

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

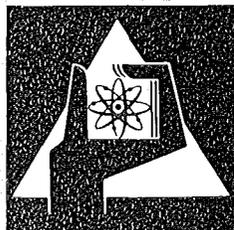
April 1974

KFK 1970

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

**Verhalten von Natrium-Bränden und Erprobung
von Schutzsystemen**

F. Huber, P. Menzenhauer, W. Peppler, W. Till



**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 1970

Institut für Reaktorentwicklung

Projekt Schneller Brüter

Verhalten von Natrium-Bränden
und Erprobung von Schutzsystemen

von

F. Huber

P. Menzenhauer

W. Pepler

W. Till

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

Kurzfassung

Die sichere Beherrschung von Natriumbränden erfordert detaillierte Kenntnisse zum Brandverhalten des Natriums. Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprogramms für den SNR wurde der Ablauf von Natriumbränden in verschiedenen Erscheinungsformen untersucht. Schwerpunkte waren die Untersuchung von Flächenbränden und die Erprobung von Maßnahmen zur Eindämmung bzw. Vermeidung solcher Brände.

Die Untersuchungen wurden in einem geschlossenen Raum mit 8 x 8 m Grundfläche durchgeführt. Für die Flächenbrände wurden Stahlwannen von 0,18 bis 4,5 m² Grundfläche eingesetzt. Um größere Flächenbrände zu verhindern wurden die Wannen mit einer Abdeckung versehen, so daß keine aktiven Löschmaßnahmen notwendig waren. Die Natriummengen lagen zwischen 10 und 200 l bei Temperaturen von 400 bis 820 °C. Neben Flächenbränden wurden auch Spritzbrände und Brände an isolierten Rohrleitungen untersucht. Gemessen wurden der Temperaturverlauf, die Brandraten und die Aerosolentwicklung. Bei einigen Bränden wurden außerdem Versuche mit Löschpulver durchgeführt. Der visuelle Brandverlauf wurde in Serien von Bildern und Filmen festgehalten.

Behaviour of Sodium Fires and Suitable Protecting Systems

Abstract

The safe control of sodium fires requires detailed informations about the burning behaviour of sodium. Therefore, in the scope of the SNR safety R and D program the course of sodium fires of different types has been investigated. The topics were directed to sodium area conflagrations and suitable protecting systems to confine, respectively to avoid such fires.

The experiments were performed in a closed hall of approx. 8 x 8 m area. The area conflagrations were executed in steel pans of 0.18 to 4.5 m². To avoid larger area conflagrations the pans were furnished with special cover, so that no active quenching measures were needed. The sodium quantities lay between 10 to 200 l at temperatures between 400 and 820 °C. Besides spray fires and fires at isolated pipes have been studied. The course of temperatures and reaction rates, and the production of aerosols have been measured. Tests with extinguishing powder were executed during some fires. The course of the fires were documented by series of slides and films.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Zusammenfassung	1
2. Ziel und Schwerpunkt der Versuche	4
3. Vorliegende Erfahrungen und Kenntnisse	5
3.1 Flüssigmetallbrände	5
3.1.1 Flächenbrände	5
3.1.2 Löschen von Bränden	6
3.2 Chemische Reaktionen	8
3.2.1 Natrium-Luft	8
3.2.2 Kohlenwasserstoffe-Luft	9
3.2.3 Natrium-Isolierwerkstoffe	10
3.2.4 Natrium-Beton	12
4. Versuchsaufbau	13
4.1 Versuchseinrichtungen	13
4.1.1 Versuchsgebäude	13
4.1.2 Auffangwanne 1,1 m ²	13
4.1.3 Auffangwanne 4,5 m ²	14
4.1.4 Wanne 0,18 m ²	15
4.1.5 Natriumauslauf	15
4.1.6 Isolierte Rohrleitungsabschnitte	16
4.1.7 Natriumversorgungsanlagen	16
4.1.8 Sicherheitsvorkehrungen	17
4.2 Versuchsdokumentation	18
4.2.1 Temperaturen	18
4.2.2 Natriummengen	19
4.2.3 Verbrennungsrückstände	21

	<u>Seite</u>
4.2.4 Abstrahlung des Brandes	21
4.2.5 Meßwertregistrierung	22
4.2.6 Bild- und Filmaufnahmen	22
5. Versuchsdurchführung	24
5.1 Versuchsverfahren	24
5.1.1 Allgemeines	24
5.1.2 Natriumaustritt	25
5.1.3 Auffangwannen	25
5.1.4 Isolierte Rohrleitungsabschnitte	26
5.1.5 Benzinbrände	27
5.2 Versuchsauswertung	28
5.2.1 Temperaturen	28
5.2.2 Brandraten	29
5.2.3 Wärmeabstrahlung	32
5.2.4 Aerosole	32
5.2.5 Umgebungseinflüsse	34
6. Versuchsergebnisse	35
6.1 Brände während des Na-Austritts	35
6.1.1 Austrittsformen	35
6.1.2 Reaktionsrate und Aerosolfreisetzung	36
6.1.3 Einwirkung eines Na-Strahls auf verschiedene Werkstoffe	37
6.1.4 Verhalten der Aerosole in der Umgebung	38
6.2 Flächenbrände in offenen Wannen	40
6.2.1 Typischer Ablauf des Na-Brandes	40
6.2.2 Weitere Versuchsergebnisse	43
6.2.3 Überlegungen zur Reaktion	45

	<u>Seite</u>
6.3 Wirkungsweise von Auffangwannen mit Abdeckung	53
6.3.1 Typischer Versuchsablauf	53
6.3.2 Weitere Versuchsergebnisse	55
6.3.3 Überlegungen zur Reaktion	57
6.4 Natriumlecks in isolierten Rohrleitungsabschnitten	58
6.4.1 Versuchsablauf	58
6.4.2 Weitere Versuchsergebnisse	59
6.5 Löschen von Natriumbränden	62
6.5.1 Flächenbrände	62
6.5.2 Brände an Rohrleitungen	62
6.6 Beseitigung der Rückstände	63
6.6.1 Allgemeines	63
6.6.2 Rückstände aus Wannen	63
6.6.3 Rückstände von Rohrleitungsbränden	63
6.6.4 Löschpulver und Aerosole	65
7. Empfehlungen	66
7.1 Allgemeines	66
7.2 Auffangwannen	66
7.3 Isolierung von Komponenten	69
7.4 Natrium-Leck-Detektion	70
7.5 Verkleidung von Betonbauteilen	71
8. Nomenklatur	72
9. Quellenverzeichnis	73
Anhang: Tabellen	
Abbildungen	

Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

- Tab. 1 Natrium-Brandversuche (Seite 1)
- Tab. 2 Natrium-Reaktionen
- Tab. 3 Isolierwerkstoffe, Chemische und physikalische Daten
- Tab. 4 Versuche mit Auffangwannen, Lage der Temperatur-Meßstellen
- Tab. 5 Ermittlung der Natrium-Mengen (Seite 20)
- Tab. 6 Natriumbrände in Auffangwannen, Versuchsparameter
- Tab. 7 Natriumbrände an Rohrleitungen, Versuchsparameter
- Tab. 8 Meteorologische Bedingungen während der Natrium-Brandversuche
- Tab. 9 Diffusionskoeffizienten (Seite 47)
- Tab. 10 Aerosolmessung in der Abluft, Meßdaten
- Tab. 11 Aerosole in der Abluft, Versuchsergebnisse
-
- Abb. 1 Versuchsgebäude
- Abb. 2 Austrittsstutzen der Abluftanlage
- Abb. 3 Auffangwanne $1,1 \text{ m}^2$
- Abb. 4 Auffangwanne $4,5 \text{ m}^2$ mit Abdeckung
- Abb. 5 Wanne $0,18 \text{ m}^2$
- Abb. 6 Auffangwanne $1,1 \text{ m}^2$ mit Abdeckung
- Abb. 7 Isolierter Rohrleitungsabschnitt, horizontale Lage
- Abb. 8 Isolierter Rohrleitungsabschnitt, vertikale Lage
- Abb. 9 Wanne $0,8 \text{ m}^2$ für Benzinbrände
- Abb. 10 Aerosolentwicklung bei Natriumauslauf
- Abb. 11 Natriumauslauf, kompakter Strahl
- Abb. 12 Natriumauslauf, zerteilter Strahl
- Abb. 13 Natriumauslauf, zersprühter Strahl
- Abb. 14 Natriumauslauf aus isoliertem Rohrleitungsabschnitt
- Abb. 15 Natriumaustritt aus einer horiz. angeordneten Düse
- Abb. 16 Spiegeldrahtglas nach Natriumstrahleinwirkung (30 s)
- Abb. 17 Ablagerung von Aerosolen an der Einströmöffnung der Abluftanl.
- Abb. 18 Natriumflächenbrand in offener Wanne $4,5 \text{ m}^2$
- Abb. 19 Natriumflächenbrand in offener Wanne $1,1 \text{ m}^2$
- Abb. 20 Aerosolentwicklung in einer Wanne $4,5 \text{ m}^2$ mit Abdeckung kurz nach dem Einfüllen
- Abb. 21 Natriumaustritt aus Isolierung, Versuch 12

- Abb. 22 Brennende Gase nach Natriumreaktion, Versuch 18
- Abb. 23 Natriumaustritt aus Isolierung, Versuch 11
- Abb. 24 Brand und Natriumaustritt aus Isolierung, Versuch 13
- Abb. 25 Abdecken eines Flächenbrandes $1,1 \text{ m}^2$ mit Löschpulver
- Abb. 26 Lösversuch bei einem Rohrleitungsbrand
- Abb. 27 Beseitigung der Brandrückstände mit Dampf
- Abb. 28 Entfernen des erkalteten Natriums aus einer Wanne
- Abb. 29 Natriumbrand nach Entfernen des Blechmantels eines erkalteten Rohrleitungsabschnittes
- Abb. 30 Natriumbrand beim Zerlegen eines erkalteten Rohrleitungsabschnittes
- Abb. 31 Versuchsgebäude
- Abb. 32 Auffangwanne $1,1 \text{ m}^2$
- Abb. 33 Auffangwanne $4,5 \text{ m}^2$, ohne Abdeckung
- Abb. 34 Auffangwanne $4,5 \text{ m}^2$, mit Abdeckung
- Abb. 35 Offene Wanne $0,18 \text{ m}^2$
- Abb. 36 Versuche mit Auffangwannen, Natrium-Auslauf A-D
- Abb. 37 Isolierte Rohrleitungen, Konstruktiver Aufbau
- Abb. 38 Rohrleitungen, Querschnitte der Isolierungen
- Abb. 39 Versuche mit Auffangwannen, Lage und Nummern der Meßsäulen
- Abb. 40 Thermoelement-Anordnungen A...D
- Abb. 41 Aerosol- und Temperaturdifferenzmessungen an der Abluftanlage
- Abb. 42 Aufbau der Wärmestahlungsmessung
- Abb. 43 Luftströmung über der Brandwanne, Mittelwerte in m/s
- Abb. 44 Wanne mit Abdeckung $4,5 \text{ m}^2$, Vers. Nr. 23, Temperaturverlauf, Brandrate
- Abb. 45 Offene Wanne $1,1 \text{ m}^2$, Versuch Nr. 24 Temperaturverlauf, Brandrate
- Abb. 46 Offene Wanne $4,5 \text{ m}^2$, Versuch Nr. 25, Temperaturverlauf, Brandrate
- Abb. 47 Offene Wanne $4,5 \text{ m}^2$, Versuch Nr. 25, Temperaturverlauf vertikal und horizontal
- Abb. 48 Offene Wanne $4,5 \text{ m}^2$, Versuch Nr. 25, Erwärmung der Abluft, Wiegung der Wanne

- Abb. 49 Aerosol-Niederschlag im Versuchsraum (Natriumanteil)
- Abb. 50 Offene Wanne $1,1 \text{ m}^2$, Versuch Nr. 5 und 22, Temperaturverläufe
- Abb. 51 Offene Wanne $0,18 \text{ m}^2$, Versuch Nr. 27, Temperaturverlauf, Wärmebilanz des Brandes
- Abb. 52 Diffusion von Na-Dampf und Sauerstoff durch Stickstoff
- Abb. 53 Offene Wanne, Versuch Nr. 24 und 25, Wärmebilanz des Brandes
- Abb. 54 Offene Wanne $0,8 \text{ m}^2$, Benzinbrand, Temperaturverlauf
- Abb. 55 Wanne $4,5 \text{ m}^2$, Vergleich Versuch Nr. 23 und 25, Temperaturverläufe und Reaktionsraten
- Abb. 56 Wanne mit Abdeckung $4,5 \text{ m}^2$, Versuch Nr. 23, Temperaturverlauf, Brandrate
- Abb. 57 Wanne mit Abdeckung, Versuch Nr. 19, 20, 21 und 23, Temperaturverläufe
- Abb. 58 Horizontale Rohrleitung, Lage der Meßstellen
- Abb. 59 Vertikale Rohrleitung, Lage der Meßstellen
- Abb. 60 Horizontale Rohrleitung, Versuch Nr. 12, Temperaturverlauf
- Abb. 61 Horizontale Rohrleitung, Versuch Nr. 12, Ausbreitung des Natriums
- Abb. 62 Vertikale Rohrleitung, Versuch Nr. 11, Ausbreitung des Natriums
- Abb. 63 Vertikale Rohrleitung, Versuch Nr. 11, Temperaturverlauf
- Abb. 64 Horizontale Rohrleitung, Versuch Nr. 9, Temperaturverlauf
- Abb. 65 Horizontale Rohrleitung, Versuch Nr. 9, Ausbreitung des Natriums
- Abb. 66 Horizontale Rohrleitung, Versuch Nr. 6, Temperaturverlauf
- Abb. 67 Horizontale Rohrleitung, Versuch Nr. 6, Ausbreitung des Natriums
- Abb. 68 Vertikale Rohrleitung, Versuch Nr. 13, Temperaturverlauf
- Abb. 69 Vertikale Rohrleitung, Versuch Nr. 13, Ausbreitung des Natriums
- Abb. 70 Horizontale Rohrleitung, Versuch Nr. 18, Temperaturverlauf
- Abb. 71 Horizontale Rohrleitung, Versuch Nr. 18, Ausbreitung des Natriums
- Abb. 72 Auffangwannensystem 100 m^2 für 50 m^3 Auffangvolumen

1. Zusammenfassung

Im Rahmen des Sicherheitsprogramms zum schnellen natriumgekühlten Brutreaktor (SNR) wurde der Ablauf von Natriumbränden untersucht. Der Schwerpunkt lag auf Versuchen mit Natrium-Flächenbränden und deren Eindämmung bzw. Vermeidung durch vorbeugende konstruktive Maßnahmen. Daneben wurde auch der Brandverlauf unter verschiedenen Austrittsformen des Natriums aus einem freiliegenden Leck und bei Leckagen aus isolierten Rohrleitungsabschnitten untersucht. Einen Überblick über diese Versuche vermittelt Tab. 1.

Tab. 1: Natrium-Brandversuche

Anzahl d. Versuche	Art des Brandes	Natrium-Temp. [$^{\circ}\text{C}$]	Natriummenge [kg]
8	Flächenbrand	350 bis 820	4 bis 190
10	Auffangwanne mit Abdeckung	400 bis 660	9 bis 190
3	Sprüh- u. Spritzbrände	450 bis 550	16 bis 25
9	Isolierte Rohrleitungen	420 bis 650	6 bis 49

Die Experimente wurden in einem geschlossenen Raum von ca. 8 x 8 m Grundfläche und 5,6 m Höhe durchgeführt. Die bei den Bränden entstehenden Aerosole wurden mit einer Abluftanlage aus dem Raum entfernt.

Der Temperaturverlauf wurde im Zentrum des Brandes und in der Umgebung erfaßt. Messungen in der Abluft gaben Aufschluß über die zeitlich veränderlichen Brandraten und über die freigesetzten Aerosolmengen.

Der Brandverlauf wurde in Serien von Bildern und Filmen festgehalten.

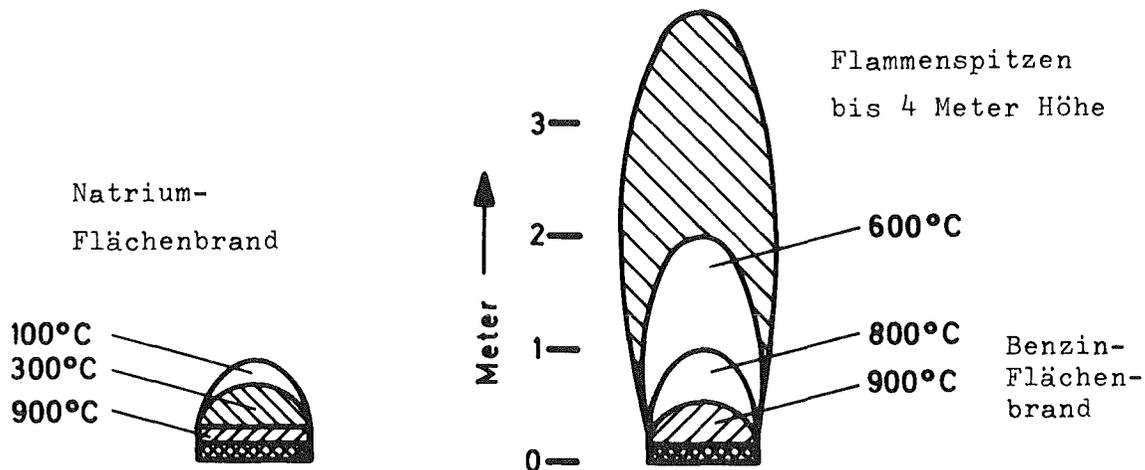
Zum Brandverhalten des Natriums zwischen Leckstelle und Auffangwanne werden folgende Aussagen gemacht:

Ein kompakter Natrium-Strahl brannte selbst bei Temperaturen von 600°C noch nicht. Traf der Strahl auf ein Hindernis und wurde zerteilt, so setzte eine kräftige Reaktion mit der Luft ein. Die Brandrate bei einem derart zerteilten Strahl betrug bei 2,4 m Fallhöhe bis zu 270 kg/h. 6 - 7 % der ausgetretenen Natriummenge sind dabei verbrannt. Von der Abluft wurden 85 % der verbrannten Menge als Oxidaerosole mitgeführt.

Die Flächenbrände wurden in Stahlwannen mit Grundflächen von 0,18 bis 4,5 m² durchgeführt. Zum Vergleich Natrium-Benzin wurden auch einige Flächenbrände mit Benzin untersucht. Die wichtigsten Ergebnisse werden zusammengefaßt:

Ein Flächenbrand auf 4,5 m² Grundfläche ergab eine spezifische Brandrate von 43 kg/m² h. Nur 36 % des verbrannten Natriums wurde mit der Abluft als Aerosol abgeführt; <0,5 % verblieb als Niederschlag im Versuchsraum. Selbst nach langer Branddauer blieb die Natrium-Lachentemperatur weit unter der Siedetemperatur. Dies gilt für alle Natrium-Flächenbrände. Die Natriumlache erreichte nach einer gewissen Branddauer eine Beharrungstemperatur bei ca. 730 °C. Diese Beharrungstemperatur wurde unabhängig davon erreicht, ob die Lachentemperatur bei Brandbeginn tiefer oder höher (>800 °C) lag. Die Temperatur in der Reaktionszone lag bei etwa 940 °C. Die spezifische Brandrate eines Flächenbrandes mit Benzin wurde zu 120 kg/m² h ermittelt.

Der Unterschied im Brandverhalten Natrium-Benzin wird an der Darstellung der Temperaturzonen deutlich:



Zur Eindämmung bzw. Vermeidung von Flächenbränden wurden die Wannen mit einer rinnenförmig ausgebildeten Abdeckung versehen, die das auftretende Natrium über Öffnungen in die Wand ableitete. Folgende wichtigen Versuchsergebnisse wurden erzielt:

Das Natrium floß unmittelbar nach Auftreffen auf die Abdeckung in die Wanne ab. Ein Verstopfen der Abauflöcher trat nicht auf. Wenige Minuten nach Abstellen des Lecks erlosch der sich auf der Abdeckung bildende Natrium-Brand. Infolge der geringen Reaktion unter der Abdeckung kühlte sich das Natrium bis auf Raumtemperatur ab. Bis zur Erstarrung reagierte in einem typischen Versuch etwa 1/3 des in der Wanne befindlichen Natriums, entsprechend einer spezifischen Brandrate von 5,2 kg/m² h.

Nur 1 % der reagierten Menge wurde als Aerosol mit der Abluft abgeführt. Im Vergleich zum offenen Flächenbrand war die Belastung der Umgebung durch Aerosole um etwa den Faktor 300 geringer. Durch Einleitung von Argon unter die Abdeckung konnte die Reaktionsrate noch weiter gesenkt werden.

Mit dieser Abdeckung können in einer Minute 250 l Natrium pro m² Fläche in die Wanne abgeführt werden. Aktive Löschmaßnahmen sind nicht erforderlich.

Zum Verhalten von Lecks in isolierten Komponenten wurden Versuche mit Rohrleitungsabschnitten von ca. 1 m Länge und definierter Leckstelle durchgeführt. Neben Steinwolle kam eine keramische Faser und eine Isolierung auf Calciumsilikatbasis zum Einsatz. Untersucht wurden die Ausbreitung des Natriums in der Isolierung, die hierbei auftretenden chemischen Reaktionen und das Aufnahme- bzw. Rückhaltevermögen der Isolierung unter verschiedenen Bedingungen. Natrium wurde solange in die Isolierung eingespeist, bis es deutlich aus dem Blechmantel austrat. Dies war z.T. erst der Fall, nachdem die Isolierung bis über 50 % mit Natrium gefüllt war. Die Ausbreitung erfolgte vorwiegend entlang des Rohres. Ein großer Teil des Natriums blieb auch nach Abstellen des Lecks in der Isolierung zurück. Steinwolle zeigte gegenüber Natrium die beste Beständigkeit. Das Ergebnis mit den anderen Isoliermaterialien war wenig günstig.

Einige Brände wurden mit Löschpulver abgedeckt. Unter den vorliegenden Versuchsbedingungen war zur vollständigen Abdeckung eine Löschpulver- zu Natriummenge von etwa 1:1 erforderlich. Eine Bekämpfung von Bränden an Rohrleitungen war nicht erfolgreich. In allen Fällen führte der Einsatz von Löschpulver zu einer starken Verschmutzung der unmittelbaren Umgebung.

2. Ziel und Schwerpunkt der Versuche

Die zunehmende Bedeutung schneller natriumgekühlter Reaktoren und die innerhalb des Kernforschungszentrums Karlsruhe ständig wachsende Zahl mit Natrium betriebener Versuchsanlagen erfordern eine sichere Beherrschung evtl. auftretender Schadensfälle. Dazu gehören die Auswirkungen von Natrium-Bränden und deren optimale Eindämmung in geschlossenen Räumen. Die Beantwortung dieser Fragen rückt, beeinflusst durch Sicherheitsdiskussionen und durch Forderungen der Gutachter nach fundierten experimentellen Ergebnissen, zunehmend in das Interesse der Öffentlichkeit.

Aus der Erfahrung mit kleinen Natriumbränden zeigte sich, daß durch die Verwendung von Löschpulver in ungeeigneter Weise weit größere Schäden an den Anlagen entstehen können, als durch den Natriumbrand selbst. Diese sekundären Schäden werden hauptsächlich durch das korrosive Verhalten des Löschpulvers selbst verursacht.

Zu größeren Natriumbränden mit Mengen von mehr als 100 kg auf brennenden Flächen größer 1 m^2 liegen aus der Literatur nur wenige Ergebnisse vor. Zur sicherheitstechnischen Beurteilung von großen Reaktorsystemen ist aber das Verhalten von großen Flächenbränden sehr wichtig.

Die Untersuchungen waren deshalb im wesentlichen auf folgende Ziele ausgerichtet:

- Verhalten kleiner und großer Natriumlachenbrände in belüfteten Räumen,
- Erprobung konstruktiver, vorbeugender Maßnahmen gegen Natriumlachenbrände,
- Durchführung von Löschkaktionen mit verschiedenen Löschmitteln,
- Verhalten von Natrium-Sprühbränden und Bränden an isolierten Rohrleitungen,
- Training von Lösch- und Betriebsmannschaften an Natrium-Bränden,
- Erstellung von Anschauungsmaterial in Form von Lehrfilmen und Diaserien über Natriumbrände zur Information von Brandbekämpfungsmannschaften, Betriebsgruppen und der Öffentlichkeit.

Schwerpunkt der Untersuchungen war das Verhalten kleiner und großer Natriumlachenbrände einschließlich der Erprobung konstruktiver, vorbeugender Maßnahmen zur Eindämmung von Natriumbränden.

3. Vorliegende Erfahrungen und Kenntnisse

3.1 Flüssigmetallbrände

3.1.1 Flächenbrände

Die Mehrzahl der in verschiedenen Laboratorien durchgeführten Flüssigmetallbrände beschränkt sich auf Flächen kleiner 1 m^2 . In [3] wird von Flächenbränden mit einer Natriummenge bis zu 130 kg berichtet. Obwohl auch Brandraten bei diesen Versuchen gemessen werden, liegt das Schwergewicht auf der Aerosolfreisetzung und des Übertrags radioaktiver Spaltprodukte, wie z.B. Jod. Eine Versuchsserie [8, 9] sei herausgegriffen, bei welcher in einem geschlossenen zwangsbelüfteten Raum in einem Gefäß von 0,6 m Durchmesser und 1,35 m Tiefe 270 kg Natrium verbrannt wurden. Die Temperatur der Natrium-Lache hat sich bei $650 - 700 \text{ }^\circ\text{C}$ stabilisiert, d.h. sie hat während der Branddauer von 30 h $700 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht überschritten. Weniger als 30 % der Natriummenge haben das Gefäß als Aerosole verlassen. Das Oxid hat sich von unten her in der Natrium-Lache aufgebaut. Im Mittel ergab sich eine Brandrate von $30 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$ bei einem kurzzeitigen Spitzenwert von $44 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$. Diese Ergebnisse sind nur beschränkt mit größeren Flächenbränden vergleichbar, schon aufgrund der großen Tiefe, die verringernd auf die Brandrate wirken dürfte.

Bei anderen Versuchen, durchgeführt bei Atomics International [10], wurde bei Bränden mit 11 - 20 kg Natrium in einer Auffangwanne von $0,5 \text{ m}^2$ Fläche beobachtet, daß bei unbeheizter Wanne eine Gleichgewichtstemperatur der Natrium-Lache von $740 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. bei geheizter Wanne von $760 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht wird, was sich mit unseren Beobachtungen auch bei größeren Brandflächen gut deckt. In diesen Versuchen lag die maximale Brandrate zwischen 49 und $56 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$. In [11, 12] wird berichtet, wie sich Natriumbrände in geschlossenen Räumen mit entsprechend begrenztem Sauerstoffangebot verhalten. Es wurden zwischen 36 und 59 kg Natrium eingesetzt, das aufgrund des begrenzten Sauerstoffangebots nur zu einem Teil verbrannte. Interessant ist jedoch, daß die anfänglichen Brandraten fast genau so hoch liegen ($47 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$) wie bei unbegrenztem Sauerstoffangebot aus der Umgebung. Auch die maximale Natrium-Lachentemperatur erreicht vergleichbare Werte zwischen $760 \text{ }^\circ\text{C}$ und $800 \text{ }^\circ\text{C}$.

Über Brände mit Flächen größer 1 m^2 gibt es nur wenige Angaben [3, 14, 16], obwohl gerade dies für Sicherheitsbetrachtungen zu schnellen Brutreaktoren besonders eindringlich gefordert wird, da eine große Unsicherheit besteht, ob das Verhalten kleiner Brände auf

große Flächenbrände übertragen werden darf. In manchen Überlegungen [3 S. 2] wird sogar angenommen, daß die Natriumlache die Siedetemperatur erreichen kann. Aus den veröffentlichten Ergebnissen zu großen Flächenbränden findet sich jedoch kein Hinweis, daß dies möglich ist. In [3 S. 76] wird in einem Diagramm, das auf einer Betrachtung der Wärmeerzeugung und Verluste eines Natriumbrandes beruht, dargestellt, zu welcher Gleichgewichtstemperatur in Abhängigkeit des Sauerstoffgehaltes des umgebenden Gases (Luft) sich das Natriumbad aufheizt. Für Luft mit 21 % Sauerstoff wären dies ca. 730 °C, eine Temperatur die unseren Messungen, wie gezeigt wird, sehr nahe kommt.

Die wenigen großen Flächenbrände hatten die Ermittlung der Reaktionsrate meist als ein mehr sekundäres Versuchsziel, das primäre Ziel war für [3 S. 53, 16] die Erprobung von Löschmethoden in einem simulierten Abschnitt der Sekundärkreislaufsysteme des Phenix-Reaktors bzw. [14] des FFTF. In beiden Fällen waren die Auffangwannen mit Beton ausgekleidet. Die in [3, 16] angegebenen, geschätzten Brandraten von 80 kg/m² h bei einem Na-Einsatz von 200 kg in eine 3,15 m² große Wanne sind aus vielen Indizien und aus Überlegungen zur Reaktion auf die Anwesenheit von Beton zurückzuführen und deshalb für reine Stahlauskleidungen nicht repräsentativ. Die Betonauskleidung wurde nahezu vollständig zerstört. Die Versuche [14] fanden in einem geschlossenen Raum statt, dessen Sauerstoffgehalt während des Brandes ständig abnahm. Die sich ergebende Brandrate von 39 kg/m² h (Na-Einsatz 317 kg, Fläche 2,97 m²) während der ersten 40 min ist aus den beiden zuvor genannten Gründen ebenso wenig repräsentativ.

3.1.2 Löschen von Bränden

Die verbreitetste Methode, kleinere Brände zu löschen, besteht darin, den Brandherd mit Löschpulver abzudecken. Eine Zusammenstellung 15 verschiedener getesteter Sorten findet sich in [3 S. 59 und 16]. Außer Totalit M 2, Met-L-X kommen praktisch keine handelsüblichen Löschpulver in Frage. Da die überwiegenden Bestandteile Natriumkarbonat und Natriumchlorid sind, bergen sie die Gefahr sekundärer Schäden. Es wurde außerdem festgestellt, daß Natriumchlorid, da es schwerer als Natrium ist, für tiefere Natriumlachenbrände ungeeignet ist, da es einsinkt. Die erforderlichen Mengen zur Brandeindämmung schwanken zwischen dem 3 - 6-fachen der beteiligten Natriummenge [3 S. 87, 16]. Für größere Brände werden

halbautomatische Pulververteilungssysteme z.B. durch Rohrleitungen diskutiert. Im allgemeinen herrscht die Auffassung vor, daß Natrium-Großbrände durch den Einsatz von Löschpulvern nicht beherrscht werden können, sondern daß andere Maßnahmen ergriffen werden müssen.

Es werden verschiedene Methoden vorgeschlagen:

1. Rasche Abkühlung des Natriums durch Einbau von Wärmespeichern in die Auffangwannen [3 S. 54, 16];
2. Fernhalten des Sauerstoffs durch Auffangwannen mit perforierter Abdeckung [3 S. 140, 19]. Die Öffnungen in der Abdeckung werden nach dem Natrium-Einlauf mit Vermiculit oder Löschpulver zugeschüttet;
3. Begrenzung der Sauerstoffmenge in den einzelnen Kreislaufabschnitten dadurch, daß die Räume untereinander abgeschottet und weitgehend gasdicht ausgeführt werden [14].

Die erste Methode hat den Vorteil, daß sich das Natrium auf eine Temperatur abkühlt, die zu einer geringeren Brandrate führt. Nachteilig sind die erforderlichen großen Wärmespeichermassen (im Versuch 450 kg Eisen/m² Wannenfläche) und die Tatsache [16], daß der Brand letztlich doch noch gelöscht werden muß.

Auch mit der zweiten Methode wird ein selbsttätiges Erlöschen des Brandes nicht erreicht. Durch die Abdeckung der Wanne mit Blechen wird der Zutritt von Sauerstoff behindert und damit die Brandrate abgesenkt, der Brand erlischt aber erst, wenn die Öffnungen mit Vermiculit oder Löschpulver zugeschüttet sind. Dies erfordert ein zuverlässiges Verteilersystem, das erst nach dem Abstellen des Lecks betätigt werden darf. Die Wirksamkeit des Systems kann verbessert werden, indem Argon über ein Verteilersystem über die Abdeckung geblasen wird [3 S. 142]. Das System wurde in einem kleineren Versuch mit 0,18 m² Brandfläche erprobt.

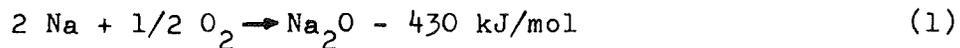
Die dritte Methode führt zu einem selbsttätigen Erlöschen des Natrium-Brandes, wenn der Sauerstoff durch den Brand aufgebraucht ist. Dies kann durch zusätzliches Spülen mit N₂ oder Ar beschleunigt werden. Die Methode setzt eine genügend kleine Unterteilung der Kreislaufräume voraus und wird dadurch u.U. aufwendig [5, 14].

Es gibt außerdem einen Vorschlag zu einer aus 1 und 2 kombinierten Methode [5]. Sie besteht in einer Auffangwanne mit Abdeckung besonderer Konstruktion, unter welche Stickstoff in flüssiger Form zur Inertisierung und Kühlung zugleich eingeleitet wird. Auch hier besteht das Problem des Verteilersystems und einer Vorratshaltung für flüssigen Stickstoff.

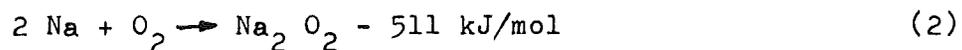
3.2 Chemische Reaktionen

3.2.1 Natrium-Luft

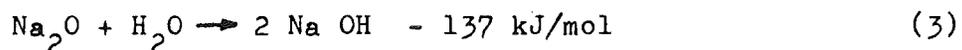
Alle nachfolgenden Reaktionen sind in Tab. 2 zusammengefaßt. Natrium reagiert schon bei Raumtemperatur mit dem Sauerstoff der Luft. Da das Natrium bis fast 100 °C fest ist, findet diese Reaktion nur an der Oberfläche statt. Die Reaktion verläuft nach folgender Gleichung:



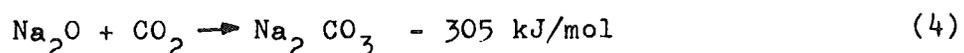
Die angegebene Wärmetönung bezieht sich auf 25 °C. Die Temperaturabhängigkeit ist nach [20] in dem betrachteten Temperaturbereich gering. Bei höheren Temperaturen, etwa ab 150 °C, findet eine sichtbare Verbrennung statt. Sie kann nach Formel (1) verlaufen, aber auch nach folgender Gleichung:



Das an der Oberfläche des festen Materials entstehende Na_2O reagiert mit der in der Atmosphäre enthaltenen Feuchtigkeit zu Natriumhydroxid.

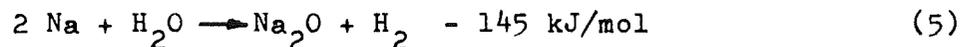


Eine weitere Reaktion findet mit dem Kohlendioxid der Atmosphäre statt. Da der Sauerstoff-Anteil der Luft ein Vielfacher der des Kohlendioxids (CO_2) ist, reagiert Natrium zunächst nach Gleichung (1) und das Natriumoxid dann mit dem CO_2 folgendermaßen:

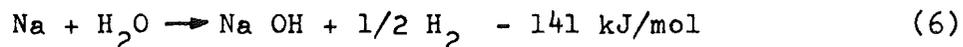


Diese Reaktion verläuft langsam. Außerdem werden wegen des geringen CO_2 -Gehaltes in der Luft, er beträgt im Mittel ca. 345 ppm_v [24], sehr große Luftmengen benötigt. Die freiwerdende Wärme kann daher außer acht gelassen werden. Anders verläuft die Reaktion beim Einsatz von CO_2 -Löschgeräten zur Bekämpfung von Natriumbränden. Hier ist das Angebot an CO_2 so groß, daß es zu gefährlichen Reaktionen [27, 33] kommt (s. Tab. 2 Formel 4a).

Mit Wasser reagiert Natrium spontan nach folgender Gleichung:

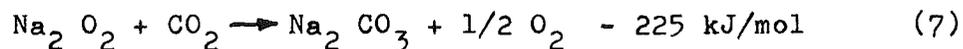


Das entstandene Na_2O reagiert weiter mit H_2O nach Formel (3) zu Na OH . Diese Reaktion kann auch direkt erfolgen:



Wie aus Gleichung (5) und (6) zu ersehen ist, wird Wasserstoff frei. In geschlossenen oder schlecht belüfteten Räumen ist daher Vorsicht geboten. Die Bedingungen zur Bildung von Knallgas bestehen nach [21] bei einem Wasserstoffanteil $\text{H}_2 > 10 \text{ Vol } \%$ mit einem Sauerstoffanteil $\text{O}_2 > 5 \text{ Vol } \%$. Die Zündung kann z.B. durch das brennende Natrium erfolgen. In beiden Fällen liegen die Reaktionsprodukte zum Teil als Aerosole vor.

Das nach (2) entstehende $\text{Na}_2 \text{O}_2$ reagiert mit dem CO_2 der Luft nach folgender Gleichung:



3.2.2 Kohlenwasserstoffe-Luft

Da bei den Versuchen Benzinbrände als Vergleich dienten, wird kurz auf die Reaktionen eingegangen.

Das verwendete handelsübliche Benzin ist ein Gemisch von Kohlenwasserstoffen. Die Verbrennungswärme kann daher nur ungefähr angegeben werden. Nach [26] hat ein Motorenbenzin mit der Zusammensetzung 85 % C und 15 % H_2 einen unteren Heizwert von 41 000 bis 44 000 kJ/kg. In unseren Rechnungen wurde der Mittelwert von 42 500 kJ/kg verwendet. Nach [26] beträgt der Luftbedarf bei der Verbrennung 10,63 Nm³/kg bei einem

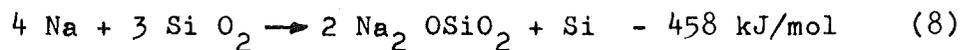
unteren Heizwert von 42 500 kJ/kg. Die theoretische Verbrennungstemperatur beträgt ca. 2 150 °C.

Im Gegensatz zum Natriumbrand sind die Verbrennungsprodukte gasförmig. Da das Benzin im Unterschied zum Natrium schon bei Temperaturen unter 100 °C siedet, bilden sich Benzindampf-Luftgemische. Sie sind explosiv und auch außerhalb des Brandherdes leicht entzündbar.

3.2.3 Natrium-Isolierwerkstoffe

Natriumführende Komponenten sind gegen Wärmeverluste isoliert. Im Verlauf der Brandversuche wurden verschiedene Isolierwerkstoffe auf ihr Verhalten gegenüber Natrium untersucht. In Tab. 3 sind diese Isolierwerkstoffe zusammengestellt und ihre Hauptbestandteile aufgeführt.

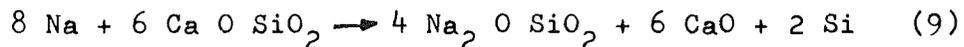
Bei der Reaktion zwischen Natrium und Siliziumoxid wird Wärme frei gemäß folgender Gleichung.



In allen verwendeten Isolierwerkstoffen ist ein hoher Anteil an SiO_2 enthalten, der aber zum überwiegenden Teil chemisch gebunden ist.

Betrachten wir zuerst die Verbindung CaOSiO_2 , welche im Isolierwerkstoff I_1 und I_3 enthalten ist.

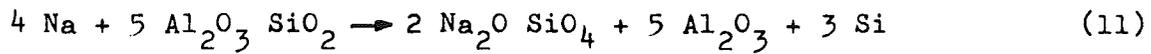
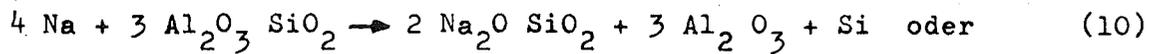
Die Reaktionsgleichung könnte folgendermaßen aussehen:



Nach [19, 23] ist diese Reaktion endotherm und daher nicht an der Aufheizung der Isolierung beteiligt.

In den verwendeten Isolierwerkstoffen ist das Kalziumoxid in unterschiedlichen Prozentsätzen vorhanden. Für eine stöchiometrische Verbindung zwischen Ca O und SiO_2 muß das Gewichts-Verhältnis $\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 0,92$ betragen.

In den Isolierwerkstoffen I_1 und I_2 ist ferner die Verbindung $\text{Al}_2 \text{ O}_3 \text{ SiO}_2$ enthalten. Die Reaktionsgleichung könnte folgendermaßen aussehen:



Die Reaktion (10) ist schwach exotherm, die Wärmefreisetzung ist aber so gering, daß sie vernachlässigt werden kann.

Die Reaktion (11) ist endotherm und damit an einer Reaktion zur Aufheizung der Isolierung nicht beteiligt. Für eine stöchiometrische Verbindung zwischen Al_2O_3 und SiO_2 muß das Gewichts-Verhältnis $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2 = 1,7$ betragen.

Der freie sich ergebende SiO_2 Anteil ist in Tab. 3 wiedergegeben, ebenso die errechnete freiwerdende Wärme pro kg Isolierwerkstoff bei der Reaktion mit Natrium.

Isolierwerkstoff I_3 wäre der günstigste, wenn er nicht einen Wassergehalt von ca. 18 % hätte. Da bei der Aufheizung ein Teil des Wassers verdampft, wird in der Rechnung nur der Kristallwasseranteil von 14 % zugrunde gelegt. Bei der Reaktion von Natrium mit Wasser nach Formel (5) werden 8 037 kJ/kg H_2O frei, bezogen auf 1 kg des Isolierwerkstoffes I_3 bedeutet dies eine zusätzliche Wärmemenge von 1 130 kJ. Zusammen mit der Reaktion aus dem freien SiO_2 -Anteil ergibt sich für Isolierwerkstoff I_3 eine Wärmefreisetzung von 1 190 kJ. Die mögliche Reaktion des Wasserstoffs mit dem Sauerstoff der Luft ist nicht berücksichtigt.

Zusätzlich wurde in Tab. 3 die Erwärmung der Isolation durch die Reaktion eingetragen. Zugrundegelegt wurde eine Ausgangstemperatur von 400 °C und die vollständige Reaktion des Natriums mit den Isolierwerkstoffen nach Formel (8 u. 5).

3.2.4 Natrium-Beton

Untersuchungen über die Reaktionen zwischen Natrium und Beton wurden in USA [14] durchgeführt. Sie bestätigen, daß die Bestandteile der handelsüblichen Betone zum größten Teil mit Natrium reagieren. Der untersuchte Beton hatte folgende Zusammensetzung:

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	CaO	H_2O	Rest	Σ
54,5	10,5	3,5	3,1	3,2	0,3	1,5	1,9	15,2	5,1	1,2	100 %

Werden die wichtigsten mit Natrium reagierenden Bestandteile wie SiO_2 - Fe_2O_3 -FeO und H_2O zusammengefaßt, so ergibt sich, daß 66 Gewichtsprozent, d.h. ca. $\frac{2}{3}$ des Betons gegen Natrium nicht beständig sind. Nach den Gleichungen 6, 8, 12 und 13 sind diese Reaktionen exotherm und führen zur Zerstörung des Betongefüges. Die Grenze der Temperaturbeständigkeit gegen Wärmespannungen liegt bei ca. 300°C , so daß bei Berührung mit flüssigem Natrium der Beton schon bei relativ geringen Temperaturen einreißt. Das Natrium dringt in diese Risse ein. Die Reaktionsfläche zwischen Beton und Natrium wird dadurch vergrößert und eine rasche Zerstörung des Betons ist die Folge.

4. Versuchsaufbau

4.1 Versuchseinrichtungen

4.1.1 Versuchsgebäude

Das Versuchsgebäude besteht aus einer Stahlkonstruktion mit Eternit-¹⁾ Verkleidung und Eternit-¹⁾gedecktem Dach (s. Abb. 1). In einer Stirnseite ist ein bis zum Dach reichendes Tor eingebaut.

