

Acta Medica Okayama

Volume 23, Issue 6

1969

Article 5

DECEMBER 1969

Physikalische grund-lagen und medizinische anwendungen des siemens-unterrichts reaktors SUR 100

Jurgen Knapp*

Peter Royl†

Endre Szirmai‡

*Universität Stuttgart,

†Universität Stuttgart,

‡Universität Stuttgart,

Physikalische Grundlagen und medizinische Anwendungen des Siemens-Unterrichtsreaktors SUR 100*

Jürgen Knapp, Peter Royl, and Endre Szirmai

Abstract

Die physikalischen Grundlagen eines Kernreaktors werden beschrieben. Als spezielles Beispiel wird Aufbau, Kontrolle und Betrieb des Siemens-Unterrichtsreaktors SUR 100 beschrieben. Dieser homogene polyäthylenmoderierte Nullleistungsreaktor hat eine Leistung von nur 100 mW. Trotzdem oder gerade deswegen ist dieser Reaktor für Ausbildungszwecke und als Übungsmöglichkeit auf dem Gebiet der Reaktortheorie und der Kernenergie sehr gut geeignet, denn die Leistungsbeschränkung erlaubt eine einfache Installation und Betriebsweise des Reaktors. Neben seiner Verwendung als Ausbildungsinstrument kann dieser Reaktor aber auch als Strahlenquelle benutzt werden. Hiermit wurden verschiedene medizinische Präparate, die auch im Strahlenschutz Verwendung finden, bestrahlt, und anschließend ihre Dosisrate bestimmt. Außerdem werden noch weitere Anwendungsmöglichkeiten des Siemens-Unterrichtsreaktors SUR 100 beschrieben.

*PMID: 4246829 [PubMed - indexed for MEDLINE] Copyright ©OKAYAMA UNIVERSITY
MEDICAL SCHOOL

Acta Med. Okayama 23, 505—517 (1969)

**PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN UND MEDIZINISCHE
ANWENDUNGEN DES SIEMENS-UNTERRICHTS-
REAKTORS SUR 100**

Jürgen KNAPP, Peter ROYL und Endre SZIRMAI*

**Abteilung für Strahlhämatalogie und Biologie, Institut für Kernenergetik der
Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland*

Eingegangen am 10. Juli 1969

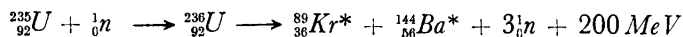
In den letzten Jahren hat die Kernenergie und die radioaktive Strahlung auf vielen Gebieten der reinen und angewandten Naturwissenschaften eine recht große Bedeutung erlangt. Daher ist es unumgänglich geworden, Studenten und Wissenschaftler der verschiedensten Fachrichtungen mit den physikalischen Grundlagen und der Betriebsweise eines Kernreaktors und den Eigenschaften radioaktiver Strahlung vertraut zu machen. Hierzu wurde der Siemens-Unterrichtsreaktor SUR 100 konstruiert.

Dieser Reaktor ist zwar nur für eine Leistung von 100 mW konzipiert, aber bis auf die Kühlung, auf die bei dieser geringen Leistung verzichtet werden kann, besitzt dieser Reaktor alle wesentlichen Elemente, die auch ein großer Kernreaktor aufweist. Dazu kommt noch ein negativer Temperaturkoeffizient des Reaktors, der zusammen mit den übrigen Sicherheitseinrichtungen einen Reaktorunfall praktisch ausschließt. Aus diesen Gründen eignet sich dieser Reaktor ganz besonders für Ausbildungszwecke.

Außerdem ist es aber auch möglich, in diesem Reaktor verschiedene Proben zu aktivieren, wobei sich die geringe Reaktorleistung allerdings hinderlich auswirkt. In diesem Sinne haben wir den Reaktor als Neutronenquelle benutzt und damit verschiedene medizinische Präparate bestrahlt und anschließend deren Dosisrate gemessen. In diesem Bericht soll allgemein die Wirkungsweise eines Reaktors beschrieben werden und im Anschluß daran soll auf die speziellen Eigenschaften des SUR 100 und auf seine Anwendungen eingegangen werden.

