

TPS Praktikum

Wasserphantom Korrektur

Ramona-Gabriela Kallo
ramonagabriela.kallo@tu-dortmund.de

Lauritz Klünder
lauritz.kluender@tu-dortmund.de

Durchführung: 12.06. und 15.06.2020

Abgabe: 21.06.2020

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Begriffserklärung	3
2	Einführung	5
3	Wasserphantom Teil 1	5
3.1	Erstellen eines Wasserphantoms	5
3.2	Erstellen eines PTVs	5
3.3	Erstellen eines Bestrahlungsplanes	5
3.4	Berechnung der Dosisverteilung	5
3.5	Inverse Bestrahlungsplanung	5
3.5.1	Erste Dosisverteilung	5
3.5.2	Zweite Dosisverteilung	6
3.5.3	Dritte Dosisverteilung	7
4	Wasserphantom Teil 2	8
4.1	Untersuchung von Dosisprofilen	8
4.2	4-Felder-Box	11
4.3	Verwendung von Keilen	14
5	Wasserphantom Teil 3	17
5.1	Bestrahlung verschiedener Volumina	17
5.2	Tiefendosiskurven durch verschiedene Volumina	23
	Literatur	27

1 Begriffserklärung

Planning Target Volume (PTV):

Vor der Bestrahlungsplanung muss zunächst von einem Arzt das Tumervolumen (GTV) in dem CT-Bild eingezeichnet werden. Da es allerdings sein kann, dass diagnostisch nicht sichtbare Bereiche mit Tumorzellen infiltriert sein können wird das GTV zu einem Klinischen Zielvolumen (CTV) erweitert. Bei der Lage des Tumors gibt es allerdings weitere Unsicherheiten. Zum einen Verformung oder Verschiebung des Tumors aufgrund von Atmung oder Herzschlag und zum anderen Lagerungsunsicherheiten bei der Bestrahlung. Aus diesem Grund wird das PTV definiert, welches diese Unsicherheiten möglichst mit berücksichtigt. [2]

CT-Wert:

Bei der Aufnahme von CT-Bildern, wird die Abschwächung der Photonenstrahlung durch die Hounsfield-Skala beschrieben. Der CT-Wert kann dabei aus den Schwächungskoeffizienten des Gewebes μ_{Gewebe} und von Wasser μ_{Wasser} bestimmt werden.

$$\text{CT-Wert} = \frac{\mu_{\text{Gewebe}} - \mu_{\text{Wasser}}}{\mu_{\text{Wasser}}} \cdot 1000\text{HU}$$

In der Praxis geht diese Skala von etwa -1000 HU bis 3000 HU. In diesem Fall ist der CT-Wert von Wasser 0 HU, von Luft -1000 HU, von Fett -100 HU und Knochen etwa 1000 HU. [1]

Referenzpunkt:

Der Referenzpunkt ist der Punkt an dem das Strahlenfeld die im Bestrahlungsplanungsprogramm eingestellte Geometrie und Größe besitzt. Der Referenzpunkt wird dabei meistens in das Zentrum des Zielvolumens gelegt. [2]

Multi-Leaf-Collimator (MLC):

Der MLC ist eine Möglichkeit nicht rechteckige Strahlenfelder zu ermöglichen. Dieser besteht aus einzelnen Lamellen, wobei jede einzeln von einem eigenen Motor gesteuert werden kann. Die Lamellen bestehen meistens aus Wolfram. Die einzelnen Lamellen können bei der Bestrahlung so verstellt werden, dass das Strahlenfeld an die Tumorform angepasst wird. [2]

Isodosenlinien und -flächen:

Bei Isodosenlinien ist die Dosis entlang dieser Linie konstant. Bei Isodosenflächen ist die Dosis bei einer dreidimensionalen Dosisverteilung auf diesen Flächen konstant. [2]

Querprofil und Tiefendosiskurven (TDK):

Ein Querprofil umfasst die Dosisverteilung eines Strahlenfeldes senkrecht zum Zentralstrahl und entlang einer der Feldachsen. Eine TDK hingegen beschreibt den Dosisverlauf entlang des Zentralstrahls. [2]

Dosis-Volumen-Histogramm (DVH):

Bei einem Dosis-Volumen-Histogramm wird die relative Dosis, die ein bestimmtes Strukturvolumen erhält, gegen das relative Volumen dieser Struktur dargestellt. Dadurch wird die räumliche Dosisverteilung eines Volumens auf eine zweidimensionale Darstellung reduziert. Durch diese Darstellung der Dosisverteilung geht räumliche Information verloren, allerdings kann mit einem DVH die geplante Dosisverteilung effektiv beurteilt werden. DVHs werden in der Klinik dafür eingesetzt um zu überprüfen ob das PTV die gewünschte Dosis erhält und ob die Risikoorgane hinreichend geschont werden. [2]

Normierungspunkt:

Der Normierungspunkt ist ein Punkt im Zielvolumen, der als Bezugspunkt für die Dosisnormierung verwendet wird. [2]

2 Einführung

Für die ersten Praktikumstage ist es notwendig sich als erstes mit dem Wasserphantom zu beschäftigen. Dieses dient vor allem als Einstieg ins Bestrahlungsprogramm. Hierbei wird gelernt wie die Software Eclipse für die Bestrahlungsplanung funktioniert. Die ersten wichtigsten Aufgaben sind vor allem die Erstellung eines Wasserphantoms, die Untersuchung von Dosisprofilen und die Erstellung einer Tiefendosiskurve.

3 Wasserphantom Teil 1

3.1 Erstellen eines Wasserphantoms

Im ersten Teil soll das Programm kennengelernt werden. Hierbei wird ein neuer "Patient" kreiert und im Konturierungsmodul soll ein Wasserphantom mit den Maßen 10 cm x 10 cm x 10 cm, einem Schichtabstand von 0,25 cm und einem CT-Wert von Wasser erstellt werden.

3.2 Erstellen eines PTVs

Im Zentrum des Phantoms wird eine kugelförmige Figur bzw. ein PTV mit einem Durchmesser von 5 cm. Hier soll das PTV auch einen CT-Wert von Wasser besitzen.

3.3 Erstellen eines Bestrahlungsplanes

Als nächstes wird ein Bestrahlungsplan angelegt. Nun wird hier ein Bestrahlungsfeld mit den Maßen 5,5 cm x 5,5 cm und einer Photonenenergie von 6 MeV hinzugefügt. Außerdem soll hier die Gantry-Rotation den Wert 0° betragen, d.h. das Wasserphantom wird bei einer Gantry-Rotation von 0° bestrahlt.

3.4 Berechnung der Dosisverteilung

Im nächsten Teil soll dann die Dosisverteilung berechnet werden. Dies geschieht mit Hilfe einem Algorithmus, der in diesem Fall mit AAA-CAP137 bezeichnet und in diesem Fall ausgewählt wird.

3.5 Inverse Bestrahlungsplanung

Als Hilfe werden in diesem Aufgabenteil drei unterschiedliche Dosisverteilung in der Anleitung hinzugefügt. Diese sollen mit Hilfe des Bestrahlungsplanungsprogramms invers rekonstruiert werden. In diesem Fall sollen die Felder die Größe 5,5 cm x 5,5 cm und eine Photonenenergie von 6 MV besitzen.

3.5.1 Erste Dosisverteilung

In der Abbildung 2 ist die erste Dosisverteilung zu sehen. Die Dosisverteilung wird mit Hilfe von vier gleich gewichteten Strahlenfelder erzeugt und jedes Strahlenfeld besitzt

eine Gantry-Rotation von 0° , 90° , 180° und 270° . Das PTV befindet sich in der Mitte des Wasserphantoms. Die Strahlenfelder werden in diesem Fall mit MLCs für das PTV ausgerichtet. Dabei werden die MLCs mit einem Sicherheitsaum von 0,5 cm an das PTV angepasst. Die vorgegebene Dosisverteilung ist zum Vergleich in der Abbildung 1 gezeigt.

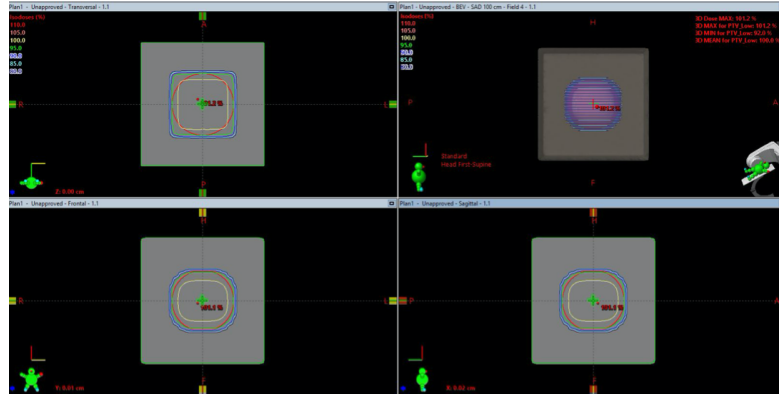


Abbildung 1: Darstellung der in der Anleitung gegebenen Dosisverteilung. [3]

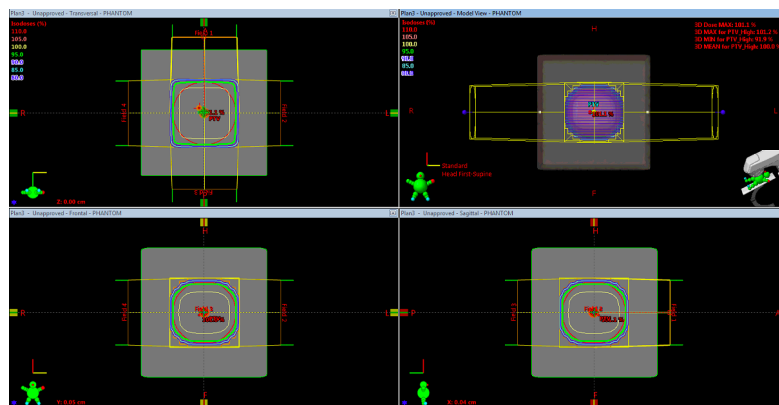


Abbildung 2: Die erste rekonstruierte Dosisverteilung.

