



(11) EP 3 389 055 A1

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:  
17.10.2018 Patentblatt 2018/42(51) Int Cl.:  
G21K 1/02 (2006.01)  
H01J 35/00 (2006.01)  
H05H 7/00 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: 17165888.3

(22) Anmeldetag: 11.04.2017

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB  
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO  
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**  
 Benannte Erstreckungsstaaten:  
**BA ME**  
 Benannte Validierungsstaaten:  
**MA MD**

(71) Anmelder: **Siemens Healthcare GmbH**  
91052 Erlangen (DE)

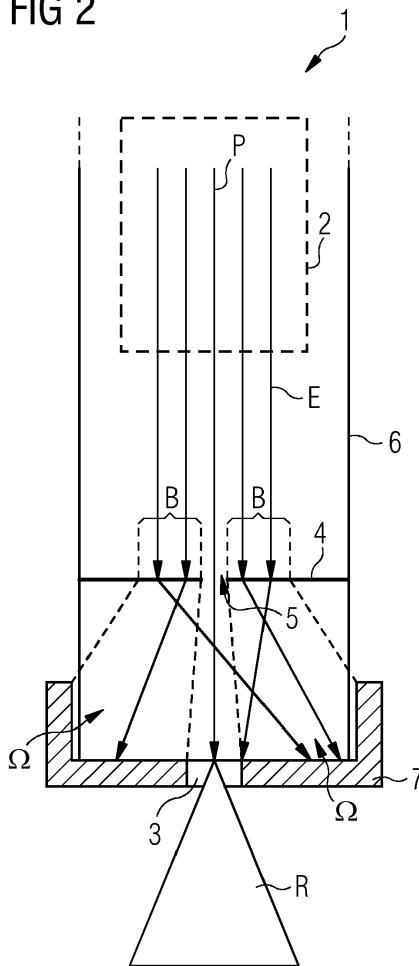
(72) Erfinder:  

- Möller, Marvin  
07751 Jena (DE)
- Müller, Sven  
99198 Urbich (DE)
- Koschmieder, Martin  
07407 Rudolstadt (DE)
- Willing, Stefan  
07407 Rudolstadt (DE)

## (54) RÖNTGENEINRICHTUNG ZUR ERZEUGUNG VON HOCHENERGETISCHER RÖNTGENSTRÄHLUNG

(57) Eine Röntgeneinrichtung (1) zur Erzeugung von hochenergetischer Röntgenstrahlung umfasst einen Linearbeschleuniger (2) und ein Target (3). Der Linearbeschleuniger (2) ist zur Erzeugung von Röntgenstrahlung (R) dazu ausgebildet, einen auf das Target (3) gerichteten Elektronenstrahl (E) zu erzeugen, dessen kinetische Energie pro Elektron zumindest 1MeV beträgt. Gemäß der Erfindung ist eine Blende (4) im Strahlengang des Elektronenstrahls (E) zwischen Linearbeschleuniger (2) und Target (3) angeordnet, welche einen eine Blendenöffnung (5) umgebenden Randbereich (B) aufweist, dessen Materialstärke in Propagationsrichtung (P) des Elektronenstrahls (E) weniger als 10% der mittleren Reichweite von Elektronen der erzeugten kinetischen Energie im Material des Randbereichs (B) beträgt.

FIG 2



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine Röntgeneinrichtung zur Erzeugung von hochenergetischer Röntgenstrahlung, umfassend einen Linearbeschleuniger und ein Target. Der Linearbeschleuniger ist zur Erzeugung von Röntgenstrahlung dazu ausgebildet, einen auf das Target gerichteten Elektronenstrahl zu erzeugen, dessen kinetische Energie pro Elektron zumindest 1MeV beträgt.

**[0002]** Röntgeneinrichtungen weisen typischerweise eine Elektronenstrahlquelle auf, die einen beschleunigten Elektronenstrahl zur Beaufschlagung eines Targets (auch: Zielmaterial) bereitstellen. Beim Auftreffen der Elektronen auf das Target entsteht im Bereich des so genannten Brennflecks Röntgenstrahlung. Die Elektronenstrahlquelle wird für gewöhnlich von einer Kathode gebildet, wobei die austretenden Elektroden durch eine anliegenden Beschleunigungsfeldstärke in Richtung einer Anode, welche in derartigen Ausführungen das Target bildet, beschleunigt werden. Bei Hochenergieanwendungen ist es ferner bekannt, einen Linearbeschleuniger als Elektronenstrahlquelle einzusetzen, der einen auf das Target gerichteten Elektronenstrahl bereitstellt.

**[0003]** In vielen Anwendungen der Radioskopie oder Radiologie besteht das Bedürfnis, einen möglichst kleinen Brennfleck zu erzeugen. Bei der Bildgebung kann dadurch beispielsweise eine hohe Ortsauflösung bei optischer Vergrößerung erreicht werden oder die von den das Röntgenstrahlenfeld begrenzenden Blenden verursachten Halbschatten verkleinert werden. Bei der Strahlentherapie, insbesondere bei der intensitätsmodulierten Strahlentherapie, kann so weiterhin eine präzise Dosisverteilung der deponierten Röntgenstrahlung realisiert werden.

Aus DE 10 2012 103 974 A1 ist eine Röntgenröhre für die medizinische Bildgebung wie der Computertomographie bekannt, die eine Kathode und eine Anode umfasst. Der Elektronenstrahl ist auf ein Target zur Erzeugung von Röntgenstrahlung gerichtet. Zur Begrenzung der Brennfleckgröße auf dem Target durchläuft der Elektronenstrahl einen seitlich begrenzenden Blendenkanal, der in einem Blendenkörper eingebracht ist. Um die bei der Absorption der Elektronen entstehende Wärme abführen zu können, muss der Bereich um den Blendenkanal möglichst massiv ausgeführt werden, gegebenenfalls ist zusätzlich eine Wasserkühlung vorgesehen.

**[0004]** Ausgehend von diesem Stand der Technik ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Röntgeneinrichtung zur Erzeugung von hochenergetischer Röntgenstrahlung anzugeben, bei der die Ausdehnung des Brennflecks auf dem Target minimiert werden kann.