Physikalische Grundlagen eines Kernreaktors vom Typ SUR 100 (1)

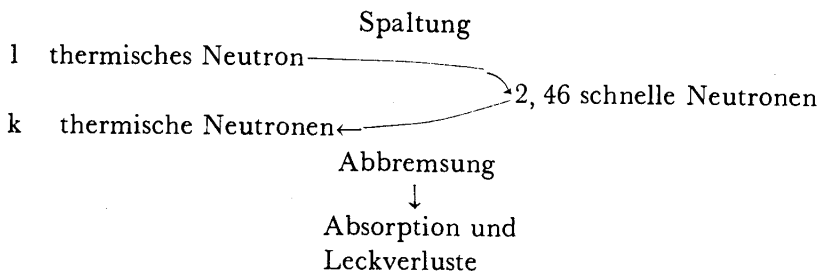
Die physikalische Grundlage eines Kernreaktors ist die Kernspaltung des Uranisotops U-235 durch Neutronen mit geringer Energie (sogenannte "langsame" oder "thermische" Neutronen). Dieser Prozess kann durch die folgende Gleichung dargestellt werden:



Diese Beziehung besagt folgendes :

Ein Neutron wird von einem Urkern mit der Massenzahl 235 und der Kernladungszahl 92 absorbiert und es bildet sich der Zwischenkern mit der Massenzahl 236. Dieser ist durch die freiwerdende Bindungsenergie des Neutrons so hoch angeregt, daß er instabil ist und sofort in mehrere Teile zerbricht. Der oben erwähnte Zerfall in Krypton und Barium ist nur eine von vielen Möglichkeiten. Mit entsprechender Wahrscheinlichkeit treten auch andere Spaltprodukte auf. Charakteristisch für Kernspaltungen ist, daß mehrere Neutronen dabei frei werden, die weitere Kernspaltungen verursachen können. Die Kernbruchstücke haben eine sehr hohe kinetische Energie (im obigen Beispiel etwa 200 MeV) und sind sehr hoch angeregt. Beim Übergang in den Grundzustand senden diese Kerne γ - und β -Strahlen aus. Einige der Spaltprodukte können auch sogenannte "verzögerte" Neutronen emittieren. Dies bedeutet, daß sie einen Teil ihrer Anregungsenergie durch die Aussendung von Neutronen abgeben können. Diese Neutronen werden etwas später frei als die unmittelbar bei der Spaltung entstehenden und spielen für die Steuerung des Reaktors eine sehr wichtige Rolle. Im Mittel entstehen pro Spaltung eines U-235 Kerns 2,46 Neutronen.

Diese Neutronen haben eine sehr hohe kinetische Energie von durchschnittlich etwa 2 MeV. Um nun die Kettenreaktion fortzusetzen müssen diese Neutronen auf thermische Energien (Bruchteile von eV) abgebremst werden. Hierbei geht ein Teil der Neutronen durch Absorption oder Leckverluste verloren. Der Neutronenzyklus kann folgendermaßen beschrieben werden :



Nach der Moderation sind also noch k thermische Neutronen übrig. Soll nun der Reaktor stationär betrieben werden (d. h. ohne zeitliche Änderung des Betriebszustandes), dann muß $k=1$ sein (kritischer Reaktor). Anders ausgedrückt bedeutet das, daß jedes Neutron, das eine Spaltung verursacht, zugleich ein weiteres thermisches Neutron erzeugt, das ebenfalls eine Kernspaltung auslöst und auf diese Weise die Kettenreaktion in Gang hält.

Bleibt nach der Abbremsung mehr als ein thermisches Neutron, das eine Spaltung macht, in dem Zyklus übrig, (d. h. $k > 1$, überkritischer Reaktor), so steigt der Neutronenfluss (Zahl der Neutronen die pro sec durch die Fläche 1 cm^2 hindurchgehen) nach einer Exponentialfunktion an und für die Reaktorleistung gilt dasselbe Anstiegsverhalten.

Wenn $k < 1$ ist (nicht kritischer Reaktor), dann nimmt der Neutronenfluß ab und die Kettenreaktion kommt zum Erliegen. Die Beschreibung des jeweiligen Betriebszustandes des Reaktors erfolgt durch die sogenannte "Reaktivität" ρ , die sich aus der Multiplikationskonstanten K folgendermaßen ergibt

$$\rho = \frac{k-1}{k}$$

Für die Kontrolle des Reaktors sind die verzögerten Neutronen von außerordentlicher Bedeutung. Für U-235 beträgt der Bruchteil der verzögerten Neutronen $\beta = 0,0064$, d. h. $0,64\%$ der Spaltneutronen sind verzögerte Neutronen.

Wird $\rho/\beta = 1$, so bedeutet dies, daß die Zahl der prompten Neutronen $k_p = k(1-\beta) = 1$ ist. Man spricht dann von einem prompt kritischen Reaktor. Wird $\rho/\beta > 1$, d. h. die Zahl der prompten Neutronen ist größer als 1, dann ist der Reaktor nicht mehr regelbar. Dieser gefährliche Fall ist jedoch beim SUR 100 aus physikalischen Gründen gar nicht möglich, wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird.

Aufbau des Reaktors SUR 100 (2)

Abbildung 1 zeigt einen Längsschnitt durch den Reaktor. Das Kernstück ist die Spaltzone, wobei in diesem Reaktor auch die Moderation in der Spaltzone erfolgt. Die Spaltzone besteht aus einem zylindrischen Kern von 24 cm Durchmesser und 26 cm Höhe. Dieser Kern besteht aus zehn Platten verschiedener Dicke und ist aus Sicherheitsgründen in zwei Hälften teilbar. Durch die Trennung der Kernhälften wird der Reaktor stark unterkritisch.

