

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

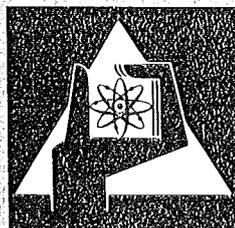
November 1975

KFK 2246
EUR 5207d

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

**Problematik eines Core-Catchers für einen gasgekühlten
Schnellen Brüter**

M. Dalle Donne, S. Dorner



**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

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2246

EUR 5207d

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

Problematik eines Core-Catchers für einen gasgekühlten
Schnellen Brüter

M. Dalle Donne*)

S. Dorner

*) Euratom, delegiert zum Projekt Schneller Brüter Karlsruhe

(Vortrag am Institut für Kernenergetik der Akademie der
Wissenschaften der Weißrussischen Sowjetischen Sozialis-
tischen Republik, Minsk, November 1975).

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

Eine russische Fassung dieses Berichtes ist bei der
Literaturabteilung der Gesellschaft für Kernforschung mbH.,
Karlsruhe, unter der gleichen Berichtsnummer erhältlich.

Zusammenfassung

Im ersten Teil des Vortrages wird über die Ausgangsproblematik der Auffangwanne für ein niedergeschmolzenes Core -Core-Catcher - berichtet, wobei insbesondere auf die Verhältnisse in einem heliumgekühlten Brüter eingegangen wird.

Die Wärmeabfuhr vom niedergeschmolzenen Kern eines mit Heliumgas gekühlten Schnellen Brüters (GSB) kann im Prinzip entweder ohne Einbringen eines zusätzlichen Kühlmittels auf die Coreschmelze - Kühlung durch Strahlung - oder mittels für den Störfall bereitgehaltenen Kühlmittels -Kühlmittelkühlung- erfolgen. Die beiden Verfahren werden erläutert. Bei der Kühlung durch Strahlung treten neben Materialproblemen insbesondere konstruktionstechnische Fragen auf. Beim zweiten Verfahren, d.h. bei der Kühlmittelkühlung, wurden bereits die verschiedensten Kühlmittel diskutiert, so z.B. Wasser, Salzschnmelzen und flüssiges Metall wie Blei. Bei allen diskutierten Varianten treten noch unbeantwortete Fragen auf; über deren Lösungsansätze wird berichtet.

In einem hypothetischen Störfall mit Coreschmelzen ist nicht auszuschließen, daß aus den Wärmetauschern auch Wasser bzw. Wasserdampf in den Corebereich gelangt und danach Wasserstoff im Containment freigesetzt wird. Im zweiten Teil des Vortrages wird auf dieses Problem eingegangen. Von den drei möglichen Vorgängen zur Wasserstofffreisetzung:

1. Thermische Zersetzung des H_2O bei hohen Temperaturen
 - Dissoziation,
2. Zersetzung des Wassers durch radioaktive Strahlung
 - Radiolyse,
3. Reaktion des Wassers mit den Komponenten der Coreschmelze
 - chemische Reaktion

stellt nur der letzte Vorgang ein ernstes Problem dar, da es unter anderem auch zu Knallgasbildung kommen könnte.

Weil das Wasser auch als geeignetes Kühlmittel zur Kühlung einer GSB-Coreschmelze erscheint, wird auf dieses Problem ausführlicher eingegangen. Da das GSB-Kühlmittel Helium auch nach einem hypothetischen Störfall als Inertisierungsmittel wirkt und man zusätzliche Maßnahmen ergreifen kann, läßt sich beweisen, daß es in einem GSB zu keiner Knallgasbildung kommen kann.

Problems of a core catcher for a Gas Cooled Fast Breeder Reactor

Abstract

In the first part of the report a discussion of the general problems of the core-catcher to cool the molten down core is presented, in the particular for the case of a Helium Cooled Fast Breeder Reactor (Gas Cooled Fast Reactor, GCFR)

The heat transfer from the molten core of a Helium Cooled Fast Reactor can occur either without an emergency extra-coolant, i.e. by means of thermal radiation, or by means of an emergency coolant, which is kept in storage for this purpose. Both systems are discussed. With the first system there are material and design problems. With the second system various liquids, such as water, molten salts or molten metals (lead) have been considered as emergency coolants. With all these coolants there are still open questions, for some of which a possible solution is indicated in the paper.

During a hypothetical accident with core melt down it is possible that water and/or water vapour from the heat exchangers comes into contact with the core and hydrogen is formed in the containment. This problem is discussed in the second part of the paper. Of the three possible ways of hydrogen formation:

1. thermal splitting of H_2O by high temperatures - dissociation
2. splitting of water through radioactive irradiation - radiolysis
3. reaction of water with the components of the core melt -
- chemical reaction

only the last process gives a real problem because of possible formation of oxyhydrogen gas.

Due to the fact that water appears to be a convenient coolant for a GCFR-core melt, this method is dealt in more detail in the paper. It is possible to show that in a GCFR no formation of oxyhydrogen gas is possible, due to the presence of the helium coolant, which also after a hypothetical melt-down accident acts as a dilution medium, and because of possible actions which can be performed during or after the accident.

Аннотация

В первой части доклада сообщается об исходной проблематике, связанной с созданием улавливающего бака для расплавляющейся активной зоны – так называемого "кор-кетчера" –, причем внимание обращается особенно на условия в реакторе-размножителе с гелиевым охлаждением.

Теплоотвод из расплавленной активной зоны охлаждаемого гелием быстрого реактора-размножителя (ГОбРР) по существу может осуществляться или без применения дополнительного средства охлаждения расплава активной зоны – охлаждением путем теплового излучения – или с помощью предназначенного на случай аварии средства охлаждения – охлаждением с применением теплоносителя. Оба метода описываются в настоящем докладе. В случае охлаждения тепловым излучением наряду с материальными проблемами возникают, в частности, конструктивно-технические вопросы. В случае второго способа, т.е. охлаждения теплоносителем, обсуждались уже самые разные средства охлаждения, так, например, вода, соляные расплавы и жидкий металл, как свинец. Для всех дискутируемых вариантов появляются вопросы, на которые пока нет ответа и о подходах к решению которых сообщается.

В случае гипотетической аварии с расплавлением активной зоны нельзя исключить возможность, что из теплообменников вода или водяной пар попадает в область активной зоны и затем водород выделяется в корпусе безопасности. Вторая часть доклада занимается как раз этой проблемой. Из трех возможных процессов выделения водорода:

1. термическое разложение H_2O при высоких температурах – диссоциация,
2. разложение воды радиоактивным излучением – радиолит,
3. взаимодействие воды с компонентами расплава активной зоны – химическая реакция

только последний процесс выдвигает серьезную проблему, так как, между прочим, возможно было бы образование гремучего газа.

Поскольку вода кажется также и пригодным теплоносителем для охлаждения расплава активной зоны ГОБРР, особенное внимание уделяется этой проблеме. Так как теплоноситель для ГОБРР, гелий, действует как средство инертизации также и после гипотетической аварии и можно принять дополнительные меры, можно показать, что в ГОБРР образование гремучего газа не может иметь места.

1. Einleitung
2. Verhältnisse in einem gasgekühlten schnellen Brüter nach einem Kernniederschmelzen
3. Kühlung der Schmelze durch Strahlung
4. Kühlmittelkühlung
 - 4.1. Kühlung mit Wasser
 - 4.2. Kühlung mit Salzen
 - 4.3. Kühlung mit Blei
5. Wasserzersetzung bei einem Kernschmelzen
6. Vermeidung der Wasserstoffbildung
7. Einfluß von Helium auf die Zündgrenze
8. Erniedrigung des Gasdruckes in der Sicherheitshülle
 - 8.1. H_2 -Rekombination
 - 8.2. O_2 -Absorption
9. Zusammenfassung und Ausblick

1. Einleitung

Bei der Auslegung von Reaktoren wird stets darauf geachtet, daß die Kühlung des Kernes unter allen möglichen Umständen gewährleistet ist. Wird der Kern eines Reaktors ungenügend gekühlt, dann kann das zu seinem Niederschmelzen führen. Falls keine geeignete Vorrichtung zum Auffangen dieser Kernschmelze -Core-Catcher- vorgesehen ist, kann diese unkontrolliert außerhalb des Sicherheitsbehälters gelangen. Um auch die mit einem solchen hypothetischen Unfall vorhandenen Risiken abzudecken, untersuchen wir auch, wie eine solche geschmolzene Kernmasse in einem "Core-Catcher" bewältigt werden kann [1,2].

Bislang wurden bei den Überlegungen zur Auslegung von Reaktoren Unfälle, die zum Niederschmelzen des Kernes führen, so unglaublich angesehen, daß man sie nicht als Auslegungsunfall betrachtet hat. Eine genaue Untersuchung der Reaktoren mit verschiedenen Kühlmitteln zeigt, daß die dynamischen Vorgänge, die zum Kernniederschmelzen führen könnten, sehr unterschiedlich sind. So zeigt sich bei den wasser- und flüssigmetallgekühlten Reaktoren, daß die Notkühlung den Abschmelzvorgang zwar verzögern würde, daß aber andererseits die Gefahr einer chemischen Reaktion, wie z.B. Metall-Wasser bzw. einer thermischen Explosion von Brennstoff-Natrium weitere Probleme mit sich bringt. Diese zusätzlichen Probleme, wie Reaktionen zwischen Kernmaterialien und Kühlmittel treten beim gasgekühlten Reaktor nicht auf, wobei hier an die Kühlung mit Helium gedacht ist. Die Kühlung mit Distickstofftetroxid wird hier nicht betrachtet.

2. Verhältnisse in einem gasgekühlten schnellen Brüter nach dem Kernniederschmelzen

Wegen der geringen Wärmekapazität und der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Heliums wird es bei einem Gasbrüter mit keinem zusätzlichen Kühlmittel im Core-Catcher zu keiner Fragmentation, d.h. zu keiner Granulatbildung der Kernschmelze kommen. Dies gilt auch für den Fall eines tropfenweisen Abschmelzens des Kerns, da sich auch in diesem Fall eine zusammenhängende Schmelze am Boden der Auffangwanne bildet. Das wird bewirkt durch die geringe Wärmeabfuhr von der Oberseite der niedergeschmolzenen Masse und durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des volumenbeheizten, oxidischen Brennstoffs. Das heißt andererseits, daß die thermisch-kritische Schichtdicke gering ist und daß die Verteilung der flüssigwerdenden Masse rasch erfolgt. Damit wird aber zugleich die Bildung einer kritischen Masse und daraus folgend eine nukleare Explosion verhindert. Im ungünstigen Fall wird man bei einem Gasbrüter nach Beendigung des Unfalls mit einer Schmelze im Core-Catcher zu tun haben, die sich bis in die Nähe ihres Siedepunktes aufheizt. Wie zu vermuten war und durch Experimente gezeigt ist [3], ist der oxidische Brennstoff und das metallische Strukturmaterial auch in der flüssigen Phase getrennt. Die Spaltprodukte werden entsprechend ihrer Eigenschaften auf die Schichten verteilt sein, was einer Aufteilung der Nachwärme von 50% in der oxidischen, 30% in der metallischen Phase und 20% der Nachwärme im Gasraum entspricht.

