

## Masterarbeit

# Didaktische Aufbereitung der 3D-Rekonstruktionssoftware für die Computertomographie zur Nutzung in öffentlichen Einrichtungen

## Didactical Extension of 3D-Rekonstruktion Software for Computer Tomography to Use in Public Institutions

angefertigt von

**Stephanie Schöning**

aus Hannover

am 2. Physikalischen Institut

**Arbeitsnummer:** II.Physik-UniGö-MEd-2013/01

**Bearbeitungszeit:** 16. April 2013 bis 16. August 2013

**Erstgutachter/in:** Prof. Dr. Arnulf Quadt

**Zweitgutachter/in:** Prof. Dr. Susanne Schneider



## Zusammenfassung

Die vorliegende Masterarbeit widmet sich dem Ziel die Mehrdeutigkeit eines Röntgenbildes aufzudecken und gleichzeitig den Nutzen der Computertomographie für Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe II hervorzuheben. Während ein Röntgenbild eine zweidimensionale Projektion des eigentlichen dreidimensionalen Objekts darstellt, zeigt das rekonstruierte dreidimensionale Bild die unterschiedlichen Dichten des Objekts pro Bildebene an. Hierdurch können Mehrdeutigkeit erkannt und ausgeschlossen werden. Zu diesem Anlass wurde eine Webseite erstellt, deren Inhalt von den Anfängen des Röntgens bis in die Gegenwart reicht. In einer interaktiven Umgebung lernen die Schülerinnen und Schüler die Bedeutung der Röntgenstrahlen und ihren geschichtlichen Kontext kennen.

Neben eines informativen Charakters, liegt dieser Arbeit ein Programm zur Rekonstruktion von Röntgenbildern zugrunde. Die Röntgenbilder müssen dafür aus verschiedenen Winkeln aufgenommen werden und können anschließend benutzerdefiniert rekonstruiert werden. Je nach Eingabe stellen die rekonstruierten Bildebenen das Objekt zuverlässig dar. Auch in diesem Teil kann der Benutzer eigene Objekte auswählen oder einige Vorlagen nutzen, die im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurden.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2. Die Theorie der Röntgenphysik</b>	<b>3</b>
2.1. Die elektromagnetische Welle . . . . .	3
2.2. Röntgenphotonen und ihre Entstehung . . . . .	5
2.2.1. Die Energie eines Röntgenphotons . . . . .	6
2.2.2. Das Spektrum der Röntgenstrahlung . . . . .	7
2.2.3. Die Absorption von Röntgenstrahlen . . . . .	9
2.2.4. Ermittlung von Absorptionskoeffizienten . . . . .	11
2.3. Das Röntgenbild . . . . .	12
2.3.1. Die Entstehung eines analogen Röntgenbildes . . . . .	12
2.3.2. Die Entstehung eines digitalen Röntgenbildes mittels CMOS-Sensor	13
2.4. Der Schritt zur Computertomographie . . . . .	16
2.4.1. Iterative Rekonstruktion . . . . .	17
2.4.2. Die Radontransformation . . . . .	19
2.4.3. Artefakte . . . . .	19
<b>3. Das Einrichten eines Webservers zur Nutzung der Webseite</b>	<b>21</b>
3.1. Die Interaktion zwischen Webbrowser und Webserver . . . . .	21
3.2. Verknüpfung der Webseite mit externen Anwendungen . . . . .	23
<b>4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite</b>	<b>25</b>
4.1. Startseite . . . . .	26
4.2. Entdecken und Verstehen . . . . .	27
4.2.1. Die Entdeckung . . . . .	27
4.2.2. Röntgen verstehen . . . . .	29
4.2.3. Entstehung eines Röntgenbildes . . . . .	35
4.2.4. Die Entstehung einer digitalen Röntgenaufnahme . . . . .	37
4.2.5. Deutung einer Röntgenaufnahme . . . . .	38

4.3.	Das Röntgen-Quiz . . . . .	40
4.3.1.	Spielidee und Anleitung . . . . .	40
4.3.2.	Das Röntgen-Quiz auf der Webseite . . . . .	44
4.3.3.	Umsetzung mit JavaScript, PHP und MySQL . . . . .	47
4.3.4.	Auswertung des Röntgen-Quiz . . . . .	52
4.4.	Die Computertomographie als Nonogramm . . . . .	53
4.4.1.	Das CT - Nonogramm . . . . .	53
4.4.2.	Rekonstruktion realer Röntgenbilder . . . . .	56
4.5.	Die Anwendung der Röntgenphysik . . . . .	58
4.6.	Programm zur Datenrekonstruktion . . . . .	61
4.6.1.	Die Aufbereitung der Rekonstruktionssoftware . . . . .	61
4.6.2.	Anleitung . . . . .	62
4.6.3.	Datenrekonstruktion . . . . .	63
4.6.4.	Datenlogger zur Erstellung der rekonstruierten Ebenen . . . . .	66
4.6.5.	Experteneinstellungen . . . . .	67
<b>5.</b>	<b>Die Auswertung der Statistik zum Röntgen-Quiz</b>	<b>71</b>
5.1.	Mögliche Taktiken beim Lösen des Röntgen-Quiz . . . . .	71
5.2.	Diskussion und Fehlerbetrachtung zur Statistik des Röntgen-Quiz . . . . .	73
<b>6.</b>	<b>Didaktische Aufbereitung</b>	<b>77</b>
6.1.	Fehlvorstellungen aufdecken und korrigieren . . . . .	77
6.2.	Eingliederung in das Kerncurriculum Niedersachsen . . . . .	79
6.3.	Anwendung der Webseite im Unterricht . . . . .	80
6.3.1.	Anknüpfen an Bekanntes . . . . .	80
6.3.2.	Ideen und Anregungen zur schülerorientierten Nutzung . . . . .	82
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>85</b>
<b>A.</b>	<b>Anhang</b>	<b>87</b>
A.1.	Anleitung zur Aufsetzung eines Servers . . . . .	87
A.1.1.	Installation der MySQL Datenbank . . . . .	88
A.1.2.	Einrichtung von Python auf dem Servercomputer . . . . .	88
A.1.3.	Installation der Pakete zur Nutzung der Rekonstruktionssoftware . . . . .	89
A.1.4.	Aufrufen eines python-Skripts via PHP . . . . .	89
A.2.	Strukturbaum zur Bedienung des Röntgen-Quiz . . . . .	90
A.2.1.	Der Start des Röntgen-Quiz . . . . .	90
A.2.2.	Die Weiterleitung im Röntgen-Quiz . . . . .	90

A.3. Röntgen-Quiz der IdeenExpo 2013 . . . . .	91
A.4. Drehbuch zum Kurzfilm . . . . .	97
A.4.1. Gesprochener Off-Text und das Film Skript . . . . .	97





# 1. Einleitung und Motivation

Seit der Entdeckung der Röntgenstrahlen 1895 durch Wilhelm Conrad Röntgen (1845 – 1923) werden Röntgenbilder zur Diagnose in der Medizin herangezogen. Das Skelett des Menschen wird sichtbar, ohne dem Patienten operativ Schaden zufügen zu müssen, eine Revolution der damaligen Zeit.

Im Jahr 1961 wurde das erste mal aus einer Sequenz von Röntgenbildern ein anatomisches Objekt rekonstruiert. Dies gelang den beiden Wissenschaftlern Allan MacLeod Cormack (1924 – 1998) und Sir Geoffrey Hounsfield (1919 – 2004), die für diese Errungenschaft den Nobelpreis für Medizin im Jahr 1979 erhielten. Das mathematische inverse Problem jedoch, das sich hinter diesem medizinischen Verfahren verbirgt, wurde schon 1917 von dem böhmischen Mathematiker Johann Radon gelöst. Sein mathematischer Beweis blieb somit fast 50 Jahre unbeachtet. Dies soll zum einen der deutschen Sprache, aber mehr noch den mathematischen Formulierungen verschuldet sein. Ein weiteres Problem seines Verfahrens, war der hohe rechnerische Aufwand, sodass die komplexen Berechnungen erst mit Hilfe der ersten Computern zu bewältigen waren. Dies verhalf der Rekonstruktion von dreidimensionalen Röntgenbildern zu dem Namen Computertomographie. Tomographie ist altgriechisch und setzt sich aus *tome* dem Schnitt und *grafein* dem Verb „schreiben“ zusammen. Alle Methoden die ein dreidimensionales Objekt durch Schnitte oder Schattenbildung nachbilden, werden unter diesem Begriff vereinigt. Mittlerweile ist die Computertomographie in der modernen Medizin unentbehrlich bei der Diagnose von Frakturen oder Problemen am Herzen. Es werden mehr Röntgenaufnahmen in weniger Zeit aufgenommen und gleichzeitig wird die Strahlendosis, und damit die Belastungen, für den Patienten immer weiter reduziert [1].

Mit diesem Fortschritt in der Medizin bleibt die Frage zurück, welche Aussagekraft ein Röntgenbild im Vergleich zum rekonstruierten Objekt hat und welchen Mehrwert dieser mathematische Aufwand bringt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es diesen Vorgang von der Röntgenstrahlung zum Röntgenbild bis hin zur Computertomographie, für Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe II darzustellen. Während den Lernenden das klassische Röntgenbild bekannt ist, soll die

## *1. Einleitung und Motivation*

Notwendigkeit der Computertomographie, am Beispiel der Mehrdeutigkeit von Röntgenbildern, so anschaulich wie möglich vermittelt werden. Diese Anschaulichkeit wird durch Schrift, Bild und Ton auf einer interaktiven Webseite, die sich direkt an den Benutzer wendet, ermöglicht. Denn bevor eine Computertomographie stattfinden kann, muss zuerst die Röntgenstrahlung entstehen, einen Körper durchdringen und seine Projektion in einem Bild festgehalten werden. Diese drei Schritte der Bilderstellung werden in den Lauf der Geschichte eingebettet und durch physikalisches Fachwissen aufbereitet.

Ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit ist ein Röntgen-Quiz, bei dem verschiedene Röntgenbilder seinem ursprünglichen Objekt zugeordnet werden sollen. Dieses ist zum Anlass der IdeenExpo 2013 entstanden und soll die Besucher und anschließend Schülerinnen und Schüler zum Verstehen der Röntgenphysik einladen.

## 2. Die Theorie der Röntgenphysik

Im Jahr 1845 wurde Wilhelm Conrad Röntgen geboren und entdeckte am 8. November 1895 durch Zufall die Röntgenstrahlung beim Arbeiten mit einer Kathodenstrahlröhre. Für diese Errungenschaft wurde ihm 1901 der Nobelpreis für Physik verliehen. Als Person wurde Röntgen introvertiert und bescheiden beschrieben, sodass es nicht verwundert, dass er die neu entdeckte Strahlung mit  $X$ -Strahlen benannte und nicht nach sich selbst [1, 2]. Im deutschsprachigen Raum ist die Strahlung dennoch unter dem Namen Röntgenstrahlen bekannt.

Die folgenden Unterkapitel geben einen Überblick zur elektromagnetischen Welle und tiefgehend zur Röntgenstrahlung. Dabei ist die Entstehung der Röntgenstrahlen ein zentraler Punkt, bis hin zur Absorption in verschiedener Materie. Im Anschluss wird auf die Entstehung eines Röntgenbildes sowohl analog als auch digital eingegangen. Schließlich endet dieses Kapitel bei der Rekonstruktion dreidimensionaler Objekte aus einer Serie von Röntgenbildern in der Computertomographie.

### 2.1. Die elektromagnetische Welle

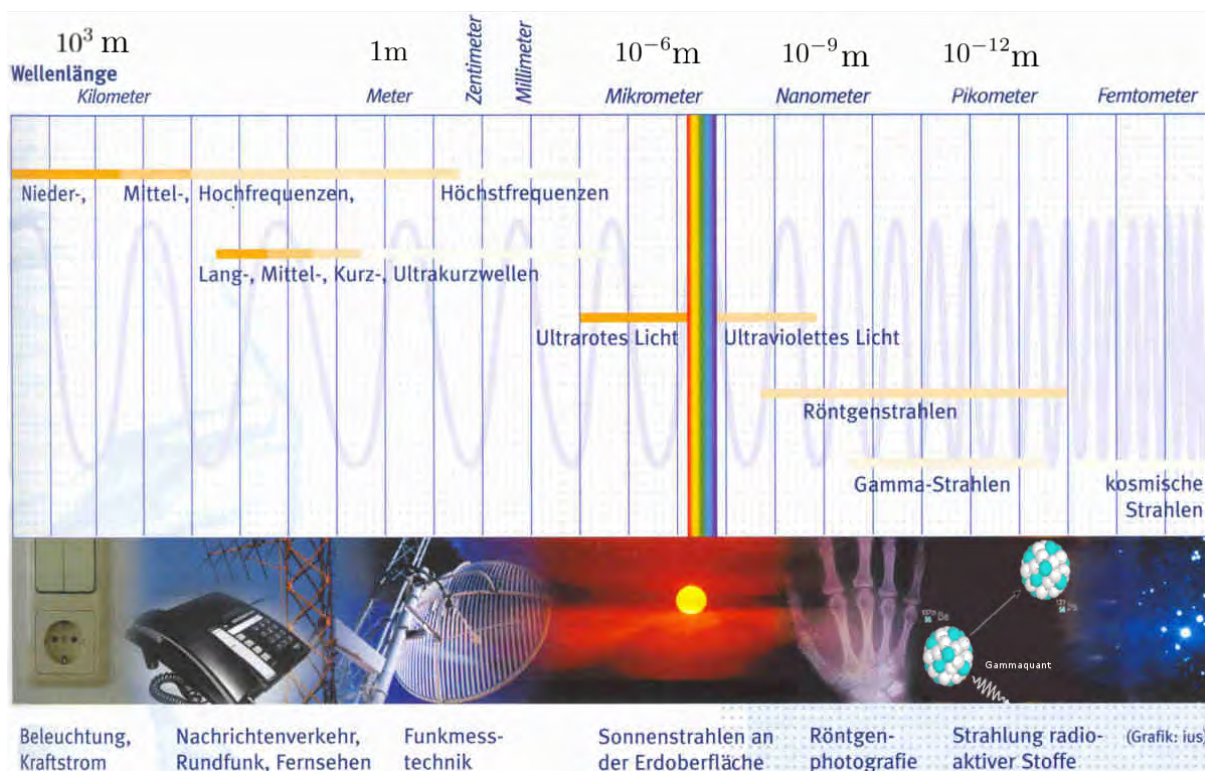
Heinrich Hertz (1857 – 1894) gilt als der erste Physiker, dem der experimentelle Nachweis der elektromagnetischen Wellen gelang [3]. In Abgrenzung zur Longitudinalwelle gehören die elektromagnetischen Wellen zu den Transversalwellen.

Dabei benötigen Longitudinalwellen immer ein Medium, da es sich bei dieser um periodische Dichteänderung handelt, die sich in Ausbreitungsrichtung der Welle fortpflanzen. Im Gegensatz dazu erfolgt die Schwingung bei der Transversalwelle, senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Eine elektromagnetische Welle besteht aus einem elektrischen und magnetischen Feld, die im betrachteten Fernfeld gleichphasig senkrecht zueinander schwingen. Dabei wird keine Materie in Schwingung versetzt, sondern es liegt eine Verkettung von elektrischen und magnetischen Feldern vor, sodass eine Transversalwelle kein Medium zur Ausbreitung benötigt [4].

In der folgenden Grafik 2.1 befindet sich eine logarithmische Darstellung der unterschiedlichen Bezeichnungen der elektromagnetischen Strahlung für verschiedene Wellenlängen in

## 2. Die Theorie der Röntgenphysik

Metern. So gibt es Radiowellen, Mikrowellen, infrarotes Licht, das sichtbare Licht, ultraviolettes Licht, Röntgenwellen und radioaktive Stoffe, die unter anderem Gammastrahlen aussenden, sowie kosmische Strahlung.



**Abb. 2.1.:** Spektrum der elektromagnetischen Welle, angelehnt an [5].

Eine eindimensionale ebene Welle, die sich in  $x$ -Richtung ausbreitet, kann folgendermaßen über eine Sinusfunktion parametrisiert werden:

$$s(x,t) = A \cdot \sin [2\pi(t/T - x/\lambda)].$$

Dabei bezeichnet  $A$  die Amplitude, und somit die maximale Auslenkung der Welle. Soll das elektrische Feld dargestellt werden, gilt  $A = E$ , und für das magnetische Feld  $A = B$ . Der Zeitpunkt, an dem die Welle betrachtet wird, ist mit  $t$  beschrieben, wobei die Schwingungsdauer mit  $T$  bezeichnet ist. Der Ort wird mit  $x$  angegeben. Diese Form der Gleichung beschreibt eine ebene Welle in jedem Ort und zu jedem Zeitpunkt exakt.

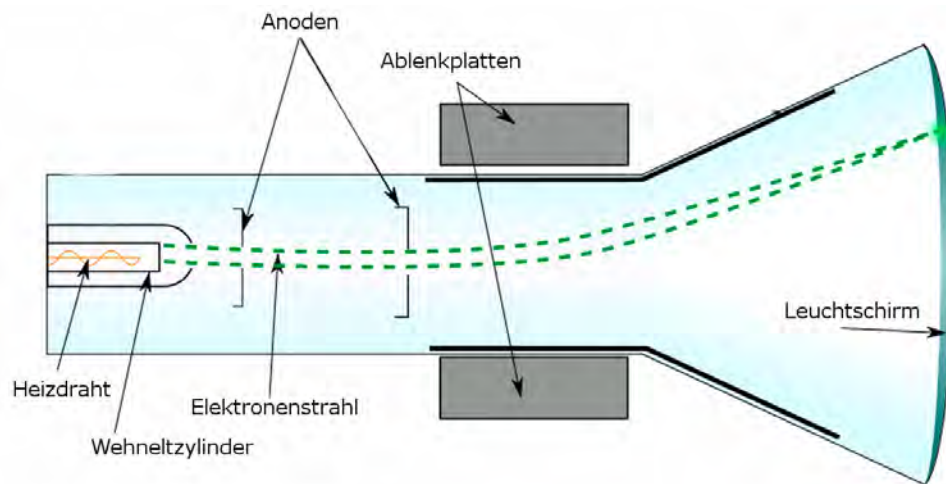
Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle ist dabei immer gleich der Lichtgeschwindigkeit  $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s. Die Form der Welle wird dabei durch deren Frequenz  $\nu = 1/T$  und ihrer Wellenlänge  $\lambda$  bestimmt. Es gilt:

$$c = \lambda \cdot \nu \tag{2.1}$$

## 2.2. Röntgenphotonen und ihre Entstehung

Die erste Detektion von Röntgenstrahlen gelang Röntgen mit einer Kathodenstrahlröhre. Die Röhre war komplett mit schwarzem Karton ummantelt, sodass kein Licht nach außen dringen konnte. Im verdunkelten Laboratorium, bemerkte er, dass eine mit Barium-Platin-Cyanid-Kristallen beschichtete Platte lumineszierte. Auf Grund dieser Beobachtung begann er die unbekannte Strahlung zu erforschen [2].

Die Kathodenstrahlröhre ist in Abbildung 2.2 dargestellt.



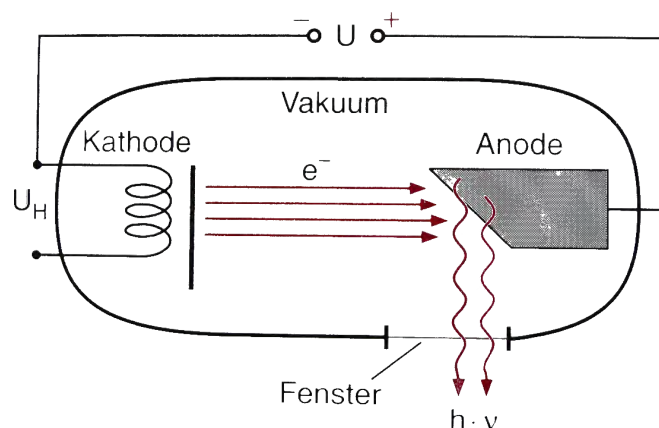
**Abb. 2.2.:** Schematische Darstellung einer Kathodenstrahlröhre, angelehnt an [6].

Durch den Heizdraht links fließt ein Strom, der den Draht so weit erhitzt bis die Austrittsarbeit  $W_A$  der Elektronen im Draht erreicht wird, und diese an der Kathode austreten. Nach der Bündelung durch den Wehneltzylinder werden die Teilchen zur Anode, die positiv geladen ist, gezogen. Hier sind zwei Anoden mit unterschiedlichem Potential zu sehen, sodass die Elektronen immer weiter beschleunigt werden. Danach gelangen die Elektronen in das elektrische Feld zwischen zwei Ablenkplatten. Da der Elektronenstrahl hier nach oben abgelenkt wird, muss die obere Platte positiv geladen sein. Zuletzt treffen die Elektronen auf eine fluoreszierende Schicht. In dieser werden die Elektronen im Material durch die energiereichen Elektronen des Strahls angeregt. Sie erreichen demnach ein höheres, aber instabileres Energieniveau und geben die erhaltene Energie sofort in Form von Photonen im sichtbaren Bereich wieder ab [7].

Ab einer angelegten Beschleunigungsspannung von  $U_{\text{Anode}} \approx 20 \text{ kV}$  ist die Energie der Elektronen hoch genug, um beim zufälligen Auftreffen auf die Anode einen geringen Anteil Röntgenstrahlung zu erzeugen.

In Abbildung 2.3 ist eine klassische Röntgenröhre zu sehen.

## 2. Die Theorie der Röntgenphysik



**Abb. 2.3.:** Schematische Darstellung einer Röntgenröhre [7].

Die emittierten Elektronen des Heizdrahts werden jetzt direkt in Richtung Anode beschleunigt und setzen dort bewusst Röntgenstrahlung frei. Durch die abgewinkelte Anode werden die Röntgenstrahlen hauptsächlich Richtung Fenster gestreut.

### 2.2.1. Die Energie eines Röntgenphotons

Die Wellenlänge der Röntgenstrahlung liegt zwischen  $10^{-8}$  m und  $10^{-13}$  m, wie auch Abbildung 2.1 zeigt [1]. Die maximale Energie einzelner Photonen  $E_{\text{Photon max}}$  wird durch die Beschleunigungsspannung, die an der Anode  $U_{\text{Anode}}$  anliegt, bestimmt:

$$E_{\text{Photon max}} = U_{\text{Anode}} \cdot e = h \cdot \nu. \quad (2.2)$$

Dabei ist  $\nu$  die Frequenz der entstehenden Photonen [7]. Bei der zuvor erwähnten Anodenspannung  $U_{\text{Anode}} = 20$  kV ergibt sich mit der Elementarladung  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C und mit dem Planckschen Wirkungsquantum  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Js =  $4,136 \cdot 10^{-15}$  eVs:

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{2 \cdot 10^4 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}}{4,136 \cdot 10^{-15}} \frac{1}{\text{s}} \\ &= 0,775 \frac{1}{\text{s}} \\ \Rightarrow \lambda &= \nu/c \text{ nach Formel 2.1} \\ &= \frac{0,775}{3 \cdot 10^8} \frac{1}{\text{m}} \\ &= 2,5 \cdot 10^{-9} \frac{1}{\text{m}}. \end{aligned}$$

Damit liegt die Wellenlänge im Bereich der Röntgenstrahlung.

### 2.2.2. Das Spektrum der Röntgenstrahlung

Bei der Entstehung von Röntgenphotonen wird nicht immer die gesamte kinetische Energie  $E_{\text{kinetisch}}$  des Elektrons an das Röntgenphoton abgegeben, sodass nach Formel 2.2 gilt:

$$h \cdot \nu = E_{\text{Photon}} \leq E_{\text{kinetisch}} = U_{\text{Anode}} \cdot e.$$

mit  $E_{\text{Photon}}$  der Energie des entstehenden Röntgenphotons und den anderen Bezeichnungen, wie im Kapitel 2.2.1 zuvor. Es entsteht ein Spektrum verschiedener Wellenlängen, wobei die Wellenlänge  $\lambda$  der Photonen immer größer oder gleich der minimalen Wellenlänge  $\lambda_{\text{min}}$  ist, da der folgende antiproportionale Zusammenhang zu  $E_{\text{Photon max}}$  der Formel 2.3 gilt:

$$E_{\text{Photon max}} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda_{\text{min}}}. \quad (2.3)$$

Das Spektrum ist jedoch nicht glatt, sondern weist einige Besonderheiten auf, wie Abbildung 2.4 unten im Röntgenspektrum zeigt. Diese sind den zwei verschiedenen Entstehungsweisen der Röntgenstrahlen verschuldet, die im Folgenden anhand des Bohrschen Atommodells erläutert werden.

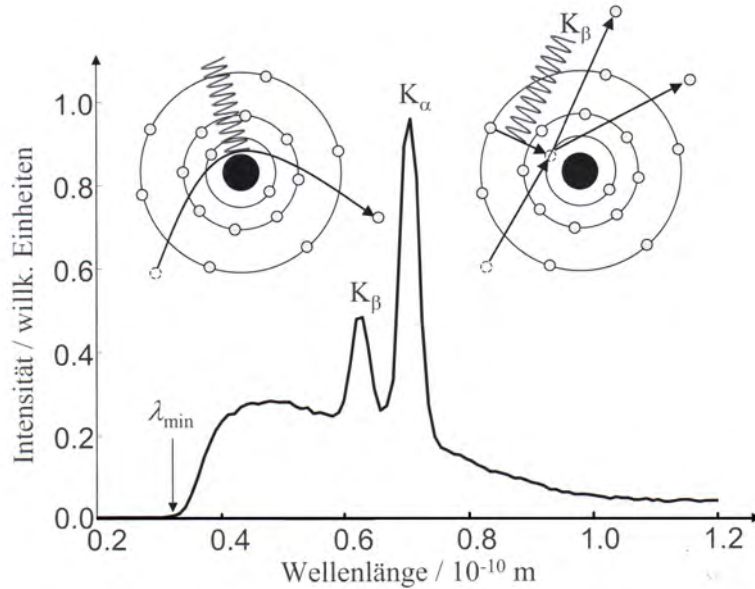
**Bremsstrahlung** Die Bremsstrahlung erhält ihren Namen daher, dass sie beim Abbremsen der energiereichen Elektronen (einige keV bis MeV) im positiven Feld des Atomkerns des Anodenmaterials entsteht. In Abbildung 2.4 oben links ist der Vorgang schematisch am Bohrschen Atommodell dargestellt. Da die Elektronen ihre Energie kontinuierlich in Form von Bremsstrahlung abgeben können, ergibt sich eine kontinuierliche spektrale Intensitätsverteilung, die von der Energie der Elektronen abhängig ist, die auf die Anode treffen [7].

**Charakteristische Strahlung** Charakteristische Röntgenstrahlung entsteht, wenn ein Elektron von einem hohen Energieniveau  $E_i$  auf ein niedrigeres Energieniveau  $E_k$  fällt und dabei ein Photon im Energiebereich der Röntgenstrahlung entsendet wird. Dieses Photon wird durch die Energiedifferenz der Energieniveaus charakterisiert

$$E_{\text{Photon}} = E_i - E_k, \quad (2.4)$$

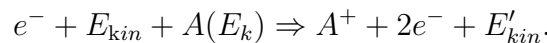
wobei der Vorgang im Atom in Abbildung 2.4 oben rechts nachvollzogen werden kann. Diese Strahlung ist materialabhängig, da die Energieniveaus der Hüllenelektronen für verschiedene Materialien unterschiedliche Energiedifferenzen aufweisen.

## 2. Die Theorie der Röntgenphysik

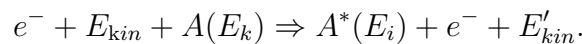


**Abb. 2.4.:** Schematische Darstellungen der Entstehung von Bremsstrahlung (links oben) und der charakteristischen Strahlung (rechts oben) zu einem Röntgenspektrum (unten) [1].

Der Anlass zur Emission eines Röntgenphotons bietet sich, wenn die beschleunigten Elektronen direkt auf ein kernnahes Hüllenelektron der Atome im Anodenmaterial treffen. Hat das Elektron  $e^-$  genug kinetische Energie  $E_{kin}$ , um das im Atom  $A$  gebundene Hüllenelektron des Energieniveaus ( $E_k$ ) herauszuschlagen, so wird das Atom ionisiert



Alternativ kann das Hüllenelektron auf ein freies höheres Energieniveau ( $E_i$ ) des Atoms angehoben werden



Dabei bedeutet  $A^*(E_i)$ , dass sich das Atom in einem instabilen Zustand befindet.

In beiden Fällen wird ein Photon der Energie  $E_{Photon}$  aus Gleichung 2.4 entsendet, wenn ein Elektron von einem hohen Energieniveau zurückfällt auf das Energieniveau  $E_k$ , sodass das Atom wieder stabil ist.

Fällt ein Elektron zurück zum niedrigsten Energieniveau, nennt man den zugehörigen Peak im Spektrum  $K$ . Beim ersten Energieniveau wird der Sprung zum niedrigsten Energieniveau  $K_\alpha$  genannt, von dem nächst höheren  $K_\beta$ .

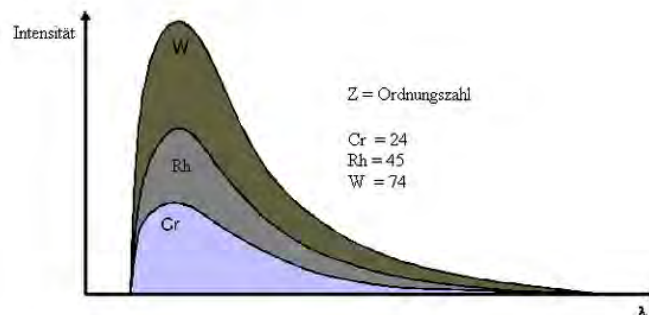


## 2.2. Röntgenphotonen und ihre Entstehung

Das Bremspektrum ist eine kontinuierliche Kurve. Die charakteristische Strahlung ist dagegen im Graph der Abbildung 2.4 durch die zwei Peaks zu erkennen, die hier den Übergang von  $K_\alpha$  und  $K_\beta$  darstellen.

Bei einer Erhöhung der Anodenspannung  $U_{Anode} \propto E_{max}$  verschiebt sich die minimale Wellenlänge  $\lambda_{min} \propto 1/E_{max}$  in Richtung Ursprung, während die Intensität des sonstigen Anteils der Röntgenstrahlung ansteigt. Bei der charakteristischen Strahlung steigt nur die Intensität [7].

**Die Abhängigkeit des Röntgenspektrums vom Anodenmaterial** Werden verschiedene Anodenmaterialien mit Elektronen der selben Energie beschossen, so ergeben sich verschiedene Spektren der Bremsstrahlung. Für ein beliebiges Material  $X$  ist dabei die Ordnungszahl  $Z$  entscheidend. Bei  ${}_Z X$  gibt sie an, wie viele Protonen im Kern des Atoms vorliegen. Somit werden Elektronen am Kern früher und stärker abgebremst, da sie einem stärkeren elektrischen Feld ausgesetzt sind [8].



**Abb. 2.5.:** Brems-Spektrum der Röntgenstrahlung verschiedener Materialien bei gleicher angelegter Anodenspannung  $U_{Anode}$  [8].

In Grafik 2.5 ist das Spektrum für Chrom  ${}_{24}\text{Cr}$ , Rhodium  ${}_{45}\text{Rh}$  und Wolfram  ${}_{74}\text{W}$  abgebildet. Die Intensität der Röntgenstrahlung ist bei Wolfram am größten, da dessen Ordnungszahl  $Z = 74$  am größten ist.

### 2.2.3. Die Absorption von Röntgenstrahlen

Fallen Röntgenstrahlen mit einer Intensität  $I_0$  senkrecht auf ein Material der Dicke  $dx$ , so reduziert sich die Intensität, nach dem Durchdringen der Materie, auf  $I$ . Es ergibt sich mit dem Abschwächungskoeffizienten  $\mu$ :

$$dI = -\mu \cdot I dx.$$

## 2. Die Theorie der Röntgenphysik

Nach der Integration folgt für eine Materialdicke  $x$  das Lambert-Beersche Gesetz:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}. \quad (2.5)$$

Falls der Wert für die Halbwertsdicke  $x_{1/2}$  eines Materials aus Experimenten bekannt ist, kann mit dieser der Wert für  $\mu$  bestimmt werden. Die Halbwertsdicke ist die Dicke des Materials, nach der nur noch die halbe Intensität der anfänglichen Röntgenstrahlung  $I_0/2$  vorhanden ist. Einsetzen in Formel 2.5 und Umstellen nach  $\mu$  ergibt:

$$\mu = \frac{\ln(2)}{x_{1/2}}.$$

Sonst kann der Abschwächungskoeffizient aus dem Streukoeffizienten  $\sigma_s$  und dem Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  bestimmt werden.

*Der Streukoeffizienten* ist dabei Proportional zu  $(1/\lambda)^4$ , falls der Durchmesser der streuenden Teilchen im Gegensatz zur Wellenlänge klein ist.

*Der Absorptionskoeffizient* ist stark von dem Material abhängig, welches die Strahlung absorbiert. Man unterscheidet drei Arten der Absorption:

**Photoeffekt** Die Energie des Röntgenphotons  $E = h \cdot \nu$  wird komplett von einem kernnahen Elektron des Atoms  $A$  absorbiert. Dadurch wird das Atom ionisiert:

$$h \cdot \nu + A(E_k) \Rightarrow A^+(E_{\text{ion}}) + e^-(E_{\text{kin}}).$$

Diese Ionisation kann nur stattfinden, wenn für die Energie des einfallenden Photons gilt:

$$h \cdot \nu = (E_{\text{ion}} - E_k) - E_{\text{kin}}(e^-).$$

**Comptoneffekt** Ein Röntgenphoton trifft auf ein quasi freies Elektron, welches eine Bindungsenergie  $E_B \ll h \cdot \nu$  hat, und gibt einen Teil seiner Energie an dieses ab:

$$h \cdot \nu + e^- \Rightarrow h \cdot \nu' + e^-(E_{\text{kin}}).$$

Dabei muss wiederum die Energiedifferenz beachtet werden, sodass  $h \cdot (\nu - \nu') = E_{\text{kin}}(e^-)$  gilt. Das so entstandene Photon kann durch den Photoeffekt vollständig absorbiert werden.

**Paarbildung** Ab einer Energie  $h\nu = 1,022 \text{ MeV}$ , also der zweifachen Ruheenergie eines Elektrons, kann ein Röntgenphoton in ein Elektron-Positron-Paar zerstrahlen:

$$h \cdot \nu \Rightarrow h \cdot \nu' + e^- + e^+ + 2E_{\text{kin}}.$$

Danach setzt sich der Absorptionskoeffizient aus dem Produkt der Teilchenzahl  $n$  und dem Absorptionsquerschnitt  $\sigma_a$  zusammen.

Experimentelle Befunde zeigen, dass für  $\sigma_a = C \cdot Z^4 \cdot \lambda^3$  gilt. Die Konstante  $C$  ist dabei wieder von der Beschaffenheit des absorbierenden Materials abhängig (zum Beispiel von der Packungsdichte der Atome im Material, oder von der Anzahl der Elektronen, die Röntgenstrahlung absorbieren) [7]. Es folgt:

$$\mu \propto Z^4 \cdot \lambda^{-1}. \quad (2.6)$$

### 2.2.4. Ermittlung von Absorptionskoeffizienten

Im folgenden sollen die Absorptionskoeffizienten von Luft, Holz, Wasser, Muskel, Knochen, Aluminium und Blei ermittelt werden.

Dies stellt für die Elemente Aluminium Al und Blei Pb keine Schwierigkeit dar, da ihre Ordnungszahl  $Z$  bekannt ist. Schwieriger wird es bei Molekülen, wie Wasser  $H_2O$  oder einer Mischung verschiedener Elemente, wie bei Luft. Bei organischer Materie, wie Holz, Muskel oder Knochen würde nur eine sehr grobe Abschätzung der tatsächlichen Absorptionskoeffizienten resultieren.

Dementsprechend werden hier keine Abschätzungen mit Formel 2.6 durchgeführt, sondern direkt experimentelle Werte des *National Institute of Standards and Technology* verwendet und in der folgenden Tabelle 2.1 angeführt. Hierbei wird der Absorptionskoeffizient mit der Dichte  $\rho$  des Materials multipliziert, damit sie untereinander verglichen werden können.

Material	Luft	Holz	Wasser	Muskel	Knochen	Aluminium	Blei
$\rho$ in $g/cm^3$	0,001	0,14	1	1,05	1,92	2,7	11,3
$\mu/\rho$ in $cm^2/g$	0,15	0,91	0,17	0,17	0,19	0,17	5,55
$\mu$ in $1/cm$	0,0002	0,13	0,17	0,18	0,36	0,46	62,94

**Tab. 2.1.:** Absorptionskoeffizienten  $\mu$  bei  $U_{Anode} = 100$  keV und einer Materialdicke von 1 cm berechnet nach [9].

Dabei sind sich  $\mu_{Knochen}$  und  $\mu_{Aluminium}$  recht ähnlich, während sich Wasser und Muskelgewebe in einem Röntgenbild nur sehr schlecht voneinander unterscheiden lassen. Ebenso liegt  $\mu_{Holz}$  in der gleichen Größenordnung, wie Muskelgewebe. Den mit Abstand höchsten Wert hat  $\mu_{Blei}$ .

## 2.3. Das Röntgenbild

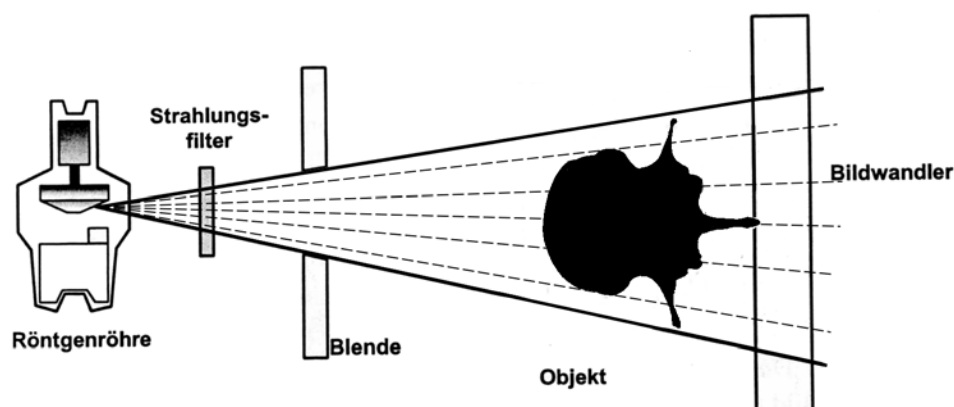
Die Erzeugung eines Röntgenbildes ist nur eine von verschiedenen diagnostischen bildgebenden Verfahren in der Medizin. Dazu gehören ebenso die Kernspintomographie, Nuklearmedizin oder Ultraschall.