Der Versuchsraum ist durch eine Stahlblechwand zum Meßraum hin abgeschlossen. Die Seitenwände des Versuchsgebäudes bestehen bis zu einer Höhe von 3 m aus Schiebetüren, darüber ist ein Lichtband aus GFK angebracht. Der Boden ist mit Betonplatten belegt. In der Mitte des Versuchsraumes befindet sich eine 0,25 m tiefe Mulde aus Stahlbeton.

Der Meßraum schließt an den Versuchsraum an. Es sind dort folgende wichtigen Komponenten installiert (s. Abb. 31): Die Abluftanlage für den Versuchsraum (Pos. 10), der Na-Versorgungsstand für Versuche bis zu 60 l (Pos. 12) und die Meßwertregistrierung (Pos. 11).

Zur Beobachtung der Vorgänge im Versuchsraum sind in die Trennwand 4 Fenster (Pos. 9) eingelassen.

Die Abluftanlage dient zur Absaugung der bei den Brandversuchen auftretenden Aerosolschwaden. Dadurch war es möglich, den Brandherd zu beobachten, zu fotografieren und zu filmen. Außerdem sollen Belüftungsverhältnisse wie sie in Anlagen und Versuchshallen vorliegen, nachgebildet werden. Zu diesem Zweck sind im Meßraum zwei Radiallüfter von 1 m Durchmesser installiert, die die Luft von der Versuchshalle ins Freie fördern (s. Abb. 2). Zur Regelung der Fördermenge sind verstellbare Drosselklappen eingebaut. Die ungedrosselte Fördermenge beträgt $2 \times 33\ 000 \text{ N m}^3/\text{h}$.

4.1.2 Auffangwanne $1,1 \text{ m}^2$ (s. Abb. 32)

Die Wanne wurde aus 3 mm dickem Stahlblech St 12 zusammengeschweißt. Für Versuche mit Abdeckung wurden zwei Aufschlagwinkel an den Längswänden befestigt. Das Abdeckblech war so gefaltet, daß parallele Auffangrinnen entstanden. Im Grund der Rinnen waren insgesamt 9 Löcher von $25 \text{ mm} \varnothing$. Dies entspricht einem Flächenanteil von 0,45 %. Um ein Verwerfen der Abdeckung durch ungleichmäßige Temperaturverteilung zu vermeiden,

1) Asbestzement

wurde diese an die Stirnwände geschraubt und durch sechs, an die Längswände der Wanne geschraubte Winkeleisen niedergehalten und grob abgedichtet.

Einschließlich bis zum Versuch Nr. 18 wurde die Wanne auf eine Lage feuerfester Steine gestellt. Da der Boden der Wanne sich bis zu diesem Zeitpunkt verworfen hatte, mußte eine neue Wanne gefertigt werden. Diese wurde mit zwischenliegender Isolierung auf einen steifen Stahlrahmen geschraubt.

Für Versuche mit Schutzgaseinspeisung wurde ein Rohr mit 10 Bohrungen von 3 mm \varnothing an einer Wannenzängswand in 170 mm Höhe angebracht.

Bei den Benzinbränden wurden Wannen mit nur 100 mm hohen Seitenwänden eingesetzt (s. Kap. 5.1.5).

Für Simulationsversuche mit Wasser zur Bestimmung des maximalen Durchflußvermögens durch die spezielle Abdeckung wurde eine Wanne von 1 m² Grundfläche mit einer Wandhöhe von 1 m angefertigt. Das Abdeckblech wurde auf halber Höhe eingeschweißt. Die Wanne wurde für eine zweite Versuchsreihe mit einem Entlüftungrohr versehen, das von der Abdeckung bis über den Rand der Wanne reichte.

4.1.3 Auffangwanne 4,5 m²

Diese Wanne bestand aus dem gleichen Material wie die zuvor beschriebenen, hatte jedoch eine 4-fache Grundfläche (Abb. 33). Um Bedingungen zu simulieren, die bei größeren Natrium-Mengen auftreten - geringere Abkühlung des Natriums durch die Wannenmasse -, wurde der Boden der Wanne mit Rohrheizkörpern von insgesamt 10 kW Leistung bestückt und auf eine 140 mm dicke Isolierung aus Kaowool (heiße Seite) und Steinwolle gestellt.

Der Wanneninhalt sollte während der Versuche kontinuierlich gewogen werden. Die Wanne wurde deshalb auf einen Rahmen aus I-Profil geschraubt und dieser mit drei Zugstangen an eine Kraftmeßdose gehängt. Damit sich die Wanne bei einseitiger Belastung nicht schief stellen konnte, wurde sie an zwei einander gegenüberliegenden Ecken mit je zwei, um 90° versetzten Kugellagern geführt (Abb. 33).

Für den Versuch mit Abdeckung wurden zwei Quer- und zwei Längsschotten eingeschweißt. Die dadurch gebildeten 4 Kammern waren durch Überlauf-

bohrungen miteinander verbunden. Die Bohrungen in den Querschotten lagen um 32 mm tiefer als der tiefste Punkt in der Abdeckung, um so einen gezielten Überlauf in die nächste Kammer zu erreichen. Die 4 Abdeckbleche wurden wie bei der 1,1 m²-Wanne auf Winkeleisen gelegt. Die Befestigung der einzelnen Abdeckungen erfolgte analog der Auffangwanne 1,1 m² (s. Abb. 34).

4.1.4 Wanne 0,18 m² (Abb. 35)

Da diese Wanne für Versuche mit Natrium über 800 °C eingesetzt werden sollte, wurde sie aus 3 mm dickem austenitischen Blech hergestellt. Der Boden und die Seitenwände wurden mit Rohrheizkörpern von insgesamt 12 kW Leistung bestückt. Zur Abdichtung des Deckels wurde am oberen Wannenrand eine mit Blei gefüllte Rinne angebracht, in die der Rand des Deckels eintauchte. Der Deckel war mit einer Aufhängeöse und einem Schutzgasanschluß versehen. Wanne und Deckel waren allseitig 200 mm dick mit Steinwolle und Kaowool isoliert. Um die Isolierung der Wanne wurde ein Blechmantel gelegt.

4.1.5 Natrium-Auslauf

Zur Nachbildung offenliegender Natrium-Leckstellen - im Vergleich zu Leckstellen mit Isolierung - wurden vier verschiedene Auslauf-Endstücke an der Natrium-Speiseleitung angebracht. Sie waren wie folgt angeordnet (Abb. 36):

- A Rohrstück 15 mm \varnothing vertikal nach unten in 1,4 m Höhe über dem Wannenboden
- B Brause mit 10 Bohrungen á 1 mm \varnothing und 10 Bohrungen á 1,2 mm \varnothing vertikal nach unten, 1,4 m über dem Wannenboden
- C Düse 1,7 mm \varnothing horizontal 1,4 m über dem Wannenboden gegenüber senkrechter Wand in 0,5 m Entfernung
- D Rohrstück 25 mm \varnothing vertikal mit darunterliegendem Blechwinkel, 2,4 m über dem Wannenboden.

4.1.6 Isolierte Rohrleitungsabschnitte

Zur Untersuchung von Bränden an Rohrleitungen wurde ein Teil der Speiseleitung durch ein isoliertes Rohr NW 50 mit definierter Leckstelle ersetzt. Es wurden sowohl horizontale, als auch vertikale Anordnungen (Abb. 37) aufgebaut. Als Leck dient eine Bohrung von 1,2 bzw. 3,8 mm \varnothing . Zum Vorheizen waren Heizstäbe am Rohr angebracht.

In Tab. 3 sind die verwendeten Isoliermaterialien beschrieben. Sie wurden folgendermaßen aufgebracht (Abb. 38):

I_1 in zwei auf Maschendraht gesteppte Bahnen; innere Lage 80 mm, äußere 70 mm dick

I_2 in 25 mm dicke Bahnen in fünf Lagen

I_3 in zwei Lagen von je zwei Rohrschalenhälften.

Die Isolierdicke war jeweils so ausgelegt, daß sich bei 600 °C Rohrtemperatur eine Außentemperatur von 60 °C einstellte.

Um das Isoliermaterial wurde ein Blechmantel aus 0,5 mm dickem, verzinktem Stahlblech gelegt. Um die nötige Formstabilität zu gewährleisten, mußten für die Versuche mit Sillan und Kaowool Abstandshalter auf das Rohr geschweißt werden,

4.1.7 Natrium-Versorgungsanlagen

Für Versuche mit Natrium-Mengen bis 60 kg wurde ein Versorgungsstand, für größere Natrium-Mengen ein 250 l-Behälter eingesetzt.

Der Versorgungsstand besteht aus folgenden wichtigen Komponenten: Natrium-Einschmelzbehälter, Heizbehälter, Füllstandssonde (bis 400 °C), Durchflußmesser, Förderpumpe bis 300 l/h, Anschluß zur Natrium-Förderung mittels Gasdruck.

Der Standort im Meßraum ist aus Abb. 31, Pos. 12 zu ersehen. In den Versuchsraum führte eine beheizte und isolierte Rohrleitung NW 16. Zwei Meter vor dem Ende der Rohrleitung war ein Absperrventil eingebaut, das vom Meßraum aus betätigt werden konnte.

Der 250 l-Behälter (Abb. 31, Pos. 7) war mit Rohrheizkörpern, Isolierung, Schutzgasanschluß, Manometer und Sicherheitsventil, sowie am

Auslaufrohr mit einem Durchflußmesser versehen. Er war im Versuchsraum aufgebaut und direkt an das dort befindliche Absperrventil angeschlossen. Die Natriumförderung erfolgte durch Gasdruck.

4.1.8 Sicherheitsvorkehrungen

Zu den vorbeugenden Schutzmaßnahmen zählten folgende Vorkehrungen:

- Personen und Meßgeräte wurden durch eine Trennwand mit Sichtfenstern zwischen Versuchsraum und Meßraum geschützt,
- Zwei Ventilatoren mit je 33 000 m³ Luftdurchsatz konnten wahlweise eingeschaltet werden, um die Aerosole abzusaugen und damit die Sicht zum Brandherd freizuhalten.
- Die Natriumventile im Versuchsraum wurden durch Fernbedienung aus dem Meßraum betätigt.
- Die Natriumversorgungseinheiten hatten eigene Auffangwannen, um bei einem Leck das Natrium unter Kontrolle zu haben.
- Der Betonboden der Versuchshalle wurde in der Umgebung des Brandes durch eine Blechwanne vor Berührung mit Natrium geschützt.
- Wasserführende Leitungen in unmittelbarer Nähe der Brandstelle wurden vermieden.
- Brennbares Material wurde aus dem Versuchsraum entfernt.

Alle Personen, die sich im eigentlichen Versuchsraum aufhielten, waren mit einfacher Brandschutzkleidung ausgerüstet.

Die in [29] beschriebene Ausrüstung wurde nur z. Teil eingesetzt, nachdem bei den ersten Versuchen mit kleinen Mengen Natrium erkannt wurde, daß Thermgardlederanzüge und schwerer Atemschutz nicht erforderlich waren. Fast ausschließlich wurde daher folgende Schutzkleidung verwendet.

- festes Schuhwerk,
- Gamaschen aus Thermgardleder, 45 cm lang mit Schnellverschluß,
- Arbeitshosen mit Flammenschutzimprägnierung,
- Arbeitsmäntel mit Flammenschutzimprägnierung,

- Vollsichtmasken mit Filter 89 B/St,
- Schutzhelm aus glasfaserverstärktem Polyester-Harz,
- Schutzscheiben aus Cellon zu obigem Helm,
- Schutzbrillen aus Hartglas,
- Fingerhandschuhe aus Thermgardleder mit Stulpe,
- Thermgardlederschürze beim Hantieren mit Brandrückständen.

Zu Beginn eines jeden Versuchs waren im Versuchsraum keine Personen anwesend. Erst während des Einlaufvorganges, sobald zu erkennen war, daß keine Gefahr bestand, durfte der Raum betreten werden.

Die beschriebene Schutzkleidung reichte aus, um sich auch in unmittelbarer Nähe des Brandherdes aufzuhalten. Kleinere Natriumspritzer erloschen auf der Schutzkleidung.

Für unvorhergesehene Vorkommnisse stand bei allen Versuchen die im Umgang mit Natrium vertraute Werksfeuerwehr in Bereitschaft.

Im Versuchsraum selbst standen Löschgeräte der Brandklasse "D" und Löschsand bereit [29].

Die bereitgestellte Löschmittelmenge war so bemessen, daß die gesamte eingesetzte Natriummenge hätte abgedeckt werden können. Die Größe der Löschgeräte reichte von 6 kg Handlöscher bis zum fahrbaren 250 kg Löschgerät.

4.2 Versuchsdokumentation

4.2.1 Temperaturen

Die Temperaturen wurden mit Ni-CrNi Mantel-Thermoelementen von 1 mm \emptyset gemessen. Die zulässige Abweichung der Thermospannung beträgt bis 100 °C \pm 3% und über 300 °C $<$ \pm 1 %. Die Thermoelemente wurden mit Stecker an einen Verteilerkasten im Versuchsraum angeschlossen und von dort über Ausgleichsleitungen in den Meßraum geführt.

Bei den Versuchen mit Auffangwannen wurden die Thermoelemente, wie in der Abb. 40 gezeigt, in sogenannte Meßsäulen (A ... C) eingesetzt. Bei der Ausführung A und B lagen die Meßstellen der Thermoelemente frei

und wurden häufig während des Brandes zerstört. Deshalb wurde in späteren Versuchen die Anordnung C mit Schutzröhrchen verwendet. Die dadurch verlängerte Ansprechzeit der Thermolemente ist ohne Belang, da jeder Meßwert nur alle 18 s registriert wurde (s. Kap. 4.2.5). Die Koordinaten der Meßsäulen sind in Tab. 4 angegeben und in Abb. 39 dargestellt. Außerdem kann aus der Tab. 4 die Lage und Zahl der Temperatur-Meßstellen der einzelnen Versuche ersehen werden. Um die Temperaturschichtung genau zu erfassen, wurden die Meßstellen bei den Versuchen 3 bis 5 und 14 bis 17 auf zwei Meßsäulen verteilt, bei den Versuchen 19 bis 25 auf mehrere Meßsäulen, um das horizontale Temperaturniveau zu erfassen. Wie der Tab. 4 zu entnehmen, wurden mehrere Thermolemente außerhalb der Wanne an separaten Meßständen angebracht.

In Abb. 41 ist u.a. die Schaltung der bei den Versuchen 23 bis 25 eingesetzten Temperaturdifferenzmessung in der Abluftanlage gezeigt. Die Thermolemente gleicher Nummer wurden in Differenzschaltung an die Registrieranlage angeschlossen.

Bei den Versuchen mit isolierten Rohrleitungsabschnitten wurden die Thermolemente mit Schutzröhrchen in der Isolierung befestigt (s. Abb. 40, Anordnung D). Die radialen Abstände der Meßstellen für verschiedene Isoliermaterialien sind der Abb. 38 zu entnehmen. Die Meßstellen wurden in fünf Meßebenen zusammengefaßt die in den Abb. 58 und 59 schraffiert gekennzeichnet sind. In der Tab. 4 (Vers. 6 bis 13 und 18) ist die Lage der vier, in der Auffangwanne eingesetzten Thermolemente angegeben.

4.2.2 Natriummengen

Die bei den einzelnen Versuchen eingebrachten Natriummengen wurden nach verschiedenen voneinander unabhängigen Methoden ermittelt.

- 1) Füllstandsmessung im Natriumvorratsbehälter,
- 2) Durchsatzmessung in der Natrium-Speiseleitung,
- 3) Gewichtsbestimmung der in den Vorratsbehälter eingebrachten Natriummenge,
- 4) Gewichtsbestimmung der in die Wanne eingebrachten Natriummenge.

Der Füllstand 1) wurde mit induktiv wirkenden Füllstandssonden mit kontinuierlicher Anzeige gemessen. Da deren Betriebstemperatur auf ca. 400 °C begrenzt war, konnte sie nur bei einem Teil der Versuche benutzt werden.

Der Durchsatz 2) wurde mit einem kalibrierten Durchflußmesser gemessen. Er diente dazu, den gewünschten Natriumdurchsatz einzustellen und die Natriummenge zu ermitteln.

Die Methode nach 3) beschränkte sich auf die Versuche, die aus dem großen Vorratsbehälter gespeist wurden. Dazu wurde das Gewicht des Fasses, in dem das Natrium angeliefert wurde, vor und nach dem Einfüllen in diesen Vorratsbehälter mit einer Federwaage gemessen. Der Vorratsbehälter wurde bei jedem Versuch vollständig entleert.

Zur Bestimmung der Natriummenge 4) wurde die Auffangwanne über drei Zugstangen an eine induktiv wirkende Kraftmeßdose gehängt. Das Meßsignal wurde über einen Trägerfrequenz-Meßverstärker auf die Registrieranlage gegeben. Hierdurch war es möglich, nicht nur die eingebrachte Natriummenge sondern auch den Gewichtsverlauf während des Versuches zu ermitteln.

Welche der beschriebenen Methoden bei den einzelnen Versuchen eingesetzt wurden, ist der nachfolgenden Tab. 5 zu entnehmen.

Versuchsnummer	M e t h o d e			
	1)	2)	3)	4)
1 - 3	x	x	-	-
4, 5, 11 - 22		x	-	-
6, 8 - 10	x	x	-	-
23 - 25	-	-	x	x
26, 27	-	-	-	x
7, 28, 29	-	-	-	-
I R E	Ermittlung der Natrium-Mengen			Tab. 5

4.2.3 Verbrennungsrückstände

Von den bei einem Natrium-Brand entstehenden festen Verbrennungsprodukten verbleibt ein gewisser Anteil am Brandort zurück. Ein anderer Teil wird als Aerosole vom Brandort wegtransportiert und im Versuchsraum niedergeschlagen bzw. mit der Abluft nach außen gefördert.

Die Niederschläge in der Versuchshalle wurden an vier Meßstellen mit je einem horizontal angeordneten Filterpapier von 185 mm \varnothing und einem Glasbehälter von 50 mm \varnothing bestimmt. Sie waren 1,5 m über dem Boden angeordnet (s. Abb. 31, Pos. 2). Die Filterpapiere und der Inhalt der Auffanggläser wurden nach dem Versuch auf Natrium analysiert.

Zur Messung der mit der Abluft nach außen transportierten Aerosolmengen wurde aus den beiden Abluftkanälen eine bestimmte Luftmenge über Filter abgesaugt. Aus der Menge der im Filter verbliebenen Rückstände konnte die Gesamtmenge in der Abluft errechnet werden. Da mehrere Filter zur Verfügung standen (s. Abb. 41) war es möglich, die Messung in verschiedene Phasen zu unterteilen (z.B. in Brand- und Löschphase).

Die in der Wanne zurückgebliebenen Natrium- und Verbrennungsrückstände wurden gewogen und von mehreren Proben die Zusammensetzung der Rückstände analysiert. Das Verhalten der beim Brand entstehenden Aerosole wurde in speziellen Versuchsreihen untersucht (vgl. 5.2.4, 5.2.5 und 6.1.2, 6.1.4, 6.6.4).

4.2.4 Abstrahlung des Brandes

Die beiden Meßanordnungen (s. Abb. 42) waren aus je einem äußeren Rohrstück und einem inneren Strahlungsempfänger aus rußgeschwärztem Kupfer aufgebaut. Dieser wurde gegen das Rohr mit Keramikwolle isoliert, mit einem Thermoelement und für Eichzwecke zusätzlich mit einer Heizwendel versehen. Das Rohrstück wurde mit einem Deckel verschlossen, auf dem ebenfalls ein Thermoelement angebracht war. Die Meßrohre wurden im Versuchsraum so angeordnet, daß das eine durch die abziehenden Aerosolschwaden und das andere frei auf die Auffangwanne gerichtet war.

Die beim Versuch abgestrahlte Wärme erhöhte die Temperatur des Strahlungskörpers. Durch Wärmeleitung über die Isolierung wurde auch

der Deckel geringfügig erwärmt, so daß sich eine von der eingestrahnten Energie abhängige Temperaturdifferenz einstellte.

4.2.5 Meßwertregistrierung

Die Meßdaten wurden von zwei 6-Kanal-Punktdruckern und einem mehrkanaligen Digitaldatenerfassungssystem registriert. Die Punktdrucker dienten der Beurteilung der Vorgänge während der Versuchsdurchführung. Die damit erzielte Registrierengenauigkeit lag i.a. bei $\pm 9^\circ\text{C}$ zuzüglich der in Kap. 4.2.1 angegebenen Toleranz der Thermoelemente.

Das verwendete Digitalerfassungssystem hat 39 Eingänge. Die Meßstellen werden zyklisch abgefragt, an einem Digitalvoltmeter angezeigt und auf Lochstreifen registriert. Die Auslösung des Meßzyklus erfolgt automatisch durch eine Digitaluhr. Ein Zyklus mit 39 Meßstellen dauerte 14 s und wurde alle 18 s ausgelöst. Die Meßgenauigkeit betrug für alle Temperaturbereiche $\pm 1^\circ\text{C}$ zuzüglich der Toleranz der Thermoelemente. Die Lochstreifen wurden anschließend mit entsprechenden Rechenprogrammen über eine IBM 360/65 ausgewertet und die Ergebnisse in Datenlisten und Diagrammen ausgegeben.

4.2.6 Bild- und Filmaufnahmen

Es liegen insgesamt 1300 Farbbilder und 80 30 m-Farbfilme vor. Die Einzelbilder wurden während der interessantesten Versuchsphasen im Abstand weniger Sekunden aufgenommen. Bei längerdauernden Versuchsabläufen, die z.T. mehr als eine Stunde währten, wurden nur bei sichtbaren Änderungen weitere Aufnahmen gemacht.

Für die Filmaufnahmen stand eine 16 mm-Kamera mit einer 30 m Filmspule zur Verfügung, das entspricht einer Laufzeit von 2 min 44 sec bei 24 Bildern/sec. Bei länger dauernden wichtigen Szenen, z.B. Einlaufphasen oder ähnliche, wurde eine zweite Kamera eingesetzt, so daß ein lückenloser Übergang der Aufnahmen gewährleistet war.

Die Dias wurden sortiert. Sie geben in Gruppen zusammengestellt für jeden Versuch getrennt einen Überblick über die interessantesten Versuchsphasen und den Versuchsablauf.

Aus den 30 Filmen wurde ein Film mit dem Titel "Das Brandverhalten von flüssigem Natrium" in deutscher und englischer Fassung erstellt [32]. Dieser Film hat eine Laufzeit von ca. 23 Minuten.

5. Versuchsdurchführung

5.1 Versuchsverfahren

5.1.1 Allgemeines

Es wurden insgesamt 18 Versuche mit Auffangwannen durchgeführt (s. Tab. 6). Sie lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

- Versuche in offenen Auffangwannen,
- Versuche in Auffangwannen mit spezieller Abdeckung.

Erstere dienten im wesentlichen der systematischen Untersuchung von Flächenbränden, die letzterer der Entwicklung und Erprobung vorbeugender Maßnahmen gegen Flächenbrände. Die wichtigsten Versuchsparameter waren die Brandfläche (0,18 bis 4,5 m²), die Natriumtemperatur (400 bis 820 °C), die Natriummenge (9 bis 190 kg) und 4 Arten des Natriumauslaufs (Lecks). Durch die verschiedenartige Ausbildung des Natriumauslaufs sollten die wichtigsten Austrittsformen aus einer Leckstelle simuliert werden. Wichtiges Ziel der Versuche war die Ermittlung der flächenspezifischen Brandrate und die Auswirkung des Brandes auf seine unmittelbare Umgebung, wozu umfangreiche Messungen erforderlich wurden. Um die Ergebnisse mit konventionellen Bränden vergleichen zu können, wurden auch einige Brände in Wannen mit handelsüblichem Benzin durchgeführt.

Insgesamt wurden 9 Versuche mit Bränden an isolierten Rohrleitungen durchgeführt (s. Tab. 7). Die Versuchsparameter waren: die Lage der Rohrleitung (horizontal, vertikal), das Isoliermaterial, die Größe der Leckstelle und die Natriumtemperatur. Untersucht wurde der typische Ablauf solcher Brände, wozu die Ausbreitung des Natriums in der Isolierung, die hierbei auftretenden chemischen Reaktionen und das Aufnahme- bzw. Rückhaltevermögen der Isolierung unter verschiedenen Bedingungen gehörten. Die bei diesen Versuchen eingesetzten Natriummengen lagen zwischen 6 und 50 kg. Um einen Flächenbrand durch das austretende Natrium zu verhindern, wurde bei allen Versuchen die in Kap. 4.1.2 beschriebene Auffangwanne mit Abdeckung unter der Rohrleitung aufgestellt.

5.1.2 Natriumaustritt

Zur Simulation verschiedenartiger Natriumlecks wurden 4 Arten (A, B, C und D) des Natriumaustritts gewählt (s. Abb. 36). Der Einfluß dieser 4 Arten auf den Brandverlauf und die Auswirkung auf die unmittelbare Umgebung war zu ermitteln.

Durch Auslauf A wurde ein Leck simuliert, bei dem das Natrium unter geringem Druck als kompakter Strahl nach unten austritt. Die freie Fallhöhe bis zur Wanne ist gering.

Durch Auslauf B wurde ein Leck nachgebildet, bei dem das Natrium unter erhöhtem Druck aus einer Leckstelle austritt und dabei zersprüht.

Auslauf C entspricht einer kleinen freiliegenden Leckstelle bei der das Natrium unter Druck horizontal austritt und erst beim Aufprall auf ein Hindernis in einiger Entfernung zersprüht.

Durch Auslauf D wurde ein Leck simuliert, bei dem eine größere Natriummenge zunächst als kompakter Strahl austritt, aber dann durch ein Hindernis im Bereich der Leckstelle stark zerteilt wird. Zusätzlich wurde die Fallhöhe von 1,4 auf 2,4 m vergrößert.

Außer der Geometrie des Natriumaustritts wurde auch die pro Zeiteinheit austretende Natriummenge variiert.

5.1.3 Auffangwannen

Es wurden drei verschiedene Wannens z.T. mit Abdeckung zur Untersuchung von Natriumflächenbränden eingesetzt. Die Wannens sind in Kap. 4.1 beschrieben.

- Offene Auffangwannen

Der Einsatz der offenen Wannens richtete sich nach dem Versuchsziel. Während bei der Wanne 1,1 m² (Abb. 3) das Kennenlernen des Natriumflächenbrandes, die Messung der Brandrate und die Erprobung von Löschmaßnahmen im Vordergrund standen, lag das Schwergewicht bei der 4,5 m² Wanne darauf, den Einfluß der Größe der brennenden Natriumfläche auf das Brandverhalten festzustellen.

Für die Löschübungen wurde nur die 1,1 m² Wanne benutzt. Die Löschmaßnahmen wurden erst eingeleitet, nachdem im Brandgeschehen ein Beharrungszustand erreicht war, um die bis dahin erzielten Ergebnisse des Flächenbrandes zur Auswertung verwenden zu können.

Mit der 0,18 m² Wanne (Abb. 5) wurde das Verhalten eines Flächenbrandes ausgehend von einer Natrium-Bad-Temperatur, die bei Brandbeginn höher war als die bei den vorangegangenen Versuchen erreichte Gleichgewichtstemperatur, untersucht.

Einige Versuche wurden unter verschärften Bedingungen durchgeführt, indem die Wannen isoliert wurden, um den Wärmeverlust möglichst gering zu halten. Zusätzlich wurden die Wannen vor dem Versuch aufgeheizt um eine Abkühlung des einfließenden Natriums zu vermeiden (s. Tab. 6) oder wie bei Versuch Nr. 26 und 27 geschehen, das Natrium auf die vorgesehene Versuchstemperatur aufzuheizen.

Der Brandablauf wurde mit dem Einfüllen beginnend bis zum Brand- oder Reaktions-Ende so weit wie möglich messtechnisch erfaßt (s. Tab. 6). Nach Abkühlen der Wanne erfolgte die Beseitigung der Rückstände 1 bis 2 Tage später (s. Kap. 6.6.2).

- Wannen mit Abdeckung (s. Abb. 4 und 6)

Der Versuchsablauf entsprach dem im vorigen Abschnitt beschriebenen. Die Versuchsbedingungen sind der Tab. 6 zu entnehmen.

Grundsätzlich anders bei diesen Wannen mit Abdeckung ist der Reaktionsverlauf nach dem Einlaufvorgang. Die spezielle Abdeckung setzt die Brandrate des in die Wanne gelangten Natriums um ein vielfaches herab.

5.1.4 Isolierte Rohrleitungsabschnitte

Zwei im Grundaufbau gleiche, sich nur durch ihre horizontale (Abb. 7) bzw. vertikale (Abb. 8) Lage unterscheidende Versuchsanordnungen wurden eingesetzt.

Das Versuchsverfahren entsprach weitgehend dem in Kap. 5.1.3 beschriebenen.

Bedingt durch die relativ kleinen Leckstellen in der Rohrleitung

(Abb. 37, Tab. 7) und das unterschiedliche Rückhaltevermögen des Isoliermaterials dauerte es eine gewisse Zeit bis sich das Natrium durch Aerosolbildung am äußeren Blechmantel der Isolierung ankündigte. Erst danach wurde mit DIA- und Filmaufnahmen begonnen. Um eine visuelle Kontrolle über den Zeitpunkt der ersten sichtbaren Natriumreaktionen zu bekommen, waren bereits zu Beginn der Versuche Personen im Versuchsraum anwesend. Der Natriummengenstrom wurde vor jedem Versuch festgelegt, die gesamte pro Versuch eingespeiste Natriummenge wurde jedoch vom Versuchsablauf bestimmt. Die Zuspeisung wurde abgestellt, sobald sich am Blechmantel der Isolierung ein etwa konstanter Austritt von Natrium eingestellt hatte.

Die Versuche 7, 10, 18 bilden hier eine Ausnahme. In Versuch 7 verstopfte sich die Leckstelle, so daß kein Natrium austrat. In Versuch 10 wurde alles verfügbare Natrium (38 kg) in der Isolierung gespeichert. Es trat kein Natrium am Blechmantel aus. In Versuch 18 wurde wegen des gefährlich erscheinenden Brandgeschehens (s. Abb. 22) die Zuspeisung bei 12,5 l unterbrochen. Die Ursache für diesen starken Brand konnte erst nach Versuchsende und Rücksprache mit dem Hersteller des bei diesem Versuch verwendeten Isoliermaterials geklärt werden (s. Kap. 3.2.3).

Nach dem Ende des Natriumaustritts durch den Blechmantel und Abkühlen der Versuchsanordnung auf Raumtemperatur wurden die Brandrückstände, wie in Kap. 6.6.3 beschrieben, beseitigt.

5.1.5 Benzinbrände

Es wurden insgesamt 7 Benzinbrände durchgeführt. Der erste Brand mit einer Benzinmenge von 5 kg wurde meßtechnisch nicht erfaßt, sondern diente nur zur visuellen Beobachtung des Brandgeschehens. Da wegen der Flammenhöhe und Wärmeentwicklung mit einer Beschädigung des Gebäudes gerechnet werden mußte, wurden die folgenden Benzinbrände in der 0,8 m² Wanne (Abb. 9) außerhalb des Gebäudes durchgeführt.

Die Benzinbrände 2 bis 4 wurden in einer Wanne mit den Maßen 800 x 1000 x 100 durchgeführt. Hierzu wurde aus einem Vorratsbehälter eine bestimmte Menge Benzin eingefüllt und mit einer Lunte entzündet. Der Brandverlauf, festgehalten in Bild- und Filmaufnahmen, wurde mit Thermoelementen, die in verschiedenen Höhen über der Wanne angebracht

waren, erfaßt und, wie in Kap. 4.2.1 beschrieben, registriert. Die Brandrate wurde aus der Zeit vom Zündbeginn bis zu jener Brandphase, bei der ein sichtbares Nachlassen der Brandintensität festzustellen war und der Wannenboden nur noch teilweise mit brennendem Benzin bedeckt war, gewonnen.

Die Benzinbrände 5 bis 7 wurden in einer Wanne mit den Maßen 505 x 505 x 100 mm durchgeführt. Der Wannenboden war zusätzlich mit 25 mm Kaowool isoliert. Diese kleineren Brände, durchgeführt in dem Versuchsraum, dienten der Eichung der Brandraten-Messung nach Kap. 5.2.2.

Der generelle Versuchsablauf war gekennzeichnet durch zunehmende Rußentwicklung mit fortschreitender Branddauer. Die durch die Konvektion am Brandherd zugeführte Luftmenge reichte zur vollständigen Verbrennung der entstandenen Benzindämpfe direkt über der Wanne nicht aus. Noch 4 m über dem Brandherd wurden Zündvorgänge und Flammenspitzen beobachtet. Kurz nach dem Entzünden siedete das Benzin in der Wanne. Rückstände sind am Brandherd nicht verblieben.

5.2 Versuchsauswertung

5.2.1 Temperaturen

Die vom Rechner erstellten Temperaturdiagramme (s. Kap. 4.2.5) wurden mit zur Beurteilung der Brandabläufe verwendet.

Bei den Versuchen mit Auffangwannen wurden die Natrium-Einlauftemperatur, die Natriumtemperatur nach dem Füllen der Wanne und der Einfluß des Brandes auf die Umgebung ermittelt. Bei Natriumlachenbränden in offenen Wannen wurde an dem zeitlichen Temperaturverlauf festgestellt, wann die Beharrungstemperatur des Natriums in der Lache erreicht war. Außerdem war deutlich zu erkennen, wann die Reaktionszone durch Absinken des Natriumspiegels eine bestimmte Höhenposition durchlief. Bei den Versuchen mit abgedeckten Wannen interessierte der Reaktionsablauf, die Abkühlgeschwindigkeit, sowie der Einfluß durch eingespeistes Schutzgas. Die Ergebnisse der Temperaturdifferenz-Messung an der Abluftanlage wurden zur Ermittlung der Brandrate benötigt (s. Kap. 5.2.2).

Die Vorgänge bei den Versuchen an isolierten Rohrleitungsabschnitten, wie die geometrische und zeitliche Natriumverteilung in der Isolierung und die Auswirkungen der Reaktionen mit den verschiedenen Materialien, wurden mit Hilfe der zeitabhängig gemessenen Temperaturen beurteilt.

5.2.2 Brandraten

Zur Ermittlung der Brandrate wurden zwei voneinander unabhängige Methoden angewandt.

Eine mittlere Brandrate wurde aus der Branddauer und der verbrannten Natriummenge nach folgender Gleichung ermittelt:

$$R_m = \frac{M_{Na}}{t_R \cdot A_W} \quad \text{[kg/m}^2 \text{ h]} \quad (14)$$

Die Masse des verbrannten Natriums wurde aus der in die Wanne eingebrachten Menge (s. Kap. 4.2.2) abzüglich der unverbrannten Rückstände bestimmt. Der Anteil an unverbranntem Natrium wurde durch Wägung, die Entnahme mehrerer Proben und anschließender chemischer Analyse ermittelt. Die Branddauer war leicht festzustellen, da das Brandende sowohl visuell als auch an Hand der Temperaturen in der Wanne deutlich zu erkennen war.

Von großem Interesse ist aber auch der zeitliche Verlauf der Brandrate. Er wurde aus der momentan freigesetzten Energie ermittelt.

$Q(t)$ [kJ/h] sei die beim Brand pro Zeiteinheit freigesetzte Wärmeenergie, H [kJ/kg] die bei der Verbrennung von einem Kilogramm Natrium freiwerdende Verbrennungswärme und A_W die Brandfläche bzw. Grundfläche der Wanne. Die zeitabhängige Brandrate ergibt sich dann aus folgender Beziehung:

$$R(t) = \frac{Q(t)}{H \cdot A_W} \quad \text{[kg/m}^2 \text{ h]} \quad (15)$$

wenn der Verlauf von Q während der Branddauer gemessen und eingesetzt wird:

Eine gewisse Schwierigkeit besteht hier in der exakten Bestimmung von Q , da verschiedene Energiebeträge in die Gesamtbilanz eingehen.

Diese sind im einzelnen:

- Q_1 [kJ/h] Energieabgabe zur Erwärmung des Natriums
- Q_2 [kJ/h] Energieabgabe zur Erwärmung der Wanne
- Q_3 [kJ/h] Energieabgabe zur Erwärmung der Isolierung
- Q_4 [kJ/h] Energieabgabe zur Erwärmung des Gebäudes
- Q_5 [kJ/h] Energieabgabe des Gebäudes an die Umgebung
- Q_6 [kJ/h] Energieabgabe an die Abluft

Damit wird

$$R(t) = \frac{\sum Q_{1-6}(t)}{H \cdot A_W} \quad \text{[kJ/m}^2 \text{ h]} \quad (16)$$

Die Energien Q_1 , Q_2 und Q_3 sind nur von Null verschieden, solange eine Temperaturänderung stattfindet. Abschätzungen haben ergeben, daß diese drei Anteile, bezogen auf die gesamte Energiefreisetzung während des Brandes weniger als 1 % ausmachen. Sie werden daher für die Mehrzahl der Auswertungen vernachlässigt. In einigen Fällen wurden sie anhand der gemessenen Temperaturverläufe berücksichtigt.

Die Energiebeträge von Q_4 und Q_5 wurden bei den Versuchen nicht gemessen. Theoretische Betrachtungen und Eichversuche mit brennendem Benzin ergaben, daß ihr Anteil in der Größenordnung von je etwa 1 % liegt. Sie wurden daher gleichfalls vernachlässigt.

Die Berechnung der Brandrate erfolgte daher im wesentlichen aus Q_6 , der Energieabgabe an die Abluft. Für Q_6 gilt:

$$Q_6(t) = m_L \cdot c_{pL} \cdot \Delta T(t) \quad \text{[kJ/h]} \quad (17)$$

Gleichung 17 in die vereinfachte Gleichung 16 eingesetzt ergibt:

$$R(t) = \frac{m_L \cdot c_{pL} \cdot \Delta T(t)}{H \cdot A_W} \quad \text{[kg/m}^2 \text{ h]} \quad (18)$$

Für den Fall, daß die Brandfläche nicht bekannt ist, z.B. während der Einfüllphase, entfällt der Faktor A_W aus Gleichung 18 und es verbleibt nur noch die Brandrate in kg/h.

Während eines Versuches ist die einzige Variable in Gleichung 18 nur die Temperaturdifferenz ΔT . Sie wurde in einer Differenzschaltung mit Thermoelementen (s. Kap. 4.2.1) gemessen und kontinuierlich aufgezeichnet. Für m_L , c_{pL} und H wurden folgende Werte eingesetzt.

$$\begin{aligned} m_L &= 80950 \quad \text{kg/h} && \text{(ermittelt aus Messungen im Abluftkanal)} \\ c_{pL} &= 1,0 \quad \text{kJ/kg } ^\circ\text{C} && \text{(bei } 15 \text{ } ^\circ\text{C)} \\ H &= 9\,100 \quad \text{kJ/kg} && \text{(nur Reaktion (1) s. Kap. 3.2.1 ange-} \\ &&& \text{nommen aber bei ca. } 800 \text{ } ^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

In Gleichung 18 eingesetzt ergibt dies:

$$R(t) = \frac{8,91}{A_W} \cdot \Delta T(t) \quad \text{[kg/m}^2 \text{ h]} \quad (19)$$

Da durch die Beheizung der Wanne und die Leistung der Lüfter bereits kleine Temperaturdifferenzen vorhanden waren, wurden diese vor Versuchsbeginn aufgezeichnet und zur Auswertung dann von den Versuchswerten in Abzug gebracht.

Die Brandrate in Wannen mit spezieller Abdeckung kann auch nach Gleichung 16 ermittelt werden. Wegen der geringen Energiefreisetzung in der Wanne trifft jedoch die Aussage, daß der Energieanteil von Q_1 , Q_2 und Q_3 klein ist gegenüber Q_6 , nicht mehr zu. Die Energiefreisetzung in der Wanne erwies sich als kleiner als die Wärmeverluste der Wanne selbst, so daß sich diese ständig abkühlte. Zur Ermittlung der Brandrate nach Gleichung 16 müssen die von der Temperatur abhängigen Energieanteile $Q_1(T)$, $Q_2(T)$ und $Q_3(T)$ mit in der Rechnung berücksichtigt werden. Da der Temperaturverlauf zeitabhängig ist, folgt:

$$R(t) = \frac{Q_6(t) - [Q_1(t) + Q_2(t) + Q_3(t)]}{H \cdot A_W} \quad \text{[kg/m}^2 \text{ h]} \quad (20)$$

Nur wenn die temperaturabhängigen Wärmeverluste der Wannenordnung bekannt sind, läßt sich somit die Brandrate ermitteln. Für die $1,1 \text{ m}^2$

Wanne wurden diese Verluste experimentell bestimmt, indem das Natrium in eine abgedichtete Wanne mit Abdeckung eingeleitet wurde. Eine Reaktion fand nicht statt. Aus der Abkühlkurve wurden die temperaturabhängigen Wärmeverluste ermittelt.

5.2.3 Wärmeabstrahlung

Nach dem Versuch wurde die gemessene Temperaturdifferenz zwischen Strahlungsempfänger und Deckel (s. Kap. 4.2.4) durch elektrisches Beheizen des Strahlungsempfängers reproduziert. Die dabei gemessene elektrische Energie ergab ein Maß für die im Versuch aufgenommene Strahlungsenergie.

Da die Meßanordnung mit einer großen Zeitkonstanten behaftet war, wurden nur die Werte verwendet, während denen die Temperaturdifferenz über längere Zeit konstant blieb.

5.2.4 Aerosole

Bei den Aerosolmessungen wurde unterschieden zwischen Aerosolen, die sich im Versuchsraum niederschlugen und Aerosolen, die von der Abluft mitgeführt wurden (s. Kap. 4.2.3).

Die in den Gläsern und auf den Filterpapieren im Versuchsraum verbliebenen Niederschläge wurden auf ihren Natriumanteil analysiert. Die erhaltenen Werte wurden in mg/m^2 umgerechnet.

$$N_s = \frac{N}{A} \quad \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^2} \right] \quad (21)$$

Hierbei ist:

N_s	$\left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^2} \right]$	an der Meßstelle gefundene spezifische Niederschlagsmenge, nur Natriumanteil
N	$\left[\text{mg} \right]$	der aus der Messung ermittelte Natriumanteil
A	$\left[\text{m}^2 \right]$	Größe der Niederschlagsfläche

Für die Gläser ist $A = 1,97 \cdot 10^{-3} \left[\text{m}^2 \right]$.

Für die Filterpapiere ist $A = 2,69 \cdot 10^{-2} \left[\text{m}^2 \right]$.

Die starke Luftströmung bewirkte, daß sich die Aerosole nicht gleichmäßig über den Versuchsraum verteilten. Der Niederschlag in Richtung der Absaugung war in der Regel wesentlich höher als auf der Torseite. Die gemessenen Niederschläge an den vier Meßstellen wurden daher arithmetisch gemittelt.

Wie in Kap. 4.2.3 beschrieben, wurden zur Messung der Aerosole in der Abluft Filter an die beiden Abluftkanäle angeschlossen. Nach dem Versuch wurden diese Filter zusammen mit den ausgefilterten Aerosolen luftdicht verschlossen, so daß keine weitere Reaktion mit dem Sauerstoff und dem Kohlendioxyd der Luft möglich war. In der chemischen Analyse wurde unterschieden zwischen dem Natriumanteil aus dem Natriumoxid bzw. aus dem Natriumcarbonat. Aus diesen Daten wurde dann der Massendurchsatz an Aerosolen bezogen auf die gesamte Abluft nach Gleichung 22 errechnet.

$$m_{\text{Na L}} = \frac{M_{\text{Na}} (\text{aus Na}_2\text{O}) + M_{\text{Na}} (\text{aus Na}_2\text{CO}_3)}{V_{\text{F}} \cdot \Delta t} \cdot V_{\text{L}} \cdot 60 \quad [\text{kg/h}] \quad (22)$$

Δt ist die Meßzeit in Minuten. V_{F} war bei den verwendeten Filtern $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Der Volumenstrom V_{L} der beiden Lüfter war etwas verschieden.

$$\begin{aligned} V_{\text{L I}} &= 33\,600 \text{ m}^3/\text{h} && \text{für Lüfter I} && \text{und} \\ V_{\text{L II}} &= 32\,500 \text{ m}^3/\text{h} && \text{für Lüfter II.} \end{aligned}$$

Setzt man diese Zahlenwerte in Gleichung 22 ein, so erhält man für Lüfter I bzw. Lüfter II:

$$m_{\text{Na L I}} = \frac{M_{\text{Na}} (\text{aus Na}_2\text{O}) + M_{\text{Na}} (\text{aus Na}_2\text{CO}_3)}{\Delta t} \cdot 1,344 \cdot 10^6 \quad [\text{kg/h}] \quad (23)$$

$$m_{\text{Na L II}} = \frac{M_{\text{Na}} (\text{aus Na}_2\text{O}) + M_{\text{Na}} (\text{aus Na}_2\text{CO}_3)}{\Delta t} \cdot 1,300 \cdot 10^6 \quad [\text{kg/h}] \quad (24)$$

Bei Versuchen mit starker Aerosolentwicklung wurde, mit Rücksicht auf eine mögliche Verstopfung der Filter, die Meßzeit Δt auf einige Minuten beschränkt. Wurden mehrere getrennte Messungen durchgeführt,

z.B. Anfangs- und Schlußphase, so mußte m_{Na} für jede Messung getrennt ermittelt werden.

