

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

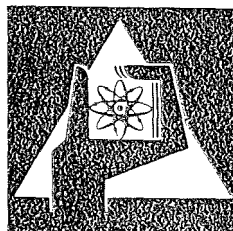
August 1976

KFK 2333

Abteilung Behandlung radioaktiver Abfälle
Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung

Energiespeicherung in Borosilikatgläsern

K. Scheffler, U. Riege, W. Hild



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KFK - 2333

PWA - 52/76

Abteilung Behandlung radioaktiver Abfälle

Projekt Wiederaufarbeitung

und Abfallbehandlung

Energiespeicherung in Borosilikatgläsern

K. Scheffler

U. Riege

W. Hild

Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe

Zusammenfassung

Der Einfluß von α - und β/γ -Strahlern auf die Energiespeicherung in Borosilikatgläsern während der Endlagerung wird diskutiert. In Zeitrafferexperimenten mit Borosilikatgläsern der typischen Zusammensetzung hochaktiver Gläser, die mit 2,6 Ci Cm-242/g Glas gespiked sind, werden die Langzeiteffekte simuliert. Die gespeicherten Energien werden als Funktion der Dosis bis zu einer akkumulierten Dosis entsprechend 2×10^{18} α -Zerfällen/g Glas gemessen, wo der Sättigungsbereich erreicht ist. Die Methode zur Messung gespeicherter Energien in einer DTA-Apparatur wird im Detail beschrieben.

Abstract

Energy Storage in Borosilicate Glasses

The effect of α - and β/γ -radiation on energy storage in borosilicate glasses during final storage is discussed. In time lapse experiments with borosilicate glasses of typical HLW-glass compositions spiked with 2.6 Ci Cm-242/g glass the long-range effects are simulated. The stored energies are measured as a function of dose up to a total integrated dose equivalent to 2×10^{18} α -desintegrations/g glass, the range where saturation is reached. The method for measurement of stored energies in a DTA-apparatus is described in detail.

Résumé

Energie emmagasinée dans des verres borosilicate.

Les effets des émetteurs α et β/γ sur l'énergie emmagasinée dans des verres borosilicate pendant le stockage final sont discutés. Dans des expériences accélérées avec des verres borosilicate de compositions typiques pour verres de hautes activités, fondus avec 2,6 Ci Cm-242/g verre, les influences de longues périodes de temps sont simulées. Les énergies emmagasinées sont déterminées en fonction de la dose à une dose correspondant

à 2×10^{18} α 's/g verre, représentant la région de saturation.
La méthode à mesurer les énergies emmagasinées dans un
appareillage DTA est décrite en détail.

Inhaltsverzeichnis

Seite

1.	Einleitung und Problemstellung	1
2.	Experimentelles	5
3.	Ergebnisse und Diskussion	8
	Tabellen	9
	Abbildungen	13
	Literatur	16

1. Einleitung und Problemstellung

Obwohl schon länger bekannt, gewann das Phänomen der Energiespeicherung in Festkörpern erst durch die Untersuchungen von E.P. Wigner {1} an besonderem Interesse. Der auch unter der Bezeichnung "Wigner-Energie" in bestrahltem Reaktorgraphit sehr ausgeprägte Effekt, und die Möglichkeit einer spontanen Freisetzung dieser gespeicherten Energie, haben bei den Erbauern und Betreibern von Graphit-moderierten Reaktoren zu intensiven Diskussionen über die mit diesem Phänomen zusammenhängenden Sicherheitsfragen geführt. Schließlich wurde in den letzten Jahren auch im Bereich der Verfestigung hochaktiver Abfälle das Problem der Energiespeicherung und eventuell möglicher Konsequenzen diskutiert. Es stellt sich hier nämlich die Frage, welche Energiebeträge in den heute diskutierten radioaktiven Endprodukten während der Lagerung gespeichert werden können und welche Folgen eine spontane oder schrittweise Freisetzung dieser Energien haben könnte. Seit den Messungen durch Wigner {1} sind eine Vielzahl von in der Natur vorkommenden Mineralien, die bei Uran- oder Thorium-Lagerstätten gefunden wurden, auf die in ihnen durch Kernspaltung gespeicherte Energie untersucht worden. Durch künstliche Bestrahlung von Mineralien, Metalloxiden und Gläsern wurden weitere experimentelle Ergebnisse gewonnen. Darüberhinaus haben verschiedene Autoren eine theoretische Beschreibung des Effektes versucht. Da die Literatur sehr umfangreich ist, sei an dieser Stelle nur auf die zusammenfassenden Arbeiten von F.P. Roberts et al. {2}, M. Laser und E. Merz {3}, G.H. Jenks {4,5} und A. Roux {6} verwiesen.

