

Versuch 1

Röntgenaufnahme und Dosimetrie

Röntgenstrahlen als elektromagnetische Welle

Die Röntgenstrahlen gehören zu den elektromagnetischen Wellen, die in der Medizin breite Anwendung finden. Sie werden mit Hilfe einer Röntgenröhre erzeugt (**Versuch 7, Röntgenspektrum und Röntgenabsorption**).

Abbildung 1 zeigt die grafische Darstellung einer elektromagnetischen Welle. Sie besteht aus der sich periodisch verändernden elektrischen Feldstärke E und der senkrecht dazu schwingenden magnetischen Feldstärke H . Die Schwingungsebenen von E und H liegen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Bei den elektromagnetischen Wellen handelt es sich deshalb um Transversalwellen. Im einfachsten Fall geht man von einer ebenen harmonischen Welle aus.

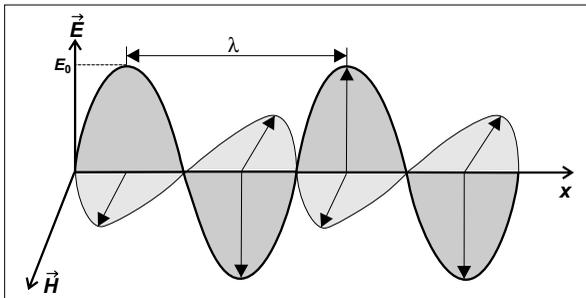


Abb. 1:
Grafische Darstellung einer elektromagnetischen Welle

Im homogenen Medium und im Vakuum breiten sich elektromagnetische Wellen geradlinig aus. Ihre Geschwindigkeit im Vakuum beträgt $2,998 \cdot 10^8$ m/s (gerundet $3 \cdot 10^8$ m/s). Ausbreitungsgeschwindigkeit c , Wellenlänge λ und Frequenz f einer Welle stehen in folgendem Zusammenhang:

$$c = \lambda \cdot f \quad (1)$$

Die Energie eines Teilchens (Quants) W_{el} einer elektromagnetischen Welle ist proportional der Frequenz und berechnet sich nach

$$W_{\text{el}} = h \cdot f \quad (2)$$

Die Konstante h , das Plancksche Wirkungsquantum, beträgt $6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s.

Man unterscheidet die elektromagnetischen Wellen nach ihrer Frequenz bzw. Wellenlänge. Die einzelnen Arten werden zum elektromagnetischen Spektrum zusammengefasst. Wichtige Bereiche elektromagnetischer Wellen und potentielle Anwendungen in Medizin und Biologie sind in **Tabelle 1** dargestellt.

Tabelle 1: Wichtige Bereiche im Spektrum elektromagnetischer Wellen und ihre häufigsten Anwendungen

Bereich	Wellenlänge	Einsatz besonders in Biologie und Medizin
Niederfrequenz	10^4 km – 10 km	Wechselstrom
Radiowellen	1 km – 1 m	Diathermie, Magnetresonanztomografie, Rundfunk, TV
Mikrowellen	10 cm – 1 mm	Magnetresonanztomografie, Mobilfunk
Infrarot	100 μ m – 760 nm	Spektroskopie, Thermografie
sichtbares Licht	760 nm – 380 nm	Mikroskopie, Endoskopie, Colorimetrie, Fotometrie, Spektroskopie, Fluoreszenz
Ultraviolett	380 nm – 10 nm	Desinfektion, Spektroskopie
Röntgenstrahlen	10 nm – 1 pm	Röntgendiagnostik, Computertomografie
Gammastrahlen	< 5 pm	Nuklearmedizin, Szintigrafie

Durchleuchtung von Gegenständen (Röntgenaufnahme)

Mit Röntgenstrahlen können innere Strukturen lebender Organismen dargestellt werden. Als Abbildungsprinzip wirkt die Zentralprojektion, da die Röntgenstrahlen von einem zentralen Punkt ausgehend (Brennfleck auf der Oberfläche der Anode in der Röntgenröhre) als Strahlenbündel den jeweiligen Körper ohne Richtungsänderung durchdringen und diesen Körper auf eine dahinter liegende Bildebene projizieren. Jedes Objektdetail wird bei einer Zentralprojektion vergrößert abgebildet, wobei die Vergrößerung von der Geometrie der Messanordnung abhängt.