Das sogenannte Projektionsröntgen wird seit der Entdeckung der Röntgenstrahlen 1895 verwendet und ist die am besten etablierteste bildgebende Technik. Hierbei wird das Objekt in den Strahlengang gebracht und anschließend das Linienintegral über den Massenschwächungskoeffizienten Zeilenweise gemessen. Demnach können Strukturen gut aufgelöst werden, wenn sich ihre Massenschwächungskoeffizienten voneinander unterscheiden, da sie die Strahlung unterschiedlich stark absorbieren.

Die Absorption der Röntgenstrahlen, durch Photoeffekt und Comptoneffekt, sind direkt von der Elektronendichte des Materials abhängig und somit von einer hohen Dichte des Materials [10]. Knochen können direkt in einem Röntgenbild analysiert werden, während Muskeln oder Fettgewebe erst durch den Einsatz von Kontrastmitteln unterschieden werden können, wie auch Tabelle 2.1 zeigt.

### 2.3.1. Die Entstehung eines analogen Röntgenbildes

Die Aufnahme eines Röntgenbildes wird dabei mittels Zentralprojektion erstellt, sodass eine möglichst punktförmige Röntgenquelle Verwendung findet, wie Abbildung 2.6 zeigt.



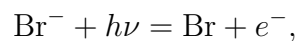
**Abb. 2.6.:** Schematische Darstellung des Projektionsröntgens, angelehnt an [10].

Zur dauerhaften Fixierung des Bildes wurden früher und werden auch heute noch Fotoplaten verwendet. In Abbildung 2.7 ist ein moderner Fotofilm schematisch dargestellt, wie er auch heute noch bei Röntgenaufnahmen von Zähnen Verwendung findet.

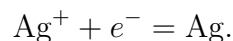


**Abb. 2.7.:** Schematische Darstellung eines Röntgenfilms und seiner einzelnen Schichten.

Die Schutzschicht des Films besteht aus gehärteter Gelatine und kann mühelos von den Röntgenphotonen durchdrungen werden. In der Mitte befindet sich eine Trägerfolie aus Polyester, auf die oben und unten eine Haftschicht aus Gelatine und Kunststoff aufgebracht ist. Diese garantiert den Halt der Emulsionsschicht, in der das Röntgenbild entsteht: Sie enthält kleine Silberbromid-Kristalle  $\text{Ag}^+\text{Br}^-$ . Trifft ein Röntgenphoton auf den Kristall, so werden hier die Bromionen oxidiert und es entstehen freie Elektronen



sowie freie  $\text{Ag}^+$  Ionen. Diese bilden an bestrahlten Stellen sogenannte Silberkeime, an denen Elektronen eingefangen werden. Wie in einer Kettenreaktion werden auch umliegende Silberionen angezogen und zu schwarzem Silber oxidiert:



Die wenigen so entstandenen Silberkeime, werden erst nach dem Entwickeln des Films sichtbar. Dabei werden an den Keimen einige Millionen zusätzlicher Silberionen reduziert und es entstehen schwarze Silberkörner. Gleichzeitig löst das Fixieren überschüssiges Silberbromid aus der Emulsionsschicht heraus und der Film verliert so seine Lichtempfindlichkeit.

### 2.3.2. Die Entstehung eines digitalen Röntgenbildes mittels CMOS-Sensor

Die digitale Fixierung von Röntgenbildern ist für die Computertomographie unverzichtbar. Es werden mehrere hundert Röntgenbilder benötigt, um eine Rekonstruktion des dreidimensionalen Objekts zu ermöglichen. Dabei ist die Dauer der Bestrahlung für den Patienten entscheidend, und die analoge Bildnahme zu langwierig. Mittlerweile werden

## 2. Die Theorie der Röntgenphysik

hauptsächlich CCD-Sensoren und CMOS-Sensoren zur Bilderstellung verwendet, die eine schnelle Datennahme ermöglichen, sodass 125 Bilder in etwa 250 ms aufgenommen werden können [11].

Da im Röntgen-Schulungsgerät von Phywe der CMOS-Sensor genutzt wird, soll dieser im Folgenden vorgestellt werden. Die Abkürzung CMOS bedeutet komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter und stammt aus dem Englischen „Complementary Metal Oxide Semiconductors“. Der erste Sensor dieser Art wurde 1967 gefertigt und ab 1990 zur Alternative der CCD-Sensoren genutzt. Als Pixeldetektor registriert der CMOS-Sensor Lichtphotonen immer in einem festgelegten räumlichen Bereich, dem Pixel. Diese Art der Röntgenintensitätsmessung gehört zu den indirekten digitalen Systemen. Der Name stammt daher, dass die Röntgenstrahlung indirekt über Lichtphotonen gemessen wird und das Bild nach diesem Schritt digital vorliegt. Die einzelnen Schritte sind in der Abbildung 2.8 links schematisch dargestellt und werden im Folgenden erläutert [12, 13]:



**Abb. 2.8.:** Schematische Darstellung eines digitalen Bildsensors, bei dem die Röntgenstrahlung durch die schwarze Abdeckung einfällt, in Lichtphotonen gewandelt wird, von der Faseroptik gebündelt wird und im CMOS-Sensor pixelweise elektrische Signale an den A/D-Wandler sendet um hochauflösende Röntgenbilder zu erstellen (links [14]). Struktur eines Szintillators mit Kristallsäulenstruktur (rechts [15]).

**Die schwarze Schutzabdeckung** wird zuerst durch die Röntgenstrahlen durchdrungen, sodass sie unverändert auf den Szintillator trifft.

**Szintillatoren** wandeln die Röntgenstrahlung in sichtbares Licht.

Dabei muss besonders darauf geachtet werden, dass eine hohe Absorptionsrate der Röntgenstrahlen garantiert wird, um eine ausreichende resultierende Lichtmenge zu erhalten.

Ein Röntgenphoton regt dabei die Elektronen im Szintillator an, indem es mittels Comptoneffekt oder Photoeffekt seine Energie auf diese überträgt. Die so erhaltene Energie geben die angeregten Elektronen in Form von Photonen wieder ab. Dabei muss das Material des Szintillators so gewählt sein, dass die Energiedifferenz der Energieniveaus der Elektronen im Atom, bei der Emission eines Photons, im Bereich des sichtbaren Lichts liegt (vgl. Kapitel 2.2.2 und Kapitel 2.2.3).

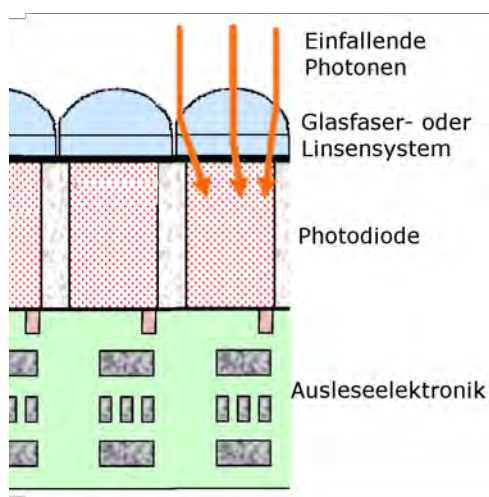
Zusätzlich soll keine laterale Lichtdiffusion stattfinden, um so jegliche Streuung bei der Weiterleitung zum CMOS-Chip zu vermeiden. Ebenso muss die Wellenlänge des entstandenen Lichts auf den nachfolgenden CMOS-Detektor abgestimmt sein.

Daher werden in Röntgendetektoren sehr oft Cäsium-Iodid-Kristalle verwendet. Das Material zeichnet sich nicht nur durch eine sehr gute Absorption der Röntgenstrahlen aus, sondern auch durch eine gute Weiterleitung des Lichts nach dessen Entstehung. Denn die Cäsium-Iodid-Kristalle haben die Eigenschaft, bei geeigneten Verdampfungsbedingungen als dichte Anordnung dünner Nadeln (Abb. 2.8 rechts) zu wachsen. Jeder Kristall des Cäsiums fungiert danach als separater Lichtleiter und schränkt so die laterale Lichtausbreitung stark ein. Je geringer der Durchmesser der einzelnen Kristallsäulen ist, desto besser ist die Ortsauflösung des resultierenden Röntgenbildes. Diese Ortsauflösung gibt zusammen mit der Pixelgröße des CMOS-Sensors an, ob zwei nebeneinanderliegende Objekte noch voneinander unterschieden werden können oder nicht.

**Eine Glasfaser-Struktur** leitet das Licht präzise zur Oberfläche des CMOS-Sensors. Durch sie kann das entstandene Licht fokussiert oder sogar in andere Wellenlängen verschoben werden, sodass der CMOS-Sensor optimal beleuchtet wird. Die platzsparende Glasfaser-Struktur ersetzt so ein Linsensystem, welche das Licht ebenso bündeln könnte.

**Funktionsweise des CMOS** Nach der Fokussierung des Lichts, wird dieses an einen der Pixel weitergeleitet. Im Pixel selbst befindet sich eine Photodiode, diese besteht aus einem Halbleiter, wie z.B. Silizium, der zur einen Hälfte n-dotiert und zur anderen p-dotiert ist. Treffen diese beiden Hälften aufeinander, so bildet sich an der Grenze eine ladungsfreie Zone, sodass die Diode entweder in Sperr- oder Durchlassrichtung geschaltet sein kann. Hier ist sie in Sperrichtung geschaltet. Erst wenn Licht auf die ladungsfreie Zone fällt, werden die Elektronen aus den Kristallbindungen gelöst und von der Ausleseelektronik registriert. Siehe dazu auch Abbildung 2.9. Je mehr Photonen einfallen, desto mehr Elektronen werden gelöst und desto höhere Ströme fließen in Richtung Auslese. Die Ausleseelektronik kann für jedes einzelne Pixel mit dem Computer über eine Schwelle in

## 2. Die Theorie der Röntgenphysik



**Abb. 2.9.:** Schematische Darstellung eines Pixels im CMOS-Chip, sodass die Photonen in einem Pixel einfallen.

der Ausleseelektronik angesteuert werden. Dadurch wird eine homogene und fehlerarme Auslese der Pixel möglich.

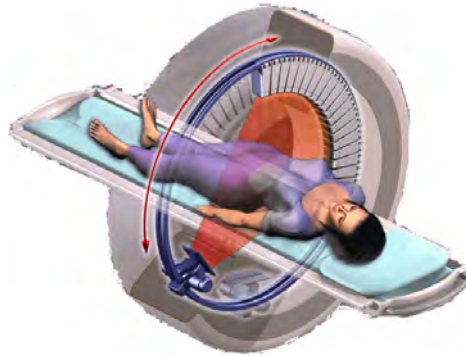
**Ein Analog-Digital-Wandler** ist in der Lage, das entstandene Bild bei 14-Bit in  $2^{14}$  Graustufen festzuhalten und damit feinste Änderungen in der Gewebedichte darzustellen. So werden hochaufgelöste Bilder erstellt, die zur Weiterverarbeitung am Computer gespeichert werden.

## 2.4. Der Schritt zur Computertomographie

Bei der Computertomographie (CT) wird das Verfahren des Projektionsröntgen aus Kapitel 2.3 genutzt, um ein dreidimensionales Abbild aus einer Serie von zweidimensionalen Röntgenbildern zu rekonstruieren (Abb. 2.10). Eingesetzt wird CT hauptsächlich bei der Unfalldiagnostik, um chirurgische Eingriffe am dreidimensionalen Objekt direkt zu planen oder Analysen am Herzen durchzuführen.

Durch die Vorwärtsbewegung der Person und der Rotation der Röntgeneinheit entstehen ebenenweise korrelierte Röntgenbilder aus verschiedenen Winkeleinstellungen. Im Folgenden sind zwei Möglichkeiten dargestellt, um die erhaltenen Daten in einer CT zu rekonstruieren.

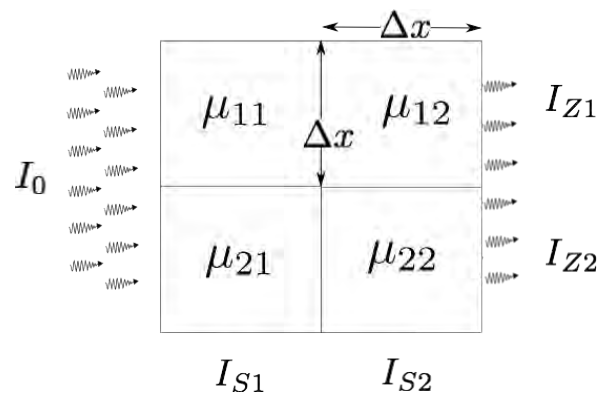




**Abb. 2.10.:** Schematische Darstellung einer Person im Computertomographen [10]. Während die Person durch die Röhre geschoben wird, rotiert ein Ring um sie herum, wie durch den roten Pfeil angedeutet ist. Dabei befinden sich Röntgenquelle (unten links zu sehen) und Detektor (oben rechts angedeutet) im Ring gegenüber, sodass aus verschiedenen Winkeleinstellungen Röntgenbilder aufgenommen werden.

### 2.4.1. Iterative Rekonstruktion

Die iterative Rekonstruktion ist in Abbildung 2.11 veranschaulicht und wird in Anlehnung an [10] in diesem Kapitel erläutert. Mathematisch beschrieben, handelt es sich bei dieser Rekonstruktion um die Lösung eines linearen Problems in  $n \times m$  Variablen, wenn das Objekt in  $n$  Zeilen und  $m$  Spalten eingeteilt wird.



**Abb. 2.11.:** Schematische Darstellung einer Ebene des vereinfachten Objekts bei der iterativen Rekonstruktion mit  $n \times m = 2 \times 2$ . Dazu haben die einzelnen Pixel die zugehörigen Absorptionskoeffizienten  $\mu_{nm}$ . Die resultierenden Intensitäten einer Zeile sind mit  $I_{Zn}$  und die der Spalten mit  $I_{Sm}$  bezeichnet.

Das Objekt wird dabei in Pixel der selben Breite und Höhe  $\Delta x$  eingeteilt. Bekannt ist die anfängliche Intensität  $I_0$  der Röntgenstrahlung. Im Detektor wird, wie in der Abbildung 2.11 dargestellt, die resultierende Röntgenintensität  $I_{Z1}$  und  $I_{Z2}$  gemessen. Zusätzlich gilt

## 2. Die Theorie der Röntgenphysik

$I_{S1} = I_{S2} = 0$ , da das Objekt von links durchstrahlt wird. Nach dem Lambert-Beerschen Gesetz (Gleichung 2.5) gilt für die Intensität  $I_{Z1}$  der Röntgenstrahlen:

$$\begin{aligned} I_{Z1} &= I_0 \cdot e^{-\mu_{11}\Delta x} \cdot e^{-\mu_{12}\Delta x} \\ &= I_0 \cdot e^{-(\mu_{n1}+\mu_{n2})\Delta x} \end{aligned}$$

Die resultierende Gleichung kann für  $n = \{1,2\}$  Zeilen mit der Intensität  $I_{Zn}$  und  $m = \{1,2\}$  Spalten der Intensität  $I_{Sm}$  wie folgt verallgemeinert werden:

$$I_{Zn} = I_0 \cdot e^{-(\mu_{n1}+\mu_{n2})\Delta x} \qquad I_{Sm} = I_0 \cdot e^{-(\mu_{1m}+\mu_{2m})\Delta x}$$

Damit ist es möglich, die Gleichungen auf ein lineares Problem zu reduzieren:

$$C_{Zn} = \mu_{n1} + \mu_{n2} \qquad C_{Sm} = \mu_{1m} + \mu_{2m}.$$

Hierbei ist  $C_{Zn} := \ln(I_0/I_{Zn})/\Delta x$  die Konstante zur Intensität  $I_{Zn}$ .

Analog ist  $C_{Sm} := \ln(I_0/I_{Sm})/\Delta x$  die Konstante zur Intensität  $I_{Sm}$ .

Mit diesen vier Gleichungen ist das Problem eindeutig gelöst und das vorliegende Objekt der Abbildung 2.11 kann iterativ rekonstruiert werden.

Je feiner die einzelnen Pixel gewählt werden, desto mehr Aufnahmen sind zur Rekonstruktion nötig. Insgesamt müssen  $n \cdot m$  linear unabhängige Gleichungen aus den Röntgenaufnahmen erstellt werden, um ein Objekt mit  $n \times m$  Pixeln zu rekonstruieren.

Allgemein ergibt sich für eine beliebige Linie von  $n$  Pixeln mit den zugehörigen Absorptionskoeffizienten  $\mu_i$  für  $i = 1, \dots, n$  die allgemeine Gleichung der Intensität  $I$  zu:

$$I = I_0 \cdot e^{-(\sum_{i=1}^n \mu_i)\Delta x}. \tag{2.7}$$

Bei der Computertomographie und dem Röntgen werden Fächerscanner genutzt. Bei diesen gehen alle Linien vom selben Ursprungspunkt aus, der Röntgenquelle.

### 2.4.2. Die Radontransformation

Neben der iterativen oder diskreten Rekonstruktion der Absorptionskoeffizienten  $\mu$ , werden kontinuierliche Linienintegrale für die Rekonstruktion verwendet. Hierzu wird eine Linie  $\gamma$  im  $\mathbb{R}^2$  definiert, die dem Weg der Röntgenstrahlen durch die Materie entspricht. Dabei ist der Absorptionskoeffizient  $\mu(x,y)$  auf dem Weg  $\gamma$  unbekannt. Die zugehörige Gleichung der Intensität der Röntgenstrahlung  $I(\gamma)$  ergibt sich durch Formel 2.7 :

$$I(\gamma) = I_0 \cdot e^{\left(-\int_{\gamma} \mu(x,y) dx dy\right)}.$$

Formal wird ein solches Linienintegral einer Dichteverteilung  $f(x,y)$  auf einem geraden Weg  $\gamma$ , durch die Radontransformation  $R$  beschrieben:

$$Rf(\gamma) = \int_{\gamma} f(x,y) dx dy.$$

Dabei ist in unserem Fall die Dichteverteilung  $f(x,y)$  unbekannt. Dagegen wird die Intensität der Röntgenstrahlen gemessen und entspricht dem Wert des Integrals. Soll demnach, wie bei der Computertomographie, die Verteilungsfunktion der Dichte bestimmt werden, liegt ein inverses Problem vor.

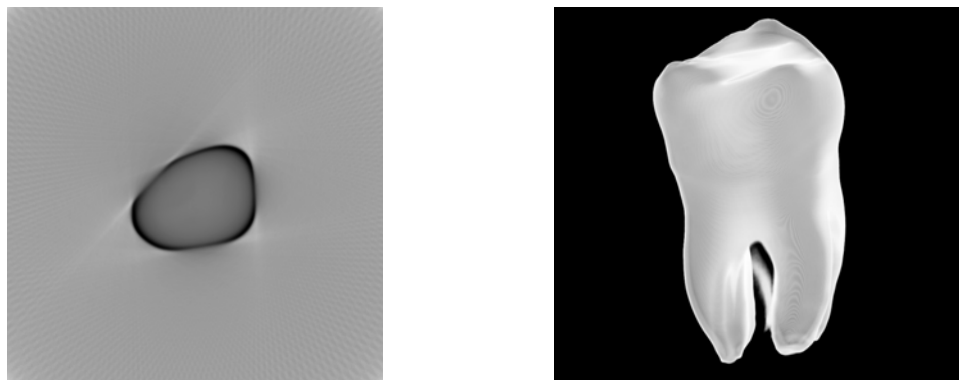
Zu deren Lösung gibt es zahlreiche Methoden, wie die inverse Radontransformation oder die gefilterte Rückprojektion. Die gefilterte Rückprojektion findet auch in medizinischen Computertomographen Verwendung. Sie basiert zum Teil auf iterativen Verfahren, die sowohl weniger Rechenleistung benötigen, als auch mit weniger Projektionen auskommen, als direkte Umkehrformeln. Sie wird ebenso in der 3D-Rekonstruktionssoftware der Masterarbeit von Jens Dietert verwendet [16]. Dabei lag dieser die Röntgensimulationssoftware von Stefano de Nicola zugrunde [17].

### 2.4.3. Artefakte

Bei allen Rekonstruktionstechniken können Fehler auftreten, da zum Beispiel die Anzahl der Röntgenbilder nicht ausreichend ist, oder eine Rekonstruktion mehrere Schlüsse zulässt. Diese Fehler werden in einer Computertomographie als Artefakte bezeichnet. Ein sehr präsender Fehler bei den Aufnahmen mit dem Schulungs-Röntgengerät ist das *Metalartefakt*.

Dieses tritt immer dann auf, wenn die Röntgenstrahlung komplett absorbiert wurde. Daraufhin können Streifenartefakte das Bild verschlechtern, oder aber Körper hohl wirken lassen. Das bedeutet, dass die Dichte im Inneren des Objekts deutlich nachlässt, obwohl

## 2. Die Theorie der Röntgenphysik



**Abb. 2.12.:** Metallartefakte eines Zahns: links ist zu erkennen, dass der Zahn hohl erscheint und rechts verblieb eine Schliere zwischen den Zahnwurzeln.

es immer aus dem selben Material der selben Dichte besteht. Diese Artefakte sind zum Beispiel bei der Rekonstruktion eines Zahns aufgetreten (Abb. 2.12). Die Ebene des Zahns links hat einen schwarzen Rand, während das Innere nur grau erscheint. Demnach wäre der Zahn in der Mitte hohl. Dies stimmt auch zum Teil, jedoch nicht in dem Ausmaß, wie die rekonstruierte Ebene vermuten lässt. Sehr deutlich dagegen ist das Artefakt zwischen den Zahnwurzeln zu erkennen. Dieses entsteht, da an den drei Wurzeln sehr viel Röntgenstrahlung absorbiert wird und in der Mitte des Zahns kaum Röntgenstrahlung passieren konnte. Demnach bleibt ein weißer Schleier zurück.

# 3. Das Einrichten eines Webservers zur Nutzung der Webseite

Zur Nutzung der Webseite in öffentlichen Einrichtungen ist es unumgänglich, einen Webserver einzurichten, der die Webseite für den Nutzer (Client) zur Verfügung stellt. Hierfür wird Software auf dem Server installiert, um Daten zu sammeln und zu speichern. Außerdem wird darauf das Rekonstruktionsprogramm gestartet und betrieben, sowie Grafiken erstellt und an den Rechner des Clients gesendet. Somit ist es nur einmal nötig die zusätzlichen Programme auf diesem Rechner zu installieren und wertvolle Arbeitszeit kann eingespart werden.

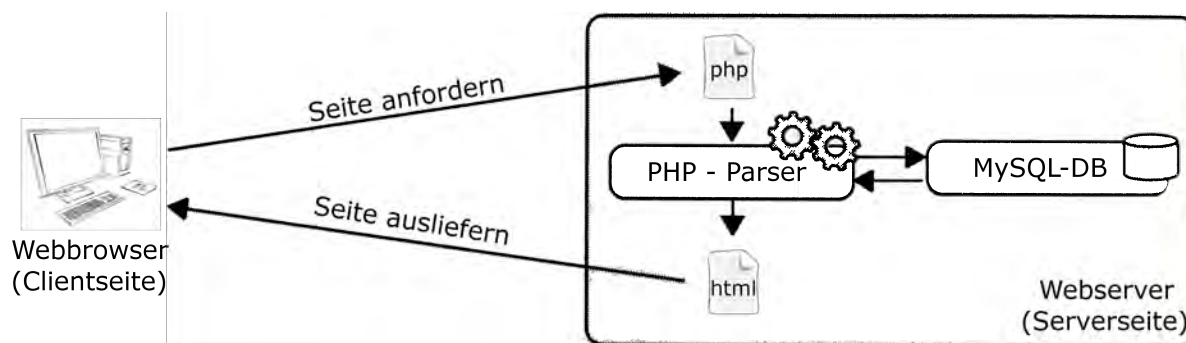
In diesem Kapitel werden die genutzten zusätzlichen Skriptsprachen für einen Server auf einem Linux Computer vorgestellt. Die Webseite kann danach von einem beliebigen Betriebssystem aufgerufen und zur Information über die Röntgenphysik oder Rekonstruktion von dreidimensionalen Objekten genutzt werden.

## 3.1. Die Interaktion zwischen Webbrowser und Webserver

Die vorangehende Aufsetzung des Servers kann im Anhang A.1 nachgelesen werden. Dort sind die benötigten Pakete für einen Apache-Server, PHP und die Kommunikation zwischen dem Server und MySQL sowie Python aufgelistet und die Installation der nötigen Software beschrieben.

Bei dem so eingerichteten Server handelt es sich um einen Webserver mit Datenbank. Der Client wird bei der Benutzung keinen Unterschied zu einem HTML-basierten Webserver bemerken, da alle Anfragen an die Datenbank ausschließlich auf der Serverseite ausgeführt werden. In Abbildung 3.1 ist der Vorgang beim Aufrufen einer Webseite dargestellt. Der Client fordert eine Seite beim Server an, und greift so auf das php-Dokument zu, nur dieses hat Zugriff auf die hinterlegten Datenbanken. Die Informationen werden vom Parser in eine html-Seite übersetzt und an den Client ausgeliefert.

### 3. Das Einrichten eines Webservers zur Nutzung der Webseite



**Abb. 3.1.:** Schematische Darstellung der Nutzung eines Webservers [18].

Bei der Erstellung der Webseite wurden verschiedene Skriptsprachen verwendet, deren Funktion und Einsatzgebiet im Folgenden kurz erklärt ist [18]:

**HTML - Hypertext Markup Language** Diese steht für eine textbasierte Auszeichnungssprache zur Strukturierung von Inhalten. Dabei enthält eine HTML ausschließlich statische Inhalte, sodass der Server keine Berechnungen oder Zugriffe auf Datenbanken durchführt, sondern lediglich Inhalte zur Verfügung stellt. Mit ihr werden demnach alle Bilder, Texte, JavaScript und CSS Skripte an den Client geschickt und erst auf der Clientseite interpretiert.

**CSS - Cascading Style Sheets** Hiermit wird eine geschachtelte Gestaltungsvorlage bezeichnet, die der html-Seite als Stilvorlage dient. In ihr sind alle gestaltenden Elemente, die der Webseite eine Struktur verleihen, abgelegt und können immer wieder aufgerufen werden. So wird garantiert, dass Bilder, Texte, Überschriften und Navigationselemente immer dieselbe Form und Größe haben und die Webseite eine einheitliche Struktur erhält.

**JS - JavaScript** Das ist eine Skriptsprache und dient der Erzeugung dynamischer Elemente in HTML. Mit Hilfe solcher Elemente ist es möglich Nutzerinteraktionen auszuwerten und Rückmeldungen zu geben, sowie Inhalte zu verändern. Die Interpretation geschieht ausschließlich auf der Clientseite, sodass keine Interaktion mit dem Server stattfindet. Demnach ist es mit Hilfe von JS nicht möglich, auf Datenbanken zuzugreifen oder Programme auf dem Server aufzurufen oder auszuführen.

**PHP-Hypertext Preprocessor** Jene ist ebenso eine Skriptsprache, die hauptsächlich für die Erstellung dynamischer Webseiten genutzt wird. Die einzelnen Dateien liegen auf dem Server und werden beim Aufruf durch den Client im Parser verarbeitet. Bei dieser Interpretation werden alle Anweisungen im php-Skript der Reihe nach ausgeführt und

zuletzt eine html-Seite an den Client ausgeliefert. Diese Seite ist wiederum statisch und agiert nicht mit dem Server. Demnach werden Daten und Befehle, die der Server erhalten soll, immer beim Aufrufen einer Webseite weitergegeben. Der Client erhält darüber keine direkte Rückmeldung. Es ist allerdings möglich, dass die Komplexität der Aktion auf dem Server eine längere Ladezeit der html-Seite hervorruft.

## 3.2. Verknüpfung der Webseite mit externen Anwendungen

Ein großer Vorteil von PHP ist das breite Angebot von Funktionsbibliotheken zur Unterstützung von Datenbanken und weiteren Programmen. Somit ist es möglich externe Anwendungen mittels PHP aufzurufen und auszuführen oder es kann eine Verknüpfung zur Datenbank stattfinden. Hier soll eine Verbindung zu der MySQL Datenbank genutzt werden.

**MySQL - My Structured Query Language** Dabei handelt es sich um ein relationales Datenbankverwaltungssystem. Dieses besteht aus einem MySQL-Server, auf dem verschiedene Datenbanken angelegt werden können, in denen wiederum Tabellen abgelegt sind. Mittels PHP ist es möglich, Einträge in den Tabellen abzuspeichern und wieder auszulesen. Dazu werden die zusätzlichen Pakete im Anhang A.1.1 benötigt [18].

Der MySQL-Server nutzt einen Hauptbenutzer (hier: *root*), dessen Eingaben mit einem Passwort (hier: *root*) bestätigt werden. Bei jedem Eintrag oder Auslesen werden diese Daten benötigt, um eine Verbindung zwischen Webserver und MySQL-Server herzustellen. Daher wurde eine Datei mit dem Namen: *konfiguration.php* angelegt, in der diese Daten abgelegt sind und bei Bedarf geändert werden können. Nach der Benutzung der Datenbank wird sie wieder geschlossen und für neue Zugriffe freigegeben.

**Python** Bei der Nutzung der 3D Rekonstruktionssoftware für die Computertomographie wird die Programmiersprache Python benötigt. Sie zählt zu den interpretierten höheren Programmiersprachen und wurde mit dem Ziel entworfen, einfach und übersichtlich zu sein. Bei dem Rekonstruktionsprogramm wurde sich für Python entschieden, da sie für alle Betriebssysteme frei erhältlich ist und so plattformunabhängig eingesetzt werden kann [18].

Bei der Steuerung über eine Webseite muss es demnach möglich sein, die Eingaben des Clients in ein python-Skript zu schreiben und danach einen Aufruf zum Starten des Skripts

### 3. Das Einrichten eines Webservers zur Nutzung der Webseite

zu senden. Zum Überschreiben einer Eingabe wird der Quellcode aus Anhang A.1.4 genutzt, ohne dass zusätzliche Pakete benötigt werden.

Erst zum Ausführen eines python-Skripts wird ein zusätzliches Paket genutzt (Anhang A.1.2). Danach kann ein Python Skript mit dem Befehl

```
1      popen($PythonSkript , 'r');
```

gestartet werden. Dabei gibt *\$PythonSkript* den Pfad zu dem gewünschten python-Skript an. Der Nachsatz *r* setzt den Zugriff auf *read*, wenn das python-Skript ohne zusätzliche Eingaben auskommt. Im Fall der Rekonstruktionssoftware wird eine zusätzliche Initialisierungsdatei eingebunden, sodass keine Parameter an das Startskript übergeben werden müssen. Zusätzlich werden in Python einige Bibliotheken genutzt, die in Python eingebunden werden müssen. Eine Auflistung dieser Bibliotheken befindet sich in Anhang A.1.3. Sie dienen hauptsächlich der Erstellung von mathematischen Grafiken, sowie zur Berechnung der einzelnen Ebenen eines Objektes, mittels Radon-Rück-Transformation. Diese wird in der Masterarbeit von Jens Dietert beschrieben und kann in [16] ab Seite 6 nachvollzogen werden.

**Shell** Bei der Betriebssystem-Shell handelt es sich um die Schnittstelle zwischen Benutzer und Computer. Die einzelnen Befehle werden über die Kommandozeile an den Interpreter weitergereicht und dienen der Bedienung von Systemkomponenten und Kernelementen.

Bei der Nutzung der Rekonstruktionssoftware werden verschiedene Grafiken erstellt, welche in Ordnern abgelegt und zum Download als .zip Datei bereitgestellt werden. Nach dem Download befinden sich die restlichen Dateien auf dem Server und würden bei einem erneuten Aufruf der Software mit veränderten Einstellungen nur partiell überschrieben aber nicht gelöscht werden. Somit müssen die Ordner vor einem erneuten Start der Software gelöscht werden, um für neue Grafiken Platz zu schaffen.

Zum rekursiven Löschen aller Dateien in einem Ordner wird das Kommando

```
1      exec_shell($Ordner , 'r');
```

genutzt. Auch hier bezeichnet *\$Ordner* den Pfad zu dem Ordner, der gelöscht werden soll. Beim Anlegen eines neuen Ordners ist darauf zu achten, dass aller Benutzer das Recht haben, in dem Ordner Daten zu generieren und zu löschen, sodass mit *chmod(777)* jedem Nutzer die vollen Rechte zugeteilt werden.



# 4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite

Zur Bedienung der 3D-Rekonstruktionssoftware aus Kapitel 2.4.2 ist eine Webseite entstanden, in der nicht nur das Programm eingebunden ist, sondern die Geschichte der Röntgenphysik Stück für Stück interaktiv erarbeitet werden kann.

Im rechten Teil der Abbildung 4.1 ist die Struktur der Webseite in einem Diagramm zu sehen. Die Nummerierung wird in den nachfolgenden Kapiteln für die einzelnen Webseiten beibehalten und dient der Orientierung. Zur schnellen Navigation sind die Hauptseiten von eins bis sechs von jeder Seite über den Navigationsblock links immer erreichbar. Die Unterkapitel sind dagegen nur von der jeweiligen Hauptseite aus zu erreichen, indem sie in der Kopfzeile ausgewählt werden.

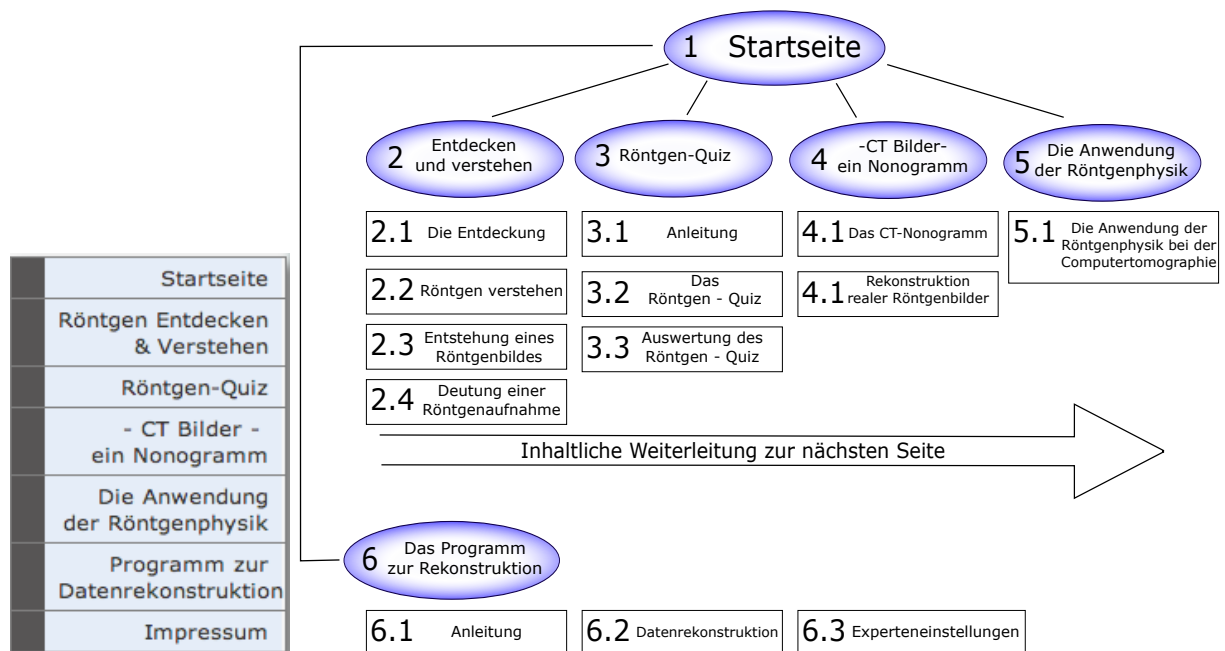


Abb. 4.1.: Navigationsblock (links) und Strukturdiagramm der Webseite (rechts).

#### 4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite

Nach dem Durchlesen einer Webseite ist in der letzten Zeile eine inhaltliche Weiterleitung zur nächsten Seite angegeben. Dies ermöglicht eine chronologische Navigation durch die Webseite.

Die folgenden Unterkapitel beschreiben den Inhalt der verschiedenen Webseiten und geben einen Einblick in die Programmierung und Inszenierung der interaktiven Elemente.

### 4.1. Startseite

Die Startseite erfüllt dabei den Zweck Aufmerksamkeit zu erregen und Interesse zu wecken. Im oberen Block der Webseite sind dazu ein Röntgenbild eines Seepferdchens links und das mit dem Rekonstruktionsprogramm erstellte Seepferdchen rechts zu sehen (Abb. 4.2). Auf der Webseite wird das rechte Bild als gif-Datei eingebunden, sodass mehrere Bilder nacheinander den Eindruck erwecken, als würde sich das Seepferdchen um sich selbst drehen.

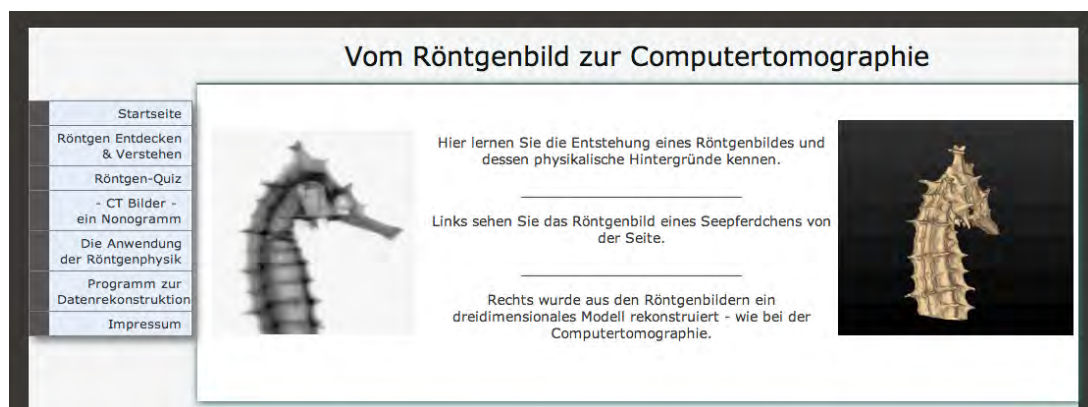


Abb. 4.2.: Erster Abschnitt der Startseite.