Der Reaktorkern besteht aus einer homogenen Mischung von U_3O_8 -Pulver und Polyäthylen $(\text{CH}_2)_n$. Das erstere dient als Brennstoff, während das letztere als Moderatorsubstanz zur Abbremsung der schnellen Neutronen verwendet wird. Polyäthylen enthält sehr viel Wasserstoff, der ein guter Moderator ist. Denn bei einem Stoß eines Neutrons mit einem Kern kann ein Neutron desto mehr Energie verlieren, je leichter der betreffende Kern ist. Deshalb ist Wasserstoff der beste Moderator. Andererseits absorbiert der Wasserstoff jedoch Neutronen, was in diesem Sinne unerwünscht ist. Das Uranoxid ist auf 20% U-235 angereichert, während das natürliche Uran nur $0,7\%$ U-235 neben dem nicht spaltbaren Isotop U-238 enthält,

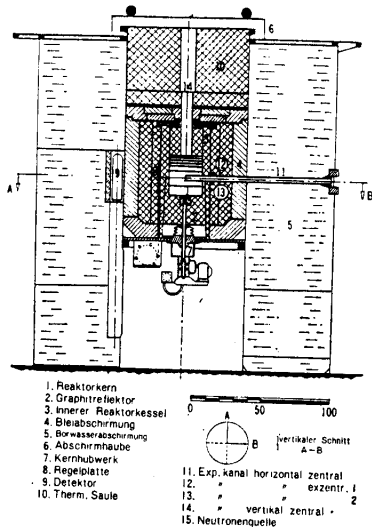


Abb. 1 Siemens-Unterrichtsreaktor SUR 100

Die gesamte Masse des spaltbaren Isotops U-235 im Reaktor beträgt etwa 700 g, während die kritische Masse nur 670 g beträgt. Unter kritischer Masse versteht man diejenige Masse an spaltbarer Substanz, bei der eine Kettenreaktion gerade noch möglich ist. Die Differenz von 30 g ist so klein, daß der Wert von ρ/β immer kleiner als 1 ist, so daß die Steuerung des Reaktors in jedem Fall gewährleistet ist.

Um den Reaktorkern schließt sich nach allen Seiten hin ein 20 cm starker Graphitreflektor an, mit dessen Hilfe erreicht werden soll, daß möglichst wenige Neutronen die Spaltzone verlassen. Vielmehr sollen sie durch Rückstreuung in die Spaltzone zurückgelenkt

werden, wo sie dann neue Spaltungen auslösen können.

An den Reflektor schließt sich ein 10 cm dicker Bleischild an, der die γ -Strahlung absorbieren soll, und ein 60 cm dicker Wassermantel mit Borsäurezusatz (8 g Bor pro Liter Wasser) als Neutronenabsorber. Durch diese biologischen Schutzvorrichtungen wird die Dosisrate bei einer Reaktorleistung von 100 mW direkt an der Außenwand des äußeren Reaktortanks auf einen kleineren Wert als den gesetzlich zulässigen Wert von 2,5 mrem/h reduziert.

Der gesamte innere Reaktorbereich, einschließlich Graphitreflektor und Bleischild, ruht auf einer Grundplatte aus Stahl, die ihrerseits auf einem an die Innenwand des äußeren Reaktorkessels angeschweißten Profilring aufliegt. Der Montagebereich unterhalb der Grundplatte ist durch eine in den unteren Bereich des äußeren Reaktorkessels eingelassene, an Scharnieren bewegliche und ebenfalls mit Wasser und Borsäurezusatz gefüllte Tür zugänglich. Um das Austreten gasförmiger Spaltprodukte (wie z. B. Xe-135), die auf Grund der geringen Reaktorleistung nur in äußerst geringen entstehen, zu verhindern, ist der Reaktorkern zusammen mit einem Teil des Graphitreflektors in einem gasdichten zylindrischen Aluminiumgefäß, dem inneren Reaktortank, eingeschlossen.

Der SUR 100 ist mit folgenden Experimentiereinrichtungen ausgestattet:

1 zentraler horizontaler Experimentierkanal mit 2,6 cm Durchmesser,

2 seitliche horizontale Experimentierkanäle von 9,6 bzw. 5,4 cm Durchmesser, 1 thermische Säule aus Graphit (84,5 cm Durchmesser und 51,6 cm Höhe) und in dieser 1 axialer vertikaler Experimentierkanal von 4,6 cm Durchmesser und 1 seitlicher vertikaler Experimentierkanal von 5,2 cm Durchmesser. Der axiale vertikale Experimentierkanal reicht bis in die Höhe des oberen Endes des Reaktorkerns, während der seitliche vertikale Experimentierkanal bis in die Höhe des unteren Endes des Reaktorkerns reicht.

