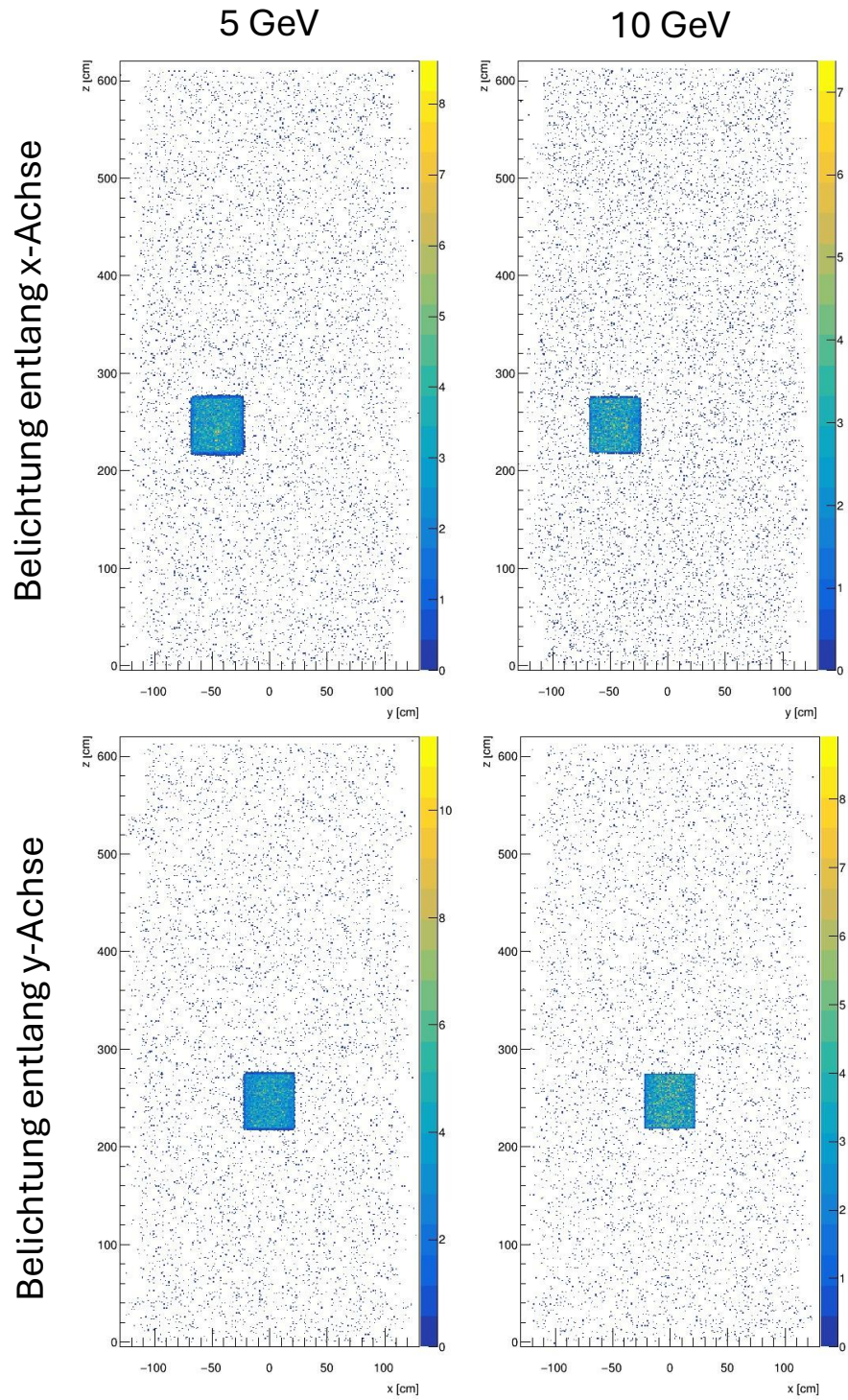


Abb. 4.11 KST-Plots der Referenzgeometrie und einer abweichenden Geometrie (partielle Füllung der Kokille mit ID 12) in Abhängigkeit der Belichtungsachse und der Myonenenergie

Die Werte des KST wurden derart normiert, dass Werte ≥ 1 den Rückschluss erlauben, dass die betrachteten Winkelhistogramme statistisch signifikant voneinander abweichen.

Für die Beleuchtung entlang der y -Achse ist zudem ein Anstieg des KST-Werts für die Energie von 10 GeV im Vergleich zu 5 GeV zu beobachten – für die Beleuchtung der x -Achse ist dies nicht der Fall. Abschließend ist festzustellen, dass die Variationen in dem betroffenen Bereich für die Beleuchtung entlang der y -Achse geringer ausfallen. Für die Beleuchtung entlang der x -Achse ist an den seitlichen Flanken ein geringer Abfall der KST-Werte zu beobachten.

Darüber hinaus werden im Folgenden Simulationsergebnisse für Geometrien, bei denen jeweils für die Kokille mit ID 5, ID 12, ID 19 und ID 26 eine partielle Füllung unterstellt wird, mit jenen für die Referenzgeometrie verglichen. Betrachtet werden hierbei mono-energetische Myonen mit Energien von 5 GeV bzw. 10 GeV und eine Belichtung entlang der z -Achse.

Die Ergebnisse des KST sind in Abb. 4.12 hinterlegt. Grundsätzlich zeigen diese zunächst einen Corona-Effekt, d. h. die Abweichungen betreffen nicht nur den zu erwartenden Querschnittsbereich der Kokille, sondern dehnen sich auch auf benachbarte Strukturen aus – insbesondere solche des Behältermantels. Im direkten Vergleich ist dieser Effekt für das Szenario mit 5 GeV stärker ausgeprägt. Zudem ist deutlich zu erkennen, dass der Effekt deutlich von der Position der betroffenen Kokille abhängt: Je tiefer sich diese Kokille im Behälter befindet, desto stärker ist der Effekt. Für die zuoberst liegende Kokille ist der Effekt praktisch nicht mehr zu erkennen.

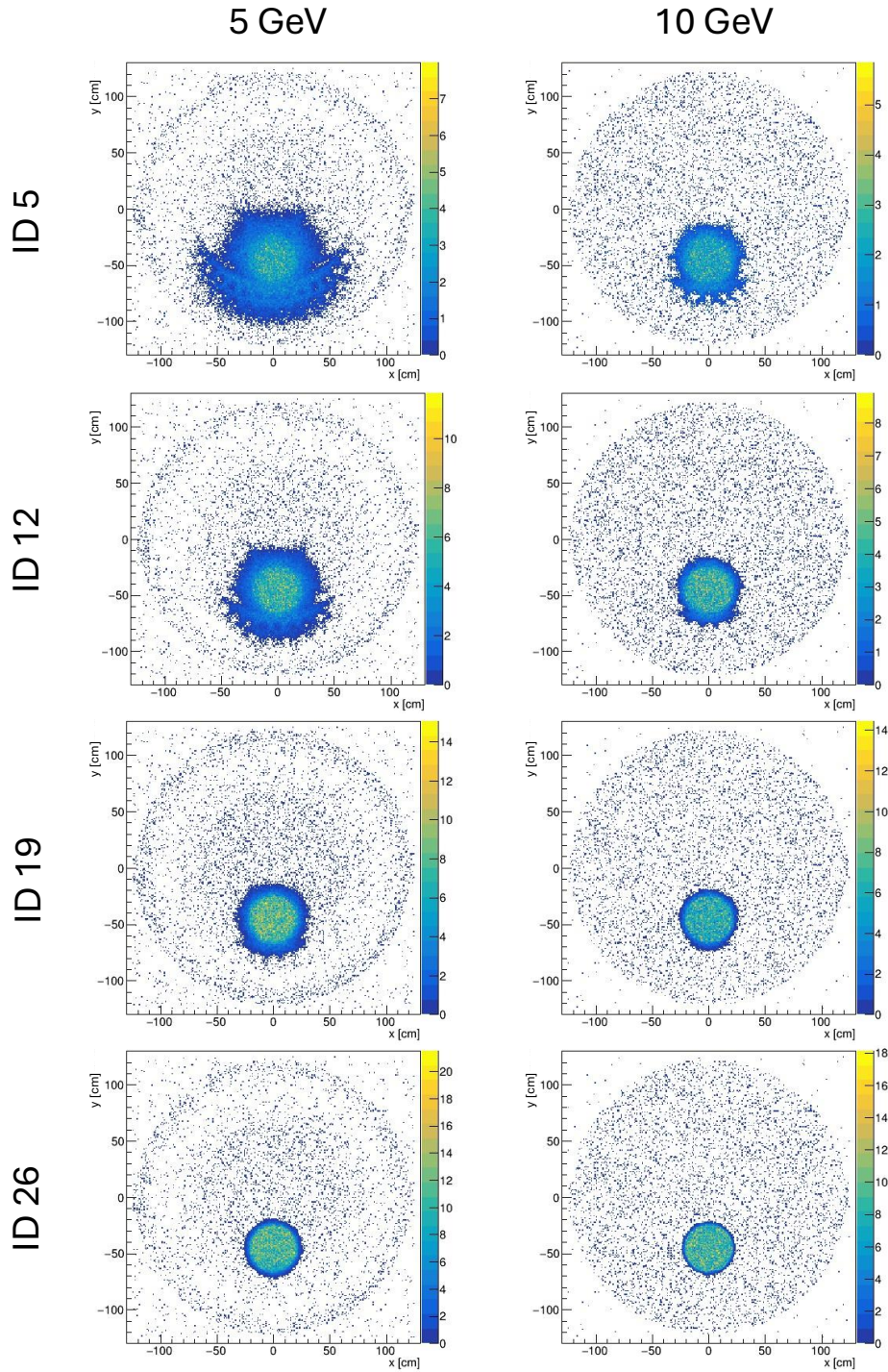


Abb. 4.12 KST-Plots zum Vergleich der Referenzgeometrie mit abweichenden Geometrien (partielle Füllung der Kokille mit ID 5 (oben), ID 12, ID 19 und ID 26 (unten)) für Myonenenergien von 5 GeV (links) und 10 GeV (rechts)

Die Belichtung erfolgte entlang der z -Achse. Die Werte des KST wurden derart normiert, dass Werte ≥ 1 den Rückschluss erlauben, dass die betrachteten Winkelhistogramme statistisch signifikant voneinander abweichen.

4.1.5 Betrachtung der Erkennbarkeit einer Restverfüllung

Zur Einschätzung, inwieweit eine partiell mit verglasten radioaktiven Abfällen verfüllte Kokille von einer ebensolchen Kokille mit Restverfüllung zu unterscheiden ist, werden im Folgenden Ergebnisse von Simulationsrechnungen betrachtet. Illustriert wird dies anhand von Variationen der Kokille mit ID 12. Es werden mono-energetische Myonen mit 5 GeV bzw. 10 GeV betrachtet. Die Ergebnisse des KST sind in Abb. 4.13 bzw. Abb. 4.14 dargestellt.

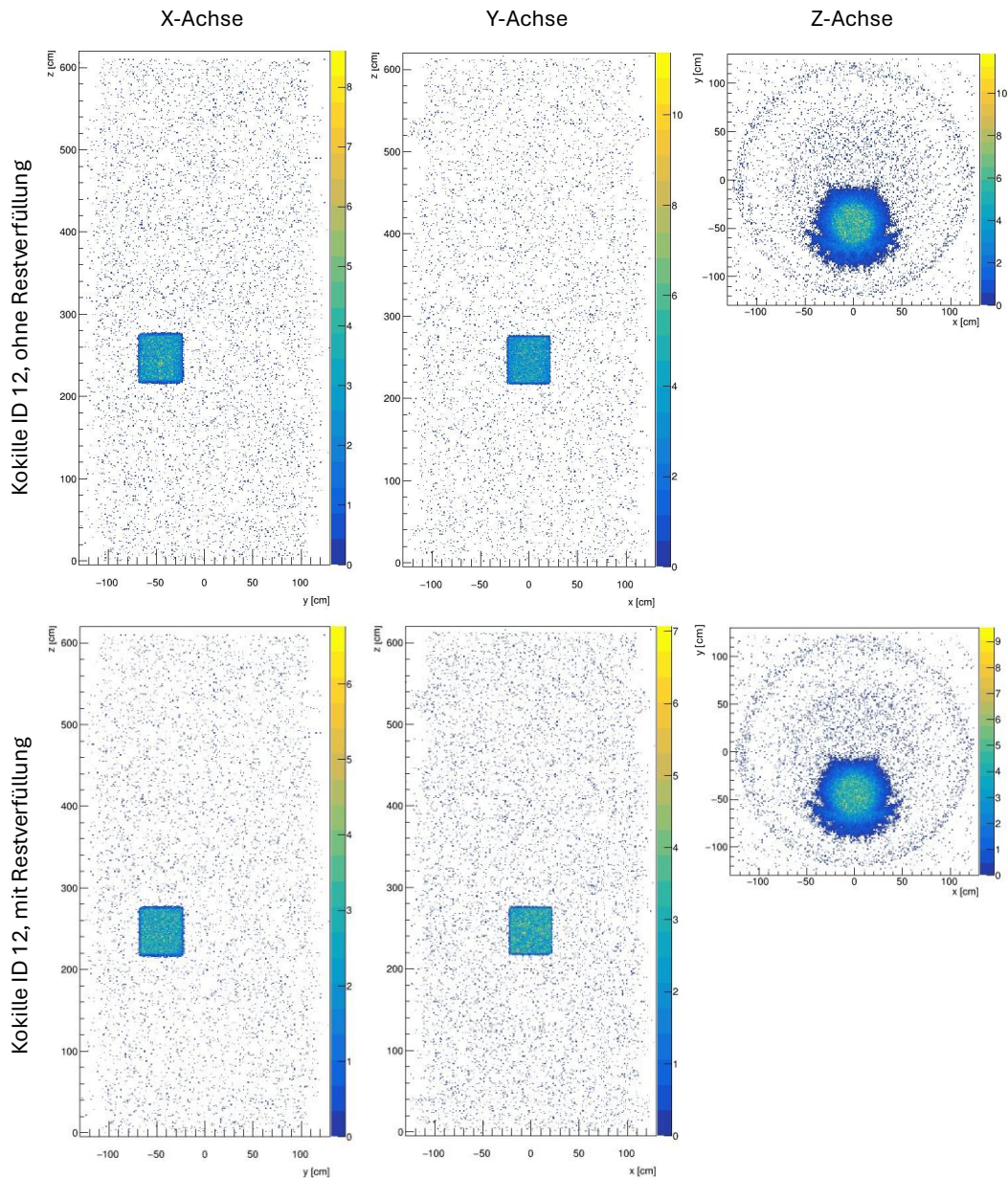


Abb. 4.13 KST für eine partielle gefüllte Kokille sowohl mit (oben) als auch ohne (unten) Restverfüllung in Abhängigkeit unterschiedlicher Blickachsen für Myonen mit 5 GeV

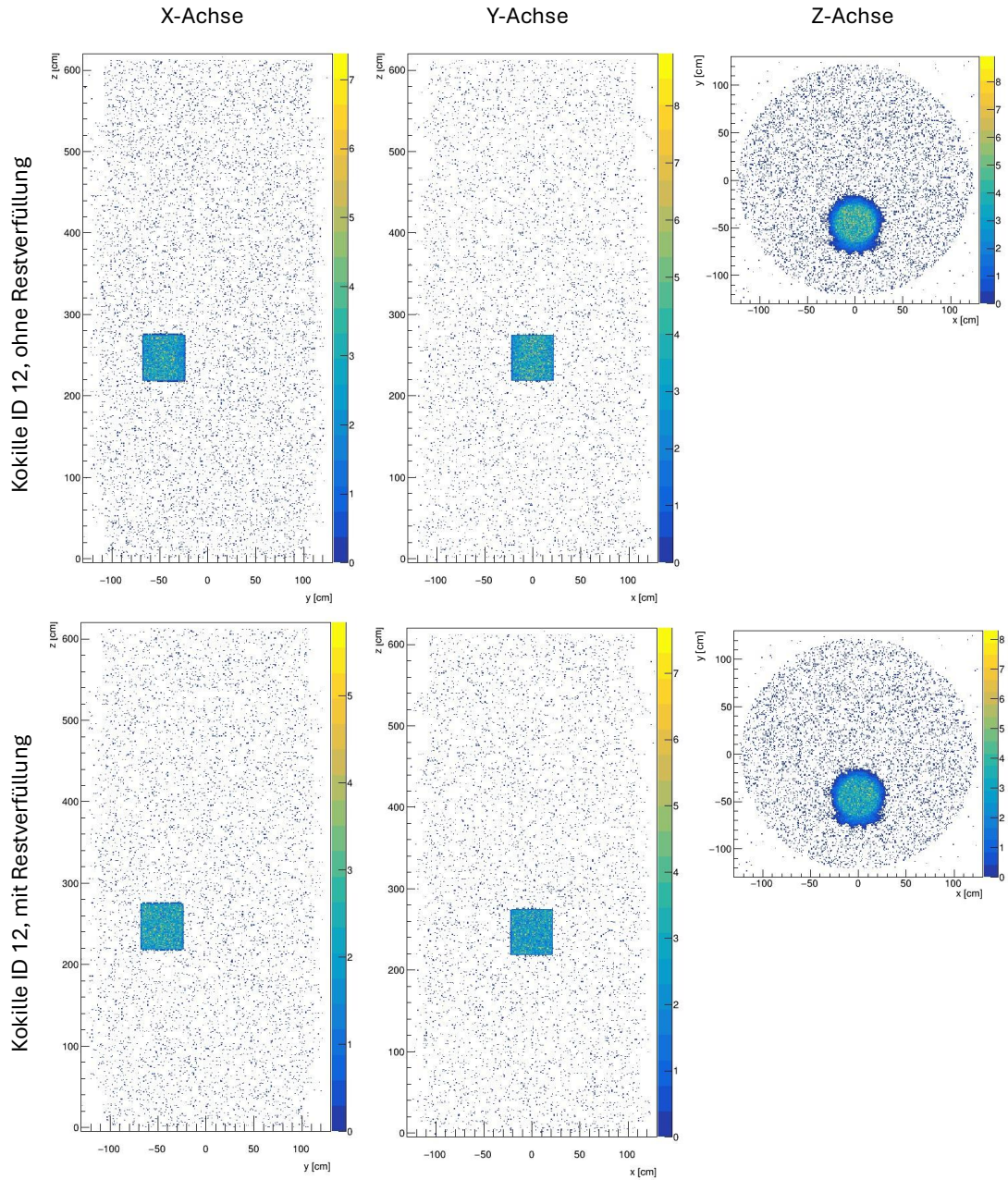


Abb. 4.14 KST für eine partielle gefüllte Kokille sowohl mit (oben) als auch ohne (unten) Restverfüllung in Abhängigkeit unterschiedlicher Blickachsen für Myonen mit 10 GeV

Für die betrachteten Energien führt der KST zu qualitativ vergleichbaren Ergebnissen: Die betroffenen Regionen sind deutlich zu erkennen und die Grenzverläufe dieser Regionen sind vergleichbar. Bei direkter Gegenüberstellung der beiden KST-Histogramme ist allerdings ersichtlich, dass die KST-Werte für das Szenario ohne Restverfüllung um etwa 10 bis 15 % größer sind.

4.1.6 Auswirkungen des Startwertes von Generatoren zur Erzeugung von Pseudozufallszahlen

Für die bisherigen Betrachtungen wurden Simulationsrechnungen genutzt, die jeweils mit dem gleichen Startwert durchgeführt wurden. Zufallsgeneratoren erzeugen oftmals anstelle echter Zufallszahlen sog. Pseudozufallszahlen. Ein Pseudozufallszahlengenerator erzeugt ausgehend von dem Startwert deterministische Folgezahlen, die nur scheinbar zufällig sind. Ein gleicher Startwert folgt zu einer exakt gleichen Zahlenfolge, die beispielsweise für die Simulation von Wechselwirkungen herangezogen werden kann und so eine Reproduzierbarkeit der Simulationsergebnisse erlaubt. Diese Reproduzierbarkeit wird an vielen Stellen benötigt, beispielsweise für wissenschaftliche Arbeiten (Reproduktion von Ergebnissen) oder das Debugging. Werden zwei Simulationen mit demselben Startwert für den Pseudozufallsgenerator für zwei unterschiedliche geometrische Modelle durchgeführt, so sind etwaige Unterschiede in den Ergebnissen direkt auf Unterschiede zwischen den geometrischen Modellen zurückzuführen. Zufällige Streuungen können so praktisch ausgeschlossen werden. Analog führen abweichende Startwerte zu zusätzlichen pseudo-zufälligen Änderungen der physikalischen Wechselwirkungen, die in der Regel zu größeren Unterschieden zwischen zwei Simulationsdurchläufen für abweichende geometrische Modelle führen. Der Grad der Abweichung hängt zudem von der Anzahl an simulierten Ereignissen ab, grundsätzlich ist für steigende Iterationen zu erwarten, dass die Bedeutung zufälliger Streuungen abnimmt.

Simulationsgestützte Machbarkeitsstudien für die Behälter- und Inventarprüfung mit Myonen basieren in den meisten Fällen auf Vergleichen, die für zwei unterschiedliche Behältergeometrien erstellt werden. Unterschiede beschränken sich im Regelfall auf lokale Abweichungen, beispielsweise hinsichtlich der Beladung, so dass Geometrie-bedingte Abweichungen hervorgehoben werden. Wie sich der Startwert des Pseudozufallszahlengenerators auf diese Vergleichsbilder für die Myographie auswirken kann, soll im Folgenden exemplarisch betrachtet werden.

Zur Illustration des Effekts des Startwertes wird ein exemplarisches Szenario betrachtet, bei dem der KST auf Projektionsbilder angewendet wird, die unter Annahme identischer als auch unterschiedlicher Startwerte generiert wurden. Für den Vergleich wird eine Referenzgeometrie und eine abweichende Geometrie betrachtet. Die Referenzgeometrie entspricht hierbei dem voll beladenen Behälter, bei dem alle Kokillen vollständig mit verglasten radioaktiven Abfällen befüllt sind. Für die abweichende Geometrie wurde eine Füllung der Kokille mit ID 12 unterstellt. Es werden monoenergetische (10 GeV) und

mono-direktionale (Ausbreitung entlang x -Achse) Myonen angenommen. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.15 dargestellt.

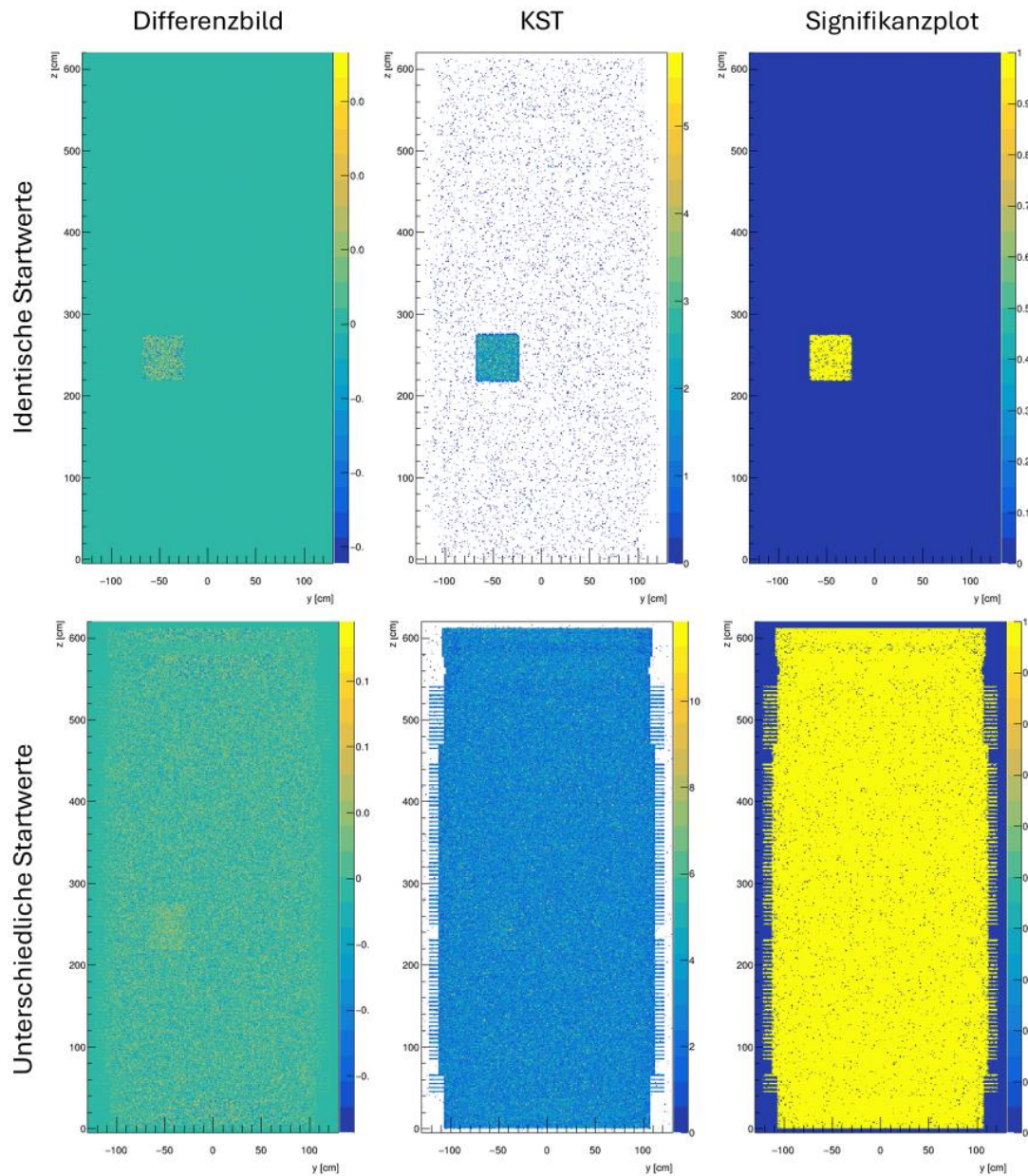


Abb. 4.15 Illustration der Relevanz des Startwerts für den Vergleich von Projektionsbildern

Betrachtet wird der Vergleich der Projektionsbilder in der (y, z) -Ebene für die Referenz- und Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 hälftig gefüllt). Abgebildet sind das Differenzbild (links), das KST-Histogramm (mitte) und das binäre Signifikanzhistogramm (rechts), bei dem gelbe Pixel zu statistisch signifikant abweichenden Verteilungen korrespondieren. Für die oberen (unteren) Histogramme werden jeweils identische (unterschiedliche) Startwerte für die zugrundeliegenden Monte-Carlo-Simulationen verwendet.

Bereits ausgehend von den Differenzbildern ist deutlich zu erkennen, dass die Verwendung unterschiedlicher Startwerte für die vorliegende Statistik ein deutliches Hintergrundrauschen bedingt. Dies führt dazu, dass die abweichende Struktur deutlich schwerer zu erkennen ist. Ein ähnliches Bild ergibt sich für das Histogramm des KST, das von einem deutlichen Rauschen mit nur geringfügigen lokalen Abweichungen geprägt ist. Gemäß des KST sind die Fluktuationen statistisch weitestgehend signifikant, so dass der KST für eine Erkennung der abweichenden Kokille nicht herangezogen werden kann.

4.1.7 Zusammenfassung

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen zunächst einmal die Notwendigkeit einer ausreichenden Myonenenergie, die sowohl von dem zu prüfenden Objekt als auch von der Beleuchtungsgeometrie abhängt. Die Simulationsrechnungen kommen zu dem Schluss, dass Myonen mit einer Energie von 1 GeV bei den betrachteten Beleuchtungsachsen zum Großteil im Behälter vollständig abgebremst werden. Höhere Energien im Bereich weniger GeV sind somit für die Nutzung des Streuwinkelverfahren notwendig. Vergleicht man diese Voraussetzung mit der energieaufgelösten Flussdichte atmosphärischer Myonen, ist ersichtlich, dass dies den tatsächlich nutzbaren Myonenfluss deutlich reduziert und somit die Messzeit wesentlich erhöht.

Die Ergebnisse zeigen darüber hinaus, dass die Bildqualität von der Lage der betroffenen Kokille relativ zur Belichtungsachse abhängt. Die raumaufgelöste Sensitivität kann somit als Optimierungsproblem betrachtet werden, was grundsätzlich eine flexible und ausrichtbare Myonenquelle wünschenswert erscheinen lässt.

Die Betrachtung der Auswirkungen des Startwertes des Zufallsgenerators zeigen zudem die Abhängigkeit der Bildqualität von der vorhandenen Statistik.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Myographie grundsätzlich dazu geeignet ist, partiell gefüllte Kokillen in einem TLB zu identifizieren. Dies setzt aber aus den o. g. Gründen ein Mindestmaß an Statistik sowie Myonen mit Energien oberhalb einer Schwellenergie voraus. Perspektivisch könnten hier technische Myongeneratoren einen Mehrwert darstellen.

4.2 Vergleich von Geant4- und MCNP-basierten Simulationsergebnissen für einen generischen TLB in Anlehnung an den Typ CASTOR® V/19

Für numerische Machbarkeitsstudien stehen neben Geant4 /AGO 03/, /ALL 16/ auch weitere Monte-Carlo-Codes zur Verfügung, die für Transportrechnungen genutzt werden können. Hierzu gehören z. B. FLUKA /BAT 15/, /AHD 22/ und das im Umfeld der Kerntechnik oft verwendete MCNP /MAS 13/. Wesentliche Unterschiede liegen zum einen in der Steuerung der numerischen Rechnungen. Das Spektrum reicht hier von Macro-basierten Simulationen, die ohne größere Programmierkenntnisse durchgeführt werden können, bis zu sehr flexiblen Umsetzungen, für die jedoch Programmierkenntnisse in einschlägigen Programmiersprachen vorausgesetzt werden. Zum anderen können unterschiedliche Modelle und/oder Modellparameter zur Beschreibung physikalischer Wechselwirkungsprozesse herangezogen werden. Zudem können weitere Feinheiten wie das Modell zur Erzeugung von Zufallszahlen, *event-biasing* und die Vorgabe von Schrittweiten zu weiteren systematischen Diskrepanzen führen. Im Rahmen der Qualitätskontrolle kann der Vergleich von Simulationen mit zwei oder mehreren Ansätzen bzw. Codes („Pseudo-Validierung“) das Vertrauen in die Simulationsergebnisse erhöhen und bei der Erkennung von kleineren Umsetzungsfehlern⁹ helfen. Zu betonen ist, dass dies keine Validierung im eigentlichen Sinne darstellt, da diese einem Vergleich mit empirischen Ergebnissen voraussetzt.

Zur Pseudo-Validierung und zu einer Einschätzung von Unsicherheiten des Geant4-basierten Codes wurden Simulationsergebnisse mit jenen verglichen, die mit MCNP unter identischen Randbedingungen und für dasselbe Behältermodell generiert wurden. Da Geant4 und MCNP unterschiedliche Ansätze bei der Beschreibung von Geometrien nutzen, musste hierfür zunächst ein Behältermodell abgestimmt werden, das in Abschnitt 4.2.1 näher beschrieben wird. In den darauffolgenden Abschnitten werden die Simulationen und die herangezogenen Randbedingungen zunächst beschrieben und im Anschluss die zugehörigen Ergebnisse zusammengestellt.

⁹ Ein Beispiel für einen solchen Umsetzungsfehler ergibt sich aus dem Simulationsvolumen. Teilchen, die an die Grenzen dieses Volumen stoßen (z. B. sehr stark gestreute Teilchen), werden in der Regel ohne Rückmeldung vernichtet und gehen nicht weiter in die Betrachtung ein. Auch bei ausgedehnten Detektorelementen, die dieses Volumen überschreiten, erfolgt mitunter keine Fehlermeldung.

4.2.1 Beschreibung eines generischen Modells in Anlehnung an den TLB vom Typ CASTOR® V/19

In Anlehnung an den TLB CASTOR® V/19 wurde ausgehend von dem zugehörigen Datenblatt /GNS 23a/, weiteren frei verfügbaren Informationen /BFS 03/ und darauf basierenden Abschätzungen ein realitätsnahes Behältermodell für DWR-Brennelemente erstellt und in Geant4 und in MCNP umgesetzt. Eine Visualisierung dieser Behältergeometrie ist in Abb. 4.16 dargestellt.

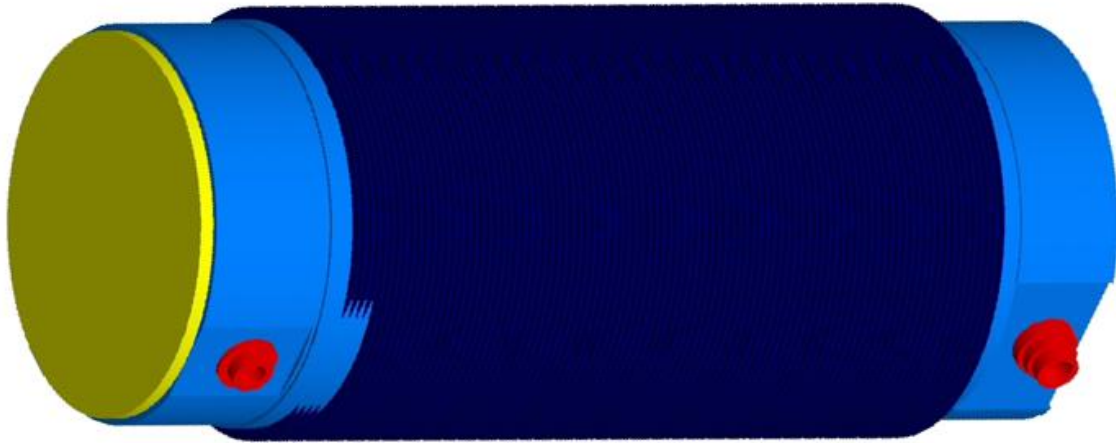


Abb. 4.16 Visualisierung des generischen Behälters in Anlehnung an den CASTOR® V/19

Analog zu dem Referenzmodell umfasst dieses realitätsnahe Behältermodell die folgenden Einzelkomponenten:

- Monolithischer Grundkörper mit Kühlrippen
- Bodenplatte
- Polyethylenplatte im Bodenbereich
- Polyethylenstäbe im Behältermantel (aufgeteilt in zwei Ringen)
- Primärdeckel
- Sekundärdeckel
- Polyethylenplatte im Deckelbereich
- Schutzplatte
- Tragezapfen

- Korb zur Fixierung der Brennelemente im Inneren des Behälters

Das Inventar besteht aus neunzehn DWR-Brennelementen, die generisch modelliert wurden. Wesentliche Vereinfachungen betreffen die Kopf- und Fußelemente, die hier als würfelförmig mit einer reduzierten Dichte angenommen wurden.

Die einzelnen Komponenten des Behälters und die Brennelemente können in der Explosionszeichnung in Abb. 4.17 identifiziert werden. Der modellierte Behälter hat in der Leerkonfiguration ein Gewicht von etwa 106,0 Mg und ist somit geringfügig leichter als das Referenzmodell mit einem Leergewicht von etwa 108 Mg /GNS 23a/. Mit einer modellierten Brennelementmasse von jeweils etwa 0,9 Mg ergibt sich so für den generischen Behälter eine maximale Masse von 122 Mg im voll beladenen Zustand. Detaillierte Informationen zu den angenommenen Materialien und den Massen der Einzelkomponenten finden sich in den Tab. 4.3 bis Tab. 4.5.

Tab. 4.3 Angenommene Materialien für das generische Behältermodell für DWR-Brennelemente in Anlehnung an den CASTOR® V/19

Material	Dichte
Edelstahl	8.00 g/cm ³
Polyethylen	0.94 g/cm ³
Sphäroguss	7.10 g/cm ³
Zirkonlegierung	6,56 g/cm ³
Edelstahl für Kopf- und Fußelement von Brennelement	1,134 g/cm ³
Urandioxid	10,96 g/cm ³

Tab. 4.4 Informationen zu Materialien und Massen für die Einzelkomponenten des detaillierten Behältermodells für DWR-Brennelemente

Komponente	Material	Masse
Monolith inkl. Kühlrippen	Sphäroguss	84,9 Mg
Tragezapfen	Edelstahl	0,5 Mg
Bodenplatte	Edelstahl	0,7 Mg
Untere Moderatorplatte	Poyethylen	0,1 Mg
Primärdeckel	Edelstahl	4,5 Mg
Obere Moderatorplatte	Polyethylen	0,2 Mg
Sekundärdeckel	Edelstahl	2,2 Mg
Schutzplatte	Edelstahl	2,4 Mg
Moderatorstäbe	Polyethylen	2,3 Mg
Tragkorb	Edelstahl	8,1 Mg

Tab. 4.5 Informationen zu Materialien und Massen für die Einzelkomponenten des generischen DWR-Brennelements

Komponente	Material	Masse
Kopfelement	Edelstahl für Kopf- und Fußelement von Brennelement	15 kg
Fußelement	Edelstahl für Kopf- und Fußelement von Brennelement	15 kg
Hüllrohre	Zirkonlegierung	153 kg
Kontrollstabbrohre	Zirkonlegierung	12 kg
Kernbrennstoff	Urandioxid	661 kg

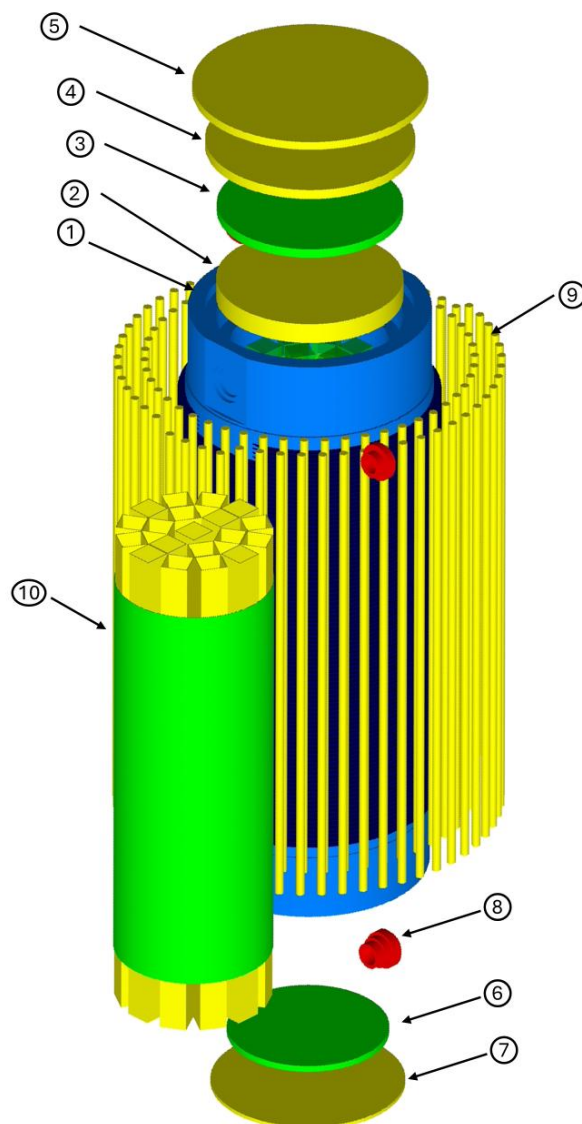


Abb. 4.17 Explosionszeichnung des detaillierten Behältermodells in Anlehnung an den TLB CASTOR® V/19

Behältermonolith (1), Primärdeckel (2), obere Polyethylenplatte (3), Sekundärdeckel (4), Schutzplatte (5), untere Polyethylenplatte (6), Bodenplatte (7), Tragezapfen (8), Polyethylenstäbe (9) und Korb (10)

4.2.2 Beschreibung der Simulation

Zur Reduzierung der Freiheitsgrade wurden für die Simulationsrechnungen monodirektionale und monoenergetische Myonen herangezogen. Jeweils einen Zentimeter unter- bzw. oberhalb des Behälters wurden großformatige Detektionsflächen angenommen, deren Normalenvektor parallel zur z -Achse verläuft. Die Myonen wurden einen Zentimeter oberhalb der oberen Detektionsfläche in einer Fläche von $2,5 \times 2,5 \text{ m}^2$ erzeugt. Die initiale Ausbreitungsrichtung entsprach der negativen z -Achse. Die Myonenenergie wurde zu 3 GeV bzw. 5 GeV fixiert, es wurden jeweils 5×10^7 Ereignisse simuliert.

4.2.3 Vergleich der Simulationsergebnisse

Für den Vergleich der Simulationsergebnisse werden zunächst Medianwerte der effektiven Streuwinkelverteilung sowie der des Energieverlusts betrachtet. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.18 und Abb. 4.19 dargestellt.

Wesentliche Unterschiede sind für das Szenario mit 3-GeV Myonen sowohl für die Streuwinkel als auch für die Energieverlustwerte zu erkennen. Hervorzuheben ist zunächst das Behälterinnere, für das die Simulation mit Geant4 zu einem deutlich höher aufgelösten und kontrastreichen Bild führt. Mit MCNP hingegen sind einzelne Brennelemente nur schwer zu erkennen. Ein weiterer wesentlicher Unterschied betrifft den Bereich der Polyethylenstäbe im Mantel des Behälters. Die MCNP-Simulationen sagen für die Bereiche in beiden Ringen weitestgehend vergleichbare Streuwinkel und Energieverlustwerte voraus, während die mit Geant4 durchgeführte Simulation deutlich höhere Streuwinkel und Energieverlustwerte für den äußeren Ring vorhersagt.

Hinsichtlich des Medians des Streuwinkels betragen die relativen Abweichungen mit wenigen Ausnahmen bis zu 100 %. So beträgt die relative Abweichung beispielsweise etwa 40 % für das innere Brennelement und 15 % für den Außenbereich des Behälters. Besonders groß mit etwa 100 % sind die relativen Abweichungen im Bereich der äußeren Polyethylenstäbe. Bezogen auf den Median der Energieverlustverteilung sind die relativen Abweichungen geringer und zeigen zudem einen glatteren Verlauf. Tendenziell führen die Geant4-Simulationen zu höheren Streuwinkeln. Bezogen auf den Energieverlust ergibt sich ein komplexeres Bild. Für den Bereich der Brennelemente sagt Geant4 höhere Energieverlustwerte vorher. Auch für den innenliegenden Mantelbereich sagt Geant4 etwas höhere Energieverlustwerte voraus. Graduell entwickelt sich dies mit

zunehmendem Radius gegenläufig, so dass für den außen liegenden Mantelbereich MCNP höhere Energieverlustwerte vorhersagt.

Auch für die höhere Myonenenergie von 5 GeV zeigen sich für den Bereich der Brennelemente deutliche Unterschiede. Auch hier führt die Geant4-Simulation zu einem kontrastreicherem Bild, allerdings sind nun auch auf Basis der MCNP-Simulation die einzelnen Brennelemente besser zu erkennen. Die Vorhersagen für den Bereich der Polyethylenstäbe haben sich angenähert, allerdings prognostiziert Geant4 tendenziell höhere Streuwinkelwerte. Hinsichtlich der Streuwinkel liegen die relativen Abweichungen bei etwa 50 % für das zentrale Brennelement sowie etwa 15 % für den äußeren Mantelbereich und sind somit vergleichbar zu dem 3-GeV-Szenario.

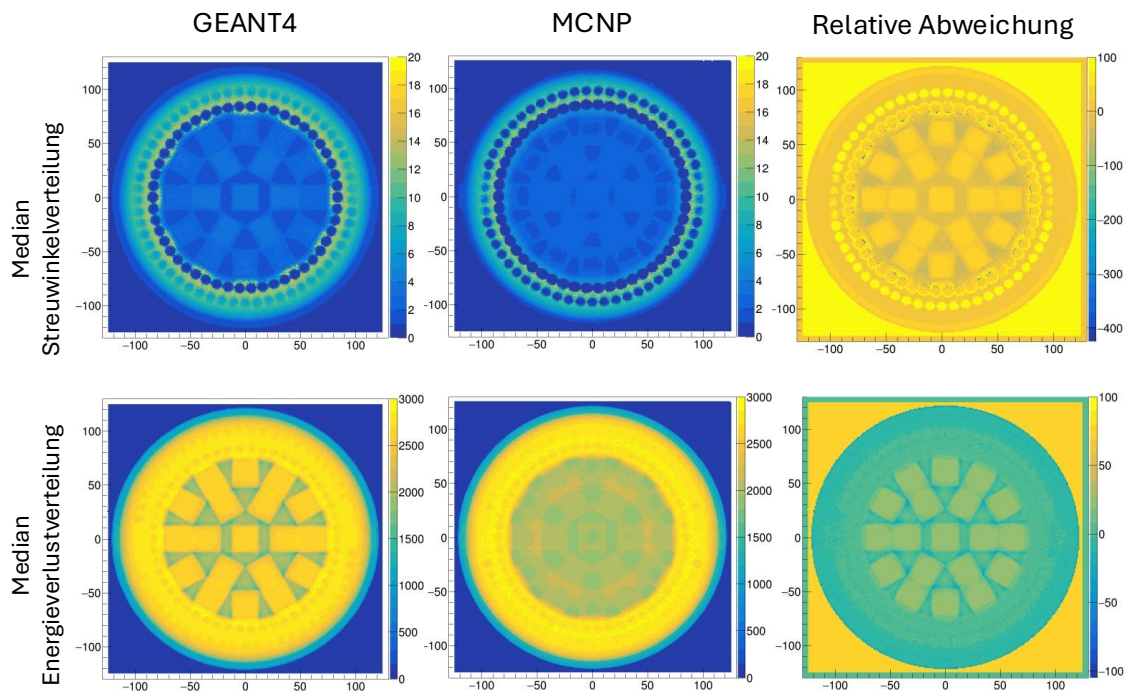


Abb. 4.18 Vergleich von simulierten Medianwerten der Streuwinkel- und Energieverteilung für Myonen mit einer Energie von 3 GeV

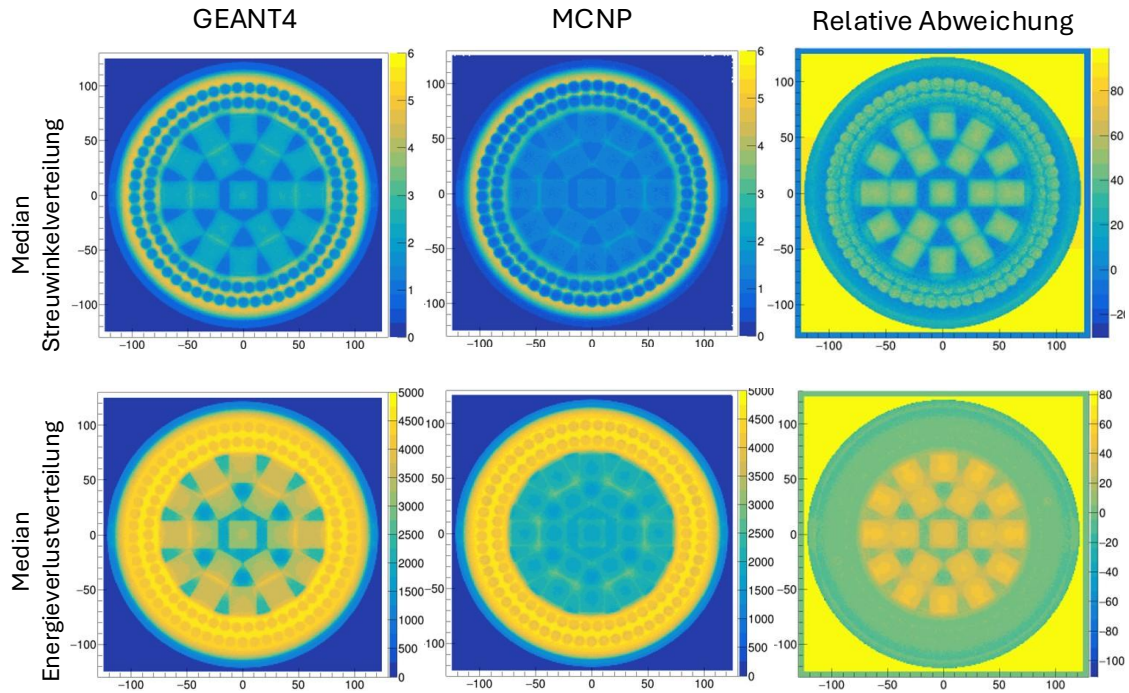


Abb. 4.19 Vergleich von simulierten Medianwerten der Streuwinkel- und Energieverlustverteilung für Myonen mit einer Energie von 5 GeV

Zur Erlangung eines besseren Verständnisses der Abweichungen werden in Abb. 4.20 und Abb. 4.21 die Streuwinkel- und Energieverlustverteilungen für zwei ausgewählte Pixel des zentralen Brennelements und des äußeren Behältermantels miteinander verglichen. Hierbei zeigen sich insbesondere für den zum zentralen Brennelement gehörenden Pixel deutliche Unterschiede bezüglich beider Signaturen. Die oben diskutierten Abweichungen hinsichtlich der Medianwerte sind somit auf systematische Unterschiede der Verteilung zurückzuführen.