3.5.2 Zweite Dosisverteilung

In der Abbildung 4 ist die zweite Dosisverteilung zu sehen. Im Gegensatz zu dem anderen Aufgabenteil haben hier die Strahlenfelder eine Gantry-Rotation von 0° , 90° und 225° . Dabei ist die Gewichtung des Feldes bei 0° 32.5%, die des Feldes bei 90° 34.5% und die des Feldes bei 225° 33%. Hierbei ergibt sich eine asymmetrische Form der Dosisverteilung, die mit der in der Anleitung gegebenen übereinstimmt (vgl. Abbildung 3).

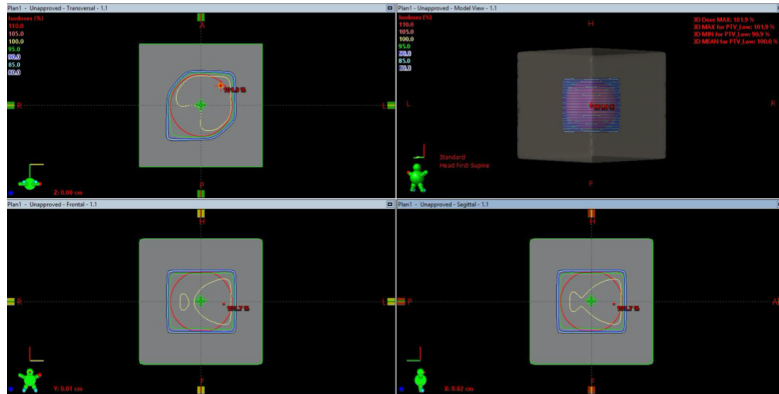


Abbildung 3: Darstellung der in der Anleitung gegebenen Dosisverteilung. [3]

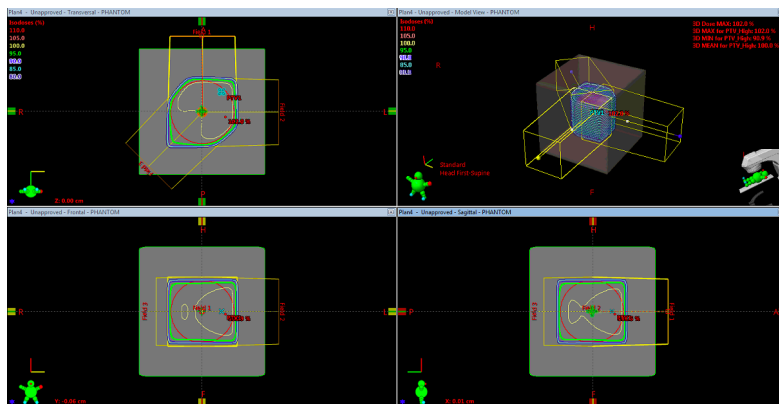


Abbildung 4: Die zweite rekonstruierte Dosisverteilung.

3.5.3 Dritte Dosisverteilung

In der Abbildung 6 ist die dritte Dosisverteilung zu sehen. Wie im vorherigen Teil handelt es sich hier auch um eine asymmetrische Form. Es ähnelt einem Hexagon. In diesem Fall wurden 6 Strahlenfelder bei Gantry-Rotationen von 30° , 90° , 150° , 210° , 270° und 330° verwendet. In diesem Fall sind alle Strahlenfelder gleichgewichtet. Die gegebene Verteilung ist zum Vergleich in Abbildung 5 dargestellt.

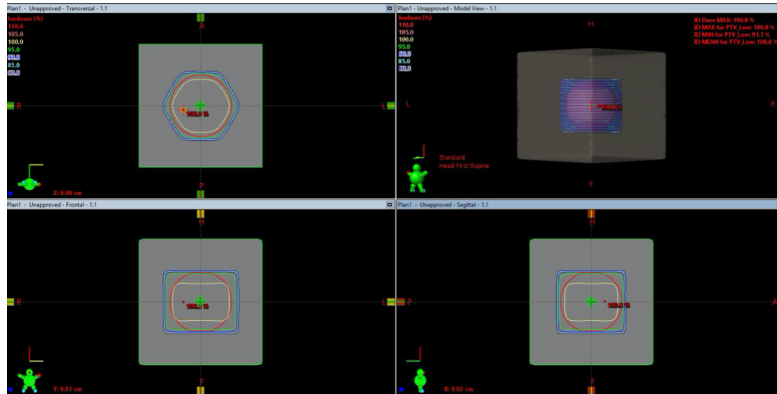


Abbildung 5: Darstellung der in der Anleitung gegebenen Dosisverteilung. [3]

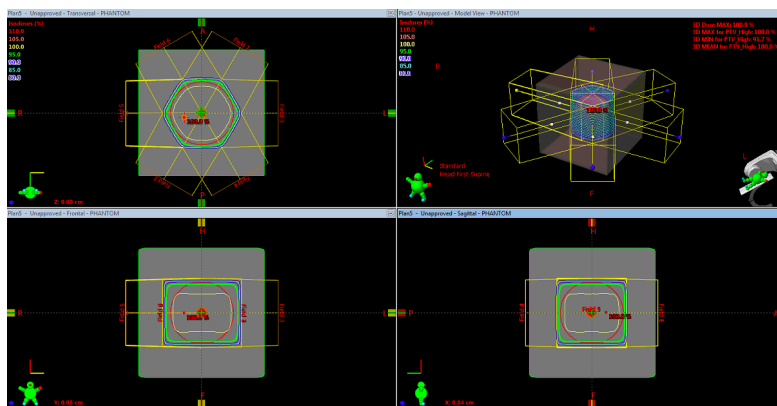


Abbildung 6: Die dritte rekonstruierte Dosisverteilung.

4 Wasserphantom Teil 2

4.1 Untersuchung von Dosisprofilen

Zuerst soll ein Wasserphantom mit den Maßen 30 cm x 30 cm x 30 cm, einem Schichtabstand von 0,25 cm und einem CT-Wert von Wasser erstellt werden. In das Zentrum des Wasserphantoms wird eine Kugel mit dem Durchmesser von 5 cm als PTV definiert. Außerdem wird eine Gantry-Rotation von 0° verwendet und ein Strahlenfeld der Größe 10 cm x 10 cm mit einer Photonenenergie von 6 MV. Das ist in der Abbildung 7 zu sehen. Das Strahlenfeld wird in der Tiefe des Phantoms breiter. Der Referenzpunkt wurde in die Mitte des Wasserphantoms gesetzt, da dort auch das Zentrum des PTVs liegt. An diesem Punkt hat das Feld die eingestellte Feldgröße erreicht. Die Feldgröße hat aber eine Ungenauigkeit, die von der Auflösung und Schichtdicke des CTs abhängig ist.

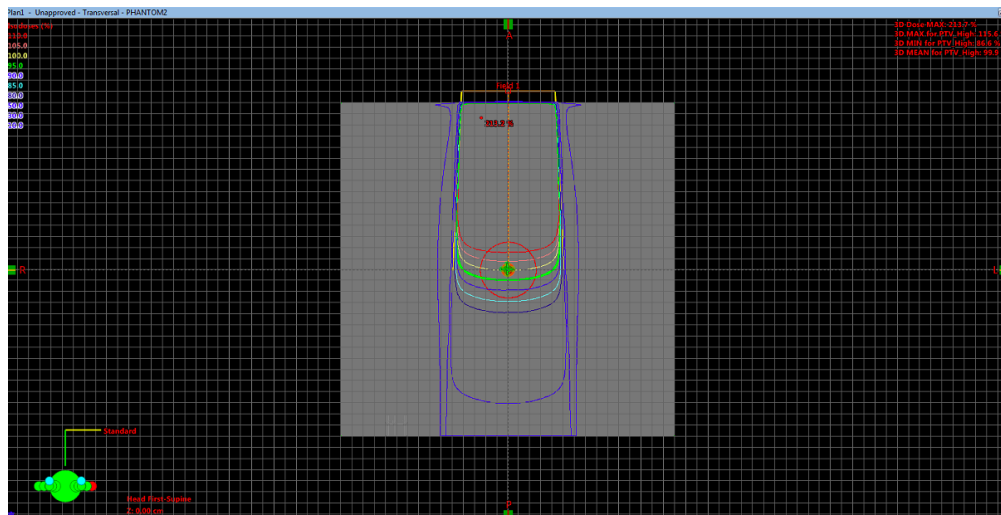


Abbildung 7: Das Wasserphantom und das bestrahlte Feld mit einem Grid von 1 cm.

