



Bundesamt  
für Strahlenschutz

## **Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz**

# Simulation von interventionellen Strahlenanwendungen in virtueller Realität zur Optimierung des Strahlenschutzes von Personal und Patienten

**Vorhaben 3621S42350**

Northdocks GmbH

Dr. J. Barenthien

F. Höfer

S. Fuchs

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz,  
nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) und im Auftrag des Bundesamtes  
für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMUV (Ressortforschungsplan) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

### **Impressum**

Bundesamt für Strahlenschutz  
Postfach 10 01 49  
38201 Salzgitter

Tel.: +49 30 18333-0

Fax: +49 30 18333-1885

E-Mail: [ePost@bfs.de](mailto:ePost@bfs.de)

De-Mail: [epost@bfs.de-mail.de](mailto:epost@bfs.de-mail.de)

[www.bfs.de](http://www.bfs.de)

BfS-RESFOR-221/24

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:

urn:nbn:de:0221-2024040842859

Salzgitter, April 2024

# Inhalt

Zusammenfassung.....	5
Summary .....	5
1. Einleitung.....	6
2. Zielsetzung und Rahmenbedingungen .....	6
3. Planung und Ablauf des Vorhabens .....	7
4. AP 1 Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik und Erarbeitung eines Konzepts .....	7
4.1 AP 1.1 Ermittlung des Sachstands .....	7
4.1.1 Ergebnisse der wissenschaftlichen Sachstandsprüfung .....	8
4.2 AP1.2 Erarbeitung Konzept.....	10
5. AP 2 Entwicklung der ersten Version des Tools .....	11
6. AP 3 Evaluierung der Software und Erstellung der endgültigen Version.....	13
6.1 AP 3.1. Validierung der Software .....	13
6.1.1 Erste Validierung der Strahlensimulation .....	13
6.1.2 Prätest: Wissen .....	14
6.1.3 Posttest: Wissen und Einschätzung Verständnis.....	14
6.1.4 Posttest: Einschätzung des Schulungstools.....	15
6.1.5 Posttest: Feedback zum Schulungstool und zur Strahlensimulation .....	15
6.1.6 Ableitung von Weiterentwicklungsmöglichkeiten anhand der Ergebnisse der ersten Validierung ....	15
6.2 AP 3.2. Erstellung und Validierung der endgültigen Version .....	16
6.2.1 Zweite Validierung der Strahlensimulation .....	16
6.2.2 Prätest: Wissen .....	19
6.2.3 Posttest: Wissen und Einschätzung Verständnis.....	19
7. Diskussion der Ergebnisse .....	19
8. Fazit und Implikationen für weitere Forschung und Entwicklung .....	20

<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>22</b>
<b>Anlagenverzeichnis .....</b>	<b>24</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>25</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>26</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>27</b>
<b>Anhang A. Ausführliche Ergebnisse Erste Validierung. ....</b>	<b>28</b>
<b>Anhang B. Ausführliche Ergebnisse Zweite Validierung .....</b>	<b>36</b>
<b>Anhang C. Bedienungsanleitung zum Strahlensimulationstraining .....</b>	<b>44</b>

## Zusammenfassung

In den letzten Jahren hat die Aufmerksamkeit für die Gefahren der Strahlenbelastung für Patienten und medizinisches Personal zugenommen. Insbesondere bei interventionellen Maßnahmen ist medizinisches Personal in seiner beruflichen Tätigkeit einer hohen Strahlenexposition ausgesetzt. Eine übermäßige Exposition von Strahlung kann beispielsweise zu Schädigungen an Organen führen. Das korrekte Verhalten des medizinischen Personals und der regelgerechte Einsatz von Schutzvorrichtungen können die Strahlenexpositionen in vielen Fällen deutlich reduzieren. Leider werden diese Schutzmaßnahmen oft nicht angewendet, weil sie in der Ausbildung und im Studium nicht ausreichend vermittelt und in der Praxis nicht regelmäßig genug geübt werden.

Interventionen, um medizinisches Personal zu einem besseren Schutzverhalten zu bewegen, ohne dabei das medizinische Personal weiterer Strahlung auszusetzen, sind kaum vorhanden. Ein neuartiger Ansatz ist dabei das Training solcher interventionellen Maßnahmen in Virtual Reality. Das Training in Virtual Reality bietet die Möglichkeit, orts- und zeitunabhängig ohne Gefährdungen durch Strahlung, das korrekte Verhalten des medizinischen Personals und den regelgerechten Einsatz von Schutzvorrichtungen zu üben. Um ein überzeugendes und lehrreiches Training zu gewährleisten, bedarf es einer möglichst präzisen Simulation der Strahlung und der Berechnung der Reduktion der Strahlenexposition durch den Einsatz von Schutzmitteln. Ziel des Vorhabens war daher die Simulation und Visualisierung von Strahlung und die Darstellung der berechneten Reduktion der Strahlenexposition bei Verwendung von Schutzvorrichtungen in einer Virtual-Reality-Umgebung.

Um diese Ziele zu erreichen, wurde zuerst eine Literaturanalyse in internationalen und nationalen Literatur- und Projektdatenbanken durchgeführt und der wissenschaftliche Forschungsstand zu Strahlung und Strahlenschutz aufgearbeitet. Auf Basis dieses Wissens wurde in einem zweiten Schritt eine Strahlensimulation entwickelt und in ein neu entwickeltes Virtual Reality Training für medizinisches Personal implementiert. In einem dritten Schritt wurde die Virtual-Reality-Trainingsanwendung mit medizinischem Personal getestet, diskutiert und validiert. Im Rahmen der Validierung der endgültigen Version des Schulungstools zeigen sich Hinweise auf eine valide Strahlensimulation. Des Weiteren zeigt sich eine hohe Akzeptanz des Schulungstools bei den Teilnehmenden an der Validierung.

## Summary

In recent years, attention to the dangers of radiation exposure for patients and medical personnel has increased. Particularly during interventional procedures, medical personnel are exposed to high levels of radiation in the course of their professional activities. Excessive exposure to radiation, for example, can cause damage to organs. The correct behavior of medical personnel and the proper use of protective devices can significantly reduce radiation exposures in many cases. Unfortunately, these protective measures are often not applied because they are not adequately taught in training and education, nor are they regularly practiced.

Interventions to encourage medical personnel to adopt better protective behaviors without exposing medical personnel to further radiation are rare. Training in virtual reality offers the opportunity to practice the correct behavior of medical personnel and the proper use of protective devices, independent of location and time, without any hazards from radiation. In order to ensure convincing and instructive training, it is necessary to simulate radiation as precisely as possible and to calculate the reduction of radiation exposure through the use of protective devices. Therefore, the goal of this project was to simulate and visualize radiation and display the calculated reduction in radiation exposure when protective devices are used in a virtual reality environment.

In order to achieve these goals, firstly a literature analysis was carried out in international and national literature and project databases and the state of scientific research on radiation and radiation protection was reviewed. Second, based on this knowledge, a radiation simulation was developed and implemented in a newly developed virtual reality training for medical personnel. In a third step, the virtual reality training application was tested, discussed and validated with medical personnel. The validation of the final version of the training tool shows evidence of a valid beam simulation. Furthermore, there is a high acceptance of the training tool among the participants of the validation.

# 1. Einleitung

In den letzten Jahren hat die Aufmerksamkeit für die Gefahren der Strahlenbelastung für Patienten und medizinisches Personal zugenommen. Insbesondere bei interventionellen Maßnahmen ist medizinisches Personal in seiner beruflichen Tätigkeit einer hohen Strahlenexposition ausgesetzt. Eine übermäßige Exposition von Strahlung kann beispielsweise zu Schädigungen an Organen führen. Das korrekte Verhalten des medizinischen Personals und der regelgerechte Einsatz von Schutzmitteln können die Strahlenexpositionen in vielen Fällen deutlich reduzieren. Leider werden diese Schutzmaßnahmen oft nicht angewendet, weil sie in der Ausbildung und im Studium nicht ausreichend vermittelt und auch in der Praxis nicht regelmäßig geübt werden. Diese Maßnahmen sind aber von besonderer Bedeutung, da die internationale Strahlenkommission 2012 den jährlichen Grenzwert für die Augenlinse von 150 auf 20 mSv abgesenkt hat (International Commission on Radiological Protection (ICRP, 2012), und ohne geeigneten Schutz und angemessene Verhaltensweise wird dieser Grenzwert häufig erreicht und überschritten. Gleichzeitig steigt aber die Zahl der komplexen Eingriffen wie Katheterablationen (CA), die Dauer der Verfahren und die Notwendigkeit mehrerer Sitzungen (MIWA et al., 2019). Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, das medizinische Personal im korrekten dosisreduzierenden Verhalten zu schulen. Dies ist allerdings eine Herausforderung, da die Übung in der Praxis bei nicht korrektem Verhalten zu hoher Strahlenexposition führen kann. Zwar weisen Ergebnisse einer Studie von MIWA et al. (2019) auf die Bedeutung der Sensibilisierung des medizinischen Personals für die Strahlenbelastung durch Vorträge für die nachhaltige und signifikante Reduktion der Durchleuchtungszeit und der Strahlendosis während komplexer interventioneller Maßnahmen hin, deren Wirkung sogar bis in Zeiträume nach dem Eingriff anhielt. Allerdings ermöglichen Vorlesungen kein aktives Lernen und Üben in der Praxis. Daher bieten sich neben Vorlesungen zur theoretischen Einführung in das praktische Vorgehen auch das Training in Virtual Reality an, da dort zeit- und ortsunabhängig sowie ohne jegliche Gefahr dosisreduzierendes Verhalten eingeübt werden kann. Eine Schwierigkeit beim Training in Virtual Reality ist die Vielzahl von verschiedenen dosisreduzierenden Maßnahmen, zu denen zum Beispiel die konsistente Verwendung des Bleischirms, Anpassung der Bildrate, Kürzung des Abstands zwischen Patient und Detektor, sowie Erhöhung des Abstands zwischen Patient\*innen und Personal gehören. Zwar gibt es erste Simulationen und Messungen der Streustrahlung (z.B. SCHUETTE et al., 2023; O'CONNOR et al 2023; RAINFORD et al 2023), aber es gibt noch keine realistische Softwarelösung, um den Nutzen von Schutzmitteln und -maßnahmen zur Reduktion der Strahlenexposition anhand von Messwerten der effektiven Dosis zu beobachten und dadurch das Bewusstsein des medizinischen Personals für die Bedeutsamkeit der dosisreduzierenden Maßnahmen zu erhöhen. Dies ist eine zentrale Voraussetzung dafür, eine optimierte Anwendung der dosisreduzierenden Maßnahmen auch in der Praxis zu erreichen.

Ziel dieses Vorhabens ist es daher, ein Schulungstool für medizinisches Personal zu entwickeln und zu validieren, mit dem strahlenschutzoptimiertes Verhalten bei interventionellen Maßnahmen in Virtual Reality trainiert werden kann. Dazu soll am Beispiel eines Katheterlabors eine Simulation in virtueller Realität (VR) entwickelt werden, mit der essenzielle Strahlenschutzmaßnahmen in einer VR-Umgebung (mit einer VR-Brille) trainiert werden können. Dabei zielt das Schulungstool durch die Entwicklung einer eigenen Strahlensimulation darauf ab, die Wirkung der eingesetzten dosisreduzierenden Maßnahmen und Schutzmittel auf die Strahlenexposition durch die Trainierenden visuell darzustellen, um das Bewusstsein für die Bedeutsamkeit von Strahlenschutzmaßnahmen zu erhöhen und strahlenschutzoptimiertes Verhalten stärker in die Praxis zu implementieren.

## 2. Zielsetzung und Rahmenbedingungen

Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Entwicklung und Validierung eines Schulungstools, mit dem strahlenschutzoptimiertes Verhalten bei interventionellen Maßnahmen in Virtual Reality trainiert werden kann. Dazu soll am Beispiel eines Katheterlabors eine Simulation in virtueller Realität (VR) entwickelt werden, mit der essenzielle Strahlenschutzmaßnahmen in einer VR-Umgebung trainiert werden können. Das zu entwickelnde Schulungstool zielt darauf ab, die Wirkung der eingesetzten dosisreduzierenden Maßnahmen und Schutzmittel auf die Strahlenexposition durch die Trainierenden darzustellen mit dem Ziel das Bewusstsein für die Bedeutsamkeit von Strahlenschutzmaßnahmen zu erhöhen und strahlenschutzoptimiertes Verhalten stärker in die Praxis zu implementieren. Dafür wurde eine neuartige Simulation für die Visualisierung Nutz- und Streustrahlung entwickelt, die auch die Wirkung der Verwendung von Schutzmaßnahmen und Schutzmitteln auf die effektive Dosis anzeigt.

Um das Projektziel zu erreichen, wurde das Projekt in verschiedene Teilarbeitsprojekte (oder „Arbeitspakete“, AP) aufgeteilt. Ein Ziel des Projektes war die Aufbereitung des Sachstands und die Entwicklung eines Konzepts zur Umsetzung des Schulungstools (AP1). Zum einen sollte dafür der wissenschaftliche und technische Sachstand aufgearbeitet werden (AP1.1). Auf Basis des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik sollte ein Konzept für die Umsetzung des Schulungstools in Virtual Reality entwickelt werden (AP1.2).

In einem zweiten Teilprojekt sollte ein erstes Schulungstool entwickelt werden. Dafür sollte das zuvor entwickelte Konzept in Virtual Reality umgesetzt werden, indem ein Katheterlabor und typische Gerätschaften in Virtual Reality nachgebildet werden und Interaktions- und Bewegungsmöglichkeiten für die trainierende Person in der Simulationsumgebung implementiert werden (AP2). Des Weiteren sollte im zweiten Arbeitspaket die Entwicklung einer Simulation von Nutz- und Streustrahlung erfolgen, die auch die Wirkung von Schutzmaßnahmen visuell anzeigt und das zentrale Element des Schulungstools darstellt.

Im letzten Teilprojekt soll die Validierung der Software und Erstellung einer endgültigen Version des Schulungstools erfolgen (AP3). Dafür soll die erste Version des Schulungstools mit Endnutzer\*innen validiert werden (AP3.1). Auf Basis der Ergebnisse werden ggf. mögliche Verbesserungen des Schulungstools diskutiert und umgesetzt. Im Arbeitspaket AP3.2 soll dann die finale Version des Schulungstools implementiert und erneut validiert werden.

### **3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Projekt wurde in drei Arbeitspaketen durchgeführt:

AP 1) Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik und Erarbeitung eines Konzepts

Für die Erarbeitung eines Konzepts für die Umsetzung des Schulungstools wurde der relevante Stand von Wissenschaft und Technik aufgearbeitet.

- Auf Basis des Sachstands wurde ein detailliertes Konzept für die Entwicklung und Validierung des Schulungstools entwickelt.

AP 2) Entwicklung der ersten Version des Tools

- Es wurde eine erste Version des Schulungstools in Virtual Reality entwickelt, in der Schutzmaßnahmen eingesetzt werden können und die Wirkung von Schutzmitteln angezeigt werden kann.

AP 3) Evaluierung der Software und Erstellung der endgültigen Version

- Die erste Version des Schulungstools wurde durch Testungen mit medizinischen Personals validiert bzw. evaluiert.
- Auf Basis der Ergebnisse der ersten Validierung wurde die erste Version des Schulungstools angepasst und eine endgültige Version des Schulungstools erstellt. Die endgültige Version des Schulungstools wurde erneut validiert.

### **4. AP 1 Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik und Erarbeitung eines Konzepts**

#### **4.1 AP 1.1 Ermittlung des Sachstands**

Zu Beginn des Projekts erfolgte eine inhaltliche Einarbeitung in das Thema Strahlenschutz und Simulationen von Strahlen. Dafür haben sich zu Projektstart die Mitarbeitenden von Northdocks GmbH mit den Spezialisten des Universitätsklinikums Schleswig-Holstein (UKSH) getroffen. Bei diesem Vor-Ort-Treffen wurde u.a. auch über die Verhaltensempfehlungen zu Strahlenschutzmitteln und Gerätschaften gesprochen. Durch die guten Kontakte konnte ein Mitarbeiter, der für die Programmierung der VR-Simulation und aufgrund seines Mathematikstudiums auch für die Berechnung der Strahlenausbreitung in der VR-Simulation zuständig war, am Grundkurs Strahlenschutz im UKSH teilnehmen. Zudem wurden auch die Lehrunterlagen des UKSHs zur Einarbeitung in den Sachstand der Wissenschaft genutzt. Die Ergebnisse dieser wissenschaftlichen Sachstandsprüfung werden auf den folgenden Seiten dargestellt.

Um einen Überblick über den derzeitigen Stand der Wissenschaft zu bekommen, wurde eine Literaturrecherche bei Google Scholar, in einschlägigen Journals sowie bei der Strahlenschutzkommission durchgeführt. Zudem wurden die Unterlagen vom Bundesamt für Strahlenschutz und der Strahlenschutzkommission intensiv studiert. Des Weiteren wurden verschiedene Software-Pakete zur Erstellung von VR-Umgebungen geprüft und inwiefern ggf. bereits frei verfügbare Daten zur Simulation genutzt werden können. Der Fokus lag hier auf der Überprüfung der Nutzbarkeit der von der Northdocks GmbH meist verwendeten Software Unreal Engine für die technische Umsetzung der Simulation, da hier bereits die größte Expertise der Mitarbeitenden von Northdocks vorliegt und dadurch das bestmögliche Ergebnis gewährleistet werden kann. Zudem wurde geprüft, inwiefern gegebenenfalls bereits frei verfügbare Daten zur Simulation genutzt werden können. Dafür wurde im Internet recherchiert und die Experten im UKSH wurden zudem befragt.

#### **4.1.1 Ergebnisse der wissenschaftlichen Sachstandsprüfung**

Im Rahmen der Literaturrecherche lag ein Fokus auf der Identifikation und Zusammenstellung wesentlicher Verhaltensempfehlungen nationaler und internationaler Gremien zu Strahlenanwendungen. Zudem wurden Kenntnisse in Bezug auf Strahlenanwendungen erarbeitet. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Literaturrecherche dargestellt.

Bei Röntgenuntersuchungen können hohe Strahlendosen an Patienten abgegeben werden, da die Strahlung durch das menschliche Gewebe geht (Bundesamt für Strahlenschutz, 2010). Nicht nur die Patient\*innen sondern auch das medizinische Personal ist, besonders in den Bereichen Radiologie, Kardiologie, Herz- und Gefäßchirurgie sowie Orthopädie und Unfallchirurgie (O & U) von Strahlenexposition als Gefahrenquelle, betroffen (SCHÜTZ et al., 2016). Als Folge können sofortige oder langfristig radiogene Effekte verursacht werden. Neben krebserregenden Gesundheitsauswirkungen, sieht die International Commission on Radiological Protection (ICRP) insbesondere die Notwendigkeit, Strahlungseffekte auf die Augenlinse und das Herz-Kreislauf-System besondere Aufmerksamkeit zu schenken, da in den letzten Jahren Beobachtungen gemacht wurden, dass die Strahlungseffekte in diesen Systemen nach viel niedrigeren Dosen auftreten als zuvor berichtet wurde (ICRP, 2012). Ein großes Problem stellt dabei die Streustrahlung dar: So erreichen je nach Untersuchungsart nur ca. 2 % der zur Bilderstellung nutzbaren Strahlung den Röntgendetektor des C-Bogens. Der Rest der Strahlung ist Streustrahlung. Von der Streustrahlung werden rund 80–90 % vom Patienten absorbiert. 10–20 % der Strahlung werden in die Umgebung abgestrahlt und exponieren dann möglicherweise das medizinische Personal (DRESING, 2011).