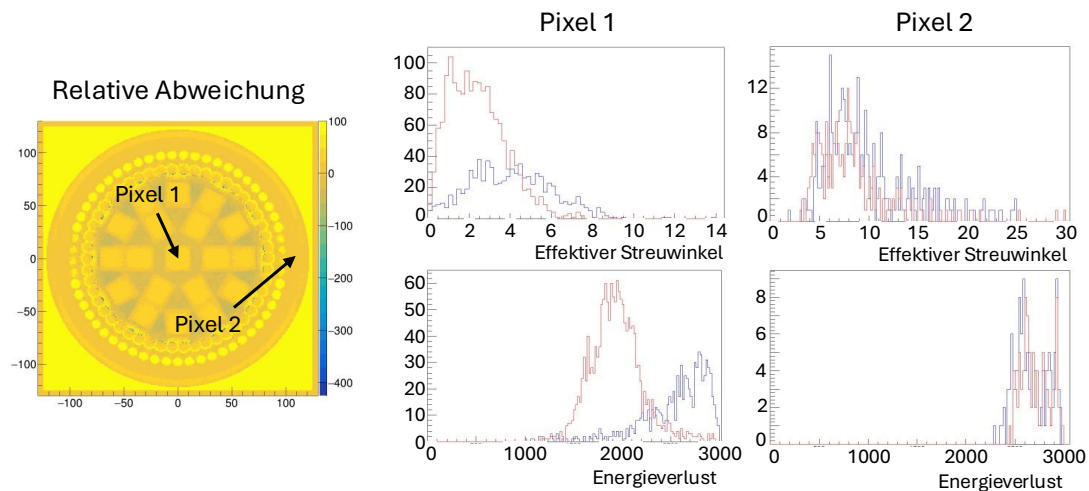


Abb. 4.20 Vergleich der Streuwinkel- und Energieverlustverteilungen für zwei ausgewählte Pixel für Simulationen mit 3 GeV

Ergebnisse der Simulation mit Geant4 (MCNP) sind in blau (rot) dargestellt.

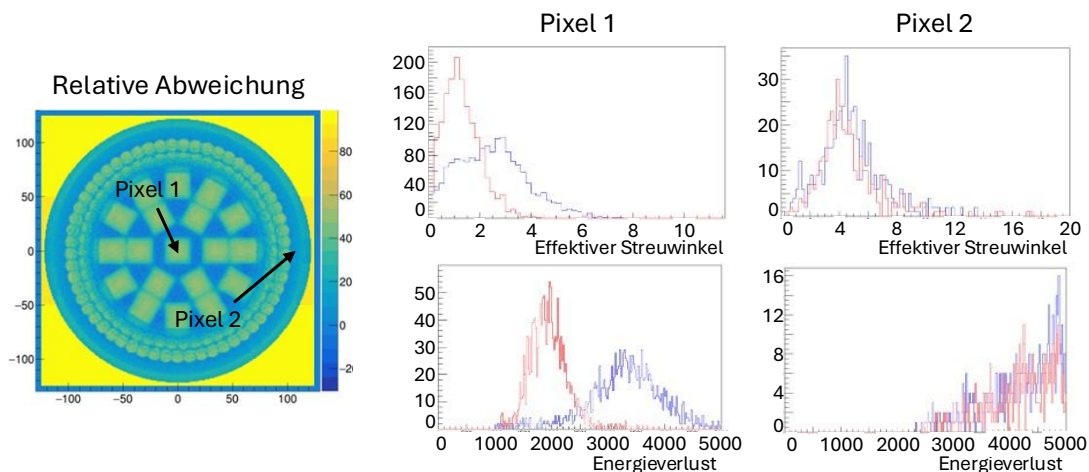


Abb. 4.21 Vergleich der Streuwinkel- und Energieverlustverteilungen für zwei ausgewählte Pixel für Simulationen mit 5 GeV

Ergebnisse der Simulation mit Geant4 (MCNP) sind in blau (rot) dargestellt.

4.3 Simulationsergebnisse für einen generischen TLB für bestrahlte Brennelemente von DWR

Die GRS hat zusammen mit Kollegen der Technischen Universität Dresden bzw. des HZDR ein generisches Modell eines TLB für 19 DWR-Brennelemente entwickelt. Dieses Modell nutzt keine Detailinformationen bestimmter existierender Behälter und kann somit mit Externen geteilt werden. Diese Entwicklung wurde wesentlich durch den Wunsch

nach einer besseren Vergleichbarkeit durch eine fixierte Geometrie motiviert. Erste Ergebnisse dieses Modells wurden auf dem SEDS-Workshop (*Safety of Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel*) im Jahr 2025 vorgestellt /BRA 25/ und auf dem SEDS-Workshop im Jahr 2026 vertieft /BRA 26/.

Das generische Behältermodell ähnelt in den Grundzügen dem CASTOR® V/19, ist im Detail allerdings deutlich einfacher aufgebaut (siehe Abb. 4.22).

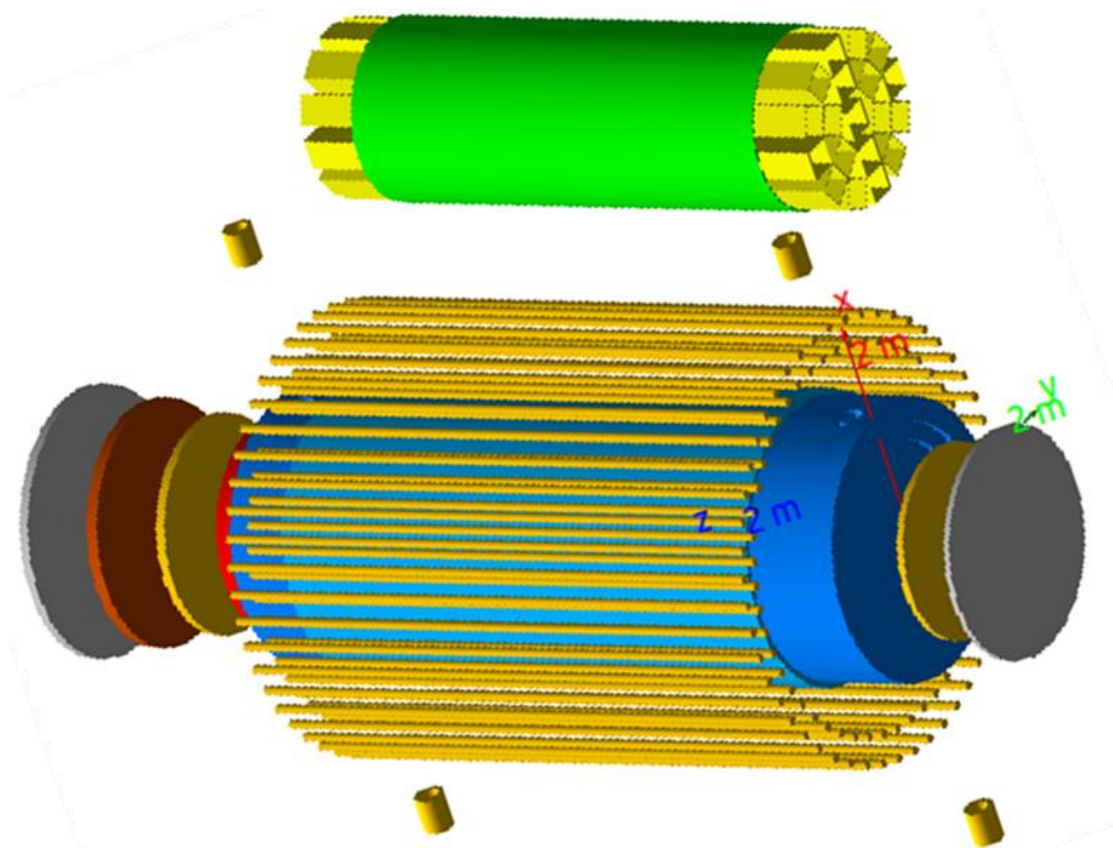


Abb. 4.22 Explosionsbild des generischen Behältermodells

Dieses Behältermodell wurde genutzt, um Vergleichssimulationen zwischen Geant4 und FLUKA durchzuführen. Betrachtet wurden hierbei mono-energetische (5 GeV) und monodirektionale (Ausbreitung entlang der z-Achse) Myonen. Insgesamt wurden jeweils $5E7$ Ereignisse simuliert. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.23 dargestellt.

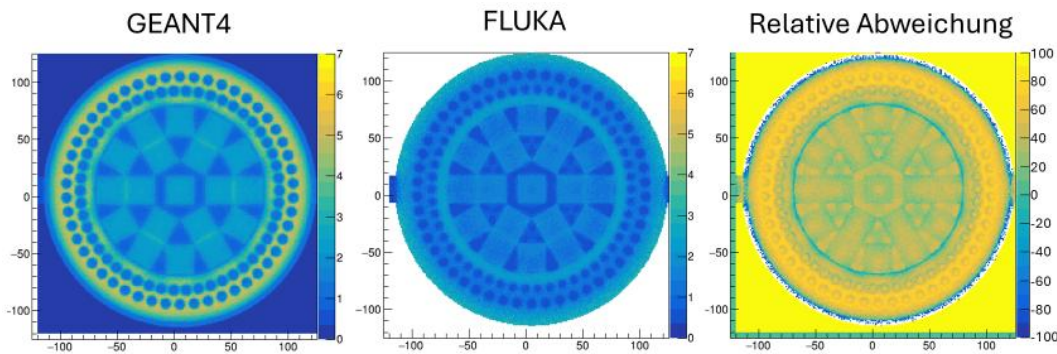


Abb. 4.23 Vergleich zwischen Simulationen mit Geant4 und FLUKA für das generische Behältermodell

Sowohl das mit Geant4 als auch das mit FLUKA generierte Projektionsbild erlaubt die Erkennung einzelner Brennelemente. Im direkten Vergleich fällt allerdings auf, dass Geant4 mit wenigen Ausnahmen im Median höhere Streuwinkel prognostiziert. Dies gilt insbesondere für den Mantelbereich, für den die Abweichungen bis etwa 65 % betragen. Auch für das zentrale Brennelement sind die relativen Abweichungen im Bereich von 40 % sehr hoch. Einzige wesentliche Ausnahmen stellen die Grenzflächen zum Behälterinneren und zur Umgebung dar, für die MCNP jeweils lokal höhere Streuwinkel vorhersagt.

4.4 Betrachtung der Nutzbarkeit von KI-Methoden im Kontext der Myonen-gestützten Bildgebung

Abschließend soll exemplarisch betrachtet werden, inwieweit KI-Methoden, wie z. B. maschinelles Lernen, in der Myonen-gestützten Bildgebung zur Auswertung von Projektionsbildern angewendet werden können und ob diese, im Vergleich zu einem klassischen deterministischen Ansatz, einen Mehrwert liefern können.

Dazu werden die Simulationsergebnisse des zuvor beschriebenen realitätsnahen Modells in Anlehnung an den CASTOR® HAW28M herangezogen (vgl. Abschnitt 4.1), um die Unterscheidbarkeit der Datensätze mit vollständig gefüllten Kokillen von denen mit nur teilweise gefüllten Kokillen zu untersuchen. Als Grundlage dienen dreidimensionale Histogramme, die die Orts- und Winkelinformationen der simulierten Myonen-Ereignisse widerspiegeln. Die Auswertung dieser Daten wurde in Python implementiert und umfasst den gesamten Prozess von der Datenvorverarbeitung über das Training neuronaler Netze bis hin zur systematischen Evaluation der Ergebnisse. Besonderer Wert wurde

dabei auf eine klare Trennung der einzelnen Verarbeitungsschritte, Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sowie auf eine physikalisch interpretierbare Analyse gelegt.

Die Rohdaten liegen im ROOT-Format /BRU 97/ vor und werden im Rahmen eines dedizierten Preprocessing-Schrittes in ein kompaktes, maschinenlerntaugliches Format überführt. Dabei wird jedes simulierte Ereignis genau einmal in ein dreidimensionales Array abgebildet, so dass die resultierenden Datensätze aus statistisch unabhängigen Samples bestehen. Diese Arrays wurden zu Trainingszwecken auf ein einheitliches Format der Größe 64x64x32 gebracht. Die vorverarbeiteten Daten werden anschließend als komprimierte NumPy-Archive /HAR 20/ gespeichert und dienen als Eingabe für die weiteren Analyseschritte.

Das maschinelle Lernen übernimmt das Modell eines neuronalen Netzes. Neuronale Netze sind datengetriebene Modelle, die durch Anpassung ihrer internen Gewichtungen eine Abbildung zwischen Eingangsdaten und Zielgrößen lernen. Während des Trainings werden diese Gewichtungen so optimiert, dass eine vorgegebene Verlustfunktion minimiert wird. *Convolutional Neural Networks* (CNN) sind eine spezialisierte Form, die insbesondere räumliche Strukturen in Daten effizient erfassen können. Da neben Ortsinformationen auch die Streuwinkel der Myonen vorliegen, wird ein 3D-CNN verwendet. Die Implementierung des Modells wurde in Keras /KER 15/ und Tensorflow /TEN 15/ umgesetzt. Die Architektur ist in diesem Fall so gewählt, dass sie räumliche Korrelationen innerhalb der Histogramme erfassen kann, ohne dabei unnötige Modellkomplexität einzuführen. Das Modell besteht aus drei Convolutional-3D Schichten, die jeweils mit einer MaxPooling3D-Schicht abschließen. Zum Zwecke der Klassifikation folgen drei vollständig verbundene Schichten, die mit einem Ausgabeneuron abschließen. Die Trainingspipeline nutzt Streaming-Datensätze auf Basis von *keras.utils.Sequence*, wodurch ein speichereffizientes Arbeiten auch bei größeren Datensätzen ermöglicht wird. Aspekte wie Klassengewichtung, Batch-Balancing und Datenaugmentierung werden explizit berücksichtigt und kontrolliert eingesetzt.

Ein zentraler Bestandteil dieser Arbeit ist die kritische Evaluation der Modellresultate. Neben klassischen Trainings- und Validierungsmetriken wird Wert auf die Trennung von Trainings-, Validierungs- und Testdaten gelegt, um ungewünschte Wechselwirkungen wie Datenleckagen konsequent zu vermeiden. Darüber hinaus werden die Ergebnisse des neuronalen Netzes stets durch modellunabhängige, physikalisch motivierte Analysen ergänzt. Dazu zählen u. a. die Auswertung einfacher Observablen (z. B. Gesamtstatistik und Schwerpunkte), die Untersuchung von Differenzbildern sowie gezielte

Region-of-Interest (ROI)-Tests, mit denen geprüft wird, ob lokal sichtbare Mittelwertunterschiede auch auf Einzelereignisebene unterscheidbar sind.

Der entwickelte Code dient damit nicht ausschließlich der Optimierung eines Klassifikationsmodells, sondern stellt ein systematisches Werkzeug zur Beantwortung der grundlegenden Frage bereit, ob die vorliegenden Observablen physikalisch ausreichend Information für eine Klassifikation enthalten. Die Kombination aus neuronalen Netzen und klassischen statistischen Tests erlaubt es, Modellartefakte von tatsächlich vorhandenen physikalischen Signalen zu unterscheiden und belastbare Schlussfolgerungen über die prinzipielle Trennbarkeit der betrachteten Ereignisklassen zu ziehen.

4.4.1 Ergebnisse

Zunächst zeigte das Training des 3D-CNN scheinbar vielversprechende Resultate auf den Trainingsdaten. Hohe Trainingsmetriken ließen zunächst auf eine erfolgreiche Klassifikation schließen. Diese Beobachtung relativierte sich jedoch in der Evaluation auf unabhängigen Validierungs- und insbesondere Testdaten. Dort erwies sich das Modell als stark konservativ und vergab für nahezu alle Ereignisse sehr niedrige Klassifikationscores, unabhängig von der gewählten Schwellenwert für diese Entscheidung. Dieses Verhalten ist konsistent mit einer Situation, in der das Modell zwar Mittelwertunterschiede zwischen Klassen während des Trainings ausnutzt, jedoch keine stabilen, auf Einzelereignisebene reproduzierbaren Merkmale gelernt hat.

Die anschließende modellunabhängige Analyse einfacher physikalischer Observablen bestätigt diese Interpretation. Weder die Gesamtstatistik noch räumliche Schwerpunkte zeigen signifikante Unterschiede zwischen Simulationen mit ausschließlich gefüllten Kokillen und denen, in denen jeweils eine Kokille nur zur Hälfte gefüllt wurde. Entscheidend ist hierbei nicht allein die Übereinstimmung der Mittelwerte, sondern insbesondere die starke Überlappung der Ereignisverteilungen. Selbst bei einer Statistik von 25 Mio. simulierten Ereignissen bleiben die beobachteten Unterschiede im Bereich der statistischen Unsicherheit einzelner Ereignisse. Damit kann ausgeschlossen werden, dass die fehlende Trennbarkeit lediglich auf eine unzureichende Stichprobengröße zurückzuführen ist.

Ein scheinbarer Widerspruch ergibt sich aus der Betrachtung von Differenzbildern, in denen lokal begrenzte Bereiche mit erhöhter Statistik sichtbar werden (vgl. Abb. B.8). Diese Beobachtung legt zunächst nahe, dass zumindest lokal ein systematischer Unter-

schied zwischen den Klassen existiert. Die durchgeführten ROI-Tests zeigen jedoch eindeutig, dass es sich hierbei um einen reinen Mittelwerteffekt handelt. Die integrierte Zählrate in diesen Regionen unterscheidet sich auf Einzelereignisebene nur minimal zwischen beiden Klassen. Die berechneten Effektgrößen liegen mit Cohen's $d \approx 0,06$ /COH 88/ deutlich unterhalb eines Bereichs, der für eine Klassifikation relevant wäre¹⁰. Damit ist quantitativ belegt, dass die im Differenzbild sichtbaren Strukturen keine ereignisweise Trenninformation enthalten.

Die Ergebnisse verdeutlichen einen grundlegenden, häufig missverstandenen Aspekt maschinellen Lernens in der Physik: Neuronale Netze können keine Information extrahieren, die in den Daten physikalisch nicht vorhanden ist. Obwohl CNN in der Lage sind, komplexe nichtlineare Muster zu erkennen, sind sie dennoch an die statistische Trennbarkeit der Klassen auf Einzelereignisebene gebunden. Liegen die Verteilungen vollständig ineinander, so entspricht der Bayes-optimale Klassifikator, das theoretisch bestmögliche probabilistische Modell, einer Zufallsentscheidung. Das beobachtete Verhalten des Modells ist daher nicht als Versagen des Lernverfahrens zu interpretieren, sondern als korrekte Reaktion auf eine unterbestimmte Klassifikationsaufgabe.

Die durchgeführte Analyse über verschiedene Raumrichtungen (x-, y- und z-Achse) verstärkt diese Schlussfolgerung zusätzlich. In keiner der betrachteten Projektionen konnte ein relevanter Zugewinn an Trenninformation festgestellt werden. Insbesondere entlang der y-Achse zeigte das Modell niedrige Scores, was auf eine besonders hohe Symmetrie beziehungsweise Informationsarmut dieser Projektion hinweist. Die Richtungsunabhängigkeit der Ergebnisse spricht dafür, dass die fehlende Trennbarkeit nicht auf geometrische Effekte, sondern auf die grundlegende Natur der betrachteten Observablen zurückzuführen ist.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die vorliegende Arbeit ein konsistentes Negativergebnis liefert. Die Kombination aus neuronalen Netzen, klassischen analytischen Vergleichen, Differenzbildern und ROI-Tests erlaubt eine klare Abgrenzung zwischen scheinbaren Mittelwerteffekten und tatsächlich klassifikationsrelevanter Information.

¹⁰ Cohen's d ist ein statistisches Maß für die Unterscheidbarkeit der Mittelwerte zweier Gruppen. Eine Effektgröße von $d < 0,2$ besagt, dass der Unterschied beider Gruppen statistisch unbedeutend ist.

Für zukünftige Arbeiten folgt daraus, dass eine erfolgreiche Trennung beider Klassen nur durch die Einbeziehung zusätzlicher physikalischer Information zu erwarten ist. Mögliche Ansätze wären beispielsweise zeitliche Informationen, eine feinere Auflösung einzelner Detektorebenen oder die Nutzung von Impulsinformationen der gestreuten Myonen. Ohne derartige zusätzliche Observablen ist die Klassifikationsaufgabe mit den hier betrachteten Daten physikalisch unterbestimmt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es ist abzusehen, dass für einen Großteil der bestrahlten Brennelemente und der hochradioaktiven Abfälle in Deutschland und anderen Ländern eine verlängerte Zwischenlagerung (d. h. Zwischenlagerperioden von deutlich mehr als 40 Jahren) notwendig sein wird. Aufgrund der befristeten Genehmigungen sind somit auch unter Berücksichtigung von WKP zusätzliche Sicherheitsnachweise zu erbringen. Zerstörungsfreie Prüfverfahren können für eine Untersuchung und Bewertung des Zustands sowohl des Behälters als auch des eingeschlossenen Inventars herangezogen werden. In diesem Bericht wurden etablierte zerstörungsfreie Prüfverfahren diskutiert und aktuelle Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten zur Weiterentwicklung von ZfP-Verfahren vorgestellt (vgl. Kapitel 2). Hervorzuheben sind hierbei Bestrebungen zur Erkennung nicht-oberflächennaher Schäden (beispielsweise innovative Ultraschallverfahren) und Messverfahren, die Rückschlüsse auf das Inventar und dessen Zustand erlauben. Hierzu gehören neben Verfahren zur Messung von Dosisleistungen und der Strahlungsfelder auch die Bildgebung mit atmosphärischen Myonen.

Die Inhalte des Kapitel 3 fokussierten sich auf die Grundlagen der Myographie und aktuellen F&E-Aktivitäten in diesem Bereich. Obschon erste myographische Feldstudien bereits in den 1960er Jahren durchgeführt wurden, ist weiterhin ein hohes Maß an Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten zu beobachten, die unterschiedliche Aspekte wie die Detektorentwicklung, die Weiterentwicklung von Rekonstruktionsverfahren oder die Implementierung von KI-Methoden abdecken. Darüber hinaus wurden in Kapitel 4 die Ergebnisse von Monte-Carlo-basierten Machbarkeitsstudien für die myographische Untersuchung von TLB präsentiert und bewertet. Zudem wurden Vorhersagen mehrerer Monte-Carlo-Codes für myographische Messungen von TLB miteinander verglichen.

In der Vergangenheit lag der Fokus numerischer Machbarkeitsstudien für die Behälterprüfung auf Behälter für Brennelemente. In diesem Bericht wurde der Anwendungsrahmen auf Behälter für verglaste hochradioaktive Abfälle erweitert. Die Ergebnisse zeigen hier eine grundsätzliche Nutzbarkeit der Myographie zur Erkennung partiell gefüllter Korkillen, weisen allerdings auf deutliche Limitierungen hin, die sich aus den Eigenschaften des natürlichen Myonenspektrums ergeben. Diese Limitierungen betreffen beispielsweise den niedrigen Myonenfluss, den Bedarf ausreichend energetischer Myonen im Bereich weniger GeV und Limitierungen, die sich aus der Winkelverteilung ergeben. Perspektivisch ist es denkbar, dass technische Myonengeneratoren auf Basis von Kiefeld-

Beschleunigern (engl.: *laser wakefield accelerator*) praktische Anwendungsbarrieren reduzieren bzw. auflösen können.

Darüber hinaus wurden Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Monte-Carlo-Codes (Geant4, MCNP und FLUKA) für definierte TLB-Modelle miteinander verglichen. Die Ergebnisse zeigen systematische und ausgeprägte Abweichungen im Bereich einiger zehn bis 100 %. Da Simulationsrechnungen auch zu Detailplanungen von Feldexperimenten genutzt werden, sind diese deutlichen Abweichungen problematisch und müssen besser verstanden werden. Darüber hinaus werden leicht verfügbare experimentelle Daten benötigt, um die Performance unterschiedlicher Codes mit empirischen Daten besser bewerten zu können.

Die Myographie ist ein interdisziplinäres Feld für dessen weitere Erschließung und Weiterentwicklung Kompetenzen in unterschiedlichen Fachbereichen und Fachdisziplinen benötigt werden. Hierzu gehören u. a. die Fachbereiche Mathematik, Informatik, Physik sowie die interdisziplinären Fachdisziplinen wie Detektorentwicklung, Simulationsstudien und – mit zunehmender Bedeutung – KI-Anwendungen. Der Bereich zeigt, dass in all diesen Feldern derzeit Fortschritte und Ergebnisse erzielt werden. Obschon die Myographie-Community stetig wächst, ist sie im Vergleich zu anderen Gebieten weiterhin als eher klein einzuschätzen. In der Regel sind die unterschiedlichen Akteure nicht gleichermaßen in allen fachlichen Disziplinen vertreten, sondern setzen sich punktuell mit bestimmten Aspekten auseinander. Für eine effektive und effiziente Nutzung vorhandener Ressourcen ist es somit zweckdienlich, Synergien einerseits zu erlauben (beispielsweise durch das Bereitstellen von F&E-Ergebnissen) und andererseits diese auch aktiv auszunutzen. Eine Stärkung des fachlichen Austauschs über die Präsentation und Publikation von Ergebnissen hinaus und mit dem Ziel, Synergien transparent und barrierearm nutzbar zu machen, ist somit wünschenswert und für die Community zweckdienlich.

Literaturverzeichnis

- /AGO 03/ Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., Asai, M., Axen, D., Banerjee, S., Barrand, G., Behner, F., Bellagamba, L., Boudreau, J., Broglia, L., et al.: Geant4—a simulation toolkit. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Bd. 506, Nr. 3, S. 250–303, DOI 10.1016/S0168-9002(03)01368-8, 2003.
- /AHD 22/ Ahdida, C., Bozzato, D., Calzolari, D., Cerutti, F., Charitonidis, N., Cimmino, A., Coronetti, A., D'Alessandro, G. L., Donadon Servelle, A., Esposito, L. S., Froeschl, R., García Alía, R., Gerbershagen, A., Gilardoni, S., et al.: New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code. Frontiers in Physics, Bd. 9, DOI 10.3389/fphy.2021.788253, 2022.
- /AKK 25/ Akkurt, H.: ESCP Aging Management Working Group Meeting: Key Recommendations and Status Update. Präsentation, EPRI-ESCP Winter Meeting, 29. Oktober 2025.
- /ALL 16/ Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Arce, P., Asai, M., Aso, T., Bagli, E., Bagulya, A., Banerjee, S., Barrand, G., Beck, B. R., Bogdanov, A. G., Brandt, D., Brown, J., et al.: Recent developments in Geant4. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Bd. 835, S. 186–225, DOI 10.1016/j.nima.2016.06.125, 2016.
- /ALR 21/ Alrheli, A., Kopp, A., Kikoła, D., Sio, C. de, Barker, D., Mhaidra, M., Stowell, P., Thompson, L. F., Velthuis, J., Weekes, M. J.: A Muon Scattering Tomography Method for Verification of Fuel Assemblies Stored in V/52 CASTOR. Präsentation, Waste Management Symposia 2021, März 2021.
- /ALV 70/ Alvarez, L. W., Anderson, J. A., Bedwei, F. E., Burkhard, J., Fakhry, A., Girgis, A., Goneid, A., Hassan, F., Iverson, D., Lynch, G., Miligy, Z., Moussa, A. H., Sharkawi, M., Yazolino, L.: Search for hidden chambers in the pyramids. Science, Bd. 167, Nr. 3919, S. 832–839, DOI 10.1126/science.167.3919.832, 1970.

- /AMB 15/ Ambrosino, F., Anastasio, A., Bross, A., Béné, S., Boivin, P., Bonechi, L., Cârloganu, C., Ciaranfi, R., Cimmino, L., Combaret, C., D'Alessandro, R., Durand, S., Fehr, F., Français, V., et al.: Joint measurement of the atmospheric muon flux through the Puy de Dôme volcano with plastic scintillators and Resistive Plate Chambers detectors. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Bd. 120, Nr. 11, S. 7290–7307, DOI 10.1002/2015JB011969, 2015.
- /ANC 19/ Ancius, D., Aymanns, K., Checchia, P., Gonella, F., Jussofie, A., Montecassiano, F., Murtezi, M., Schwalbach, P., Schoop, K., Vanini, S., Zumerle, G.: Modelling of safeguards verification of spent fuel dry storage casks using muon trackers. *Präsentation*, 41th ESARDA Symposium, 2019.
- /AND 84/ Andersen, A.: Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique (SART): A superior implementation of the ART algorithm. *Ultrasonic Imaging*, Bd. 6, Nr. 1, S. 81–94, DOI 10.1016/0161-7346(84)90008-7, 1984.
- /AND 25/ Andreetto, P., Aymanns, K., Balling, M., Benettoni, M., Bez, N., Bonomi, G., Castellani, L., Checchia, P., Conti, E., Dackner, J., Gonella, F., Jussofie, A., Lorenzon, A., Montecassiano, F., et al.: Results on re-verification tests of spent fuel casks with muon tomography: MUTOMCA project. *Journal of Applied Physics*, Bd. 138, Nr. 12, DOI 10.1063/5.0272975, 2025.
- /ATG 25/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) (AtG) zuletzt geändert 2. Dezember 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 301).
- /BAE 24/ Bae, J., Montgomery, R., Chatzidakis, S.: Momentum informed muon scattering tomography for monitoring spent nuclear fuels in dry storage cask. *Scientific Reports*, Bd. 14, Nr. 1, S. 6717, DOI 10.1038/s41598-024-57105-y, 2024.
- /BAG 13/ Bagavathiappan, S., Lahiri, B. B., Saravanan, T., Philip, J., Jayakumar, T.: Infrared thermography for condition monitoring – A review. *Infrared Physics & Technology*, Bd. 60, S. 35–55, DOI 10.1016/j.infrared.2013.03.006, 2013.

- /BAR 25/ Barnes, S., Alameddine, J. M., Bueno, A., Perez-Prada, M., Sattler, F.: The CACTUS Project: Novel methods for the monitoring of CASTOR casks using muons. Präsentation, BGZ Fachworkshop, 26. November 2025.
- /BASE 23/ Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: Zwischenlager Gorleben. Stand vom 20. Juli 2023, erreichbar unter <https://www.base.bund.de/de/zwischenlager/aufbewahrung/standorte-zwischenlager/zwischenlager-gorleben/zwischenlager-gorleben.html>, abgerufen am 29. Januar 2026.
- /BASE 25a/Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: Zwischenlager Nord und Neubau Ersatztransportbehälterlager Lubmin. Stand vom 18. Dezember 2025, erreichbar unter https://www.base.bund.de/de/zwischenlager/aufbewahrung/standorte-zwischenlager/zwischenlager-lubmin/zwischenlager-lubmin_inhalt.html, abgerufen am 29. Januar 2026.
- /BASE 25b/Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: Zwischenlager Lingen. Stand vom 23. Juli 2025, erreichbar unter https://www.base.bund.de/de/zwischenlager/aufbewahrung/standorte-zwischenlager/zwischenlager-lingen/zwischenlager-lingen_inhalt.html, abgerufen am 29. Januar 2026.
- /BASE 26/ Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: Zwischenlager Brunsbüttel. Erreichbar unter https://www.base.bund.de/de/zwischenlager/aufbewahrung/standorte-zwischenlager/zwischenlager-brunsbuettel/zwischenlager-brunsbuettel_inhalt.html, abgerufen am 14. Mai 2026.
- /BAT 15/ Battistoni, G., Boehlen, T., Cerutti, F., Chin, P. W., Esposito, L. S., Fassò, A., Ferrari, A., Lechner, A., Empl, A., Mairani, A., Mereghetti, A., Ortega, P. G., Ranft, J., Roesler, S., et al.: Overview of the FLUKA code. *Annals of Nuclear Energy*, Bd. 82, S. 10–18, DOI 10.1016/j.anucene.2014.11.007, 2015.
- /BEN 81/ Bently, P. G.: A review of acoustic emission for pressurised water reactor applications. *NDT International*, Bd. 14, Nr. 6, S. 329–335, DOI 10.1016/0308-9126(81)90112-7, 1981.

- /BFS 03/ Bundesamt für Strahlenschutz: Strahlungsmessungen an einem Transport- und Lagerbehälter vom Typ CASTOR HAW 20/28 CG. Juli 2003.
- /BGZ 25/ BGZ Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH: Das Forschungsprogramm der BGZ. 3. Aufl., 33 S., 2025.
- /BGZ 26/ BGZ Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH: Übersicht der BGZ-Zwischenlager. Erreichbar unter <https://zwischenlager.info/>, abgerufen am 14. Mai 2026.
- /BMUV 23/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV): Verzeichnis radioaktiver Abfälle, (Bestand zum 31. Dezember 2022 und Prognose). 97 S., November 2023.
- /BON 20/ Bonechi, L., D'Alessandro, R., Giammanco, A.: Atmospheric muons as an imaging tool. Reviews in Physics, Bd. 5, S. 100038, DOI 10.1016/j.revip.2020.100038, 2020.
- /BON 23/ Bonomi, G.: Muon tomography for re-verification of spent fuel casks (the MUTOMCA project). Präsentation, Muographers '23: Neapel, 21. Juni 2023.
- /BOR 25a/ Borigo, C.: Robotic Guided Wave Scanning Technologies for Spent Fuel Dry Storage Canister Evaluation. Präsentation, Guided Wave, EPRI-ESCP Winter Meeting, 29. Oktober 2025.
- /BOR 25b/ Borozdin, K.: Imaging Techniques in Muon Tomography. Präsentation, Fifth MODE Workshop on Differentiable Programming for Experiment Design: Kreta (Griechenland), 9. Juni 2025.
- /BRA 21/ Braunroth, T., Berner, N., Rowold, F., Péridis, M., Stuke, M.: Muon radiography to visualise individual fuel rods in sealed casks. EPJ Nuclear Sciences & Technologies, Bd. 7, S. 12, DOI 10.1051/epjn/2021010, 2021.
- /BRA 25/ Braunroth, T.: Generic cask modelling options to promote both exchange and comparability and their illustration using a muographic application. Präsentation, SEDS Workshop 2025, 22. Mai 2025.

- /BRA 26/ Braunroth, T.: Muography for the Non-Destructive Examination of Dual-Purpose Casks, Recent Feasibility and Performance Studies based on Monte-Carlo Calculations. Präsentation, SEDS Workshop 2026, 11. Mai 2026.
- /BRU 97/ Brun, R., Rademakers, F.: ROOT — An object oriented data analysis framework. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Bd. 389, Nr. 1-2, S. 81–86, DOI 10.1016/S0168-9002(97)00048-X, 1997.
- /BUR 25/ Bury, F., Lagrange, M.: Scattering-Based Machine Learning Algorithms for Momentum Estimation in Muon Tomography. Particles, Bd. 8, Nr. 2, S. 43, 2025.
- /CAS 21/ Cashion, A., Cieslewski, G., Foris, A., Su, J., Schwellenbach, D., Bonal, N.: Muon Tracker with Unsegmented Plastic Scintillator Panels. The Journal of Science and Medicine, Bd. 3, Nr. 2, DOI 10.37714/josam.v3i2.68, 2021.
- /CERN 26/ CERN: Benchmarks. Erreichbar unter <https://geant4-internal.web.cern.ch/node/305>, Stand von 2026.
- /CHO 18/ Choi, S., Cho, H., Lissenden, C. J.: Nondestructive inspection of spent nuclear fuel storage canisters using shear horizontal guided waves. Nuclear Engineering and Technology, Bd. 50, Nr. 6, S. 890–898, DOI 10.1016/j.net.2018.04.011, 2018.
- /CLA 22/ Clarkson, A., Gardner, S., Ireland, D., Jebali, R., Kaiser, R., Mahon, D., Ryan, M., Shearer, C., Yang, G.: Muon Imaging Applications for Nuclear Waste Management and Decommissioning. Journal of Advanced Instrumentation in Science, Bd. 2022, DOI 10.31526/jais.2022.256, 2022.
- /COH 88/ Cohen, J.: Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. 2. Aufl., ISBN 0-8058-0283-5, Lawrence Erlbaum Associates, 1988.
- /DEC 14/ Declercq, N. F.: Experimental study of ultrasonic beam sectors for energy conversion into Lamb waves and Rayleigh waves. Ultrasonics, Bd. 54, Nr. 2, S. 609–613, DOI 10.1016/j.ultras.2013.08.016, 2014.

- /DEC 26/ Decision Sciences: Our Product, The next generation of non-intrusive inspection. Erreichbar unter <https://www.decisionsciences.com/products-solutions/>, abgerufen am 20. Februar 2026.
- /DOB 18/ Dobrowolska, M., Velthuis, J., Frazão, L., Kikoła, D.: A novel technique for finding gas bubbles in the nuclear waste containers using Muon Scattering Tomography. Journal of Instrumentation, Bd. 13, Nr. 05, S. P05015-P05015, DOI 10.1088/1748-0221/13/05/P05015, 2018.
- /DUR 18/ Durham, J. M., Poulson, D., Bacon, J., Chichester, D. L., Guardincerri, E., Morris, C. L., Plaud-Ramos, K., Schwendiman, W., Tolman, J. D., Winston, P.: Verification of Spent Nuclear Fuel in Sealed Dry Storage Casks via Measurements of Cosmic-Ray Muon Scattering. Physical Review Applied, Bd. 9, Nr. 4, S. 44013, DOI 10.1103/PhysRevApplied.9.044013, 2018.
- /EDW 25/ Edwards, S.: Recent Inspection Results from McGuire, Oconee, and Robinson. Präsentation, Duke Energy, EPRI-ESCP Winter Meeting, 29. Oktober 2025.
- /EPRI 16/ Electric Power Research Institute: Dry Canister Storage System Inspection and Robotic Delivery System Development. 13. Mai 2016.
- /EPRI 17a/ Electric Power Research Institute: Guidelines for the Use of Acoustic Emission and Passive Ultrasonic Techniques. Stand vom 16. Oktober 2023, erreichbar unter <https://www.epri.com/research/products/000000003002009935>, abgerufen am 24. Oktober 2023.
- /EPRI 17b/ Electric Power Research Institute: Inspection and Delivery System Development and Field Trials for Dry Canister Storage System Evaluation. 28. November 2017.
- /EPRI 17c/ Electric Power Research Institute: Extended Storage Collaboration Program (ESCP): Nondestructive Evaluation Subcommittee – Industry Progress Report. 18. Oktober 2017.
- /EPRI 19/ Electric Power Research Institute: Dry Storage System Inspection: Visual, Thermal, and Radiation Dose Measurements. 26. September 2019.

- /ESK 23a/ Entsorgungskommission: Verlängerte Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und sonstiger hochradioaktiver Abfälle in Abhängigkeit von der Auswahl des Endlagerstandortes, Positionspapier. 21 S., 23. März 2023.
- /ESK 23b/ Entsorgungskommission: Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern, Empfehlung der Entsorgungskommission. 37 S., 7. September 2023.
- /EVI 23/ Evident: Ultraschallprüfung – Allgemeine Fragen. Stand vom 24. Oktober 2023, erreichbar unter <https://www.olympus-ims.com/de/ultrasonic-testing-faqs/>, abgerufen am 24. Oktober 2023.
- /FRA 16/ Frazão, L., Velthuis, J., Thomay, C., Steer, C.: Discrimination of high-Z materials in concrete-filled containers using muon scattering tomography. *Journal of Instrumentation*, Bd. 11, Nr. 07, S. P07020-P07020, DOI 10.1088/1748-0221/11/07/P07020, 2016.
- /FUJ 13/ Fujii, H., Hara, K., Hashimoto, S., Ito, F., Kakuno, H., Kim, S. H., Kochiyama, M., Nagamine, K., Suzuki, A., Takada, Y., Takahashi, Y., Takasaki, F., Yamashita, S.: Performance of a remotely located muon radiography system to identify the inner structure of a nuclear plant. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, Bd. 2013, Nr. 7, DOI 10.1093/ptep/ptt046, 2013.
- /GAR 11/ García-Martín, J., Gómez-Gil, J., Vázquez-Sánchez, E.: Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors*, Bd. 11, Nr. 3, S. 2525–2565, DOI 10.3390/s110302525, 2011.
- /GAV 12/ Gavrilov, P. M., Kravchenko, V. A., Gamza, J. V., Barakov, B. N., Il'inykh, J. S.: Tight case for storage of ampoules with bundles of spent fuel elements. Hrsg.: Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatie "GORNO-KhIMICHESKIJ KOMBINAT", 4. Juni 2012.
- /GEA 26/ Geant4: Physics Validation Working Group. Erreichbar unter https://www.geant4.org/collaboration/working_groups/physval-wg/, abgerufen am 22. Mai 2026.

- /GIL 72/ Gilbert, P.: Iterative methods for the three-dimensional reconstruction of an object from projections. *Journal of theoretical biology*, Bd. 36, Nr. 1, S. 105–117, DOI 10.1016/0022-5193(72)90180-4, 1972.
- /GIO 96/ Giomataris, Y., Rebougeard, P., Robert, J. P., Charpak, G.: MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Bd. 376, Nr. 1, S. 29–35, DOI 10.1016/0168-9002(96)00175-1, 1996.
- /GLE 04/ Gleaton, D.: Infrared Thermography in High Level Waste. Präsentation, Infrared Thermography in High Level Waste, 24. August 2004.
- /GNS 23a/ GNS: Produktinfo CASTOR® V/19. Oktober 2023.
- /GNS 23b/ GNS: Produktinfo CASTOR® HAW28M. Stand vom 19. Oktober 2023, erreichbar unter , abgerufen am 19. Oktober 2023.
- /GRO 01/ Groom, D., Mokhov, N. V., Striganov, S. I.: Muon Stopping Power and Range Tables 10 MeV-100 TeV. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, Bd. 78, Nr. 2, S. 183–356, DOI 10.1006/adnd.2001.0861, 2001.
- /GRS 20/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Untersuchungen zur Rückführung radioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung, Abschlussbericht zu AP 6. GRS, Nr. 606, September 2020.
- /GRS 24/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik bei der Sicherheit der Behandlung bestrahlter Brennelemente, Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle und radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, Teilbericht zum AP 1.6 Methodenbewertung zerstörungsfreier Prüfmethoden. GRS, Nr. 716, Januar 2024.

- /GUA 15/ Guardincerri, E., Bacon, J., Borozdin, K., Durham, M. J., Fabritius II, J., Hecht, A., Milner, E. C., Miyadera, H., Morris, C. L., Perry, J., Poulson, D.: Detecting special nuclear material using muon-induced neutron emission. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Bd. 789, S. 109–113, DOI 10.1016/j.nima.2015.03.070, 2015.
- /HAN 14/ Hanazato, T., Tanaka, H., Kusagaya, T., Okamoto, Y.: Muon radiography Monitoring for Structural Survey of the Prambanan World Heritage Temple. Präsentation, Japan Geoscience Union Meeting 2014, 28. April 2014.
- /HAR 20/ Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M. H., et al.: Array programming with NumPy. Nature, Bd. 585, Nr. 7825, S. 357–362, DOI 10.1038/s41586-020-2649-2, 2020.
- /HOG 25/ Hogan, D.: Results from the Palo Verde and Connecticut Yankee Aging Management Inspections. Präsentation, NAC International, EPRI-ESCP Winter Meeting, 29. Oktober 2025.
- /HON 20/ Honarvar, F., Varvani-Farahani, A.: A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control. Ultrasonics, Bd. 108, S. 106227, DOI 10.1016/j.ultras.2020.106227, 2020.
- /HOS 19/ Taheri, H., Hassen, A. A.: Nondestructive Ultrasonic Inspection of Composite Materials: A Comparative Advantage of Phased Array Ultrasonic. Applied Sciences, Bd. 9, Nr. 8, S. 1628, 19. April 2019.
- /IAEA 22/ IAEA International Atomic Energy Agency: Muon Imaging. TECDOC Series, 13. Oktober 2022.

- /IAEA 25/ International Atomic Energy Agency: Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material. IAEA Safety Standards, SSR-6 (Rev. 2), 2025.
- /ICRP 96/ International Commission on Radiological Protection: Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication, Nr. 74, 1996.
- /JEN 26/ Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen: Zwischenlagerung in Jülich. Erreichbar unter <https://www.jen-juelich.de/projekte/zwischenlagerung>, abgerufen am Januar 2026.
- /KAC 37/ Kaczmarz, S.: Przybliżone rozwiązywanie układów równań liniowych. – Angenäherte Auflösung von Systemen linearer Gleichungen. Bulletin International de l'Académie Polonaise des Sciences et des Lettres. Classe des Sciences Mathématiques et Naturelles. Série A, Sciences Mathématiques, S. 355–357, 1937.
- /KER 15/ Chollet, F., et al.: Keras. 2015.
- /KIM 15/ Kim, Y. Y., Kwon, Y. E.: Review of magnetostrictive patch transducers and applications in ultrasonic nondestructive testing of waveguides. Ultrasonics, Bd. 62, S. 3–19, DOI 10.1016/j.ultras.2015.05.015, 2015.
- /KIM 19/ Kim, W. J., Park, J. H., Chung, H. J., Kim, K. P.: Evaluation of Neutron Flux of a PWR Dry Storage Cask. Präsentation, PATRAM, 2019.
- /KO 14/ Ko, J.-H., Park, J.-H., Jung, I.-S., Lee, G.-U., Baeg, C.-Y., Kim, T.-M.: Shielding Analysis of Dual Purpose Casks for Spent Nuclear Fuel under Normal Storage Conditions. Nuclear Engineering and Technology, Bd. 46, Nr. 4, S. 547–556, DOI 10.5516/NET.08.2013.039, 2014.
- /KUN 12/ Kunerth, D. C., McJunkin, T., McKay, M., Bakhtiari, S.: Inspection of Used Fuel Dry Storage Casks. Idaho National Lab, INL/EXT-12-27119, DOI 10.2172/1056020, 2012.

- /KWO 01/ Kwon, J.-R., Lyu, G.-J., Lee, T.-H., Kim, J.-Y.: Acoustic emission testing of repaired storage tank. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Bd. 78, Nr. 5, S. 373–378, DOI 10.1016/S0308-0161(01)00038-2, 2001.
- /LA 17/ La Mura, M., Lamberti, N. A., Mauti, B. L., Caliano, G., Savoia, A. S.: Acoustic reflectivity minimization in Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers (CMUTs). *Ultrasonics*, Bd. 73, S. 130–139, DOI 10.1016/j.ultras.2016.09.001, 2017.
- /LAF 19/ Lafebre, S.: Graph of cosmic flux versus particle energy. 8. Januar 2019.
- /LEE 06/ Lee, J.-H., Lee, M.-R., Kim, J.-T., Luk, V., Jung, Y.-H.: A study of the characteristics of the acoustic emission signals for condition monitoring of check valves in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*, Bd. 236, Nr. 13, S. 1411–1421, DOI 10.1016/j.nucengdes.2006.01.007, 2006.
- /LEF 23/ Lefevre, B., Gomez, H., Procureur, S., Attié, D., Gallego, L., Gonzales, P., Lehuraux, M., Lesage, B., Mandjavidze, I., Mas, P., Pomarede, D.: 3D imaging of a nuclear reactor using muography measurements with Micromegas detectors. *EPJ Web of Conferences*, Bd. 288, S. 7001, DOI 10.1051/epjconf/202328807001, 2023.
- /LEF 24/ Lefevre, B., Attié, D., Bajou, R., Gomez, H.: 2D and 3D analysis improvements with machine learning for muography applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Bd. 1068, S. 169755, DOI 10.1016/j.nima.2024.169755, 2024.
- /LIM 22/ Lim, K. T., Kim, S., Kim, M., Moon, J., Kim, G., Chung, H.: The Feasibility of Passive Neutron Measurement for Dry Storage Safeguards Approach. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Nr. 69, S. 1331–1335, DOI 10.1109/TNS.2022.3149322, 2022.
- /LIM 23/ Lim, L. X. J., Qiu, Z.: μ -Net: ConvNext-Based U-Nets for Cosmic Muon Tomography. *ArXiv* 2312.17265, 2023.

- /LIT 20/ Littmann, F., Capineri, L., Rettori, L.: Ultrasonic investigation system for the integrity verification of the threads used to bolt lids on casks for nuclear spent fuel. 2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2020.
- /LIU 22/ Liu, Z., Fang, M., George, J., Meng, L.-J., Di Fulvio, A.: Neutron Tomography of Spent Fuel Casks. *Journal of Signal Processing Systems*, Bd. 94, Nr. 4, S. 399–409, DOI 10.1007/s11265-021-01706-7, 2022.
- /LIU 23/ Liu, G., Luo, X., Tian, H., Yao, K., Niu, F., Jin, L., Gao, J., Rong, J., Fu, Z., Kang, Y., Fu, Y., Wu, C., Gao, H., Gong, J., et al.: High-precision muography in archaeogeophysics: A case study on Xi'an defensive walls. *Journal of Applied Physics*, Bd. 133, Nr. 1, DOI 10.1063/5.0123337, 2023.
- /LOH 85/ Lohmann, W., Kopp, R., Voss, R.: Energy Loss of Muons in the Energy Range 1-10000 GeV. CERN Yellow Reports: Monographs, 1985.
- /LOP 20/ Lo Presti, D., Riggi, F., Ferlito, C., Bonanno, D. L., Bonanno, G., Gallo, G., La Rocca, P., Reito, S., Romeo, G.: Muographic monitoring of the volcano-tectonic evolution of Mount Etna. *Scientific reports*, Bd. 10, Nr. 1, S. 11351, DOI 10.1038/s41598-020-68435-y, 2020.
- /MAD 05/ Madruga, F. J., González, D. A., Mirapeix, J. M., López Higuera, J. M.: Application of infrared thermography to the fabrication process of nuclear fuel containers. *NDT & E International*, Bd. 38, Nr. 5, S. 397–401, DOI 10.1016/j.ndteint.2004.11.002, 2005.
- /MAH 18/ Mahon, D., Clarkson, A., Gardner, S., Ireland, D., Jebali, R., Kaiser, R., Ryan, M., Shearer, C., Yang, G.: First-of-a-kind muography for nuclear waste characterization. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, Bd. 377, Nr. 2137, DOI 10.1098/rsta.2018.0048, 2018.
- /MAR 24/ Martinelli, L.: ATLAS New Small Wheel performance studies after first year of operation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Bd. 1063, S. 169290, DOI 10.1016/j.nima.2024.169290, 2024.

