



REPUBLIK
ÖSTERREICH
Patentamt

(10) Nummer: **AT 410 850 B**

(12)

PATENTSCHRIFT

(21) Anmeldenummer: A 1039/2000
(22) Anmeldetag: 15.06.2000
(42) Beginn der Patentdauer: 15.12.2002
(45) Ausgabetag: 25.08.2003

(51) Int. Cl.⁷: **G01N 23/05**

(73) Patentinhaber:
DROSG MANFRED DR.
A-1190 WIEN (AT).

(54) VORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUR STRUKTURANALYSE VON SAUERSTOFFHALTIGEN MEDIEN MIT SCHNELLEN NEUTRONEN

AT 410 850 B

(57) Die Vorrichtung zur Strukturanalyse von sauerstoffhaltigen Medien bzw. zum Auffinden leichter Elemente in sauerstoffhaltigen Medien mittels schneller Neutronen umfasst eine Neutronenquelle und ein Nachweissystem für schnelle Neutronen. Erfindungsgemäß liefert der Neutronengenerator bei der Vorrichtung zur Strukturanalyse einigermaßen monoenergetische Neutronen mit einer mittleren Energie von 2,35 MeV. Bei dieser Energie ist der Wirkungsquerschnitt mit Sauerstoff minimal, sodass die anderen Strukturen deutlicher sichtbar werden. Zum Auffinden nur eines bestimmten leichten Elements in einem sauerstoffhaltigen Medium soll der Neutronengenerator einigermaßen monoenergetische Neutronen mit einer mittleren Energie liefern, die größer ist als 2,35 MeV, sodass unter Berücksichtigung des Streuwinkels (der Detektorposition), der Masse des streuenden Atomkerns und der primären Neutronenenergie die Energie der vom aufzufindenden Element gestreuten Neutronen im Mittel 2,35 MeV beträgt, wobei die Analyse mit Hilfe elastisch gestreuter schneller monoenergetischer Neutronen in Rückstreugeometrie erfolgt.

Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Strukturanalyse von sauerstoffhaltigen Medien mit schnellen Neutronen, die eine als Neutronengenerator ausgebildete Neutronenquelle und ein Nachweissystem für schnelle Neutronen umfasst.

5 Sie betrifft weiters ein Verfahren zum Auffinden leichter Elemente in sauerstoffhaltigen Medien mittels Neutronen.

Neutronenstrahlung wird - ebenso wie Röntgen- und Gammastrahlung - seit Jahrzehnten zur Herstellung von Abbildungen durchstrahlter biologischer und technischer Strukturen, beispielsweise des menschlichen oder tierischen Körpers oder technischer Objekte, benutzt. Die Abbildungen von Strukturen mit Hilfe von Neutronenstrahlen ist gegenüber gewöhnlichen, mittels Röntgenstrahlen erzeugten Abbildungen andersartig. Das hat seinen Grund darin, dass die Schwächung von Neutronenstrahlen in der durchstrahlten Struktur auf speziellen Wechselwirkungen mit den Atomkernen der bestrahlten Materie beruht, wobei Elemente niedriger Ordnungszahl, wie Wasserstoff, Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff, ähnliche Wirkungsquerschnitte wie Elemente höherer Ordnungszahl erbringen, während die Schwächung von Röntgenstrahlung beim Durchtritt durch Materie wesentlich vom Fotoeffekt abhängt und so mit der Ordnungszahl der bestrahlten Atomsorten ansteigt.

Bei der Röntgendiagnose werden schon seit langem unterschiedliche Frequenzen der Röntgenstrahlung bzw. Gammastrahlung eingesetzt, um die diagnostischen Aussagemöglichkeiten der Abbildungen zu verbessern. Bei den Strukturuntersuchungen mit Neutronen hat man sich bezüglich der Neutronenenergien auf jene beschränkt, die entweder von radioaktiven Neutronenquellen oder von Reaktoren oder von Beschleunigern geliefert werden.

Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Vorrichtung der eingangs genannten Art zu schaffen, bei der der Einfluss des Sauerstoffs auf das Resultat gering ist, wodurch bei Vorliegen größerer Mengen von Sauerstoff im zu analysierenden Objekt die anderen Strukturen (so auch fremde Einschlüsse) besser zu Tage treten können. Dabei soll die Strukturanalyse leicht durchführbar sein und unter Beibehaltung wesentlicher bisheriger Verfahrensabläufe erfolgen können.