In Deutschland wird der Umgang mit Strahlenquellen u.a. in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) geregelt. In der StrlSchV werden auch Grenzwerte hinsichtlich der Strahlenexposition vorgegeben. Auch die Strahlenschutzkommission (STRAHLENSCHUTZKOMMISSION, 2018) sowie die ICRP geben Empfehlungen hinsichtlich der Strahlenexposition vor. Ziel der Grenzwertvorgaben von StrlSchV und ICRP ist es, Strahlenschäden zu vermeiden, welche in sogenannte stochastische, also zufällige, und deterministische Effekte differenziert werden. Während die Letztere ganz eindeutig strahlungsenergetische Schwellendosen in Abhängigkeit von der betroffenen Zellart aufweisen (Minimum ca. 1 Gy) und die Schwere der Erkrankung dosisabhängig ist, geht man im Strahlenschutz davon aus, dass die stochastischen Effekte keine Schwellendosen aufweisen und dass die Anzahl der betroffenen Personen mit erhöhter Strahlendosis und lang anhaltenden Effekten zunimmt. Bei der Einschätzung dieser Effekte ist es wichtig, zwischen der Energiedosis (Gy), der reinen durch die Strahlung auf Materie übertragene Energie und der biologisch relevanten Äquivalentdosis (Sv) für den gesamten Körper (= Effektivdosis; ED) und die einzelnen Organe (= Organdosis; OD) zu unterscheiden, welchen ein spezifischer biologischer Wichtungsfaktor zur Energiedosis hinzugerechnet wird (SCHÜTZ et al., 2016)

Beruflich exponierte Personen können laut StrlSchV bis zu 20 mSv/Jahr exponiert werden (§ 78 (1) Strahlenschutzgesetz), wobei diese Dosis über einen 5-Jahres-Zeitraum gemittelt wird. Nicht nur die Körperdosis muss hierbei beachtet werden, auch Organdosen unterliegen gesetzlich geregelten Grenzwerten (KRAUSS et al., 2014). Die Strahlenschutzkommission gibt hier Organ-Äquivalentdosen für die berufliche Strahlenexposition vor (STRAHLENSCHUTZKOMMISSION, 2020).

Grundsätzlich gilt in internationalen und nationalen Empfehlungen das ALARA („as low as reasonably achievable“)-Prinzip. Das bedeutet, dass nur so viel Strahlung wie unbedingt erforderlich zum Erreichen des Untersuchungsziels eingesetzt werden sollte. Demnach soll unter Gewährleistung diagnostischer und interventioneller Sicherheit darauf hingearbeitet werden, dass die Strahlenexposition möglichst unterhalb aktueller Referenzwerte liegen. Entsprechende Strahlenschutzmaßnahmen und Kursprogramme können hier die Strahlenexposition für Patienten und medizinisches Personal nachhaltig reduzieren.

Um eine möglichst geringe Strahlenexposition für das medizinische Personal zu erreichen, wird in deutschen Krankenhäusern oftmals nach der 3A-Regel (Abstand halten, für Abschirmung sorgen, Aufenthaltsdauer minimieren) gearbeitet. Zudem sollte die Schutzkleidung fachgerecht angelegt werden und für Abschirmung durch verschiedene Strahlenschutzmittel und Ausrüstung gesorgt werden. Des Weiteren ist hilfreich, wenn die Strahlendosis durch Maßnahmen der Untersuchungstechnik möglichst geringgehalten wird (SCHÜTZ et al., 2016).

Als Maßnahmen der Untersuchungstechnik beispielsweise bei Herzkatheteruntersuchungen sind folgende (Verhaltens-)Regeln zu benennen (HAMM et al., 2008; SCHÄCHINGER et al., 2015):

- möglichst geringen Detektor-Patienten-Abstand
- Einblendung auf ROI („region of interest“)
- bedarfsgerechte Durchleuchtungszeiten sowie Anzahl und Dauer der Filmserien.
- Umsetzung strahlenschonender Röhrenangulationen
- herzfrequenzadaptierte Bild- und interventionsangepasste Pulsfrequenzen
- bedarfsgerechten Ausbildungs- und körperlichen Erholungszustand.

Aus gerätetechnischer Sicht ist die hinreichende Detektoreingangsdosis bzw. Bildqualität bei möglichst strahlenarmer Einstellung zu nennen. Auch auf technischer Seite könnten Strahlenschutzmaßnahmen ergriffen werden bzw. Schutzmittel genutzt werden, um Strahlenexposition zu verringern (ICRP, 2012): Anlagenbezogene bleiäquivalente Abdeckungen (i. d. R. 0,5–1 mm Pb-Äquivalenz):

- Obertischschildscheibe (z. B. Acrylscheibe) mit Bleilamellenverlängerung
- Untertischlamellen mit schwenkbarem Seitenteil (mit Lamellenverlängerung der Obertischschildscheibe abgestimmt)
- Fahrbare Bleiacrylscheiben (z. B. für TAVI, TEE oder Anästhesie) Fußschalterschutz

Experimentelle Studien deuten auf eine starke Reduktion der Strahlungsexposition für medizinisches Personal durch Schutzmittel hin und zeigen beispielsweise, dass ohne Hand- und Augenschutz die totale Strahlungsexposition lediglich auf die Durchführung von beispielsweise 300 Kyphoplastien pro Jahr minimiert wäre. Das legt die Wichtigkeit von individuellen Schutzmaßnahmen für das medizinische Personal nahe, insbesondere in den Bereichen Radiologie, Kardiologie, Herz- und Gefäßchirurgie sowie Orthopädie und Unfallchirurgie (O & U), in der das medizinische Personal von Strahlenexposition als Gefahrenquelle betroffen ist (MROZ et al., 2008).

Individuelle Maßnahmen des Untersuchers (i. d. R. 0,35–0,5 mm Pb-Äquivalenz):

- Rundummantel oder Zweiteiler, ggf. mit Schulterschutz
- Schilddrüsenschutz
- Lateral umfassende Bleibrille
- Mütze oder Helm (aus Blei oder bleiäquivalentem Material)
- ggf. Handschuhe bei direkter Strahlenexposition der Hände
- ggf. bleiäquivalente Abschirmung des Fußschalters
- ggf. zur Reduzierung der Händeexposition Bleimatte über bzw. Bleiunterlage unter den Patientenoberschenkeln

Durch Schutzmittel können die Jahresdosis der Strahlenexposition für medizinisches Personal extrem gesenkt werden. Beispielsweise reduziert sich der Jahresdosiswert der Strahlenexposition der Augenlinse für medizinisches Personal von 250mSv ohne Schutzeinrichtung auf 5mSv mit Schutzeinrichtung (Werte für Angiographie/ DSA Durchleuchtungszeit 5h/ Woche mit DSA-Serien) (Norddeutsches Seminar für Strahlenschutz, 2021).

Neben der Reduktion der Strahlenexposition von medizinischem Personal ist auch eine Reduktion der Strahlenexposition des Patienten erstrebenswert. Diese kann, insbesondere außerhalb der zu untersuchenden Körperbereiche, unter anderem durch den sachgerechten Einsatz von Patienten-Strahlenschutzmitteln erreicht werden. Allerdings wird zu Bedenken gegeben, dass der übermäßige Einsatz wenig effizienter Schutzmittel oder die falsche Anwendung von Schutzmitteln die Akzeptanz beim medizinischen Personal als auch bei den Patienten verringern und einem optimalen Strahlenschutz entgegenwirken kann (STRAHLENSCHUTZKOMMISSION, 2022). Folgende Schutzmittel können für Patienten genutzt werden:

- Patientenbezogene bleiäquivalente Abdeckungen (i. d. R. 0,2–1 mm Pb-Äquivalenz)
  - Punktionsstelle, Arbeitsfeld oder „region of interest“ können je nach Interventionskomplexität (TAVI, Vorhofohrverschluss, CRT) und Zugangsweg (radial, transapikal) zusätzlich geschützt werden
  - Lagerung des Patienten auf Bleigummimatte/Bleimatte in den Bereichen, die für die geplante Untersuchung nicht durchleuchtet werden müssen (z. B. Beine ab Oberschenkel bei transfemorale Punktion für Herzkatheter)
  - Unsterile Bleimatten/Abdeckungen (z. B. über Oberschenkel des Patienten unter der Sterilabdeckung)
  - Ggf. sterile, während der Untersuchung repositionierbare Strahlenschutzabdeckungen (vorgeformte Einmalartikel) zur Abdeckung im Bereich der Punktionsstelle/der Zugangsstelle

Eine Übersicht über die Anwendung von Patienten-Strahlenschutzmitteln bei verschiedenen Untersuchungsarten und die erzielbare Dosisreduktion findet sich in einer Publikation der Strahlenschutzkommission (STRAHLENSCHUTZKOMMISSION, 2022).

Die Schulung des medizinischen Personals erscheint aufgrund der Gefahr der Strahlenexposition für Patienten und medizinisches Personal besonders wichtig. Dabei stellt sich die Frage, wie medizinisches Personal am besten geschult werden kann. Insbesondere im Hinblick darauf, dass die Strahlenexposition von ärztlichem Personal möglichst geringgehalten werden soll und gleichzeitig praxisnah der Umgang mit Strahlenanwendungen geübt soll, scheint die Nutzung von digitalen Technologien wie AR und VR sinnvoll (DAVIS, 2018; SALOPEK, 2018). Im Bereich des Strahlenschutzes sind diese Technologien für Trainingszwecke bisher kaum verbreitet und die Schulung und Weiterbildung von ärztlichem Personal erfolgt beispielsweise u.a. über Onlinere Ressourcen. Hingegen werden sie in anderen Bereichen wie z.B. bei der Übung minimalinvasiver Operationen bereits erfolgreich zu Übungszwecken oder zur Unterstützung von Operationen eingesetzt (TONUTTI et al., 2017).

#### **4.2 AP1.2 Erarbeitung Konzept**

Basierend auf den Recherchen und auf eigenen Überlegungen ist ein detailliertes Konzept für die Entwicklung und Validierung eines Schulungstools entwickelt worden. Hierbei wurden die geltenden datenschutzrechtlichen Vorschriften, insbesondere die datenschutzrechtlichen Voreinstellungen gem. Art. 25 Datenschutz-Grundverordnung (data protection by design und by default), berücksichtigt und die einzelnen Schritte der Verarbeitung personenbezogener Daten in einem Datenschutzkonzept dokumentiert werden.

Das Konzept umfasst

- die Entwicklung einer eigenen Strahlensimulation, die Nutz- und Streustrahlung visuell repräsentieren kann und die Wirkung von Schutzmitteln und Schutzmaßnahmen während der Untersuchung bei der Berechnung der Dosis berücksichtigt
- die Simulation des Katheterlabors
- die Simulation der Schutzmittel
- ein Bewegungs- und Interaktionskonzept in der VR-Simulation

Ziel des Vorhabens ist es, ein Katheterlabor unter Berücksichtigung aller relevanten Faktoren - inklusive Patient und anderer potentieller Personen im Raum - in der VR-Umgebung zu entwickeln. Die Bewegung aller relevanten Personen und Gerätekomponenten ist in der Umgebung zu ermöglichen. Sowohl die Nutzstrahlung als auch die Streustrahlung

sollen zu Lernzwecken simuliert werden und unabhängig voneinander darzustellen sein. Das Ziel ist, die Wirkung der eingesetzten Maßnahmen zu zeigen. Der Lerneffekt der VR-Übungen ist, mit geeigneten Methoden zu erfassen und anhand von Graphiken darzustellen und zu bewerten.

Das Konzept wurde dem Bundesamt für Strahlenschutz präsentiert. Die Umsetzung des Konzepts ist im nächsten Kapitel (7 AP 2: Entwicklung eines ersten Schulungstools) beschrieben.

## 5. AP 2 Entwicklung der ersten Version des Tools

In einem ersten Schritt wurde das Katheterlabor in VR nachgebildet, in dem sich die Trainierenden beim VR-Training befinden. Dabei werden typische Gerätschaften wie der C-Bogen und der Behandlungstisch sowie Strahlenschutzmittel, die vom Trainierenden genutzt werden können, in die virtuelle Realität übertragen und dort simuliert. Zu diesen essentiellen Strahlenschutzmitteln zählen ein Bleimantel (Ein- oder Zweiteiler), ein Schilddrüsenschutz, eine Bleihaube, eine Bleibrille, eine Bleiplatte und ein Untertischschutz. Handschuhe stehen auch zur Verfügung, obwohl sie in der Regel nicht benutzt werden, um das entsprechende Verhalten der Belichtungsautomatik zu prüfen. Die Simulation des Katheterlabors und der typischen Gerätschaften sind anhand von Fotos eines Katheterlabors und der dazugehörigen Geräte durchgeführt, die bei einem Vorort-Besuch bei Ansprechpersonen des Universitätsklinikums Kiel (UKSH) (Dr. Lützen, Dr. Trentmann und ihren Mitarbeitenden) aufgenommen werden konnten.

In einem zweiten Schritt wurden in der VR-Umgebung die Interaktionsmöglichkeiten mit den typischen Gerätschaften und die Bewegungsmöglichkeiten im simulierten Katheterlabor möglichst realistisch in der virtuellen Realität abgebildet. Dafür wurden ein exemplarischer Patient sowie ein Beispiel-Avatar für das medizinische Personal nachgebildet, der sich in Ich-Perspektive durch das Katheterlabor bewegen und mit den Gerätschaften interagieren kann. Als Grundlage der programmierten Interaktions- und Bewegungsmöglichkeiten diente die Erprobung der typischen Geräte hinsichtlich der Interaktions- und Bewegungsmöglichkeiten beim Vorort-Besuch im UKSH. Auf Basis dieses Erfahrungsschatzes der Programmierenden von Northdocks GmbH wurde ein möglichst einfache Bedienung des Trainings für Endanwender\*innen programmiert und umfassen folgende Interaktions- und Bewegungsmöglichkeiten:

- Implementierung der Möglichkeit, Bleiplatte und Untertischschutz so zu platzieren, dass die Streustrahlung minimiert wird.
- Implementierung der Möglichkeit, den Bildverstärker an den Patienten heranzufahren.
- Implementierung der Möglichkeit, die Bildrate (Cine und Fluoro) zu verändern und die Low-Medium-High Einstellung sowie voll- und semitransparente Blenden zu verwenden.
- Implementierung der Bewegungsfreiheit, um bei der simulierten Untersuchung den Abstand zum C-Bogen zu halten sowie „strahlenarme“ Projektionen auszuwählen.
- Implementierung der Bewegungsfreiheit, um bei der simulierten Untersuchung die Finger mit und ohne Blei-Handschuhe innerhalb der Belichtungsautomatik zu platzieren.

Um die Wirkung von verschiedenen Schutzmaßnahmen während der Untersuchung anzeigen zu können, wurde folgen Einflüsse auf die Nutz- und Streustrahlung sowie die Berechnung der Organdosiswerte implementiert:

- Einfluss der Bildrate (Modalitäten Cine und Fluoro)
- Einfluss der Durchleuchtungs- und Cine-Zeit
- Verwendung von vorprogrammierten Modi
- Einfluss des Abstands des Bildverstärkers vom Objekt
- Optimierung der Einblendung
- Verwendung semitransparenter Blenden
- Verhalten bei Verwendung von Blei-Handschuhen
- Einfluss des Abstands von der Strahlenquelle beim Filmen und bei CBCT-Aufnahmen

- Auswahl strahlenarmer Projektionen

In einem vierten Schritt erfolgt die Abschätzung oder Berechnung von Organdosiswerten (insbesondere für Augenlinse und Schilddrüse), der Hautdosis an den Händen und der effektiven Dosis für das Personal und den Patienten für die o. g. Expositionsszenarien und Schutzmittel. Die effektive Dosis ergibt sich aus der Summe der gewichteten Organdosen ( $H_T$ ) für alle angegebenen Gewebe und Organe des Körpers und wurde mit der Formel für die effektive Dosis berechnet (INTERNATIONALE STRAHLENSCHUTZKOMMISSION, 2007):

$$E = \sum_T w_T H_T$$

Die Formel wurde für die Anwendung angepasst und die Gewichtungsfaktoren ( $w_T$ ) wurden gruppiert, um besser berechnet werden zu können. Die Zusammensetzung der gesamten Dosis unter Berücksichtigung der Gewichtungsfaktoren ist in Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1 Gewichtungsfaktoren Körperteile/ Organe.**

Körperteil/ Organ	Gewichtungsfaktor
Kopf	0,04
Augen	0,03
Hände	0,01
Hals	0,10
Oberkörper	0,33
Becken	0,46
Extremitäten	0,03
Summe	1

Die erste Version des Schulungstools wurde in einem Projektgespräch in Oberschleißheim präsentiert. Zusätzlich zur ersten funktionierenden Version des Tools wurde auch eine Bedienungsanleitung übermittelt. In der Bedienungsanleitung werden sowohl der Umgang mit der VR-Brille und den Controllern (z.B. im Hinblick auf die Bewegung und Orientierung in der Simulationsumgebung mit den Controllern) als auch mit dem Schulungstool (z.B. Einstellen des C-Bogens) erklärt. Zudem befindet sich für eine genauere Erläuterung des Umgangs mit dem Schulungstool auch ein Link zu einer Videoanleitung, die als eine Art visuelle Schritt-für-Schritt-Anleitung mit Sprechertext angesehen werden kann.

## 6. AP 3 Evaluierung der Software und Erstellung der endgültigen Version

### 6.1 AP 3.1. Validierung der Software

Ziel des Teilarbeitspakets 3.1 war es, die erste Version des entwickelten Schulungstools mit praktizierendem medizinischen Personal zu validieren. Zur Validierung des Schulungstools wurde ein Prä-Post-Test durchgeführt, bei dem zum einen die effektive Dosis und die Augenlinsendosis der Strahlenexposition unter Verwendung verschiedener Schutzmaßnahmen erfasst wurde und zum anderen ein Fragebogen mit Wissensfragen sowie Fragen zur Zufriedenheit mit der VR-Anwendung eingesetzt wurde. Damit die Teilnehmenden ohne Vorerfahrung mit VR keinen Nachteil in der Nutzung des Schulungstools hatten, erhielten alle eine Schulung zur Nutzung des VR-Headsets und der Controller. Bei der Nutzung des VR-Schulungstools hatten die Teilnehmenden nicht nur die Aufgabe sich mit den Strahlenschutzmitteln zu beschäftigen und den Einfluss verschiedener strahlenoptimierender Verhaltensweisen auf die Strahlenexposition zu beobachten, sondern um den Alltag möglichst gut zu widerzuspiegeln, führten sie auch Untersuchungen an einem Patienten durch (Koronarangiographie).

Die Validierung erfolgte mit dem medizinischen Personal des Universitätsklinikums Köln an der Schule der Medizinischen Technologien für Radiologie (MTR). Die Validierung wurden mit einer Stichprobe von 36 Personen durchgeführt. 55,6% der Teilnehmenden waren MTRA-Schüler\*innen aus verschiedenen Lehrjahren. 39,8% der Teilnehmenden gaben an keine Vorerfahrung mit katheterbasierten Interventionen und 58,3% gaben an nur über wenig Vorerfahrungen mit katheterbasierten Interventionen zu haben. 55,6% der Teilnehmer\*innen hatten keine Vorerfahrung mit VR und 44,4% nur wenig Vorerfahrung.

#### 6.1.1 Erste Validierung der Strahlensimulation

Um zu validieren, ob die entwickelte Simulation der Strahlung fachlich korrekt ist und die Wirkung der Schutzmittel korrekterweise die effektive Dosis bzw. Dosis der Augenlinsen reduziert, wurden im Rahmen der ersten Validierung drei unterschiedliche Bedingungen getestet: Erstens der Einfluss der Strahlung ohne die Verwendung von Schutzmitteln und ohne Abstand zum Patienten bzw. Detektor. Zweitens der Einfluss der Strahlung bei Verwendung von Schutzmitteln und ohne Abstand zum Patienten bzw. Detektor. Drittens wird der Einfluss bei der Verwendung von Schutzmitteln und mit Abstand zum Patienten bzw. Detektor. Für den Zweck der Validierung wurden zum einen der Wert für die effektive Dosis und zum anderen der Dosiswert für die Augenlinsen in der Simulation berechnet und angezeigt. Auf Basis der Formeln ist anzunehmen, dass die Werte geringer ausfallen sollten, je mehr Schutzmaßnahmen eingesetzt werden.

Am geringsten fiel der Mittelwert ( $M$ ) der effektiven Dosis bei der Verwendung von Schutzmitteln und Abstandhalten zum Patienten bzw. Detektor aus ( $M = 0,11$  mSv;  $SD = 0,16$  mSv) (ungekürzte statistischen Begriffe siehe Abkürzungsverzeichnis). Der Mittelwert ( $M$ ) des in der Strahlensimulation berechneten Wertes der effektiven Dosis war bei Verwendung von Schutzmitteln und ohne Abstand zum Patienten bzw. Detektor ( $M = 0,29$  mSv;  $SD = 0,23$  mSv) geringer als ohne Schutzmittel und nah am Patienten ( $M = 1,49$ ;  $SD = 1,04$ ). Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung zeigen, dass die verschiedenen Messbedingungen einen signifikanten Einfluss auf die effektive Dosis hat ( $F(2,38) = 35.791$ ,  $p < .001$ ). Der Effekt der verschiedenen Messbedingungen entspricht einem starken Effekt (partielles Eta-Quadrat (Effektstärkenmaß auf Stichprobenebene):  $\eta^2 = .653$ ).