- /MAS 13/ Mashnik, S. G., Bull, J. S., Hughes, H. G., Prael, R. E., Sierk, A. J.: Current status of MCNP6 as a simulation tool useful for space and accelerator applications. AIP Conference Proceedings, Nr. 1560, S. 706–708, DOI 10.1063/1.4826878, 2013.
- /MAU 25/ Mauskar, K.: Aging Management Inspections of Dry Shielded Canisters (DSCs) & Horizontal Storage Modules (HSMs) – Orano Experience 2025 Update. Präsentation, orano, EPRI-ESCP Winter Meeting, 29. Oktober 2025.
- /MEY 13/ Meyer, R. M., Pardini, A. F., Hanson, B. D., Sorenson, K. B.: Review of NDE Methods for Detection and Monitoring of Atmospheric SCC in Welded Canisters for the Storage of Used Nuclear Fuel. Pacific Northwest National Lab., PNNL-22158, DOI 10.2172/1183636, 2013.
- /MEY 16/ Meyer, R. M., Suffield, S. R., Hirt, E. H., Suter, J. D., Lareau, J. P., Zhuge, J. W., Qiao, H., Moran, T. L., Ramuhalli, P.: Nondestructive Examination Guidance for Dry Storage Casks. Pacific Northwest National Lab., PNNL-24412 Rev. 1, DOI 10.2172/1333454, 2016.
- /MIL 20/ Miller, C. A., Geddes, C. G., Ludewigt, B. A., Clarke, S. D., Pozzi, S. A.: Verification of dry storage cask loading using monoenergetic photon sources. Annals of Nuclear Energy, Bd. 137, S. 107091, DOI 10.1016/j.anucene.2019.107091, 2020.
- /MON 20/ Monchalín, J.-P.: Laser-Ultrasonics: Principles And Industrial Applications. E-Journal of Nondestructive Testing, Bd. 25, Nr. 03, 2020.
- /MRO 25/ Mroz, S.: Recent Inspection Results from Davis Besse. Präsentation, Vis-tra, EPRI-ESCP Winter Meeting, 29. Oktober 2025.
- /NAG 05/ Nagamie, K., Tanaka, H. K. M., NAKAMURA, S. N., ISHIDA, K., HASHIMOTO, M., SHINOTAKE, A., NAITO, M., HATANAKA, A.: Probing the inner structure of blast furnaces by cosmic-ray muon radiography. Proceedings of the Japan Academy, Series B, Bd. 81, Nr. 7, S. 257–260, DOI 10.2183/pjab.81.257, 2005.

- /NAV 24/ Navas, S., Amsler, C., Gutsche, T., Hanhart, C., Hernández-Rey, J. J., Lourenço, C., Masoni, A., Mikhasenko, M., Mitchell, R. E., Patrignani, C., Schwanda, C., Spanier, S., Venanzoni, G., Yuan, C. Z., et al.: Review of Particle Physics. *Physical Review D*, Bd. 110, Nr. 3, DOI 10.1103/PhysRevD.110.030001, 2024.
- /NIE 25a/ Niedermeier, J., Bae, J., Stuke, M.: Threshold Analysis of Modelling and Measurement Accuracies in Muon Scattering Tomography. *Transactions of the American Nuclear Society*, Nr. 132, DOI 10.13182/T140-48642, 2025.
- /NIE 25b/ Niedermeier, J., Stuke, M.: Multiple-scattering muography of a thick-walled spent-fuel cask: A high-statistics Geant4 simulation. *Journal of Applied Physics*, Bd. 138, Nr. 23, DOI 10.1063/5.0288368, 2025.
- /NIE 25c/ Niedermeier, J., Stuke, M.: Impact of Modeling Assumptions on Muon Scattering Images of Loaded Dry Storage Casks. *Nuclear Science and Engineering*, Bd. 199, sup1, DOI 10.1080/00295639.2024.2340142, 2025.
- /NIS 17/ Nishiyama, R., Ariga, A., Ariga, T., Käser, S., Lechmann, A., Mair, D., Scampoli, P., Vladymyrov, M., Ereditato, A., Schlunegger, F.: First measurement of ice-bedrock interface of alpine glaciers by cosmic muon radiography. *Geophysical Research Letters*, Bd. 44, Nr. 12, S. 6244–6251, DOI 10.1002/2017GL073599, 2017.
- /NIST 10/ National Institute of Standards and Technology: XCOM-Photon Cross Sections Database, NIST Standard Reference Database 8. DOI 10.18434/T48G6X, Stand von 2010, erreichbar unter <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>, 2010.
- /OLÁ 22/ Oláh, L., Tanaka, H. K. M.: Muography: Exploring Earth's Subsurface with Elementary Particles, Machine Learning with Muographic Images as Input. *Geophysical Monograph Series*, ISBN 9781119723028, DOI 10.1002/9781119722748.ch4, 2022.
- /OLI 21/ Olisa, S. C., Khan, M. A., Starr, A.: Review of Current Guided Wave Ultrasonic Testing (GWUT) Limitations and Future Directions. *Sensors*, Bd. 21, Nr. 3, S. 811, DOI 10.3390/s21030811, 2021.

- /PÉR 18/ Pérot, B., Jallu, F., Passard, C., Gueton, O., Allinei, P.-G., Loubet, L., Estre, N., Simon, E., Carasco, C., Roure, C., Boucher, L., Lamotte, H., Comte, J., Bertaux, M., et al.: The characterization of radioactive waste: a critical review of techniques implemented or under development at CEA, France. EPJ Nuclear Sciences & Technologies, Bd. 4, S. 3, DOI 10.1051/epjn/2017033, 2018.
- /PEZ 25/ Pezzotti, L., Antonioli, G., Cifarelli, D., Corradetti, D., Costa, J. P., Galante, L., Gallerati, A., Gallo, M., Gnesi, I., Gabrielli, G., Jouve, A., Marcucci, N., Marrani, A.: Three-dimensional cosmic muon tomography reconstruction of reinforced concrete using Geant4 simulations and machine learning event reduction. Journal of Instrumentation, Bd. 20, Nr. 09, S. P09038, DOI 10.1088/1748-0221/20/09/P09038, 2025.
- /PIA 18/ Piatek, S.: Silicon photomultipliers (SiPMs): Operation, performance, and possible applications. Hrsg.: Hamamatsu Photonics, Stand vom 22. März 2024, erreichbar unter <https://www.hamamatsu.com/eu/en/resources/webinars/detectors/sipm-operation-performance.html>, abgerufen am 22. März 2024.
- /POU 17/ Poulson, D., Durham, J. M., Guardincerri, E., Morris, C. L., Bacon, J. D., Plaud-Ramos, K., Morley, D., Hecht, A. A.: 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, S. 48–53, DOI 10.1016/j.nima.2016.10.040, 2017.
- /PRO 23/ Procureur, S., Attié, D., Gallego, L., Gomez, H., Gonzales, P., Lefèvre, B., Lehuraux, M., Lesage, B., Mandjavidze, I., Mas, P., Pomarède, D.: 3D imaging of a nuclear reactor using muography measurements. Science advances, Bd. 9, Nr. 5, S. Eabq8431, DOI 10.1126/sciadv.abq8431, 2023.
- /RAC 20/ Rachamin, R., Hampel, U.: 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, S. 106975, DOI 10.1016/j.anucene.2019.106975, 2020.

- /RAM 10/ Ramanaviciene, A., Virzonis, D., Vanagas, G., Ramanavicius, A.: Capacitive micromachined ultrasound transducer (cMUT) for immunosensor design. *Analyst*, Bd. 135, Nr. 7, S. 1531–1534, DOI 10.1039/C0AN00104J, 2010.
- /ROS 00/ Rose, J. L., Nagy, P. B.: *Ultrasonic Waves in Solid Media*. The Journal of the Acoustical Society of America, Bd. 107, Nr. 4, S. 1807–1808, DOI 10.1121/1.428552, 2000.
- /SAG 23/ Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hoch-radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG) in der Fassung vom 22. März 2023, zuletzt geändert 22. März 2023.
- /SAL 15/ Salchak, Y., Bulavinov, A., Pinchuk, R., Lider, A., Bolotina, I., Sednev, D.: Dry Storage Casks Monitoring by Means of Ultrasonic Tomography. *Physics Procedia*, Bd. 70, S. 484–487, DOI 10.1016/j.phpro.2015.08.291, 2015.
- /SCA 23/ Scampoli, P., Ariga, A. (Hrsg.): *Cosmic Ray Muography*. ISBN 978-981-126-490-0, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2023.
- /SCH 04/ Schultz, L. J., Borozdin, K. N., Gomez, J. J., Hogan, G. E., McGill, J. A., Morris, C. L., Priedhorsky, W. C., Saunders, A., Teasdale, M. E.: 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*, Bd. 519, Nr. 3, S. 687–694, DOI 10.1016/j.nima.2003.11.035, 2004.
- /SCH 07/ Schultz, L. J., Blanpied, G. S., Borozdin, K. N., Fraser, Andrew M., Hengartner, Nicolas W., Klimenko, A. V., Morris, C. L., Orum, C., Sossong, M. J.: Statistical Reconstruction for Cosmic Ray Muon Tomography. *IEEE Transactions on Image Processing*, Nr. 16, DOI 10.1109/TIP.2007.901239, August 2007.
- /SCH 18/ Schouten, D., Ledru, P.: Muon Tomography Applied to a Dense Uranium Deposit at the McArthur River Mine. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Bd. 123, Nr. 10, S. 8637–8652, DOI 10.1029/2018JB015626, 2018.

- /SED 15/ Sednev, D., Lider, A., Demyanuk, D., Kroening, M., Salchak, Y.: Ultrasonic Fingerprinting of Structural Materials: Spent Nuclear Fuel Containers Case-Study. *Physics Procedia*, Bd. 70, S. 505–509, DOI 10.1016/j.phpro.2015.08.296, 2015.
- /SEI 24/ Lisa Seidel: Zeitliche Gesamtbetrachtung des Standortauswahlverfahrens – Abschätzung der BGE aus 2022. Präsentation, 3. Forum Endlagersuche - AG 6, 23. November 2024.
- /SSV 24/ Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) (StrlSchV) zuletzt geändert 23. Oktober 2024 (BGBl. I Nr. 324).
- /STE 07/ Stepinski, T.: Synthetic Aperture Focusing Technique in Ultrasonic Inspection of Coarse Grained Materials. Schweden, 15. Dezember 2007.
- /TAN 09/ Tanaka, H. K. M., Uchida, T., Tanaka, M., Takeo, M., Oikawa, J., Ohminato, T., Aoki, Y., Koyama, E., Tsuji, H.: Detecting a mass change inside a volcano by cosmic-ray muon radiography (muography): First results from measurements at Asama volcano, Japan. *Geophysical Research Letters*, Bd. 36, Nr. 17, DOI 10.1029/2009GL039448, 2009.
- /TAN 20/ Tanaka, H. K. M., Sumiya, K., Oláh, L.: Muography as a new tool to study the historic earthquakes recorded in ancient burial mounds. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, Bd. 9, Nr. 2, S. 357–364, DOI 10.5194/gi-9-357-2020, 2020.
- /TAN 23/ Tanaka, H. K. M., Bozza, C., Bross, A., Cantoni, E., Catalano, O., Cerretto, G., Giammanco, A., Gluyas, J., Gnesi, I., Holma, M., Kin, T., Roche, I. L., Leone, G., Liu, Z., et al.: Muography. *Nature Reviews Methods Primers*, Bd. 3, Nr. 1, DOI 10.1038/s43586-023-00270-7, 2023.
- /TEN 15/ Abadi, M., Agarwal, A., Barham, P., Brevdo, E., Chen, Z., Citro, C., Corrado, G. S., Davis, A., Dean, J., Devin, M., Ghemawat, S., Goodfellow, I., Harp, A., Irving, G., et al.: TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems. DOI 10.5281/zenodo.4724125, 2015.

- /THO 19/ Thon, A., Bélanger, P.: EMAT design for minimum remnant thickness gauging using high order shear horizontal modes. *Ultrasonics*, Bd. 95, S. 70–78, DOI 10.1016/j.ultras.2019.03.006, 2019.
- /TIA 98/ Tian, G. Y., Zhao, Z. X., Baines, R. W.: The research of inhomogeneity in eddy current sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, Bd. 69, Nr. 2, S. 148–151, DOI 10.1016/S0924-4247(98)00085-5, 1998.
- /TIO 19/ Tioukov, V., Alexandrov, A., Bozza, C., Consiglio, L., D'Ambrosio, N., Lellis, G. de, Sio, C. de, Giudicepietro, F., Macedonio, G., Miyamoto, S., Nishiyama, R., Orazi, M., Peluso, R., Sheshukov, A., et al.: First muography of Stromboli volcano. *Scientific Reports*, Bd. 9, Nr. 1, S. 6695, DOI 10.1038/s41598-019-43131-8, 2019.
- /UGH 24/ Ughade, R. S., Chatzidakis, S.: On-the-fly 3D muon path estimation algorithm for muon imaging applications | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. Stand vom 24. April 2024, erreichbar unter , abgerufen am 24. April 2024.
- /WAG 20/ Wagner, M., Reinicke, S., Kratzsch, A., Hampel, U.: 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*, Bd. 366, S. 110749, DOI 10.1016/j.nuceng-des.2020.110749, 2020.
- /WAG 25/ Wagner, M., Eisenhofer, S., Bieberle, A., Hampel, U.: Algebraic image reconstruction for muon scattering computed tomography without tracing. *Journal of Applied Physics*, Bd. 138, Nr. 1, DOI 10.1063/5.0273571, 2025.
- /WAG 26/ Wagner, M., Turko, J., Eisenhofer, S., Wojciechowski, P., Eyßle, S., Reinicke, S., Fiß, D., Kratzsch, A., Hampel, U.: RIMANUS and DCS-MONITOR III: Recent developments in non-invasive monitoring of transport and storage casks. Präsentation, SEDS Workshop 2026, 2026.

- /WAN 20/ Wang, B., Zhong, S., Lee, T.-L., Fancey, K. S., Mi, J.: Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review. *Advances in Mechanical Engineering*, Bd. 12, Nr. 4, S. 168781402091376, DOI 10.1177/1687814020913761, 2020.
- /WAN 25/ Wang, Y., Liu, S., Yao, Z., Liu, Y., Zhang, Z., He, Z., Pan, Z., Feng, C.: A mobile high spatial-resolution muography instrument based on large-area Micromegas detectors. *Journal of Applied Physics*, Bd. 138, Nr. 17, DOI 10.1063/5.0288077, 2025.
- /WAN 26/ Wang, H.-C., Zhang, Z., Yu, P., Bao, Y.-X., Zhai, J.-J., Xu, Y., Deng, L., Xiao, S., Zhang, X.-H., Yu, Y.-H., He, W.-B., Chen, L.-W., Zhang, Y., Yang, L., Sun, Z.-Y.: Transfer learning empowers material Z classification with muon tomography. *Nuclear Science and Techniques*, Bd. 37, Nr. 5, DOI 10.1007/s41365-026-01901-w, 2026.
- /XIA 23/ Xiang, D., Gong, X., Velicheti, D., Lami, P., Wang, Y., Whiteman, M., Sung, M. K., Uluutku, B., Harwood, A.: A Non-Contact, Intelligent Sensor Network System for Long-Term Health Monitoring of Spent Nuclear Fuel Dry-Storage Canisters and Fuel Assemblies. Präsentation, EPRI Extended Storage Collaboration Program (ESCP) Meeting - Fall 2023, 26. Oktober 2023.
- /YOO 25/ Yoon, B.: NDE Capability Demonstration for Dry Storage System Welded Canister. Präsentation, EPRI - Electric Power Research Institute, EPRI-ESCP Winter Meeting, 29. Oktober 2025.
- /ZHU 11/ Zhu, Y.-K., Tian, G.-Y., Lu, R.-S., Zhang, H.: A review of optical NDT technologies. *Sensors*, Bd. 11, Nr. 8, S. 7773–7798, DOI 10.3390/s110807773, 2011.
- /ZHU 25/ Zhuang, B., Arcaro, A., Gencturk, B., Meyer, R., Oberai, A., Sinkov, A., Good, M.: Non-destructive evaluation and machine learning methods for inspection of spent nuclear fuel canisters: A state-of-the-art review. *Progress in Nuclear Energy*, Bd. 185, S. 105697, DOI 10.1016/j.pnucene.2025.105697, 2025.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Nationale Regelwerkspyramide	7
Abb. 2.2	Schematische Darstellung der Wirbelstromprüfung	16
Abb. 2.3	Schematische Darstellung des Schallemissionsdetektionsprinzips	18
Abb. 2.4	Schematische Darstellung der Ultraschalluntersuchung	20
Abb. 2.5	Schematische Darstellung der Ultraschallprüfung mit Gruppenstrahlertechnik in einer linearen Anordnung	21
Abb. 2.6	Laser-Ultraschall und konventionelle Ultraschallprüfung im Vergleich /MON 20/	23
Abb. 2.7	Skizze einer Röntgentomographischen Messung	26
Abb. 3.1	Teilchenfluss der kosmischen Strahlung (CC 3.0) /LAF 19/	40
Abb. 3.2	Funktionsprinzip eines Myonenspektrometers mit Hilfe mehrerer Cherenkov-Strahler (CC 4.0) /BAE 22/	53
Abb. 3.3	Darstellung der relevanten Richtungs- und Positionsparameter	54
Abb. 3.4	Illustration wesentlicher Parameter für das MLSD-EM Verfahren (Rekonstruktionen von /SCH 07/)	59
Abb. 3.5	Dichteprofil für einen Teil des Vulkans Stromboli in Italien (Quelle: /TIO 19/, CC 4.0 International)	64
Abb. 3.6	Schnittbild des G2 Reaktors in Frankreich /PRO 23/ (CC4.0 Lizenz)	65
Abb. 3.7	Aufbau einer Myonen-tomographischen Testmessung an einem 500- Liter-Fass in Sellafield /CLA 22/ (CC 4.0 Lizenz)	68
Abb. 3.8	Detektorsetup für die Feldmessungen in Grafenrheinfeld im Rahmen des MUTOMCA Vorhabens (CC4.0) /AND 25/	71
Abb. 3.9	Simulationsergebnisse für einen TLB für bis zu 24 Brennelemente zum Vergleich des PoCA- und des MMST-Algorithmus (CC 4.0) /BAE 24/	73
Abb. 3.10	Rekonstruierte Projektionsbilder auf Basis der Rekonstruktionsverfahren von Liu und Wagner für ein virtuelles Phantom (CC 4.0) /WAG 25/	74
Abb. 4.1	Visualisierung des realitätsnahen Behälters für bis zu 28 Kokillen in Anlehnung an den CASTOR® HAW 28M	91

Abb. 4.2	Explosionsbild des generischen Behälters für 28 Kokillen, des Tragkorbs und einer Kokille	93
Abb. 4.3	Betrachtete Kokillen und Füllmaterialien	95
Abb. 4.4	Draufsicht auf den generischen Behälter für verglaste radioaktive Abfälle zur Illustration der Lage der Kokillen in der (x, y) -Ebene sowie des gewählten Koordinatensystems.....	96
Abb. 4.5	Projektionsbilder in der (y, z) -Ebene für drei Inventarkonfigurationen für mono-direktionale Myonen (x -Achse) mit einer Energie von 1 GeV	98
Abb. 4.6	Projektionsbilder in der (y, z) -Ebene für drei Inventarkonfigurationen für mono-direktionale Myonen (x -Achse) mit einer Energie von 5 GeV	98
Abb. 4.7	Projektionsbilder in der (y, z) -Ebene für drei Inventarkonfigurationen für mono-direktionale Myonen (x -Achse) mit einer Energie von 10 GeV	99
Abb. 4.8	Vergleich der Referenzgeometrie mit der Vergleichsgeometrie I auf Basis des Differenzbilds (oben) und des KST (unten) für drei unterschiedliche Myonenenergien (von links nach rechts)	100
Abb. 4.9	Vergleich der Referenzgeometrie mit der Vergleichsgeometrie II auf Basis des Differenzbilds (oben) und des KST (unten) für drei unterschiedliche Myonenenergien (von links nach rechts)	101
Abb. 4.10	Illustration der Position der abweichenden Kokille (ID 12, rot) im Gebinde und der betrachteten Beleuchtungsachsen.....	102
Abb. 4.11	KST-Plots der Referenzgeometrie und einer abweichenden Geometrie (partielle Füllung der Kokille mit ID 12) in Abhängigkeit der Belichtungsachse und der Myonenenergie	103
Abb. 4.12	KST-Plots zum Vergleich der Referenzgeometrie mit abweichenden Geometrien (partielle Füllung der Kokille mit ID 5 (oben), ID 12, ID 19 und ID 26 (unten)) für Myonenenergien von 5 GeV (links) und 10 GeV (rechts)	105
Abb. 4.13	KST für eine partielle gefüllte Kokille sowohl mit (oben) als auch ohne (unten) Restverfüllung in Abhängigkeit unterschiedlicher Blickachsen für Myonen mit 5 GeV	106
Abb. 4.14	KST für eine partielle gefüllte Kokille sowohl mit (oben) als auch ohne (unten) Restverfüllung in Abhängigkeit unterschiedlicher Blickachsen für Myonen mit 10 GeV	107

Abb. 4.15	Illustration der Relevanz des Startwerts für den Vergleich von Projektionsbildern	109
Abb. 4.16	Visualisierung des generischen Behälters in Anlehnung an den CASTOR® V/19.....	112
Abb. 4.17	Explosionszeichnung des detaillierten Behältermodells in Anlehnung an den TLB CASTOR® V/19	114
Abb. 4.18	Vergleich von simulierten Medianwerten der Streuwinkel- und Energieverteilung für Myonen mit einer Energie von 3 GeV	116
Abb. 4.19	Vergleich von simulierten Medianwerten der Streuwinkel- und Energieverteilung für Myonen mit einer Energie von 5 GeV	117
Abb. 4.20	Vergleich der Streuwinkel- und Energieverlustverteilungen für zwei ausgewählte Pixel für Simulationen mit 3 GeV.....	118
Abb. 4.21	Vergleich der Streuwinkel- und Energieverlustverteilungen für zwei ausgewählte Pixel für Simulationen mit 5 GeV.....	118
Abb. 4.22	Explosionsbild des generischen Behältermodells.....	119
Abb. 4.23	Vergleich zwischen Simulationen mit Geant4 und FLUKA für das generische Behältermodell	120

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Übersicht über die in den Zwischenlagern eingelagerten Behältertypen (Stand: Ende 2025).....	6
Tab. 3.1	Beiträge zum Energieverlust dE/dx für verschiedene Initialenergien E im Targetmaterial Uran.....	42
Tab. 3.2	Übersicht wesentlicher Parameter unterschiedlicher Typen gasgefüllter Detektoren.....	51
Tab. 3.3	Empfindlichkeit unterschiedlicher Detektortypen für Gamma- und Neutronenstrahlung	86
Tab. 4.1	Angenommene Materialien für das generische Behältermodell für verglaste radioaktive Abfälle	94
Tab. 4.2	Informationen zu Materialien und Massen für die Einzelkomponenten des generischen Behälters für verglaste radioaktive Abfälle	94
Tab. 4.3	Angenommene Materialien für das generische Behältermodell für DWR-Brennelemente in Anlehnung an den CASTOR® V/19.....	113
Tab. 4.4	Informationen zu Materialien und Massen für die Einzelkomponenten des detaillierten Behältermodells für DWR-Brennelemente.....	113
Tab. 4.5	Informationen zu Materialien und Massen für die Einzelkomponenten des generischen DWR-Brennelements	114

Abkürzungsverzeichnis

ART	Algebraisches Rekonstruktionsverfahren (<i>Algebraic Reconstruction Technique</i>)
AtG	Atomgesetz
BGZ	BGZ Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH
BMUKN	Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BZG	Brennelemente-Zwischenlager Gorleben
CISCC	Chlorid-induzierte Spannungsrisskorrosion
CNN	<i>Convolutional Neural Network</i>
CRUD	<i>Chalk River Unidentified Deposits</i>
DCMS	Trockengekoppelte Magnetostruktur Scanning (<i>Dry-Coupled Magnetic Structure Scanning</i>)
DSC	<i>Dry-Shielded Canister</i>
DWR	Druckwasserreaktor
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
ESCP	<i>Extended Storage Collaboration Project</i>
ESK	Entsorgungskommission
EURATOM	Europäische Atomgemeinschaft
F&E	Forschung und Entwicklung
FBP	Gefilterte Rückprojektion (<i>Filtered Back Projection</i>)
GWPA	<i>Guided Wave Phased Array</i>
HSM	<i>Horizontal Storage Module</i>
HZDR	Helmholz-Zentrum Dresden-Rossendorf
ILW	Mittelradioaktive Abfälle (<i>Intermediate Level Waste</i>)
INFN	<i>Istituto Nazionale Di Fisica Nucleare</i>
IRT	Infrarot-Thermographie
KI	Künstliche Intelligenz
KST	Kolmogorov-Smirnov-Test
MCS	Mehrfach-Coulomb-Streuung (<i>Multiple-Coulomb Scattering</i>)
MLSD-EM	<i>Maximum Likelihood Scattering and Displacement Expectation Maximization</i>
MMST	<i>Momentum-informed Muon Scattering Tomography</i>
MUTOMCA	<i>MUon TOMography for CAsks</i>
MWPC	Mehrdraht Proportionalkammer (<i>Multi-Wire Proportional Chamber</i>)
NDT	<i>Non-destructive testing</i>

NRC	<i>Nuclear Regulatory Commission</i>
PAUT	Ultraschallprüfung mit Gruppenstrahlertechnik (<i>Phased Array Ultrasonic Testing</i>)
PMT	Photovervielfacherröhre (<i>Photomultiplier Tube</i>)
PoCA	<i>Pont-of-Closest Approach</i>
RAVIS	<i>Remote Air-slot Volumetric Inspection System</i>
REEVIS	<i>Robotic Remote Electro-Magnetic Acoustic Transducer Volumetric Inspection System</i>
RIO	<i>Region-of-Interest</i>
RPC	Widerstandsplattenkammer (<i>Resistive Plate Chamber</i>)
SAFT	<i>Synthetic Aperture Focussing Technique</i> Algorithmus
SART	<i>Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique</i>
SEDS	Safety of Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel
SIRT	<i>Simultaneous Iterative Reconstruction Technique</i>
SONGS	Kernkraftwerk San Onofre (<i>San Onofre Nuclear Generating Station</i>)
TLB	Transport- und Lagerbehälter
TSC	<i>Transportable Storage Canister</i>
UMS	<i>Universal Multipurpose Systems</i>
VCC	<i>Vertical Concrete Cask</i>
VSGS	<i>Volumetric Sidewall Guided Wave and Magnetostrictive Scanning System</i>
W&T	Wissenschaft und Technik
WKP	Wiederkehrende Prüfung
WRPS	<i>Washington River Protection Solutions</i>
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung
ZLN	Zwischenlager Nord

A Anhang A: Übersicht über die Behälterinventare einzelner Zwischenlager für hochradioaktive Abfälle und Brennelemente

Tab. A.1 Übersicht über die Behälterinventare einzelner Brennelemente (Stand: Ende 2025)

Quellen: Jülich /JEN 26/, Brunsbüttel/ /BASE 26/, sonst: /BGZ 26/

ZL	V/52	V/19	THTR/ AVR	MTR 2	Ila	Ic	HAW 20/28 CG	HAW 28M	440/84	440/84 mVK	KRB- MOX	KNK	TS 28 V	TN 85	TN 24 E	MOSAİK
Ahaus	3	3	305	18												
Gorleben		3			1	1	74	21				4	1	12		
Rubenow							5		61	1	3	4				
Jülich			152													
Biblis		102						6								138
Brokdorf		70														
Brunsbüttel	20															
Grafenrheinfeld		54														
Grohnde		73														
Gundremmingen	156															
Isar	43	26						7							19	
Krümmel	42															
Lingen		47								15						
Neckarwestheim		70													19	
Philippsburg	29	73						4								
Unterweser		40														
Summe	293	561	457	18	1	1	79	38	61	16	3	8	1	12	38	138

B Anhang B: Simulationsergebnisse für detailliertes Behältermodell für verglaste radioaktive Abfälle

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Simulationen für das detaillierte Modell eines TLB in Anlehnung an den CASTOR® HAW 28M graphisch dargestellt (vgl. Abschnitt 4.1).

B.1 Simulationsergebnisse für Kokille mit ID 5 ohne Restverfüllung

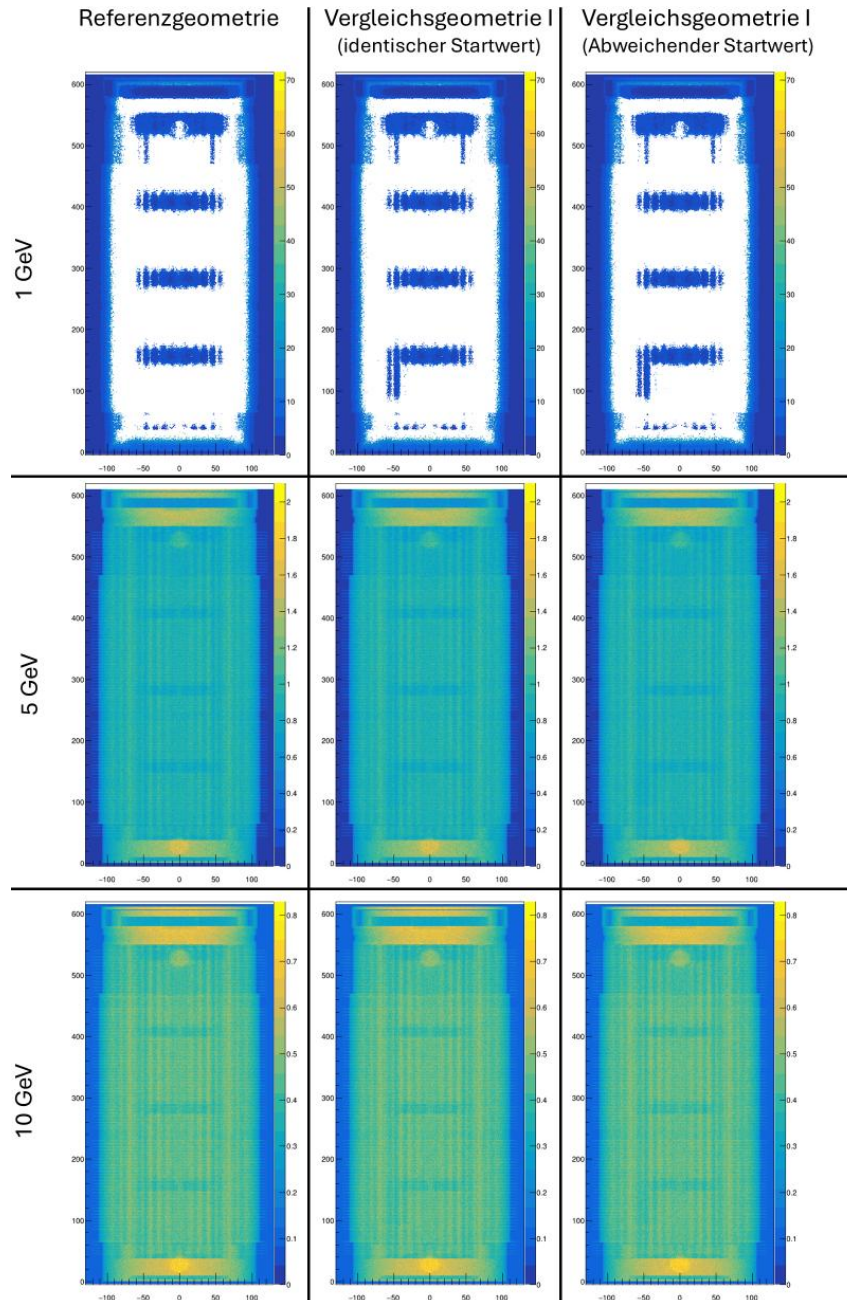


Abb. B.1 Projektionsbilder in der (x,z)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 5 zur Hälfte gefüllt, keine Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (x-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

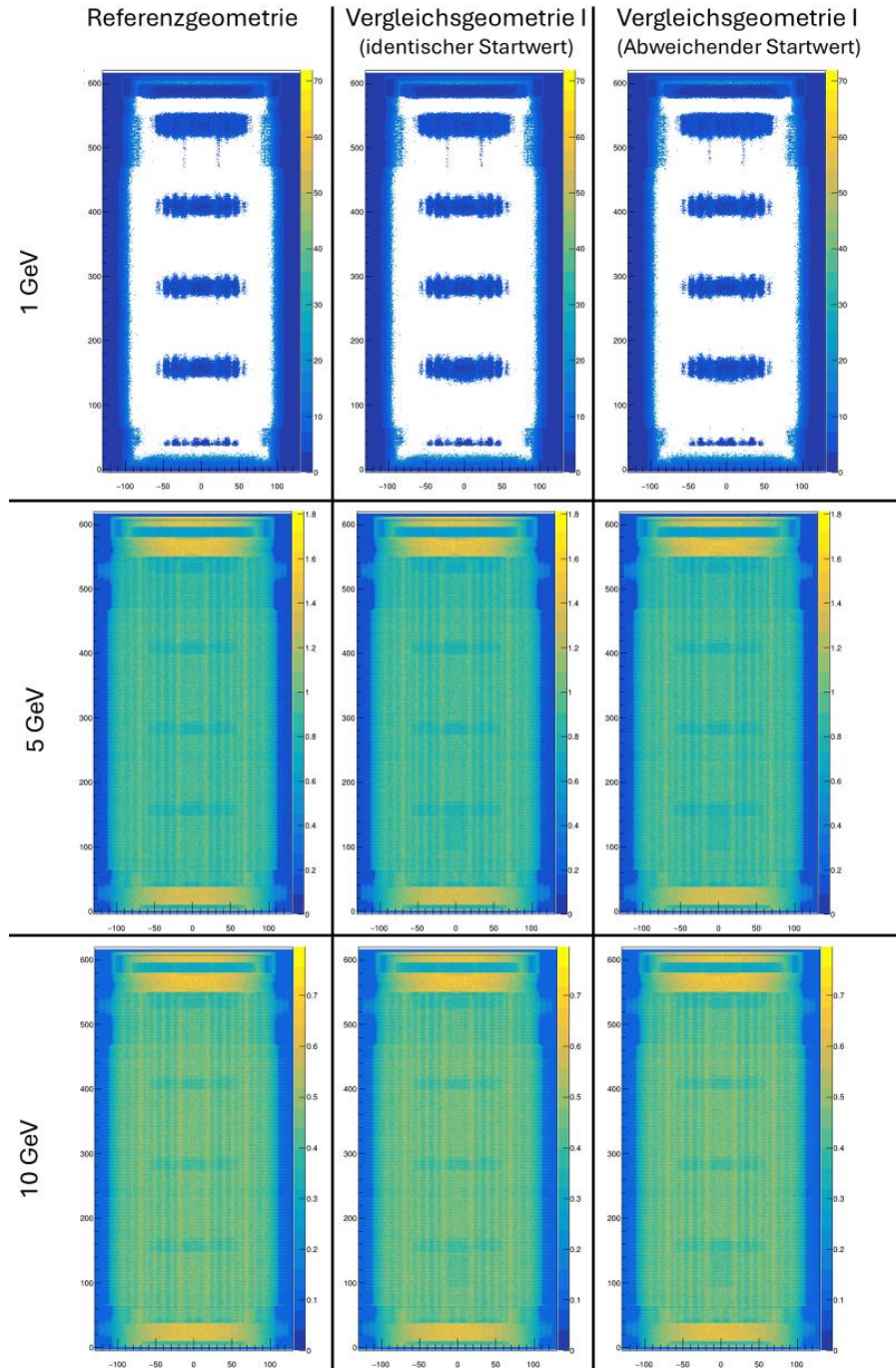


Abb. B.2 Projektionsbilder in der (y,z) -Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 5 zur Hälfte gefüllt, keine Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (y -Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

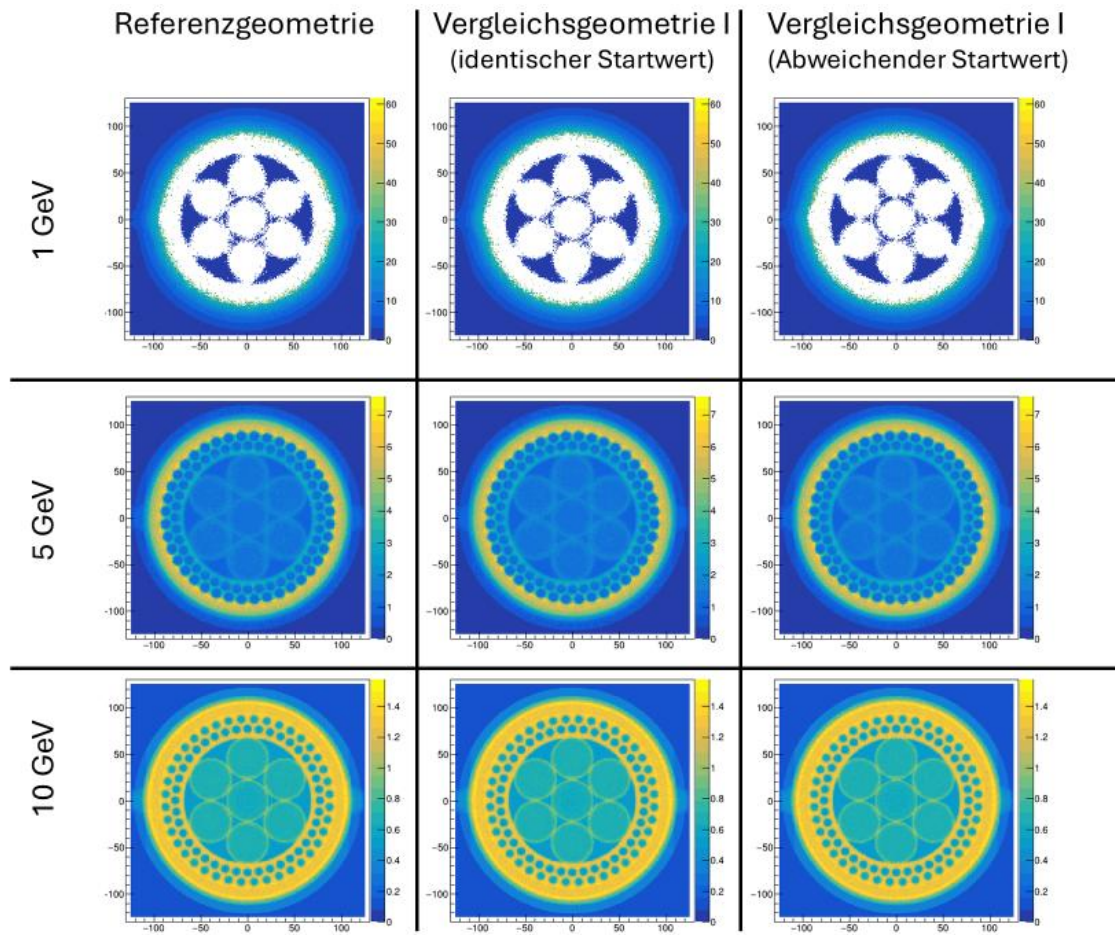


Abb. B.3 Projektionsbilder in der (x,y)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 5 zur Hälfte gefüllt, keine Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (z-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

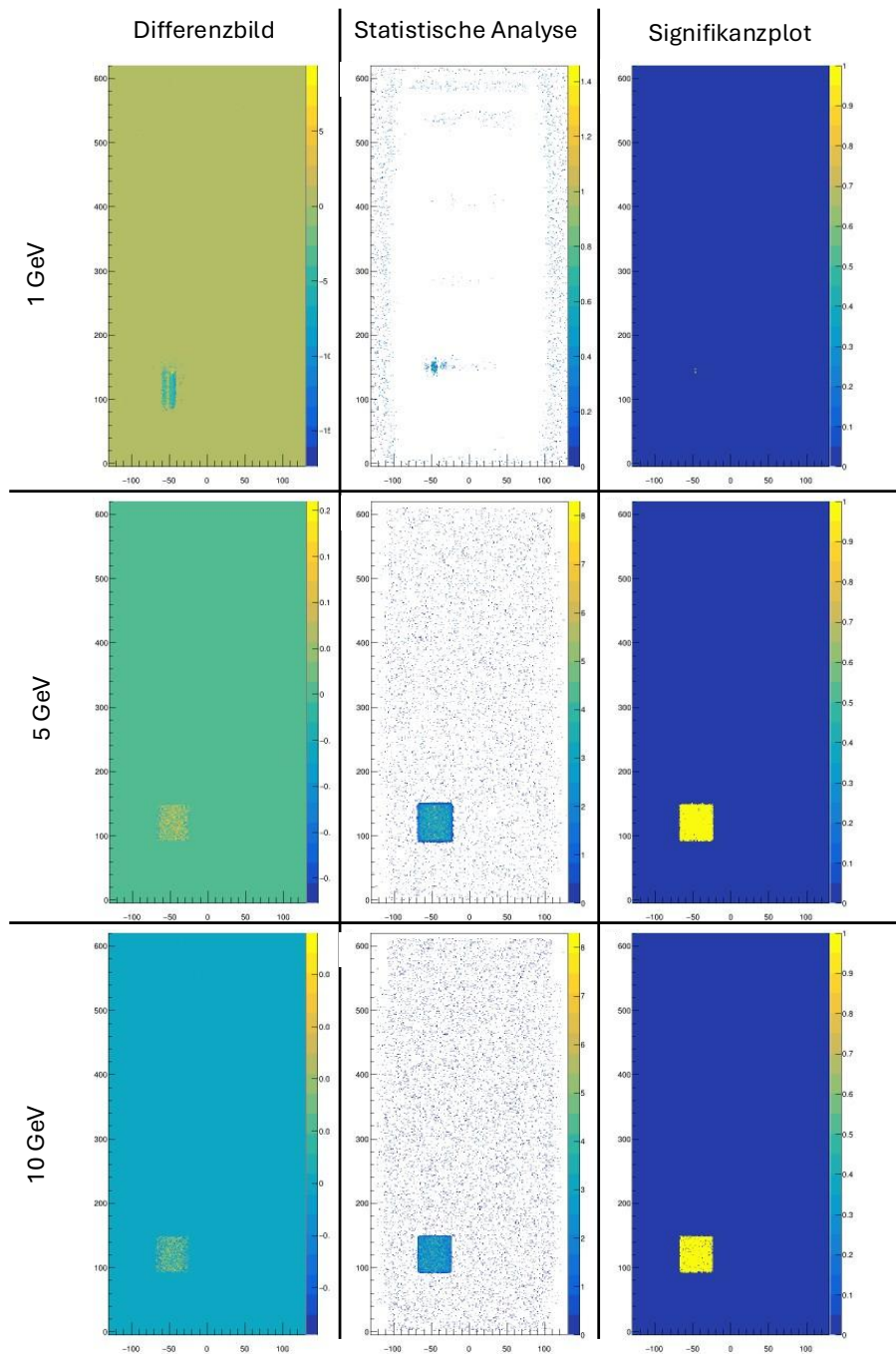


Abb. B.4 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo-Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 5 zur Hälfte gefüllt, keine Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (x-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

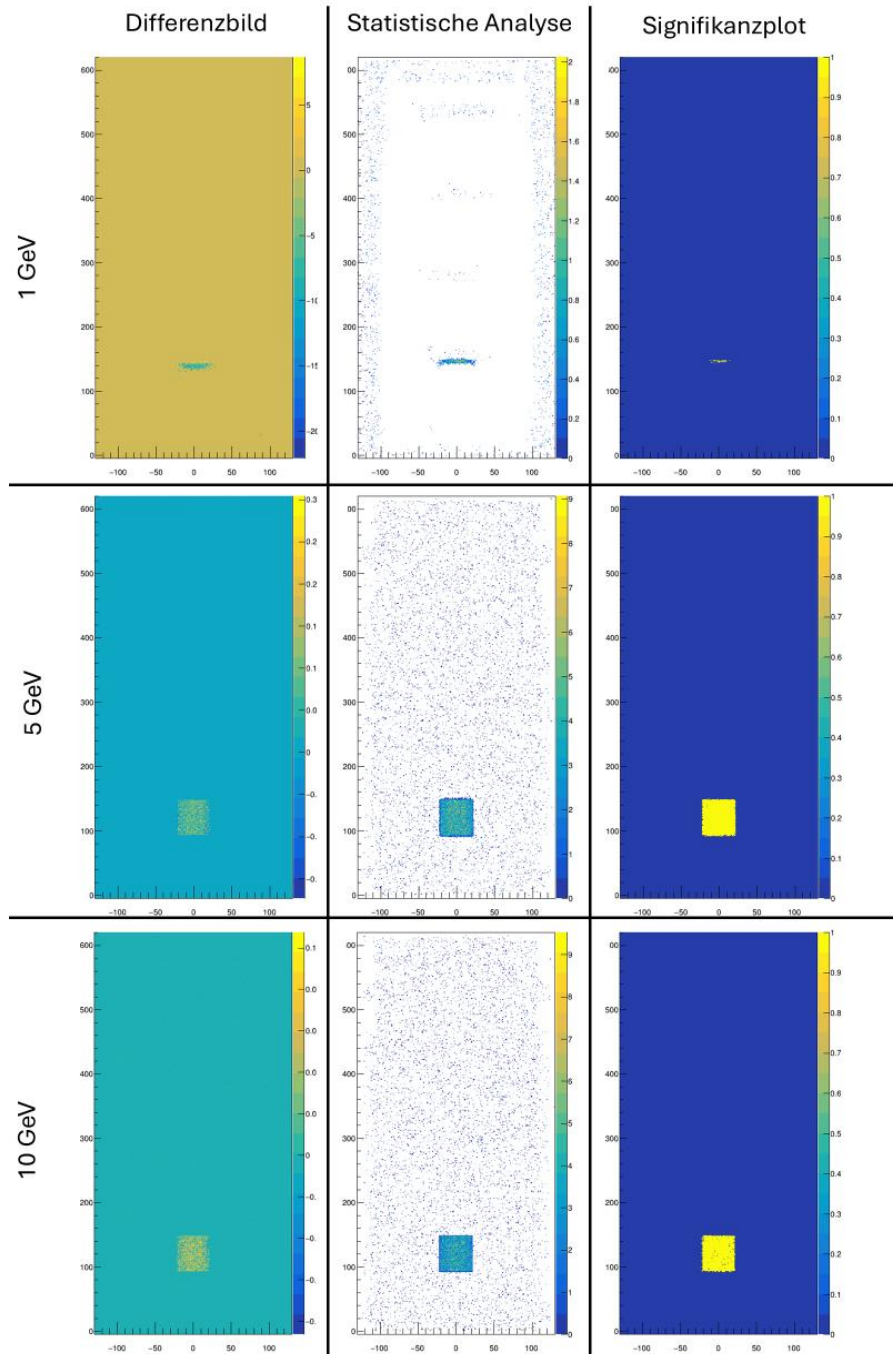


Abb. B.5 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo-Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 5 zur Hälfte gefüllt, keine Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (y-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