**[0005]** Gemäß der Erfindung wird diese Aufgabe gelöst durch eine Röntgeneinrichtung zur Erzeugung von hochenergetischer Röntgenstrahlung der eingangs genannten Art mit den kennzeichnenden Merkmalen des Patenanspruchs 1.

**[0006]** Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung

sind Gegenstand der Unteransprüche.

**[0007]** Eine Röntgeneinrichtung zur Erzeugung von hochenergetischer Röntgenstrahlung umfasst einen Linearbeschleuniger und ein Target. Das Target besteht typischerweise aus einem Zielmaterial, welches zur Erzeugung von Röntgenstrahlung durch Abbremsung der beschleunigten Elektronen dient. Der Bereich des Targets, in dem diese Konvertierung stattfindet, wird als Brennfleck bezeichnet. Der Linearbeschleuniger ist weiterhin dazu ausgebildet und ausgerichtet, einen auf das Target gerichteten Elektronenstrahl zu erzeugen, dessen kinetische Energie pro Elektron zumindest 1MeV beträgt. Gemäß der Erfindung ist im Strahlengang des Elektronenstrahls zwischen dem Linearbeschleuniger und dem Target eine Blende angeordnet, welche einen eine Blendenöffnung umgebenden Randbereich aufweist, dessen Materialstärke in Propagationsrichtung des Elektronenstrahls weniger als 10% der mittleren Reichweite von Elektronen der erzeugten kinetischen Energie im Material des Randbereichs beträgt.

**[0008]** In Linearbeschleunigern werden typischerweise hohe kinetische Energien erreicht, so dass die emittierten Elektronen eine im Vergleich zu den in herkömmlichen Röntgenröhren erzeugten Elektronen erhöhte mittlere Reichweite in Materialien haben. Die Erfindung wählt zur Begrenzung des Brennflecks in diesem energetischen Bereich den Ansatz, eine Blende vorzusehen, die nicht dazu ausgebildet ist, die Elektronen des erzeugten Energiebereichs in merklichem Ausmaß zu absorbieren, vielmehr ist vorgesehen, dass die Wechselwirkung im Wesentlichen auf inelastische oder elastische Streuvorgänge beschränkt werden soll. Hierzu weist die Blende zumindest in dem die Blendenöffnung begrenzenden Randbereich eine Materialstärke auf, die lediglich ein Bruchteil der mittleren Reichweite von Elektronen der erzeugten kinetischen Energie im Material der Randbereichs beträgt. Bei der Transmission des Elektronenstrahls durch den Randbereich der Blende erfahren die peripheren Elektronen, welche den Randbereich durchdringen, eine Auslenkung und werden gestreut. Die daraufhin divergent propagierenden Elektronen treffen anschließend im Allgemeinen nicht mehr auf das Zielmaterial auf, welches das Target bildet. Der den Brennfleck erzeugende Bereich des Elektronenstrahls ist somit im Wesentlichen auf den Bereich der Blendenöffnung begrenzt. Gleichzeitig ist der Energieübertrag auf die Blende minimal, da dieser im Wesentlichen nur auf inelastische Streueffekte beruht. Dies bedingt unter anderem einen geringeren Wärmeeintrag auf die Blende, die daher nicht notwendigerweise zusätzlich gekühlt werden muss.

**[0009]** Mit anderen Worten bildet der Randbereich der Blende einen Streukörper (auch: Diffusor) für die hindurchtretenden Elektronen des von der anliegenden Beschleunigungsspannung vorgegebenen Energiebereichs. Die dabei zufällig ausgelenkten Elektronen können in anderen Bereichen der Röntgeneinrichtung absorbiert werden und sind somit im Nutzstrahlenfeld der

erzeugten Röntgenstrahlung nicht mehr sichtbar. Die Begrenzung der Ausdehnung des Brennflecks auf dem Target (auch: Zielmaterial) bedingt unter anderem eine verbesserte Bildqualität bei bildgebenden Verfahren. So weisen die erfassten Bilder eine geringere Unschärfe bzw. kleinere Halbschatten auf, da sich die Ausdehnung des Brennflecks einer idealen Punktquelle annähert. Mögliche Anwendungsfelder betreffen beispielsweise die Radioskopie, insbesondere die zerstörungsfreie Prüfung von Werkstücken, Bauteilen oder anderen Objekten, die Überprüfung von Transportgut, insbesondere im Rahmen einer Frachtgutkontrolle, bei der beispielsweise Lastkraftwagen oder Frachtcontainer für Züge oder Containerschiffe durchleuchtet werden, um deren Inhalt sichtbar zu machen oder Anwendungen im Bereich der Medizin, insbesondere im Bereich der Strahlentherapie. So kann beispielsweise durch die von der Erfindung bereitgestellte Begrenzung des Brennflecks eine präzisere Dosisverteilung bei der Strahlentherapie, insbesondere bei der intensitätsmodulierten Strahlentherapie realisiert werden, da die Halbschatten des das Photonenstrahlenfeld begrenzenden Kollimators kleiner sind. Zudem können die Röntgeneinrichtungen hinsichtlich ihres Gewichts optimiert werden, da nachgeschaltete Kollimateure zur Kollimation der erzeugten Röntgenstrahlung wegfallen oder zumindest begrenzt können.

**[0010]** Die Blende besteht in einem einfachen Ausführungsbeispiel aus einem dünnen Blech insbesondere aus Stahl oder einem anderen Übergangsmetall oder -legierung. Ein weiteres, besonders bevorzugtes nichtmetallisches Material für die Blende ist beispielsweise Graphit.

**[0011]** Es versteht sich, dass das Material und die Materialstärke der Blende zumindest in dem die Blendenöffnung umgebenden Randbereich auf die kinetische Energie der beim bestimmungsgemäßen Gebrauch der Röntgeneinrichtung erzeugten Elektronen abgestimmt ist. Bei kinetischen Energien im MeV-Bereich liegt die Materialstärke typischerweise im Bereich von einem oder mehreren Millimetern, wenn diese aus einem leichten Material wie beispielsweise Graphit besteht. Blenden aus einem schwereren Material, insbesondere Metall weisen geringere Materialstärken beispielsweise im Submillimeterbereich, insbesondere im Bereich von etwa 1/10 mm, auf.