3. Kühlung der Schmelze durch Strahlung

Die Kernschmelze kann sich bis in die Nähe ihres Siedepunktes auch bei intensiver Bodenkühlung aufheizen, da die an der Auffangwanne anliegende und erstarrte Schicht wegen ihrer schlechten Wärmeleitung den Wärmefluß sehr stark mindert, wie das aus Abb.1 bzw. 2 von L.Barleon [1] hervorgeht. Abb.1 zeigt das Temperaturprofil in der Schmelze; und Abb.2 zeigt den Wärmefluß nach unten, d.h. durch die erstarrte Oxidschicht und nach oben in Abhängigkeit von der Nachwärme.

Der große Wärmefluß nach oben würde ein Abschmelzen der Reaktoreinbauten bewirken. Um das Abschmelzen zu verhindern, muß eine gekühlte Abdeckung vorgesehen werden. Diese Abdeckung muß so konstruiert sein, daß gewährleistet ist, daß die heiße Kernmasse möglichst schnell in den abgedeckten Bereich des Core-Catchers gelangt. Abb.3 stellt eine schematische Skizze einer solchen Konstruktion dar. Es wurden auch modifizierte Vorrichtungen dieser Art diskutiert, so z.B. eine in mehrere Zellen unterteilte Wanne [4]. Bei allen diskutierten Vorschlägen tauchen entweder konstruktions- oder funktionstechnische Schwierigkeiten auf, deshalb wurde bereits auch die Kühlung der Reaktoreinbauten, wie Schilde, Gitterplatten usw. durch ein eingebautes Kühlsystem vorgeschlagen [5]. Aber auch dieser Vorschlag erscheint wenig zuverlässig und erfordert einen erheblichen technischen Aufwand.

4. Kühlmittelkühlung

Da man bei der Kühlung durch Strahlung sehr hohe Temperaturen der Schmelze nicht vermeiden kann, und damit werkstoffliche und ingenieurmäßige Probleme auftauchen, liegt es nahe, nach einer Kühlung der Schmelze mit einem geeigneten Mittel Ausschau zu halten. Dabei ist insbesondere an das Wasser zu denken.

4.1 Kühlung mit Wasser

Bei der Kühlung mit Wasser soll eine entsprechende Menge Wasser in die Reaktorkaverne gespült werden. Der an den erhitzten Reaktoreinbauten und durch die Kernschmelze erzeugte Wasserdampf soll an Wärmesenken der Sicherheits-hülle kondensiert werden und damit den Wärmeabtransport von der Schmelze bewirken. Auch bei dieser Kühlmethode werden noch verschiedene ungeklärte Fragen aufgeführt, so z.B. der Transport der Nachwärme von der Schmelzoberfläche zum eingespritzten Wasser, Dampfdruckaufbau im Spannbetonbehälter, sowie die chemische Reaktion von Wasser mit der Schmelze u.a.m. [5]. Auf die zuletzt angeführte Frage soll noch eingehender eingegangen werden, da, wenn man schon einen hypothetischen Kernschmelzunfall annimmt, nicht auszuschließen ist, daß durch einen Schaden in Wärmetauschern ein Wassereintrich in die Reaktorkaverne erfolgt.

4.2 Kühlung mit geschmolzenen Salzen

Die Auswahl eines geschmolzenen Salzes als Kühlmittel einer Kernschmelze kann ähnlich erfolgen, wie die Auswahl von geschmolzenen Salzen für die Kühlung von Reaktoren. Dabei wird nur zu beachten sein, daß für die Coreschmelze-Kühlung ein Salz erforderlich ist, das bei relativ nied-

rigen Temperaturen einen hohen Dampfdruck oder aber eine sehr gute Leitfähigkeit aufweist. Im ersten Falle erfolgte der Wärmetransport mittels Salz durch Verdampfen an der Schmelze und Kondensation an vorgesehenen Wärmesenken der Sicherheitshülle, d.h. man hätte einen ähnlichen Vorgang wie bei der Wasserkühlung. Für den zweiten Fall müßten ähnliche Bedingungen geschaffen werden, wie bei der nachher zu besprechenden Metallkühlung. Da es unwahrscheinlich erscheint den Bedingungen für den zweiten Fall zu entsprechen, wird dieser Fall hier nicht weiter diskutiert.

In Tabelle 1-5 sind Salze bzw. Salzgemische mit niedrigem Schmelzpunkt bzw. Siedepunkt zusammengefaßt. Bei den Zwei- und Dreistoffsystemen sind Systeme berücksichtigt, bei denen zumindest eine Komponente einen niedrigen Siedepunkt aufweist.

Die Fluoride und Chloride erscheinen wegen ihrer chemischen Stabilität am geeignetsten. Bei Halogeniden mit mehreren Wertigkeiten werden die möglichen chemischen Vorgänge komplex. Daher soll als Beispiel das zweiseitige Salz Zinkchlorid näher betrachtet werden.

Von einem Salz als Kühlmittel ist u.a. zu verlangen, daß es eine chemische Stabilität und keine starke Korrosivität aufweist. Die Wechselwirkung mit den Komponenten der Coreschmelze läßt sich aus den entsprechenden Bildungsenergien in etwa abschätzen. In Abb.4 sind die freien Bildungsenergien des $ZnCl_2$ und einiger Komponenten der Coreschmelze eingetragen. Daraus ist zu ersehen, daß das Chlor gegenüber Zink eine höhere Affinität hat als gegenüber Eisen, Nickel und mit Einschränkung gegenüber Chrom - also gegenüber den Hauptelementen des Stahls. Bei Uran ist es umgekehrt, nur ist hier zu beachten, daß das Uran in der Schmelze nicht elementar vorliegt, sondern als Uranoxid. Daher hat man bei der Abschätzung der Wechselwirkung die Summenformel



in Betracht zu ziehen.

Die Summenformel der Bildungsenergien bei 1000 K, also knapp unterhalb des Siedepunktes ist

$$\begin{aligned} (-99) - (2 \cdot 35) &\neq -(2 \cdot 59) - 46 \\ &- 169 \neq - 164 \end{aligned}$$

Demnach ist zu erwarten, daß bei einem direkten Kontakt zwischen UO_2 und ZnCl_2 keine stärkere Reaktion eintritt. Aber auch bei einer Reaktion würde sich nur ein Gleichgewicht einstellen. Das Urantetrachlorid hat zudem einen niedrigen Schmelzpunkt (angegeben wird 567°C bzw. 590°C) und einen niedrigen Siedepunkt (angegeben wird 618°C bzw. 787°C). Daraus wäre zu folgern, daß auch bei einer Reaktion durch das entstehende und verdampfende Urantetrachlorid Wärme von der Kernschmelze abgeführt wird. Die Spaltprodukte machen das System komplexer.

Bei der Kühlung mit geschmolzenen Salzen wird man auch an geeignete Gemische denken. Das Salz bzw. Salzgemisch könnte man entweder im Core-Catcher bereithalten oder nach einem Unfall zuführen. Die Zufuhr könnte auch als Pulversprühung erfolgen. Dabei hätte man evtl. den Vorteil, daß man diese Partikel leichter in gewünschter Größe als bei Wasser einsprühen könnte.

Obwohl die Verwendung eines Salzes als Kühlmittel einer Kernschmelze attraktiv erscheint, sind keine eingehendere Untersuchungen noch vorgenommen, die auf jeden Fall erforderlich wären. Hinzuweisen ist noch, daß die Verdampfungswärme der Alkalichloride um $40\text{-}55 \text{ kcal/Mol}$ schwankt [6], das ergibt eine Verdampfungswärme bis 160 cal/g , also in der Größenordnung wie bei den Metallen.

4.3 Kühlung mit flüssigem Metall insbesondere mit Blei

Bei der Kühlung der Kernschmelze mit einem flüssigen Metall wird man unwillkürlich an die Verhältnisse bei einem natriumgekühlten schnellen Brüter denken, d.h. wo man mit Hilfe des sehr gut wärmeleitenden und bis zu größerer Höhe im Sumpf der Reaktorkaverne befindlichen Natrium die Nachwärme an die Sicherheitshülle abführen will.

Von den in Frage kommenden Metallen scheiden bei einer eingehenderen Nachprüfung fast alle aus, so z.B. die Alkalimetalle wegen ihrer Reaktivität; Zinn, Zink, Indium und Gallium wegen ihrer Korrosivität im flüssigen Zustand gegenüber Stahl. Quecksilber hat eine höhere Dichte als die Kernschmelze und damit würde die Schmelze auf dem Quecksilber zu schwimmen kommen. Ernsthaft wurde lediglich das Blei als Kühlmittel für eine Kernschmelze ins Gespräch gebracht [7,8]. Nach den Vorstellungen in Battelle Memorial Institut [7] sind zwei Möglichkeiten zur Kernschmelzekühlung nach dem sogenannten "Lead-Slurry-Concept" diskutiert worden:

a) das Blei wird mit Wasser überschichtet,
b) der Core-Catcher besteht nur aus Blei, d.h. ohne Wasser.
In beiden Fällen wird angenommen, daß der oxidische, d.h. der Brennstoffanteil der Schmelze im Blei wegen der Dichteverhältnisse suspendiert. Der leichtere, metallische Teil der Schmelze schwimmt auf dem Blei. Der suspendierte oxidische Teil der Schmelze gibt im ersten Fall seine Wärme über Konvektion und über die metallische Phase an das verdampfende Wasser ab. Im zweiten Fall wird die Wärme über die Seitenwände und über verdampfendes Blei abgeführt.

Auch nach den Vorschlägen von C.A. Goetzmann soll die oxidische Phase der Kernschmelze in Blei suspendiert sein. Die Bleimenge soll um 1000 t für einen 1000 MWe-gasgekühlten Brutreaktor betragen. Diese Bleimenge soll die Nachwärme an die besonders konstruierte Seitenwände ableiten.

Obwohl die Diskussion über dieses Verfahren noch anhält, können Bedenken gegen dieses Verfahren angebracht werden. Eine Nachprüfung der möglichen Dichteänderung sowohl des oxidischen Teils der niedergeschmolzenen Coremasse wie des für die Auffangwanne vorgesehenen Bleis zeigt, daß sich die Dichten sehr stark ändern können. Die Dichteänderung der oxidischen Phase kann durch die Spaltprodukte und der sich während des Störfalles bildenden Oxide verursacht werden. Die Dichte des Bleis der Auffangwanne ändert sich durch die Löslichkeit der Stahlkomponenten im Blei. Diese Dichteänderungen machen eine Suspensionsbildung der oxidischen Phase im Blei fraglich und damit erscheint das darauf basierende Blei-Core-Catcher-Konzept noch unzuverlässig.

Bei der Verwendung von Blei als Wärmeübertragungsmittel im Core-Catcher sind durch die Dichteänderungen in den einzelnen Phasen der Schmelze auch andere Wirkungsweisen dieses Core-Catchers denkbar. Abb. 5 zeigt schematisch die mögliche Anordnung der Phasen.