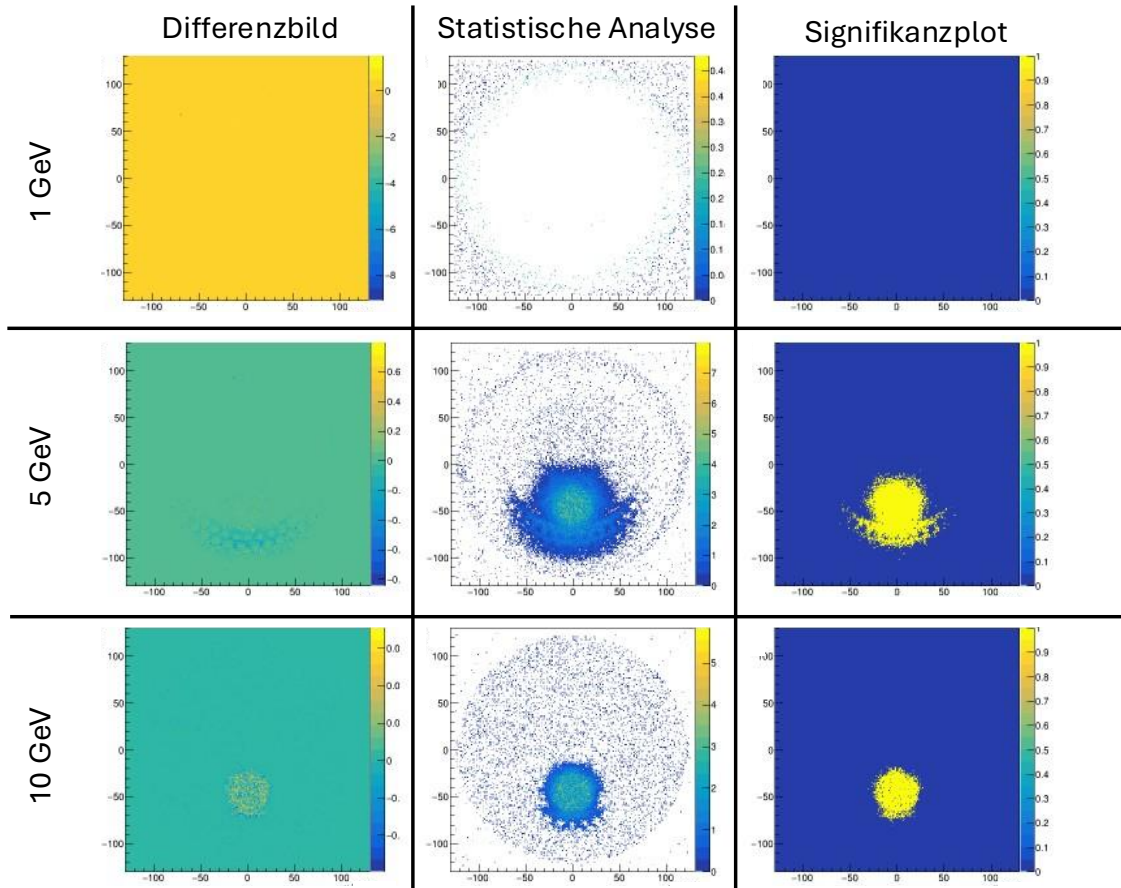


Abb. B.6 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo-Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 5 zur Hälfte gefüllt, keine Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (z-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

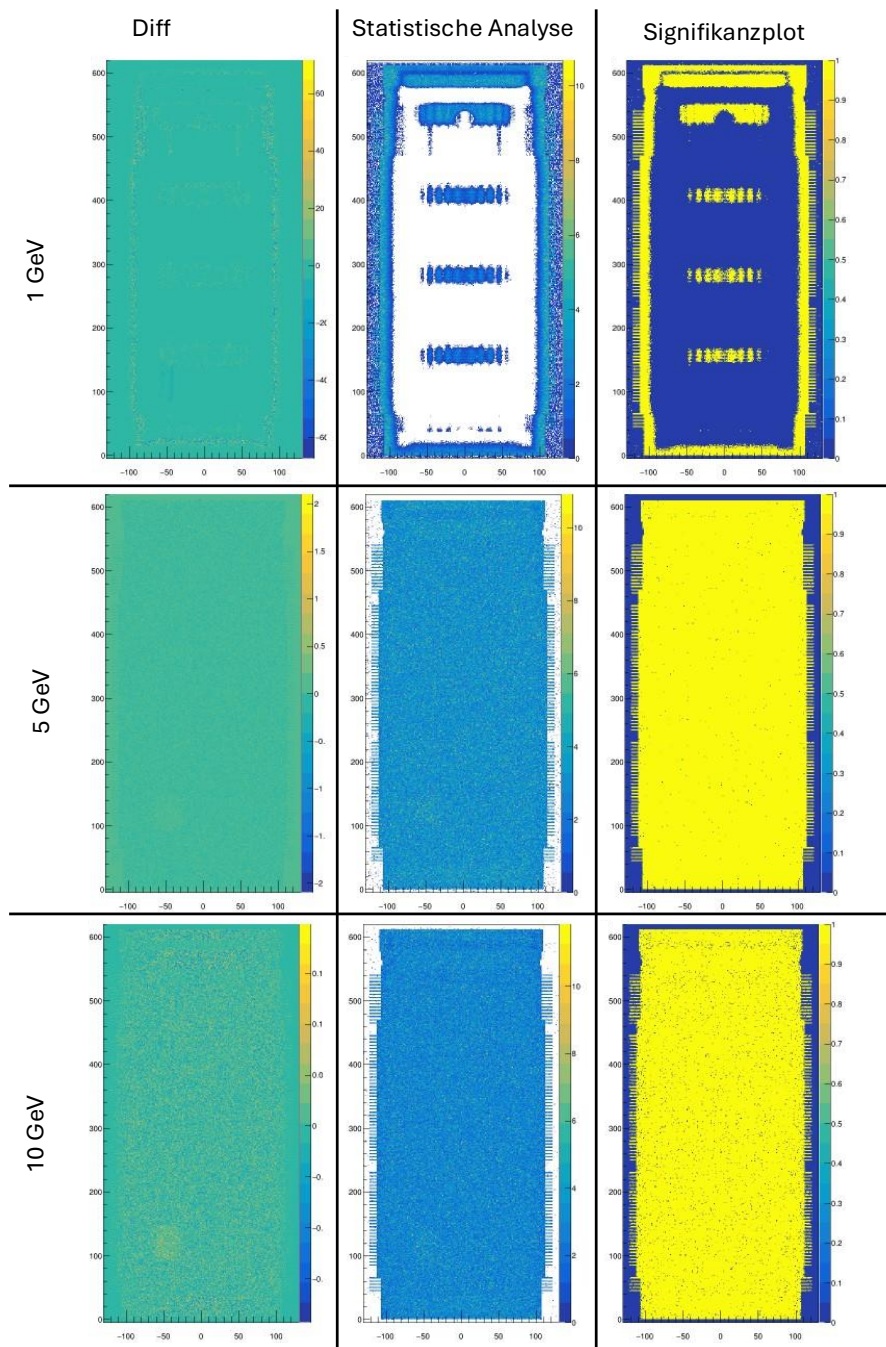


Abb. B.7 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo-Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 5 zur Hälfte gefüllt, keine Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (x-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

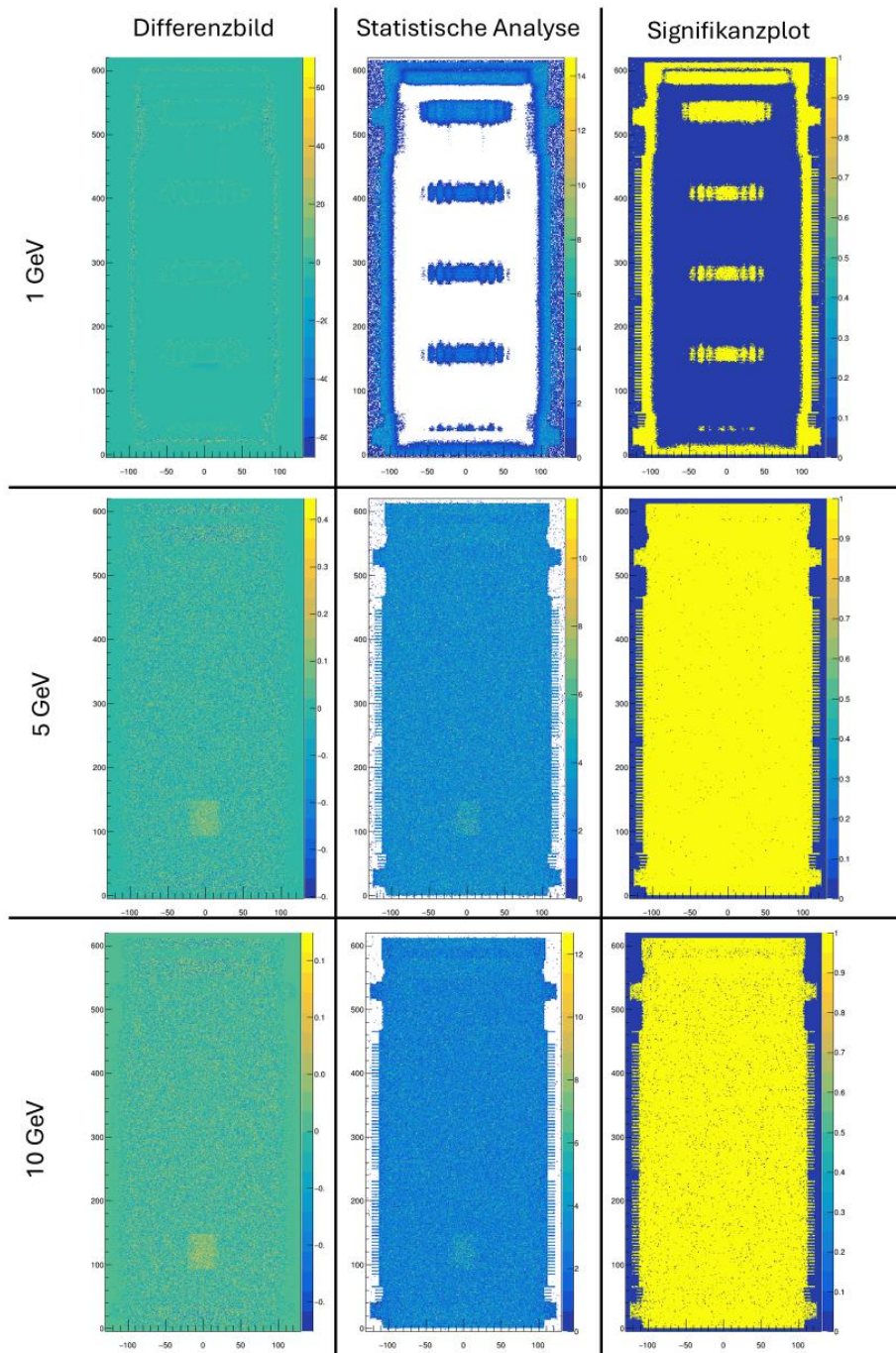


Abb. B.8 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo-Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 5 zur Hälfte gefüllt, keine Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (y-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

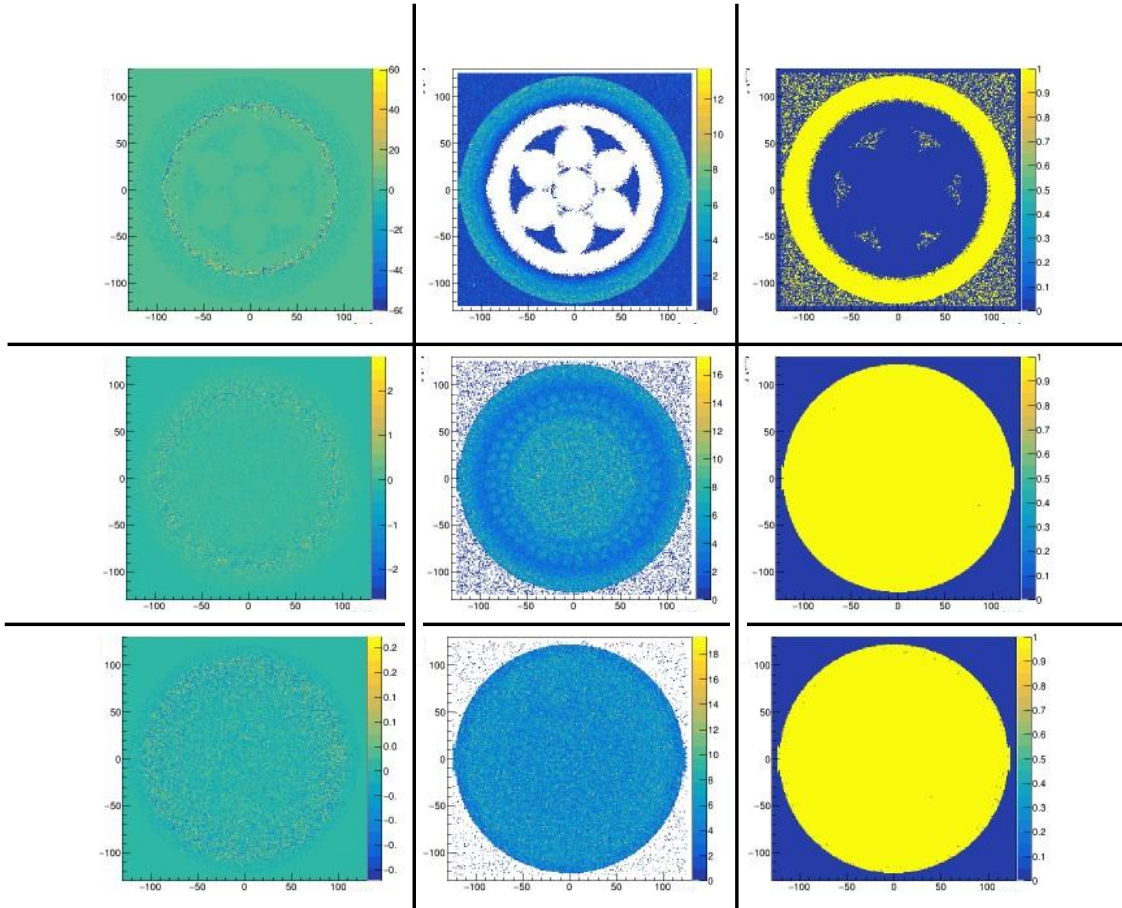


Abb. B.9 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo-Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 5 zur Hälfte gefüllt, keine Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (z-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

B.2 Simulationsergebnisse für Kokille mit ID 5 mit Restverfüllung

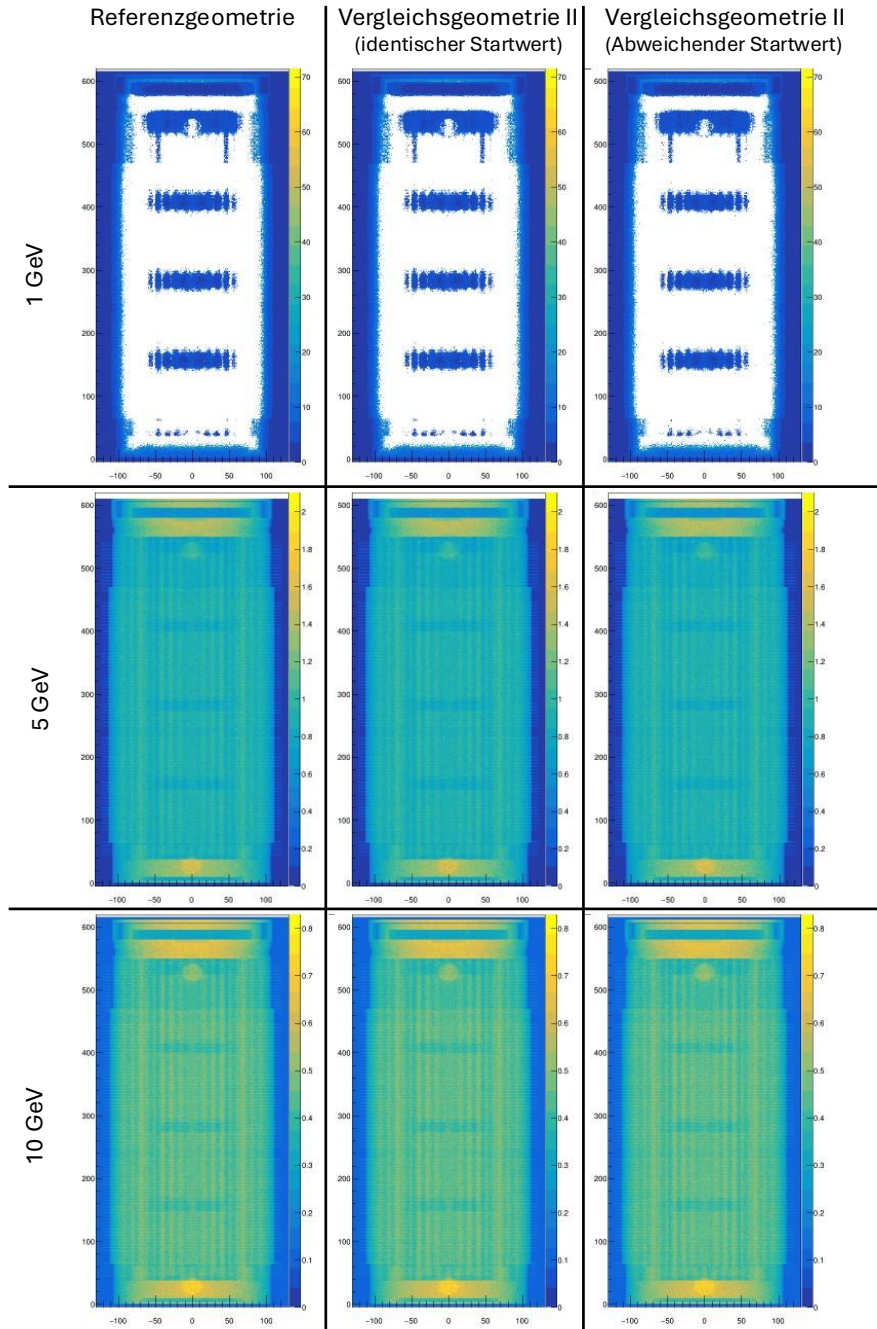


Abb. B.10 Projektionsbilder in der (x,z)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 5 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (x-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

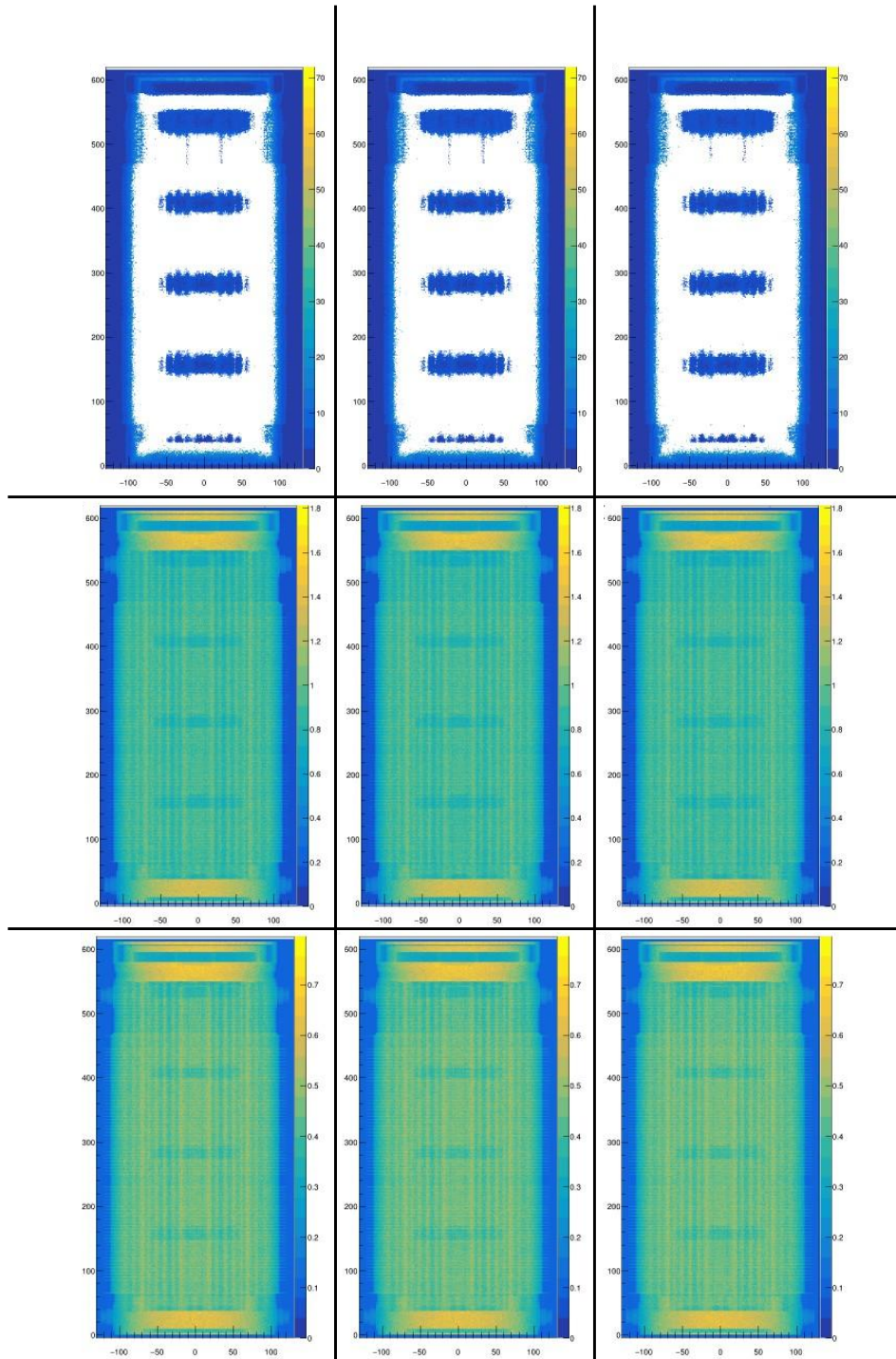


Abb. B.11 Projektionsbilder in der (y,z)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 5 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (y-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

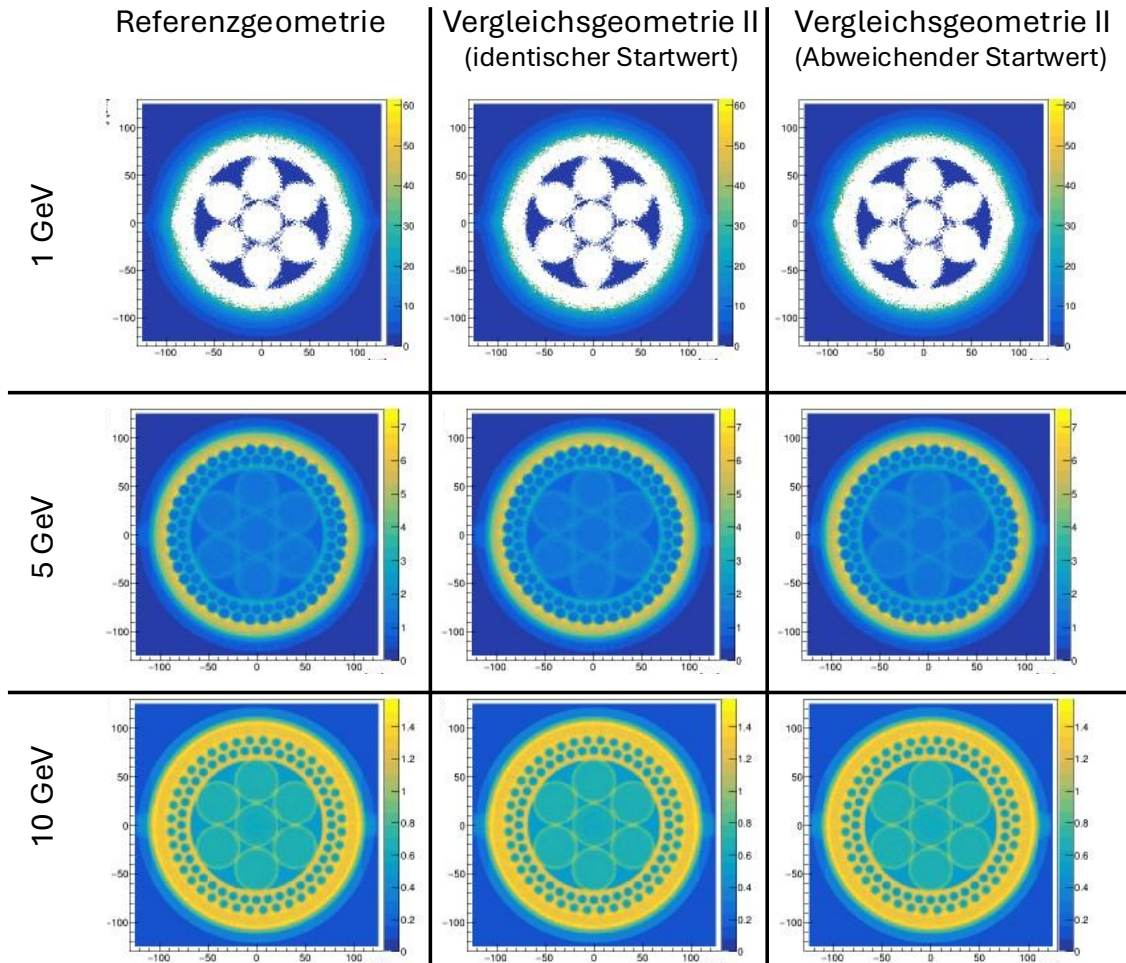


Abb. B.12 Projektionsbilder in der (x,y)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 5 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (z-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

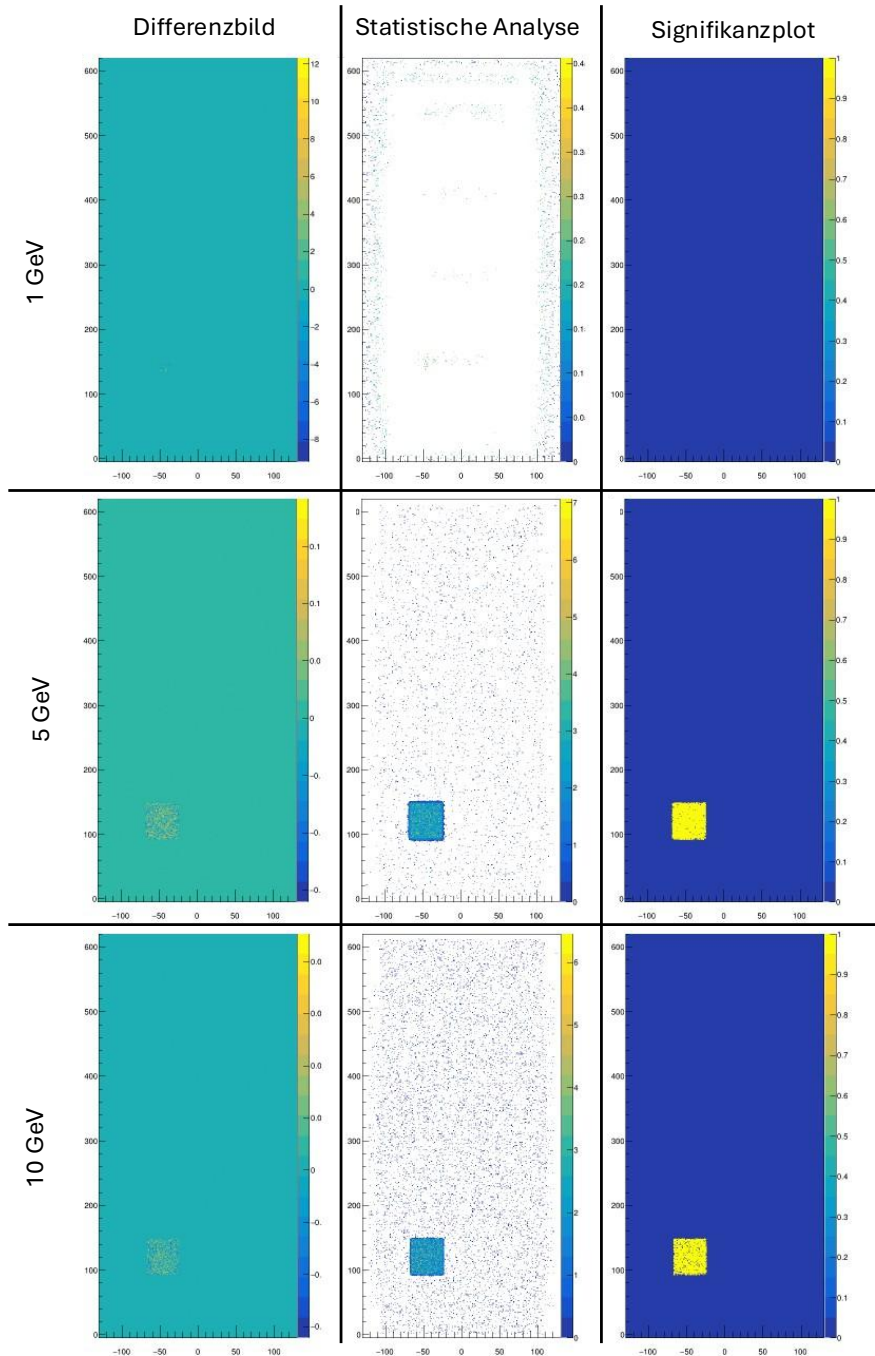


Abb. B.13 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo-Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 5 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (x-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

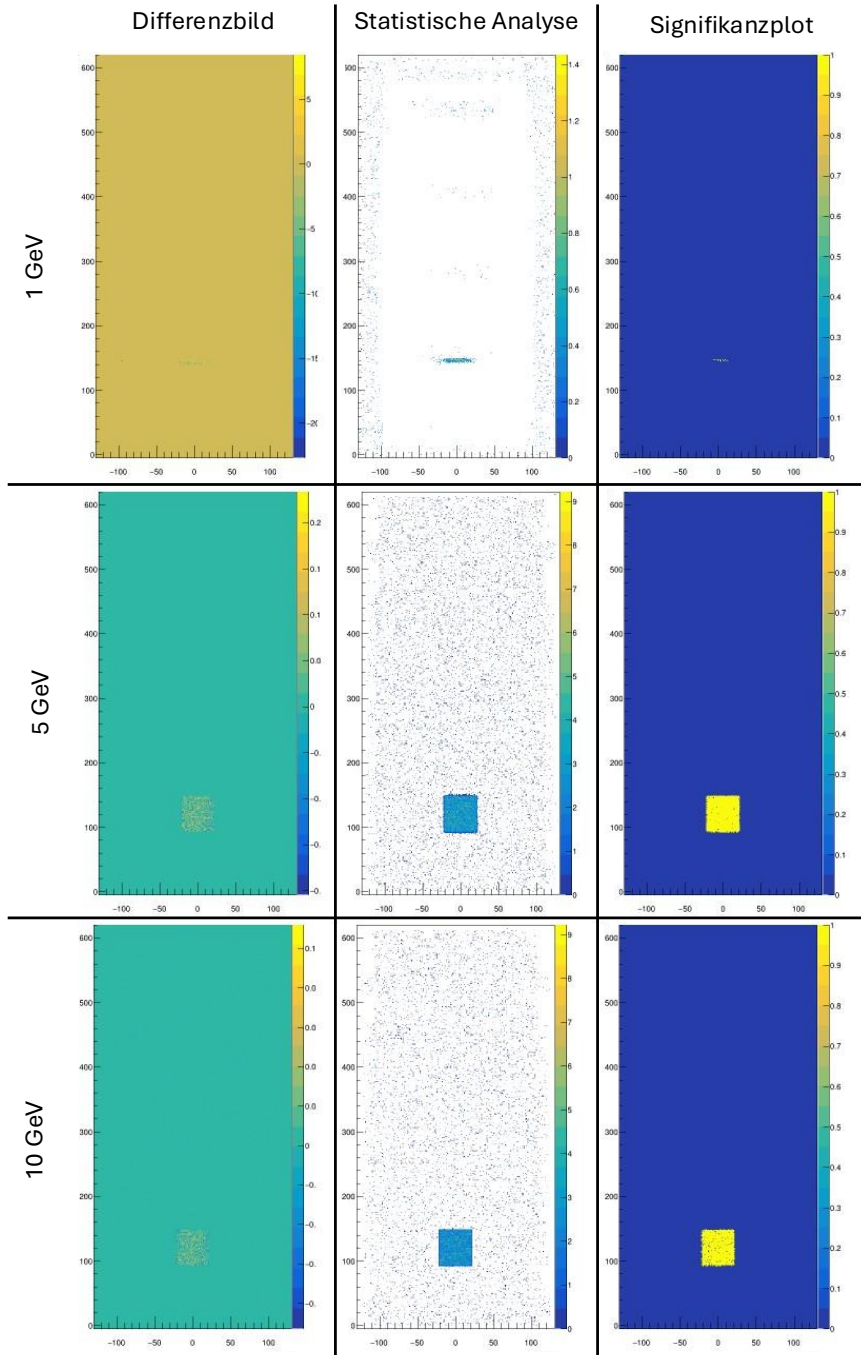


Abb. B.14 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo-Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 5 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (y-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

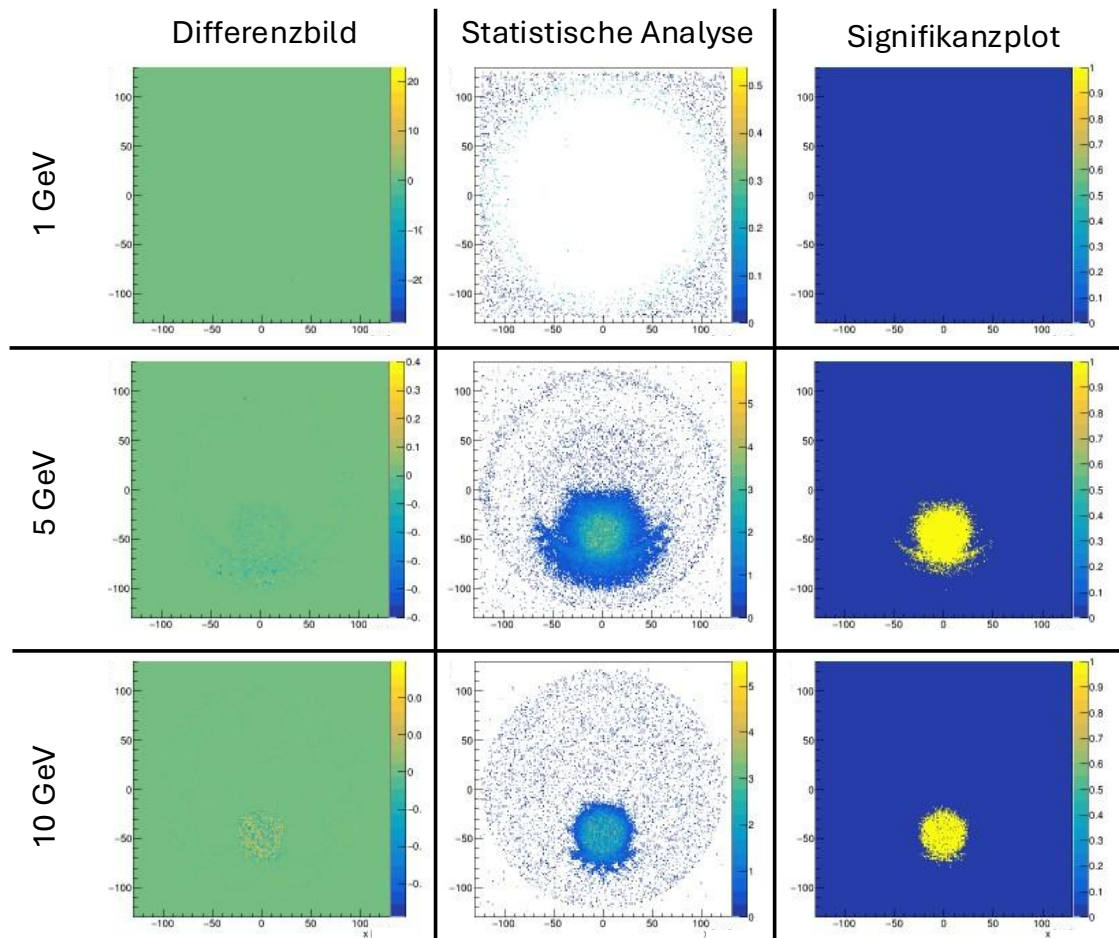


Abb. B.15 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo-Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 5 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (z-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

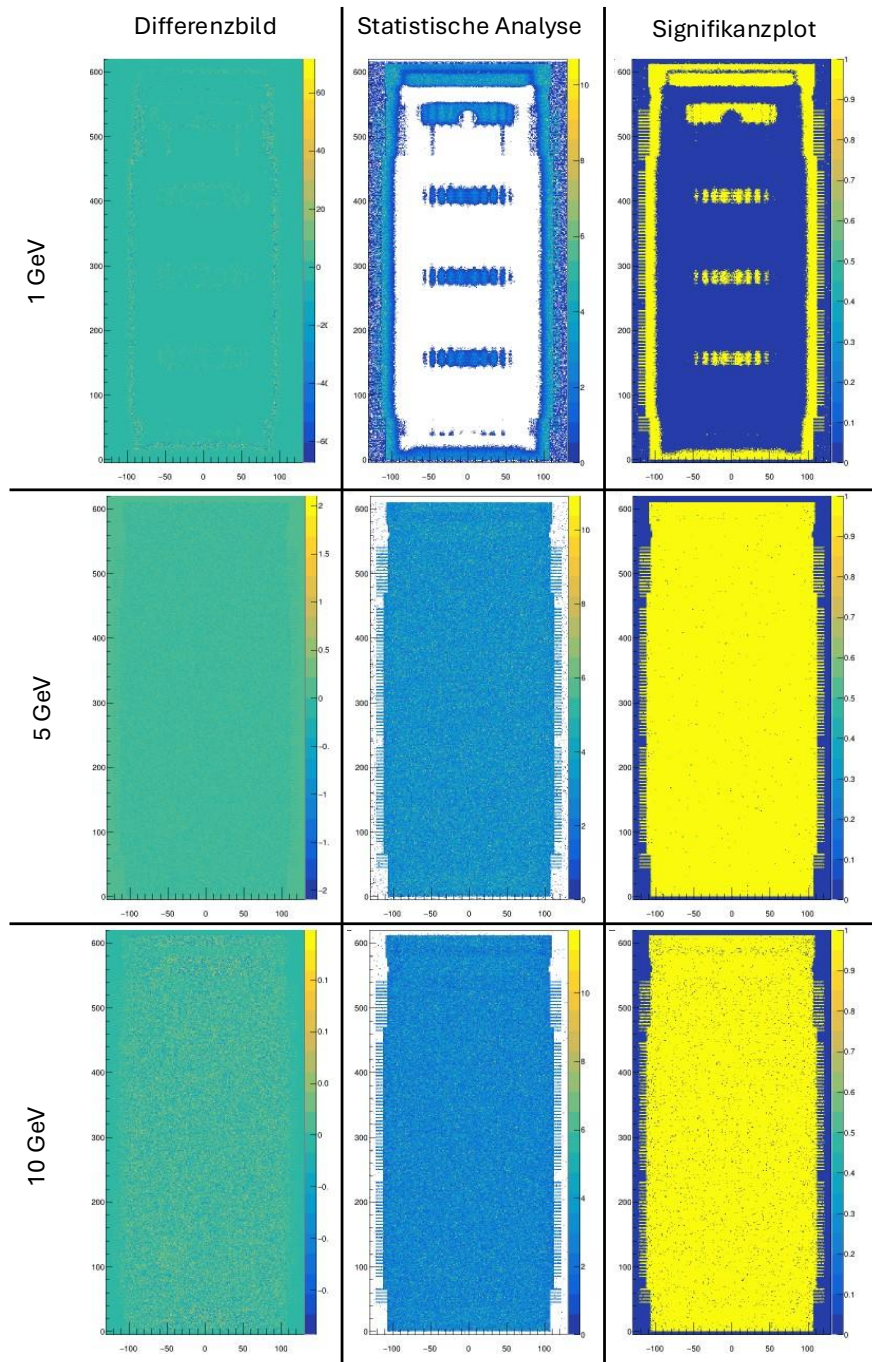


Abb. B.16 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 5 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (x-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

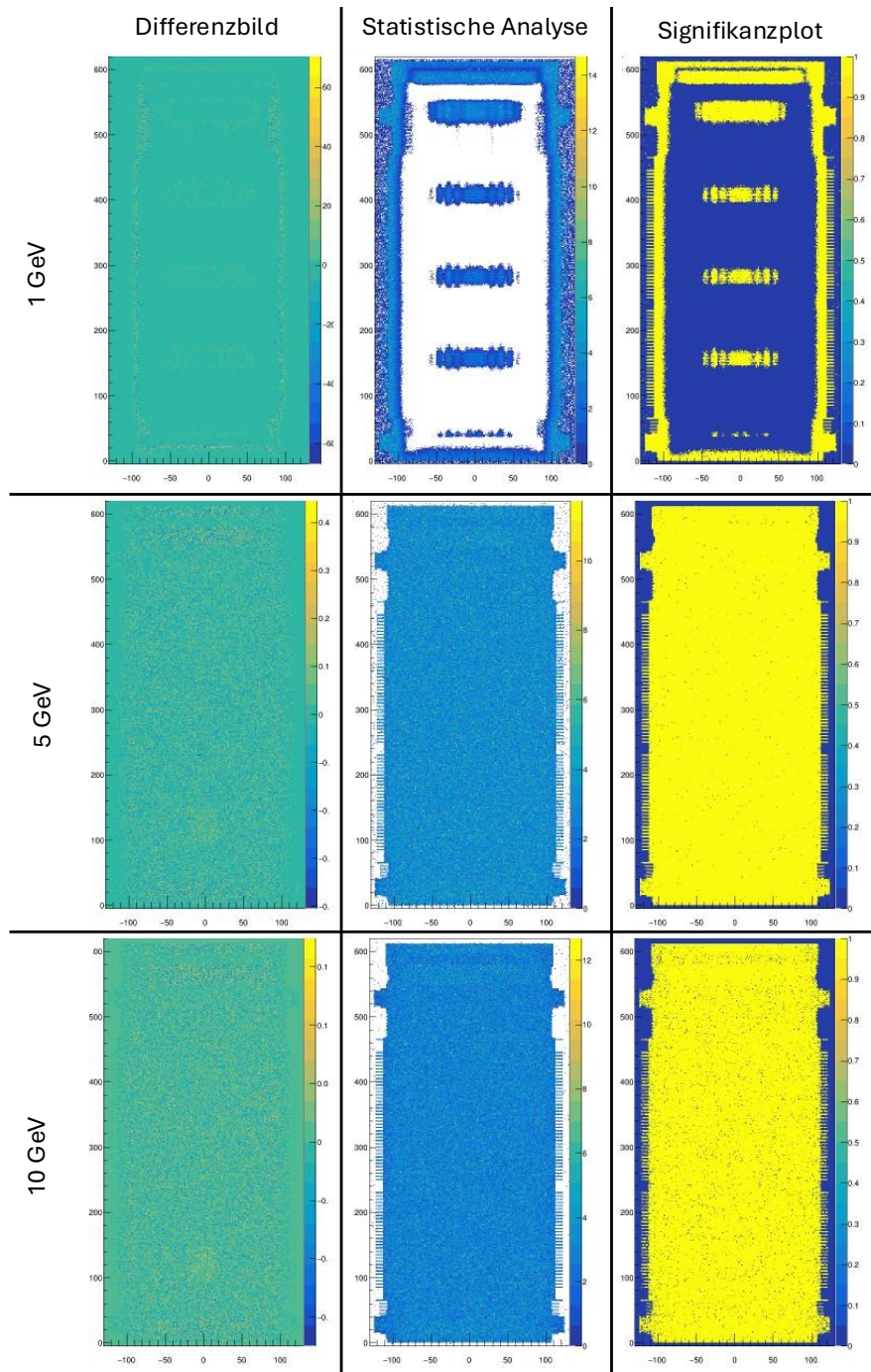


Abb. B.17 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 5 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (y-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

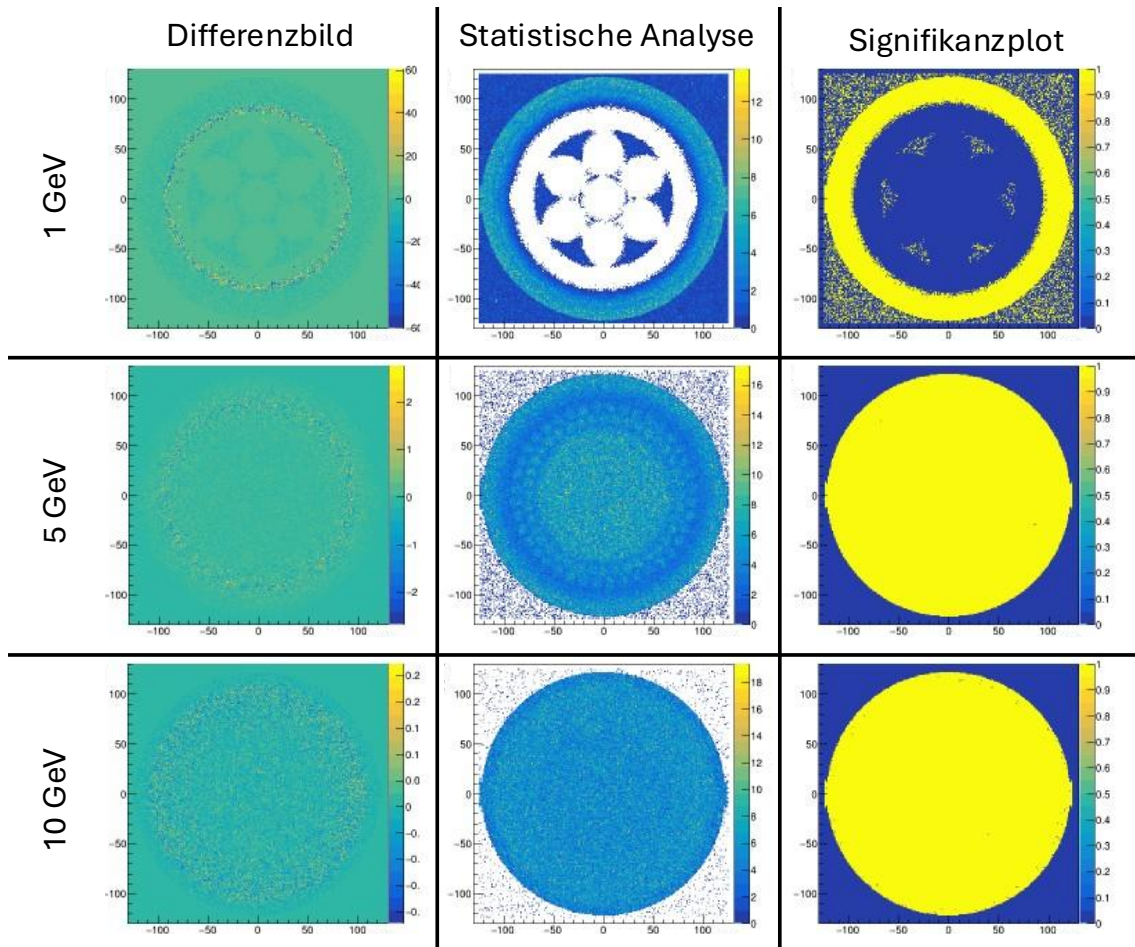


Abb. B.18 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 5 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (z-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

B.3 Simulationsergebnisse für Kokille mit ID 12 ohne Restverfüllung

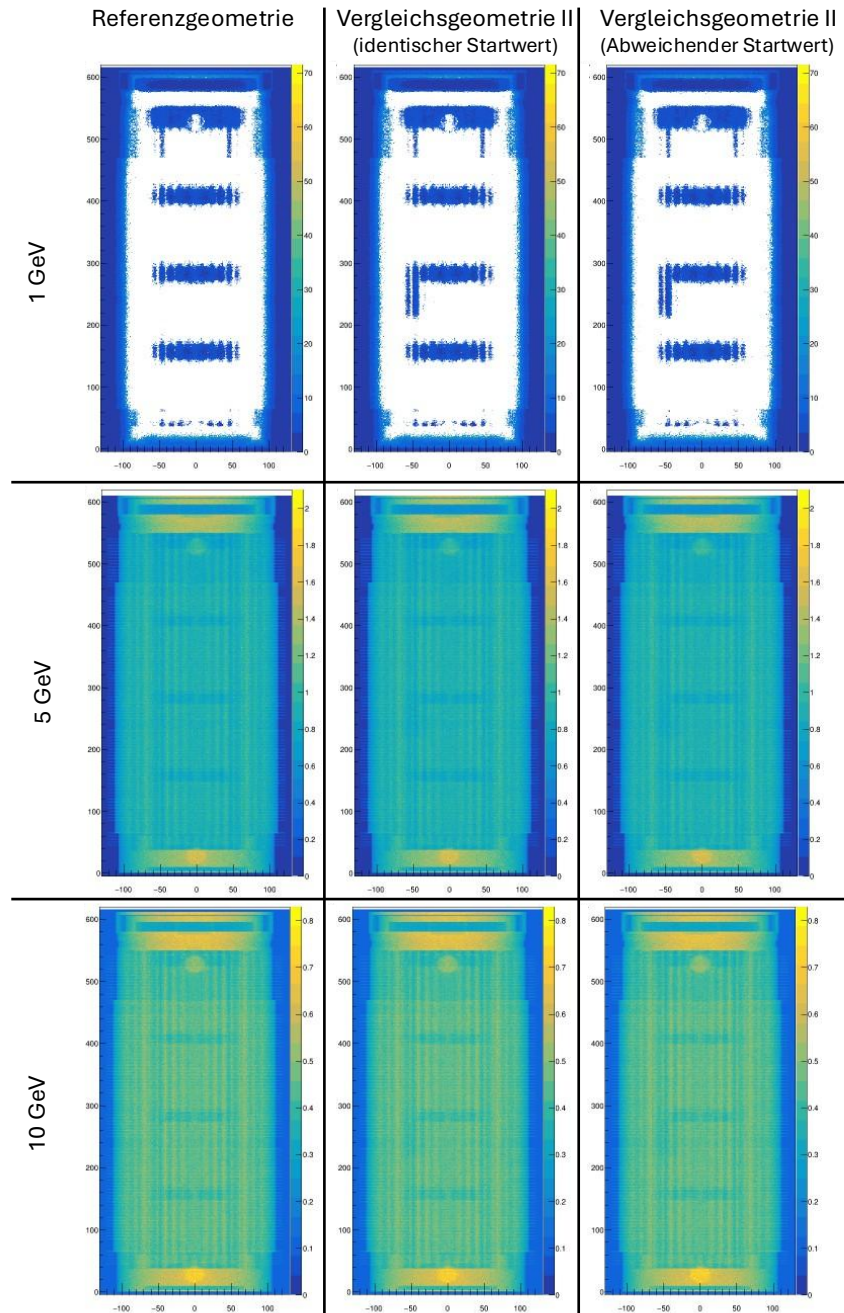


Abb. B.19 Projektionsbilder in der (x,z)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (x-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