**[0012]** In einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung ist zumindest der die Elektronen streuende Randbereich der Blende von einer Folie oder mehreren Folien gebildet. Derartige Ausführungen sind als kostengünstige Implementationen eines Streukörpers von hinreichend geringer Dicke zu sehen, bei denen sichergestellt ist, dass die Wechselwirkung mit den Elektronen der erzeugten kinetischen Energie im Wesentlichen auf Streuprozesse beschränkt ist. Ist der Bereich der Blende, der ursächlich für die Streuung der Elektronen ist, von einem derartigen Folienmaterial gebildet, so ist der Wärmeeintrag minimal. Die derartig ausgebildeten Blenden müssen daher während des Betriebs der Röntgenein-

richtung nicht notwendigerweise aktiv gekühlt werden.

**[0013]** Die Folie besteht vorzugsweise aus einem Metall. Besonders bevorzugt besteht die Blende bzw. zumindest der streuende Randbereich der Blende aus Titan. In anderen Ausführungsbeispielen besteht die Blende oder zumindest der die Blendenöffnung umgebende Randbereich aus Edelstahl, Wolfram oder Kupfer oder aus einem anderen Übergangsmetall oder Übergangsmetalllegierung.

**[0014]** Die Blende, insbesondere die vorstehend beschriebene Blende bestehend aus zumindest einer metallischen Folie, ist in einem möglichen Ausführungsbeispiel mittels einer Kühlleinrichtung, insbesondere mittels einer Wasserkühlleinrichtung kühlbar. Somit ist sichergestellt, dass auch der durch inelastische Streuprozesse übertragene, relativ geringe Wärmeübertrag zuverlässig abgeführt werden kann.

**[0015]** Vorzugsweise ist ein Kollimator im Strahlengang der durch Beaufschlagung des Targets erzeugten Röntgenstrahlen angeordnet. Dieser dient zur Begrenzung des Nutzstrahlenfelds der erzeugten Röntgenstrahlung. Ist der Ort der Röntgenstrahlentstehung (Brennfleck) klein, so sind auch die Halbschatten an den Grenzen des Nutzstrahlenfeldes klein.

**[0016]** Besonders bevorzugt ist ein zumindest den Linearbeschleuniger, die Blende und das Target umgebendes Vakuumgehäuse oder eine diese Bauteile umgebende Vakuumhülle zumindest bereichsweise mit einer Abschirmung versehen, die dazu geeignet ist, Röntgenstrahlung zu absorbieren, die von gestreuten Elektronen hervorgerufen wird, welche auf das Vakuumgehäuse auftreffen und dadurch abgebremst werden. Die dabei entstehende Röntgenstrahlung kann durch die Wahl des Wandungsmaterials spektral beeinflusst werden und ist lokal bevorzugt durch eine außerhalb des Vakuumgehäuses angeordnete Abschirmung abzuschirmen. In anderen Ausführungsbeispielen ist die Abschirmung im Inneren des Vakuumgehäuses vorgesehen. Da das Vakuumgehäuse der Röntgeneinrichtung evakuiert ist, besteht die im Inneren des Vakuumgehäuses vorgesehene Abschirmung vorzugsweise aus einem Material mit hohem Dampfdruck, besonders bevorzugt umfasst die Abschirmung Elemente mit kleiner Kernladungszahl. Außenseitig am Vakuumgehäuse können zur

Abschirmung auch Materialien zum Einsatz kommen, welche einen niedrigen Dampfdruck aufweisen. Diese Abschirmung besteht beispielsweise ganz oder zum Teil aus Blei. Da die gestreuten Elektronen vom Material der Blende nicht absorbiert werden, breiten diese sich divergent zur Propagationsrichtung des Elektronenstrahls aus und treffen auf das mit Abschirmmaterialien versehene Vakuumgehäuse auf, von welchem sie absorbiert werden. Da die Absorption der an der Blende gestreuten Elektronen in keinem stark lokalisierten Bereich, sondern in großflächigen Bereichen des Vakuumgehäuses erfolgt, kann auch hier im Allgemeinen auf eine externe Kühlung verzichtet werden.

**[0017]** In anderen möglichen Ausgestaltungen der Er-

findung ist das Vakuumgehäuse der Röntgeneinrichtung, mittels einer Fluidkühlung kühlbar.

**[0018]** Besonders bevorzugt weisen die mit der Abschirmung versehenen Bereiche gegenüber Bereichen des Vakuumgehäuses ohne Abschirmung eine für Elektronen der erzeugten kinetischen Energie erhöhte Absorption auf. Mit anderen Worten ist vorgesehen, lediglich diejenigen Bereiche mit einer Abschirmung zu versehen, welche für die Absorption von gestreuten Elektronen relevant sind. Dies trägt unter anderem zur Gewichtsreduktion bei.

**[0019]** Die mit der Abschirmung versehenen Bereiche liegen vorzugsweise ausschließlich innerhalb eines von der Blende ausgehenden, sich in Propagationsrichtung des Elektronenstrahls erstreckenden Raumwinkelbereichs. Der Raumwinkelbereich wird bevorzugt von einer Vielzahl von überlagerten Streukegeln gebildet, deren Kegelspitzen innerhalb des die Blendenöffnung umgebenden Randbereichs liegen. Mit anderen Worten ist die Abschirmung dort angeordnet, wo die im Randbereich der Blende gestreuten Elektronen zumindest mit hoher Wahrscheinlichkeit auftreffen.

**[0020]** In Weiterbildung der Erfindung ist vorgesehen, dass der abzuschirmende Raumwinkelbereich einem mittleren Streuwinkelbereich der im Randbereich der Blende gestreuten Elektronen entspricht. Diese Weiterbildung macht sich die Beobachtung zunutze, dass der mittlere Streuwinkel sowohl von der kinetischen Energie der einfallenden Elektronen als auch vom Streukörper, welcher hier von dem die Blendenöffnung umgebenden Randbereich bereitgestellt wird, abhängt. In Abhängigkeit der bei Betrieb angelegten Beschleunigungsspannung und dem zur Begrenzung des Brennflecks eingesetzten Streumaterials ist somit ermöglicht, eine selektive Dimensionierung der Abschirmung vorzusehen. Dadurch ist insbesondere eine weitergehende Gewichtsreduktion ermöglicht, da nur diejenigen Bereiche des Vakuumgehäuses mit einer Abschirmung versehen werden, in denen der Großteil der gestreuten Elektronen absorbiert wird. So ist beispielsweise die Auslenkung der gestreuten Elektronen bezüglich der Propagationsrichtung der nicht gestreuten Elektronen bei höheren Energien kleiner als bei Elektronen geringerer kinetischer Energie. Im Ergebnis kann daher die Abschirmung bei Röntgeneinrichtungen, die zur Bereitstellung von höherenergetischer Röntgenstrahlung ausgebildet sind, auf einen kleineren, um die Propagationsrichtung des nicht gestreuten Elektronenstrahls konzentrierten Raumwinkelbereich begrenzt werden.