Der berechnete durchschnittliche Wert der Augenlinsendosis war bei Verwendung von Schutzmitteln und ohne Abstand zum Patienten bzw. Detektor ( $M = 0,005$  mSv;  $SD = 0,004$  mSv) geringer als ohne jegliche Schutzmaßnahmen (Bedingung: ohne Schutzmittel und nah am Patienten ( $M = 0,35$  mSv;  $SD = 1,11$  mSv). Des Weiteren war die durchschnittliche Augenlinsendosis bei der Verwendung von Schutzmitteln und Abstandhalten zum Patienten bzw. Detektor am geringsten ( $M = 0,002$  mSv;  $SD = 0,002$  mSv). Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung zeigen allerdings, dass die verschiedenen Messbedingungen keinen signifikanten Einfluss auf die Augenlinsendosis hat ( $F(2,38) = 1.949$ ,  $p > .05$ ) (ungekürzte statistischen Begriffe siehe Abkürzungsverzeichnis). Das partielle Eta-Quadrat (Effektstärkenmaß auf Stichprobenebene) beträgt  $\eta^2 = .093$ .

### 6.1.2 Prätest: Wissen

Im Mittel erreichten die Teilnehmenden 7,94 von 12 möglichen Punkten in den Wissensfragen (Minimum = 4; Maximum = 12). Der Median betrug 8 Punkte. Besonders häufig wurden die Fragen “Wenn ich die Bleibrille anziehe, reduziert sich die Dosis in meiner Augenlinse um den Faktor” (richtige Antwort von 15 von 36 Teilnehmenden) und Wenn ich sowohl den Untertischschutz als auch die Bleischürze mit Schilddrüsenschutz benutze, reduziert sich meine effektive Dosis um den Faktor...?” (richtige Antwort von 9 von 36 Teilnehmenden) falsch beantwortet. Weitere detailliertere Ergebnisse sowie graphische Darstellungen dieser werden in Anhang A präsentiert.

### 6.1.3 Posttest: Wissen und Einschätzung Verständnis

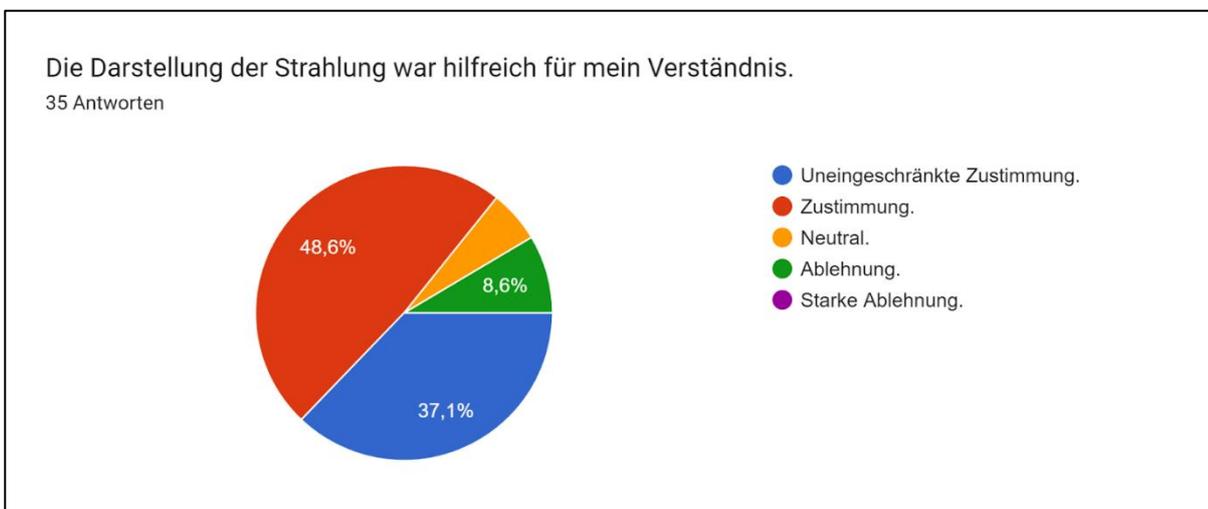
Am Posttest nahmen 35 Personen teil. Die Teilnehmenden hatten entweder wenig Vorerfahrung (51,4%) oder keine Vorerfahrung mit VR (48,6%).

Im Mittel erreichten die Teilnehmenden 7,49 von 12 möglichen Punkten in den Wissensfragen (Minimum = 0; Maximum = 10). Der Median betrug 8 Punkte. Besonders häufig wurden die folgenden Fragen falsch beantwortet:

- “Wenn ich sowohl den Untertischschutz als auch die Bleischürze mit Schilddrüsenschutz benutze, reduziert sich meine effektive Dosis um den Faktor...?” (richtige Antwort von 8 von 35 Teilnehmenden),
- “Erhöhe ich die Patientendosis wenn ich Blei-Handschuhe benutze?” (richtige Antwort von 17 von 35 Teilnehmenden) und
- “Wenn ich die Bleibrille anziehe, reduziert sich die Dosis in meiner Augenlinse um den Faktor...” (richtige Antwort von 17 von 35 Teilnehmenden)

Das heißt: Der Lerneffekt war im Mittel nicht zu erkennen, obwohl bei einigen Fragen mehr Teilnehmer\*innen die richtige Antwort im Post-Test gewählt haben.

Die Teilnehmenden stimmten mehrheitlich der Aussage “Die Darstellung der Strahlung war hilfreich für mein Verständnis.” zu. Die genaue prozentuale Verteilung ist in Diagramm 1 dargestellt.



1 Diagramm: Prozentuale Verteilung der Antworten zu dem Item “Die Darstellung der Strahlung war hilfreich für mein Verständnis.”

Weitere detailliertere Ergebnisse sowie graphische Darstellungen dieser werden in Anhang A präsentiert.

#### **6.1.4 Posttest: Einschätzung des Schulungstools**

Im Posttest wurden die Teilnehmenden auch nach Feedback zu dem VR-Schulungstool befragt.

82,9% der Teilnehmenden gaben an, sich durch das Tutorial auf die Bedienung vorbereitet gefühlt zu haben (14,3% einigermaßen gut und 2,9% mittel/ weder noch). Verbesserungsvorschläge für das Tutorial durch die Teilnehmenden waren eine längere Übungszeit, ein längerer Fokus im Tutorial für das Greifen von Objekten, ein langsames Tempo der Bewegung und eine präzisere Formulierung von Fragen.

Die Mehrheit der Teilnehmenden stimmte der Aussage zu, dass die Umgebung glaubwürdig war (65,7% Zustimmung und 28,6% uneingeschränkte Zustimmung). Des Weiteren gab der Großteil der Teilnehmenden an, die Interaktionen mit den einzelnen Elementen als intuitiv empfunden zu haben (77,1% Zustimmung und 20% uneingeschränkte Zustimmung) und sich gut in der Szene durch Laufen und Teleportieren bewegen zu können (62,9% Zustimmung und 37,1% uneingeschränkte Zustimmung).

Die Teilnehmenden gaben an, zu wissen, was sie zu tun haben (31,4% uneingeschränkte Zustimmung, 51,4% Zustimmung und 17,1% neutral). Jedoch gaben 5,7% (2 Teilnehmende) an, mit der Anwendung überfordert zu sein. Die restlichen Teilnehmenden lehnten die Aussage ab, sich durch die Anwendung überfordert zu sein (48,6% starke Ablehnung der Aussage, 28,6% Ablehnung und 17,1% neutral). 34,3% der Teilnehmenden stimmten uneingeschränkt der Aussage "Ich habe mich gefühlt, als wäre ich tatsächlich in einem anderen Raum" zu. 60% der Teilnehmenden stimmten dieser Aussage zu, 2,9% waren neutral und 2,9% lehnten diese Aussage ab.

#### **6.1.5 Posttest: Feedback zum Schulungstool und zur Strahlensimulation**

Gut gelungen empfanden die Trainierenden die realistische und echte Bildgebung, das Texture Pack, die Darstellung des Untersuchungsraumes, die Darstellung von Katheter und Röntgenschutzmitteln sowie die Patientenlage. Auch die Funktionalität der Gegenstände und Geräte wurde positiv beurteilt. Auch Aspekte der Bedienung, Steuerung und Bewegung wurden hervorgehoben: Die Auswahl und Bedienung, das Bewegen im Raum wurde als gut gelungen bezeichnet. Im Hinblick auf die Strahlensimulation wurden die Darstellung der Strahlung und der Dosis, Dosisberechnung und die Verdeutlichung der Strahlenexposition mit und ohne Strahlenschutz positiv hervorgehoben.

Verbesserung sahen die Teilnehmenden noch bei den folgenden Punkten: Einzelne Teilnehmende haben sich eine langsamere Bewegung im Raum gewünscht, um Motion-Sickness vorzubeugen. Damit verbunden wurde sich gewünscht, dass das Umsehen mit dem Controller weniger ruckhaft, sondern fließend erfolgen sollte. Ein weiterer Wunsch war, eine andere Position der Anzeige der Strahlung (z.B. am Fuß des Patienten) zu finden, damit man sich nicht um 180 Grad drehen muss, um sie bei der Arbeit am Patienten sehen zu können.

Auf visueller Ebene wurden einzelne Wünsche nach einer größeren Schärfe des Bildes bzw. einer präziseren Einstellung der Schärfe für Brillenträger geäußert. Weiterhin wurde gewünscht, dass Gegenstände und Geräte auch haptisch erlebbar werden (z.B. beim Anheben eines Gegenstands fühlt sich dieser genauso schwer an, wie er tatsächlich ist) und stärker dem Prinzip der Schwerkraft unterliegen (z.B. beim Runterfallen der Bleibrille).

Hinsichtlich der Strahlensimulation wurde sich gewünscht, dass die Strahlen etwas länger dargestellt werden, um den Verlauf deutlich nachvollziehen zu können. Damit verbunden war auch der Wunsch, sich den Strahlengang länger und genauer ansehen zu können. Auch eine Darstellung der ortsabhängigen Dosisleistung wurde sich gewünscht.

Auch zum Training kam Feedback: So wurde der Vorschlag eingebracht, eine Liste mit Aufgaben vorzugeben, die abgearbeitet werden kann (z.B. Bleibrille aufsetzen und danach besonders auf die Augenlinsendosis achten), damit man noch mehr auf bestimmte Werte geachtet wird, wenn Schutzmittel angelegt bzw. genutzt werden.

#### **6.1.6 Ableitung von Weiterentwicklungsmöglichkeiten anhand der Ergebnisse der ersten Validierung**

Im Zuge der Überarbeitung nach der ersten Validierung wurde vor allem ein Update bei der Visualisierung durchgeführt. Die Strahlen sind nun beständiger und damit besser zu sehen. Dies sollte die Verständlichkeit bei der zweiten Validierung enorm verbessern. Des Weiteren wurden sowohl die fahrbare als auch die über dem Patienten angebrachte Bleischeibe angepasst, besser bewegbar gemacht und deren Absorptionsrate angepasst. Auch kleinere Anpassungen an der ICRP-Formel, die die Grundlage der Strahlensimulation darstellt, wurden durchgeführt: Die Gewichtungsfaktoren wurden optimiert und normiert, die Grundstrahlung angepasst und ausgiebig getestet. Dies soll unter anderem die Problematik der sehr niedrigen effektiven Dosis bzw. Dosis der Augenlinse bei der Bedingung ohne

Schutzmittel und nah am Patienten bzw. Detektor adressieren. Abschließend wurden die Texte in der Anwendung sinnvoll an die Fachsprache angeglichen.

## **6.2 AP 3.2. Erstellung und Validierung der endgültigen Version**

Nach der Überarbeitung des Schulungstools auf Basis der Ergebnisse und Rückmeldungen aus der ersten Validierung wurde die überarbeitete (endgültige) Version validiert. Die Validierung erfolgte erneut mit medizinischem Personal des Universitätsklinikums Köln an der Schule der Medizinischen Technologien für Radiologie (MTR). Um zu verhindern, dass sich (Test-)Effekte der ersten Validierung und der zweiten Validierung kumulieren, wurde eine Stichprobe, die noch nicht an der ersten Validierung teilgenommen hat, für die zweite Validierung herangezogen.

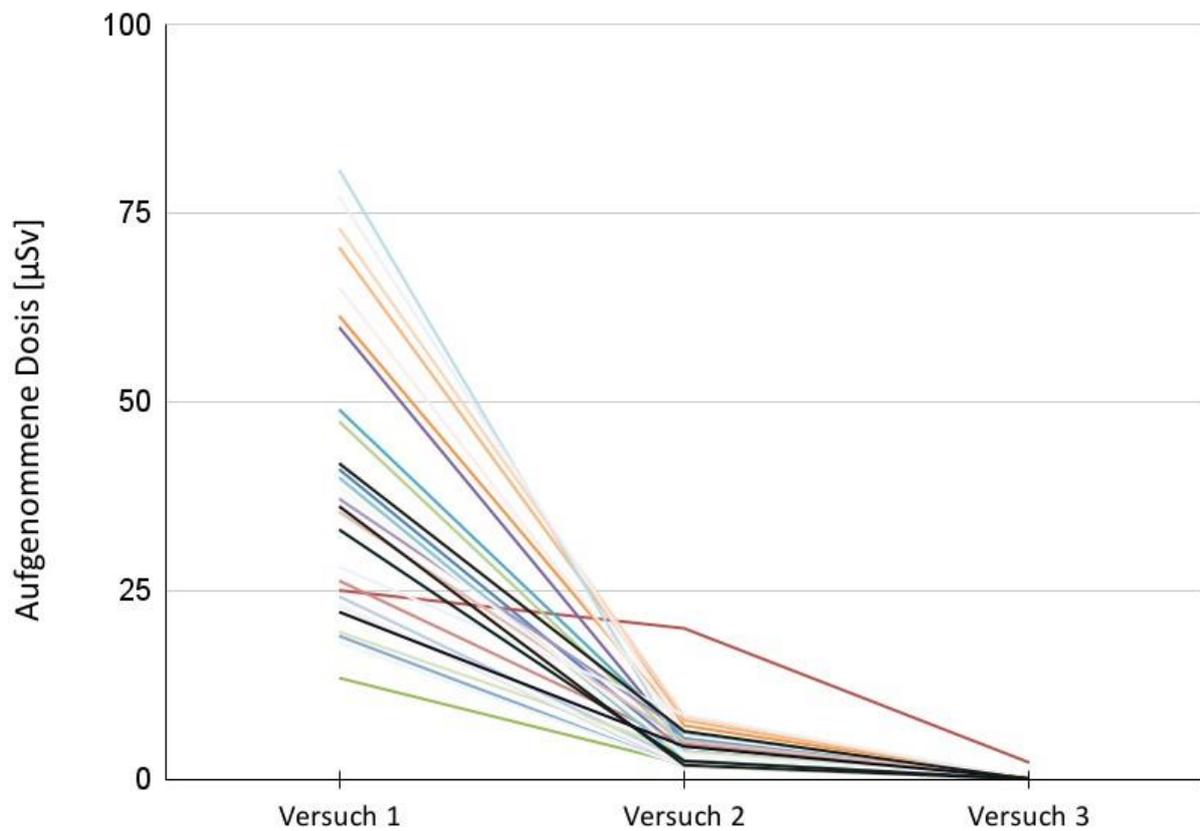
Der zweite Validierung wurden mit einer Stichprobe von 30 Personen durchgeführt. 46,6% der Teilnehmenden waren MTRA-Schüler\*innen aus verschiedenen Lehrjahren. 33,3% der Teilnehmenden gaben an keine Vorerfahrung mit katheterbasierten Interventionen und 63,3% gaben an nur über wenig Vorerfahrungen mit katheterbasierten Interventionen zu haben. Eine Person (3,3%) hat viel Erfahrung in der katheterbasierten Intervention. 26,7% der Teilnehmenden hatten keine Vorerfahrung mit VR und 73,3% nur wenig Vorerfahrung.

Bei dieser Validierung hatten die Teilnehmenden bei der Nutzung des Schulungstools nicht nur die Aufgabe den Einfluss verschiedener strahlenoptimierender Verhaltensweisen (wie die Nutzung von Schutzmitteln und Abstandhalten) auf die Strahlenexposition zu beobachten, sondern um den Alltag möglichst gut zu widerzuspiegeln, führten sie auch Untersuchungen an einem Patienten durch. Bei der zweiten Validierung waren die Interventionen der Diagnostischen Koronarangiographie sowie eines Carotis-Stentings implementiert, damit die Trainierenden diese schemenhaft durchführen können und ihre Aufmerksamkeit nicht nur auf das strahlenoptimierte Verhalten gelenkt ist. Das Carotis-Stenting wurde gemäß der Leistungsbeschreibung als zweite Interventionsart frei gewählt. Das Carotis-Stenting wurde als zweite Interventionsart ausgewählt, da bei dieser (sowie anderen) Interventionsart(en) oftmals mit Systemen mit Flachbilddektoren gearbeitet bzw. mit C-Bogen-gestützten Rotationsangiografien (CBCT) gearbeitet wird. Dieses Vorgehen bietet den Vorteil einer schnelleren Akquisition von Volumendaten sowie die Möglichkeit der sekundären Rekonstruktion CT-ähnlicher Schnittbilder in hoher Kontrastaufklärung unmittelbar im Angiografieraum (Strahlenschutzkommission, 2015). Der Einsatz des Carotis-Stentings im Schulungstool ist folglich darin begründet, dass die dort verwendete digitale Volumentomographie (CBCT) eine detailgenaue Diagnostik mit wenig Röntgenstrahlung sowie hoher Präzision der Bilder liefert und diese daher auch in der Praxis immer häufiger eingesetzt wird.

### **6.2.1 Zweite Validierung der Strahlensimulation**

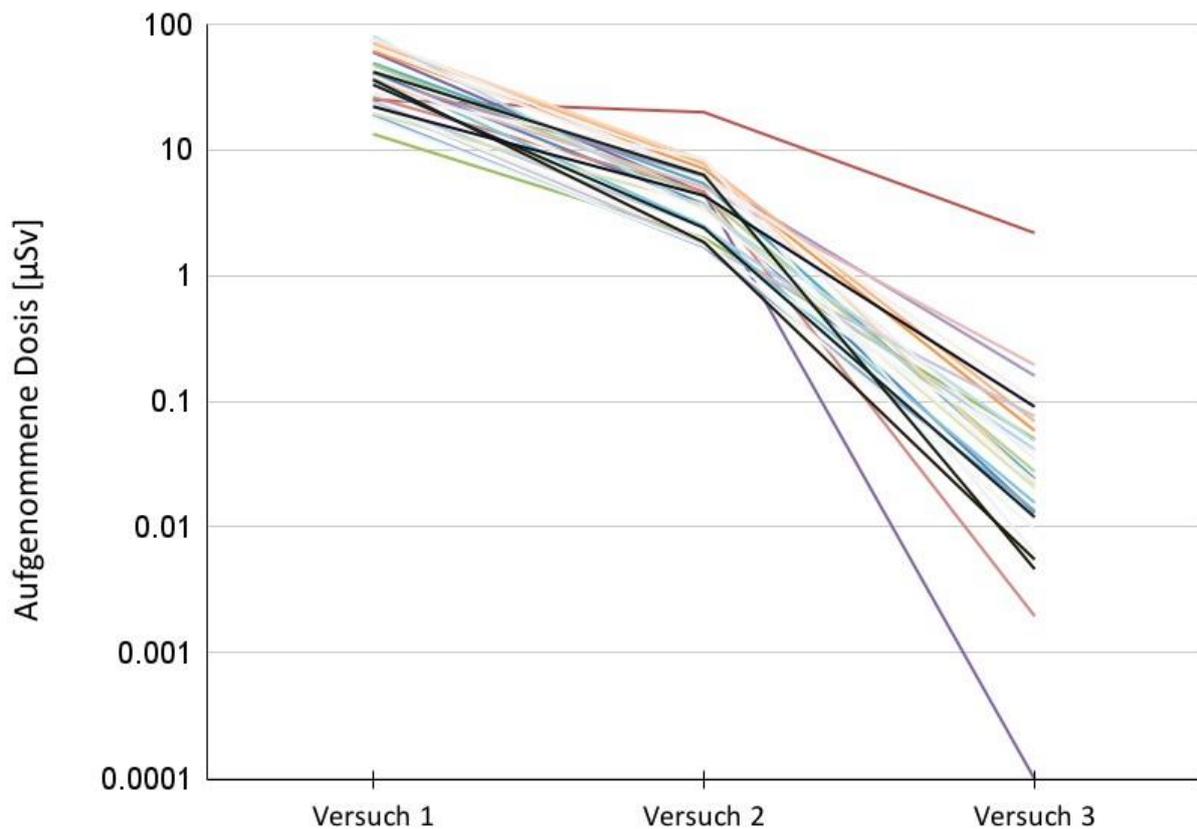
Abbildung 2 und 3 zeigen die Ergebnisse der Validierung der Strahlensimulation. Hier wurde jeweils drei Mal von der gleichen teilnehmenden Person eine Koronarangiographie durchgeführt. Dies wurde für alle Personen aus der Stichprobe wiederholt. Der erste Messzeitpunkt zeigt die effektive Dosis der Strahlung (effektive Dosis), wenn keine Schutzmittel genutzt wurden und kein Abstand zum Patienten bzw. Detektor gehalten wurde. Die zweite Messung zeigt den Wert der effektive Dosis bei Verwendung von Schutzmitteln, aber ohne Abstand zum Patienten. Bei der dritten Messung wurde zusätzlich noch die effektive Dosis angezeigt, wenn Schutzmittel angelegt wurden und Abstand zum Patienten bzw. Detektor gehalten wurde. Anhand der Abbildung lässt sich eine erwartungsgemäße Abnahme der Dosiswerte feststellen, wenn mehr Schutzmaßnahmen eingesetzt wurden.