Alle bisher bekannt gewordenen Werte für gespeicherte Energien liegen mit Ausnahme von hochbestrahltem Graphit (ca. 600 cal/g) zwischen einigen cal/g und 200 cal/g. Sowohl für natürlich als auch für künstlich bestrahlte Stoffe kann jedoch in den wenigsten Fällen als gesichert angesehen werden, daß die gemessenen Werte mit den tatsächlich erreichbaren Sättigungswerten für die gespeicherte Energie identisch sind. Außerdem ist die Höhe der

gespeicherten Energie in starkem Maße von folgenden Einflußgrößen abhängig:

- chemische Zusammensetzung des Festkörpers
- kristallographische Eigenschaften des Festkörpers
- physikalische und kernphysikalische Eigenschaften des Festkörpers
- Bestrahlungstemperatur
- Bestrahlungsart
- Strahlendosis

Für verschiedene Festkörper oder unterschiedlich bestrahlte Stoffe sind daher quantitative Vergleiche oder Extrapolationen von Meßwerten fragwürdig, wenn nicht unzulässig.

Für die Verfestigung hochradioaktiver Abfallösungen werden heute allgemein Borosilikatgläser als geeignete Matrix angesehen. Die Bestrahlungsdosis während der langen Endlagerzeiträume, ist in diesen hochaktiven Gläsern sowohl durch die inkorporierten β/γ -Strahler (Spaltprodukte) als auch α -Strahler (Aktiniden) extrem hoch (7), sodaß mit Energiespeicherung zu rechnen ist. Eine theoretische Betrachtung und die Messung des Effektes durch entsprechend angelegte Zeitrafferexperimente ist daher als Beitrag zur Beurteilung der Sicherheit der Endlagerung dieser hochaktiven Abfallgläser unerläßlich.

Für die bei der Bestrahlung von Festkörpern hervorgerufenen Effekte können cum grano salis zwei Mechanismen verantwortlich gemacht werden: Zum einen Elektronenaustauschvorgänge an bereits vorhandenen atomaren Fehlstellen; zum Beispiel erfolgt durch γ -Bestrahlung von Steinsalz Elektroneneinfang an Anionfehlstellen der in der Blaufärbung sichtbar wird. Zum anderen werden durch Zusammenstoß mit schweren Teilchen ($\beta, \alpha, n, \text{Rückstoßkerne}$) weitere neue atomare Fehlstellen erzeugt. Der letztere Effekt der den wesentlichsten Beitrag zur Energiespeicherung liefert ist stark temperaturabhängig: So werden bei tiefen Temperaturen die Fehlstellen gewissermaßen eingefroren, mit zunehmender Temperatur nimmt durch Rekombination die Fehlstellendichte wieder ab. Bei

genügend hohen Temperaturen erfolgt vollständige Ausheilung, begleitet von exothermer Freisetzung der gespeicherten Energie. Aus einfach aufgebauten kristallinen Körpern wird dabei die gespeicherte Energie mit steigender Temperatur diskontinuierlich in diskreten exothermen Peaks freigesetzt. Ansonsten wird eine mehr oder weniger kontinuierliche Energiefreisetzung mit zunehmender Temperatur beobachtet. Dieser Fall trifft auch für alle glasartigen Stoffe zu.

Da bereits bei tiefen Temperaturen eine gewisse Ausheilung der erzeugten Fehlstellen stattfindet, deren Ausheilungsrate sicher der Anzahl der Fehlstellen proportional ist, wird verständlich, daß mit zunehmender Bestrahlungsdosis die erzeugte Anzahl von Fehlstellen abnimmt und insgesamt einem Sättigungswert zustrebt. Daraus darf auch gefolgert werden, daß die im künstlichen Bestrahlungsexperiment über kurze Zeit applizierte Dosis möglicherweise größere Effekte liefert, als dies bei Einwirkung über die tatsächlichen Zeiträume von tausenden von Jahren der Fall ist. Näherungsrechnungen kommen zu dem Ergebnis, daß in Gläsern die erreichbaren Sättigungsenergien 200 cal/g Glas {3,5} nicht übersteigen sollten, allerdings werden auch höhere Werte nicht vollständig ausgeschlossen {5}.

Für hochaktive Gläser wird nachstehend der relative Beitrag der einzelnen Bestrahlungseffekte zur Energiespeicherung abgeschätzt. Hierzu werden die von G.H. Jenks {5} berechneten spezifischen Fehlstellen pro Elementarereignis eingesetzt:

- 150 atomare Fehlstellen/6 MeV- α -Teilchen
- 2000 atomare Fehlstellen/ α -Rückstoßkern (Atomgewicht 240, Energie der α -Strahlung 6 MeV)
- < 2 atomare Fehlstellen/ β -Teilchen (sehr konservative Annahmen, Energie: 1,5 MeV)

Die Anteile aus γ -Strahlung, Neutronen aus (α, n)-Reaktionen und Spontanspaltung sind in hochaktiven Gläsern vernachlässigbar.

