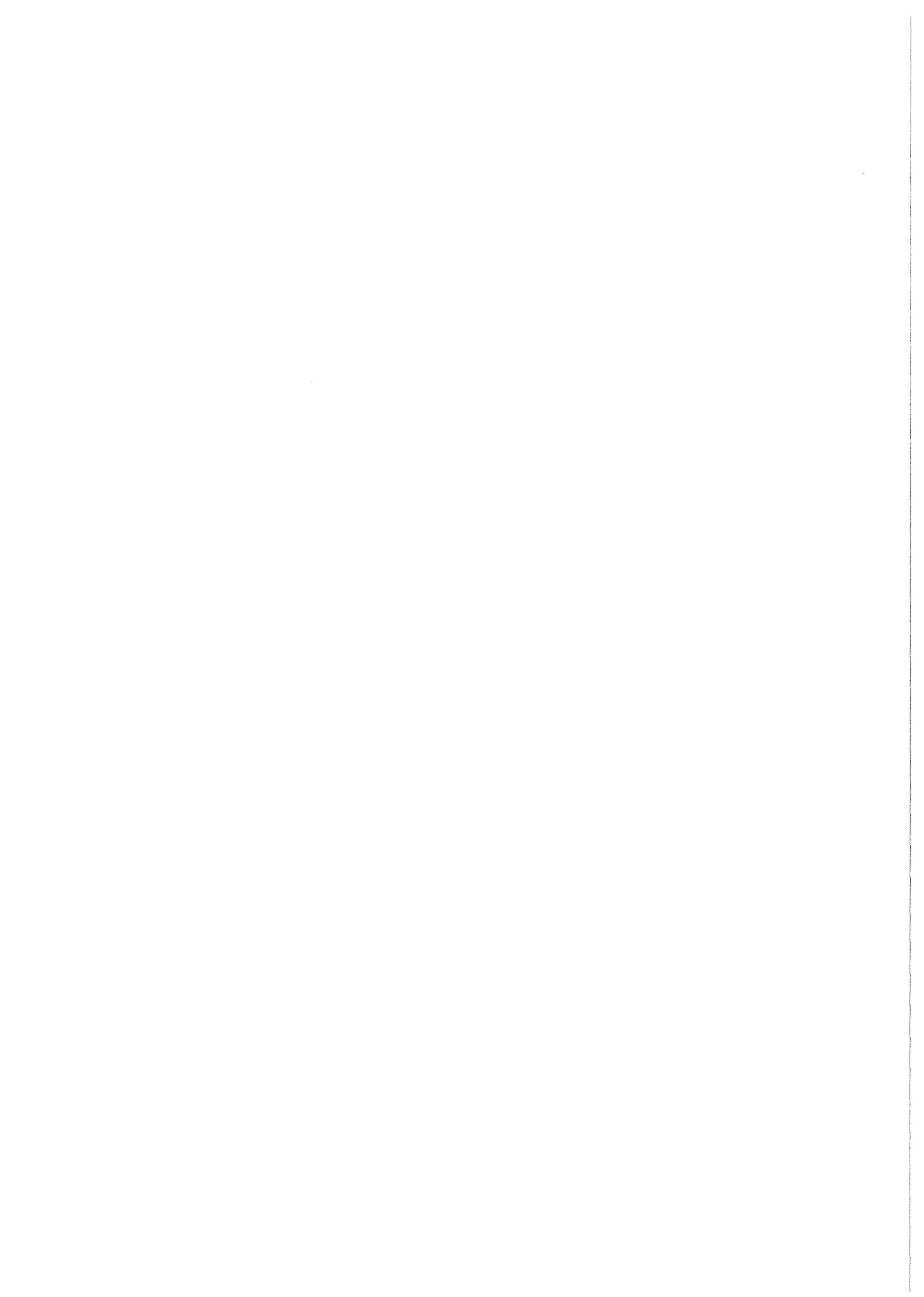


KfK 3997
Dezember 1985

Spaltgasverhalten in bestrahltem UO_2 bei Out-of-pile-Glühungen von 1400 bis 2000° C

J. Burbach, H. Zimmermann
Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Nukleare Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Material- und Festkörperforschung

Projekt Nukleare Sicherheit

KfK 3997

SPALTGASVERHALTEN IN BESTRAHLTEM UO_2
BEI OUT-OF-PILE-GLÜHUNGEN
VON 1400 BIS 2000 °C

J. Burbach, H. Zimmermann

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

UO₂-Proben mit Abbränden zwischen 0,3 und 3,8% wurden in Kapseln geglüht. Es wurden zwei Versuchsserien durchgeführt. Bei der ersten Serie wurden die Kapseln in einem Rohrofen erwärmt. Die Temperaturen reichten von 1200 bis 1600 °C und die Glühzeiten von 8 bis 240 Minuten. Bei der zweiten Serie wurden die Kapseln induktiv auf Temperaturen von 1700 bis 2000 °C erwärmt bei Zeiten von 2,5 bis 40 Minuten. Nach der Glühung wurden die Spaltgasfreisetzung und teilweise die Schwellung bestimmt. Die Freisetzung nimmt zu mit steigender Temperatur und Glühzeit sowie mit steigendem Abbrand. Nach Glühzeiten von 5 bis 15 Minuten bei 2000 °C liegt die Spaltgasfreisetzung bei Proben mit Abbränden über 0,9% zwischen 40 und 60%.

Fission Gas Behaviour in Irradiated UO₂ During Out-of-pile Annealing Tests

Abstract

UO₂ samples irradiated to various burnups between 0.3 and 3.8% were annealed in capsules. Two test series were performed. In the first one the capsules were heated in a tubular furnace. The temperatures ranged from 1200 to 1600 °C and the annealing times from 8 to 240 minutes. In the second test series the capsules were inductively heated at temperatures from 1700 to 2000 °C for 2.5 to 40 minutes. After annealing the fission gas release and in some cases the swelling were measured. The release increases with increasing temperature, annealing time and burnup. At 2000 °C and burnups above 0.9% the fission gas release is between 40 and 60% after annealing times between 5 and 15 minutes.

1. Einleitung

Im Rahmen von Untersuchungen zum Spaltgasverhalten bei Brennstoffüberhitzung infolge von Kühlungsstörungen in LWR-Brennelementen, die bei schweren Reaktorstörfällen /1/ auftreten, wurden Glühversuche mit bestrahlten UO_2 -Proben durchgeführt. Die Proben wurden in geschlossenen Kapseln bei Temperaturen zwischen 1300 und 2000 °C geglüht und anschließend wurde die Spaltgasfreisetzung bestimmt. Bei der ersten Versuchsserie erfolgte die Glühung in einem Rohofen. Hierbei wurden Temperaturen bis zu 1600 °C erreicht. Über diese Versuche wurde bereits in /2/ kurz berichtet. Bei einer zweiten Versuchsserie wurden die Kapseln induktiv auf Temperaturen bis zu 2000 °C erwärmt.

2. Experimentelles

2.1 Probenmaterial

Für die Glühversuche standen Proben aus den bis zu verschiedenen Abbränden bestrahlten Brennstäben der PNS-Versuchsserien zur Untersuchung des Brennstabverhaltens bei Kühlmittelverluststörfällen /3-8/ zur Verfügung. In fünf Bestrahlunseinsätzen waren jeweils sechs Brennstäbe im FR 2 bestrahlt worden. Fünf Stäbe jedes Einsatzes wurden einem in-pile-LOCA-Test unterworfen, und jeweils ein Stab wurde zur Charakterisierung des Brennstoffes verwendet. Diesen nicht LOCA-getesteten Stäben wurden die Glühproben entnommen. Sie lagen als Bruchstücke mit Durchmessern ≤ 5 mm vor. Die verwendete Probenmenge lag in der Regel bei ca. 7,5 g Gewicht. Tab. 1 nach /4/ gibt die wichtigsten Brennstoff- und Brennstabdaten wieder. Die Bestrahlungsdaten der einzelnen Brennstäbe sind in der Tab. 2 aufgeführt.

Die Spaltgasfreisetzung des Brennstoffes lag zwischen 0,3% bei 0,9% Abbrand und 7,8% bei 3,8% Abbrand. Die Brennstoffdichte nahm von 10,7 g/cm³ bei 0,3% Abbrand auf ca. 10,4 g/cm³ bei 3,8% Abbrand ab. Aus diesem Ergebnis kann abgeleitet werden, daß eine Nachverdichtung des UO₂ von 5,5 Vol.-% Porosität auf ca. 2 Vol.-% Restporosität unter Bestrahlung stattfand und die mittlere integrale Schwellrate knapp unter 1% pro % Abbrand lag. Die Korngrößen der bestrahlten Proben lagen im allgemeinen zwischen 10 µm in der Randzone und 20 µm im Zentrum der Brennstofftablette.

2.2 Glühung

Die Glühungen bei Temperaturen bis zu 1600 °C wurden in einem Rohrofen durchgeführt. Dazu wurden die Proben in Kapseln aus der Molybdänlegierung TZM oder aus Niob eingefüllt und der Kapseldeckel unter Argon verschweißt. Die Glühzeiten reichten von 8 bis 360 Minuten.

Da der zur Verfügung stehende Rohrofen keine Glühungen bei Temperaturen über 1600 °C zuließ, mußten die Glühversuche bei höheren Temperaturen mit induktiver Beheizung durchgeführt werden. Die Anlage hierzu bestand aus einem Generator, einem außenliegenden Schwingkreis, einem Induktor, einem Kühlaggregat und dem Rezipienten mit der Probenkapsel. Generator und Kühlaggregat waren im Bedienungsgang der Heißen Zellen stationiert. Der Schwingkreis mit dem Induktor und der Rezipient befanden sich in der Zelle.

Bei dem Generator handelt es sich um einen Hochfrequenz-Röhren-Generator der Firma Himmel mit einer Hochfrequenz-Nennleistung von 20 kW. Die Betriebsfrequenz liegt bei 700 kHz.

Der Rezipient mit allen Einbauten und mit der Induktorspule ist schematisch in der Abb. 1 dargestellt. Er besteht aus einem einseitig

verschlossenen Rohr aus Quarzglas mit einem Durchmesser von 35 mm und einer Wandstärke von 1,5 mm und ist an eine Vakuumpumpe angeschlossen. Zum Schutz des Quarzglases vor der Wärmestrahlung der Kapsel befindet sich zwischen Quarzrohr und Probenkapsel ein Schutzrohr aus Bornitrid. Am oberen Ende ist dieses Rohr zur Vermeidung von Wärmeverlusten durch Abstrahlung durch einen Abschlußdeckel, ebenfalls aus Bornitrid, verschlossen. Die Induktorspule um den Rezipienten ist wassergekühlt.

Die Probenkapsel ist aus der Molybdänlegierung TZM gefertigt. Sie hat einen Außendurchmesser von 19 mm und eine Wandstärke von 1 mm. Die äußere Höhe der Kapsel beträgt 43,5 mm. Am Boden ist sie mit einem Gewindezapfen versehen, der zur Fixierung und Zentrierung der Kapsel auf dem Kapselhalter dient. Die Temperaturmessung erfolgt mit einem W5Re/W26Re-Thermoelement im Kapselboden. Zu diesem Zweck ist der Gewindezapfen mit einer Bohrung versehen.