5.2.5 Umgebungseinflüsse

Bei der Auslegung der in Kap. 4.1.1 beschriebenen Anlage wurde ein weit über das übliche Maß hoher Luftwechsel angestrebt, um die Versuchsbedingungen zu verschärfen, derart, daß möglichst viel Sauerstoff an den Brandherd herangeführt wird. Die Lüfter sind daher so bemessen, daß sich bezogen auf den Hallenquerschnitt eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 0,4 m/sec einstellt.

Bedingt durch das kurze Bauwerk war die Luftströmung im Bereich des Brandherdes jedoch wesentlich höher. Im Bereich der Türöffnung traten Wirbel auf, so daß sich in manchen Bereichen Rückströmungen entgegen der Hauptströmungsrichtung ausbildeten.

Ein Strömungsdiagramm in einem senkrechten Schnitt durch den Versuchsraum aufgenommen, zeigt die Hauptströmungsrichtung und Geschwindigkeiten als Mittelwerte über die Breite der Versuchswanne (Abb. 43).

Die Luftgeschwindigkeiten im Versuchsraum wurden von den jeweiligen Wetter-Wind-Verhältnissen beeinflusst. Da die großen Flügeltüren bei allen Versuchen voll geöffnet waren, konnten sich Windböen bis in die Halle auswirken. Aus der Tabelle 8 [30] ist zu ersehen, daß die Windgeschwindigkeiten außerhalb der Versuchshalle teilweise um den Faktor 5 höher lagen, als die durch Ventilatoren erzeugte Luftgeschwindigkeit in der Halle.

Die in die Halle einströmende Luft bewirkte, daß von der Tür aus gesehen, die Sicht zur Wanne freigehalten wurde, während bei genügend großer Brandintensität der restliche Teil der Halle von einem nahezu undurchdringlichen, weißen Aerosolnebel angefüllt war (s. Abb. 10).

Auch die relative bzw. absolute Feuchte der Luft war in den einzelnen Versuchen unterschiedlich hoch (s. Tab. 8). Dies wirkt sich insbesondere auf die Aerosole aus.

6. Versuchsergebnisse

6.1 Brände während des Natriumaustritts

6.1.1 Austrittsformen

In Kap. 5.1.2 wurden die Austrittsformen des Natriums aus einem simulierten Leck beschrieben. In den Abb. 11, 12, 13 und 14 wird das unterschiedliche Verhalten veranschaulicht.

- Der kompakte Natriumstrahl (Abb. 11) brennt auf seiner freien Wegstrecke praktisch nicht. Er erscheint silberglänzend bis schwarz bei Temperaturen zwischen 100 °C und 500 °C. Bei höheren Temperaturen und dunklem Hintergrund erkennt man, daß der Strahl glüht. An der Austrittsöffnung bildet sich eine Brandzone aus, die wahrscheinlich dadurch entsteht, daß sich kleinste Mengen Natrium am Rande der Austrittsöffnung ablösen und durch Vergrößerung der reagierenden Oberfläche die Reaktion mit dem O₂ der Luft einleiten. Diese Brandzone umschloß den austretenden Natriumstrahl in einer Länge von max. 100 mm.

Nach dem Auftreffen des Strahls auf ein Hindernis kommt es zum Versprühen und dadurch zum intensiveren Brand.

- Bei einigen Versuchen wurde der Strahl durch ein dachförmig gefaltetes Blech, das unter der Auslauföffnung angebracht war, zerteilt. Durch die Vergrößerung der Natriumoberfläche setzte sofort eine kräftige Reaktion mit Luft ein, begleitet von einer so dichten Aerosolentwicklung, daß schon nach kurzer Zeit nur noch mit Hilfe der Abluftanlage der Blick auf die Brandstelle freigehalten werden konnte (Abb. 10 und 12).
- Tritt das Natrium aus einem Leck unter Druck aus, kann es in viele Einzelstrahlen zerteilt werden. Diese lösen sich nach kurzer Weglänge in Einzeltropfen auf und brennen dann. Diese Bedingungen wurden mit einer, einer Brause ähnlichen, Mehrfachdüse simuliert (s. Kap. 4.2.3). Infolge der großen reagierenden Oberfläche war auch in diesem Falle die Aerosolentwicklung sehr stark (Abb. 13).
- Als vierte Form des Austretens von Natrium ist das Abtropfen oder Abfließen von isolierten Komponenten zu betrachten. In diesem Falle ist die Oberfläche des austretenden Natriums, hervorgerufen durch

vorherige Berührung mit Isolierstoffen, Verkleidungsblechen o.ä. schon so groß, daß das Natrium in jedem Falle brennt. Es kriecht von den Austrittsstellen an den Flächen entlang und brennt in ruhiger Form von der Oberfläche her ab. Bei verstärktem Austritt tropft oder läuft es brennend herab. Die Aerosolentwicklung war vergleichsweise schwach, da die freien reagierenden Oberflächen klein blieben (Abb. 14) und sich ein Natriumlachenbrand durch die darunter angeordnete Auffangwanne mit Abdeckung nicht ausbilden konnte.

6.1.2 Reaktionsrate und Aerosolfreisetzung

Wie im vorangegangenen Kapitel bereits in einem visuellen Vergleich festgestellt werden konnte, hängt die Reaktionsrate und die Aerosolfreisetzung von der Austrittsform des Natriums ab. Je feiner verteilt das Natrium austritt und je größer der Abstand von der Austrittsstelle bis zur Auffangwanne ist, desto größer ist die Reaktionsrate und mit ihr die Aerosolentwicklung. Begrenzt wird allerdings die Reaktionsrate durch ein endliches Sauerstoffangebot aus der Umgebung.

Für die Versuche 23 (Wanne mit spezieller Abdeckung), 24 und 25 (Brand in offener Wanne) ist die zeitabhängige Reaktionsrate in den Diagrammen, Abb. 44, 45 und 46 dargestellt.

Wie die Darstellungen zeigen, ergeben sich während der Auslaufphase kurzzeitig verhältnismäßig hohe Reaktionsraten. Der Höchstwert liegt bei Versuch 25 bei 334 kg/h . Bei Versuch 23 beträgt der entsprechende Wert nur 289 kg/h . Die Reaktionsrate der Auslaufphase setzt sich zusammen aus der Reaktion des Natriums auf dem Weg von der Austrittsstelle bis zur Auffangwanne und aus der Reaktion des in der Wanne sich ausbildenden Flächenbrandes. Bei Versuch 23 kommt daher bereits die den Brand eindämmende Wirkung der Wanne mit spezieller Abdeckung zum Ausdruck. Wird der Anteil des Flächenbrandes in Abzug gebracht, so ergeben sich bei den Versuchen 23, 24 und 25 über die Dauer des Natrium-Austritts gemittelte Reaktionsraten von 195 , 140 und 270 kg/h . Diese Werte sind etwa proportional den pro Zeiteinheit ausgetretenen Natriummengen, d.h. bei dieser Versuchsanordnung ist die Reaktion des austretenden Natriums proportional der Austrittsgeschwindigkeit.

Auf dem Weg vom Austritt zur Wanne sind bei Versuch 23 ca. 7 % und bei den Versuchen 24 und 25 etwa 6 % der eingefüllten Natriummengen verbrannt. Der etwas höhere Anteil bei Versuch 23 dürfte auf das stärkere Versprühen des Natriums beim Auftreffen auf die Abdeckung zurückzuführen sein.

Aus den Aerosolmessungen (Tab. 10) in Verbindung mit den Brandraten (Tab. 11) wurde ermittelt, daß bei den Versuchen 23 und 25 von dem im Strahl verbrannten Natrium ca. 85 % als Aerosole von der Abluft mitgeführt werden. Die auch bei Versuch 24 durchgeführten Aerosolmessungen sind für eine weitere Auswertung nicht verwertbar (s. Kap. 6.1.4).

Bei den Versuchen 19 und 21 (kompakter Strahl) wurden keine zeitabhängigen Reaktionsraten ermittelt. Hier sind nur indirekte Schlüsse aus der Aerosolmessung möglich. Ein Maß für die Beurteilung ist der in der Abluft gemessene Natriumanteil während der Anfangsphase, bezogen auf die eingesetzte Natriummenge. Aus Tab. 11 ist zu entnehmen, daß dieser Anteil bei den Versuchen mit kompaktem Strahl (19 und 21) um den Faktor 18 kleiner war als bei dem entsprechenden Versuch mit zerteiltem Strahl (23).

6.1.3 Einwirkungen des Natrium-Strahls auf verschiedene Werkstoffe

Ein Kontakt der üblichen Wandmaterialien wie Mauerwerk und Beton mit Natrium hoher Temperatur ist auszuschließen (s. Kap. 3.2.4). Es bietet sich hier eine Verkleidung mit Blech an. Zur Beobachtung von Versuchsanlagen und Versuchen sind außerdem Fenster erwünscht, die kurzzeitig versprühendem Natrium standhalten.

Als Versuchsmuster wurden daher folgende Werkstoffe unter einem auftreffenden Natrium-Strahl untersucht:

- Blech St 12; 2 mm stark
- Verbundglas normale Glasqualität
- Tempaxglas wärmebeständig bis 400 °C
- Spiegeldrahtglas mit einer Drahteinlage, Maschenweite 12 mm, Drahtstärke 0,5 mm.

Der Abstand der senkrecht aufgehängten Versuchsmuster bis zur Austrittsdüse betrug 0,5 m. Das Natrium trat mit einer Temperatur von 540 °C aus einer waagrecht angeordneten Düse von 1,7 mm Ø unter Druck aus (Abb. 15).

- Das Blech wurde mehrere Minuten dem Natriumstrahl ausgesetzt. Zunächst versprühte das Natrium nach dem Auftreffen stark, dann baute sich aber um die Auftreffstelle ein Wulst von Verbrennungsrückständen auf, der das Versprühen stark reduzierte. Das nicht verbrannte Natrium tropfte oder lief brennend vom Blech ab. Das Blech erwärmte sich in diesem Bereich nicht wesentlich über die Natriumtemperatur, da das auftreffende Natrium die durch den Brand entwickelte Wärme abführte.

Zur Prüfung der drei Glassorten wurden diese einzeln in Blechhalterungen vor die Blechwand auf der der Natriumaustrittsdüse zugekehrten Seite aufgehängt. Als Standzeit wurde die Zeit vom Auftreffen des Strahles bis zum Durchbrennen durch das Gas gemessen. Das Durchbrennen war u.a. erkennbar an dem schlagartigen Nachlassen des Versprühens auf der Oberfläche des Gases.

- Verbundglas hielt nur 10 s dem Natriumstrahl stand. Nach dem Zerspringen der dem Natriumstrahl zugekehrten Seite verbrannte die Folie und fast gleichzeitig zersprang auch die zweite Scheibe.
- Tempaxglas zersprang sofort beim Auftreffen des Natriumstrahles mit einem Knall und nur noch Bruchstücke steckten in den Halteklammern.
- Spiegeldrahtglas wurde ca. 1/2 Minute dem Natriumstrahl ausgesetzt und ließ kein Natrium durch. Nach Beendigung des Versuches war die Scheibe zwar zersprungen, hatte aber durch die Drahteinlage ihre Form behalten (Abb. 16).

6.1.4 Verhalten der Aerosole in der Umgebung

Die in der Halle während des Brandes entstehenden Aerosole wurden abgesaugt (Abb. 2).

Wie in Kap. 3.2.1 beschrieben, reagiert das in der Luft vorhandene Kohlendioxid mit dem stark ätzenden Natriumoxid rasch zu ungefährlichem

Natriumkarbonat nach Formel (3). Der in unserem Bereich in der Luft enthaltene Anteil an Kohlendioxid beträgt ca. 345 ppM_v, d.h. in der von den beiden Lüftern geförderten Abluftmenge können in der Stunde 63 kg Natriumoxidaerosole in Natriumkarbonat umgewandelt werden. Bei den Versuchen mit hoher Reaktionsrate während der Einfüllphase (s. Kap. 6.1.2) kann demnach nicht alles Natriumoxid vor dem Verlassen der Abluftanlage in Natriumkarbonat umgewandelt werden. Aerosolmessungen in der Abluft bei insgesamt 6 verschiedenen Versuchen bestätigen dies (s. Tab. 9). Der Natriumanteil, der in den Filtern abgeschiedenen Aerosole, wurde getrennt nach Natriumoxid (Na₂O) und Natriumkarbonat (Na₂CO₃) ermittelt. Bei Versuch 25 wurde während der Anfangsphase (t = 0 ... 4,5 min) ca. 1/3 der Aerosole in Natriumkarbonat umgewandelt, was in etwa auch dem theoretischen Wert entspricht. Jedoch bei den Versuchen 19 und 21, sowie 23 während der Abkühlphase, bei denen rechnerisch alle mit der Abluft abgeführten Na₂O-Aerosole in Na₂CO₃ hätten umgewandelt werden können, wurde noch Na₂O in den Filtern nachgewiesen. Dies deutet darauf hin, daß die Verweilzeit in der Abluftanlage für eine vollständige Umwandlung nicht ausreicht. Der Umwandlungsgrad schwankt hier zwischen 50 und 100 %.

Da jedoch die Aerosole auch nach Verlassen des Abluftkanals noch für gewisse Zeit im Abluftstrom verbleiben und dieser sich mit wachsender Entfernung immer mehr mit der Umgebungsluft vermischt, (für eine Entfernung von 10 m hinter den Ausblaseöffnungen wurde eine Vermischung mit der umgebenden Luft im Verhältnis 1:4 errechnet [31_7]) ist die Verweilzeit und das Angebot an Kohlendioxyd genügend groß um selbst bei den hohen Brandraten während des Einfüllvorganges alles Natriumoxid in das gefahrlose Karbonat umzuwandeln, was durch Messungen und durch den stumpfen nicht ätzenden Geruch des Karbonats bestätigt wurde.

Die Vegetation in der unmittelbaren Umgebung des Versuchsgebäudes hat keinerlei erkennbare Schäden genommen. Der Aufenthalt in der Umgebung selbst in den abziehenden Schwaden war gefahrlos und ohne Schutzmaske möglich.

Auf das besondere Verhalten der Aerosole bei Versuch 24 muß hier noch hingewiesen werden. Die mit der Abluft abgeführten Natriumoxid-Aerosole zeigten eine verhältnismäßig starke Wechselwirkung mit der Luftfeuchte. An den Einströmöffnungen der Abluftkanäle bildeten sich klumpenförmige Ablagerungen von feuchtem Natriumoxid (Abb. 17). Nach Beendigung des Versuches wurde festgestellt, daß die Filter und deren Ansaugöffnungen weitgehend verstopft waren, so daß die Meßergebnisse für eine weitere

Auswertung nicht verwendet werden konnten. An Hand der im Filter abgetrennten Aerosolmengen wurde nachgerechnet, daß der Luftdurchsatz bereits kurz nach Auslaufbeginn stark reduziert war. Da bei anderen Versuchen in den Filtern erheblich größere Mengen abgetrennt wurden, ohne daß es zur Verstopfung kam, dürfte die Ursache der Verstopfung die Reaktion mit der Luftfeuchte sein. Im Gegensatz zu den trockenen Aerosolen bilden die feuchten Aerosole nach kurzer Zeit einen zähflüssigen, klebrigen Belag auf dem Filter und hemmen damit den Luftdurchsatz. Ob es sich hierbei bereits nur noch um Hydroxid handelt, wurde nicht ermittelt. Der Wassergehalt in der Luft von etwa 5 g/m^2 würde jedenfalls für eine vollständige Reaktion ausreichen. Da dieser jedoch bei den Versuchen 23 und 25 gleichfalls bei etwa 5 g/m^3 lag und es dort aber zu dieser Erscheinung nicht kam, dürfte er allein nicht für den Ablauf der Reaktion entscheidend sein. Werden zu dem genannten Wassergehalt die relativen Luftfeuchten bezogen auf die Ablufttemperatur ermittelt, so liegt diese für Versuch 24 mit ca. 27 % deutlich über denen der Versuche 23 und 25 mit 8 % bzw. 5 %. Es wird daher angenommen, daß die relative Feuchte bei der Bildung von Hydroxid eine entscheidende Rolle spielt. Die relative Feuchte ist damit ein außerordentlich wichtiger Parameter bei der Entwicklung von Abscheidesystemen von Natrium-Oxidaerosolen.

6.2 Flächenbrände in offenen Wannen

6.2.1 Typischer Ablauf eines Natrium-Brandes

An Hand von Versuch Nr. 25, einem Brand in der $4,5 \text{ m}^2$ großen Wanne (Abb. 18) wird der typische Ablauf erläutert. Zunächst interessiert der Gang der Temperaturen in und über dem Natrium. In Abb. 47 ist die vertikale und horizontale Temperaturentwicklung gezeigt.

Das Natrium fließt aus dem simulierten Leck mit einer Temperatur von $645 \text{ }^\circ\text{C}$ aus. Während dieses Vorganges ($t = 0 \dots 2,5 \text{ min}$) werden einige Meßstellen von herunterspritzendem, brennendem Natrium berührt. Dies erklärt die kurzzeitig auftretenden Temperaturen bis zu $1100 \text{ }^\circ\text{C}$. Nach dem

Einfüllen treten diese hohen Temperaturen nicht mehr auf. Die Natriumtemperatur in der Wanne (Meßstelle 4/u, 4/10 und 14/u) zeigt einen raschen Anstieg von der Einfülltemperatur bis zu einer Art Gleichgewichtstemperatur bei ca. 730°C , 10 min nach Versuchsbeginn. Die Brandrate folgt diesem Verhalten, wie noch gezeigt wird, aber mit einer gewissen Zeitverzögerung. Von dem genannten Zeitpunkt an bleiben die Temperaturen auf dem erreichten Niveau nahezu konstant bis die Hauptmasse des Natriums verbrannt ist. Gerät eine Meßstelle, wie dies für 4/10 der Fall ist in die Reaktionszone, so steigt die Temperatur, wie bereits beim Einlaufvorgang erläutert, u.U. stark an, bis durch den fortschreitenden Abbrand die Reaktionszone weiter nach unten gewandert ist. Ein repräsentativer vertikaler Schnitt durch die Temperaturzonen gibt das obere Diagramm der Abb. 47 wieder. So beträgt die Natriumtemperatur am Boden der Wanne 730°C , die Luft-Aerosoltemperatur 170 mm darüber noch 580°C . In 800 mm Höhe sinkt sie auf 240°C ab.

Der im unteren Diagramm der Abb. 47 dargestellte vertikale Schnitt macht deutlich, daß sich die Natriumtemperaturen an verschiedenen Orten der Wanne kaum unterscheiden, in einer Höhe von 170 bzw. 400 mm über dem Wannensboden aber Temperaturunterschiede bis zu 100°C gemessen werden. Dies erklärt sich aus der Lage der Meßsäulen zur Hauptluftströmung über der Wanne (s. Kap. 4.2.1).

Der Verlauf der Brandrate wurde aus der Erwärmung der Abluft gewonnen. Am Beispiel des Versuchs 25 Abb. 48 ist eine solche Temperaturdifferenzmessung zwischen der frisch eintretenden Luft und der erwärmten Abluft wiedergegeben. Zur Bestimmung der Brandrate wurden zeitlich gemittelte Werte verwendet.

In Abb. 48 ist auch der Verlauf des Wannengewichtes eingetragen. Das Einsatzgewicht ändert sich während des Brandes praktisch nicht. D.h. die durch die Aerosole verschwindende Masse an Natrium wird durch die Sauerstoffaufnahme des verbleibenden Natriums ausgeglichen.

Die Messung der Wärmestrahlung in Versuch 25 (s. Kap. 5.2.3) ergab bei dem in den Aerosolschwaden stehenden Meßrohr eine Wärmeaufnahme von $5,36\text{ kW/m}^2$ und bei dem freistehenden Meßrohr von $7,9\text{ kW/m}^2$. Das bedeutet eine Reduzierung der Wärmestrahlung durch die Aerosole von 32 %. Dieser Wert gilt nur für die in Abb. 31 skizzierten Verhältnisse. Die Berechnung einer Gebäudebelastung durch Wärmestrahlung eines Natriumbrandes ist sehr schwierig, da diese von sehr vielen Faktoren

wie Strahlungszahlen, Temperaturen, Abständen, Strahlungswinkeln, Größen der Flächen, Aerosoldichten abhängen. Zur Abschätzung eines Höchstwertes kann die bei der Reaktionsbetrachtung ermittelte Reaktionszonentemperatur von ca. 940°C bei einer Strahlungszahl der brennenden Fläche von ca. $19 \text{ kJ/m}^2 \text{ h }^{\circ}\text{C}^4$ eingesetzt werden.

Der in Abb. 46 dargestellte Verlauf der Brandrate für Versuch Nr. 25 wird ausführlicher beschrieben. Nach Beendigung des Einlaufvorganges (s. Kap. 6.1.2) also ca. 2,5 min nach Versuchsbeginn, sinkt die Brandrate bis zum Zeitpunkt 7 min ab, um dann wieder anzusteigen. Wird der Verlauf der Natriumlachentemperatur (Meßstelle 4/u, 14/u) mit berücksichtigt, so findet sich für dieses Verhalten folgende Erklärung. Da die Wanne kälter als das eingefüllte Natrium (645°C) ist, kühlt sich das Natrium zunächst ab und damit sinkt auch die Reaktionsrate. Dies ist jedoch ein instationärer Vorgang, da, wie in Kap. 6.3.2 ausführlich behandelt, bei dieser Lachentemperatur mehr Wärme der Lache durch die Reaktion zugeführt, als durch die Verdampfung entzogen wird. Dies erklärt den Wiederanstieg der Lachentemperatur sowie der Reaktionsrate bis nach etwa 15 min bei einer Natriumtemperatur von ca. 730°C ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Von nun an brennt das Natrium mit fast konstanter Brandrate und Natriumtemperatur.

Den Einlaufvorgang eingeschlossen, wurde bis zum Ende des Brandes nach 50 min Dauer eine mittlere spezifische Brandrate von $45,5 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$ ermittelt; ohne den Einlaufvorgang für den reinen Flächenbrand beträgt sie $43,2 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$. Diese aus der kontinuierlichen Messung in der Abluft gewonnenen Brandraten sind infolge von Meßfehlern um etwa 8 % zu hoch, wie die Gegenkontrolle über die gesamt eingesetzte bzw. wirklich verbrannte Natriummenge ergibt.

Von den eingesetzten 190 kg Natrium sind insgesamt etwa 178 kg verbrannt. Der nicht verbrannte Natriumanteil von 12 kg wurde durch chemische Analyse aus den Verbrennungsrückständen in der Wanne ermittelt. Das unverbrannte Natrium befand sich überwiegend entlang den Seitenwänden der Wanne. In dieser Zone herrschen während des Brandes niedrigere Temperaturen und damit verbunden geringere Reaktionsraten. Mit Ausnahme der Rückstände in den Randzonen bildeten diese in der Wanne eine feste Masse bestehend aus etwa 58 % Na_2O , 16 % Na_2CO_3 , 1,5 % Na_2O_2 , 18 % Fe und 3 % Na. Der hohe Eisenanteil stammt aus dem korrosiven Abtrag des ferritischen Bleches der Wanne insbesondere im Bereich der Reaktionszone. Es wurde außerdem beobachtet,

daß Mantelthermoelemente sobald sie in die Reaktionszone gelangen, sehr rasch durchkorrodieren. Besonders an den austenitischen Schutzhörchen war ein Materialabtrag (bis zu 1 mm) zu erkennen.

Die Aerosolmessungen in der Abluft ergaben, daß während des reinen Flächenbrandes ca. 36 % der verbrannten Natriummenge als Aerosole mit der Abluft abgeführt werden. Der Rest verbleibt als Rückstand in der Wanne.

Der Aerosolniederschlag im Versuchsraum wurde über die gesamte Versuchsdauer, also auch während der Einfüllphase, gemessen. Der mittlere Natriumanteil betrug ca. 10 000 mg/m² (s. Abb. 49). Bezogen auf eine Fläche von etwa 64 m² ergibt sich damit ein Gesamtniederschlag im Versuchsraum von ca. 640 g. Dies entspricht 0,36 % der verbrannten Natriummenge.

Wird die mit der Reaktion verbundene Gewichtszunahme auf der Basis der zuvor genannten Natriumverbindungen und entsprechendem Anteil berechnet, so liegt die Zunahme ähnlich hoch wie der mit der Abluft abgeführte Natrium-Anteil. D.h. das Gewicht der Wanne bleibt, wie bereits festgestellt, etwa konstant.

6.2.2 Weitere Versuchsergebnisse

Zwei weitere Flächenbrände in offenen Wannen von je 1,1 m² Grundfläche (Abb. 19) sind in Abb. 50 dargestellt. Das Natrium wurde nach einer gewissen Branddauer mit Löschpulver abgedeckt (s. Kap. 6.5.1).

Die in Versuch 5 eingebrachte Natriummenge betrug 26 kg bei einer Natriumtemperatur von 400 °C. Da die Wanne weder beheizt noch isoliert war, wurde bis zum Zeitpunkt des Löschens, die in den Versuchen 24, 25 und 27 gefundene Gleichgewichtstemperatur der Natriumlache von ca. 730 °C nicht annähernd, sondern nur 635 °C erreicht.

Die Reaktionsrate dürfte infolgedessen unter der des gefundenen Gleichgewichtszustandes liegen.

Die Temperaturen sinken nach dem Löschen mit Furex D37 durch die Wärmeabgabe an das Löschpulver zunächst steil ab. In der Folge verlangsamt sich die Abkühlung bis nach 4,5 Stunden die Wannentemperatur auf unter 100 °C abgesunken ist.

Bei Versuch 22, der ebenso nach einer gewissen Branddauer durch Löschen mit Met-L-X unterbrochen wurde, wurden im Vergleich zu Versuch 5 einige wichtige Parameter geändert. Die Natriummenge beträgt 54 kg bei 595 °C, Die Wanne war nach unten wärmeisoliert. Die Gleichgewichtstemperatur wird nach einer Branddauer von 30 min fast erreicht. Die Abkühlung der Natriumlache nach dem Löschen bis unter den Erstarrungspunkt dauert 11 Stunden, d.h. länger als bei Versuch 5.

Der Temperaturverlauf in Versuch 24 (Abb. 45) kann unmittelbar mit dem des ausführlich behandelten Versuches 25 (Abb. 47) verglichen werden. Wesentliche Unterschiede sind nicht festzustellen. Dies gilt auch für den Verlauf der Brandrate im unteren Diagramm der Abb. 45 und 46.

Die mittlere spezifische Brandrate - aus der Aufwärmung der Abluft errechnet - beträgt auf eine Branddauer von 53 min bezogen 42,5 kg/m²h; die Einfüllphase eingeschlossen. Aus dem zeitlichen Verlauf der Brandrate wurde eine verbrannte Natriummenge von 46,5 kg ermittelt. Demgegenüber steht die aus der eingesetzten Menge unter Abzug der Rückstände ermittelte Menge von ca. 55 kg. Die Abweichung beträgt hier 15 %. Verglichen mit Versuch 25 ergibt sich eine Tendenz, daß mit größer werdender Lachenfläche die spezifische Brandrate etwas zurückgeht.

Zwei Versuche mit Wannen von je 0,18 m² Grundfläche, ausgehend von einer weit über der Gleichgewichtstemperatur liegenden Natrium-Temperatur von 820 °C, führten zu interessanten Ergebnissen. Es sind die Versuche Nr. 26 und 27. Der Temperaturverlauf des letzteren ist in der Abb. 51 wiedergegeben.

Sofort nach dem Entfernen des Deckels beginnen die Natriumtemperaturen steil abzusinken, bis nach etwa 6 min Werte zwischen 725 °C und 745 °C erreicht werden. Dies entspricht weitgehend der in vorhergehenden Versuchen beobachteten Gleichgewichtstemperatur. Diese Temperaturen bleiben eine gewisse Zeit konstant, um dann wieder anzusteigen bis auf etwa 775 °C. Diese letzte Phase des Versuchsablaufs ist spezifisch für die enge hohe Wanne mit kleiner Grundfläche, da die Wärmeabgabe durch Strahlung durch die hohen Seitenwände der schmalen Wanne behindert wird. Der Wiederanstieg der Temperaturen ist aus diesen Gründen nur repräsentativ für die kleine schmale Wanne und nicht für die bereits diskutierten großen Wannen.

Die aus der Branddauer und der verbrannten Menge errechnete spezifische Brandrate liegt bei den beiden Versuchen bei 46 kg/m²h bzw. 48 kg/m²h.

Sie liegt damit etwas höher als bei der 1,1 m²-Wanne. Die Tendenz, daß kleinere Wannen größere Brandraten bringen, wie im Vergleich der Versuche 24 und 25 festgestellt, findet eine zusätzliche Bestätigung.

Messungen der mit der Abluft abgeführten Aerosole wurden, von den in diesem Kapitel angeführten Versuchen, nur bei Versuch 22 und 24 durchgeführt. Aus den in Kap. 6.1.4 genannten Gründen war eine Auswertung des Versuchs 24 nicht möglich. Den Meßdaten des Versuchs 22 ist zu entnehmen (Tab. 10), daß von einer Messung während der Löschphase 1/4 des in der Abluft vorhandenen Natriums aus dem NaCl-Anteil des Löschpulvers stammt.

Aus den Niederschlagsmessungen Abb. 49 ist zu ersehen, daß die Niederschläge bei Verwendung der 1,1 m²-Wanne (Versuch 5, 22 und 24) deutlich unter denen der 4,5 m²-Wanne (Versuch 25) liegen. Bei den Aerosolniederschlägen handelt es sich um versuchsspezifische Werte, die sowohl von den Versuchsbedingungen (Brandfläche, Löschpulver, Austrittsform, Natriummenge und -temperatur) als auch von den Umgebungseinflüssen (Luftgeschwindigkeit, Strömungsrichtung, Luftfeuchtigkeit) abhängig sind. Die Ergebnisse dürfen daher nur mit dem dazugehörigen Versuch betrachtet werden.

6.2.3 Überlegungen zur Reaktion

Es wurde in Experimenten gezeigt, daß die Natrium-Lachentemperatur nach einer gewissen Branddauer einem Temperaturgleichgewichtswert zwischen 720 und 745 °C zustrebt. Beginnt der Brand bei Temperaturen unterhalb dieses Bereichs, erwärmt sich die Natriumlache, beginnt er bei höheren Temperaturen (ca. 820 °C), kühlt sie sich ab. Dieses charakteristische Verhalten deutet darauf hin, daß ganz bestimmte physikalisch, chemische Vorgänge, die z.T. gegenläufig in ihrer Auswirkung auf die Lachentemperatur sind, den Brandablauf bestimmen.

Das bekannteste Modell, das diese Vorgänge erfaßt, ist in Sofire II von Al [13] zu sehen. Es geht davon aus, daß die Brandrate im wesentlichen von der Sauerstoffdiffusion durch eine Grenzschicht Stickstoff bestimmt wird. Nicht eingeschlossen ist die Gegendiffusion des Natriumdampfes durch die Stickstoffschicht, die bei höheren Temperaturen bzw. Natriumdampfdrücken sicherlich nicht vernachlässigt werden darf.

Die Diffusionsvorgänge in der Reaktionszone werden unter folgenden vereinfachenden Annahmen näher untersucht:

1. Konvektionsvorgänge werden ausgeschlossen,
2. der Natrium-Dampfdruck an der Oberfläche der Lache entspricht der Lachentemperatur,
3. es wird isotherme Diffusion angenommen,
4. der Einfluß der Aerosole auf die Diffusionskoeffizienten wird vernachlässigt,
5. Natrium-Dampf wird als Gas betrachtet,
6. in der Reaktionszone sinkt die Konzentration der reagierenden Stoffe praktisch auf Null ab,
7. es findet ausschließlich eine Reaktion zu Na_2O statt,
8. die Temperatur in der Reaktionszone wird für die Diffusionsvorgänge nicht berücksichtigt.

Zunächst wurden die temperaturabhängigen Diffusionskoeffizienten Na in N_2 und O_2 in N_2 mit folgender Beziehung aus [18] berechnet.

$$D_{12} = \frac{0,001858 (T+273)^{3/2} \sqrt{\frac{\text{Mol}_1 + \text{Mol}_2}{\text{Mol}_1 \cdot \text{Mol}_2}}}{P \cdot \sigma_{12}^2 \cdot \Omega_D} \quad [18 \text{ S. } 523] \quad (25)$$

$$\sigma_{12} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad [18 \text{ S. } 633] \quad (26)$$

P ist der Druck in Atm

Ω_D wird aus der Tabelle [18 S. 524] mit dem aus der Tabelle [18 S. 632 - 633] entnommenen ξ_0/k , °K gewonnen.

Da σ_2 (Na) für Natrium nicht aufgeführt ist, wird es aus folgender Näherung [18 S. 525] ermittelt.

$$\sigma_2 (\text{Na}) = 1,118 \cdot v_b^{1/3} \quad (27)$$

Aus der Rechnung ergaben sich folgende Diffusionskoeffizienten:

T [°C]	D _{Na} in N ₂ cm ² /s	D _{O₂} in N ₂ cm ² /s
400	0,705	0,8
600	1,13	1,22
750	1,5	1,58
800	1,63	1,67

Tab. 9: Diffusionskoeffizienten

Zum Vergleich sei hier ein aus Versuchen [1] gewonnener Diffusionskoeffizient für O₂ in N₂ zu 1,18 cm²/s, gültig bei einer Temperatur von 845 °C angeführt.

Mit den berechneten Diffusionskoeffizienten können die Grenzschichtstärken bestimmt werden

$$m_{12} = - D_{12} \cdot \frac{\Delta \rho_1}{\Delta x} \quad (28)$$

Die Konzentrationsgefälle $\Delta \rho$ [g/cm³] über eine bestimmte Schichtstärke Δx [cm] sind bekannt, die Massenströme m [g/h] werden aus den jeweiligen gemessenen Brandraten bestimmt. Das Ergebnis einer solchen Betrachtung für eine Brandrate von 40 kg/m² h ist in Abb. 52 dargestellt.

Bei niedrigeren Temperaturen < 650 °C spielt der Natrium-Dampf-Transport durch die Stickstoffschicht keine wichtige Rolle, was mit dem geringen Dampfdruck zu begründen ist. Mit zunehmender Temperatur bzw. zunehmendem Dampfdruck wird sich jedoch die Reaktionszone immer weiter von der Natrium-Oberfläche entfernen (siehe Annahmen 1-8 dieses Kapitels) d.h. aber zugleich, daß die Reaktion fast ausschließlich in der Dampfphase stattfindet. Diese Aussage wird durch folgende Überlegung gestützt. Durch die hervorragende Wärmeleitfähigkeit des Natriums kann kein nennenswerter Temperaturabfall an der Oberfläche durch die entzogene Verdampfungswärme auftreten, d.h. der Natrium-Dampfdruck entspricht der Natrium-Lachen-Temperatur. Würde nun in unmittelbarer Nähe der Oberfläche der Dampfdruck durch die Reaktion mit O₂ auf nahe Null absinken, so ergäbe sich

ein sehr steiles Konzentrationsgefälle dg/dx für einen Natrium-Dampftransport. Dies wiederum würde zu einer wesentlich höheren Verdampfungs- und damit Brandrate des Natriums führen als in den Versuchen gemessen wurde. Die Reaktion kann also nicht an der Natriumoberfläche selbst stattfinden.

Aus diesen Betrachtungen zum Diffusionstransport der beiden reagierenden Komponenten Na und O_2 wird geschlossen, daß bei einer Temperatur von ca. $650^\circ C$ beginnend mit weiter steigenden Temperaturen die Reaktion mit Natrium in zunehmendem Maße aus der gemischt flüssigdampfförmigen Phase an der Natrium-Oberfläche in eine Reaktion aus der dampfförmigen Phase allein übergeht. Die Beobachtung, daß sich Natrium-Flächenbrände stets auf ein bestimmtes Temperaturniveau einstellen, das bedeutend unterhalb der Siedetemperatur liegt, unterstützt diese Aussage. Das Temperaturniveau entspricht einem Gleichgewichtszustand, so daß die der Natriumlache durch Verdampfung entzogene Wärme gleich der aus der Reaktionszone zugeführten Wärme ist, sofern die Wanne, wie bei unseren Versuchen geschehen, gegen sonstige Wärmeverluste isoliert ist.

Davon ausgehend, daß eine Reaktion in dem angedeuteten Temperaturbereich nur in der Dampfphase stattfindet, wurden die Versuche 24, 25 und 27 eingehender analysiert. Es gelten noch folgende zusätzliche Annahmen:

1. Die Energie zur Verdampfung des Natriums wird der Natriumlache entzogen.
2. Ist die Lachentemperatur konstant, so muß die zur Verdampfung erforderliche Energie aus der Reaktionszone an die Lache abgegeben werden.
3. Der Wärmetransport von der Reaktionszone zur Lache erfolgt nur durch Strahlung.
4. Die Temperatur in der Reaktionszone ist konstant und in dem betrachteten Bereich von der Brandrate und Lachentemperatur unabhängig.
5. Die Reaktionszone wird als eine geschlossene Schicht betrachtet, so daß von der Lache keine Energie durch die Reaktionszone nach außen abgegeben werden kann (z.B. Abstrahlung).
6. Die Strahlungszahl ist in dem betrachteten Bereich etwa konstant.

Die Wärmebilanz aufgrund dieser Annahmen lautet:

$$Q_{11} = Q_{10} + Q_1 + Q_7 + Q_8 + Q_9 \quad \text{[kJ/h]} \quad (29)$$

Es bedeuten:

Q_1	[kJ/h]	Energieabgabe zur Erwärmung des Natriums
Q_7	"	Energieabgabe zur Erwärmung der Wanne unterhalb des Natrium-Spiegels
Q_8	"	Energieabgabe zur Erwärmung der Isolierung unterhalb des Natrium-Spiegels
Q_9	"	Energieabgabe der Wanne unterhalb des Natrium-Spiegels an die Umgebung
Q_{10}	"	Verdampfungsenergie des reagierenden Natriums
Q_{11}	"	Strahlungsenergie von der Reaktionszone zum Natrium-Spiegel

Da die Reaktion nur in der Dampfphase stattfinden soll, wird die Reaktionsrate:

$$R_s = \frac{Q_{10}}{A_W \cdot H_v} \quad \text{[kg/m}^2 \text{ h]} \quad (30)$$

Da H_v von der Natriumtemperatur T_{Na} abhängt und T_{Na} sich während der Versuche ändert, wird aufgrund der Werte von [36] folgende Näherung gesetzt:

$$H_v = 4737,6 - 0,9776 T_{Na} \quad \text{[kJ/kg]} \quad \text{für } T_{Na} = 650 \text{ bis } 820 \text{ }^\circ\text{C} \quad (31)$$

Q_{11} kann aus der Beziehung für den Strahlungsenergieaustausch zweier paralleler Flächen berechnet werden:

$$Q_{11} = A_W \cdot C_m \left[\left(\frac{T_R + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{Na} + 273}{100} \right)^4 \right] \quad \text{[kJ/h]} \quad (32)$$

Für die mittlere Strahlungszahl gilt:

$$C_m = \frac{1}{\frac{1}{C_R} + \frac{1}{C_{Na}} - \frac{1}{C_S}} \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}^4} \right] \quad (33)$$

Mit C_S der Strahlungszahl des schwarzen Körpers und den Schätzwerten $C_R = C_{Na} = 18,84 \text{ kJ/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}^4$ erhält man $C_m = 17,25 \text{ kJ/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}^4$.

Die Temperatur der Reaktionszone T_R konnte aus den Meßwerten der Versuche nicht eindeutig ermittelt werden. Deshalb wurde diese aus dem gemessenen Wert der spezifischen Brandrate von $R = 43,2 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$ des Versuchs Nr. 25 mit Hilfe der Gleichungen (30), (29) und (32) errechnet. Die verwendete Brandrate entspricht jenem Abschnitt im Versuchsverlauf, während dem die Lachentemperatur konstant blieb. In diesem Fall werden Q_1, Q_7, Q_8 zu Null. Q_9 wurde mit Gleichung (37) berechnet. Dabei ergab sich T_R zu $940 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die zeitabhängige Natriumtemperatur T_{Na} in der Lache wurde mit mehreren Thermoelementen gemessen. Die Meßwerte wurden gemittelt und durch eine e-Funktion angenähert.

Die Werte für Q_1, Q_7, Q_8 ändern sich mit der Temperatur. Für die Energieabgabe zur Aufheizung des Natriums gilt:

$$Q_1(t) = M_{Na} \cdot c_{Na} \cdot \Delta T_{Na}(t) \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right] \quad (34)$$

Da nur das Geschehen während des Flächenbrandes betrachtet wird, muß für M_{Na} bei den Versuchen Nr. 24 und 25 die beim Auslauf verbrannte Natrium-Masse von der eingesetzten Natrium-Masse abgezogen werden. Für die Energieabgabe zur Erwärmung der Wanne unterhalb des Natrium-Spiegels gilt analog:

$$Q_7(t) = M_{Wu} \cdot c_W \cdot \Delta T_{Na}(t) \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right] \quad (35)$$

wobei wegen der guten Wärmeleitfähigkeit von Natrium die Wandtemperatur gleich der Natriumtemperatur gesetzt wurde. Die Energieabgabe zur Erwärmung der Isolierung unterhalb des Natrium-Spiegels bestimmt sich zu:

$$Q_8(t) = M_{Iu} \cdot c_I \cdot \Delta T_I(t) \quad \text{[kJ/h]} \quad (36)$$

Bei den Versuchen 24 und 25 war der Massenanteil der Isolierung verhältnismäßig gering und die Isolierung zudem vorgeheizt. Q_8 wurde daher bei diesen Versuchen vernachlässigt. Q_9 ergab sich im wesentlichen aus der Wärmeabstrahlung der Wannenzwand. Diese kann aus der Formel für die Wärmestrahlung von Flächen in großen Räumen ermittelt werden:

$$Q_9(t) \cdot A_1 \cdot C \left[\left(\frac{T_{Na}(t)+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1+273}{100} \right)^4 \right] \quad \text{[kJ/h]} \quad (37)$$

Darin ist:

A_1 [m²] Fläche der Wannenzwand unterhalb des Natriumspiegels
 T_1 [°C] Temperatur der Versuchshalle

Für die Strahlungszahl C wurden 16,74 kJ/m² h °C⁴ (oxidierter Stahl) angenommen. Q_9 für Versuch 27 ergab sich aus der Wärmeleitung der Isolierung:

$$Q_9(t) = \frac{A_{Iu} \cdot \lambda}{d} \cdot (T_I(t) - T_1) \quad \text{[kJ/h]} \quad (38)$$

Darin ist:

λ [kJ/m h °C] Wärmeleitfähigkeit der Isolierung
 d [m] Dicke der Isolierung

Für die Versuche 24, 25 und 27 wurden die zeitlich veränderlichen Wärmebilanzen, wie zuvor beschrieben, aufgestellt. Für alle drei Versuche wurde eine konstante Reaktionszonen­temperatur von 940 °C angenommen. In Abb. 53 ist der Versuch 24 aufgetragen. Da die Reaktion nur in der Dampfphase stattfinden soll, ist der zeitliche Verlauf der Brandrate Q_{10} (gemessen) mit dem Wert Q_{10} (gerechnet) unmittelbar vergleichbar. Für Temperaturen oberhalb 700 °C ist die Übereinstimmung befriedigend, während es darunter zu erheblichen Abweichungen kommt. Dies läßt darauf schließen, daß unterhalb 700 °C die Reaktion nicht nur wie für die Rechnung angenommen in der Dampfphase stattfindet, sondern auch direkt mit dem flüssigen Natrium. Die Energieabgabe zur Erwärmung des Natriums Q_1 und zur Erwärmung der Wanne Q_7 hat nur bei Versuchsbeginn eine gewisse Bedeutung.