Für die Glaszusammensetzung bzw.-aktivität gelten folgende Randbedingungen:

- 70 t Glas/t LWR-Brennstoff (Abbrand: 33.000 MWd/t)
- 1 Jahr Kühlzeit des Brennstoffs bis zur Wiederaufarbeitung
- 5 Jahre Lagerung der hochaktiven Abfalllösung bis zur Verglasung

Damit ergibt sich für die Aktivität des Glases direkt nach der Herstellung:

β -Aktivität: 10.000 Ci/l Glas
 α -Aktivität: 50 Ci/l Glas

Nach einer Lagerung der hochaktiven Gläser über einen Zeitraum von 10.000 Jahren ergibt sich folgende Statistik:

$2,2 \times 10^{18}$ α -Zerfälle/g Glas
 x 150 Fehlstellen/ α -Teilchen $\rightarrow 3,3 \times 10^{20}$ Fehlstellen/g Glas
 x 2000 Fehlstellen/ α -Rückstoßkern $\rightarrow 44 \times 10^{20}$ Fehlstellen/g Glas
 1×10^{20} β -Zerfälle/g Glas
 x < 2 Fehlstellen/ β -Teilchen $\rightarrow < 2 \times 10^{20}$ Fehlstellen/g Glas

Innerhalb der ersten 50 Jahre Lagerung werden die Gläser durch die Zerfallswärme der kurzlebigen Spaltprodukte auf relativ hohe Temperaturen von einigen 100°C erwärmt. Im Realfall tragen daher die β -Zerfälle noch erheblich weniger zu Energiepseicherung bei, als die theoretisch berechneten Effekte. Unter Berücksichtigung dieser Verhältnisse zeigt die Abschätzung, daß die Speicherung von Energie in hochaktiven Gläsern fast ausschließlich durch den Zerfall der langlebigen Aktiniden verursacht wird.

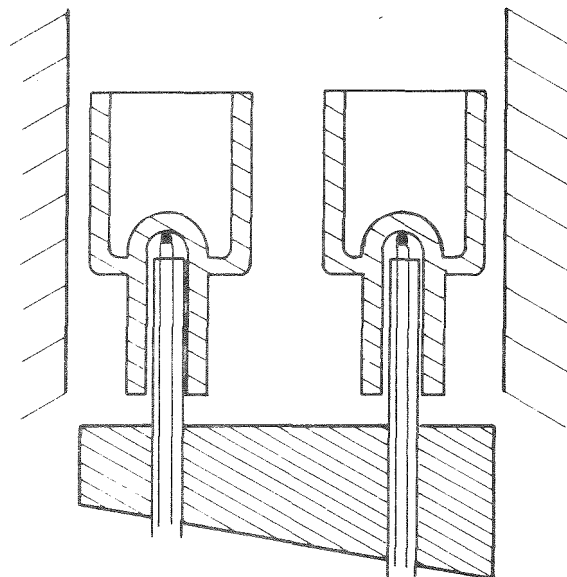
Daher wurde der im Kernforschungszentrum Karlsruhe für die Verfestigung hochaktiver Abfallösungen entwickelte Borosilikatglas-typ VG 98 (9) auf seine Eigenschaften im Hinblick auf Speicherung von Energie als Folge von α -Zerfall in Zeitrafferexperimenten näher untersucht.

2. Experimentelles

Über Herstellung und einige Eigenschaften der für das Zeitrafferexperiment im Januar 1975 erschmolzenen Gläser wurde bereits berichtet {7}. Die chemische Zusammensetzung der 3 Gläser ohne und mit inaktiv simulierten Spaltprodukttoxiden sowie Gadoliniumoxid ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Alle Glasproben wurden jeweils mit einer spezifischen α -Aktivität von 2,493 Ci Cm-242/g Glas und 0,138 Ci Am-241/g Glas hergestellt und bei etwa 23°C gelagert. Die kumulierte Zahl der α -Zerfälle pro g Glas erreichte Ende Juli 1976 einen Wert von rund 2×10^{18} . An mehreren Glasproben wurde als Funktion der akkumulierten α -Zerfälle (akkumulierte Dosis) die Energiespeicherung gemessen.

Als Meßmethode wurde die differentielle Thermoanalyse (DTA) gewählt; als Meßapparatur diente ein Differential-Thermo-Analyse-Gerät 404 der Fa. Netsch-Gerätebau GmbH/Selb mit Meßkopf für Dynamische Differential Kalorimetrie (DDK). Bei dem nachstehend abgebildeten Meßkopf befinden sich die Thermoperlen getrennt von den Substanzen in Bohrungen der Meßbecher. Es wurden Al_2O_3 -Becher von ca. 1 g Eigengewicht und mit $0,25 \text{ cm}^3$ Inhalt verwendet. Die Einwaage an Substanz betrug jeweils 100 mg.



DDK-Meßkopf

Für den Erfolg der Messungen und eine gute Reproduzierbarkeit der Meßwerte müssen eine Reihe von Randbedingungen erfüllt sein, um den flachen, über einen weiten Temperaturbereich verschmierten "Peak" (Abb. 1) erfassen zu können, der sich durch die Freisetzung der gespeicherten Energie ergibt:

1. Exakte Kalibrierung des DDK-Meßkopfes auf geradlinigen Verlauf der Nulllinie.
2. Verwendung von Meßbechern, die praktisch gleiches Gewicht und gleiche Innenabmessungen haben.
3. Meßprobe und Vergleichsprobe müssen gleiches Gewicht, gleiche Geometrie und gleiche Wärmeleitfähigkeit haben. Durch Herstellen eingeschmolzener Proben werden die geometrischen Bedingungen nicht immer hinreichend erfüllt. Daher wurde bei den Messungen Glasgranulat mit 0,5 - 1,5 mm Korngröße verwendet.