Um örtliche Überhitzungen der Kapselwand zu vermeiden, mußte die Aufheizung relativ langsam erfolgen. Es wurde in 5 min auf 1400 °C vorgeheizt. Nach einer Haltezeit von 1 min wurde dann die Aufheizung auf die gewünschte Temperatur in ca. 1 min durchgeführt. Es wurde mit Glühtemperaturen von 1700 bis 2000 °C und Haltezeiten von 2,5 bis 30 min gearbeitet.

2.3 Untersuchungsmethoden

Zur Auswertung der Experimente wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Messung des freigesetzten Spaltgases durch Anbohren der Kapsel, Absaugen des Gasinhaltes und gaschromatographische Bestimmung der Spaltgasmengen.
- Bestimmung des gebundenen Spaltgases. Zu diesem Zweck wurden die Brennstoffproben in einer Kugelmühle auf Teilchengrößen unter 1 µm

zerkleinert und das während des Mahlprozesses freigesetzte Spaltgas bestimmt. Dieses Spaltgas wird als Porensplaltgas bezeichnet; denn es stammt zum überwiegenden Teil aus Poren und Blasen. Die gemahlten Proben wurden anschließend in warmer Salpetersäure aufgelöst, wobei das restliche Spaltgas freigesetzt wurde, das sich in bestrahlungsbedingter Lösung oder in sehr kleinen Blasen innerhalb der Körner befand (Gittersplaltgas). Auch diese Gasmengen wurden gaschromatographisch bestimmt. Zur Beschleunigung der Untersuchungen wurden die induktiv geglühten Proben jedoch sofort aufgelöst und damit das gebundene Spaltgas nur integral bestimmt.

- Keramographische Untersuchungen an ausgewählten Proben.
- Bestimmung der Brennstoffdichte nach dem Auftriebsverfahren in Tetrachlorkohlenstoff vor und nach der Glühung zur Ermittlung der Schwellung. Auch diese Untersuchung wurde zwecks Zeitersparnis nicht mehr bei der zweiten Versuchsserie durchgeführt.

3. Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Tabellen 3 bis 9 aufgeführt. Bei den Spaltgasbestimmungen wurden die einzelnen Mengen (Gasvolumen unter Normalbedingungen) zum besseren Vergleich untereinander auf das jeweilige Probengewicht bezogen. Die einzelnen Spaltgasanteile jeder Probe wurden summiert und in den letzten Spalten der Tab. 3 bis 9 in Prozent der theoretisch erzeugten Spaltgasmenge ausgedrückt. Die Meßwerte können als zuverlässig angesehen werden, wenn die Summen bei ca. 100% abzüglich der jeweiligen integralen Freisetzung im Stab liegt. Differenzen von wenigen Prozent müssen toleriert werden, weil einmal die örtliche Spaltgasfreisetzung von der integralen abweichen kann und zum anderen die Glühprobe möglicherweise wegen Fehlens einzelner Bruchstücke nicht für den gesamten Brennstoffquerschnitt repräsentativ ist. Teilweise ist die Summe jedoch deutlich niedriger als der Erwartungswert. Das ist vermutlich

auf Spaltgasverluste während des Versuchs oder bei den Spaltgasbestimmungen zurückzuführen. In einigen Fällen waren die induktiv erwärmten Kapseln nachgewiesenermaßen undicht. Da den Teilmengen nicht ohne weiteres anzusehen ist welche ev. zu niedrig ist, wurde bei der grafischen Darstellung der Freisetzung als Funktion der Glühzeit in den Abb. 2 bis 6 sowohl die direkt bestimmte prozentuale Freisetzung (bezogen auf die theoretisch in der Probe erzeugte Spaltgasmenge) als auch die Freisetzung verwendet, die sich als Differenz aus dem theoretisch erzeugten und der Summe des zurückgehaltenen Spaltgases und der integralen Spaltgasfreisetzung ergibt. Bei den Induktionsglühungen wurde wegen der relativ geringen Anzahl von Meßergebnissen und wegen deren starker Streuung die Zeitabhängigkeit der Freisetzung nur als Streuband ohne genaue Zuordnung zum Probenabbrand dargestellt. Dabei wurden jedoch die Ergebnisse der Proben aus dem Stab C6, die nur 0,3% Abbrand aufwiesen, nicht berücksichtigt, weil sie meist deutlich unter dem Streuband der anderen Ergebnisse liegen.

Die Zeitabhängigkeit der prozentualen Spaltgasfreisetzung bei allen Glühtemperaturen und allen Abbrandstufen über 0,3% ist gekennzeichnet durch eine sehr rasch erfolgende Anfangsfreisetzung in Höhe von 10 bis 30% und durch einen relativ langsamen Anstieg bei Glühzeiten über ca. 3 min. Die hohe Anfangsfreisetzungsrates wird hervorgerufen durch das Aufreißen von Korngrenzen und Entweichen des in ihnen gespeicherten Spaltgases. Bei sehr niedrigen Abbränden, wenn erst wenig Spaltgas an den Korngrenzen vorhanden ist, ist dieser Effekt auch nicht stark ausgeprägt, wie die Freisetzung aus den Glühproben des Stabes C6 zeigt (Abb. 6). Die weitere Freisetzung wird dann von Diffusionsvorgängen bestimmt, durch die das Spaltgas aus dem Korninneren an die Korngrenzen transportiert wird, von denen es dann zum größten Teil sofort freigesetzt wird. Die Freisetzung steigt, bei gleichem Abbrand, mit zunehmender Glüh Temperatur.

In allen Abbrandstufen steigt die prozentuale Spaltgasfreisetzung mit der Glüh Temperatur an. Diese Temperaturabhängigkeit ist für eine Glühzeit von 10 min in der Abb. 7 dargestellt. Die Glühdauer von

10 min ist gewählt worden, weil hier die meisten Werte vorliegen bzw. durch Interpolation aus den Abb. 2 bis 6 gewonnen werden konnten. Für eine exakte Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Freisetzung reichen die vorhandenen Meßwerte jedoch nicht aus. Der scheinbar lineare Zusammenhang im untersuchten Temperaturbereich muß vermutlich als zufällig betrachtet werden. Er entsteht durch Überlagerung der weniger temperaturabhängigen hohen Anfangsfreisetzung und der diffusionsgesteuerten Freisetzung.

Abb. 8 zeigt für eine Temperatur von 2000 °C und eine Glühzeit von 10 min die Abhängigkeit der Freisetzung und der Konzentration des gebundenen Spaltgases vom Abbrand. Diese Abbildung wurde aus der Abb. 7 abgeleitet, unter Extrapolation der Werte für 2,4% Abbrand auf 2000 °C. Die Freisetzung steigt mit zunehmendem Abbrand stark an, während die Konzentration des gebundenen Spaltgases nach dem anfänglichen Anstieg bei etwa 3% Abbrand einen Sättigungswert erreicht hat.

Die Abb. 9 bis 13 zeigen Gefügebildungen von Proben der Stäbe F6 und G3.6 (2,4 und 3,8% Abbrand) nach folgenden Glühbehandlungen

- 240 min bei 1205 °C (2,4% Abbrand)
- 15 min bei 1525 °C (2,4% Abbrand)
- 2,5 min bei 1800 °C (3,8% Abbrand)
- 15,4 min bei 1800 °C (3,8% Abbrand)
- 15,5 min bei 2000 °C (3,8% Abbrand)

Mit Ausnahme der 4 Stunden bei 1205 °C geglühten Probe, bei der während der Glühung praktisch keine Gefügeänderung eingetreten ist, treten in allen anderen Fällen Korngrenzenblasen und Korngrenzentrennungen auf, die in manchen Bereichen das Ausmaß feiner Risse annehmen. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Glühtemperatur. Das Vorhandensein der Korngrenzentrennungen schon nach kurzen Glühzeiten erklärt die hohe Anfangsfreisetzungsrates.

Die Entstehung größerer Korngrenzenporosität und die Bildung von Korngrenzentrennungen führt zu Schwellungen des Brennstoffes. Die Zeit-

und Abbrandabhängigkeit der Schwellung hat einen ähnlichen Verlauf wie die der Spaltgasfreisetzung. Abb. 14 zeigt die Schwellung der bei verschiedenen Temperaturen geglühten Proben des Stabes G1.6 (3,7% Abbrand) in Abhängigkeit von der Glühzeit. Einige Dichtebestimmungen an Brennstoffpartikeln, die bei 2000 °C geglüht worden waren, ergaben Schwellungen bis zu 20 Vol.-%.

Spaltgasfreisetzung und Schwellung sind die Folgen von Umverteilungsvorgängen des Spaltgases im Brennstoff. Abb. 15 veranschaulicht qualitativ diese Umverteilungsvorgänge. Mit zunehmender Glühtemperatur und Glühdauer nimmt nicht nur die Freisetzung zu, sondern auch der prozentuale Anteil des in Poren und Blasen ausgeschiedenen Spaltgases. Dementsprechend nimmt der Anteil des Gitterspaltgases ab. Das Porensplattgas befindet sich jedoch nicht nur an Korngrenzen, sondern es haben sich auch mikroskopisch sichtbare Spaltgasblasen innerhalb der Körner gebildet.

4. Schlußfolgerungen

Die prozentuale Spaltgasfreisetzung aus dem Brennstoff bei Glühungen out-of-pile hängt in erster Linie von der Brennstofftemperatur ab. Sie nimmt mit steigender Temperatur zu, von weniger als 12% Freisetzung bei 1400 °C auf 40 bis 60% Freisetzung bei 2000 °C nach Glühzeiten zwischen 5 und 15 min und bei Probenabbränden ab 0,9%.

Die Zeitabhängigkeit der Freisetzung ist gekennzeichnet durch eine sehr rasch erfolgende Anfangsfreisetzung in Höhe von 10 bis 30% infolge des Aufreißens der Korngrenzen und durch einen relativ langsamen Anstieg bei Glühzeiten über 3 min, der durch Spaltgasdiffusion aus dem Korninnern an die Korngrenzen bestimmt wird.

Mit steigendem Abbrand nimmt die prozentuale Freisetzung zu. Während bei Abbränden zwischen 0,9 und 3,8% wegen der Streuung der relativ wenigen Meßergebnisse diese Abhängigkeit nur qualitativ erkennbar ist,

wird der Abbrandeinfluß jedoch besonders auffällig beim Vergleich dieser Ergebnisse mit den Freisetzungswerten der Proben mit 0,3% Abbrand, die selbst bei einer Glühtemperatur von 2000 °C stets unter 20% liegen.

Neben der Spaltgasfreisetzung erfolgt auch eine Ausscheidung des zurückgehaltenen Spaltgases in inter- und intrakristallinen Blasen verbunden mit einer Volumenzunahme des Brennstoffes. Diese Schwellung zeigt eine ähnliche Temperatur- und Zeitabhängigkeit wie die Spaltgasfreisetzung. Schwellungen bis zu 20 Vol.-% nach Glühungen bei 2000 °C wurden beobachtet.