Für die Darstellung der Dosisverteilung im Phantom, wird ein Querprofil erstellt. Es wird in diesem Fall senkrecht zum Zentralstrahl in einem Bild aufgenommen. Dies ist in der Abbildung 8 zu sehen. Aus dieser Abbildung kann entnommen werden, dass am Rand des Feldes ungefähr eine relative Dosis von 50 % ankommt.

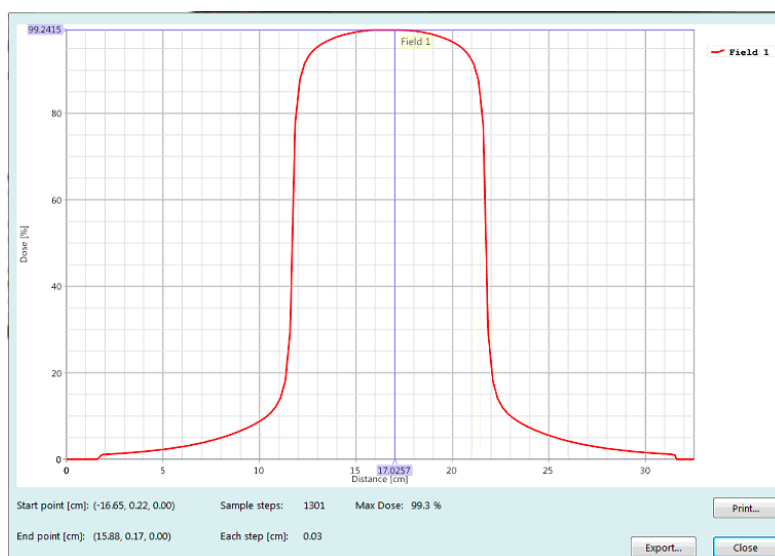


Abbildung 8: Dosisquerprofil in der Mitte des Phantoms.

Im weiteren Verlauf soll das Feld auf 6 cm x 6 cm für eine sinnvollere Bestrahlung des PTVs verkleinert werden. Diese Dosisverteilung ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Dosisberechnung zeigt, dass die 95 %-Isodosenlinie das gesamte PTV nicht umschließt. Der Grund dafür ist, dass die Dosisverteilung auf den Referenzpunkt, der sich im Zentrum

des PTVs befindet, normiert ist. Dies bedeutet, dass die 100 %-Isodosenlinie immer durch den Referenzpunkt läuft. Da innerhalb des PTV die Strahlung weiter abgeschwächt wird, wird hinter dem Referenzpunkt auch weniger Dosis deponiert. In diesem Fall wird die Photonenstrahlung bereits in dem PTV so stark abgeschwächt, dass die relative Dosis bereits in dem PTV auf unter 95% absinkt.

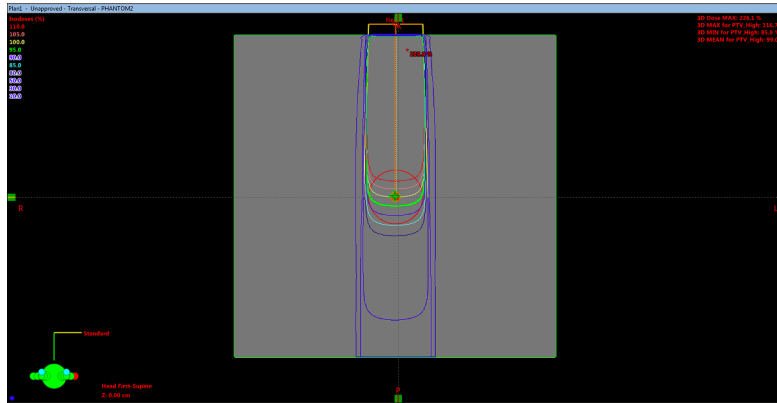


Abbildung 9: Dosisverteilung bei einem Strahlenfeld der Größe 6 cm x 6 cm.

Im letzten Schritt wird eine Tiefendosiskurve erstellt. Diese ist in Abbildung 10 zu sehen wobei die Tiefendosiskurve entlang des Zentralstrahls durch das Phantom verläuft. Außerhalb des Phantoms ist keine Dosis deponiert, da dort kein Material definiert wurde. Das bedeutet für das Programm ist außerhalb des Wasserphantoms Vakuum und dort kann keine Dosis deponiert werden. Innerhalb des Wasserphantoms ist der CT-Wert von Wasser eingestellt und somit wird dort Dosis deponiert. Nach dem Eintritt der Photonenstrahlung in das Wasserphantom steigt die Dosis zunächst an und erreicht erst in etwa 1,5 cm Tiefe sein Maximum. Das liegt an dem Dosisaufbaueffekt, der bei hochenergetischen Photonen ab etwa 1 MeV zu beobachten ist. Dieser Effekt kann mit dem Klein-Nishima-Wirkungsquerschnitts beschrieben werden, da die Wahrscheinlichkeit für Vorwärtstreuung mit steigender Photonenenergie zunimmt. Das bedeutet, dass bei Eintritt in das Wasserphantom die erzeugten Sekundärelektronen und die gestreuten Photonen sich hauptsächlich in Strahlrichtung bewegen. Durch indirekt ionisierende Photonenstrahlung geschieht der Energieübertrag auf das Material hauptsächlich durch Sekundärelektronen und diese bewegen sich überwiegend in Einstrahlrichtung. Die übertragene Energie und somit die Dosis die durch die Elektronen auf das Wasserphantom übertragen wird summiert sich und wird bis zu einem Maximum immer größer. In der Tiefe des Maximums haben die Photonen so viel Energie abgegeben, dass die Wahrscheinlichkeit für Vorwärtstreuung nicht mehr so groß ist. Nach dem Maximum nimmt die deponierte Dosis also nach dem Lambert-Beerschen Gesetz exponentiell ab. Das kann auch anhand der gemessenen Tiefendosiskurve gesehen werden. [2]

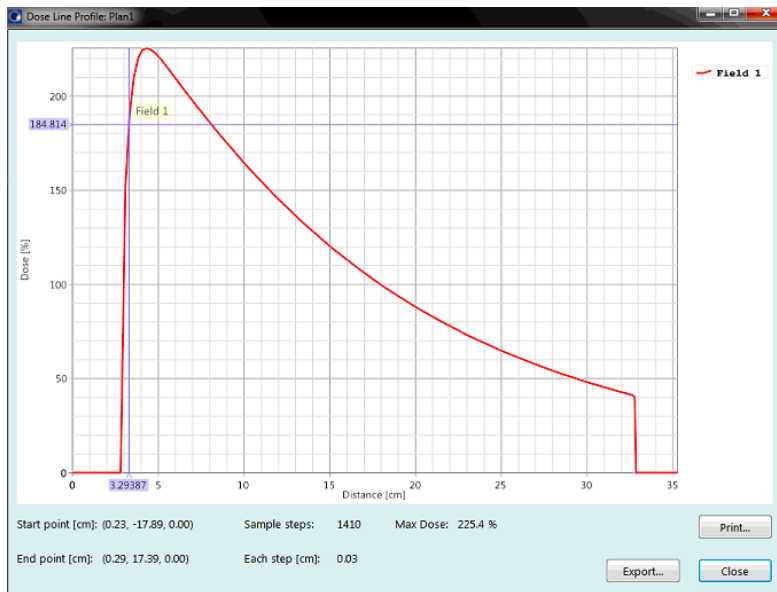


Abbildung 10: Die Tiefendosiskurve entlang des Zentralstrahls.

4.2 4-Felder-Box

Zu dem bereit erstellten Feld werden nun drei weitere Felder erzeugt. Bei diesen zusätzlichen Feldern sind die Gantry-Rotationen 90° , 180° und 270° . Diese haben die gleichen Eigenschaften wie das erste erstellte Feld und hierbei muss darauf geachtet werden, dass die Gesamtgewichtung bei 1 liegt. In diesem Fall hat jedes Feld eine Gewichtung von 0,25.

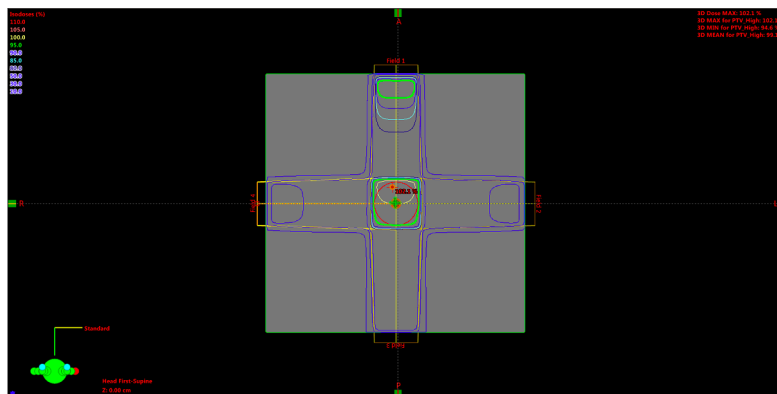


Abbildung 11: Darstellung einer 4-Felder-Box mit einer doppelten Gewichtung eines Feldes wie die anderen drei.