**[0021]** Als mittlerer Streuwinkelbereich im Sinne der vorliegenden Spezifikation wird ein um den mittleren Streuwinkel zentrierter Streukegel angenommen, dessen Öffnungswinkel einer für den Streuprozess charakteristischen mittleren Abweichung, insbesondere einer Standardabweichung entspricht. Der mittlere Streuwinkel bezeichnet den Mittelwert der Winkel der gestreuten Elektronen zur Beschleunigungsachse, welch mit der Propagationsrichtung der ungestreuten Elektronen über-

einstimmt.

**[0022]** Der Linearbeschleuniger der Röntgeneinrichtung ist bevorzugt dazu ausgebildet, einen Elektronenstrahl zu erzeugen, dessen kinetische Energie pro Elektron weniger als 20MeV beträgt. Die Röntgeneinrichtung ist somit bevorzugt für die bereits beschriebenen Anwendungen im Bereich der Radioskopie oder Radiologie einsetzbar.

**[0023]** Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zur Herstellung einer Röntgeneinrichtung zur Erzeugung von hochenergetischer Röntgenstrahlung, insbesondere ein Verfahren zur Herstellung einer der vorstehend beschriebenen Röntgeneinrichtungen. Die Röntgeneinrichtung umfasst einen Linearbeschleuniger und ein Target, wobei der Linearbeschleuniger zur Erzeugung von Röntgenstrahlung dazu ausgebildet ist, einen auf das Target gerichteten Elektronenstrahl zu erzeugen, dessen kinetische Energie pro Elektron zumindest 1MeV beträgt. Gemäß der Erfindung wird ein Bauteil im Strahlengang des Elektronenstrahls zwischen Linearbeschleuniger und Target angeordnet, dessen Materialstärke in Propagationsrichtung des Elektronenstrahls weniger als 10% der mittleren Reichweite von Elektronen der erzeugten kinetischen Energie im Material des Bauteils beträgt. In das Bauteil wird eine Blendenöffnung dadurch eingebracht, dass das Bauteil mit einem von dem Linearbeschleuniger erzeugten Elektronenstrahl beaufschlagt wird. In diesem Sinne bildet das Bauteil nach Einbringen der Blendenöffnung die bereits beschriebene Blende.

**[0024]** Es hat sich gezeigt, dass die mittels Linearbeschleunigern erzeugten Elektronenstrahlen auf Grund der anliegenden elektrischen Feder bereits stark fokussiert sind, so dass die Teilchendichte im Zentrum des Elektronenstrahls stark erhöht ist. Diese Eigenschaft macht sich die Erfindung zunutze, um die vorstehend beschriebene Blendenöffnung in das Bauteil einzubringen. Hierzu wird gegebenenfalls die vom Linearbeschleuniger bereitgestellte Stromstärke des beschleunigten Elektronenstrahls gegenüber der im normalen Betrieb generierten Stromstärke erhöht, um ein Loch in das im Strahlengang eingebrachte Bauteil -welches beispielsweise von einer oder mehrerer der vorstehend beschriebenen Folien gebildet ist- hinein zu brennen. Die Dimensionierung der so erzeugten Blendenöffnung entspricht dabei dem zentralen Bereich des Elektronenstrahls und damit automatisch einer Blendenöffnung mit den vorstehend beschriebenen Streucharakteristik für die abseits des zentralen Bereichs propagierenden Elektronen. Eine aufwendige Justage einer bereits eine Blendenöffnung aufweisende Blende kann vermieden werden und damit Montage- und Justierungskosten eingespart werden.

**[0025]** Für eine weitere Beschreibung der Erfindung werden auf die in den Zeichnungsfiguren gezeigten Ausführungsbeispiele verwiesen. Es zeigen in einer schematischen Darstellung:

Fig. 1: eine Röntgeneinrichtung gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel in einer schematischen Schnittdarstellung;

Fig. 2: eine Röntgeneinrichtung gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel in einer schematischen Schnittdarstellung;

Fig. 3: mittlere Streubereiche bei der Elektronenstreuung an einem ausgewählten Streukörper.

**[0026]** Einander entsprechende Teile oder Bezugsgrößen sind in allen Figuren mit den gleichen Bezugszeichen versehen.

**[0027]** Figur 1 zeigt eine Röntgeneinrichtung 1 gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung in einer schematischen Schnittdarstellung. Die Röntgeneinrichtung 1 umfasst einen lediglich schematisch dargestellten Linearbeschleuniger 2, der dazu ausgelegt ist, einen Elektronenstrahl E der kinetischen Energie von zumindest 1MeV pro Elektron zu erzeugen. Der Elektronenstrahl E ist auf ein Target 3 gerichtet. Das Target 3 emittiert im Bereich eines Brennflecks Röntgenstrahlung R.

**[0028]** Im Strahlengang zwischen Linearbeschleuniger 2 und Target 3 ist eine Blende 4 angeordnet, die einen peripheren Teil des einfallenden primären Elektronenstrahls E diffus streut, so dass die Ausdehnung des Brennflecks auf dem Target 3 reduziert wird. Hierzu besteht zumindest eine Blendenöffnung 5 umgebende Randbereich B der Blende 4 aus einem Material, welches dazu geeignet ist, Elektronen der erzeugten kinetischen Energie zu streuen. Der Randbereich B der Blende 4 weist in Propagationsrichtung P des Elektronenstrahls E eine Materialstärke auf, die im Vergleich der Reichweite der Elektronen der erzeugten kinetischen Energie im Material des Randbereichs B klein ist. Konkret beträgt die Materialstärke des Randbereichs B in dem hier betrachteten Ausführungsbeispiel weniger als etwa 10% der Reichweite von Elektronen mit der kinetischen Energie von 1MeV im Material des Randbereichs B.