Die horizontalen Experimentierkanäle gehen durch den gesamten Reaktor hindurch und sind an beiden Enden mit Füllstücken aus Graphit, Blei und Polyäthylen verschlossen. Die vertikalen Kanäle sind mit Graphit gefüllt. Der Graphit der thermischen Säule ist in einen Aluminiumbehälter eingelegt, so daß er leicht entfernt und durch einen anderen Moderator wie z. B. H_2O oder organische Substanzen ersetzt werden kann.

Der SUR 100 hat zwei unabhängige Sicherungssysteme, von denen jedes allein den Reaktor sicher abschalten kann. Zwei Cadmiumbleche, die als Neutronenabsorber dienen, sind im Graphitreflektor direkt außerhalb des inneren Reaktorkessels angebracht. Durch Federkraft beschleunigt können sie von unten bis etwa in die Höhe des Reaktorkerns bewegt werden um den Reaktor abzuschalten. Als zweite Sicherheitsabschaltmaßnahme kann die untere Hälfte des Reaktorkerns zusammen mit einem Teil des Graphitreflektors um etwa 5 cm nach unten fallen. Durch jede dieser beiden Maßnahmen allein wird der Reaktor so stark unterkritisch, daß die Kettenreaktion sofort zum Erliegen kommt.

Die Überschußreaktivität ρ des Reaktors, die von der Brennstoffmenge und somit von der Höhe des Reaktorkerns abhängt, ist auf 0,003 festgesetzt. Durch Einschieben jedes der beiden Cadmiumbleche wird die Reaktivität um je 0,005 verringert, während durch das Entfernen der Kernhälften voneinander die Reaktivität um etwa 0,05 abnimmt.

Innerhalb des Bewegungsmechanismus' für die untere Reaktorkernhälfte ist die Neutronenquelle angebracht, die für das Anfahren des Reaktors benötigt wird. Es handelt sich hierbei um eine Ra/Be-Quelle mit einer Aktivität von 10 mC, welche nach Anfahren des Reaktors bis unter die untere Kernhälfte bewegt wird

Außer den beiden eben beschriebenen Sicherheitssystemen besitzt der Reaktor noch eine innere Sicherheit, die alleine auf der Anordnung und Zusammensetzung des Kerns beruht und dann immer noch wirksam würde, wenn der äußerst unwahrscheinliche Fall eintreten sollte, daß die enderen Sicherheitssysteme ausfallen.

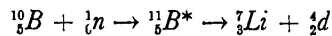
Der stark negative Temperaturkoeffizient der Reaktivität ($3 \cdot 10^{-4}/^{\circ}C$)

gewährleistet bei der geringen Überschußreaktivität von 0,003, daß eine Leistungsexkursion automatisch begrenzt wird bevor der Reaktor selbst oder seine unmittelbare Umgebung ernsthaft gefährdet werden. Während einer solchen Exkursion ist zwar die Dosisrate kurzzeitig größer als zulässig, aber entsprechend der kurzen Dauer einer Exkursion, die größenordnungsmäßig nur 0,1 sec dauert, ist dies kein Problem.

Die nukleare Instrumentierung zeigt den Betriebszustand des Reaktors an und überwacht diesen. Sie erlaubt eine Messung des Neutronen- und γ -Flusses an verschiedenen Punkten des Reaktors und steuert über Grenzwerteinheiten die Schaltorgane der elektrischen Verriegelung.

Neutronen und γ -Strahlen können primär nicht nachgewiesen werden, da eine direkte Registrierung nur von geladenen Teilchen möglich ist. Daher werden Sekundärreaktionen benützt um mit Neutronen bzw. γ -Strahlen geladene Teilchen herzustellen, die dann nachgewiesen werden können.

Der Nachweis thermischer Neutronen erfolgt mit Hilfe der folgenden Reaktion:



Die γ -Strahlen erzeugen durch verschiedene Prozesse Elektronen (Photo-Effekt, Compton-Effekt, Paarbildung).

Die geladenen Partikel werden durch Entladung einer Kapazität (Ionisationskammer, Zählrohr) nachgewiesen.

Im Anfahrstadium des Reaktors wird die Neutronenflußdichte durch einen Impulsmeßkanal ermittelt, der wahlweise auf eines von zwei BF_3 -Zählrohre umgeschaltet werden kann. Bei höherer Reaktorleistung treten die Gleichstrommeßkanäle in Aktion. Einer von diesen ist mit einer kompensierten Neutronenionisationskammer ausgerüstet, während der andere eine unkompensierte Neutronenionisationskammer besitzt. (Eine kompensierte Neutronenionisationskammer mißt nur die einfallenden Neutronen, während eine unkompensierte sowohl die Neutronen als auch die γ -Strahlen registriert.)