Durch zwei Röntgenaufnahmen (Zentralprojektionen) aus aufeinander senkrechten Richtungen gelingt es, die Lage und Größe eines nicht sichtbaren Objektes zu bestimmen. Als Modell dient im Folgenden ein Metallstift der Länge l in einem Holzwürfel (**Abb. 2a**): In einer Ecke des Würfels (abgeschrägt) wird der Ursprung eines räumlichen Koordinatensystems gelegt (**Abb. 2b**).

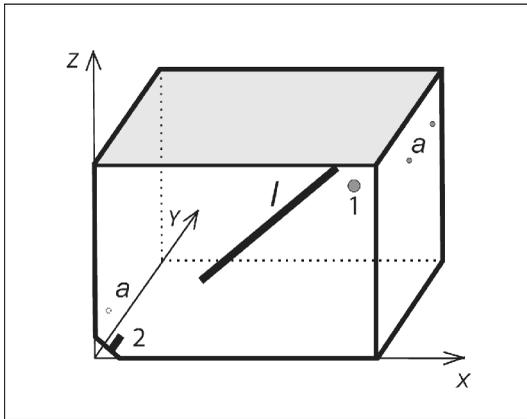


Abb. 2a:
Holzwürfel mit Metallstift l
Oben rechts: Markierung 1 für
Kennzeichnung der xz -Projektion

Unten links: Markierung 2 zur
Kennzeichnung des Koordinaten-
ursprungs

Markierung einer Länge $a = 25\text{ mm}$
(Aufgabe 3) auf der yz - und auf der ihr
gegenüberliegenden Seite

Dann kann die Lage des Metallstiftes im Raum mit Hilfe der Winkel α , β und γ zwischen l und den Richtungen der Koordinatenachsen x , y und z angegeben werden.

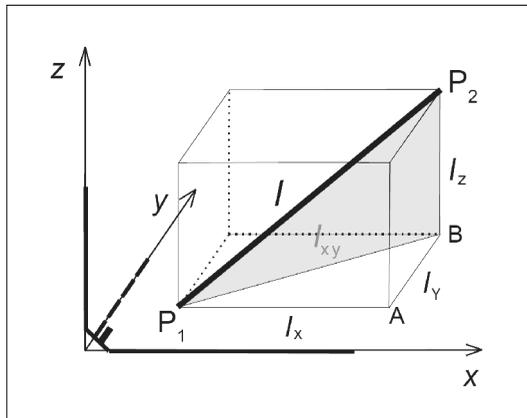


Abb. 2b:
Lage des Metallstiftes l im räumlichen
kartesischen Koordinatensystem,
welches mit den Kanten des Würfels
übereinstimmt

Aus **Abbildung 2b** ergibt sich:

$$l^2 = l_z^2 + l_{xy}^2 \text{ (Dreieck } P_1BP_2) \text{ und } l_{xy}^2 = l_x^2 + l_y^2 \text{ (Dreieck } P_1AB)$$

und daraus

$$l = \sqrt{l_x^2 + l_y^2 + l_z^2} \tag{3}$$

Weiter gilt $\cos \alpha = l_x / l$, $\cos \beta = l_y / l$ und $\cos \gamma = l_z / l$.

Ein anderes Prinzip der Bilderzeugung mit Hilfe von Röntgenstrahlen wird bei der Computertomografie verwirklicht. Hier werden die von ringförmig angeordneten Detektoren ermittelten Absorptionswerte mittels eines Computers einzelnen Bildpunkten (Pixeln) zugeordnet, so dass Bilder einzelner Schichten erzeugt werden.

Strahlenschutz

Röntgenstrahlen gehören wie radioaktive Strahlen (**Versuch 8, Radioaktivität**) und Neutronenstrahlen zu den ionisierenden Strahlenarten. Bei ihrer Anwendung sind generelle Anforderungen des Strahlenschutzes zwingend einzuhalten, um eine unnötige Exposition von Patienten, medizinischem Personal und Umgebung zu vermeiden. Dazu gehören die Begrenzung der Strahlenexposition auf eine möglichst kurze Dauer, die Verwendung geeigneter Materialien hoher Ordnungszahl (z. B. Blei) zur Absorption der Strahlen sowie ein großer Abstand von der Strahlenquelle. In der Umgebung punktförmiger Strahlenquellen vermindert sich die wirksame Dosis je Fläche mit dem Quadrat des Abstandes vom Ort der Strahlung (quadratisches Abstandsgesetz, **Abb. 3**).