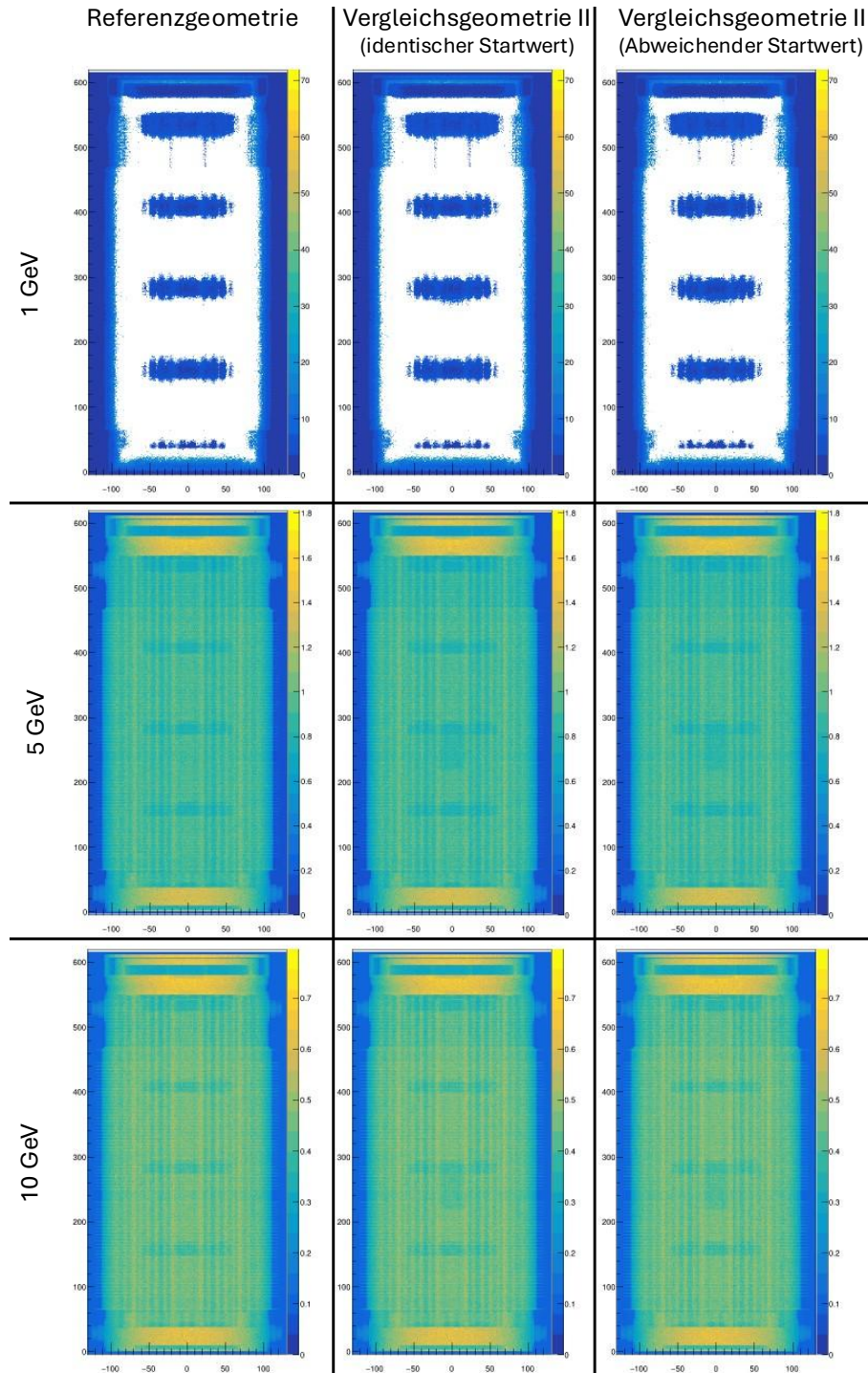


Abb. B.20 Projektionsbilder in der (y,z) -Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (y -Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

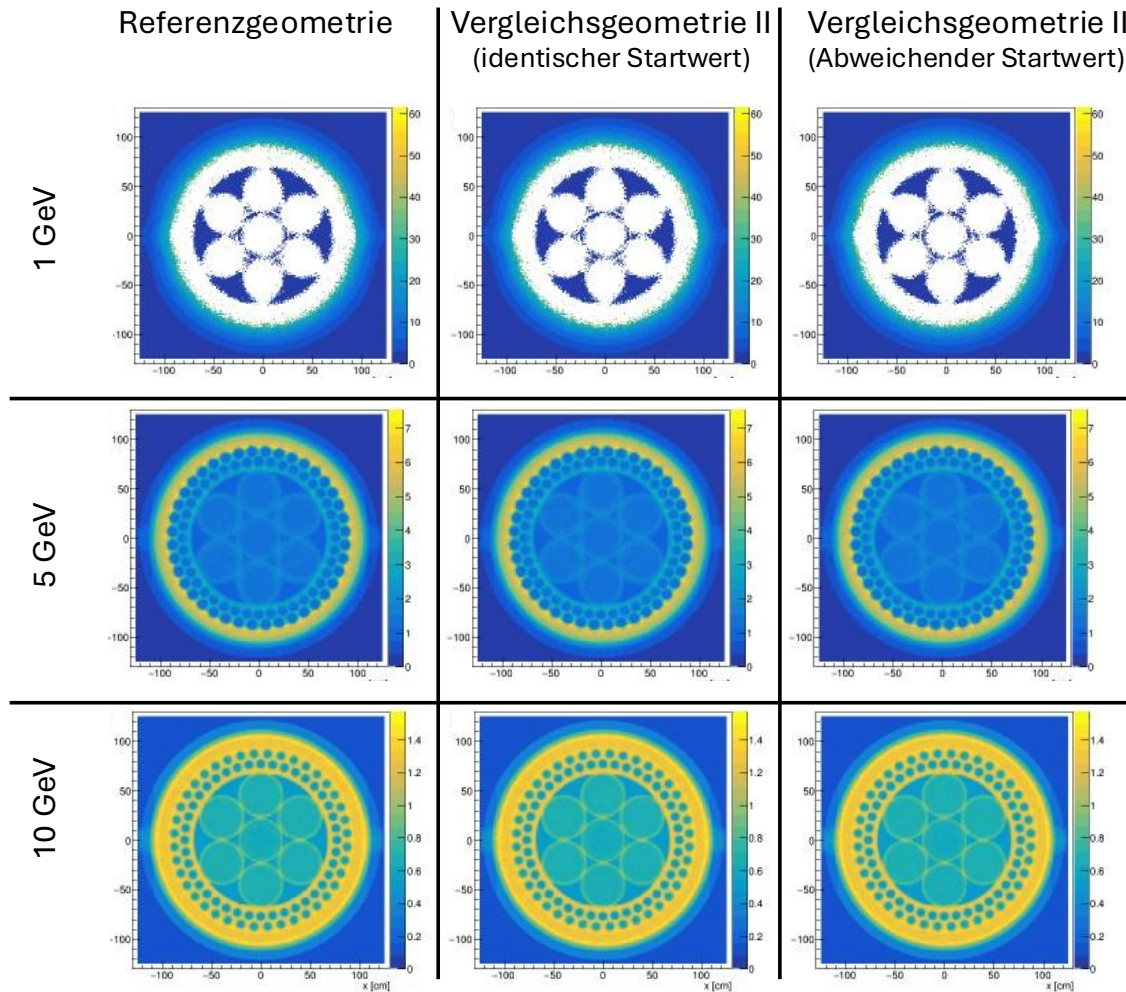


Abb. B.21 Projektionsbilder in der (x,y)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (z-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

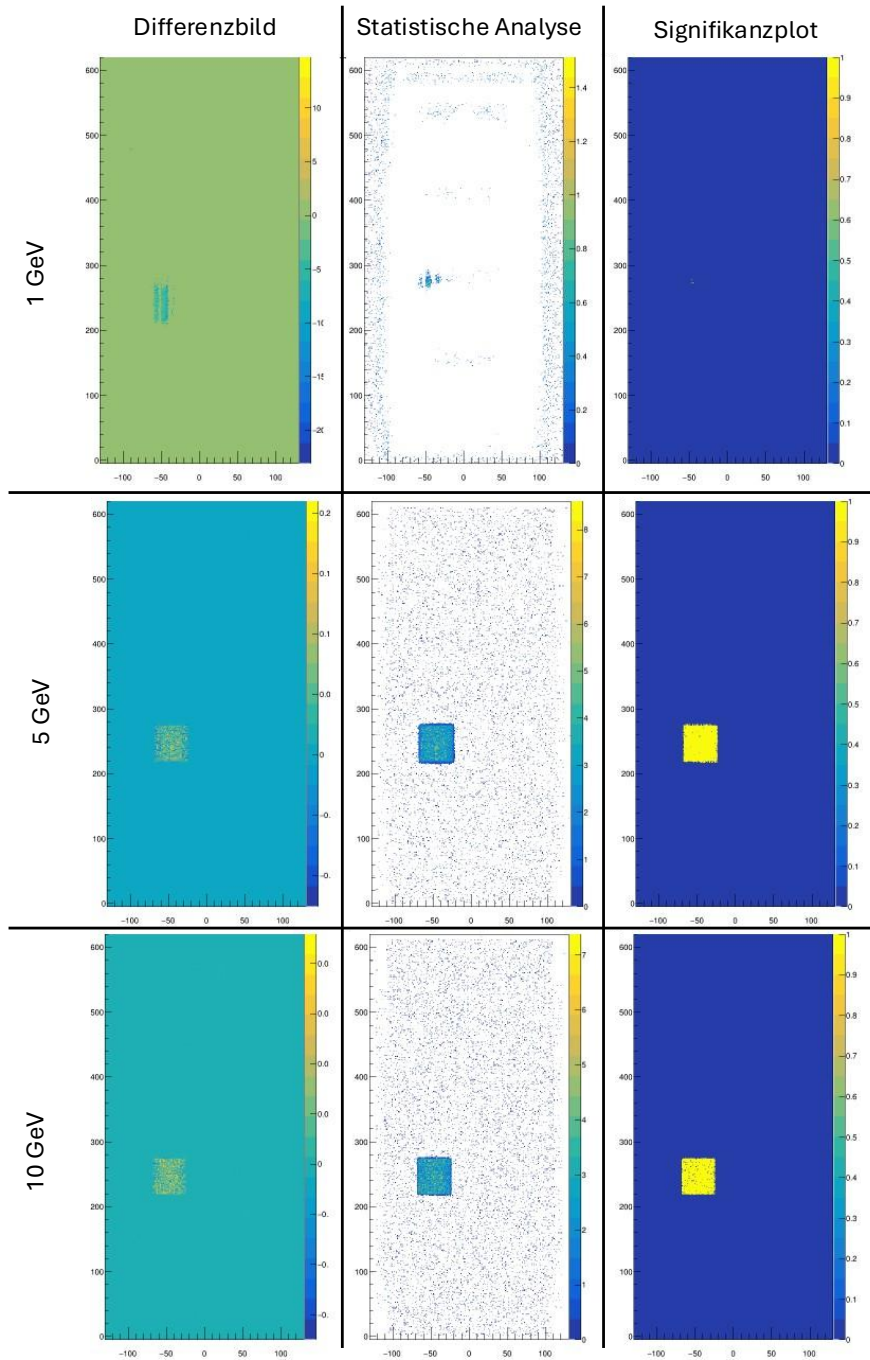


Abb. B.22 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (x-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

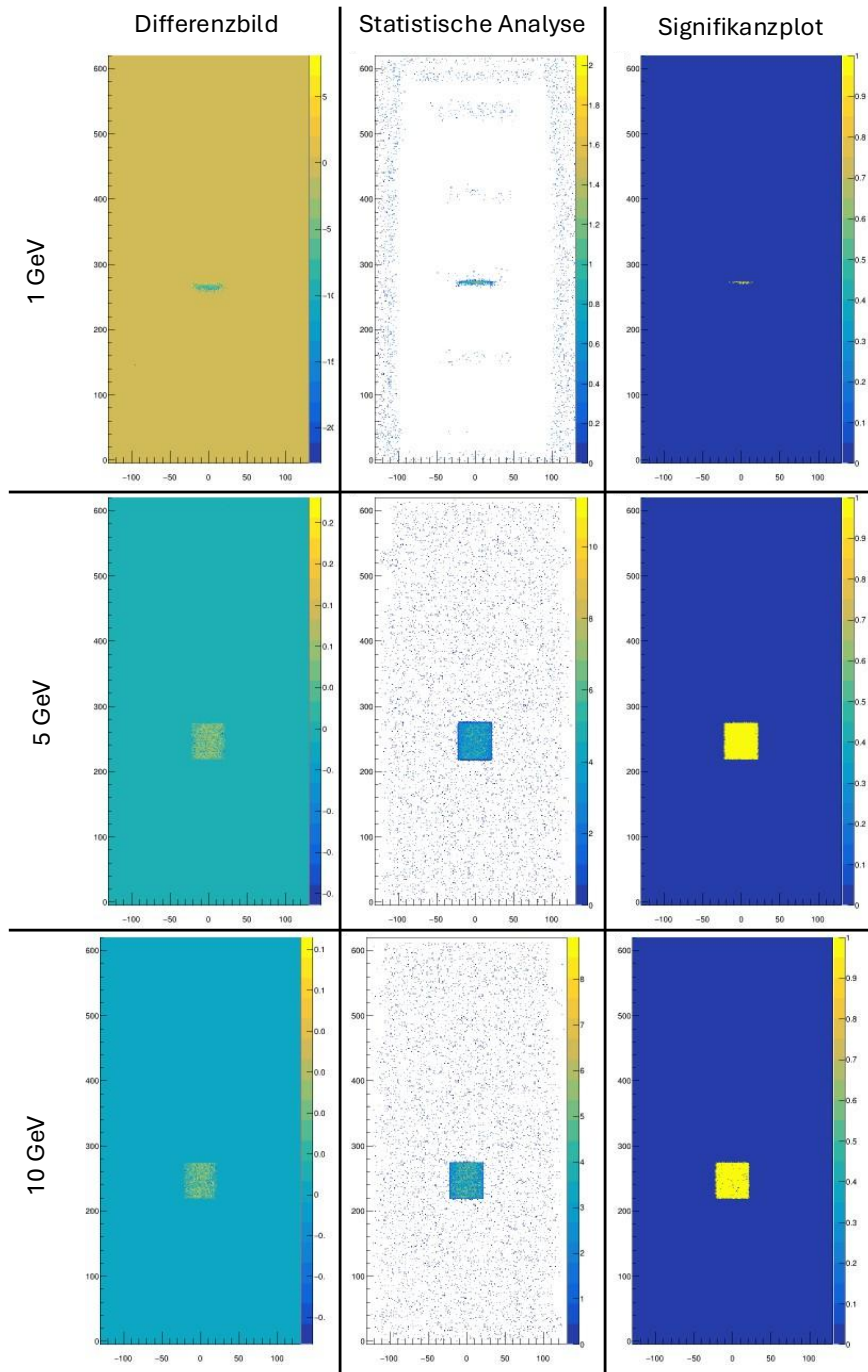


Abb. B.23 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (y-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

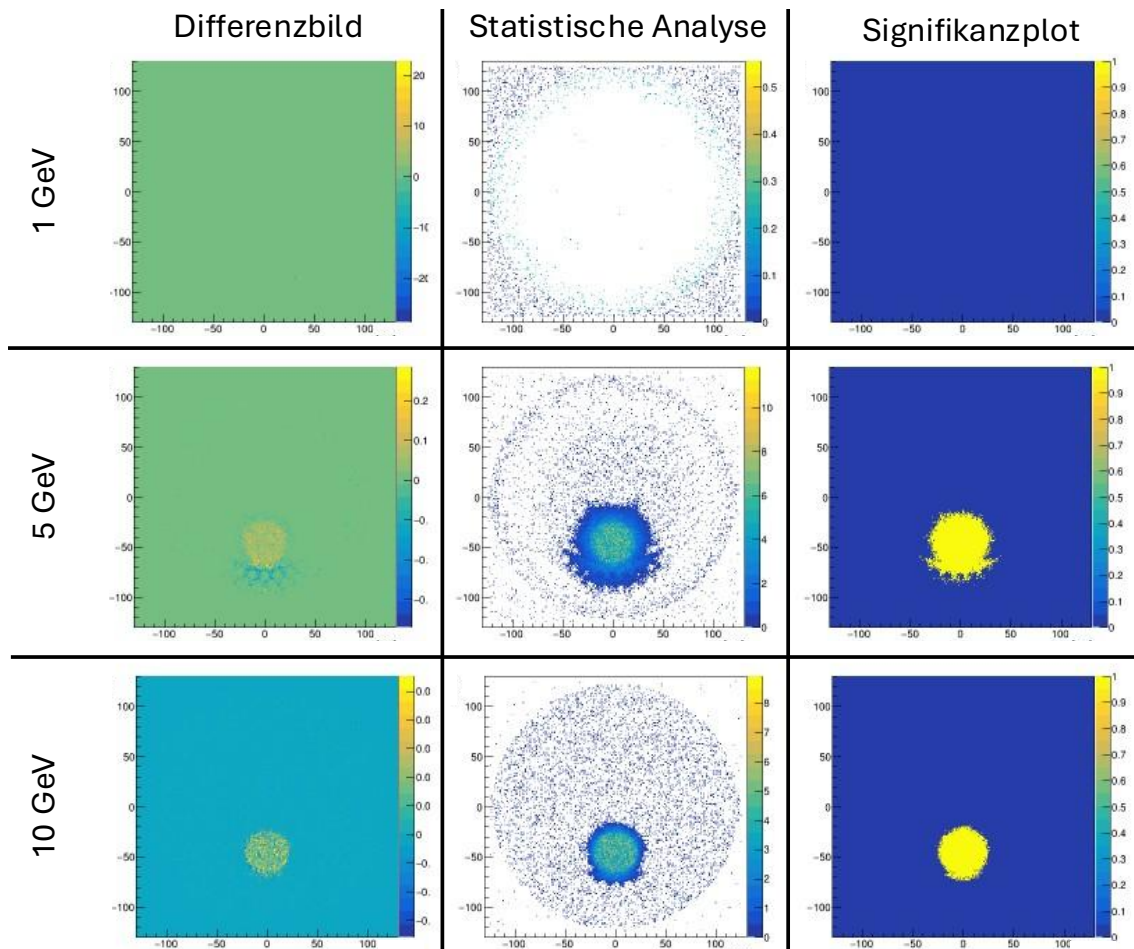


Abb. B.24 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (z-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

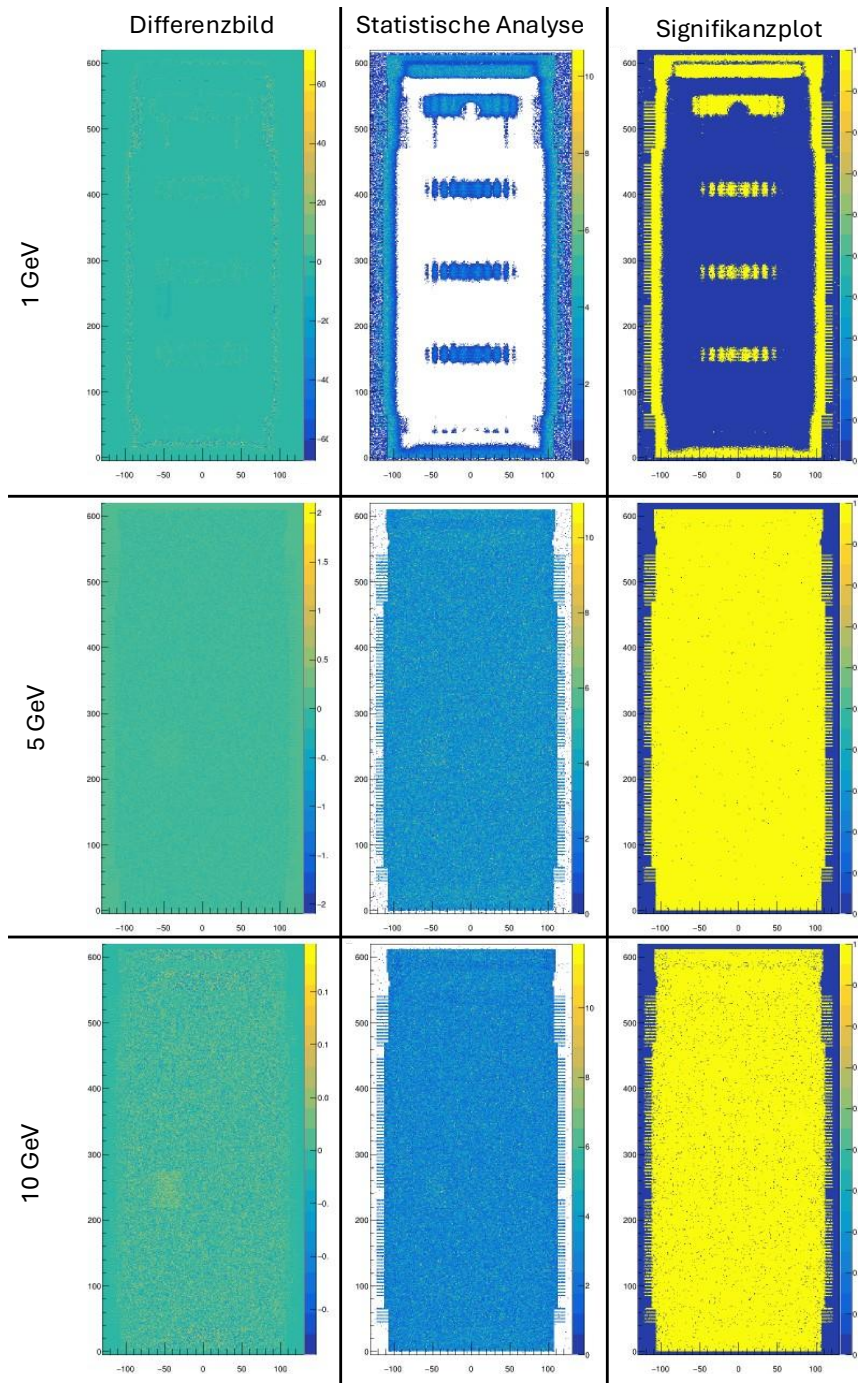


Abb. B.25 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (x-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

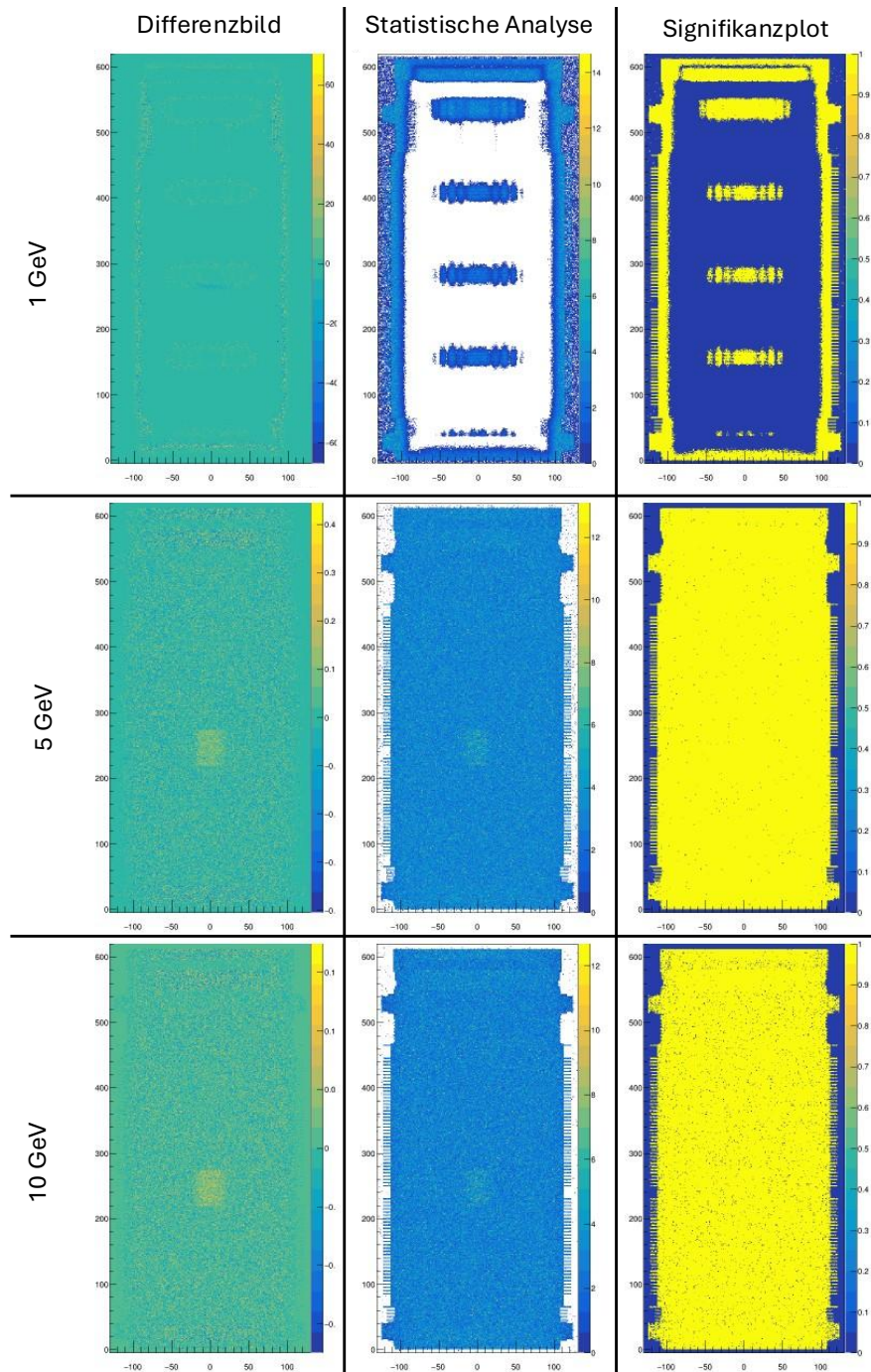


Abb. B.26 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (y-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

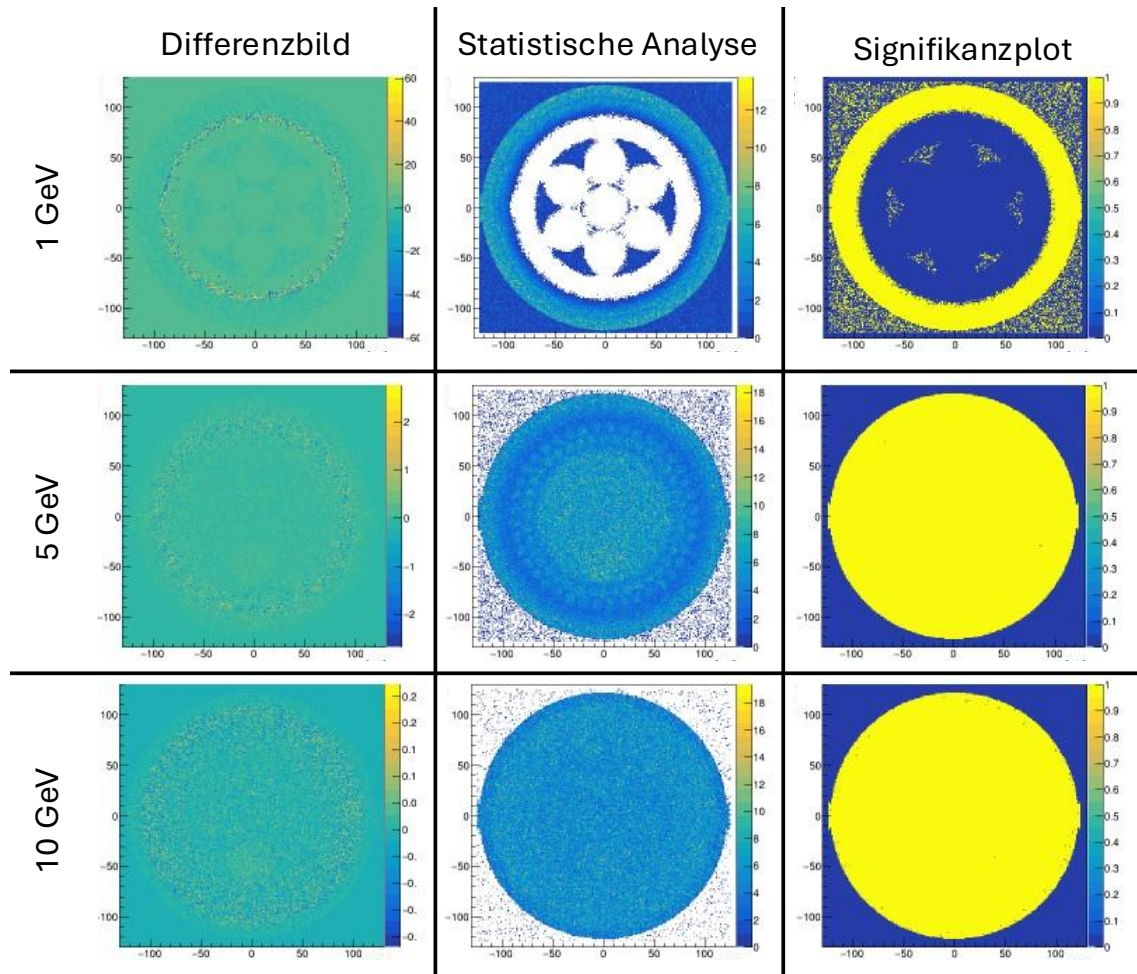


Abb. B.27 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (z-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

B.4 Simulationsergebnisse für Kokille mit ID 12 mit Restverfüllung

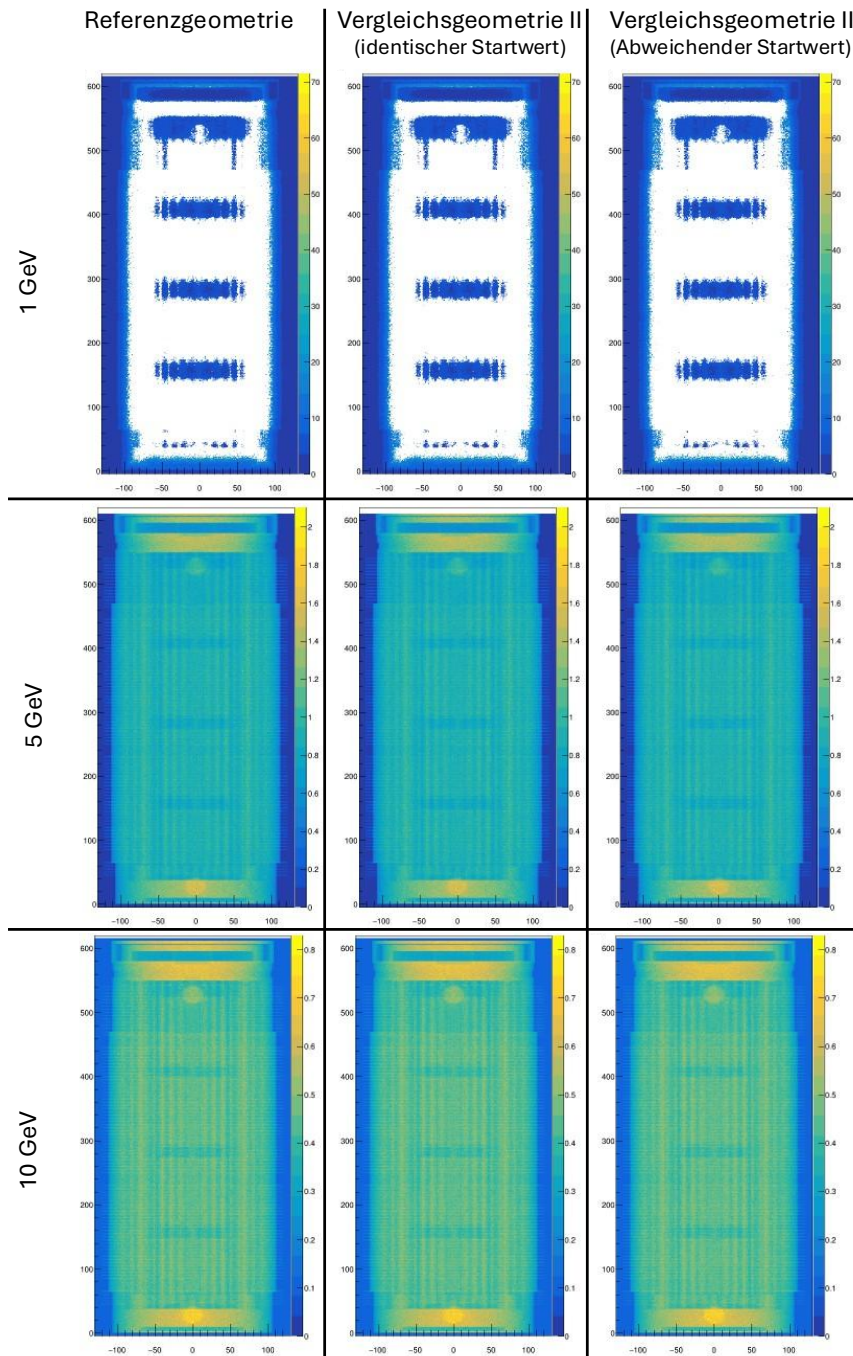


Abb. B.28 Projektionsbilder in der (x,z)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (x-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

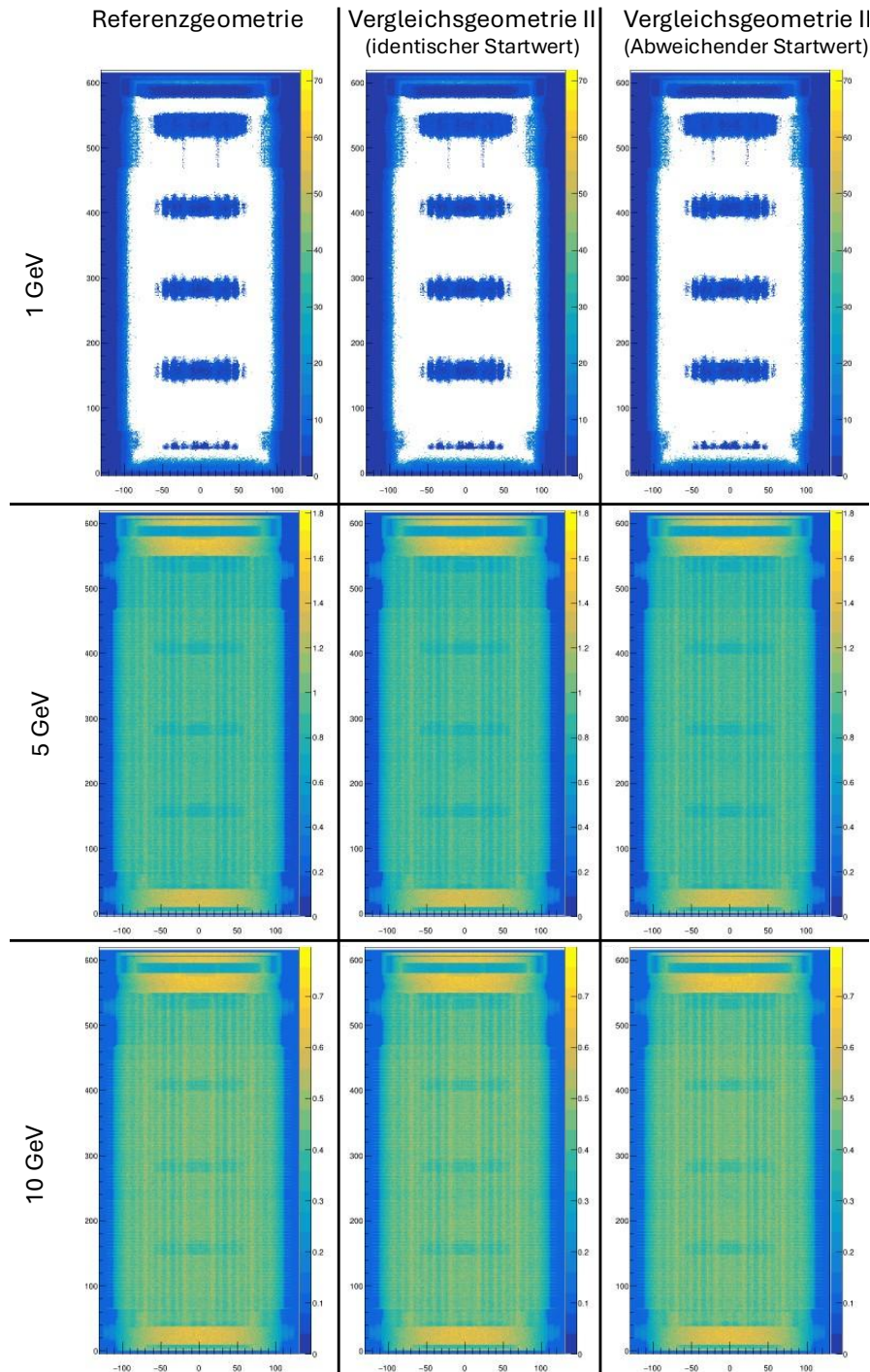


Abb. B.29 Projektionsbilder in der (y,z)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (y-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

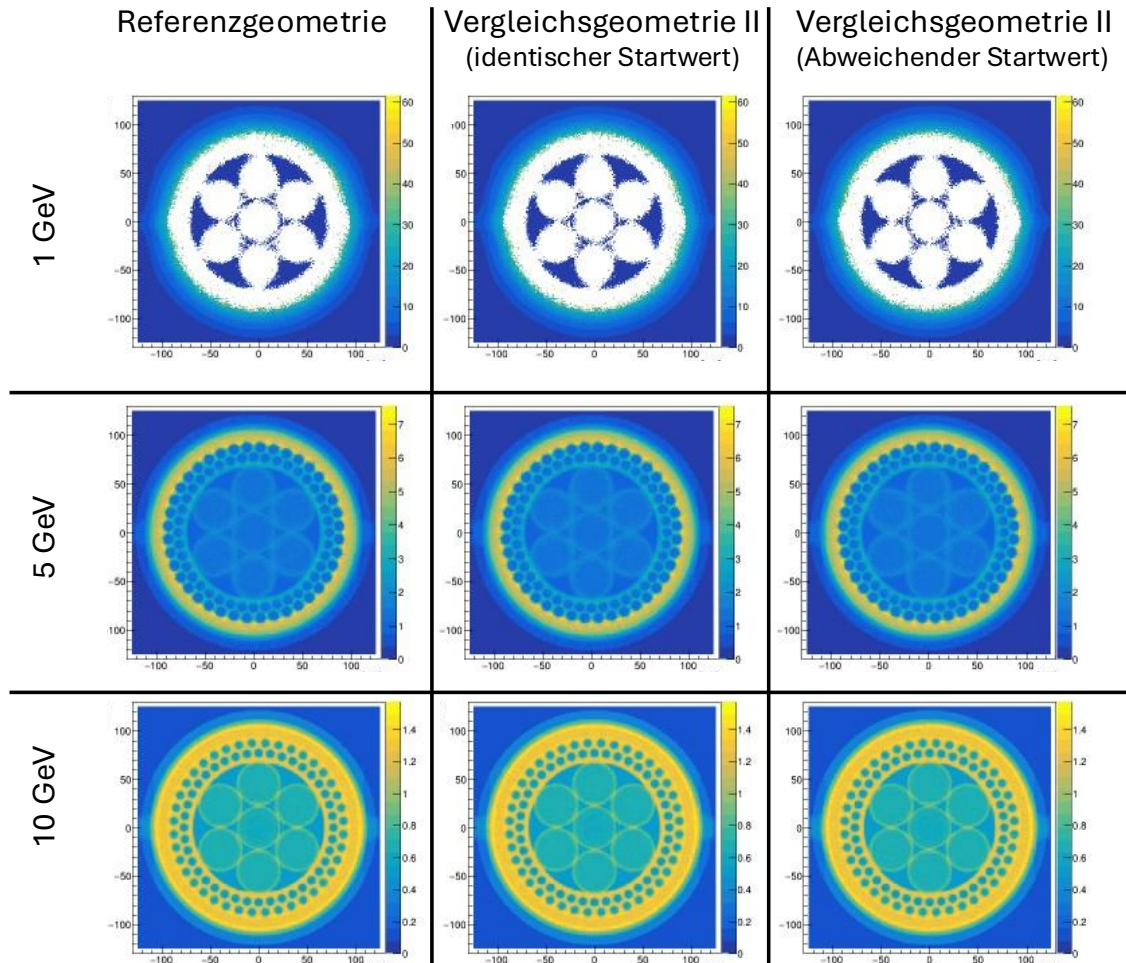


Abb. B.30 Projektionsbilder in der (x,y)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (z-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

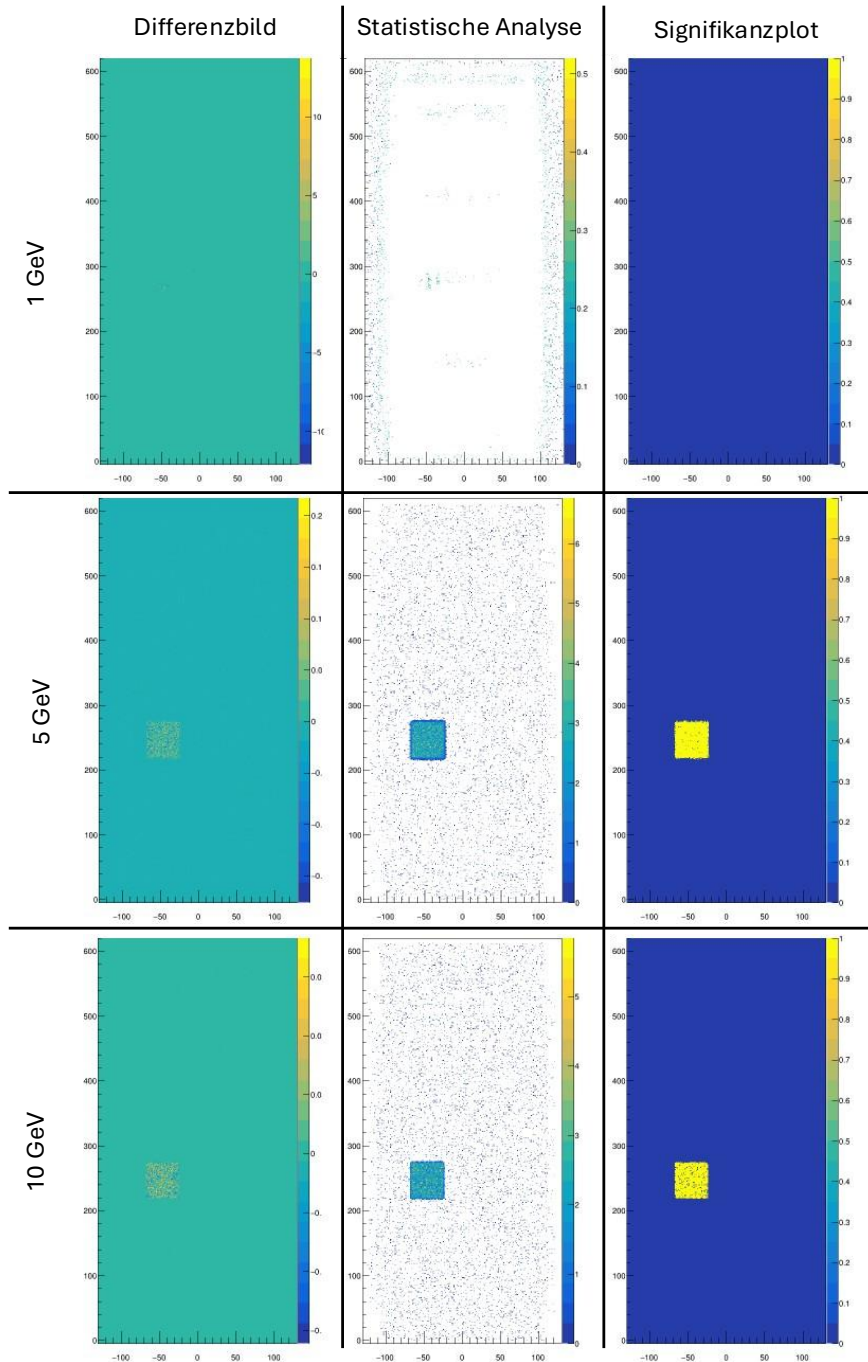


Abb. B.31 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (x-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

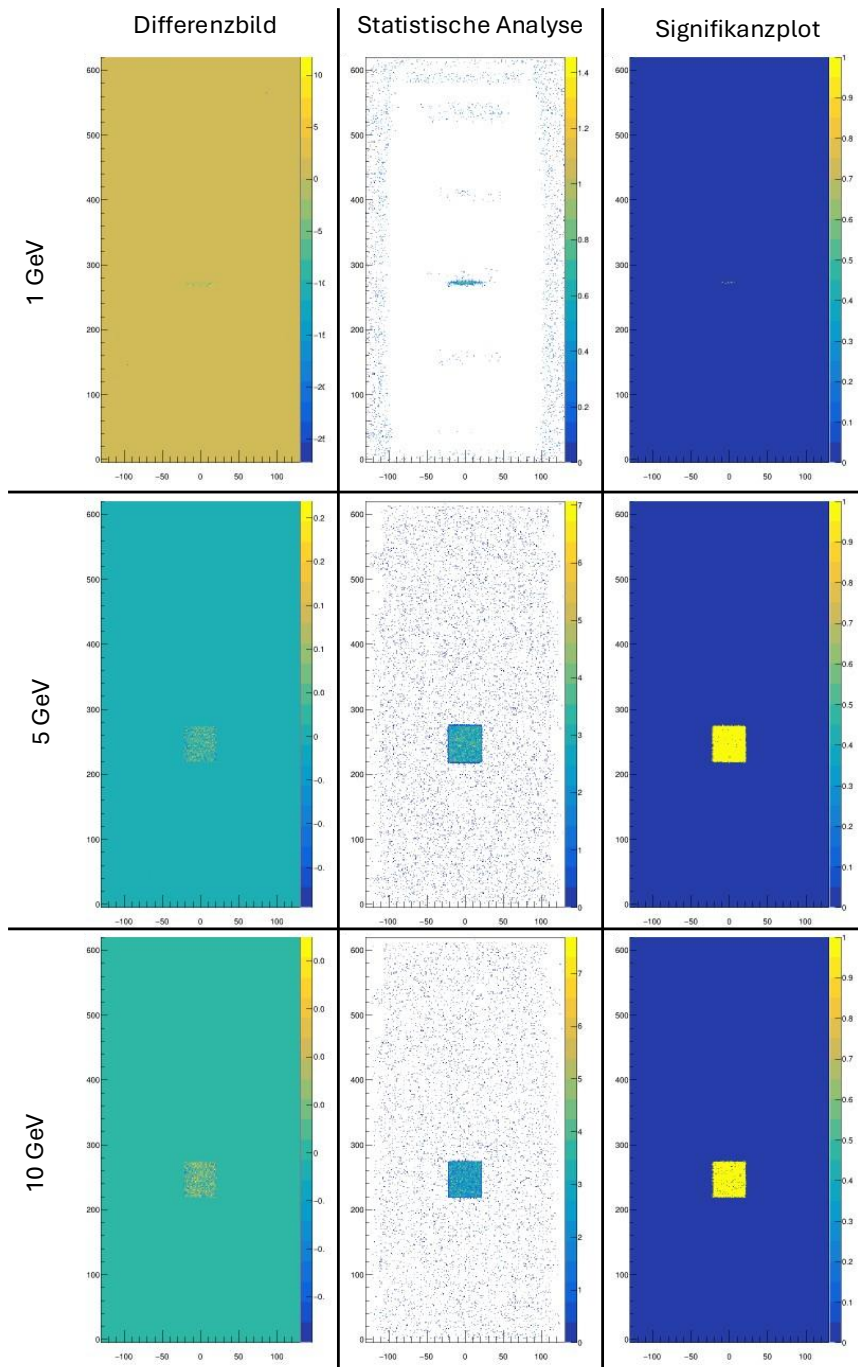


Abb. B.32 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (y -Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