Direkt vergleichbar ist der gleichfalls in Abb. 53 gezeigte Versuch 25 mit einer Brandfläche von $4,5 \text{ m}^2$. Als einziger Unterschied ist ein nach dem Einfüllvorgang gemessener zeitlich begrenzter Rückgang der Brandrate zu verzeichnen. Nach ca. 15 min wird aber auch dort die volle Brandrate erreicht. In beiden Versuchen wird nach 15... 20 min eine Natriumlachentemperatur $T_{m \text{ Na}}$ zwischen $730 \dots 745 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht, die bis zum Brandende praktisch konstant bleibt. Dies deutet darauf hin, daß sich ein thermodynamischer Gleichgewichtszustand eingestellt hat.

Noch eindeutiger wird die Existenz dieses Gleichgewichtszustandes durch die Versuche 26 und 27 nachgewiesen. Hier wurde der Natriumbrand durch Öffnen einer Wanne von $0,18 \text{ m}^2$ Fläche bei $820 \text{ }^\circ\text{C}$ also einer Temperatur weit über der Gleichgewichtstemperatur eingeleitet (Abb. 51). Der Wärmeeintrag durch die Verdampfung des Natriums läßt innerhalb von 10 min die Lachentemperatur von $820 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $725 \dots 745 \text{ }^\circ\text{C}$ absinken. Danach bleibt sie einige Zeit nahezu konstant. Aus dem zeitlichen Verlauf der Temperatur wurde die der Lache durch Ausdampfung entzogene Wärmemenge Q_{10} wie für die Versuche Nr. 24 und 25 errechnet. Der thermodynamische Gleichgewichtszustand wird deutlich sichtbar nach dem Schnittpunkt der Kurven für Q_{10} und Q_{11} erreicht. Nach einiger Zeit steigt die Natriumlachentemperatur wieder langsam an, was, wie beschrieben, ein Merkmal der kleinen Wanne ist. Diese Versuche haben bewiesen, daß selbst unter ungünstigsten Umständen das Natrium in der Wanne nicht die Siedetemperatur erreichen kann. D.h. aber, hohe Brandraten, wie sie bei siedenden Flüssigkeiten, wie z.B. Treibstoffen auftreten, sind bei Natrium auszuschließen. An dieser Stelle werden die Ergebnisse einiger Flächenbrände mit Benzin eingefügt.

In Abb. 54 wird ein typischer Temperaturverlauf, aufgenommen über einer Wanne mit brennendem Benzin, gezeigt. Selbst 1 m über der Wanne werden noch Temperaturen bis zu $800 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen; im Falle des Natriumflächenbrandes Abb. 47 nur ca. $250 \text{ }^\circ\text{C}$. Der Temperaturrückgang nach der ersten Minute (Abb. 54) ist auf die Versuchsdurchführung im Freien zurückzuführen und kein Merkmal dieses Brandes. Durch wechselnde Winde wurden die Flammen von den Meßstellen zeitweise abgetrieben. Die Brandrate in diesem Versuch war ca. $120 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$, wobei nur ca. 5 kg Benzin insgesamt eingesetzt wurde.

Dieses unterschiedliche Verhalten von Benzin bzw. Natrium-Flächenbränden ist u.a. auf die unterschiedlich hohen Siedetemperaturen und Verdampfungswärmen zurückzuführen. Während Natrium erst bei 880°C siedet, liegt der Siedepunkt bei Benzin unter 100°C . Zur Verdampfung von Natrium wird etwa die 14-fache Wärmemenge je kg benötigt wie für Benzin. Die von der Reaktionszone in die Lache zu übertragende Wärmemenge ist bei Benzin um mehr als eine Größenordnung geringer als bei Natrium, um gleiche Mengen zu verdampfen. Die spezifische Verbrennungsenergie für Benzin ist viermal so groß wie für Natrium.

6.3 Wirkungsweise von Auffangwannen mit Abdeckung

6.3.1 Typischer Versuchsablauf

In Abb. 55 ist der Verlauf der Temperaturen und der Brandraten für Versuch 23 in einer Wanne mit Abdeckung von $4,5\text{ m}^2$ Grundfläche wiedergegeben. Im oberen Diagramm der Abb. 55 ist für die ersten 75 min der Temperaturverlauf im Natrium der Wanne und auf der Abdeckung der Wanne dargestellt. Selbst während des Einfüllens in den ersten 4 min steigt die Natriumtemperatur nicht über die Einfülltemperatur an. Sofort nach Beendigung beginnt sie erst steil, dann weniger steil abzusinken. Interessant ist auch das Verhalten der Temperatur der Abdeckung, die ein Maß für die Wärmeabstrahlung der Wanne in den Raum darstellt. Nach dem Einfüllen erreicht sie einen Höchstwert mit 400°C , um dann steiler als die Natriumtemperatur abzusinken.

Zum Vergleich ist in Abb. 55 auch der Temperaturverlauf des Versuchs 25 eingezeichnet. Dort treten Natriumflächentemperaturen von 730°C während der knapp 1 h Branddauer auf, während in Versuch 23 die max. Flächentemperatur lediglich 400°C erreicht und bereits nach 20 min auf unter 200°C abgesunken ist. Ähnlich verhalten sich die Temperaturen im Natrium.

In Abb. 56 ist der Versuch 23 bis zur Erstarrung des Natriums in der Wanne 7 h nach Versuchsbeginn gezeigt. Im oberen Diagramm ist die Erstarrungslinie während der 6 bis 7 h deutlich zu erkennen. Nachdem die Natriumtemperatur ca. 130°C unterschritten hat, geht die Reaktionsrate in der Wanne praktisch auf Null zurück, wie der Verlauf der gesamt reagierenden Menge (M_R) ausweist.

Aus dem Verlauf der Reaktionsrate (Abb. 56) ergeben sich einige wichtige Aussagen. Nach Beendigung des Einlaufvorganges (s. Kap. 6.1.2), also ca. 4 min nach Versuchsbeginn sinkt die Reaktionsrate innerhalb von weiteren 3,5 min auf 64 kg/h ab. Dies entspricht etwa einem Wert von 40 % verglichen mit dem Brand in offener Wanne. Zu diesem Zeitpunkt ist das vom Einlaufvorgang auf der Abdeckung verbliebene Natrium verbrannt. Eine Reaktion findet nur noch unterhalb der Abdeckung statt. Parallel mit den Natrium-Temperaturen in der Wanne sinkt die Reaktionsrate rasch weiter ab, bis sie nach 50 min nur noch 20 kg/h, also ca. 10 % der offenen Wanne beträgt. Bis zu diesem Zeitpunkt sind insgesamt einschließlich des Einlaufvorganges 48 kg Natrium, unter Abzug des Einlaufvorganges 28 kg verbrannt. Wird berücksichtigt, daß nur 3 Felder der Wanne mit Natrium gefüllt waren, so ergeben sich aus diesen beiden Werten mittlere spezifische Reaktionsraten für die ersten 50 min von $17 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$ bzw. $10 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$. Im weiteren Verlauf verlangsamt sich die Abnahme der Reaktionsrate, was mit der verminderten Wärmeabgabe der Wanne bei niedrigerem Temperaturniveau zusammenhängt. Etwa 3,5 h nach Versuchsbeginn (Abb. 56) hört die Reaktion ganz auf, das Natrium erstarrt. Bis zu diesem Zeitpunkt haben von den eingesetzten 190 kg Natrium 75,4 kg reagiert. Die mittlere spezifische Reaktionsrate aus diesem Wert beträgt nur $6,4 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$.

In dem Zeitraum von 7,5 bis 197 min nach Versuchsbeginn, also unter Ausschluß der Einlaufphase, wurden 0,6 kg Natrium (Tab. 11) als Aerosole in der Abluft gemessen. In diesem Zeitraum haben etwa 55 kg Natrium mit Luft reagiert was einer spezifischen Reaktionsrate von $5,2 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$ entspricht. D.h., aber nur ca. 1 % der reagierten Menge findet sich als Aerosole in der Abluft wieder. Die Belastung der Umgebung des Brandes durch Aerosole ist damit außerordentlich gering, was u.a. darin zum Ausdruck kam, daß in dieser Versuchsphase die Sicht in der Halle (Abb. 20) und deren Begehbarkeit praktisch nicht behindert war.

Werden die spezifischen Aerosolfreisetzungsraten des Versuchs 25 mit Versuch 23 unter Ausschluß der Einlaufphase miteinander verglichen, so steht ein Wert von $16,4 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$ einem sehr kleinen Wert von $0,056 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$ gegenüber. Die Belastung der Umgebung des Brandes ist bei Verwendung der Auffangwanne mit Abdeckung um etwa den Faktor 300 geringer als bei einem Brand in offener Wanne. Der mittlere Aerosolniederschlag im Versuchsraum über die gesamte Versuchsdauer, also einschließlich der Einfüllphase, betrug ca. 500 mg/m^2 . Er ist damit um etwa Faktor 20 geringer als bei Versuch 25 mit offener Wanne. Das wesentlich geringere Verhält-

nis gegenüber dem zuvor genannten ergibt sich durch den Einschluß der Einfüllphase. Wie bereits unter 6.2.2 vermerkt, können die Niederschlagswerte der einzelnen Versuche nur schwer miteinander verglichen werden. Wichtiger sind daher die in der Abluft gemessenen Werte.

6.3.2 Weitere Versuchsergebnisse

In Abb. 57 sind die Abkühlkurven des Natriums weiterer Versuche in der Wanne mit Abdeckung dargestellt. Ähnliche Versuchsbedingungen gelten für Versuch 19 und 23. Die Ausgangstemperaturen sind allerdings verschieden sowie die Flächen der Wannen. Den ersten zwei Stunden ist bei den Versuchen ein steiler Temperaturabfall gemeinsam. Danach verlangsamt sich der Temperaturabfall in Versuch 19 und verweilt bei 120 °C, bis nach 11 Stunden alles Natrium durchreagiert ist. Die Ursache der langsamen Reaktion bei 120 °C, die nur in diesem Versuch beobachtet wurde, ist nicht geklärt. Möglicherweise besteht ein Zusammenhang mit der Ausgangstemperatur, die auch eine Bildung von Na_2O_2 während der Einfüllphase zuläßt. Dieses Na_2O_2 gelangt unter die Abdeckung in die Wanne und kann später den zusätzlichen Sauerstoff an das flüssige Natrium abgeben. Dies mag die schwache Reaktion mit unterhalten.

Der in Abb. 57 gezeigte Versuch 20 gibt die Abkühlung der mit Natrium gefüllten, völlig abgedichteten Wanne, d.h. ohne jegliche Reaktion wieder. Er dient als Eichversuch, um die Wärmeübergangsverhältnisse von der Wanne an die Umgebung zu ermitteln. Die Abweichung des Versuchs 21 von den idealen Abkühlungsbedingungen des Versuchs 20 sind nicht sehr groß. Durch die zusätzliche Einspeisung von Argon in den Raum unterhalb der Abdeckung wird die Reaktion fast vollständig unterbunden. D.h. das gute Ergebnis der speziellen Abdeckung kann durch zusätzliche Einspeisung von Argon noch verbessert werden.

Die bei Versuch 19 während der Abkühlphase ermittelte spezifische Aerosolfreisetzung zeigt mit $0,057 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$ eine recht gute Übereinstimmung mit Versuch 23. Durch die erwähnte Einspeisung von Argon wurde bei Versuch 21 dieser Wert auf $0,022 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$ reduziert, was einem Verhältnis von 2,6 entspricht. Der mittlere Aerosolniederschlag im Versuchsraum wurde bei Versuch 19 mit etwa 120 mg/m^2 und bei Versuch 21 mit 60 mg/m^2 ermittelt. Mit dem Faktor 2 ist auch hier ein deutlicher Einfluß der Argoneinspeisung zu erkennen.

Die Bewertung der vom Einlaufvorgang auf der Abdeckung verbliebenen Brandprodukte (Na_2O und Na_2O_2) brachte folgende Ergebnisse.

- Die Menge der Rückstände auf der Abdeckung nahm mit steigender Natriumtemperatur ab, was damit zu begründen ist, daß die Oxide bei höherer Temperatur besser gelöst und mit dem Natrium weggespült werden. Hinzu kommt, daß das Natriumperoxid bei Temperaturen oberhalb $400\text{ }^\circ\text{C}$ schmilzt.
- Die Größe der mit Brandrückständen bedeckten Fläche war abhängig von der Art des Natriumauslaufs.
- In der direkten Umgebung des kompakt auftreffenden Natriums blieb nur ein dünner Film geschmolzener Natriumoxide zurück.
- Bei großen Natriummengen (Versuch 23) war die Abdeckung des Feldes, welches direkt unter dem Leck lag, in der ganzen Fläche mit einem dünnen schwarzen Film von Natriumoxid bedeckt. Die Menge war so gering, daß sie von der Wiegeeinrichtung nicht erfasst werden konnte.
- Verspritztes Natrium blieb als Oxid auf der Abdeckung liegen. Es bedeckte zum Teil auch in einer lockeren, porösen Schicht die angrenzenden Ablauflöcher.
- Die Schichtstärke der mit Natriumoxiden behafteten Fläche betrug bis zu 10 mm bei Versuchen mit ca. $400\text{ }^\circ\text{C}$ Natriumauslauf-temperatur und bis zu 4,0 mm bei den Versuchen mit ca. $600\text{ }^\circ\text{C}$ Auslauf-temperatur.
- In keinem Fall wurde beobachtet, daß das Natrium durch Oxide am Ab-
laufen durch die Löcher in der Abdeckung gehindert wurde.

Um nachzuweisen, daß die Wanne mit Abdeckung auch für große Natriumleckagen geeignet ist, wurden einige Versuche mit Wasser durchgeführt. Grundlage dieser Versuche war die Annahme, daß in einem natriumführenden Kreislaufabschnitt, in einem Raum mit einer Grundfläche von 100 m^2 eine Natriummenge von 50 m^3 durch einen Bruch der Hauptrohrleitung plötzlich austreten. Dieses Natrium soll in einem Zeitraum von ca. 2 min vom Wannensystem gleicher Grundfläche sicher aufgefangen werden. Die Flächenbelastung beträgt bei dieser Annahme $0,500\text{ m}^3$ Natrium pro m^2 Wannenfläche.

Für diesen Versuch wurde die in Kap. 4.1.2 beschriebene Wanne mit einer Grundfläche von 1 m^2 und einer Höhe von 1 m verwendet. Die 9 Ablauflöcher von $25 \text{ mm } \varnothing$ in der Abdeckung wurden vor Versuchsbeginn mit Klebestreifen verschlossen. Der obere Teil der Wanne wurde dann mit $0,45 \text{ m}^3$ Wasser gefüllt. Durch gleichzeitiges schnelles Entfernen der Klebestreifen wurden die Ablauflöcher frei und das Wasser floß in den unteren Teil der Wanne. Da die eingeschlossene Luft durch die gleichen Bohrungen entgegen dem einströmenden Wasser entweichen mußte, dauerte das Einströmen des Wassers, das immer wieder durch die entweichende Luft unterbrochen wurde, ca. 5 min. Diese Zeit entsprach nicht den Forderungen. Durch ein Entlüftungsröhr von 20 mm Innendurchmesser in der Abdeckung wurde die Ablaufzeit auf $1,4 \text{ min}$ für die angegebene Wassermenge reduziert. Wird die geringere Viskosität des Natriums bei Temperaturen um $500 \text{ }^\circ\text{C}$ in Rechnung gestellt, so wird die Forderung von ca. 2 min für die Ablaufzeit noch beträchtlich unterschritten.

6.3.3 Überlegungen zur Reaktion

Die die Reaktion begrenzende Wirkung der speziellen Auffangwannen, wie in dem vorhergehenden Kapitel an Hand der Versuchsergebnisse demonstriert, wird durch den stark verminderten Zutritt von Sauerstoff zum Natrium bewirkt, denn nur $0,4 - 0,5 \%$ der Wannenoberfläche sind für den Natrium- bzw. Sauerstoffzutritt offen, d.h. nicht abgedeckt. In Versuchen, die bereits 1966 stattfanden [24], wurde gefunden, daß bereits eine Vergrößerung dieser freien Fläche auf 1% dazu führt, daß der Brand nicht selbsttätig erlischt. D.h. durch Konvektion und Diffusion gelangt bei 1% nicht abgedeckter Fläche soviel Sauerstoff zum Natrium, daß die Temperaturen nicht unter den Schmelzpunkt absinken und die Reaktion nicht aufhört.

Da die Reaktion, vom Einfüllvorgang abgesehen, in der Wanne stattfindet, werden auch dort die Aerosole gebildet. Sie können nur durch die offene Fläche von $0,4 - 0,5 \%$ in die Umgebung gelangen. Dies ist letztlich die Ursache dafür, daß wie gemessen, nur etwa $1,0 \%$ der reagierten Natriummenge als Aerosole die Wanne verlassen. Die übrigen 99% bleiben in der Wanne zurück. Die Umgebung des Brandes wird verglichen mit einem Brand in offener Wanne gleicher Grundfläche durch die viel kleinere Reaktionsrate und Aerosolfreisetzung um etwa den Faktor 300 geringer belastet.

Die den Brand begrenzende Wirkung zeigt sich sobald das Natrium auf das Abdeckblech der Wanne trifft und von dort in die Wanne abfließt. Durch die Form der Bleche wird das Natrium zu den Öffnungen geleitet und fließt ab. Da die Abdeckung, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, in kurzer Zeit große Natriummengen durchläßt, bleibt das Natrium nur kurzzeitig in den Rinnen stehen, bis es in der Wanne fast vollständig verschwindet, d.h. die brennenden Flächen werden bereits während des Lecks auf ein Mindestmaß eingeschränkt.

6.4 Natriumlecks in isolierten Rohrleitungen

6.4.1 Versuchsablauf

Zur Darstellung der Vorgänge eines Natriumlecks in einer isolierten Rohrleitung wird der Versuch 12 näher untersucht. Der Rohrleitungsabschnitt ist horizontal angeordnet und mit Steinwolle (I_1) isoliert.

Die Temperaturverläufe an einigen charakteristischen Meßstellen sind in Abb. 60 wiedergegeben. Vor Versuchsbeginn zeigen, bedingt durch die Vorheizung des Rohres, die inneren Meßstellen Temperaturen von 480 ... 560 °C, die in der Mitte der Isolierung 200 ... 250 °C und die äußeren am Blechmantel ca. 60 °C an. Das Natrium fließt mit einer mittleren Temperatur von 615 °C bei einem Massendurchsatz von 8 kg/min aus der Leckstelle in die Isolierung ein und reagiert dort. Passiert die Reaktionsfront eine Meßstelle, so wird eine Temperaturspitze registriert, die bis zu 100 °C über der Natriumauslauftemperatur liegt. Da der Registrierzyklus 18 s beträgt, können diese Temperaturüberhöhungen auch noch größer sein. Die höhere Temperatur im Bereich der Reaktionsfront wird durch die freiwerdende Wärme der in Kap. 3.2.1 und 3.2.3 beschriebenen Reaktionen verursacht. Da sich das Natrium im Bereich der Reaktionszone mit größer werdendem Abstand vom Leck zunehmend erwärmt, steigen die Temperaturspitzen an. Das nachströmende Natrium gleicht diese jedoch wieder aus. Anhand der Temperaturverläufe, des zeitabhängigen Massendurchsatzes und der während des Versuchs und beim Abbau der Isolierung erstellten Fotoaufnahmen wurde die zeitabhängige Natriumverteilung (s. Abb. 61) rekonstruiert. Sie ist in den Meßebenen als schraffierte Fläche dargestellt. Die schraffierte Fläche bedeutet allerdings nicht, daß dieser Bereich vollständig mit Natrium durchdrungen ist, da dieses bevorzugt entlang des Rohres, der Abstandshalter, der Schutzhörchen und des Blechmantels, sowie zwischen den Isolierungslagen fließt.

In manchen Bereichen bleibt die Isolierung intakt. Ein deutlich sichtbarer Natriumbrand entsteht erst nach 4 min, nachdem das Natrium den Blechmantel erreicht hatte, da hier Sauerstoff durch die Öffnungen und Blechstöße zutreten kann. 5 min nach Versuchsbeginn, nachdem eine Natrium-Masse von 40 kg, entsprechend einem Volumenanteil der Isolierung von ca. 53 %, aus dem Leck ausgetreten war, ist das Natrium bis zu den Stoßstellen des Blechmantels und der Stirnseiten vorgedrungen und beginnt auszulaufen (s. Abb. 21). 0,5 min später wird der Zufluß zum Leck abgestellt. Die Aerosolentwicklung ist so stark, daß zur Freihaltung der Sicht die Abluft-Anlage eingeschaltet werden mußte. Ein Teil des in der Versuchsanordnung zurückgehaltenen Natriums läuft in den folgenden 22 min brennend in die Wanne ab.

Eine Überschlagsrechnung an Hand der Abkühlgeschwindigkeit, der Wärmeleitung und der Wärmekapazitäten ergab, daß von den insgesamt eingebrachten 45,5 kg Natrium ca. 36 kg in der Isolierung verbleiben. Bis zur Erstarrung des Natriums nach 14 h haben von den verbliebenen 36 kg Natrium 14 kg reagiert [28].

6.4.2 Weitere Versuchsergebnisse

Versuch 11 soll den Einfluß einer vertikalen Rohrleitungslage deutlich machen. Die Isolierung, der Natriumdurchsatz und die Natriumausgangstemperatur entsprechen dem Versuch 12. Das Natrium (s. Abb. 62) breitet sich infolge der Schwerkraft mit der doppelten Geschwindigkeit wie bei Versuch 12 entlang des Rohres aus. Es treten höhere Temperaturspitzen (s. Abb. 63) bezogen auf die Natriumauslaufttemperatur auf. Dies wird auf die niedrige Natriumkonzentration in der Isolierung infolge der höheren axialen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Natriums zurückgeführt. Das Natrium trat 4 min nach Versuchsbeginn, nachdem eine Menge von 30 kg in die Isolierung eingedrungen war, am tiefsten Punkt der Anordnung an einer Stoßstelle des Mantels aus (s. Abb. 23). Diese Natriummenge nahm ca. 36 % des Volumens der Isolierung ein. Der Zufluß zum Leck wurde bei 40,5 kg Natrium abgestellt. Eine Überschlagsrechnung ergab, daß ebenfalls 36 kg Natrium in der Isolierung verbleiben. Davon reagierten bis zur Erstarrung nach 11,3 h 15 kg. Wird die gespeicherte Natrium-Masse auf die Länge der Rohrleitung bezogen, so ergibt sich bei der vertikalen eine kleinere Speicherfähigkeit als bei der horizontalen Anordnung.

Der Einfluß eines kleineren Leckdurchsatzes wird an Hand der Ergebnisse des Versuchs 9 erläutert. Die Versuchsparameter entsprechen mit Ausnahme des geringeren Leckdurchsatzes von 0,8 kg/min denen des Versuchs 12.

Die Temperaturspitzen (s. Abb. 64) sind höher als bei Versuch 12. Das Natrium wurde nicht so tief in die Isolierung gedrückt (s. Abb. 65). Für die hohen Temperaturspitzen gilt die gleiche Begründung wie bei Versuch 11. Das Natrium trat bei einer Masse von 14,5 kg, entsprechend einem Volumenanteil der Isolierung von ca. 19 %, aus dem Blechmantel aus. Der Zufluß zum Leck wurde bei 21,2 kg Natrium unterbrochen. Von dieser Masse lief nur ca. 1 kg Natrium aus dem Rohrleitungsabschnitt aus. Bis zur Erstarrung nach 8,5 h hatten ca. 9,5 kg Natrium reagiert.

Versuch 6 zeigt das Verhalten bei niedriger Natrium-Auslauftemperatur ($T_{m Na} = 420 \text{ }^{\circ}\text{C}$) und kleinem Leckdurchsatz ($m_{Na} = 1 \text{ kg/min}$) bei horizontaler Anordnung mit I_1 . Dem Temperaturverlauf (s. Abb. 66) ist zu entnehmen, daß keine Temperaturspitzen auftreten und mit einer Ausnahme (Meßstelle 33) die Natriumtemperatur nicht überschritten wird. Dies deutet auf eine geringe Reaktion, vermutlich bedingt durch eine schlechte Benetzung des Isoliermaterials bei der niedrigen Natriumtemperatur, hin. Das Natrium breitet sich nur wenig aus (s. Abb. 67) und trat bereits bei einer Einlaufmasse von 3 kg aus dem Blechmantel aus (ca. 4 Vol % der Isolierung). Die insgesamt eingespeiste Masse von 5,8 kg lief zum größten Teil aus, das Isoliermaterial blieb weitgehend unversehrt.

Zusammenfassend wird festgestellt:

- Bei vertikaler Lage der Rohrleitung ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit entlang des Rohres größer und die zurückgehaltene Natrium-Masse kleiner als bei horizontaler Lage.
- Ein kleinerer Leckdurchsatz führt zu geringerer radialer Ausbreitung und somit zu kleineren zurückgehaltenen Mengen.
- Bei niedrigeren Temperaturen ist die Reaktion in der Isolierung geringer.

Es ist zu beachten, daß die erzielten Ergebnisse insbesondere die Natriumverteilung für andere Anordnungen nicht repräsentativ sein können, da sie von der Aufbringung der Isolierung (Dichte, Dicke, Anzahl der Lagen, Lage der radialen und axialen Stoßstellen), des Blechmantels, sowie der Einbauten (Instrumentierung, Abstandshalter, Beheizung) abhängt.

In zwei Versuchen wurde das Verhalten anderer Isolierwerkstoffe ermittelt. Für Versuch 13 wurde eine Keramikfaser-Isolierung (I_2) (s. Abb. 38) in vertikaler Anordnung gewählt. Das Natrium trat bei einer mittleren Temperatur von $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$ mit einem Leckdurchsatz von 8 kg/min in die Iso-

lierung ein. Die Temperaturspitzen (s. Abb. 68) liegen wesentlich höher als bei den Versuchen mit Steinwolleisolierung (I_1). Das Natrium breitet sich schnell in radialer Richtung (s. Abb. 69) aus. Das Vordringen des Natriums in die einzelnen Meßebenen konnte schon kurz nach Versuchsbeginn visuell erfolgt werden, da sich an den Thermoelement-Durchführungen Brandherde zeigten (s. Abb. 24) ohne daß jedoch Natrium herabtropfte. An diesen Brandherden wurde ein Teil der Thermoelemente im Bereich außerhalb der Schutzröhrchen zerstört. 40 kg (ca. 54 Vol % der Isolierung) Natrium flossen innerhalb von 5 min in die Isolierung, ehe es am unteren Teil des Blechmantels auslief. Bei 48,5 kg wurde der Zufluß zum Leck unterbrochen, 35 kg blieben in der Anordnung zurück. Aus der kurzen Abkühlzeit von 3 h wurde errechnet, daß nur 5,8 kg dieser Masse reagierten. Beim Zerlegen der Anordnung lag das Natrium in kompakter Form vor; die Isolierung war fast vollständig zerstört.

Für Versuch 18 wurde eine Calciumsilikat-Isolierung (I_3) in horizontaler Anordnung gewählt. Die mittlere Temperatur des Natriums war $620\text{ }^{\circ}\text{C}$, der Durchsatz 8 kg/min. Kurz nach Versuchsbeginn traten Flammen aus dem Blechmantel, zunächst ohne Aerosolentwicklung, wenig später traten aus allen Thermoelement-Durchführungen und Blechstößen Gase aus, die sich zum Teil verpuffungsartig entzündeten (s. Abb. 22). Dabei wurden in der Isolierung Temperaturen (s. Abb. 70) von $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen. Wegen der gefährlichen Brandentwicklung wurde die Natriumzuspeisung schon nach 10 kg abgestellt. Wie in Abb. 71 zu sehen ist, verteilt sich das Natrium hauptsächlich in radialer Richtung. Die Isolierung wurde nur im schraffierten Bereich der Abb. 71 zerstört. Die Ursache der heftigen Reaktion und der Gasentwicklung ist im Wassergehalt des Isolierwerkstoffes (s. Kap. 3.2) zu sehen.

Ein Vergleich der Verträglichkeit mit Natrium der drei verwendeten Isolierwerkstoffe ergibt:

- I_1 zeigt nur schwache Reaktion mit Natrium, wird aber bei Temperaturen $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ gut benetzt.
- I_2 wird durch die Reaktionen völlig zerstört. Die Auswirkungen bleiben aber auf den Raum innerhalb des Blechmantels begrenzt.
- Die Reaktion mit I_3 ist heftig. Es bilden sich brennende Gase (H_2), die sich verpuffend entzünden und für die Umgebung eine große Gefahr darstellen. Die hohen Reaktionstemperaturen innerhalb des Blechmantels können die Rohrleitung zerstören.

6.5 Löschen von Natriumbränden

6.5.1 Flächenbrände

Zwei Flächenbrände (Versuch 5 und 22) wurden mit handelsüblichen Löschpulvern der Brandklasse "D" (Flüssigmetallbrände), abgedeckt (Abb. 25). Nach dem Abdecken mit Löschpulver kühlte sich die Natriumlache innerhalb von 4,5 bzw. 11 h auf Erstarrungstemperatur ab. Es wurden folgende Löschpulver benutzt: Total M; Furex D 37 und Met-L-X.

Das Löschpulver wurde in kurzen Intervallen von einigen Sekunden auf das brennende Natrium gegeben, damit die Sicht auf den Brand, die durch aufsteigende mit Löschpulver vermischte Aerosole stark behindert war, zwischenzeitlich wieder frei wurde. Die 6 kg Löschgeräte wurden von je einer Person gehandhabt, die 12 kg-Geräte von zwei Personen.

Trotz vorschriftsmäßiger Anwendung der Pulver konnte zunächst keine geschlossene Abdeckschicht auf dem Natrium erzielt werden. Die sich aus Löschpulver bildende Kruste brach immer wieder auf. Erst nachdem die Löschpulvermenge etwa der zu löschenden Natriummenge entsprach, verblieb eine durchgehende Abdeckung aus Löschpulver. Das Mengenverhältnis Na-Löschpulver mit 1:1 gilt nur für die vorliegenden idealen Versuchsbedingungen. Bei echten Natriumlachenbränden in Anlagen muß mit wesentlich ungünstigeren Mengenverhältnissen gerechnet werden. Die Wärmebelastung durch den Brand war so gering, daß die Löscharbeiten nicht behindert wurden.

Die Löschpulver bestehen bis zu 87 % aus Salzen von Alkalimetallen, der Rest aus Siliciumverbindungen und geringen Mengen organischen Bestandteilen. Teilweise traten bei Berührung mit dem flüssigen Natrium und an den Aufbruchstellen Flammen auf. Diese Erscheinung wird im wesentlichen auf die organischen Bestandteile im Löschpulver zurückgeführt.

6.5.2 Brände an Rohrleitungen

Die Löschkaktion (Versuch 8, Abb. 26) wurde mit einem 12 kg-Handlöschgerät, gefüllt mit Total M, durchgeführt. Beim Aufbringen des Löschpulvers auf die Stelle des Blechmantels, von der das Natrium brennend abtropfte, wurde keine Dämmwirkung festgestellt, da das Pulver nicht haften blieb.

Das Aufsprühen des Löschpulvers erfolgte auch hier, wie in Kap. 6.5.1 beschrieben, mit kurzen Unterbrechungen. So konnte immer wieder kontrolliert werden, ob das Löschen eine Wirkung zeigte. Das Löschpulver haftete nicht an den senkrechten und hängenden Flächen. Das abtropfende Natrium wurde durch den Sprühstrahl des Löschpulvers fortgeblasen und führte zusammen mit dem Löschpulver zu einer großflächigen Verschmutzung der Umgebung des Versuchsaufbaues und zu einer Gefährdung durch Verbreiterung des Brandherdes. Das Natrium, welches zwischen den einzelnen Löschkaktionen in die untergestellte Wanne mit Abdeckung laufen konnte, wurde sicher aufgefangen und bildete keine Gefahr mehr.

6.6 Beseitigung der Rückstände

6.6.1 Allgemeines

Nach dem Versuch wurden die Rückstände, wie nicht reagiertes Natrium, Natriumoxid und Natriumperoxid beseitigt und in nicht brennbare Produkte umgewandelt, d.h. in Natronlauge überführt. Diese wurde außerhalb des Gebäudes aufgefangen. Zur gefahrlosen Beseitigung und Umwandlung hat sich Wasserdampf gut bewährt. Ein Dampferzeuger mit einer Leistung von 320 kg lieferte leicht überhitzten Dampf. Dieser wurde mit einer Lanze, die flexibel mit dem Dampferzeuger verbunden war, auf die zu reinigende Stelle gerichtet (Abb. 27). Größere Brocken Natrium wurden unter dem Dampfstrahl flüssig und zerteilten sich dann in kleinere Mengen. Wurde der Dampfstrahl fortgeschwenkt, fing das Natrium an zu brennen, es erlosch aber sofort wieder unter dem Dampfstrahl. Der bei der Reaktion im Dampfstrom entstehende Wasserstoff (s. Tab. 2) hat nicht zur Knallgasbildung geführt. Nur an Stellen, an denen sich bildendes Kondenswasser nicht ablaufen konnte, kam es zu kleineren Knallgasexplosionen, die aber die Arbeiten nicht behinderten.

6.6.2 Rückstände aus Wannen

Nachdem die Wanne mit den Brandrückständen auf Raumtemperatur abgekühlt war, wurde festgestellt, ob alles Natrium durchreagiert war. War dies der Fall, so wurden mit einer

Schaufel die Rückstände auf ein neben der Wanne liegendes Blech gebracht und dort mit Dampf zu Natronlauge reagiert. Waren in der Wanne noch nennenswerte Mengen an metallischem Natrium, so wurde dieses Natrium, nachdem die losen Oxidschichten entfernt waren, mit einem breiten Elektromeißel ausgestemmt (s. Abb. 28) und in dicht verschraubbare Eisenfässer verpackt. Kleinere Mengen Natrium bis zu etwa 1 kg wurden mit der Dampfzange auf einem schrägliegenden Blech abreagiert.

Wurden die Rückstände erst einige Tage nach Versuchsende beseitigt, kam es wiederholt zu unerwarteten kleineren Knallgasexplosionen. Die Ursache war folgende: Da ein Zutritt von Luftfeuchtigkeit in die Wanne nicht verhindert werden konnte, bildete sich aus dem Na_2O in der Wanne Natronlauge. Diese Lauge ist stark hygroskopisch und absorbiert weitere Luftfeuchtigkeit. Da gleichzeitig noch metallisches Natrium vorhanden war, genügten kleine Bewegungen in der Wanne, um den Kontakt zwischen dem metallischen Natrium und der Natronlauge herzustellen. Eine heftige Reaktion mit Branderscheinungen und Knallgasexplosionen waren die Folge. Die Brandrückstände wurden deshalb bei den Versuchen möglichst sofort nach Erkalten beseitigt.

6.6.3 Rückstände von Rohrleitungsbränden

Nach Abkühlen des isolierten Rohrleitungsstückes auf Raumtemperatur wurde der Blechmantel von der Isolierung entfernt. Wegen der zunächst langsamen Abkühlung konnte diese Arbeit erst am folgenden Tag ausgeführt werden. Da sehr viele Thermoelemente durch den Blechmantel in die Isolierung führten (s. Kap. 4.2.1) und dort teilweise von Natrium eingeschlossen waren und das Natrium zudem am Blechmantel klebte, konnte dieser nur mit entsprechenden Werkzeugen entfernt werden. Beim Demontieren der kalten Isolierung entstanden immer wieder Brände mit starker Aerosolentwicklung (s. Abb. 28 und 30). Nach Entfernung der Isolierung brannte diese in einer untergestellten Blechwanne aus. Die Isoliermaterialreste wurden anschließend mit Dampf abgeblasen, um sicherzustellen, daß kein metallisches Natrium mehr daran haftete.

6.6.4 Löschpulver und Aerosole

Die bei 3 Versuchen eingesetzten Löschpulver ließen sich mit den Brandrückständen leicht beseitigen. Bedingt durch die relativ große Menge an benötigtem Löschpulver war nur ein größerer Arbeitsaufwand erforderlich. Ein Teil des Löschpulvers konnte nach der Abkühlung von dem erstarrten Natrium als loses Pulver entfernt werden. Ein Teil des Pulvers backte an der Berührungsstelle mit Natrium und Natriumoxid zu einer festen Kruste zusammen, sie wurde zusammen mit dem festen Natrium ausgestemmt.

Ein gewisser Anteil des sehr fein gekörnten Löschpulvers wurde durch die Konvektion am Brandherd fortgetragen und setzte sich mit den Brandaerosolen an horizontalen Berührungsflächen ab. Der Versuchsraum war so eingerichtet, daß diese Ablagerungen mit einem Wasserstrahl abgewaschen werden konnten.

An senkrechten, glatten Flächen wurden keine nennenswerten Aerosolablagerungen festgestellt mit Ausnahme des Versuchs 24. Hier bildeten sich (s. Kap. 6.1.4) begünstigt durch die Luftfeuchte an den Gittern der Lüfteransaugschächte bis zu 1 cm dicke poröse, leicht entfernbarere Aerosol-schichten (s. Abb. 17).

7. Empfehlungen

7.1 Allgemeines

Vorbeugende Maßnahmen gegen Natriumlachenbrände sind nicht nur der sicherste Schutz, wie die Versuche gezeigt haben, sondern auch der einzig zuverlässige, sobald große Natrium-Mengen beteiligt sind. Gezielte Löschaktionen, mit den heute üblichen Löschpulvern, setzen eine Bereitstellung des 4 - 6 fachen Gewichtes an Löschpulver, verglichen mit den erwarteten größten Natrium-Leckagen voraus. Wegen der Sichtbehinderung am Brandherd kommt der Einsatz von Löschpersonal nicht in Frage. Es müssen daher fest installierte auf die betroffenen Flächen selektiv ansteuerbare Löschpulververteilersysteme eingerichtet werden. Dieses setzt wiederum voraus, daß durch diverse Instrumentierung der Brandort zuvor festgestellt wurde. Eine Löschaktion darf erst dann ausgelöst werden, wenn das Leck weitgehend zum Stillstand gekommen ist, da sonst das Natrium auf das Löschpulver läuft und sich darüber ausbreitet. Durch die zerklüfteten, vergrößerten Oberflächen kann der Brand dann sogar intensiviert werden. Ein weiterer Nachteil der Verwendung von Löschpulvern besteht darin, daß sekundäre Natriumauffangsysteme, die das Natrium möglichst rasch aus den unter den Anlagen angeordneten Auffangwannen übernehmen sollen, durch Löschpulver leicht blockiert werden können. Löschpulver kann zudem aus solchen Auffangsystemen nur sehr schwer wieder entfernt werden. Ein zusätzliches Problem stellen die in den heute üblichen Löschpulvern vorhandenen Chloride dar. Sie führen unter Umständen, die heute noch nicht überblickt werden, unter Langzeiteinwirkung zu Spannungsrißkorrosion. Natrium, das solche Löschpulverrückstände enthält, kann nicht wieder aufbereitet werden, wie dies leicht der Fall ist, wenn nur Oxide zu entfernen sind. Aus den beschriebenen Gründen raten wir daher von dem Einsatz von Löschpulvern bei Natrium-Großbränden in technischen Anlagen dringend ab.

7.2 Auffangwannen

Unter jeder natriumführenden Anlage sollte ein Wannensystem vorgesehen werden, das aus einem Leck austretendes Natrium sicher auffängt. Die Auffangwannen sind als ein Bestandteil der Gesamtanlage bereits bei der Planung mit zu berücksichtigen. Nur so kann eine optimale Auslegung erreicht werden. Die Wannensysteme müssen folgende Bedingungen erfüllen:

- Das Natrium, entsprechend der größten angenommenen Leckmenge muß sicher aufgenommen werden können.
- Die ganze mit Komponenten überbaute Fläche muß überdeckt werden.
- Der Anschluß zu den Gebäudewänden ist so auszuführen, daß an den Wänden ablaufendes Natrium sicher in die Wanne gelangt.
- Eine Unterteilung in Segmente, die ein Ausbreiten des Natriums bei kleineren Schadensfällen auf das gesamte Wannensystem verhindern, ist zweckmäßig.
- Die Trennwände sind mit Überlauföffnungen ausgestattet, so daß bei größeren Mengen das Natrium in die nächste Sektion überfließen kann.
- Sind Natriummengen $> 1 \text{ m}^3$ aufzufangen, empfiehlt sich zusätzlich vorzusehen, daß das Natrium in einen Sammelbehälter abgezogen werden kann, wo es dann abkühlt.
- Die Wannens sind zum Gebäudeboden hin zu isolieren, um den Beton gegen übermäßige Erwärmung zu schützen.
- Die Bodenbleche sind so auszubilden, daß die bei Berührung mit Natrium zu erwartenden Wärmespannungen die Funktionsfähigkeit nicht beeinträchtigen.
- Als Werkstoff für die Wannens genügt ein ferritischer Stahl (z.B. St 00).
- Die Wannens sind mit einer Abdeckung zu versehen, so daß die Reaktion des Natriums unterhalb dieser stark vermindert oder praktisch vollständig unterbunden wird.
- Diese Abdeckung ist so auszubilden, daß sie einfach entfernt werden kann, um nach einem Leck die Wannens säubern zu können.
- Durch eine Temperaturüberwachung mit einem Netz von Thermoelementen in der Wanne ist eine Lokalisierung des eingeflossenen Natriums wünschenswert.

In Abb. 72 wird in einem konkreten Beispiel der Aufbau und die Konstruktion eines Wannensystems gezeigt, das diese Forderungen erfüllt. Es stützt sich im wesentlichen auf die in Kap. 6 beschriebenen Ergebnisse der Versuche ab. Das Wannensystem wurde ausgelegt für eine Grundfläche von 100 m^2 und eine maximal aufzunehmende Natriummenge von 50 m^3 . Es ist unterteilt in Wannensfelder von $1 \times 2 \text{ m}$ Grundfläche. Die Aneinanderreihung von je 5 Feldern bilden eine Wannensreihe in deren Mitte der Ablauf zum Sammelbehälter liegt. Je nach der Größe des Lecks

wird das Wannensystem unterschiedlich beaufschlagt. Das Verhalten des Wannensystems bei verschiedenen Leckagen wird kurz dargestellt:

- Bei einer Natriumleckage bis $0,6 \text{ m}^3/\text{min}$ reichen die Öffnungen in der Abdeckung eines Wannenfeldes von 2 m^2 Fläche noch zur Ableitung in das darunter liegende Wannenfeld aus.
- Bei Mengen $> 0,6 \text{ m}^3/\text{min}$ fließt das Natrium über das Trennschott in Feld 2 über. Es kann eine entsprechende maximale Menge von $1,2 \text{ m}^3/\text{min}$ von der Abdeckung zweier Felder abgeleitet werden.
- Sind die Leckmengen $> 5,50 \text{ m}^3/\text{min}$ fließt das Natrium über die Längsschotten in 750 mm Höhe in die nächste parallel liegende Wannereihe über. Da die Längsschotten in der Mitte jeder Wannereihe etwas heruntergezogen sind, wird es dort bevorzugt überfließen.
- Bei einer Wannensfläche von 100 m^2 kann durch die gesamte Abdeckung ca. $33 \text{ m}^3/\text{min}$ Natrium in die darunterliegenden Wannen abfließen.
- Das Restspeichervermögen einer Wanne von 2 m^2 beträgt bei diesen Abmessungen 100 l je Feld, d.h. bei größeren Mengen wird ein weiteres Feld gefüllt bis zu den Überlauföffnungen in 50 mm Höhe usw..
- Sollte mehr Natrium auslaufen, als das Restspeichervermögen einer Wannereihe (bei 50 mm Füllstand) beträgt, so fließt dieses in den Sammelbehälter ab.
- Ist das Ablaufrohr einer Wannereihe zum Sammelbehälter kurzzeitig nicht in der Lage, das anfallende Natrium aufzunehmen, so kann das Natrium auch unter der Abdeckung durch die in 150 mm Höhe liegenden Überlauföffnungen in die nächste Wannereihe abfließen. Das Speichervermögen einer Wannereihe bis zu diesen Überlauföffnungen in 150 mm Höhe beträgt $1,5 \text{ m}^3$.
- Selbst bei einer Leckmenge von 50 m^3 Natrium, sofern diese nicht innerhalb einer Minute freigesetzt wird, werden nicht alle Wannenfelder mit Natrium beaufschlagt, da bereits während der Leckage Natrium in den Sammelbehälter abfließt.