**[0029]** Die abseits vom Zentrum des Elektronenstrahls E propagierenden Elektronen werden vom Randbereich B diffus gestreut und somit großflächig über die innere Oberfläche eines Vakuumgehäuses 6 der Röntgeneinrichtung 1 verteilt. Entsprechend verteilt sich auch der von der Absorption dieser Elektronen verursachte Wärmeintrag über weite Bereiche des Vakuumgehäuses 6, so dass auf eine externe Kühlung des Vakuumgehäuses 6 verzichtet werden kann.

**[0030]** Außenseitig am Vakuumgehäuse 6 ist eine Abschirmung 7 angeordnet, die in dem exemplarischen Ausführungsbeispiel aus Blei besteht und sich - mit Ausnahme des Bereichs des Targets 3 - über die gesamte äußere Oberfläche des Vakuumgehäuses 6 erstreckt.

**[0031]** Dadurch, dass seitliche Randbereiche des Elektronenstrahls E vom Target 3 weggestreut werden, können Halbschatten in mittels der erzeugten Röntgenstrahlung R erfassten Bildern minimiert werden. Als An-

wendungsfeld für die Röntgeneinrichtung 1 bietet sich somit die Radioskopie an, andere Anwendungsfelder betreffen beispielsweise die medizinische Strahlentherapie.

**[0032]** Die Blende 4 ist in dem gezeigten Ausführungsbeispiel aus einem einfachen Blech oder einer Folie aus Metall gebildet. Da die Wechselwirkung der Elektronen mit dem Material der Blende 4 im Wesentlichen auf inelastische und elastische Streuereignisse beschränkt ist, ist auch hier der Wärmeintrag minimal. Eine Kühlung der Blende 4 ist somit nicht zwingend erforderlich.

**[0033]** Optional ist eine Kühlseinrichtung 8 zur Fluidkühlung der Blende 4 vorgesehen, die schematisch in Figur 1 dargestellt ist. In diesem Fall ist die Blende 4 derart ausgestaltet, dass ein Kühlfluid, beispielsweise Wasser, zumindest durch einen Abschnitt der Blende hindurch geleitet werden kann. In einem möglichen Ausführungsbeispiel ist die Blende 4 von zwei planparallelen Folien gebildet, zwischen denen ein Zwischenraum gebildet ist, in den das Kühlfluid einbringbar ist.

**[0034]** Der Anteil der durch gestreute Elektronen verursachten Röntgenstrahlung R kann weiter reduziert werden, wenn eine Kollimation der vom Target 3 ausgehenden Röntgenstrahlung R erfolgt. Hierzu ist optional ein Kollimator 9, beispielsweise ein Lamellenkollimator, im targetnahen Bereich der austretenden Röntgenstrahlung R angeordnet.

**[0035]** Figur 2 zeigt eine Röntgeneinrichtung 1 gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel. Das zweite Ausführungsbeispiel unterscheidet sich von der in Figur 1 illustrierten Ausführung lediglich hinsichtlich der Ausdehnung der Abschirmung 7, so dass zunächst auf die diesbezüglichen Beschreibung verwiesen wird, um Wiederholungen zu vermeiden.

**[0036]** Bei dem in Figur 2 dargestellten zweiten Ausführungsbeispiel ist die Abschirmung 7 auf einen Teilbereich des Vakuumgehäuses 6 beschränkt. Die Auslegung der Abschirmung 7 erfolgt derart, dass zumindest der überwiegende Anteil der im Randbereich B gestreuten Elektronen von der Abschirmung 7 absorbiert werden. Hierzu ist ein von dem streuenden Randbereich B ausgehender Raumwinkelbereich  $\Omega$  (in Figur gestrichelt angedeutet) abzuschirmen, in den im Mittel zumindest die überwiegende Mehrzahl Elektronen gestreut werden. Die Ausdehnung der Abschirmung 7 ist somit in Abhängigkeit der kinetischen Energie der Elektronen nach Maßgabe des mittleren Streuwinkels  $\phi$  und der mittleren Abweichung von diesem mittleren Streuwinkel  $\phi$  auszulegen.

**[0037]** Die zur Auslegung der Abschirmung 7 relevante Information ist in Figur 3 für ein ausgewähltes Streumaterial und für bestimmte Energiebereiche zwischen 2MeV und 18MeV illustriert. Gezeigt sind jeweils der für Elektronenstreuung der jeweiligen Energie maßgebliche mittlere Streuwinkel  $\phi$  und die mittlere Abweichung  $\sigma$  hiervon, die als um den mittleren Streuwinkel  $\phi$  zentrierte Balken dargestellt ist. Die mittlere Abweichung  $\sigma$  entspricht hier der Standardabweichung, so dass in dem

hier illustrierten Beispiel unter der Annahme von normal-verteilten Streuereignissen davon auszugehen ist, dass etwa 68% der in den von dem mittleren Streuwinkel  $\phi$  und der mittleren Abweichung  $\sigma$  festgelegten mittleren Streuwinkelbereich gestreut werden.

[0038] Die Kenntnis der mittleren Streuwinkelbereiche in Abhängigkeit der kinetischen Energie der einfallenden Elektronen kann dazu genutzt werden, die Röntgeneinrichtung 1 gezielt geometrisch auszustalten und abzuschirmen. Der Raumwinkelbereich  $\Omega$ , den die Abschirmung 7 abdeckt, entspricht der Summe der mittleren Streuwinkelbereiche, deren Streuzentren in dem für die Elektronenstreuung maßgeblichen Randbereich B der Blende 4 liegen. Die Ausdehnung der Abschirmung 7 kann durch diese Konstruktionsweise deutlich reduziert werden.