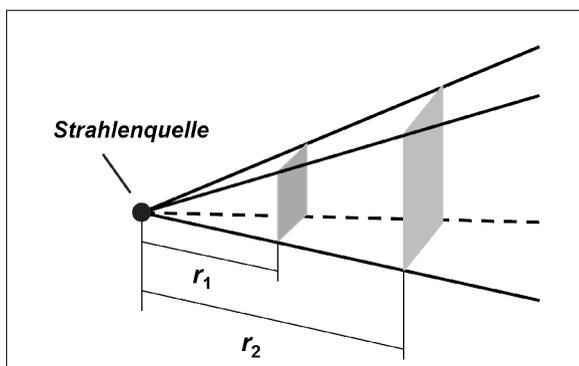


Abb. 3:
Quadratisches Abstandsgesetz

$$\text{Dosis} \sim 1/r^2$$

Die Strahlendosis je Flächenelement im Abstand r_2 beträgt nur ein Viertel des Wertes im Abstand r_1 für $r_2 = 2 r_1$.

Dosimetrie

Zur Beurteilung der Wirkung ionisierender Strahlen auf Materie wird die **Ionendosis** und davon ausgehend die **Energiedosis** bestimmt. Die Ionendosis J ist der Quotient aus der Ladung ΔQ , die in einem Volumenelement ΔV in Luft gebildet wird und der absorbierenden Luftmasse Δm . Sie wird in Coulomb pro Kilogramm gemessen. Unter Energiedosis versteht man das Verhältnis aus der in ΔV absorbierten Energie ΔW und der absorbierenden Luftmasse Δm . Im SI-System besitzt sie die Einheit Joule pro Kilogramm, wofür das Gray (Gy) eingeführt wurde. Der Einfluss der Bestrahlungszeit wird in der Dosisleistung, dem Verhältnis von Dosis und Bestrahlungszeit, berücksichtigt. Definitionen dosimetrischer Größen und ihre Einheiten sind in **Tabelle 2** aufgeführt.

Die Messung der Ionendosisleistung erfolgt mit einer Ionisationskammer. Im einfachsten Fall handelt es sich dabei um einen luftgefüllten Plattenkondensator. An die Reihenschaltung Luftkondensator und Messwiderstand wird eine Gleichspannung angelegt, die eine genügend hohe Feldstärke zwischen den Kondensatorplatten erzeugt und dafür sorgt, dass die durch die Röntgenstrahlung entstandenen geladenen Teilchen ohne Regeneration (positive und negative Teilchen verschmelzen nicht) zur entsprechenden Elektrode gelangen. Das verursacht einen Stromfluss durch den Messwiderstand R (**Abb. 6**) verbunden mit einem Spannungsabfall U_R , dessen Größe von der Intensität und Art der Strahlung abhängt.

Im Vergleich zur übertragenen Energie wirken Neutronen- und α -Strahlen auf Gewebe deutlich stärker als β -, γ - oder Röntgenstrahlen. Diesem Sachverhalt wird mit der Angabe eines dimensionslosen **Bewertungsfaktors** q , der für β -, γ - und Röntgenstrahlen gleich 1 ist, für α -Strahlen aber den Wert 20 hat, Rechnung getragen. Die **Äquivalentdosis** H ist definiert als Produkt aus Energiedosis D und Bewertungsfaktor q (**Tabelle 2**). Damit kann die biologische Wirkung unterschiedlicher Strahlenarten vergleichend beurteilt werden. Die Äquivalentdosis wird in der Einheit Joule pro Kilogramm oder Sievert (Sv) angegeben.

Tabelle 2: Grundgrößen der Dosimetrie

Größe	Definition	SI-Einheit	Alte Einheit
Ionendosis J	$J = \Delta Q / \Delta m$	C/kg	Röntgen (R) $1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$
Energiedosis D	$D = \Delta W / \Delta m$	1 Gy = 1 J/kg	Rad (rd) $1 \text{ rd} = 10^{-2} \text{ Gy}$
Ionendosisleistung \dot{J}	$\dot{J} = J/t$	A/kg	
Energiedosisleistung \dot{D}	$\dot{D} = D/t$	Gy/s	
Äquivalentdosis H	$H = D \times q$	1 Sv = 1 J/kg*	Röntgen equivalent men (rem) $1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$

* Sv anstelle von Gy bedeutet: die Energiedosis D wurde mit dem Bewertungsfaktor q für die verwendete Strahlenart multipliziert.