Bei der Übertragung dieser out-of-pile bestimmten Ergebnisse auf die Verhältnisse im Brennstab bei einer Kühlungsstörung ist zu beachten, daß bei den Glühversuchen praktisch kein Temperaturgradient im Brennstoff existiert. Der fehlende Temperaturgradient schließt gerichtete Blasenwanderung als wirksamen Freisetzungsmechanismus aus, so daß bei den Glühversuchen die Spaltgasfreisetzung möglicherweise unterschätzt wird.

Literatur

- /1/ R.K. McCardell, P.E. MacDonald
Safety and Licensing Issues that are being Addressed by the
Power Burst Facility Test Programs
Safety Aspects of Fuel Behaviour in Off-normal and Accident
Conditions, Proc. CSNI Specialists Meeting, Espoo, Finland,
1-4 Sept. 1980, 315-332
- /2/ H. Zimmermann
Fission Gas Behaviour in LWR Fuel during Loss-of-Coolant
Accidents
Eur. Appl. Research Reports Vol. 5, No. 6, 1984, 1349-1361

- /3/ M. Prüßmann, E.H. Karb, L. Sepold
In-pile Experimente zum Brennstabverhalten beim Kühlmittelver-
luststörfall. Bericht über die Versuchsserie G1
KfK 3061 (1981)
- /4/ M. Prüßmann, E.H. Karb, L. Sepold
In-pile Experimente zum Brennstabverhalten beim Kühlmittelver-
luststörfall. Bericht über die Versuchsserie G2/3
KfK 3099 (1981)
- /5/ M. Prüßmann, E.H. Karb, L. Sepold
In-pile Experimente zum Brennstabverhalten beim Kühlmittelver-
luststörfall. Bericht über die Versuchsserie C
KfK 3195 (1982)
- /6/ M. Prüßmann, E.H. Karb, L. Sepold
In-pile Experimente zum Brennstabverhalten beim Kühlmittelver-
luststörfall. Bericht über die Versuchsserie E
KfK 3345 (1982)
- /7/ P. Hofmann, C. Petersen, G. Schanz, H. Zimmermann
In-pile Experimente zum Brennstabverhalten beim Kühlmittelver-
luststörfall. Ergebnisse der zerstörenden Nachuntersuchungen
der Versuchsserie F
KfK 3288 (1982)
- /8/ P. Hofmann, C. Petersen, G. Schanz, H. Zimmermann
In-pile Experimente zum Brennstabverhalten beim Kühlmittelver-
luststörfall. Ergebnisse der zerstörenden Nachuntersuchungen
der Versuchsserie G
KfK 3433 (1983)

Tabelle 1: Brennstab- und Brennstoffdaten

Hülle		Zry-4
Durchmesser außen	mm	10,75
innen	mm	9,3
Wandstärke	mm	0,725
Länge zwischen den Endstopfen	mm	880
Brennstoff		UO ₂
U 235-Gehalt: aktive Zone	%	4,7
Endpellets	%	0,3
Dichte	g/cm ³	10,35
UO ₂ -Pellets		
Durchmesser	mm	9,11
Länge	mm	11
Säulenhöhe aktive Zone	mm	500 ± 5,5
Endpellets	je 1 Stück	beidseitig
Dishing aktive Zone		beidseitig
Endpellets		einseitig
Al ₂ O ₃ -Isolierpellets		
Durchmesser	mm	9,15 - 0,01
Länge	mm	8,0 ± 0,2
3 Stück an jeder Seite der UO ₂ -Säule		
Freie Gasvolumen		
Dishing gesamt	cm ³	0,73 - 0,78
Spalt Hülle/Brennstoff	cm ³	1,57
Plenum (abzüglich Feder)	cm ³	15,86
Σ Endstopfen, Kapillare, Druckaufnehmer	cm ³	13,32

Tabelle 2: Bestrahlungsdaten der Brennstäbe

Stab	Bestr.-	Abbrand	Stableistung	
	Dauer	(radiochem.)	mittl.	max. ¹⁾
	d	%	W/cm	W/cm
C6	37	0.3	395	395
E6	133	0.9	350	370
F6	338	2.4	360	425
G1.6	595	3.7	360	490
G3.6	650	3.8	310	460

1) Über den Bestrahlungszyklus mit maximaler Leistung
gemittelte Stableistung

Tabelle 3: Spaltgasbilanz der Glühproben aus dem Stab F6 (Glühung im Rohröfen,
mittl. Abbrand 2,4 %, integrale Freisetzung während der Bestrahlung 3,5 %)

Kap- sel	Glühdaten		Schwel- lung %	Freies Spaltgas			Porensplattgas			Gittersplattgas			Summe	
	Zeit min	Temp. °C		F %	Xe/Kr	mm ³ /g	P %	Xe/Kr	mm ³ /g	G %	Xe/Kr	mm ³ /g	F+P+G mm ³ /g	%
14	120	1200	0.1	11.9	1.6	7.3	-	-	-	574.4	79.3	7.7	-	-
13	240	1205	0.4	5.5	0.8	8.0	42.6	5.9	7.6	-	-	-	-	-
18	180	1305	0.2	14.2	1.9	7.7	22.3	3.0	7.9	630.7	85.8	7.9	667.1	90.7
19	180	1400	0.5	21.6	3.1	7.7	18.8	2.7	7.2	-	-	-	-	-
16	8	1500	1.0	88.8	11.8	7.7	220.2	29.1	9.1	448.6	59.4	7.9	757.7	100.3
12	15	1525	2.1	86.6	12.1	7.4	117.1	16.3	7.6	-	-	-	-	-
11	30	1510	1.5	97.9	14.3	7.7	87.6	12.8	7.5	416.1	60.7	8.2	601.6	87.8
10	58	1500	1.5	103.2	14.5	7.7	-	-	-	-	-	-	-	-
9	120	1500	3.0	124.6	17.8	7.8	139.1	19.9	8.2	355.6	50.8	8.3	619.4	88.5
8	180	1500	4.3	91.1	14.2	7.7	147.0	22.8	7.9	372.2	57.8	8.4	610.3	94.8
7	15	1600	2.4	94.7	14.9	6.8	69.3	10.9	7.7	442.6	69.9	8.2	606.6	95.8
6	55	1600	2.8	152.0	25.0	7.2	185.2	30.4	7.9	235.4	38.7	8.4	572.6	94.1
5	115	1600	3.5	167.7	24.2	7.1	-	-	-	-	-	-	-	-
17	180	1600	4.8	-	-	-	171.0	23.4	8.3	290.9	39.7	8.3	-	-

Tabelle 4: Spaltgasbilanz der Glühproben aus dem Stab G1.6 (Glühung im Rohröfen,
mittl. Abbrand 3,7 %, integrale Freisetzung während der Bestrahlung 2,7 %)

Kap- sel	Glühdaten		Schwel- lung %	Freies Spaltgas			Porenspaltgas			Gitterspaltgas			Summe	
	Zeit min	Temp. °C		F mm ³ /g	%	Xe/Kr	P mm ³ /g	%	Xe/Kr	G mm ³ /g	%	Xe/Kr	F+P+G mm ³ /g	%
20	30	1300	0.4	69.3	6.3	7.6	187.9	17.2	7.8	725.2	66.4	8.1	982.4	89.9
21	120	1300	1.3	72.8	6.6	7.5	-	-	-	-	-	-	-	-
23	10	1400	1.6	129.2	11.9	8.9	231.3	21.3	8.9	709.0	65.3	7.9	1069.5	98.4
24	30	1400	2.3	163.2	15.0	7.7	271.6	25.0	8.0	527.0	48.4	8.4	961.8	88.4
25	60	1400	2.5	246.0	22.6	7.7	343.2	31.5	7.6	449.3	41.2	7.8	1038.6	95.3
26	360	1400	2.7	127.2	11.7	7.8	243.4	22.3	7.9	680.9	62.4	8.0	1051.5	96.3
27	8	1500	2.1	206.9	19.1	8.1	189.5	17.5	7.7	699.0	64.7	9.1	1095.4	101.3
28	30	1500	2.6	294.2	27.2	7.7	184.6	17.0	7.8	593.4	54.8	9.0	1072.2	99.0
29	180	1500	4.2	404.6	37.3	7.2	349.7	32.2	7.9	353.8	32.6	8.2	1108.1	102.2
30	8	1600	2.6	293.5	27.8	8.1	224.8	21.3	7.9	522.9	49.5	8.2	1041.2	98.6
31	30	1600	4.4	383.1	36.2	7.8	284.1	26.8	8.0	388.4	36.7	8.3	1055.6	99.7

Tab. 5: Spaltgasbilanz der Glühproben aus dem Stab C6 (Induktionsglühung, mittlerer Abbrand 0,3%)

Kap- sel	Glühdaten		Freies Spaltgas			Gebundenes Spaltgas			Summe	
	Zeit min	Temp. C	F mm ³ /g	F %	Xe/Kr	Z mm ³ /g	Z %	Xe/Kr	F+Z mm ³ /g	F+Z %
61	3.7	1700	-	-	-	74.4	93.9	7.2	-	-
62	10.0	1700	8.2	10.3	8.0	(78.5)	(99.1)	7.3	86.6	109.4
45	2.5	1800	3.1	3.9	7.3	69.1	87.3	7.3	72.2	91.2
41	2.7	1800	1.8	2.3	7.0	75.7	95.6	7.3	77.5	97.9
68	5.0	1800	-	-	-	(79.0)	(99.7)	7.6	-	-
46	16.7	1800	16.6	21.0	6.9	53.9	68.1	7.3	70.5	89.1
44	40.0	1800	-	-	-	62.0	78.2	7.2	-	-
80	2.5	2000	11.8	15.0	8.0	68.8	86.9	7.0	80.7	101.8
66	4.7	2000	8.0	10.1	7.5	68.0	85.9	7.3	76.0	96.0
74	7.5	2000	4.2	5.4	7.7	73.1	92.3	7.3	77.3	97.6
64	15.5	2000	10.4	13.2	7.0	64.2	81.0	7.3	74.6	94.2

Tab. 6: Spaltgasbilanz der Glühproben aus dem Stab E6 (Induktionsglühung, mittl. Abbrand 0,9%, integrale Freisetzung während der Bestrahlung 0,3%)

Kap- sel	Glühdaten		Freies Spaltgas			Gebundenes Spaltgas			Summe	
	Zeit	Temp.	F			Z			F+Z	
	min	C	mm ³ /g	%	Xe/Kr	mm ³ /g	%	Xe/Kr	mm ³ /g	%
48	3.1	1800	28.1	11.8	7.0	205.7	86.6	7.6	233.8	98.4
53	4.1	1800	-	-	-	187.6	79.0	7.4	-	-
51	5.1	1800	29.2	12.3	7.0	207.5	87.3	7.1	236.7	99.6
67	5.2	1800	-	-	-	222.1	93.5	7.3	-	-
49	15.5	1800	56.2	23.6	6.9	160.8	67.7	7.4	217.0	91.3
55	30.0	1800	34.7	14.6	7.0	-	-	-	-	-
57	3.0	2000	-	-	-	173.1	72.9	7.4	-	-
79	5.9	2000	74.4	31.3	7.1	163.6	68.9	8.0	238.0	100.2
58	15.7	2000	-	-	-	136.5	57.5	7.3	-	-