## 2. Validierung



2 Abbildung. Darstellung der effektiven Dosis unter verschiedenen Bedingungen mit einer linearen Skala (1. Messung: ohne Verwendung von Schutzmitteln und nah am Patienten bzw. Detektor, 2. Messung: Verwendung von Schutzmitteln und nah am Patienten bzw. Detektor, 3. Messung: Verwendung von Schutzmitteln und Abstand zum Patienten bzw. Detektor).

## 2. Validierung



3 Abbildung. Darstellung der effektiven Dosis unter verschiedenen Bedingungen mit einer logarithmischen Skala (1. Messung: ohne Verwendung von Schutzmitteln und nah am Patienten bzw. Detektor, 2. Messung: Verwendung von Schutzmitteln und nah am Patienten bzw. Detektor, 3. Messung: Verwendung von Schutzmitteln und Abstand zum Patienten bzw. Detektor).

Ergänzend zu Abbildung 2 und 3 werden auch die Deskriptiva der berechneten Messwerte für die drei Bedingungen berichtet: Die berechnete Wert der effektive Dosis (Bedingung: ohne Schutzmittel und nah am Patienten ( $M = 40,33$  mSv;  $SD = 19,74$  mSv) reduzierte sich durch die Verwendung von Schutzmitteln und ohne Abstand zum Patienten bzw. Detektor ( $M = 4,92$  mSv;  $SD = 3,63$  mSv) (ungekürzte statistischen Begriffe siehe Abkürzungsverzeichnis). Des Weiteren verringerte sich die effektive Dosis erneut nach Verwendung von Schutzmitteln und Abstandhalten zum Patienten bzw. Detektor ( $M = 0,12$  mSv;  $SD = 0,41$  mSv). Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung zeigen, dass die verschiedenen Messbedingungen einen signifikanten Einfluss auf die effektive Dosis hat ( $F(2,54) = 104,589$ ,  $p < .001$ ) (ungekürzte statistischen Begriffe siehe Abkürzungsverzeichnis). Der Effekt der verschiedenen Messbedingungen entspricht einem starken Effekt (partielles Eta-Quadrat (Effektstärkenmaß auf Stichproben-ebene):  $\eta p^2 = .795$ ).

Der berechnete Wert der Augenlinsendosis (Bedingung: ohne Schutzmittel und nah am Patienten ( $M = 1,84$  mSv;  $SD = 1,14$  mSv) reduzierte sich durch die Verwendung von Schutzmitteln und ohne Abstand zum Patienten bzw. Detektor ( $M = 0,18$  mSv;  $SD = 0,15$  mSv). Des Weiteren verringerte sich die Augenlinsendosis erneut nach Verwendung von Schutzmitteln und Abstandhalten zum Patienten bzw. Detektor ( $M = 0,003$  mSv;  $SD = 0,005$  mSv). Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung zeigen, dass die verschiedenen Messbedingungen einen signifikanten Einfluss auf die effektive Dosis hat ( $F(2,54) = 64,106$ ,  $p < .001$ ) (ungekürzte statistischen Begriffe siehe Abkürzungsverzeichnis). Der Effekt der Messbedingungen entspricht einem starken Effekt (partielles Eta-Quadrat (Effektstärkenmaß auf Stichprobenebene):  $\eta p^2 = .704$ ).

### 6.2.2 Prätest: Wissen

Im Mittel erreichten die Teilnehmenden 5,27 von 12 möglichen Punkten in den Wissensfragen (Minimum = 2; Maximum = 10). Der Median betrug 4 Punkte. Besonders häufig wurden die Fragen "Welche Maßnahmen helfen zum Strahlenschutz?" (richtige Antwort von 7 von 30 Teilnehmenden) und "Wenn ich sowohl den Untertischschutz als auch die Bleischürze mit Schilddrüsenschutz benutze, reduziert sich meine effektive Dosis um den Faktor...?" (richtige Antwort von 11 von 30 Teilnehmenden) falsch beantwortet. Weitere detailliertere Ergebnisse sowie graphische Darstellungen dieser werden in Anhang B präsentiert.

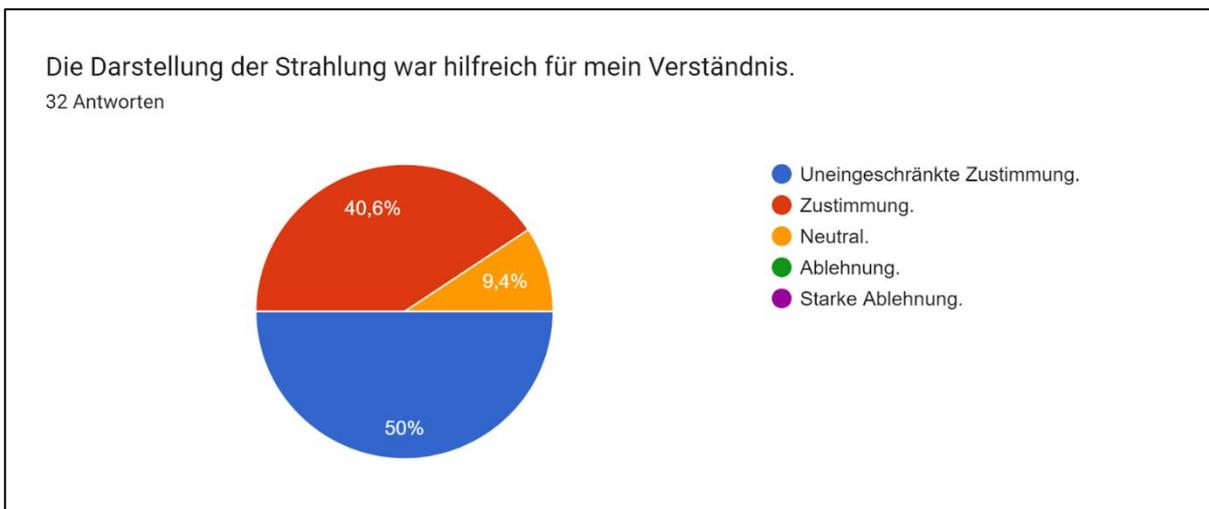
### 6.2.3 Posttest: Wissen und Einschätzung Verständnis

Am Posttest nahmen 32 Personen teil. Die Teilnehmenden hatten entweder wenig Vorerfahrung (51,4%) oder keine Vorerfahrung mit VR (48,6%).

Im Mittel erreichten die Teilnehmenden 6,19 von 12 möglichen Punkten in den Wissensfragen (Minimum = 0; Maximum = 12). Der Median betrug 6 Punkte. Besonders häufig wurde die Frage "Welche Maßnahmen helfen zum Strahlenschutz" (richtige Antwort von 11 von 32 Teilnehmenden) falsch beantwortet. Die Frage "Wenn ich sowohl den Untertischschutz als auch die Bleischürze mit Schilddrüsenschutz benutze, reduziert sich meine effektive Dosis um den Faktor...?" wurde nach der Nutzung der VR-Anwendung häufiger richtig beantwortet als beim Prätest: richtige Antwort von 20 von 32 Teilnehmenden, wobei vor der Nutzung der VR-Anwendung nur 11 Personen richtig geantwortet hatten.

Insgesamt gab es also eine Erhöhung von 57 % in der Beantwortung von der ersten Frage, 81% bei der zweiten genannten Frage und eine Erhöhung von 5,27 auf 6,19 (17%) in der mittleren Punktzahl.

Die Teilnehmenden stimmten mehrheitlich der Aussage "Die Darstellung der Strahlung war hilfreich für mein Verständnis." zu. Die prozentuale Verteilung wird anhand von Diagramm 3 ersichtlich.



3 Diagramm: Prozentuale Verteilung der Antworten zu dem Item "Die Darstellung der Strahlung war hilfreich für mein Verständnis."

Weitere detailliertere Ergebnisse sowie graphische Darstellungen dieser werden in Anhang B präsentiert.

## 7. Diskussion der Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts wurde ein Schulungstool entwickelt, das es medizinischem Personal ermöglicht, in VR Strahlung bei (katheterbasierten) Interventionen und die Wirkung von Schutzmitteln und strahlenoptimiertem Verhalten zu beobachten. Dies soll das Bewusstsein für Strahlenexposition und die Bedeutsamkeit von Schutzmitteln erhöhen. Für das Schulungstool wurde nicht nur ein Katheterlabor nachgebildet und in VR übertragen, sondern auch eine eigene Strahlensimulation entwickelt.

In einem ersten Schritt wurde die erste Version des Schulungstools mit Hilfe von medizinischem Personal validiert. Die Strahlensimulation wurden dabei durch die Berechnung der Messwerte der effektive Dosis und Augenlinsendosis unter drei Bedingungen (1. Bedingung: keine Schutzmittel genutzt wurden und kein Abstand zum Patienten bzw. Detektor; 2. Bedingung: Verwendung von Schutzmitteln, aber kein Abstand zum Patienten bzw. Detektor; 3. Bedingung: Verwendung von Schutzmitteln und Abstand zum Patienten bzw. Detektor) validiert. Verschiedene Personen aus der Stichprobe des medizinischen Personals führten dabei jeweils die drei Messungen durch, um Effekte durch eine einzelne Versuchsperson zu minimieren. Ergebnisse der ersten Validierung zeigten, dass sich erwartungsgemäß die Werte der effektiven Dosis bei Einsatz von Strahlenschutzmaßnahmen signifikant verringerten. Allerdings fielen die initialen Werte der effektiven Dosis ohne Strahlenschutzmaßnahmen verhältnismäßig gering aus. Zudem zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten der Augenlinsendosis der drei Bedingungen. Dies weist auf einen Optimierungsbedarf bei der Strahlensimulation hin. Im Rahmen der Überarbeitung wurde bei der Berechnung der Dosiswerte in Strahlensimulation diese Problematik durch eine Anpassung der ICRP-Formel und eine angepasste Gewichtung der Bleischeiben adressiert.

Auch die Befragungen des medizinischen Personals gaben noch weitere Möglichkeiten zur Weiterentwicklung, die im Rahmen der Überarbeitung umgesetzt wurden. Trotz des Bedarfs zur Weiterentwicklung zeigt sich aber bereits bei der ersten Validierung eine hohe Zustimmung hinsichtlich der Einfachheit der Bedienung des VR-Schulungstools sowie der Einschätzung des Schulungstools als hilfreich für das Verständnis von Strahlung. Dies ist ein positiver Befund der ersten Validierung.

Auf Basis der Ergebnisse der ersten Validierung und des Feedbacks wurde die erste Version des Schulungstools überarbeitet und eine endgültige Version entwickelt. Diese wurde erneut mit medizinischem Personal validiert. Die Strahlensimulation wurde abermals durch die Berechnung der Messwerte und ihren Vergleich unter den drei Bedingungen (1. Bedingung: keine Schutzmittel genutzt wurden und kein Abstand zum Patienten bzw. Detektor; 2. Bedingung: Verwendung von Schutzmitteln, aber kein Abstand zum Patienten bzw. Detektor; 3. Bedingung: Verwendung von Schutzmitteln und Abstand zum Patienten bzw. Detektor) validiert. Bei der zweiten Validierung zeigte der Mittelwertvergleich erwartungsgemäß einen signifikanten Unterschied zwischen den Bedingungen sowohl für die berechneten Werte der effektiven Dosis als auch der Augenlinsendosis. Beide zeigten hohe Effekte der Bedingungen für die Messwerte. Erneut zeigte sich auch eine hohe Akzeptanz für das Schulungstool durch das medizinische Personal. Weiterhin stimmten rund 90% der Teilnehmenden zu, dass die Darstellung der Strahlung im Schulungstool hilfreich für ihr Verständnis war.

Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass durch die Überarbeitung des Schulungstools eine deutliche Verbesserung der Strahlensimulation erreicht werden konnte und das Schulungstool durch das medizinische Personal viel positives Feedback erhalten hat. Dies lässt auf eine regelmäßige Nutzung des Schulungstools durch medizinisches Personal hoffen.

## **8. Fazit und Implikationen für weitere Forschung und Entwicklung**

Nach Abschluss und Auswertung der zweiten Validierung zeigt sich, dass im Rahmen des Projekts ein funktionierendes Virtual-Reality-Schulungstool entwickelt wurde. Hierbei weisen die Ergebnisse der Validierung auf eine realitätsnahe Neuentwicklung der Strahlensimulation sowie eine realistische Berechnung der Wirkung der Schutzmittel in der Strahlensimulation auf die effektive Dosis (Gesamtdosis) und Dosis der Augenlinse. Auf Grund der Hinweise auf die Validität der fachlich korrekten Berechnung der Dosiswerte stellt das entwickelte Virtual-Reality-Schulungstool ein mächtiges Lernwerkzeug für die Schulung von medizinischem Personal dar.

Auch wenn das Schulungstool die Anforderungen der Projektausschreibung erfüllt, bieten sich auf der Basis des durchgeführten Projekts verschiedene (Weiter-)Entwicklungsmöglichkeiten für die zukünftige Forschung und Entwicklung. Diese wurden in der Projektlaufzeit jedoch noch nicht umgesetzt, da sie auf Grund des vorgegebenen Lastenhefts des Projekts und der beschränkten finanziellen und zeitlichen Ressourcen bisher noch nicht voll umsetzbar waren.

1. Als erstes wäre ein neueres Behandlungszimmer mit neueren Geräten wünschenswert. Dadurch könnte beispielsweise mit Biplane-Geräten für Angiografie in modernem Interventionsraum gearbeitet werden.

2. Zweitens wäre es wichtig, bei der Berechnung der Strahlenexposition den Effekt von Patient\*innen mit verschiedenen Gewichten berücksichtigen und dadurch den Trainierenden die Möglichkeit zu geben, zu beobachten, wie sich verschiedene Patienten auf die (Streu-)Strahlung auswirken können. Dies wäre politisch besonders relevant wegen der Aufmerksamkeit der Strahlenschutzverordnung auf spezielle Gruppen wie Schwangere oder Kinder.
3. Den Lernfortschritt der Trainierenden könnte als dritte Entwicklungsmöglichkeit auch die graphische Visualisierung der Dosis an Personal und Patient (an einer menschlichen Figur, nicht nur in Zahlen und Kurven) helfen und visuell verdeutlichen, welche Körperregionen besonders von der Strahlung betroffen sind.
4. Damit zusammenhängend könnte viertens zusätzlich der Druck von einer PDF-Datei, die alle Ergebnisse von den eigenen Versuchen zusammenfasst, den Lernprozess unterstützen. So könnten die Trainierenden zum Beispiel die PDF-Datei ausgedruckt mitnehmen oder per E-Mail zugesendet bekommen, um sie im Nachhinein noch zu analysieren und ihr Verhalten hinsichtlich des Strahlenschutzes zu reflektieren.
5. Fünftens wäre es sinnvoll, es üben zu können, wie sich die Dosis verhält, wenn an der Seite des Detektors oder der Quelle gearbeitet wird.
6. Als sechste Weiterentwicklungsmöglichkeiten sind selbsterklärende Hinweise zur Anwendung des Schulungstools ohne die Betreuerin oder den Betreuer, damit das medizinische Personal auch ohne Unterstützung mit dem Schulungstool üben kann.
7. Siebtens wäre es sinnvoll, die Parameter des Betriebs in die Unreal Engine zu übertragen. Dadurch könnte sich beim Training an einem echten C-Bogen außerhalb der Anwendung orientiert werden. Das bedeutet, dass das Schulungstool den Betrieb des C-Bogens "beobachtet" und Position, Strahlenstärke etc. des Geräts in die Simulation übertragen kann, um möglichst eine realistische Anwendung zu ermöglichen.
8. Achters wäre eine experimentelle Validierung des Schulungstools sinnvoll, um über weitere Hinweise auf die Validität der Strahlsimulation zu verfügen.
9. Neuntens kam der Wunsch auf, einen optischen Effekt der Brille zu ermöglichen, so dass sich beim Aufsetzen der simulierten Bleibrille die Sicht wie bei einer echten Bleibrille trübt.
10. Zehntens wäre eine Übersetzung und Nutzung des Schulungstools in andere Sprachen wünschenswert, um möglichst viel medizinisches Personal schulen zu können und das Schulungstool international nutzen zu können.
11. Als elftes wäre eine Optimierung der Darstellung der Strahlung sinnvoll, so dass zum Beispiel die Einblendung des Strahlenbündels deutlicher sichtbar gemacht werden kann.
12. Als zwölftes sollte in dem Schulungstool eine Multiplayer-Funktionalität implementiert werden, um später im OP-Team verwendbar zu sein (z.B. wenn eine Person eine Einstellung am Gerät vornimmt, muss dies bei allen anderen Teammitgliedern ankommen) und üben zu können.
13. Als letzte weitere Entwicklungsmöglichkeit sollte ein höherer Detailgrad bei den Eingriffen angedacht und umgesetzt werden, um eine noch größere Immersion zu ermöglichen und dem medizinischen Personal die Möglichkeit zu geben, auch unter sehr praxisnahen Bedingungen ihr Schutzverhalten zu prüfen (z.B. wenn im Stress eines OPs in der Unfallchirurgie zusätzlich noch auf strahlenschutzoptimiertes Verhalten geachtet werden muss).

## Literaturverzeichnis

- BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (2010). Röntgen – Nutzen und Risiken mit integriertem Röntgenpass. Deutschland: Salzgitter. [https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/ion/stko-roentgen.pdf;jsessionid=8789B24DA50CB55F023B832D0DC0E90F.1\\_cid372?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/ion/stko-roentgen.pdf;jsessionid=8789B24DA50CB55F023B832D0DC0E90F.1_cid372?__blob=publicationFile&v=8)
- DAVIS, J. (2018). Going virtual: How VR is guiding interventional radiology. <https://www.elsevier.com/connect/going-virtual-how-vr-is-guiding-interventional-radiology>
- DRESING, K. (2011). Röntgen in Unfallchirurgie und Orthopädie. Ein Update über physikalische und biologische Auswirkungen, sinnvolle Anwendung und Strahlenschutz im Operationsaal. *Operative Orthopädie und Traumatologie*, 23, 70–78. <https://doi.org/10.1007/s00064-011-0027-9>.
- HAMM, C. W., ALBRECHT, A., BONZEL, T., KELM, M., LANGE, H., SCHACHINGGER, V., ... & VOELKER, W. (2008). Diagnostische Herzkatheteruntersuchung. *Clinical Research in Cardiology*, 97(12), 925. <https://doi.org/10.1007/s00392-008-0686-1>
- INTERNATIONALE STRAHLENSCHUTZKOMMISSION (ICRP) (2007). Die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) von 2007 ICRP-Veröffentlichung 103 Verabschiedet im März 2007. Deutsche Ausgabe. März. [https://www.icrp.org/docs/P103\\_German.pdf](https://www.icrp.org/docs/P103_German.pdf)
- ICRP (2012). ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. ICRP Publication 118. *Ann. ICRP* 41(1/2). <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2012.02.001>
- KRAUSS, M., REDIES, M., & RICHTER, P. (2014). Strahlenschutz im OP. *OP-JOURNAL*, 30(03), 138-143. <https://doi.org/10.1055/s-0034-1383302>
- MIWA, Y., UEDA, A., KOMEDA, M., TAKEUCHI, S., NAGAOKA, M., MOMOSE, Y., ... & SOEJIMA, K. (2019). Reducing radiation exposure during atrial fibrillation ablation using lectures to promote awareness. *Open Heart*, 6(1), e000982. <https://doi.org/10.1136/>
- MROZ, T. E., YAMASHITA, T., DAVROS, W. J., & LIEBERMAN, I. H. (2008). Radiation exposure to the surgeon and the patient during kyphoplasty. *Clinical Spine Surgery*, 21(2), 96-100. <https://doi.org/10.1097/BSD.0b013e31805fe9e1>
- Norddeutsches Seminar für Strahlenschutz in der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und in der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald. Unterlagen zum Grundkurs für Mediziner und Medizinphysiker.
- O'CONNOR, M., & RAINFORD, L. (2023). The impact of 3D virtual reality radiography practice on student performance in clinical practice. *Radiography*, 29(1), 159-164. <https://doi.org/10.1016/j.radi.2022.10.033>.
- RAINFORD, L., TCACENCO, A., POTOČNIK, J., BROPHY, C., LUNNEY, A., KEARNEY, D., & O'CONNOR, M. (2023). Student perceptions of the use of three-dimensional (3-D) virtual reality (VR) simulation in the delivery of radiation protection training for radiography and medical students. *Radiography*, 29(4), 777-785. <https://doi.org/10.1016/j.radi.2023.05.009>
- SALOPEK, J. J. (2018). Augmented and virtual reality in the IR suite. Feature: A new reality. *IRG Quarterly*. <https://connect.sirweb.org/e-irq/participate/viewirqarticle?DocumentKey=4bfc61a8-8b03-4e62-b78e-3e5a25fd88a4>
- SCHÄCHINGER, V., NEF, H., ACHENBACH, S., BUTTER, C., DEISENHOFER, I., ECKARDT, L., ... & KELM, M. (2015). Leitlinie zum Einrichten und Betreiben von Herzkatheterlaboren und Hybridoperationssälen/Hybridlaboren. *Der Kardiologe*, 9(1), 89-123. <https://doi.org/10.1007/s12181-014-0631-7>
- SCHUETTE, C., STREUBER, M., POOTTGIESSER, V., PREIM, B., SAALFELD, P., VAHLBRUCH, J. W., & WALTHER, C. (2023). A teaching concept for school experiments on radioactivity using augmented reality methods. *Radiation Protection Dosimetry*, 199(8-9), 716-724. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncad071>
- SCHÜTZ, U., BEER, M., WILD, A., OEHLER, S., & KRAUS, M. (2016). Radiation protection during C-arm based spine interventions in orthopedics and traumatology. *OUP*, 4, 224-237. <https://doi.org/10.3238/oup.2016.0224-237>
- STRAHLENSCHUTZKOMMISSION (2020). Grenzwerte der Organ-Äquivalentdosen für die berufliche Strahlenexposition. Empfehlung der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung. Verabschiedet in der 309. Sitzung der

Strahlenschutzkommission am 10. Dezember 2020.