Mit Glasgranulat läuft eine Bestimmung beispielsweise folgendermaßen ab: In einen Meßbecher werden 100 mg Cm/Am-Glas-Granulat, in den anderen 100 mg Granulat des gleichen Glases ohne Cm/Am eingewogen. Der Meßkopf wird in den Ofen eingeführt; das Aufheizen des Ofens erfolgt erst, nachdem sich ein Gleichgewicht zwischen den Temperaturen beider Meßbecher, erkennbar am Gang des Schreibers, eingestellt hat. Die aktive Probe hat wegen der Zerfallswärme eine höhere Temperatur als die inaktive Probe! Die Aufheizgeschwindigkeit hat in gewissen Grenzen keinen Einfluß auf die Gesamt-Bestimmung der gespeicherten Energie; zu langsame Aufheizgeschwindigkeiten bergen jedoch die Gefahr in sich, daß Einwirkungen von außen das Meßergebnis beeinflussen. Bei 1°C/min werden beispielsweise 7 h zum Schreiben des Temperaturbereiches, bei dem die Energiefreisetzung beobachtet wird, benötigt. Die Messungen wurden daher mit einer Aufheizgeschwindigkeit von 10°C/min durchgeführt.

Um eine genaue Nulllinie für die Messung der Energiespeicherung zu erhalten wäre es ideal, die Proben abzukühlen und ein zweites Mal zu messen. Da jedoch oberhalb 500°C das Glasgranulat bereits

zu verbacken beginnt und sich damit die geometrischen Gegebenheiten verändern ist es zweckmäßiger, die 2. Messung (Nulllinie) mit frischem inaktiven Glasgranulat unter sonst gleichen Bedingungen durchzuführen.

Zur Auswertung der DTA-Diagramme (Abb. 1) wurde über den gesamten Temperaturbereich des "Peaks" eine Eichung in Kalorien pro Flächeneinheit durchgeführt. In Tabelle 2 sind die hierfür verwendeten Eichsubstanzen zusammengestellt. Abb. 2 zeigt die grafische Darstellung der Eichkurve, die als Ausgleichs-Binomialfunktion rechnerisch wie folgt ermittelt wurde:

$$f(x) = 0,4908 - 5,656 \cdot 10^{-4} x + 1,9965 \cdot 10^{-6} x^2 + 1,931 \cdot 10^{-9} x^3$$

Mit Hilfe dieser Funktion wurden die "Peak"-Flächen der DTA-Diagramme durch graphische Integration ausgewertet.

Die größte Abweichung der Einzelwerte vom Mittelwert betrug bei Wiederholungsmessungen weniger als ± 5%.

3. Ergebnis und Diskussion

Die Freisetzung der in den untersuchten Gläsern gespeicherten Energien erfolgt über einen weiten Temperaturbereich: Er beginnt zwischen 70 - 100°C und endet wenig oberhalb von 600°C (Abb. 1). In Tabelle 4 sind die Energiefreisetzungsraten in cal/g°C als Funktion der Temperatur aufgeführt. Das Maximum liegt zwischen 400°C und 550°C. Dieser Verlauf der Energieabgabe stimmt mit Messungen überein, die bei ähnlichen Experimenten an $^{244}\text{CmO}_2$ - haltigen Gläsern (2) und $^{238}\text{PuO}_2$ -haltigen Gläsern (8) durchgeführt wurden.

Die insgesamt gespeicherten Energiebeträge sind in Tabelle 3 zusammengefaßt und in Abb. 3 graphisch dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die Energie-Sättigungswerte bereits weitgehend bei einer akkumulierten Dosis auftreten, die 10^{18} α -Zerfällen/g Glas entspricht und mit Sicherheit bei 2×10^{18} α -Zerfällen/g Glas erreicht sind. Den höchsten Sättigungswert mit rund 95 cal/g Glas erreicht das Glas, das neben den Spaltprodukttoxiden auch Gadoliniumoxid enthält. Seine gespeicherte Energie wird im Temperaturbereich bis zu 650°C (Tabelle 4) wieder vollständig abgegeben.

Bis zum Erreichen von 10^{18} bzw. 2×10^{18} α -Zerfällen/g Glas beträgt die Endlagerzeit 600 bzw. 7000 Jahre (7). Spaltprodukte und kurzlebige Aktiniden sind in diesen Zeiträumen praktisch vollständig abgeklungen, so daß als Folge ihrer Zerfallswärmeentwicklung nur mehr ein vernachlässigbarer Temperaturgradient zwischen Glas und Endlagerformation besteht. Daher würde auch eine spontane Freisetzung der gespeicherten Energie (konservativste Annahme) nur zu einer Temperaturerhöhung um maximal 270°C führen (für 95 cal/g Glas und spezifische Wärme der Gläser bei 400°C: 0,35 cal/g°C).