Tab. 7: Spaltgasbilanz der Glühprobe aus dem Stab F6 (Induktionsglühung, Abbrand 2,5%, integrale Freisetzung während der Bestrahlung 3,5%)

Kap- sel	Glühdaten		Freies Spaltgas			Gebundenes Spaltgas			Summe	
	Zeit	Temp.	F			Z			F+Z	
	min	C	mm ³ /g	%	Xe/Kr	mm ³ /g	%	Xe/Kr	mm ³ /g	%
76	16.0	1900	307.2	46.6	7.3	333.1	50.5	7.3	640.3	97.0

Tab. 8: Spaltgasbilanz der Glühproben aus dem Stab G1.6 (Induktionsglühung, mittl. Abbrand 3,7%, integrale Freisetzung während der Bestrahlung 2,7%)

Glühdaten			Freies Spaltgas			Gebundenes Spaltgas			Summe	
Kap- sel	Zeit min	Temp. C	F		Xe/Kr	Z		Xe/Kr	F+Z	
			mm ³ /g	%		mm ³ /g	%		mm ³ /g	%
75	4.0	1900	286.5	29.3	7.9	879.4	90.0	8.0	1165.9	119.4
70	15.0	1900	422.2	43.2	7.4	528.6	54.1	8.1	950.7	97.3
32	2.4	2000	-	-	-	253.8	26.0	8.2	-	-

Tab. 9: Spaltgasbilanz der Glühproben aus dem Stab G3.6 (Induktionsglühung, mittl. Abbrand 3,8%, integrale Freisetzung während der Bestrahlung 7,8%)

Glühdaten			Freies Spaltgas			Gebundenes Spaltgas			Summe	
Kap- sel	Zeit min	Temp. C	F		Xe/Kr	Z		Xe/Kr	F+Z	
			mm ³ /g	%		mm ³ /g	%		mm ³ /g	%
39	2.5	1800	247.2	24.6	7.6	686.3	68.4	8.2	933.4	93.0
60	5.5	1800	223.1	22.2	7.6	735.3	73.3	8.3	958.4	95.5
40	15.4	1800	-	-	-	567.7	56.6	11.1	-	-
77	3.2	1900	245.2	24.4	7.6	698.4	69.6	8.3	943.6	94.1
78	4.8	1900	267.1	26.6	7.7	586.9	58.5	10.3	853.9	85.1
72	7.0	1900	297.6	29.7	7.8	592.3	59.0	8.2	890.0	88.7
69	16.0	1900	-	-	-	590.9	58.9	8.9	-	-
63	2.9	2000	285.3	28.4	7.7	627.1	62.5	12.5	912.4	90.9
36	3.4	2000	-	-	-	533.6	53.2	8.2	-	-
73	5.5	2000	-	-	-	629.8	62.8	8.4	-	-
81	8.0	2000	378.5	37.7	7.7	-	-	-	-	-
37	11.3	2000	-	-	-	295.4	29.4	8.0	-	-
65	15.5	2000	419.9	41.9	8.0	396.7	39.5	12.3	816.6	81.4

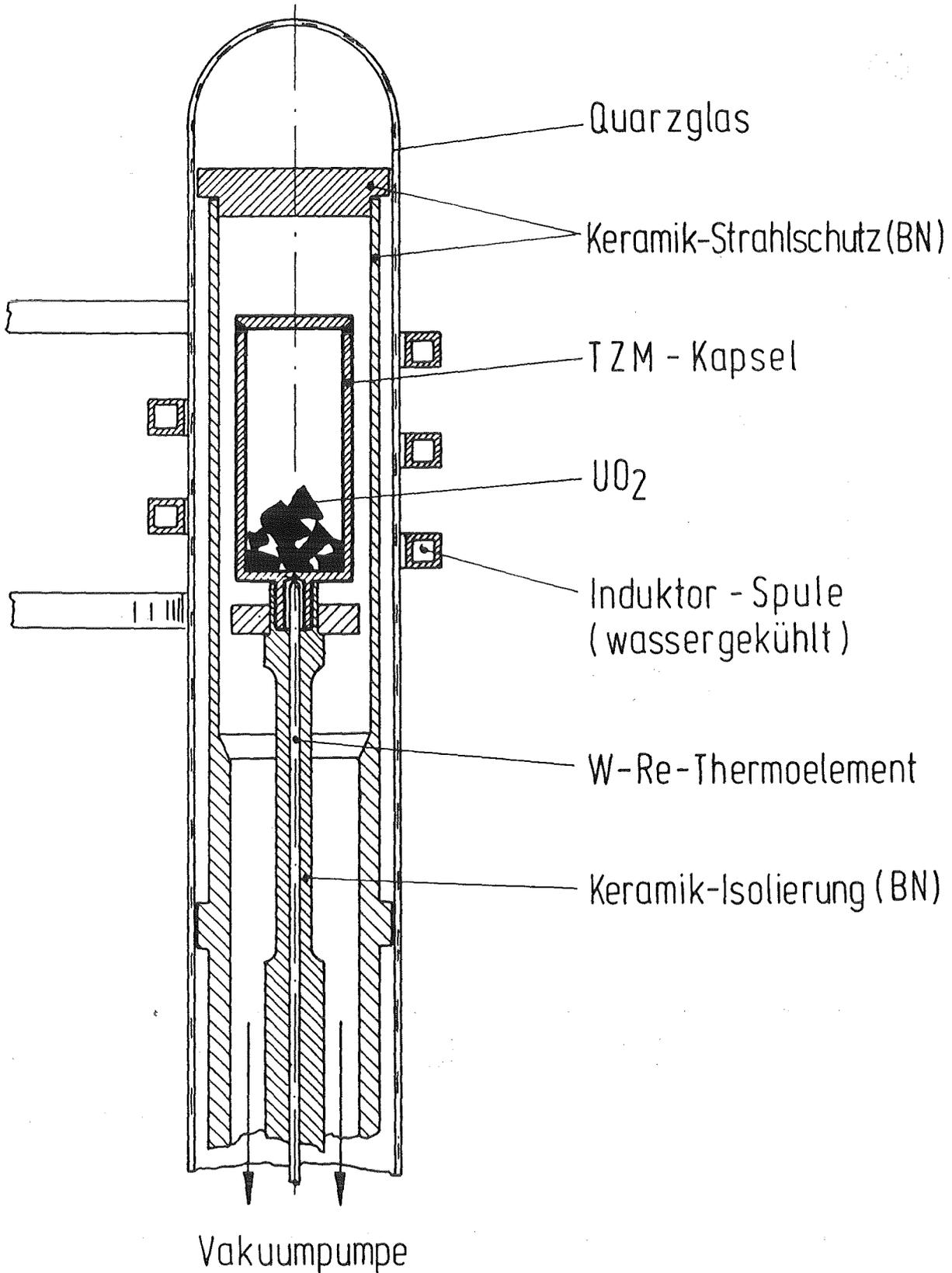


Abb. 1: Schematische Darstellung des Rezipienten mit Einbauten und Induktor-Spule