5. Wasserzersetzung bei einem Kernschmelzen

Wie vorher berichtet denkt man unter anderem auch an Wasser als Kühlmittel für die Kernschmelze und da man in hypothetisch denkbaren Fällen nicht ausschließen kann, daß das Wasser in die Reaktorkaverne gelangt, ist man gezwungen die Frage der Wasserzersetzung und der Wasserstofffreisetzung auch bei einem gasgekühlten Brutreaktor zu untersuchen. Dabei sind folgende Vorgänge zu unterscheiden [9] :

1. Thermische Dissoziation - Zersetzung des Wassers bei hohen Temperaturen;
2. Radiolyse-Zersetzung des Wassers durch Strahlung
3. Chemische Reaktion-Wechselwirkung des Wassers mit den Komponenten der Coreschmelze insbesondere mit Metall

Von den drei möglichen wasserstoffzersetzenden Vorgängen beim Coreschmelzen ist die Radiolyse ein relativ langsam ablaufender Prozeß. So wird in einem freien Containmentvolumen von 50000 m³ eines Druckwasserreaktors von 2000 MW_{th} eine Wasserstoff-Konzentration von 0,56 Vol% nach 30 Tagen errechnet [9]. Die erzeugte Wasserstoffmenge beträgt 0,14 m³ H₂ pro MW_{th} und 30 Tage, d.h. insgesamt 280 m³ H₂. Dabei ist angeführt, daß die angenommenen Bedingungen sehr konservativ sind.

Die thermische Dissoziation führt auch bei sehr hohen Temperaturen und relativ niedrigen Drucken, wie z.B. 3000 K und 10 ata, erst zu einer Dissoziation von 7,64%. Außerdem ist zu beachten, daß sowohl bei der Radiolyse wie bei der thermischen Dissoziation stets neben Wasserstoff auch Sauerstoff bzw. OH freigesetzt wird, so daß neben der Dissoziation zugleich eine Rekombination stattfindet. Bei einer thermischen Dissoziation stellt sich im Temperaturgradienten stets das Gleichgewicht ein, so daß es praktisch zu keiner Explosion durch Knallgasbildung kommen kann.

Bei einer chemischen Reaktion wird der Sauerstoff gebunden und nur der Wasserstoff wird freigesetzt. Als Reaktionspartner bei einem hypothetischen Unfall des Kernschmelzens bieten sich die metallischen Komponenten an. Die Metall-Wasser-Reaktion kann sehr schnell verlaufen und daher könnten größere Mengen Wasserstoff freigesetzt werden. Sollte der freigesetzte Wasserstoff auf seinem Wege von der Entstehungsstelle so abgekühlt werden, daß er bei einem Zusammentreffen mit dem Sauerstoff aus der Containmentluft nicht sofort rekombiniert, so wäre eine Möglichkeit zur Knallgasbildung gegeben. Bei Vorhandensein einer Zündung käme es zur Explosion.

In Zusammenhang mit einer Wasserkühlung der Kernschmelze wäre noch auf die mögliche Wasserdampf-Explosion bei einem plötzlichen Zusammentreffen einer größeren Menge der fragmentierten Kernschmelze mit Wasser hinzuweisen. Diese Explosion läßt sich mit Sicherheit vermeiden, wenn sicher-

gestellt ist, daß keine Schmelze in einem Wassersumpf gelangt. Übrigens erscheint es erforderlich, die Gefährlichkeit dieses Effektes genauer zu untersuchen, denn andererseits könnte damit unter Umständen eine gefährliche Kompaktierung verhindert werden.

6. Vermeidung der Wasserstoffbildung

Nach der Feststellung, daß durch die Metall-Wasser-Reaktion die größere Menge Wasserstoff von den wasserstofferzeugenden Vorgängen entstehen könnte und daher von da die größte Gefahr zu einer Knallgasbildung ausgeht, liegt es nahe, daß man nach Möglichkeiten zur Vermeidung der Wasserstoffbildung sucht. Als sicherer Weg dazu wäre die Trennung der Reaktionspartner, d.h. das Wasser von der metallischen Phase fern zu halten. Während des Niederschmelzvorganges läßt sich das nicht erreichen. Beim bereits niedergeschmolzenen Core sind folgende Trennungen möglich durch:

- a) - Aufbringen einer inerten Schicht auf die Metallschmelze
-Abdeckmittel-
- b) - Zumischen einer Komponente zur Erniedrigung der Dichte des oxidischen Brennstoffes -Verdünnungsmittel-
In diesem Falle käme die oxidische Phase auf der metallischen Phase zu schwimmen.
- c) - Zulegieren schwerer Metalle zu der Stahlschmelze.

Von einem Abdeckmittel wäre zu verlangen, daß es mit Wasser nicht reagiert, der Schmelzpunkt sollte unter dem der Stahlschmelze liegen und die Dichte des geschmolzenen Abdeckmittels müßte geringer sein als die des Stahls. Da die meisten Metalle als Abdeckmittel ausscheiden und die Oxide, die chemisch stabil sind aber eine Löslichkeit mit dem Brennstoff haben, erscheint dieser Weg nicht praktisch. Andererseits bietet die gegenseitige Löslichkeit der Oxide gerade die Möglichkeit den Brennstoff zu verdünnen und

damit zu erreichen, daß die oxidische Phase auf die metallische zu liegen kommt. So wäre es möglich den Brennstoff mit Siliziumoxid zu verdünnen, aber es ist anzunehmen, daß sich dazu auch andere Oxidsysteme eignen.

Von den Zulegierungsmetallen, die eine bedeutend höhere Dichte als 10 g/cm^3 haben und damit die Metallschmelze schwerer machen als die oxidische Phase, kämen nur Tantal, Wolfram, Uran und Quecksilber in Frage. Quecksilber wird man wegen seiner Korrosivität und Toxizität ausscheiden. Tantal und Wolfram haben sehr hohe Schmelzpunkte, so daß zu befürchten ist, daß der Legierungsvorgang relativ langsam verlief. Metallisches Uran hat ein hohes spez. Gewicht von $18,7 \text{ g/cm}^3$ und einen relativ niedrigen Schmelzpunkt. Diese Tatsachen würden für das metallische Uran als Beschwerungs-substanz sprechen, aber andererseits käme in die Reaktorkaverne noch mehr reaktives Material, so daß die Verdünnung der oxidischen Phase am geeignetesten wäre.

7. Einfluß von Helium auf die Zündgrenze

Das Wasser wäre in mancher Hinsicht ein wünschenswertes Kühlmittel für eine Kernschmelze, obwohl mit der dabei auftretenden Wasserzersetzung Probleme entstehen. Darum erscheint es angebracht, den Einfluß von Helium näher zu untersuchen. Diese Arbeiten sind im Gange. Nach den ersten Überlegungen kann geschlossen werden, daß das Helium bei einem Störfall mit Wasserstofffreisetzung als Inertisierungsmittel wirkt, so daß es zu keiner Knallgasbildung bzw. Knallgasexplosion kommen kann.

Nach früheren Untersuchungen engen chemisch inerte Substanzen den Zündgrenzenbereich ein. Der Einfluß der untersuchten Substanzen nimmt in folgender Rangfolge zu [13, vgl. 9] :

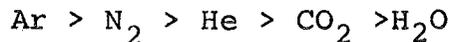


Abb. 6 und 7 zeigen die Zündgrenzen von Wasserstoff in Luft mit Kohlendioxid bzw. Stickstoff sowie mit Wasserdampf [9]. Abb. 8 wiedergibt die Zündgrenzen von Wasserstoff in Luft mit verschiedenen Verdünnungsstoffen [14-16].

Zur Diskussion des Einflusses des Heliums auf die Zündgrenze des Wasserstoffs ist es erforderlich, einige Daten des Gasbrüters festzuhalten. Nach [5] befänden sich in der Sicherheitshülle mit einem freien Volumen von 60000 m³ nach einer Kernschmelze ein Gemisch von 72 t Luft und 12 t Helium mit einem Gesamtdruck von 3 bar und einer Temperatur von 140°C. Das bedeutet, daß das Gasgemisch etwa 54,5 Vol.% Helium enthielt. Die Sauerstoffkonzentration betrage nur ca. 8,5 Vol.%.

Die Kernschmelze setzte sich aus über 120 t Brenn- bzw. Brutstoff und etwa 39,5 t Stahl zusammen [1]. Wenn man Stahl gleich Eisen ansetzt und die Oxidation des Eisens zu FeO annimmt, dann würden bei vollständiger Oxidation des Eisens etwa $70,6 \cdot 10^4$ Mol Wasserstoff entwickelt. Nach der Kernschmelze wäre dann in der Sicherheitshülle ein Gasgemisch aus ca. 11,3 Vol.% Wasserstoff, 40,3 Vol.% Luft und 48,4 Vol.% Helium. Daraus folgte, daß man sich etwa an der Inertisierungsgrenze befände, wenn man die Inertisierungswirkung von Helium etwa dem des Wasserdampfs gleichsetzte (vgl. Abb. 8 und Abb. 7), auf jeden Fall ist man weit entfernt von dem Detonationsbereich.

Die Verhältnisse werden noch mehr entschärft, wenn man annimmt, daß es unwahrscheinlich erscheint, daß der ganze metallische Anteil der Schmelze mit dem Wasser reagieren kann, und daß ein Teil des Wasserstoffs noch unterhalb der Zündgrenze bei höherer Temperatur rekombinieren wird.

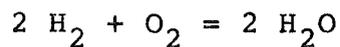
Außerdem ist zu beachten, daß die Untersuchungen des zeitlichen Verlaufs eines Störfalles mit H_2 -Freisetzung bei Leichtwasserreaktoren zeigten [17], daß zuerst Wasserdampf erzeugt wird und danach eine korrelierende Wasserstoff- und Wasserdampfproduktion einsetzt, wie das aus Abb. 9 und 10 hervorgeht.

Der zugleich entstehende Wasserdampf erhöht die Konzentration des Inertisierungsmittels. Nach einem Kernschmelzenunfall hat das Gasgemisch eine Temperatur von $140^{\circ}C$, so daß keine H_2O -Kondensation auftritt. Aber bereits die Tatsache, daß die Wasserstofffreisetzung verzögert und zugleich mit Wasserdampferzeugung erfolgt, sollte es ermöglichen, durch Rekombination oder Absorption einer Komponente des Knallgas, d.h. durch Absorption des Sauerstoffs oder Wasserstoffs, die Konzentration der Gase unterhalb der Zündgrenze zu halten.

8. Erniedrigung des Gasdruckes in der Sicherheitshülle

Da im Gasgemisch nach einem Kernschmelzen mit Wasserstofffreisetzung sowohl Wasserstoff wie Sauerstoff vorhanden sein wird, bieten sich Katalysatoren zur Rekombination dieser Gase zu Wasser an. Die marktüblichen Katalysatoren auf Pd-Basis sind bis $600^{\circ}C$ auch in Gegenwart von H_2O -Dampf wirksam [18]. Die Unsicherheiten durch Vergiftung der Katalysatoren durch flüchtige Spaltprodukte sowie der evtl. ungenügenden Umwälzung des Gasgemisches am Katalysator müssen noch untersucht werden. Die Rekombination des

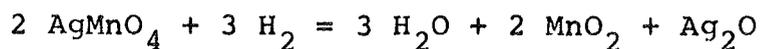
im Containment vorhandenen Sauerstoffs sowie des freigesetzten Wasserstoffs hätte den Vorteil, daß hier auf jeden Fall ein Druckabbau erreicht wird:



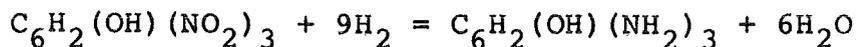
Aus 3 Mol Gas entsteht 2 Mol Wasser bzw. Wasserdampf.