Zubehör

Röntgenerät XR 4.0, Holzwürfel, zwei Filmkassetten mit eingelegtem Röntgenfilm, Ionisationskammer im Röntgenerät, Digitalvoltmeter, Entwicklungseinrichtung (Dunkelkammer, Entwickler, Fixierbad, Trockenschrank), Filmbetrachter.

Aufgaben

1. Bestimmen Sie die Länge (l) und die Lage (Richtungswinkel α , β und γ) eines Metallstiftes in einem Holzwürfel

- Zur Bestimmung der Lage des Metallstiftes im Holzwürfel sind Würfel und Filmkassette in die dafür vorgesehene Halterung zu schieben.
- Als Nullpunkt des Koordinatensystems, das für die Auswertung der Aufnahmen erforderlich ist, verwende man die abgeschrägte Würfecke. Im Röntgenbild erscheint dort ein kleiner heller Strich.
- Fertigen Sie je eine Aufnahme mit der roten (abgeschrägte Ecke links unten) und der blauen (abgeschrägte Ecke rechts unten) Seite zur Röntgenröhre an.
- Die rote Seite des Würfels ist die xz -Ebene, die blaue die yz -Ebene. Bei der Aufnahme soll die als z -Achse bezeichnete Kante zwischen der roten und blauen Fläche senkrecht über der abgeschrägten Ecke stehen.
Zur späteren Identifizierung der beiden Aufnahmen ist die rote Ebene mit einem Punkt rechts oben markiert.
- Die Halterung mit Würfel und Filmkassette wird an die vorgesehene Stelle im Experimentierraum der Röntgenapparatur positioniert.
- Das Bedienfeld der Röntgenapparatur ist in **Abb. 4** dargestellt. Alle eingestellten Parameter erscheinen zur Kontrolle im Hauptmenü am oberen Rand des Displays. Licht kann nach Belieben an- oder ausgeschaltet werden. Der Ton bleibt während des gesamten Versuches aus.

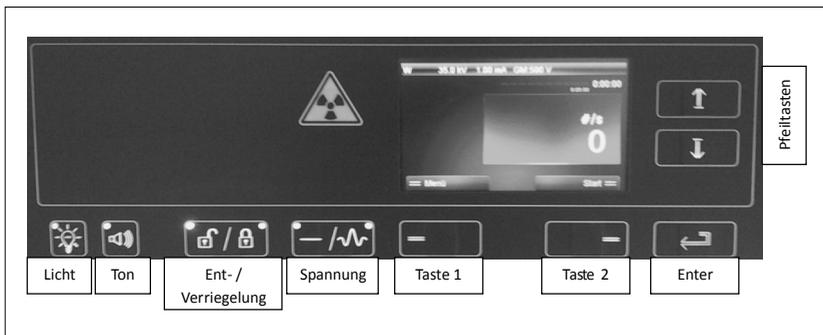


Abb. 4: Bedienfeld der Röntgenapparatur

- Ein sanfter Druck nach rechts am Griff der **Sicherheitstür** rastet diese ein bzw. aus. Für den Betrieb der Röntgenröhre muss die Tür eingerastet sein und anschließend per Tastendruck verriegelt werden (erfolgreiche Verriegelung ist hörbar und sichtbar am Signallicht der **Ent-/Verriegelungstaste**). Sollte keine Verriegelung erfolgen, öffnen

und schließen Sie die Tür erneut. Nach erfolgreicher Verriegelung muss die Tür zum Öffnen wieder entriegelt und anschließend ausgerastet werden. Versuchen Sie niemals die Tür gewaltsam zu öffnen.

Während des Betriebs der Röntgenröhre kann und darf die Verriegelung nicht gelöst werden.