Somit stellt die Energiespeicherung in den untersuchten Gläsern auch bei sehr restriktiven Annahmen kein potentiell Risiko im Hinblick auf die Sicherheit der Endlagerung dar.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der für die Messung der Energiespeicherung gewählten Borosilikatgläser

Komponenten	<u>Glas 1</u>	<u>Glas 2</u>	<u>Glas 3</u>
	Grundglas 98 [Gew.o/o]	Spaltprodukt- glas 98 [Gew.o/o]	Spaltprodukt- Gd ₂ O ₃ -Glas 98 [Gew.o/o]
SiO ₂	48,0	38,7	33,7
TiO ₂	4,0	3,2	2,9
Al ₂ O ₃	1,3	1,0	0,9
B ₂ O ₃	12,9	10,4	9,1
CaO	2,7	2,1	1,9
Na ₂ O	26,2	23,1	20,5
Spaltproduktoxide*		14,6	14,6
Korrosionsprodukte:			
Fe ₂ O ₃		1,4	1,4
C+ ₂ O ₃		0,4	0,4
NiO		0,2	0,2
Neutronengift:			
Gd ₂ O ₃			9,5
AmO ₂ /CmO ₂	4,9	4,9	4,9
Summe:	100,0	100,0	100,0

* Zusammensetzung entsprechend einem Abbrand von 33.000 MWd/t LWR-Brennstoff [7]; verwendet wurden jeweils die inaktiven Isotope

Tabelle 2: Eichsubstanzen für die quantitative Auswertung von DTA-Diagrammen

Substanz	Art der Umwandlung	Umwandlungs- temperatur [°C]	Umwandlungs- wärme [°C]
KNO ₃	fest-fest	127,7 ⁽¹⁾⁽³⁾ 127,9 ⁽⁴⁾	12,1 ⁽³⁾⁽⁴⁾
	fest-flüssig	334,3 ⁽⁴⁾ 338 ⁽²⁾ 337 ⁽³⁾	22,7 ⁽³⁾⁽⁴⁾
Sn	fest-flüssig	231,9 ⁽¹⁾⁽³⁾ 231,7 ⁽²⁾	14,3 ⁽³⁾⁽⁴⁾ 14,4 ⁽²⁾
Te	fest-flüssig	449,5 ⁽³⁾ 449,8 ⁽⁵⁾	32,8 ⁽³⁾ 32,9 ⁽⁵⁾
Pb	fest-flüssig	327,4 ⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾	5,5 ⁽³⁾⁽⁴⁾ 5,74 ⁽⁵⁾
Ag ₂ SO ₄	fest-fest	412 ⁽⁴⁾ 424 ⁽¹⁾	-
	fest-flüssig	657 ⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁶⁾	13,7 ⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁶⁾
K ₂ SO ₄	fest-fest	583 ⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾	11,1 ⁽³⁾⁽⁴⁾

- Literatur:
- (1) National Bureau of Standards (U.S.), Circ. 500 (1952)
 - (2) Handbook of Chemistry and Physics, 53rd edition (1972/73)
 - (3) D'Ans-Lax, Taschenbuch für Chemiker und Physiker, B. 1, 3. Auflage (1967)
 - (4) Lendolt-Börnstein, 6. Aufl., II. Band, 4. Teil (1961)
 - (5) C.J. Smithells, Metals Reference Book, 3rd edition, Vol. 2 (1962)
 - (6) Gmelins Handbuch der Anorganischen Chemie, Silber, Teil B 3, 8. Aufl. (1973)

Tabelle 3: Meßergebnisse für die in Borosilikatgläsern gespeicherte Energie in Abhängigkeit von der Zahl der α -Zerfälle bzw. der α -Energiedosis

Glas Nr.	α -Zerfälle pro g Glas	Dosis [rad]	Lagerzeit von HAW-Glas* [a]	gespeicherte Energie [cal/g Glas]
1	$2,0 \times 10^{17}$	$1,95 \times 10^{10}$	22	22,8
1	$16,8 \times 10^{17}$	$1,63 \times 10^{11}$	3000	67,5
1	$19,3 \times 10^{17}$	$1,88 \times 10^{11}$	6000	60,6
2	$2,0 \times 10^{17}$	$1,95 \times 10^{10}$	22	41,0
2	$16,8 \times 10^{17}$	$1,63 \times 10^{11}$	3000	80,3
2	$19,3 \times 10^{17}$	$1,88 \times 10^{11}$	6000	85,8
3	$1,0 \times 10^{17}$	$0,98 \times 10^{10}$	9	25,4
3	$2,0 \times 10^{17}$	$1,95 \times 10^{10}$	22	71,4
3	$16,8 \times 10^{17}$	$1,63 \times 10^{11}$	3000	94,1
3	$19,3 \times 10^{17}$	$1,88 \times 10^{11}$	6000	95,0

* Herstellungsbedingungen für HAW-Glas:

70 l Glas pro t LWR-Brennstoff

33.000 MWd/t Abbrand

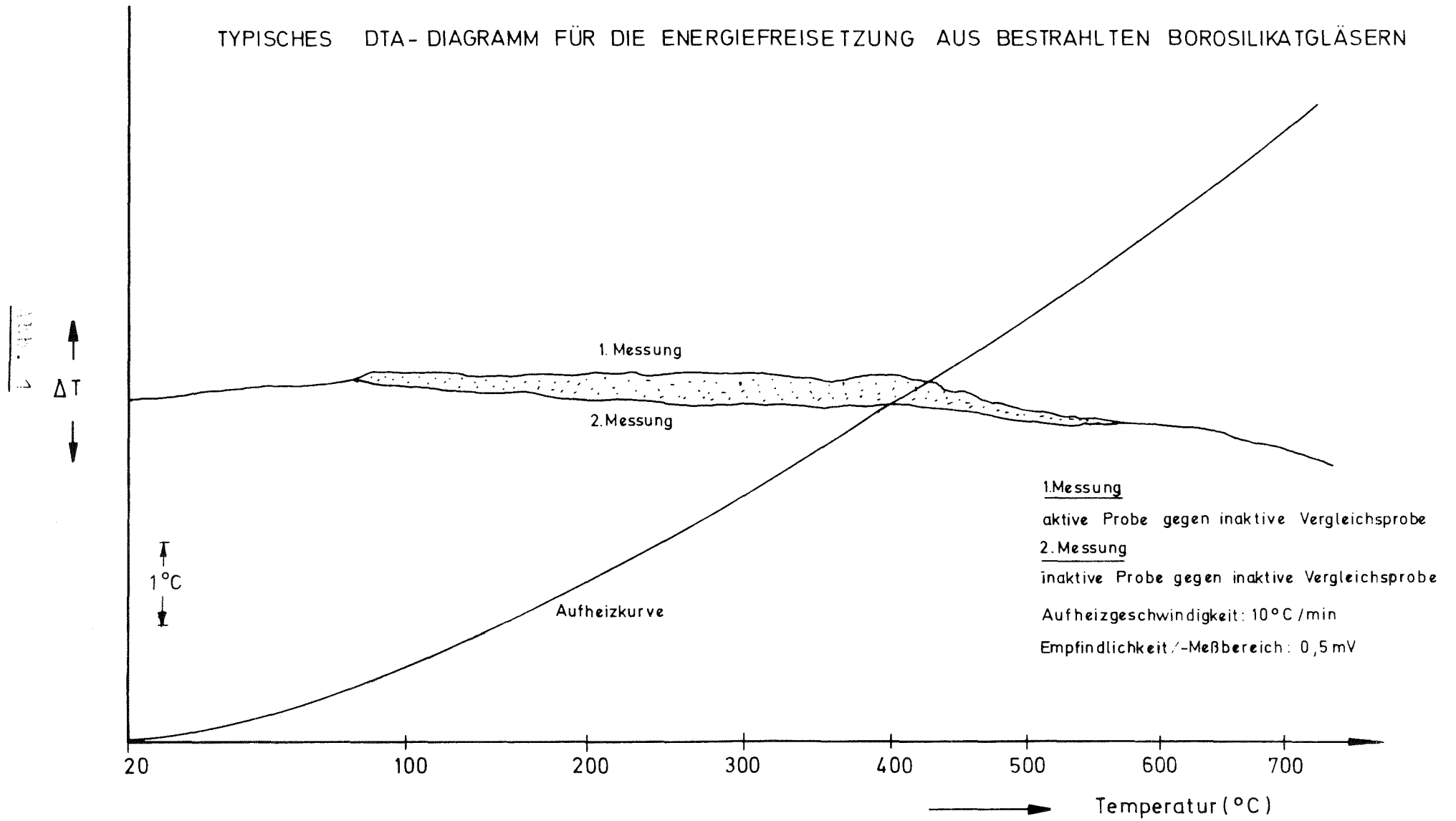
1 Jahr Kühlzeit bis zur Wiederaufarbeitung

5 Jahre Lagerung des 1 WW bis zur Verglasung

Tab. 4 : Freisetzung der gespeicherten Energie als Funktion der Temperatur bei einer Aufheizgeschwindigkeit von $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ($1,68 \cdot 10^{18}$ α -Zerfälle/g Glas)

Temperaturbereich ($^{\circ}\text{C}$)	mittlere Energiefreisetzungsraten ($\text{cal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$)		
	Glas 1	Glas 2	Glas 3
70 - 200	0,052	0,052	0,088
200 - 300	0,088	0,129	0,166
300 - 350	0,103	0,168	0,186
350 - 400	0,124	0,172	0,194
400 - 450	<u>0,202</u>	<u>0,198</u>	<u>0,24</u>
450 - 500	<u><u>0,267</u></u>	<u><u>0,240</u></u>	<u><u>0,296</u></u>
500 - 550	<u>0,197</u>	<u>0,240</u>	<u>0,248</u>
550 - 600	0,115	0,146	0,124
600 - 650	0,029	0,042	0,030