Die Neutronenflußdichten können sowohl in linearem als auch in logarithmischem Maßstab gemessen werden.

Ein mit einem γ -Zählrohr bestückter Meßkanal dient der Messung und Überwachung der γ -Dosisrate in der unmittelbaren Reaktorumgebung.

Die Neutronenzählrohre und Ionisationskammern sind in Höhe des Reaktorkerns in drei Nischen in der Innenwand des äußeren Reaktorkegels untergebracht und sind von Polyäthylenreflektoren umgeben.

Durch ein sinnvolles Verriegelungssystem bewirkt die allgemeine elektrische Instrumentierung des Reaktors, daß dieser nur in der richtigen

Art und Weise angefahren und betrieben werden kann, so daß irgendwelche Fehlbedienungen wirkungslos bleiben und der Reaktor automatisch und zuverlässig abgeschaltet wird, falls gewisse Strahlenschutzmaßnahmen unterlassen werden oder wenn ein technischer Fehler, wie das Versagen wichtiger Geräte, die mit der nuklearen Instrumentierung verknüpft sind, auftritt. Unzulässige Betriebsbedingungen schalten den Reaktor genauso ab.

Im Hinblick auf den negativen Temperaturkoeffizienten der Reaktivität verhindert die Verriegelungsschaltung, daß der Reaktor bei einer niedrigeren Temperatur als 15°C in Betrieb genommen werden kann. Die Temperatur im Reaktor wird mit einem Widerstandsthermometer gemessen, das im Reaktorkern eingebettet ist und wird zusätzlich durch einen Temperaturschalter im äußeren Reaktorkessel überwacht. Die gesamte Instrumentierung ist in einem Kontrollpult zusammengefaßt. Bei einer kontinuierlichen Reaktorleistung von 100 mW ist der Neutronenfluß im leeren horizontalen zentralen Experimentierkanal $5,56 \cdot 10^6$ n/cm² sec für thermische Neutronen und $1,31 \cdot 10^7$ n/cm² sec für schnelle Neutronen. Wenn der Kanal mit Moderators substanz gefüllt wird, dann steigt der thermische Neutronenfluß auf $6,2 \cdot 10^6$ n/cm² sec an.

Die Reaktorleistung von 100 mW wird nur durch die Wirksamkeit der Abschirmung beschränkt, so daß sie bei kurzzeitigem Betrieb auch erhöht werden kann, ohne daß die innerhalb eines gewissen Zeitabschnittes zulässige Gesamtdosis überschritten wird. Außerdem ist es möglich, die Abschirmung durch Aufschichten von Betonblöcken um den äußeren Reaktortank herum so zu verstärken, daß der Reaktor kontinuierlich mit einer Leistung von 1 Watt und einem um den Faktor 10 höheren Fluß betrieben werden kann. Für Ausbildungszwecke ist diese vergrößerte Reaktorleistung von geringer Bedeutung, sie wird jedoch wichtig, wenn der Reaktor für Meßzwecke oder als Strahlungsquelle benutzt werden soll.

Der Brennstoffverbrauch des Reaktors liegt bei etwa $30 \mu\text{g}$ Uran-235 pro Jahr, wenn er kontinuierlich betrieben wird.

Anwendung des Reaktors (2)

Die wichtigste Anwendung des SUR 100 liegt in der Verwendung als praktisches Instrument für die Ausbildung und die Einführung in das Gebiet der Kernenergie und ihrer Anwendung, wobei der Reaktor als Anschauungsobjekt und Übungsmöglichkeit sowie als Strahlenquelle und Meßinstrument benützt werden kann. Im letzteren Fall kann er in gewissen Grenzen auch für Forschungsarbeiten benützt werden. Durch die Möglichkeiten kurzlebige Isotope zu aktivieren und den Reaktor als

Strahlenquelle zu benützen kann er auch auf den Gebieten der Meßtechnik, der Nuklearmedizin, -biologie und -chemie verwendet werden.

Die praktische Ausbildung am Reaktor wird gewöhnlich in drei Teilen durchgeführt.

Ein Einführungskurs vermittelt die Grundlagen und die üblichen Methoden der Strahlungsmeßtechnik und des Strahlenschutzes.

Die Studenten werden hierbei mit den Methoden der Messung aktivierter Präparate vertraut gemacht, indem sie die charakteristischen Daten von Zählrohren, Ionisationskammern sowie von Szintillationszählern und Zählgeräten bestimmen und die für die Strahlungsmessung notwendigen Korrekturen kennenlernen.

