

EUR 363.d

REPRINT

ASSOZIIERUNG

Europäische Atomgemeinschaft - EURATOM
Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire - C.E.N.

**MESSUNG DER GEMISCHTEN
STRAHLUNGSFELDER IM REAKTOR BR2 MIT
HILFE VON KALORIMETERSONDEN**

von

R. WERZ

1964



Bericht abgefasst im
Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire - C.E.N., Mol, Belgien

Euratom-Vertrag Nr. 006-60-5 BRAB

Sonderdruck aus
NUKLEONIK
Band 6, Heft 1, 1964

HINWEIS

Das vorliegende Dokument ist im Rahmen des Forschungsprogramms der Kommission der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) ausgearbeitet worden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Euratomkommission, ihre Vertragspartner und alle in deren Namen handelnden Personen :

- 1° — keine Gewähr dafür übernehmen, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen richtig und vollständig sind oder dass die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden und Verfahren nicht gegen gewerbliche Schutzrechte verstösst;
- 2° — keine Haftung für die Schäden übernehmen, die infolge der Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden oder Verfahren entstehen könnten.

This reprint is intended for restricted distribution only. It reproduces, by kind permission of the publisher, an article from "NUKLEONIK", Vol. 6, No. 1 - 1964, 28-33. For further copies please apply to Springer Verlag — Heidelberg 1, Neuenheimer Landstrasse 28-30 (Deutschland).

Dieser Sonderdruck ist für eine beschränkte Verteilung bestimmt. Die Wiedergabe des vorliegenden in „NUKLEONIK“, Vol. 6, Nr. 1 - 1964, 28-33 erschienenen Aufsatzes erfolgt mit freundlicher Genehmigung des Herausgebers. Bestellungen weiterer Exemplare sind an Springer Verlag — Heidelberg 1, Neuenheimer Landstrasse 28-30 (Deutschland), zu richten.

Ce tiré-à-part est exclusivement destiné à une diffusion restreinte. Il reprend, avec l'aimable autorisation de l'éditeur, un article publié dans «NUKLEONIK», Vol. 6, N° 1 - 1964, 28-33. Tout autre exemplaire de cet article doit être demandé à Springer Verlag — Heidelberg 1, Neuenheimer Landstrasse, 28-30, (Deutschland).

Questo estratto è destinato esclusivamente ad una diffusione limitata. Esso è stato riprodotto, per gentile concessione dell'Editore, da «NUKLEONIK», Vol. 6, N° 1 - 1964, 28-33. Ulteriori copie dell'articolo debbono essere richieste a Springer Verlag — Heidelberg 1, Neuenheimer Landstrasse 28-30 (Deutschland).

Deze overdruk is slechts voor beperkte verspreiding bestemd. Het artikel is met welwillende toestemming van de uitgever overgenomen uit „NUKLEONIK“, Vol. 6, no. 1 - 1964, 28-33. Meer exemplaren kunnen besteld worden bij Springer Verlag — Heidelberg 1, Neuenheimer Landstrasse 28-30 (Deutschland).

EUR 363.d

REPRINT

MESSUNG DER GEMISCHTEN STRAHLUNGSFELDER IM REAKTOR BR2 MIT HILFE VON KALORIMETERSONDEN von R. WERZ.

Assoziierung: Europäische Atomgemeinschaft - EURATOM

Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire - C.E.N.

Bericht abgefasst im Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire - C.E.N., Mol (Belgien).

EURATOM-Vertrag Nr. 006-60-5 BRAB.

Sonderdruck aus „Nukleonik“, Band 6, Heft 1 - 1964 - Seiten 28-33.

Durch Strahlungsabsorption werden Materialproben im Innern von Reaktoren aufgeheizt. Eine Analyse des gemischten Strahlungsfeldes ergibt, dass sich die Aufheizung aus drei Komponenten zusammensetzt, für welche die thermischen Neutronen, die schnellen Neutronen und die γ -Strahlen verantwortlich sind. Je nach Art der gewählten Materialprobe kann eine bestimmte Strahlenkomponente mehr oder weniger für die Aufheizung verantwortlich sein. Kalorimetersonden gestatten die Strahlungsaufheizung von Materialproben zu messen und erlauben damit eine Dosimetrie des gemischten Strah-

EUR 363.d

REPRINT

MEASUREMENT OF THE MIXED RADIATION FIELDS IN THE BR2 REACTOR BY MEANS OF CALORIMETER PROBES by R. WERZ.

Association: European Atomic Energy Community - EURATOM

Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire - C.E.N.

Work performed at the Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire - C.E.N., Mol (Belgium).

EURATOM contract No 006-60-5 BRAB.

Reprinted from "Nukleonik", Vol. 6, No 1 - 1964 - pp. 28-33.

Material samples are heated inside the reactor by means of irradiation absorption. An analysis of the mixed radiation field shows that there are three components in the heating due respectively to thermal neutrons, fast neutrons and gamma radiations. The influence of a given radiation component will vary with the type of sample selected. Calorimeter probes make it possible to measure the radiation heating of material samples and thus to obtain a dosimetry of the mixed radiation field within the reactor. Two types of radiation detector may be used in these probes, namely the adiabatic and the isothermal calori-

EUR 363.d

REPRINT

MEASUREMENT OF THE MIXED RADIATION FIELDS IN THE BR2 REACTOR BY MEANS OF CALORIMETER PROBES by R. WERZ.

Association: European Atomic Energy Community - EURATOM

Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire - C.E.N.

Work performed at the Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire - C.E.N., Mol (Belgium).

EURATOM contract No 006-60-5 BRAB.

Reprinted from "Nukleonik", Vol. 6, No 1 - 1964 - pp. 28-33.