Die Vorteile dieses Wannensystems sollen kurz zusammengefaßt werden:

- Das Wannensystem arbeitet selbsttätig, ohne jeglichen Eingriff von außen.

- Hinsichtlich der geringen Reaktionsraten und der sehr niedrigen Aerosolentwicklung gelten die Ergebnisse, wie sie in Kap. 6.3 beschrieben sind.
- Die Abdeckung ist gleichzeitig ein Wärmestrahlungsschutz für die Umgebung, da sie die Strahlung im Vergleich zur offenen Flüssigmetallfläche auf etwa 13 % herabsetzt.

Als Nachteil dieses Wannensystems ist festzustellen, daß in dem vom Leck betroffenen Gebiet je Wannensfeld etwa 100 l Natrium zurückbleiben und nach Erkalten entfernt werden müssen. Dies wurde aber mit Absicht in Kauf genommen, um bei einem kleineren Leck nicht das ganze Wannensystem zu verschmutzen.

7.3 Isolierung von Komponenten

Als Isoliermaterial, das mit Natrium in Berührung kommen kann, ist Steinwolle oder Schlackenwolle mit einem niedrigen freien SiO_2 -Gehalt zu empfehlen (s. Kap. 3.2.3 Steinwolle Werkstoff I_1). Dieses Isoliermaterial ist bis zu Temperaturen von ca. 600 °C verwendbar. Bei höheren Temperaturen kommt für die der heißen Komponente zugewandten Seite ein Material auf Aluminiumsilikatbasis (s. Kap. 3.2.3, Werkstoff I_2) in einer Schichtstärke in Frage, die einen Temperaturabbau bis zur Verwendungsgrenze des Isolierwerkstoffes I_1 bewirkt.

Isolierwerkstoffe auf geschmolzener Basis in Form von Fasern sind nur sehr wenig hygroskopisch und daher einem Material in Pulverform oder geschäumtem, porösem Zustand vorzuziehen.

Zur Ausführung der Isolierung ist zu empfehlen, Rohrleitungen und Komponenten in relativ kurz voneinander getrennt isolierte Abschnitte zu unterteilen, ähnlich wie dies auch für die Begleitheizung vorzusehen ist. Damit wird verhindert, daß sich das aus einem Leck austretende Natrium in der Isolierung ausbreitet und unter Umständen sogar in andere Räume gelangt. Außerdem können dadurch großflächige Korrosionsschäden an Komponenten und Rohrleitungen ausgeschlossen werden.

7.4 Natrium-Leckdetektion

Ein gutes Leckdetektionssystem sollte so beschaffen sein, daß es Lecks zuverlässig, schnell und ortsgenau anzeigt. Wie in dem Kapitel 6.4 erwähnt, hat die Isolierung die Eigenschaft, das aus einer Leckstelle austretende Natrium aufzunehmen, zurückzuhalten und an mehr oder weniger weit entfernte Stellen zu leiten. Dort tritt es dann an einer undichten Stelle, z.B. des Blechmantels der Isolierung, aus. Dieser Vorgang kann bei einem kleinen Leck erhebliche Zeit beanspruchen. Es kann sogar der Fall eintreten, daß das Natrium gar nicht aus der Isolierung nach außen tritt und somit eine optische Wahrnehmung des Lecks nicht möglich ist. Die sich bildenden Reaktionsprodukte können jedoch zu schweren Korrosionsschäden an Komponenten und zur Zerstörung von Meß- und Steuerleitungen, die in der Isolierung verlaufen, führen und damit zu größeren Schäden Anlaß geben.

Zur schnellen Schadenserkennung müssen daher an ein Detektionssystem folgende Anforderungen gestellt werden:

- Bereits ein geringes Leck (wenige cm^3 Na) sollte rasch und ortsgenau angezeigt werden.
- Die Komponentenbereiche sind mit mindestens je zwei voneinander unabhängigen Detektoren in oder unter der Isolierung zu überwachen.
- Daneben ist ein Detektionssystem vorzusehen, das in den Raum austretendes Natrium oder dessen Verbindungen anzeigt.

Da solche Leckdetektionssysteme von uns nicht erprobt wurden, kann keine direkte Empfehlung ausgesprochen werden. Als eine aussichtsreiche Methode zur Leckdetektion an den Komponenten selbst oder innerhalb der Isolation werden jedoch Begleitdrähte angesehen, die bei einem Leck Kurzschluß anzeigen.

7.5 Verkleidung von Betonbauteilen

Der Beton muß gegen Berührung mit Natrium (s. Kap. 3.2.4) geschützt werden. Es empfiehlt sich eine Verkleidung aller freien Betonflächen mit einfachen ferritischen Blechen. Der verkleidete Beton darf aber keinen erhöhten Temperaturen ausgesetzt werden, da sich sonst durch das Austreiben des im Beton gebundenen Wassers ein der Temperatur entsprechend hoher Dampfdruck zwischen Blechverkleidung und Beton aufbauen kann.

Nach Angaben der Zementhersteller kann der Wassergehalt der fertig abgebundenen Betone bis zu 8 Gewichtsprozenten betragen. Nach [35] wird das freie und physikalisch absorbierte Wasser zwischen 100 °C und 200 °C ausgetrieben. Ein Teil des chemisch gebundenen Wassers wird zwischen 400 °C und 600 °C frei, der Rest des chemisch gebundenen Wassers zwischen 800 °C und 900 °C.

Alle Betonbauwerkteile, die durch Berührung mit ausgelaufenem Natrium oder Wärmestrahlung auf die genannten Temperaturen erhitzt werden können, sind zwischen Beton und Verkleidungsblech mit einer Isolierung zu versehen.

8. Nomenklatur

<u>Symbol</u>	<u>Bedeutung</u>	<u>Dimension</u>
A	Fläche	m^2
C	Strahlungszahl	$\text{kJ}/m^2 \text{ h } ^\circ\text{C}^4$
c	Spezifische Wärme	$\text{kJ}/\text{kg } ^\circ\text{C}$
c_p	Spezifische Wärme bei konstantem Druck	$\text{kJ}/\text{kg } ^\circ\text{C}$
D_{12}	Diffusions-Koeffizient	cm^2/s
H	Verbrennungswärme	kJ/kg
ΔH	Freie Bildungsenergie	kJ/g
H_v	Verdampfungsenthalpie	kJ/kg
M	Masse	kg, g, mg
m	Massenstrom	kg/h
Mol	Molekulargewicht	-
N	Natriumanteil des Niederschlages	mg/m^2
P	Druck	N/m^2
Q	Energie	kJ/h
R	Brandrate (Reaktionsrate)	kg/h
R_s	Spezifische Brandrate	$\text{kg}/m^2 \text{ h}$
T	Temperatur	$^\circ\text{C}$
t	Zeit	min, h
V	Volumenstrom	m^3/h
v_b	Spezifisches Volumen der Flüssigkeit bei Siedetemperatur	cm^3/gmol
w	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
Δx	Schichtstärke	cm, mm
Δs	Konzentrationsgefälle	g/cm^3

Indices

Ben	Benzin
c	kritisch
F	Filter
I	Isolierung
L	Abluft
m	mittlere
N	Niederschlag
Na	Natrium
R	Reaktion
s	spezifisch
u	unterhalb des Natrium-Spiegels
W	Wanne

9. Quellenverzeichnis

- [1] Paul A. Lottes:
Toward an Understanding of Sodium Fires
Power Reactor Technology and Reactor Fuel Processing,
Vol. 10, No. 1, Winter 1966-1967
- [2] H.W. Emmans:
Heat Transfer in Fire
Journal of Heat Transfer May 1973 p. 145-151
- [3] IAEA-NPR: Meeting of Specialists on Sodium Combustion and
its Extinguishment-Techniques and Technology, Summary Report
Hanford Engineering Development Lab., Richland, Washington, USA
May 22-25, 1972
- [4] UKAEA SRD M42
The Entropment of Sodium Combustion Products using a
Recirculatory Foam-Generating Appartus,
G.H. Bulmer, Aug. 1972
- [5] UKAEA SRD M43
The Use of Liquified Nitrogen to Extinguish Sodium Fires.
G.H. Bulmer, Aug. 1972
- [6] L. Leibowitz:
Thermodynamic Equilibria in Sodium-Air-Systems,
Journal of Nuclear Materials 23 (1967) 233-235
- [7] WAA-SR-10850 Auszug
Sodium Fires and Fission Product Release,
G.N. Lauben, Oct.-Dez. 1964
- [8] A.A. Jarrett, G.N. Lauben, R.L. Koontz:
Sodium Fires and the Release Characteristics of Particulates
and Fission Products,
Fission Products Release and Transport under Accident Conditions
Conf. - 650407, Vol. 1, Apr. 5-7, 1965

- [9] Harry I. Etlinger, William D. Moss, Harold Busey:
Characteristics of the Aerosol Produced from Burning Sodium
and Plutonium,
Nuclear Science and Engineering: 30, 1-13 (1967)
- [10] AI-AEC-12858
Annual Technical Progress Report
LMFBR Safety Programs GFY 1969
Nuclear Safety, Gaseous Effluents, Sodium Fires
- [11] AI-AEC-13050
Quarterly Technical Progress Report
LMFBR Safety Programs
October-December 1972
Nuclear Safety, Characterisation of Sodium Fires and Fission
Products
- [12] AI-AEC-13060
Quarterly Technical Progress Report
LMFBR Safety Programs
January-March 1973
Nuclear Safety, Characterisation of Sodium Fires and Fission
Products
- [13] AI-AEC-13055
SOFIRE II USER REPORT
- [14] HEDL-TME-73-48
FFTF Secondary Sodium Fire Protection System Test FI
April 1973 - Hanford Eng. Dev. Lab.
- [15] SESR/SESR-CI n° 72/102 JC/GR
Consequences Thermiques d'un feu de sodium primaire sur un dome
de confinement,
M. Belval, J. Colome, J. Regnier, Dec. 1972
- [16] Feux de sodium et reacteurs rapides,
M. Falgayrettes, CEA-CEN/Cadarache, Konferenzpapier
Proceedings of the International Conference, Engineering
of Fast Reactors For Safe and Reliable Operation,
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Oct. 9-13, 1972

- [17_] IA-Notiz 53.898.2 5.2.73 - K. Förster:
Erfahrungsaustausch mit dem CEA über das Brandverhalten
von Natrium
- [18_] K. Keller:
Natrium-Luft-Reaktionen als Reaktorstörfall,
Kernforschungszentrum Karlsruhe - KFK 1034, Januar 1970
- [19_] Chemical Engineers Handbook
John H. Perry
Third Edition, Mc Graw-Hill, 1950
- [20_] C.E. Wicks and F.E. Block
Thermodynamic Properties of 65 Elements - Their Oxides,
Halides, Carbides and Nitrides, 1961
- [21_] Zündgrenzen der Gemische H_2-O_2-X''
von A.J. Verbrugh (Rec. Trav. chim. 59 (1940) 983/1020, 995)
- [22_] P. Menzenhauer - Notiz TN
Sicherheitsbetrachtung NSK (nicht veröffentlicht)
- [23_] Verträglichkeit zwischen Natrium und Isoliermaterialien,
Diplomarbeit von cand. chem. ing. H.G. Dillmann, Universität
Karlsruhe, Lehrstuhl für Reaktortechnik - Prof. Dr.D. Smidt,
August 1970
- [24_] P 16 08 027. Sicherheitseinrichtung mit flüssigem Metall,
insbesondere Natrium oder Natrium-Kalium betriebene Anlagen.
Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe
- [25_] B. Dorr:
Literaturstudie und Zusammenstellung
"Natrium-Reaktionen" (nicht veröffentlicht)
- [26_] Radex Handbuch 1954: Österreichisch-amerikanische Magnesität AG,
Radenthein

- [27] Merkblatt für Arbeiten mit Natriummetall
Berufsgenossenschaft der Chemischen Industrie
Ausgabe 1952 (geändert 1963 - Nachdruck 1971)
- [28] B. Dorr: IRE 3-Notiz
Gesellschaft für Kernforschung
"Auswertung der Natriumbrandversuche an waagerechten
Rohrleitungen" (nicht veröffentlicht)
- [29] Ausrüstung der Feuerwehr der GfK
Angaben von Herrn O.-Brandmeister Ott,
Gesellschaft für Kernforschung
- [30] Meteorologische Bedingungen während der Brandversuche
ASS/TM - 12.4.1973, Gesellschaft für Kernforschung
- [31] Dubbels Taschenbuch 12. Auflage S. 302-303
- [32] Farbfilm 16 mm "Das Brandverhalten von flüssigem Natrium"
P. Menzenhauer, W. Peppler, Gesellschaft für Kernforschung mbH,
Karlsruhe, Institut für Reaktorentwicklung, 1973
- [33] Ullmann-Band 12, S. 635 Abschnitt: Natrium-Chemische Eigen-
schaften-Reaktionen
- [34] Filterprogramm
J.G. Wilhelm, H.G. Dillmann, J. Furrer, K. Gerlach:
Auszug aus: Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit,
Jahresbericht 1972 - KFK 1818 - Gesellschaft für Kernforschung
mbH., Karlsruhe
- [35] Betontechnische Berichte 1969, Absatz 2.1
von Prof. Dr. Ing. habil Dr. Ing. E.h.K. Walz
Beton Verlag GmbH, Düsseldorf
- [36] Stoffdaten von Natrium
KFK-Bericht Nr. 924, EUR 4168 d
A. Pee, Febr. 1969
Kernforschungszentrum Karlsruhe

Formel Nr.	Formel	ΔH freiwerdende Wärme kJ/gmol Formel kJ/gmol kcal/gmol		1 kg Natrium reagiert mit x kg		Stoff	freiwerdende Wärme bei 20 °C, kJ/kg reagierendes Natrium kJ/kg kcal/kg	
1	$2 \text{ Na} + 1/2 \text{ O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}$	430	102,5	0,348		O_2	9335	2230
2	$2 \text{ Na} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}_2$	511	122,2	0,695		O_2	11093	2650
3	$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ Na OH}$	137	32,7	0,392		H_2O	2976	711
4	$\text{Na}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3$	305	73	0,957		CO_2	6639	1586
5	$2 \text{ Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2$	145	34,6	0,392		H_2O	3148	752
6	$\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na OH} + 1/2 \text{ H}_2$	141	33,7	0,784		H_2O	6128	1464
7	$\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + 1/2 \text{ O}_2$	225	53,7	0,957		CO_2	4885	1167
8	$4 \text{ Na} + 3 \text{ Si O}_2 \rightarrow 2 \text{ Na}_2\text{O SiO}_2 + \text{Si}$	458	109,4	1,965		SiO_2	4969	1187
9	$8 \text{ Na} + 6 \text{ CaO SiO}_2 \rightarrow 4 \text{ Na}_2\text{O SiO}_2 + 6 \text{ CaO} + 2 \text{ Si}$							
10	$4 \text{ Na} + 3 \text{ Al}_2\text{O}_3 \text{ SiO}_2 \rightarrow 2 \text{ Na}_2\text{O SiO}_2 + 3 \text{ Al}_2\text{O}_3 + \text{Si}$							
11	$4 \text{ Na} + 5 \text{ Al}_2\text{O}_3 \text{ SiO}_2 \rightarrow 2 \text{ Na}_2\text{O SiO}_4 + 5 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 3 \text{ Si}$							
12	$2 \text{ Na} + \text{FeO} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{Fe}$	164	39,1	1,560		FeO	3566	852
13	$6 \text{ Na} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 3 \text{ Na}_2\text{O} + 2 \text{ Fe}$	470	112,3	1,156		Fe_2O_3	3407	814
4 a	$4 \text{ Na} + 3 \text{ CO}_2 \rightarrow 2 \text{ Na}_2\text{O CO}_2 + \text{C}$	1078	257	1,435		CO_2	11717	2798

GFK
IRE

Natrium-Reaktionen

Tab. 2

Angaben zum Isolierwerkstoff	I ₁ Steinwolle	I ₂ Keramikfaser	I ₃ Isoliermat. auf Kalzium-Silikatbas.
Handelsbezeichnung	Sillan	Kaowool	Promasil 800
Form	Fasermatte auf Maschen- draht	Fasermatte	Rohrschalen organisch gebunden
Dichte kg/m ³	125	96	200
λ (bei 300 °C Mittel) kJ/mh °C	0,358	0,230	0,264
Höchste Verwendungstemperatur °C	700	1260	800
spez. Wärme kJ/kg °C	0,83	1,05	0,83
Mittelwerte Analyse in %			
SiO ₂	52	52	43
CaO	28	-	37
Al ₂ O ₃	6	45	1
(M _g O, Na ₂ O, SiO, Si ₂ O ₃)	14	3	1
H ₂ O	-	-	18 ¹⁾
freier chemisch nicht gebundener Anteil SiO ₂ %	18,5	25,4	3,0
freiwerdende Wärme			
kJ/kg Isolierung	468,9	644,8	1205,8 ²⁾
kJ/m ³ Isolierung	58615	61898	240322 ²⁾
reagierendes Natrium			
kg Na/m ³ Isolierung	11,8	12,4	74,5 ²⁾
Theoretische Erwärmung der Iso- lierung bei Reaktion mit Natrium bei einer Vorheiztemperatur von 400 °C			
ΔT °C	490	535	1010 ²⁾
Endtemperatur °C	890	935	1410 ²⁾

1) davon ca. 14 % als Kristallwasser

2) einschl. des im Werkstoff enthaltenen Kristallwassers

GFK
IRE

Isolierwerkstoffe
Chemische u. physikalische
Daten

Tab. 3

Versuchsbedingungen		Versuchs - Nr.																		
	Einh.	1	2	3	4	5 ¹⁾	14	15	16	17	19	20	21	22 ¹⁾	23	24	25	26	27	
Auffangwanne Fläche	m ²	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	4,5	1,1	4,5	0,18	0,18	
Auffangwanne mit Abdeckung	-		x	x	x		x	x		x	x	x	x		x					
Auffangwanne mit Isolierung	-										x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Auffangwanne mit Heizung	-														x	x	x	x	x	
Auffangwanne mit Schutzgaseinsp.	-						x	x	x				x							
Natrium-Auslauf	-	A	A	A	A	A	B	C	B	A	A		A	A	D	D	D			
Natrium-Temperatur	°C	350	400	370	580	400	530	450	550	600	570	600	550	600	660	660	660	820	810	
Natrium-Menge	kg	3,5	9	26	24	26	25	22	16,5	25	49	49	49	54	190	59	190	9,5	9,3	
Natrium-Durchsatz	kg/min		9	8,6	8,1	8,2	8,25	1,7	8,2	8,1	12,25	12,25	12,25	11	47	39	76,5			
Auslaufzeit	min		1	3,0	3,0	3,2	3,0	14,5	2,0	3,0	4,0	4,0	4,0	5,0	4,0	1,5	2,5			
Durchgeführte Messungen																				
Natrium-Menge		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Temperatur in der Wanne			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
" außerh.der Wanne			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
" der Zu-u. Abluft															x	x	x			
Wärmestrahlung																x	x			
Aerosolniederschlag in der Halle			x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x			
Aerosole in der Abluft											x		x	x	x	x	x			
Gewichtsverlauf															x	x	x			

1) mit Löschpulver abgedeckt (s. Kap. 5.1.3)

**GFK
IRE**

**Natriumbrände in Auffangwannen
Versuchsparemeter**

Tab.6

Versuchsbedingungen		Versuch-Nr.								
	Einh.	6	7	8	9	10	11	12	13	18
Rohrleitungsanordnung horizontal	-	x	x		x	x		x		x
Rohrleitungsanordnung vertikal	-			x			x		x	
Isolierung	-	I ₁	I ₂	I ₃						
Durchmesser der Leckstelle	mm	1,2	1,2	1,2	1,2	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
Natrium-Temperatur	°C	420	600	600	580	530	580	615	650	620
Natrium-Menge	kg	5,8	<0,5	17	21,2	31,6	40,5	45,5	48,5	10
Natrium-Durchsatz	kg/min	1		0,8	0,8	8,5	8	8	8	8
Löschen mit Löschpulver	-			x						
Durchgeführte Messungen										
Natrium-Menge		x		x	x	x	x	x	x	x
Temperatur der Rohrleitung				x	x	x	x	x	x	x
Temperatur in der Isolierung		x	x	x	x	x	x	x	x	x
Temperatur in der Wanne		x	x	x	x	x	x	x	x	x
Aerosolniederschlag in der Halle		x		x	x		x	x	x	

GFK
IRE

Natriumbrände an Rohrleitungen
Versuchsparemeter

Tab. 7

Versuch Nr.	Datum	Uhrzeit ca.	Luft Messhöhe 2 m über Grund		Wind Messhöhe 40 m über Grund	
			°C	relative Feuchte %	Geschwind. m/s	aus Richtung 0 ÷ 360° 
1	18.10.71	10. ⁰⁰	13,8	82	4,9	235
2	5.11.71	9. ³⁰	3,0	95	5,0	212
3	25.11.71	10. ⁴⁵	-1,3	90	1,6	240
4	13.12.71	10. ¹⁵	5,7	73	4,1	31
5	20.12.71	10. ²⁰	9,0	88	5,0	235
6	17.2.72	13. ⁰⁰	5,5	63	3,3	43
7	7.3.72	10. ¹⁵	7,6	88	3,2	186
8	21.3.72	10. ⁵⁰	11,7	60	1,2	272
9	28.3.72	10. ¹⁰	6,1	77	7,3	239
10	18.4.72	10. ⁰⁰	7,3	83	2,4	13
11	26.4.72	10. ⁰⁵	6,6	50	3,1	41
12	2.5.72	10. ⁴⁵	18,2	53	1,5	38
13	8.5.72	10. ²⁰	17,4	63	1,9	75
14	17.5.72	10. ⁰⁵	7,4	87	2,3	186
15	29.5.72	11. ¹⁰	15,5	83	6,0	232
16	5.6.72	10. ⁰⁵	20,7	63	2,2	131
17	21.6.72	9. ⁵⁰	18,8	65	4,1	240
18	13.7.72	13. ³⁰	20,8	42	3,7	38
19	13.9.72	10. ⁰⁵	11,5	81	2,4	236
20	27.9.72	10. ¹⁰	11,4	85	1,5	212
21	9.10.72	13. ⁴⁰	14,2	64	2,1	300
22	24.10.72	13. ⁵⁰	10,5	85	5,4	230
23	14.12.72	10. ¹⁰	-1,8	97	1,5	17
24	6.2.73	10. ¹⁵	1,7	85	5,1	238
25	22.2.73	14. ⁰⁵	6,5	68	4,8	251
Strömungs- messung	7.11.72	10. ⁰⁰	8,2	90	2,7	224
	21.8.73	10. ⁰⁰	22,2	76	2,1	310

GFK
IRE

Meteorologische Bedingungen
während der Natrium-Brand-
versuche

Tab.8

Versuchs-Nr.		19	21	22	23	24 ²⁾	25
Filter I/1							
Dauer der Messung	min	0-70	0-75	0-32	0-197	0-4	0-4,5
Na aus Na ₂ O	mg	5,5	3,7	8	89,1	11	202
Na aus Na ₂ CO ₃	mg	6,4	7,1	12	116	22,3	107,5
Na insgesamt ³⁾	mg	11,9	10,8	20	205,6	33,3	309,5
Filter I/2							
Dauer der Messung	min	8-70	9-75	33-43	7,5-197	0-22	10-17
Na aus Na ₂ O	mg	1,3	-	4,80	6,2	14,1	156,9
Na aus Na ₂ CO ₃	mg	1,7	1,3	8,0; 8,5 1)	13,7	28,0	91
Na insgesamt ³⁾	mg	3,0	1,3	21,3	19,9	42,1	247,9
Filter II/1							
Dauer der Messung	min	-	-	0-32	0-197	0-4	0-4,5
Na aus Na ₂ O	mg	-	-	34,3	333	9,5	200,7
Na aus Na ₂ CO ₃	mg	-	-	32	110	25,0	87,1
Na insgesamt ³⁾	mg	-	-	66,3	443	34,5	287,8
Filter II/2							
Dauer der Messung	min	-	-	33-43	7,5-197	0-22	10-17
Na aus Na ₂ O	mg	-	-	8,6	2,1	14,8	68,5
Na aus Na ₂ CO ₃	mg	-	-	11,2	4,8	25,3	71,6
Na insgesamt	mg	-	-	12,3 1)	6,9	40,1	140,1

1) Na aus NaCl (Löschpulver)

2) Bei Versuch 24 waren die Ansaugöffnungen der Filter teilweise durch Oxide verstopft. Bei der Auswertung ist dies entsprechend zu berücksichtigen.

GFK
IRE

Aerosolmessung in der Abluft
Meßdaten

Tab.10

Versuchs-Nr.		19		21		22		23		24		25	
Eingebrachte Natriummenge	kg	49		49		54		190		59		190	
Betrachtete Versuchsphase		Anfang	Abkühlg.	Anfang	Abkühlg.	Brand	Löschen	Anfang	Abkühlg.	Anfang	Brand	Anfang	Brand
Betrachteter Zeitraum	min	0-8	8-70	0-9	9-75	0-32	33-43	0-7,5	7,5-197	0-4	4-22	0-4,5	10-17
Während des betrachteten Zeitraumes reagierte Natriummenge (ermittelt aus der gemessenen Reaktionsrate)	kg	-	-	-	-	-	-	20 ²⁾	55	5,1	14	20 ²⁾	24
Während des betrachteten Zeitraumes mit der Abluft in Form von Aerosolen abgeführte Natrium-Menge	kg	0,2	0,068	0,2	0,027	1,9	7,0	13,6 ²⁾	0,60	1,5 ¹⁾	0,44 ¹⁾	12,6 ²⁾	8,6
Anteil des mit der Abluft abgeführten Natriums bezogen auf die eingesetzte Natrium-Menge	%	0,4	-	0,4	-	-	-	7,2	0,34	-	-	6,6	36
Anteil des mit der Abluft abgeführten Natriums, bezogen auf die verbrannte Natrium-Menge	%							68	1,1			63	36

1) Wegen Verstopfung der Filter können die Werte nicht verwendet werden.

2) Summe aus der Reaktion des Strahles und dem sich bildenden Flächenbrand

**GFK
IRE**

**Aerosole in der Abluft
Versuchsergebnisse**

Tab. 11

Abb. 1 Versuchsgebäude

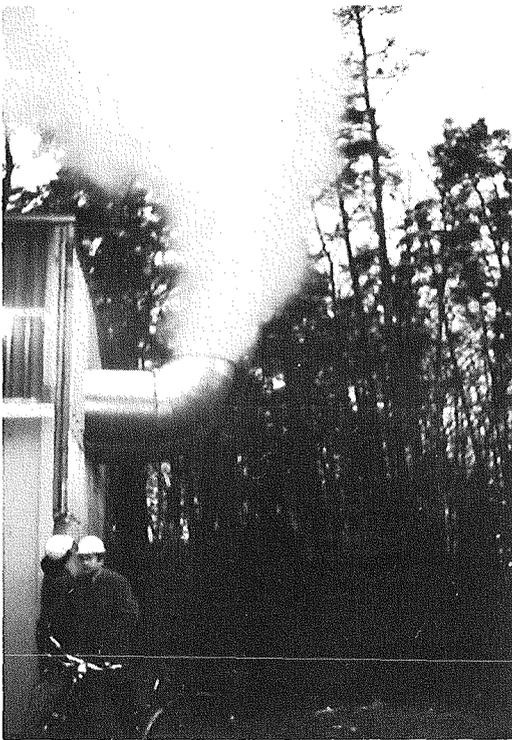
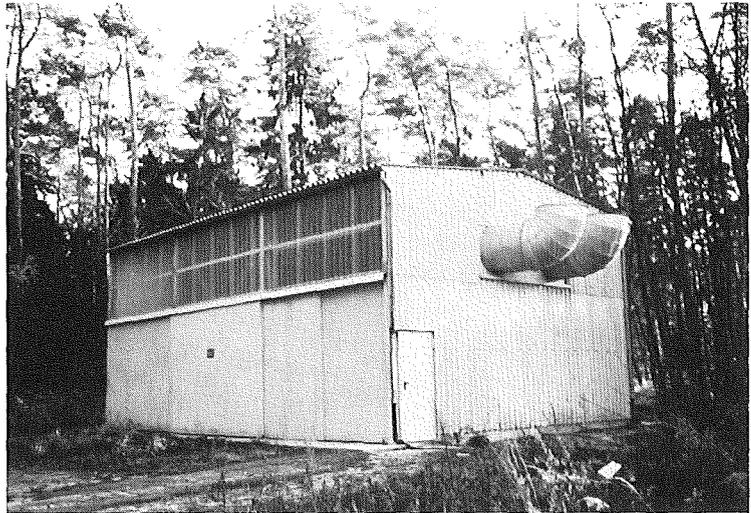
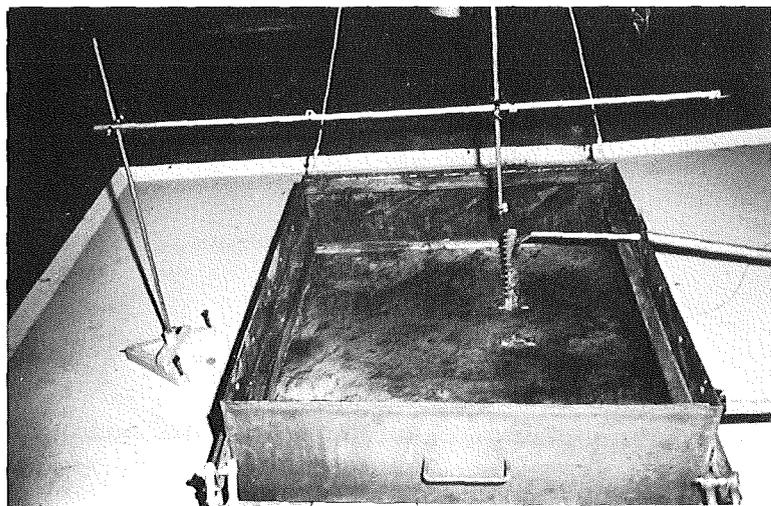


Abb. 2 Austrittsstutzen der Abluft-
anlage

Abb. 3 Auffangwanne 1,1 m²



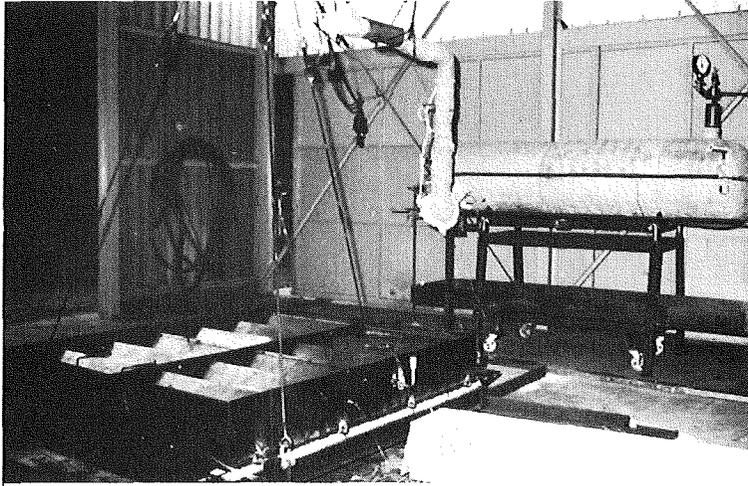


Abb. 4 Auffangwanne $4,5 \text{ m}^2$ mit Abdeckung

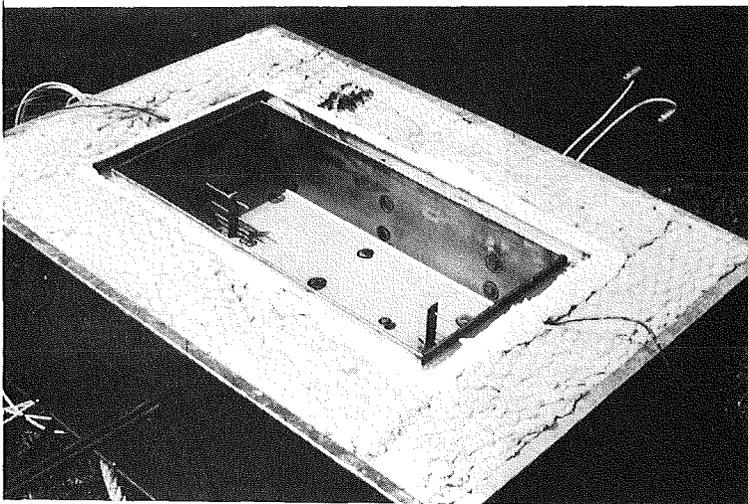


Abb. 5 Wanne $0,18 \text{ m}^2$

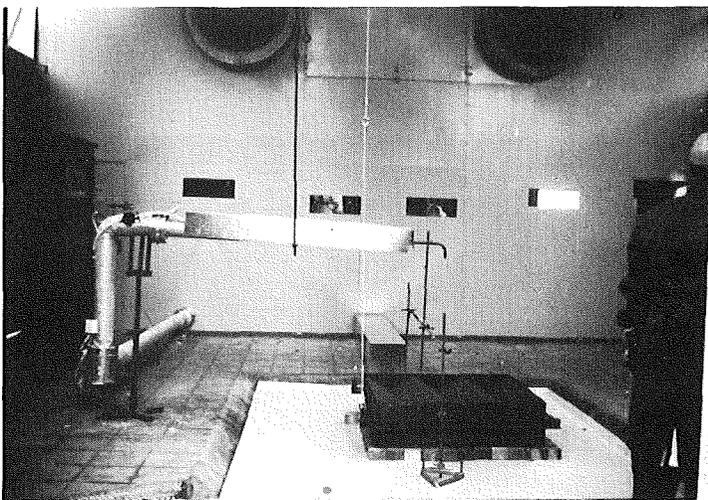


Abb. 6 Auffangwanne $1,1 \text{ m}^2$ mit Abdeckung

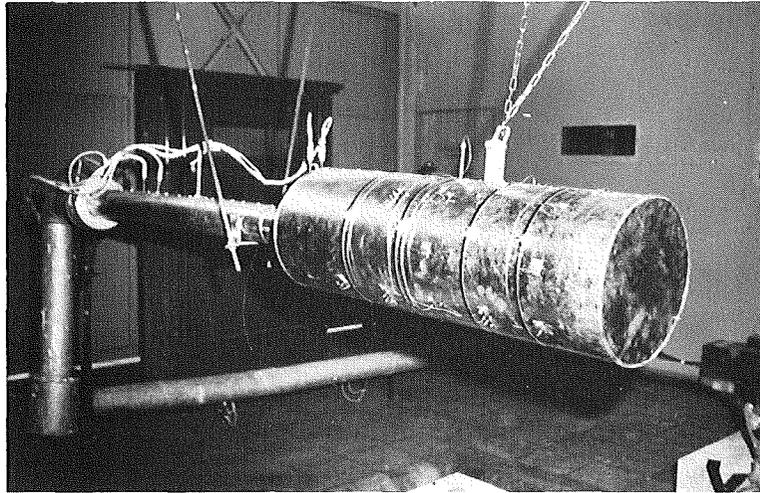


Abb. 7 Isolierter Rohrleitungsabschnitt, horizontale Lage

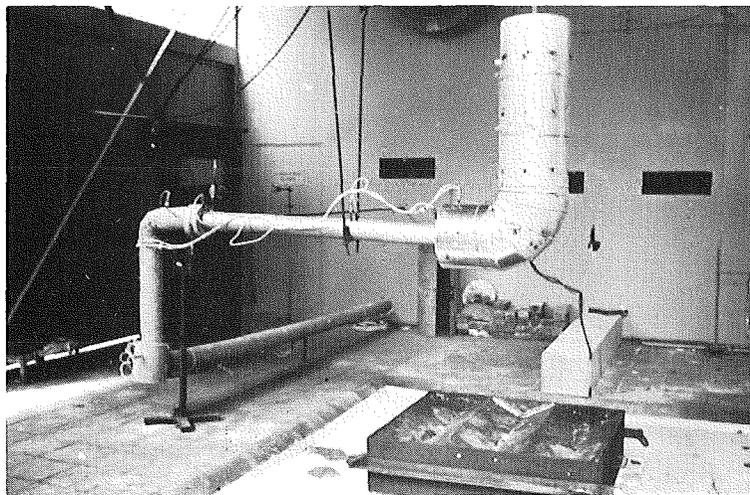


Abb. 8 Isolierter Rohrleitungsabschnitt, vertikale Lage

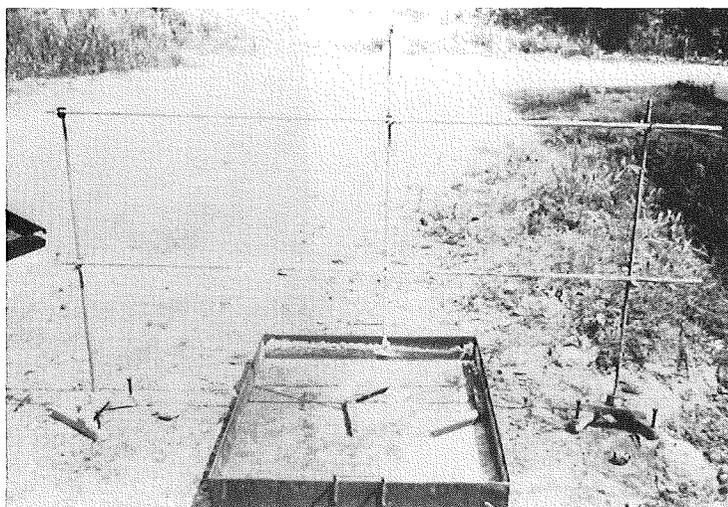


Abb. 9 Wanne $0,8 \text{ m}^2$ für Benzinbrände

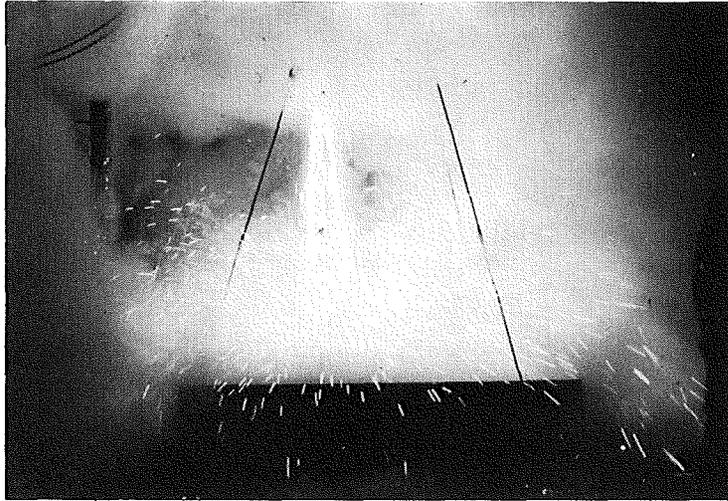


Abb. 10 Aerosolentwicklung bei Natriumauslauf

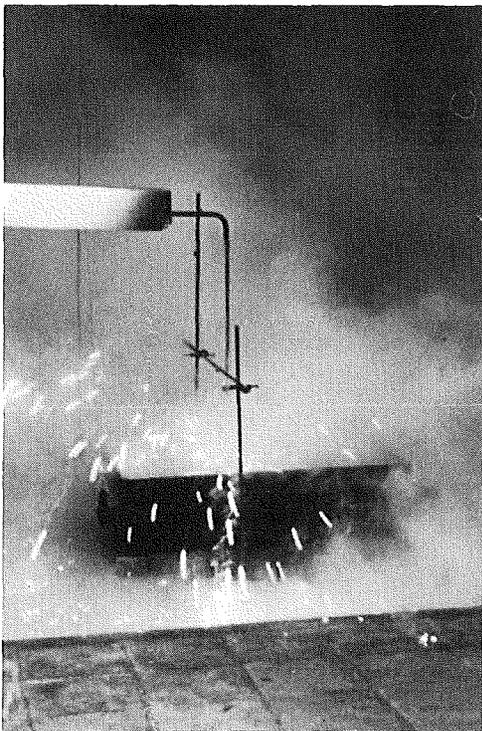


Abb. 11 Natriumauslauf, kompakter Strahl

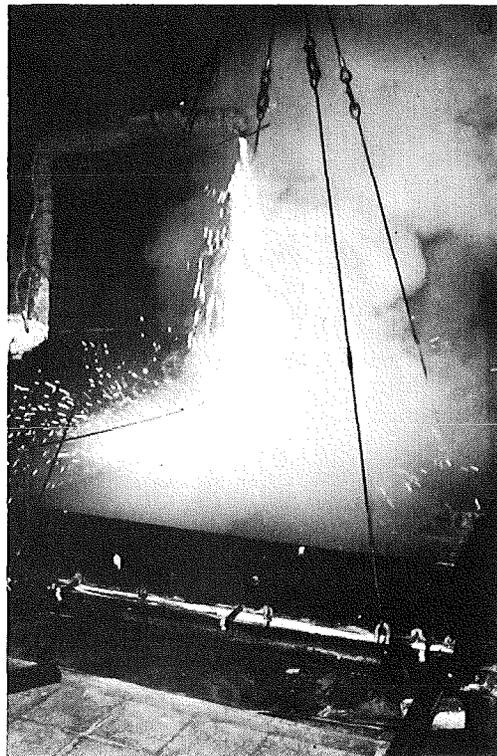


Abb. 12 Natriumauslauf, zerteilter Strahl

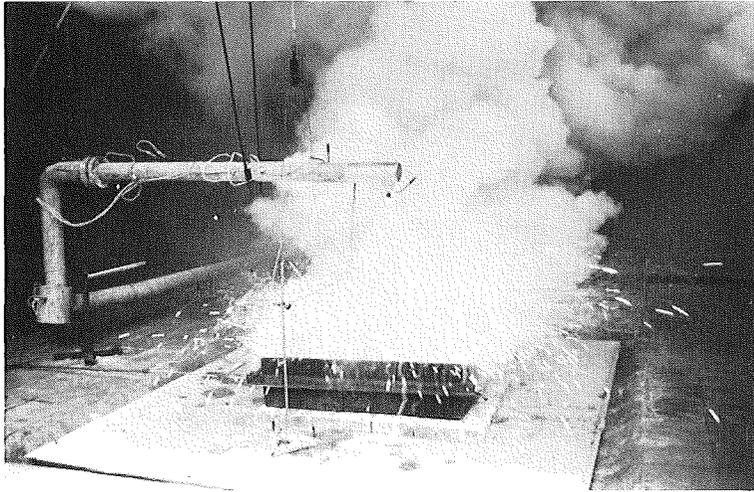


Abb. 13 Natriumauslauf, zersprühter Strahl

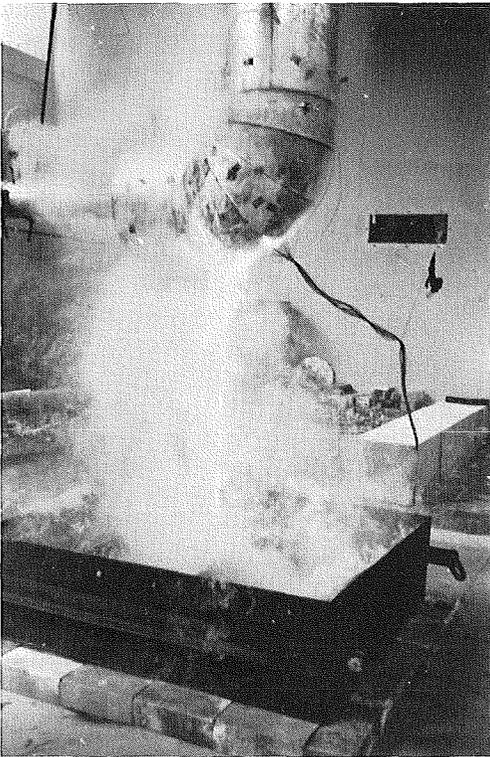


Abb. 14 Natriumauslauf aus isoliertem Rohrleitungsabschnitt

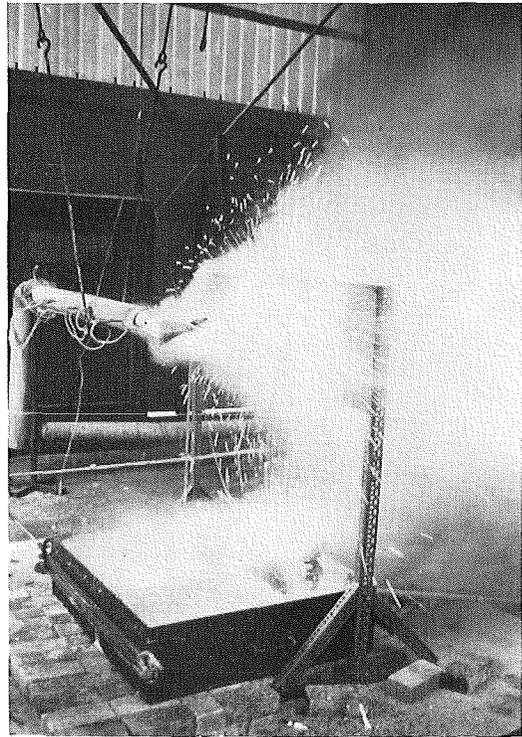


Abb. 15 Natriumaustritt aus einer horizontal angeordneten Düse

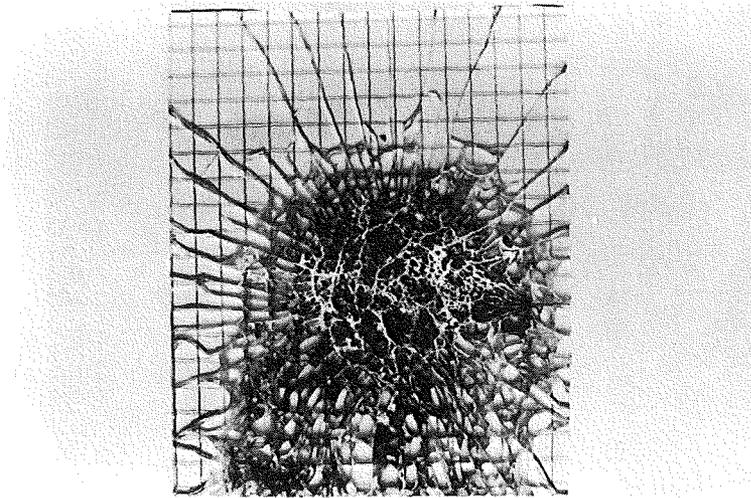


Abb. 16 Spiegeldrahtglas nach Natriumstrahleinwirkung (30 s)