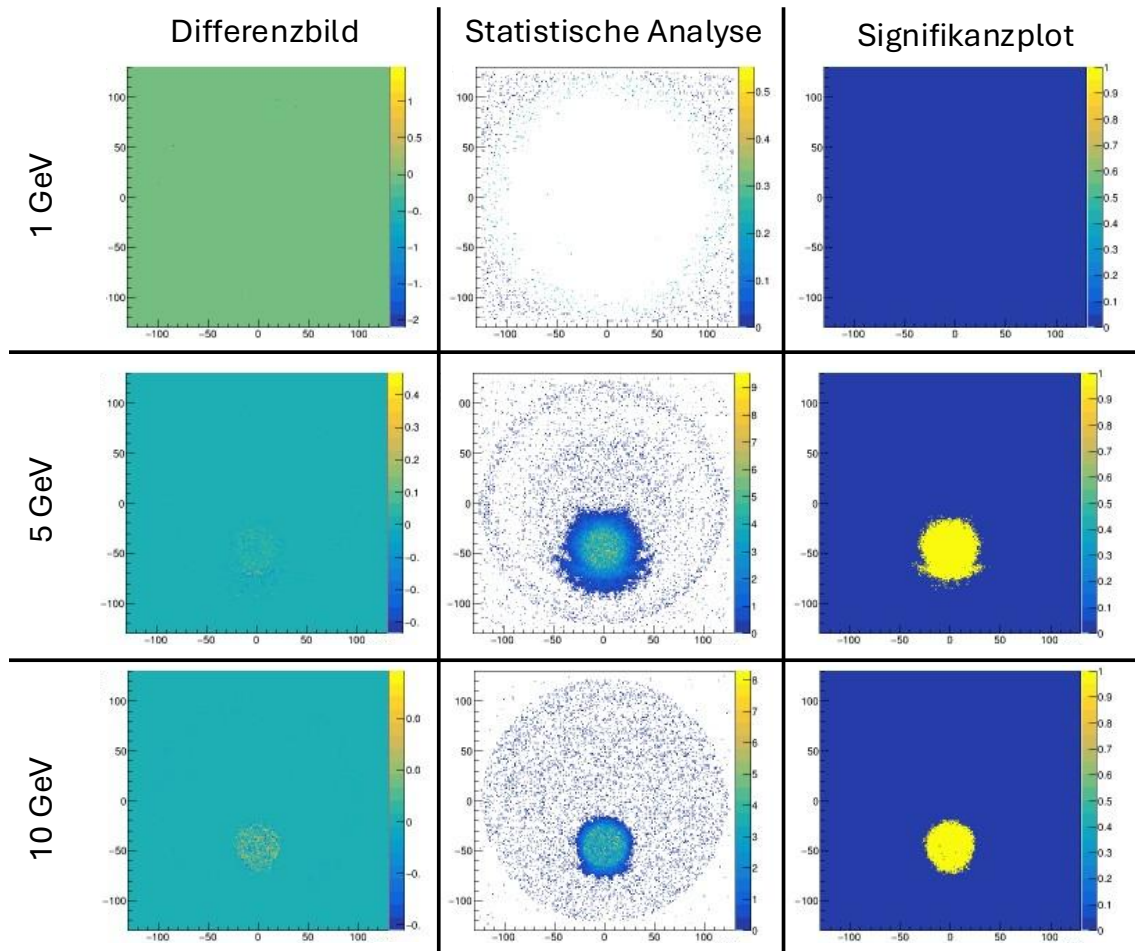


Abb. B.33 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (z-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

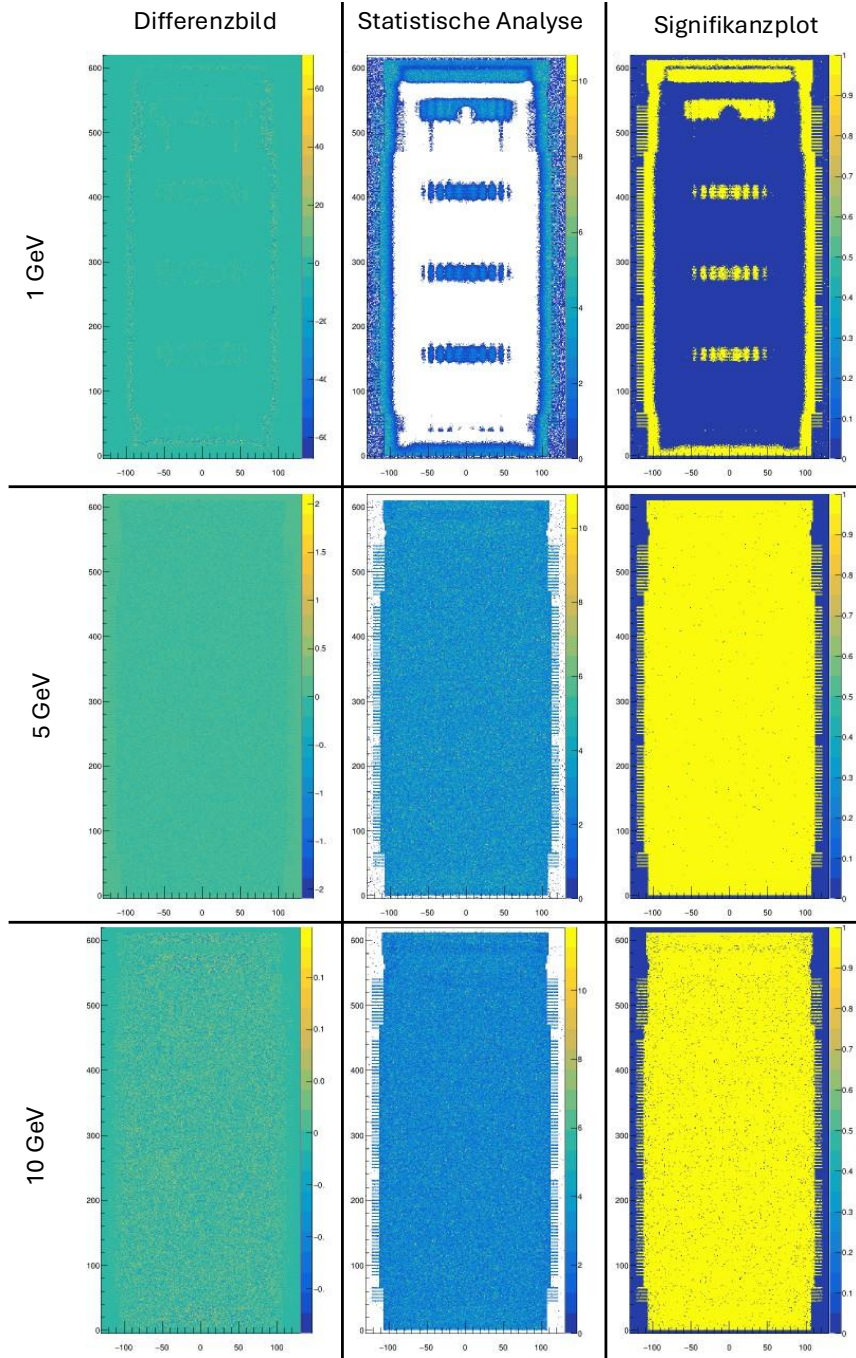


Abb. B.34 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (x-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

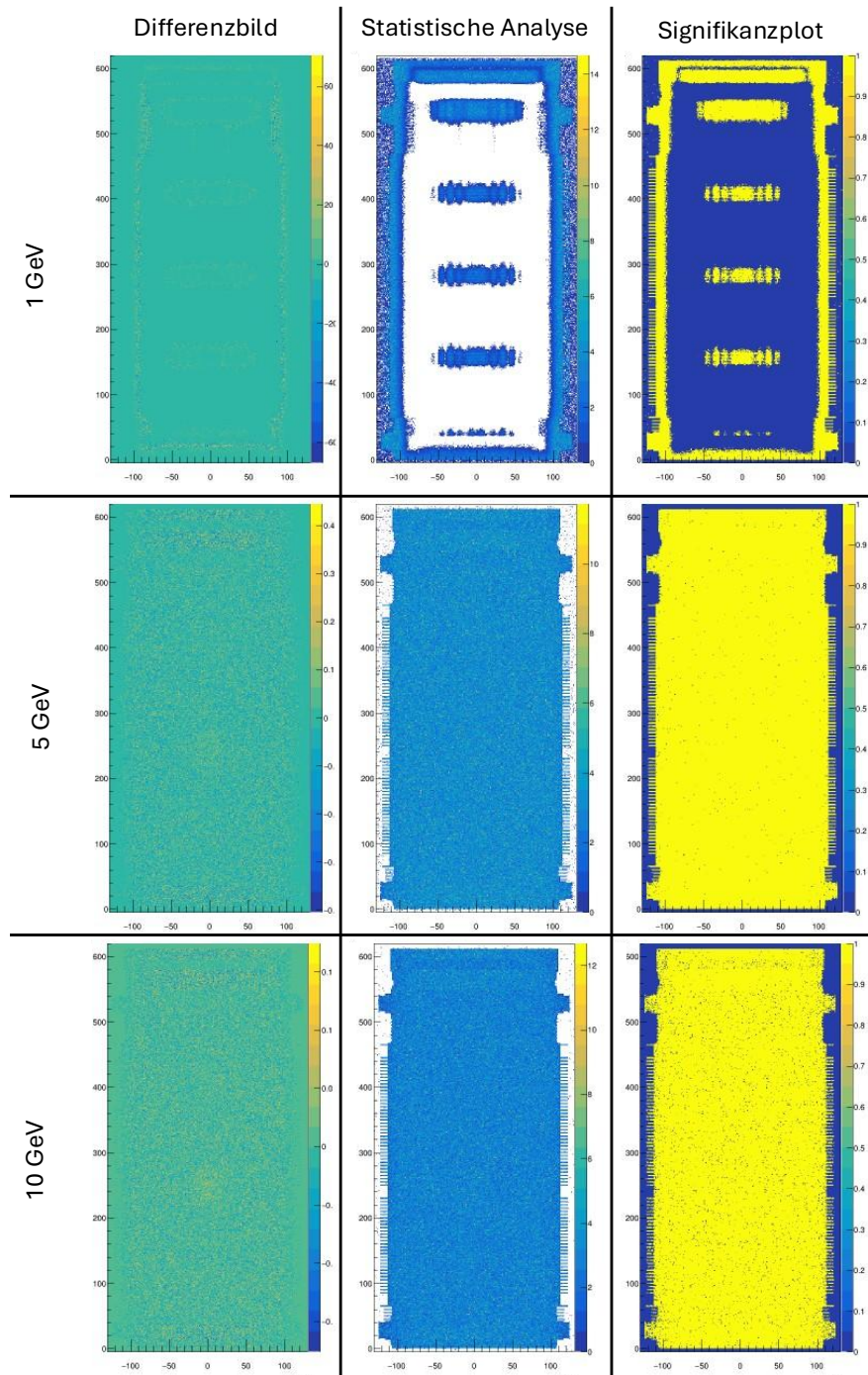


Abb. B.35 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (y -Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

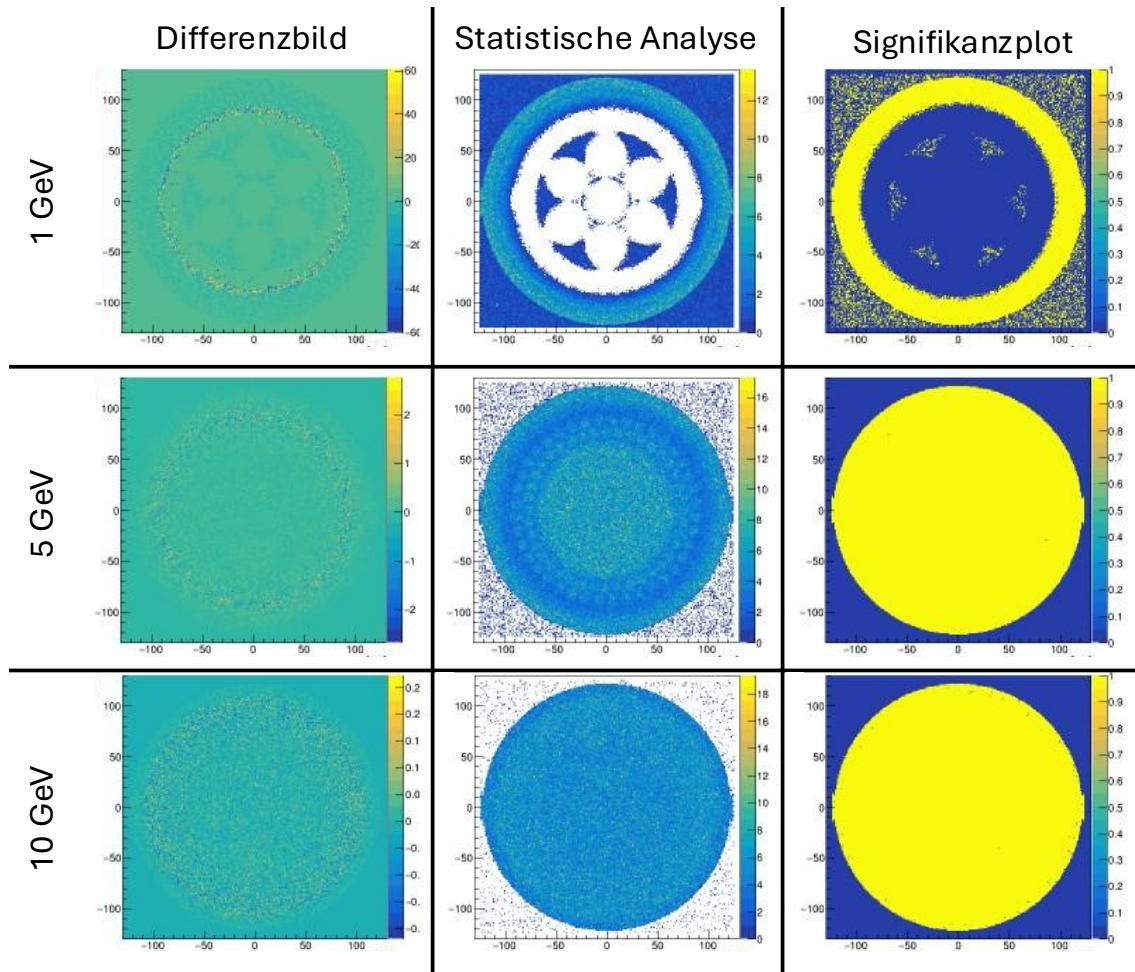


Abb. B.36 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 12 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (z-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

B.5 Simulationsergebnisse für Kokille mit ID 19 ohne Restverfüllung

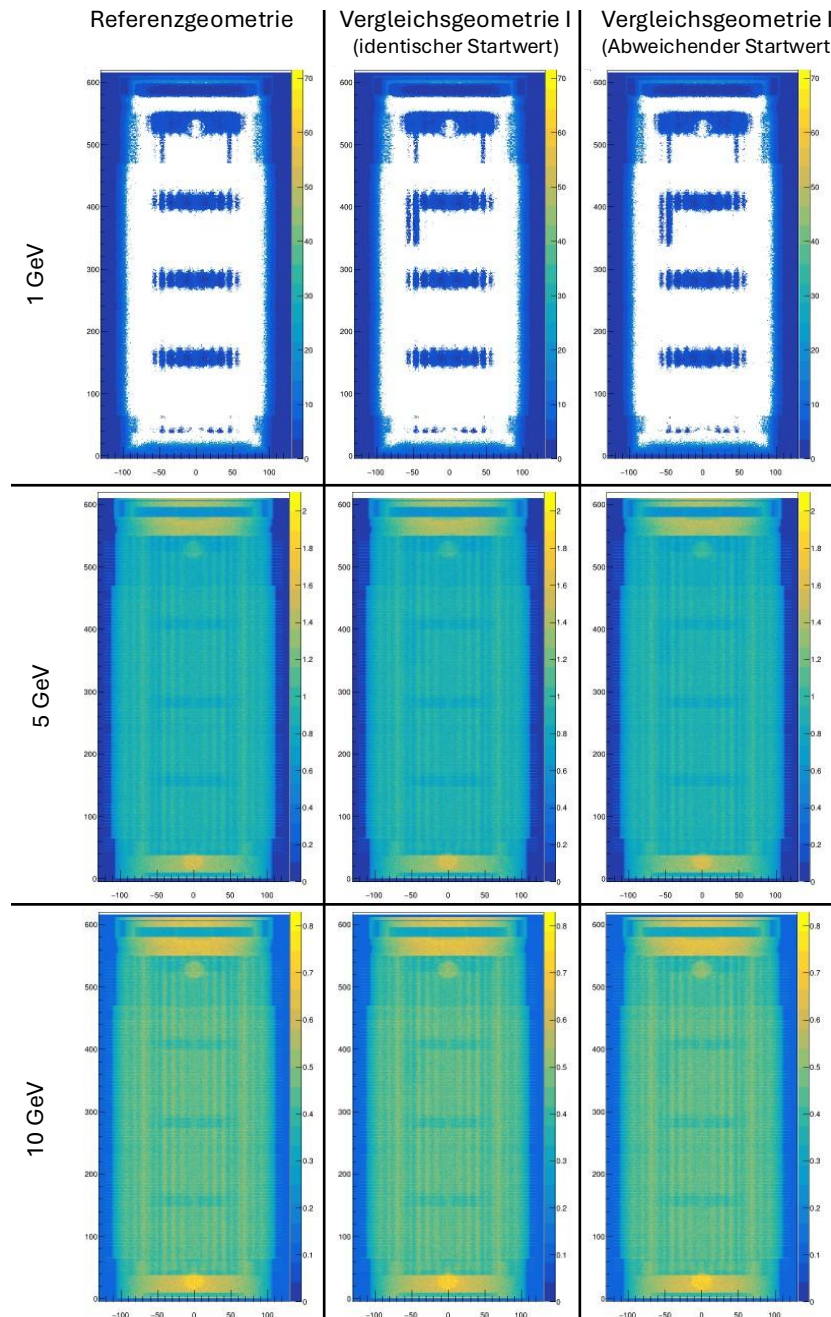


Abb. B.37 Projektionsbilder in der (x,z)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 19 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (x-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

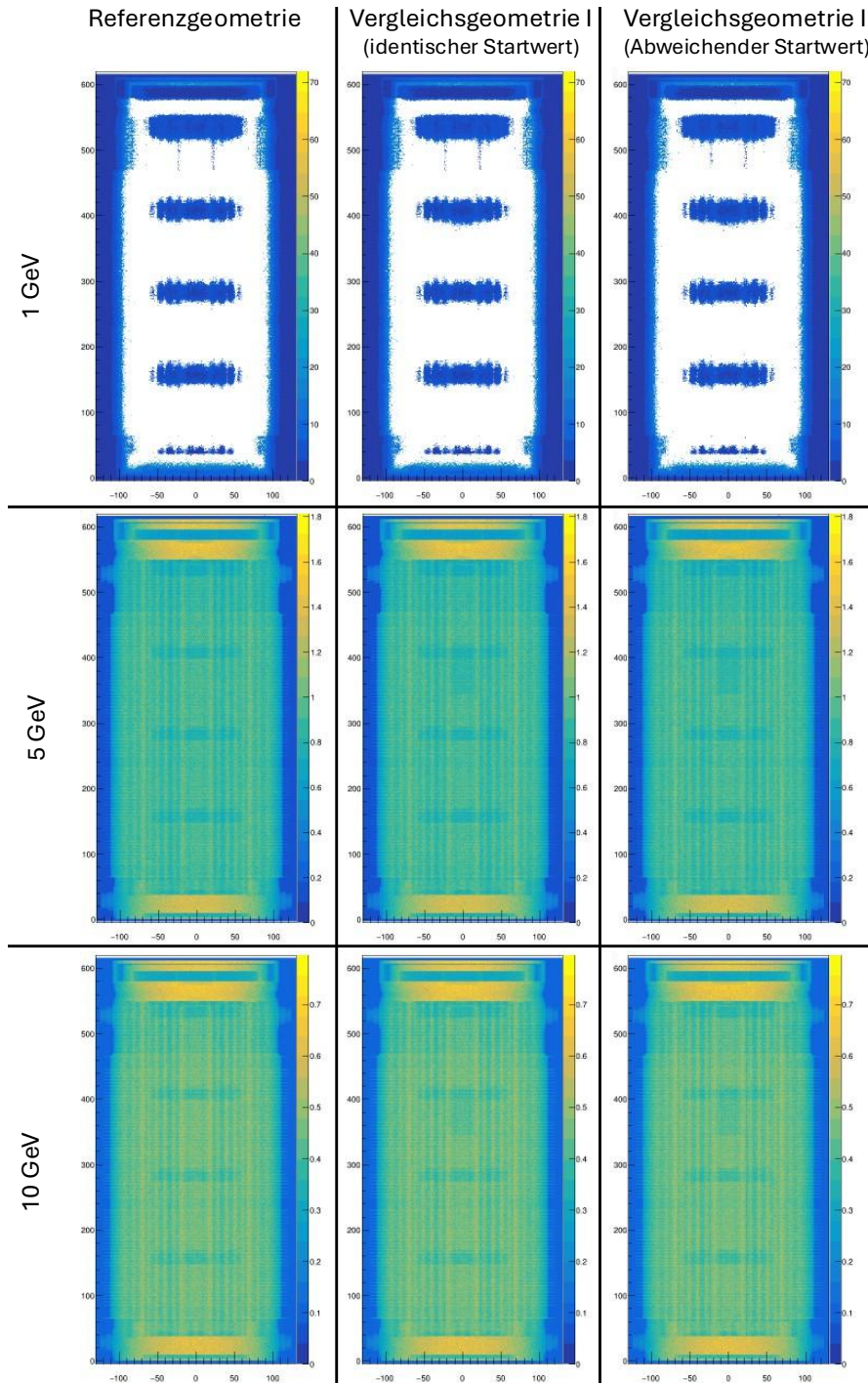


Abb. B.38 Projektionsbilder in der (y,z) -Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 19 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (y -Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

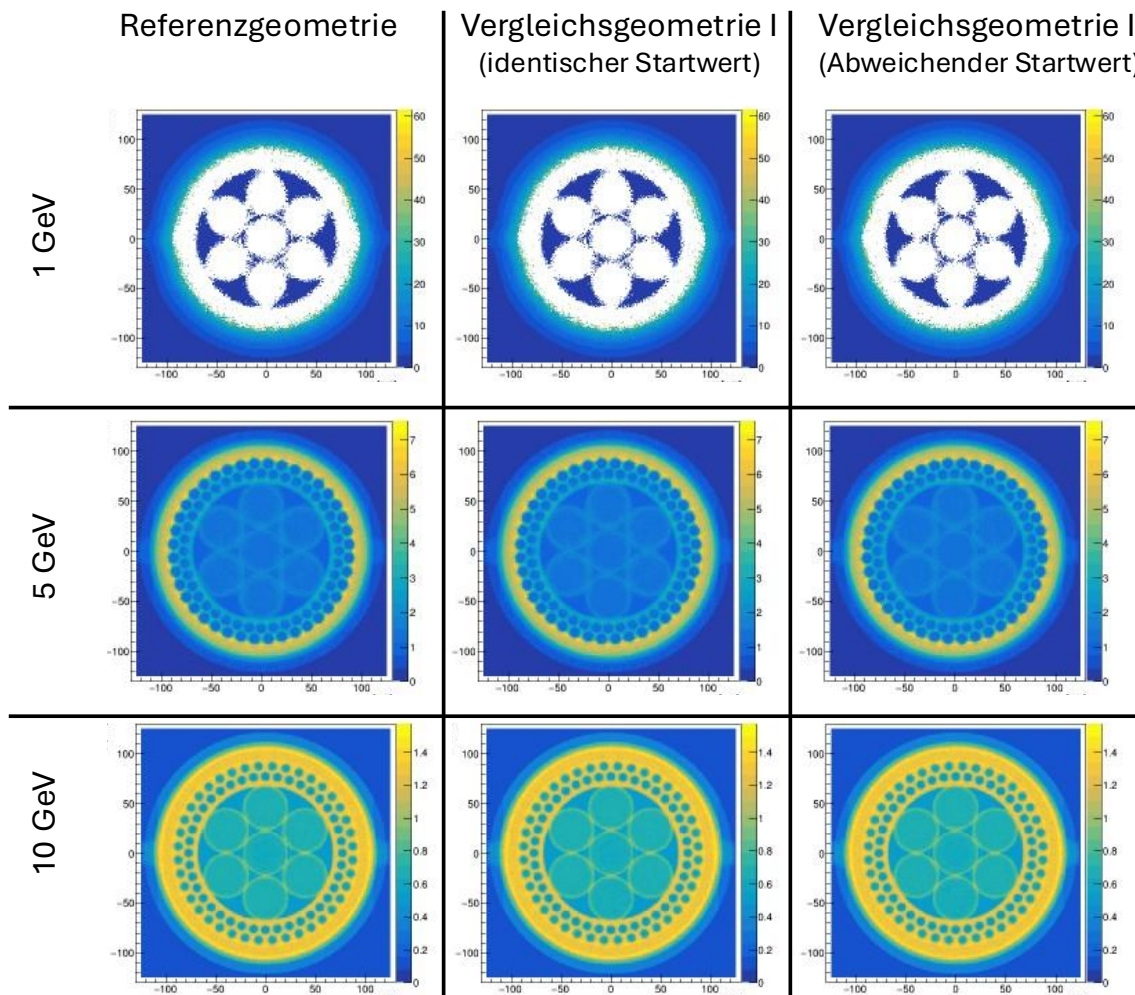


Abb. B.39 Projektionsbilder in der (x,y)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 19 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (z-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

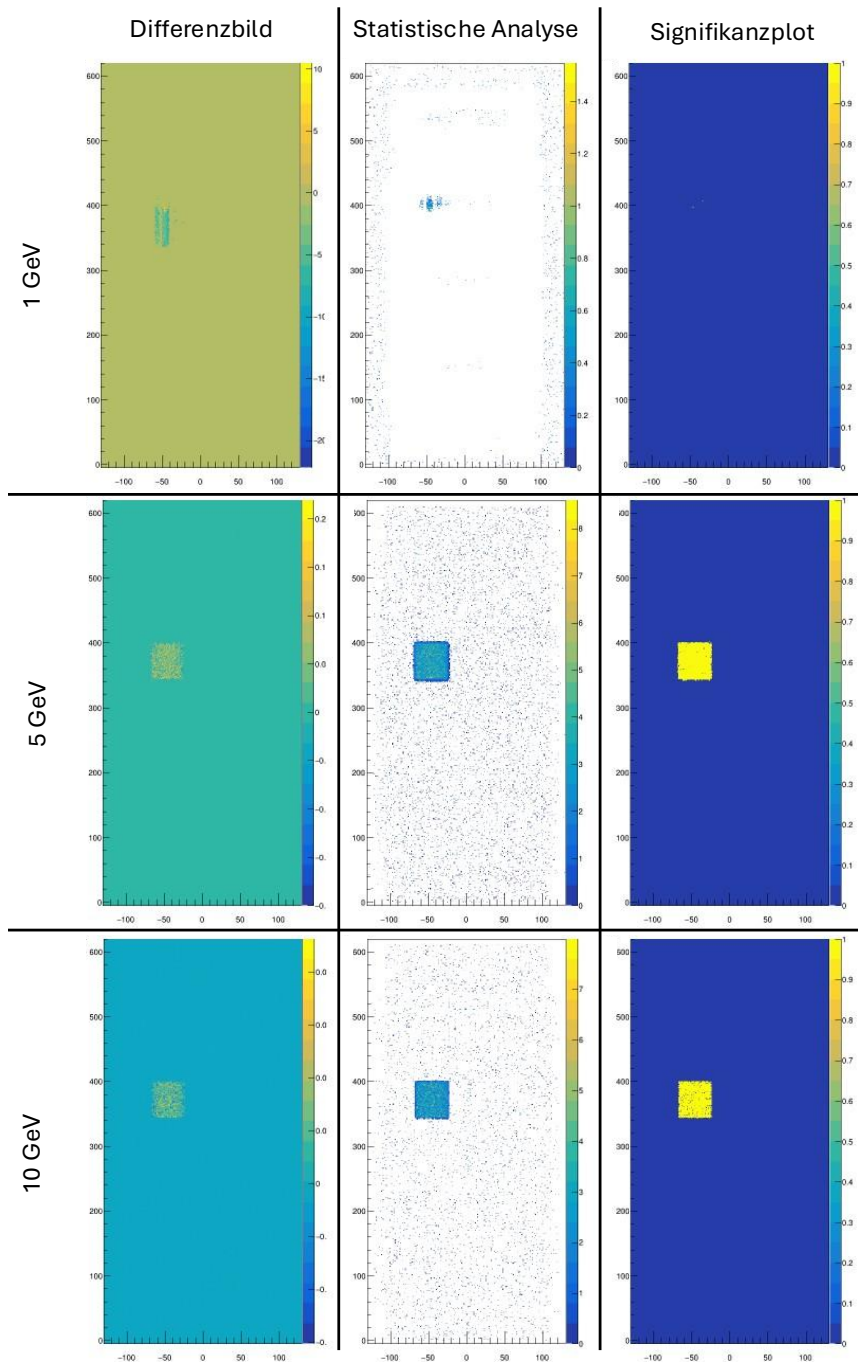


Abb. B.40 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 19 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (x-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

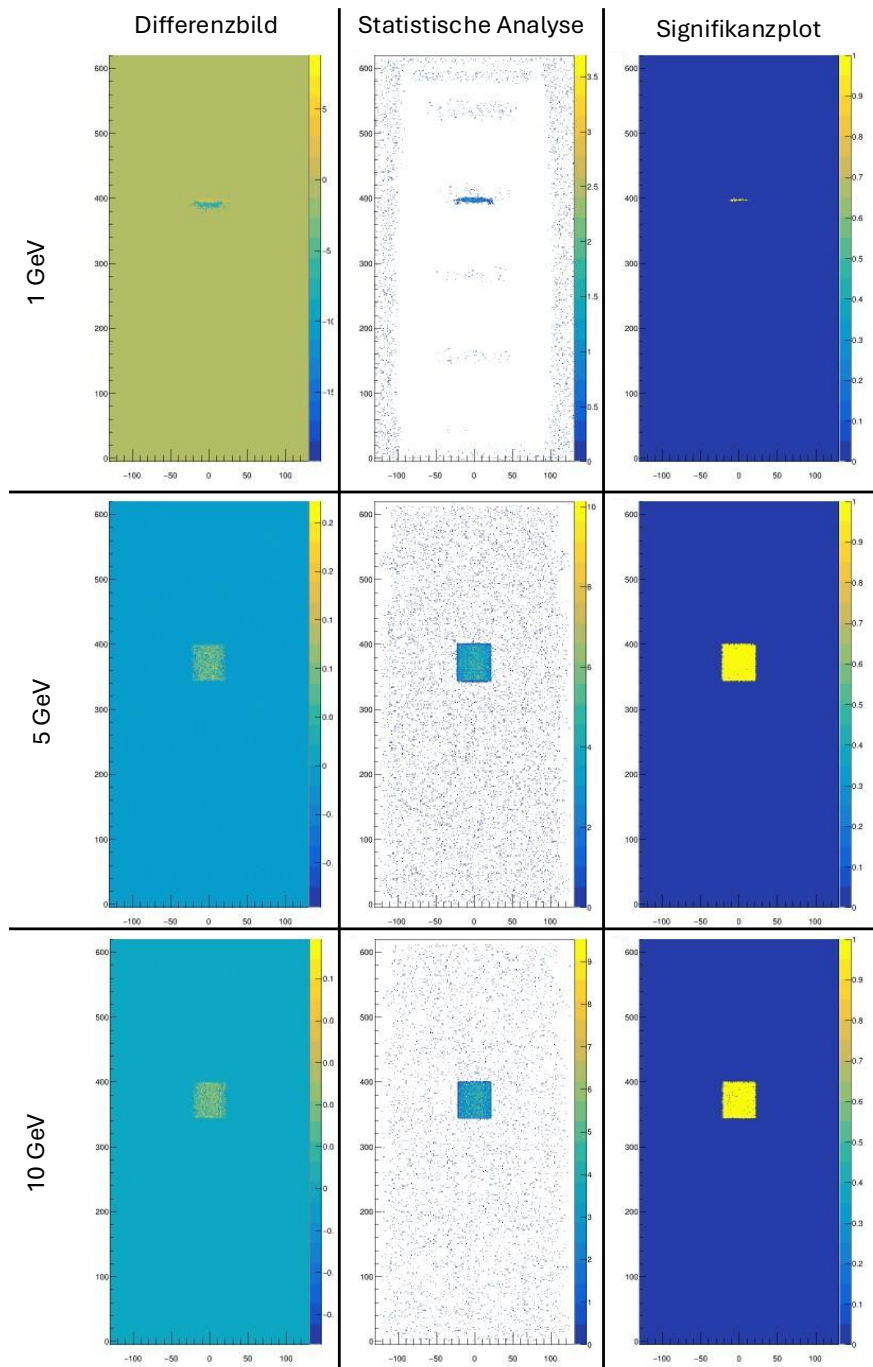


Abb. B.41 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 19 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (y-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

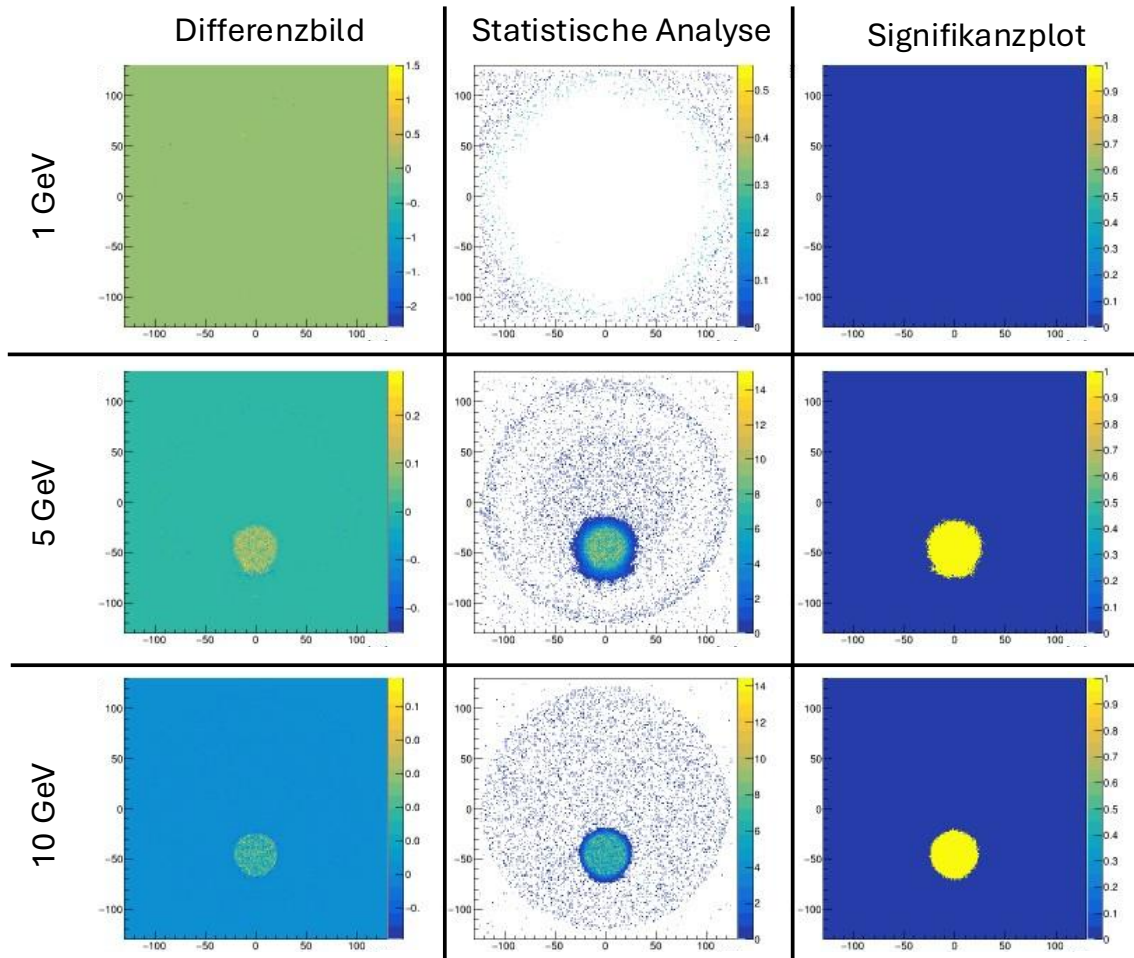


Abb. B.42 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 19 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (z-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

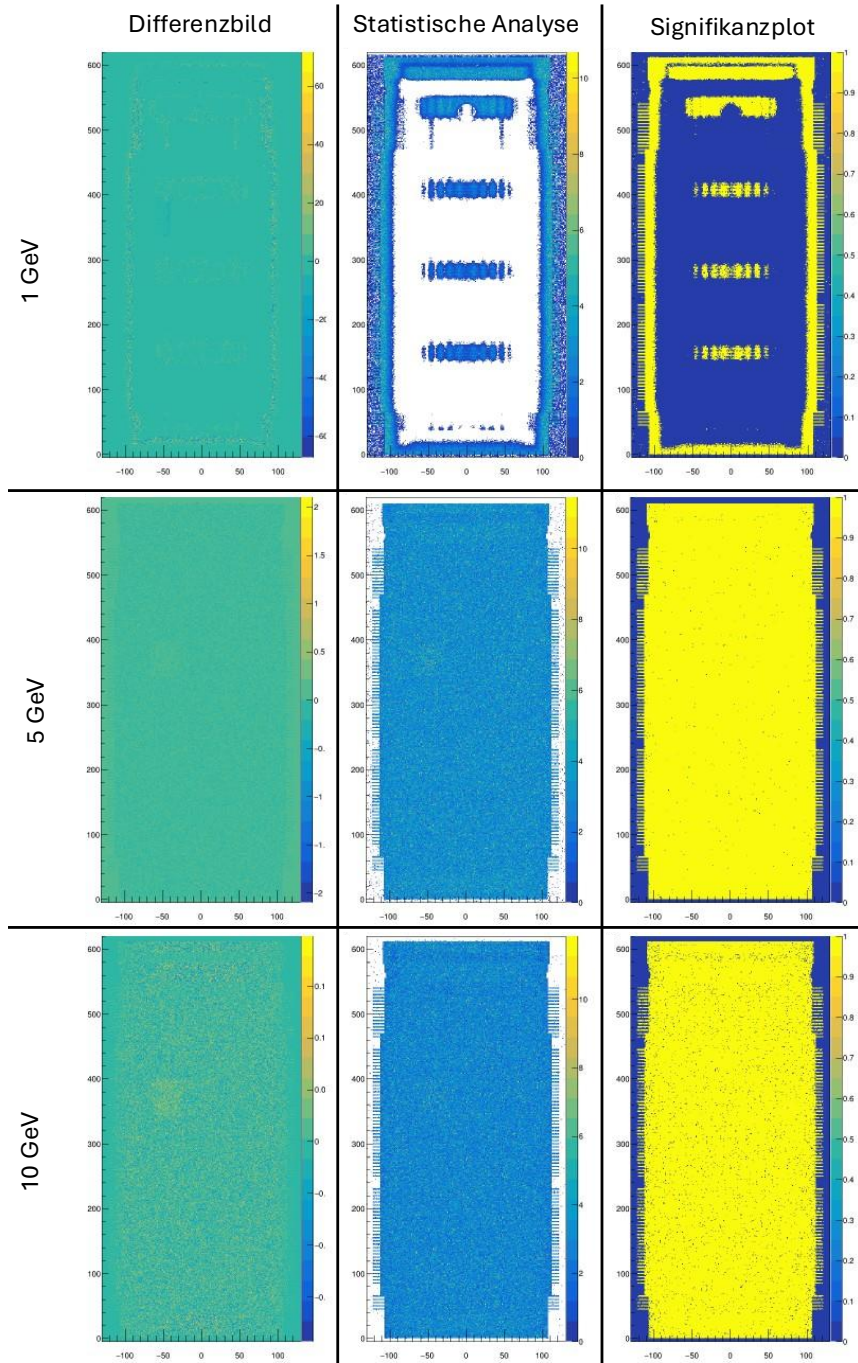


Abb. B.43 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 19 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (x-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

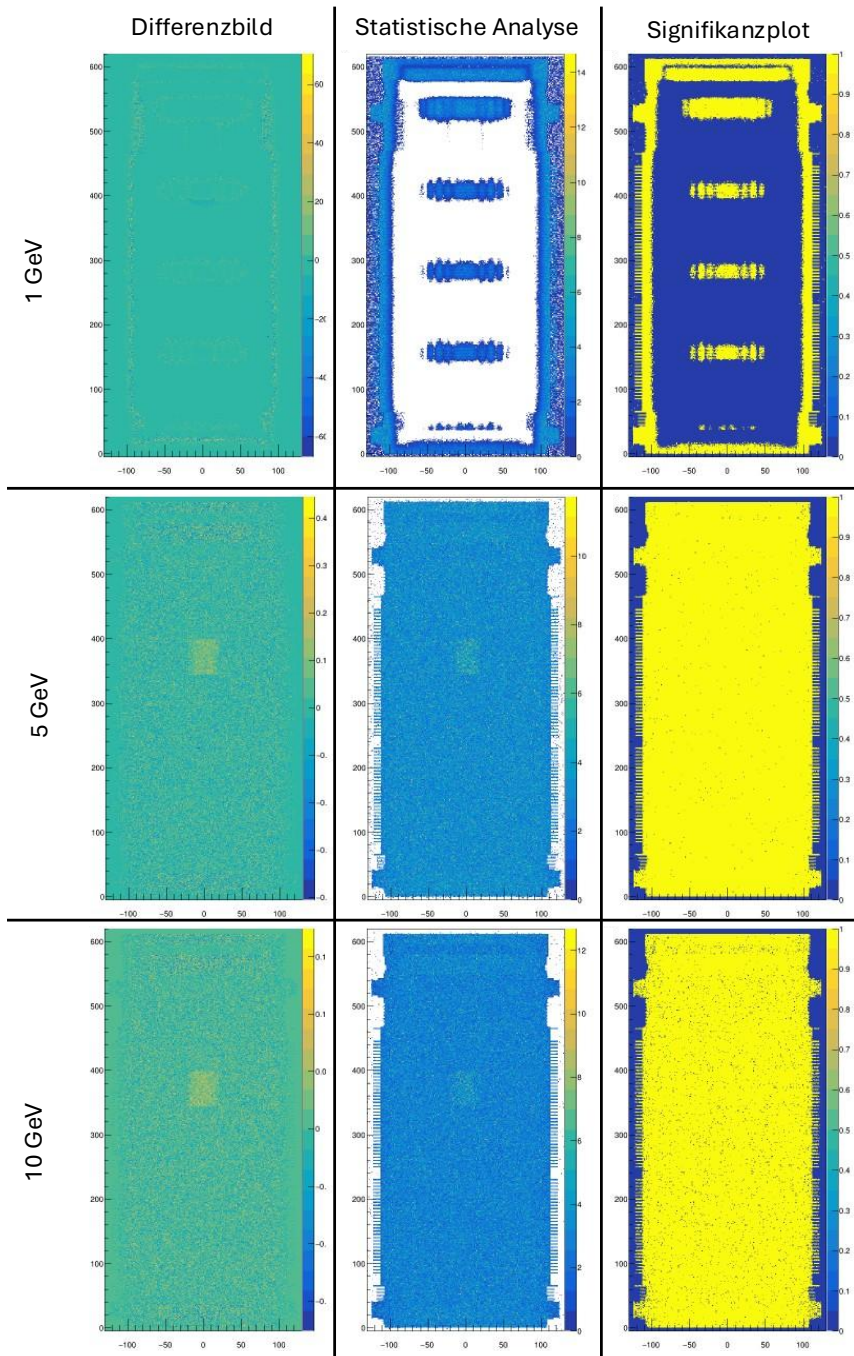


Abb. B.44 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 19 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (y-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

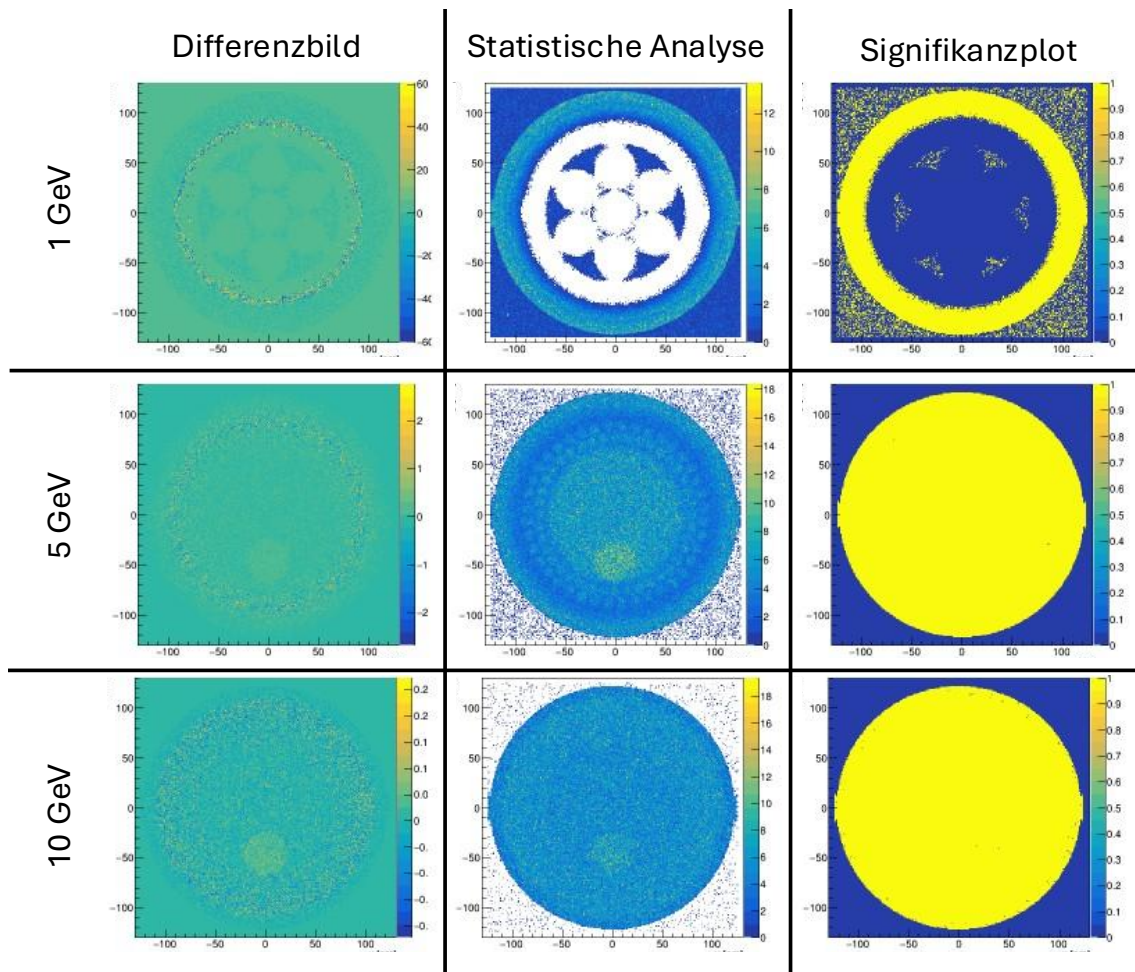


Abb. B.45 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 19 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (z-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

B.6 Simulationsergebnisse für Kokille mit ID 19 mit Restverfüllung

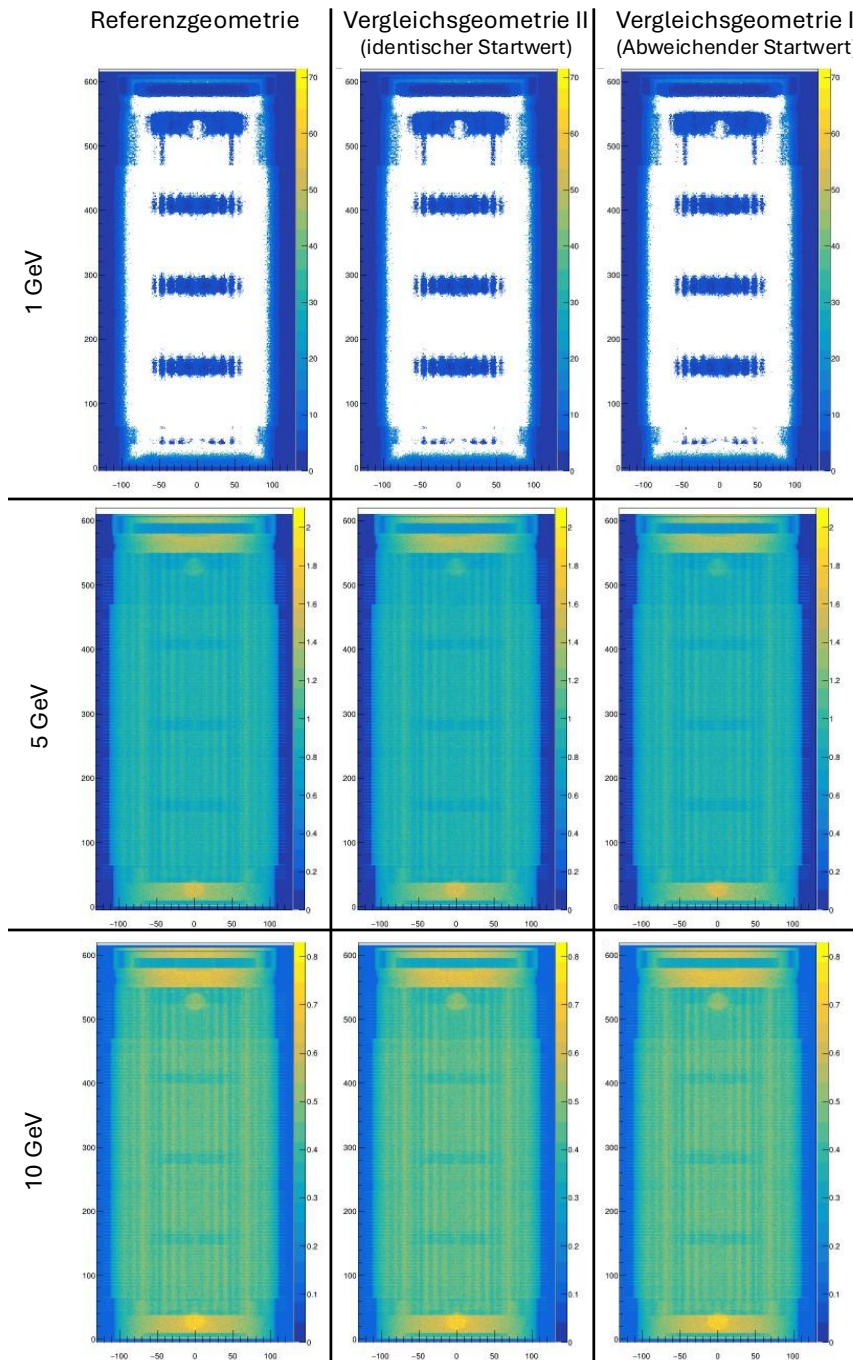


Abb. B.46 Projektionsbilder in der (x,z)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 19 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (x-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