TYPISCHES DTA-DIAGRAMM FÜR DIE ENERGIEFREISETZUNG AUS BESTRAHLTEN BOROSILIKATGLÄSERN



EICHKURVE für das WÄRME / FLÄCHEN-ÄQUIVALENT
VON DTA-DIAGRAMMEN

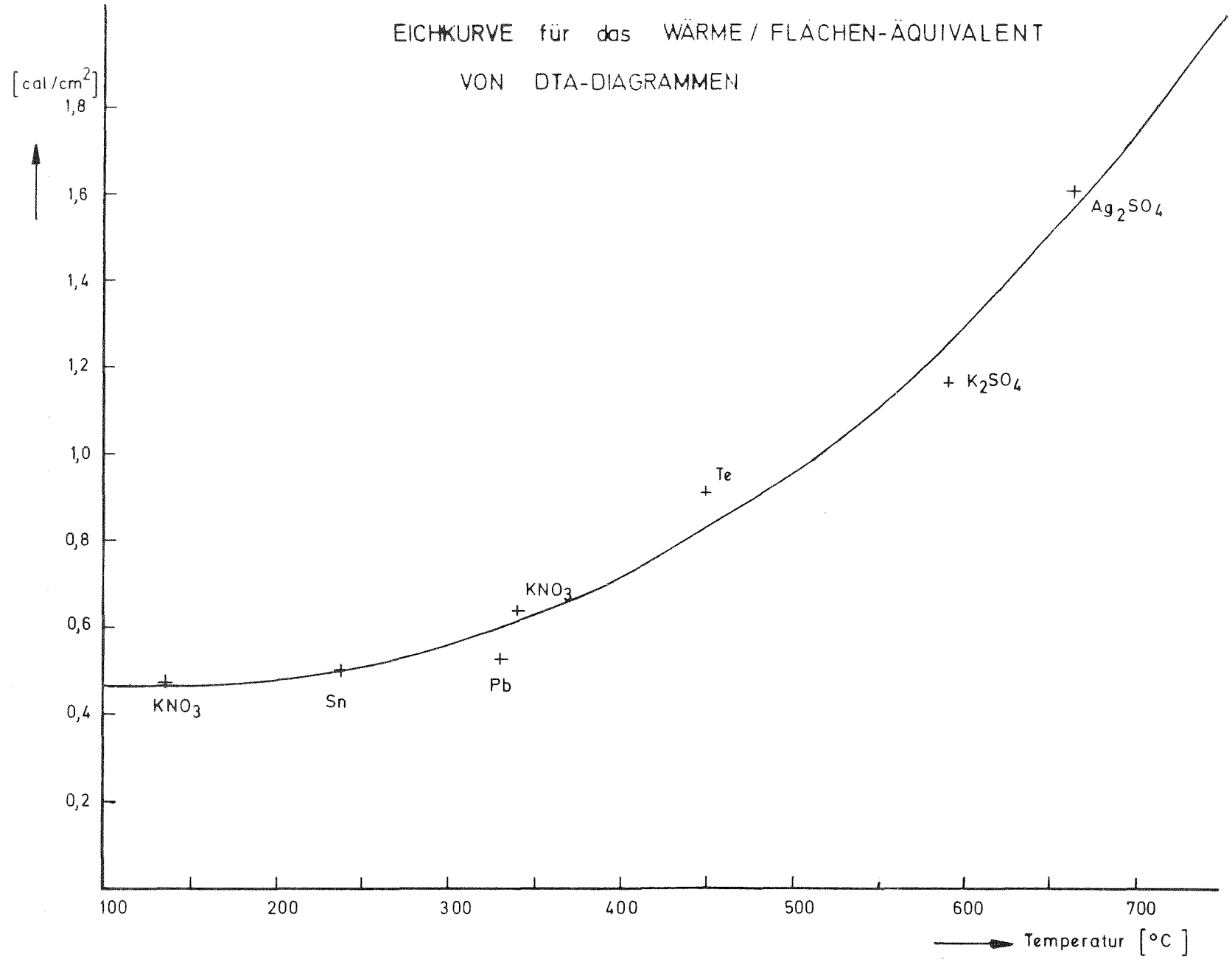
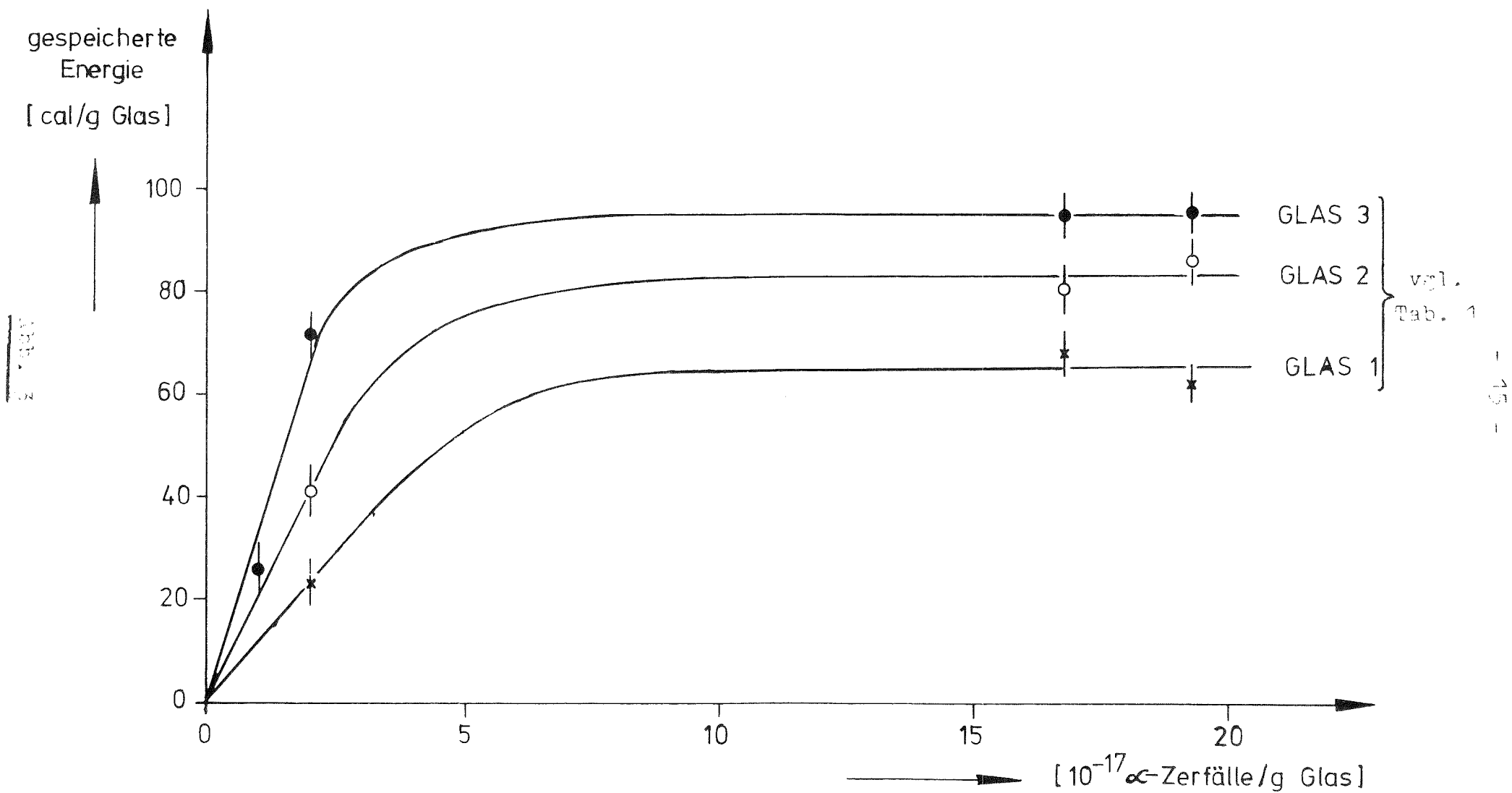