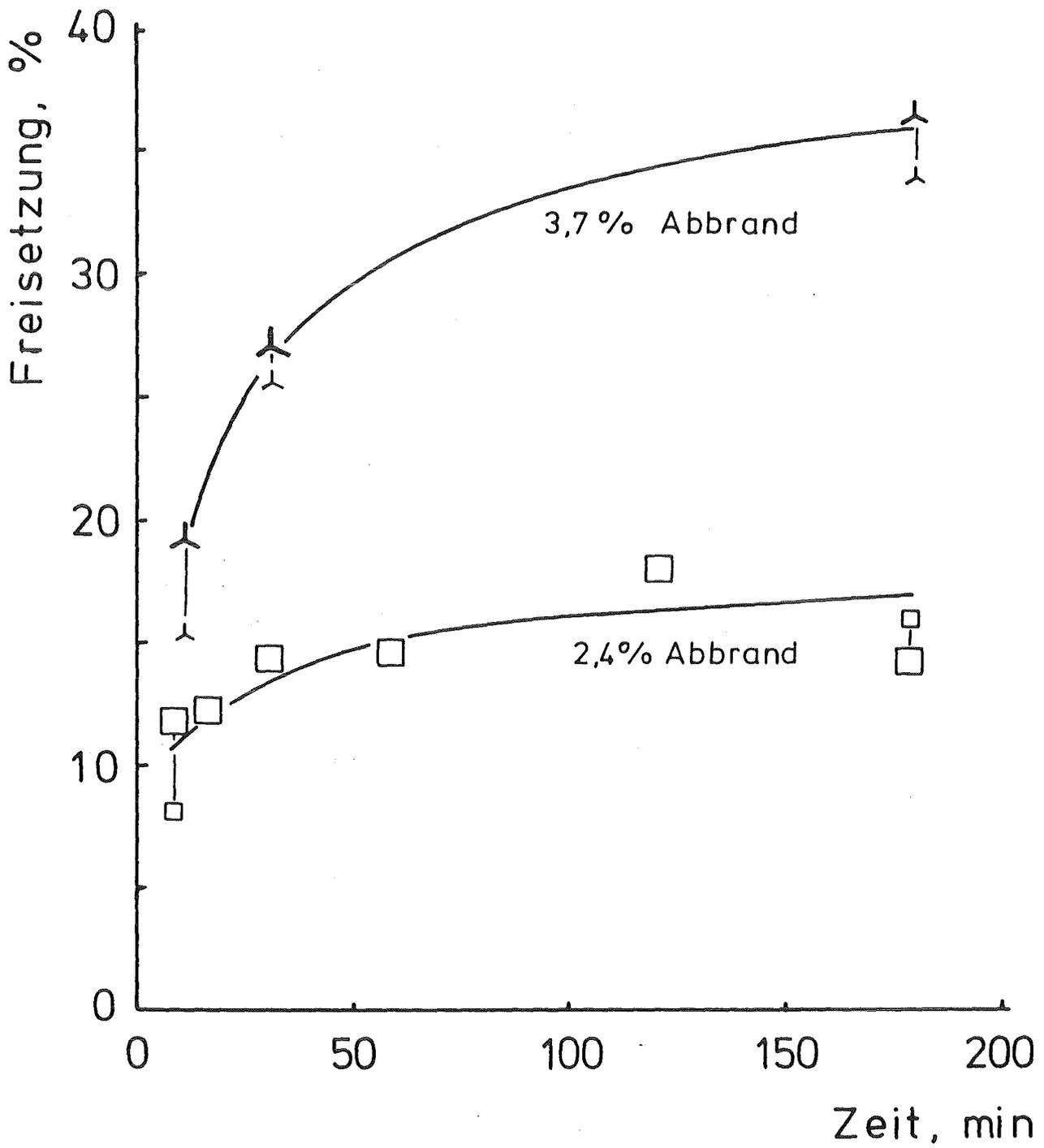


Abb. 2: Spaltgasfreisetzung bei 1500 °C in Abhängigkeit von der Glühzeit

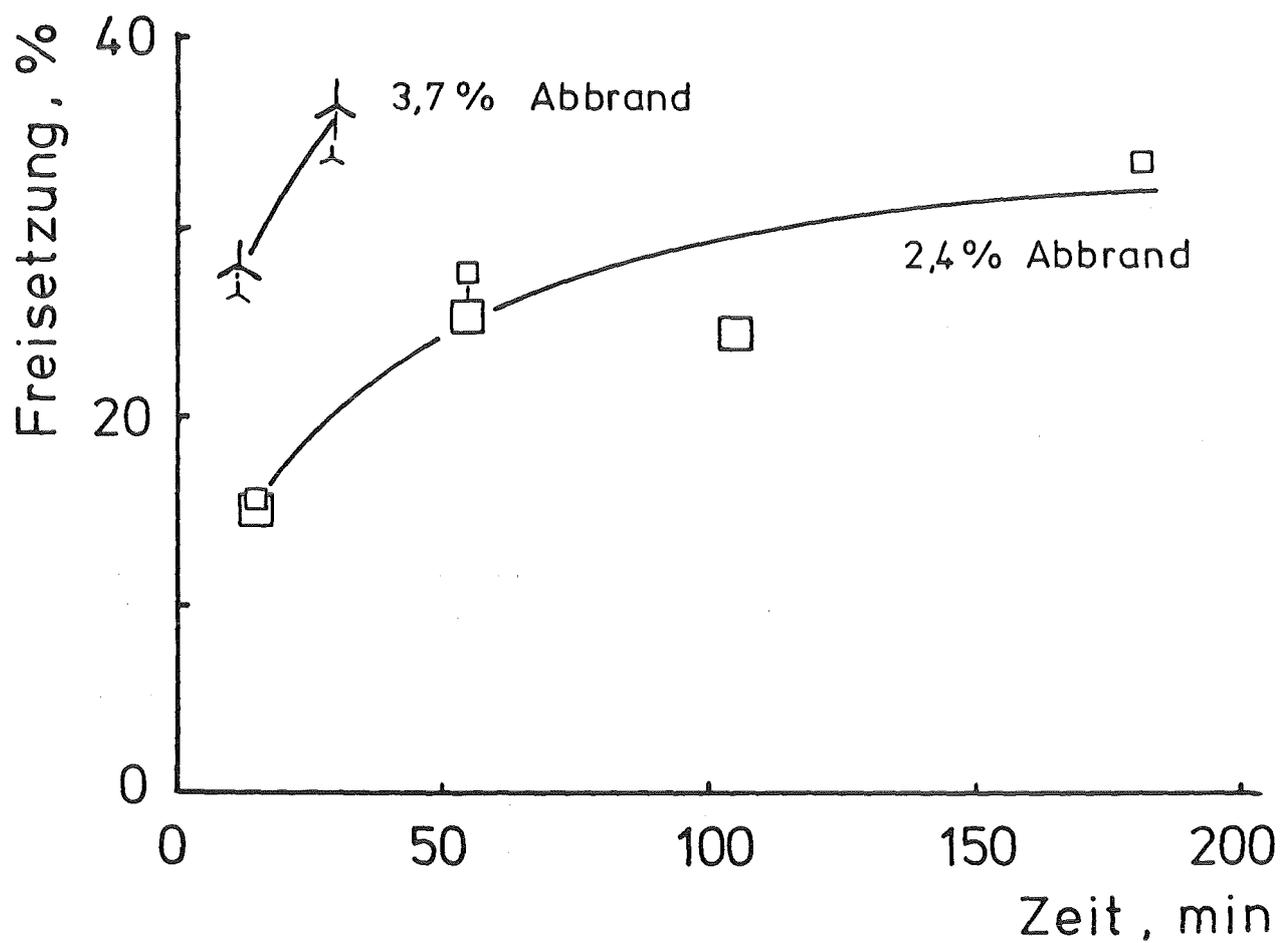


Abb. 3: Spaltgasfreisetzung bei 1600 °C in Abhängigkeit von der Glühzeit

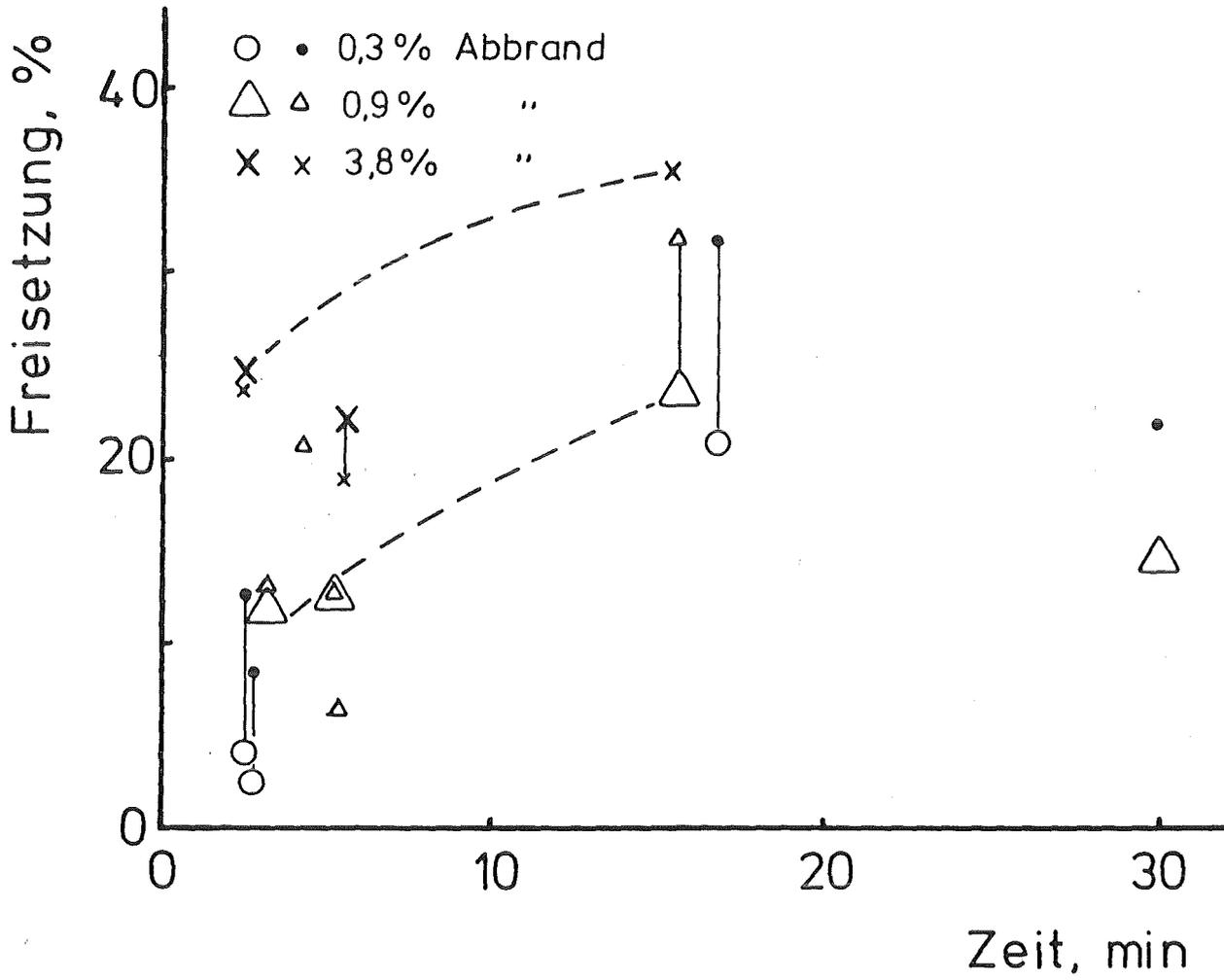


Abb. 4: Spaltgasfreisetzung bei 1800 °C in Abhängigkeit von der Glühzeit

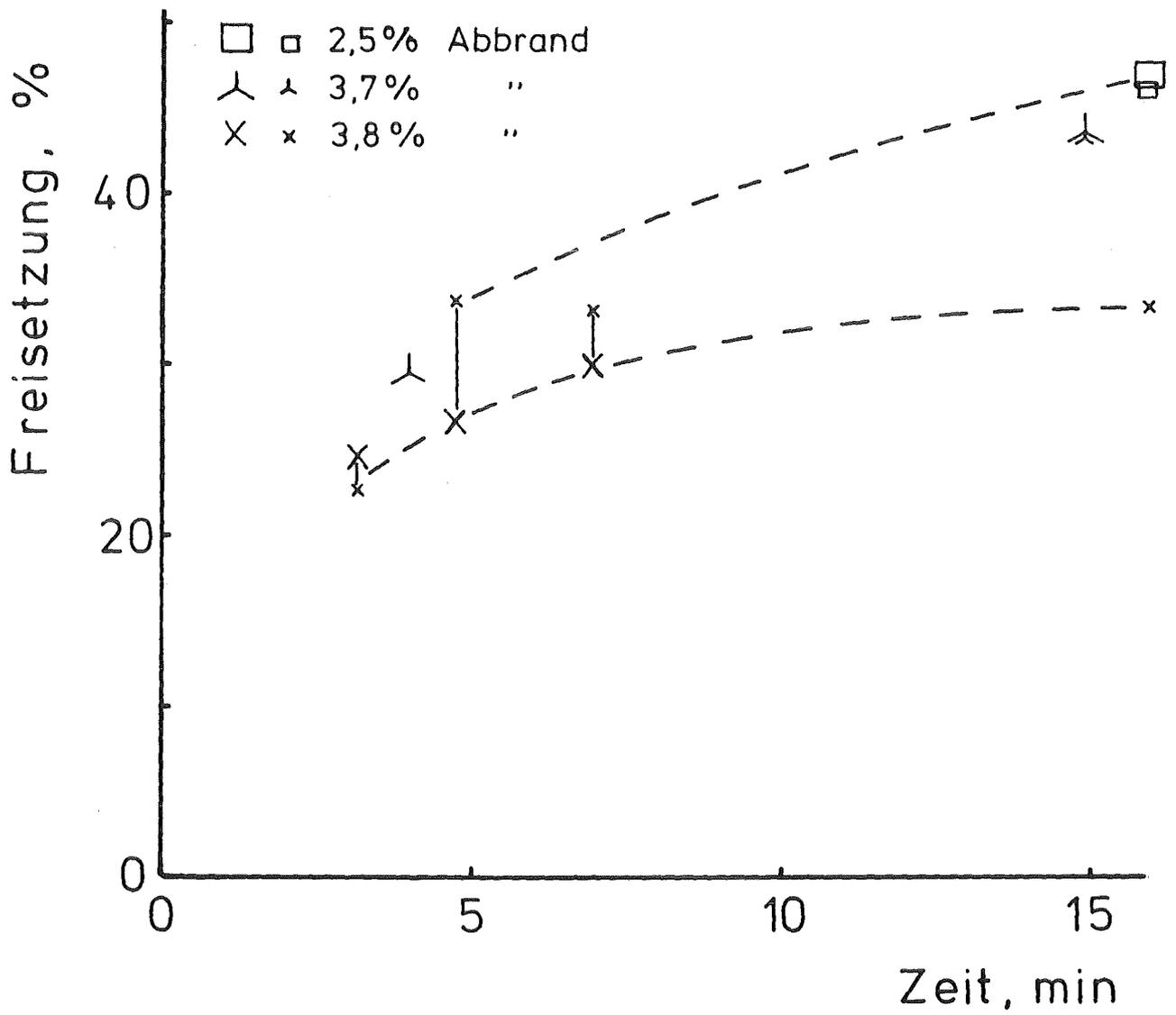