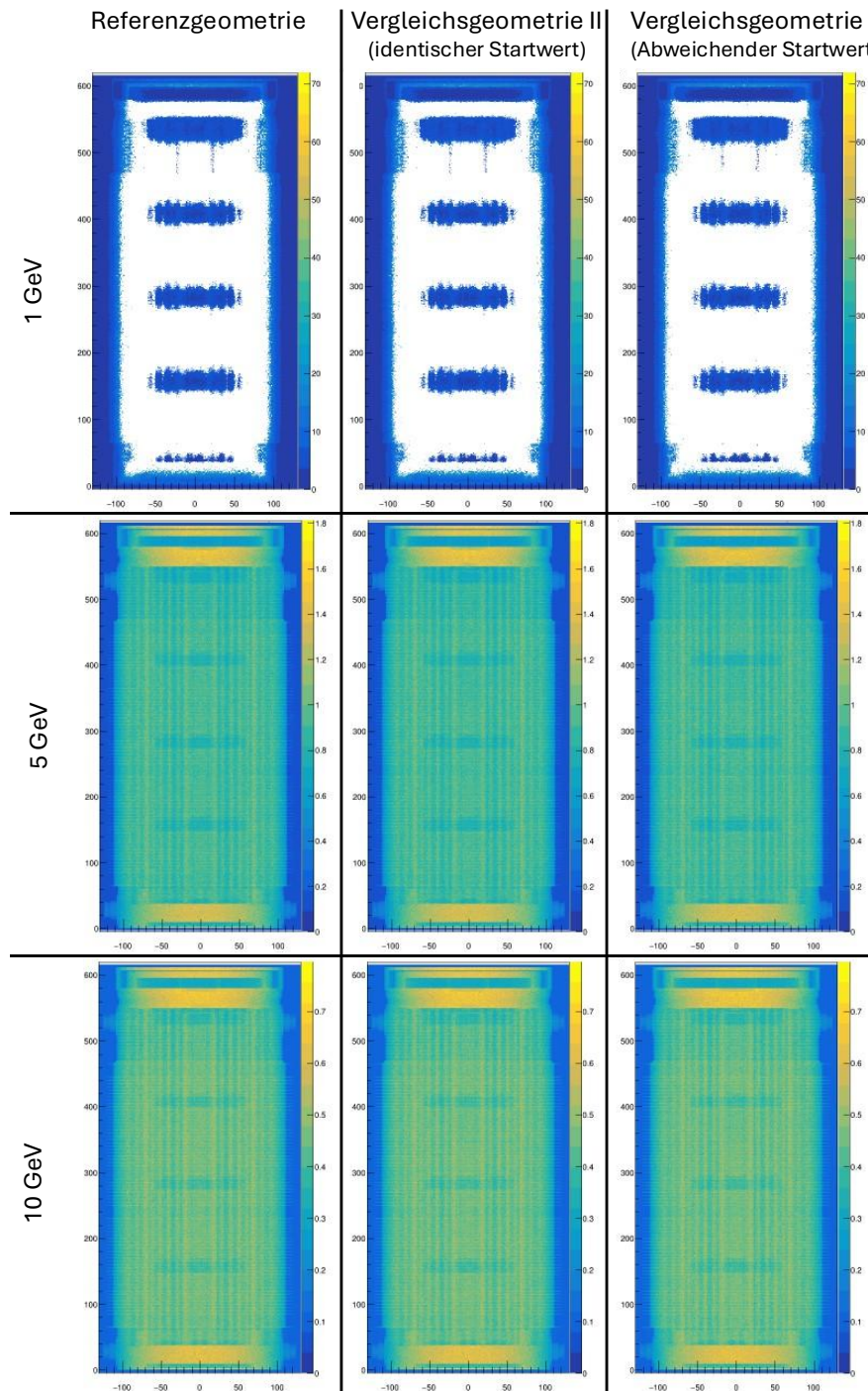


Abb. B.47 Projektionsbilder in der (y,z) -Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 19 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (y -Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

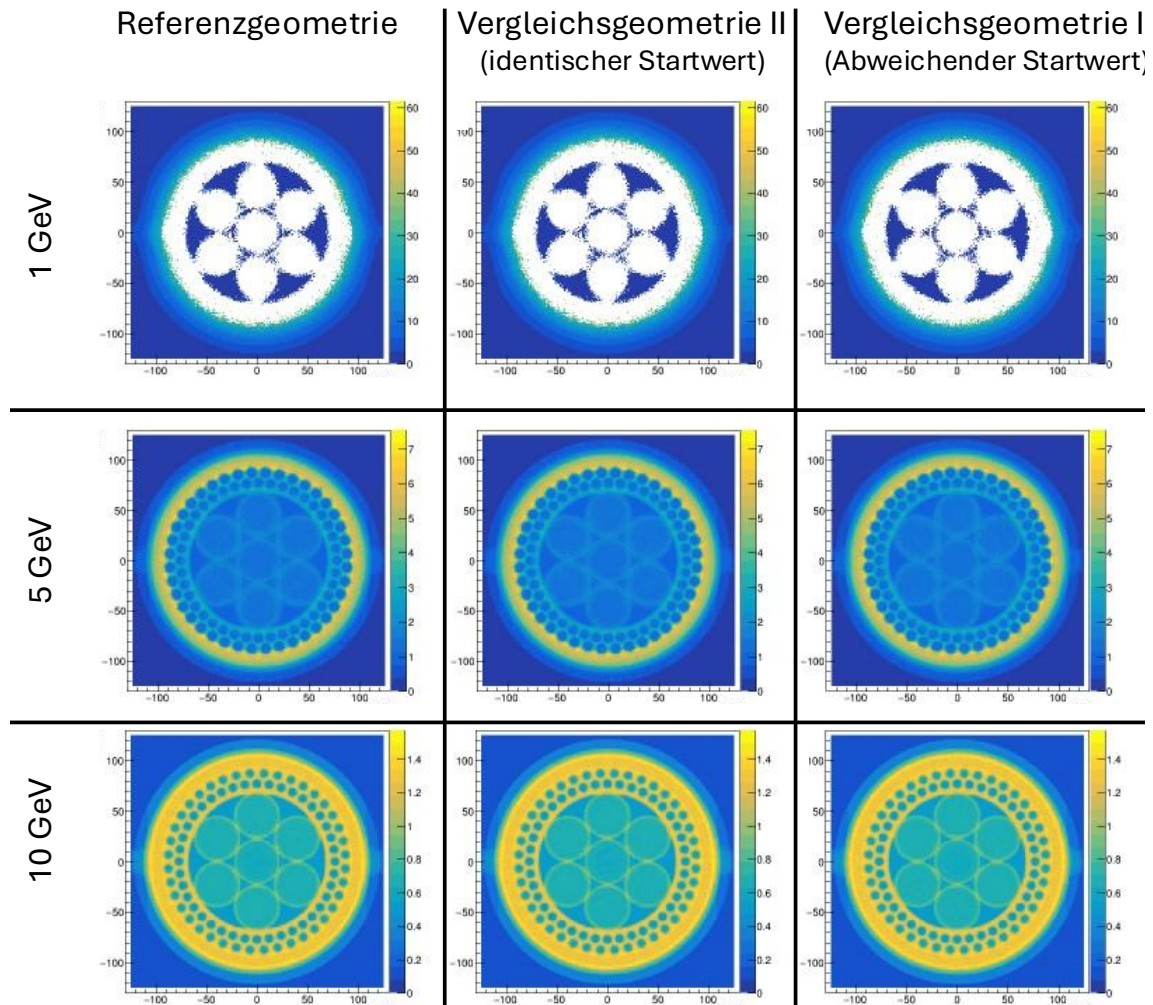


Abb. B.48 Projektionsbilder in der (x,y)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 19 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (z-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

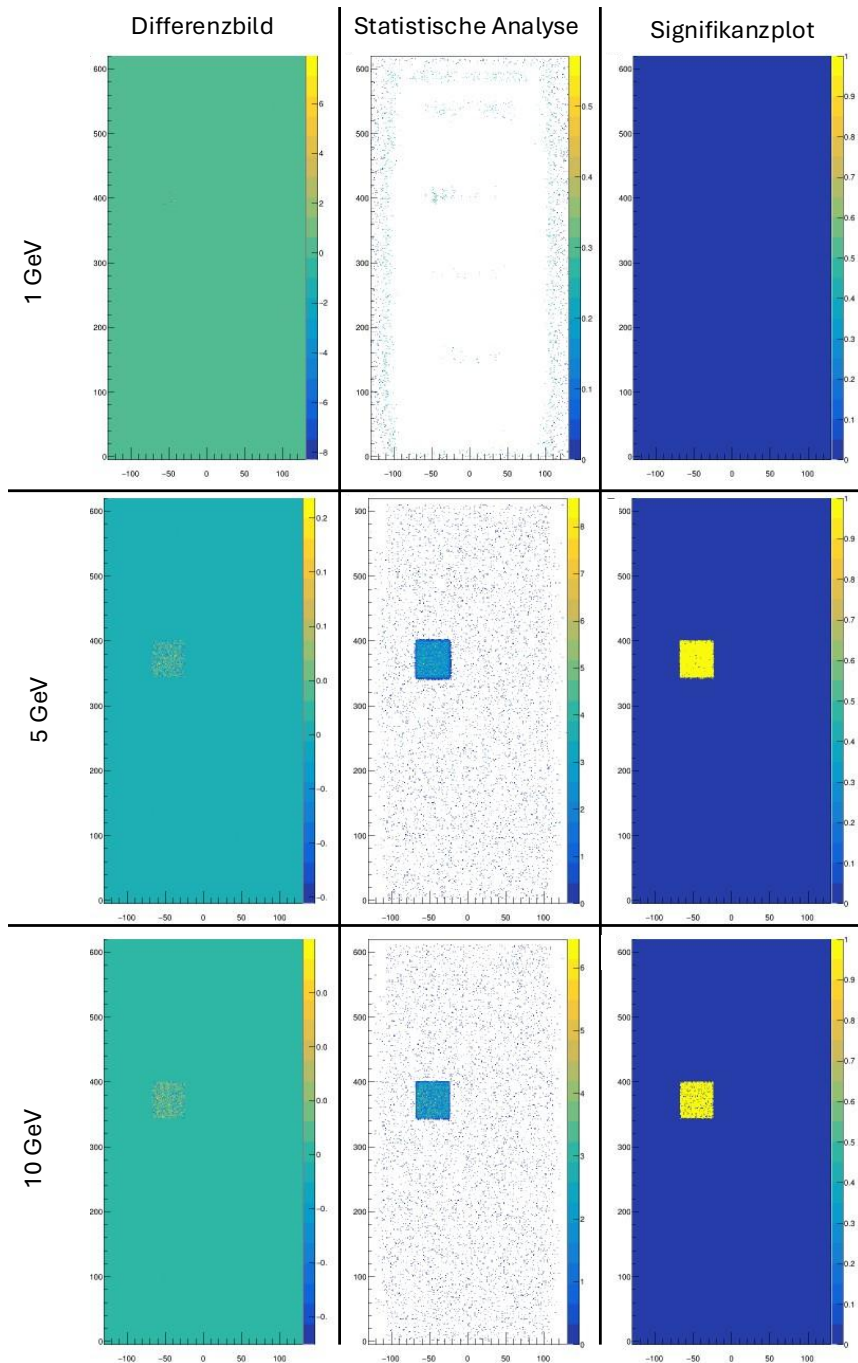


Abb. B.49 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 19 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (x-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

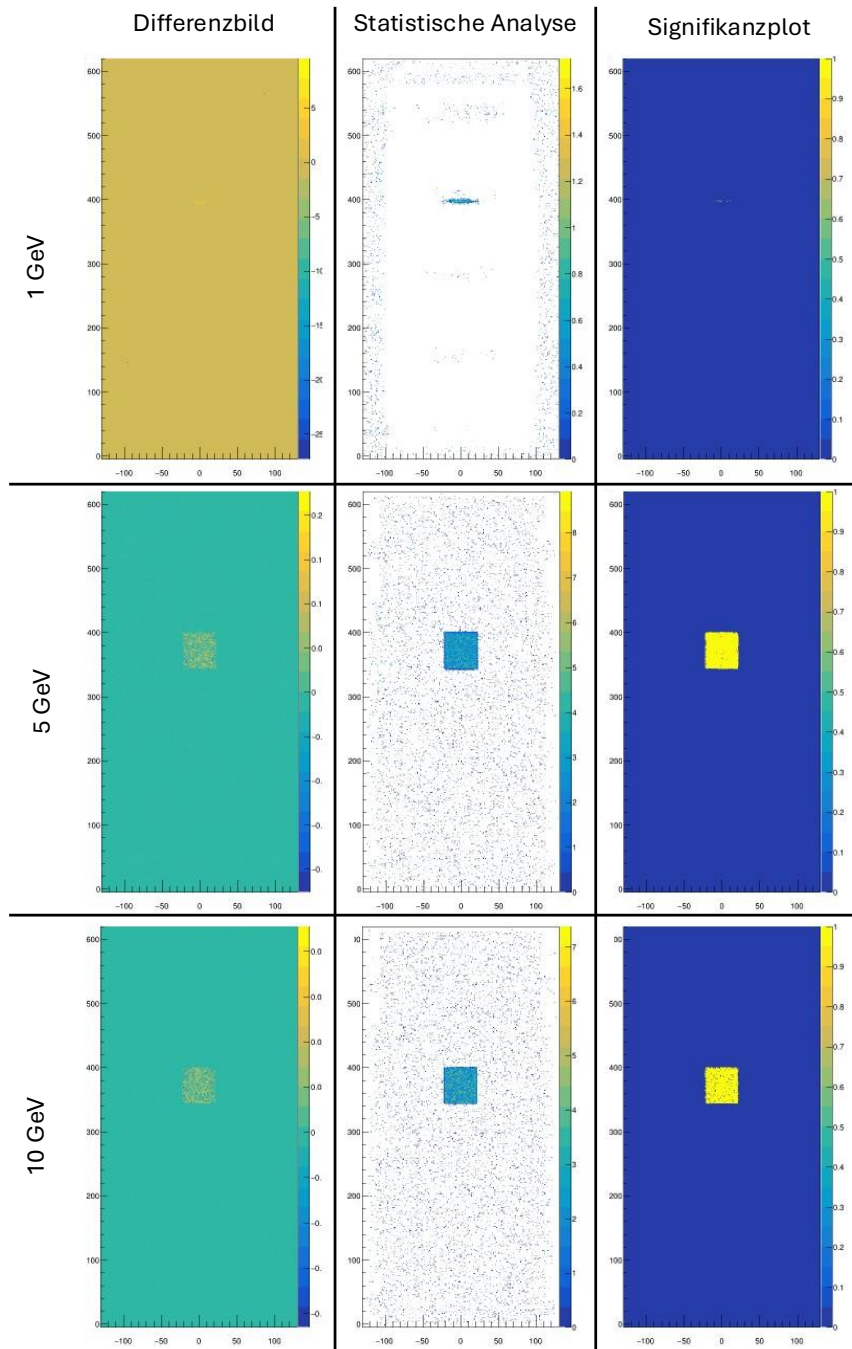


Abb. B.50 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 19 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (y-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

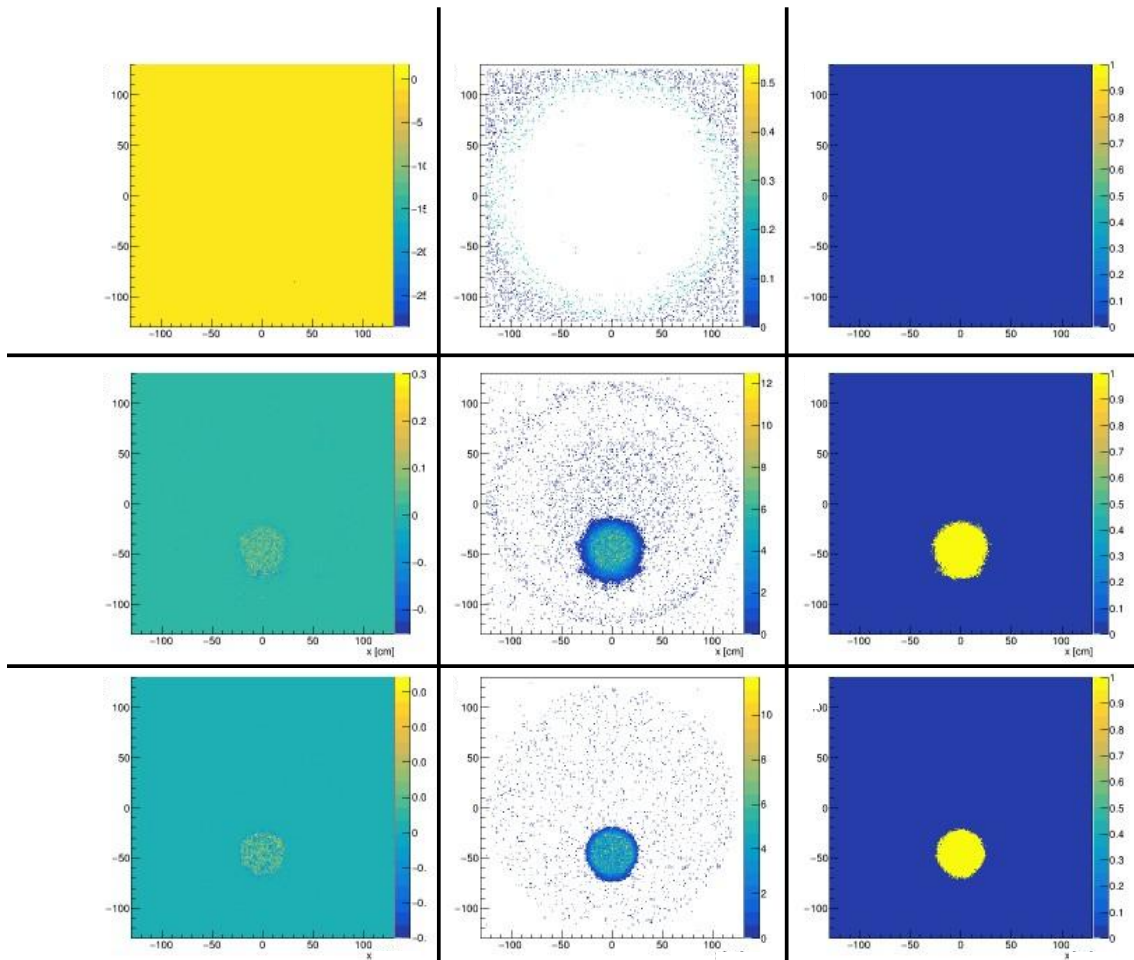


Abb. B.51 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 19 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (z-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

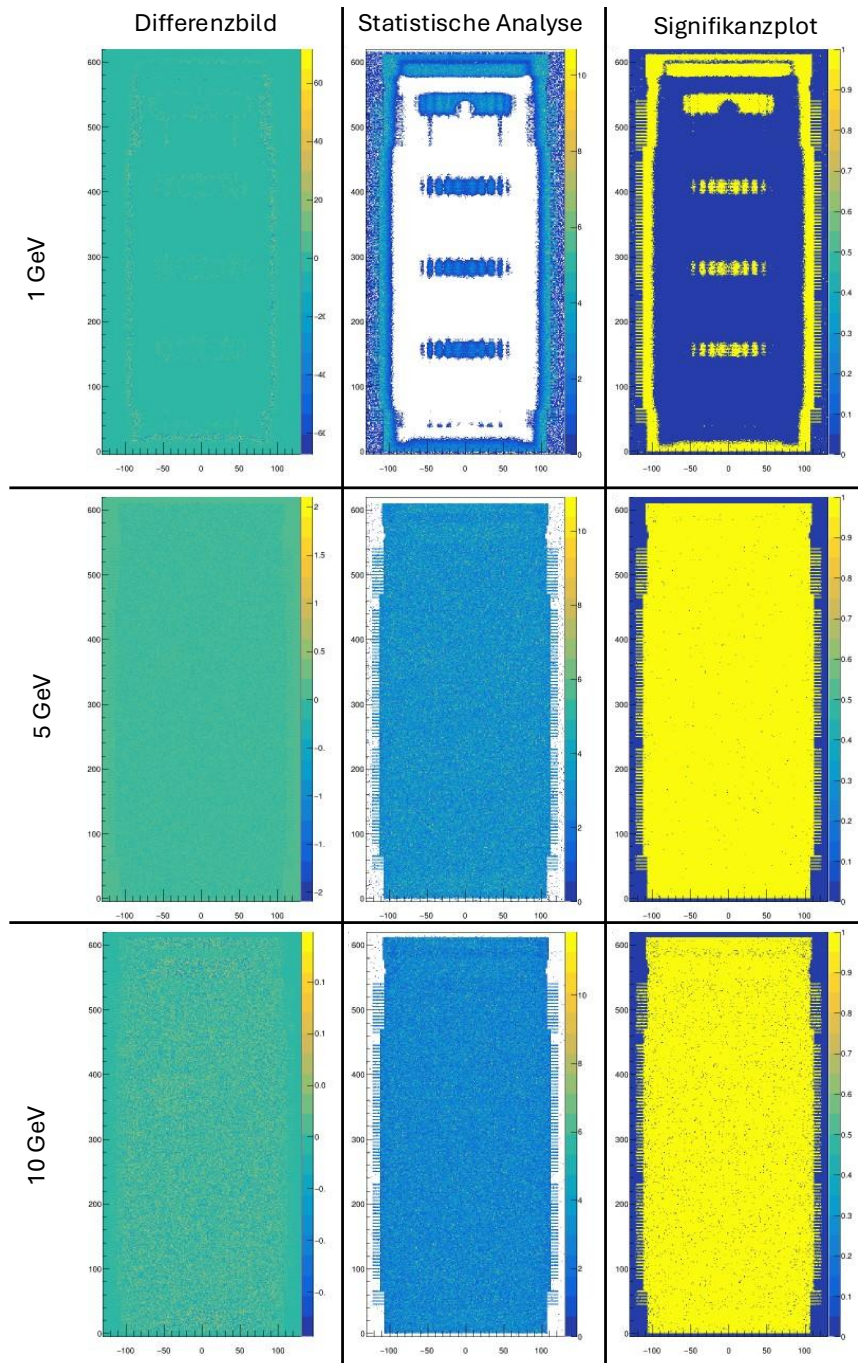


Abb. B.52 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 19 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (x-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

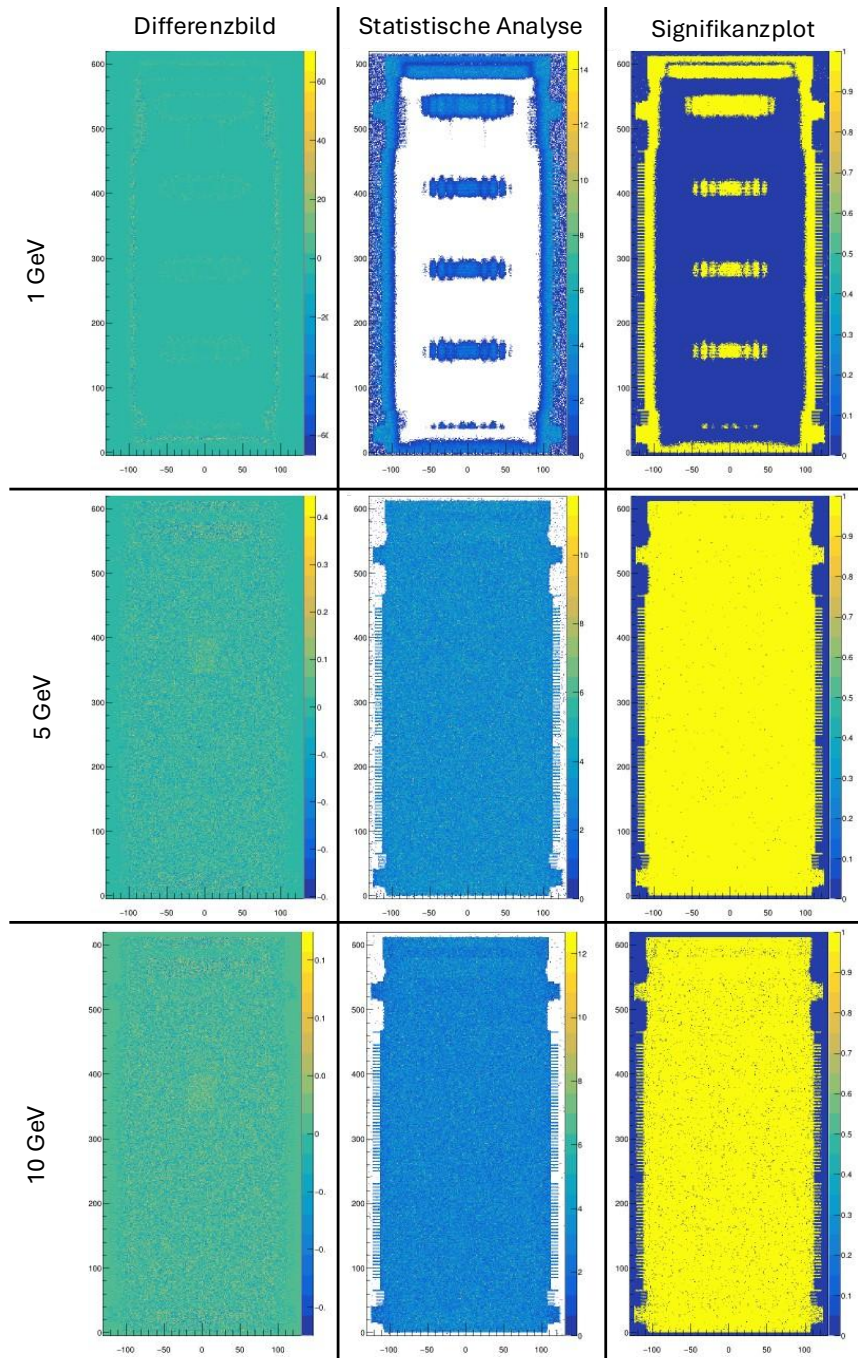


Abb. B.53 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 19 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (y-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

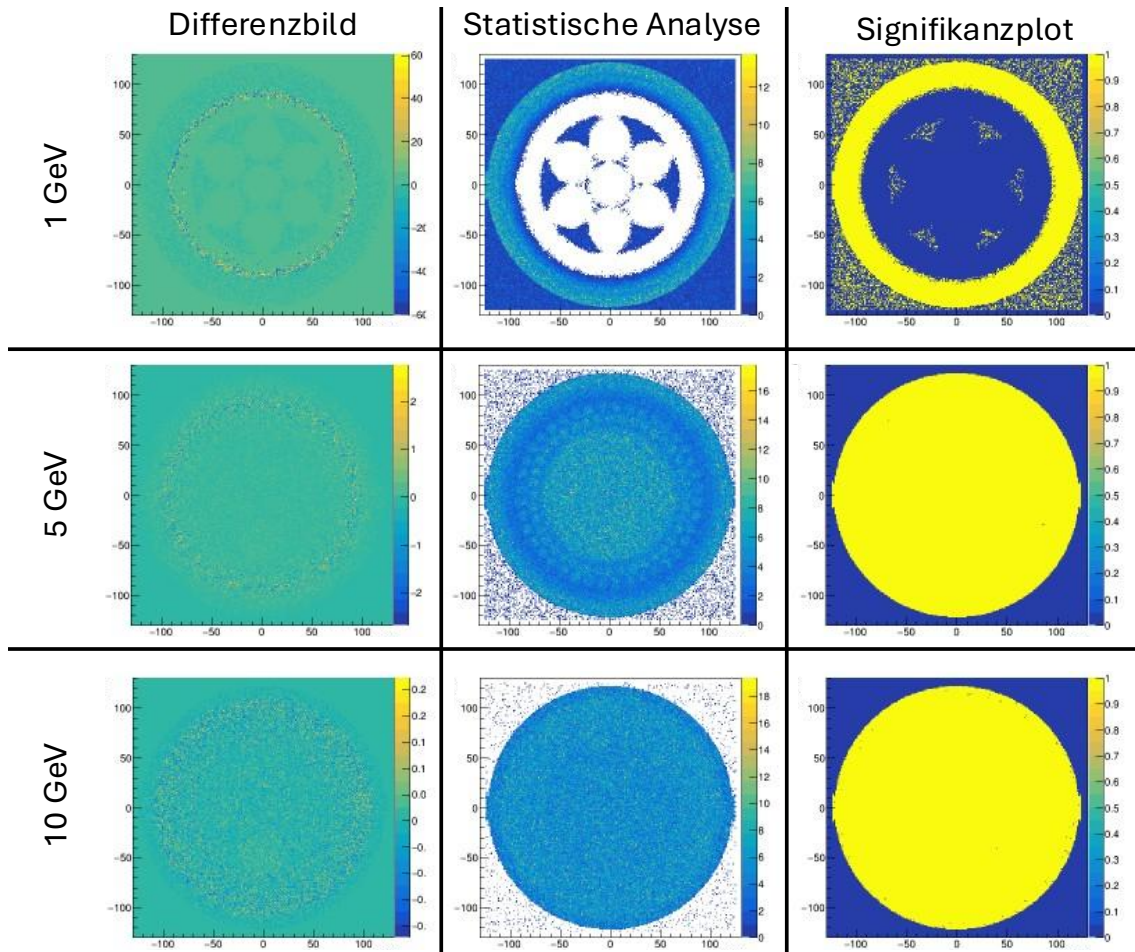


Abb. B.54 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 19 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (z-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

B.7 Simulationsergebnisse für Kokille mit ID 26 ohne Restverfüllung

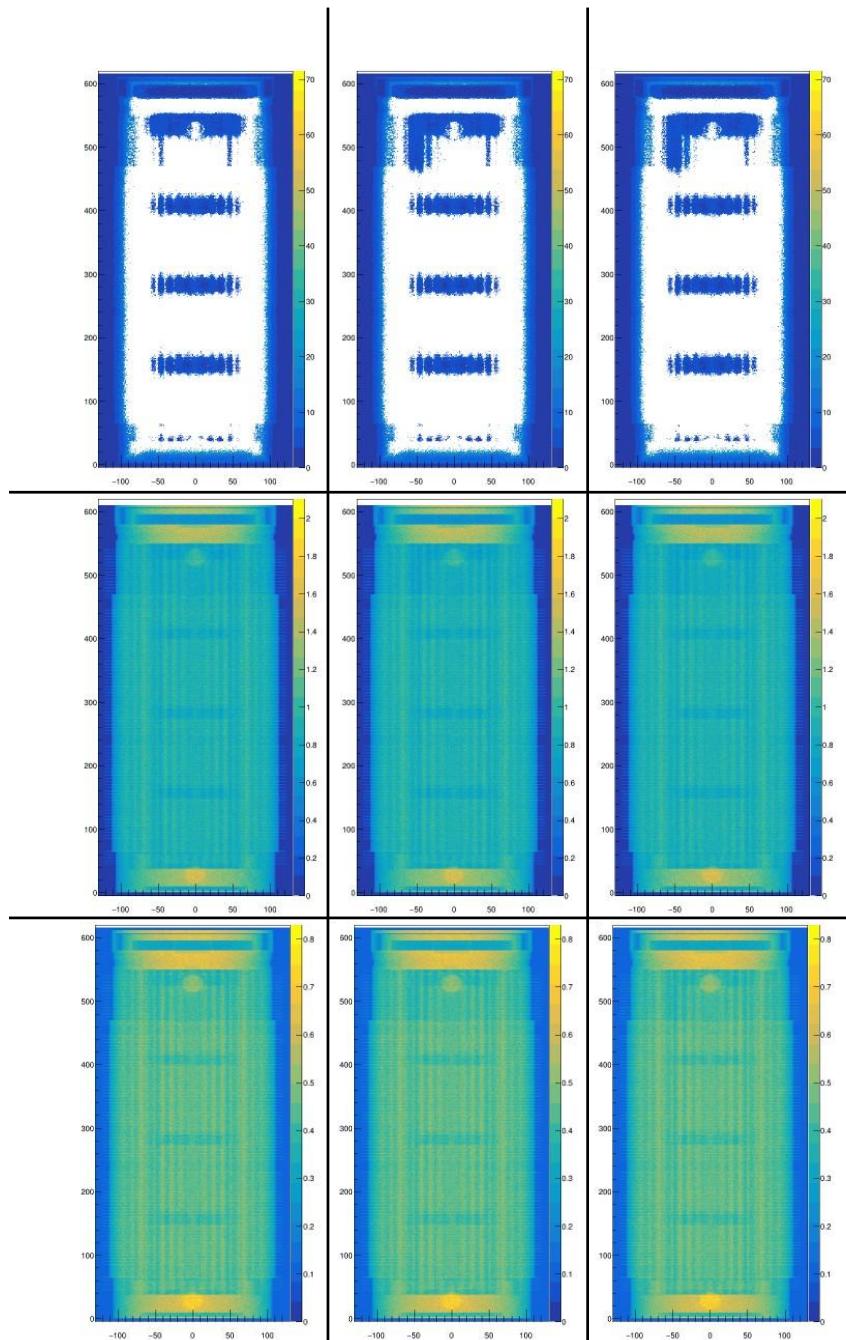


Abb. B.55 Projektionsbilder in der (x,z)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 26 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (x-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

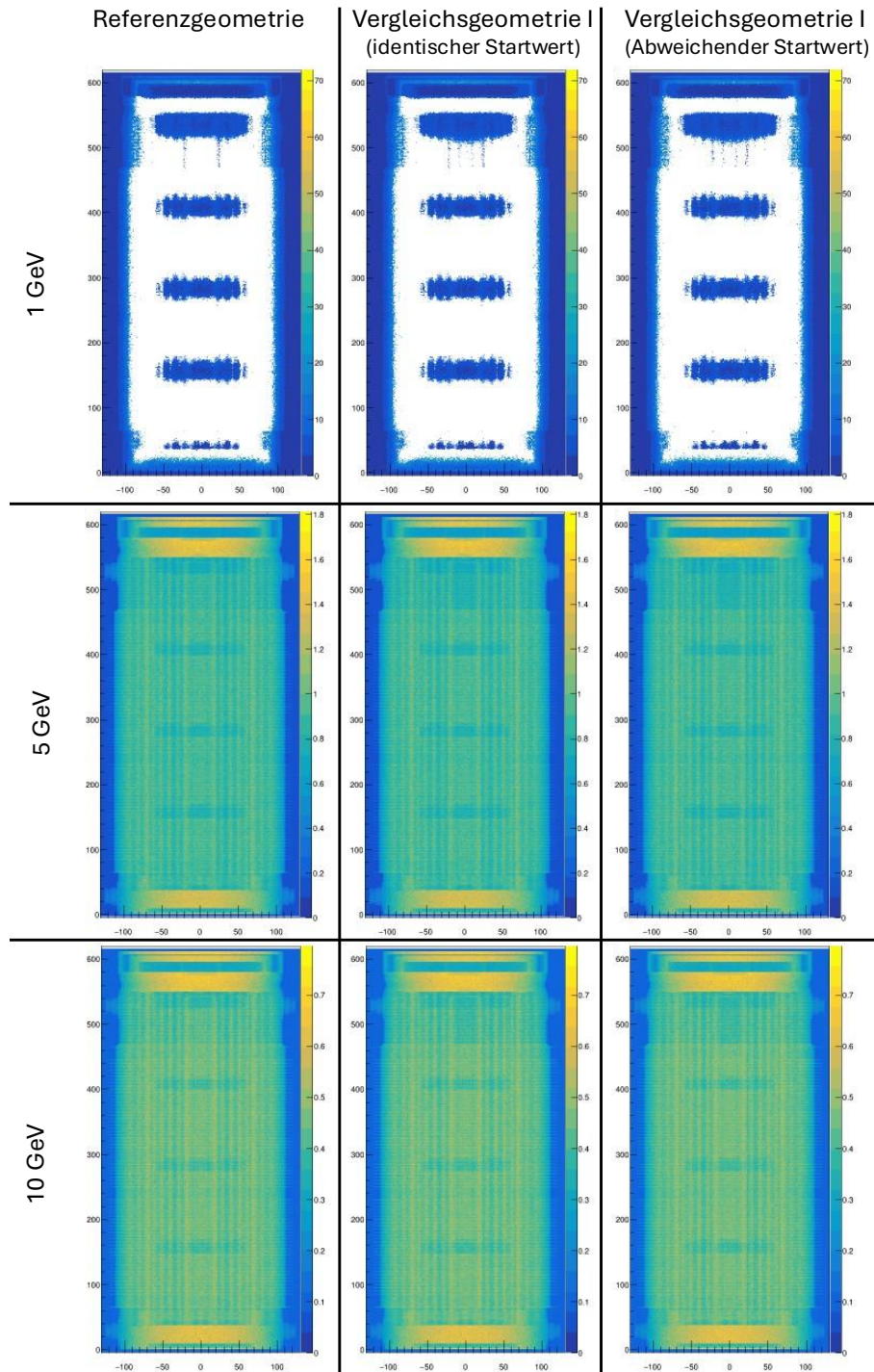


Abb. B.56 Projektionsbilder in der (y,z)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 26 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (y-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

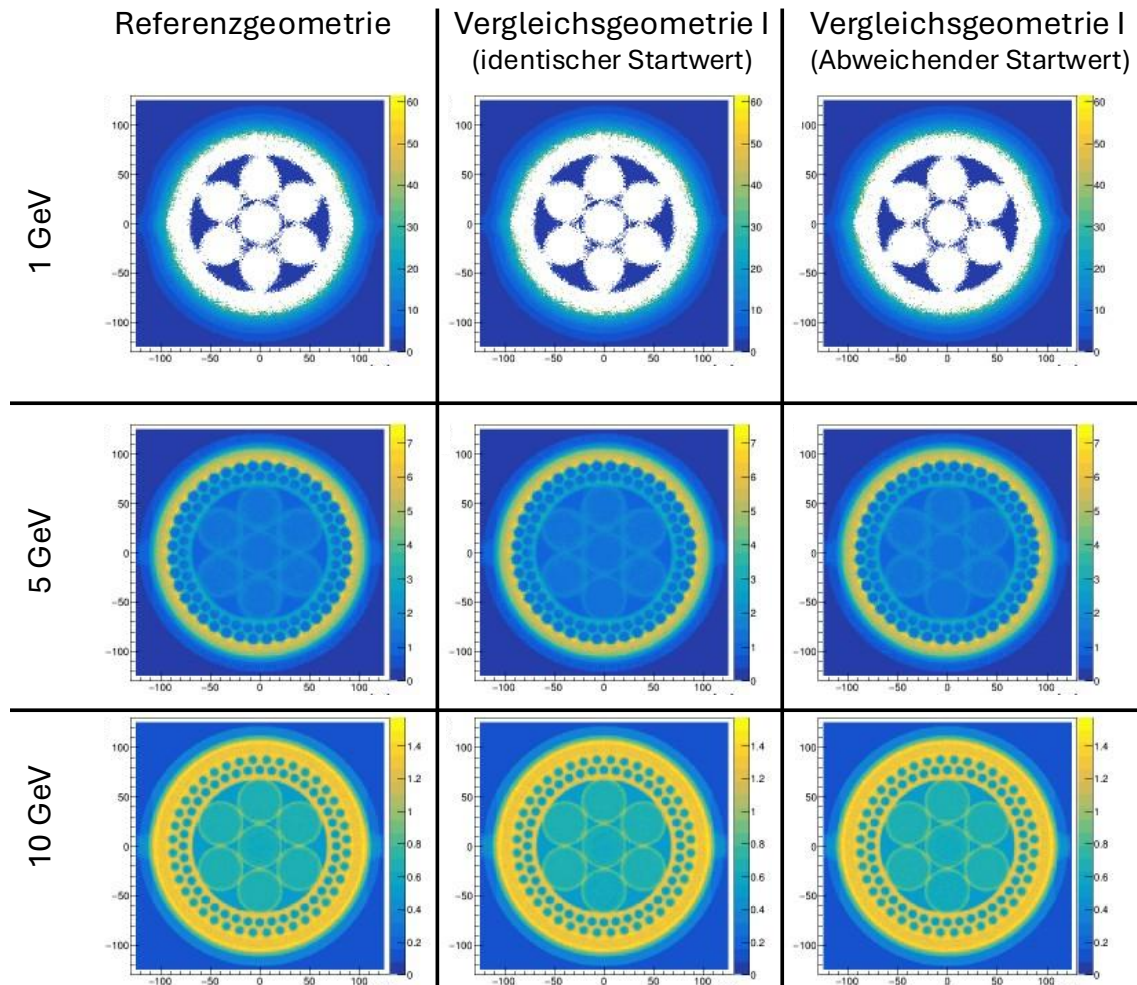


Abb. B.57 Projektionsbilder in der (x,y)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 26 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (z-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

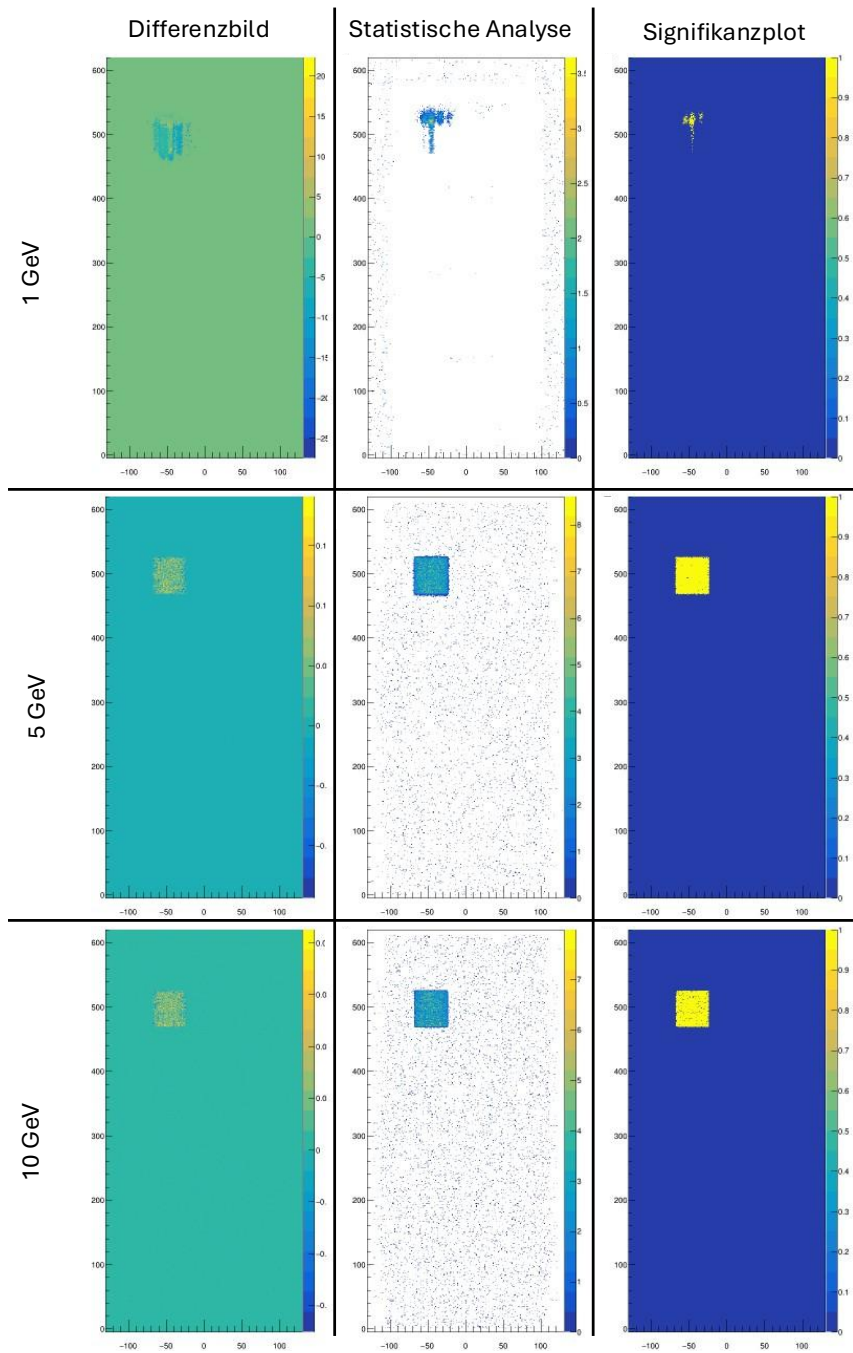


Abb. B.58 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 26 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (x-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

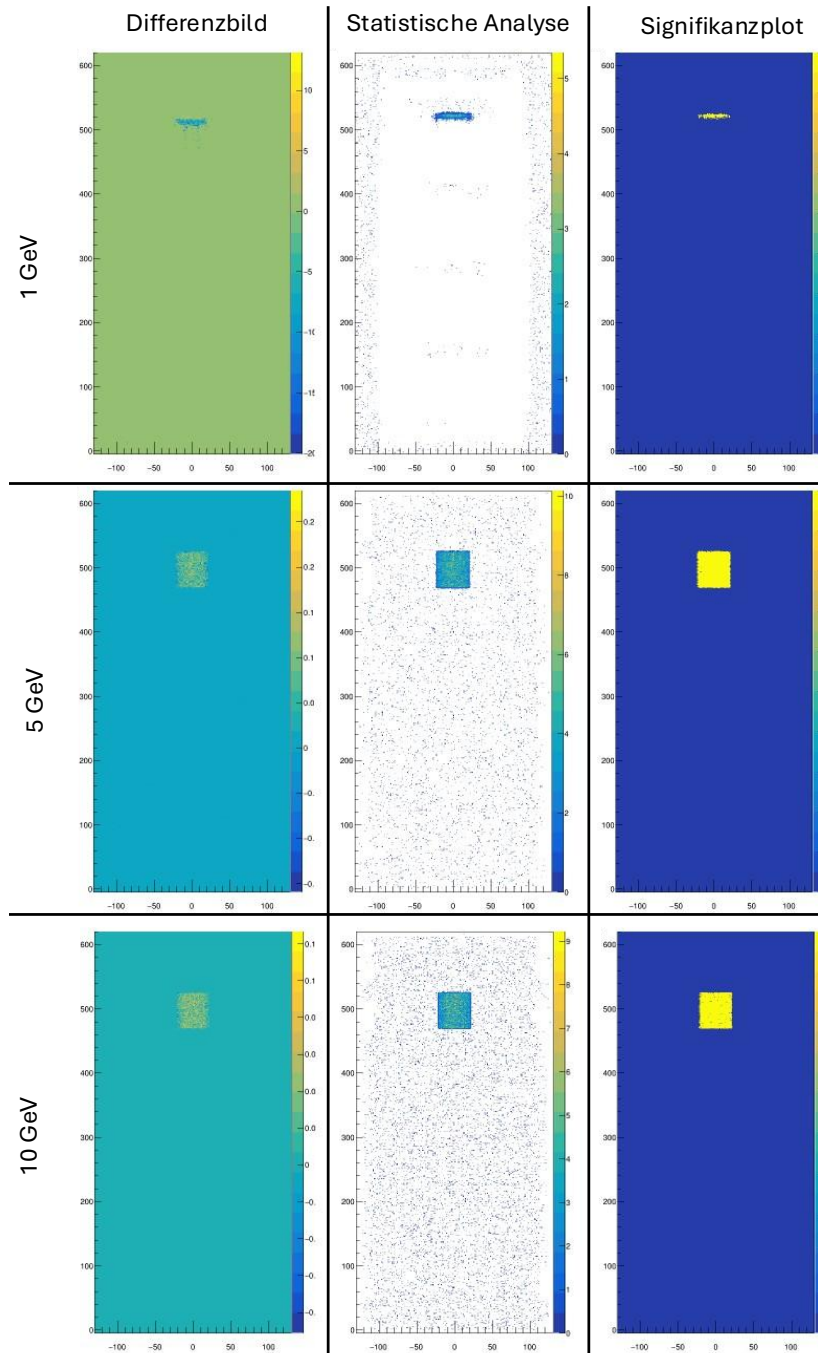


Abb. B.59 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 26 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (y-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