8.1. Absorption von Wasserstoff

Ein technisches Verfahren für eine Absorption des bei einem Coreschmelzen freigesetzten Wasserstoffs ist unbekannt. Deshalb soll hier nur auf die Methoden zur gasanalytischen Bestimmung als Diskussionsgrundlage hingewiesen werden. Bei der Wasserstoffabsorption durch Silberpermanganat nach der Gleichung



würde man enorme Silbermengen bedürfen. Die Absorption durch Pikrinsäurelösungen



erfordert ebenfalls einen hohen Chemikalieneinsatz und bedarf noch einen Pd-Katalysator.

Einen Katalysator erfordert auch die Absorptionsmethode mittels Natriumchloratlösung



Der Einsatz von Katalysatoren macht das Verfahren wegen der Verhältnisse nach einem Unfall noch unsicherer. Daher wird auch die Rekombination des Wasserstoffs mit Dinitroresorcin in wässriger Suspension in Gegenwart eines Nickelkatalysators



wenig aussichtsreich angesehen.

Die Verbrennung des Wasserstoffs an Kupferoxid



würde keinen Druckaufbau verhindern, wenn das H_2O nicht zugleich an einer Wärmesenke kondensiert wird.

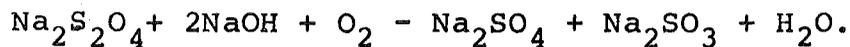
8.2 Absorption von Sauerstoff

Neben der Absorption von Wasserstoff ist auch an die Absorption von dem im Containment vorhandenen Sauerstoff zu denken. Die Absorption von Sauerstoff erscheint wegen seiner größeren Löslichkeit in wässriger Phase erfolgversprechender. Dazu bieten sich die gasabsorptionsmetrischen Bestimmungsmethoden an [19]. Bei der Absorption

mittels einer alkalischen Pyrogallol-Lösung wird eine Lösung aus einem Gewichtsteil Pyrogallol in 6,5 Gewichtsteile einer wässrigen Kalilauge verwendet. Die Lösung ist unter Luftabschluß herzustellen.

Da das Oxyhydrochinon relativ teuer ist, soll die alkalische Oxyhydrochinonlösung zur Sauerstoffabsorption aus billigerem Hydrochinon hergestellt werden.

Neben diesem organischen Absorptionsmittel wären noch die anorganischen zu erwähnen, so die alkalische Natriumdithionitlösung. Die Absorption erfolgt auf Grund der Reaktion:



Eine sehr wirksame Absorptionslösung stellt eine schwefelsaure Chrom (II)-Sulfatlösung dar.

Die Kupfer (I)-Chloridlösung kann ammoniakalisch sauer oder neutral sein.

Von den festen Absorptionsmitteln wäre der gelbe Phosphor und aktives Kupfer anzuführen.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von den Verhältnissen in einem gasgekühlten Schnellen Brüter nach einem hypothetischen Unfall mit Kernschmelzen, wurden die Kühlmöglichkeiten für die Kernschmelze diskutiert. Bis heute ist noch kein anerkanntes Verfahren zur Beherrschung dieses Falles entwickelt.

Läßt man die Schmelze frei, d.h. die Wärme nach oben abstrahlen, muß neben einer intensiven Bodenkühlung auch für eine Kühlung der Restreaktoreinbauten gesorgt werden.

Die Kühlung mit Blei, d.h. die Wärmeabfuhr mit flüssigen Blei an die Containmentwand ist sehr problematisch.

Die Kühlung der Schmelze mit verdampfenden und kondensierenden geschmolzenen Salzen erweist sich als wirksam und entwicklungsfähig. Weitere Arbeiten sind erforderlich.

Da man nach einem Unfall mit Kernschmelzen einen Wassereinbruch in die Reaktorkaverne nicht ausschließen kann, muß das Wasser als Kühlmittel besonders beachtet werden. Die ersten Untersuchungen zeigen, daß die als Problem angesehene Wasserzersetzung durch das Helium, das als Inertisierungsmittel wirkt, weniger gefährlich erscheint. Auch ein Verfahren mit Wasserkühlung erfordert noch eingehendere Untersuchungen auch experimenteller Art. Da das Core-schmelzen immer mehr in den Blickpunkt der Reaktorsicherheit rückt, könnten bei einer Wasserkühlung der Schmelze Parallelen zu den Problemen bei Leichtwasserreaktoren gefunden werden und damit käme die Kernschmelzenkühlung auf breitere Forschungsbasis.

Bei einem Gasbrüter mit Distickstofftetroxidkühlung wird man das Wasser als Kühlmittel der Kernschmelze wohl ausschließen müssen, da erschiene die Kühlung mit geschmolzenen Salzen erfolgversprechender.

Literatur

1. L.Barleon, M.Dalle Donne and S.Dorner
Temperature and Heat-Flux Distribution in the Molten
Core Mass of a GCFR after a Hypothetical Melt-Down
Accident
KFK-1755 - EUR 4852e (1972)
2. L.Barleon, M.Dalle Donne, S.Dorner
Some Considerations on the Development of a Core-
Catcher of a Gas Cooled Fast Reactor
KFK 2036 - EUR 4977e (1974)
3. J.Fischer, J.D.Schilb and M.G.Chasanov
Investigation of the Distribution of Fission Products
among Molten Fuel and Reactor Phases
ANL-7864 (1971)
4. C.A.Goetzmann, persönliche Mitteilung
KWU-Erlangen
5. M.Dalle Donne, C.A.Goetzmann
Design and Safety Considerations for a 1000 MWe
Gas Cooled Fast Reactor
Proc. of 1st European Nuclear Conference,
April 21-25, 1975, Paris
6. M.Blander
Molten Salt Chemistry
Interscience Publishers, New York, 1974
7. L.David et al.
Evaluation of the Applicability existing Data to the
Analytical Description of a Nuclear Accident Core
Meltdown Evaluation
BMI-1910 (Battelle Memorial Inst., Juli 1971)

8. C.A.Goetzmann
KWU-Erlangen, 25.7.1975 persönliche Mitteilung
9. Statusbericht - Wasserstoffbildung bei Leichtwasser-
reaktoren;
Laboratorium für Reaktorregelung und Anlagensicherung,
Garching, MRR-125 (April 1973)
10. S.Dorner
Theoretische Untersuchungen zur Wasserstoffbildung
beim LWR-Coreschmelzen,
KFK 1859 (1973)
11. S.Dorner, G.Schumacher
Untersuchungen zur Wasserstoff-Bildung und Rekombi-
nation beim LWR-Coreschmelzen
KFK 1908 (1974) S.138
12. S.Dorner, K.Schretzmann
Untersuchungen zur Wasserstoffbildung und Rekombi-
nation beim LWR-Coreschmelzen
KFK 2050 (1974) S.210
13. J.van Heinigen
Explosion-Limits I, On the Influence of Argon,
Nitrogen, Helium and Carbon Dioxide on the Ex-
plosion-Limits of Hydrogen, Carbon Monoxide, Methane
and Butane in Air
Rec. Travaux chim. des Pays-Bas 55 (1936) 65-75
14. R.Wischnewski
Untersuchungen zur Wassergasbildung bei Störfällen
an HTR-Reaktoren am Beispiel einer geplanten Heiß-
gastemperaturerhöhung auf 950°C am AVR-Reaktor
Dissertation, Technische Hochschule, Aachen, 1973

15. H.F.Coward, G.W.Jones
Limits of Flamability of Gases and Vapors
U.S.Bureau of Mines, Bull. No. 503 (1952)
16. J.S.Years, L.Shnidman
The Extinction of Gas Flames by Steam
Proc.Am.Gas Assoc. 20 (1938)
17. H.Körber
Untersuchungen des Einflusses einiger wichtiger
Kenngrößen beim hypothetischen Kernschmelzunfall,
Bericht Nr. 2-12 Institut für Kernenergetik, Uni-
versität Stuttgart, 1975
18. D.Ksinsik und G.Brückel
Die katalytische Entfernung von Sauerstoff, Wasser-
stoff und Kohlenmonoxid aus Gasen
Doduco Information 3, 11 (1970) - Pforzheim
(vorgetragen auf Achema-Tagung 1970)
19. F.Bayer und G.Wagner
Gasanalyse, Methoden der Arbeitspraxis
F.Enke Verlag, Stuttgart 1960

Tabelle 1: Salze mit einem Schmelzpunkt unterhalb 500°C

bis 100°C		bis 300°C		bis 500°C				
Salz	Schmelz-Siedepunkt °C	Salz	Schmelz-Siedepunkt °C	Salz	Schmelz-Siedepunkt °C			
AsCl ₃	-18	130,2	GaBr ₃	121,5	278,8	BeCl ₂	440	520
MoF ₆	17	35	GaCl ₂	170,5	z. 200	Bi ₂ (MoO ₄) ₃	439	-
GaCl ₃	77,9	201,2	AlCl ₃	190	1827 subl. 177,8	CuCl	442	1366
SbF ₅	7,0	149,5	As ₂ S ₃	300	707	CuCl ₂	498	z. CuCl
SbCl ₃	73,4	223	BiCl ₃	230	447	PbCl ₂	501	950
SbBr ₃	96,6	280	LiNO ₃	255	-	KFSO ₃	311	-
NbF ₅	72	220	MoCl ₅	194	298	KNO ₂	387	-
TaF ₅	96,8	229,5	RbOH	300	-	KReO ₄	350	-
SnBr ₄	31	202	RbFSO ₃	304	-	KHS	455	-
			Pb ₂ S ₂	420	850	KNO ₃	334	z. 400
			Pb ₂ S ₃	213	-	RbNO ₃	310	-
			NaOH	319	1390	Sr(OH) ₂	375	-
			NaNO ₃	306,8	z. 380	Sr(NO) ₃	570	-
			NaNO ₂	271	z. 320	InJ ₂	351	715
			NaHS	350	-	TlCl	430	720
			Na ₂ S ₄	275	zers.	PbBr ₂	373	916
			SnCl ₂	246	623	NaBr	381	
			ZnCl ₂	262	732	ZnBr ₂	394	650
			InCl ₂	235	550			
			InJ ₃	210				
			FeCl ₃	282	315			
			SbJ ₃	167	401			
			NbCl ₅	194	254			
			TaBr ₃	240	348,8			
			TaCl ₅	221	239,8			
			TeBr ₂	210	339			
			TeCl ₂	209	327			
			TlNO ₃	206	430			
			SnF ₄	-	705			

Tabelle 2: Chloride der Alkali, Erdalkali und einiger anderer Metalle

	Schmelzpunkt °C	Siedepunkt °C	Dichte g/cm ³	Viskosität cp	Oberfl.-Spannung dyn/cm	Spez. Wärme cal/g
SnCl ₄	-33	114,1	2,232			
AlCl ₃	190 ^{2,5atm}	177 subl.	1,31 ^{fl}			
NbCl ₅	194	240,5	3,92			
BiCl ₃	230	447	4,75			
SnCl ₂	246	623	3,393 ²⁴⁶			
ZnCl ₂	262	732	2,91 ²⁵			
ZrCl ₄	300 subl.					
BeCl ₂	400	520	1,899 ²⁵			
RbCl ₂	501	950	5,85		490°:138	540:0,121
LiCl	613	1353	2,068 ²⁵		614°:137	607:0,183
YCl ₃	680		2,8 ¹⁸			
MgCl ₂	708	1412	2,316			
RbCl	715	1390	2,088 ^{fl}		750°:95,7	
CaCl ₂	772	1600	2,512 ²⁵		772°:152	
KCl	776	1500	1,984		776°:98,4	771:0,118
NaCl	801	1413	2,165	841°:1,30	803°:113,8	
SrCl ₂	873		3,052			
BaCl ₂	962	1560	3,856 ²⁴			
UCl ₃	835	1727	5,44 ²⁵			
UCl ₄	590	787	4,725 ²⁵			
ThCl ₄	820 subl. 720-750	1100 zers.	4,59			
PuCl ₄						