- Zur Einstellung der Hochspannung öffnen Sie das Menü mit **Taste 1**. Wählen Sie „**X-Ray Parameter**“ und anschließend „**Hochspannung**“ aus und bestätigen Sie jeweils mit **Enter**. Stellen Sie per **Pfeiltasten** 35 kV ein und bestätigen Sie mit **Enter**. In analoger Weise stellen Sie anschließend den „**Strahlstrom**“ auf 1,00 mA ein.
- Zur Einstellung der Aufnahmezeit öffnen Sie das Menü mit **Taste 1**. Wählen Sie „**Timer**“ und anschließend „**Dauer**“ aus. Stellen Sie mit den **Pfeiltasten** „**Expose**“ auf 0:01:00 (1 Minute) und „**Delay**“ auf 0:00:00 ein. Bestätigen Sie jede Einstellung mit **Enter**. Anschließend erfolgt automatisch die Abfrage des Timer-Status. Wählen Sie „**Ein**“ (blau hinterlegt) und bestätigen Sie mit **Enter**.
- Starten Sie die Aufnahme mit **Taste 2**. Die Röhre erlischt automatisch nach einer Minute. Wiederholen Sie den Vorgang mit der blauen Würfelseite und einer neuen Filmkassette.
- Die Filme werden in der Dunkelkammer bei Rotlicht drei Minuten entwickelt, zwischengewässert, drei Minuten fixiert, nochmals gewässert und danach im Trockenschrank getrocknet. Die Zeiten sind am Kurzzeitwecker einzustellen. Zwei Zangen (mit E für Entwickler und F für Fixierlösung gekennzeichnet) dienen dem Transport der Filme. Berühren Sie die Filme dabei nur an den Ecken. Eine Verwechslung der Zangen ist zu vermeiden.

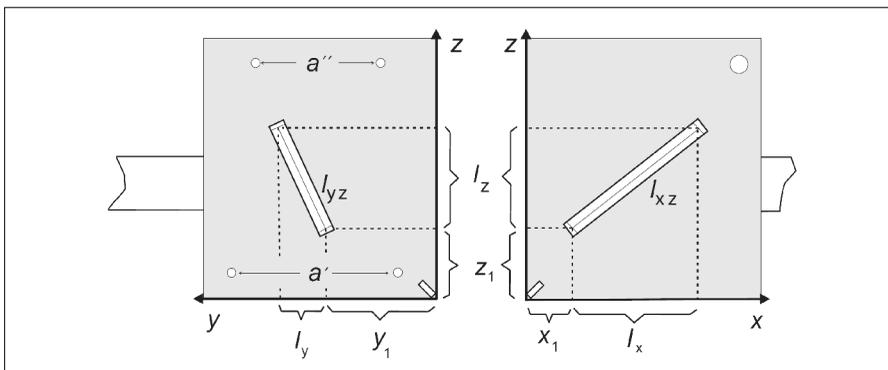


Abb. 5: links: Projektion des Metallstiftes in die yz-Ebene (blaue Seite des Würfels)
 rechts: in die xz-Ebene (rote Seite)
 Beachten Sie die Markierung für Koordinatenursprung auf beiden Projektionen und Markierung der xz-Projektion (Kreis oben)

- Legen Sie die entwickelten Filme mit den Projektionen der xz - und yz -Ebene auf den Betrachter (**Abb. 5**) und vermessen Sie die Strecken l_x , l_y und l_z und berechnen Sie l nach **Formel (3)** sowie die Richtungswinkel α , β und γ . **Achten Sie darauf, dass der im Bild sichtbare Teil der Halterung horizontal ausgerichtet ist.**

$l_x =$	$u(l_x) =$	
$l_y =$	$u(l_y) =$	
$l_z =$	$u(l_z) =$	
$l =$		
$\alpha =$	$\beta =$	$\gamma =$

2. Verifizieren Sie die Beziehung

$$u(l) = \frac{l_x}{l} u(l_x) + \frac{l_y}{l} u(l_y) + \frac{l_z}{l} u(l_z)$$

die sich nach Gleichung (5), Seite 153, ergibt und berechnen Sie $u(l)$.

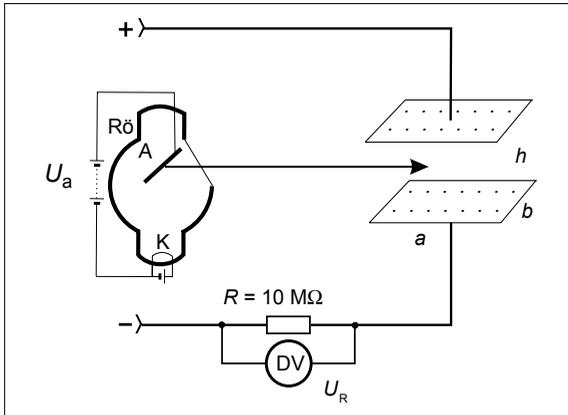
$$u(l) =$$

3. Bestimmen Sie die korrigierte Länge l_{kor} des Metallstiftes, indem Sie die Vergrößerung V berücksichtigen, die aufgrund divergenter Strahlen bei der Zentralprojektion auftritt.