Abb. 2

ENERGIESPEICHERUNG IN BOROSILIKATGLÄSERN



Literatur:

- {1} E.P. Wigner
Appl. Phys. 17, 857 (1946)
- {2} F.P. Roberts, G.H. Jenks, C.D. Bopp
Radiation Effects in Solidified High Level-Waste
BNWL-1944, UC-70 (Januar 1976)
- {3} M. Laser, E. Merz
Zur Frage der Energiespeicherung in Festkörpern
durch Kernstrahlung bei der Lagerung hochradioaktiver
Abfälle
Jül-766-CT (Mai 1971)
- {4} G.H. Jenks
Gamma-Radiation Effects in Geologic Formations of
Interest in Waste Disposal
ORNL-TM-4827, UC-70 (September 1975)
- {5} G.H. Jenks, C.D. Bopp
Energy Storage in High Level Radioactive Waste and
Simulation and Measurement of Stored Energy with
Synthetic Wastes
ORNL-TM-3781 (Januar 1973)
- {6} A. Roux
Energie emmagasinée dans les oxydes BeO, MgO, Al₂O₃
et SiO₂ irradiés aux neutrons
CEA-N-1171 (Dezember 1969)
- {7} K. Scheffler, U. Riege, W. Hild, A.T. Jakubick
Zur Problematik der sicheren Beseitigung α -haltiger
Abfälle aus Wiederaufarbeitung und Brennelementfertigung
am Beispiel des Langzeitverhaltens hochaktiver Gläser
KFK-2170 (Juli 1975)

- {8} A.R. Hall, J.T.Dalton, B. Hudson, J.A.C. Marples
Development and Radiation Stability of Glasses
for Highly Radioactive Wastes
International Symposium on the Management of
Radioactive Wastes from the Nuclear Fuel Cycle
IAEA-OECD/NEA, Wien (März 1976)
- {9} W. Guber, L. Kahl, J. Saidl
Recent Experiments on Fixation of High Activity Wastes
in Karlsruhe
KFK-2179 (Mai 1975)