Material samples are heated inside the reactor by means of irradiation absorption. An analysis of the mixed radiation field shows that there are three components in the heating due respectively to thermal neutrons, fast neutrons and gamma radiations. The influence of a given radiation component will vary with the type of sample selected. Calorimeter probes make it possible to measure the radiation heating of material samples and thus to obtain a dosimetry of the mixed radiation field within the reactor. Two types of radiation detector may be used in these probes, namely the adiabatic and the isothermal calori-

lungsfeldes im Innern von Reaktoren. Als Strahlungsdetektoren kommen für diese Sonden zwei Typen in Frage: das adiabatische und das isothermische Kalorimeter. Für den belgischen Reaktor BR2 wurde eine Kalorimetersonde entwickelt, die zwei isothermische Kalorimeter mit Uran-235 und Aluminium als Absorber enthält. Diese Detektoren messen im wesentlichen den thermischen Neutronenfluss und die Dosisleistung des γ -Strahlungsfeldes. Die erhaltenen Messergebnisse werden an einem Beispiel diskutiert. Der Bau weiterer Exemplare dieser Sonde, jedoch mit zum Teil anderen Absorbermaterialien, wie Beryllium und Graphit, ist vorgesehen.

meter. For the Belgian BR2 reactor a calorimeter probe was developed containing two isothermal calorimeters with uranium 235 and aluminium as absorbers. These detectors essentially measure the thermal neutron flux and the dose-rate of the gamma-radiation field. The results obtained are discussed by consideration of an example. It is intended to construct further models of this probe, but in part to use other absorber materials such as beryllium and graphite.

meter. For the Belgian BR2 reactor a calorimeter probe was developed containing two isothermal calorimeters with uranium 235 and aluminium as absorbers. These detectors essentially measure the thermal neutron flux and the dose-rate of the gamma-radiation field. The results obtained are discussed by consideration of an example. It is intended to construct further models of this probe, but in part to use other absorber materials such as beryllium and graphite.

Sonderdruck aus
„Nukleonik“, 6. Band, 1. Heft, 1964, S. 28—33

Springer-Verlag, Berlin · Göttingen · Heidelberg

Messung der gemischten Strahlungsfelder im Reaktor BR2 mit Hilfe von Kalorimetersonden

Von RUDOLF WERZ*

(Section Physique des Réacteurs, CEN-Euratom, Mol (Belgien))

Mit 4 Textabbildungen

(Eingegangen am 2. September 1963)

Zusammenfassung. Durch Strahlungsabsorption werden Materialproben im Innern von Reaktoren aufgeheizt. Eine Analyse des gemischten Strahlungsfeldes ergibt, daß sich die Aufheizung aus drei Komponenten zusammensetzt, für welche die thermischen Neutronen, die schnellen Neutronen und die γ -Strahlen verantwortlich sind. Je nach Art der gewählten Materialprobe kann eine bestimmte Strahlenkomponente mehr oder weniger für die Aufheizung verantwortlich sein. Kalorimetersonden gestatten die Strahlungsaufheizung von Materialproben zu messen und erlauben damit eine Dosimetrie des gemischten Strahlungsfeldes im Innern von Reaktoren. Als Strahlungsdetektoren kommen für diese Sonden zwei Typen in Frage: das adiabatische und das isothermische Kalorimeter. Für den belgischen Reaktor BR2 wurde eine Kalorimetersonde entwickelt, die zwei isothermische Kalorimeter mit Uran-235 und Aluminium als Absorber enthält. Diese Detektoren messen im wesentlichen den thermischen Neutronenfluß und die Dosisleistung des γ -Strahlungsfeldes. Die erhaltenen Meßergebnisse werden an einem Beispiel diskutiert. Der Bau weiterer Exemplare dieser Sonde, jedoch mit zum Teil andern Absorbermaterialien, wie Beryllium und Graphit, ist vorgesehen.

1. Einleitung

Der Materialprüfreaktor BR 2 des belgischen Kernforschungszentrums CEN in Mol zeichnet sich durch einen hohen Neutronenfluß und ein damit verbundenes intensives gemischtes Strahlungsfeld aus. Er wird seit September 1962 mit der halben Nennleistung betrieben. Eine Steigerung bis auf die volle Nennleistung ist für den Herbst 1963 vorgesehen, sobald die Erfahrungen über das thermische Verhalten der Brennelemente genügend ausgewertet sind. Die volle Nennleistung ist durch einen Wärmefluß an der heißesten Stelle der Brennelementoberflächen von maximal 400 W/cm² gegeben. Diesem Wert entspricht ein thermischer Neutronenfluß von etwa $6 \cdot 10^{14}$ n/cm² s. Die einzelnen Kanäle des Reaktorkernes werden an Firmen oder Forschungszentren vermietet, die hier ihre Versuche und Bestrahlungs sonden einbauen. Für die meisten Bestrahlungsversuche interessiert den Kunden nicht nur der im betreffenden Kanal herrschende thermische Neutronenfluß, sondern vor allem auch die Intensität und Zusammensetzung des gesamten gemischten Strahlungsfeldes. Die Entwicklung von Sonden zur fortlaufenden Messung der Strahlen im Innern des Hochflußreaktors BR2 war daher erforderlich.

Mit Ausnahme der Neutrinos wird die gesamte im Reaktor erzeugte Strahlenenergie in diesem selbst, eingebaute Versuche und seine Abschirmung einbezogen, absorbiert. Sieht man von dem kleinen Betrag möglicherweise in Form physikalischer oder chemischer Stoffveränderungen gespeicherter Energie ab, so wird die absorbierte Strahlenenergie letztlich insgesamt in Wärme umgewandelt. Eine Dosimetrie des gemischten Strahlungsfeldes benutzt als Maß zweckmäßigerweise die im bestrahlten Material je Masseneinheit absorbierte Strahlungsenergie. So ist die Einheit des „rad“ für jede beliebige Strahlenart definiert als eine „absorbierte Strahlendosis“ von 100 erg je Gramm Materie. In Hochflußreaktoren ist die absorbierte Dosisleistung so hoch, daß man sie meistens nicht in rad je Stunde, sondern unmittelbar in Watt je Gramm angibt. Dabei entsprechen $3,6 \cdot 10^8$ rad/h einer absorbierten Leistung von 1 W/g.

Der Zusammenhang zwischen absorbiertem Dosis und erzeugter Wärmemenge erlaubt eine wichtige

Folgerung: Die Dosimetrie der gemischten Strahlungsfelder in Hochflußreaktoren kann auf die Messung der Aufheizung verschiedener Materialien durch die Reaktorstrahlung zurückgeführt werden.

Zur Messung dieser Materialaufheizung ist ein entsprechend gewählter Probekörper zusammen mit einem Kalorimeter, das die entwickelte Wärme zu messen gestattet, in den Reaktor einzuführen. Vor dem Entwurf derartiger Kalorimetersonden ist es nützlich, dem Ursprung der verschiedenen Strahlen und den zur Materialaufheizung führenden Prozessen ein wenig nachzugehen. Eine solche Studie fördert das Erreichen optimaler Eigenschaften bei der zu entwickelnden Sonde und erlaubt anschließend eine bessere Deutung der erhaltenen Meßergebnisse.