Abb. 5: Spaltgasfreisetzung bei 1900 °C in Abhängigkeit von der Glühzeit

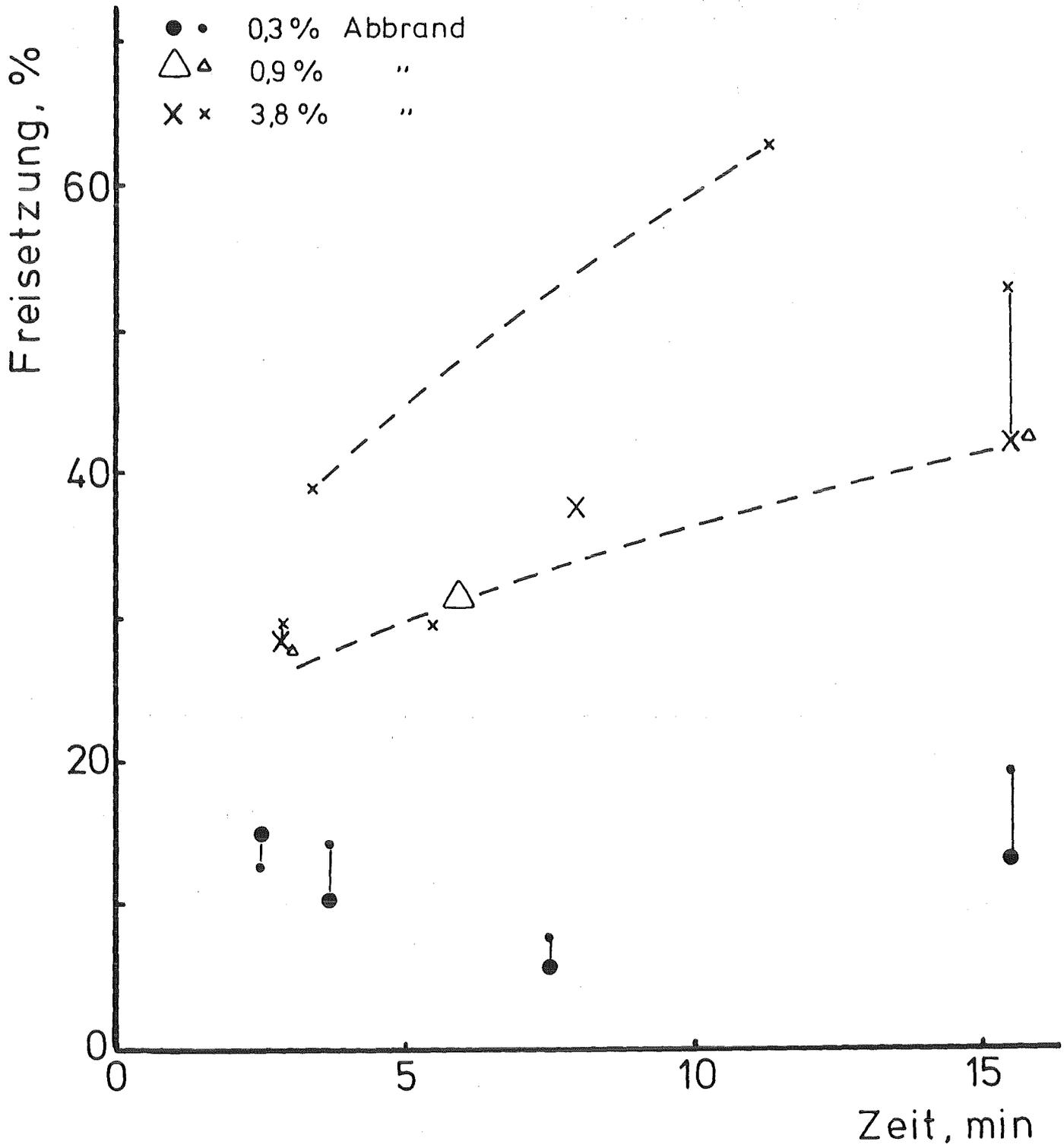


Abb. 6: Spaltgasfreisetzung bei 2000 °C in Abhängigkeit von der Glühzeit

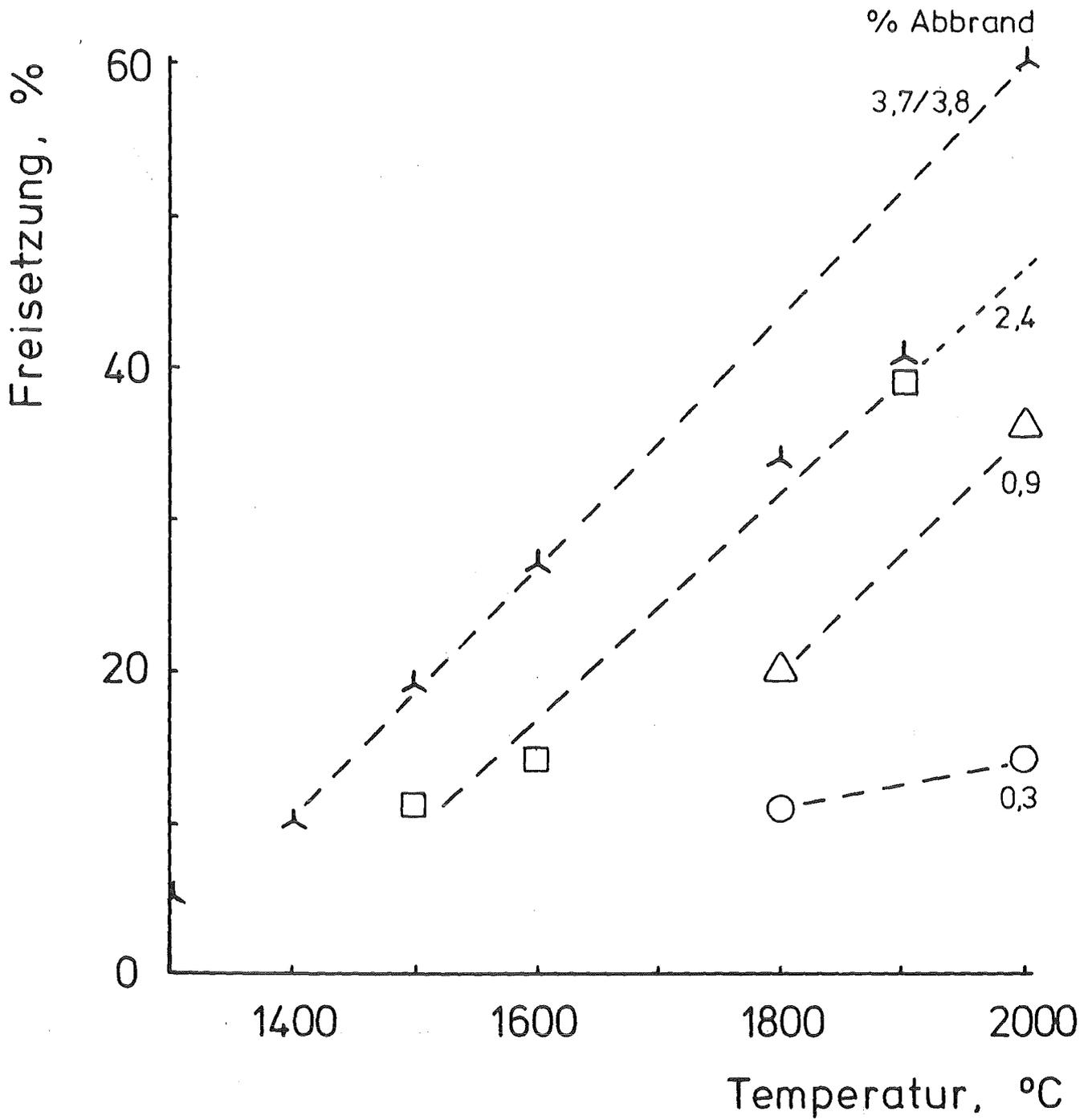


Abb. 7: Abhängigkeit der Spaltgasfreisetzung von der Glühtemperatur bei Proben verschiedenen Abbrandes (Glühzeit 10 min)