[https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse\\_PDF/2020/2020-12-10\\_Empf\\_Organ-Aequivalentdosen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2020/2020-12-10_Empf_Organ-Aequivalentdosen.pdf?__blob=publicationFile)

STRAHLENSCHUTZKOMMISSION (2018). Grundlagen zur Begründung von Grenzwerten für beruflich strahlenexponierte Personen. Wissenschaftliche Begründung der Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet im Umlaufverfahren am 07. September 2018.

STRAHLENSCHUTZKOMMISSION (2022). Verwendung von Patienten-Strahlenschutzmitteln bei der diagnostischen Anwendung von Röntgenstrahlung am Menschen. Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet in der 321. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 22./23. September 2022.

[https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse/2022/2022-09-22\\_Empf\\_Patienten-Strahlenschutzmittel.html](https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse/2022/2022-09-22_Empf_Patienten-Strahlenschutzmittel.html)

STRAHLENSCHUTZKOMMISSION (2015). Cone Beam-Computertomografie (CBCT) und Mammatomosynthese. Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet in der 277. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 02./03. Juli 2015. [https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse\\_PDF/2015/2015-07-03%20Empf%20CBCT%20und%20Mammatomosynthese.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2015/2015-07-03%20Empf%20CBCT%20und%20Mammatomosynthese.pdf?__blob=publicationFile)

TONUTTI, M., ELSON, D. S., YANG, G. Z., DARZI, A. W., & SODERGREN, M. H. (2017). The role of technology in minimally invasive surgery: state of the art, recent developments and future directions. *Postgraduate Medical Journal*, 93(1097), 159-167. <https://doi.org/10.1136/postgradmedj-2016-134311>

# Anlagenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.

Abbildungsverzeichnis.

Tabellenverzeichnis.

Anhang A. Ausführliche Ergebnisse Erste Validierung.

Anhang B. Ausführliche Ergebnisse Zweite Validierung.

# Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

M = Mittelwert/ mean

SD = Standardabweichung/ standard deviation

F = F-Test/ F-test.

p = p-Wert (Signifikanzniveau)/ p-value (significance level)

$\eta^2$  = partielle Eta-Quadrat (Effektstärkenmaß auf Stichprobenebene)

## Abbildungsverzeichnis

1 Diagramm: Prozentuale Verteilung der Antworten zu dem Item "Die Darstellung der Strahlung war hilfreich für mein Verständnis." .....	14
2 Abbildung. Darstellung der effektiven Dosis unter verschiedenen Bedingungen mit einer linearen Skala .	17
3 Abbildung. Darstellung der effektiven Dosis unter verschiedenen Bedingungen mit einer logarithmischen Skala.....	20

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1. Gewichtungsfaktoren Körperteile/ Organe.....	12
---	----

# Anhang A. Ausführliche Ergebnisse Erste Validierung

In Anhang A werden die Ergebnisse der ersten Validierung anhand graphischer Darstellungen ausführlich dargestellt.

Daten der Befragung vor der Nutzung der VR-Anwendung:

Wissenstest

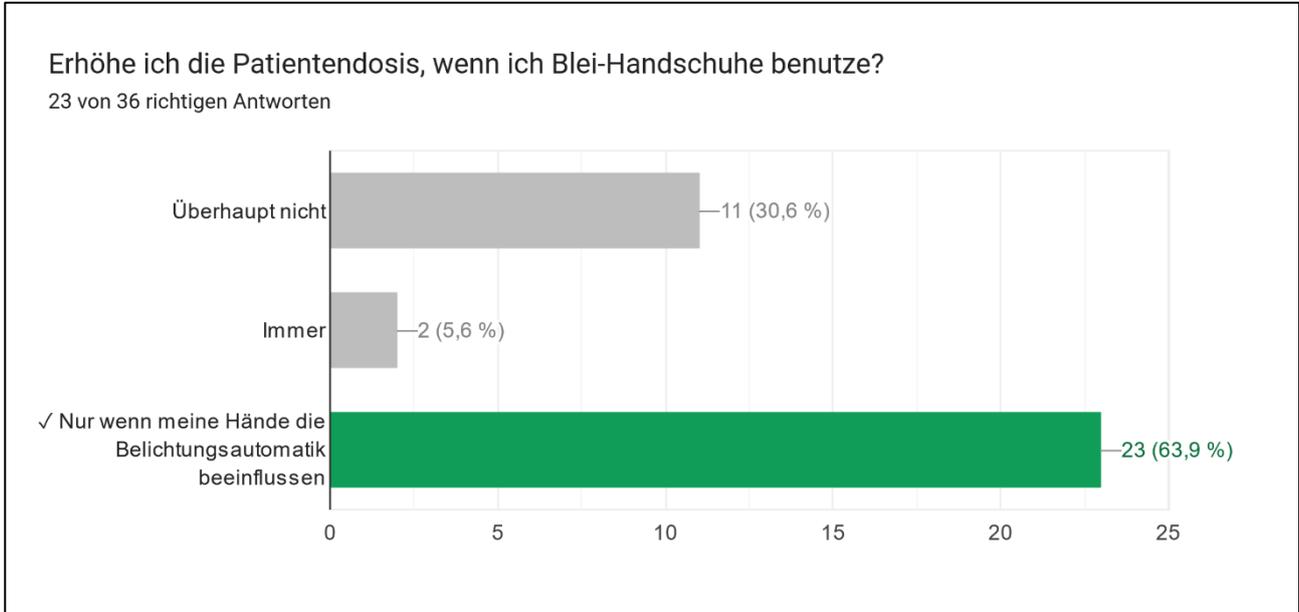


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur ersten Frage des Wissenstests. 1. Validierung Befragung vor der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtige Antwort ist grün markiert.

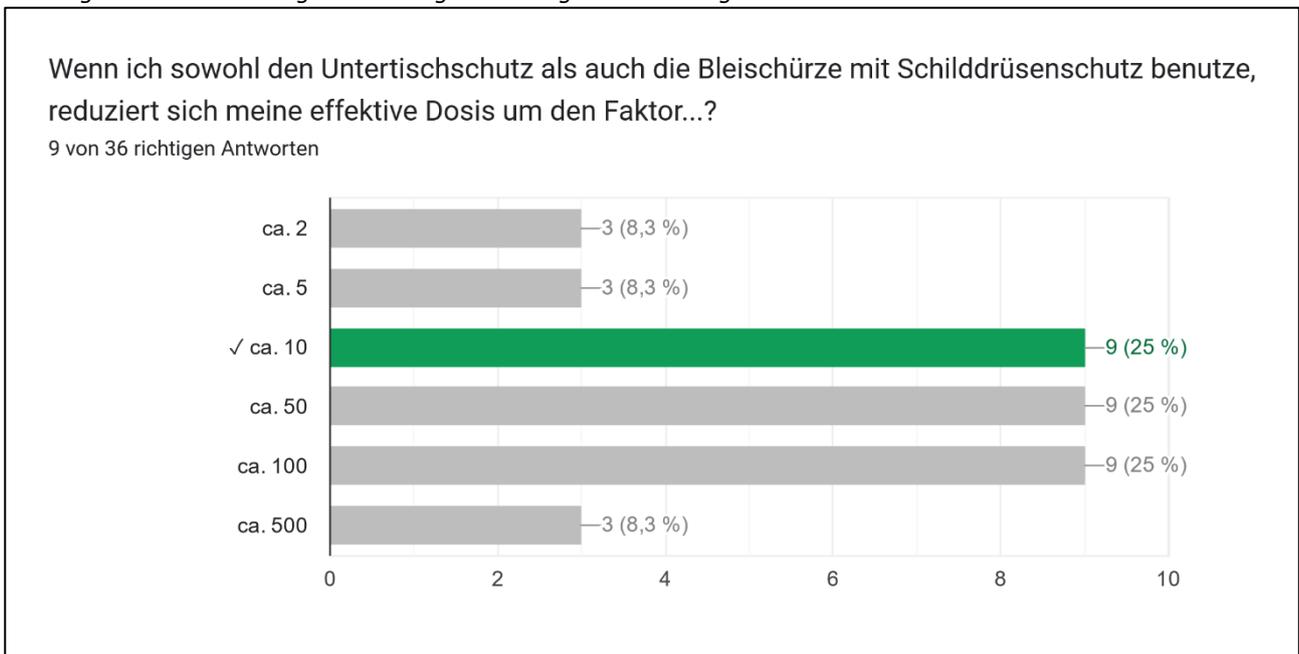


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur zweiten Frage des Wissenstests. 1. Validierung Befragung vor der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtige Antwort ist grün markiert.

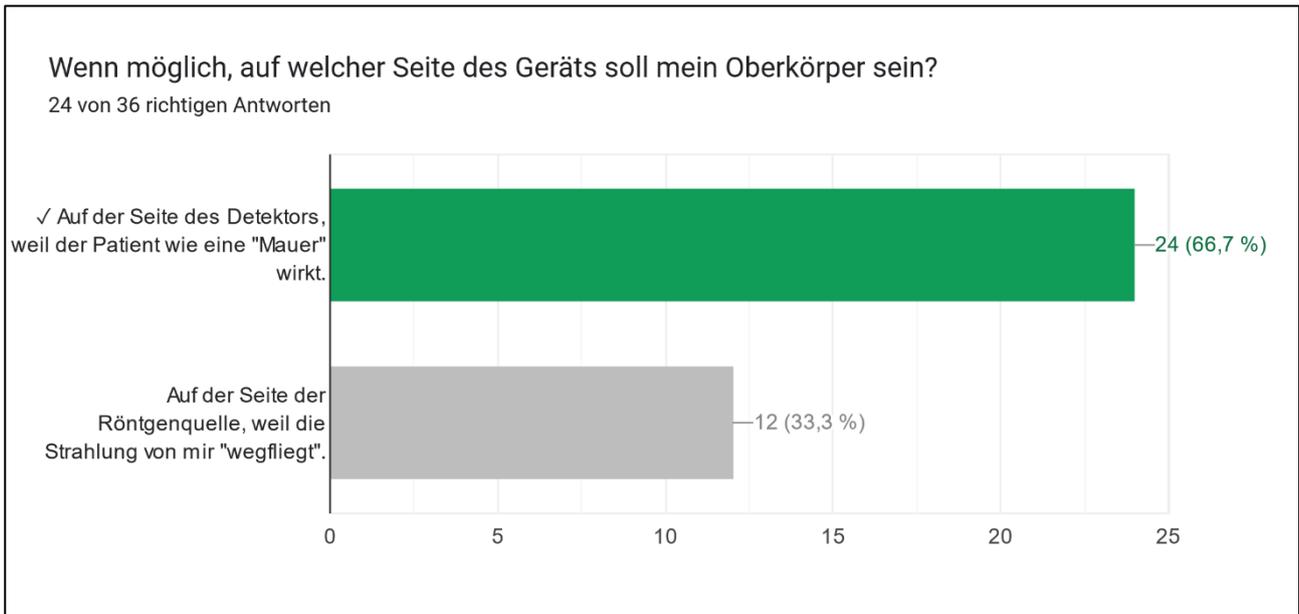


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur dritten Frage des Wissenstests. 1. Validierung Befragung vor der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtige Antwort ist grün markiert.

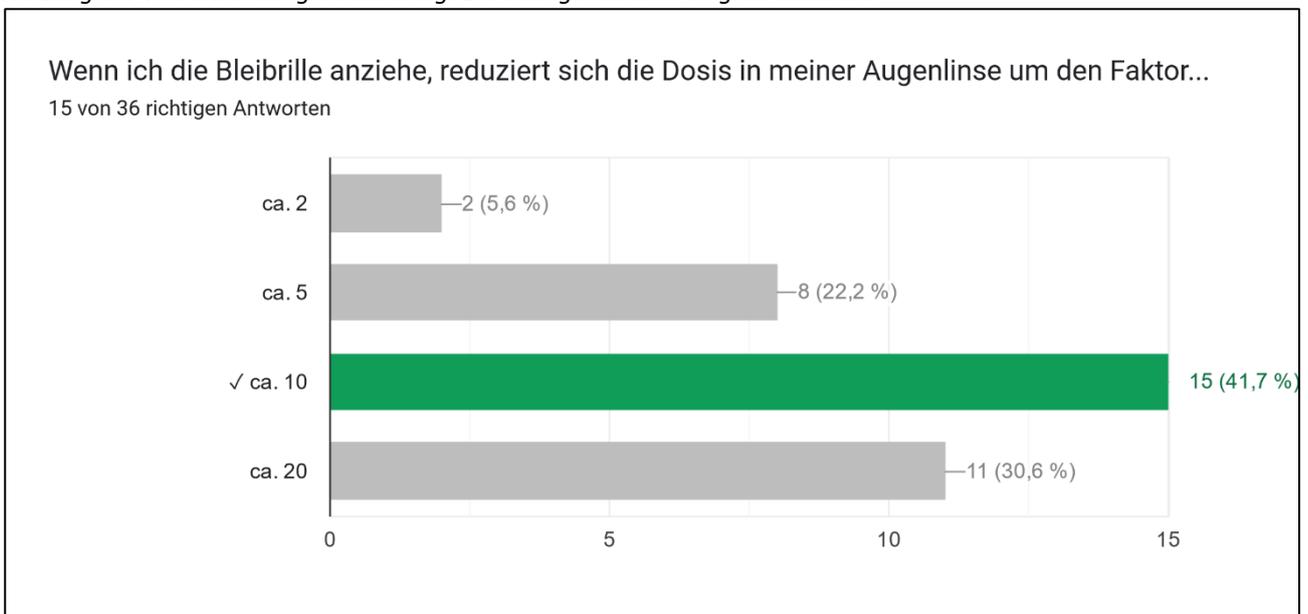


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur vierten Frage des Wissenstests. 1. Validierung Befragung vor der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtige Antwort ist grün markiert.

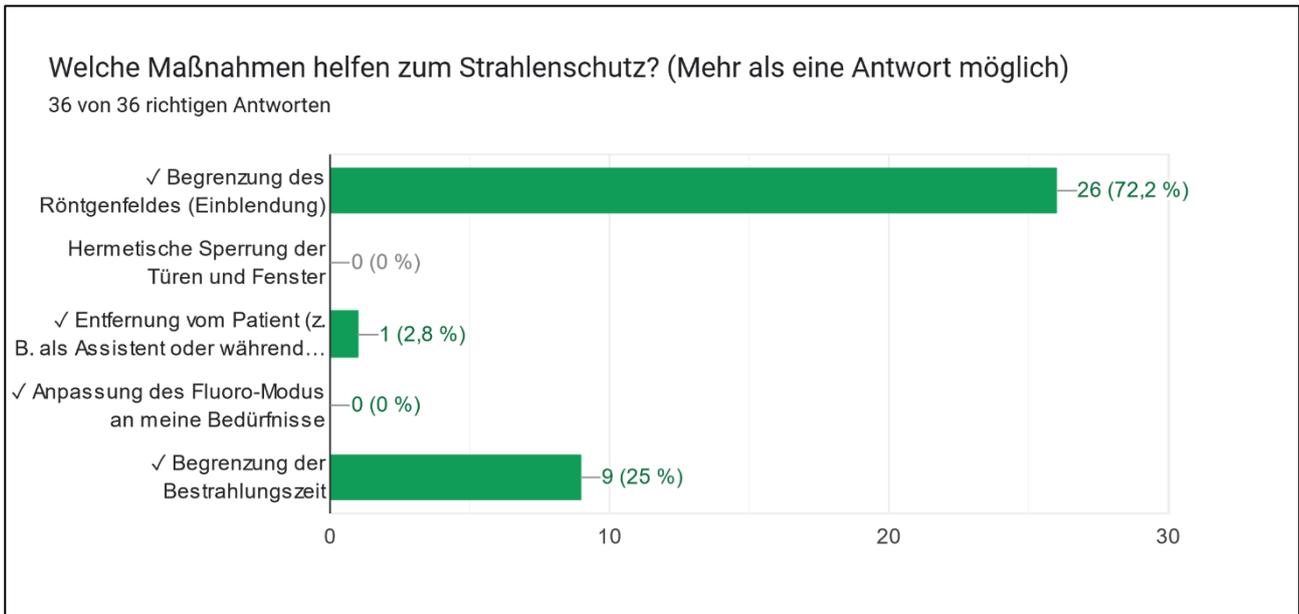


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur fünften Frage des Wissenstests. 1. Validierung Befragung vor der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtigen Antworten sind grün markiert.

Daten der Befragung nach der Nutzung der VR-Anwendung:

Wissenstest

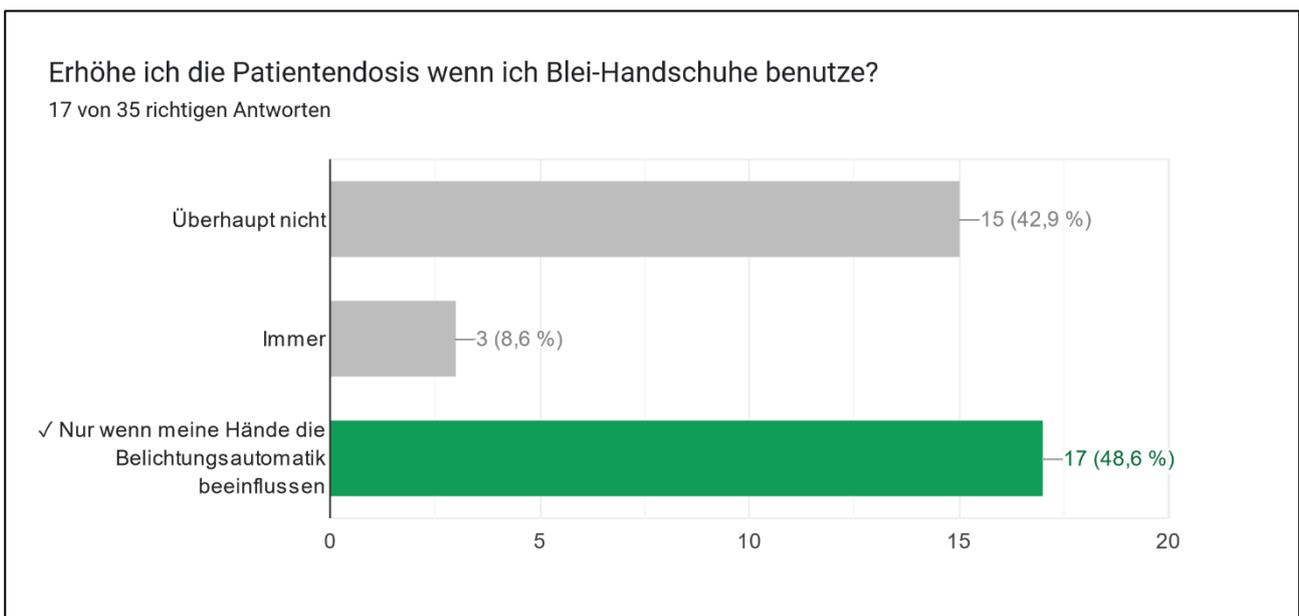


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur ersten Frage des Wissenstests. 1. Validierung Befragung nach der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtige Antwort ist grün markiert.