Danach wird eines der Felder doppelt gewichtet, wie die restlichen drei Felder. Dies ist in der Abbildung 11 zu sehen. Dabei ist die Gewichtung des Feldes bei 0° 40% und bei den restlichen 20%. Als letztes werden die Gewichtungen der Felder erneut verändert. Diesmal

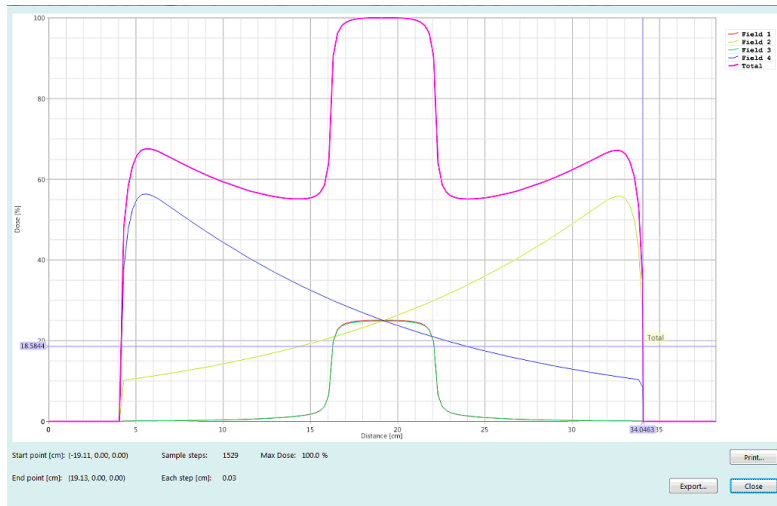


Abbildung 13: Die Tiefendosiskurve der 4-Feldes-Box mit gleicher Gewichtung.

Da in dieser Kurve vier Felder zu der Dosisverteilung in dem Wasserphantom beitragen unterscheidet sich diese Tiefendosiskurve stark von der in Abbildung 10. Die einzelnen Kurven von den Feldern 2 und 4 sehen ähnlich aus wie die vorher aufgenommene Tiefendosiskurve. Das liegt daran, dass das Dosisprofil entlang des Zentralstrahls dieser Felder aufgenommen wurde und diese beiden Felder sich genau gegenüber liegen. Diese Kurven zeigen den gleichen Verlauf wie die vorherige Tiefendosiskurve. Außerhalb des Wasserphantoms ist die Dosis null und bei Eintritt in das Phantom ist ein Dosisaufbaueffekt zu erkennen. Nach dem Maximum fällt die Dosis auch exponentiell ab. Die einzelnen Kurven von den Feldern 1 und 3 liegen genau übereinander und sehen ähnlich aus wie das Querprofil in Abbildung 8. Das kommt daher, dass von diesen Feldern das Querprofil gemessen worden ist, da sie sich auch genau gegenüber liegen und senkrecht zu den anderen beiden Feldern stehen. Auch diese Kurven zeigen den gleichen Verlauf wie das in Abbildung 8 gezeigte Querprofil. Die Dosis steigt erst in dem Phantom etwas an. In der Mitte des Phantoms und des PTVs, wo sich das eingestellte Feld von 6 cmx 6 cm befindet, steigt das Dosisprofil stark an bis die gewünschte relative Dosis erreicht ist. Wenn die relative Dosis erreicht ist, ist das Dosisprofil konstant bis die Dosis nach etwa 6 cm wieder stark abfällt.

Die gesamte Kurve (in Pink) ergibt sich aus der Summe der Dosisprofile der einzelnen Felder. Der äußere Verlauf dieser Kurve ähnelt der Tiefendosiskurve aus Abbildung 10, da in diesem Bereich die Felder 1 und 3 nur wenig zu der Dosis beitragen. In der Mitte des Wasserphantoms, in dem Bereich wo die Felder 1 und 3 hauptsächlich zu der Dosisverteilung beitragen, hat die Gesamtkurve einen Verlauf wie in dem Querprofil in Abbildung 8.

Anhand des gesamten Dosisprofils ist zu erkennen, dass in der Mitte des Wasserphantoms, dort wo sich das PTV befindet, die meiste Dosis deponiert wird. Das ist ein Vorteil an einer Bestrahlung mit mehreren Feldern. Wird nur mit einem Feld bestrahlt ist es durch den exponentiellen Dosisabfall schwierig eine gewünschte Dosis in einem PTV zu

4.3 Verwendung von Keilen

The screenshot shows the RStudio environment with a plot titled 'Rise of the Infection (infectious)'. The plot compares two models: 'PlanCompGHS' (red line with circles) and 'PlanCompGHS' (green line with circles). The y-axis represents the 'Rise of the Infection (infectious)' from 0 to 100, and the x-axis represents 'Relative time (%)' from 0 to 100. The 'PlanCompGHS' curve starts at 100 and drops sharply to near 0 by 100%. The 'PlanCompGHS' curve starts at 100 and drops more gradually, reaching near 0 by 100%.

Zu beobachten ist, dass bei der Verwendung eines Keilfilters die maximale relative Dosis bei der Bestrahlung höher ist als ohne den Filter. Durch den Keilfilter wird das Strahlungsfeld unterschiedlich stark abgeschwächt. Damit in dem Referenzpunkt die gleiche Dosis deponiert wird, wie ohne den Keilfilter, muss eine höhere Dosis appliziert werden. Auf einer Seite wird das Strahlenfeld allerdings kaum abgeschwächt, deshalb ist auf dieser Seite auch die maximale Dosis, die in dem Wasserphantom deponiert wird,

höher als ohne den Keilfilter. Aus diesem Grund ist die Beobachtung, dass sich die maximale relative Dosis erhöht sinnvoll. Anhand der roten Kurve ist zu erkennen, dass die Dosisdeposition in dem PTV bei der Verwendung eines Keilfilters inhomogener ist als ohne den Filter. Das liegt daran, da das Strahlenfeld durch den Keilfilter beeinflusst wird und somit die Dosisverteilung in dem PTV und auch im gesamten Wasserphantom asymmetrisch wird.

Im weiteren Verlauf sollen zwei neue Pläne am gleichen Wasserphantom erstellt werden. Dabei werden zwei opponierende Felder mit Gantry Rotationen von 0° und 180° mit einem Keilfilter der Stärke 60° erstellt. Hierbei muss wieder auf die Gesamtgewichtung geachtet werden. Bei einem Plan sollen die Ausrichtungen der Keile identisch sein, diese Dosisverteilung ist in Abbildung 15 zu sehen. Bei dem zweiten Plan ist die Ausrichtung der Keile entgegengesetzt. Dieser Plan ist in Abbildung 16 gezeigt. Zum Vergleich der beiden Pläne wird erneut ein DVH mit den beiden Plänen erzeugt. Dieses ist in Abbildung 17 dargestellt. Dabei ist das DVH des PTVs in rot dargestellt und das des gesamten Wasserphantoms in grün. Der Plan mit den Keilfiltern in gleicher Ausrichtung ist durch Quadrate dargestellt und der Plan mit den entgegengesetzten Keilfilter durch Dreiecke. An dem DVH ist zu erkennen, dass sich die Dosisdepositionen in dem gesamten Wasserphantom nicht unterscheiden. Das kommt daher, da es sich bei beiden Plänen um die gleichen Felder und auch die gleichen Keilfilter handelt, die lediglich anders ausgerichtet sind. Diese unterschiedliche Ausrichtung macht sich nur in der Dosisdeposition innerhalb des PTVs bemerkbar, allerdings nicht wenn das gesamte Wasserphantom betrachtet wird. Werden die zwei Kurven des PTVs betrachtet sind Unterschiede zu erkennen. Bei dem Plan mit den entgegengesetzten Keilfiltern wird eine deutlich geringere maximale relative Dosis deponiert als bei den anderen Plan. Der Grund dafür kann anhand der Abbildungen 15 und 16 gut gesehen werden. Bei dem ersten Plan mit den gleichen Keilfiltern ist der Keilfilter auf der gleichen Seite am geringsten. Aus diesem Grund verläuft die 110% Isodosenlinie durch das gesamte Wasserphantom und damit auch durch das PTV. Bei den anderen Plan sind die Keilfilter auf unterschiedlichen Seiten am geringsten. Aus diesem Grund überlagert sich der abgeschwächte Teil des ersten Feldes mit dem nicht abgeschwächten Teil des opponierenden zweiten Feldes und umgekehrt. Dadurch ist die maximale Dosis in dem PTV deutlich geringer.

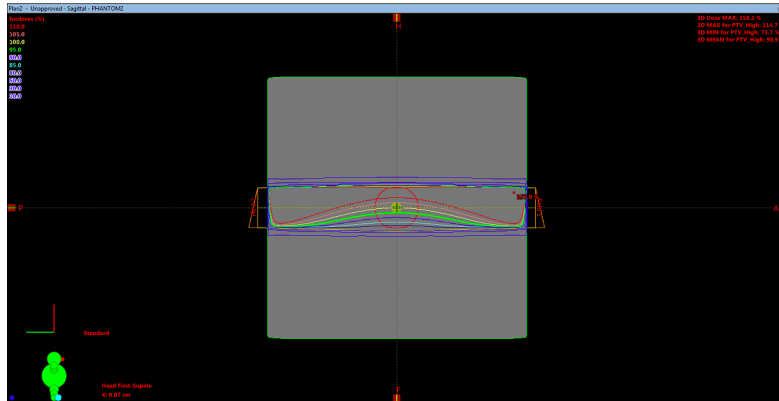


Abbildung 15: Das Dosisprofil in gleicher Winkelausrichtung.