Tabelle 3: Binäre Chlorid-Systeme mit einem Schmelzpunkt
(Eutektikum) unterhalb 300°C

Eutektische Temp. °C	Komponenten	Mol-% der 2. Komp.	I. Komponente		II. Komponente	
			Schmelz- punkt °C	Siede- punkt °C	Schmelz- punkt °C	Siede- punkt °C
122	TlCl-CuCl	60	430	720	442	1366
171	ZnCl ₂ -SnCl ₂	36	262	732	246	623
172	CuCl-SnCl ₂	66	442	1366	246	623
178	TlCl-SnCl ₂	72	430	720	246	623
180	KCl-SnCl ₂	62	776	1500	246	623
183	NaCl-SnCl ₂	68	801	1413	246	623
193	TlCl-ZnCl ₂	52	430	720	262	732
215	NaCl-BeCl ₂	50	801	1413	440	520
215	SnCl ₂ -LiCl	15	246	623	613	1353
228	ZnCl ₂ -KCl	46	262	732	776	1500
233	SnCl ₂ -MnCl ₂	5	246	623	650	1190
242	CaCl-ZnCl ₂	88	442	1366	262	732
262	TlCl-PbCl ₂	14	430	720	501	950
262	KCl-ZnCl ₂	71	776	1500	262	732
262	NaCl-ZnCl ₂	59,5	801	1413	262	732
280	CuCl-PbCl ₂	42	442	1366	501	950
292	PbCl ₂ -BeCl ₂	53	501	950	440	520
300	LiCl-BeCl ₂	56	613	1353	440	520
300	TlCl-BeCl ₂	56	430	720	440	520

Tabelle 4: Binäre Chlorid-Systeme mit einem Schmelzpunkt
(Eutektikum) zwischen 300 und 450°C

Eutektikum Temp. °C	Komponenten	Mol-% der 2. Komp.	I. Komponente		II. Komponente	
			Schmelz- punkt °C	Siede- punkt°C	Schmelz- punkt °C	Siede- punkt°C
362	TlCl-MgCl ₂	26	430	720	708	1412
372	BaCl ₂ -BeCl ₂	87	962	1560	440	520
378	TlCl-PbCl ₂	42	430	720	501	950
412	NaCl-TlCl	82	801	1413	430	720
419	TlCl-CaCl ₂	7	430	720	772	1600
432	ZnCl ₂ -KCl	68,5	262	732	776	1500
438	PbCl ₂ -PbO	22	501	950	888	

Tabelle 5: Ternäre Chlorid-Systeme mit niedrigem Schmelzpunkt

Eutektische Temperatur °C	Komponenten	Zusammensetzung in Mol-%
203	ZnCl ₂ -NaCl-KCl	60-20-20
383	PbCl ₂ -KCl-NaCl	71-11-18
396	MgCl ₂ -KCl-NaCl	60-20-20
415	KCl-NaCl-TlCl	6,1-6,3-87,4
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>		
435	MgCl ₂ -NaCl-UCl ₃	38,6-57,91-3.49
432	MgCl ₂ -NaCl-UCl ₃	36,36-54,54-9.09
550	MgCl ₂ -NaCl-UCl ₃	33,33-50,01-16,66

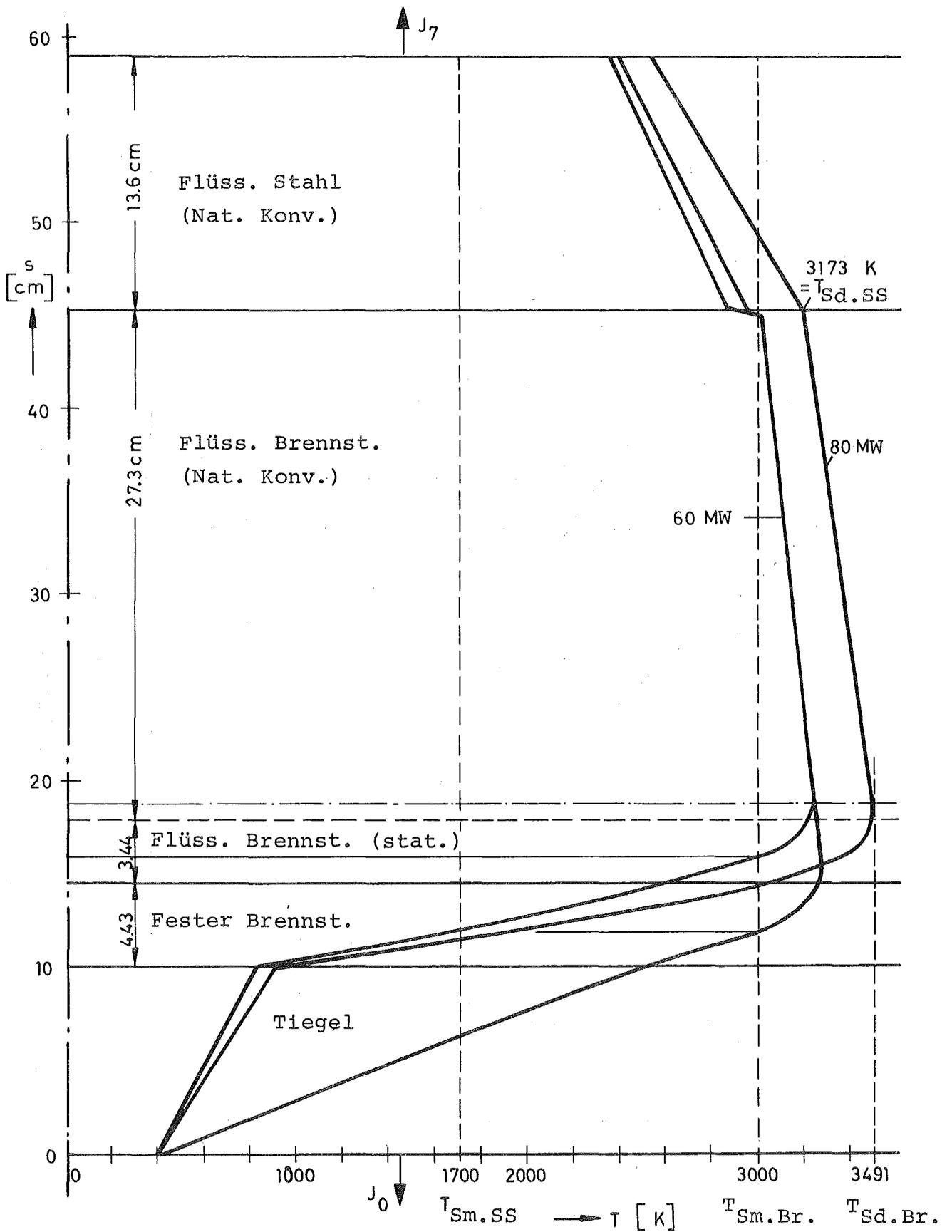


Abb.1 Temperaturprofil in der Coreschmelze.
 Nachwärme: 60 und 80 MW.

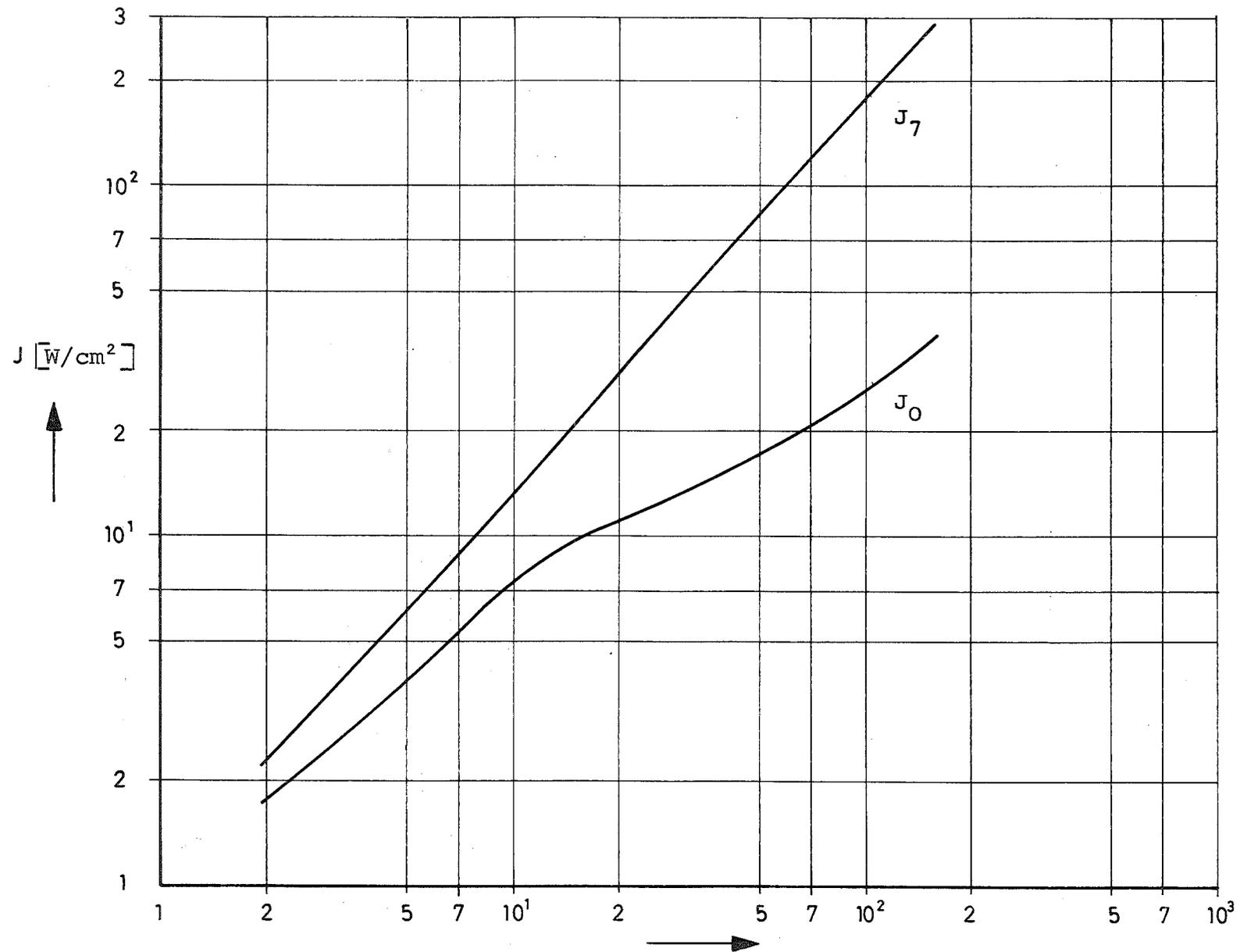


Abb.2 Verhältnis der Wärmeflüsse nach oben (J_7) und unten (J_0) in Abhängigkeit von der Nachwärme.