Mit der Überschrift *Vom Röntgenbild zur Computertomographie* kann sich der Betrachter sofort erschließen, dass hier ein Röntgenbild zu einem frei drehbaren dreidimensionalen Objekt rekonstruiert wurde.

Im zweiten Block der Startseite wird das Lehrvideo gezeigt, welches im Rahmen dieser Masterarbeit gedreht wurde. In Zusammenarbeit mit Sascha Prinz entstand so ein 3:50-Minuten Video, das kurz und knapp die Aufnahme der Röntgenbilder für eine anschließende Computertomographie zeigt und deren Anwendung in der Medizin illustriert. Hierzu wurde ein Interview mit dem Direktor Herrn Prof. Dr. med. Joachim Lotz der diagnostischen Röntgenabteilung an der Universitätsmedizin Göttingen (UMG) geführt und ein Ausschnitt verwendet. Das Drehbuch zum Kurzfilm und der extern eingesprochene Text des Videos stehen im Anhang A.4 zur Verfügung.

Im Anschluss kann sich der Leser informieren, welche Inhalte die Webseite vermittelt und bekommt eine Übersicht zu den einzelnen Kapiteln. Die zugehörigen Unterkapitel sind direkt im Text verlinkt. Dies ermöglicht eine unkomplizierte Navigation durch den Inhalt, falls dieser nicht chronologisch nachvollzogen wird.

## 4.2. Entdecken und Verstehen

Nach der Startseite wird der Leser auf die Seite der Überschrift *Entdecken und Verstehen* weitergeleitet. In vier Unterkapitel wird hier die Röntgenphysik präsentiert. Der Zugriff auf die einzelnen Abschnitte erfolgt über die Kopfzeile, wie Abbildung 4.3 zeigt.



**Abb. 4.3.:** Kopfzeile der Seite 2 *Entdecken und Verstehen*, mit dem ausgeklappten Untermenü der Seite 2.1 *Die Entdeckung*.

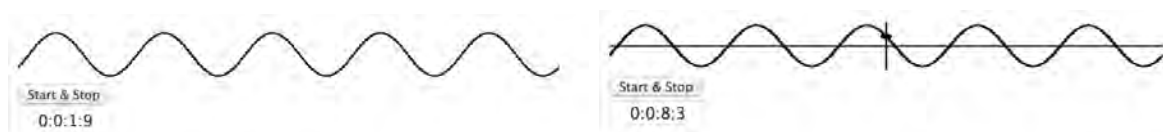
Zuerst wird hier die elektromagnetische Welle vorgestellt und in das Spektrum eingeordnet. Im Anschluss wird in *Röntgen verstehen* das Leben von Wilhelm Conrad Röntgen geschildert, sowie seine Entdeckung thematisiert und anschaulich dargestellt. Diese Unterseite bildet den Kern dieses Theorieteils. Nach der Erforschung wird jetzt die Entstehung eines analogen oder digitalen Röntgenbildes in *Entstehung eines Röntgenbildes* erläutert. Sodass auf der letzten Seite *Deutung einer Röntgenaufnahme* das entstandene Bild erklärt werden kann.

### 4.2.1. Die Entdeckung

**Entdeckung der elektromagnetischen Welle** Dieser erste Block beginnt mit dem Entdecker der elektromagnetische Welle Heinrich Hertz und seinem Portrait. Es folgt der theoretische Inhalt aus dem Kapitel 2.1 zur Transversalwelle. Visuell ansprechend wird dieser Absatz dadurch, dass sich eine Sinuskurve durch das Bild bewegt (Abb. 4.4 links). Fährt man mit dem Cursor über das Bild der Welle, wird ein einzelner Punkt auf der Welle

#### 4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite

eingebildet, der sich nicht fortbewegt sondern auf seinem Platz auf und abschwingt (Abb. 4.4 rechts).



**Abb. 4.4.:** Sinuswelle ohne (links) und mit Cursorkontakt (rechts). Darunter befindet sich je eine Stoppuhr.

**Die theoretische Beschreibung einer Welle** Nach dem Phänomen der Welle wird im zweiten Block die Welle theoretisch beschrieben. Die Schwingungsdauer  $T$ , Frequenz  $f$  und Wellenlänge  $\lambda$  werden kurz erklärt und die Wellenlänge grafisch dargestellt (Abb. 4.5 links).

Zu Frequenz und Schwingungsdauer kann eine kleine Aufgabe ausgeführt werden. Wie in Abbildung 4.4 zu sehen, gibt es einen *Start & Stop* Schalter, mit dem die Zeit gemessen werden kann, bis eine Schwingungsdauer durchgelaufen ist. Ebenso kann eine Minute gewartet werden, in der man die Anzahl der durchlaufenen Wellen zählt, um die Frequenz zu bestimmen. Das Ergebnis kann in die zugehörigen Textfelder eingegeben werden. Mit den *Prüfe*-Schaltern evaluiert ein JavaScript die Eingabe und gibt, je nach Antwort, eine der drei Ausgaben (Abb. 4.5 rechts).



**Abb. 4.5.:** Darstellung der Wellenlänge links und Aufgabenfelder mit möglichen Rückmeldungen für die Eingabe von  $T$  rechts.

Bei der Überprüfung der Antworten wurde darauf geachtet, dass nur Zahlen ausgewertet werden. Bei allen anderen Eingaben erscheint wieder die Eingabe  $f = \text{Anzahl:30}$  oder  $T = \text{Zeit: 18.3}$ . Damit wird nur eine Rückmeldung zur Richtigkeit gegeben, wenn eine Zahl eingegeben wurde.

**Spektrum der elektromagnetischen Welle** Neben der einfachen, laufenden Welle aus dem ersten Block sind hier die Welle des elektrischen Feldes  $E$  und des magnetischen Feldes  $B$  überlagert abgebildet. Auf der Webseite läuft die Welle nach rechts unten aus

dem Bild heraus, sodass sich der Betrag des  $E$ - und  $B$ -Vektors stets ändern.

Der anschließende Text befasst sich mit der Wahrnehmbarkeit dieser Wellenart und deckt dabei das sichtbare Licht und die Infrarotstrahlen als Wärme auf. Die Beschreibung erfolgt anhand der Grafik 2.1 in Kapitel 2.1.

Durch dieses Bild gelangt der Leser zum eigentlichen Thema, der Röntgenwelle. Denn eine elektromagnetische Welle wird immer dann Röntgenwelle genannt, wenn ihre Wellenlänge  $\lambda$  zwischen  $10^{-8}$  m und  $10^{-12}$  m liegt. Dieser Bereich liegt in der Abbildung 2.1 etwa im Nanometerbereich.

### 4.2.2. Röntgen verstehen

**Wilhelm Conrad Röntgen** Wie auch der Block der Seite 2.1 beginnt der Block zu 2.2 mit einem Portrait des Physikers. Anschließend wird das Leben von Wilhelm C. Röntgen in wenigen Sätzen zusammengefasst und beschreibt den Charakter des introvertierten und schweigsamen Mannes. Es folgt ein weiteres interaktives Element, das dem Leser der Webseite ermöglicht, einen zusätzlichen Text zu diesem Block aus- und einzuklappen (Abb. 4.6).

**Wilhelm Conrad Röntgen**



Die Entdeckung der Röntgenstrahl  
Nobelpreis im Fach Physik im Jah

Er selber war eher zurückhaltend  
Alpen und wanderte gerne. Bei se  
arbeitete hochkonzentriert weiter

Nach seiner Entdeckung der Rönt  
weder Patente noch Lizenzverträ  
oder Vertrag unterliegen. Vor des  
Mahlzeiten noch zum Schlafen na

Seine Karriere bagann dabei nich  
verwehrte...

[entdecke mehr ▼](#)

Die Entdeckung am 8. November 1895

**Wilhelm Conrad Röntgen**



Die Entdeckung der Röntgenstrahl  
Nobelpreis im Fach Physik im Jah

Er selber war eher zurückhaltend  
Alpen und wanderte gerne. Bei se  
arbeitete hochkonzentriert weiter

Nach seiner Entdeckung der Rönt  
weder Patente noch Lizenzverträ  
oder Vertrag unterliegen. Vor des  
Mahlzeiten noch zum Schlafen na

Seine Karriere bagann dabei nich  
verwehrte...

[weniger ▲](#)

<b>1845</b>	kam am 27. März Wilhelm Conrad als einziger
<b>1861</b>	besuchte er, mit 16 Jahren, die technische Sc dafür war eine entwürdigende Zeichnung der

**Abb. 4.6.:** Erster Block der Seite 2.2 mit eingeklapptem (links) und ausgeklapptem (rechts) Lebenslauf von Wilhelm C. Röntgen.

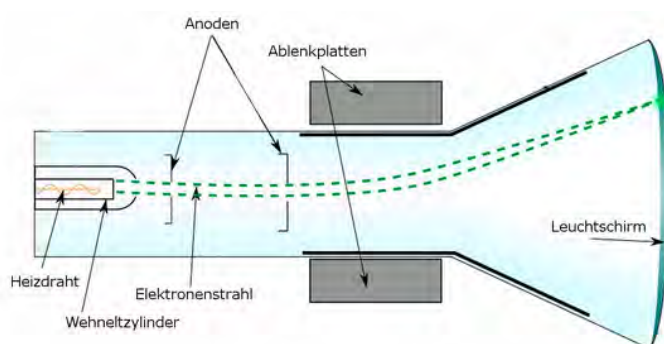
In diesem Block wird der Lebenslauf von Wilhelm C. Röntgen illustriert. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit kann jeweils nur ein zusätzlicher Text gleichzeitig sichtbar sein.

Neben den Informationen zu Wilhelm C. Röntgen wird separat *die Entdeckung am 8. November 1895* in einer kurzen Erzählung beschrieben und ein erstes Röntgenbild ge-

#### 4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite

zeigt. Da Röntgen in seinem Versuch noch eine Kathodenstrahlröhre nutzte, wird diese im nachfolgenden Block erläutert.

**Von der Kathodenstrahlröhre zur Röntgenröhre** Dies sind zwei aufeinanderfolgende Abschnitte, in denen jeweils die Theorie der Kathodenstrahlröhre und die der Röntgenröhre erläutert wird. Bei der Kathodenstrahlröhre können wiederum zusätzliche Informationen ausgeklappt werden, um weitere Details aus dem Kapitel 2.2 an den Leser weiterzugeben. Die kurze Erklärung für jeden Leser befindet sich immer im Untertitel der Zeichnung (Abb. 4.7).



*Klassische Kathodenstrahlröhre*

*Der Heizdraht emittiert Elektronen, die Richtung Anode beschleunigt werden. Danach werden sie nach oben durch die Ablenkplatten abgelenkt und treffen auf den Leuchtschirm.*

Hier wird der Strahl nach oben abgelenkt. Wie muss demnach die obere Ablenkplatte geladen sein?

Die Ladung ist:

**Abb. 4.7.:** Schematische Darstellung der Kathodenstrahlröhre auf der Webseite.

Bei der Kathodenstrahlröhre wird der Leser aufgefordert, über die Ablenkrichtung des Elektronenstrahls nachzudenken. Wie in der Abbildung 4.7 wird der Strahl nach oben abgelenkt. Somit muss die obere Platte positiv geladen sein, um die Elektronen anzuziehen. Dieses Ergebnis kann in dem zugehörigen Textfeld ausgewertet werden.

**Entstehung der Röntgenstrahlen, erklärt am Bohrschen Atommodell** Wie die Blocküberschrift vermuten lässt, wird die Entstehung von Röntgenstrahlen in diesem Abschnitt behandelt. Wichtig ist, dass der Erklärung ein Modell zugrunde liegt, welches Bohr entwickelte, und nicht die Realität direkt dargestellt wird.

Zu beiden Prozessen im Atom, ist eine Animation eingebunden, bei der die Bremsstrahlung in Abbildung 4.8 links und die charakteristische Röntgenstrahlung rechts zu sehen ist.

Für beide Entstehungsarten kann ein zusätzlicher Text eingeblendet werden, der die Vor-



Ein Elektron kommt dem Atomkern sehr nah und wird abgelenkt und abgebremst. Dabei entsteht Röntgenstrahlung.

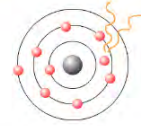
physikalisch erklärt ▾



Animation zur Bremsstrahlung an Hand des Bohrschen Atommodells

Ein Elektron wird auf den Atomkern geschossen und trifft ein Elektron des Atoms. Es entsteht eine Lücke, die durch ein anderes Elektron des Kerns wieder gefüllt wird. Beim Abbremsen entsendet dieses Elektron hochenergetische Röntgenstrahlung.

physikalisch erklärt ▾



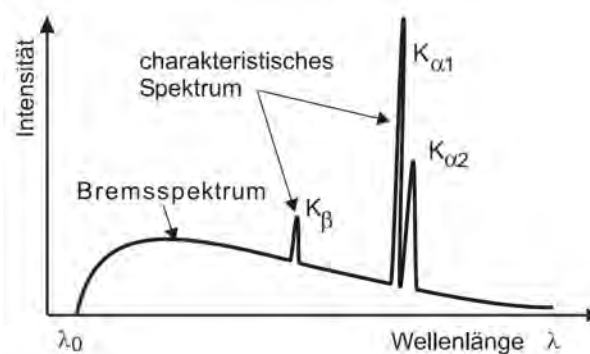
Animation zur charakteristischen Strahlung

**Abb. 4.8.:** Abbildung zur Entstehung der Bremsstrahlung links und der charakteristischen Strahlung rechts

gänge im Atom noch einmal erklärt und mit zusätzlichen Formeln und Bildern erläutert. So wird bei der Bremsstrahlung auf die Energie eines Röntgenphotons eingegangen, wie sie in Kapitel 2.2.1 erklärt wurde.

Bei der charakteristischen Strahlung werden die verschiedenen auftretenden Möglichkeiten erklärt, um Strahlungen verschiedener Intensitäten zu erhalten. Dabei wird auf die einzelnen Bedeutungen von zum Beispiel  $K_{\alpha}$ , eingegangen und wie sie sich zusammensetzen (Kapitel 2.2.2).

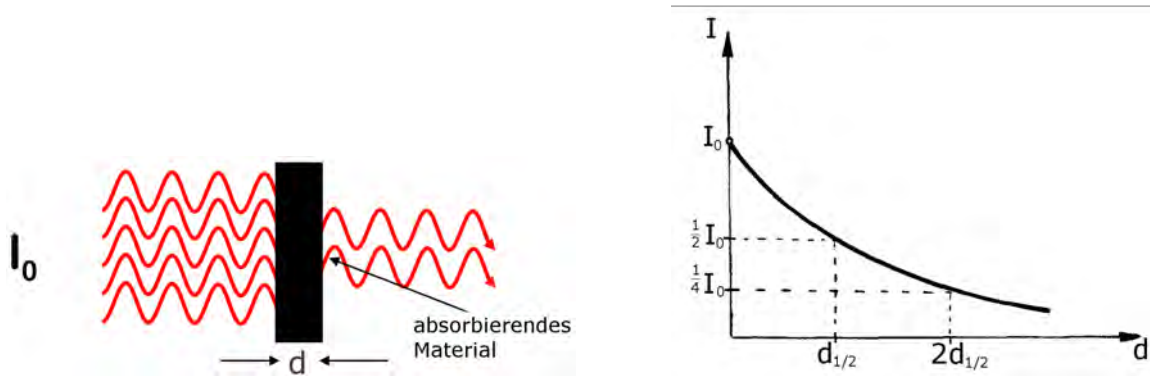
**Das Spektrum der Röntgenstrahlen** Das Spektrum der Röntgenstrahlen ist immer von dem gewählten Anodenmaterial abhängig. Diese Abhängigkeit wird dem Leser mit der Grafik (Abb. 4.9) verdeutlicht und ist in Kapitel 2.2.2 theoretisch beschrieben.



**Abb. 4.9.:** Spektrum der Röntgenstrahlung, für ein Material [19].

Im Zusatzteil wird das Auftreten verschiedener Röntgenphotonen bei verschiedenen Anodenspannungen behandelt. Somit wird nicht nur auf das Spektrum eingegangen, sondern auch auf die benötigte Energie, um ein volles Spektrum zu erhalten.

**Absorption von Röntgenwellen - Tomographie** Dieser Block widmet sich dem Begriff der Tomographie, als Projektion von dreidimensionalen Gegenständen auf eine ebene Fläche. Anhand der Abbildung 4.10 wird der Begriff der Halbwertsdicke erklärt und mit der Halbwertszeit eines radioaktiven Materials verglichen (siehe dazu Kapitel 2.2.3).



**Abb. 4.10.:** Schematische Darstellung der Absorption von Röntgenstrahlen bei der Dicke  $d$  des Materials links, nach [7] und rechts exponentieller Abfall der Intensität  $I$  nach der Dicke  $d$ .

Dass es sich bei dem Vorgang der Absorption von Röntgenstrahlen um eine exponentielle Funktion handelt, wird in einem zusätzlichen Text deutlich. Hier wird explizit auf den Abschwächungskoeffizienten  $\mu$  des Materials eingegangen und so die Formel 2.5

$$I(d) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$$

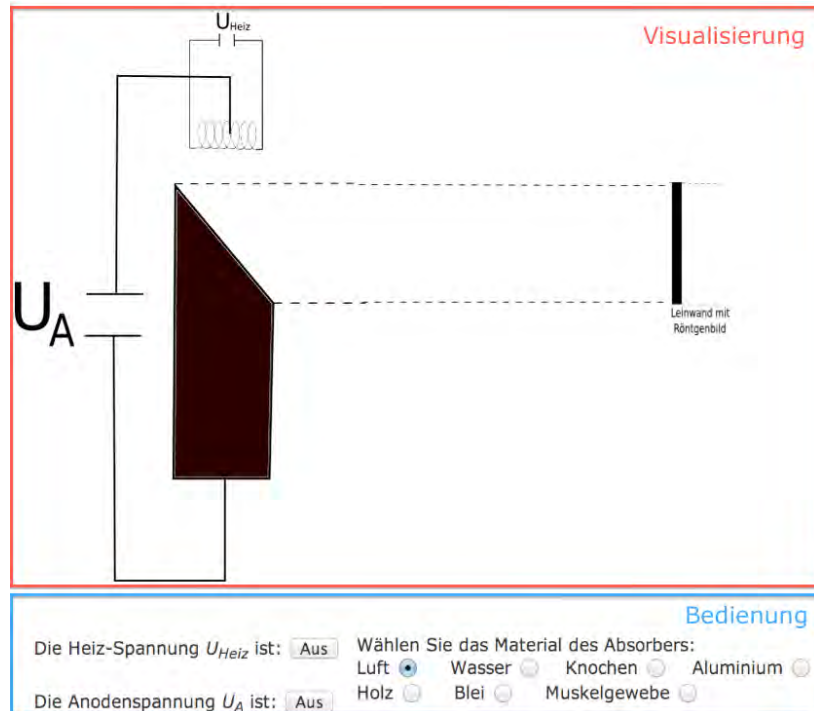
der Intensität der Röntgenstrahlung erklärt und die Abbildung 4.10 (rechts) eingebildet.

**Absorption von Röntgenwellen - ein kleines Experiment** Mit dem Wissen aus den vorangegangenen Blöcken bildet ein Experiment zur Absorption von Röntgenstrahlen den Abschluss dieser Unterseite. Programmiert ist das Experiment mit JavaScript, um die Eingaben des Benutzers direkt entgegenzunehmen und die Seite nicht neu laden zu müssen. Das Programmfenster ist unterteilt in Visualisierung oben und Bedienung unten, wie Abbildung 4.11 zeigt.

Die Visualisierung zeigt links zwei Stromkreise, einer mit der Heizspannung  $U_{Heiz}$  zur Erzeugung freier Elektronen und der andere zur Schaltung der Anodenspannung  $U_{Anode}$ . Die Anode ist dabei in schwarz abgebildet und abgeschrägt, um emittierte Röntgenphotonen Richtung Leinwand zu senden. In der Mitte ist ein Bereich, in den Objekte eingefügt werden können, um die Anodenspannung zu absorbieren.

Rechts ist daraufhin eine Leinwand aufgestellt, die lumineszierend wirkt. Demnach ist sie

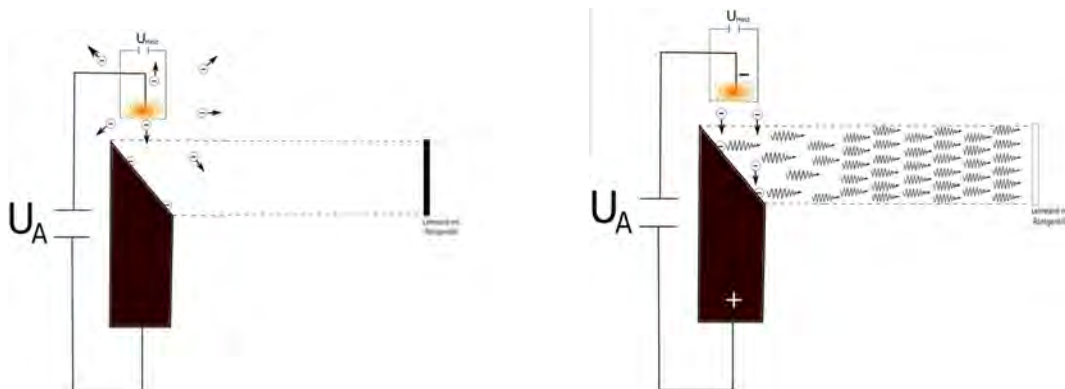




**Abb. 4.11.:** Aufbau des Experiments, wenn alle Spannungen ausgeschaltet sind und Luft gewählt wurde.

schwarz, wenn keine Strahlung auftrifft und weiß bei voller Röntgenintensität.

Im Bedienfeld können die Spannungen aus und angeschaltet werden, sodass sich in der Visualisierung die Bilder aus Abbildung 4.12 ergeben.

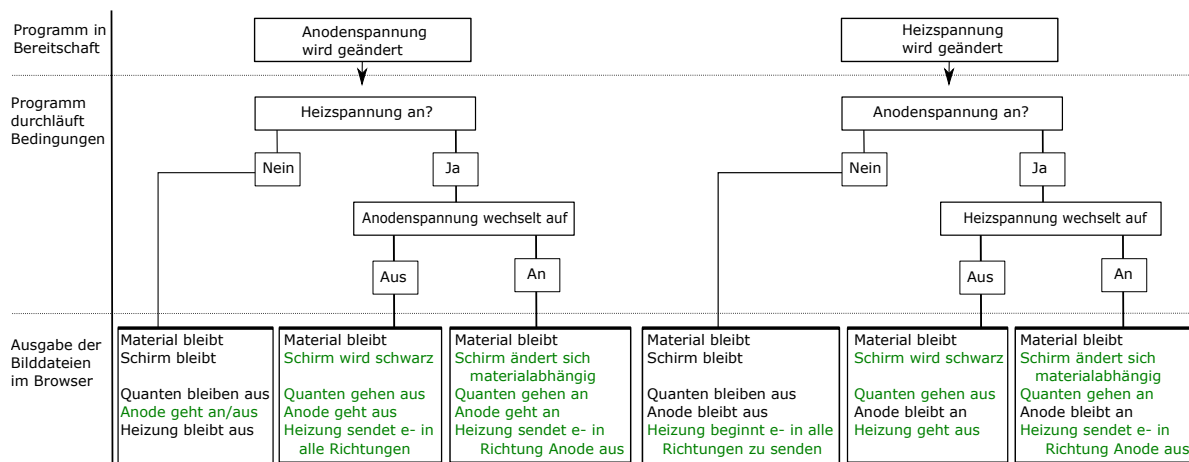


**Abb. 4.12.:** Aufbau des Experiments, mit eingeschalteter Heizspannung links und hingenommener Anodenspannung rechts

Die zugrundeliegende Struktur des JavaScript-Programms ist in Abbildung 4.13 für die Schaltung der Spannungen zu sehen.

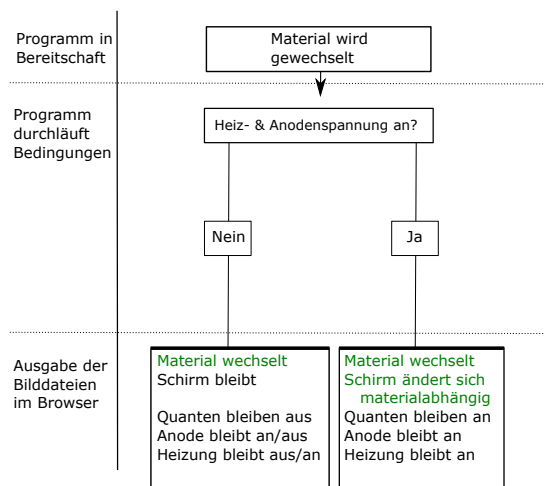
In Abbildung 4.11 unten rechts sind die verschiedenen Absorbermaterialien aufgelistet. Zur Auswahl stehen: Luft, Holz, Wasser, Muskelgewebe, Knochen, Aluminium und Blei.

#### 4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite



**Abb. 4.13.:** Strukturdiagramm des Experiments zur Absorption von Röntgenwellen beim Schalten der Spannungen.

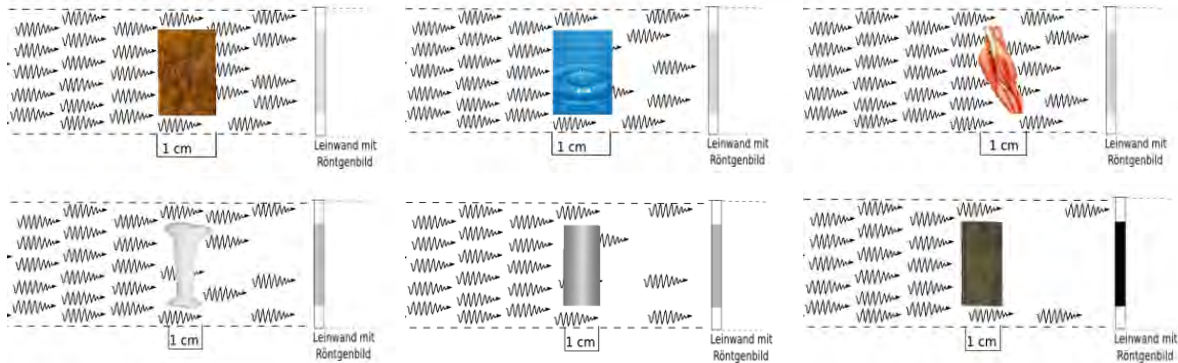
Wird eines der Materialien gewählt, erscheint es zwischen Anode und Leinwand. Sind beide Schalter eingeschaltet, so wird das Objekt von Röntgenstrahlung durchleuchtet und es absorbiert, je nach Material, die Strahlung mehr oder weniger. Dabei ist jedes Objekt einen Zentimeter dick, damit die Werte vergleichbar bleiben. Im Strukturdiagramm der Abbildung 4.14 wird beim Wechsel der Materialien der entsprechende Absorptionskoeffizient des Materials in eine Graustufe gewandelt und angezeigt.



**Abb. 4.14.:** Strukturdiagramm des Experiments beim Wechsel der Materialien.

Die visuelle Umsetzung ist in Abbildung 4.15 zu sehen. Dabei wurde hier nicht die explizite Berechnung des Absorptionskoeffizienten aus Kapitel 2.2.3 genutzt, sondern die Bestimmung der Absorptionskoeffizienten aus Kapitel 2.2.4. Auch Luft hat einen Absorptionskoeffizienten. Allerdings ist er mit  $\mu = 0,02 \frac{1}{\text{cm}}$  im Verhältnis so klein, dass er in diesem Experiment mit  $\mu = 0$  angenommen wurde. Auch die unterschiedlichen Dicken,

bei den Bildern von Knochen und Muskelgewebe wurde in diesem Experiment vernachlässigt.



**Abb. 4.15.:** Die sechs verschiedenen Materialien (Holz, Wasser, Muskel, Knochen, Aluminium und Blei) mit den zugehörigen Graustufen des Leuchtschirms und angepasster Photonenzahl, die den Schirm erreicht.

Der letzte Teil besteht daraus, die drei darunter stehenden Fragen mit Hilfe des Aufbaus zu beantworten. Dabei sind die Fragen:

1. Welches der Materialien würde man in einem Röntgenbild von Knochen kaum unterscheiden können?
2. Welches der Materialien würde man zum Schutz vor Röntgenstrahlen verwenden?
3. Welches Material ist dem Muskelgewebe am ähnlichsten, wenn man mit der Halbwertsdicke vergleicht?

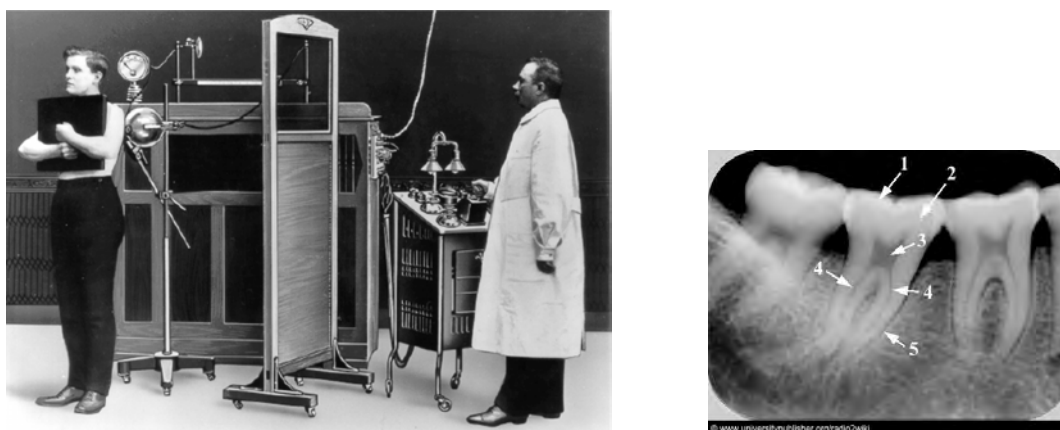
Auch hier werden die Antworten in einem Textfeld gegeben. Die Lösung kann entweder anhand der Zahl von Röntgenphotonen, die die Leinwand erreichen abgeschätzt werden, oder durch den Grauwert auf der Leinwand direkt. Die richtigen Antworten können sowohl groß als auch klein geschrieben werden und lauten: 1. Aluminium, 2. Blei und 3. Wasser.

### 4.2.3. Entstehung eines Röntgenbildes

Die Entdeckung der Röntgenstrahlen geschah auf Grund von lumineszierenden Materialien. Für die Röntgendiagnostik ist es unumgänglich, ein Röntgenbild dauerhaft zu fixieren. Dazu wird auf der Webseite zuerst die analoge Variante mit Fotofilm vorgestellt und im zweiten Block eine digitale.

#### 4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite

**Die Entstehung eines analogen Röntgenbildes früher wie heute** Als Aufhänger zu diesem Thema dient eine Röntgenuntersuchung um 1910, wie sie in Abbildung 4.16 links zu sehen ist. Dabei befindet sich die Röntgenquelle hinter dem Patienten, der eine Fotoplatte vor den Brustkorb hält, um diesen röntgen zu lassen. In diesem Zusammenhang wird die Frage an den Leser gestellt, ob der Brustkorb oder die Arme abgebildet werden. Gerade nach dem Experiment zur Absorption von Röntgenstrahlen aus Seite 2.2 *Röntgen verstehen* im letzten Block ist dies eine leichte Frage. Falls sich der Leser unsicher ist, kann er mit einem Link auf die vorangegangene Seite gelangen und sich erneut informieren. Im Anschluss weist ein kurzer Absatz noch einmal darauf hin, dass Gegenstände in Röntgenbildern nur gut voneinander unterschieden werden können, wenn sie unterschiedliche Absorptionskoeffizienten haben.



**Abb. 4.16.:** Röntgenuntersuchung um 1910 [20] links und ein moderner Zahnfilm, der die Mahlzahnregion zeigt [21].

Im Anschluss folgt die Vorstellung des Fotofilms, wobei ein Zahnfilm (Abb. 4.16 rechts) die heutige Anwendung illustriert. Die chemischen Eigenschaften des Fotofilms werden erst lesbar, wenn der Leser sie ausklappt (siehe Kapitel 2.3.1). Jedoch sollte der Kurztext ausreichend sein, um die anschließende Frage zu beantworten:

Erscheint auf einem Fotofilm ein Nagel im Knochen eines Menschen *heller oder dunkler* als das restliche Bild? Die Antwort ist dabei *heller* und wird nach der Eingabe als richtig markiert.

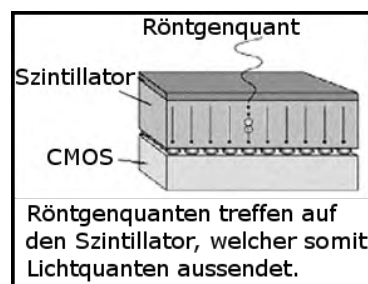
Die letzte Information dieses Blocks erläutert das Projektionsröntgen für den interessierten Benutzer, angelehnt an das Kapitel 2.3.

#### 4.2.4. Die Entstehung einer digitalen Röntgenaufnahme

In diesem Block wird der von PHYWE genutzte digitale Bildsensor vorgestellt, der in Kapitel 2.3.2 beschrieben ist. Dabei wird dem Leser zuerst der Vorgang im Bildsensor in vier Schritten vorgestellt:

1. Die Röntgenstrahlung trifft auf den Sensor.
2. Die Röntgenphotonen verursachen im Szintillator das Aussenden von Photonen.
3. Lichtphotonen werden im CMOS-Sensor pixelweise zu Spannungspulsen gewandelt.
4. Die Spannungspulse werden im Computer den Bildpunkten zugeordnet und in Graustufen dargestellt.

Daneben befindet sich direkt die Abbildung 4.17 links, sodass der Aufbau des Sensors mit dem Text assoziiert werden kann.



**Abb. 4.17.:** Aufbau eines digitalen Bildsensors [15].

Im Anschluss wird der verwendete CMOS-Chip eingehend erläutert. Es wird eine Animation eines Pixels des CMOS-Sensors gezeigt. Somit fallen die Photonen in einem Pixel ein, werden dort in Elektronen umgewandelt und zur Ausleseelektronik weitergeleitet. Neben den technischen Daten, werden die speziellen Eigenschaften des CMOS-Sensors im Vergleich zum CCD-Sensor kurz zusammengefasst:

- Die Auslesegeschwindigkeit ist wesentlich größer.
- Jeder Pixel kann direkt angesprochen werden, sodass Betriebskosten geringer sind.
- Jeder Pixel kann einzeln programmiert werden, um das Rauschen zu verringern oder schon vor der Aufnahme einen Weißabgleich durchzuführen.

Auch hier ist eine ausführliche Erklärung zum CMOS-Sensor im Bildsensor in einem Zusatzteil verfügbar. Entscheidet sich der Leser für die detailreiche Variante, so wird *Das*

#### 4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite

*indirekte digitale System* in einzelnen Absätzen erläutert, wie im Unterkapitel 2.3.2 zum CMOS geschehen.

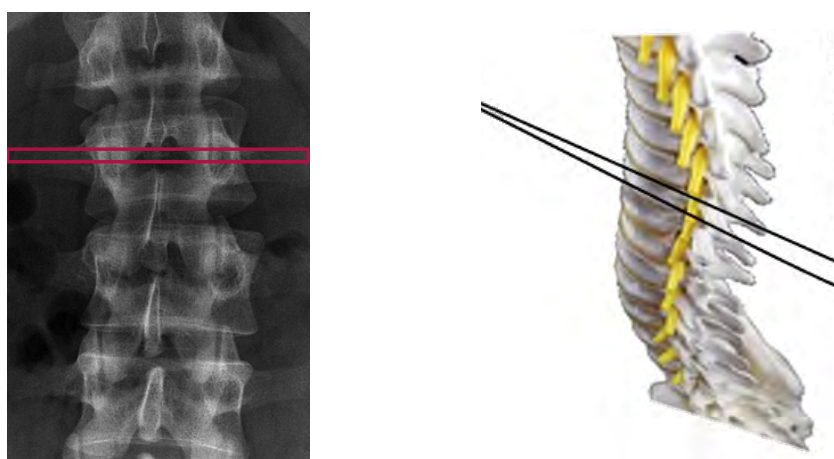
Das Kapitel zum CMOS-Sensor, welches immer auf der Webseite zu lesen ist, wird passend in den zusätzlichen Text eingebettet. Es erscheint zwischen der Glasfaser-Struktur und dem Analog-Digital-Wandler.

Das Bild ist jetzt digital auf dem Computer verfügbar, und jeder Pixel hat eine Graufärbung erhalten. Wie diese verschiedenen Graustufen entstehen und gedeutet werden können, wird auf der Seite 2.4 *Deutung einer Röntgenaufnahme* erklärt.

#### 4.2.5. Deutung einer Röntgenaufnahme

**Die Erstellung einer Bildzeile im Röntgenbild** Der Block beginnt mit einer Zusammenfassung des Wissens, das der Leser für diese Unterseite benötigt und stellt Weiterleitungen zu den passenden vorangegangenen Abschnitten zur Verfügung. Dazu gehört vor allem die Tomographie, da in dieser erläutert wird, dass die Röntgenstrahlen unterschiedlich absorbiert werden und daher auch unterschiedlich viele den Bildwandler erreichen. Als Bildwandler wurden eine analoge und eine digitale Methode vorgestellt, die ebenso verlinkt sind. Im Anschluss wird die Frage untersucht, woher die unterschiedlichen Graustufen stammen und wie sie ein Röntgenbild bilden.