Vor der Beschreibung einer für den BR2 entwickelten Kalorimetersonde möchten wir daher im folgenden den Ursprung der verschiedenen Strahlen, ihre Wechselwirkungen und ihren Beitrag zur Materialaufheizung analysieren. Dabei werden wir Strahlen und Prozesse vernachlässigen, die für die Energiebilanz des gemischten Strahlungsfeldes keinen merklichen Beitrag leisten.

2. Analyse des gemischten Strahlungsfeldes

2.1. Ursprung

Der Ursprung des gemischten Reaktorstrahlungsfeldes ist durch die bei der Kernspaltung in Freiheit gesetzten Neutronen gegeben. Sie erzeugen durch Wechselwirkung mit der im Reaktor vorhandenen Materie, also vor allem durch Spaltung, (n, γ)-Einfang und Streuung, verschiedene Strahlen, die dann ihrerseits auf die Materie einwirken und weitere Strahlen entstehen lassen. Dabei entwickelt eine jede Strahlenart im Reaktor eine ihr eigene räumliche Intensitätsverteilung.

2.2. Aufteilung des gemischten Strahlungsfeldes in Komponenten

Im Hinblick auf eine Dosimetrie des gemischten Strahlungsfeldes ist es zweckmäßig, dieses Feld in zwei Gruppen, wie folgt, aufzuteilen: Die erste Gruppe besteht aus den ungeladenen Strahlen; das sind die thermischen Neutronen, die schnellen Neutronen und die γ -Strahlen. Ihre Wechselwirkung mit der Materie erzeugt unmittelbar keine Wärme, wohl aber geladene

* Neue Anschrift: Département de Recherche Physique, CEA-Euratom, Cadarache (Frankreich).

Teilchenstrahlen, welche die zweite Gruppe als unmittelbar aufheizende Strahlen darstellen. Die Reichweite der eine Ladung tragenden Strahlen ist im Vergleich zu den neutralen Strahlen gering, da ihre Ladung eine starke Wechselwirkung mit der Materie hervorruft. Dabei wird ihre kinetische Energie entlang der Flugbahn aufgezehrt und so gut wie restlos in Wärme umgewandelt. Wir unterteilen die unmittelbar aufheizenden Strahlen dreifach entsprechend ihrer Entstehung durch die drei vorhergenannten neutralen Strahlen.

Entsprechend der so durchgeführten und in Abb. 1 dargestellten Aufteilung des gemischten Strahlungsfeldes läßt sich die Gesamtaufheizung einer Materialprobe im Reaktor in drei Komponenten zerlegen, für die

- a) thermische Neutronen,
- b) schnelle Neutronen und
- c) γ -Strahlen

auf dem Umweg der von ihnen gebildeten geladenen Teilchenstrahlen verantwortlich sind.

Unabhängig von dieser Aufteilung können wir prompte und verzögerte Strahlen unterscheiden. Die prompten Strahlen zeichnen sich dadurch aus, daß ihre Intensität zeitlich der des Neutronenflusses trägeheitslos folgt. Die verzögerten Strahlen, im wesentlichen β -Teilchen und γ -Strahlen, haben ihren Ursprung im Zerfall von β -aktiven Nukliden, die durch Kernspaltung (Spaltprodukte) und durch (n, γ) -Einfang gebildet wurden. Bei einer plötzlichen Änderung der Reaktorleistung, also insbesondere beim Anfahren und nach dem Abschalten, macht sich die verzögerte Komponente des gemischten Strahlungsfeldes bemerkbar. So vergehen beispielsweise nach dem Anfahren des Reaktors mehrere Stunden, bevor das γ -Strahlungsfeld ausreichend gesättigt erscheint.

2.3. Abschätzung der von den verschiedenen Strahlen verursachten Dosisleistung

Wie in der Einführung erklärt, kann man die Dosisleistung durch die in dem bestrahlten Material je Masseneinheit erzeugte Wärmeleistung messen. Entsprechend der Aufteilung des Strahlungsfeldes setzt sich die Gesamtaufheizung einer Materialprobe aus drei Anteilen, herrührend von thermischen und schnellen Neutronen sowie von γ -Strahlen, zusammen. Für die Abschätzung der Größe dieser Anteile wollen wir einige Gesichtspunkte anführen.

Der Aufheizungsbeitrag durch thermische Neutronen ist im allgemeinen leicht zu ermitteln. Er ist proportional dem thermischen Neutronenfluß, dem Absorptionswirkungsquerschnitt und der kinetischen Energie der entstehenden geladenen Teilchen. In Lithium, Bor und spaltbarem Material erreicht die Aufheizung durch thermische Neutronen extrem hohe Werte.

Eine Berechnung der Aufheizung durch schnelle Neutronen ist sehr schwierig; denn im allgemeinen ist die Intensität und das Spektrum der schnellen Neutronen nicht mit genügender Genauigkeit bekannt. Außerdem hängt die bei der Streuung übertragene Energie vom Streuwinkel ab. Bei wasserstoffreichen Materialien, wie z.B. Wasser, kann die Aufheizung durch schnelle Neutronen diejenige durch γ -Strahlen übertreffen. Im Gegensatz hierzu kann bei Materialien mittleren und hohen Atomgewichts die Aufheizung

durch schnelle Neutronen meistens im Vergleich zur Gesamtaufheizung vernachlässigt werden.