Abb. 17 Ablagerung von Aerosolen an der Einströmöffnung der Abluftanlage

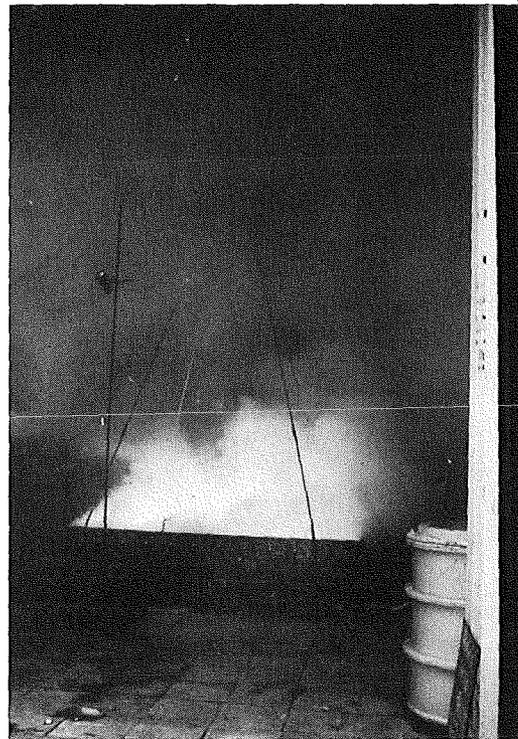


Abb. 18 Natriumflächenbrand in offener Wanne $4,5 \text{ m}^2$

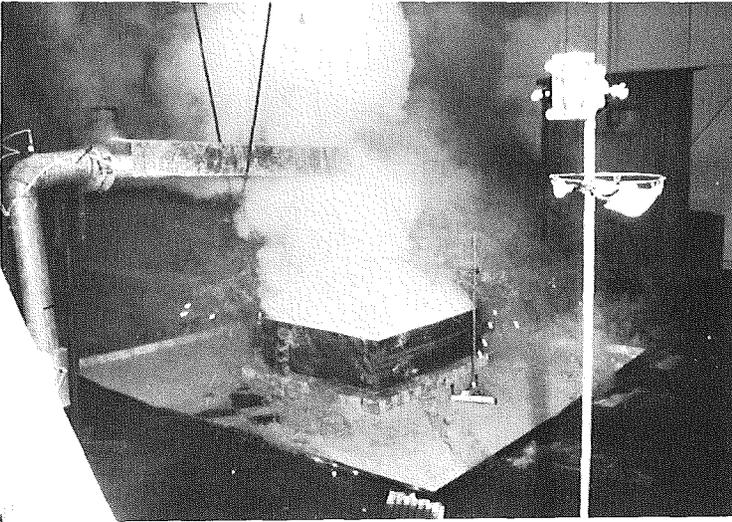


Abb. 19 Natriumflächenbrand
in offener Wanne
 $1,1 \text{ m}^2$

Abb. 20 Aerosolentwicklung in
einer Wanne $4,5 \text{ m}^2$
mit Abdeckung kurz nach
dem Einfüllen

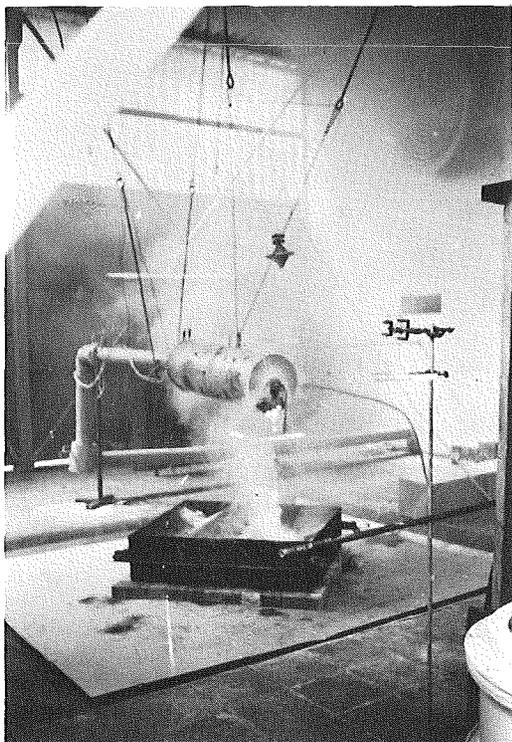
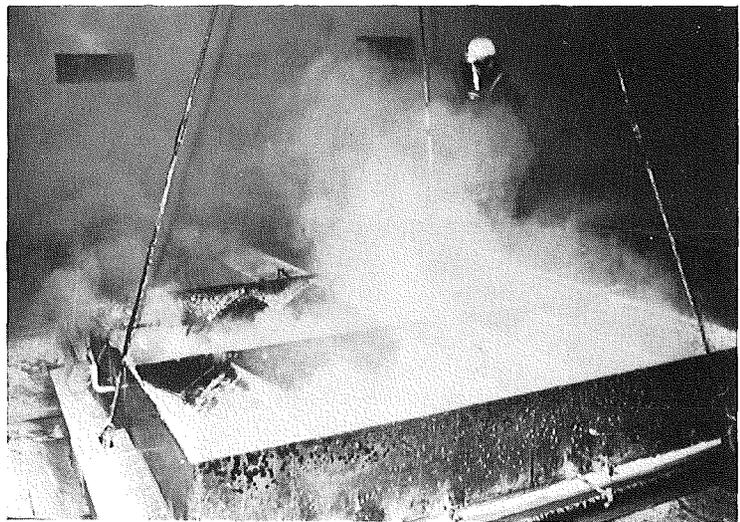


Abb. 21 Natriumaustritt aus Isolierung,
Versuch 12

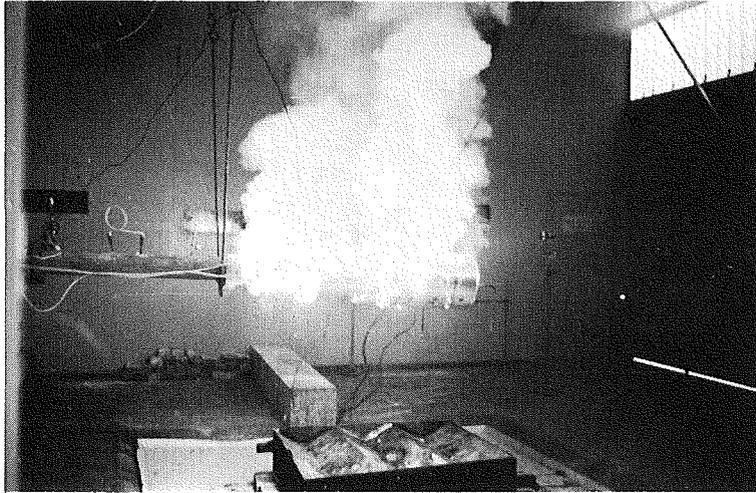


Abb. 22 Brennende Gase nach Natriumreaktion, Versuch 18

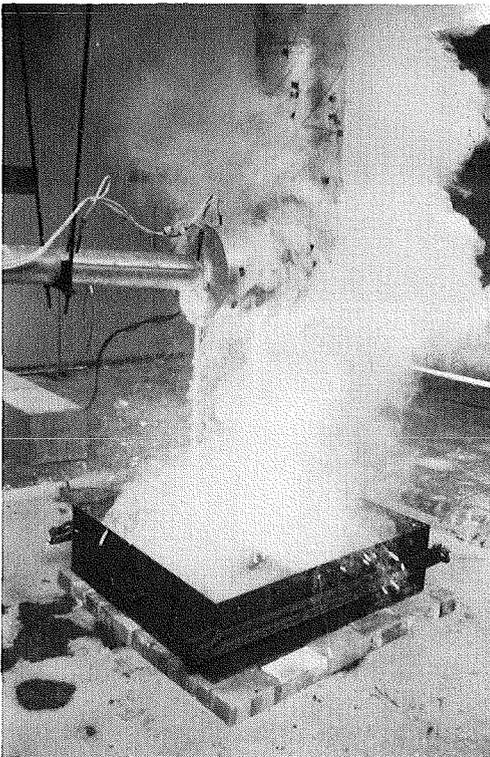


Abb. 23 Natriumaustritt aus Isolierung, Versuch 11

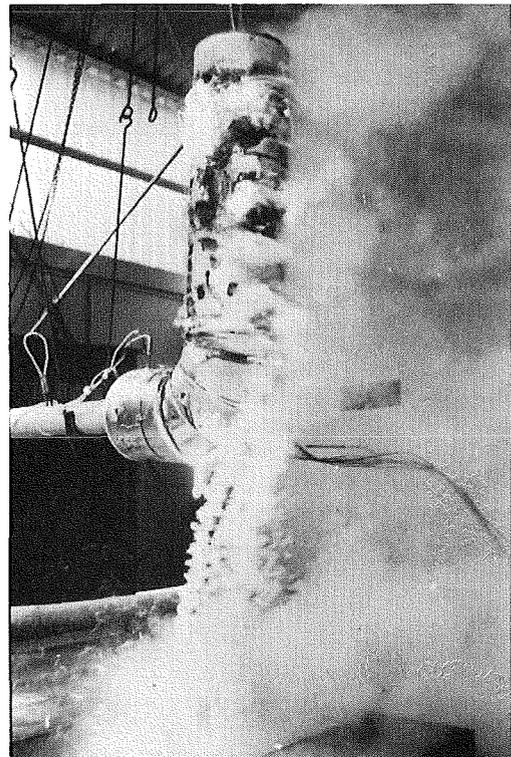


Abb. 24 Brand und Natriumaustritt aus Isolierung, Versuch 13



Abb. 25 Abdecken eines Flächenbrandes $1,1 \text{ m}^2$ mit Löschpulver

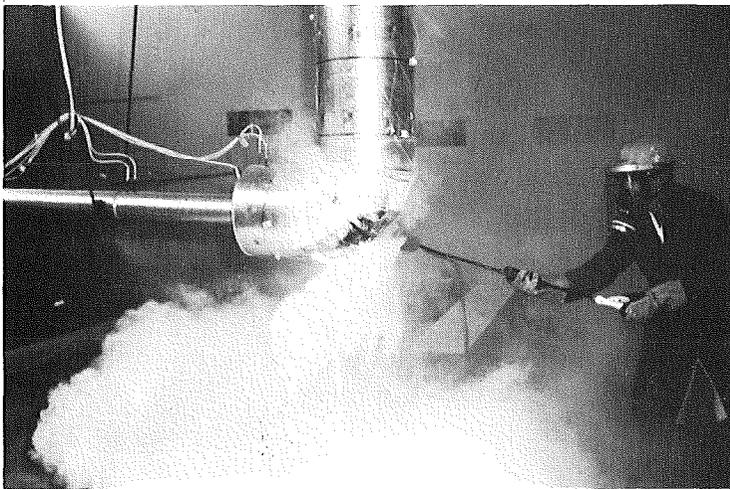


Abb. 26 Löschversuch bei einem Rohrleitungsbrand



Abb. 27 Beseitigung der Brandrückstände mit Dampf

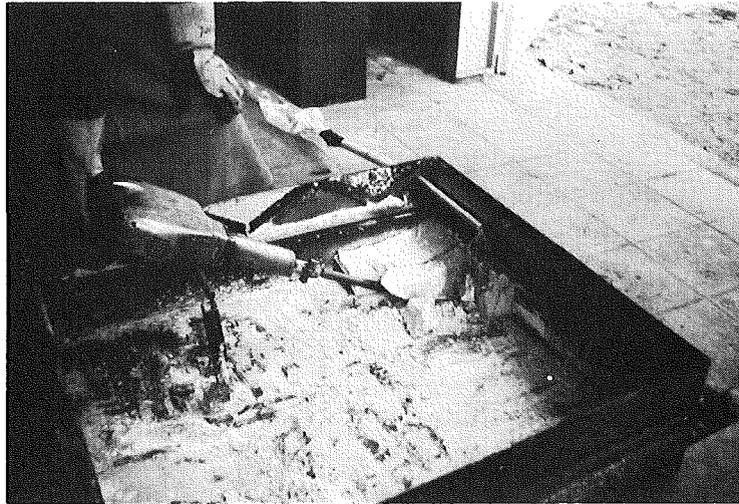


Abb. 28 Entfernen des erkalteten Natriums aus einer Wanne

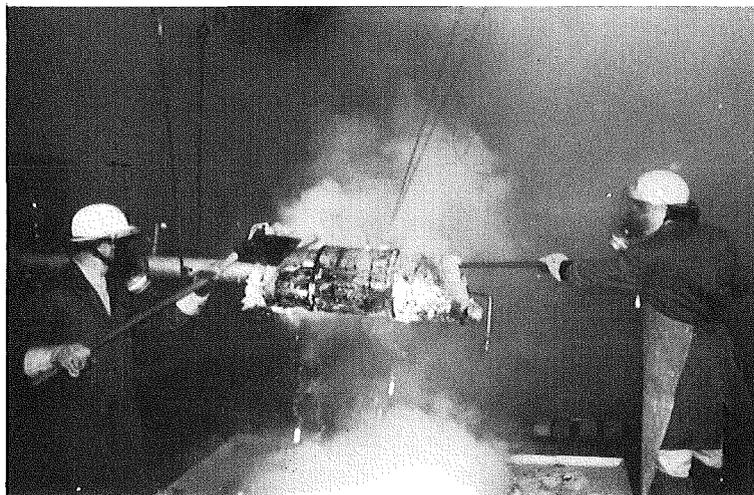


Abb. 29 Natriumbrand nach Entfernen des Blechmantels eines erkalteten Rohrleitungsabschnittes

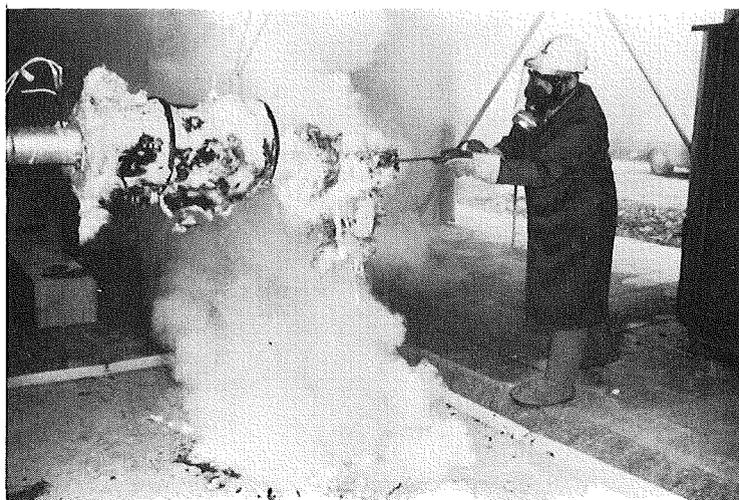
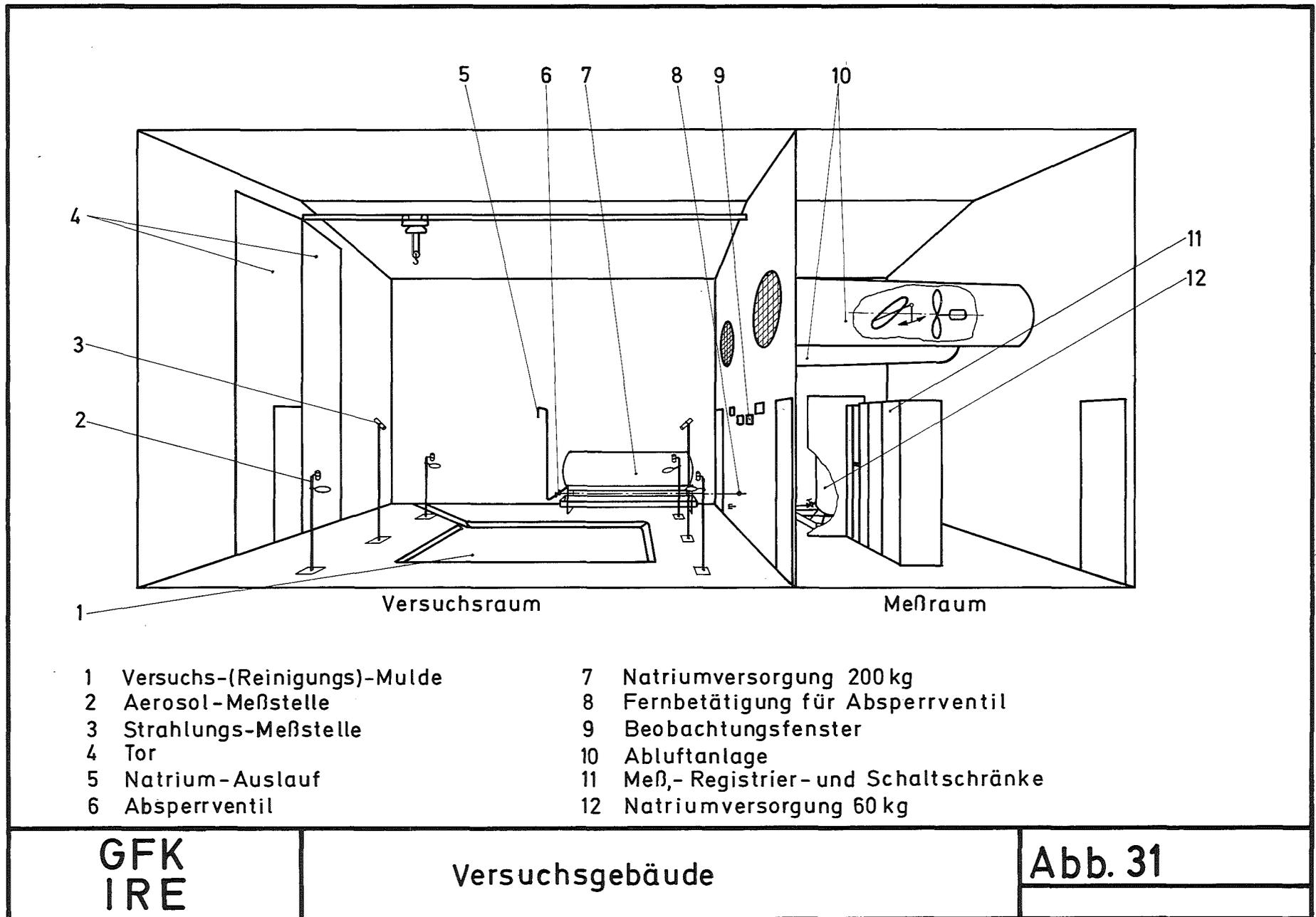


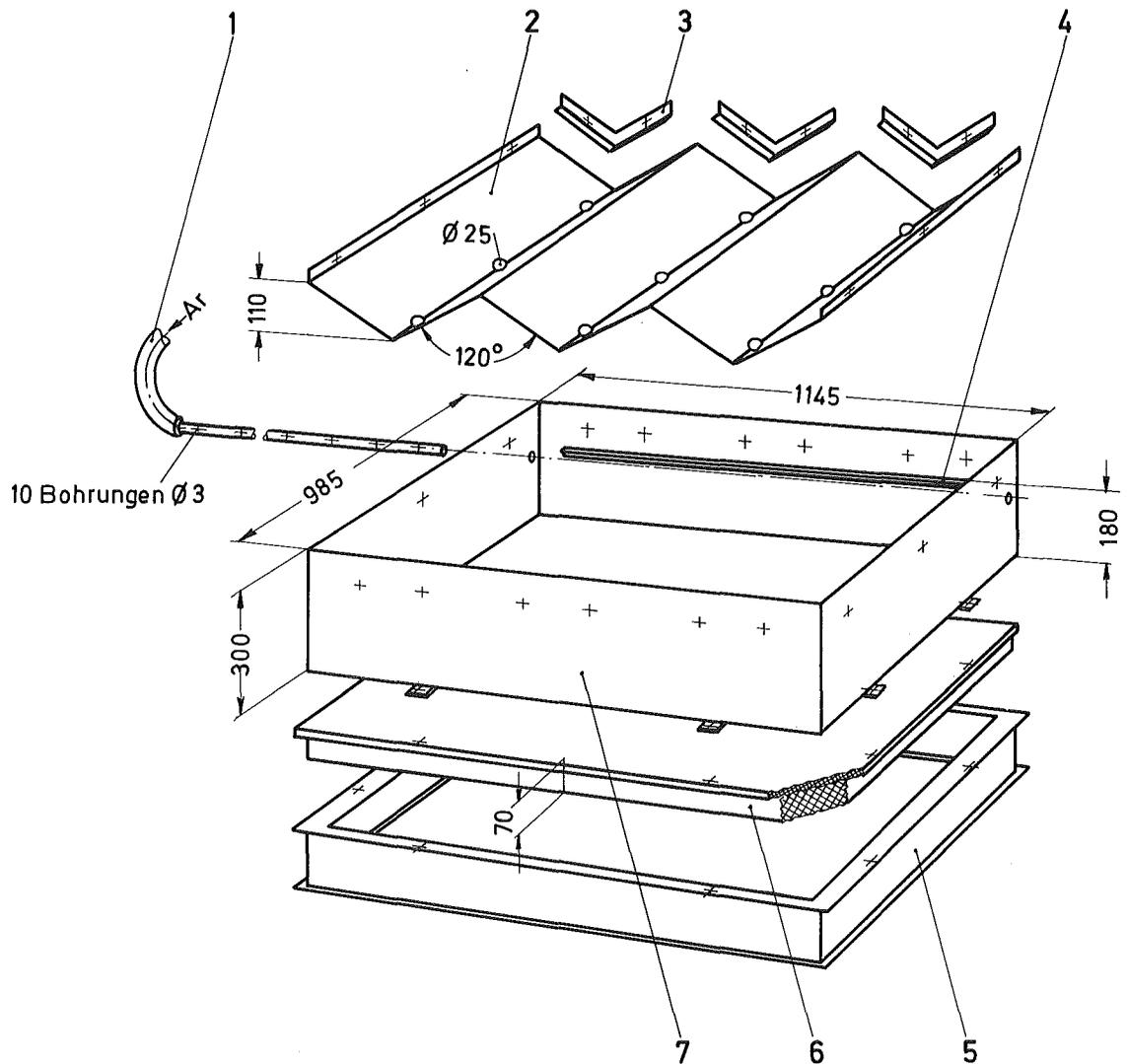
Abb. 30 Natriumbrand beim Zerlegen eines erkalteten Rohrleitungsabschnittes



GFK
IRE

Versuchsgebäude

Abb. 31

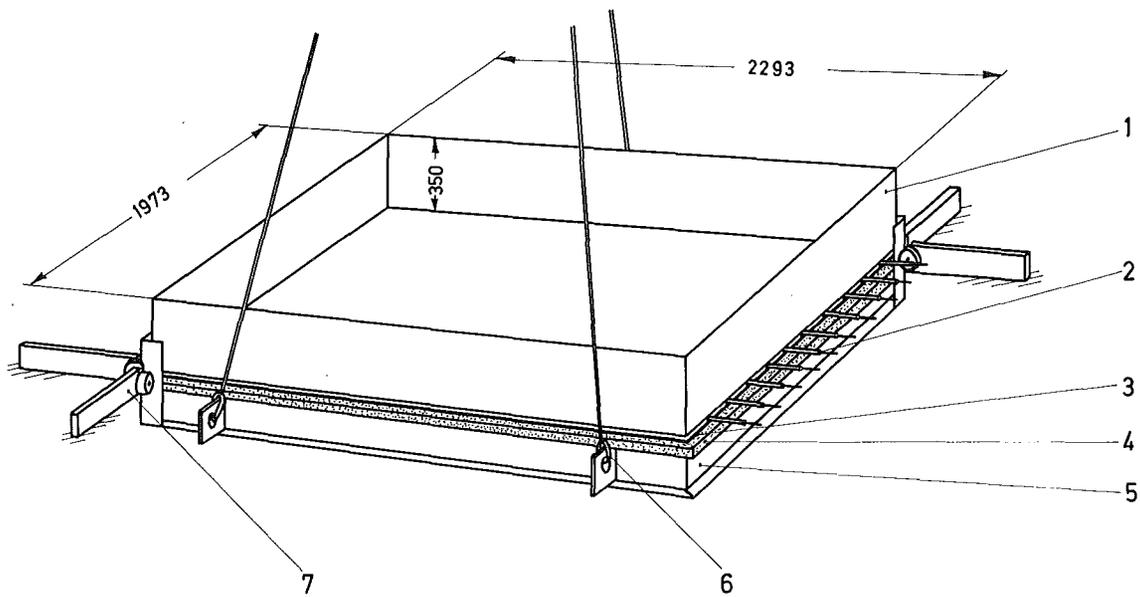


- 1 Schutzgaseinspeisung (nur bei Versuch Nr.14;15;16;21 eingebaut)
- 2 Abdeckung
- 3 Haltewinkel (6 Stück) } für Versuche mit abgedeckter Wanne
- 4 Auflage für Abdeckung
- 5 Rahmen } nur bei den Versuchen Nr.19...22
- 6 Isolierung }
- 7 Auffangwanne

GFK
IRE

Auffangwanne 1,1m²

Abb. 32

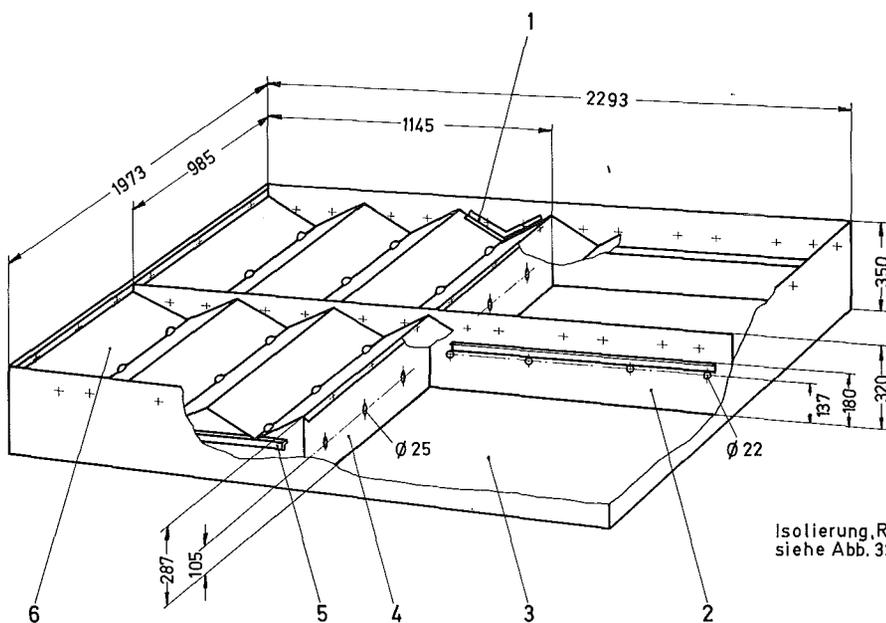


- | | |
|-----------------|-----------------|
| 1 Wanne | 5 Rahmen |
| 2 Heizstäbe | 6 Aufhängung |
| 3 Zwischenblech | 7 Rahmenführung |
| 4 Isolierung | |

GFK
IRE

Auffangwanne 4,5 m²
ohne Abdeckung

Abb. 33



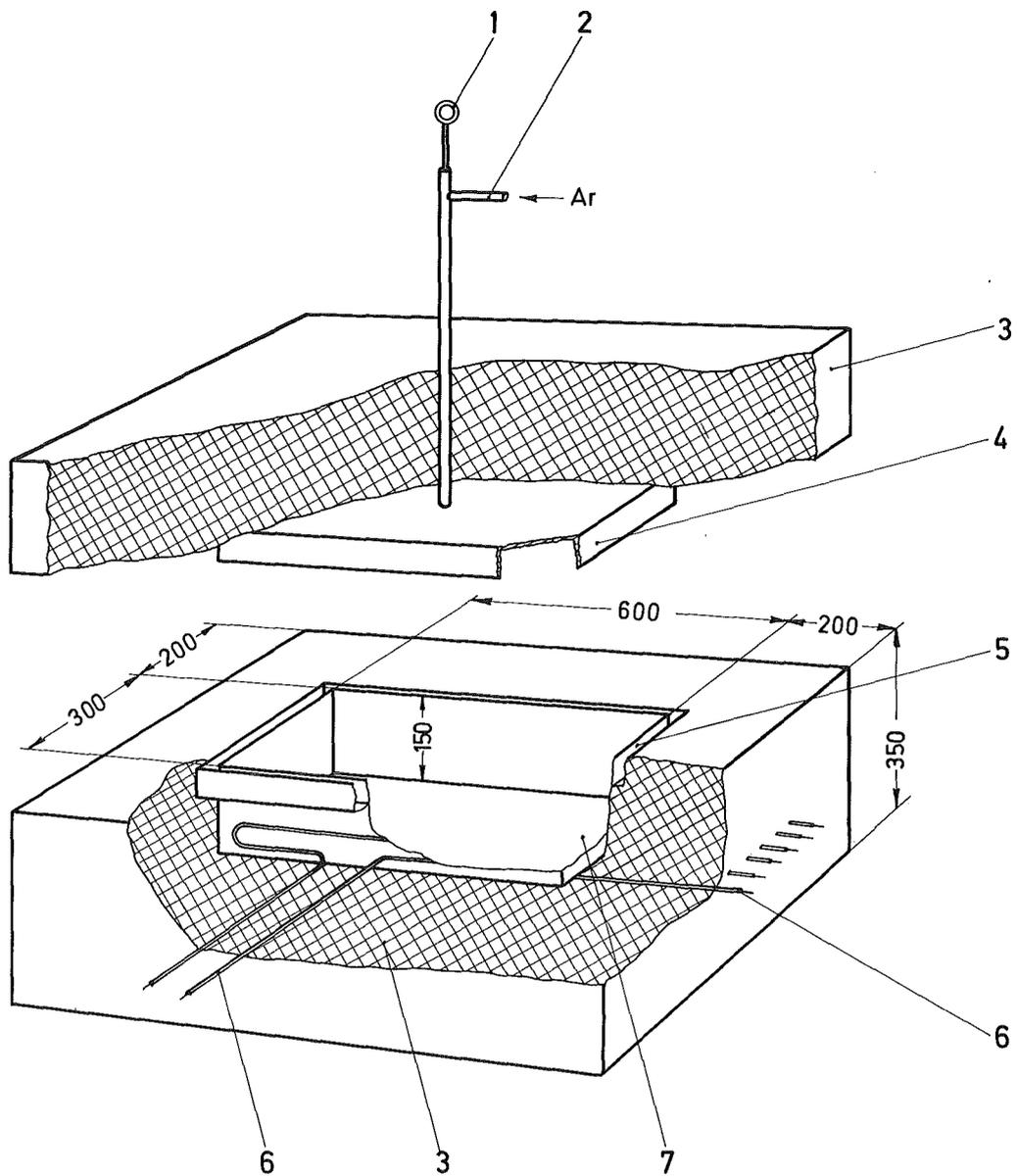
Isolierung, Rahmen und Aufhängung
siehe Abb. 33

- | | |
|--------------------------|-------------------------|
| 1 Haltewinkel (24 Stück) | 4 Querschott |
| 2 Längsschott | 5 Auflage für Abdeckung |
| 3 Auffangwanne | 6 Abdeckung |

GFK
IRE

Auffangwanne 4,5 m² mit Abdeckung

Abb. 34

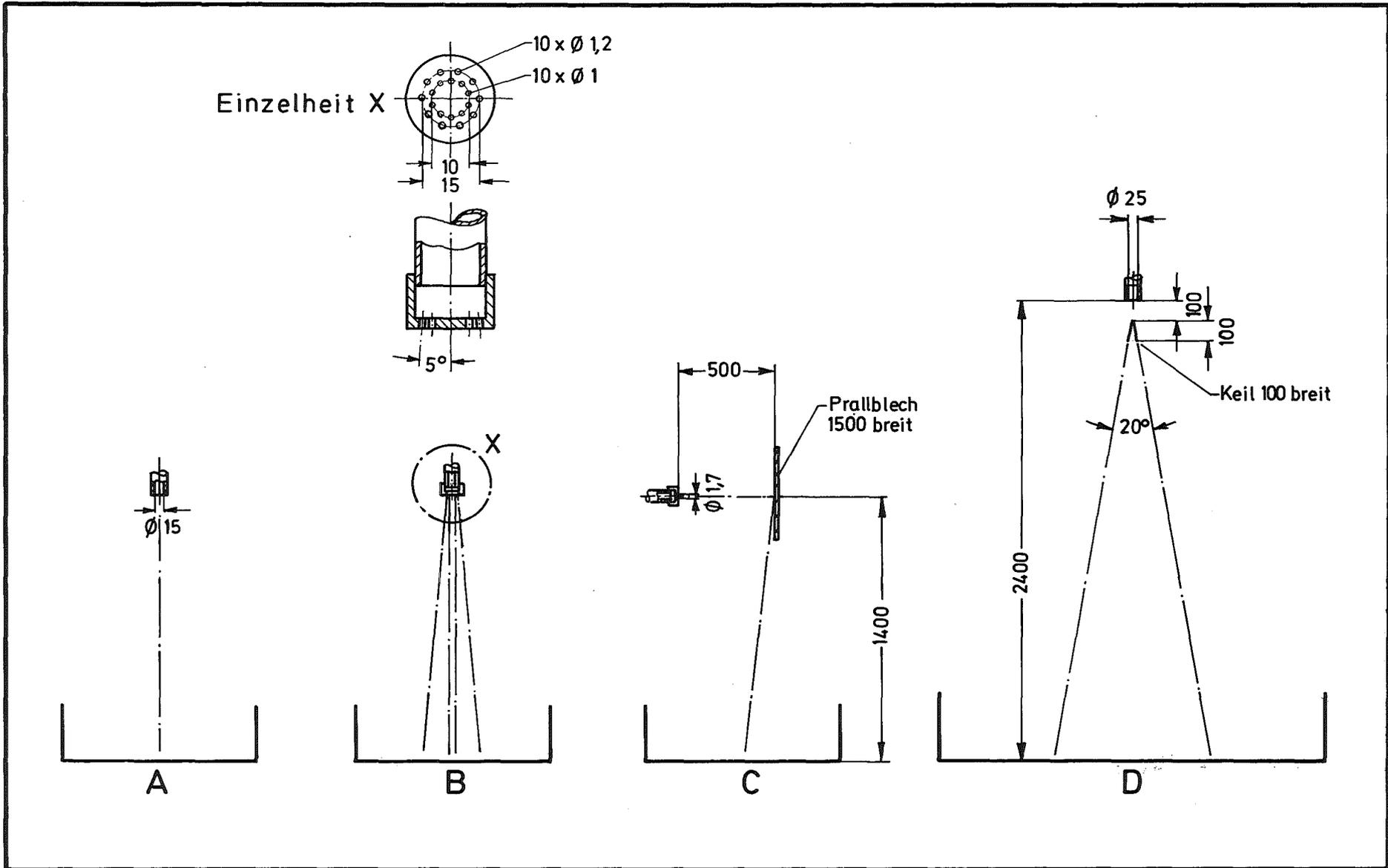


- 1 Deckel-Aufhängung
- 2 Schutzgaseinspeisung
- 3 Isolierung
- 4 Deckel
- 5 Bleirinne
- 6 Heizstäbe
- 7 Wanne

GFK
IRE

Offene Wanne 0,18 m²

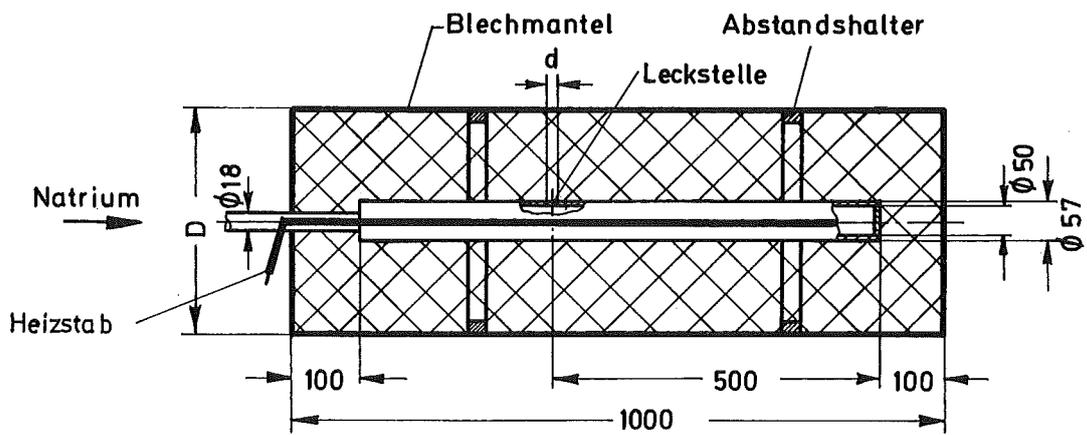
Abb. 35



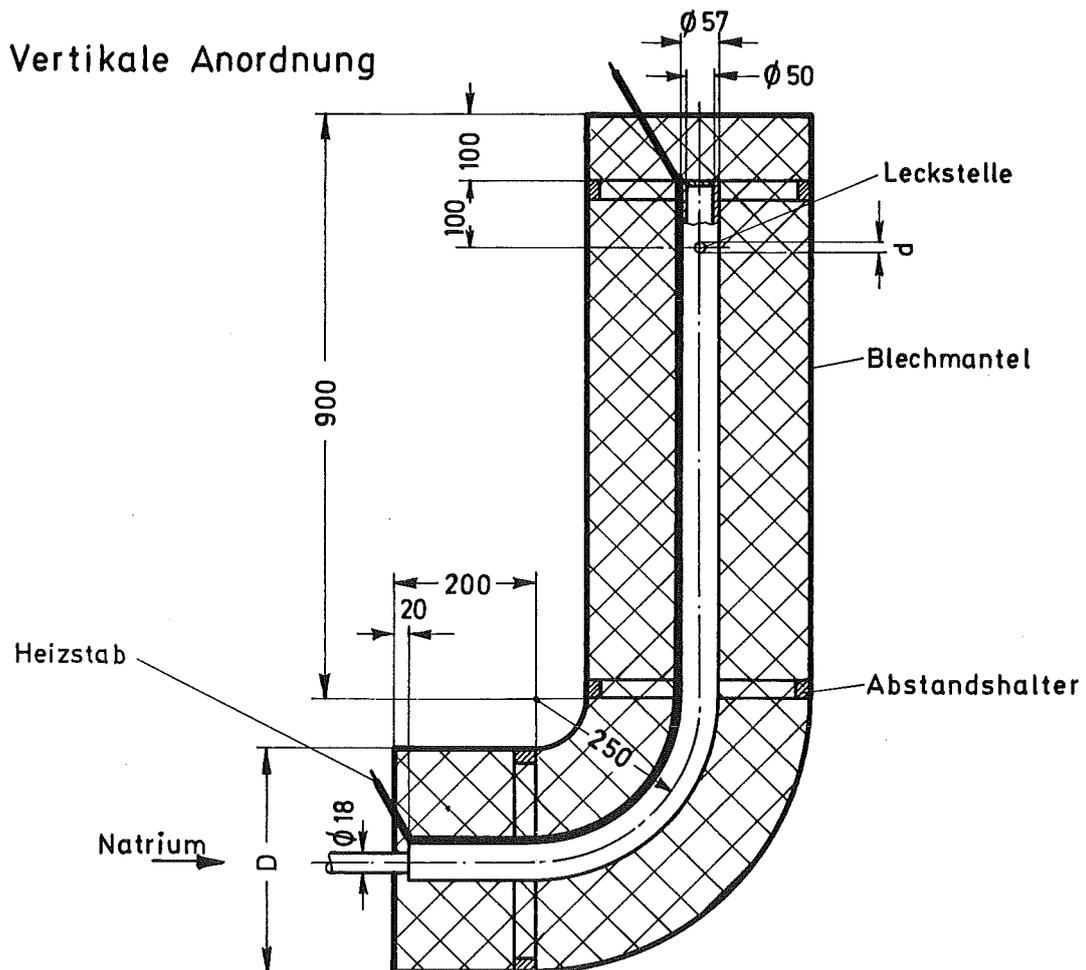
GFK
IRE

Versuche mit Auffangwannen
Natrium - Auslauf A-D

Abb. 36



Horizontale Anordnung



D = Isolierungs ϕ (siehe Abb.38)

d = Leck ϕ (siehe Tab. 7)