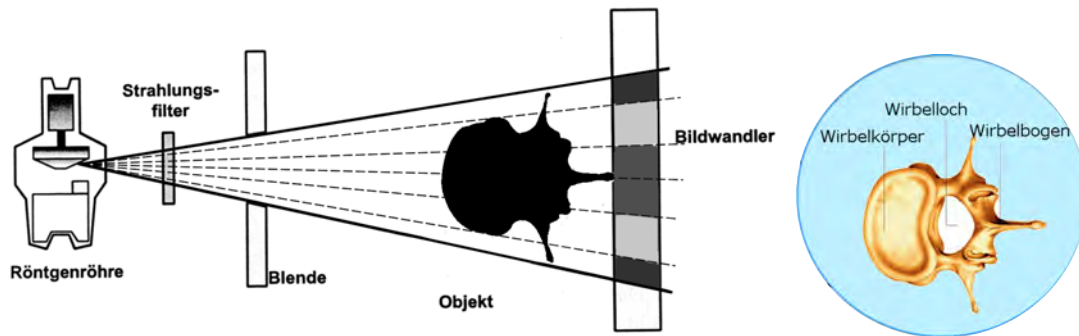
Die Frage nach der Umsetzung in einem Röntgenbild wird am Beispiel einer Wirbelsäule gezeigt (Abb.4.18 links). Um die einzelnen Kontraste besser zu erkennen, sind die Farben von Röntgenbildern invertiert.



**Abb. 4.18.:** Röntgenbild der Wirbelsäule links [22] und Wirbelsäule rechts, je mit markierter Bildzeile .

Auf der Webseite ist neben der Wirbelsäule aus Abbildung 4.18 der Aufbau zum Röntgen

zu sehen. Von links nach rechts wird das Röntgengerät, dann eine Blende, die Wirbelsäule als Objekt und ein Bildwandler dahinter gezeigt. Der Aufbau dazu ist in Abbildung 4.19 abgebildet.



**Abb. 4.19.:** Schematischer Aufbau eines Röntgengerätes von oben (links) und beschrifteter Wirbel im Längsschnitt (rechts).

Je mehr Strahlung den Bildwandler erreicht, desto dunkler wird das Bild. Demnach wird in der Mitte der Wirbelsäule viel Strahlung durchgelassen, während sie am Rand absorbiert wird. Klickt der Benutzer jetzt auf den Wirbel, werden die einzelnen Bestandteile im Wirbel beschriftet, indem sich Abbildung 4.18 (rechts) über den Aufbau legt. Der Benutzer kann erkennen, dass der Wirbel in der Mitte ein Loch hat und die Strahlung daher nicht durch Knochen absorbiert wird sondern die Luft durchdringt.

Noch bevor der Benutzer weiß, dass er auf den Wirbel klicken kann, wird ihm die Frage gestellt, ob der Knochen in der Mitte der Wirbelsäule eher massiv oder durchlässig ist. Ist die Antwort falsch, so erscheint die Aufforderung den Wirbel anzuklicken, sodass in der Mitte das Loch sichtbar wird.

**Die Mehrdeutigkeit von Röntgenbildern** Dieser Block informiert den Leser darüber, dass Röntgenbilder nicht eindeutig sind. Dazu wird einer der Holzwürfel, die im Rahmen dieser Masterarbeit erstellt wurden, geröntgt. Neben dem Aufbau im Röntgengerät wird das erhaltene Röntgenbild zeilenweise in einer Animation eingeblendet.

In diesem Zusammenhang werden die Holzwürfel, welche mit Aluminiumstäben durchzogen sind, kurz vorgestellt. Da auf dem Röntgenbild drei Säulen zu sehen sind, kann es entweder die drei, fünf oder sechs gewesen sein. So kann mit einem einfachen Beispiel gezeigt werden, dass Röntgenbilder nicht eindeutig sind.

Dies dient als Überleitung zu 3.2 *Röntgen-Quiz*.

### 4.3. Das Röntgen-Quiz

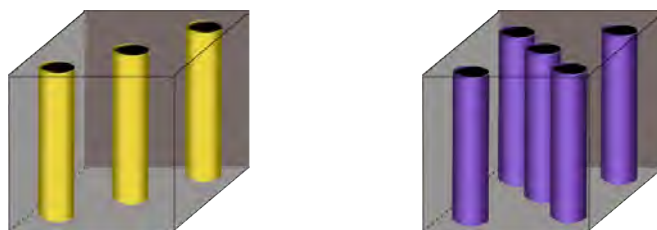
Das Röntgen-Quiz ist eines der Hauptelemente dieser Webseite. Es soll dem Nutzer spielerisch verdeutlichen, dass Röntgenbilder nicht eindeutig sind. Vor allem sehr dichte Objekte absorbieren den größten Teil der Röntgenstrahlen, sodass andere Objekte weder davor noch dahinter registriert werden können.

Im ersten Abschnitt werden die Regeln des Quiz erläutert, sowie das Spielprinzip dargestellt. Anschließend wird die visuelle Umsetzung und Bedienung des Röntgen-Quiz auf der Webseite erläutert. Es folgt eine Beschreibung des JavaScripts, welches die Eingaben der Benutzer sammelt, und der Weiterleitung an den Server mittels PHP. Somit können die Daten gespeichert und grafisch wiedergegeben werden, sodass im letzten Schritt eine Auswertung stattfinden kann.

#### 4.3.1. Spielidee und Anleitung

Die Spielidee entstand zum Anlass der Veröffentlichung der Masterarbeit auf der IdeenExpo 2013 in Hannover. Zu diesem Anlass hat die Universität Göttingen einen Ausstellungsbereich, der zur intensiven Auseinandersetzung mit naturwissenschaftlichen Experimenten und Phänomenen einlädt. In dieser Umgebung sollte die Webseite über ein spielerisches Element verfügen, das die Besucher der Expo leicht nachvollziehen können und so ihr Interesse an der gesamten Thematik geweckt wird. Dabei sollten die genutzten Gegenstände im Quiz möglichst alltagsnah sein und gleichzeitig die Problematik der Mehrdeutigkeit von Röntgenbildern veranschaulichen.

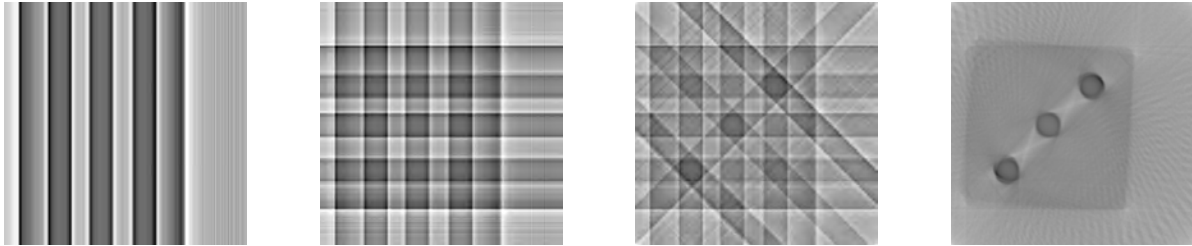
Zu diesem Zweck wurde das Experiment zur Mehrdeutigkeit von Röntgenbildern aus der Masterarbeit von Jens Dietert weiter ausgebaut [16]. In dieser wurden Aufnahmen aus verschiedenen Winkeln von zwei Würfelproben angefertigt, die in Abbildung 4.20 zu sehen sind. Sie haben eine Seitenlänge von 2 cm und bestehen aus Holz. Jeder der Würfel wurde drei beziehungsweise fünf mal angebohrt und mit je einer Aluminiumstangen von 1 cm Länge und 30 mm Durchmesser gefüllt.



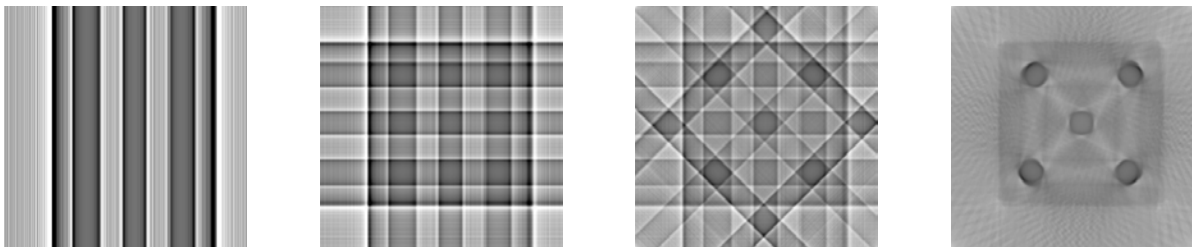
**Abb. 4.20.:** Schematische Darstellung der Holzwürfelproben mit Aluminiumstäben im Inneren. Links sind sie als 3er Würfel und rechts als 5er Würfel angeordnet.



Beide Proben wurden im Röntgengerät aus verschiedenen Winkeln durchleuchtet und anschließend deren Ebenen rekonstruiert. Nach der Rekonstruktion konnte man die verschiedenen Ebenen der beiden Würfel erst voneinander unterscheiden, wenn ausreichend viele Röntgenbilder aus verschiedenen Winkeln hinzugenommen wurden, wie die Beispiel-ebenen der Abbildungen 4.21 und 4.22 zeigen.



**Abb. 4.21.:** Rekonstruktionen des 3er Würfels mit 2, 4, 8 und 100 Röntgenaufnahmen.



**Abb. 4.22.:** Rekonstruktion des 5er Würfels mit 2, 4, 8 und 100 Röntgenaufnahmen.

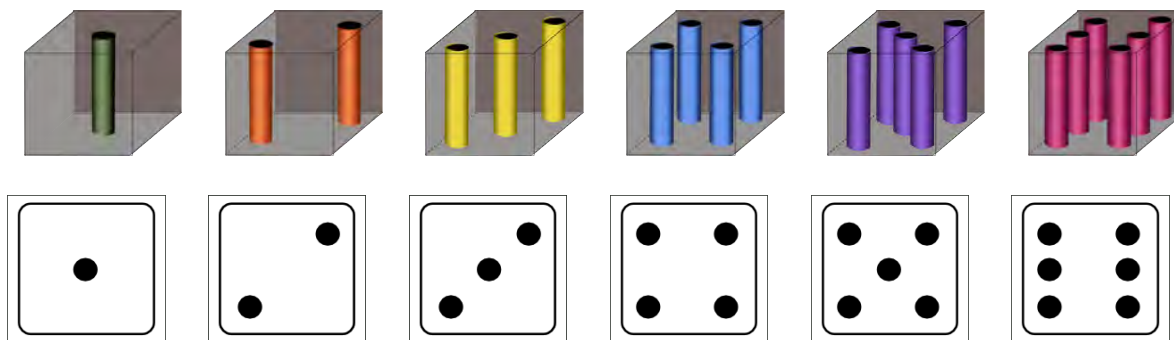
Diese Mehrdeutigkeit in den rekonstruierten Ebenen liegt darin begründet, dass die verwendeten Röntgenbilder der Würfel für die Rekonstruktion sehr große Übereinstimmungen miteinander aufweisen oder sogar identisch sind. Wird eine Röntgenaufnahme von dem Würfel drei oder fünf aufgenommen, sodass die Strahlung senkrecht zu einer der vier Seitenflächen aufkommt, sehen alle acht Röntgenaufnahmen gleich aus. Daher können sie dem ursprünglichen Würfel nicht zugeordnet werden. Bei jeder Aufnahme erscheint das Bild aus Abbildung 4.24 links, da genau drei Säulen nebeneinander im Würfel je einen Schatten im Röntgenbild ergeben und schon die erste Säule die Strahlung komplett absorbiert.

Aus diesem Versuch der Mehrdeutigkeit entstand die Idee, einzelne Röntgenbilder einem zugehörigen Objekt zuzuordnen. Dabei dürfen sich die Objekte von außen nicht unterscheiden und sollen im Röntgenbild Mehrdeutigkeiten aufweisen. Wie in Kapitel 2.2.4 angeführt, ist die Absorption der Röntgenphotonen bei Aluminium in Holz mit denen von Knochen in Muskelgewebe vergleichbar. Dieser Aspekt soll zusätzlich verdeutlichen, dass eine Mehrdeutigkeit nicht nur im Modell, sondern auch beim Röntgen von Körperteilen

#### 4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite

auftreten kann.

Für das Quiz wurden die oben beschriebenen Holzwürfel noch einmal nachgebaut, wobei jetzt alle sechs Würfelzahlen als Aluminiumsäulen in Holz realisiert wurden. Schematisch sind die Würfel in Abbildung 4.23 oben zu sehen.

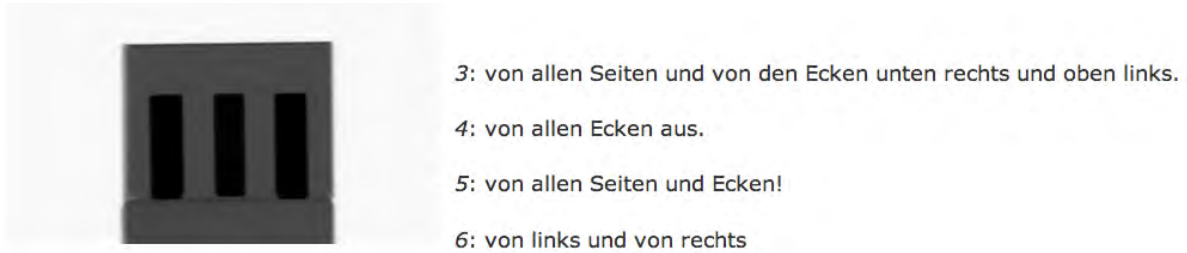


**Abb. 4.23.:** Schematische Darstellung aller sechs Holzwürfel (oben) und Aufsicht als Würfelzahl (unten).

Zu jedem Würfel wurden in  $1^\circ$  Schritten insgesamt 360 Röntgenbilder aufgenommen, wobei je vier davon Anwendung im Röntgen-Quiz auf der Webseite fanden. Das Ziel des Quiz ist es, den richtigen Würfel herauszufinden, der auf den Röntgenaufnahmen zu sehen ist.

**Die Anleitung zum Quiz** Das Quiz wird anhand der schematischen Darstellung der Würfel erklärt und direkt darunter sind die entsprechenden Würfelzahlen abgebildet, wie sie in Abbildung 4.23 unten zu sehen sind. Es ist daher gut möglich, sich die Säulen in der Aufsicht als Würfelzahlen vorzustellen.

Im Anschluss daran wird betont, dass die Röntgenbilder immer von der Seite aufgenommen wurden und daher im Röntgenbild selber nur Säulen zu erkennen sind. Als Beispielbild ist auch hier das Bild mit drei Säulen (Abb. 4.24 links) zu sehen. Je nach Einfall der Röntgenstrahlen auf eine Kante oder Seite des Würfels, sind die Nummern: drei, vier, fünf, oder sechs möglich. In der Anleitung erscheint dazu die Abbildung 4.24 mit Text. So kann der Benutzer der Webseite nachvollziehen, aus welcher Richtung die Röntgenstrahlen auf den Würfel treffen müssen, um das abgebildete Röntgenbild zu erkennen.



**Abb. 4.24.:** Ausschnitt aus der Anleitung zum Röntgen-Quiz von der Webseite. Hier wird passend zum Röntgenbild links, rechts auf die jeweiligen Würfelzahlen von oben Bezug genommen.

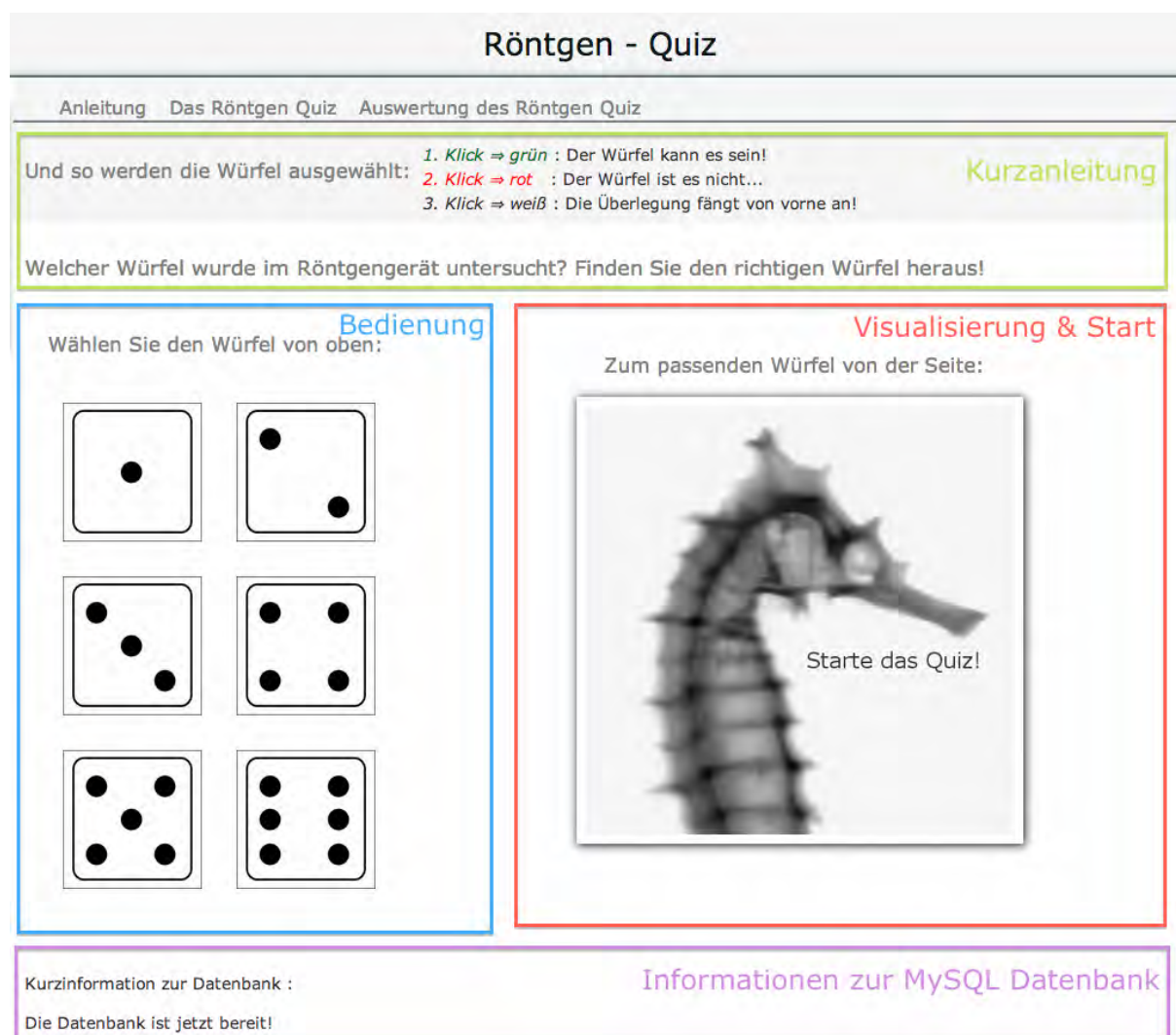
Dieser theoretischen Erklärung folgt die Schritt für Schritt Anleitung zum Quiz:

1. Starten Sie das Quiz mit einem Klick auf das Seepferdchen.
2. Es erscheint ein Röntgenbild, zu dem Sie die Würfel auf der linken Seite einmal anklicken, die jeweils zum Röntgenbild passen können (grüne Markierung).
3. Durch zweimaliges Anklicken können Sie die Würfel rot markieren und somit ausschließen.
4. Klicken sie auf den grünen weiter-Pfeil, um das nächste Röntgenbild zu demselben Würfel zu erhalten.
5. Entscheiden Sie sich, welche Würfel jetzt noch durch das Röntgenbild dargestellt werden können. (Schließen sie weitere Würfel aus, indem Sie diese rot markieren.)
6. Sie erhalten vier Röntgenbilder nacheinander und sollten zum Schluss genau einen Würfel als Ergebnis zurückbehalten.
7. Beim letzten Röntgenbild erscheint ein Schalter zum Beenden.
8. Es folgt eine individuelle Auswertung Ihrer Eingaben.

Im Anschluss wird der Benutzer gefragt, ob er ein ausklappbares Beispiel Quiz sehen möchte. Hier sind die vier Schritte einzeln mit Musterlösung zu sehen und als Hilfestellung ein räumlicher Würfel, auf den die Röntgenphotonen treffen.

### 4.3.2. Das Röntgen-Quiz auf der Webseite

Sowohl im chronologischen Verlauf der Webseite als auch im Navigationscontainer links gelangt man zur Hauptseite des Röntgen-Quiz, wie sie in Abbildung 4.25 zu sehen ist.



**Abb. 4.25.:** Aufbau der Webseite des Röntgen-Quiz mit den Einteilungen: Kurzanleitung, Bedienung, Visualisierung & Start sowie Informationen zur MySQL Datenbank.

Unter der Navigationszeile der Webseite befindet sich die Kurzanleitung zum Röntgen-Quiz. Darin wird die Bedeutung der Farben erklärt, die beim Anklicken der Würfel im Feld *Bedienung* auftreten können, sowie das Ziel des Quiz.

Die Bedienung erfolgt über die sechs Würfelfelder. Bewegt man den Cursor über einen der Würfel, so ändert sich der Cursor in eine Hand und der jeweilige Würfel erhält eine orangefarbene Umrandung. Dies dient der Orientierung und weist darauf hin, dass die

Möglichkeit besteht zu klicken.

Das Fenster *Visualisierung & Start* wandelt sich nach dem Start in das erste Röntgenbild um und dient danach ausschließlich der Visualisierung. Dabei geschieht die Zuweisung des Quizwürfels zufällig.

Die Kurzinformation zur Datenbank befindet sich unten auf der Webseite, sodass sie bei der normalen Bedienung nicht auffällt. Falls ein Fehler mit der Datenbank auf dem Server vorliegt, meldet sie einen Fehler zurück und weist so den Benutzer darauf hin, dass das Quiz momentan nur eingeschränkt nutzbar ist. Dem Besitzer der Webseite sollte die ausgegebene Fehlermeldung ausreichen, um diesen zu beheben.

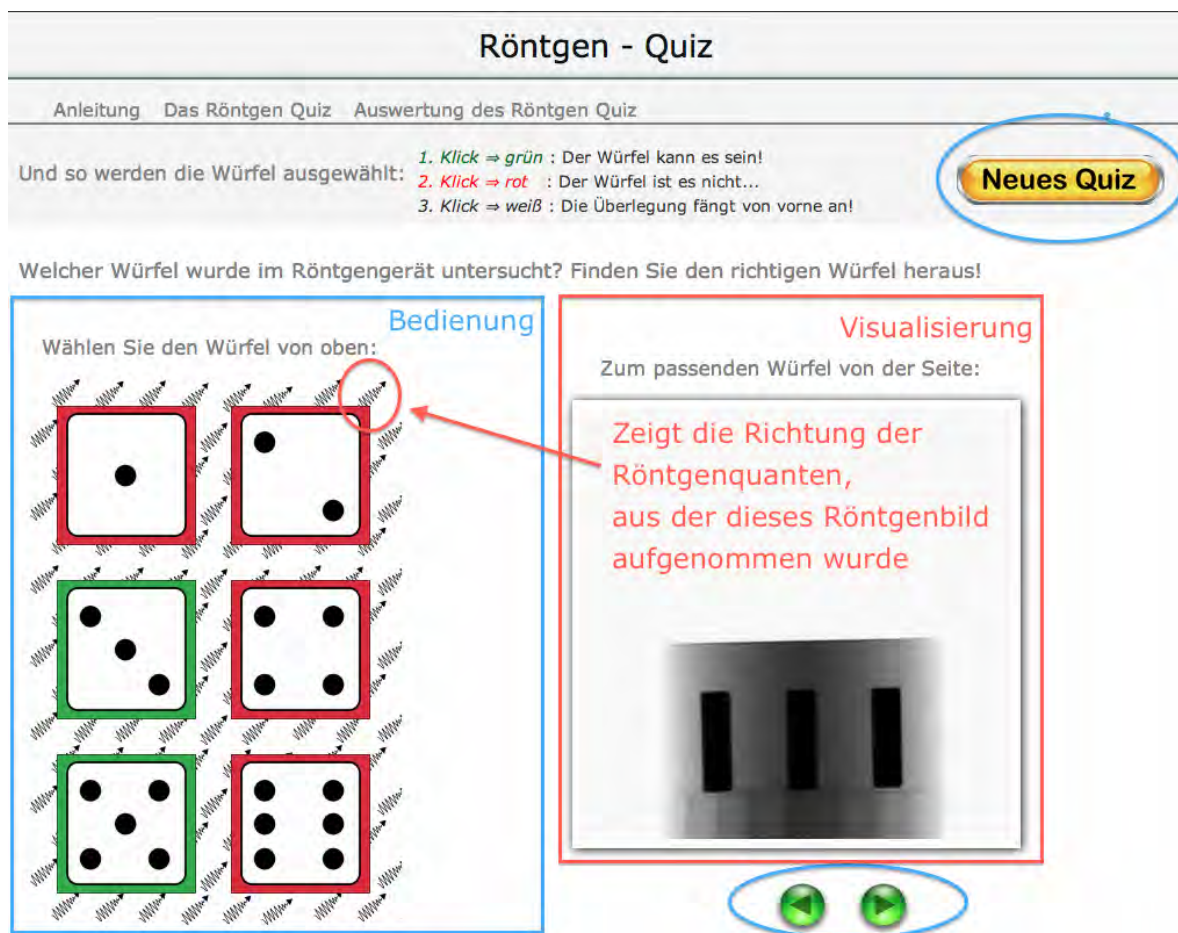


Abb. 4.26.: Aufbau der Webseite des Röntgen-Quiz nach dem Start.

Nach dem Starten des Quiz erscheinen neue Bedienungs- und Visualisierungselemente im Browser, wie Abbildung 4.26 zeigt.

**Bedienungselemente** Mit dem Schalter *Neues Quiz* werden die Daten aus dem alten Quiz gelöscht und ein neues Quiz gestartet. Es erscheint wieder das Seepferdchen mit dem

#### 4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite

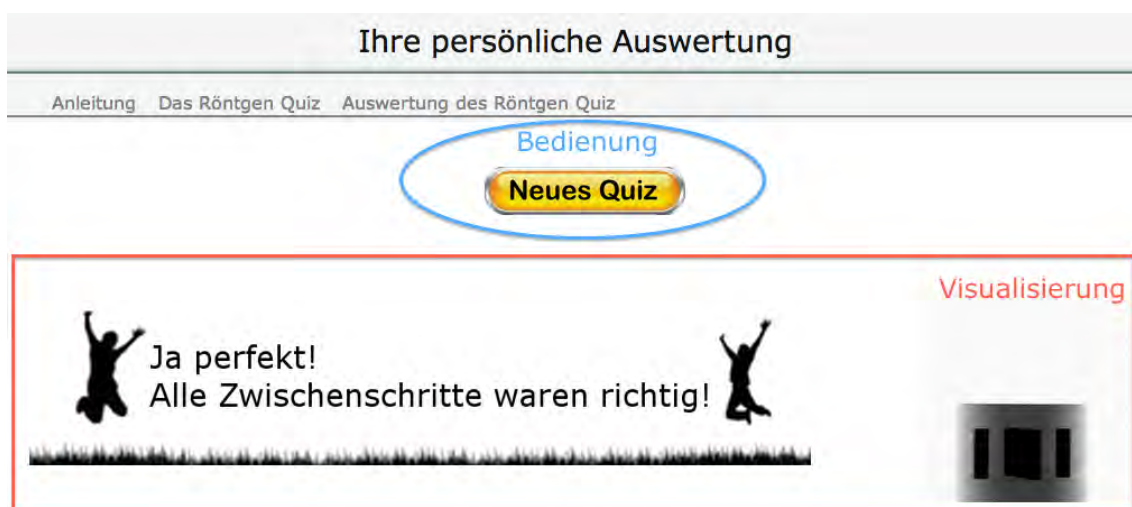
Schriftzug *Starte das Quiz!*.

Die grünen Schalter dienen dem Vor- und Zurückblättern der Röntgenbilder. Wenn das erste Mal der Weiterschalter (der rechte grüne Schalter in der Visualisierung) geklickt wird, speichert das Skript alle Eingaben. Demnach kann man zurückblättern, um sich zu vergewissern, jedoch nicht, um die richtige Lösung im Nachhinein anzuklicken.

Geblieden sind die sechs Würfel, wobei ihre Farben zurückgesetzt werden, wenn ein Quiz gestartet wird. Beim Bedienen des Weiter- oder Zurückschalters bleiben die roten, grünen und weißen Markierungen im Bedienungsfeld erhalten.

**Visualisierungselemente** Neben dem eingeblendeten Röntgenbild sind im Hintergrund der Würfel kleine Wellen mit einer Pfeilspitze abgebildet. Diese sollen Röntgenphotonen darstellen, die aus einer definierten Richtung kommen. Aus dieser Richtung ist das Röntgenbild aufgenommen worden. Jedes mal wenn der Weiter- oder Zurückschalter geklickt wird, ändert sich die Richtung der Röntgenphotonen. Sie werden wieder ausgeblendet, wenn der Schalter *Neues Quiz* genutzt wird.

Beim vierten Röntgenbild wandelt sich der Weiterschalter in den gelben Schalter *Quiz beenden und auswerten*. Damit werden die Daten an das PHP-Skript gesendet, welches die Benutzereingaben auswertet und eine persönliche Rückmeldung ausgibt (Abb. 4.27).



**Abb. 4.27.:** Weiterleitung auf die Seite der persönlichen Auswertung, mit einer perfekten Lösung des Quiz.

Diese Seite der persönlichen Auswertung wird ausschließlich beim Beenden des Röntgen-Quiz aufgerufen. Das Programm gibt vier verschiedenen Rückmeldungen, die jeweils mit einem Schattenbild illustriert sind:

- Der Würfel wurde erkannt und alle Zwischenschritte sind richtig.



- Richtiger Würfel wurde erkannt, aber Zwischenschritte sind nicht alle richtig.
- Zuletzt wurde ein falscher Würfel identifiziert.
- Kein oder mehrere Würfel wurden zuletzt ausgewählt, sodass die Antwort ungültig ist.

Über dieser Rückmeldung erscheint ein *Neues Quiz* Schalter, der den Benutzer zurück zur Seite des Röntgen-Quiz leitet, um ein neues Quiz zu starten.

Neben der personalisierten Rückmeldung, erscheint der Würfel aus dem Quiz als Animation. In dieser werden einige der Röntgenbilder nacheinander abgespielt, sodass es den Anschein hat, als würde sich der Würfel um sich selbst drehen.

Im zweiten Block der persönlichen Auswertung erscheinen zwei Grafiken. Diese werden beide mit Hilfe der Daten aus der MySQL Datenbank erstellt und werden im Kapitel 4.3.3 erläutert. Es handelt sich zum einen, um eine Darstellung der eigenen Angaben und zum Anderen, um die Musterlösung des zugehörigen Quiz.

Zuletzt sind noch einmal alle vier Röntgenbilder aus dem Quiz mit den zugehörigen Röntgenphotonen im Hintergrund abgebildet, sodass hier die einzelnen Schritte im Quiz nachvollzogen werden können.

An dieser Stelle folgt eine Überleitung zu 3.3 *Auswertung des Röntgen-Quiz*.

#### 4.3.3. Umsetzung mit JavaScript, PHP und MySQL

Die Auswertung des Röntgen-Quiz geschieht auf der Grundlage der MySQL Datenbank, die in Kapitel 3.2 vorgestellt wurde. Beim ersten Öffnen der Webseite 3.2 *Röntgen-Quiz* wird die Datenbank automatisch erstellt. Der erste Aufruf der Datenbank geschieht nach dem Röntgen-Quiz durch den Schalter *Quiz beenden und auswerten*, da hier die Eingabe aus dem Quiz in der Datenbank abgelegt wird. Bei der Auswertung wird sie anschließend wieder ausgelesen, interpretiert und dem Client grafisch zurückgegeben.

Im Folgenden sind die einzelnen Skripte kurz erläutert, die das Röntgen-Quiz mit der Datenbank verknüpfen.

**Erstellung der MySQL Datenbank** Beim Öffnen von 3.2 *Röntgen-Quiz* wird am Ende des Blocks ein php-Skript aufgerufen. Der Benutzer wird darauf nicht hingewiesen, sondern erhält lediglich die Rückmeldung, dass die Datenbank jetzt bereit ist oder keine Verbindung zur Datenbank möglich ist.

War die Verbindung erfolgreich, so wurde die Datenbankstruktur aus Tabelle 4.1 auf dem

#### 4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite

wuerfel1_1							
id	Datum	Nr1	Nr2	Nr3	Nr4	Nr5	Nr6
automatisch	Timestamp	Integer	Integer	Integer	Integer	Integer	Integer
wuerfel1_2							
id	Datum	Nr1	Nr2	Nr3	Nr4	Nr5	Nr6
automatisch	Timestamp	Integer	Integer	Integer	Integer	Integer	Integer
wuerfel1_3							
id	Datum	Nr1	Nr2	Nr3	Nr4	Nr5	Nr6
automatisch	Timestamp	Integer	Integer	Integer	Integer	Integer	Integer
wuerfel1_4							
id	Datum	Nr1	Nr2	Nr3	Nr4	Nr5	Nr6
automatisch	Timestamp	Integer	Integer	Integer	Integer	Integer	Integer

**Tab. 4.1.:** Struktur der Datenbank *Röntgen-Quiz* für den Würfel 1.

MySQL-Server angelegt.

Das Quiz besteht aus sechs Würfeln, zu denen je vier Bilder vom Benutzer angeklickt werden können. Zu jedem Würfel gehören daher vier separate Tabellen, die je für ein Röntgenbild aus dem Röntgen-Quiz stehen.

Zu einem neuen Eintrag gehört eine *id* und der Zeitstempel. Die Nummern eins bis sechs enthalten dabei die Information, ob im Quiz ein Würfel grün markiert ist. Wurde demnach eine Sechs im ersten Röntgenbild grün markiert, steht in der Tabelle *wuerfelX\_1* bei Nr6 eine 1. Wird die Aussage im zweiten Röntgenbild zurückgenommen, so steht in Tabelle *wuerfelX\_2* bei Nr6 eine 0, dies ist sowohl bei einer weißen, als auch bei einer roten Markierung der Fall. *X* steht dabei für die Würfelzahl, die im Röntgen-Quiz erkannt werden soll.

Bei jedem Öffnen der Seite 3.2 *Röntgen-Quiz* wird geprüft, ob eine solche Struktur der Datenbank vorliegt, wenn nicht wird sie für alle Würfel gleichzeitig angelegt. Danach wird immer nur die Datenbank bearbeitet, die zum Würfel *X* gehört.

Falls keine Verbindung aufgebaut werden konnte, wird die Fehlermeldung der MySQL Datenbank zurückgegeben und der Besitzer des Servers sollte noch einmal überprüfen, ob alle Schritte im Anhang A.1.1 berücksichtigt wurden und Kapitel 3.2 zur Hilfe nehmen.

**Datennahme mit JavaScript** Während das Erstellen der Datenbank direkt beim Aufruf der Seite mittels PHP serverseitig geschieht, wird die Datennahme mit JavaScript clientseitig durchgeführt. Der Benutzer kann die in Abbildung 4.25 im Bedienungsfeld



markierten Würfel grün, rot oder weiß kennzeichnen, wobei in der Auswertung nur ein grün markierter Würfel beachtet wird. Demnach ist es wichtig, dass beim Neustart oder Starten des Röntgen-Quiz alle Parameter zurückgesetzt werden, wie im Strukturbaum im Anhang A.2.1 in der Abbildung A.1 nachvollzogen werden kann.

Danach sollen die einzelnen Würfelaufsichten dem rechts dargestellten Röntgenbild zugeordnet werden (Abb. 4.26). Die Struktur des zugehörigen JavaScripts ist ebenso im Anhang A.2.2 Abbildung A.2 zu sehen. Dabei wird der abgebildete Strukturbaum immer dann durchlaufen, wenn der Weiterschalter gedrückt wird. Jedoch werden die sechs Variablen nur nach dem ersten Anklicken des Weiterschalters gespeichert.

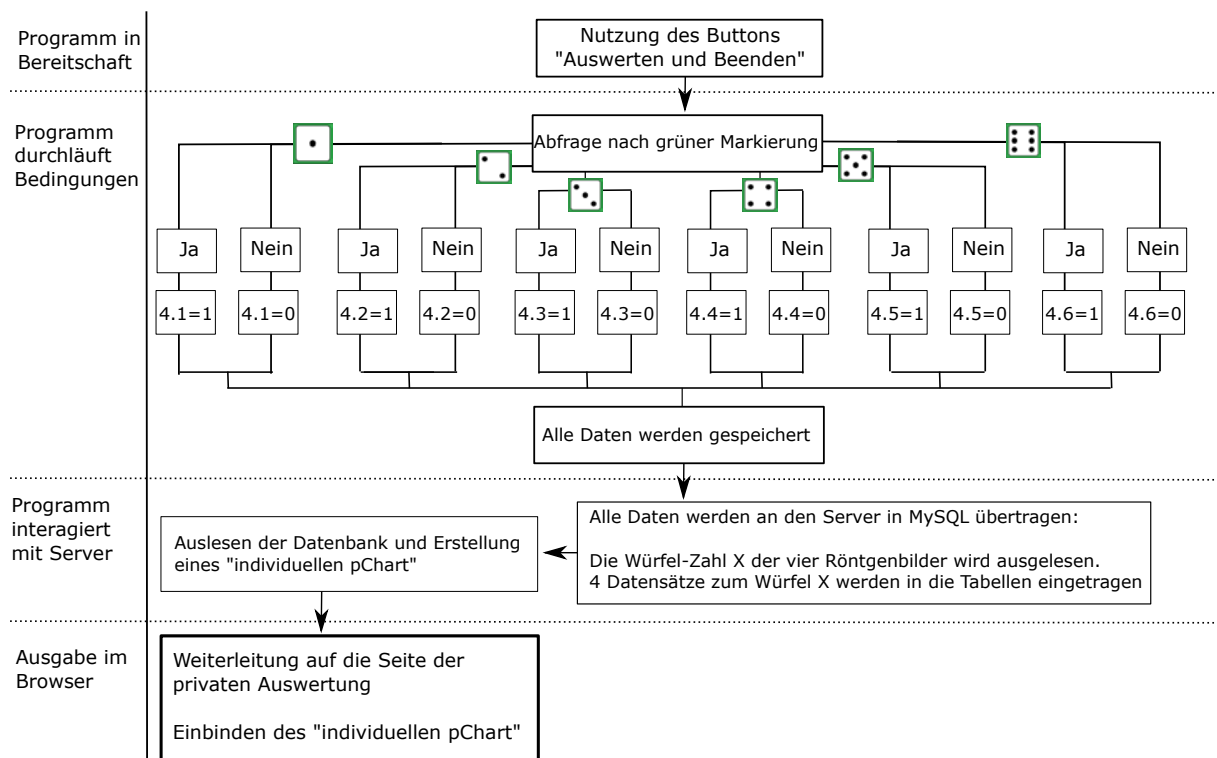


Abb. 4.28.: Strukturbaum zum *Auswerten und Beenden* Schalter im Röntgen-Quiz.