Wenn ich sowohl den Untertischschutz als auch die Bleischürze mit Schilddrüsenschutz benutze, reduziert sich meine effektive Dosis um den Faktor...?

14 von 35 richtigen Antworten

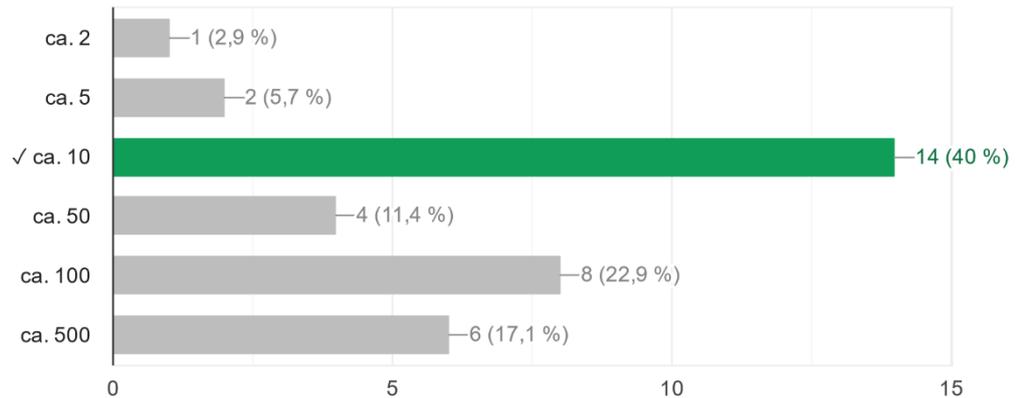


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur zweiten Frage des Wissenstests. 1. Validierung Befragung nach der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtige Antwort ist grün markiert.

Wenn möglich, auf welcher Seite des Geräts soll mein Oberkörper sein?

21 von 35 richtigen Antworten

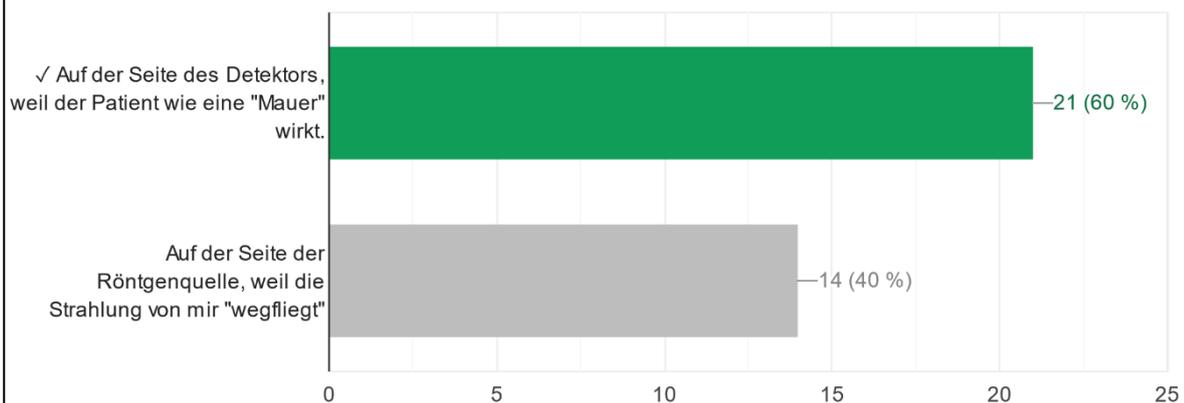


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur dritten Frage des Wissenstests. 1. Validierung Befragung nach der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtige Antwort ist grün markiert.

### Wenn ich die Bleibrille anziehe, reduziert sich die Dosis in meiner Augenlinse um den Faktor...

17 von 35 richtigen Antworten

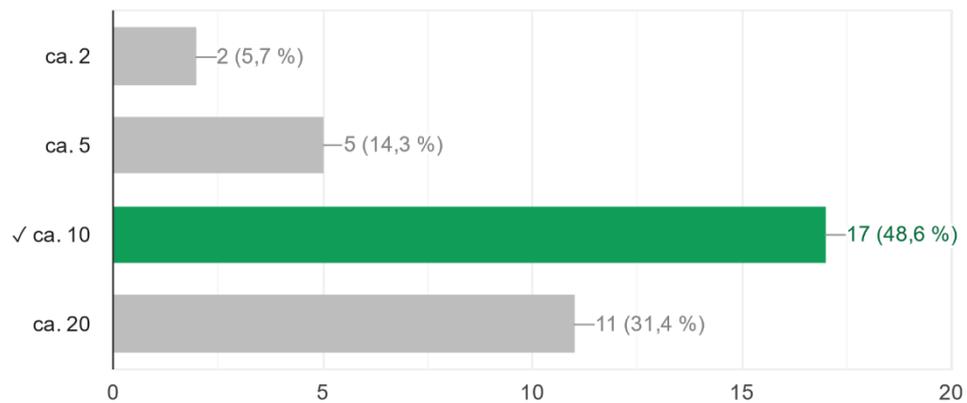


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur vierten Frage des Wissenstests. 1. Validierung Befragung nach der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtige Antwort ist grün markiert.

### Welche Maßnahmen helfen zum Strahlenschutz? (Mehr als eine Antwort möglich)

34 von 35 richtigen Antworten

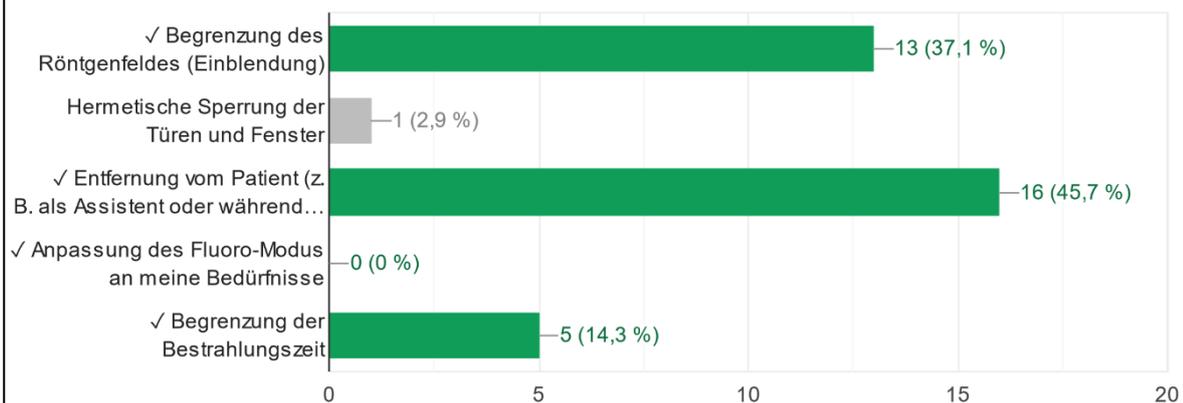


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur ersten Frage des Wissenstests. 1. Validierung Befragung nach der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtigen Antworten sind grün markiert.

Feedback zur Anwendung

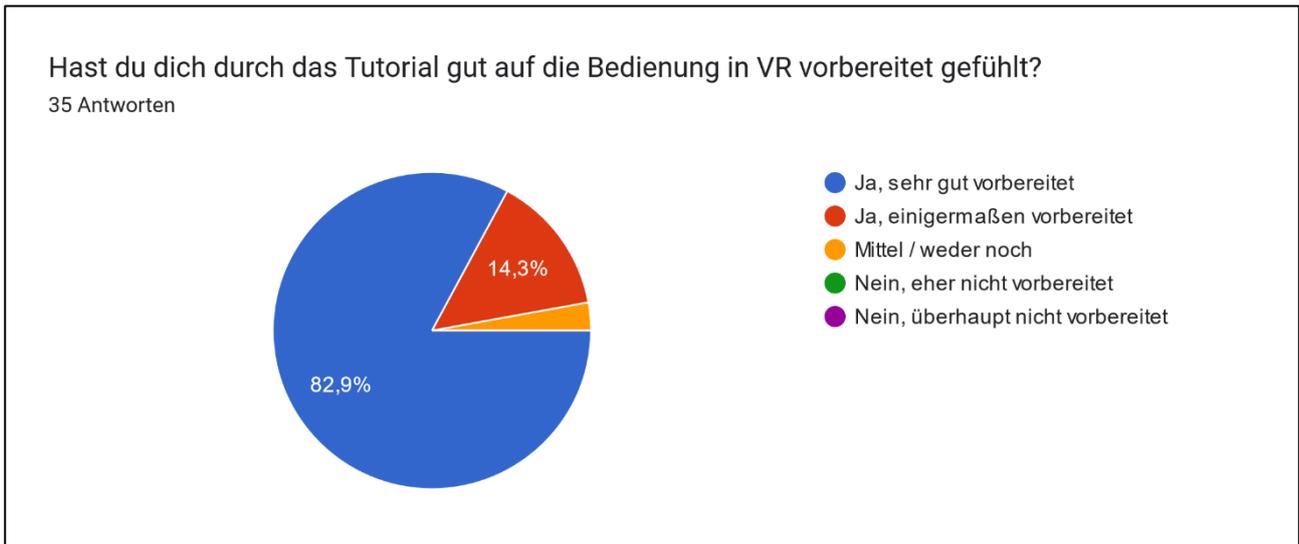


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Einschätzungen der Studienteilnehmenden hinsichtlich der Vorbereitung auf die Bedienung in VR durch das Tutorial (1. Validierung).

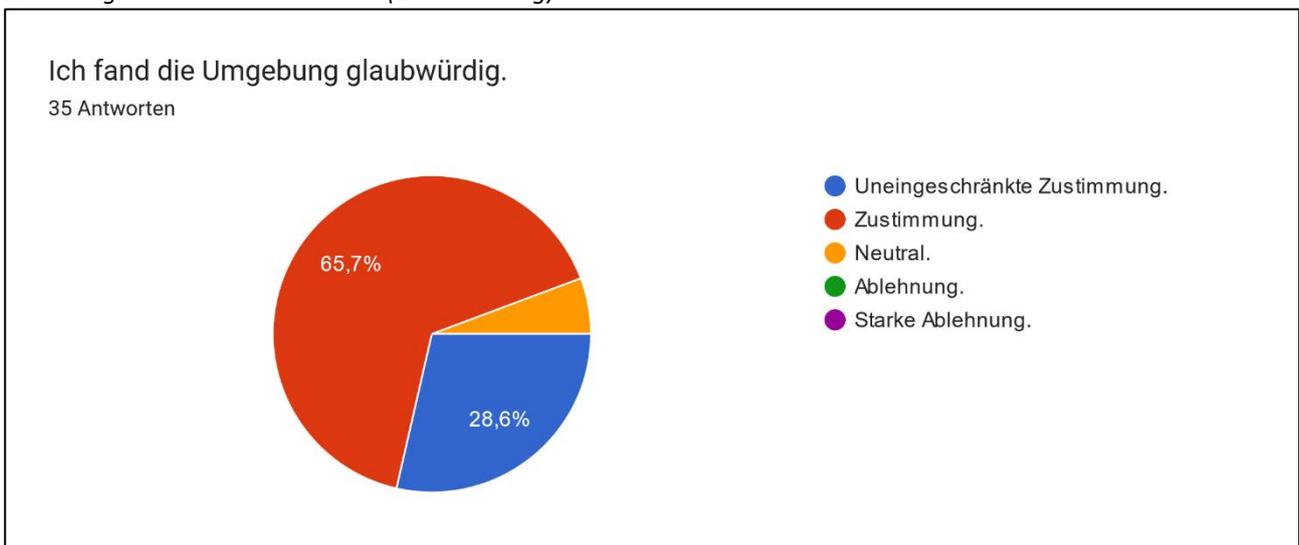


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Einschätzungen der Studienteilnehmenden zur Glaubwürdigkeit der VR-Umgebung (1. Validierung).

Die Interaktion mit den einzelnen Elementen empfand ich als intuitiv.

35 Antworten

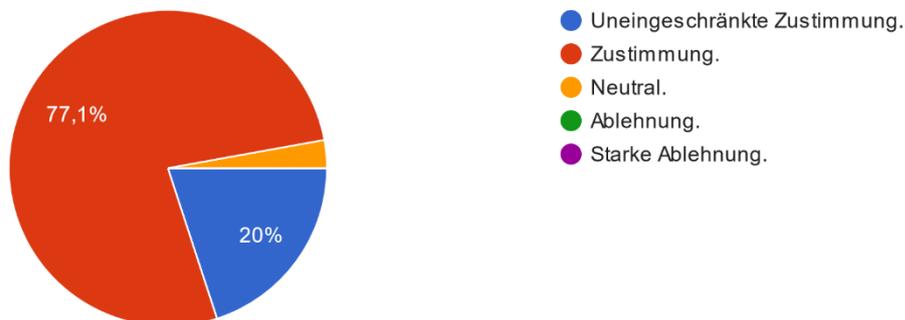


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Einschätzungen der Studienteilnehmenden zu den Interaktionen mit den einzelnen Elementen (1. Validierung).

Ich konnte mich gut in der Szene bewegen (Laufen & Teleportieren).

35 Antworten

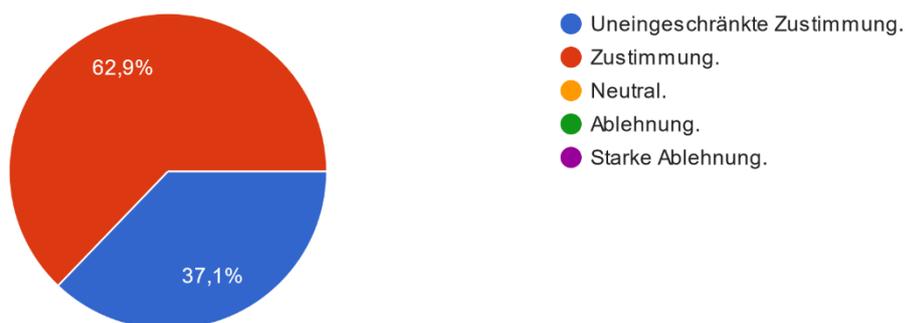


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Einschätzungen der Studienteilnehmenden zur Bewegung in der Szene/VR-Umgebung (1. Validierung).

Ich wusste, was ich zu tun hatte.

35 Antworten

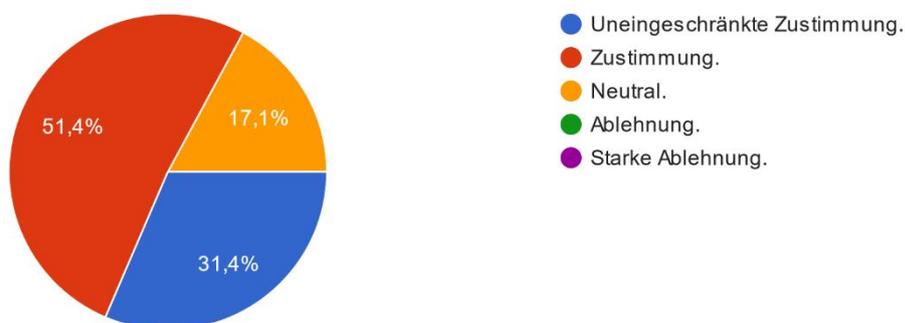


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Einschätzungen der Studienteilnehmenden zur Frage „Ich wusste, was ich zu tun hatte“ (1. Validierung).

Die Anwendung hat mich überfordert.

35 Antworten

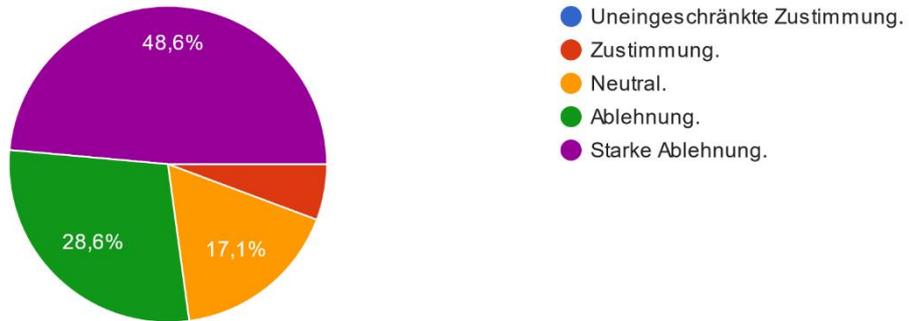


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Einschätzungen der Studienteilnehmenden zur Überforderung durch die Nutzung der Anwendung (1. Validierung).

Ich habe mich gefühlt, als wäre ich tatsächlich in einem anderen Raum.

35 Antworten

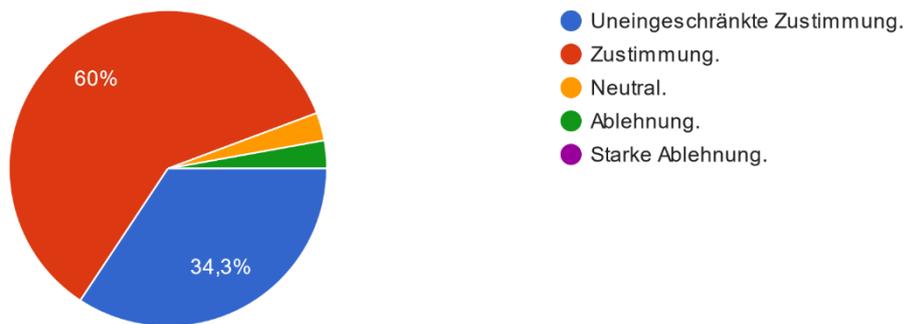


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Einschätzungen der Studienteilnehmenden zur Immersion der VR-Umgebung (1. Validierung).

Die Darstellung der Strahlung war hilfreich für mein Verständnis.

35 Antworten

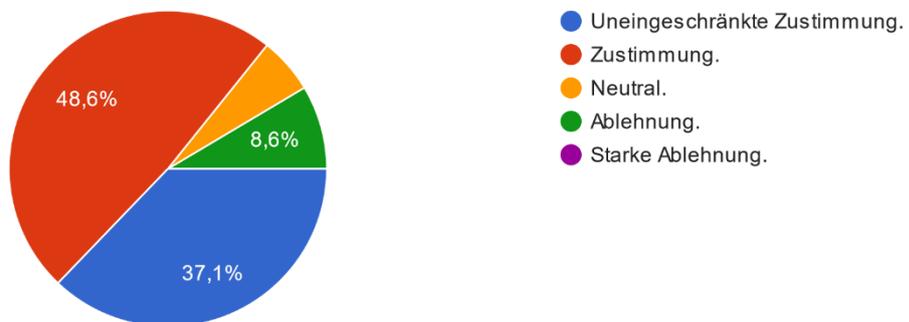


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Selbsteinschätzungen der Studienteilnehmenden zur Darstellung der Strahlung für ihr Verständnis (1. Validierung).

## Anhang B. Ausführliche Ergebnisse Zweite Validierung

In Anhang B werden die Ergebnisse der zweiten Validierung anhand graphischer Darstellungen ausführlich dargestellt.