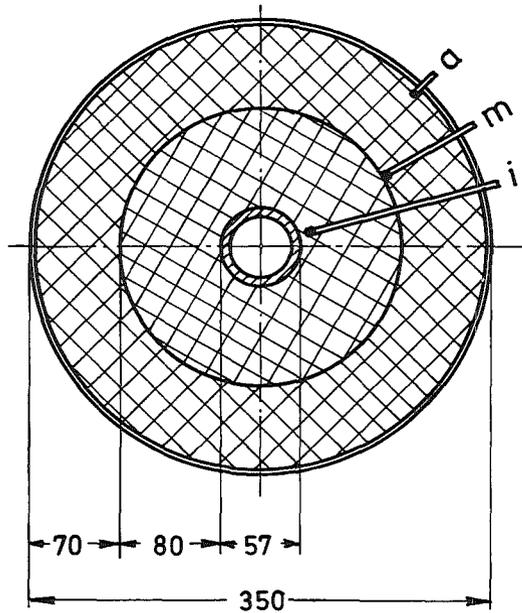
GFK
IRE

Isolierte Rohrleitungen
Konstruktiver Aufbau

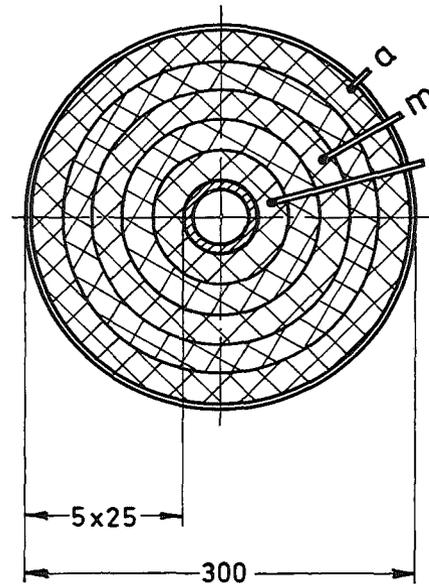
Abb.37

Isoliermaterialien

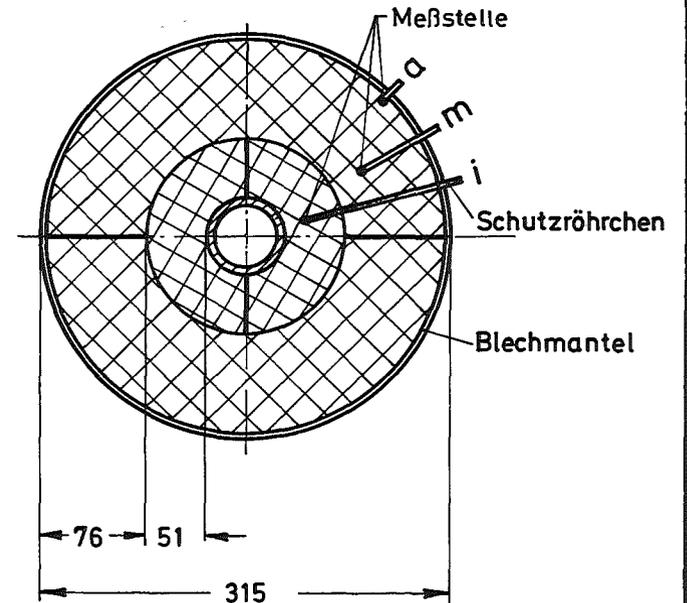
l_1
Steinwolle



l_2
Keramikfaser



l_3
Kalziumsilikat



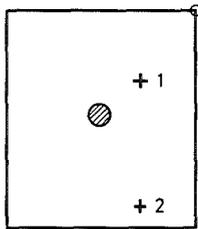
Abstand der Meßstellen: $a = 10 \text{ mm}$ von Außenkante Isolierung
 $m = \text{Mitte der Isolierung}$
 $i = 6,5 \text{ mm}$ vom Innenrohr

GFK
IRE

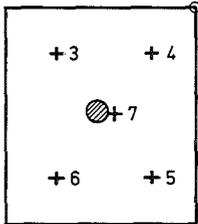
Rohrleitungen
Querschnitte der Isolierungen

Abb. 38

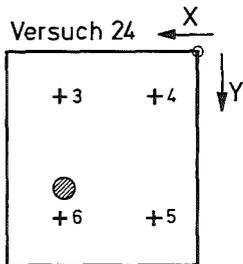
Versuch 2...18



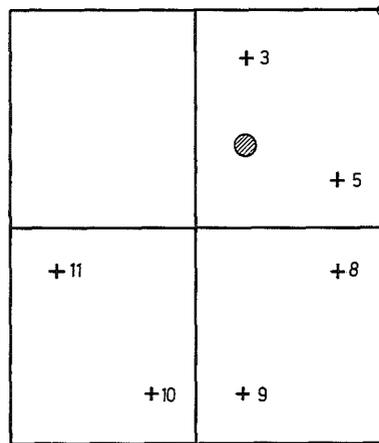
Versuch 19...22



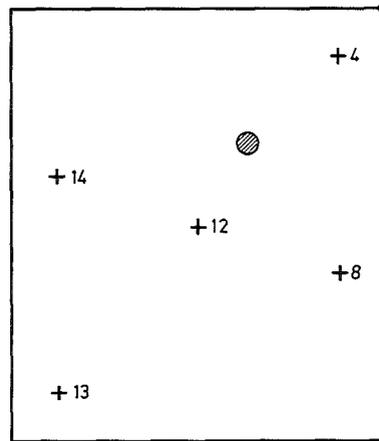
Versuch 24



Versuch 23



Versuch 25



Tor ← → Meßraum

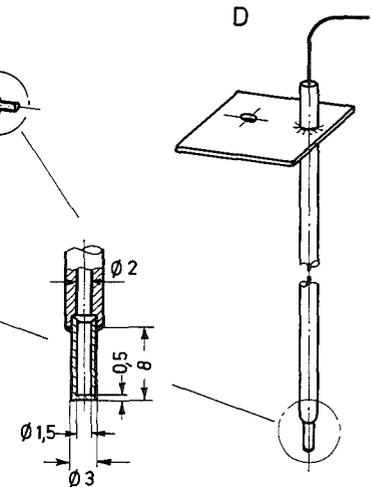
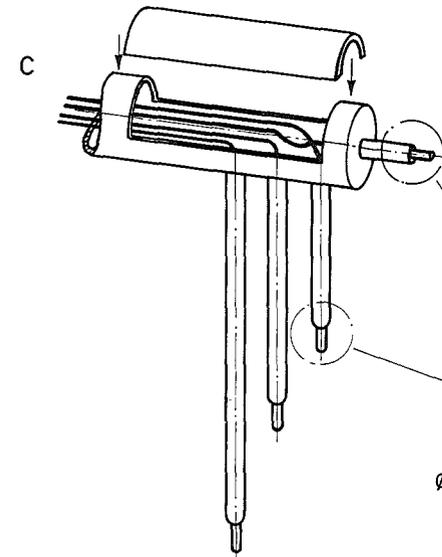
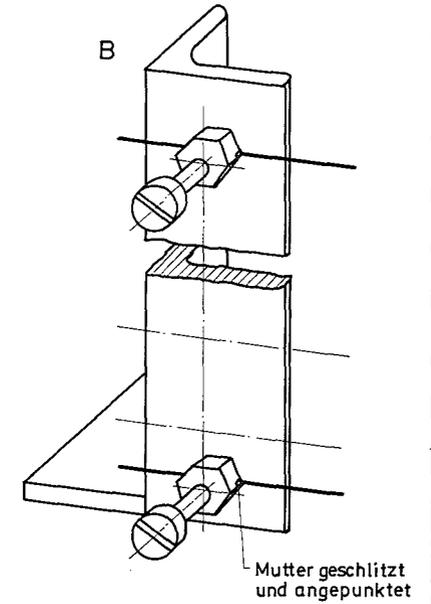
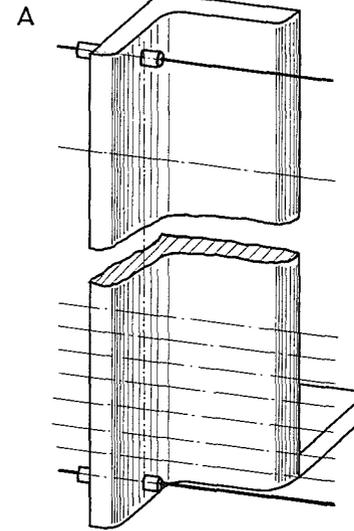
⊙ Natrium-Einlaufstelle

X-Y Koordinaten der Meßsäulen (siehe Tab. 4)

GFK
IRE

Versuche mit Auffangwannen
Lage und Nummern der Meß-
säulen

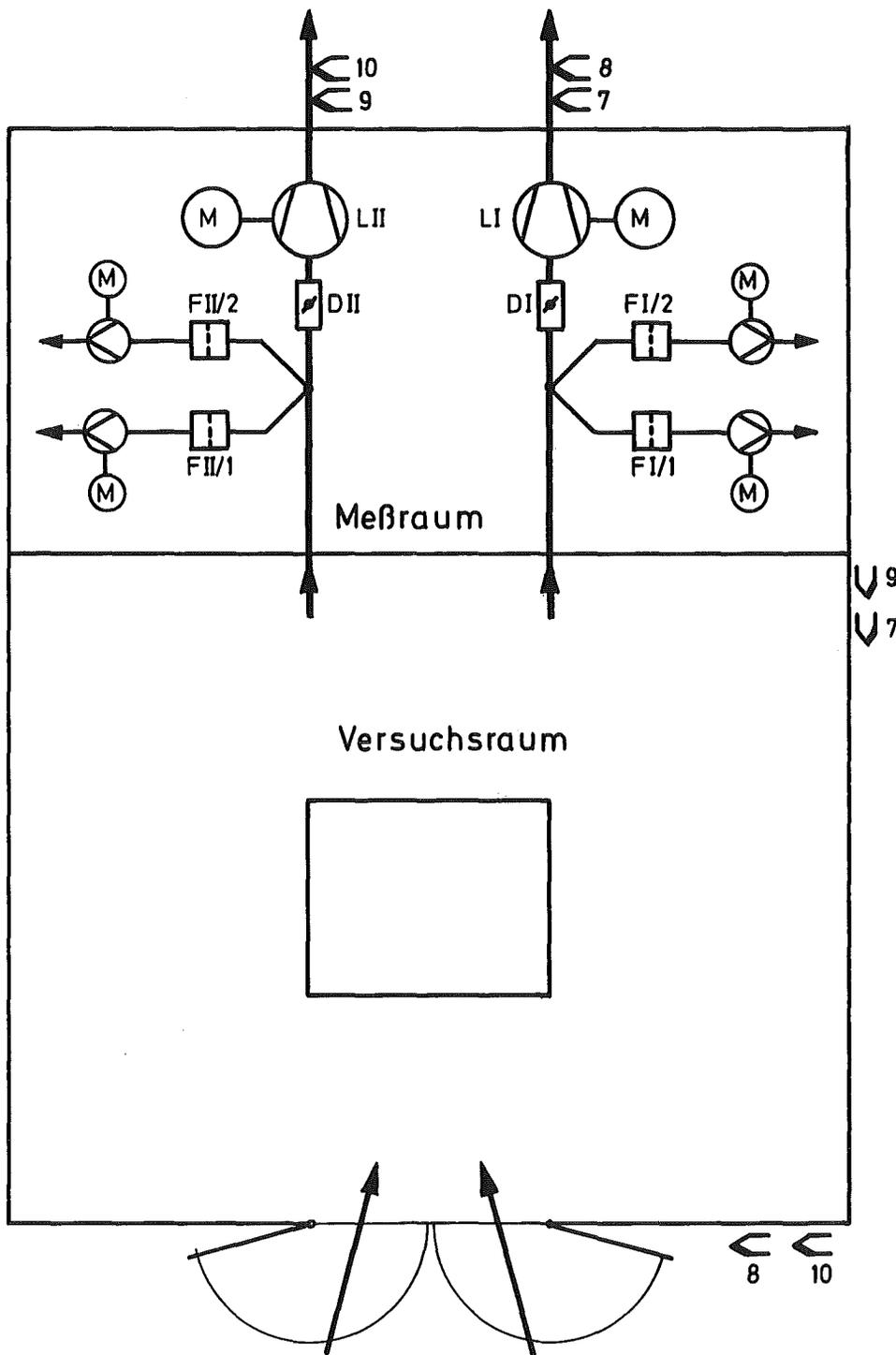
Abb. 39



GFK
IRE

Thermoelement-Anordnungen A...D

Abb. 40

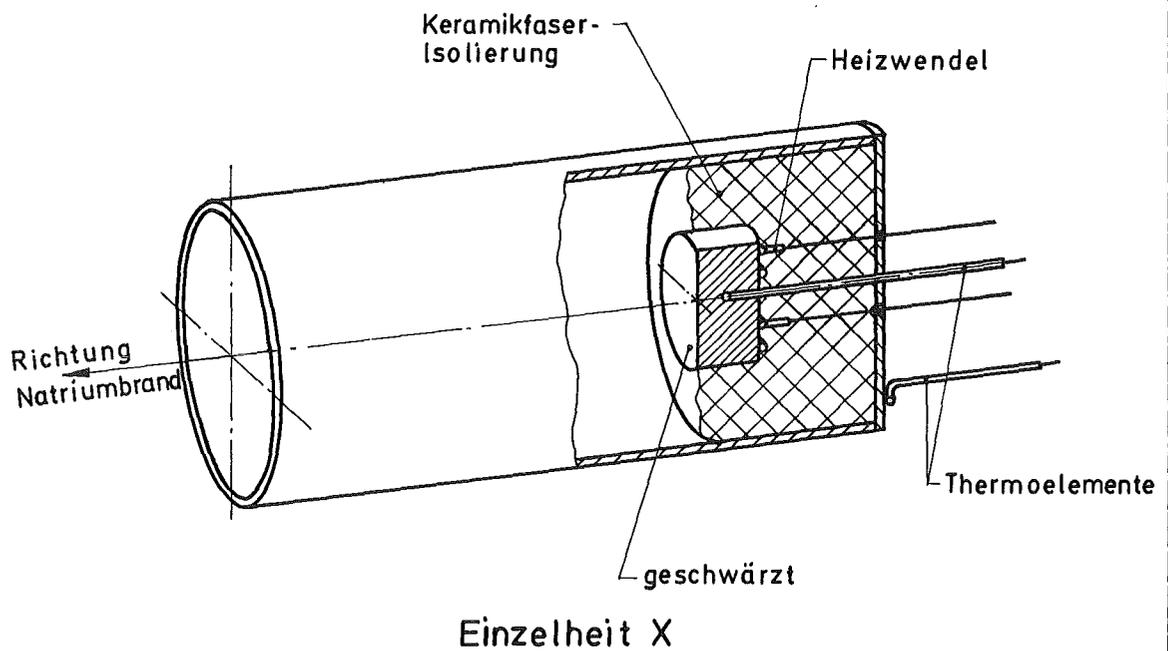
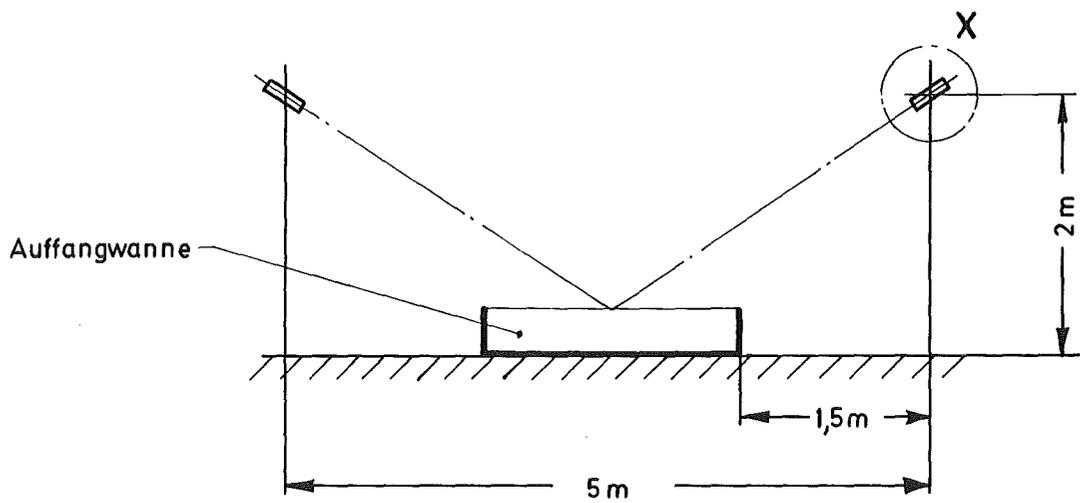


L = Lüfter
 D = Drosselklappe
 F = Filter
 7...10 = Temperaturdifferenz-Meßstellen-Nr.

GFK
IRE

Aerosol- und Temperaturdifferenzmessungen an der Abluftanlage

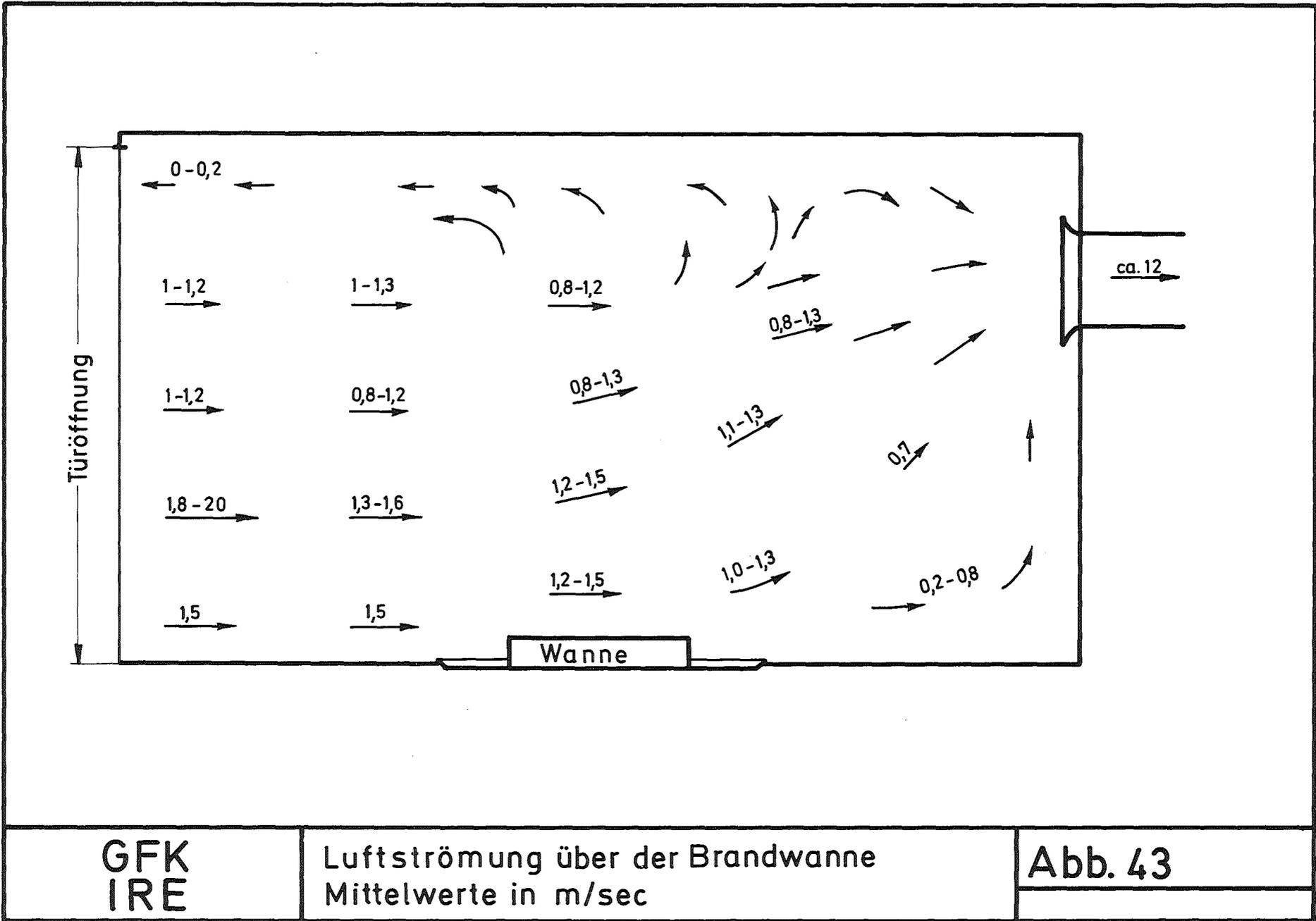
Abb. 41



GFK
IRE

Aufbau der Wärmestrahlungs-
messung

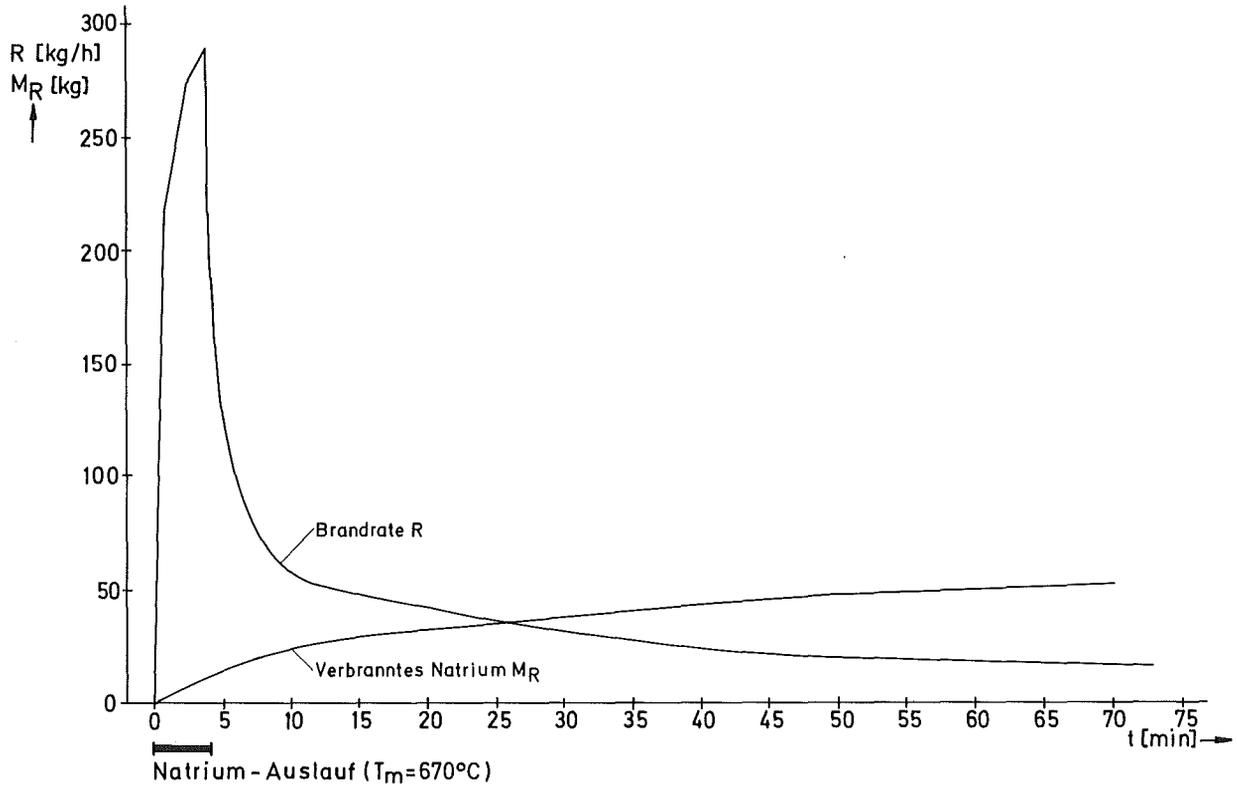
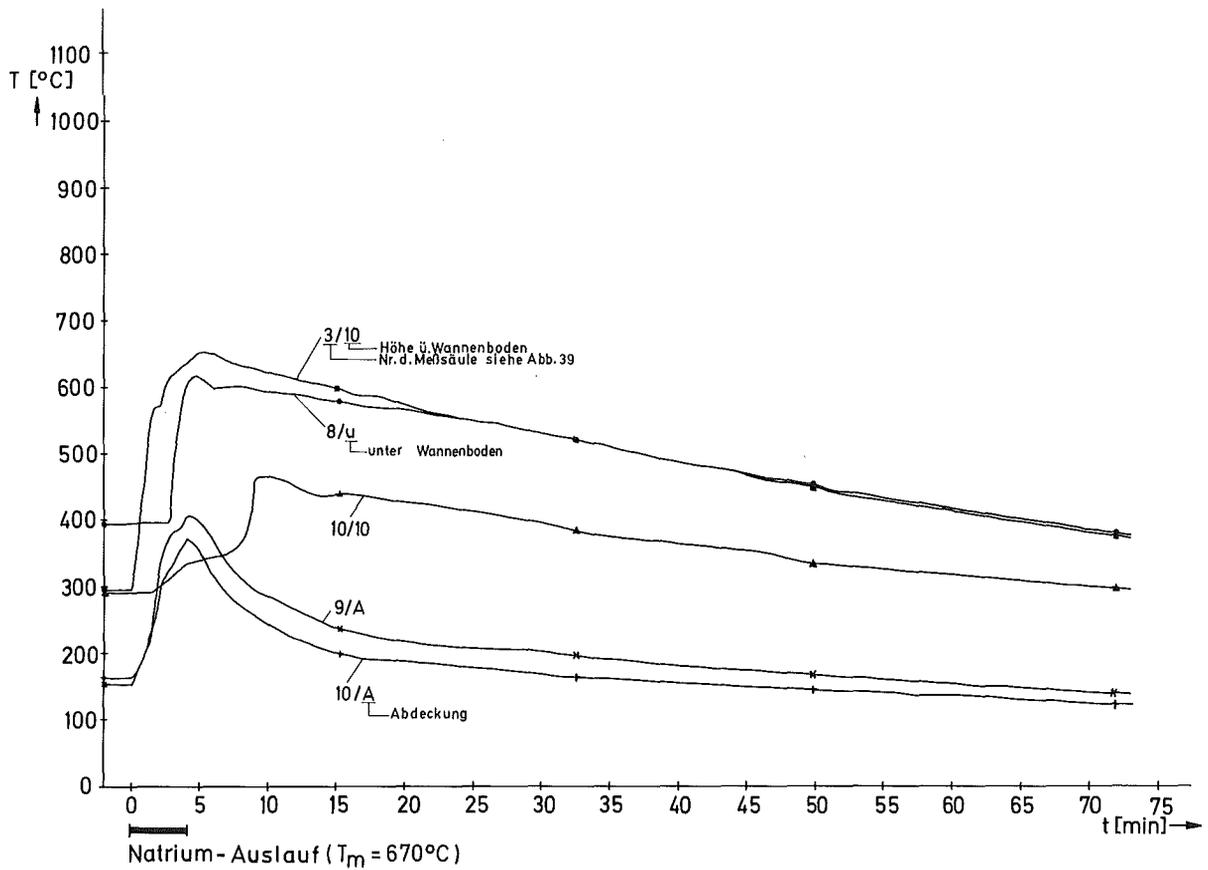
Abb. 42



GFK
IRE

Luftströmung über der Brandwanne
Mittelwerte in m/sec

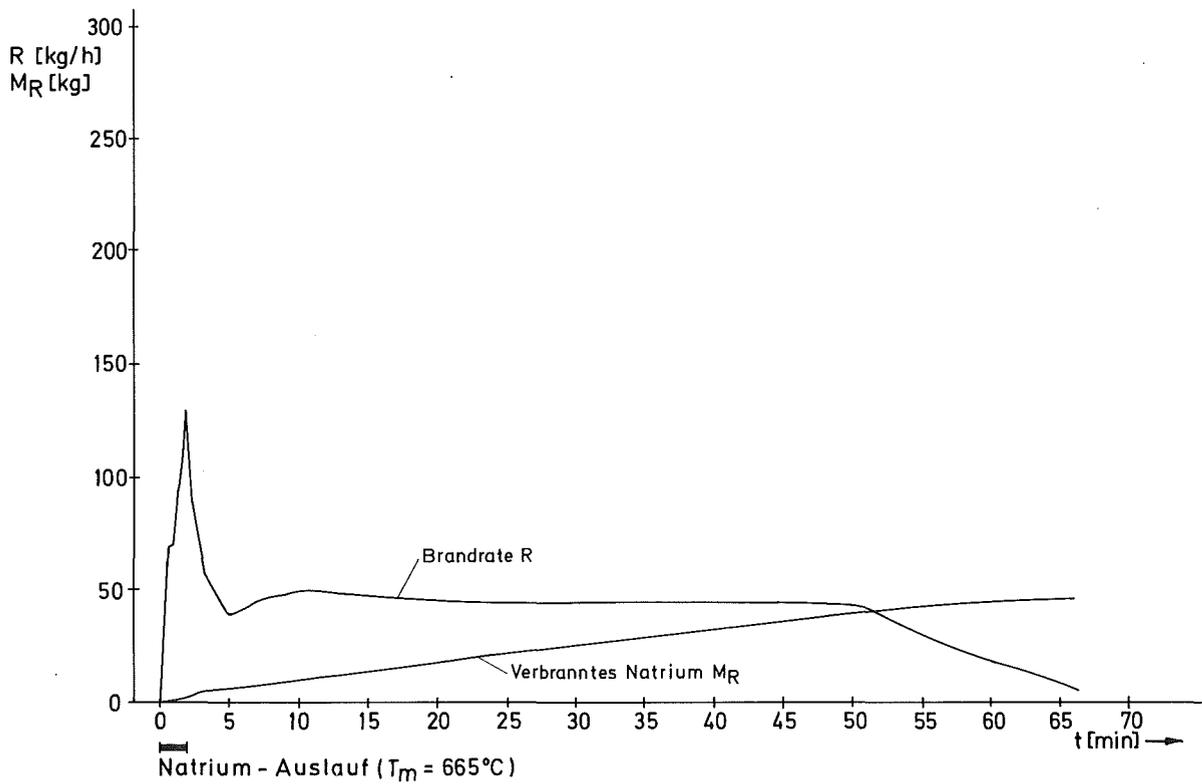
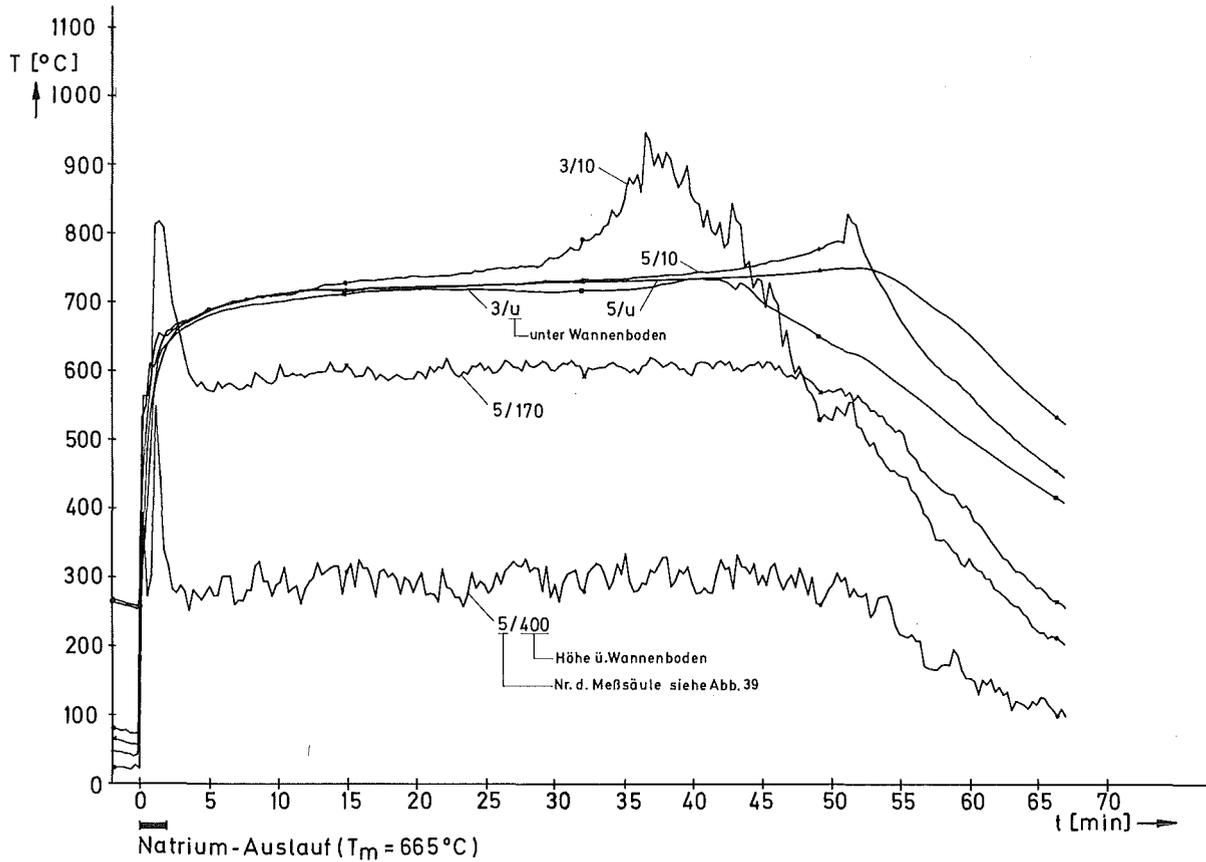
Abb. 43



GFK
IRE

Wanne m. Abdeckung $4,5\text{m}^2$; Vers. Nr. 23
Temperaturverlauf, Brandrate

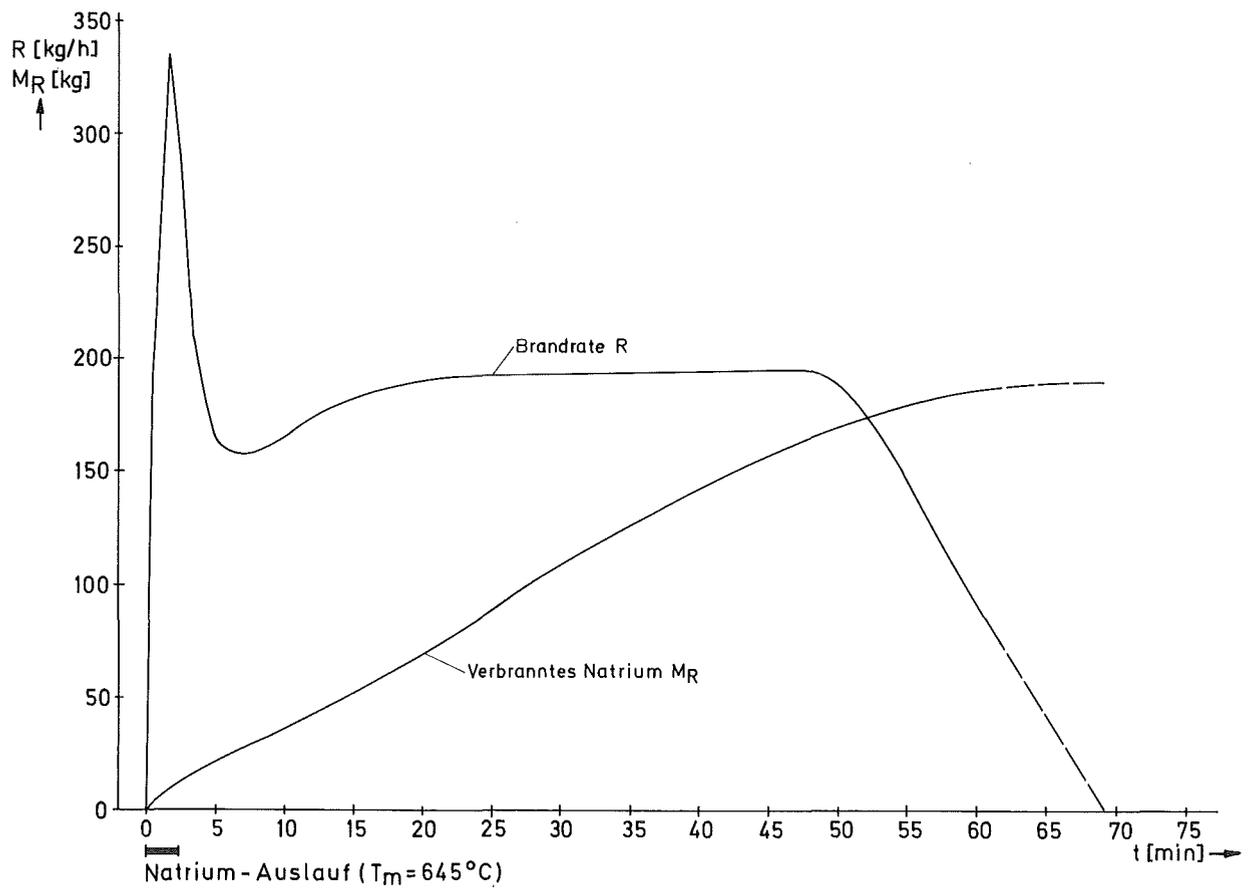
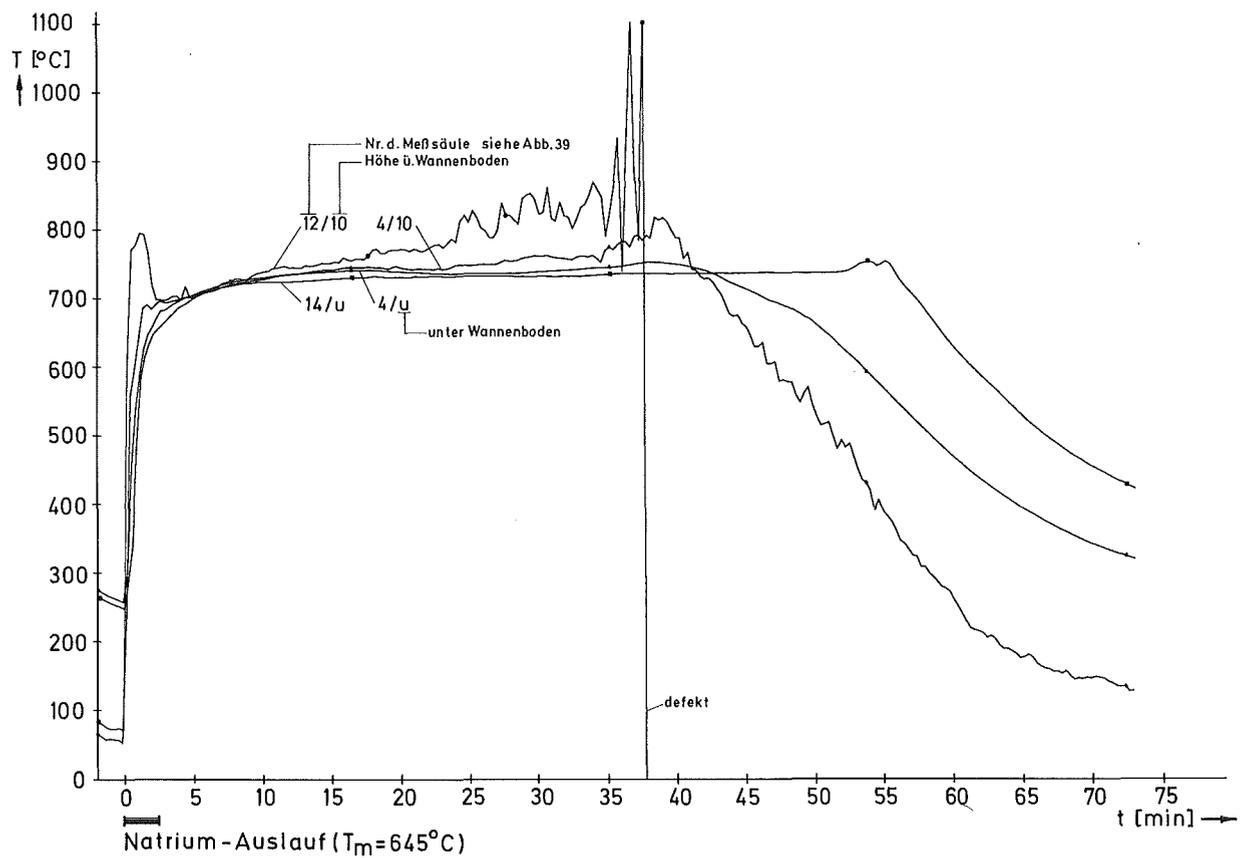
Abb. 44



GFK
IRE

Offene Wanne $1,1 \text{ m}^2$; Vers. Nr. 24
Temperaturverlauf, Brandrate

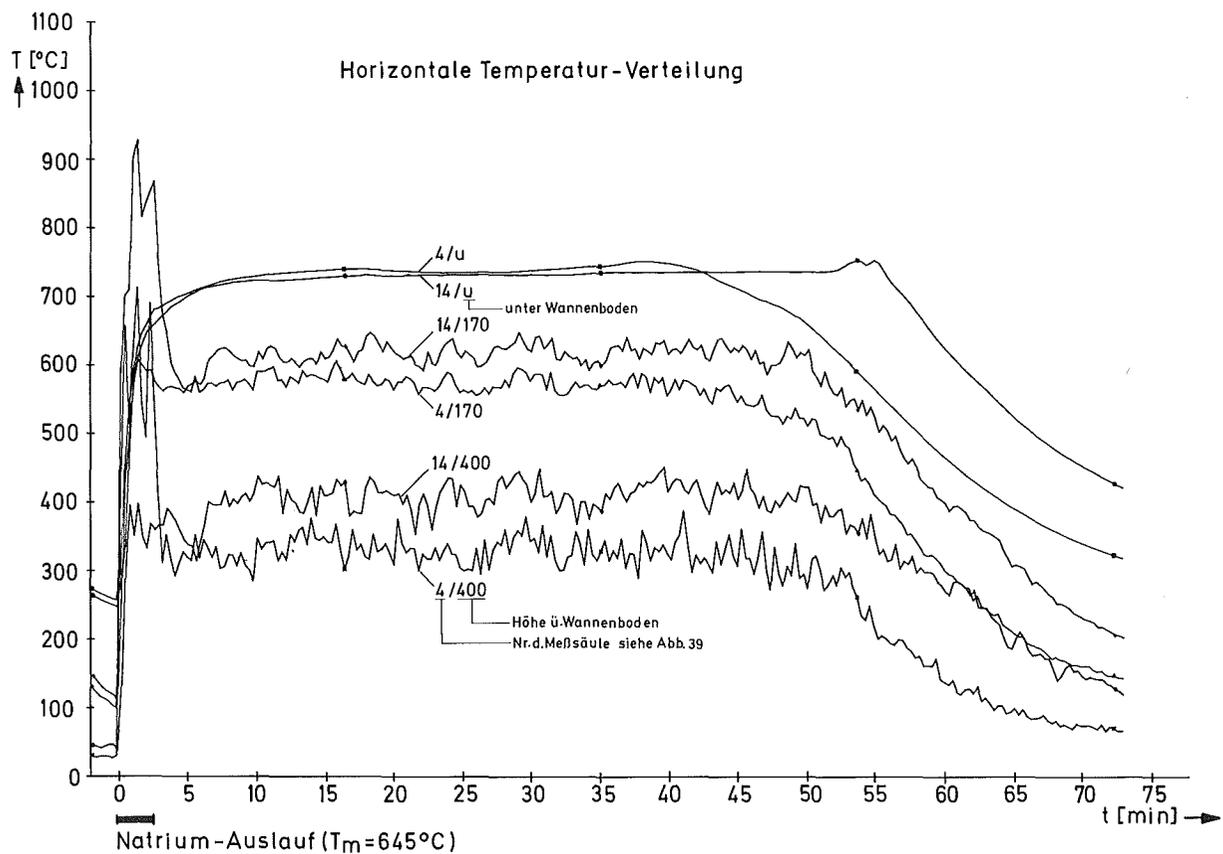
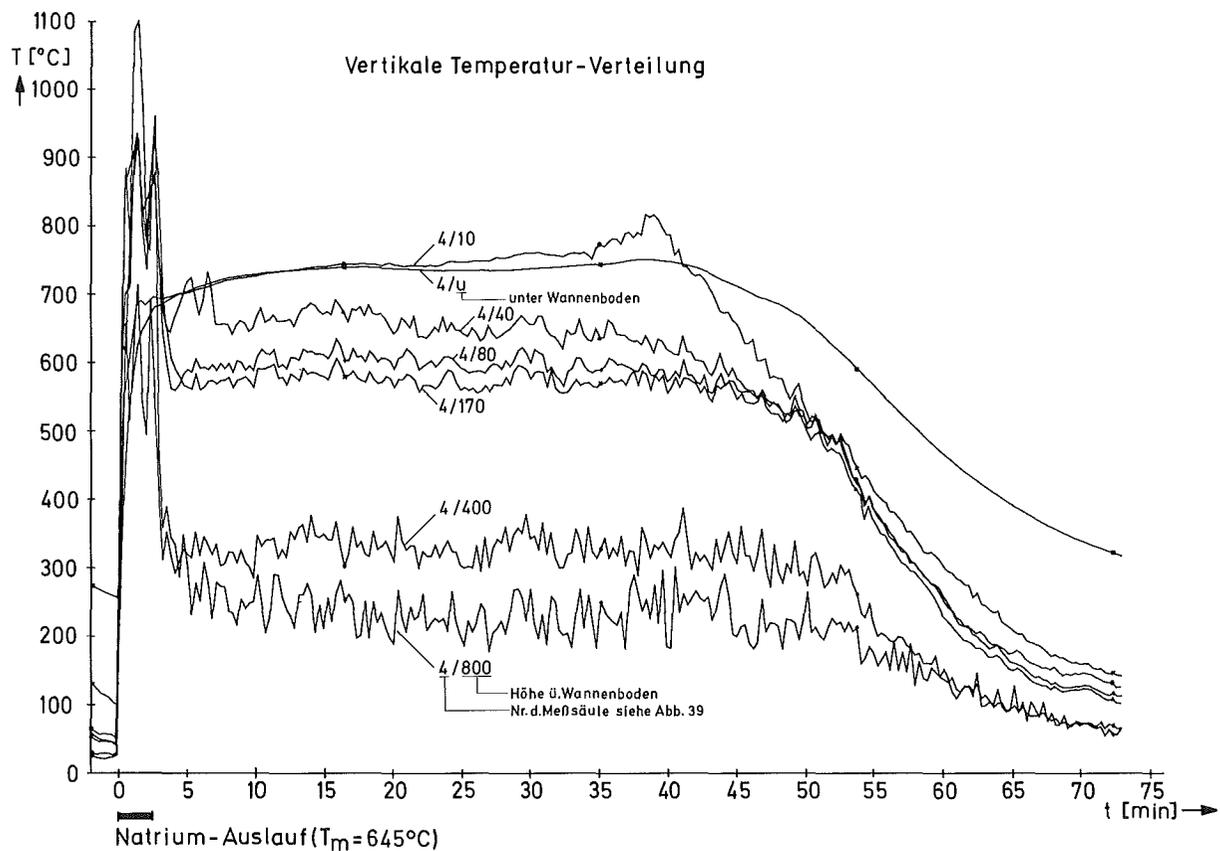
Abb. 45