Nach dem Ersten der vier Röntgenbilder wurden analog 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 und 1.6 gesetzt.

Bei der Bedienung des letzten Schalters *Quiz beenden und auswerten* werden die Daten gespeichert, an den Server übertragen und in MySQL abgelegt. Erst danach wird eine individuelle Grafik erstellt, wie sie in Abbildung 4.30 zu sehen ist.

**Sichere Übergabe der Daten via PHP an MySQL** Die Datenübergabe beginnt mit dem *Auswerten und Beenden* Schalter, sodass 25 Informationen an die Datenbank übertragen werden sollen. Eine davon legt den Würfel aus dem Quiz fest und für jedes der

#### 4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite

vier Röntgenbilder müssen sechs mögliche ausgewählte Würfel übertragen werden. Dabei kann JavaScript nicht mit dem Server interagieren, sondern überträgt die Informationen in der Adresszeile an die Webseite *Roentgen\_Eintragen\_in\_mySQL.php*. Die zugehörige Adresszeile könnte demnach wie folgt aussehen:

```
Roentgen_Eintragen_in_mySQL.php?WuerfelWert=6&Nr01=1&...
```

Somit wären alle Informationen für den Client in der Adresszeile sichtbar und für Hackangriffe frei zugänglich. Durch ein Ändern in der Adresszeile könnten falsche Werte an den Server übertragen oder Einträge mehrfach zugesendet werden. Hier kann zum Beispiel die Variable *WuerfelWert=6* in *WuerfelWert=3* geändert werden. Um dies zu umgehen, hat die Webseite *Roentgen\_Eintragen\_in\_mySQL.php* ausschließlich den Nutzen, die übertragenen Daten mit einem Befehl

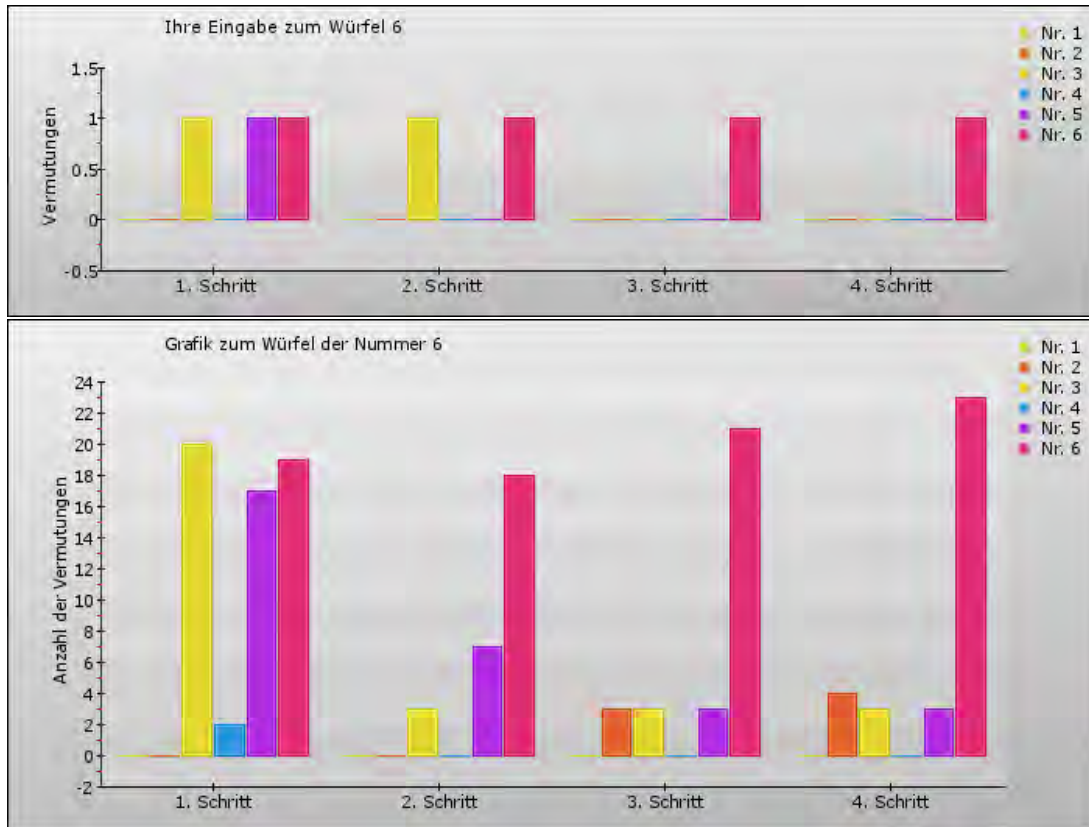
```
1 $WuerfelWert = $_GET[ " WuerfelWert " ] ;
```

auszulesen und in der Datenbank passend abzulegen. Anschließend wird der Benutzer umgehend auf die Seite *Roentgen\_Privatauswertung.php?WuerfelWert=".\$WuerfelWert* weitergeleitet. Dabei wird nur noch die Zahl des Röntgenwürfels übertragen, den der Benutzer im Quiz erkennen sollte. Diese Angabe wird benötigt, um eine persönliche Ausgabe zu generieren. Ändert der Benutzer diese Angabe, so ist sichergestellt, dass keine anderen Angaben als die Ziffern eins bis sechs toleriert werden. Daher wird schlimmstenfalls der letzte Eintrag eines anderen Clients in der persönlichen Auswertung ausgegeben. Diese Informationen sind jedoch unbedenklich und können weder dem Client noch dem Server schaden zufügen.

**Grafische Darstellung der Daten mit pChart** Zur grafischen Darstellung der Daten wird eine zusätzliche Bibliothek für PHP eingebunden. Es handelt sich um pChart, eine frei zugängliche Bibliothek, solange die Software nicht kommerziell genutzt werden soll [23].

Nach der sicheren Weiterleitung der Daten an die MySQL Datenbank, werden automatisch auf der Seite *Roentgen\_Privatauswertung.php?WuerfelWert=X* alle Grafiken zum Würfel der Nummer *X* neu erstellt. Dazu wird der Wert des Würfels zum Quiz wieder aus der Adresszeile ausgelesen und die passende Datenbank genutzt, um zwei Grafiken zu erstellen. In Abbildung 4.29 sind die Grafiken zum Würfel der Nummer 6 abgebildet, die auf dem Server erstellt werden.

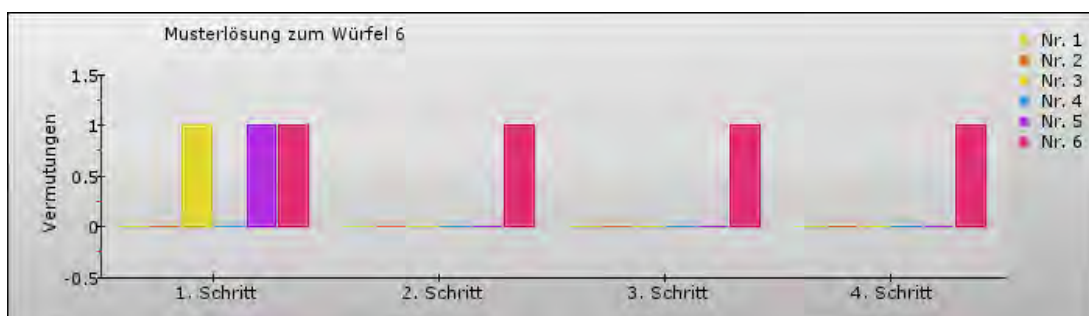
Die obere Abbildung zeigt die eigenen Angaben beim Röntgen-Quiz, während die untere Grafik alle bisher aufgenommenen Daten pro Würfel und Schritt aufsummiert. Im Beispiel wurden in der Grafik *Ihre Eingabe zum Würfel 6* im ersten Schritt, also dem ersten Röntgenbild, eine 3, 5 und 6 ausgewählt. Im Zweiten wurde dementsprechend die 5 wieder



**Abb. 4.29.:** pChart Ausgabe zum Würfel 6, oben die individuelle Ausgabe, unten die summierte Anzeige aller Datenbankeinträge.

zurückgezogen und ab dem 3. Schritt die 6 als richtiger Würfel identifiziert.

Bei der unteren Grafik wird deutlich, dass 37 Leute zuletzt die Zahl 6 identifiziert haben und nur einige die 1, 2 oder 4 vermuteten. Vergleicht man die Daten mit der Musterlösung aus Abbildung 4.30, so wird deutlich, dass in Summe die richtige Auswahl getroffen wurde.



**Abb. 4.30.:** Vorab generierte Musterlösung für den Würfel der Nummer sechs.

Die Musterlösung wurde dabei vorab mit einem php-Skript erstellt und wird nicht mehr durch Zugriffe vom Client verändert.

### 4.3.4. Auswertung des Röntgen-Quiz

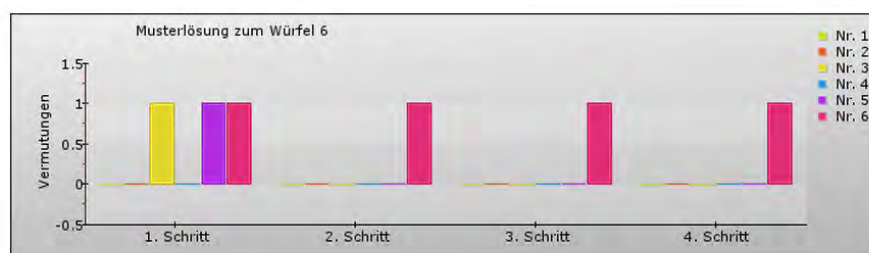
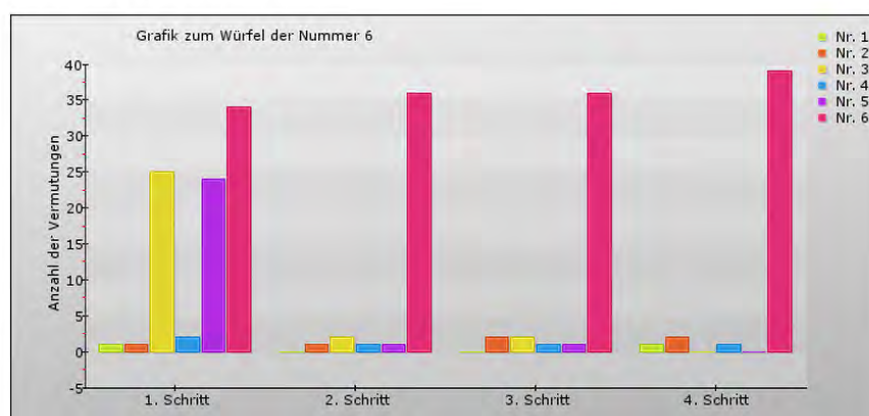
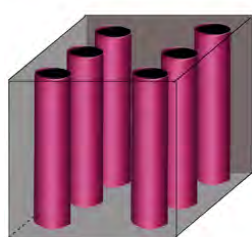
Bei der Auswertung des Röntgen-Quiz, kann nur die Auswertung für alle Würfel direkt aufgerufen werden. Sie besteht aus einem Erklärungsteil und je einem Block zu den sechs verschiedenen Quiz-Würfeln.

**Statistik zum Röntgen-Quiz** Der erste Block informiert den Nutzer, dass seine Daten gespeichert wurden und sie in die nachfolgende Statistik einfließen. Falls er nicht interessiert ist die einzelnen Ergebnisblöcke durchzugehen, kann er direkt durch einen Link zur Webseite 4.1 *CT Bilder - ein Nonogramm* gelangen.

**Die Beispielwürfel** Für jeden Würfel ist ein Block auf der Webseite angelegt, um das Ergebnis aus dem Röntgen-Quiz zu visualisieren. Hierzu ist in Abbildung 4.31 der Block

#### Beispielwürfel mit der Nummer 6

Dieser Würfel kann schon im zweiten Schritt erkannt werden!



Der erste Schritt sind drei Säulen zu sehen, die eine 3, 5, oder 6 bedeuten können. Doch schon im zweiten Schritt sind mehr als drei Säulen zu sehen, was nur bei der 6 möglich ist. Nach dem zweiten Schritt steht fest, dass eine 6 vorliegt.

**Abb. 4.31.:** Auswertung der einzelnen Beispielwürfel auf der Webseite, hier der Nummer sechs. Dabei ist das Röntgenbild unten links eine Animation, in der die einzelnen vier Schritte eingeblendet werden, während sich der Würfel dreht.

zum Würfel 6 abgebildet. Der erste Satz informiert den Client darüber, ab welchem Schritt der Würfel eindeutig identifiziert werden konnte. Danach folgen auf der rechten Seite die summierte Auswertung aller bisherigen Einträge zum Würfel der Zahl 6, sowie darunter die zugehörige Musterlösung. Links ist dazu noch einmal das Modell des Würfels zu sehen und darunter die Röntgenbilder als Animation. Ebenso wie bei der persönlichen Auswertung werden dabei einige Röntgenbilder nacheinander abgespielt, sodass eine Drehung des Würfels erkannt wird.

Der Abschluss eines jeden Blocks ist die Erläuterung der Musterlösung in wenigen Sätzen.

## 4.4. Die Computertomographie als Nonogramm

Diese Webseite *4 CT-Bilder ein Nonogramm* besteht aus zwei Unterseiten. Auf der Ersten wird dem Leser die Rekonstruktion der dreidimensionalen Bilder anschaulich erläutert. Dazu lernt der Client das Nonogramm als Rätsel kennen und daran die Rekonstruktion einer Ebene für die Computertomographie. Diese Art der Rekonstruktion ist an das iterative Verfahren aus Kapitel 2.4.1 angelehnt. Im Anschluss werden auf der zweiten Seite verschiedene Animationen gezeigt und damit, wie eine Computertomographie am Ende aussehen kann.

### 4.4.1. Das CT - Nonogramm

**Das Nonogramm - Ein Rätsel der Projektionen** Dieser erste Block beschreibt das Nonogramm als Rätsel der Projektionen. Wie Abbildung 4.32 links zeigt, stehen am Rand links und oben Zahlen.

	4	5	4	1	1
2					
3					
4					
3					
2					

	4	5	4	1	1
2	■	■	·	■	■
3					
4					
3					
2					

**Abb. 4.32.:** Beispiel eines Nonogramms (links) und mit einer gelösten Zeile (rechts), wie es auch auf der Webseite gelöst werden kann.

Die Anzahl der Zahlen beschreibt dabei die Anzahl der vorhandenen zusammenhängenden

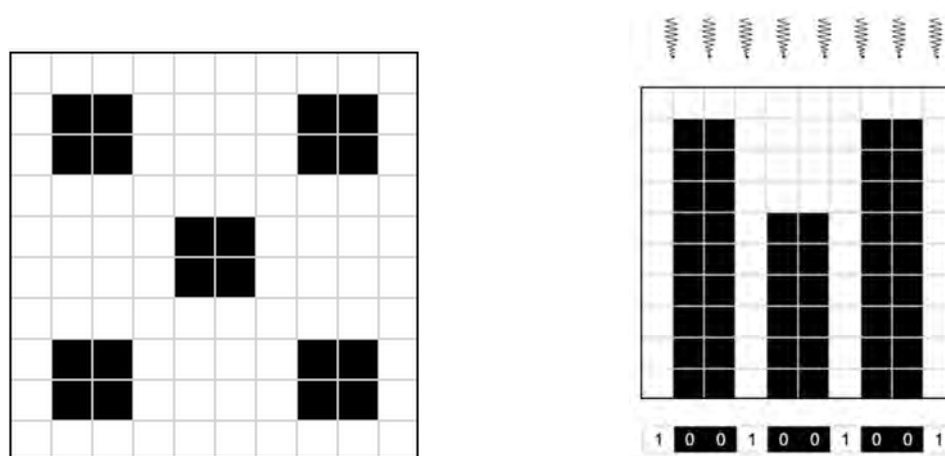
#### 4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite

Objekte. Die Zahl an sich beschreibt wie lang das Objekt ist. In Abbildung 4.32 rechts ist eine Zeile gelöst worden. [22] besagt dabei, dass es zwei getrennte Objekte gibt, die jeweils zwei Blöcke lang sind, sodass die Lösung eindeutig ist.

Während bei einem Nonogramm ein Muster aus schwarzen und weißen Kästchen rekonstruiert wird, kann aus vielen Röntgenbildern ein dreidimensionales Objekt rekonstruiert werden. Dabei wird Ebene für Ebene eine Art Nonogramm gelöst und im Anschluss übereinandergelegt. So entstehen schwarze und weiße Strukturen, die eine Fläche des geröntgenen Objekts wiedergeben.

Bei einem Röntgenbild gibt der Grauwert an, ob ein Objekt vorliegt und wie massiv es ist. In den folgenden Grafiken bedeutet schwarz, dass erstens mindestens ein Objekt vorliegt und zweitens alle Strahlung absorbiert wurde. Weiß dagegen besagt, dass keine Strahlung absorbiert wird und somit hier kein Objekt zu sehen ist. Jedoch kann nicht erkannt werden, ob mehrere Objekte hintereinander liegen. Dieses Problem kann dadurch gelöst werden, dass mehrere Aufnahmen des selben Objekts zur Rekonstruktion genutzt werden.

**Eine Ebene im Röntgenbild verstehen lernen** Zur Veranschaulichung wird auf der Webseite eine Ebene des Würfels der Nummer fünf schematisch dargestellt (Abb. 4.33 links).



**Abb. 4.33.:** Schematische Darstellung einer Ebene des Würfels Nummer 5 (links). Der selbe Würfel ist rechts mit Röntgenstrahlen durchleuchtet worden, indem diese auf eine der Seitenflächen fallen. Die Säulen absorbieren die Strahlung hier vollständig und auf der Leinwand wird keine Röntgenstrahlung mehr registriert. Die Intensitätsverteilung der Röntgenstrahlung ist schematisch in dem Streifen darunter abgebildet.

Trifft die Röntgenstrahlung seitlich auf den Würfel mit fünf Säulen, so durchdringt die

Strahlung das Holz und wird erst von der ersten Aluminiumsäule, die sie trifft, absorbiert. Dies ist schematisch in der Abbildung 4.33 rechts zu sehen, indem die Aluminiumsäule einen Schatten bis zur Leinwand wirft. Die Röntgenstrahlung erreicht damit den Schirm nicht mehr und die Intensität wird mit 0 angegeben. Wird die Strahlung von keiner Säule absorbiert wird die Intensität mit 1 auf dem Schirm dargestellt.

Auf der Webseite ist es möglich, die Röntgenquelle in der Abbildung 4.33 rechts in 45° Schritten nach links zu drehen. Dabei ändert sich das resultierende Streifenmuster im Würfel. Momentan wird noch davon ausgegangen, dass die Röntgenstrahlen in der ersten Säule komplett absorbiert werden, dies ist jedoch nicht bei allen Objekten der Fall.

**CT Nonogramm - Wie eine Ebene aus Röntgenbildern rekonstruiert wird** Da die Vorgänge im Inneren des Objekts nicht nachweisbar sind, bleiben zur Rekonstruktion einer Ebene nur die Graustufen auf der Leinwand zurück. Im Beispielwürfel sind dies vereinfacht nur Schwarz- und Weißwerte.

Jede einzelne Ebene kann als CT Nonogramm gesehen werden!

Dazu dienen die Zahlen am Rand des leeren Würfelrasteres. Jede 1 steht für einen weißen und jede 0 für einen schwarzen Streifen!

**Die Erstellung der CT-Nonogramme können Sie hier aktivieren:**

Stufe 1:

Da die einzelnen Röntgenbilder zu dem selben Objekt gehören, können auch die entstandenen Nonogram Ebenen überlagert werden.

In der Ebene zeigt sich dann, wo sich Objekte innerhalb der Röntgenstrahlen befinden, die viel Strahlung absorbieren.

**Die Überlagerung der CT-Nonogramme können Sie hier aktivieren:**

Stufe 2:

Eine Übersicht zur Rekonstruktion für die einzelnen Ebenen:

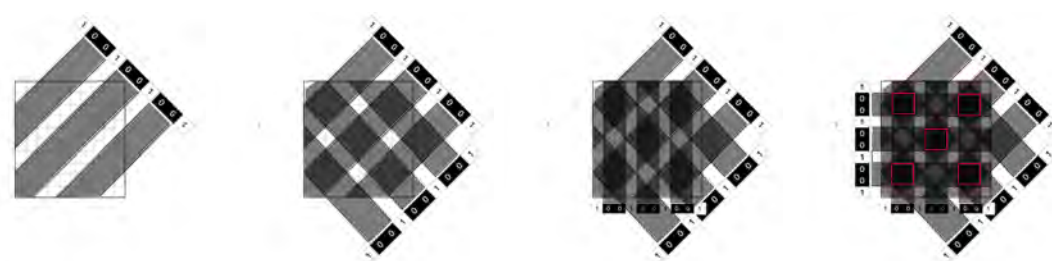
**Abb. 4.34.:** Visualisierung des CT-Nonogramms auf der Webseite, wenn die Stufe 1 ausgewählt ist. Dort, wo die Intensität 0 ist, wird mindestens ein Objekt vermutet, sodass ein Schattenwurf eingezeichnet wird.



#### 4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite

Der Zusammenhang zum Nonogramm wird im letzten Block hergestellt. Mit dem Schalter zu *Stufe 1* auf der linken Seite der Abbildung 4.34 können die Schattenwürfe als Streifen eingblendet werden. Jede 0 besagt, dass keine Röntgenstrahlung den Schirm erreicht und mindestens ein Objekt zwischen Röntgenquelle und Schirm liegen muss. Mit den Pfeiltasten ist es wieder möglich vier Einstellungen der Röntgenstrahlen durchzugehen. Damit treffen die Röntgenstrahlen auf zwei der Seitenflächen und zwei Ecken auf. Mit diesen Informationen kann die Ebene des Würfels rekonstruiert werden.

Dies wird jetzt durch die *Stufe 2* gezeigt. Hier überlagern sich die einzelnen Streifen der Röntgenbilder, wenn der grüne Schalter genutzt wird. Demnach wird die Nummer fünf des Würfels Schritt für Schritt besser sichtbar, wie Abbildung 4.35 von links nach rechts zeigt.



**Abb. 4.35.:** Visualisierung des CT-Nonogramms bei der Überlagerung von vier verschiedenen Röntgenaufnahmen.

Demnach können aus mehreren Röntgenaufnahmen, die eine Intensitätsverteilung der Röntgenstrahlung darstellen, mehrere Schattenstreifen identifiziert werden. Diese geben, wie beim Nonogramm an, ob ein Objekt in der Reihe vorliegt. Werden mehrere Schattenwürfe überlagert, ergibt sich die ursprüngliche Verteilung von absorbierender und nicht absorbierender Materie. Anders als beim Nonogramm wird dieses Rätsel weniger analytisch, als geometrisch gelöst.

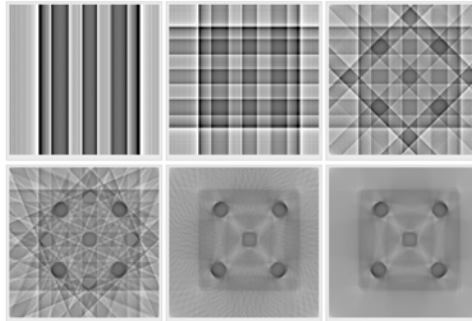
Die Säulen sind in diesem Beispiel komplett absorbierend, sodass diese Vereinfachung der iterativen Rekonstruktion aus Kapitel 2.4.1 gewählt werden kann.

#### 4.4.2. Rekonstruktion realer Röntgenbilder

In vier kurzen Abschnitten werden die theoretisch besprochenen rekonstruierten Ebenen mit dem Datenrekonstruktionsprogramm rechnerisch bestimmt und verschiedene dreidimensionale Objekte rekonstruiert.

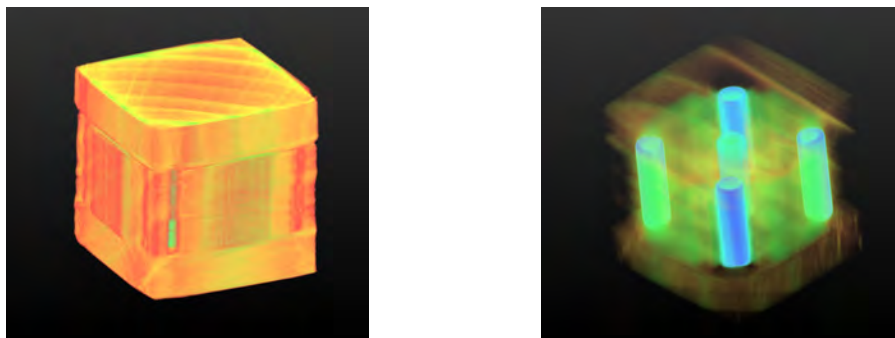


**Die Rekonstruktion eines Würfels der Nummer fünf** Neben dem Verweis auf das Rekonstruktionsprogramm werden hier verschieden viele Röntgenbilder verwendet, um die Ebene zu rekonstruieren (Abb. 4.36).



**Abb. 4.36.:** Datenrekonstruktion mit zwei, vier, acht, 16, 100 und 360 Röntgenbildern.

**Die Darstellung der Rekonstruierten Ebenen in VolView** Nach der Bestimmung der Ebenen ist die Rekonstruktion beendet. Die Darstellung geschieht mit der frei zugänglichen Software VolView, die für alle Betriebssysteme verfügbar ist. Zur Verdeutlichung der freien Drehbarkeit als dreidimensionales Objekt, wurden beide Grafiken aus Abbildung 4.37 animiert dargestellt, sodass sie von oben und der Seite betrachtet werden können.

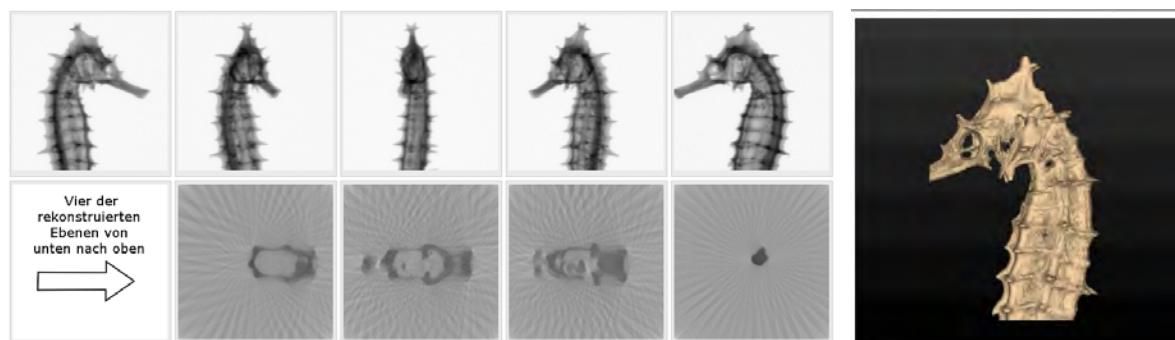


**Abb. 4.37.:** 3D Rekonstruktion in VolView massiv (links) und transparent (rechts).

**Das Seepferdchen entsteht als 3D-Model** Ebenso wird hier der Aufhänger der Startseite wieder aufgegriffen und Ebene für Ebene eine dreidimensionale Darstellung des Seepferdchens aufgebaut (Abb. 4.38).

**Weitere Röntgenbilder rekonstruieren** Der letzte Block gibt einen Anreiz, das Rekonstruktionsprogramm für Röntgenbilder zu testen. Hier sind alle Datensätze aufbereitet

#### 4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite



**Abb. 4.38.:** Von den Röntgenbildern eines Seepferdchens zu den Ebenen bis zur 3D Rekonstruktion in VolView.

und eine dreidimensionale Animation zu den sechs Würfeln, dem Seepferdchen, einer SD-Karte, einem Käfer, einem USB-Stick und einem Zahn hinterlegt. Der Client kann diese per Schalter auswählen und in einem ähnlichen Format wie Abbildung 4.38 betrachten.

### 4.5. Die Anwendung der Röntgenphysik

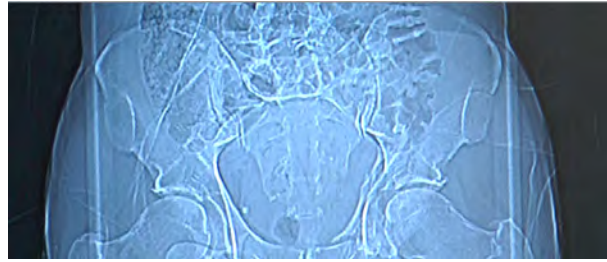
Auf dieser Seite wird dem Nutzer die Anwendung der Computertomographie in der Medizin dargelegt. Dabei wird im ersten Abschnitt der Ablauf einer Computertomographie geschildert. Im zweiten Block wird die Frage geklärt, ob ein so entstandenes dreidimensionales Objekt die Details aus dem Röntgenbild nur besser darstellt oder sogar unsichtbares sichtbar macht. Zu beiden Blöcken wird ein Ausschnitt aus dem Interview mit Prof. Dr. med. Joachim Lotz zur Verfügung gestellt.

**Die Funktionsweise eines modernen Computertomographen** Hier wird der Inhalt aus Kapitel 2.4 wiedergegeben und der Teil des Interviews zum Ablauf einer Computertomographie eingebunden.

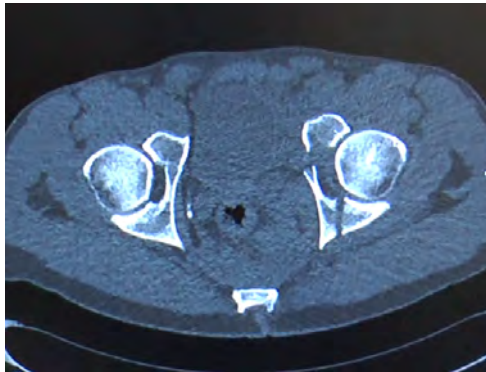
#### **Können Objekte in einem CT-Bild besser oder überhaupt erkannt werden?**

Die Antwort auf diese Frage wurde dem Interview von Herrn Prof. Dr. med. Joachim Lotz entnommen und lautet ganz klar: „Beides“.

Das Beispiel für eine bessere Darstellung des Objekts ist eine Fraktur im Hüftgelenk. Diese ist in Abbildung 4.39 zu sehen. Beim Vergleich zwischen dem rechten und linken Hüftgelenk wird deutlich, dass beim Rechten mehr Risse und unklare Strukturen zu erkennen sind. Doch erst nach der Computertomographie wird das gesamte Ausmaß des Schadens deutlich. In der Abbildung 4.40 links wurde eine Ebene des CTs abgebildet, während rechts das dreidimensionale Objekt zu sehen ist.

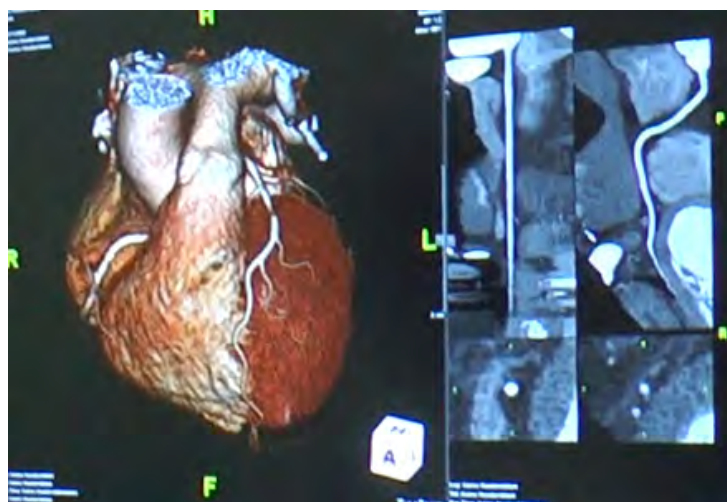


**Abb. 4.39.:** Röntgenbild des Beckenbereichs mit Fraktur auf der rechten Seite.



**Abb. 4.40.:** Rekonstruktion der Fraktur durch ein CT, mit einer Ebene (links) und der dreidimensionalen Darstellung (rechts).

Den genauen Befund erläutert Herr Prof. Dr. med. Lotz in dem Video der Webseite. Das Beispiel, bei dem das Röntgenbild noch keine Diagnose zulässt, ist das Herz. Dieses ist in einem Röntgenbild gar nicht zu erkennen, während in einem Herz-CT alle Einzelheiten des Herzens analysiert werden können, wie die Abbildung 4.41 zeigt.



**Abb. 4.41.:** Rekonstruktion des Herzens durch ein CT (links) und einzelne Ebenenansichten durch das Herz (rechts).

#### *4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite*

Bis in die Spitze können so die einzelnen Adern auf dem rekonstruierten Herzen erkannt und gedeutet werden. Mit dieser medizinischen Erkenntnis endet die Theorie der Webseite und verweist zuletzt auf das Datenrekonstruktionsprogramm und das Impressum. Letzteres beinhaltet die verwendeten Inhalts- wie Bildquellen.

## 4.6. Programm zur Datenrekonstruktion

Den Abschluss der Webseite bildet die Einbettung der 3D-Rekonstruktionssoftware von Jens Dietert in die Webseite [16]. Dabei werden zuerst die nötigen Änderungen im 3D-Rekonstruktionsprogramm erläutert. Es folgen die Beschreibungen zu den drei Unterseiten der Webseite und die Möglichkeit der Visualisierung der rekonstruierten Ebenen mittels VolView.

### 4.6.1. Die Aufbereitung der Rekonstruktionssoftware

Die Software ist in Python geschrieben und somit generell auf jedem Betriebssystem ausführbar. Zuerst werden die aufgenommenen zweidimensionalen Röntgenaufnahmen eingelesen und anschließend findet eine Drehachsenbestimmung und -korrektur, sowie die eigentliche ebenenweise Bildrekonstruktion statt.

Die verschiedenen manuellen Einstellungen können separat in der Initialisierungsdatei *initialisierung.py* geändert werden. Starten lässt sich das Programm, indem die Projektionsaufnahmen in den Ordner „data“ kopiert werden und in der Konsole das Programm *reconstruction.py* aufgerufen wird. Daraufhin werden alle Grafiken zusammen in dem festgelegten Ordner „pictures“ gespeichert.

**Aufbereitung der Software für den Server** Obwohl das Programm für alle Betriebssysteme ausgelegt ist, konnte keine zufriedenstellende Lösung bei der Installation auf Mac Os und Microsoft Windows gefunden werden, sodass der Server auf einem Computer mit Ubuntu aufgesetzt wird. Hier sind die zusätzlichen Bibliotheken für die Software zuverlässig und intuitiv zu installieren und im Anhang A.1.3 angeführt.

Damit das Programm die Röntgenbilder mit mehr als 500 Bildzeilen von Phywe verarbeiten kann, wurde die programminterne Nutzung des Arbeitsspeichers optimiert. Anstatt pro Bildzeile einer Ebene 20 MB an Arbeitsspeicher zu belegen, werden noch maximal 75 MB bei der Berechnung eines gesamten Bildes benötigt. Damit kann das Programm mit jedem heute üblichen Computer verwendet und auf der Webseite eingebunden werden.

**Manuelle Einstellungen setzen** In der Datei *initialisierung.py* können 22 Variablen gesetzt und verändert werden. Damit der Benutzer der Software nicht mit allen Informationen gleichzeitig konfrontiert wird, werden zuerst die ausschlaggebenden Informationen abgefragt. Zu diesen gehören vier Parameter zur Datenverarbeitung und ein bis drei zur Drehachsenbestimmung.

Die aktuellen Werte der Variablen werden im Browser angezeigt und können dort direkt

#### 4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite

geändert werden. In einem php-Skript werden die Daten danach in das python-Skript geschrieben und können so von der Rekonstruktionssoftware verwendet werden. Die genaue Umsetzung ist im Anhang A.1.4 beschrieben.

Die übrigen Variablen können separat in den Experteneinstellungen gesetzt werden.

**Bereitstellung von Datensätzen und Rückgabe der Ergebnisse** Damit verschiedene Datensätze von der Webseite genutzt werden können, wurden die Ordnerpfade variabel angelegt. Demnach können Röntgenbilder aus verschiedenen Ordner aufgerufen werden, indem der Ordnerpfad neu gesetzt wird. Die Rückgabe der Daten wird durch einen Link zum Herunterladen auf der Webseite gewährleistet. Dabei werden alle erstellten Grafiken in einem Archiv komprimiert zur Verfügung gestellt.

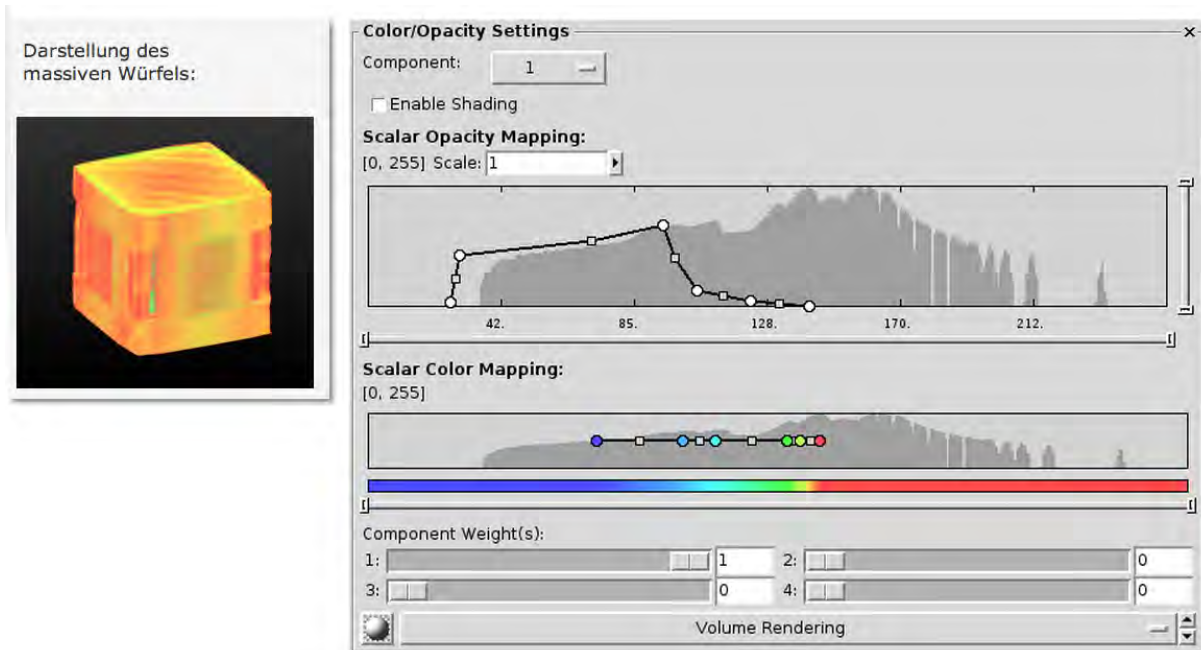
Bei der Nutzung von eigenen Röntgenbildern wird der zuvor festgelegte Ordner „data“ genutzt. So ist es dem Client möglich seine Röntgenbildserie in den Ordner zu legen und das Programm von der Webseite aus zu starten und das Ergebnis herunterzuladen, solange er der Eigentümer des Servers ist.