Diese Aufgaben werden durch eine Vorrichtung der eingangs genannten Art zur Strukturanalyse erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass die Neutronenquelle einen energiestabilen oder energiestabilisierten Beschleuniger für die Erzeugung von Neutronen gemäß einer der folgenden Reaktionen umfasst: ${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$, ${}^1\text{H}(t,n){}^3\text{He}$, ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$, ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$, ${}^{11}\text{B}(p,n){}^{11}\text{C}$, ${}^{15}\text{N}(p,n){}^{15}\text{O}$, ${}^6\text{Li}(p,n){}^6\text{Be}$, ${}^{13}\text{C}(p,n){}^{13}\text{N}$, ${}^3\text{H}({}^4\text{He},n){}^6\text{Li}$ und ${}^4\text{He}(t,n){}^6\text{Li}$, sodass einigermassen monoenergetische Neutronen mit einer mittleren Energie von 2,35 MeV erzeugt werden.

Sie werden weiters durch ein Verfahren der eingangs genannten Art erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass einigermassen monoenergetische Neutronen mit einer mittleren Energie erzeugt werden, die größer ist als 2,35 MeV, sodass unter Berücksichtigung des Streuwinkels (der Detektorposition), der Masse des streuenden Atomkerns und der primären Neutronenenergie die Energie der vom aufzufindenden Element gestreuten Neutronen im Mittel 2,35 MeV beträgt und dass die Analyse mit Hilfe elastisch gestreuter schneller monoenergetischer Neutronen in Rückstreuengeometrie erfolgt.

Die Erfindung beruht auf der Verwendung monoenergetischer Neutronen ausgesuchter Energie und macht sich den Umstand zunutze, dass der an sich hohe Wechselwirkungsquerschnitt von (schnellen) Neutronen mit Sauerstoff bei einer Neutronenenergie von 2,35 MeV auf etwa 10 Prozent des Wertes in der Umgebung sinkt. Wegen der exponentiellen Abhängigkeit der Absorption vom Wirkungsquerschnitt vervielfacht sich dieser Unterschied überaus stark mit zunehmender Dicke. (Wird z. B. außerhalb des Minimums die Intensität des Primärstrahls durch den Durchgang durch das Objekt auf 0,1 Prozent reduziert, beträgt die Intensität des Primärstrahls, falls er die Minimumenergie hat, unter denselben Bedingungen 50 Prozent!) Zusätzlich hat diese Energie (gegenüber den 14 MeV Neutronen der üblichen ${}^3\text{H}(d,n)$ Quelle, meistens d-T Quelle genannt) den Vorteil, dass als Personenschutz keine so massive Abschirmung erforderlich ist. Dabei kann entweder die Energie der eingestrahlteten Neutronen oder die Energie der gesuchten gestreuten Neutronen optimiert werden.

Da die Neutronenquelle einen energiestabilen oder energiestabilisierten Beschleuniger für die Erzeugung der Neutronen aufweist, werden Schwankungen der Energie der Neutronen weitgehend vermieden, sodass dieser Effekt maximal zum Tragen kommt.

55 Zur Verbesserung des Signal/Untergrund-Verhältnisses kann vor dem Detektor ein Sauerstoff-

filter angebracht sein. Es handelt sich dabei um einen Vorabsorber, der auf Grund seines großen Sauerstoffgehaltes bevorzugt schnelle Neutronen von 2,35 MeV durchlässt, die ja gerade ausgesendet werden sollen.

5 Stark sauerstoffhaltige Medien sind alle künstlichen und natürlichen Stoffe, die als Reinstoffe oder als Gemenge vorliegen und bei denen der Sauerstoffgehalt typischerweise mehr als 50 Atomprozent ausmacht (z.B. Karbonate, Silikate, Sulfate, Nitrate), also in der Praxis Gebrauchsstoffe wie Beton, Erde, Sand, Ziegel, Ton, Keramik oder Gestein. Bei geringerem Sauerstoffgehalt wie in Wasser und wasserhaltigen Stoffen wird auch eine Verbesserung möglich sein, sie ist jedoch nicht so ausgeprägt. Durch die vorliegende Erfindung wird die Intensität des

10 Primärstrahles weniger stark abgeschwächt, so dass dickere Objekte analysiert werden können, als dies ohne diese Vorkehrung möglich ist.
Die bei Rückstreuanordnungen bzw. Strukturanalysen mit schnellen Neutronen bisher üblichen Anordnungen und Verfahrensabläufe können insoweit beibehalten werden, als das neutronenerzeugende Target den Platz der bisherigen Neutronenquelle einnimmt. Dabei ist es einerlei, ob die

15 Analyse in Durchstrahlgeometrie oder Rückstreugeometrie erfolgt und welche Art von Neutronen-nachweis angewendet wird.
Der Nachweis der schnellen Neutronen kann nicht nur mit herkömmlichen Neutronendetektoren erfolgen, sondern es können alle in der Neutronenradiographie üblichen bildgebenden Nachweismethoden eingesetzt werden.