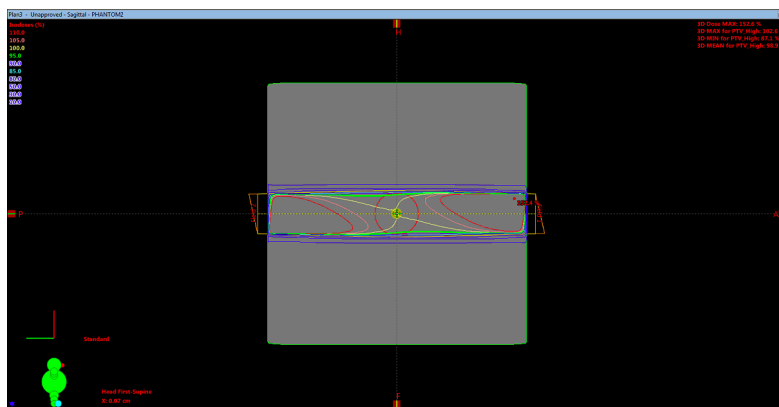


Abbildung 16: Das Dosisprofil in entgegengesetzter Winkelausrichtung.

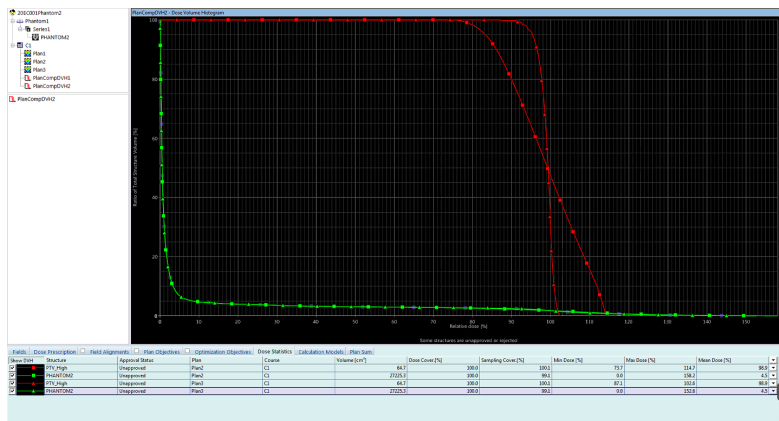


Abbildung 17: Vergleich der beiden Dosisprofil mit Keile in selber (Quadrate) und entgegengesetzte Keilen (Dreiecke) Ausrichtung des Wasserphantoms in grün und des PTVs in rot.

5 Wasserphantom Teil 3

5.1 Bestrahlung verschiedener Volumina

In diesem Aufgabenteil wird erneut ein Wasserphantom mit den Maßen $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$, dem Schichtabstand $0,25 \text{ cm}$ und einem CT-Wert von Wasser. Diesmal werden in dem Wasserphantom weitere Konturen definiert. Es werden vier Kugeln mit einem Durchmesser von $2,5 \text{ cm}$ und CT-Werten von Luft, Fett, Wasser und Knochen in das Wasserphantom eingezeichnet. Dieses Wasserphantom wird nun mit einem $25 \times 25 \text{ cm}^2$ 6 MV Photonenfeld bestrahlt bei einer Grantry Rotation von 90° . Bei der Bestrahlung wird die Bestrahlungsmaschine Eclipse-CAP-TB und der Berechnungsalgorithmus Acuros verwendet. Diese Bestrahlung, ohne Normierung auf einen Referenzpunkt, ist in Abbildung 18 gezeigt.

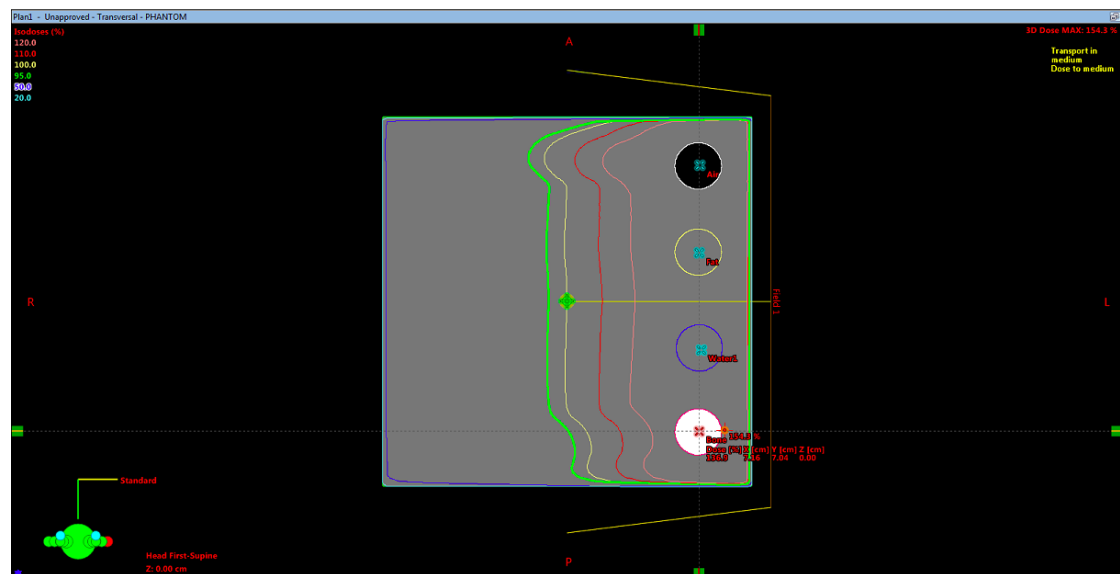


Abbildung 18: Isodosenlinien der Bestrahlung des modifizierten Wasserphantoms, ohne Normierung auf einen Referenzpunkt.

Nun wird in den vier Strukturen jeweils ein Referenzpunkt festgelegt und der Plan wird der Reihe nach auf die vier Referenzpunkte normiert. Die Dosisverteilungen sind in den Abbildungen 19, 20, 21 und 22 dargestellt.

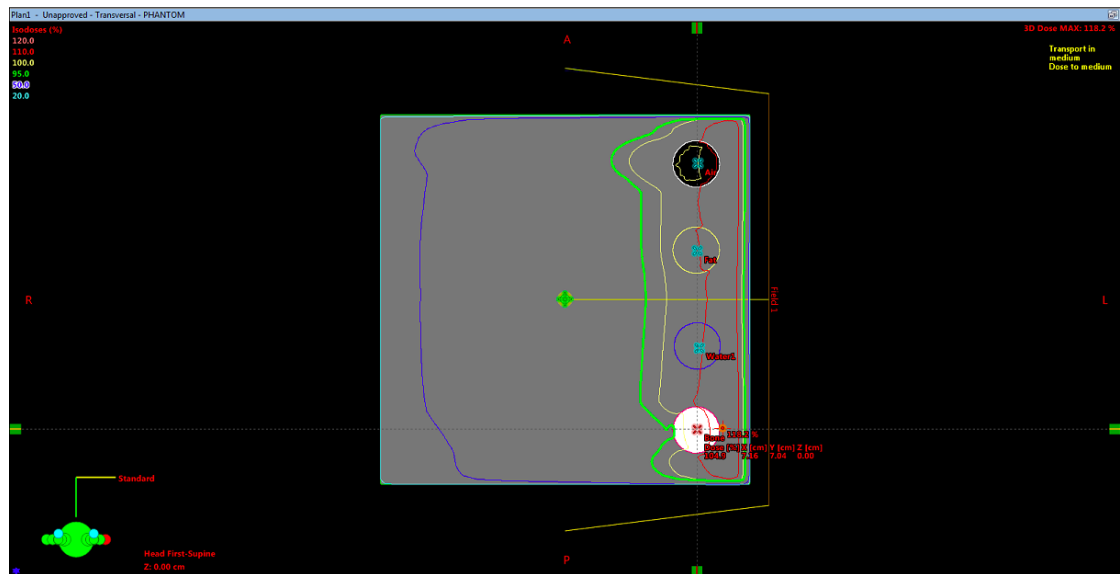


Abbildung 19: Resultierende Dosisverteilungen im Wasserphantom bei Normierung auf den Referenzpunkt „Luft“.