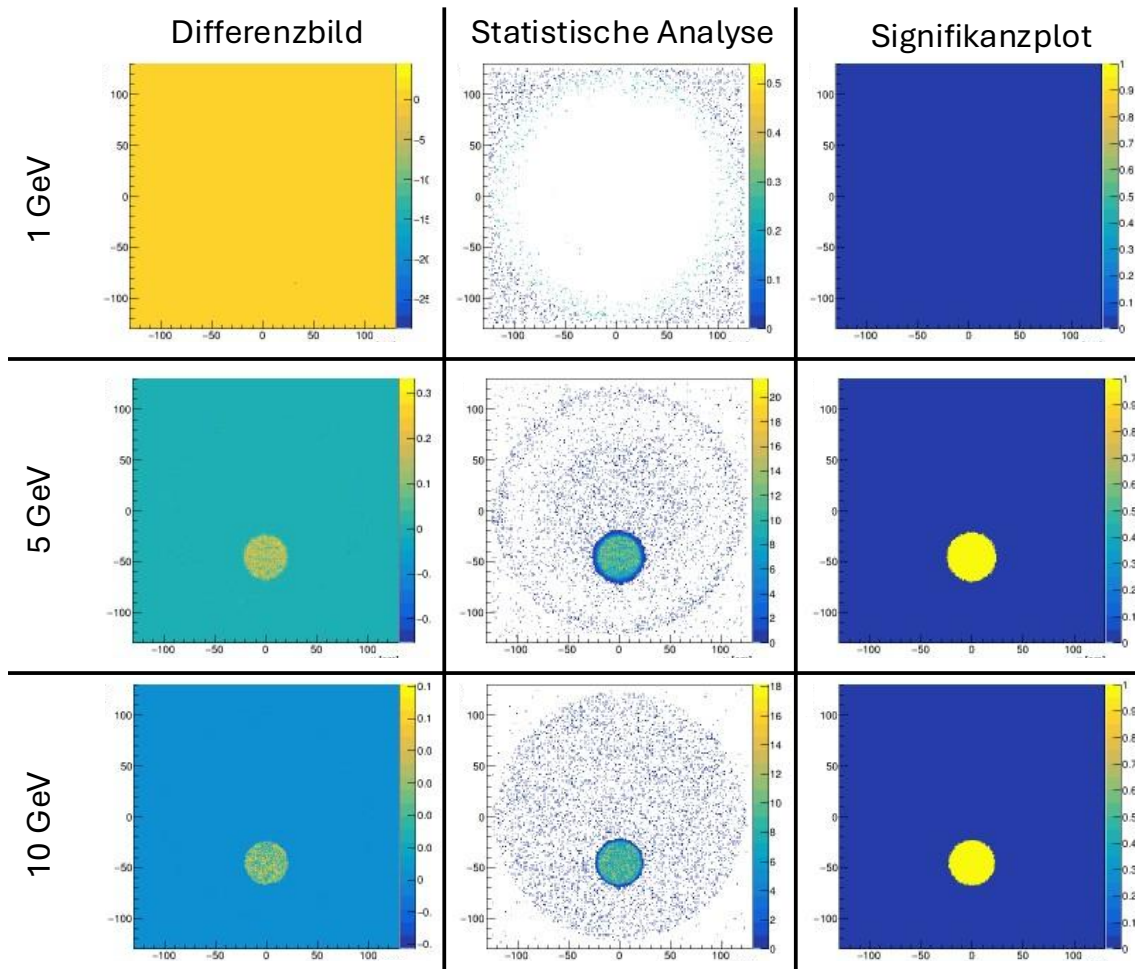


Abb. B.60 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 26 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (z-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

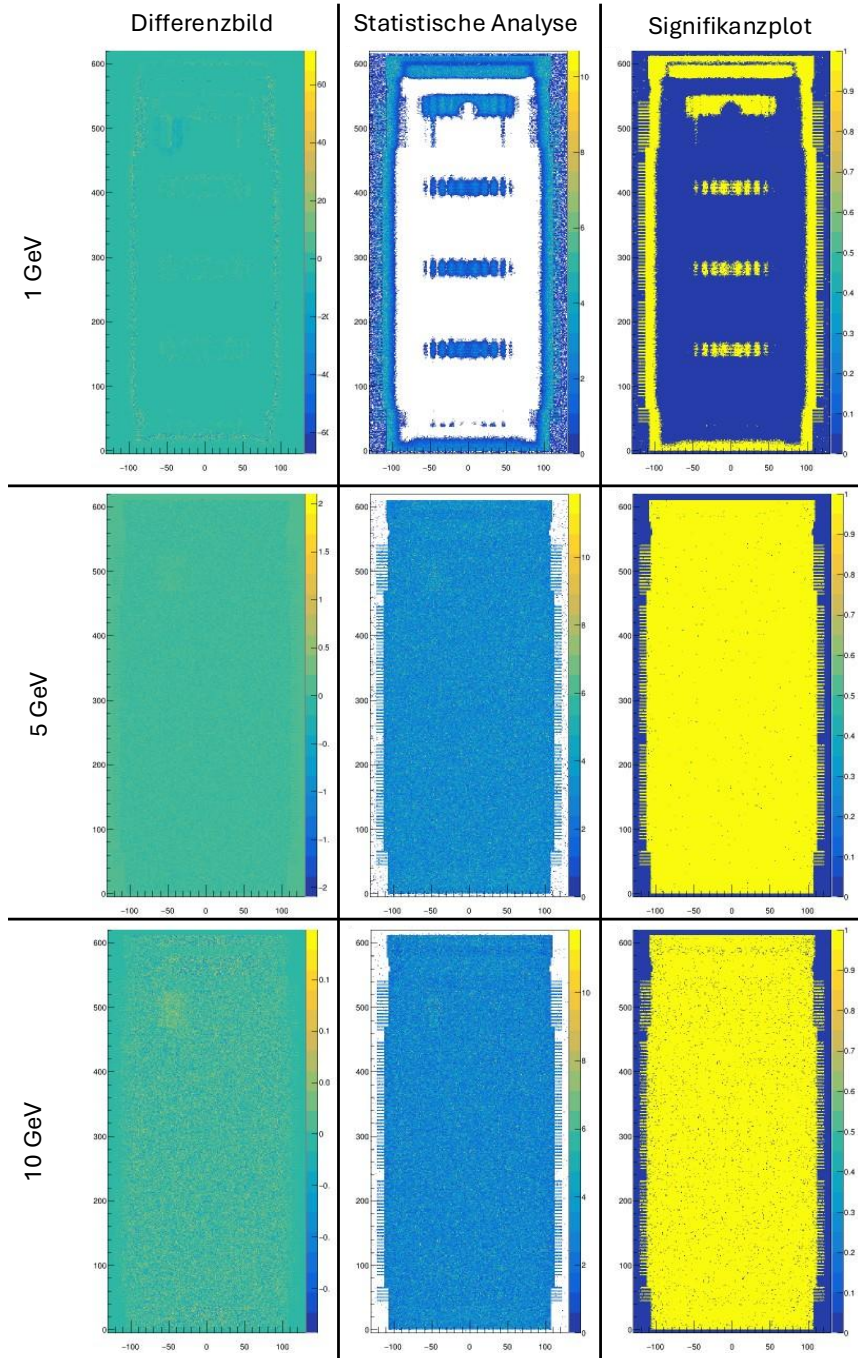


Abb. B.61 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 26 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (x-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

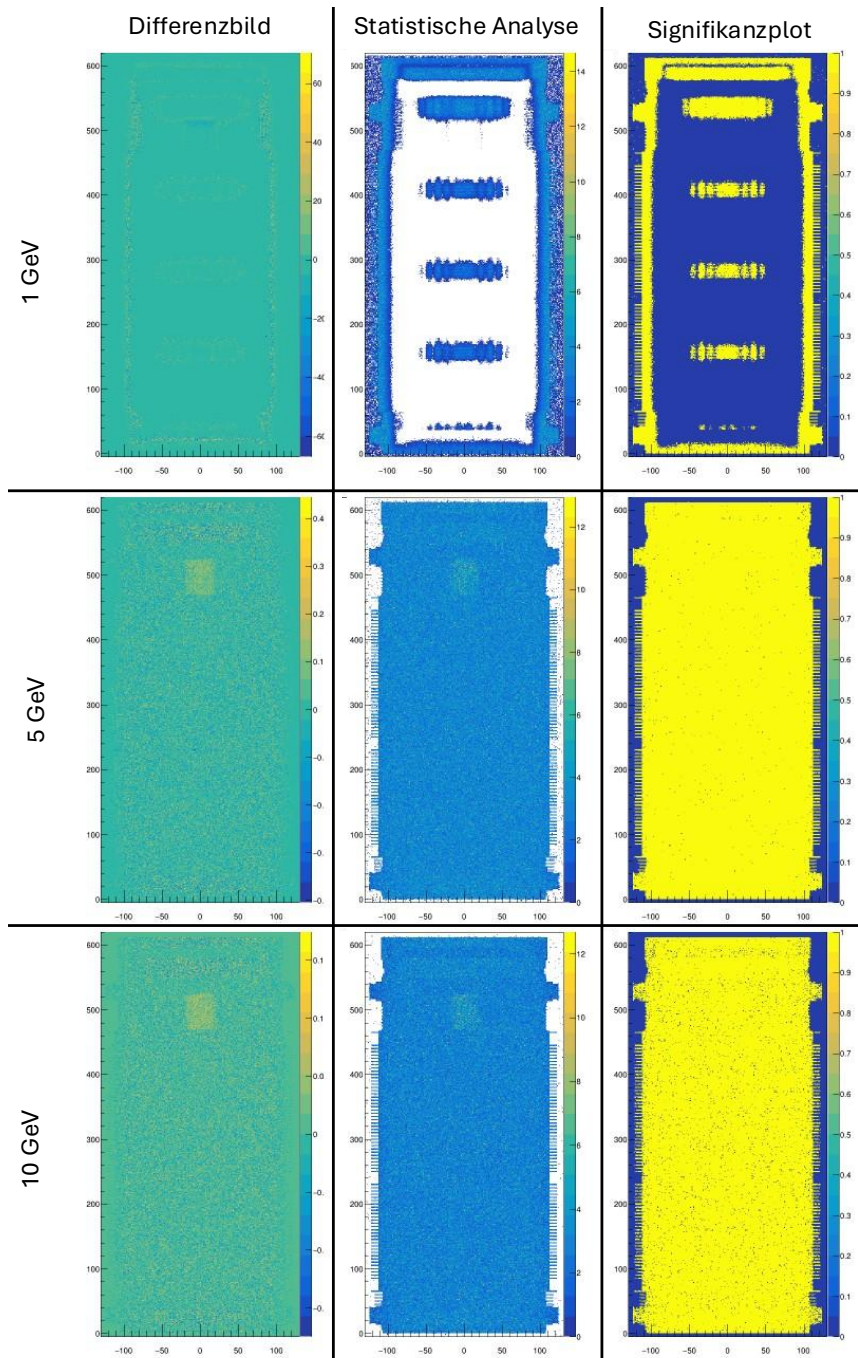


Abb. B.62 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 26 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (y -Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

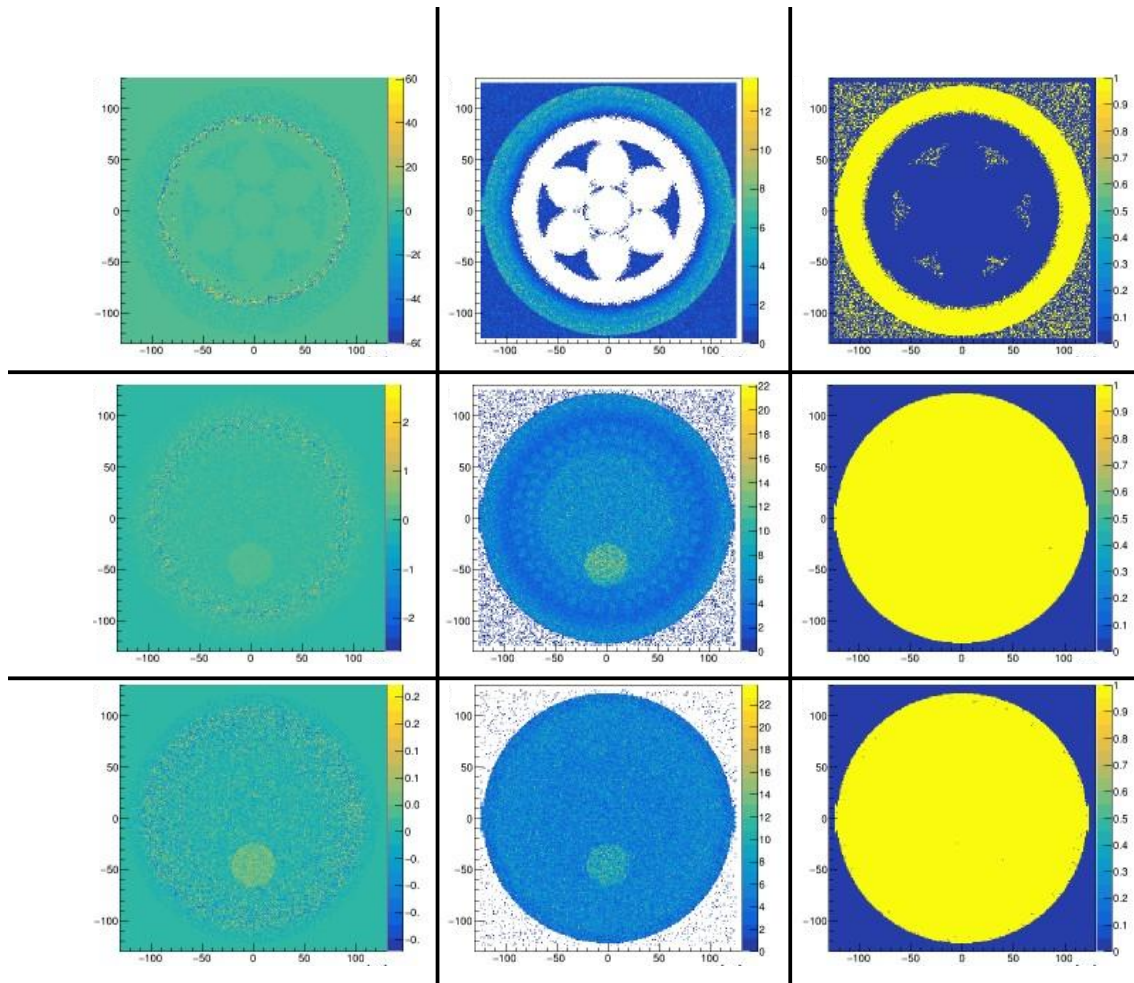


Abb. B.63 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 26 zur Hälfte gefüllt, ohne Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (z-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

B.8 Simulationsergebnisse für Kokille mit ID 26 mit Restverfüllung

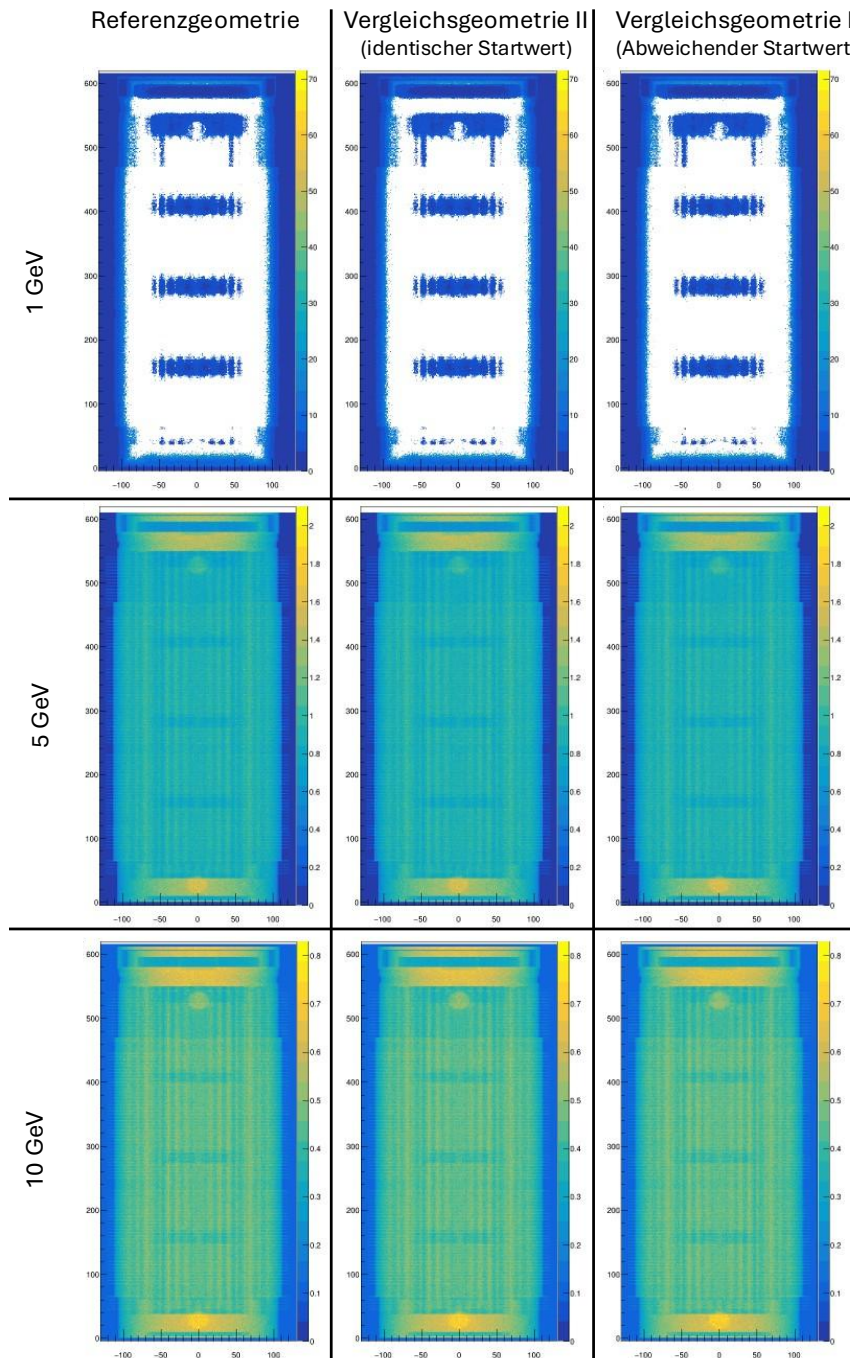


Abb. B.64 Projektionsbilder in der (x,z)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 26 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (x-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

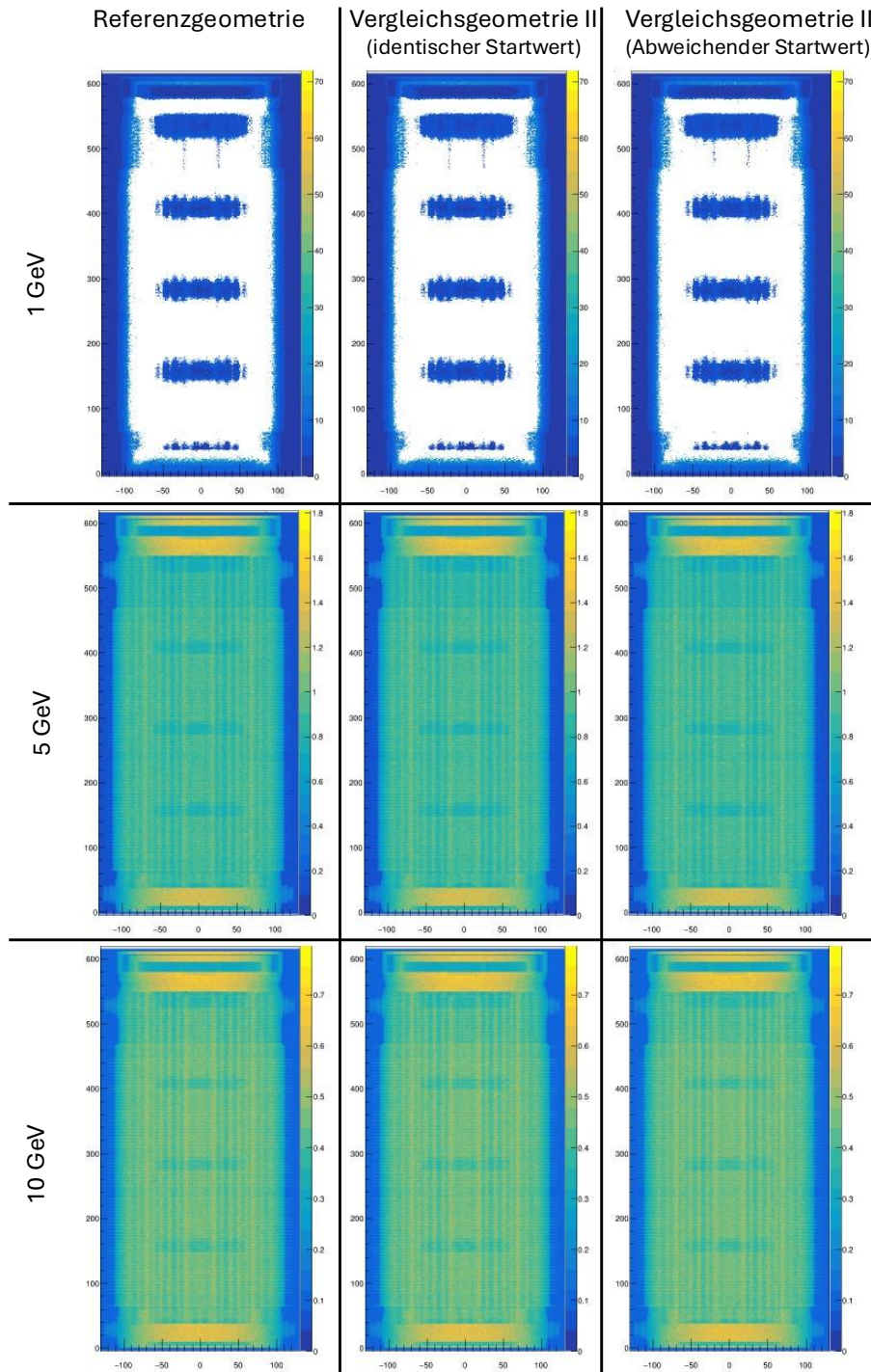


Abb. B.65 Projektionsbilder in der (y,z) -Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 26 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (y -Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

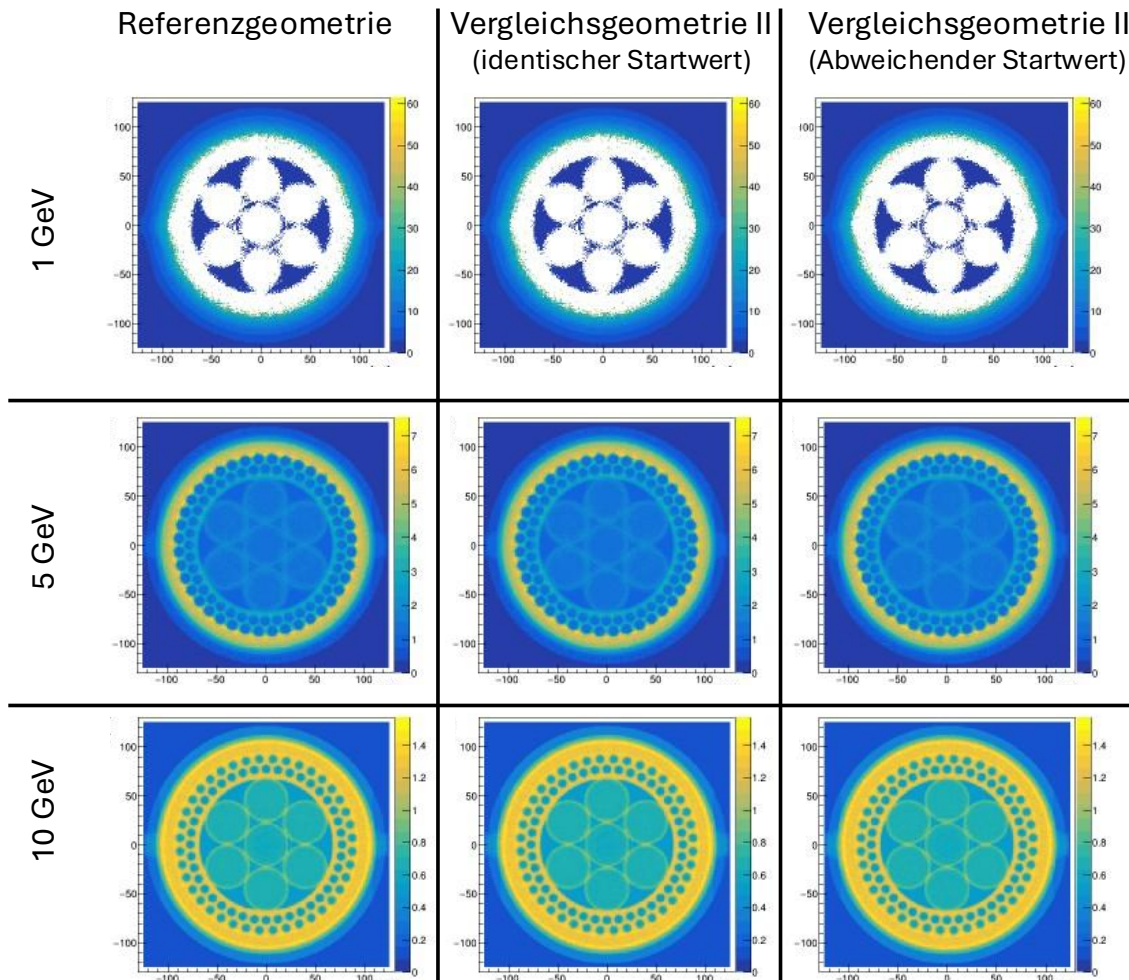


Abb. B.66 Projektionsbilder in der (x,y)-Ebene auf Basis des Medians der Streuwinkelverteilung für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 26 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionalen Myonen (z-Achse)

Von links nach rechts: Projektionsbilder zur Referenzgeometrie, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit dem gleichen Startwert, Projektionsbilder der abweichenden Geometrie mit abweichendem Startwert.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

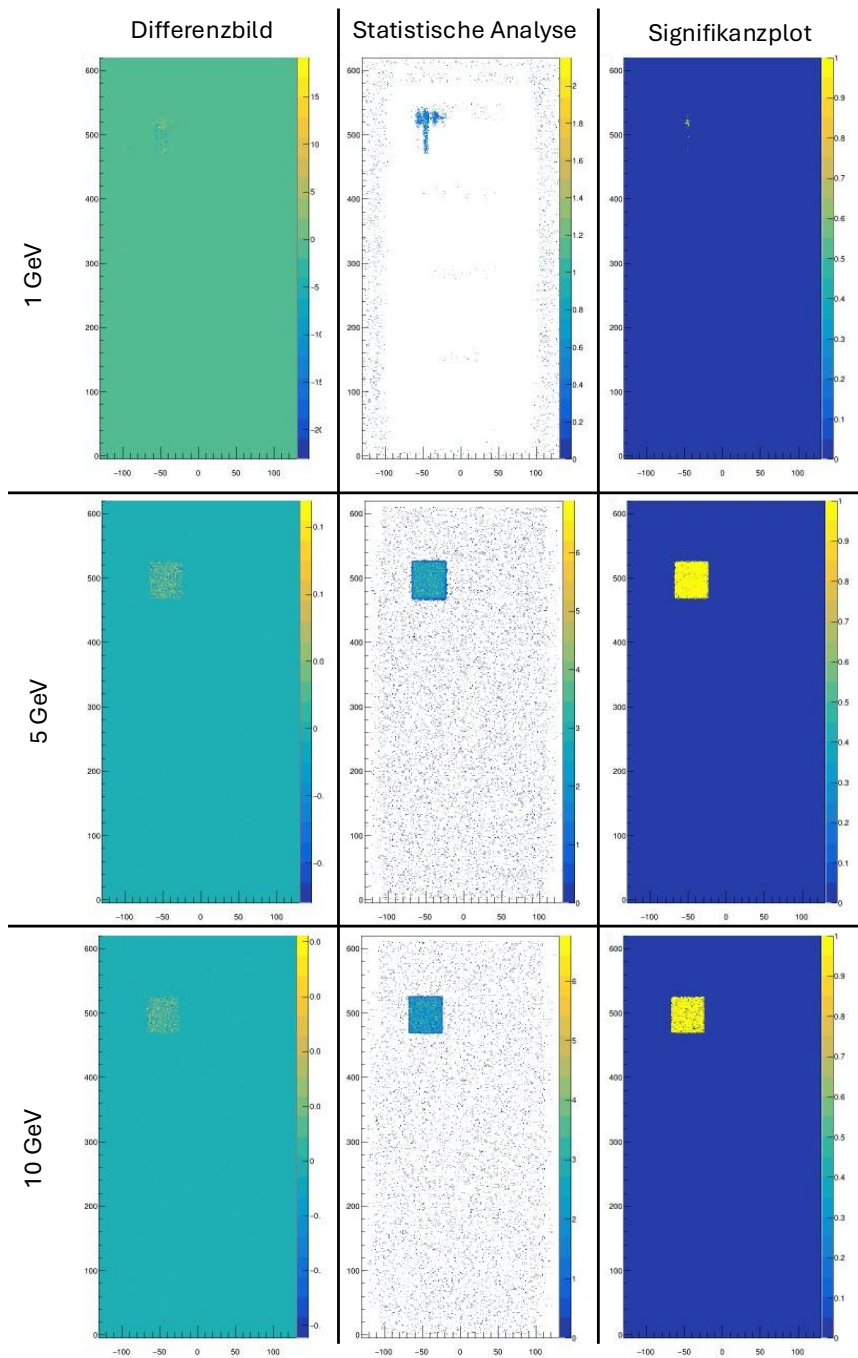


Abb. B.67 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 26 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (x-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

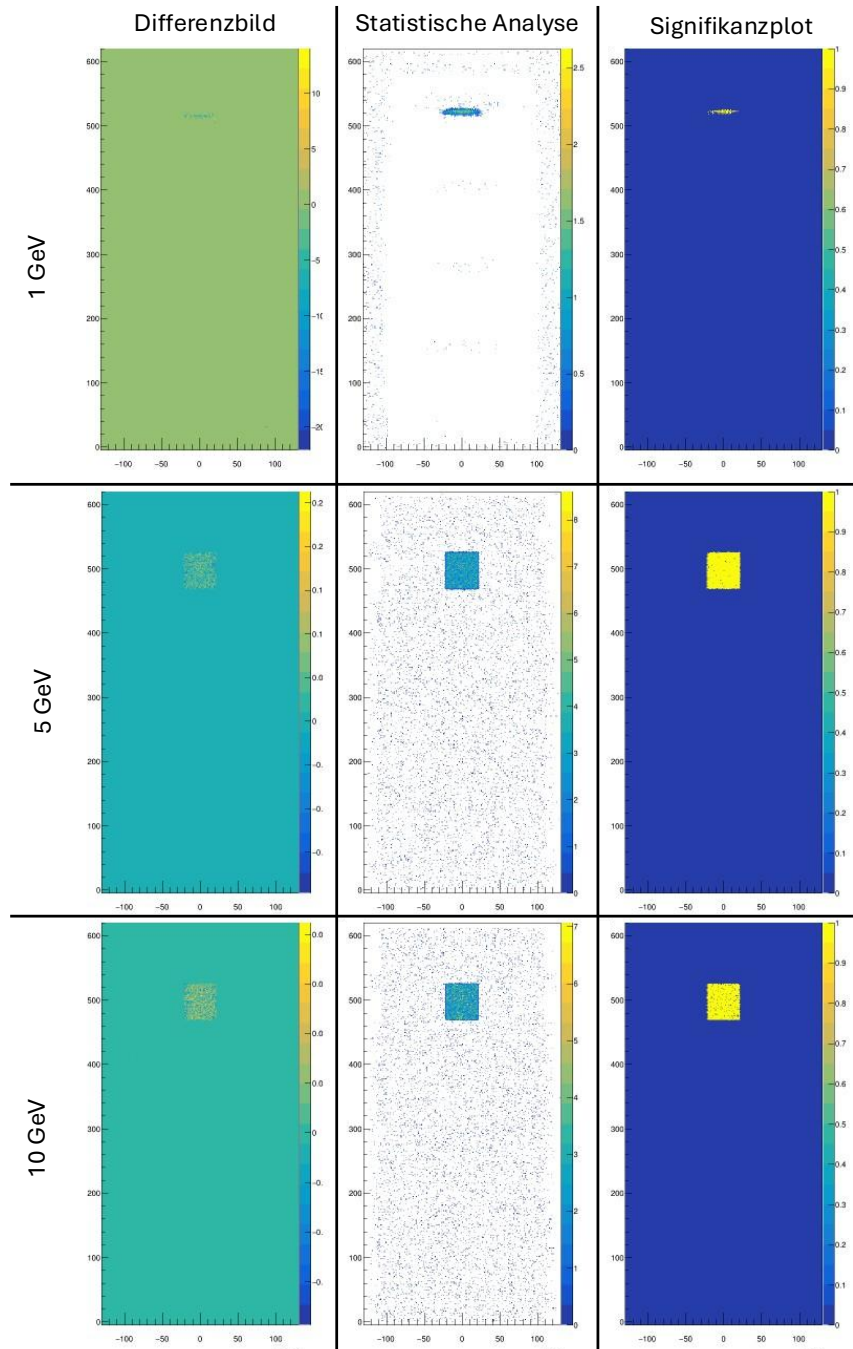


Abb. B.68 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 26 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (y-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

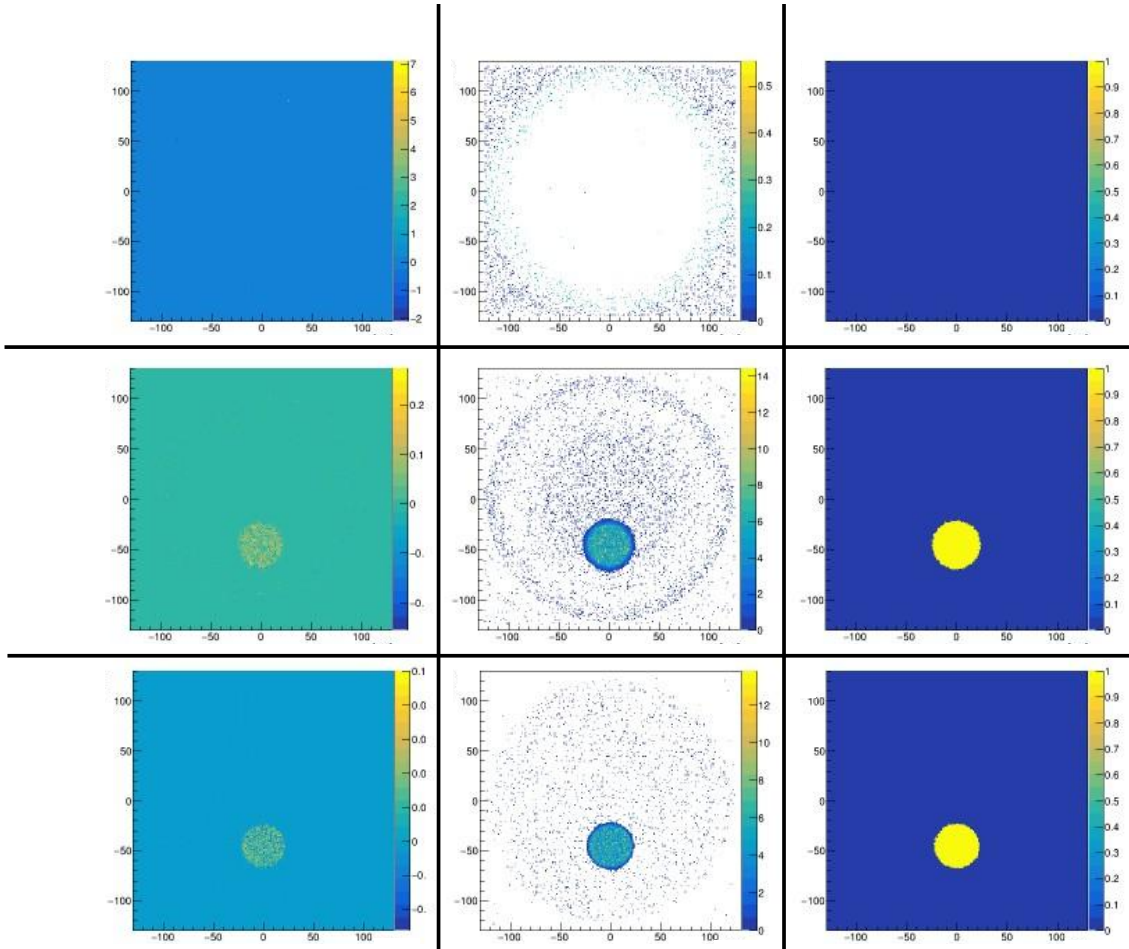


Abb. B.69 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 26 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (z-Achse) unter Berücksichtigung identischer Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

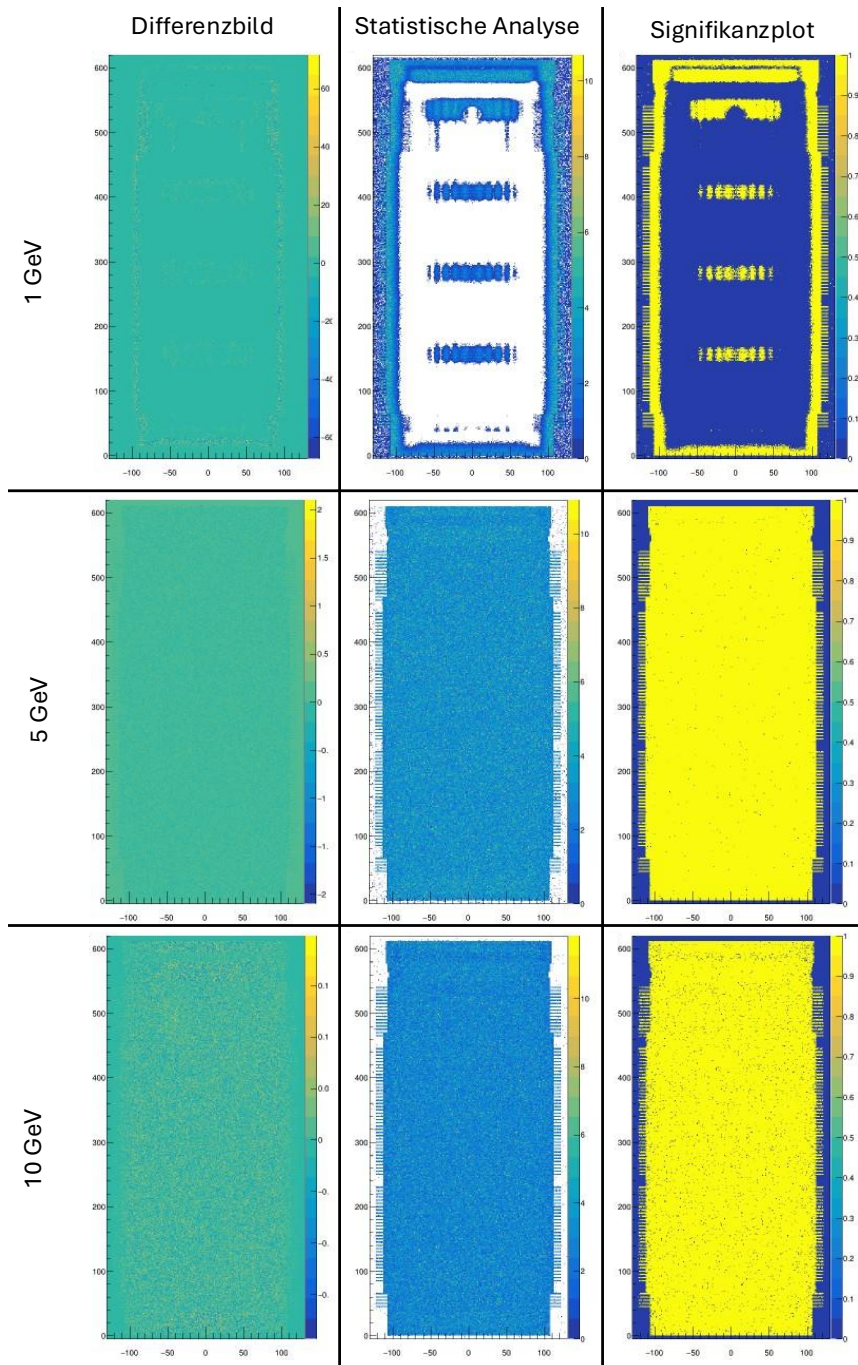


Abb. B.70 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 26 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (x-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

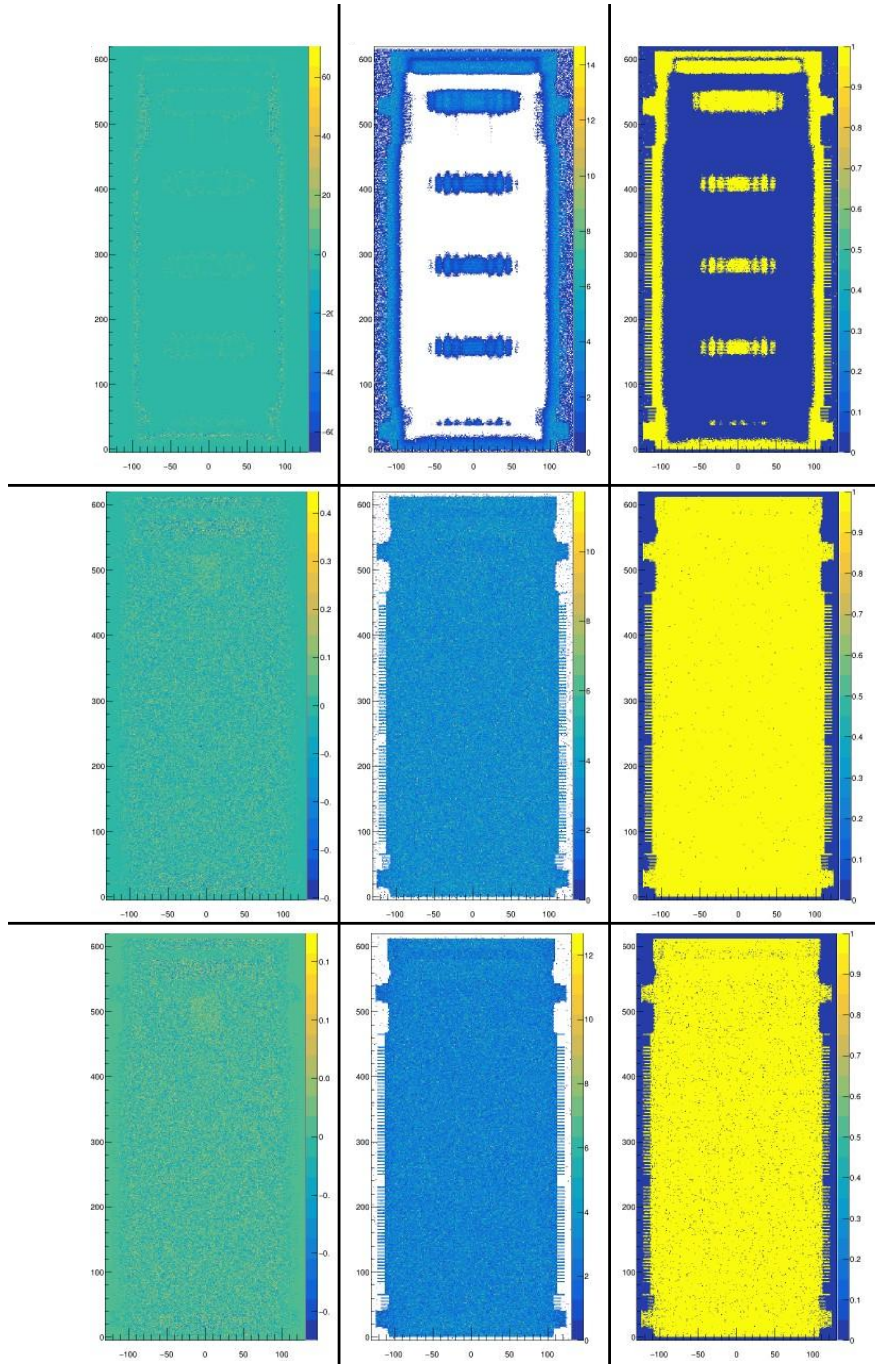


Abb. B.71 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 26 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (y-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

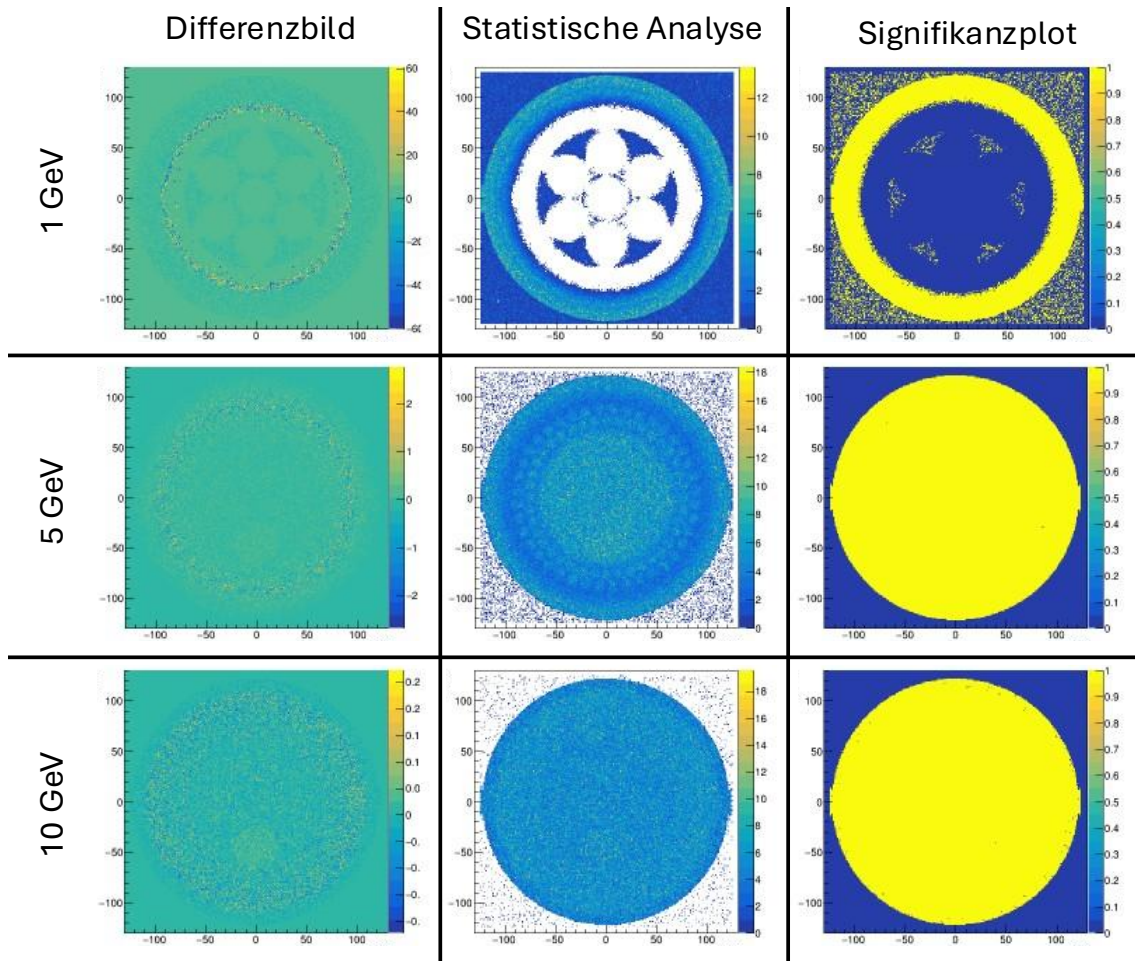


Abb. B.72 Vergleich und statistische Analyse der Ergebnisse von Monte-Carlo Simulationen für die Referenzgeometrie sowie für eine lokal abweichende Vergleichsgeometrie (Kokille mit ID 26 zur Hälfte gefüllt, mit Restverfüllung), generiert mit mono-energetischen und mono-direktionale Myonen (z-Achse) unter Berücksichtigung abweichender Startwerte.

Von links nach rechts: Differenzbild zwischen Referenzgeometrie und abweichender Geometrie, Ergebnisse der KST-Analyse (Werte > 1 zeigen signifikante Abweichungen) und binäre Darstellung der Signifikanz der pixelweisen Abweichungen.

Von oben nach unten: Myonenenergie von 1 GeV, 5 GeV und 10 GeV.

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

ISBN 978-3-911727-58-7