Beim BR2 ist die Compton-Streuung die bei weitem vorherrschende Wechselwirkung der γ -Strahlung. Die Eigenart dieses Prozesses hat zu Folge, daß der auf die Masseneinheit Materie bezogene Wirkungsquerschnitt in erster Näherung der Zahl der in der Masseneinheit vorhandenen Elektronen proportional ist. Daraus folgt, daß die Dosisleistung, bzw. die je Gramm Materie erzeugte Wärmeleistung durch die γ -Strahlung nur wenig von der Ordnungszahl abhängt und für fast alle Elemente annähernd konstant ist. Eine Ausnahme machen der leichte Wasserstoff wegen

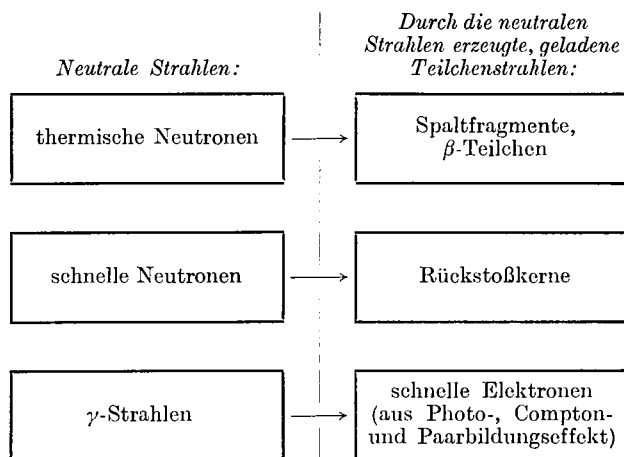


Abb. 1. Aufteilung des gemischten Strahlungsfeldes eines thermischen Reaktors. (Die Pfeile verbinden die neutralen Strahlen mit den durch sie erzeugten geladenen Teilchenstrahlen)

seines hohen Elektronengehaltes und die sehr schweren Elemente wegen ihres erhöhten Wirkungsquerschnittes für Photoeffekt und Paarbildung. Bei diesen Stoffen zeigt die Aufheizung durch γ -Strahlung deshalb einen größeren Wert.

Mit Ausnahme von ausgesprochenen Moderatoren und starken Absorbern, die beim Neutroneneinfang geladene Strahlen erzeugen, werden im BR2 die Materialien im wesentlichen nur von der γ -Strahlung aufgeheizt. Dies erklärt, warum beim Betriebe dieses Materialprüfreaktors der Dosimetrie des γ -Strahlungsfeldes eine besondere Bedeutung zukommt.

Bei stationärem Betrieb des BR2 werden je Spaltung rund 2,5 Neutronen in Freiheit gesetzt. Hiervon wird 1 Neutron zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion in einem weiteren Spalteinfang absorbiert. Die überschüssigen 1,5 Neutronen werden irgendwo im Reaktor, die Abschirmung einbegriffen, in einem (n, γ) -Prozeß eingefangen. Das bedeutet, daß auf je eine Spaltung anderthalb (n, γ) -Einfänge entfallen. Unter Benutzung dieses Sachverhaltes haben wir für den BR2 eine Abschätzung der im Mittel je Spaltung freiwerdenden Strahlenenergie durchgeführt [1], die in Tabelle 1 wiedergegeben ist. Danach werden je Spaltung etwa 205,2 MeV absorbierbarer Energie erzeugt und anschließend in Wärme umgewandelt. Zu diesem Gesamtwert tragen die thermischen Neutronen mit 176 MeV (85,8%), die schnellen Neutronen mit 5 MeV (2,4%) und die γ -Strahlung mit 24,2 MeV (11,8%) bei.

3. Wirkungsweise der Kalorimetersonden

In den letzten Jahren wurden vor allem in den USA und England große Anstrengungen unternommen

um Kalorimetersonden zur Messung der Dosisleistung der Reaktorstrahlungsfelder zu entwickeln oder zu verbessern. Dabei wurden zwei Typen von Detektoren benutzt, das adiabatische und das isothermische Kalorimeter.

Tabelle 1. Abschätzung der mittleren Energie der im BR2 je Spaltung, bzw. je $1,5(n,\gamma)$ -Einfang erzeugten Strahlen

Wechselwirkung	Erzeugte Strahlung	Energie (MeV)	Aufheizung bewirkende geladene Teilchenstrahlen ¹	Als Ursache wirkende neutrale Strahlen ¹
(n, f)	Spaltfragmente	168	Spaltfragmente	thermische Neutronen
	schnelle Neutronen	5	Rückstoßkerne	schnelle Neutronen
	prompte γ -Strahlung	7,2	schnelle Elektronen	γ -Strahlung
	β -Strahlung der Spaltprodukte	7,0	β -Teilchen	thermische Neutronen
	γ -Strahlung der Spaltprodukte	7,0	schnelle Elektronen	γ -Strahlung
$(n, \gamma)^2$	prompte γ -Strahlung	9,6	schnelle Elektronen	γ -Strahlung
	β -Strahlung der Einfangprodukte	0,45	β -Teilchen	thermische Neutronen
	γ -Strahlung der Einfangprodukte	0,36	schnelle Elektronen	γ -Strahlen
Gesamtbetrag:		205,2		

¹ Siehe Aufteilung des Strahlungsfeldes der Abb. 1.

² Die für den (n, γ) -Einfang angegebenen Energiebeträge sind gewissen Schwankungen, bedingt durch unterschiedliche Beladung und Betriebszustand, unterworfen.

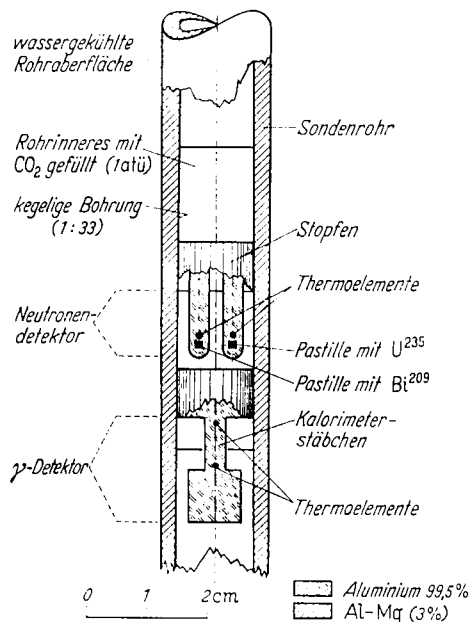


Abb. 2. Schnitt durch Sondenrohr mit Detektoren

Messungen mit adiabatischen Kalorimetern wurden beispielsweise in Harwell in den Reaktoren BEPO und PLUTO durchgeführt [2]. Bei diesem Kalorimetertyp ist die Materialprobe im Innern eines Hohlzylinders aufgehängt, dessen Temperatur mittels einer elektrischen Heizung geregelt werden kann. Probe und Hohlzylinder tragen je ein Thermoelement. Zur Vermeidung von gegenseitiger Beeinflussung durch Wärme-

transport ist das Ganze von einem evakuierten Behälter umgeben. Nach Einführen in das Reaktorstrahlungsfeld absorbiert die Materialprobe Strahlung und erwärmt sich. Über die elektrische Heizung wird die Temperatur des Hohlzylinders derartig geregelt, daß keine Temperaturdifferenz zwischen ihm und der Probe auftritt. Die Temperaturzunahme der dadurch thermisch isolierten Probe läßt sich bei Kenntnis ihrer spezifischen Wärme leicht in die absorbierte Strahlungsenergie umrechnen. Die schnellsten, gerade noch zu kontrollierenden Temperaturzunahmen der Proben lagen in Harwell bei 1°C/s . Damit ist aber die Anwendung dieser adiabatischen Kalorimeter auf Strahlungsfelder beschränkt, in denen die absorbierte Strahlungsleistung einige Zehntel Watt je Gramm nicht übersteigt. Die Folge war, daß bei Messungen im Hochflußreaktor PLUTO dessen Leistung auf 100 kW, das sind 1% seiner Nennleistung, vermindert werden mußte.