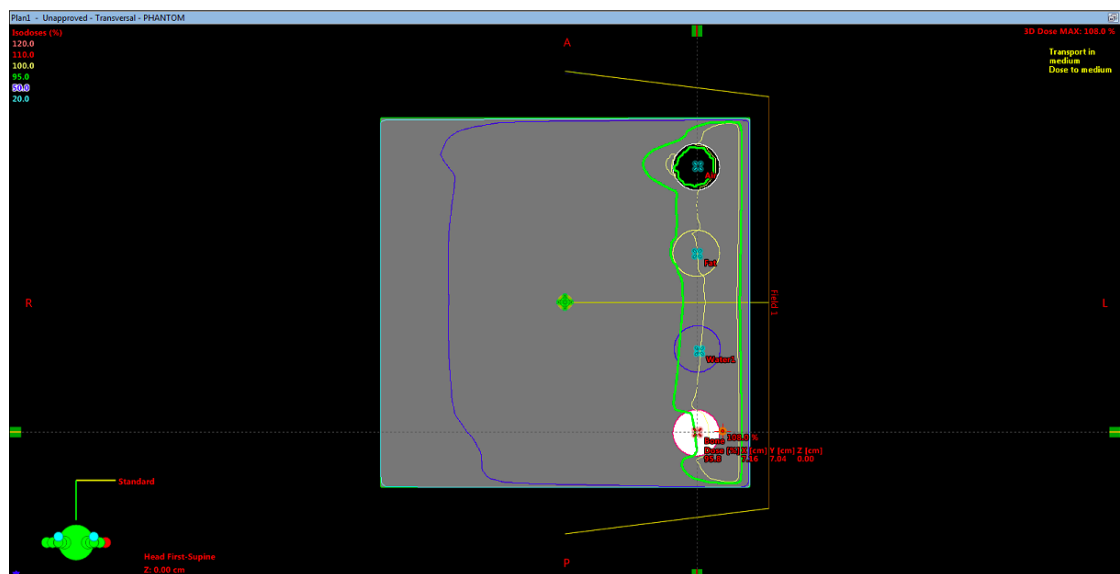
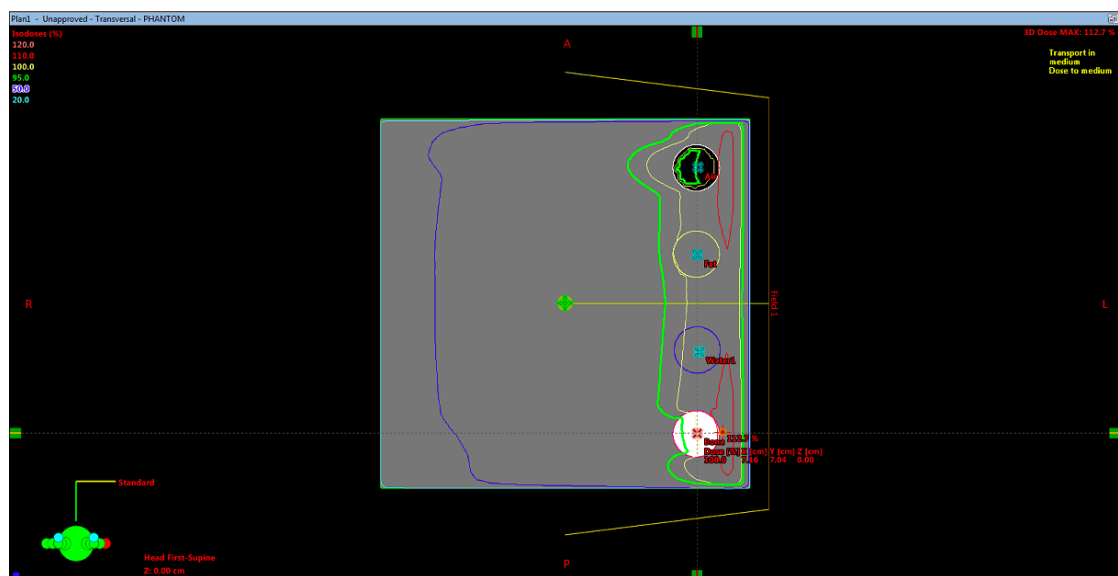
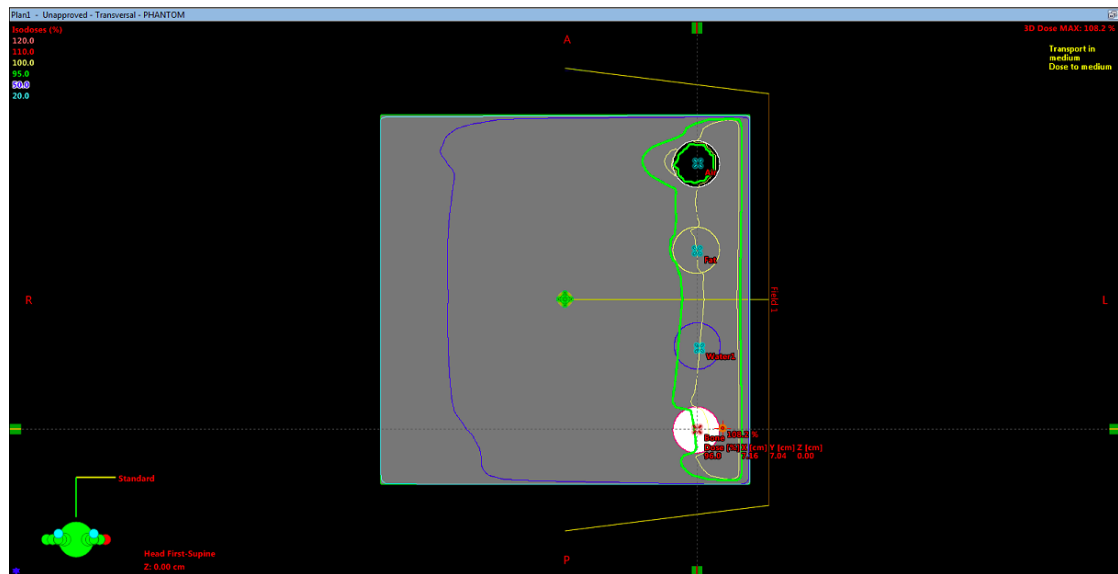


Abbildung 20: Resultierende Dosisverteilungen im Wasserphantom bei Normierung auf den Referenzpunkt „Fett“.



Bei der Normierung des Plans auf den Referenzpunkt in Luft ist zu erkennen, dass dabei in der Struktur aus Luft hauptsächlich 100% der Dosis deponiert wird, in einem kleinen Teil zu Beginn der Struktur 110%. Außerdem ist zu erkennen, dass bei allen Normierungen hinter der Struktur aus Luft am meisten Dosis, im Vergleich zu den anderen Strukturen, deponiert wird. Das kommt daher, da Luft die geringste Dichte

hat und somit in dieser Struktur die Photonenstrahlung am wenigsten abgeschwächt wird. Deshalb muss bei dieser Normierung auch eine höhere Dosis appliziert werden und im Teil des Wasserphantoms vor den Struktur wird mehr als 110% der Dosis deponiert.

Bei der Normierung auf Fett und Wasser sind keine großen Unterschiede in der Dosisverteilung zu erkennen. In beiden Fällen wird in etwa der Hälfte der Struktur 100% der Dosis deponiert und in dem hinteren Teil der Struktur fällt die relative Dosis auf 95%. Die beiden Dosisverteilungen sind sich so ähnlich, da die Dichte von Wasser und Fett sehr ähnlich sind. Deshalb verlaufen die Isodosenlinien hinter den beiden Strukturen (die 95% und 50% Linien) etwa linear senkrecht zur Strahlrichtung. Hinter den beiden Strukturen wird weniger als 95% der Dosis deponiert.

Als letztes ist der Plan auf Knochen normiert worden. Auch bei dieser Normierung wird in etwa der Hälfte der Struktur 100% der Dosis deponiert. Da Knochen eine hohe Dichte haben, wird die Photonenstrahlung stark abgeschwächt und die deponierte Dosis in dieser Struktur fällt schnell ab. Das kann daran gesehen werden, da die 95% Isodosenlinie noch durch die Struktur verläuft, was bei den anderen Strukturen nicht der Fall war. Das bedeutet in dem hinteren Teil der Struktur wird weniger als 95% der Dosis deponiert. Auch hinter dieser Struktur wird bei allen Normierungen immer am wenigsten Dosis deponiert. Das liegt auch daran, dass in dieser Struktur, aufgrund von der hohen Dichte, die Photonenstrahlung am stärksten abgeschwächt wird.

Bei den verschiedenen Normierungen auf die unterschiedlichen Referenzpunkte fällt auf, dass sich die Isodosenlinien verändern. Der Verlauf der Isodosenlinien ist bei den verschiedenen Normierungen immer ähnlich, allerdings verändert sich die Lage im Wasserphantom. Durch die unterschiedlichen Normierungen auf die Referenzpunkte, wird an diesem Punkt 100% der Dosis deponiert. Deshalb verläuft die 100% Isodosenlinie durch den jeweiligen Referenzpunkt und die relative Dosisverteilung verändert sich.

Da Fett und Wasser eine ähnliche Dichte haben verändert sich die relative Dosisverteilung wenig bei diesen beiden Normierungen. In Luft wird, aufgrund der geringen Dichte nur wenig Dosis deponiert. Aus diesem Grund wird bei dieser Normierung über 110% der Dosis vor den Strukturen deponiert. Dort wird also mehr Dosis deponiert als in der Struktur. Knochen ist die Struktur mit der höchsten Dichte, aus diesem Grund nimmt die deponierte Dosis in dieser Struktur schnell ab. Deshalb ist die deponierte Dosis an dem Referenzpunkt, auf die normiert wird, relativ gering. Deshalb ist die relative Dosisverteilung ähnlich zu der Normierung auf den Referenzpunkt in Luft.

Nun werden hinter der Reihe aus den vier Strukturen, aus Sicht der Einstrahlrichtung, weitere vier Strukturen angelegt, die als Organ klassifiziert werden und einen CT-Wert von Wasser besitzen. Dieses modifizierte Wasserphantom wird mit dem gleichen Feld wie vorher bestrahlt und der Plan wird auf den Referenzpunkt in der Wasserkugel normiert. Nun wird ein Dosis-Volumen-Histogramm (DVH) zu den neuen vier Strukturen angelegt. Was ein DVH darstellt und wofür es verwendet wird ist in 1 erklärt.

Das DVH der vier Strukturen ist in Abbildung 23 gezeigt.