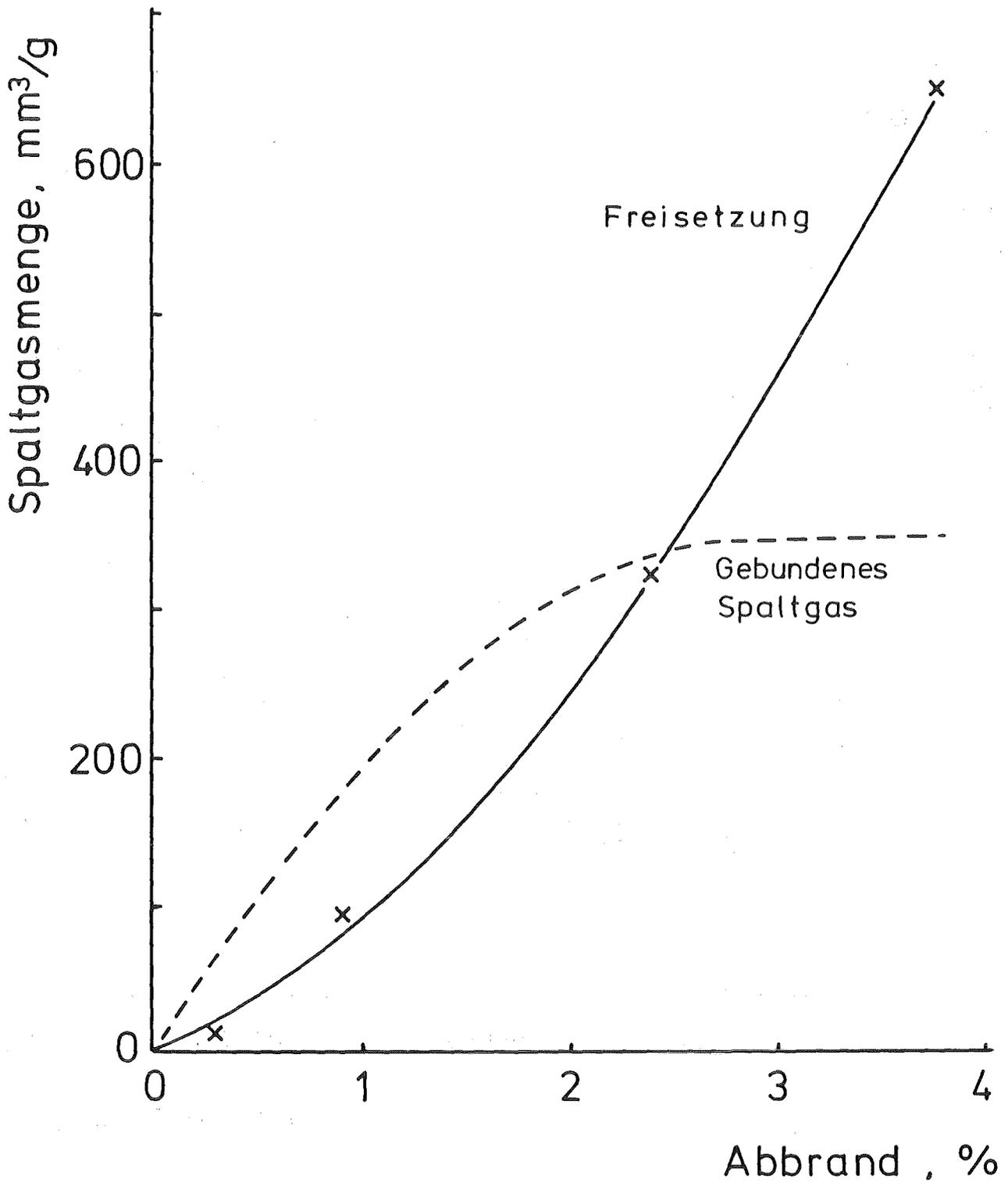


Abb. 8: Spaltgasfreisetzung und Konzentration des gebundenen Spaltgases bei 2000 °C in Abhängigkeit vom Probenabbrand (Glühzeit 10 min)

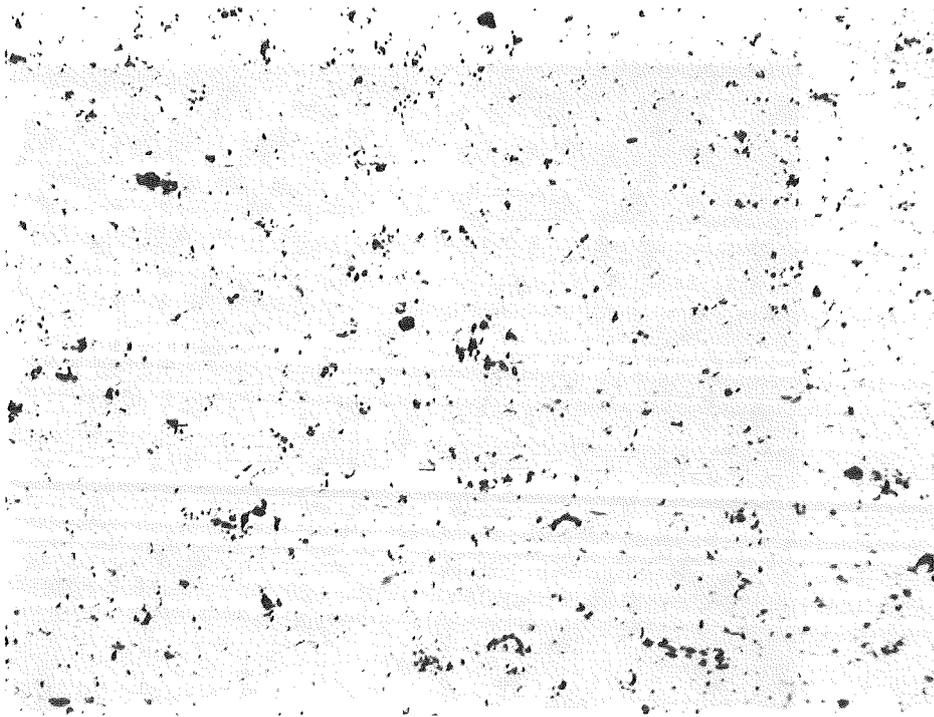


Abb. 9: Probe mit 2,4 % Abbrand nach einer Glühbehandlung 240 min
- 1205 °C, 200:1

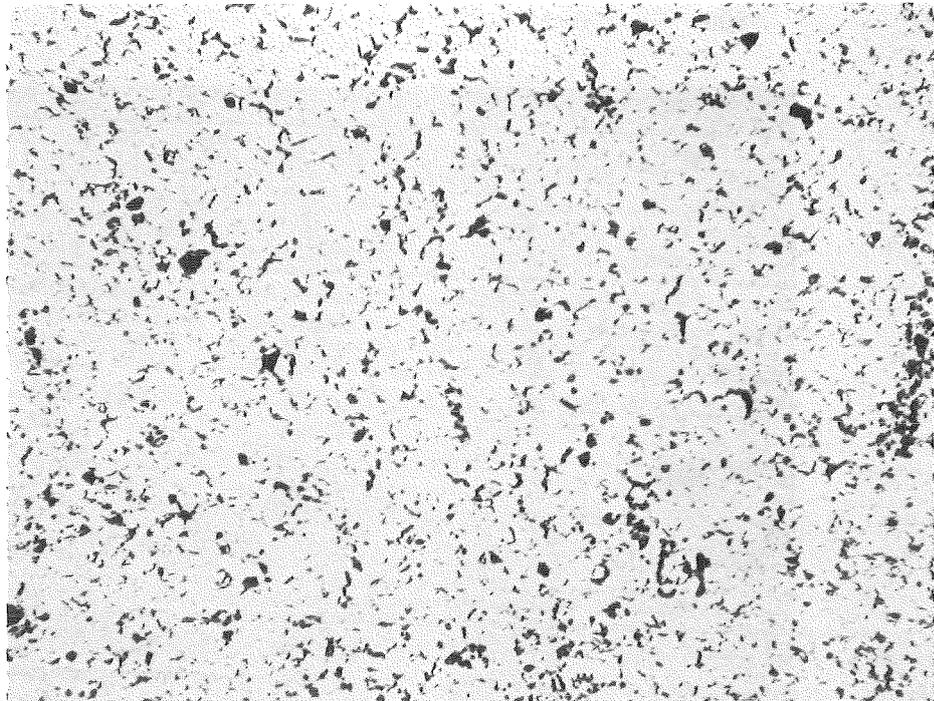


Abb. 10: Probe mit 2,4 % Abbrand nach einer Glühbehandlung 15 min
- 1525 °C, 200:1

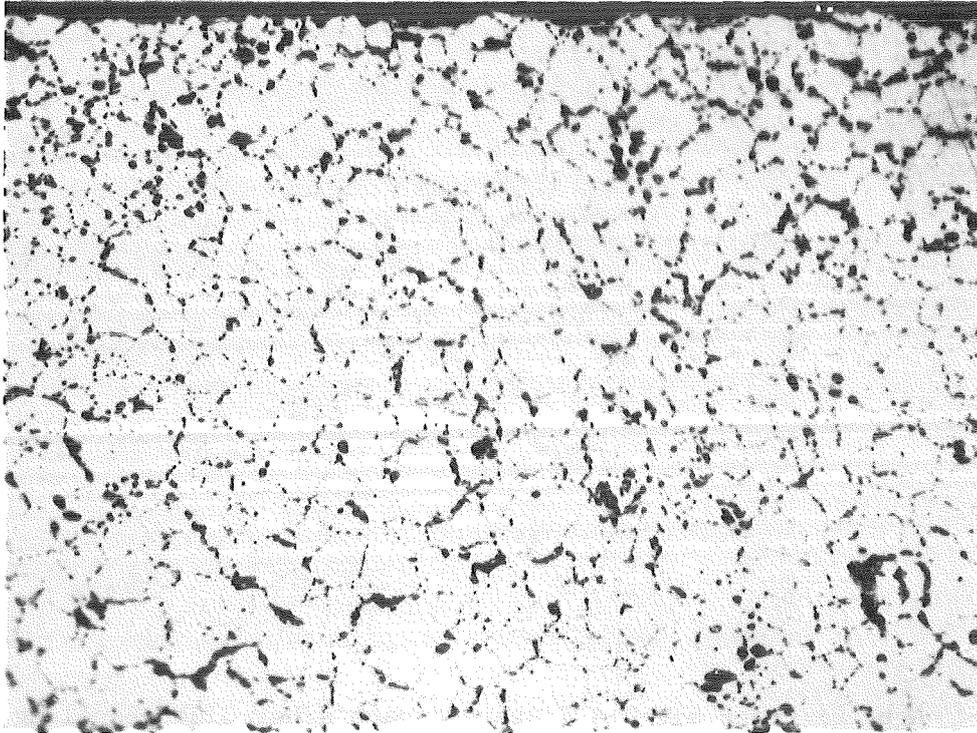


Abb. 11: Probe mit 3,8 % Abbrand nach einer Glühbehandlung 2,5 min -
1800 °C, 500:1

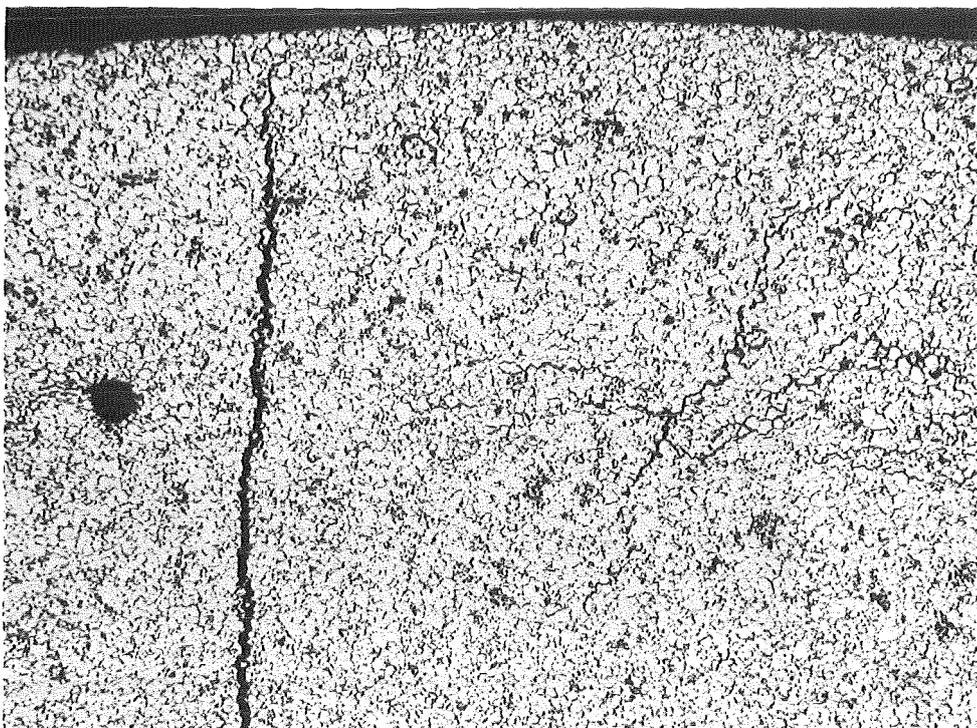


Abb. 12: Probe mit 3,8 % Abbrand nach einer Glühbehandlung 15,4 min -
1800 °C, 100:1