[0039] Ein bevorzugtes Verfahren zur Herstellung der vorstehend beschriebenen Röntgeneinrichtung 1 umfasst einen Verfahrensschritt, in dem ein Bauteil, welches im endmontierten Zustand die Blende 4 bildet, in den Strahlengang des vom Linearbeschleuniger 2 bereitgestellten Elektronenstrahls E eingebracht wird. Die Blendenöffnung 5 wird in das Bauteil mittels des Elektronenstrahls E hinein gebrannt. Hierzu kann gegebenenfalls vom Linearbeschleuniger 2 bereitgestellt Stromstärke des Elektronenstrahls gegenüber der beim regulären Betrieb erzeugten Stromstärke erhöht werden. Da die Anzahl der Elektronen aufgrund der fokussierenden Eigenschaften des Linearbeschleunigers 2 in einem zentralen Bereich des Elektronenstrahls E stark erhöht ist und randseitig stark abnimmt, verbleibt bei einem derartigen Vorgehen ein die Blendenöffnung 5 umgebender Randbereich B mit den vorstehend beschriebenen streuenden Eigenschaften. Randseitige Strahlbereiche des Elektronenstrahls E, in denen die Elektronenanzahl im Vergleich zum zentralen Bereich des Elektronenstrahls E stark vermindert ist, werden somit im regulären Betrieb der Röntgeneinrichtung 1 vom Target 3 weggestreut und so die Ausdehnung des Brennflecks auf dem Target 3 minimiert.

[0040] Obwohl die Erfindung im Detail mit Bezug auf das bevorzugte Ausführungsbeispiel näher illustriert und beschrieben wurde, so ist die Erfindung nicht hierdurch eingeschränkt. Andere Variationen und Kombinationen können vom Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne vom wesentlichen Gedanken der Erfindung abzuweichen.

#### Patentansprüche

- Röntgeneinrichtung (1) zur Erzeugung von hochenergetischer Röntgenstrahlung, umfassend einen Linearbeschleuniger (2) und ein Target (3), wobei der Linearbeschleuniger (2) zur Erzeugung von Röntgenstrahlung (R) dazu ausgebildet ist, einen auf das Target (3) gerichteten Elektronenstrahl (E) zu erzeugen, dessen kinetische Energie pro Elektron zumindest 1 MeV beträgt, gekennzeichnet durch eine im Strahlengang des Elektronenstrahls (E) zwischen Linearbeschleuniger (2) und Target (3) angeordneten Blende (4), welche einen eine Blendenöffnung (5) umgebenden Randbereich (B) aufweist, dessen Materialstärke in Propagationsrichtung (P) des Elektronenstrahls (E) weniger als 10% der mittleren Reichweite von Elektronen der erzeugten kinetischen Energie im Material des Randbereichs (B) beträgt.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

6

dest 1 MeV beträgt, gekennzeichnet durch eine im Strahlengang des Elektronenstrahls (E) zwischen Linearbeschleuniger (2) und Target (3) angeordneten Blende (4), welche einen eine Blendenöffnung (5) umgebenden Randbereich (B) aufweist, dessen Materialstärke in Propagationsrichtung (P) des Elektronenstrahls (E) weniger als 10% der mittleren Reichweite von Elektronen der erzeugten kinetischen Energie im Material des Randbereichs (B) beträgt.

- Röntgeneinrichtung (1) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest der Randbereich (B) der Blende (4) aus Graphit besteht.

- Röntgeneinrichtung (1) nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest der Randbereich (B) der Blende (4) von zumindest einer Folie gebildet ist.

- Röntgeneinrichtung (1) nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Folie aus einem Metall besteht.

- Röntgeneinrichtung (1) nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Folie zumindest zum Teil aus Titan, Edelstahl oder Kupfer besteht oder mit Titan, Edelstahl oder Kupfer beschichtet ist.

- Röntgeneinrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Blende (4) mittels einer Kühleinrichtung, insbesondere mittels einer Wasserkühlleinrichtung kühlbar ist.

- Röntgeneinrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein Kollimator (9) im Strahlengang der durch Beaufschlagung des Targets (3) erzeugten Röntgenstrahlen (R) angeordnet ist.

- Röntgeneinrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch ein zumindest den Linearbeschleuniger (2), die Blende (4) und das Target (3) umgebendes Vakuumgehäuse (6), welches zumindest bereichsweise mit einer Abschirmung (7) versehen ist, die dazu geeignet ist, durch Abbremsung von gestreuten Elektronen verursachte Röntgenstrahlung zu absorbieren.

- Röntgeneinrichtung (1) nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die mit der Abschirmung (7) versehenen Bereiche gegenüber Bereichen des Vakuumgehäuses (6) ohne Abschirmung eine für Röntgenstrahlung erhöhte Absorption aufweisen.

- Röntgeneinrichtung (1) nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass die mit der Abschirmung (7) versehenen Bereiche ausschließlich inner-

halb eines von der Blende (4) ausgehenden, sich in Propagationsrichtung (P) des Elektronenstrahls (E) erstreckenden Raumwinkelbereichs ( $\Omega$ ) liegen.

11. Röntgeneinrichtung (1) nach einem der Ansprüche 5  
 8 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Raumwinkelbereich ( $\Omega$ ) einem mittleren Streuwinkelbereich der im Randbereich (R) der Blende (4) gestreuten Elektronen entspricht.

10

12. Röntgeneinrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die kinetische Energie pro Elektron im erzeugten Elektronenstrahl (E) weniger als 20MeV beträgt.

15

13. Verfahren zur Herstellung einer Röntgeneinrichtung (1) zur Erzeugung von hochenergetischer Röntgenstrahlung (R), umfassend einen Linearbeschleuniger (2) und ein Target (3), wobei der Linearbeschleuniger (2) zur Erzeugung von Röntgenstrahlung (R) dazu ausgebildet ist, einen auf das Target (3) gerichteten Elektronenstrahl (E) zu erzeugen, dessen kinetische Energie pro Elektron zumindest 1MeV beträgt, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein Bauteil im Strahlengang des Elektronenstrahls (E) zwischen 20  
 Linearbeschleuniger (2) und Target (3) angeordnet wird, dessen Materialstärke in Propagationsrichtung (P) des Elektronenstrahls (E) weniger als 10% der mittleren Reichweite von Elektronen der erzeugten kinetischen Energie im Material des Bauteils beträgt, 25  
 wobei in das Bauteil eine Blendenöffnung (5) da-  
 durch eingebracht wird, dass das Bauteil mit einem von dem Linearbeschleuniger (2) erzeugten Elektro-  
 nenstrahl (E) beaufschlagt wird.