#### 4.6.2. Anleitung

Die Unterseite 6.1 *Anleitung* zur 3D-Rekonstruktionssoftware besteht aus zwei Blöcken. Bei der Auswahl von Daten, wird dem Nutzer verdeutlicht, dass die Rekonstruktionssoftware auch ohne ein Röntgengerät mit Beispieldatensätzen genutzt werden kann. Da das Programm sehr intuitiv zu bedienen ist, wurde auf eine Schritt für Schritt Anleitung verzichtet und nur kurz der Ablauf der Rekonstruktion geschildert. Der zweite Block befasst sich mit der Visualisierung der rekonstruierten Daten in VolView.

Da das Programm zwingend zur Visualisierung nötig ist, wird hier der Link auf die Webseite zum Herunterladen der Software zur Verfügung gestellt. Das Öffnen der Ebenen in VolView ist selbsterklärend und wird daher nicht weiter beschrieben. Um Schwierigkeiten bei der Nutzung der Software zu vermeiden, wird auf die Einstellung der Parameter zur Visualisierung der unterschiedlichen Dichten in der rekonstruierten Ebene näher eingegangen.

Standardmäßig sind vier Gewichtungskomponenten für die Dichte aktiviert, von der jedoch nur eine benötigt wird. Werden die anderen drei unbenutzten Komponenten nicht deaktiviert, ist die Darstellung eines Objekts sehr schwer. Daher wird auf diese Besonderheit hingewiesen und die genutzten Einstellungen für einen massiven sowie transparenten Würfel mit angegeben. Hier sind die Einstellungen für den massiven Würfel in Abbildung 4.42 zu sehen.



**Abb. 4.42.:** Links ist der massive Würfel zu sehen, der mit den Einstellungen in Vol-View rechts, visualisiert werden kann. Dabei ist oben dargestellt, welcher Bereich der Graustufen dargestellt wird und in der Mitte welche Farbgebung gewünscht ist. Unten ist zu sehen, dass nur die erste Komponente der Gewichtungskomponenten für die Dichte aktiviert ist.

### 4.6.3. Datenrekonstruktion

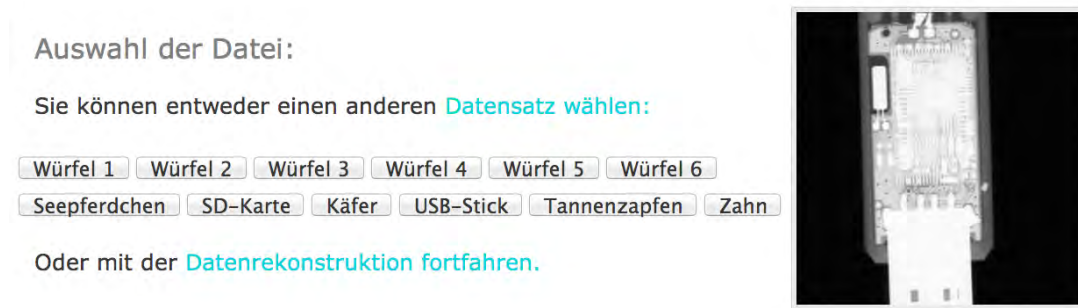
Die Unterseite 6.2 *Datenrekonstruktion* setzt sich aus vier Blöcken zusammen. Der erste befasst sich mit der Datenauswahl, während im zweiten die Einstellungen zu den Daten geändert werden können. Der dritte Absatz dient dem Starten des Programms und der letzte einem Zurücksetzen aller Einstellungen.

**Das Programm zur Datenrekonstruktion** Hier findet die Auswahl statt, ob eigene Daten verwendet werden sollen, oder die auf dem Server hinterlegten Röntgenbilder. Dabei ist darauf zu achten, dass nur der Computer auf dem der Server läuft, auf den Ordner „data“ zugreifen kann.

Dem Nutzer stehen bei der Auswahl verschiedene Datensätze zur Verfügung. Dabei zeigt eine Vorschau an, wie das Objekt als Röntgenbild aussieht (Abb. 4.43). Auf eine visuelle Darstellung wurde bei den selbst aufgenommenen Röntgenbildern verzichtet, da dem Benutzer das Objekt im Regelfall bekannt ist.



#### 4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite



**Abb. 4.43.:** Darstellung der Auswahl eines Datensatzes beim Rekonstruktionsprogramm, hier wurde der USB-Stick gewählt.

**Zwei Schritte zur individuellen Einstellung der Datenrekonstruktion** Die zwei Schritte beziehen sich dabei auf die Datenverarbeitung und die Drehachsenbestimmung.

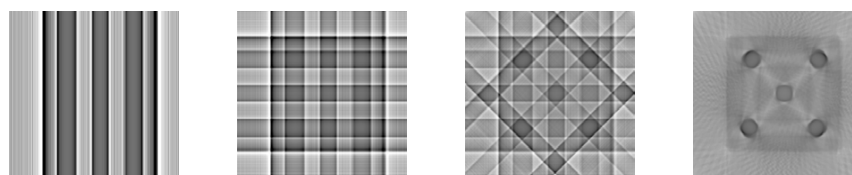
Bei der *Datenverarbeitung* gibt es vier Einstellungen, die im Folgenden wie auf der Webseite erklärt sind. Dabei sind die einzelnen Begriffe türkis markiert und bei der Berührung mit dem Cursor wird ein Informationstext sichtbar.

**Startebene** Bei 0 wird ab der ersten Ebene begonnen zu rekonstruieren. Ansonsten empfiehlt es sich, nach der Bestimmung des Dynamikbereichs, die erste Ebene mit Objekt anzugeben. Typisch ist der Wert 0.

**Endebene** Bei 0 oder „Ende“ wird bis zur untersten Ebene rekonstruiert. Es kann passieren, dass sonst der untere Teil des Objekts nicht rekonstruiert wird. Typisch ist der Wert 0.

**Anzahl der Projektionen** Erst ab etwa 10 genutzten Projektionen wird die Ebene erkennbar. Dies liegt vor allem an der Mehrdeutigkeit der Bilder. Es können so viele Projektionen eingestellt werden wie vorhanden sind. Je mehr Projektionen genutzt werden, desto zeitintensiver ist die Berechnung. 0 bedeutet alle werden genutzt. 2 ist der niedrigste Wert. Werden nicht alle Projektionen verwendet, so werden die genutzten mit in den Ordner kopiert. Gut geeignet ist der Wert 100.

Dazu werden die vier Beispielrekonstruktionen (Abb. 4.44) angezeigt .



**Abb. 4.44.:** Grafiken zu 2, 4, 8 und 100 Projektionen dienen der Verdeutlichung.

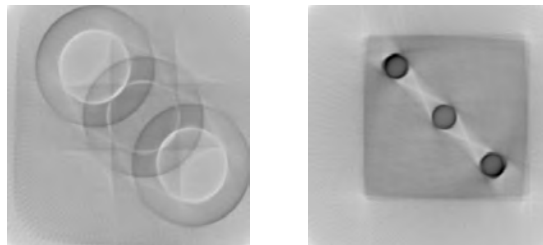


**Dynamikschwelle** Diese Schwelle gibt an, ab wann ein Objekt in den verschiedenen Graustufen des Röntgenbildes zu erkennen ist und kein Rauschen mehr vorliegt. Sie kann gerade bei schwach sichtbaren Objekten zu hoch und bei sehr kontraststarken Objekten zu gering sein. Sie liegt im Bereich von 0 bis 1. Typisch ist ein Wert von 0,2.

Bestätigt werden diese Eingaben mit einem Schalter der Aufschrift *Eingaben übernehmen*. Danach werden die Daten an den Server übertragen. Die Eingabe wird nur übernommen, wenn sie mit einem Punkt als Dezimaltrennung stattfindet, da dieser für das python-Skript notwendig ist. Ebenso sind keine Buchstaben oder Kombinationen von Zahlen und Buchstaben erlaubt. Wird ein ungültiger Wert eingegeben bleibt die Eingabe unbeachtet und das Programm gibt dem Benutzer die Rückmeldung, wie er seine Eingabe ändern muss oder, dass sie ungültig ist. Ebenso wird der aktuelle Wert zur Kontrolle mit ausgegeben.

Bei der *Drehachsenbestimmung* kann der Benutzer zwischen der manuellen Eingabe und der rechnerischen Bestimmung der Drehachse entscheiden.

Bei der *manuellen Eingabe* kann der Wert für die Verschiebung der Drehachse eingegeben werden. Der Wert zur Verschiebung der Drehachse liegt zwischen  $-50$  und  $+50$  Pixeln, er kann eine Rekonstruktion verbessern oder verschlechtern, wie Abbildung 4.45 zeigt.



**Abb. 4.45.:** Grafiken zu einer schlechten Justierung der Drehachse (links) und einer guten (rechts).

Danach kann hier die Eingabe übernommen werden, nach denselben Regeln wie zuvor bei der Datenauswahl.

Bei der *rechnerischen Bestimmung* können drei Werte für die Berechnung der Drehachse eingegeben werden.

**Winkel-Ebenen-Zahl** Gemeint ist die Anzahl der untersuchten Winkeleinstellungen pro Ebene, um die Drehachse der Ebene zu bestimmen. Bei  $m$  Winkeleinstellungen liegt

#### 4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite

die Zahl zwischen 1 und  $m/2 - 1$ . Mehr als 100 Schritte sind nicht empfehlenswert und werden nicht akzeptiert. Als sinnvoll hat sich ein Wert von 10 erwiesen.

**Schrittweite** Gemeint ist der Abstand zwischen den untersuchten Ebenen bei der Drehachsenbestimmung. Dabei liegt der Wert zwischen 1 und 100. Typisch ist ein Wert von 20 bei 500 Zeilen.

**Fehler** Dieser Fehler bezeichnet die Unsicherheit bei der Bestimmung der Drehachse. Je größer dieser Wert ist, desto höher muss die Übereinstimmung bei mehreren Bestimmungen innerhalb einer Ebene sein. Der Wert liegt zwischen 0 und 1. Typisch ist ein Wert von 0,95.

Auch hier folgt eine Übergabe, sodass alle Einstellungen zur Rekonstruktion angegeben wurden.

**Starten Sie das Programm!** Da das Programm je nach gewählter Einstellung sehr rechenintensiv ist, dauert es einige Zeit, bis die Ebenen rekonstruiert sind. Daher wird der Benutzer nach dem Klick auf den Startschalter gefragt, ob er seine Einstellungen sinnvoll gewählt hat. Er wird ebenso darauf hingewiesen, dass er automatisch auf die folgende Seite weitergeleitet wird.

Zur Abschätzung der Laufzeit des Programms ist die Tabelle 4.2 in diesem Block mit angegeben. Somit kann der Benutzer für die Rekonstruktion von 100 Ebenen seine Wartezeit abschätzen.

<b>Anzahl der Projektionen</b>	2	4	8	10	16	20	50	100	200	300
<b>Laufzeit in Minuten</b>	1	1	1	1	1,5	2	5	10	15	20

**Tab. 4.2.:** Tabelle zur Laufzeit der 3D-Rekonstruktionssoftware für unterschiedliche Anzahlen an genutzten Projektionen bei der Rekonstruktion von 100 Ebenen.

**Reset aller Parameter** Gerade bei der ersten Nutzung des Programmes empfiehlt es sich vorherige Einstellungen zurückzusetzen. Die zugehörige Funktion ist dem Schalter *Reset* hinterlegt. Die Standardeinstellungen sind bei den einzelnen Punkten als typische Werte mit angegeben.

#### 4.6.4. Datenlogger zur Erstellung der rekonstruierten Ebenen

Diese Seite wird immer nach dem Start des Rekonstruktionsprogramms aufgerufen. Dabei befindet sich hier der Datenlogger zum Rekonstruktionsprogramm. Nach einer erfolgrei-

chen Erstellung der Ebenen, mit Drehachsenbestimmung, gibt der Datenlogger Rückmeldung über den Verlauf der Rekonstruktion.

Hervorzuheben ist der erste Wert zum Dynamikbereich. Er gibt an, ab welcher Ebene ein Objekt, bei der eingegebenen Dynamikschwelle erkannt wurde.

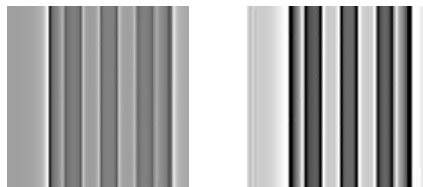
Ebenso ist die letzte Zeile für die Experteneinstellungen von Bedeutung. Hier wird der optimale Schwarz- sowie Weißwert der letzten Ebene angegeben. Dieser kann in den folgenden Experteneinstellungen verwendet werden.

Direkt unter diesem Protokoll ist ein Link, sodass die rekonstruierten Ebenen und Grafiken heruntergeladen werden können.

### 4.6.5. Experteneinstellungen

Die Seite 3.6 *Experteneinstellungen* besteht aus drei zusätzlichen Schritten, das Rekonstruktionsprogramm zu bedienen. Im Anschluss kann auch hier das Programm gestartet und zurückgesetzt werden. Dabei werden dem Benutzer dieselben Informationen zur Verfügung gestellt, wie auf der Seite des 6.2 *Datenrekonstruktionsprogramms* zuvor (siehe dazu „Starten Sie das Programm.“ und „Reset aller Parameter“).

**1. Schritt: Farbeinstellungen zu den Ebenen** Hier können der Schwarzwert und der Weißwert aus dem Datenlogger eingetragen werden, um eine kontraststärkere Farbgebung der Ebenen zu erhalten (Abb. 4.46). Dazu muss zuerst eine Rekonstruktion durchgeführt worden sein, weswegen diese Einstellungen zu den Experteneinstellungen gehört.



**Abb. 4.46.:** Grafiken zu einer Ebene vor dem Farbabgleich links und danach rechts.

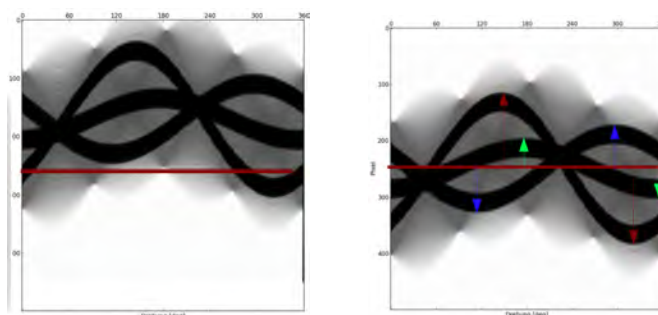
**2. Schritt: Erstellen zusätzlicher Grafiken** In diesem Abschnitt können bis zu sechs zusätzliche Grafiken erstellt werden:

**Sinogramme** Zur Drehachsenbestimmung kann ein Sinogramm verwendet werden. Dieses wird pro Ebene erstellt, indem immer ein Streifen der Ebene pro Projektion aufgetragen wird. Je mehr Projektionen verwendet werden, desto klarer werden die einzelnen Sinuskurven auf dem Sinogramm. Eine Sinuskurve entsteht immer, wenn sich ein Objekt in Drehung befindet. Die Drehachse ist richtig eingestellt, wenn alle

#### 4. Vom Röntgenbild zur Computertomographie - die interaktive Webseite

Objekte (Sinuskurven) um die Mittellinie oszillieren. Daher lohnt es sich, ein Sinogramm vor und nach der Drehachsenkorrektur zu erstellen.

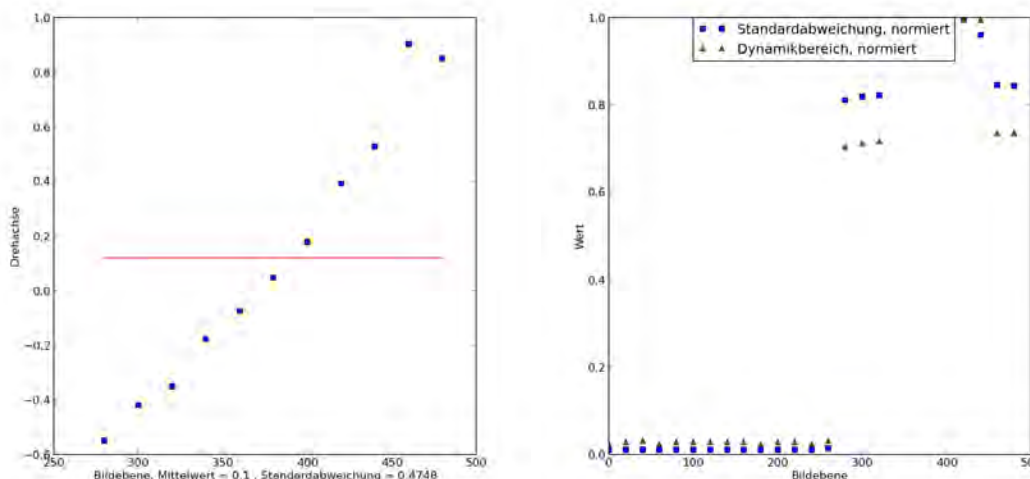
Demnach kann sich der Benutzer entscheiden, ob er ein Sinogramm vorher, nachher oder sowohl als auch erstellen lassen will, wie sie in Abbildung 4.47 zu sehen sind.



**Abb. 4.47.:** Sinogramm für den Würfel der Nummer drei bei einer falschen Drehachse (links) und korrigiert mit nachträglich eingezeichneten Amplituden (rechts).

**RGB-Format** Normalerweise werden die einzelnen Grafiken nur in Graustufen gespeichert. Hier können Sie jedoch auch alle Ebenen im RGB-Format erhalten. Möchte der Nutzer diese Funktion nutzen, so werden beide Formate abgespeichert.

**Drehachsenmittelwerte** Normalerweise wird diese Grafik nicht ausgegeben. Hier können Sie jedoch auch die Standardabweichung bei der Berechnung der Drehachse ausgeben. Der Benutzer kann somit die Grafik 4.48 links erstellen und speichern lassen.

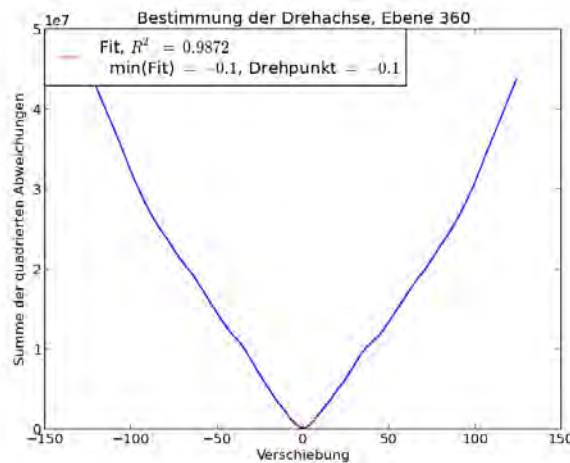


**Abb. 4.48.:** Darstellung der Mittelwerte mit Standardabweichung bei der Bestimmung der Drehachse (links) und zur Bestimmung des Dynamikbereichs (rechts).

**Dynamikbereichbestimmung** Hier ist es dem Nutzer möglich, die Grafik 4.48 rechts zur Bestimmung des Dynamikbereichs in seinem Ordner ablegen zu lassen. Diese zeigt an, ab wann ein Objekt im Röntgenbild registriert wurde und lässt so erkennen, ab welcher Schwelle der Dynamikbereich überschritten wurde.

**Drehachsenbestimmung** Die Grafiken zur Drehachsenbestimmung werden zu jeder Ebene im Ordner des Nutzers mitgespeichert. Es handelt sich dabei um eine quadratische Auftragung zur Bestimmung des Minimums. So kann die Abweichung zur Drehachse bestimmt werden (Abb. 4.49).

Bei einer separaten Auftragung der Ebenen (siehe Schritt 3 der Experteneinstellungen) werden außerdem Histogramme erstellt. Dies kann zur Abschätzung der Unsicherheit nützlich sein.



**Abb. 4.49.:** Eine der Grafiken der Ebenen zur Bestimmung der Drehachse mit Hilfe eines Parabelfits.

**3. Schritt: Datenverarbeitung bei der Drehachsenbestimmung** Bei der Drehachsenbestimmung werden normalerweise die einzelnen Drehachsen pro Ebene erst aufsummiert und danach ein Fit gebildet. Hier können jedoch auch alle Ebenen separat bestimmt und danach erst ein Mittelwert gebildet werden. Demnach ist es hier möglich, einzelne Grafiken pro Ebene auszugeben.

Zusätzlich kann optional für jede Ebene der einzelne Fitparameter pro bestimmter Drehachse in einer Textdatei mitgespeichert werden.

Zählt man die Grundeinstellungen und die Extraeinstellungen zusammen, so können alle Einstellungen aus der 3D-Rekonstruktionssoftware separat verändert und zur Datenrekonstruktion genutzt werden.



# 5. Die Auswertung der Statistik zum Röntgen-Quiz

Das Röntgen-Quiz aus Kapitel 4.3 ist darauf ausgelegt, auf der IdeenExpo 2013 in Hannover von Menschen verschiedenster Altersstufen und mit unterschiedlich gut ausgeprägtem Vorstellungsvermögen durchgeführt zu werden. Dabei werden alle Daten des Quiz pro Durchlauf aufgenommen und gespeichert. Die Visualisierung der Ergebnisse des Röntgen-Quiz soll dabei allen Benutzern durch die Farbgebung erleichtert werden, da die Säulen im Würfelmodell dieselbe Farbe haben, wie die zugehörigen Säulen im Histogramm. Dies zeigt Abbildung 4.31 Kapitel 4.3.4 für den Würfel der Nummer sechs.

Bisher wurden nur wenig repräsentative Daten aufgenommen, da die meisten Benutzer ein gutes Basiswissen zu Projektionen auf Grundlage eines Physik- oder Mathematikstudiums vorweisen konnten. Demnach wird in diesem Kapitel das Röntgen-Quiz spekulativ ausgewertet und die Ergebnisse nach der IdeenExpo 2013 angehängen.

Die vorläufigen Statistiken können im Anhang A.3 Abbildung A.3 bis A.8 zu den einzelnen Würfeln betrachtet werden.

## 5.1. Mögliche Taktiken beim Lösen des Röntgen-Quiz

Bei der Bedienung des Röntgenquiz ist es vorgesehen, seine Antworten nicht im Nachhinein zu ändern. Denn die Mehrdeutigkeit der Röntgenbilder lässt Schritt für Schritt nach und soll auch so im Quiz nachvollzogen werden. Es ist immer möglich die vorangegangenen Bilder zu betrachten, jedoch nicht seine Antwort im Nachhinein zu ändern. Dabei können fünf verschiedene Varianten bei der Lösung des Röntgenquiz auftreten

**Lösen durch logisches Kombinieren** Bei dieser Variante betrachtet der Benutzer jedes Röntgenbild und markiert die Würfelzahlen, bei denen die Anzahl der projizierten Säulen mit der Anzahl an Würfelpunkten übereinstimmt, die nicht hintereinander liegen. Im zweiten Schritt wird dies auf der Grundlage der schon markierten Würfelzahlen

## 5. Die Auswertung der Statistik zum Röntgen-Quiz

wiederholt. Bei dieser Variante bleibt zum Schluss immer genau ein Würfel als Lösung übrig.

**Lösen durch genaues Hinschauen** Beim genauen Betrachten einer Röntgenaufnahme, können dem Benutzer feine Unterschiede bei den Säulen auffallen. Dabei liegen die Säulen entweder nicht perfekt hintereinander, sodass zwei Säulen in Reihe erkannt werden. Oder der Würfel stand bei der Röntgenaufnahme leicht schräg, sodass ein Teil der Tiefeninformation erhalten bleibt. Dabei kann im Röntgenbild ein leichter Versatz der Säulen erkannt werden.

Bei der Auswahl der Röntgenbilder wurde darauf geachtet, dass diese Effekte möglichst gering sind. Wird der Würfel dennoch aus diesem Grund früher richtig erkannt, erhält der Benutzer eine Rückmeldung für die Richtigkeit seiner Antwort. Jedoch wird das Quiz nicht als perfekt gelöst angesehen.

In der Statistik würde diese Lösungsvariante die richtigen Würfelzahlen stärker hervortreten lassen, als die Würfelzahlen, die durch Mehrdeutigkeit im Röntgenbild entstehen.

**Lösen durch mehrmaliges Betrachten der Röntgenbilder** Entscheidet sich der Benutzer dazu erst alle Röntgenbilder anzuschauen, kann er seine Antworten nicht mehr nachträglich ändern. Auch wenn er danach im ersten Schritt des Quiz den richtigen Würfel auswählt, wird die Auswahl in der individuellen Auswertung nicht mit angezeigt. Demnach kann er höchstens im letzten Schritt den richtigen Würfel wählen. Dadurch kann es vorkommen, dass im vierten Schritt mehr Einträge in Summe vorliegen, als in den drei Schritten zuvor.

**Lösen durch Raten** Neben dem taktischen Probieren, Hinschauen oder Durchwechsellern der Röntgenaufnahmen, kann der Benutzer auch einen Würfel von Anfang an raten und als richtig markieren. Dabei kann er Glück haben und den Richtigen tippen oder aber falsch liegen. Im Endeffekt wird dadurch höchstens die Statistik verfälscht, da eine perfekte Lösung vorsieht, dass alle Zwischenschritte richtig angeklickt werden.

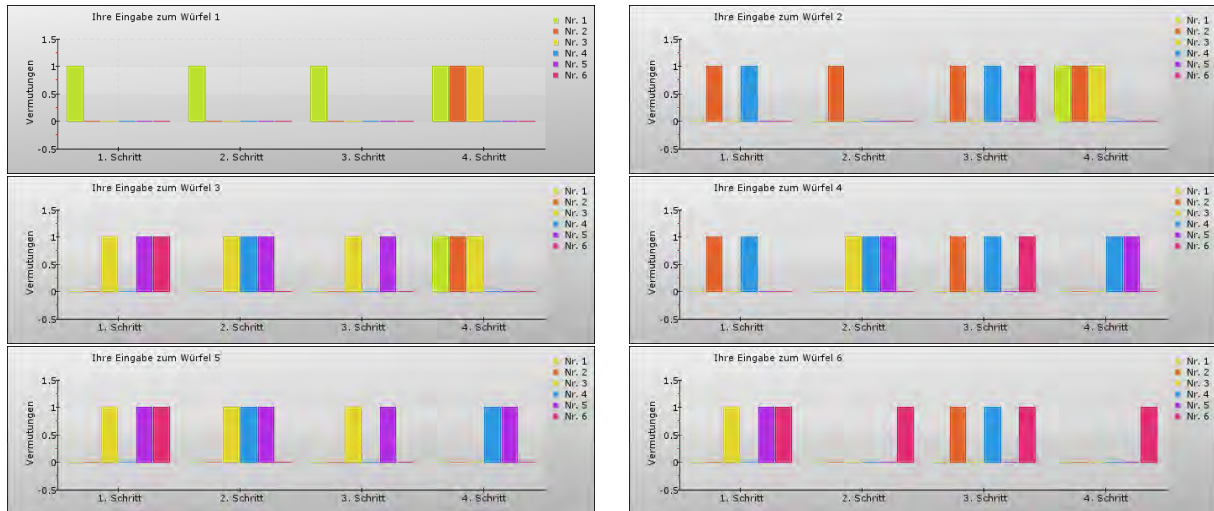
Falls der Benutzer zuletzt mehr als einen Würfel markiert hat, wird das Quiz zwar der Statistik hinzugefügt, doch die Rückmeldung gibt den Hinweis, dass nur ein Würfel zum Schluss ausgewählt werden soll. Demnach werden in der Statistik einige Würfel angeführt, die sonst nicht ausgewählt würden. Diese zusätzliche Verteilung wird im Folgenden als statistisches Grundrauschen bezeichnet.

**Lösen mit falscher Spielidee** Eine generelle Fehlerquelle beim Röntgenquiz liegt darin, dass die Spielidee nicht verstanden wird. In diesem Fall könnte die Abhängigkeit zwi-



## 5.2. Diskussion und Fehlerbetrachtung zur Statistik des Röntgen-Quiz

sehen den einzelnen Röntgenbildern nicht beachtet werden und jedes Röntgenbild wird für sich ausgewertet. Demnach würden die in Abbildung 5.1 gezeigten individuellen Lösungen entstehen. Das Resultat ist, dass in jeder Einzelgrafik nur eine Würfelzahl in allen vier Schritten auftritt. Diese Würfelzahl hätte das Quiz gelöst.



**Abb. 5.1.:** Lösungen des Röntgenquiz, bei der Spielvorstellung, dass die Röntgenaufnahmen unkorreliert sind.

Demnach erhöht sich durch diese falsche Spielidee ein systematisches Rauschen, für jeden einzelnen Würfel in der Statistik. Jedoch wird gleichzeitig die richtige Lösung immer hinzugenommen, sodass der Trend zum richtigen Würfel erhalten bleibt.

## 5.2. Diskussion und Fehlerbetrachtung zur Statistik des Röntgen-Quiz

Die hier gewählte Reihenfolge bei der Aufbereitung der Ergebnisse, richtet sich nach der Unterscheidbarkeit der Würfel nach dem ersten Schritt im Röntgenquiz. Es gibt einen Würfel mit einer Säule, zwei mit zwei Säulen und drei Würfel mit drei Säulen im ersten Röntgenbild, also dem ersten Schritt des Quiz.

Die Abbildung 5.2 zeigt die vier Schritte im Röntgenquiz für den Würfel der Nummer eins im unteren Teil. Im oberen Abschnitt ist die Aufsicht des Würfelmodells abgebildet, mit dem die Richtung der Röntgenphotonen durch die Welle mit Pfeilspitze symbolisiert wird. Im Quiz ist der obere Teil der Abbildung nicht zu sehen.

Der Würfel der Nummer eins ist der Einzige, der aus jeder Richtung nur eine Säule aufweist und schon im ersten Schritt erkannt werden kann, wie im Vergleich zu Abbildungen

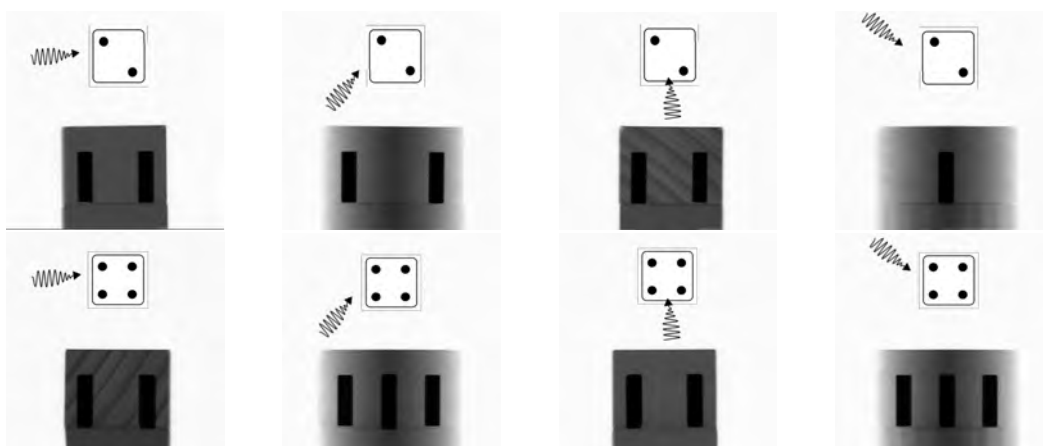
## 5. Die Auswertung der Statistik zum Röntgen-Quiz



**Abb. 5.2.:** Schritt 1 bis 4 des Röntgenquiz zum Würfel Nummer eins, mit Richtung der Röntgenphotonen in der Aufsicht.

5.3 und 5.4 auffällt. Demnach wird bei diesem Würfel die beste Verteilung erwartet. Der Fehler durch genaues Hinschauen wird hierbei wegfallen, da nur eine Säule zu sehen ist und nur eine Säule vorliegt. Auch die Notwendigkeit zum Durchblättern oder Raten ist bei diesem Würfel sehr klein. Demnach sollte die Verteilung der vier Schritte einen sehr deutlichen Anstieg bei der Nummer eins aufweisen und ansonsten ein geringes Grundrauschen, das beim Raten von Lösungen nicht vermieden werden kann. Falls im vierten Schritt eine Zunahme bei den Nummern zwei und drei festgestellt wird, kann dies auf das *Lösen mit falscher Spielidee* zurückgeführt werden.

Bei den Würfeln der Nummer zwei und vier sind im ersten Schritt zwei Säulen im Röntgenbild zu sehen, wie auch die Abbildung 5.3 zeigt.



**Abb. 5.3.:** Schritt 1 bis 4 des Röntgenquiz zum Würfel Nummer zwei oben und zur vier unten, mit Richtung der Röntgenphotonen in der Aufsicht.

Die Reihenfolge der Winkeleinstellungen bei den Röntgenphotonen ist immer die Selbe und wird auch hier zur Verdeutlichung über den Röntgenbildern angezeigt. Anders als bei dem 1er-Würfel, können die beiden Würfel erst im zweiten Schritt voneinander unterschieden werden.

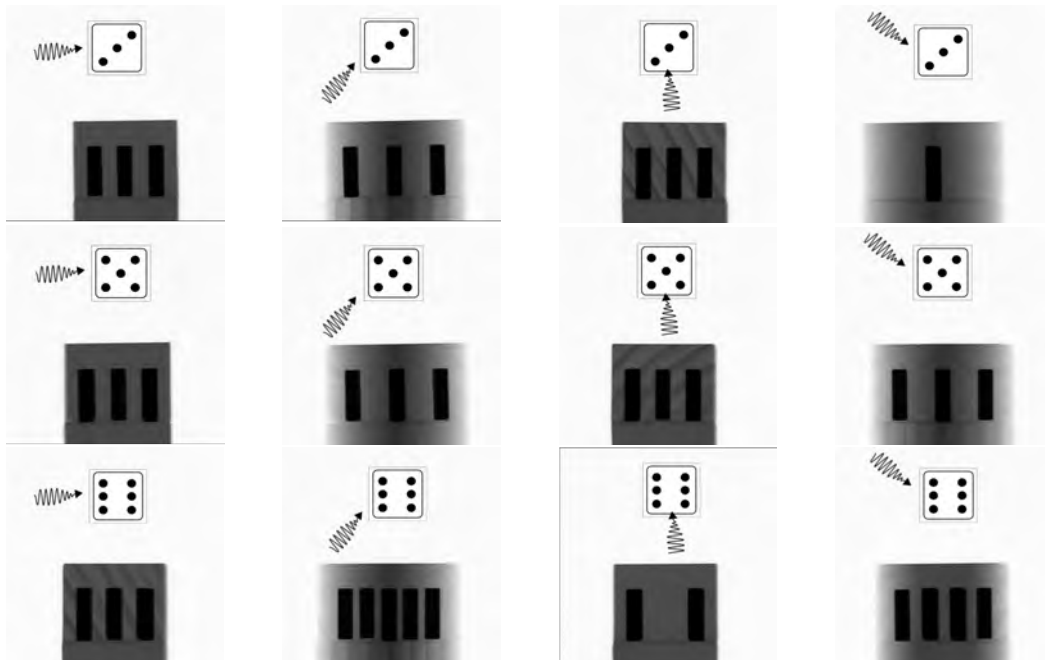
Auf den ersten Blick kann der 1er-Würfel ausgeschlossen werden, da er nur eine Säule

## 5.2. Diskussion und Fehlerbetrachtung zur Statistik des Röntgen-Quiz

hat. Auch die Würfel der Nummer drei und fünf zeigen aus keiner Winkeleinstellung in der Projektion zwei Säulen. Der einzige Würfel, der auch zwei Säulen nach dem Röntgen zeigen kann ist der 6er-Würfel. Jedoch wird diese Anordnung der Säulen erst im dritten Schritt und nicht im ersten Schritt erreicht, (dazu Abbildung 5.4 unten). Dennoch sei beachtet, dass der 6er-Würfel deshalb ausgewählt wird.

Abgesehen vom statistisch verteilten Grundrauschen durch *Lösen durch Raten* wird das systematische Grundrauschen der Abbildung 5.1 oben rechts für den 2er-Würfel und in der Mitte rechts für den 4er-Würfel erwartet.

Falls im ersten Schritt des Röntgen-Quiz drei Säulen zu sehen sind, können dafür der 3er-, 5er- oder 6er-Würfel als Objekt angenommen werden, wie auch Abbildung 5.4 zeigt.



**Abb. 5.4.:** Schritt 1 bis 4 des Röntgenquiz zum Würfel Nummer drei oben, fünf mittig und sechs unten, mit Richtung der Röntgenphotonen in der Aufsicht.

Im zweiten Schritt kann der 6er-Würfel von den zwei anderen Würfeln unterschieden werden, während der 3er- und 5er-Würfel erst im vierten Schritt ein anderes Röntgenbild aufzeigen. Zusätzlich könnte bei dem 6er-Würfel die Vermutung auftreten, dass er im zweiten Schritt keine vier sondern drei Säulen in der Projektion zeigt. Dies wäre ebenso in der Statistik im zweiten Schritt zu erkennen, da diese bei einem 3er- oder 5er-Würfel nicht ausgeschlossen würde.

Hinzu kommen, wie zuvor, sowohl statistische als auch systematische Fehler, wobei letz-

## 5. Die Auswertung der Statistik zum Röntgen-Quiz

tere der Abbildung 5.1 entnommen werden können.