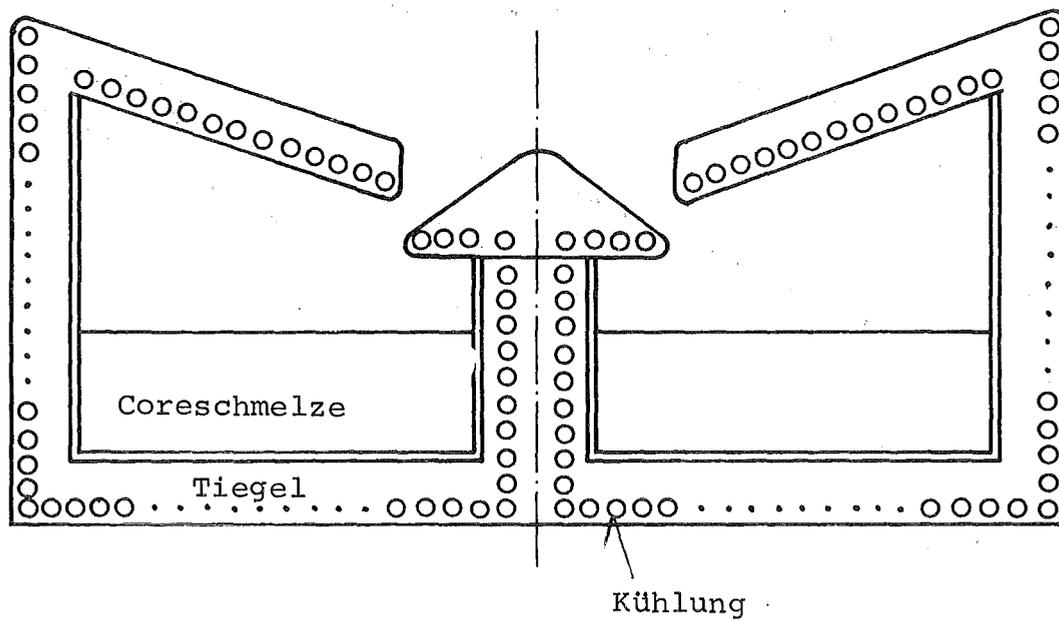


Abb.3 Core-Catcher-Konzept für einen GSB - Skizze.

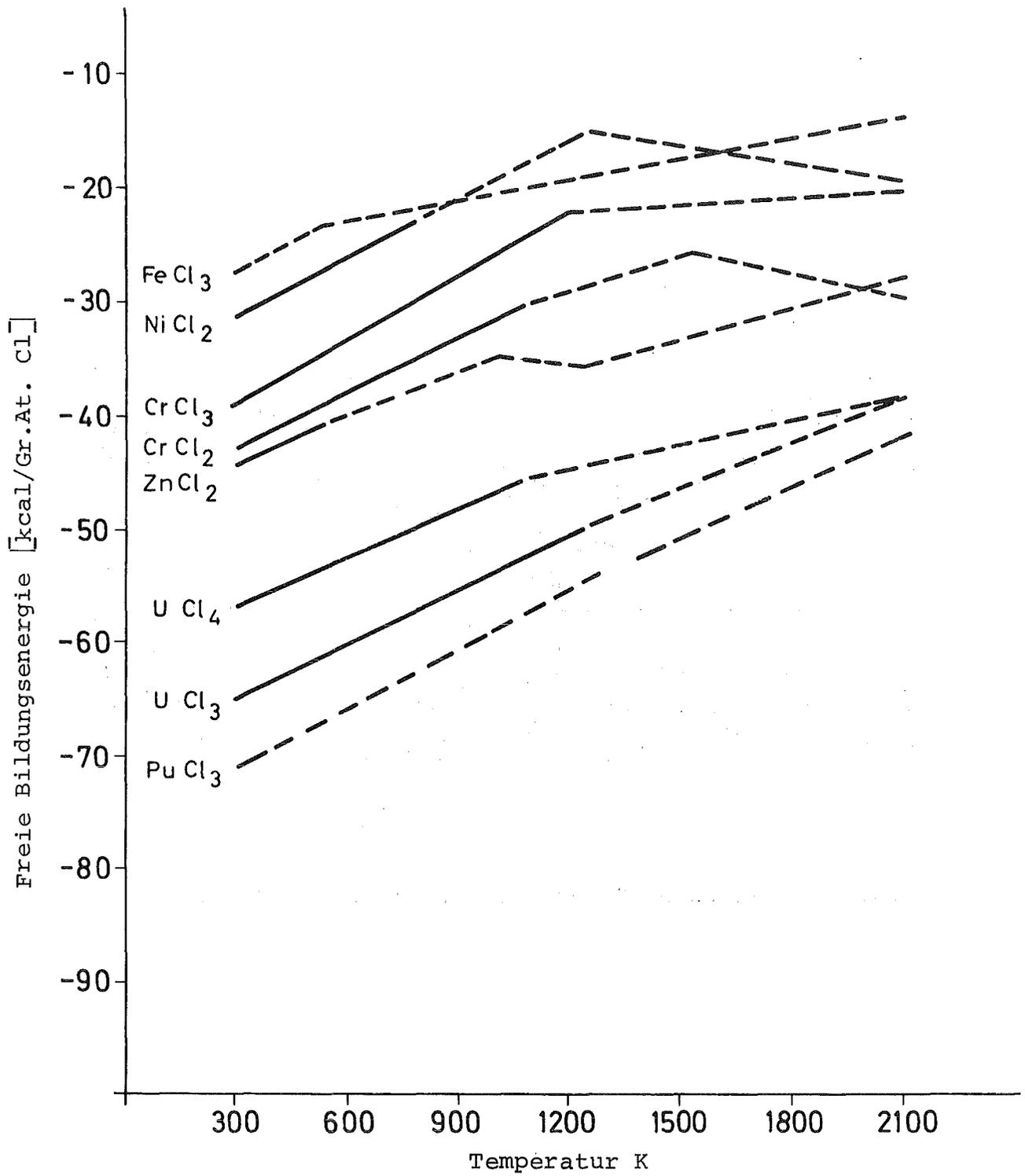


Abb.4 Freie Bildungsenergie einiger Chloride

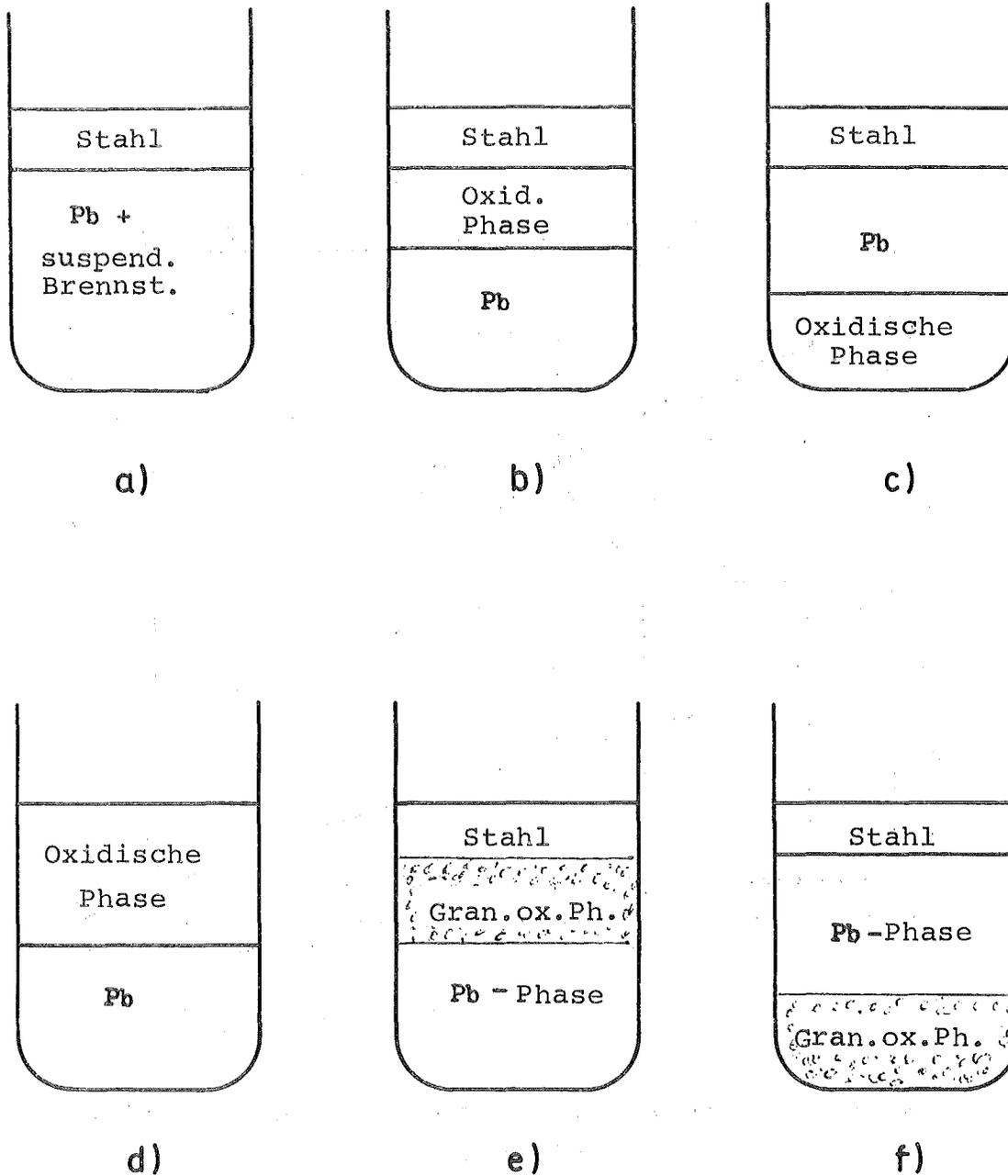


Abb. 5 Schematische Darstellung der Wechselwirkungsmöglichkeiten des Bleis mit der Coreschmelze.