20 Als Neutronenquellen kommen alle genannten Quellen, die 2,35 MeV liefern können, in Frage. Aus Intensitäts- und anderen praktischen Gründen werden wohl folgende Quellen praktisch eingesetzt werden: $^3\text{H}(p,n)^3\text{He}$, $^1\text{H}(t,n)^3\text{He}$, $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$, $^9\text{Be}(p,n)^9\text{B}$, $^{11}\text{B}(p,n)^{11}\text{C}$, $^{15}\text{N}(p,n)^{15}\text{O}$.

Vorzugsweise erzeugt man bei dem erfindungsgemäßen Verfahren die Neutronen gemäß der Reaktion $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$. Dies ist insbesondere dann zweckmäßig, wenn die Größe des Beschleunigers samt allen technischen Nebeneinrichtungen eine Rolle spielt. Diese Neutronenquelle erzeugt

25 monoenergetische Neutronen von Energien über 2,35 MeV. Sie kann in einer transportablen Vorrichtung zum Einsatz kommen (Minensuchgerät). Nachteilig ist allerdings die relativ kleine Intensität.
Weitere Möglichkeiten, wie "weiße" Neutronenquellen mit Sauerstofffilter, sind im Prinzip auch

30 möglich, doch ist auch hier die Intensität relativ klein.
Bei dem Verfahren zum Auffinden leichter Elemente kann es schwierig sein, die Energie der Neutronen ausschließlich aufgrund theoretischer Überlegungen exakt einzustellen, damit die gestreuten Neutronen die gewünschte Energie von 2,35 MeV haben. Die Einstellung kann aber ganz einfach experimentell vorgenommen werden, indem vor der eigentlichen Messung die Energie der Neutronen verändert wird, bis eine maximale Zählrate in dem Nachweissystem festgestellt

35 wird. Bei diesem Maximum haben die gestreuten Neutronen die gewünschte Energie (weil dort der Wirkungsquerschnitt mit Sauerstoff minimal ist).
Weitere Einzelheiten und Anwendungsgebiete der Erfindung ergeben sich aus den folgenden beiden Ausführungsbeispielen:

- 40 1. Zerstörungsfreie Analyse in Durchstrahlgeometrie; und
2. Auffinden von im Erdreich vergrabenen Gegenständen in Rückstreugeometrie.

1. Zerstörungsfreie Analyse in Durchstrahlgeometrie

Bei Durchstrahlgeometrie wird die Beschleunigerspannung des Neutronengenerators so

45 gewählt, dass die mittlere Energie der primären Neutronen 2,35 MeV oder geringfügig darüber ist. Da Neutronen bei Streuung in Vorwärtsrichtung nur kleine Energiebeträge abgeben, erhält man bei Durchstreuung eine höhere wirksame Intensität, wenn die Primärenergie geringfügig zu groß ist, als wenn diese um denselben Betrag zu klein ist. Da die Beschleunigerspannung in den seltensten Fällen auf 0,01 MeV bekannt sein wird, wird man die günstigste Beschleunigerspannung zunächst

50 einmal durch optimale Transmission in einem sauerstoffhaltigen Objekt festlegen. Wenn man von der andersartigen Neutronenquelle absieht, kann die Analyse unter Beibehaltung wesentlicher bisheriger Verfahrensabläufe, wie sie z.B. bei Neutronenradiographieverfahren zum Einsatz kommen, durchgeführt werden. Gegenüber der wegen ihrem guten Durchdringungsvermögen bekannten $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ -Quelle, die 14 MeV Neutronen liefert, zeigt die in der Energie abgestimmte

55 Quelle in stark sauerstoffhaltigen Objekten ein weit besseres Durchdringungsvermögen: 1 m Beton

schwächt die Intensität von 2,35 MeV Neutronen um fast einhundertmal weniger als die von 14 MeV Neutronen. Als Nachteil ist der aufwändigere und auch schwerere Beschleuniger zu nennen.

5 2. Auffinden von im Erdreich vergrabenen Gegenständen in Rückstreugeometrie.