Wegen des linearen Zusammenhanges zwischen Reaktorleistung und Strahlungsfeld ließen sich die gefundenen Meßwerte auf die Nennleistung umrechnen. Dennoch haftet solchen Extrapolationen ein schwerwiegender Nachteil an, weil Leistungsreaktoren meistens für einen möglichst großen negativen Temperaturkoeffizienten der Reaktivität ausgelegt sind. Die Folge hiervon ist, daß sich bei einer Verminderung der Leistung auch die Stellung der Regelstäbe und damit die Verteilung des Neutronenflusses und gesamten gemischten Strahlungsfeldes wesentlich verändert.

Das Bestreben, die Strahlungsfelder in Hochflußreaktoren möglichst bei voller Leistung zu messen, hat zur Entwicklung von isothermischen Kalorimetern geführt, die außerdem eine kontinuierliche Messung erlauben. Im Gegensatz zum adiabatischen Kalorimeter wird die im Probekörper entwickelte Wärme nicht gespeichert, sondern nach außen abgeführt. Der so erzeugte Wärme fluß liefert die zu messende Temperaturdifferenz. Ein Nachteil besteht in der schwierigeren Eichung von isothermischen Kalorimetern.

4. Beschreibung der Kalorimetersonde

4.1. Aufbau

Die für den BR2 entwickelte erste Kalorimetersonde kann beliebig in einem der vielen Kanäle, die den Reaktorkern von oben nach unten durchqueren, eingebaut werden. Sie enthält zwei Detektoren vom Typ des isothermischen Kalorimeters, welche die absorbierte Dosisleistung

- a) in Aluminium und
- b) in Uran-235

zu messen gestattet.

Im Strahlungsfeld des BR2 ist ein Probekörper aus Aluminium im wesentlichen nur für die γ -Strahlung empfindlich, denn der Beitrag von thermischen und schnellen Neutronen zur Aufheizung liegt durchweg unter 5%. Die Aufheizung von Uran-235 ist dagegen fast ausschließlich durch von thermischen Neutronen ausgelöste Spaltungen verursacht. Wegen dieser Eigenschaften werden die beiden Detektoren zur besseren Unterscheidung im folgenden γ - und Neutronendetektor genannt.

Die Abb. 2 stellt einen Schnitt durch das über 4 m lange und nur 18 mm dicke Sondenrohr in Höhe der

beiden Detektoren dar. Der Probekörper des γ -Detektors besteht aus einem Aluminiumzylinder von 8,5 mm Durchmesser und 8,5 mm Länge. Die in ihm erzeugte Wärme wird durch das ihn tragende Aluminiumstäbchen von 3,5 mm Durchmesser in einen kegeligen Stopfen und von dort in das Sondenrohr abgeführt. Dieses Rohr wird vom Reaktorkühlwasser, das eine Temperatur von 40 bis 50° C und einen Druck von 12 atü hat, umspült.

In einem Abstand von 7 mm sind in dem Aluminiumstäbchen zwei Thermolemente eingelassen, wodurch dieses Stäbchen das eigentliche isothermische Kalorimeter bildet. Die sich zwischen den Thermolementen einstellende Temperaturdifferenz ist ein Maß für die Zeiteinheit durch das Stäbchen strömende Wärmemenge. Das von den Thermolementen kommende Signal wird einem elektronischen Gleichspannungsverstärker zugeführt und anschließend mit einem Kompensationsschreiber registriert.

Der Neutronendetektor besteht aus zwei Kalorimeterstäbchen, die ebenfalls aus Aluminium sind und einen Durchmesser von 3,5 mm haben. Das eine Stäbchen enthält nahe seinem Ende eine eingeschweißte Pastille aus gesintertem Aluminiumpulver, dem 1,2 mg Uran-235 als U_3O_8 beigemischt sind. Das andere Stäbchen hat die gleichen Abmessungen und trägt ebenfalls eine Pastille, der jedoch statt Uran eine gleich große Menge an Wismut-209 beigefügt wurde. Nahe der Pastille tragen beide Stäbchen je ein Thermolement. Die angezeigte Temperaturdifferenz ist ein Maß der durch spaltende Neutronen im Uran erzeugten Wärme. Wegen seines symmetrischen Aufbaus ist der Neutronendetektor gegen die von außen kommende β - und γ -Strahlung kompensiert, weil diese die beiden Kalorimeterstäbchen in gleichem Maße aufheizen.

Das Sondenrohr tritt mit seinen Meßleitungen durch eine Dichtung im oberen Deckel aus dem Reaktordrucktank heraus. Auf dem Deckel befestigt ist eine Gewindespindel, die eine axiale Bewegung des Sondenrohres mit einem Hub von 1400 mm ermöglicht. Die Bewegung der Spindel erfolgt zur Zeit von Hand mittels einer an der Ladebrücke des Reaktorschwimmbades befestigten Welle.

Nach Beendigung einer Meßreihe ist die Sonde in ihre höchste Stellung zu fahren. Hier befindet sich der Neutronendetektor 960 mm über der Mittelebene des Reaktorkernes, außerhalb des hohen Neutronenflusses. In dieser Stellung wird der Sondenkanal in Höhe der Brennelemente außerdem durch einen am unteren Ende der Sonde befestigten Standard-Berylliumstopfen von 17 mm Durchmesser ausgefüllt. Diese Ruhestellung der Sonde gewährleistet zweierlei: Schutz des Neutronendetektors gegen unnötigen Abbrand und ungestörte Neutronenverteilung im Reaktorkern.