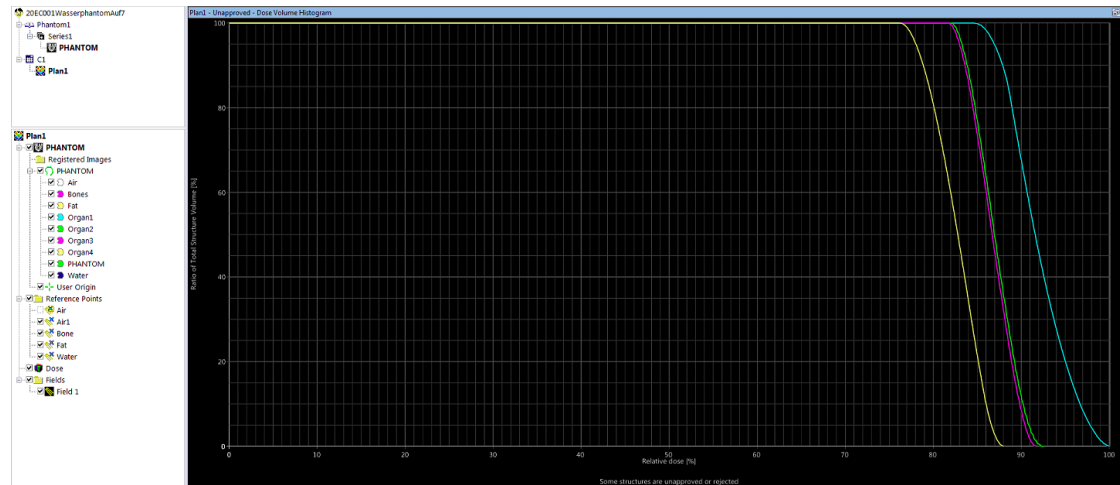


Abbildung 23: Dosis-Volumen-Histogramm zu den vier neu angelegten Strukturen mit dem CT-Wert Wasser.

Dabei liegt das Organ 1 hinter der Struktur Luft, das Organ 2 hinter Fett, das Organ 3 hinter Wasser und das Organ 4 hinter Knochen. Anhand des DVHs ist zu erkennen, dass in Organ 1 am meisten Dosis deponiert wird. Etwa 100% des Organs erhält eine relative Dosis von etwa 85%. Die Kurven von dem Organ 2 und 3 verlaufen sehr ähnlich. In 100% dieser Organe wird mehr als 82% der Dosis deponiert. In dem letzten Organ wird am wenigsten Dosis deponiert, nämlich etwa 76% der relativen Dosis in 100% des relativen Volumen. Für die Bestrahlungsplanung folgt anhand dieser Erkenntnisse, dass Knochengewebe im Strahlengang vermieden werden sollte, da in diesem Gewebe viel Dosis deponiert wird und somit in dem Zielvolumen eine zu geringe Dosis deponiert werden könnte. Außerdem ist zu erkennen, dass Fettgewebe und Wasser als nahezu gleich betrachtet werden können bei der Bestrahlungsplanung. Bei Strukturen aus Luft im Strahlengang ist zu beachten, dass in diesen die Photonenstrahlung nur wenig abgeschwächt wird und somit in den dahinter liegenden Strukturen noch eine hohe Dosis deponiert wird.

In der Abbildung 24 ist zusätzlich das DVH des gesamten Wasserphantoms in grün dargestellt.

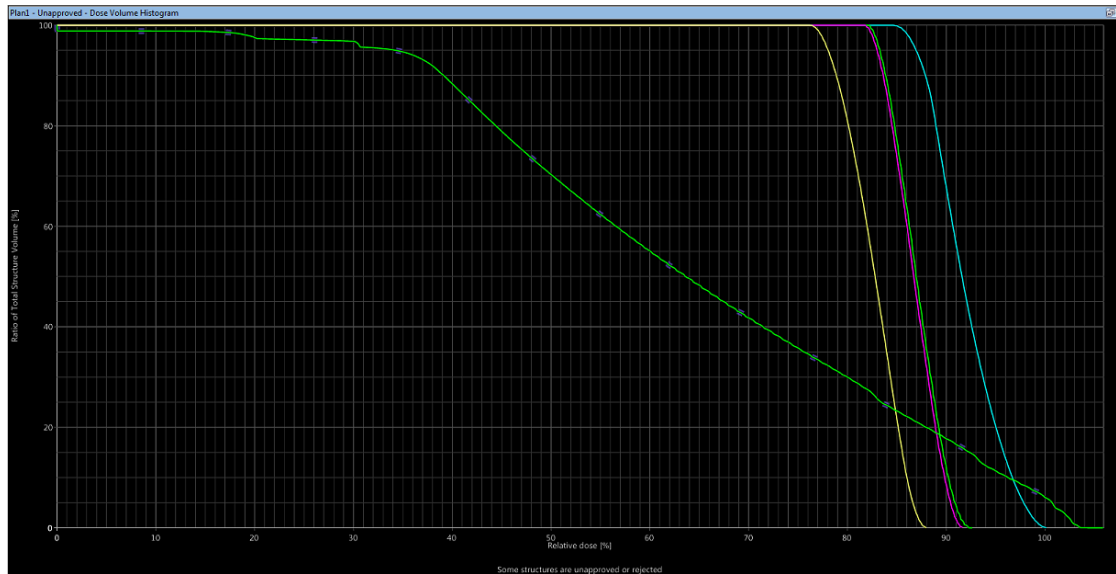


Abbildung 24: Dosis-Volumen-Histogramm zu den vier neu angelegten Strukturen mit dem CT-Wert Wasser und des gesamten Wasserphantoms.

Anhand dieser Kurve ist zu erkennen, dass etwa 70% des relativen Volumens des Wasserphantoms eine relative Dosis von 50% erhält und etwa 98% eine relative Dosis von 20%. Diese hohe Dosisdeposition kann mit Hilfe des MLCs verringert werden. Die Lamellen werden dabei so eingestellt, dass der Photonenstrahl nur im Bereich der Strukturen auf das Wasserphantom trifft. Das neue DVH ist in Abbildung 25 dargestellt.

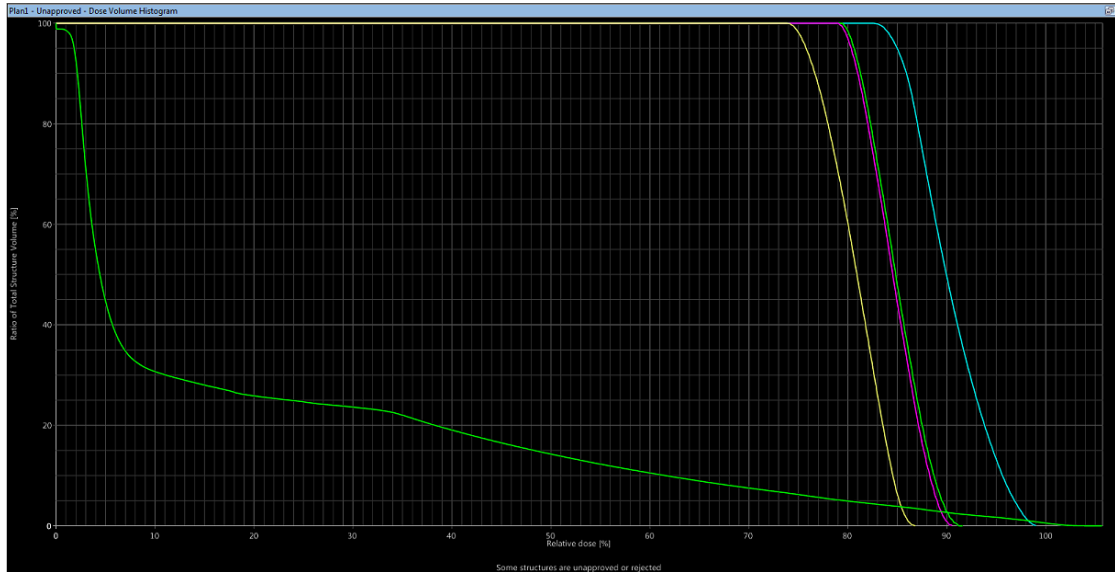


Abbildung 25: Dosis-Volumen-Histogramm zu den vier neu angelegten Strukturen mit dem CT-Wert Wasser und des gesamten Wasserphantoms mit MLC-begrenztem Feld.

Anhand dieses DVHs ist zu sehen, dass sich die Dosisdeposition in den Organen leicht verringert. Allerdings wird dadurch in nur etwa 14% des relativen Volumens des Wasserphantoms eine relative Dosis von 50% deponiert und in 26% eine relative Dosis von 20%.

5.2 Tiefendosiskurven durch verschiedene Volumina

Für diesen Teil wird erneut ein neues Wasserphantom angelegt mit den Maßen $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, dem Schichtabstand $0,25 \text{ cm}$ und einem CT-Wert von Wasser. In diesem Wasserphantom wird im Zentrum eine kugelförmige Struktur mit einem Durchmesser von $d = 5 \text{ cm}$. Der CT-Wert dieser Struktur soll den von Luft, Fett, Wasser und Knochen annehmen. Dieses Wasserphantom wird mit einem $6 \times 6 \text{ cm}^2$ 6 MV Photonenfeld bestrahlt bei einer Gantry Rotation von 270° . Nun wird eine Tiefendosiskurve entlang des Zentralstrahls für die verschiedenen CT-Werte der Struktur aufgenommen. Da die simulierten Werte der Tiefendosiskurven nicht aus dem Programm gespeichert werden können, werden die hochgeladenen Werte verwendet. Diese Daten werden mittels Python graphisch dargestellt. Die gegebenen Dosiswerte werden dabei auf das jeweilige Maximum normiert und gegen die Tiefe x im Wasserphantom dargestellt.