30

35

40

45

50

55

FIG 1

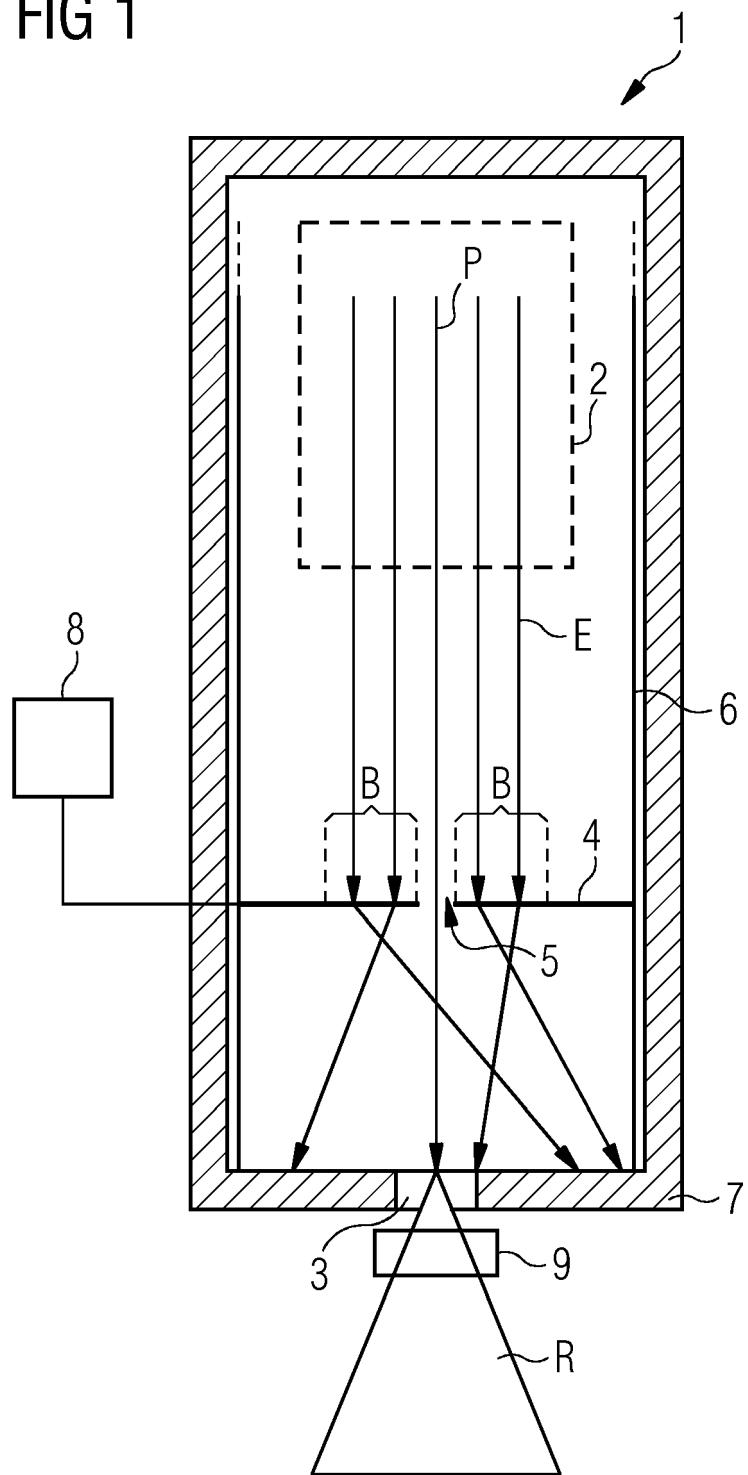
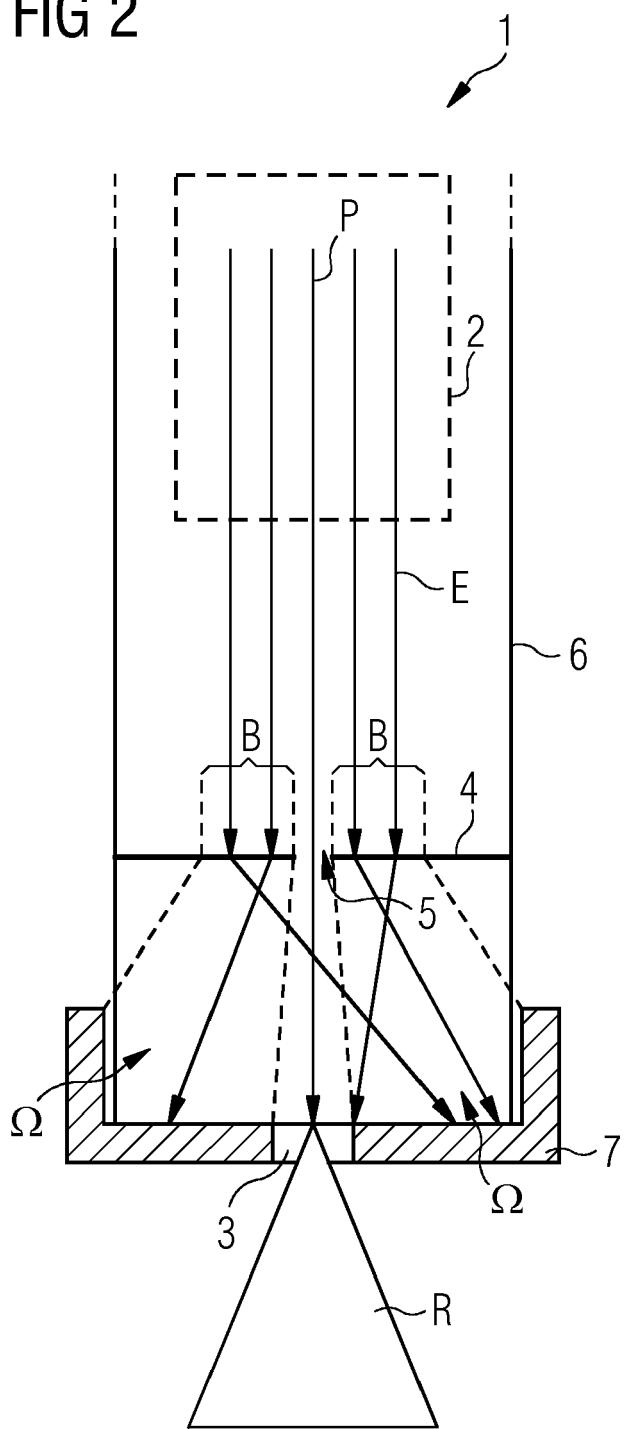