Aus verschiedensten Gründen war die Wahl der Werkstoffe für die Herstellung der Sonde sehr beschränkt. Erwähnt sei hier nur das intensive Strahlungsfeld und der Umstand, daß keinerlei schwermetallhaltige Stoffe mit dem Kühlwasser in Berührung kommen dürfen, weil dies eine Korrosion des in großen Mengen im Reaktor vorhandenen Berylliums und Aluminiums nach sich ziehen würde. Für das Sondenrohr haben wir Aluminium, legiert mit 3% Magnesium, wegen seiner guten Wärmeleitung, Korrosionsfestigkeit, geringen Wirkungsquerschnittes für Neutronenabsorption und ausreichenden mechani-

schen Festigkeit gewählt. Die verwendeten Thermolemente sind vom Typ Chromel-Alumel. Chromel- und Alumeldraht sind zusammen in Magnesiumoxyd eingebettet und von einem Rohr aus rostfreiem Stahl mit nur 0,5 mm Außendurchmesser umhüllt.

Bei der Befestigung der Detektoren mußte ein guter Wärmeübergang zum Sondenrohr hin sichergestellt werden. Zu diesem Zwecke sind die Kalorimeterstäbchen mit schwach kegeligen Stopfen (1:33) aus Aluminium verbunden. Die Mantelfläche der Stopfen wurde galvanisch verkupfert und anschließend verzinkt. Das Sondenrohr ist von unten her kegelig (1:33) aufgebohrt und innen ebenfalls verkupfert und verzinkt. Die auf den Stopfen fertig montierten Detektoren wurden in das Rohr eingeführt und unter Zugabe von Zinn-Bleilot gegen die Kegelflächen gepreßt. Ein kurzes Erhitzen des Sondenrohres auf 200° C stellte einen innigen Kontakt von Rohr und Stopfen durch Weichlöten her. Anschließend wurde die untere Öffnung des Sondenrohres durch elektrische Schweißung verschlossen. Die Füllung der Sonde mit Kohlendioxyd von 1 atü hat zum Zweck, ein Eindringen von Luft und Feuchtigkeit zu verhindern.

4.2. Einfluß der thermischen Trägheit auf die Meßgeschwindigkeit

Isothermische Kalorimeter sind mit einer ihnen eigenen thermischen Trägheit behaftet. Diese Trägheit hat zur Folge, daß bei einer sprunghaften Intensitätsänderung des Strahlenfeldes sich die angezeigte Temperaturdifferenz lediglich asymptotisch nach einem exponentiellen Gesetz auf den neuen Wert einstellt. Nur bei einer kleinen Zeitkonstanten des exponentiell einschwingenden Signals lassen sich Messungen in rascher Folge durchführen. Die Zeitkonstante ist proportional dem Quadrat der linearen Ausdehnung des Kalorimeters. Sie ist außerdem umgekehrt proportional der Temperaturleitfähigkeit des Kalorimetermaterials (Verhältnis von Wärmeleitfähigkeit zum Produkt aus Dichte und spezifischer Wärme). Aluminium hat eine sehr große Temperaturleitfähigkeit.

Eine Änderung der Umgebungstemperatur führt beim isothermischen Kalorimeter zu einem Wärmetransport zwischen Umgebung und Probekörper. Der Wärmetransport erzeugt ein Störsignal, das um so größer ist, je schneller sich die Außentemperatur ändert und je höher der Wärmehalt von Kalorimeter und Probekörper ist.

Die fast ausschließliche Verwendung von Aluminium und die geringen linearen Abmessungen der beiden Kalorimeter hatten zum Zweck, die Signaleinstellzeit und die Größe der Störsignale bei Temperaturschwankungen des Reaktorkühlwassers herunterzudrücken. Detektoren kleiner Masse haben außerdem eine geringere Rückwirkung auf das sie umgebende Strahlenfeld.

Die Tabelle 2 zeigt eine Zusammenstellung der wichtigsten Sondendaten. Die Zeitkonstante des Neutronendetektors ist mit 0,7 s bemerkenswert kurz.

4.3. Eichung

Für die Eichung der Kalorimeter wurden zwei maßgetreue Kopien der Detektoren angefertigt, deren Probekörper im Innern mit einer elektrischen Heizung ausgerüstet waren. Die damit durchgeführten Messungen zeigten folgendes:

Tabelle 2. Zusammenstellung von Daten der Kalorimetersonde

	Neutronendetektor	γ -Detektor
Absorbermaterial	Uran-235 (1,2 mg)	Aluminium (1,3 g)
Meßprinzip	isothermisches Kalorimeter	isothermisches Kalorimeter
Kompensation	gegenüber β - und γ -Strahlen	keine
Empfindlichkeit	$1,99 \cdot 10^{13} \text{ } ^\circ\text{C/n/cm}^2\text{s}$	$3,34^\circ \text{C/W/g}$
Zeitkonstante des Detektorsignals bei sprunghafter Änderung der Strahlenintensität	0,7 s	5,8 s
Maximal zulässige Absorberraufheizung	27 kW/g (entspricht: $n v_0 = 7 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2\text{s}$)	24 W/g (entspricht: $8,6 \cdot 10^9 \text{ rad/h}$)
Mittleres Störsignal	$\pm 0,5 \mu\text{V}$ (entspricht: $\pm 6 \cdot 10^{10} \text{ n/cm}^2\text{s}$)	$\pm 0,5 \mu\text{V}$ (entspricht: $\pm 3 \text{ mW/g}$)

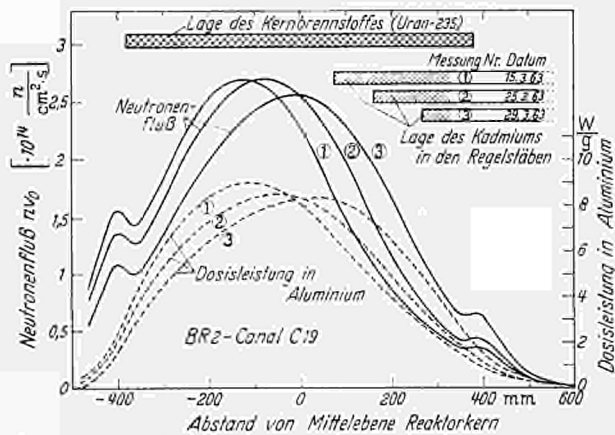


Abb. 3. Mit der Kalorimetersonde gemessene Verteilung des Neutronenflusses und der Dosisleistung in Aluminium längs eines mit einem Brennelement beladenen Kanals

a) Die gemessene Temperaturdifferenz war linear für Heizleistungen bis mindestens 20 W;

b) Bei Schwankungen der Kühlwassertemperatur ließ sich keine Veränderung der Detektorempfindlichkeit feststellen.