Daten der Befragung vor der Nutzung der VR-Anwendung:

Wissenstest

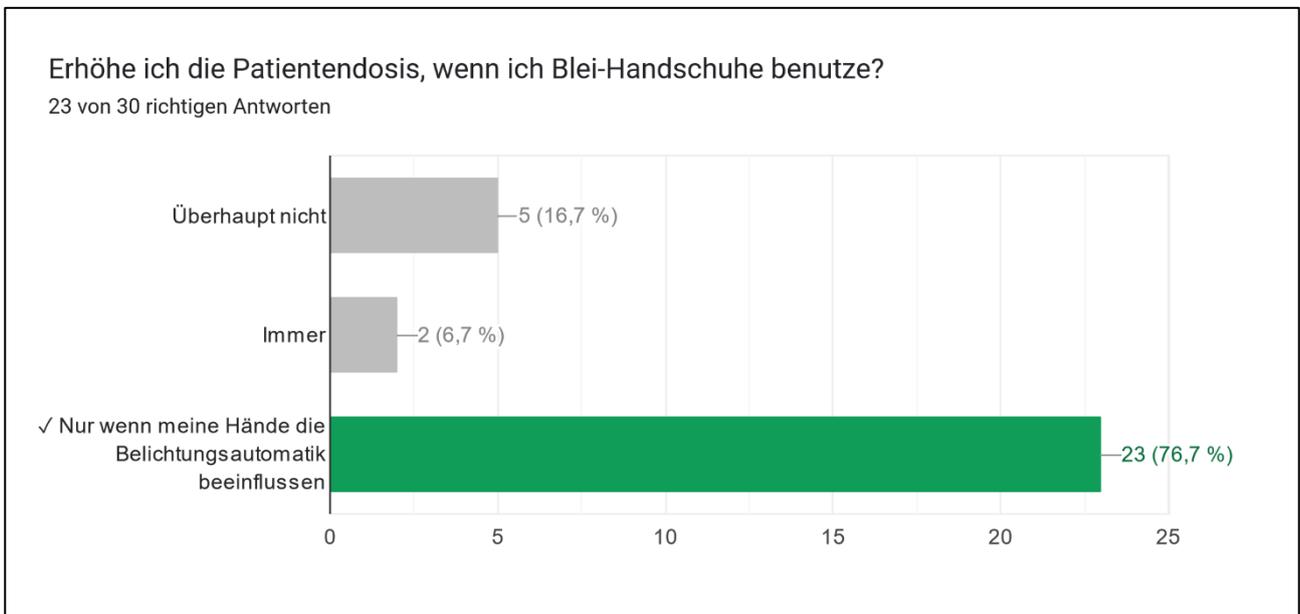


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur ersten Frage des Wissenstests. 2. Validierung Befragung vor der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtige Antwort ist grün markiert.

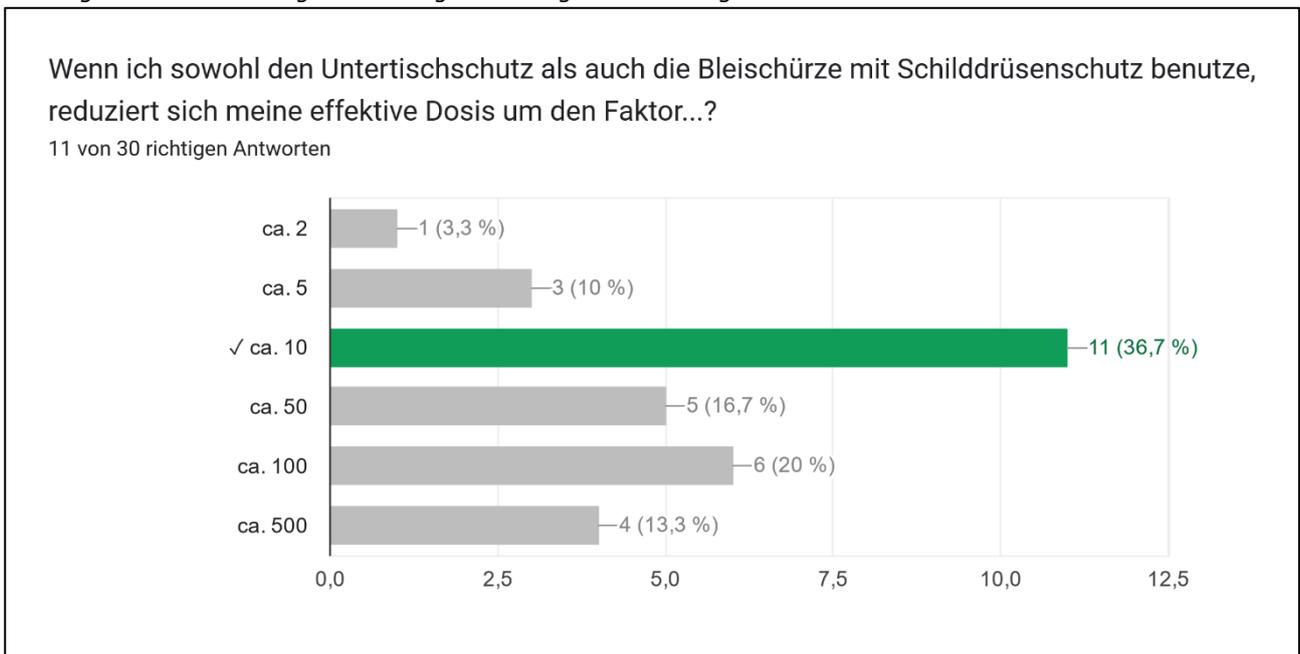


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur zweiten Frage des Wissenstests. 2. Validierung Befragung vor der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtige Antwort ist grün markiert.

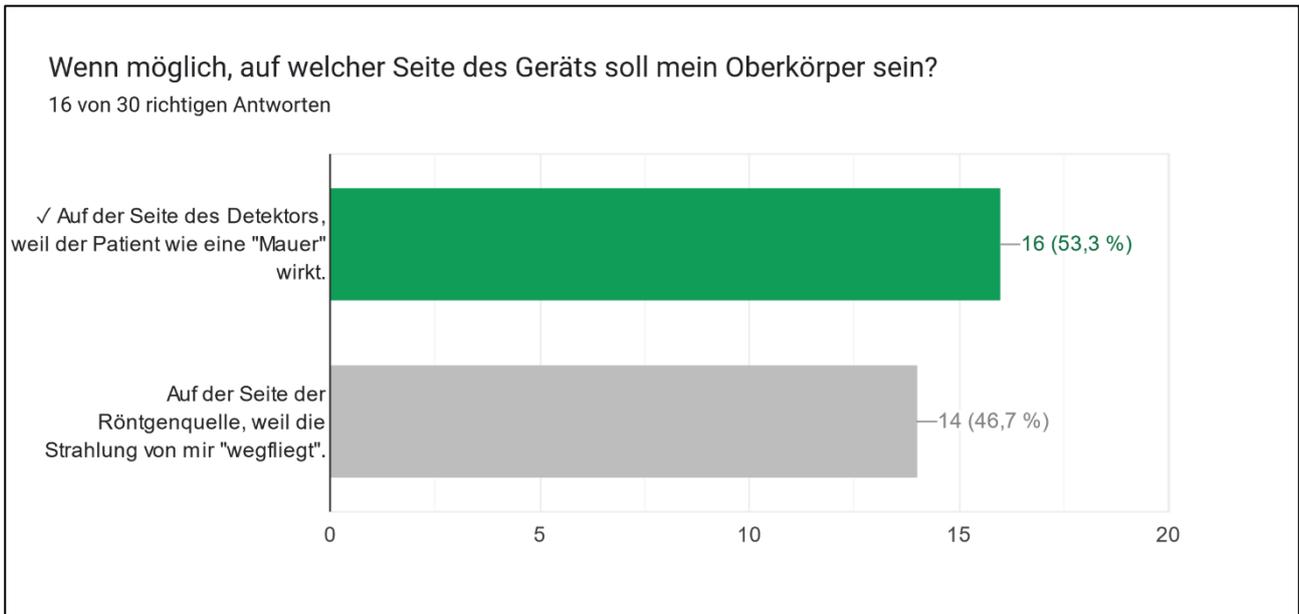


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur dritten Frage des Wissenstests. 2. Validierung Befragung vor der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtige Antwort ist grün markiert.

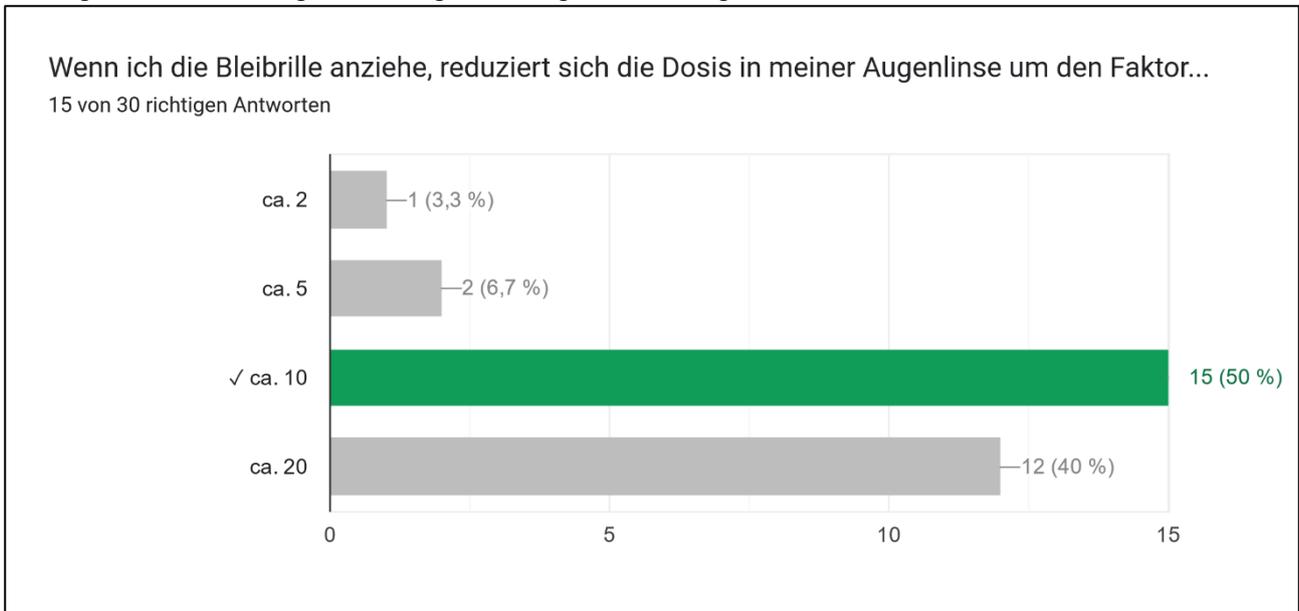


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur vierten Frage des Wissenstests. 2. Validierung Befragung vor der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtige Antwort ist grün markiert.

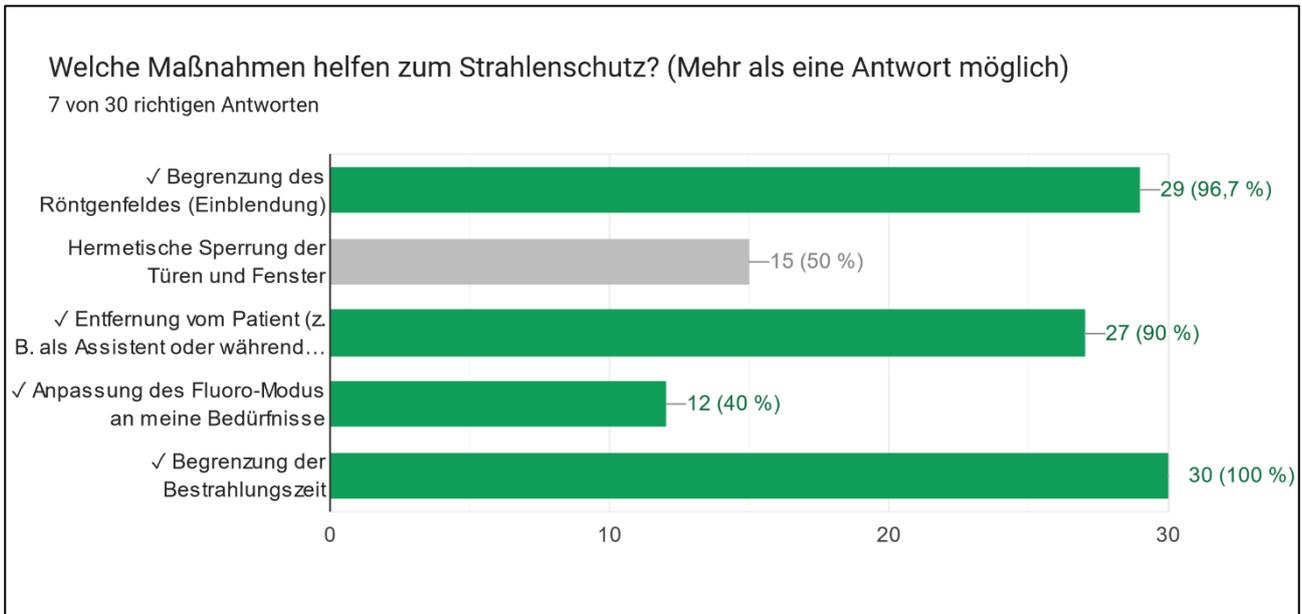


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur fünften Frage des Wissenstests. 2. Validierung Befragung vor der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtigen Antworten sind grün markiert.

Daten der Befragung nach der Nutzung der VR-Anwendung:

Wissenstest

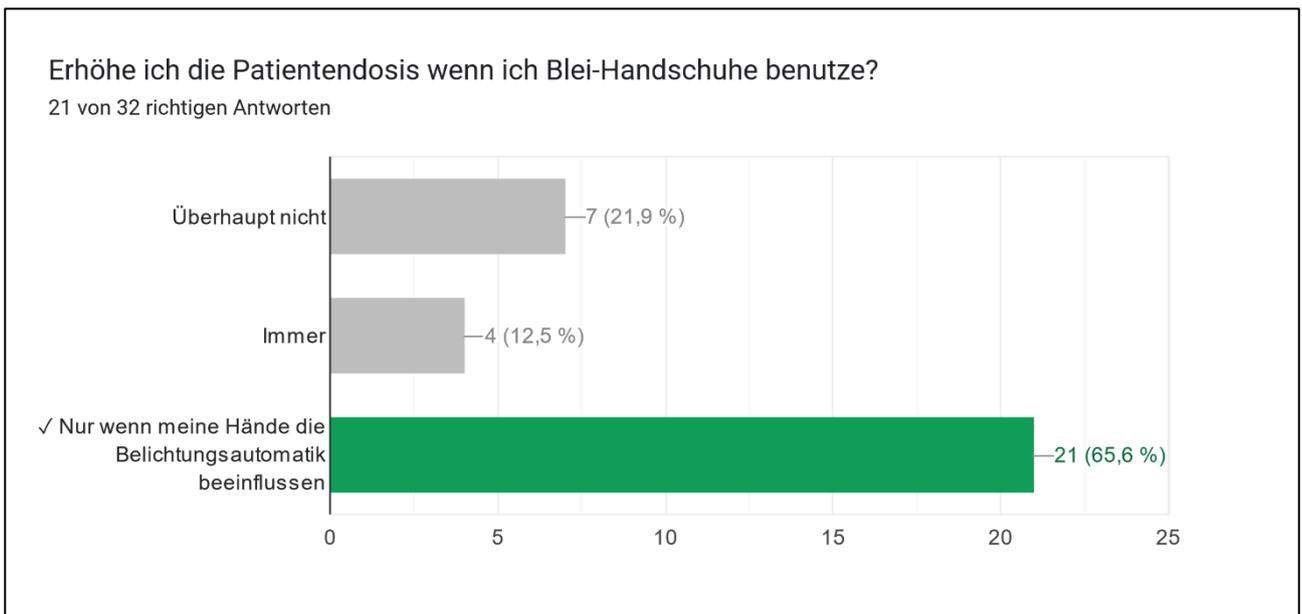


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur ersten Frage des Wissenstests. 2. Validierung Befragung nach der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtige Antwort ist grün markiert.

Wenn ich sowohl den Untertischschutz als auch die Bleischürze mit Schilddrüsenschutz benutze, reduziert sich meine effektive Dosis um den Faktor...?

20 von 32 richtigen Antworten

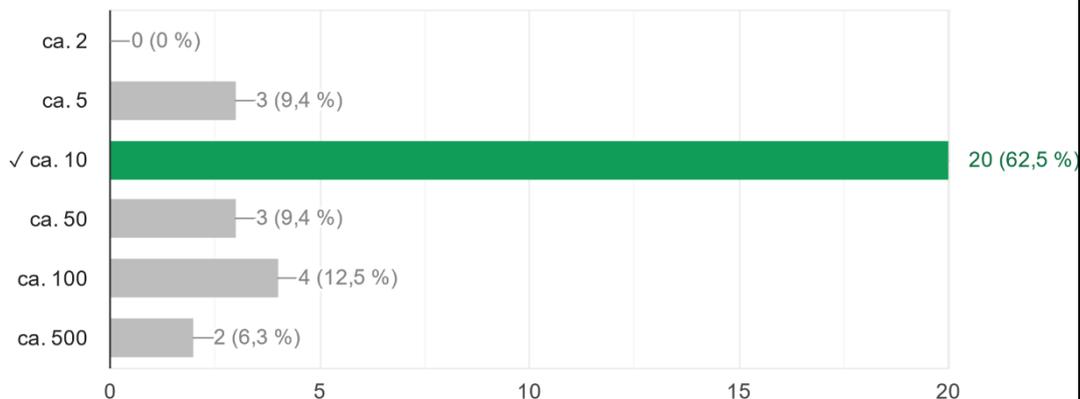


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur zweiten Frage des Wissenstests. 2. Validierung Befragung nach der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtige Antwort ist grün markiert.

Wenn möglich, auf welcher Seite des Geräts soll mein Oberkörper sein?

19 von 32 richtigen Antworten

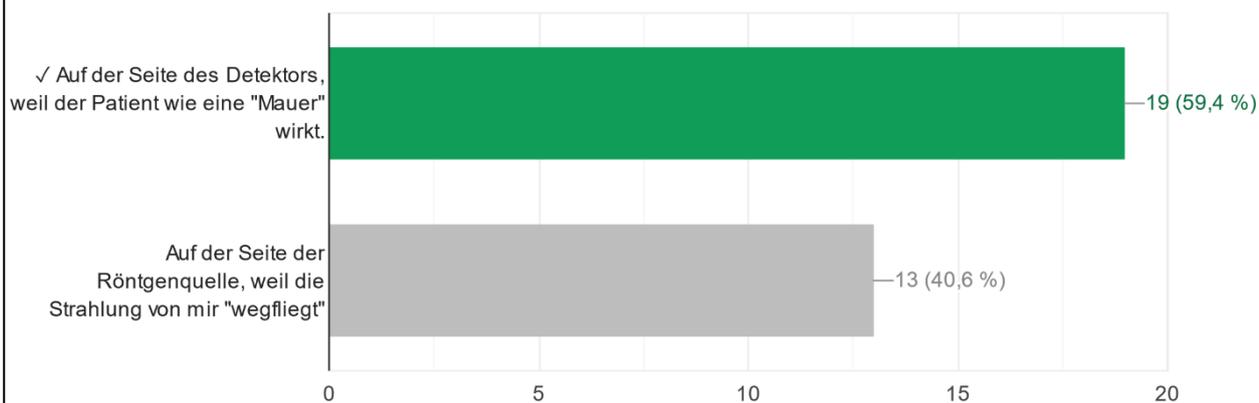


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur dritten Frage des Wissenstests. 2. Validierung Befragung nach der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtige Antwort ist grün markiert.

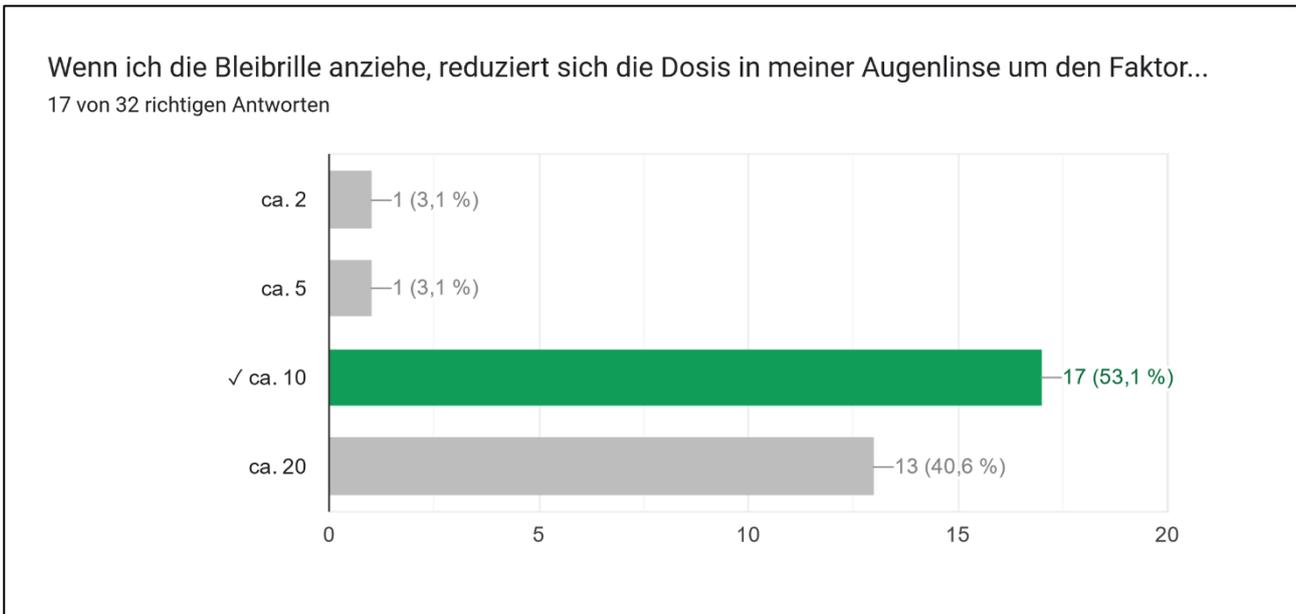


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur vierten Frage des Wissenstests. 2. Validierung Befragung nach der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtige Antwort ist grün markiert.