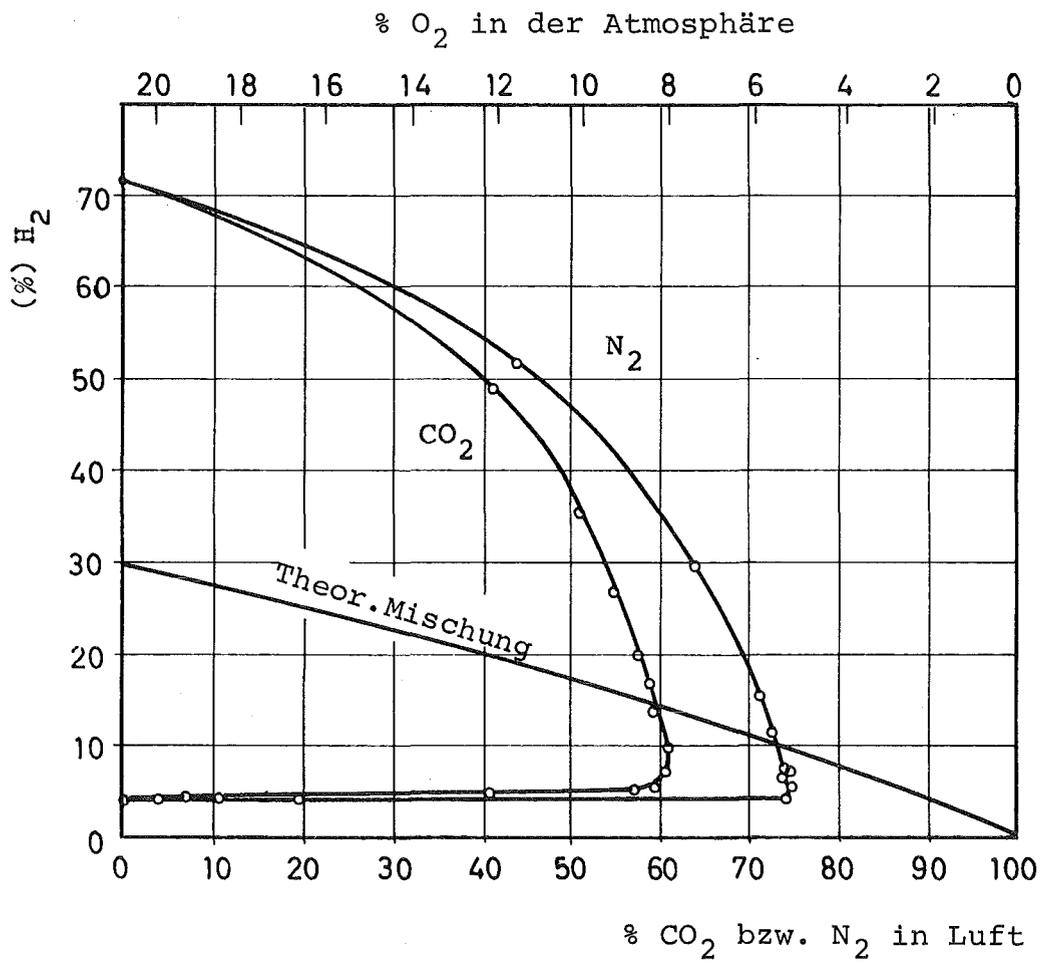


Abb.6 Entflammbarkeitsbereiche des Wasserstoffs mit Luft und CO₂ bzw. N₂ [9] .

- 42°C, 0 atü
- - - - - 167°C, 0 atü
- · · · · 167°C, 7 atü

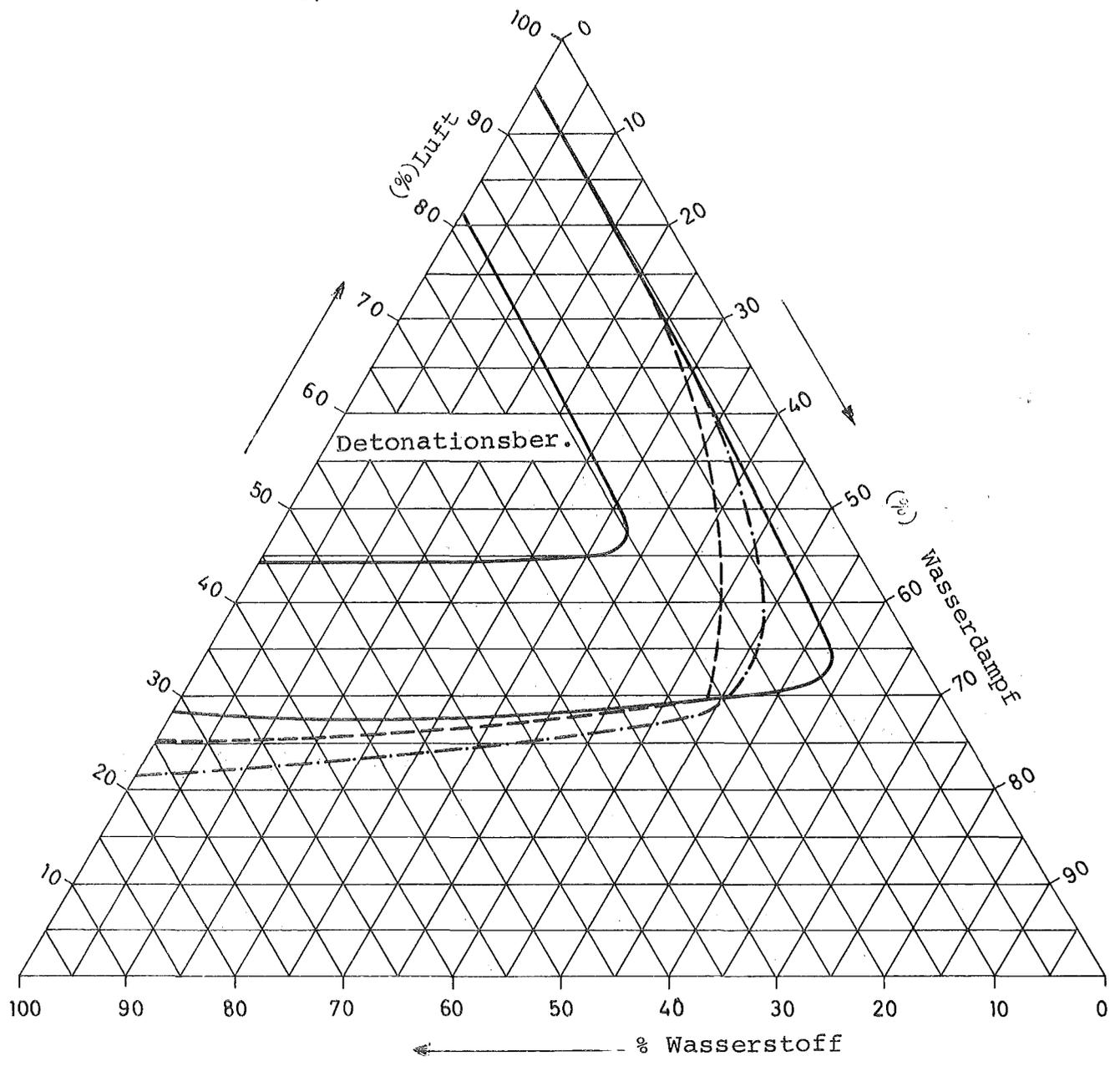


Abb.7 Zündgrenzen für Wasserstoff -Luft- Dampf-Gemische [9] .

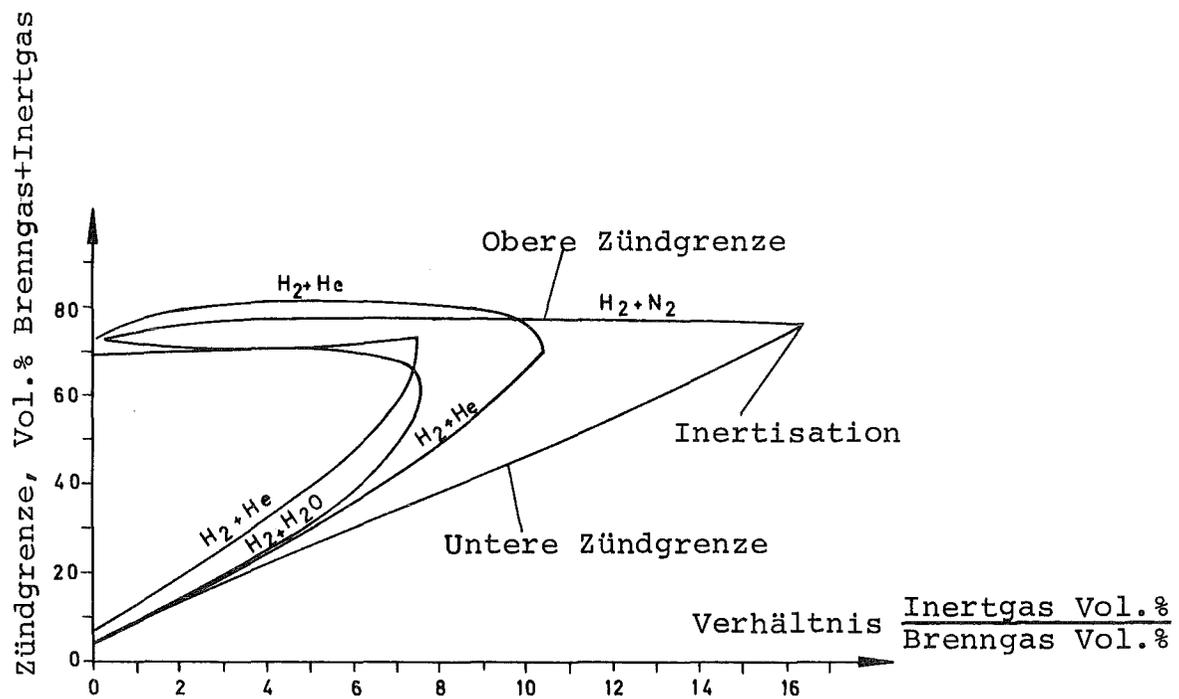


Abb.8 Entflammbarkeitsbereiche des Wasserstoffs mit verschiedenen Verdünnungsmitteln [14].