Die so durchgeführte Eichung lieferte den Zusammenhang zwischen absorbierter Leistung und angezeigter Temperaturdifferenz. Die Kenntnis der Masse des absorbierenden Materials ermöglicht die Umrechnung der absorbierten Leistung auf die absorbierte Dosisleistung. Im Falle des Neutronendetektors läßt sich über die Spaltdichte außerdem der Zusammenhang von Signal und thermischem Neutronenfluß ausrechnen. Die Eichung durch elektrische Heizung war beim Neutronendetektor jedoch nicht unbedingt zuverlässig; denn das Herstellungsverfahren der uranhaltigen Pastille gab keine absolute Sicherheit dafür, daß die darin tatsächlich enthaltene Menge an Uran-235 genau mit dem vorgesehenen Nennwert übereinstimmte. Für den Neutronendetektor wurde deshalb eine zweite Eichung mittels einer Bestrahlung im BR2 durchgeführt, bei der das angezeigte Signal mit dem durch Kobaltaktivierung gemessenen Neutronenfluß verglichen wurde. Die Ergebnisse beider Eichungen unterschieden sich um nur 3%.

5. Meßergebnisse

Seit September 1962 wird der Reaktor BR2 mit der halben Nennleistung betrieben. Wie in der Einleitung erläutert, entspricht dies einer thermischen Reaktorleistung, die an der heißesten Stelle der Brennelemente durch deren Oberfläche einen Wärmefluß von 200 W/cm^2 erzeugt. Die diesem Wert entsprechende Reaktorleistung ist somit keine Konstante, sondern sie ergibt sich aus der jeweiligen Beladungsanordnung mit Brennelementen und Experimenten. Die zu Beginn einer neuen Beladung auf diese Weise vorgegebene Reaktorleistung wird dann anschließend über die Anzeige einer Stickstoff-16-Ionisationskammer, die in das aus dem Reaktor austretende Kühlwasser eintaucht, konstant gehalten. Stickstoff-16 hat eine Halbwertszeit von 7,4 sec und entsteht durch eine (n, p) -Reaktion der schnellen Neutronen mit dem Sauerstoff des Kühlwassers. Es läßt sich zeigen, daß die Menge des gebildeten Stickstoff-16 in erster Näherung der Gesamtzahl der Spaltungen je Zeiteinheit und damit der thermischen Reaktorleistung proportional ist.

Während eines derartigen Reaktorbetriebes wandern die Regelstäbe als Folge des Abbrandes täglich um 1 bis 2 cm nach oben aus dem Reaktorkern hinaus. Diese Aufwärtsbewegung zieht eine entsprechende Änderung in der räumlichen Verteilung des Reaktorstrahlenfeldes nach sich. Jeweils nach 1 bis 2 Wochen wird der Reaktor abgeschaltet, um die entstandenen Abbrandverluste durch Vertauschen oder Ersetzen von Brennelementen auszugleichen, bzw., um neue Experimente in den Reaktorkern einzubauen. Jeder solche Eingriff in die Beladungsanordnung bewirkt ebenfalls eine Veränderung von Intensität und räumlicher Verteilung des gemischten Strahlenfeldes.

Bisher war die Sonde im allgemeinen in einem der heißesten und mit einem Brennelement beladenen Kanäle eingebaut. Messungen wurden im Abstand von einigen Tagen, insbesondere aber nach Beginn, gegen Mitte und Ende einer Betriebsperiode durchgeführt. Irgendeine Beeinträchtigung des Reaktorbetriebes trat durch die Ausführung der Messungen nicht auf. Es genügte, den Reaktoroperator vor Beginn der Messung zu unterrichten, damit dieser gegebenenfalls geringfügige Reaktivitätsänderungen, hervorgerufen durch die Bewegung der Sonde, mit Hilfe eines Regelstabes ausgleichen konnte. Bei Vorschubgeschwindigkeiten des Neutronendetektors bis 2 mm/sec war eine kontinuierliche Registrierung der räumlichen Verteilung des thermischen Neutronenflusses möglich. Jedoch mußte zur Registrierung des γ -Detektorsignals wegen dessen größerer Trägheit der Vorschub jeweils bis zu 30 sec unterbrochen werden.

Als Beispiel zeigt die Abb. 3 eine mit der Kalorimetersonde gemessene Verteilung des thermischen Neutronenflusses und der Dosisleistung in Aluminium (zu mehr als 95% durch γ -Strahlen verursacht). Die Kurven 1, 2 und 3 zeigen Messungen, die nach Beginn, gegen Mitte und Ende einer Betriebsperiode mit halber Nennleistung (ungefähr 18 MW) gemacht wurden. Bei Messung 1 ist das Maximum des thermischen Neutronenflusses infolge der noch tief eingefahrenen Regelstäbe etwa 125 mm unter der Mittelebene des Reaktorkernes anzutreffen. Gegen Ende der Periode (Messung 3) haben die Regelstäbe eine höhere Stellung eingenommen, und dementsprechend ist die Lage des

Flußmaximums bis dicht unter die Mittelebene gerückt. Bei diesen drei aufeinanderfolgenden Messungen wuchs der längs des Kanals über die räumliche Ausdehnung des Urans gemittelte Neutronenfluß von 1,67 über 1,76 auf $1,80 \cdot 10^{14}$ n/cm² s an. Da, wie beschrieben, die Reaktorleistung während der Betriebsperiode konstantgehalten wurde, spiegelt sich in der Zunahme des mittleren Flusses die Verarmung der Reaktorbeladung an Uran-235 durch Abbrand wider. Ähnlich dem Neutronenfluß, rückt auch der Ort maximaler Dosisleistung in Aluminium im Laufe einer Betriebsperiode nach oben. Bei Messung 3 war das Maximum der Dosisleistung sogar oberhalb der Mittelebene anzutreffen.