Ein erster Reaktorkurs befaßt sich mit einführenden Übungen wie Reaktorkonstruktion und Verhalten des Reaktors (beim Anfahren, im Betrieb, Verhalten bei gewissen vorgebbaren Störungen) sowie Bestimmung charakteristischer Reaktorgrößen wie räumliche Verteilung des Neutronenflusses im Reaktor, Intensitätsverlauf kollimierter Neutronenstrahlen in den Experimentierkanälen, Reaktivitätswerte der Kontrollplatten, Einflußfunktionen für Absorption, Streuung, Moderation und Hohlräume, Temperaturkoeffizient der Reaktivität und Neutronentemperatur.

Der zweite Reaktorkurs benützt den Reaktor ausschließlich als Meßinstrument und Strahlenquelle. In Transmissionsexperimenten mit kollimierten Neutronenstrahlen am und im Reaktorkern werden totale Wirkungsquerschnitte bestimmt. Absorptionsquerschnitte werden mit der Danger-Coefficient und der Pile-Oscillator-Methode gemessen. Die Messung der Resonanzabsorption ergibt die sogenannten effektiven Resonanzintegrale. Mit Experimenten in der thermischen Säule des Reaktors können sowohl die Diffusionslänge und die Transportweglänge in Graphit, die sogenannten Albedowerte von Graphit und Paraffin als auch die Lebensdauer und die Diffusionskonstante von thermischen Neutronen in Graphit bestimmt werden.

Wenn der Reaktor als Neutronenquelle für die Aktivierung von Isotopen benützt wird ist es vorteilhaft, ihn mit einer zusätzlichen Abschirmung aus Beton zu umgeben und dann mit einer Leistung von 1 W zu betreiben. Mit einem Neutronenfluß von ungefähr $5 \cdot 10^7$ n/cm² sec in der Mitte des zentralen Experimentierkanals ist es möglich, eine relativ große Zahl von Isotopen für Meßzwecke ausreichend zu aktivieren, wobei es sich selbstverständlich vor allem um kurzlebige Isotope handelt.

Der letztere Umstand stellt praktisch keine Einschränkung dar, da es sowieso in jedem Fall vorzuziehen ist, Isotopen mit einer Halbwertszeit von mehr als zehn Tagen von einem der großen Reaktorzentren zu

beziehen.

In Tabelle 1 sind einige der im SUR 100 aktivierbaren Isotope, sowie die Halbwertszeiten der resultierenden radioaktiven Isotope und die spezifische Aktivität, die man nach einstündiger Bestrahlung bei 1 W im horizontalen zentralen Experimentierkanal erhält, aufgeführt.

Dabei wurde angenommen, daß die zu bestrahlenden Proben die zu aktivierenden Elemente in ihrer natürlichen Isotopenhäufigkeit enthalten.

Tabelle 1: Aktivierung von Isotopen im Siemens-Unterrichtsreaktor SUR 100
(Bei einer Reaktorleistung von 1 Watt)

Z	E	M	T _{1/2}	A _{1h} (µc/g)	m (g)
11	Na	23	14,97 h	0,9	180
12	Mg	26	9,45 m	0,1	1400
13	Al	27	2,27 m	6,3	46
17	Cl	37	37,29 m	1,9	4,3
19	K	41	12,52 h	0,1	80
23	V	51	3,76 m	72	40
25	Mn	55	2,576 h	46	17
27	Co	59	10,47 m	220	6,5
29	Cu	63	12,8 h	2,1	70
		65	5,1 m	7	
30	Zn	68	57 m	1,1	240
31	Ga	69	21,1 m	8,5	100
		71	14,3 h	1,1	
33	As	75	26,4 h	1,6	70
35	Br	79	4,38 h	2,4	50
			17,6 m	40	
38	Sr	86	2,8 h	0,34	300
45	Rh	103	4,4 m	95	2,7
46	Pd	108	13,5 h	10	50
47	Ag	107	2,3 m	176	7
49	In	115	53,99 m	530	2,5
53	J	127	24,99 m	50	75
55	Cs	133	3,2 h	3,6	20
63	Eu	151	9,2 h	235	0,17
66	Dy	164	139,2 h	250	0,8
71	Lu	175	3,11 h	24	7,5
74	W	186	24 h	1,2	40
77	Ir	193	19 h	12	2,8
79	Au	197	2,697 d	4,2	8

Z=Ordnungszahl; E=Element; M=Massenzahl; T_{1/2}=Halbwertszeit;
A_{1h}=spez. Aktivität; m=max. Menge

Die maximalen Mengen, die in der letzten Spalte der Tabelle 1 angegeben werden, sind die Isotopenmengen die aus physikalischen Gründen höchstensfalls aktiviert werden können, ohne daß der Reaktor auf Grund der Neutronenabsorption unterkritisch wird. Hierbei ist nicht berücksichtigt, daß auch der zur Verfügung stehende Raum im zentralen Experimentierkanal (von 2,6 cm Durchmesser) die Menge der zu aktivierenden Substanz beschränkt.