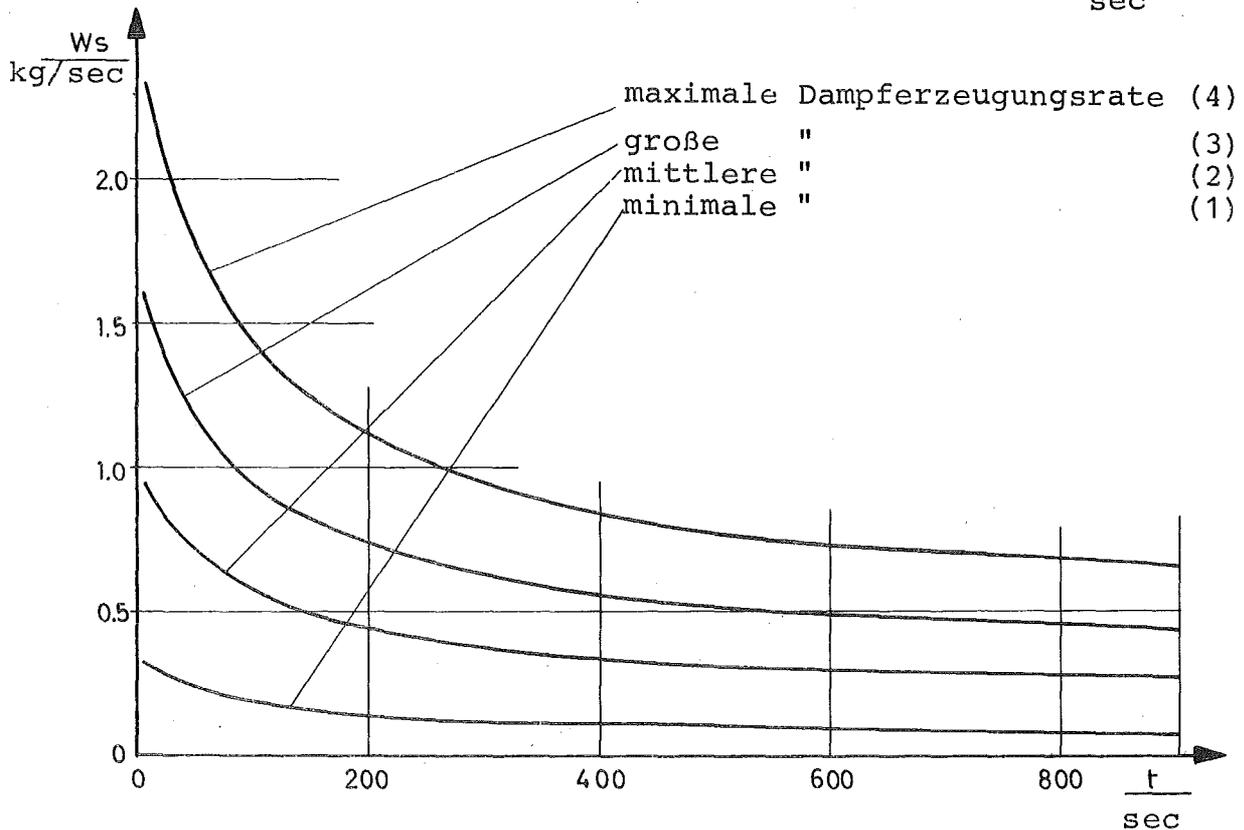
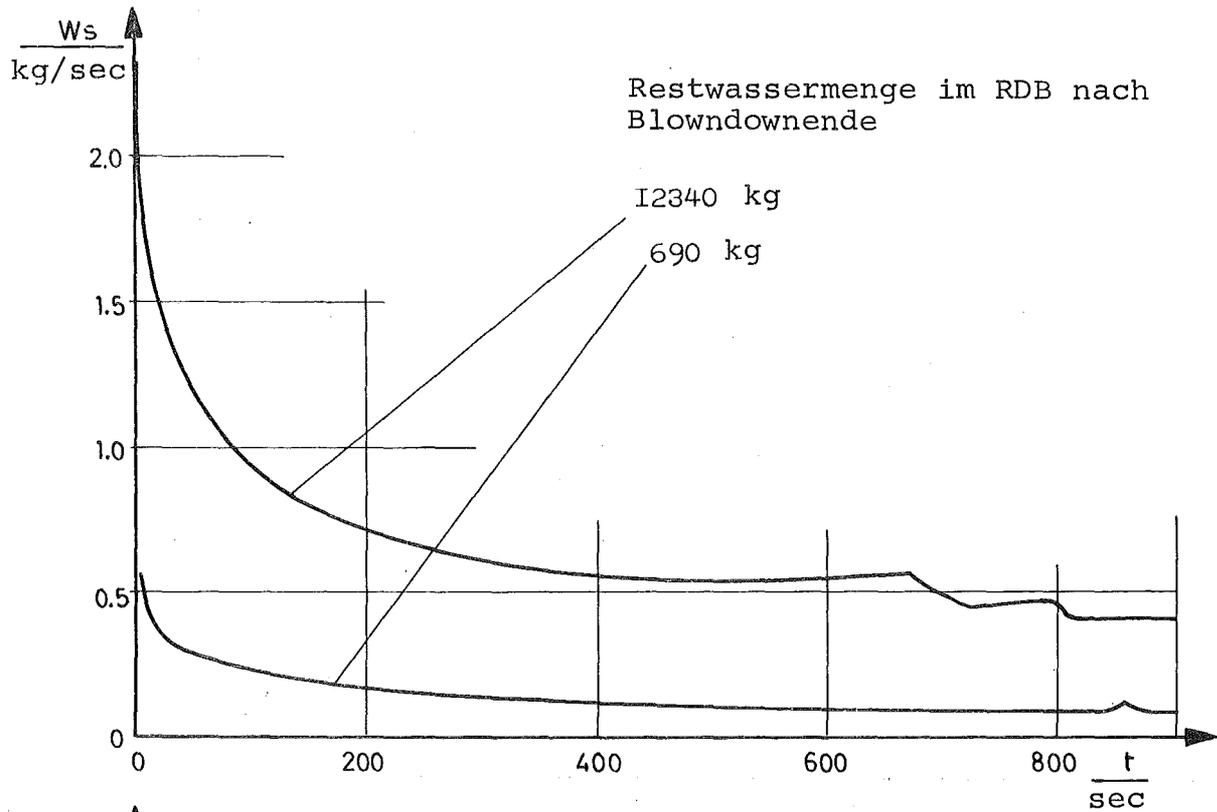


Abb. 9 Dampferzeugungsrate $W_s(t)$;
oben: mit Nurloc gerechnete Kurven
unten: Parameterfeld für Chemloc [17].

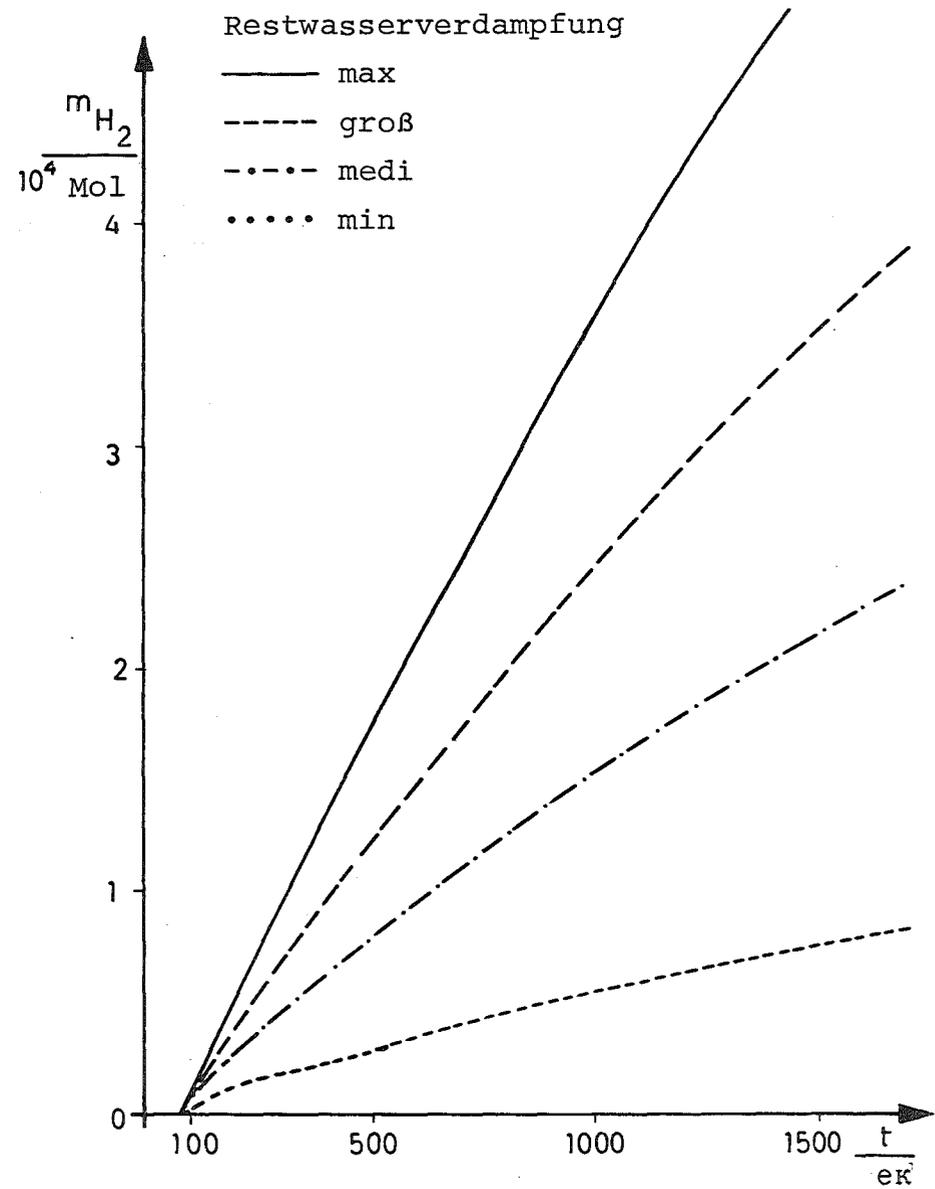
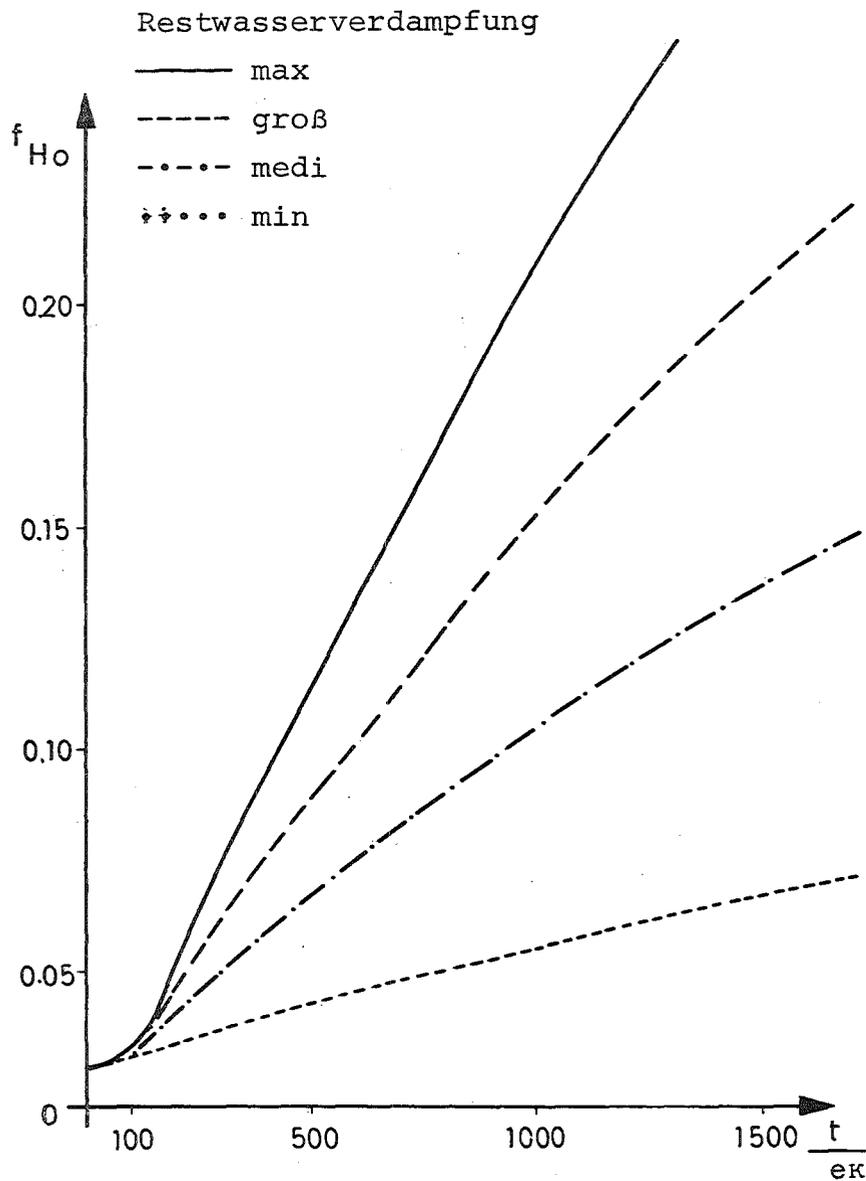


Abb.10 Bruchteil $f_{Ho}(t)$ [links] des oxidierten Hüllrohrmaterials und Wasserstoffmenge $m_{H_2}(t)$ bei verschiedenen Dampferzeugungsraten [17].