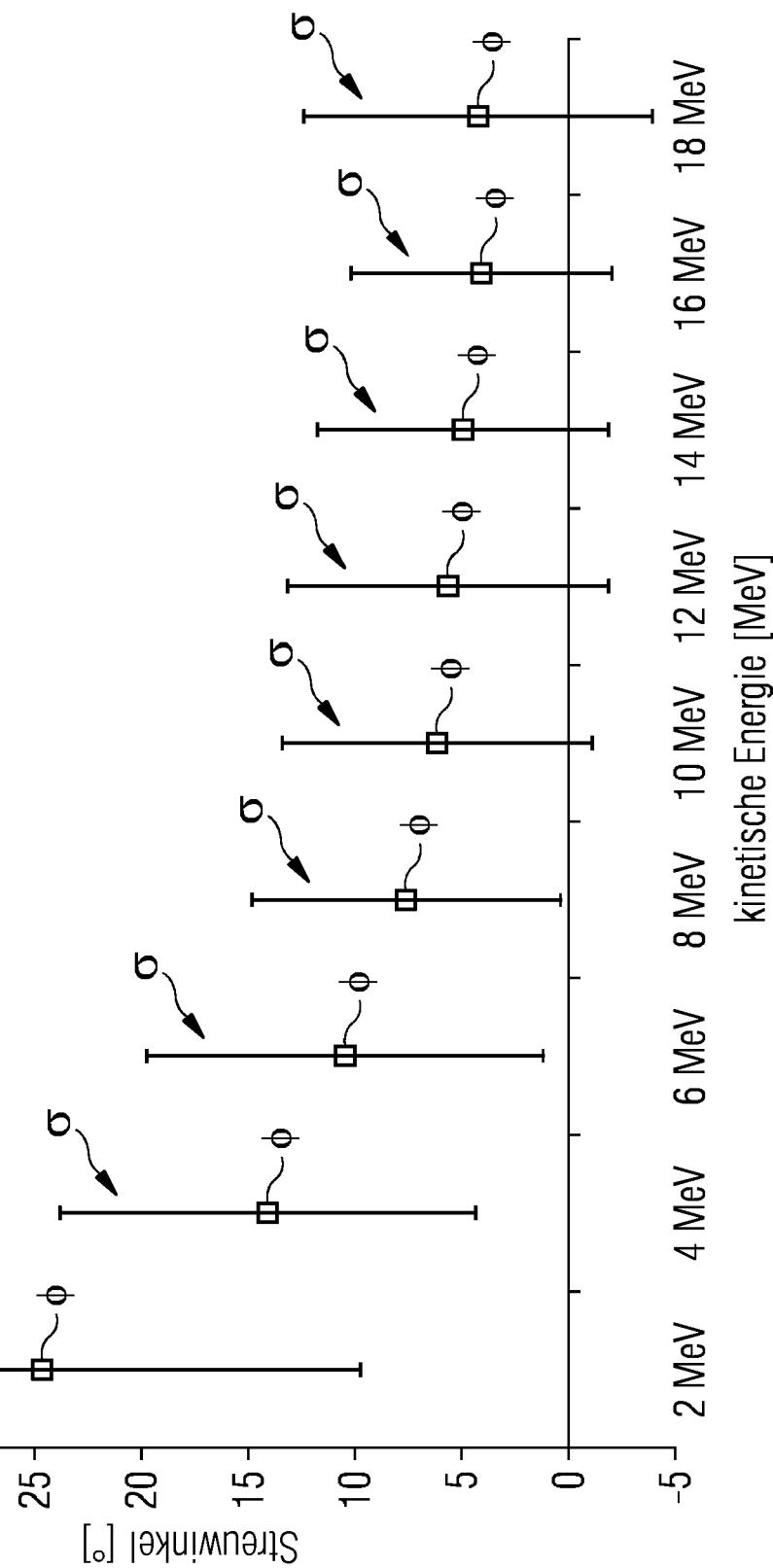
FIG 2



**FIG 3**

Elektronenstreuung

EP 3 389 055 A1





## EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung  
EP 17 16 5888

5

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE									
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betritt Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)						
10 X	GB 665 998 A (STANDARD TELEPHONES CABLES LTD) 6. Februar 1952 (1952-02-06) * Seite 2, linke Spalte, Zeile 31 - rechte Spalte, Zeile 77 * * Seite 3, linke Spalte, Zeile 11 - Seite 4, rechte Spalte, Zeile 87; Abbildungen * -----	1,3-5,12	INV. G21K1/02 H01J35/00 H05H7/00						
15 T	Anonymous: "Stopping Power and Range Tables for Electrons", , 10. Oktober 2017 (2017-10-10), XP055414376, Gefunden im Internet: URL:https://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/e_table.pl [gefunden am 2017-10-10] -----								
20 T	Anonymous: "Composition of COPPER", , 10. Oktober 2017 (2017-10-10), XP055414377, Gefunden im Internet: URL:https://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/compos.pl?029 [gefunden am 2017-10-10] -----		RECHERCHIERTE SACHGEBiete (IPC)						
25			G21K H01J H05H						
30									
35									
40									
45									
50 2	Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt								
55	<table border="1"> <tr> <td>Recherchenort</td> <td>Abschlußdatum der Recherche</td> <td>Prüfer</td> </tr> <tr> <td>München</td> <td>11. Oktober 2017</td> <td>Krauss, Jan</td> </tr> </table>	Recherchenort	Abschlußdatum der Recherche	Prüfer	München	11. Oktober 2017	Krauss, Jan		
Recherchenort	Abschlußdatum der Recherche	Prüfer							
München	11. Oktober 2017	Krauss, Jan							
	<p>KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE</p> <p>X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet  Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie  A : technologischer Hintergrund  O : nichtschriftliche Offenbarung  P : Zwischenliteratur</p>	<p>T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze  E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmelde datum veröffentlicht worden ist  D : in der Anmeldung angeführtes Dokument  L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument</p> <p>&amp; : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument</p>							

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT  
ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 17 16 5888

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patendokumente angegeben.  
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am  
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

11-10-2017

10	Im Recherchenbericht angeführtes Patendokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
15	GB 665998	A 06-02-1952	KEINE	
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

**IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente**

- DE 102012103974 A1 **[0003]**