Der in den horizontalen exzentrischen Experimentierkanälen zur Verfügung stehende Raum ist zwar einiges größer und die Einflüsse von Absorbern auf die Reaktivität des Reaktors sind bedeutend geringer, so daß aus diesen Gründen hier größere Mengen aktiviert werden könnten, aber dafür ist andererseits der Neutronenfluß in diesen Kanälen bedeutend geringer (nur etwa 15 % des maximalen Flusses) als im zentralen Kanal.

Aktivierungszeiten von mehr als einer Stunde steigern die Aktivität kaum noch, wenn die Halbwertszeiten kleiner als 20 Minuten sind. Für Halbwertszeiten über fünf Stunden wird jedoch durch längere Bestrahlungszeit die Aktivität beträchtlich gesteigert.

Bei Verwendung des Reaktors in Nuklearmedizin und Nuklearbiologie ist man auf niedrige Dosisraten beschränkt. Auf Grund des geringen Neutronenflusses ist es nicht möglich, den Reaktor für medizinisch-biologische Anwendungen wie die therapeutische Nutzung radioaktiver Isotope, Bestrahlung von Krankheitskeimen mit hohen γ -Dosen oder Neutronenbestrahlungen von mit bestimmten Elementen versetztem Gewebe zum Zwecke der Neutronenabsorptionstherapie, einzusetzen. Aber es gibt einige medizinisch-biologische Anwendungen für deren Untersuchung die Bestrahlungsdichte im SUR 100 ausreichend ist. Hierbei wird der Reaktor direkt als Strahlungsquelle oder indirekt zur Aktivierung von Isotopen benutzt. Im ersten Fall ist es möglich, die Entstehung von Mutationen, die z. B. durch Bestrahlung von Samen mit Neutronen ausgelöst werden können, zu untersuchen.

Die geforderte Strahlungsintensität von 10^{10} bis 10^{12} n/cm² kann man im zentralen Experimentierkanal des SUR 100 innerhalb von etwa 3 min bis 5 h erhalten, wenn man den Reaktor bei einer Leistung von 1 Watt betreibt. Die Untersuchung der Strahlenwirkung auf lebende Tiere und Pflanzen wird oft bei relativ geringen Dosisraten durchgeführt (bis herunter zu 10 r/d). Hierbei können die Effekte von kontinuierlicher oder unterbrochener Bestrahlung studiert werden. Am unteren Ende der thermischen Säule des SUR 100 kann man Neutronendosisraten von etwa 10 r/h erhalten, wobei die Neutronen Energien zwischen 0,1 und einigen MeV besitzen. Die γ -Dosisraten die man am Fuß der thermischen Säule

nach Entfernung eines Teiles der oberen Bleiabschirmung erhalten kann, liegen bei etwa 100 r/h. Zur Schädlungebekämpfung kann man Insekten, Insektenlarven und Insekteier niedrigen Dosen aussetzen um die Insekten zu sterilisieren und die Vermehrung zu behindern.

Entsprechend reichen diese Dosen aus um die Verhinderung der Bildung von Antikörpern bei Gewebetransplantationen in Tierversuchen zu untersuchen.

Bestrahlungen von isoliertem Gewebe können durchgeführt werden um Strahlungseffekte zu untersuchen und mit Hilfe der Aktivierungsanalyse können Spurenelemente nachgewiesen werden. Im letzteren Fall wird die Neutronenflußdichte im SUR 100 im Allgemeinen allerdings nicht groß genug sein, so daß man hiermit nur orientierende Untersuchungen durchführen und sich mit der Technik der Aktivierungsanalyse vertraut machen kann.

Die kurzlebigen Isotope, die im SUR 100 aktiviert werden können, werden vor allem für diagnostische Zwecke und als Tracer in Biologie und Medizin verwendet um hiermit Stoffwechselprozesse, im weitesten Sinne des Wortes, zu untersuchen. Bei Benutzung der kurzlebigen Isotope ist die totale Strahlungsdosis auf Grund der raschen Abnahme der Aktivität gering, während die Aktivität für die Messung selbst groß genug ist.

Manchmal wird die Tracer-Technik zusammen mit der Aktivierungsanalyse angewandt, wobei die Menge des Tracer-Elements im Gewebe durch die Aktivierung bestimmt wird. In diesem Fall wird der biologische Teil des Versuchs durch Strahlungseffekte nicht beeinflußt.

Die Elemente von medizinisch-biologischem Interesse (Na, Mg, Cl, K, V, Mn, Cu, Zn, As, Sr, Rh, J, Ir und Au) sowie ihre Halbwertszeiten und ihre spezifischen Aktivitäten, die man nach einstündiger Bestrahlung bei 1 W im zentralen Kanal des SUR 100 erhält, sind in Tabelle 1 angegeben.