Anhand dieser Beschreibung können die entstehenden Grafiken nach der IdeenExpo 2013 ausgewertet werden. Im Jahr 2011 haben über 310.000 Besucher die einzelnen Ausstellungsstände besucht und begeistert an den Experimenten zu Naturwissenschaft und Technik mitgewirkt. Demnach wird die Statistik des Röntgen-Quiz hoch genug sein, um zu erkennen, ob die Besucher der IdeenExpo 2013 aus den Röntgenbildern das Objekt rekonstruieren können<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>Nachtrag: Im Jahr 2013 besuchten sogar 432.000 Interessenten die IdeenExpo, wobei das Röntgen-Quiz etwa 100 mal gelöst wurde. Die zugehörigen Grafiken können im Anhang A.3 betrachtet werden. Ebenso ist eine kurze Stellungnahme zu den einzelnen Grafiken im Bezug auf die Fehlerbetrachtung aus Kapitel 5 gegeben.

## 6. Didaktische Aufbereitung

Im letzten Kapitel dieser Masterarbeit soll der didaktische Teil in den Vordergrund rücken. Da sich diese Webseite an Schülerinnen und Schüler (SuS) der Sekundarstufe II richtet, orientiert sie sich nicht nur am Wissensstand der Lernenden, sondern auch am Kerncurriculum der Sekundarstufe II [24].

Dabei werden bekannte Fehlvorstellungen angesprochen und auf die Webseite bezogen. Zur Nutzung der Webseite im Unterricht muss ein thematischer Übergang des Unterrichtsstoffs zur Webseite hergestellt werden. Mögliche Eingliederungen und didaktische Anregungen sind in diesem Kapitel zu finden.

### 6.1. Fehlvorstellungen aufdecken und korrigieren

Das Themengebiet der Röntgenphysik umfasst sowohl in der Sekundarstufe I als auch in der Sekundarstufe II mehrere Bereiche der Physik. Dazu gehören verschiedene Teilchenmodelle, welche zur Erklärung der Entstehung von Röntgenstrahlung genutzt werden und die Einführung der Atom- und Quantenphysik. Hierbei wird die Entstehung und Absorption der Röntgenphotonen aufgebaut und vertieft [25].

**Schülervorstellungen zum Teilchen- und Atommodell** Im Folgenden werden die Schülervorstellungen der charakteristischen Merkmale von Teilchen im Allgemeinen aufgelistet. Dabei handelt es sich nicht nur um Vorstellungen in der Sekundarstufe II, jedoch sollten Lehrerinnen und Lehrer um diese Vorstellungen bei Teilchen wissen, damit die Herkunft der Verständnisprobleme der SuS eingeordnet werden kann:

- Kleinsten Teilchen wie Protonen, Neutronen oder Elektronen werden makroskopische Eigenschaften zugeschrieben, wie zum Beispiel: Temperatur, Farbe, Geruch, Form und Konsistenz.
- Zwischen den Teilchen eines Stoffes befindet sich Luft, so auch zwischen Elektronen und Atomkern. Dieser Gedanke entsteht, da zwischen den Teilchen „nichts“ ist und Luft mit „nichts“ in Verbindung gebracht wird.

## 6. Didaktische Aufbereitung

- Oder zwischen den Teilchen befindet sich der selbe Stoff in kontinuierlicher Form: Zwischen den Wassermolekülen befinden sich dementsprechend Wasserteilchen.
- Größen und Verhältnisse sind den SuS nicht klar, so wird zum Beispiel das Elektron im Verhältnis zum Atomkern viel größer eingeschätzt, als es wirklich ist. Dies kann bei der Behandlung von Wirkungsquerschnitten und Absorption zu Komplikationen führen.
- Ein Elektron hat eine fest vorgeschriebene Bahn, um den Atomkern herum.

Insgesamt werden verschiedene Fehlvorstellungen durch unpassende Analogien und Beispiele verstärkt. Daher ist das Arbeiten mit Modellen eine wichtige Voraussetzung für den naturwissenschaftlichen Unterricht. Auf der Webseite ist dies bei der schematischen Darstellung der Entstehung von Röntgenstrahlung durch Überlagerung von Bremsstrahlung und charakteristischer Strahlung der Fall (Abbildung 4.8 Kapitel 4.2.2). Dabei wird ausdrücklich betont, dass die Darstellung an das Bohrsche Atommodell angelehnt ist.

**Schülervorstellungen zu Quantenobjekten** Bei der Einführung und Analyse von Quantenobjekten, wird die klassische Physik verlassen. Gerade mit diesem Übergang und der Aufhebung der bekannten alltäglichen Strukturen haben SuS Schwierigkeiten:

- Alle Objekte, auch Quantenobjekte, haben zu jeder Zeit einen festen Ort. Demnach fehlt den SuS das Bewusstsein der Unschärferelation.
- Die elektromagnetische Welle ist sowohl ein Teilchen, als auch eine Welle, oder nur eins von beidem. (Obwohl beides nur ein Modell der Wirklichkeit ist und keine der Beschreibungen real zutreffen.)

Die Darstellung eines Photons auf der Webseite wird durch eine Welle mit Pfeilspitze angedeutet. Dabei soll sowohl der Wellencharakter als auch der Teilchencharakter des Photons symbolisiert werden. Jedoch entspricht dies nicht einer realen Abbildung.

Die Stärkung der Bewusstheit für Modelle ist in diesem Bereich der Physik ausschlaggebend. Dennoch sollten die Grundlagen im Verständnis von Modellen schon in der Sekundarstufe I gelegt werden.

## 6.2. Eingliederung in das Kerncurriculum Niedersachsen

Der Themenbereich **Atom- und Kernphysik** sollte den SuS aus der Sekundarstufe I bekannt sein. In den inhaltlichen Kompetenzen beim Übergang zur Sekundarstufe II wird vorausgesetzt, dass  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -, Röntgen- und UV-Strahlung anhand ihrer Eigenschaften beschrieben werden können. Die Anwendungsgebiete sind dabei die Kernkraft oder der medizinische Bereich. Eine wichtige Grundlage der prozessbezogenen Kompetenzen ist die mathematische Beschreibung des radioaktiven Kernzerfalls im Bezug zur Halbwertszeit  $t_{1/2}$ . Diese wird eingeführt und vertieft, sodass aus einer Abklingkurve  $t_{1/2}$  abgelesen werden kann [24].

Die Themenbereiche **Atomkern, Atomhülle und Quantenobjekte** sind in der Sekundarstufe II angesiedelt und knüpfen an das Vorwissen der Sekundarstufe I an. So wird unter Anderem erwartet, dass die SuS in der Lage sind einen radioaktiven Zerfall mittels Exponential- oder Logarithmusfunktion zu beschreiben. Hier wird direkter Bezug zur Abklingkurve des radioaktiven Zerfalls genommen.

Zusätzlich wird das „Röntgenbremsspektrum als Energieübertrag von Elektronen auf Photonen“ erläutert. Dazu ist es nötig, das Wissen zur Entstehung der Röntgenstrahlen aus der Sekundarstufe I aufzufrischen, auch wenn dies nicht explizit erwähnt wird. Kurse auf erhöhtem Anforderungsniveau sollen zusätzlich dazu in der Lage sein, aus einem Röntgenspektrum das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  zu bestimmen. Die Vorstellung, dass Teilchen ihre Energie  $E$  in Paketen, den Quanten, abgeben können, ist eine essentielle Eigenschaft der Quantenobjekte. Diese grundlegende Theorie ist für den weiteren Erfolg in der Sekundarstufe II wichtig und sollte daher gut gefestigt werden.

Die Existenz von Energieniveaus der Elektronen in der Atomhülle wird bei Kursen auf erhöhtem Anforderungsniveau zusätzlich am Beispiel des charakteristischen Spektrums der Röntgenstrahlen erläutert. Hier sollen die SuS anhand von Linienspektren der Röntgenstrahlen auf die Annahme diskreter Energieniveaus in der Atomhülle schließen. Gleichzeitig werden prozessorientierte Kenntnisse in der Bestimmung der Wellenlänge von Spektrallinien vertieft und den zugehörigen Energieübergängen zugeordnet [24]. Das Modell der gequantelten Energie von Teilchen überlagert sich dabei mit deren Welleneigenschaften.

Im Themenbereich **Schwingungen und Wellen** wird ausführlich auf die *harmonische Schwingung* und deren Ausbreitung eingegangen. Im Unterricht sollen die SuS

## 6. Didaktische Aufbereitung

lernen, eine harmonische Schwingung graphisch darzustellen und sie mit Hilfe von Amplitude  $A$ , Periodendauer  $T$  und Frequenz  $\nu$  zu beschreiben. Dabei sollen die SuS entweder die Zeigerdarstellung oder die Sinuskurve verwenden. Im Anschluss wird die Ausbreitung harmonischer Wellen hinzugenommen, sodass als weitere Charakteristika Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$ , Phase  $\varphi$  und Wellenlänge  $\lambda$  hinzukommen. Mit diesem Wissen soll der Zusammenhang von Wellenlänge und Frequenz mit der zugehörigen Gleichung  $c = \lambda \cdot \nu$  begründet werden [24].

Beim Arbeiten mit Wellen ist es besonders wichtig, dass die verwendeten Modelle der Welle erläutert werden können, damit eine Mathematisierung möglich wird. Denn nur dadurch, dass die Welle periodisch gleichmäßig, also harmonisch, schwingt, ist eine Beschreibung mittels Sinusfunktion möglich. Als elektromagnetische Welle kann die Röntgenstrahlung als Beispiel einer Transversalwelle angeführt werden. Explizit wird sie jedoch erst bei der Bestimmung der Wellenlänge im Bezug zur Bragg-Reflexion erwähnt.

Die inhaltsbezogenen und prozessorientierten Kompetenzen werden einerseits direkt auf der Webseite eingebettet und können andererseits selbstständig erarbeitet werden. Dieses Zusammenspiel von theoretischem Inhalt und eigenständigem Recherchieren von Sachverhalten wird im folgenden Kapitel erörtert.

### 6.3. Anwendung der Webseite im Unterricht

Neben einen informativen und unterhaltsamen Charakter hat diese Webseite das Anliegen, Erkenntnisse und Phänomene im Bezug zur Röntgenphysik zu vermitteln. Dabei soll nicht ausschließlich der reguläre Schulstoff ausgearbeitet werden, sondern für SuS interessante technische und medizinische Aspekte liefern. Dabei stellt die Webseite keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll variabel im Unterricht Anwendung finden.

#### 6.3.1. Anknüpfen an Bekanntes

Schon auf der Startseite wird an das Vorwissen der SuS angeknüpft, indem sie einem Röntgenbild gegenübergestellt werden. Jedoch sollen keine schlechten Erinnerungen mit Knochenbrüchen oder Zahnarztbesuchen hervorgerufen, sondern die Faszination an der Rekonstruktion eines dreidimensionalen Objektes geweckt werden.

Auf der Seite 2.1 *Die Entdeckung* wird davon ausgegangen, dass den SuS die Welle als theoretisches Konstrukt bekannt ist. Beispielsweise sollten Schallwellen als Longitudinalwellen bereits in der Schule durchgenommen worden sein, um an dieses Wissen mit



der elektromagnetischen Welle als Transversalwelle anknüpfen zu können. Zum Auffrischen der Erinnerung folgt in einer kleinen Aufgabe die Bestimmung von Frequenz  $\nu$  und Schwingungsdauer  $T$  (siehe Anfang Kapitel 4.2.1). Auf der Webseite wird die Frequenz mit  $f$  bezeichnet, da diese Bezeichnungen den SuS aus den meisten Physikbüchern oder Internetportalen bekannt ist [26–28]. Zur Wellenlänge  $\lambda$  oder der Amplitude  $A$  konnte keine eigene Aufgabe gestellt werden, da die Bildgröße der Wellenlänge vom Browserfenster abhängig ist und somit Wellenlänge und Amplitude mit ihm variieren.

Danach kann die Einführung der elektromagnetischen Welle anhand des dritten Blocks stattfinden. Gerade die Animation zur elektromagnetischen Welle verdeutlicht sehr anschaulich die Überlagerung von elektrischem und magnetischem Feld. Gleichzeitig wird hier die Einordnung der Röntgenstrahlen in das Spektrum der elektromagnetischen Welle anhand von Gebrauchsgegenständen abgebildet. Die zugehörige Grafik ist in Abbildung 2.1 Kapitel 2.1 zu sehen. Das Grundwissen aus der Sekundarstufe I zum Themenbereich *Atom- und Kernphysik* kann hier mit Hilfe der Emission eines  $\gamma$ -Quants bei radioaktiv strahlenden Stoffen aufgefrischt und in das gesamte Spektrum der elektromagnetischen Welle eingeordnet werden.

Auf der zweiten Seite 2.2 *Röntgen verstehen*, wird nach der geschichtlichen Einleitung die Kathodenstrahlröhre erläutert. Diese wird ebenso in der Sekundarstufe II in dem Themenbereich *Elektrizität* des Kerncurriculums angesprochen, unter der „Bewegung von freien Elektronen unter dem Einfluss der Kraft im homogenen  $E$ -Feld“ [24]. Die Repetition der Lerninhalte aus vorangegangenen Lehreinheiten, fördert so die Verknüpfung der beiden Themengebiete. Auch auf der Webseite soll damit das nachhaltige Lernen gefördert werden, indem die Zwischenfrage zur Ladung der Ablenkplatten in der Brownschen Röhre gestellt wird.

Zur Wiederholung der exponentiellen Funktion beim Zerfall von radioaktiven Stoffen, kann das Kapitel *Absorption von Röntgenwellen* genutzt werden. Es wird nicht die bekannte Abklingkurve zur Halbwertszeit erklärt, sondern ein Analogon: die Halbwertsdicke. Dabei ist erläutert, wie sich die Halbwertsdicke  $d_{1/2}$  ergibt und es wird Bezug zur Halbwertszeit genommen.

Auf der zweiten Seite 2.3 *Entstehung eines Röntgenbildes* wird indirekt an das Vorwissen der SuS appelliert. Die Frage, wie früher ein Röntgenbild erstellt wurde, kann anhand der Abbildung 4.16 aus Kapitel 4.2.3 rekonstruiert werden. Hierzu sollten SuS ihre Erfahrungen bei Röntgenaufnahmen schildern, denn damals wurde auf die Abschirmung mittels Bleiweste komplett verzichtet. Eine Diskussion zum Schutz vor radioaktiver Strahlung

## 6. Didaktische Aufbereitung

oder auch die Gefahr der Röntgenstrahlen kann somit eingeleitet werden.

Die weiteren Kapitel im Theorieteil der Webseite knüpfen nicht mehr direkt an Inhalte des Physikunterrichts im Sekundarbereich II an, sondern können entweder mit Hilfe der Webseite erschlossen werden oder gehen über den Inhalt des Kerncurriculums und damit über den konventionell unterrichteten Schulstoff hinaus. Dabei soll durch das Aufrufen der Webseite im Unterricht der Wille zum Forschen in den SuS geweckt werden.

### 6.3.2. Ideen und Anregungen zur schülerorientierten Nutzung

Die Startseite soll den Benutzer der Webseite dazu motivieren, mehr über das CT und seine Besonderheiten erfahren zu wollen. Dazu gibt es ein kurzes Lehrvideo, das den Mehrwert einer Rekonstruktion dem einfachen Röntgenbild gegenüberstellt. Diesen Einstieg können Lehrkräfte nutzen, um die SuS für das Thema zu begeistern. Die einzelnen Themenbereiche der Webseite sind auf der Startseite in fünf Absätzen knapp beschrieben. Im Folgenden sind ein paar mögliche Themen für SuS zur Bearbeitung genannt, welche in Gruppenarbeiten oder sogar als Themenvorschlag für eine Facharbeit genutzt werden können.

*Arbeitsteilung bei der Erarbeitung der Webseite:* Nach der generellen Einleitung in die Röntgenphysik, die alle SuS gleichermaßen erhalten sollten, können die verschiedenen Themen auf Arbeitsgruppen verteilt werden, um die gesamte Webseite zu erschließen. Zur Themenauswahl können folgende Fragestellungen Anwendung finden:

- Wie kommt es zu der Mehrdeutigkeit von Röntgenbildern? Informieren Sie sich auf der Webseite und recherchieren Sie zusätzlich, wie ein Röntgenbild entsteht.
- Wie kann ein Röntgenbild mit einem CMOS-Chip aufgenommen werden? Und woher stammen die Vorteile gegenüber einem CCD-Chip. Informieren Sie sich auf der Webseite und tragen Sie zusätzliche Informationen zum CCD-Chip zusammen.
- Wie kann aus einer Serie von Röntgenbildern ein dreidimensionales Objekt rekonstruiert werden? Informieren Sie sich auf der Webseite und informieren Sie sich über iterative Rekonstruktionsverfahren von dreidimensionalen Objekten.
- Wo findet heutzutage eine Computertomographie Anwendung und welchen medizinischen Nutzen hat sie? Informieren Sie sich neben der Webseite zusätzlich darüber, welche Generationen von Computertomographen es gibt und worin ihre Unterschiede

bestehen. Informieren Sie sich zusätzlich über ein alternatives bildgebendes Verfahren, neben CT und Röntgenbild.

In dieser Auswahl von Gruppenarbeiten sind sehr viele verschiedene Interessenbereiche abgedeckt. Sowohl technische, als auch medizinische, sowie mathematische Elemente werden angesprochen und bieten den SuS auch innerhalb der Fragestellung genug Freiraum zum selbstständigen Arbeiten. Die Bearbeitung sollte mindestens vier Schulstunden beanspruchen, damit sowohl die Theorie verstanden als auch vertieft werden kann.

Die folgenden Vorschläge können zur Ausarbeitung in einer Facharbeit genutzt werden, und auf der Webseite beginnen:

**Medizinischer Exkurs in die diagnostische Röntgenphysik:** An dieser Stelle kann die Entstehung eines Röntgenbildes oder einer Computertomographie im Vordergrund stehen. Auch der Schutz vor der Röntgenstrahlung früher, und die Abschirmungsmöglichkeiten heute können diskutiert werden. Zusätzlich kann sowohl auf die Geschichte als auch auf die verschiedenen Methoden der Computertomographen eingegangen werden.

**Mathematischer Exkurs zur dreidimensionalen Bildrekonstruktion:** Dieses Thema ist nur für SuS mit mathematischer Begabung empfehlenswert, da schon die iterative Rekonstruktion von Röntgenbildern aus Kapitel 2.4.1 ihre Schwierigkeiten für SuS der Sekundarstufe II birgt. Die ersten Schritte können dabei selbstständig auf der Webseite erarbeitet werden, während die tatsächliche Rekonstruktion noch nicht angesprochen wurde.

**Mathematischer Exkurs zur Drehachsenbestimmung mittels Sinogramm:** Im Datenrekonstruktionprogramm ist in den Experteneinstellungen in einem kurzen Abschnitt erklärt, was ein Sinogramm ist, und wie es zur Drehachsenbestimmung genutzt werden kann (dazu Kapitel 4.6.5). Dabei ist die Bestimmung der Drehachse essentiell für die Rekonstruktion einer Ebene im späteren CT-Bild. Das 3D-Rekonstruktionsprogramm kann genutzt werden, um das Ausmaß einer falschen Drehachse einzuschätzen. Ebenso können auch eigene Methoden zur Drehachsenbestimmung von den SuS entworfen werden.

**Weitere Versuche zur Nutzung des 3D-Rekonstruktionsprogramms:** Hierzu lassen sich Anregungen in der Masterarbeit von Jens Dietert finden. Hier werden zwei Versuche aufgezeigt, die mit Hilfe des Rekonstruktionsprogramms durchgeführt werden können. Dabei geht es in einem Versuch um die Grenzen der Darstellbarkeit bei Hohlräumen in Objekten. Ein anderer Versuch befasst sich mit dem Auflösungsvermögen eines Röntgenbildes, bei sehr feinen Strukturen [16].



## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde eine Webseite erstellt, die sowohl die Röntgenstrahlung von der elektromagnetischen Welle bis zum Röntgenbild erläutert, als auch die Computertomographie anschaulich erklärt. Dazu gibt es viele interaktive Elemente, die die Webseite für Schülerinnen und Schüler ansprechend gestalten.

Beim theoretischen Teil der Webseite wurde besonders darauf geachtet, die Physik in ihren geschichtlichen Hintergrund einzubetten, ohne den Leser mit zu vielen Informationen abzuschrecken. Dazu werden einige Textpassagen ausgeblendet, die der Benutzer bei Interesse anzeigen lassen kann. Nach jedem Abschnitt wird eine abschließende Frage an den Benutzer gerichtet, in der er seine erlangten Grundkenntnisse überprüfen kann. Durch diese Selbstkontrolle wird der Benutzer motiviert, seine Wissenslücken aufzufüllen, indem er den Abschnitt erneut liest oder seine Mitschülerinnen und Mitschüler um Hilfe bittet. Der Mehrdeutigkeit von Röntgenbildern wird im Röntgen-Quiz besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Dieses lässt den Benutzer der Webseite spielerisch lernen, dass ein Röntgenbild nicht immer ausreicht, um das ursprüngliche Objekt eindeutig zu identifizieren. Eine Lösung dieses Problems liegt in der Computertomographie, deren mathematisches Prinzip anhand eines Rätsels, dem Nonogramm, verdeutlicht wird. Der Bezug zur medizinischen Nutzung rundet die Webseite ab und gibt einen Einblick in die diagnostische Röntgenabteilung und die technischen Möglichkeiten der Computertomographie.

Neben der theoretischen Rekonstruktion, kann die Software, um eine Serie von Röntgenbildern zu einem dreidimensionalen Objekten zu rekonstruieren, auf dem Server genutzt werden. Auf diesem Computer ist es möglich, dass eigene Röntgenaufnahmen rekonstruiert werden können. Benutzer der Webseite können keine eigenen Daten hochladen, dafür aber aus zwölf Datensätzen wählen und individuell rekonstruieren lassen. Hier ist es möglich die Rekonstruktion über zwanzig Parameter zu beeinflussen und so verschiedene Aspekte, wie die Mehrdeutigkeit oder die Drehachsenbestimmung, zu betonen.

Bei der Nutzung im Unterricht ist eine Webseite immer dann gut geeignet, wenn die Schülerinnen und Schüler diese auf dem Gerät ihrer Wahl aufrufen können. So wären sie überall in der Lage ihre Hausaufgaben zu erledigen oder ihren Wissensdurst zu stillen.

## *7. Zusammenfassung und Ausblick*

Diese Möglichkeit wird den Schülerinnen und Schülern gegeben, wenn die vorliegende Webseite um die folgenden Aspekte erweitert würde.

Für eine bessere Bedienung mit mobilen Endgeräten, müsste die Webseite für verschiedene Bildschirmgrößen optimiert werden. Momentan ist sie zur Nutzung an einem Computer ausgelegt, da vor allem die Rekonstruktionssoftware Daten zur Nutzung am Computer generiert.

Zur Optimierung des Datenrekonstruktionsprogramms, können verschiedene Benutzer angelegt werden. Damit könnte sich jeder individuell auf der Webseite einen Account anlegen und seine Daten auf dem Server hochladen, rekonstruieren und abspeichern. Demnach würden keine Daten bei Mehrfachzugriffen überschrieben werden. Zusätzlich dazu können separate Zeitfenster zur Verfügung gestellt werden, damit immer nur ein Benutzer gleichzeitig Daten rekonstruieren kann. Diese Änderungen würden jedoch ein großes Speichervolumen auf dem Servercomputer einnehmen, sodass zusätzlich lange unbenutzte Daten gelöscht werden müssten. Um Sicherheit für den Server zu garantieren, dürften nur „sichere Daten“ beim Hochladen zugelassen werden.

Insgesamt bietet die Webseite auch ohne serverseitige Verbesserungen eine gute Ergänzung zum Unterrichtsalltag und bietet viel Potential zum individuellen Lernen und gemeinsamen Forschen.

# A. Anhang

## A.1. Anleitung zur Aufsetzung eines Servers

Um eine aktuelle Version des Betriebssystem Ubuntu/Linux zu erhalten, laden Sie dieses zum Beispiel von der Webseite <http://www.ubuntu.com/download> und kopieren die Datei auf einen Stick. Danach nutzen Sie den Stick zur Installation des Betriebssystems auf dem Computer, indem Sie den Anweisungen zur Installation von Ubuntu folgen. Merken Sie sich in jedem Fall das Passwort für ihren Admin-Benutzer, da es für die Installation zusätzlicher Software und Veränderungen am System essentiell ist. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde ein Webserver mit Ubuntu 12 aufgesetzt. Es ist auch möglich eine Version von Ubuntu zu wählen, die speziell für die Aufsetzung eines Webserver ausgelegt ist. Dazu können Sie sich unter: <http://www.linux.org/> informieren.

Ansonsten können Sie mit der Einrichtung des Servers beginnen. Öffnen Sie dazu die Konsole und führen Sie ein Systemupdate mit den folgenden Shellkommandos durch:

```
sudo apt - get update  
sudo apt - get upgrade.
```

Danach starten Sie entweder die Konsole neu oder führen einen Neustart mit

```
sudo reboot
```

durch.

Geben Sie, wenn nötig, Ihr Admin-Passwort ein und bestätigen Sie bei Bedarf.

## A. Anhang

Zur Aufsetzung des Servers benötigen Sie die zusätzlichen Pakete:

```
apache2
php5
php5 - gd
libapache2 - mod - php5
```

Pakete können Sie mit dem Shellkommando *sudo apt-get install PAKET* installieren. Zum Starten oder beenden des Servers nutzen Sie:

```
sudo /etc/init.d/apache2 start
sudo /etc/init.d/apache2 stop
```

### A.1.1. Installation der MySQL Datenbank

Auch für die Einrichtung der Datenbank werden unter Umständen zusätzliche Pakete benötigt:

```
mysql - server
php5 - mysql
libapache2 - mod - auth - mysql.
```

Bei der Installation des ersten Paketes werden Sie gefragt, wie der Admin-User und das zugehörige Passwort lauten sollen. In der Webseite werden beide standardmäßig mit *root* vorgeschlagen. Jedoch ist es sicherer, wenn Sie die Eingaben sowohl im MySQL-Server, als auch in der Datei *konfiguration.php* ändern.

### A.1.2. Einrichtung von Python auf dem Servercomputer

Damit der Server die Möglichkeit hat python-Skripte zu starten, wird das Paket

```
libapache2 - mod - python.
```

verwendet, welches häufig schon vorinstalliert ist.



### A.1.3. Installation der Pakete zur Nutzung der Rekonstruktionssoftware

Zur Nutzung der Rekonstruktionssoftware werden von Jens Dietert einige Pakete vorgeschlagen, die einzeln herunterzuladen und zu installieren sind [16]. Meine Empfehlung ist die Installation der folgenden Python-Pakete, mit dem Befehl *sudo apt-get install*:

```
python - numpy
python - scipy
python - matplotlib
python - skimage
python - imaging
python - guppy
cython
```

### A.1.4. Aufrufen eines python-Skripts via PHP

Zum besseren Verständnis des Quellcodes, ist hier kurz erläutert, wie ein python-Skript mittels PHP bearbeitet werden kann. Dazu wird folgender Quellcode genutzt:

```
1 $Local = dirname($SERVER["SCRIPT_FILENAME"]);
2 $t = file($Local."Datenrekonstruktion_neu/initialisierung.py");
3 $t[26] = "Neue_Eingabe"\n";
4 $Datei = fopen("Datenrekonstruktion_neu/initialisierung.py","w");
5 fwrite($Datei, implode($t));
6 fclose($Datei);
```

Zeile 1: Hier wird der Ordnerpfad, in dem die einzelnen Webseiten liegen ermittelt und unter *\$Local* abgelegt.

Zeile 2: Mit dem Befehl *file()* wird die Initialisierungsdatei *Initialisierung.py* aus dem Ordner *Datenrekonstruktion\_neu* geöffnet und in der Variable *\$t* in einem Array gespeichert. In dieser sind alle Parameter gespeichert, die in Rekonstruktionssoftware Verwendung finden.

Zeile 3: Jede Zeile des Arrays kann beliebig überschrieben werden, sodass im Beispiel die Zeile [26] mit *Neuer Text* überschrieben wird.

Danach wird die Initialisierungsdatei mit *fopen()* geöffnet, mit *fwrite()* überschrieben und anschließend mit *fclose()* geschlossen.

## A.2. Strukturbaum zur Bedienung des Röntgen-Quiz

### A.2.1. Der Start des Röntgen-Quiz

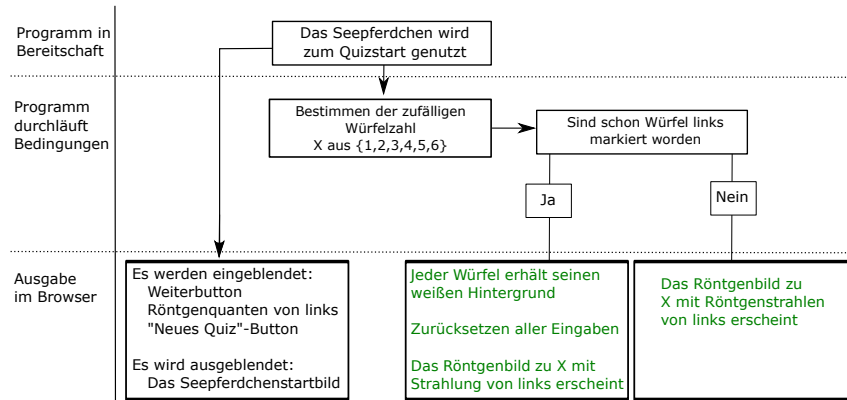


Abb. A.1.: Strukturbaum zum Starten eines Röntgen-Quiz.

### A.2.2. Die Weiterleitung im Röntgen-Quiz

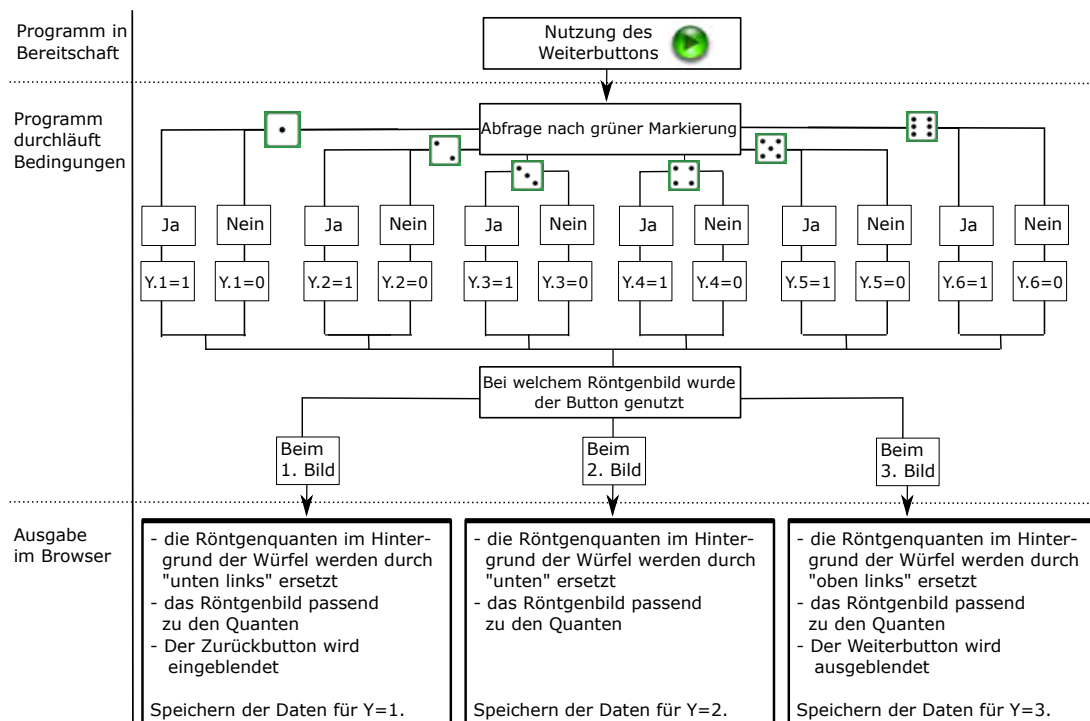
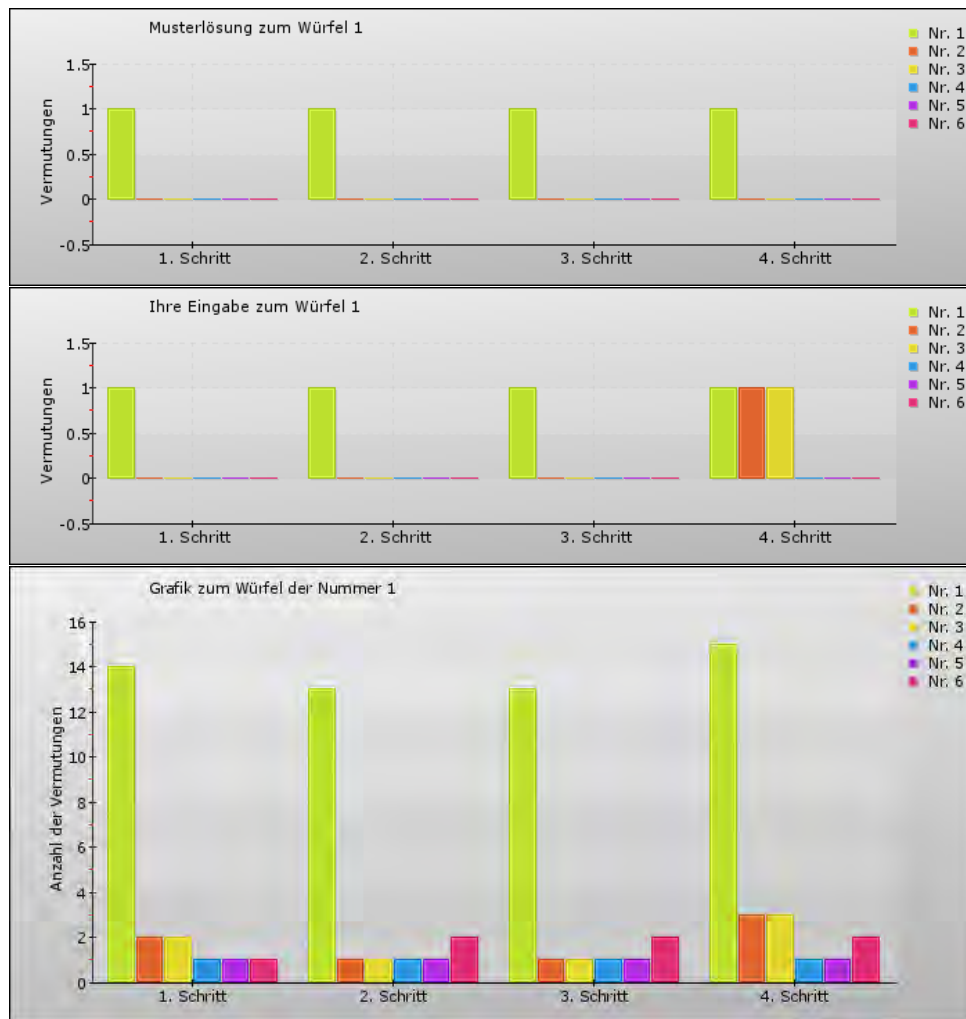


Abb. A.2.: Strukturbaum zum Fortfahren im Röntgen-Quiz.

## A.3. Röntgen-Quiz der IdeenExpo 2013

Im Folgenden sind die entstandenen Grafiken zum Röntgen-Quiz der IdeenExpo 2013 zu sehen. Im Bezug zu Kapitel 5 werden hier abschließend die Abweichungen zur Musterlösung des Röntgen-Quiz kurz analysiert.

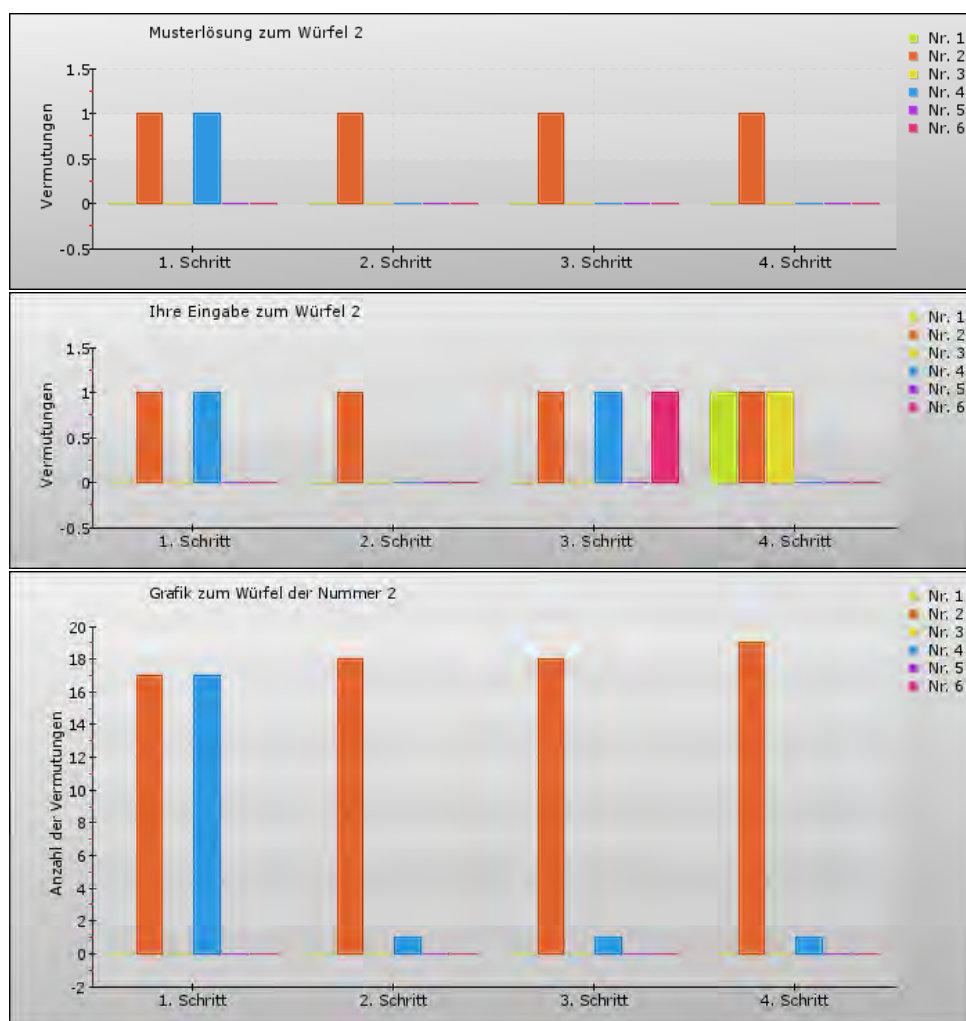
### Würfel der Ziffer eins



**Abb. A.3.:** Lösung des Würfels zur Ziffer eins (oben), Lösung bei der Annahme, dass die vier Bilder unkorreliert sind (mittig) und die Statistik der IdeenExpo 2013 (unten).