- Eine Länge von $a = 25$ mm ist dafür auf der blauen Seite des Würfels unten und auf der zugehörigen Rückseite oben markiert worden. In der yz -Projektion erscheinen diese Längen als Abstand zweier Punkte unten und oben auf dem Film (**Abb. 5**).
- Die Vergrößerung V bei der Projektion hängt vom Abstand – abzubildender Gegenstand Film – ab. So wird die untere Länge a (größerer Abstand vom Film) auf a' vergrößert, während die obere Länge a nur auf a'' vergrößert wird.

$$a' = \quad a'' = \quad V = \frac{a' - a''}{2a} = \quad l_{\text{kor}} = \frac{l}{V} =$$

4. Bestimmen Sie die Ionendosisleistung und Energiedosisleistung am Ort der Ionisationskammer in Abhängigkeit von der Spannung U_a an der Röntgenröhre (Abb. 6)



Rö: Röntgenröhre
 DV: Digitalvoltmeter
 a, b, h: Länge, Breite und Höhe der Ionisationskammer

Abb. 6:
 Zur Bestimmung der Dosisleistung

Die Ionendosisleistung \dot{J} ist im speziellen Fall

$$\dot{J} = \frac{J}{t} = \frac{Q}{mt} \tag{4}$$

- mit
- J : Ionendosis
 - t : Messzeit
 - Q : Ladung, die zwischen den Platten der Ionisationskammer entsteht
 - m : $m = \rho V$, Masse der Luft in der Ionisationskammer
 - ρ : $\rho = 1,29 \text{ gl}^{-1}$, Dichte der Luft bei Raumtemperatur
 - V : $V = abh$, Kammervolumen, das aus Plattengröße ab und Plattenabstand h bestimmt wird.

Weiter ergibt sich

$$Q = I \cdot t = \frac{U_R}{R} \cdot t \tag{5}$$

- I : Strom durch Ionisationskammer und Messwiderstand
- U_R : Spannungsabfall am Messwiderstand ($R = 10 \text{ M}\Omega$), der am Digitalvoltmeter abgelesen wird (Abb. 6).

Aus (4) und (5) folgt

$$j = \frac{U_R}{R \cdot \rho \cdot a \cdot b \cdot h} \quad (6)$$

- Für die Energiedosisleistung gilt $\dot{D} = k\dot{J}$; $k = 33,7 \text{ V}$.
- Die Spannung U_R wird in Abhängigkeit von der Anodenspannung U_a am Digitalvoltmeter abgelesen. Beginnen Sie die Messreihe bei $U_a = 8 \text{ kV}$ und erhöhen Sie danach U_a in Schritten von 3 kV bis $U_a = 35 \text{ kV}$.
- Entnehmen Sie den Würfel samt grauer Halterung. Schließen und verriegeln Sie die Sicherheitstür. Stellen Sie Hochspannung entsprechend der Aufgabenstellung ein. Folgen Sie dazu der Anleitung zu **Aufgabe 1**.
- Zur Abschaltung der Aufnahmezeit öffnen Sie das Menü mit **Taste 1**. Wählen Sie „**Timer**“ und anschließend „**Status**“ aus und bestätigen Sie jeweils mit **Enter**. Wählen Sie „**Aus**“ (blau hinterlegt) und bestätigen Sie mit **Enter**.
- Starten Sie die Röntgenröhre mit der **Spannungs**-Taste. Die Änderung der Hochspannung kann während des Betriebs der Röntgenröhre vorgenommen werden. Folgen Sie dazu der Anleitung zu **Aufgabe 1**.
- Schalten Sie die Röntgenröhre nach Beendigung der Messungen per **Spannungs**-Taste wieder aus.
- Protokollieren Sie die Messwerte und berechneten Größen in **Tabelle 3** und geben Sie die entsprechenden Einheiten an.

Für **Gleichung (6)**

$a =$

$b =$

$h =$

$\rho =$

Tabelle 3: \dot{J} und \dot{D} in Abhängigkeit von U_a

$U_a/$	$U_R/$	$\dot{J}/$	$\dot{D}/$

Stellen Sie \dot{J} und \dot{D} nach Wahl geeigneter Maßstäbe im vorbereiteten Koordinatensystem grafisch dar.