Messung der Dosisrate an neutronenbestrahlten medizinischen Präparaten (3, 4)

Durch die Einführung moderner Untersuchungsmethoden in Medizin, Biologie und Biochemie wurde entdeckt, daß manche medizinischen Präparate unerwünschte Eigenschaften besitzen können, die vorher unbekannt waren. Aus diesem Grund haben wir verschiedene Medikamente im Siemens-Unterrichtsreaktor SUR 100 mit Neutronen bestrahlt. Eine theoretische Berechnung der Aktivierung ist bei vielen Präparaten nicht möglich, da die chemischen Formeln nicht bekannt sind.

Bei den untersuchten Medikamenten handelt es sich vorwiegend um Strahlenschutzpräparate, d. h. um Präparate die als Vorbeugung vor einer

Bestrahlung bzw. nach bereits erfolgter Bestrahlung angewandt werden. Besonders im ersten Fall ist es interessant, wie sich das Medikament, das selbst der Bestrahlung ausgesetzt wird, nachher verhält. Würde es nach der Bestrahlung eine zu große Radioaktivität aufweisen, so könnte dadurch der prophylaktische Effekt wieder aufgehoben oder gar ins Gegenteil umgekehrt werden.

Hier möchten wir nur kurz auf einige allgemeine Dinge eingehen und die Ergebnisse zusammenfassen.

Von den betreffenden Medikamenten wurde jeweils ein Dragee 1 Stunde lang im zentralen horizontalen Experimentierkanal des SUR 100 bei der Leistung 100 mW bestrahlt. Dabei betrug der thermische Neutronenfluß etwa $6,2 \cdot 10^3$ n/cm² sec, was einer Dosisrate von etwa 12 rem/h für thermische Neutronen entspricht. Der schnelle Neutronenfluß betrug etwa $1,9 \cdot 10^7$ n/cm² sec, entsprechend einer Dosisrate von etwa 80 rem/h. Im Vergleich zur Neutronendosis ist die geschätzte γ -Dosisrate von etwa 1r/h in diesem Reaktor praktisch vernachlässigbar. Etwa 3 Minuten nach Ende der Bestrahlung wurde die Dosisrate mit einem Meßgerät, das eine nahezu 2π Messung erlaubt, gemessen. Um einen Eindruck von der Größe der gemessenen Dosisraten zu vermitteln, sollen die Meßwerte einiger Präparate in Tabelle 2 angeführt werden.

Tabelle 2: Dosisraten neutronenbestrahlter Medikamente.

Präparat	Dosisraten (μ r/h)	
	$\gamma + \beta$	γ
Tachostyptan	3	2
Epsilon-Tachostyptan	4	≈ 0
Irradian	400	10
Movicard	54	≈ 0
Hepammerz	35	≈ 0

Als Vergleich: Der Nulleffekt (der bei obigen Meßwerten nicht mehr enthalten ist) liegt in der Größenordnung 15–20 μ r/h.

Auf eine weitere Diskussion dieser Meßwerte soll hier verzichtet werden, da dies in anderen Arbeiten schon gemacht wurde oder noch gemacht werden soll.

Zusammenfassung:

Die physikalischen Grundlagen eines Kernreaktors werden beschrieben. Als spezielles Beispiel wird Aufbau, Kontrolle und Betrieb des Siemens-Unterrichtsreaktors SUR 100 beschrieben. Dieser homogene

polyäthylenmoderierte Nullleistungsreaktor hat eine Leistung von nur 100 mW.

Trotzdem - oder gerade deswegen - ist dieser Reaktor für Ausbildungszwecke und als Übungsmöglichkeit auf dem Gebiet der Reaktortheorie und der Kernenergie sehr gut geeignet, denn die Leistungsbeschränkung erlaubt eine einfache Installierung und Betriebsweise des Reaktors. Neben seiner Verwendung als Ausbildungsinstrument kann dieser Reaktor aber auch als Strahlenquelle benutzt werden. Hiermit wurden verschiedene medizinische Präparate, die auch im Strahlenschutz Verwendung finden, bestrahlt, und anschließend ihre Dosisrate bestimmt.

Außerdem werden noch weitere Anwendungsmöglichkeiten des Siemens-Unterrichtsreaktors SUR 100 beschrieben.

LITERATUR

1. GLASTONE, S. and EDLUND, M. C.: The Elements of Nuclear Reactor Theory, Van Nostrand Company, Inc., New York 1960
2. HILDENBRAND, G., HÜHNE, P. und SCHWARZ, E.: Atomwirtschaft, Vol. VIII, No. 4, pp. 209, 1962
3. SZIRMAI, E. *et al.*: Strahlentherapie 137/1, p. 122, 1969
4. SZIRMAI, E. *et al.*: Nuclear Energy, Nov./Dec. 1968, p. 175