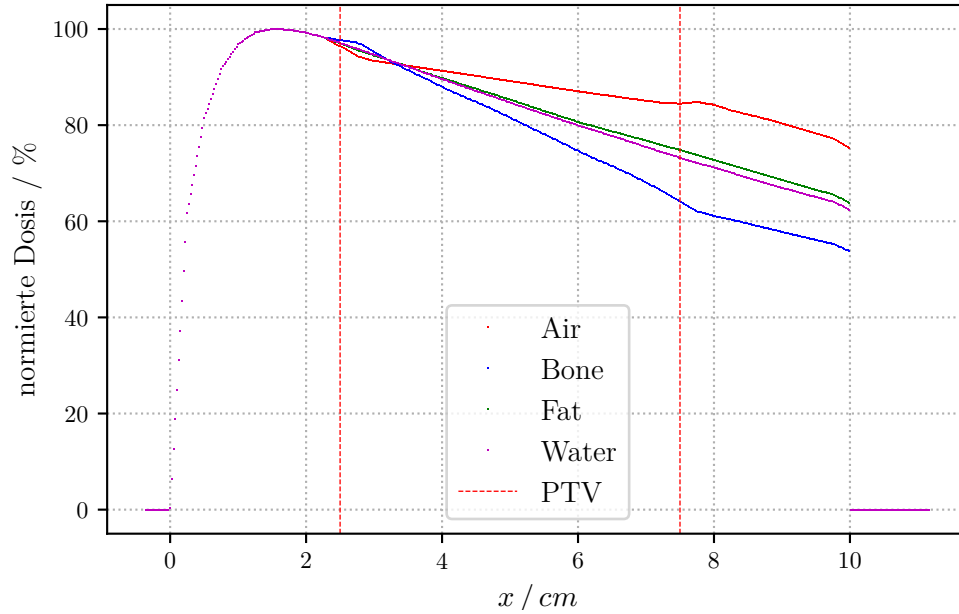


Abbildung 26: Normierte Tiefendosiskurven für verschiedene CT-Werte des PTVs.

Im Bereich bis zu der Struktur im Zentrum des Wasserphantoms ($0 \leq x \leq 2,5$) verlaufen die Tiefendosiskurven alle gleich. In dem Bereich mit den unterschiedlichen CT-Werten ($2,5 \leq x \leq 7,5$) laufen die TDKs dann auseinander. Dabei fällt die TDK bei Knochen am stärksten, da in Knochen die meiste Dosis deponiert wird. Jedoch steigt die Dosis bei Knochen zunächst etwas an, was an dem Dosisaufbaueffekt liegt. Der Verlauf der TDK bei Fett und Wasser ist auch hier wieder ähnlich. Bei beiden fällt die relative Dosis linear ab, wobei die Dosis in Wasser etwas stärker abfällt als in Fett. Deshalb laufen die TDKs bei den beiden Materialien etwas auseinander. Das kommt daher, dass Wasser ($HU = 0$) die Photonenstrahlung etwas stärker abschwächt als Fett ($HU = -100$). Bei Luft wird die Photonenstrahlung am wenigsten geschwächt, was an dem flachen Verlauf der TDK zu erkennen ist. Nach der Struktur ($7,5 \leq x \leq 10$) kommt es bei Luft erneut zu einem Dosisaufbaueffekt. Bei Fett und Wasser verläuft die TDK nahezu linear weiter, da der Unterschied zum restlichen Wasserphantom so gering ist. Bei dem Übergang von Knochen zum Wasserphantom ist zu erkennen, dass die TDK nach durchlaufen der Struktur nicht mehr so stark abfällt. Generell ist in diesem Bereich zu sehen, dass die TDKs wieder den gleichen Verlauf haben, aber durch den Einfluss der verschiedenen Strukturen nun versetzt zueinander sind. In den Abbildungen 27, 28, 29 und 30 sind die einzelnen Tiefendosiskurven, die mit dem Bestrahlungsplanungsprogramm erzeugt worden sind, noch einmal dargestellt.

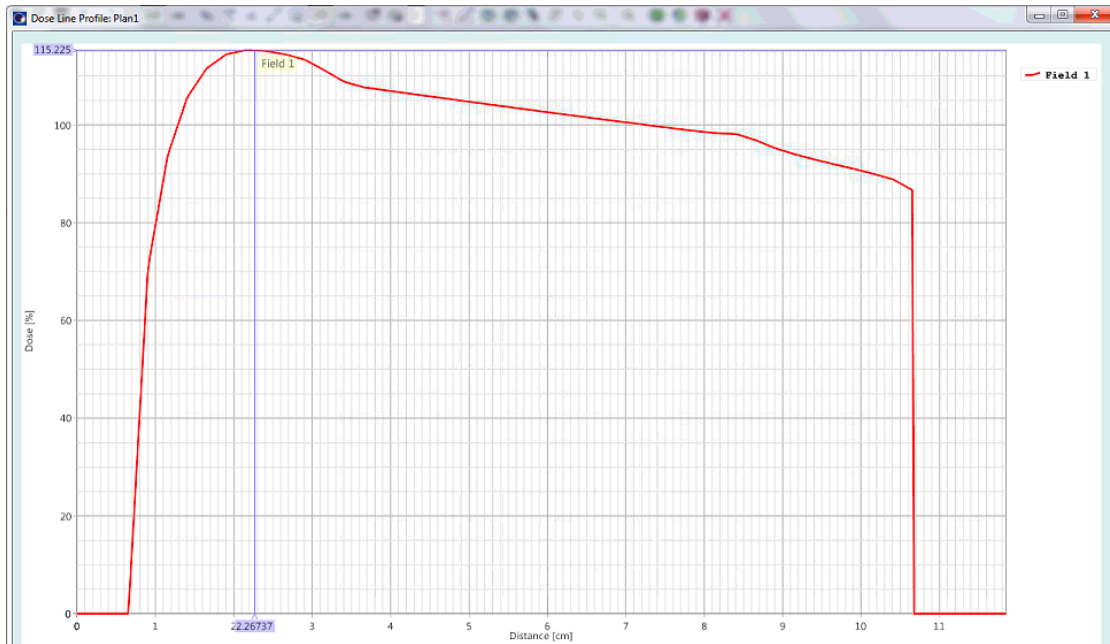


Abbildung 27: Tiefendosiskurve innerhalb des Wasserphantoms. In diesem Fall besteht das PTV in dem Zentrum aus Luft.



Abbildung 28: Tiefendosiskurve innerhalb des Wasserphantoms. In diesem Fall besteht das PTV in dem Zentrum aus Wasser.



Abbildung 29: Tiefendosiskurve innerhalb des Wasserphantoms. In diesem Fall besteht das PTV in dem Zentrum aus Fett.

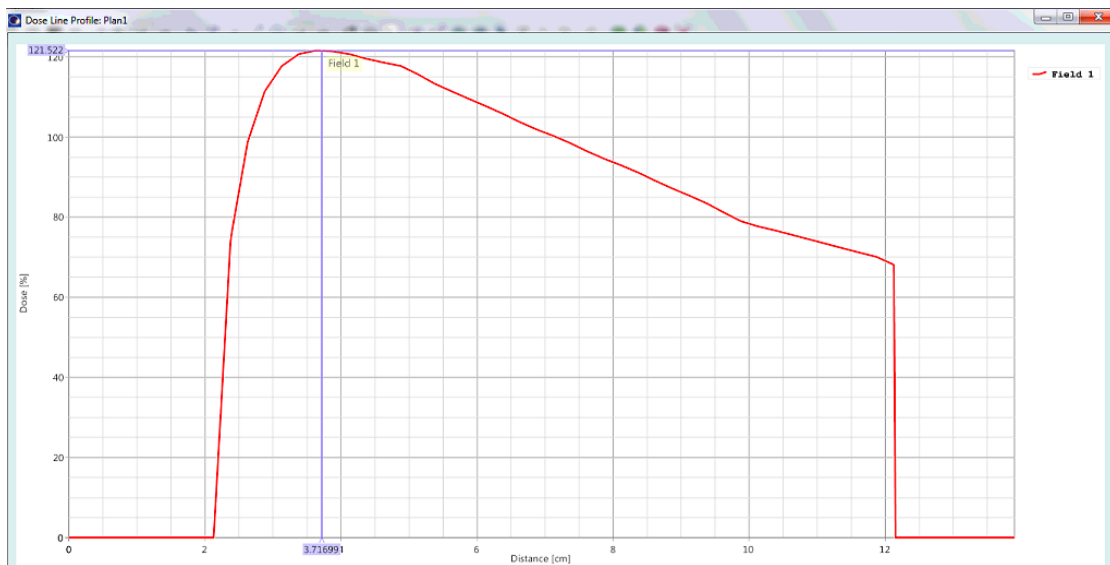


Abbildung 30: Tiefendosiskurve innerhalb des Wasserphantoms. In diesem Fall besteht das PTV in dem Zentrum aus Knochen.

Literatur

- [1] Alkadhi u. a. *Wie funktioniert CT?* Springer Verlag, 2011.
- [2] *TPS-Praktikum Grundlagen*. TU Dortmund. URL: https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/690510/mod_resource/content/1/TPS_Grundlagen.pdf.
- [3] *TPS-Praktikum: Wasserphantome*. TU Dortmund, 2020. URL: https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1245681/mod_resource/content/0/Wasserphantom.pdf.