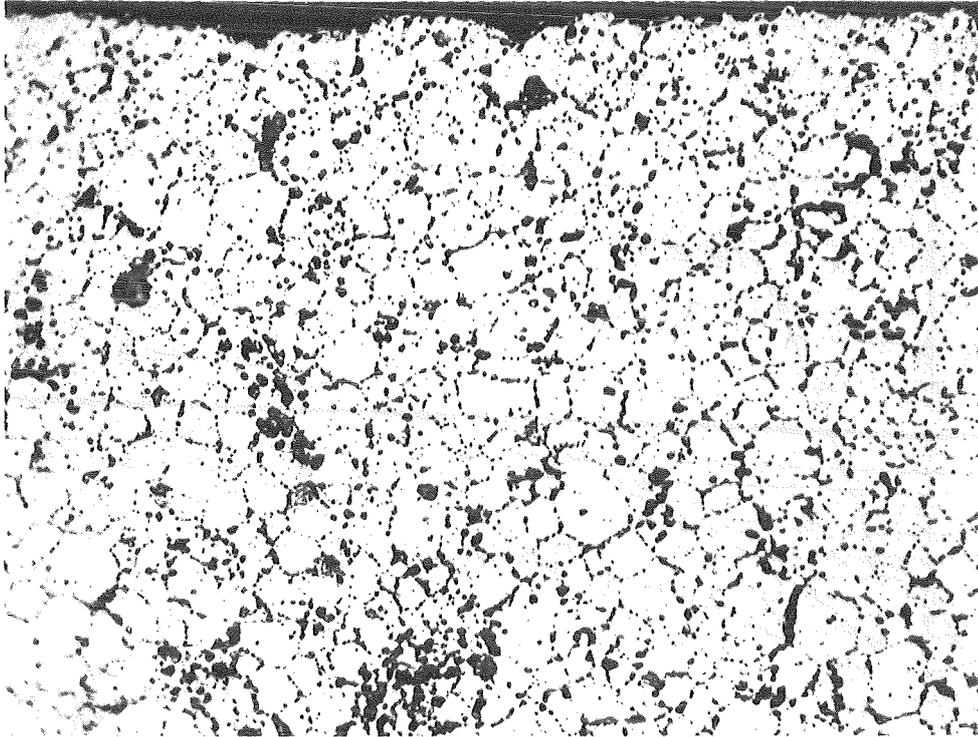


Abb. 13: Probe mit 3,8 % Abbrand nach einer Glühbehandlung 15,5 min
- 2000 °C, 500:1

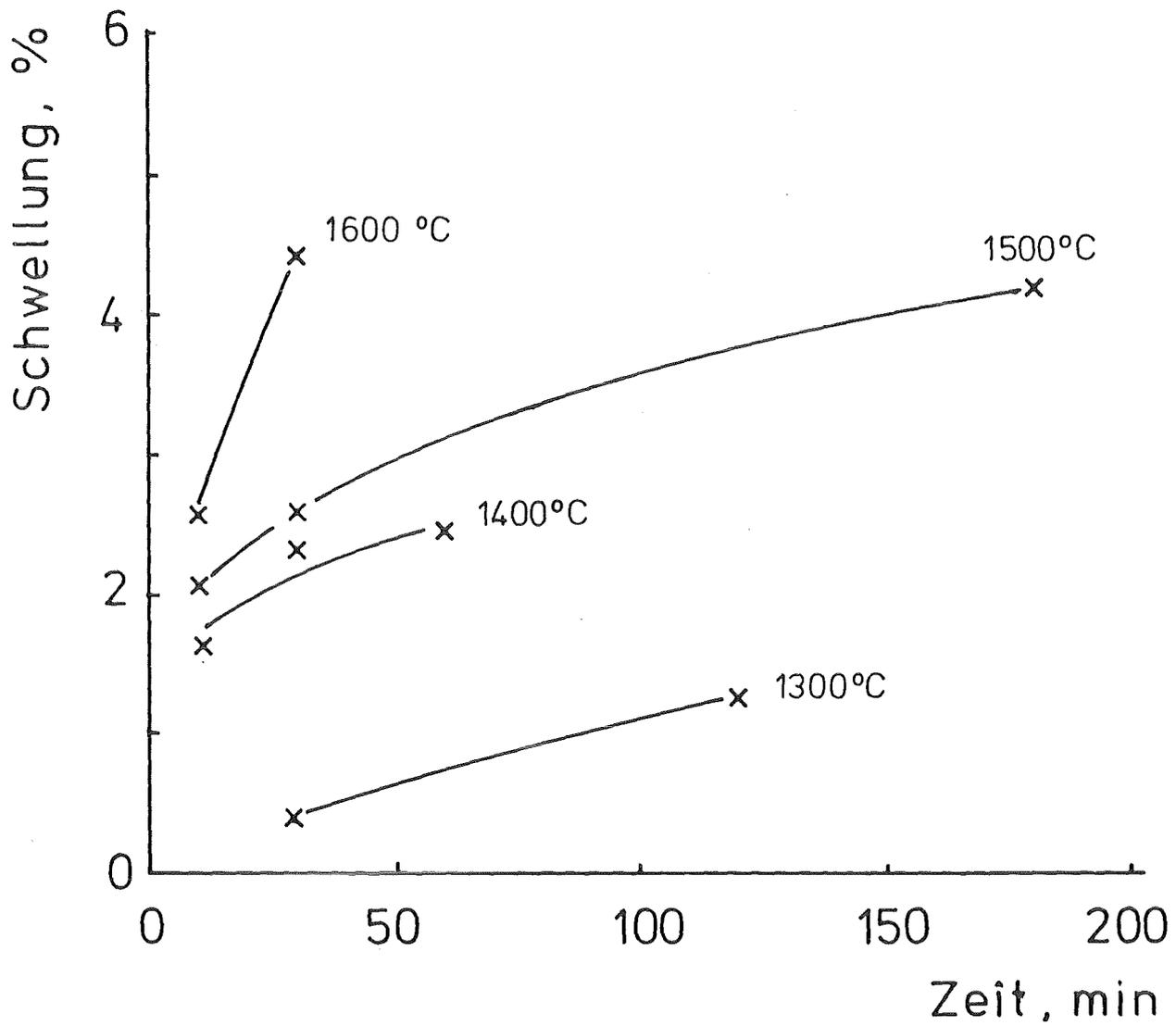


Abb. 14: Schwellung bei verschiedenen Glühtemperaturen in Abhängigkeit von der Glühzeit (Probenabbrand 3,7 %)

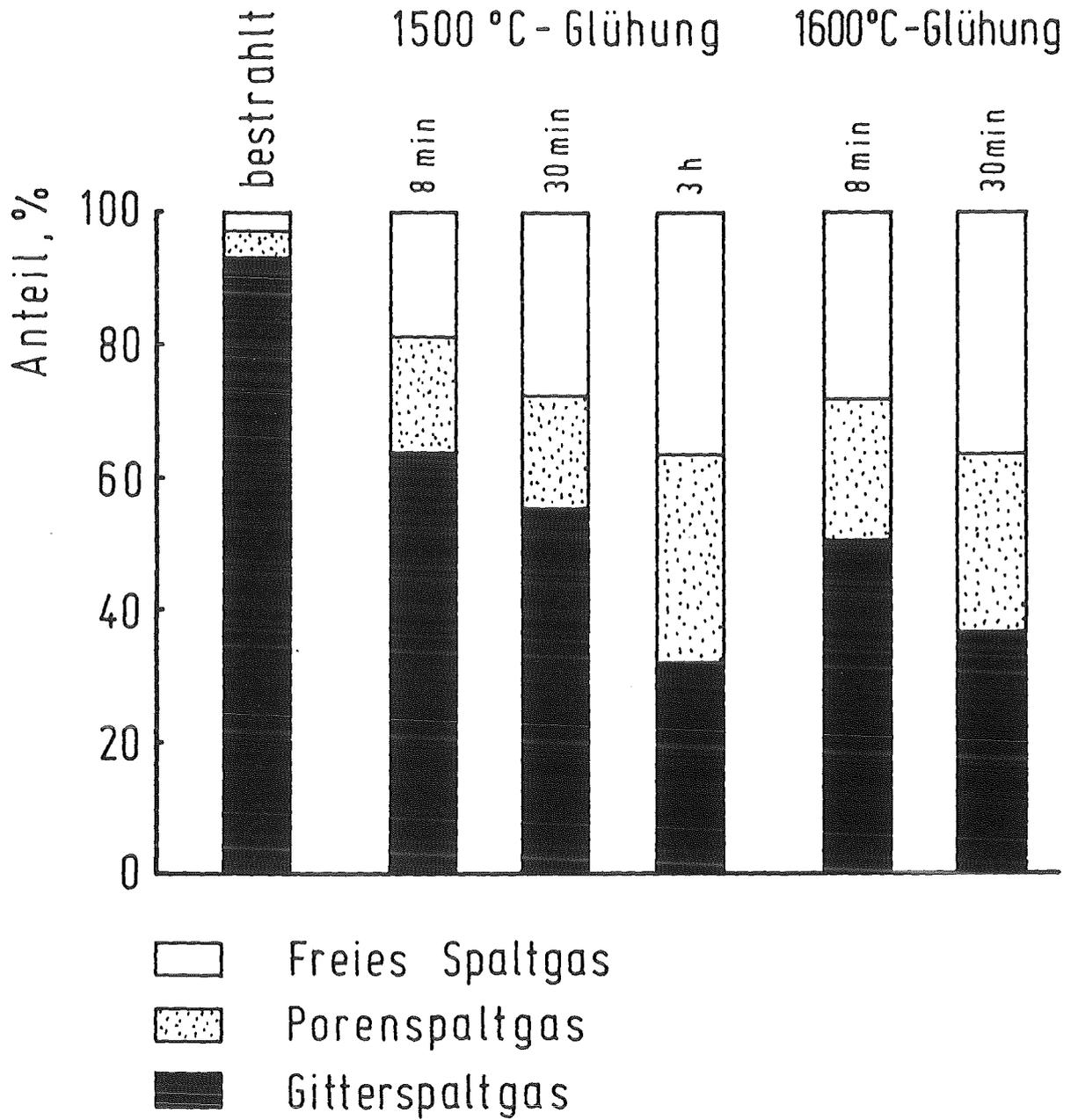


Abb. 15: Spaltgasverteilung in Proben mit 3,7 % Abbrand nach verschiedenen Glühbehandlungen