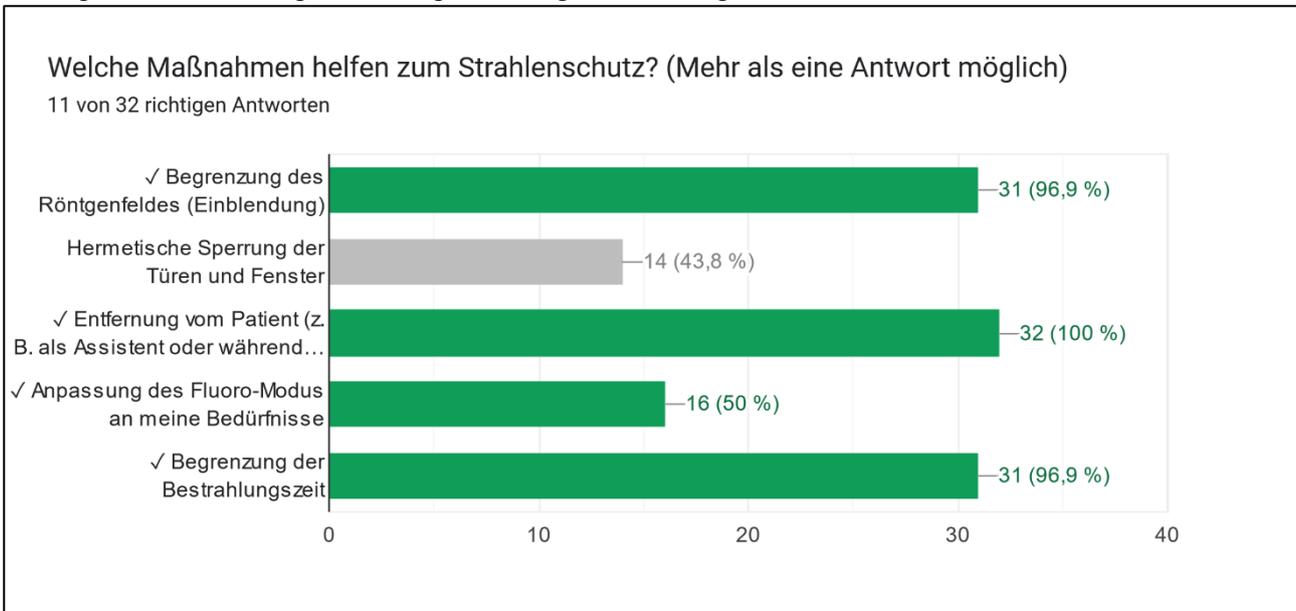


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Antworten zur fünften Frage des Wissenstests. 2. Validierung Befragung nach der Nutzung der VR-Anwendung. Anmerkung: Die richtigen Antworten sind grün markiert.

## Feedback zur Anwendung

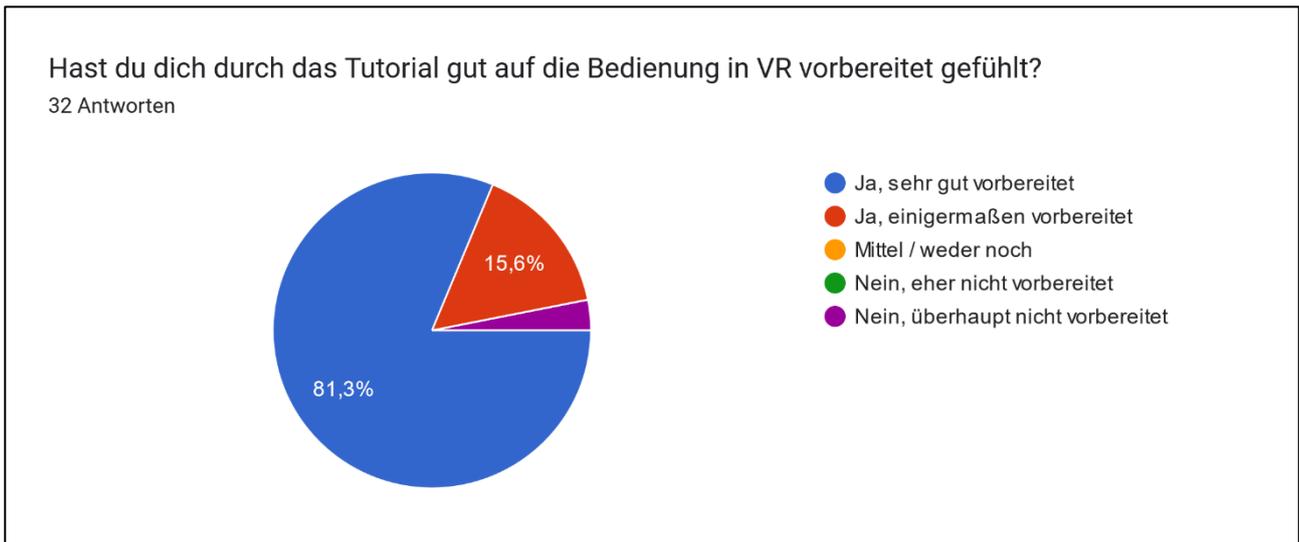


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Einschätzungen der Studienteilnehmenden hinsichtlich der Vorbereitung auf die Bedienung in VR durch das Tutorial (2. Validierung).

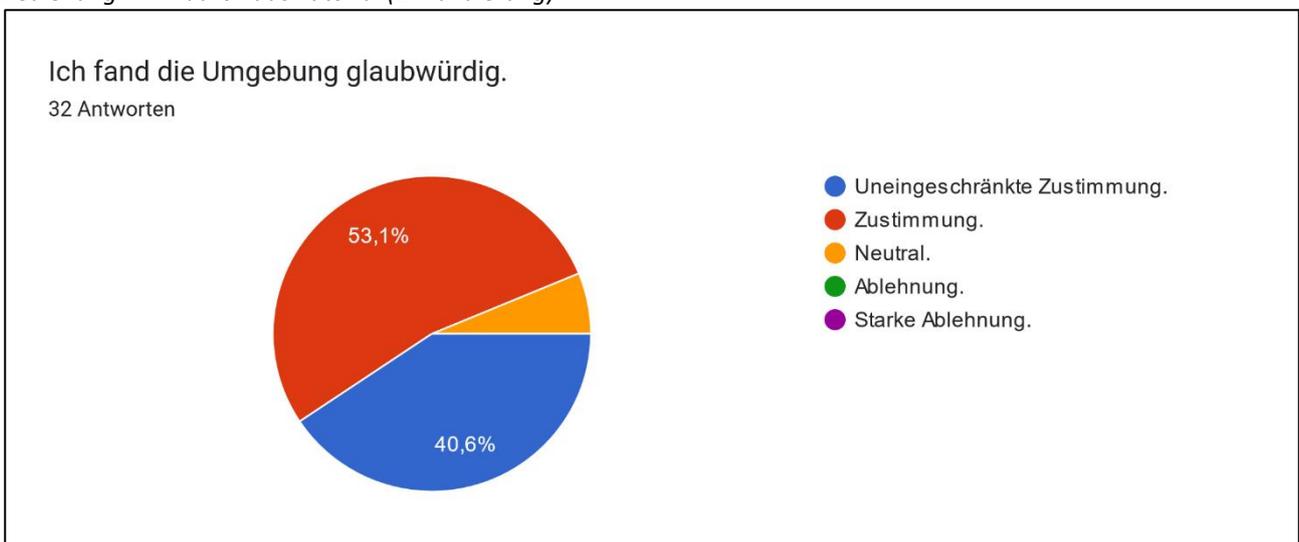


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Einschätzungen der Studienteilnehmenden zur Glaubwürdigkeit der VR-Umgebung (2. Validierung).

Die Interaktion mit den einzelnen Elementen empfand ich als intuitiv.

32 Antworten

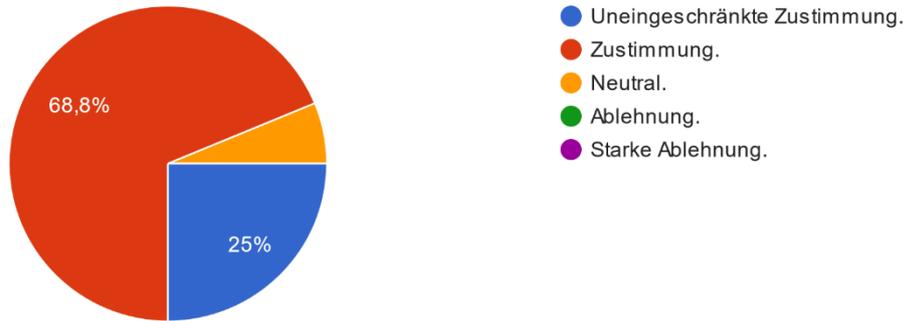


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Einschätzungen der Studienteilnehmenden zu den Interaktionen mit den einzelnen Elementen (2. Validierung).

Ich konnte mich gut in der Szene bewegen (Laufen & Teleportieren).

32 Antworten

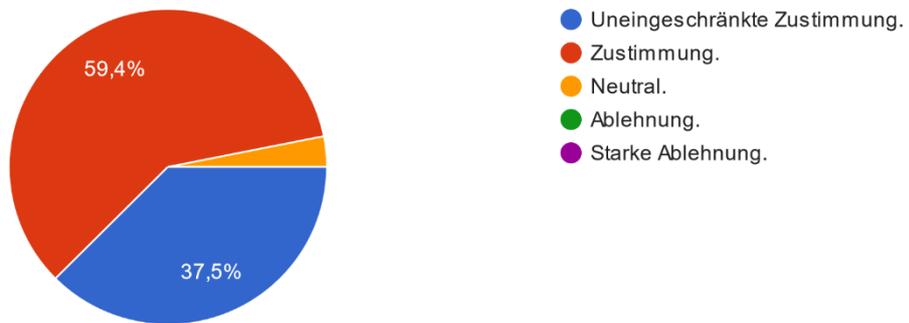


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Einschätzungen der Studienteilnehmenden zur Bewegung in der Szene/ VR-Umgebung (2. Validierung).

Ich wusste, was ich zu tun hatte.

32 Antworten

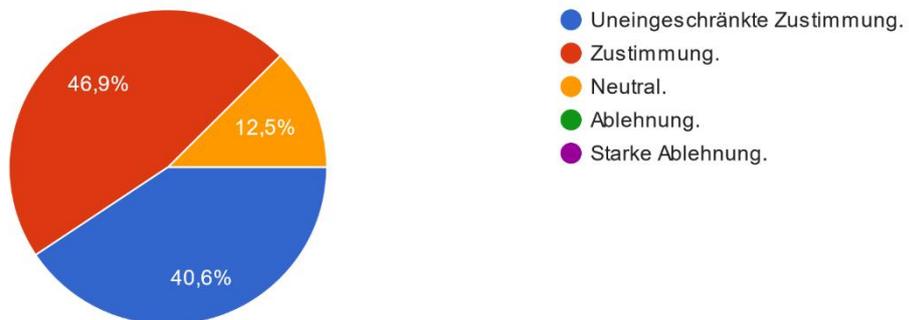


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Einschätzungen der Studienteilnehmenden zur Frage „Ich wusste, was ich zu tun hatte“ (2. Validierung).

Die Anwendung hat mich überfordert.

32 Antworten

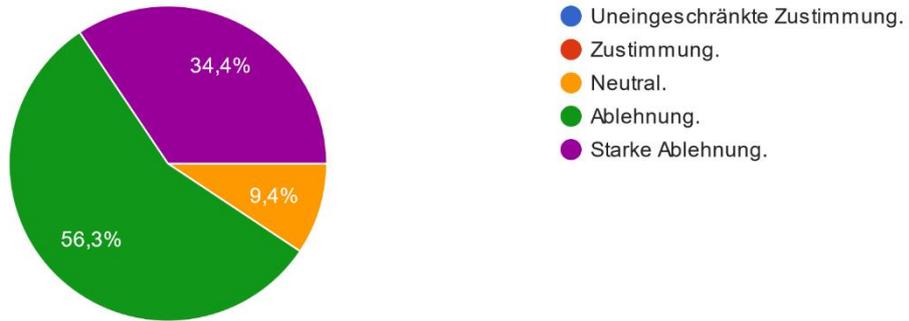


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Einschätzungen der Studienteilnehmenden zur Überforderung durch die Nutzung der Anwendung (2. Validierung).

Ich habe mich gefühlt, als wäre ich tatsächlich in einem anderen Raum.

32 Antworten

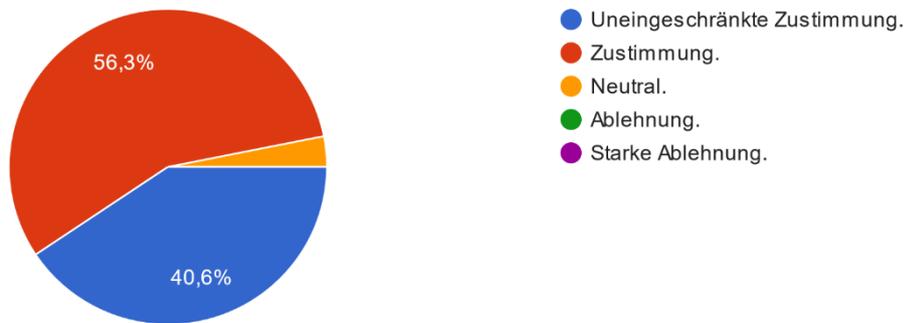


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Einschätzungen der Studienteilnehmenden zur Immersion der VR-Umgebung (2. Validierung).

Die Darstellung der Strahlung war hilfreich für mein Verständnis.

32 Antworten

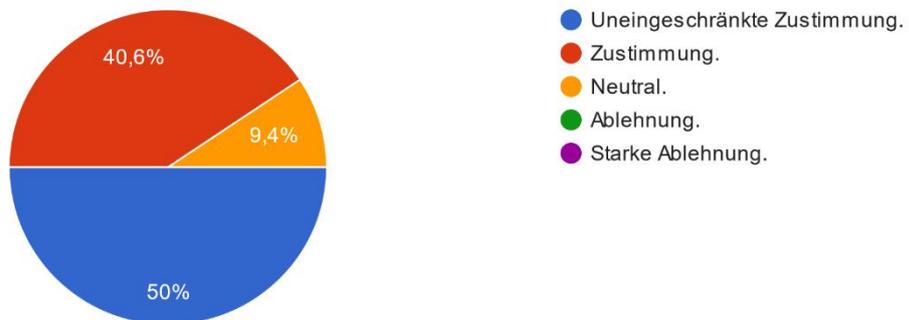


Abbildung. Häufigkeitsverteilung der Selbsteinschätzungen der Studienteilnehmenden zur Darstellung der Strahlung für ihr Verständnis (2. Validierung).

## Anhang C. Bedienungsanleitung zum Strahlensimulationstraining

Herzlich Willkommen! Diese Anleitung soll Ihnen eine kurze Einleitung zur Northdocks-Strahlensimulation geben und Sie mit der Benutzung vertraut machen.

Folgende Features sind in der Anwendung vorhanden:

Das Hauptaugenmerk dieser Anwendung liegt in der Simulation der ionisierenden Strahlung und deren Visualisierung. Die Simulation funktioniert in Echtzeit und kann im Menü ein- und ausgeschaltet werden. Die Visualisierung spiegelt dies direkt wieder und zeigt über ein Farbschema die Intensität der Strahlung an. Für Menschen mit Rot-Grün-Schwäche gibt es ein alternatives Farbschema.

Die Strahlenquelle, die hier simuliert wird, gehört zu einem mobilen C-Bogen (s. Abbildung). Dieser C-Bogen ist detailgetreu in die digitale Welt übersetzt und in ein Katheterlabor integriert worden. Der Bogen, alle Hebel daran und auch der Detektor sind komplett interaktiv und funktionieren wie ihr Gegenstück in der echten Welt.



Abbildung. Darstellung des Katheterlabors mit typischen Gerätschaften und dem bereitgestellten Menü zur Bedienung der Anwendung.

Die Strahlenquelle kann über das native Menü oder über das bereitgestellte Menü, das vor dem Patienten positioniert ist (s. Abbildung oben), gesteuert und modifiziert werden. Dort können unter anderem Einblendung, Pulsmodus oder die Distanz, die die simulierte Strahlung zurücklegt, eingestellt werden.

Darüber hinaus kann sowohl die aufgenommene Strahlung als auch die momentane Dosisleistung angezeigt werden. Die Strahlung wird einzeln an verschiedenen Körperpartien (Kopf, Augen, Schilddrüse, Oberkörper, Becken, Hände und andere Extremitäten) getrackt und im Menü visuell dargestellt (s. unten).

The screenshot shows the 'Ray Control' interface with the following settings and data:

- Einblend-Stufe:** 0
- Einblend-Stufe (semi):** 0
- Modus:** Cine
- Anzeige:** gesamte Strahlung
- Farbe:** GRÜN
- Strahlenlänge:** 500
- Buttons:** Film, CBCT, AN/AUS, AUS
- Effektive Dosis:**
  - Arzt: < 0,01  $\mu\text{Sv}$
  - Patient: < 0,01  $\mu\text{Sv}$
- Dosisleistung:**
  - Eff. DL Arzt: < 0.01  $\mu\text{Sv/h}$
  - DL Kopf: < 0.01  $\mu\text{Sv/h}$
  - DL Augenlinse: < 0.01  $\mu\text{Sv/h}$
  - DL Schilddrüse: < 0.01  $\mu\text{Sv/h}$
  - DL Torso: < 0.01  $\mu\text{Sv/h}$
  - DL Becken: < 0.01  $\mu\text{Sv/h}$
  - DL Extremitäten: < 0.01  $\mu\text{Sv/h}$
  - DL Hände: < 0.01  $\mu\text{Sv/h}$
  - Eff. DL Patient: < 0.01  $\mu\text{Sv/h}$
  - Gerät [DFP/s]: 857,14  $\mu\text{Gy cm}^2/\text{s}$

Abbildung. Abbildung der Anzeige zur Darstellung der Strahlung aufgeschlüsselt nach verschiedenen Körperpartien.

Im Katheterlabor sind Strahlenschutzmittel vorhanden, die Sie anziehen verwenden können. Diese sind in der Abbildung unten dargestellt:



Abbildung. Darstellung der Schutzkleidung im simulierten Katheterlabor (Kleid, Weste, Rock, Brille, Schilddrüsenchutz, Handschuhe und Haube aus Blei).

Es stehen ein Kleid, Weste und Rock, Brille, Schilddrüsenchutz, Handschuhe und Haube aus Blei zur Verfügung. Diese können angezogen werden und reduzieren dann die Dosis, die an der entsprechenden Stelle aufgenommen wird. Um die Ausrüstung wieder auszuziehen, gibt es ein Panel an der Wand, das dies ermöglicht. Des Weiteren stehen zwei Bleischeiben und ein Untertischschutz zur Verfügung, die bei korrekter Verwendung ebenfalls die aufgenommene Dosis reduzieren. Die Veränderungen können dann anhand der veränderten Messwerte im Menü beobachtet werden.

Zusätzlich zur freien Verwendung der Simulation gibt es zwei Eingriffe, die Sie vornehmen können. Es wurden eine diagnostische Koronarangiographie und ein Carotis-Stenting implementiert. Dadurch kann das Verhalten während einer realen Intervention - und damit das Vorgehen für eine möglichst strahlungsarme Vorgehensweise - geübt werden. Um eine dieser Interventionen zu starten, müssen sie das rotierende Fragezeichen über dem Patienten anklicken.

Für einen adäquaten Betrieb der Strahlensimulation sind die minimale Anforderungen die Nutzung von Windows 10, einen Intel Core 7 Prozessor oder äquivalent sowie mindestens eine NVIDIA 1070 oder äquivalent.

Northdocks wünscht viel Spaß mit der Strahlensimulation!