Eine Analyse mittels Neutronenrückstreuung ist z. B. dann angebracht, wenn die hintere Seite des sauerstoffhaltigen Objekts nicht zugänglich ist, wie bei der Suche nach in der Erde verborgenen Objekten. In solchen Fällen stehen alternativ zwei Optimierungsmöglichkeiten der primären
10 Neutronenenergie zur Verfügung:

Damit eine Analyse möglichst weit in die Tiefe erfolgen kann, wählt man wie bei der Durchstrahlung eine Primärenergie von 2,35 MeV. Will man jedoch herausfinden, ob ein bestimmtes chemisches Element im durchstrahlten Bereich vorhanden ist, ist eine alternative Optimierung möglich. Dies ist z.B. der Fall bei der Suche nach Explosivstoffen (Minen), die in der Erde vergraben sind, und die jedenfalls Stickstoff enthalten.
15

Bei der alternativen Optimierung bei Neutronenrückstreuung geht man davon aus, dass die Energie der (elastisch) gestreuten Neutronen durch die Primärenergie des Neutronenstrahls, durch die charakteristische Masse des zu suchenden Elementes und durch den (elastischen) Streuwinkel festgelegt ist. Diese Sekundärenergie ist also, unter den gegebenen Voraussetzungen, charakteristisch für die Masse des streuenden Atomkerns, und bei Elementen bis zur Ordnungszahl 15 auch charakteristisch für das Element, sofern es nicht in radioaktiver Form vorliegt. Es kann also alternativ die Primärenergie so gewählt werden, dass die Energie nach der Streuung im Mittel gerade 2,35 MeV beträgt. Da der sekundäre Neutronenstrahl ein längeres Stück Erde durchlaufen muss als der primäre, ist eine Optimierung der Sekundärenergie schon allein aus diesem Grund besser.
20 Weiters verbessert diese Optimierung das Signal/Untergrund-Verhältnis, da die von anderen Elementen gestreuten Neutronen nicht 2,35 MeV haben und daher stärker geschwächt werden. Bei der oben angesprochenen Suche nach einem stickstoffhaltigen Objekt, das in der Erde vergraben ist, käme z.B. eine Primärenergie von 3.1 MeV und ein Messwinkel von 156 Grad gegenüber dem primären Neutronenstrahl in Frage, damit nach Streuung an Stickstoff Sekundärneutronen
25 von 2,35 MeV auftreten.
30

Die Erfindung ist, wie aus dem Text hervorgeht, nicht auf die vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispiele und Anwendungsgebiete beschränkt.

35 PATENTANSPRÜCHE:

1. Vorrichtung zur Strukturanalyse von sauerstoffhaltigen Medien mit schnellen Neutronen, die eine als Neutronengenerator ausgebildete Neutronenquelle und ein Nachweissystem für schnelle Neutronen umfasst, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Neutronenquelle
40 einen energiestabilen oder energiestabilisierten Beschleuniger für die Erzeugung von Neutronen gemäß einer der folgenden Reaktionen umfasst: $^3\text{H}(p,n)^3\text{He}$, $^1\text{H}(t,n)^3\text{He}$, $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$, $^9\text{Be}(p,n)^9\text{B}$, $^{11}\text{B}(p,n)^{11}\text{C}$, $^{15}\text{N}(p,n)^{15}\text{O}$, $^6\text{Li}(p,n)^6\text{Be}$, $^{13}\text{C}(p,n)^{13}\text{N}$, $^3\text{H}(^4\text{He},n)^6\text{Li}$ und $^4\text{He}(t,n)^6\text{Li}$, sodass einigermaßen monoenergetische Neutronen mit einer mittleren Energie von 2,35 MeV erzeugt werden.
- 45 2. Verfahren zum Auffinden leichter Elemente in sauerstoffhaltigen Medien mittels schneller Neutronen, **dadurch gekennzeichnet**, dass einigermaßen monoenergetische Neutronen mit einer mittleren Energie erzeugt werden, die größer ist als 2,35 MeV, sodass unter Berücksichtigung des Streuwinkels (der Detektorposition), der Masse des streuenden Atomkerns und der primären Neutronenenergie die Energie der vom aufzufindenden
50 Element gestreuten Neutronen im Mittel 2,35 MeV beträgt und dass die Analyse mit Hilfe elastisch gestreuter schneller monoenergetischer Neutronen in Rückstreugeometrie erfolgt.
3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Neutronen gemäß der Reaktion $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$ erzeugt werden.
- 55 4. Verfahren Anspruch 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass vor der eigentlichen

AT 410 850 B

Messung die Energie der Neutronen verändert wird, bis eine maximale Zählrate in dem Nachweissystem festgestellt wird.

5

KEINE ZEICHNUNG

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55