Die Abb. 4 zeigt das aus den Messungen der Abb. 3 berechnete Verhältnis von Dosisleistung in Aluminium zum thermischen Neutronenfluß. Der Abfall dieses Verhältnisses ober- und unterhalb des urangefüllten Reaktorkernes ist sehr ausgeprägt. Der Anstieg des Verhältnisses in der oberen Hälfte des Reaktorkernes ist zum Teil durch das dort in geringem Maße abgebrannte Uran, zum andern aber durch die Anwesenheit der mehr oder weniger eingefahrenen, Kadmium tragenden Regelstäbe bedingt. Der starke Anstieg des Verhältnisses am rechten Ende der Abbildung ist durch die Regelstäbe verursacht.

6. Abschließende Bemerkungen

Die hier beschriebene Kalorimetersonde ist seit August 1962 im Reaktor BR2 eingebaut und wurde regelmäßig zu Messungen benutzt. Ihr mechanisches und meßtechnisches Betriebsverhalten war bisher einwandfrei und entsprach in jeder Weise den Erwartungen. Die Meßwerte waren gut reproduzierbar. Soweit Vergleiche möglich waren, stimmten die mit dem Neutronenkalorimeter gemessenen Flußverteilungen mit den durch Kobaltaktivierung erhaltenen Meßergebnissen überraschend gut überein. Was die Absolutbeträge der Meßwerte angeht, so muß beim γ -Detektor wegen dessen indirekter und komplizierter Eichung mit einem gewissen Fehler gerechnet werden. Wir schätzen diesen Fehler auf nicht größer als 7%. Bis zu einem integrierten Fluß von 10^{20} n/cm² dürfte weder eine nennenswerte Verminderung der Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums der Kalorimeterstäbchen noch eine merkliche Änderung in der Empfindlichkeit der darin eingebauten Thermolemente eintreten. Im Verlaufe einer normalen Meßserie wird der γ -Detektor zur Zeit einem integrierten Neutronenfluß von jeweils maximal 10^{17} n/cm² ausgesetzt. Damit dürfte dieser Detektor für einen genügend langen Zeitraum eine ausreichend konstante Empfindlichkeit besitzen.

Beim Neutronendetektor liegen die Verhältnisse ein wenig anders, da ein gewisser, unvermeidlicher Abbrand des in ihm enthaltenen Uran-235 auftritt. In bestimmten Zeitabständen müßte seine Anzeige mit

den durch Kobaltaktivierung gefundenen Neutronenflußwerten überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden. Durch eine solche Nacheichung ist die Genauigkeit der Anzeige des Neutronendetektors durch diejenige der Flußmessungen durch Kobaltaktivierung vorgegeben.

Die in der Sonde enthaltenen Absorber aus Uran-235 und Aluminium erlauben den thermischen Neutronenfluß und die im wesentlichen durch γ -Strahlen verursachte Aufheizung in Aluminium zu messen. Die bisher durchgeführten Messungen zeigen, daß, extrapoliert auf die volle Nennleistung des BR2, die Aufheizung von Aluminium in den heißesten Brenn-

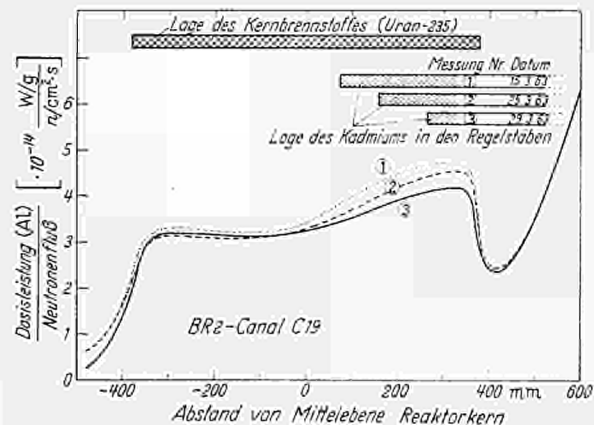


Abb. 4. Verhältnis von Dosisleistung in Aluminium zu Neutronenfluß längs eines mit einem Brennelement beladenen Kanals (s. Abb. 3)

elementkanälen Werte zwischen 16 und 20 W je Gramm erreicht. Diesem Wert entspricht eine Dosisleistung von $5,7$ bis $7,2 \cdot 10^9$ rad je Stunde.

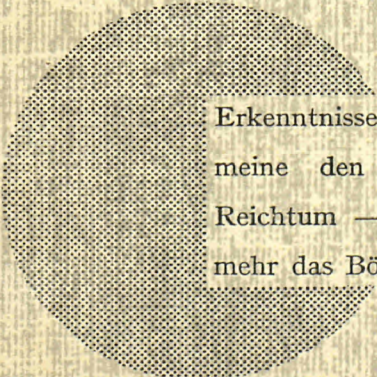
Es besteht die Absicht, weitere Exemplare dieser Sonde herzustellen, in der gleichen Ausführung, aber teilweise andere Absorber als Uran-235 und Aluminium enthaltend, z.B. Graphit und Beryllium. Die mit diesen moderierenden Absorbieren gefundenen Meßwerte würden durch Vergleich mit den nichtabsorbierenden Absorbieren die zur Zeit noch nicht gemessene Materialaufheizung durch schnelle Neutronen zu ermitteln gestatten.

Der Verfasser möchte Herrn F. MORTE für die wirksame Förderung und den Kollegen der Abteilung Physique des Réacteurs des CEN in Mol für die unermüdliche Mitarbeit bei der Entwicklung der Kalorimetersonde danken.

Literatur: [1] WERZ, R.: Mesure des champs de rayonnement dans le BR2 par sonde calorimétrique. Société Européenne d'Énergie Atomique; Colloque sur l'exploitation des piles à eau, Mol, November 1962. Dokument CEN-R. 2185. — [2] ANDERSON, A. R., and J. K. LINACRE: Calorimetric Measurement of Energy absorbed from Reactor Radiation. IAEA; Selected Topics in Radiation Dosimetry, S. 609, Wien 1961.

Adresse: Dr. RUDOLF WERZ,
CEN Cadarache DRP/SECNR, B.P. Nr. 1
Saint-Paul-lez-Durance/Frankreich





Erkenntnisse verbreiten ist soviel wie Wohlstand verbreiten — ich meine den allgemeinen Wohlstand, nicht den individuellen Reichtum — denn mit dem Wohlstand verschwindet mehr und mehr das Böse, das uns aus dunkler Zeit vererbt ist.

Alfred Nobel

CDNA00363DEC