Neben einem kontinuierlichen Grundrauschen in der unteren Grafik aus Abbildung A.3 kann auch der systematische Fehler einer falschen Spielidee (Kapitel 5.1) festgestellt werden, da hier sowohl die 2 als auch die 3 im letzten Schritt angewählt wurden. Jedoch wurde die Eins zum Schluss am meisten ausgewählt und somit gut erkannt.

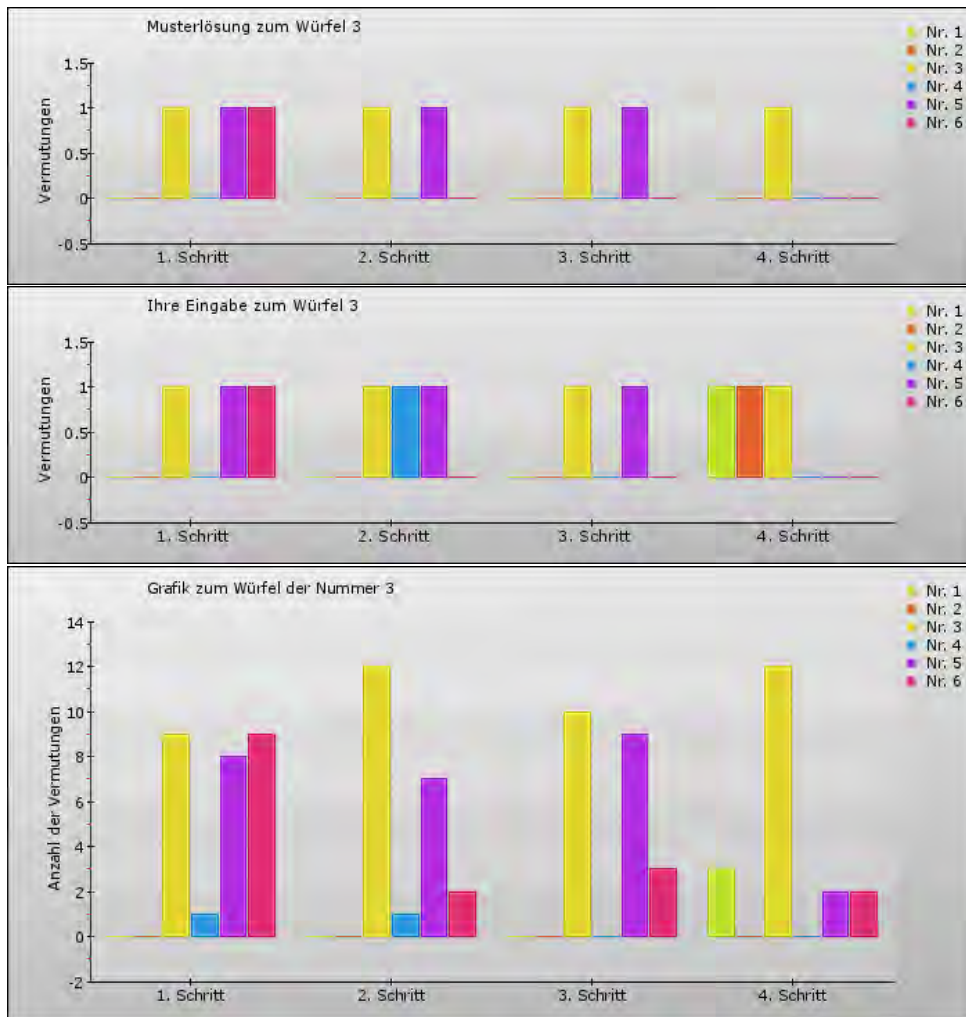
## Würfel der Ziffer zwei



**Abb. A.4.:** Lösung des Würfels zur Ziffer zwei (oben), Lösung bei der Annahme, dass die vier Bilder unkorreliert sind (mittig) und die Statistik der IdeenExpo 2013 (unten).

Bei der Statistik zur IdeenExpo der Würfelnummer zwei ist kaum Grundrauschen zu verzeichnen, auch wenn die Statistik genauso viele Einträge, wie die restlichen Würfel aufweist. Nur der Würfel der Nummer vier wurde einmal als Lösung deklariert, wobei dieser auch im ersten Röntgenbild als richtige Option ausgewählt werden kann. Eine falsche Spielidee (Kapitel 5.1) kann in diesem Fall nicht erkannt werden.

## Würfel der Ziffer drei

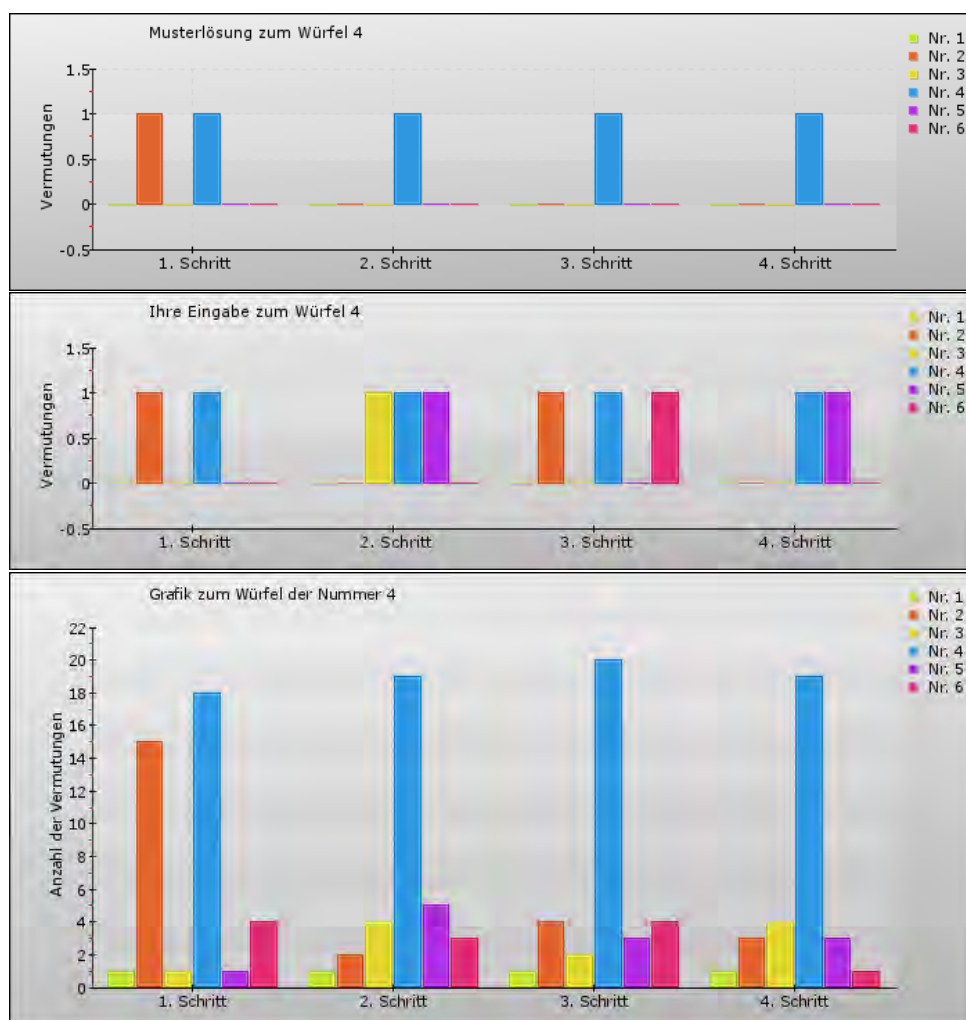


**Abb. A.5.:** Lösung des Würfels zur Ziffer drei (oben), Lösung bei der Annahme, dass die vier Bilder unkorreliert sind (mittig) und die Statistik der IdeenExpo 2013 (unten).

Bei dem Würfel der Nummer drei müssten zu Beginn drei Würfel gewählt werden. Dies ist im ersten Schritt recht gut zu erkennen, auch wenn die Nummer fünf einmal nicht erkannt wurde. Schon im zweiten Schritt haben einige die Fünf ausgeschlossen, obwohl sie es logisch betrachtet noch sein kann. Jedoch sind hier beim genauen Betrachten keine hintereinanderliegenden Stäbe zu erkennen, sodass dadurch die Abweichung zur Musterlösung erklärt werden kann. Im dritten Schritt wird die Sechs teilweise wieder hinzugenommen, obwohl die räumliche Anordnung der Stäbe des Röntgenbildes die Sechs ausschließt. Hier kann auf eine räumliche Fehlvorstellung geschlossen werden. Im letzten

Schritt wird der Würfel der Nummer eins ausgewählt, da nur eine Säule zu sehen ist. Demnach kann dabei auf eine falsche Spielidee geschlossen werden.

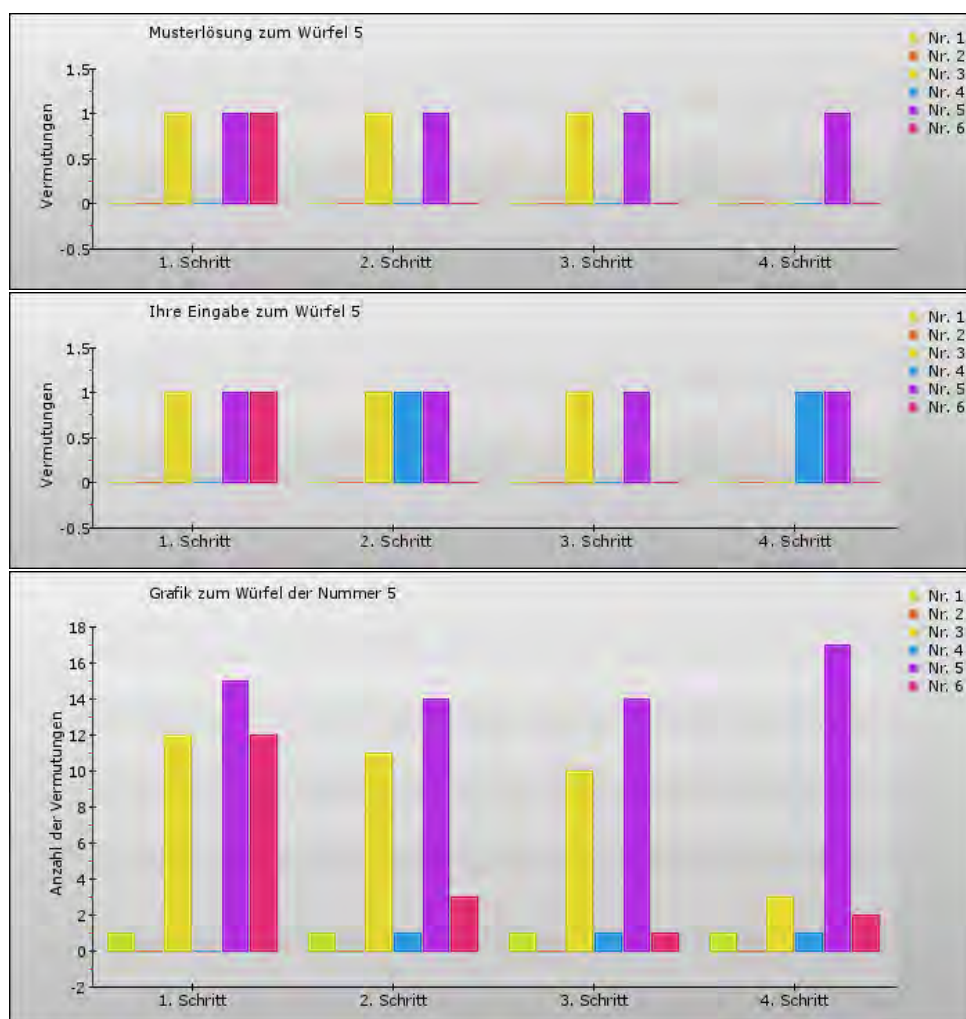
### Würfel der Ziffer vier



**Abb. A.6.:** Lösung des Würfels zur Ziffer vier (oben), Lösung bei der Annahme, dass die vier Bilder unkorreliert sind (mittig) und die Statistik der IdeenExpo 2013 (unten).

Im Gegensatz zu den restlichen Würfeln hat dieser Würfel ein sehr hohes Grundrauschen, bei gleicher Anzahl an Lösungsversuchen. Jedoch sticht die Musterlösung aus dem Rauschen gut hervor, sodass im Grunde die richtige Spielidee erkannt wurde. In diesem Fall kann in keinem Schritt eine falsche Spielidee ausgeschlossen werden, wenn die Statistik (unten) mit der Annahme von unkorreliert Röntgenbildern (mittig) verglichen wird.

## Würfel der Ziffer fünf

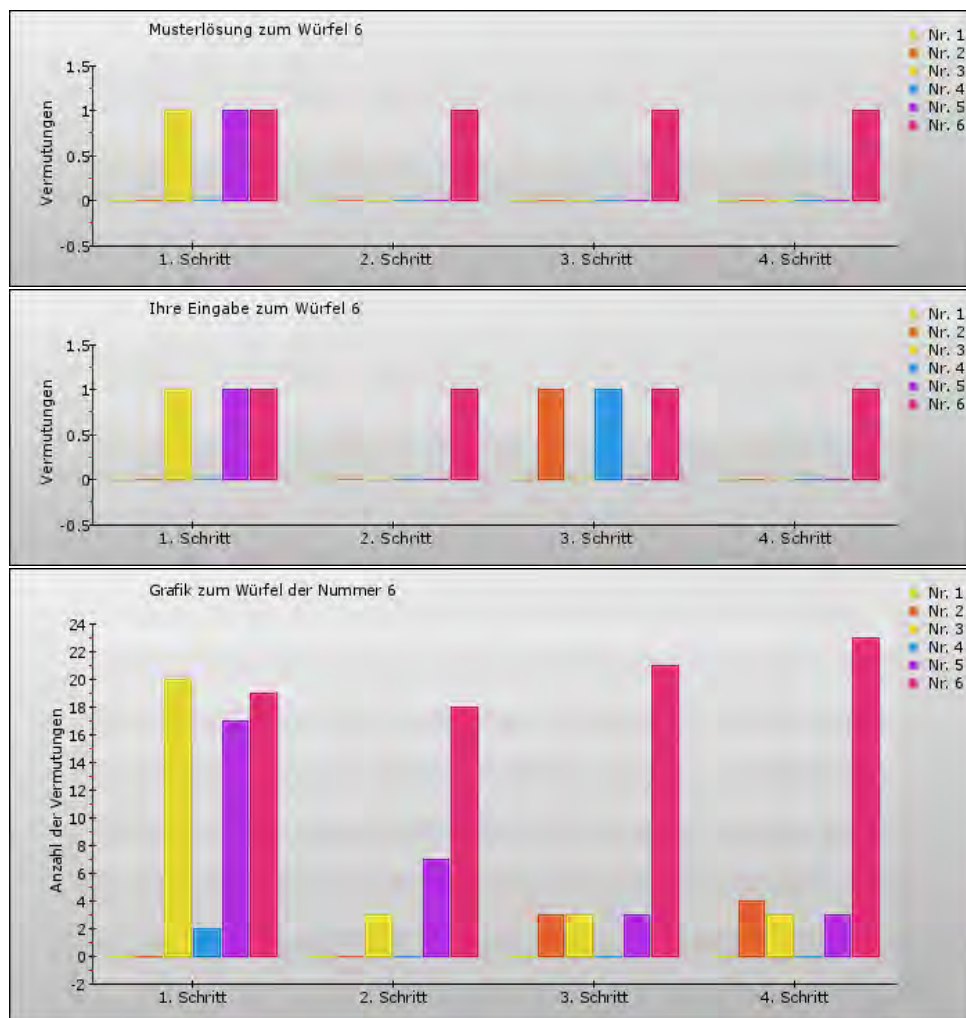


**Abb. A.7.:** Lösung des Würfels zur Ziffer fünf (oben), Lösung bei der Annahme, dass die vier Bilder unkorreliert sind (mittig) und die Statistik der IdeenExpo 2013 (unten).

Während die Musterlösung in allen Schritten gut widerspiegelt wird, ist zu erkennen, dass die Fünf häufiger als die Drei als richtige Lösung angegeben wurde. Diese Tatsache kann dadurch begründet werden, dass bei der Fünf drei Säulen hintereinander liegen und somit ein minimaler Versatz zu erkennen ist. Ansonsten ist im Grundrauschen kaum eine Tendenz zur falschen Spielidee zu erkennen, es ist eher wahrscheinlich, dass hier geraten wurde.



## Würfel der Ziffer sechs



**Abb. A.8.:** Lösung des Würfels zur Ziffer sechs (oben), Lösung bei der Annahme, dass die vier Bilder unkorreliert sind (mittig) und die Statistik der IdeenExpo 2013 (unten).

Da der Würfel der Nummer sechs schon im zweiten Bild eindeutig erkannt werden kann, ist auffällig, dass die Drei in allen Fällen häufig ausgewählt wurde. Ebenso ist erstaunlich, dass die Zwei nach der Auswahl im dritten Schritt auch im vierten erhalten blieb, obwohl dort vier Säulen zu erkennen sind. Demnach ist hier vom Raten als Lösungsweg auszugehen und keine falsche Spielidee.

Abschließend ist anzumerken, dass die Statistik pro Würfel noch zu gering ist, um eine eindeutige Aussage machen zu können. Jedoch ist die Musterlösung in allen sechs Würfeln gut zu erkennen, sodass das Quiz verständlich scheint und zum Mitdenken anregt.



## A.4. Drehbuch zum Kurzfilm

### A.4.1. Gesprochener Off-Text und das Film Skript

**Aufmacher (Säulen Bahnhof)** Hätte der Mensch nur ein Auge, würde er hier nur eine Steinsäule sehen. Unseren zwei Augen verdanken wir es in die Tiefe zu blicken. Jedes Auge sieht ein anderes Bild. Unser Gehirn setzt zwei ebene Bilder zu einem räumlichen Bild zusammen. Um mehrere Säulen zu erkennen, müssen wir aber unseren Blickwinkel ändern. Es kommt also auf die Perspektive an.

**Info I (Schattenbilder)** Je nach Perspektive kann ein Objekt Ein- oder Mehrdeutig sein. Das ein einzelner Eindruck aus einer Perspektive täuschen kann, verdeutlicht das folgende Experiment. Der Schatten von Gegenständen gibt verschiedene Informationen preis, je nach Perspektive. So können sich hinter scheinbar einfachen Dingen, komplexe Gegenstände verbergen. Ähnlich wie bei den Schattenbildern hier, können auch Röntgenbilder einen falschen Eindruck hinterlassen. Ein Problem mit dem sich Stephanie Schöning in ihrer Masterarbeit auseinandergesetzt hat.

**Info II (Röntgengerät)** Ein Weg das Problem der Mehrdeutigkeit von Röntgenbildern zu lösen ist die Computertomographie. An einem Schulungs-Röntgengerät der Firma Phywe führt Stephanie die Aufnahme einer Folge von Röntgenbildern für die anschließende Computertomographie vor. Die Strahlung durchdringt die Materie und wird entweder ganz oder teilweise absorbiert. Je dichter ein Material ist, desto mehr Strahlung wird absorbiert und desto schwärzer wird das zugehörige Röntgenbild. In unserem Röntgenbild ist nicht nur die Holzstruktur des Würfels in grau zu erkennen, sondern auch drei Säulen in Schwarz. Diese Säulen bestehen aus Aluminium, und absorbieren die Röntgenstrahlen komplett. Bei den verschiedenen Winkeleinstellungen wird je ein Bild aufgenommen. Aus mehreren Bildern wird später ein Dreidimensionales. Dennoch bleibt die Frage zu klären, welchen Mehrwert dieser Schritt vom Röntgenbild zur Computertomographie hat? Genau diese Frage kann uns Prof.Dr.med.Joachim Lotz von der Röntgenabteilung des Klinikums in Göttingen beantworten

**Fazit** Wie sich zeigt ist Computertomographie hilfreich um Mehrdeutigkeiten auszuschließen. So kann beispielsweise „Unsichtbares“ sichtbar gemacht werden. Wer nun Lust zum selber Experimentieren bekommen hat kann dies auf der Website von Stephanie Schöning selbst ausprobieren: [URL](#) Viel Spass beim Entdecken.

# Aufbau Magazin-Bericht Vom Röntgenbild zur Computertomographie

Abschnitt	Ziele & Methoden	Protokoll
<p><b>Aufmacher</b></p> <p>Säulenreihe am Bahnhof</p> <p>20-30 Sek</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aufmerksamkeit erzeugen und eine Situation aus dem Alltag anführen.</li> <li>2. Erste Annäherung zum Thema der Rekonstruktion von 3D-Bildern herstellen.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <b>Direkte Frontaufnahme auf eine Säule (eher im Zoom)</b> „Was Sie hier sehen, ist eine Steinsäule, doch was sich dahinter verbirgt ...“</li> <li>2. <b>(und dann langsam den Zoom verringern, stehen bleiben und) leicht nach rechts/links schieben bis mehrere Säulen sichtbar werden</b> „... erkennen Sie erst auf den zweiten Blick! Unseren zwei Augen verdanken wir es in die Tiefe zu blicken. Jedes Auge sieht ein anderes Bild, sodass unser Gehirn zwei ebene Bilder zu einem räumlichen Bild vereint.“</li> <li>3. <b>Jetzt mehr zur Seite schwenken, damit die gesamte Säulenreihe sichtbar wird</b> „Damit wir jede der Säulen einzeln erkennen, müssen wir sie in einem neuen Blickwinkel betrachten.“</li> <li>4. „Somit kann durch verschiedene Blickwinkel ein dreidimensionales Bild der Säulenreihe gewonnen werden.“</li> </ol>
<p><b>Infoblock 1</b></p> <p>Das Durchleuchten mit der Taschenlampe</p> <p>10-20 Sek</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Um das Röntgen besser zu verstehen werden einige Objekte in das Licht einer Taschenlampe gehalten. (in der Physik, Taschenlampe, Drehteller mit festgeklemmten Objekt, Wand)(Kamm, Gabel, ...)</li> <li>2. Verständnis von Projektionen: man kann nicht alles erkennen, Neugier Wecken, wie es in der Medizin genutzt wird, welche Methoden es noch gibt...</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <b>Der Versuch wird aufgebaut und zuerst nur der Helle Lichtfleck mit dem Schatten des Kamms gefilmt, sodass nur ein Strich zu sehen ist. Zuerst ist das LICHT AUS</b> „Genauso ist es hier...“</li> <li>2. <b>Die Taschenlampe wird eingeschaltet und der Strich erscheint</b> „...denn was sich hier verbirgt...“</li> <li>3. <b>Der Drehteller dreht sich weiter und das Objekt kann immer besser erkannt werden</b> „...sehen Sie erst aus einem anderen Blickwinkel!“</li> <li>4. <b>Ein Schwenk zum Objekt lässt es im Original erkennen</b> „Diese Schatten sind uns bekannt, doch können sie nicht nur mit sichtbarem Licht erzeugt werden! Da das Licht zu den elektromagnetischen Welle gehört, ist es mit den Röntgenstrahlen verwandt. Doch diese können verschiedenste Materialien durchdringen.“</li> </ol>
<p><b>O-Ton 1</b></p> <p>Die Mehrdeutigkeit von Röntgenbildern</p> <p>20-30 Sek</p>	<p>Eingehen auf Mehrdeutigkeit von Röntgenbildern die Überleitung zu CT-Aufnahmen</p>	<p>„So wie die Schattenbilder Mehrdeutigkeiten aufweisen, so ist es auch bei Röntgenbildern! Genau mit diesen Mehrdeutigkeiten habe ich mich in meiner Masterarbeit beschäftigt.“</p> <p>Während ein einzelnes Röntgenbild zu der Annahme führt, dass zwei Gegenstände vollkommen gleich aussehen, so ist es in der Realität nicht der Fall.“</p> <p>„Als Anschauungsobjekt habe ich diese Holzwürfel verwendet. Sie sehen von außen alle gleich aus, doch beim Röntgen werden verschiedene Füllungen enthüllt.“</p> <p>„Mit Hilfe der Computertomographie ist es möglich die Verteilung von absorbierendem Material in den einzelnen Ebenen des Würfels zu rekonstruieren.“</p> <p>Je nachdem, aus wie vielen verschiedenen Richtungen der Würfel durchleuchtet wird, also ja nach Anzahl der genutzten Röntgenbilder, funktioniert es kaum .... bis sehr gut!“</p>

<p><b>Infoblock 2</b></p> <p>Das Röntgengerät vorstellen</p> <p>10-20 Sek</p>	<p>Die Röntgenphysik soll am Schulungs-Röntgengerät vorgestellt werden. Durch viele Fenster ist das Gerät keine Blackbox sondern zeigt den Ablauf des Experiments.</p> <p><i>(Evtl. gibt es eine Fluoreszierende Platte zur ersten Sichtbarmachung des Röntgenbildes Ja gab es... a)</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Eine der Proben wird geröntgt und die Bilder werden live übertragen. An diesen können schon Mehrdeutigkeiten erkannt werden, die zum Konflikt führen sollen.</li> <li>2. Das Ergebnis wird schon vorgestellt obwohl der Weg dahin noch unbekannt bleibt, um Spannung für kommendes zu wecken und überleiten zu können.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li><b>1. Das Gerät wird im Vollbild gezeigt.</b> „Erzeugen kann man Röntgenstrahlen zum Beispiel in diesem speziellen Schulungs-Röntgengerät.“</li> <li><b>2. Der Fokus liegt links auf der glühenden Elektronenquelle</b> „Die Röntgenröhre besteht aus einer Elektronenquelle, die energiereiche Elektronen emittiert. Im Betrieb glüht die Elektronen-Quelle orange und schleudert sie auf die Anode. Diese Anode besteht aus dem Metall Molybdän (Mo) und es entstehen durch den Elektronenbeschuss auf zwei verschiedenen Wegen Röntgenstrahlung.“ <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zum einen werden die Elektronen im Mo durch den positiv geladenen Atomkern gebremst, sodass sie ihre überschüssige Energie in Form von Röntgenstrahlung aussenden (Die Bremsstrahlung, dazu den Minifilm?).</li> <li>• Zum anderen treffen Elektronen auf die Elektronen des Mo-Atoms und schleudern diese aus dem Atom heraus. Die so entstandene Lücke wird von einem anderen Elektron des Atoms geschlossen. Dieses Elektron hat eine zu große Energie, die es als Röntgenstrahlung emittiert. (Die charakteristische Strahlung, auch ein Film?)</li> </ul> </li> <li><b>3. Jetzt wird der Holzwürfel eingeblendet und das Gerät bedient.</b> „Nachdem das Objekt auf der Drehplatte befestigt wurde, können die Sicherheitsschlösser verriegelt werden. Erst danach kann die Röntgenstrahlung hinzugenommen werden.“</li> <li><b>4. Die Messung wird im Zeitraffer abgespult und danach auf das Ergebnis geblendet.</b> Die Strahlung durchdringt die Materie und wird entweder ganz oder teilweise absorbiert. Je dichter ein Material ist, desto mehr Strahlung wird absorbiert und desto schwärzer wird das zugehörige Röntgenbild dargestellt. In unserem Röntgenbild ist nicht nur die Holzstruktur des Würfels in grau zu erkennen, sondern auch drei Säulen in Schwarz (<i>5er Würfel</i>). Diese Säulen bestehen aus Aluminium, und absorbieren die Strahlung dieses Röntgengeräts komplett. Im Holz wird die Strahlung dagegen nur gering abschwächt.“</li> <li><b>5. Die einzeln erstellten Bilder zeigen</b> „Bei den verschiedenen Winkeleinstellungen wird je ein Bild mit einem CMOS-Chip aufgenommen. Dadurch können die Säulen im Holz nachgewiesen werden. Doch erst bei mehreren Bildern wird die innere Struktur erkennbar!“</li> </ol>
	<p>Visualisierung während des Röntgens oder dem 1. O-Ton (Hohlräume in zB. Aluminiumstangen,) Weiße Schlieren im CT-Bild)</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li><b>1. Das fertige ct-Bild in VolView vorführen: Erst Die Ebenen, dann die Dichte erhöhen, sodass das Holz verschwindet und die Säulen erscheinen.</b></li> <li>2. „Mit Hilfe des Programms VolView können die unterschiedlichen Dichten verschieden gefärbt werden. Es ist also möglich in das Objekt hineinzuschauen!“</li> <li><b>3. Überleitung zum Interview:</b></li> <li>4. „Dennoch bleibt die Frage zu klären, welchen Mehrwert dieser Schritt vom Röntgenbild zur Computertomographie hat.“</li> </ol>

<p><b>O-Ton 2</b></p> <p>Der Nutzen in der Medizin</p> <p>20-30 Sek</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Vorstellen von Herrn Prof.Dr.med.Joachim Lotz (im Büro oder vorm CT?)</li> <li>2. Röntgenbild versus CT Bild</li> <li>3. Mehrwert eines CT-Bildes</li> <li>4. Gefahren für den Menschen (Strahlendosis, Dauer, ...)</li> <li>5. Ablauf einer CT-Untersuchung</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <b>Einführung in das Fachgebiet der medizinischen Anwendung von CT-Bildern</b> „Genau diese Frage kann uns Prof.Dr.med.Joachim Lotz von der Röntgenabteilung des Klinikums in Göttingen beantworten.“</li> </ol> <p>Interview:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prof.Dr.med.Joachim Lotz, wann wird ein Computertomographie verwendet und welchen Nutzen hat diese im Vergleich zu einem Röntgenbild?</li> <li>• Was kann man auf einem CT-Bild besser erkennen?</li> <li>• (Unterschiedlich dichte Materialien ausblenden, Drehbar,...)</li> <li>• Wie ist der Ablauf einer CT-Untersuchung?</li> </ul> <p>Vielen Dank für das nette und aufschlussreiche Gespräch!“</p>
<p><b>Fazit</b></p> <p>Die Website und das Röntgenquiz</p> <p>10-20 Sek</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Zusammenfassung dessen, was gelernt wurde: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erstellung Röntgenbild</li> <li>• Mehrdeutigkeit der Röntgenbilder</li> <li>• Rekonstruiertes CT-Bild</li> <li>• Anwendung in der Medizin</li> <li>• Vorstellung der Website mit Röntgenquiz</li> <li>• Ende</li> <li>• Mein Name?</li> <li>• Werden Namen allgemein eingeblendet?</li> </ul> </li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. „Wie Sie in diesem kurzen Video gesehen haben, ist eine CT-Untersuchung gerade um Mehrdeutigkeiten auszuschließen oder unsichtbares zu entdecken sehr hilfreich.</li> <li>2. Diese Mehrdeutigkeit, liegt den Röntgenbildern zu Grunde und Sie können diese im Röntgen-Quiz auf meiner Webseite neben den Hintergründe zu Röntgenstrahlen und den entstehenden Bildern noch einmal nachvollziehen.</li> <li>3. Vielen Dank für Ihr Interesse und viel Spaß beim Entdecken!“</li> </ol>

# Literaturverzeichnis

- [1] T. M. Buzug, *Einführung in die Computertomographie, Mathematische physikalische Grundlagen der Bildrekonstruktion*, Springer (2005)
- [2] A. Fölsing, *Wilhelm Conrad Röntgen, Aufbruch ins Innere der Materie*, Carl Hanser Verlag (1995)
- [3] Deutsches Museum, *Heinrich Hertz – vom Funkensprung zur Radiowelle*, <http://www.deutsches-museum.de/bonn> (2013)
- [4] C. Ziegler, *Elektromagnetische Schwingungen und Wellen*, Kapitel 11 der Vorlesung Experimentalphysik V (2008)
- [5] C. Schmidt, *Das elektromagnetische Spektrum*, Forever Explorer (2012)
- [6] T. Knott, *Kathodenstrahlröhre* (2012), URL [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cathode\\_ray\\_tube\\_de.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cathode_ray_tube_de.svg)
- [7] Demtröder, *Experimentalphysik Atome, Moleküle und Festkörper*, Springer (2000)
- [8] TU Clausthal, *Röntgenstrahlung*, Kapitel 1 (2002)
- [9] J. H. Hubbell, S. M. Seltzer Radiation and Biomolecular Physics Division, PML, NIST, *X-Ray Attenuation Databases Dosimetric Interest*, NIST - <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm> (2011)
- [10] D. Suter, *Vorlesung der Medizinphysik Kapitel 6*, Universität Dortmund (2009)
- [11] J. Lotz, *Interview zur Computertomographie*, Universitätsmedizin Göttingen (2013)
- [12] M. Lindner, *Entwicklung eines zählenden Pixeldetektors für „Digitales Röntgen“*, Doktorarbeit, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn (2001)
- [13] A. C. Konstantinidis, *Evaluation of Digital X-Ray Detectors for Medical Imaging Applications*, Doktorarbeit, University College London (2011)

- [14] ic med Systemlösungen für die Medizin GmbH, *PureImage™ Technologie* (© 2005 - 2013)
- [15] ermo / Curaden AG, *Detektortechnologien*, <http://www.3d-roentgen.ch/Info.htm> (2013)
- [16] J. Dietert, *Entwicklung einer 3D-Bildrekonstruktionssoftware für die Computertomographie und Konzeption eines Anschauungsversuchs*, Masterarbeit, Georg-August-Universität Göttingen (2013)
- [17] S. de Nicola, *Development of a C++ Simulator for X-Ray Tomography*, Georg-August-Universität Göttingen II. Physikalisches Institut RISE summer student report. (2012.)
- [18] S. Reimers, *PHP 5.4 & MySQL 5.6 Das umfassende Handbuch*, Galileo Press, Bonn 2012 (2012)
- [19] Spieß, Kups, *Röntgenfeinstrukturuntersuchung - WE 11 (Debye-Scherrer-Verfahren)*, TU Ilmenau Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik Institut für Werkstofftechnik (2011)
- [20] D. Suter, *Röntgenquellen und Röntgendetektoren*, Vortrag im Rahmen des Seminars „Medizinphysik“ (2006)
- [21] University Publisher 3.0, *Lehrbuch der klinisch-radiologischen Diagnostik - Dentalradiologie*, Medizinische Universität Wien und Wikimedia Österreich (2013)
- [22] O. Burian, *Fallsammlung Radiologie für MTRA*, Visotex® Pharma Consulting Network (2005), URL [http://www.fallsammlung-radiologie.de/images/faelle/lumbosakraler\\_wirbel/05-gr.jpg](http://www.fallsammlung-radiologie.de/images/faelle/lumbosakraler_wirbel/05-gr.jpg)
- [23] Jean-Damien POGOLOTTI, *pChart*, Technical report (2007-2012), URL <http://www.pchart.net/license>
- [24] Niedersächsischen Kultusministerium, *Kerncurriculum für die gymnasiale Oberstufe des Gymnasium und der Gesamtschule, das Fachgymnasium, das Abendgymnasium und das Kolleg im Fachbereich Physik* (2009)
- [25] T. Wilhelm, *Ausgewählte Probleme der Didaktik der Physik für Lehramt an Gymnasien*, Didaktik der Physik, Universität Augsburg (2010)
- [26] F. Bader, *Physik - Gymnasium Sek.II 12 - 13*, Schroedel Verlag, Hannover (2000)

- [27] W. Bredthauer, K. G. Bruns, M. Grote H. Köhnke, *Impulse der Physik 11-12*, Ernst Klett Verlag GmbH, Stuttgart (2010)
- [28] E. Leitner und U. Finckh, *Inhalte nach Jahrgangsstufen des Bundeslands: Niedersachsen*, LEIFI Physik Niedersachsen (2013), URL <http://www.leifiphysik.de/>





# Danksagungen

Mit den letzten Zeilen dieser Arbeit möchte ich meinem betreuenden Prof. Dr. Arnulf Quadt danken, der mich für das Thema, eine Benutzeroberfläche für die 3D-Rekonstruktionssoftware zu entwerfen begeisterte. Mit seiner Hilfe erhielt ich einen Einblick in die Computertomographie am UMG und konnte die Röntgenhardware bei Phywe nutzen. Zusammen mit Sascha Prinz unterstützte er mich tatkräftig bei den Aufnahmen für den Informationsfilm zur Computertomographie.

Für den Schnitt und die Regie möchte ich ebenso Sascha Prinz danken, der mich beim Dreh begleitete.

Besonderer Dank gilt dem Lehrmittelhersteller Phywe, mit deren Computertomographie-Aufsatz und Röntgengerät die Röntgenbilder entstanden sind. Dabei durfte ich die Räumlichkeiten nutzen und alle Objekte röntgen, die auf der Webseite zum Rekonstruktionsprogramm zur Verfügung stehen. Auch ein Teil des Rekonstruktionsfilms konnte im Infocenter der Phywe erfolgreich gedreht werden.

Vielen Dank an Herrn Dr. Markus Grumann, Katinka Seevers, Anton Batalov und Jana Puschra.

Ebenso möchte ich vor allem Herrn Prof. Dr. med. Joachim Lotz der diagnostischen Röntgenabteilung der Universitätsmedizin Göttingen danken. Nach einem ersten Informationsgespräch nahm er sich die Zeit, zwei Beispiele für ein Interview vorzubereiten. Seine Ausführung zur Computertomographie verdeutlicht sehr gut, deren Ablauf und wann diese eingesetzt wird.

Abschließend folgten mehrere Iterationen der Korrektur sowohl auf der Webseite, als auch bei der geschriebenen Ausgabe der Masterarbeit. Dafür möchte ich meinen Freunde und meiner Familie für die Unterstützung danken.

**Erklärung**

nach §18(8) der Prüfungsordnung für den Bachelor-Studiengang Physik und den Master-Studiengang Physik an der Universität Göttingen:

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Abschlussarbeit selbständig verfasst habe, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe und alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen wurden, als solche kenntlich gemacht habe.

Darüberhinaus erkläre ich, dass diese Abschlussarbeit nicht, auch nicht auszugsweise, im Rahmen einer nichtbestandenen Prüfung an dieser oder einer anderen Hochschule eingereicht wurde.

Göttingen, den 17. Dezember 2013

(Stephanie Schöning)