GFK
IRE

Offene Wanne $4,5\text{m}^2$; Vers.Nr. 25
Temperaturverlauf, Brandrate

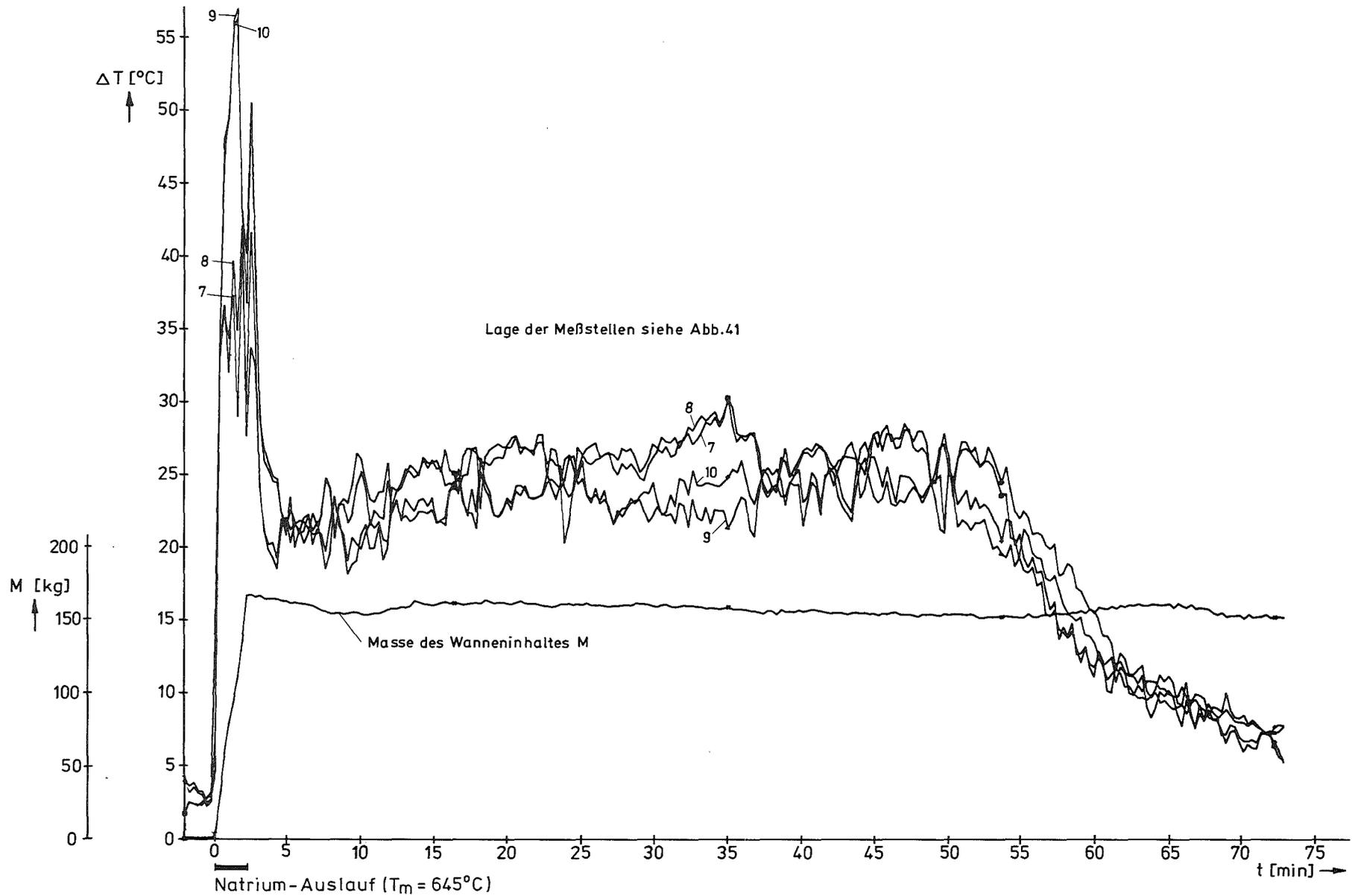
Abb. 46



**GFK
IRE**

**Offene Wanne 4,5m²; Vers. Nr. 25
Temperaturverlauf vertikal u. horiz.**

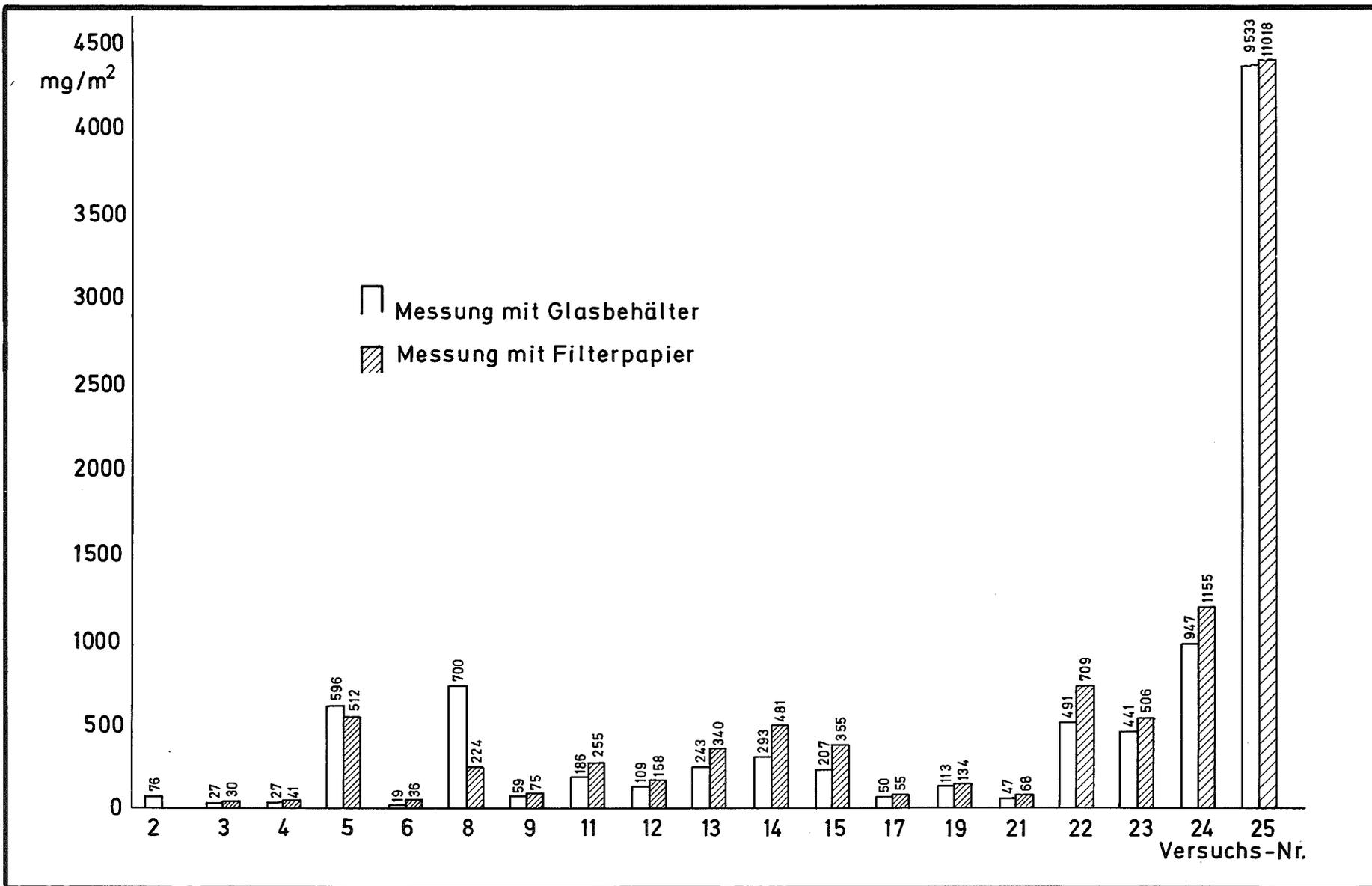
Abb. 47



GFK
IRE

Offene Wanne $4,5 \text{ m}^2$; Vers.Nr.25
Erwärmung d. Abluft, Wiegung d. Wanne

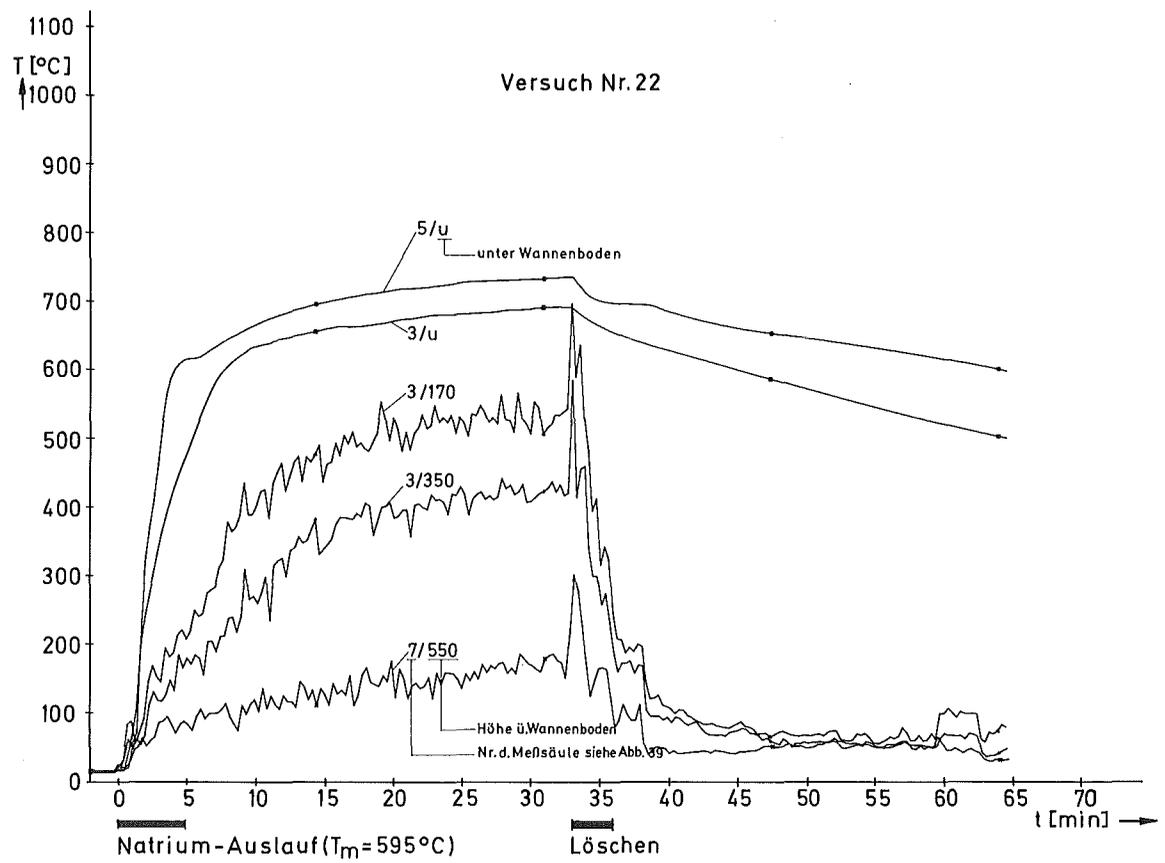
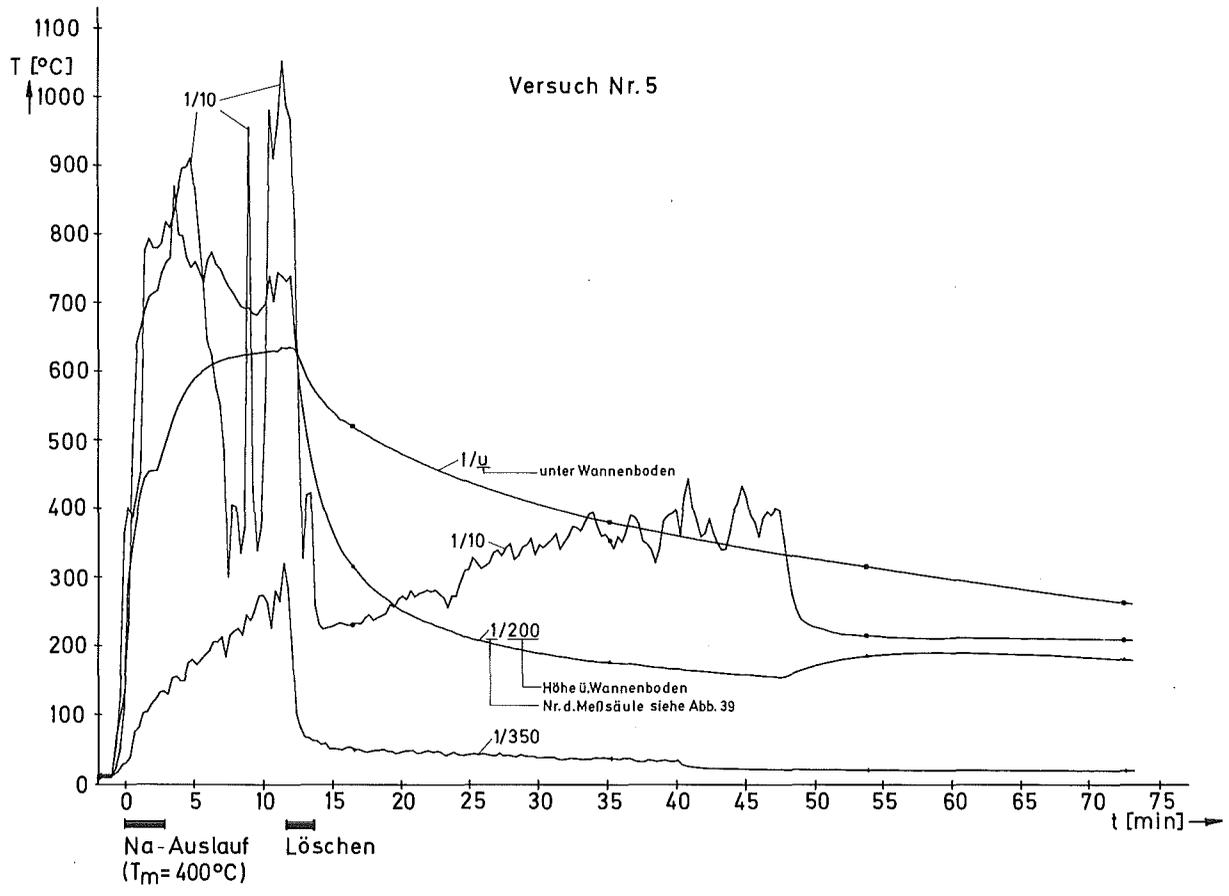
Abb. 48



GFK
IRE

Aerosol-Niederschlag im Versuchsraum
(Natriumanteil)

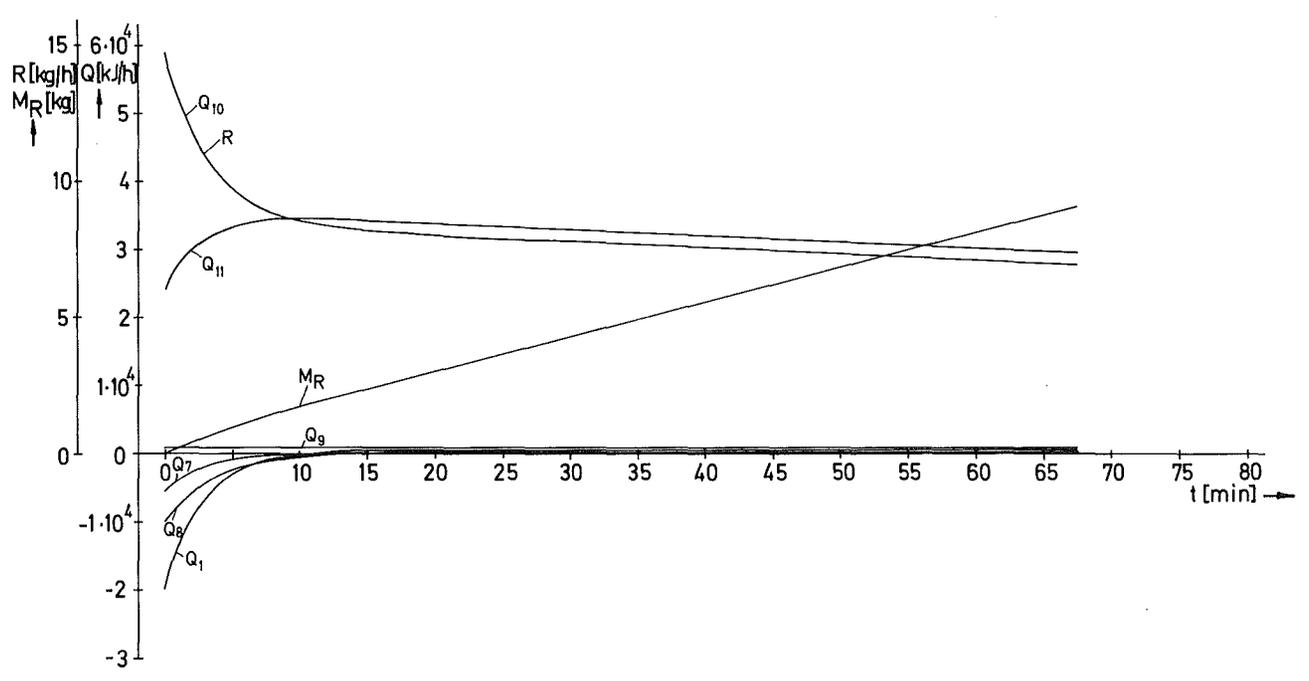
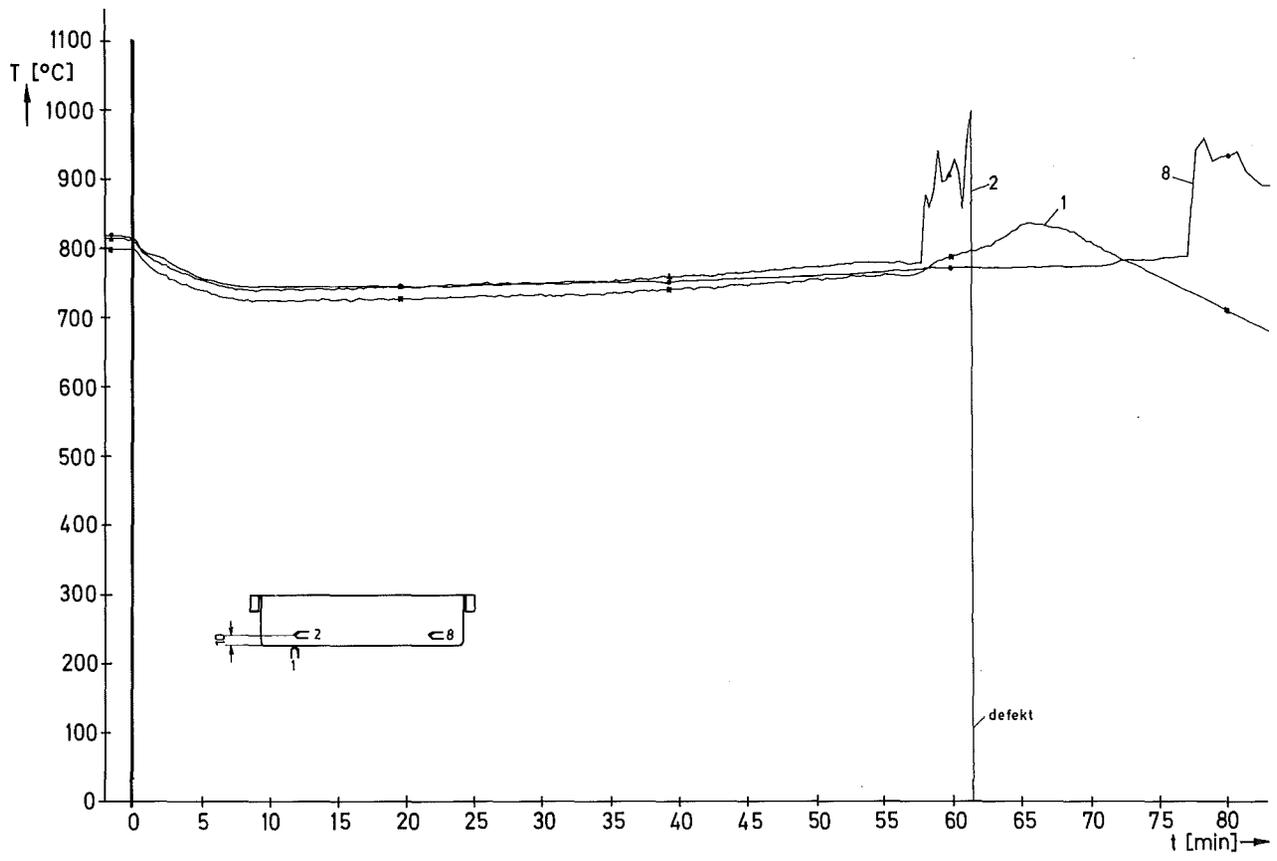
Abb. 49



**GFK
IRE**

**Offene Wanne 1,1 m²; Vers. Nr. 5 u. 22
Temperaturverläufe**

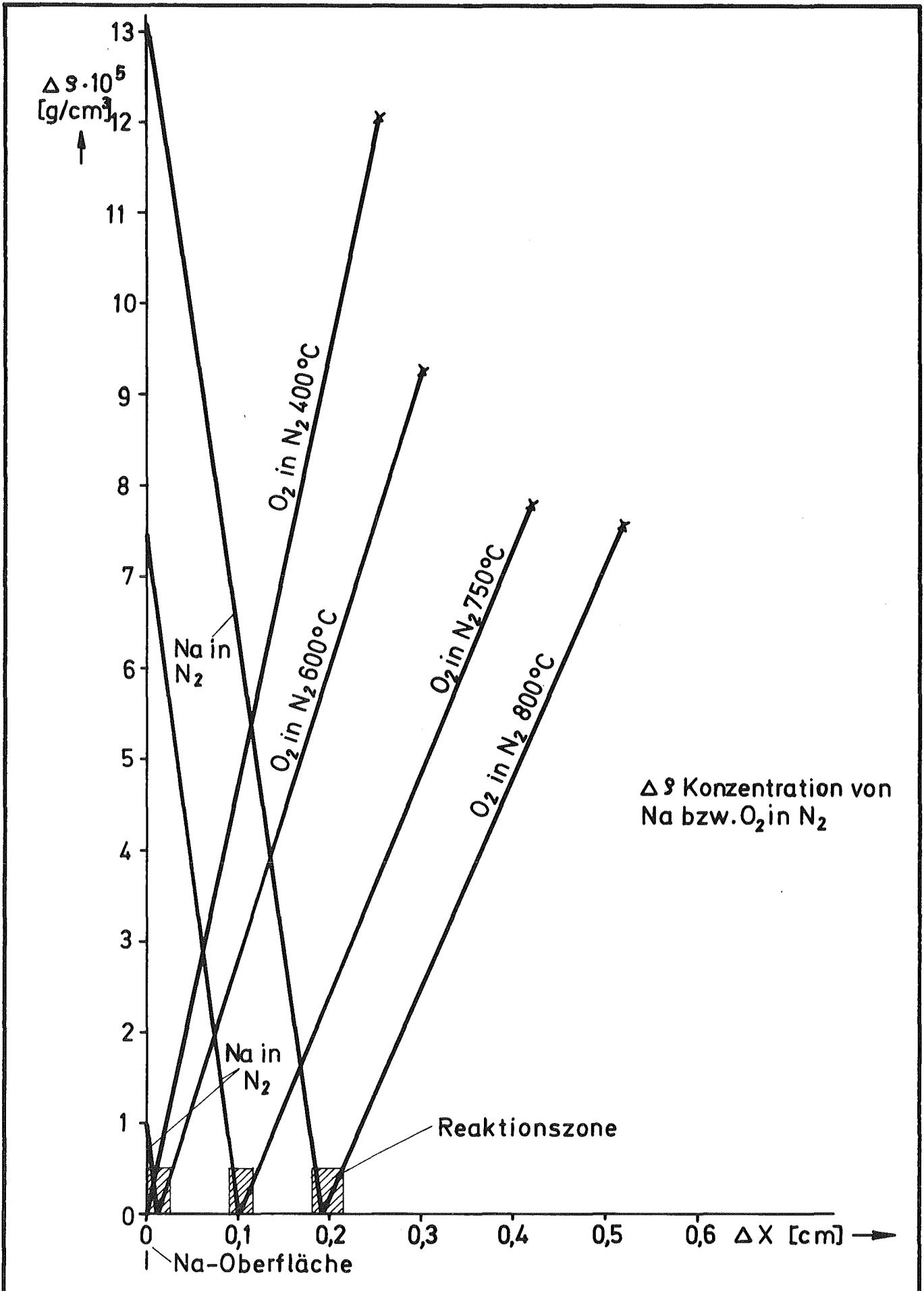
Abb. 50



GFK
IRE

Offene Wanne $0,18 \text{ m}^2$, Vers.Nr.27
Temperaturverlauf, Wärmebilanz
des Brandes

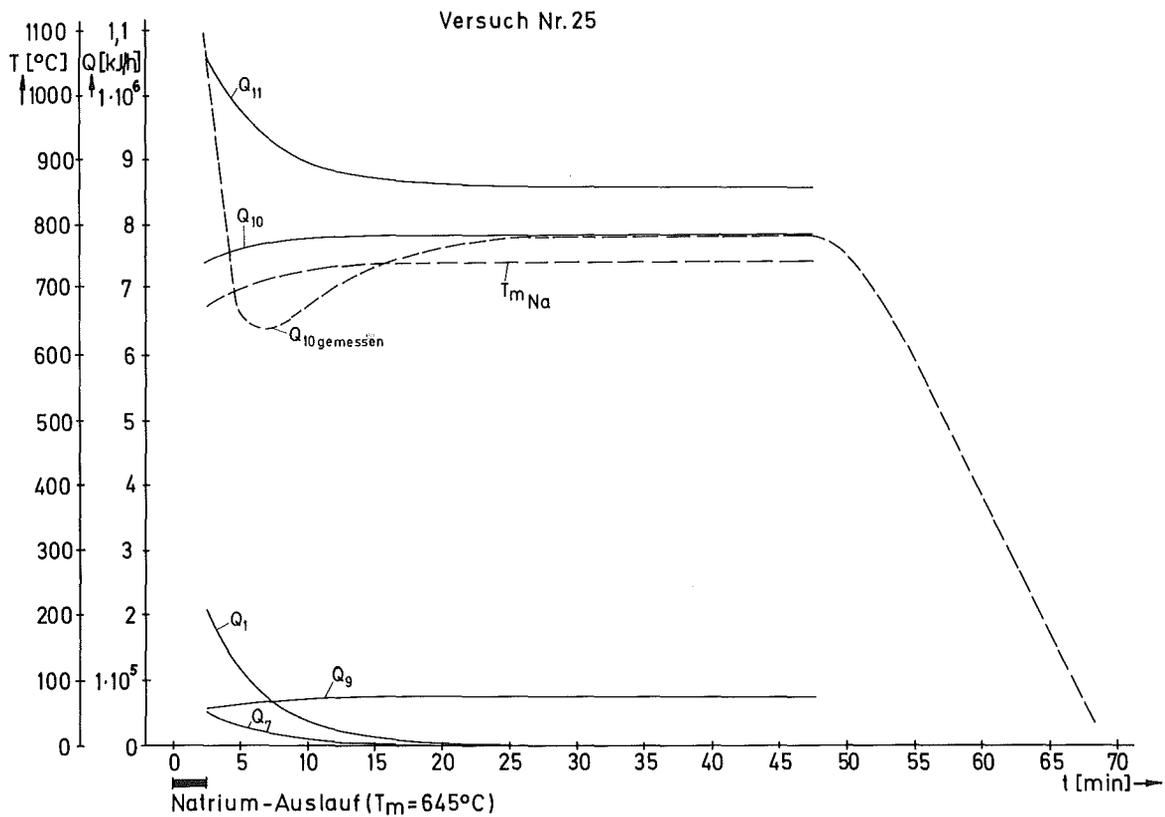
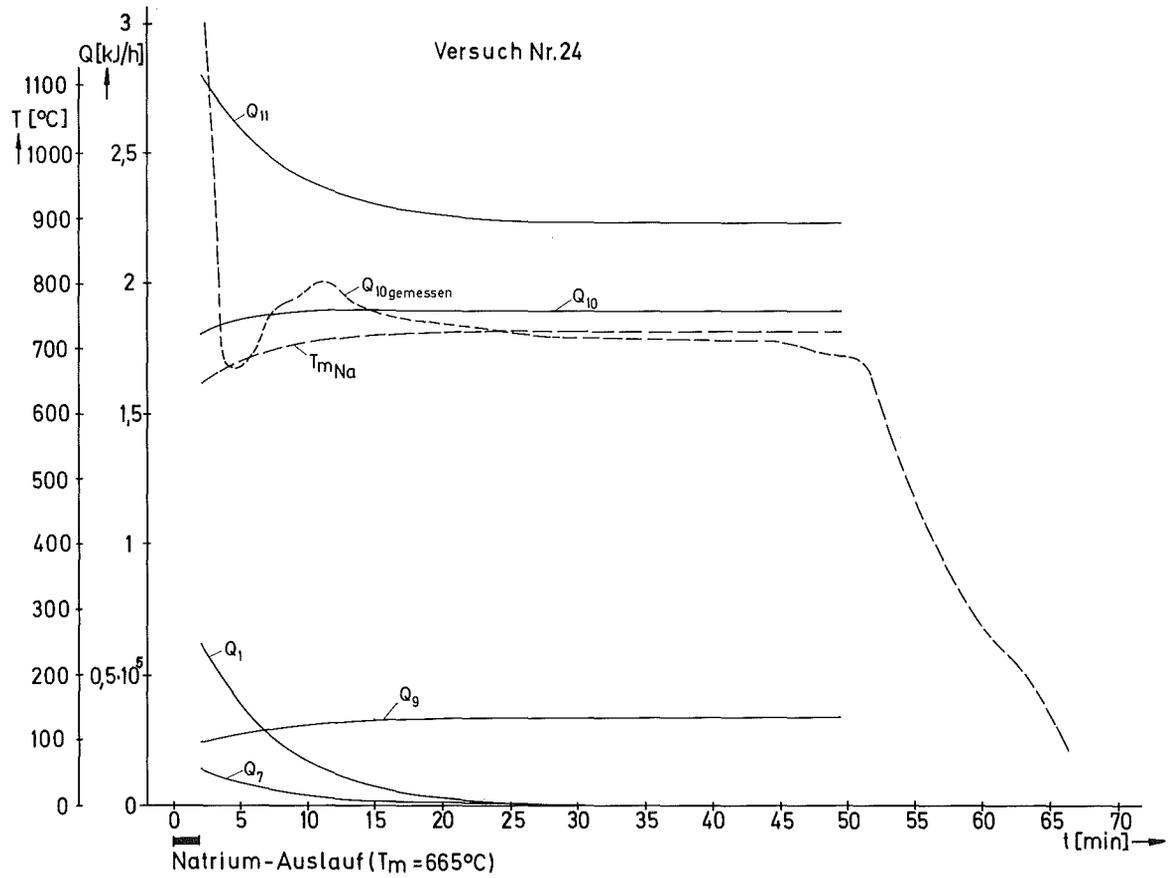
Abb.51



GFK
IRE

Diffusion von Na-Dampf u. Sauerstoff durch Stickstoff

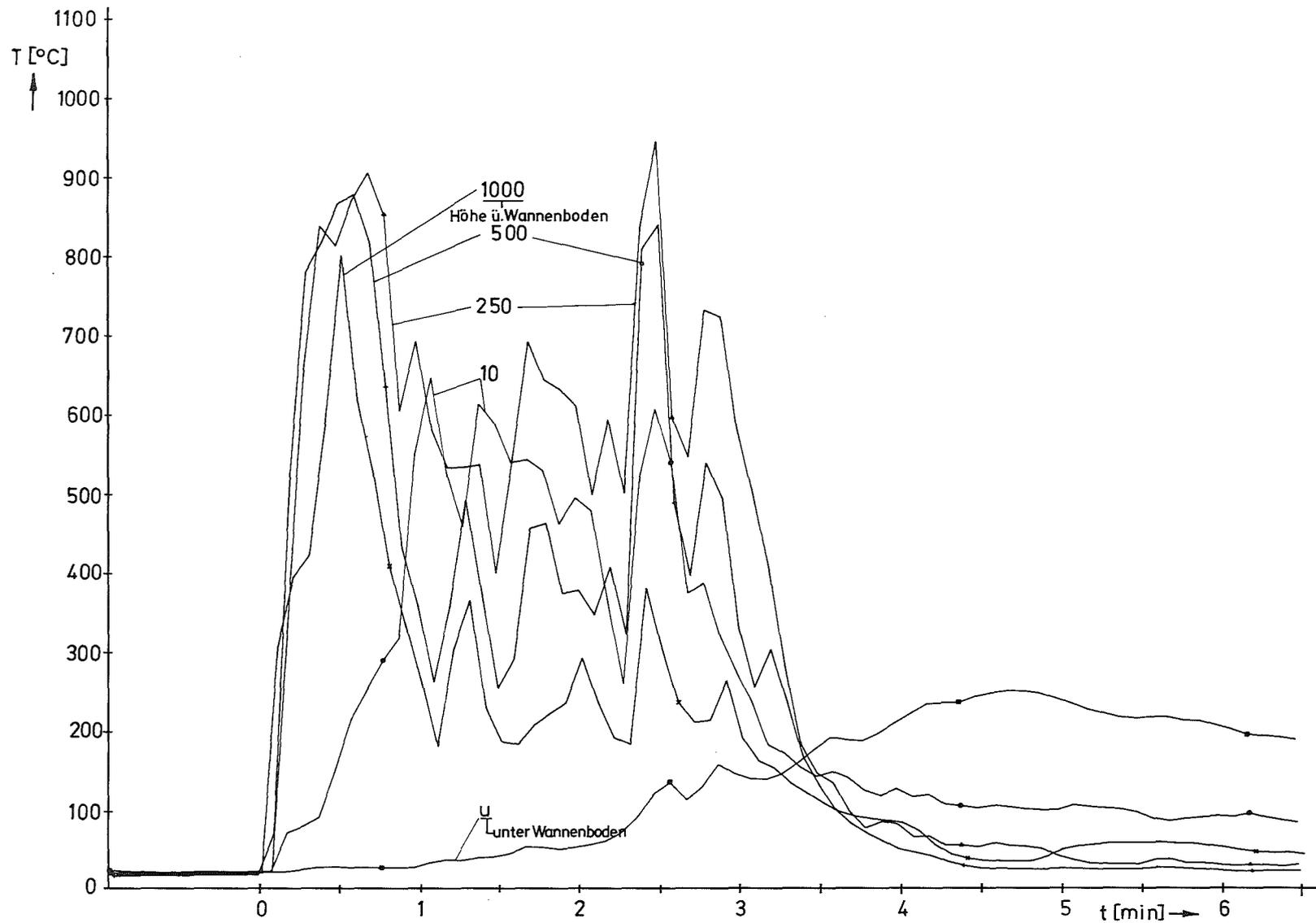
Abb. 52



**GFK
IRE**

Offene Wanne, Vers. Nr. 24 u. 25
Wärmebilanz des Brandes

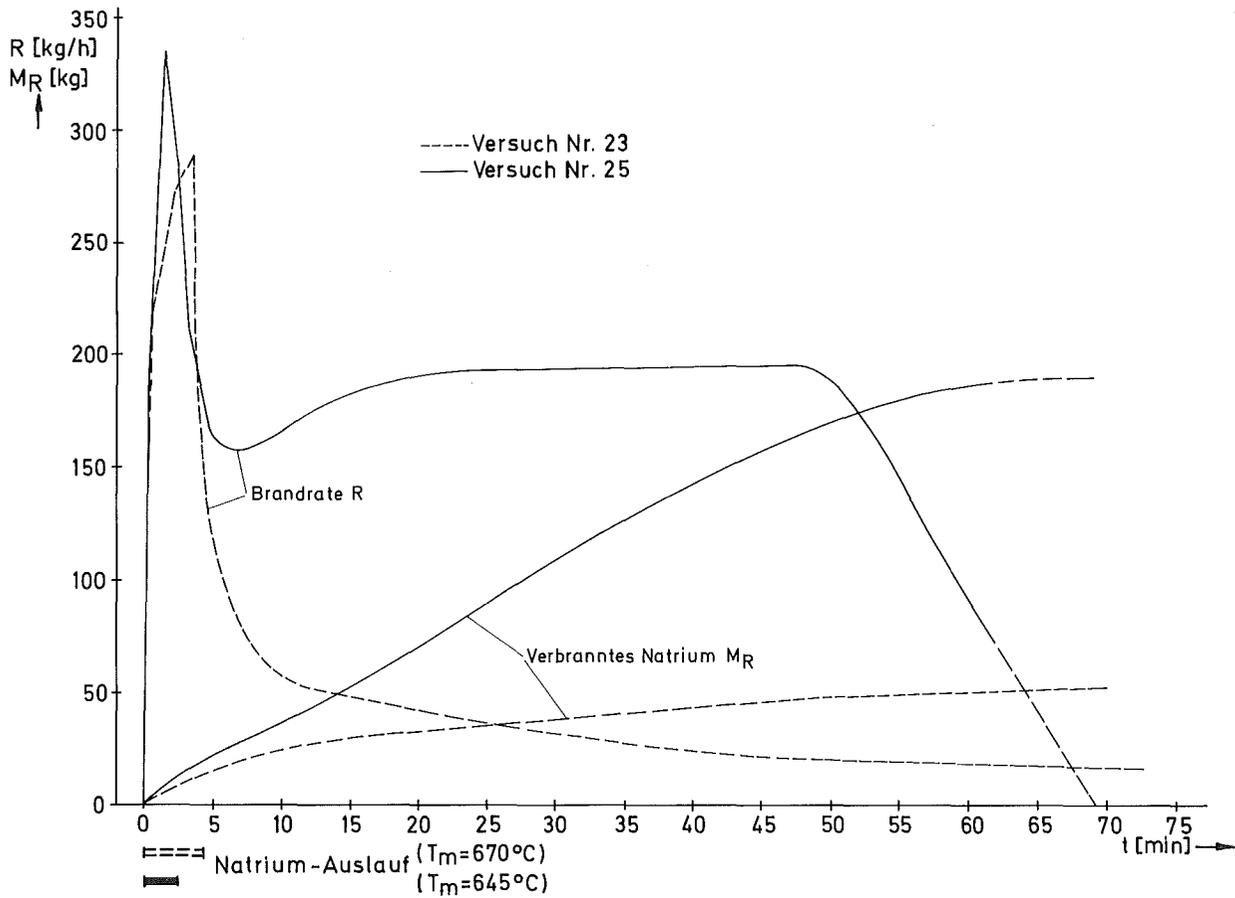
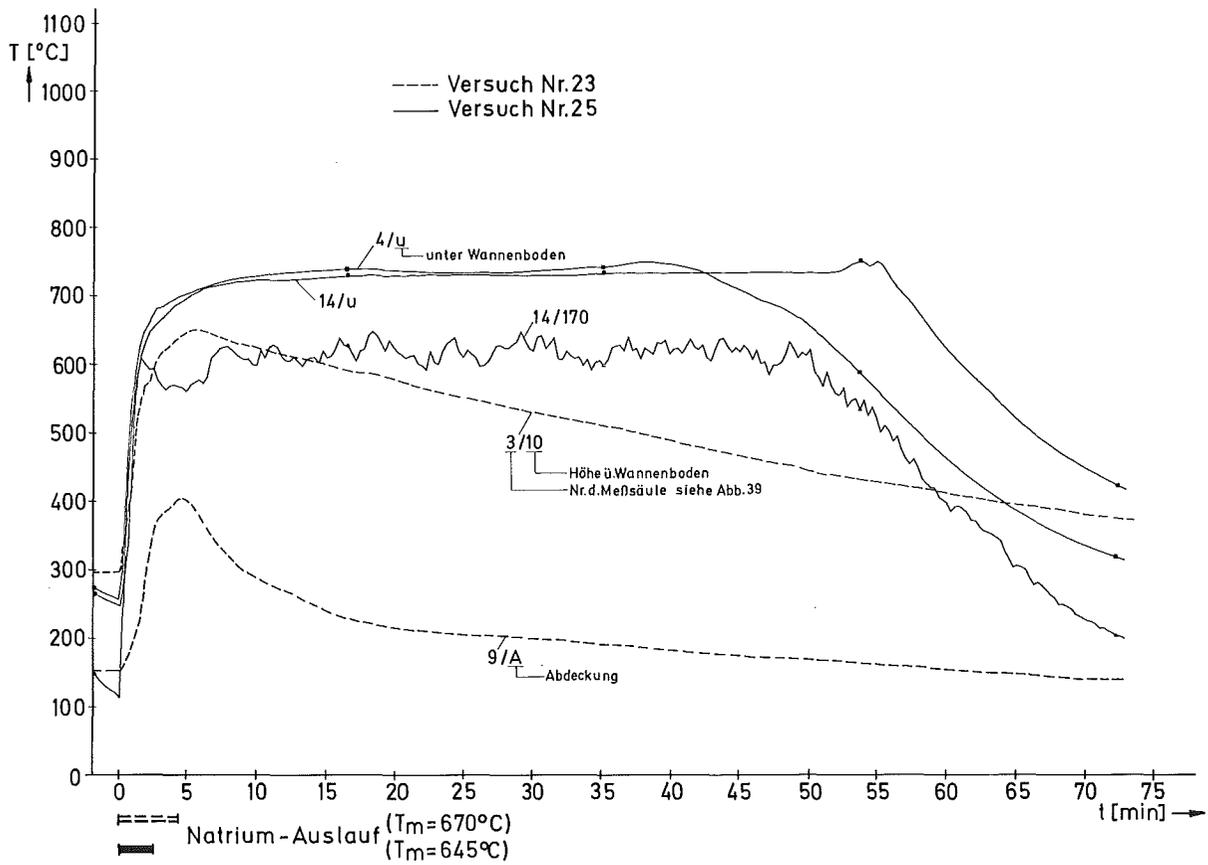
Abb. 53



GFK
IRE

Offene Wanne $0,8\text{ m}^2$; Benzinbrand
Temperaturverlauf

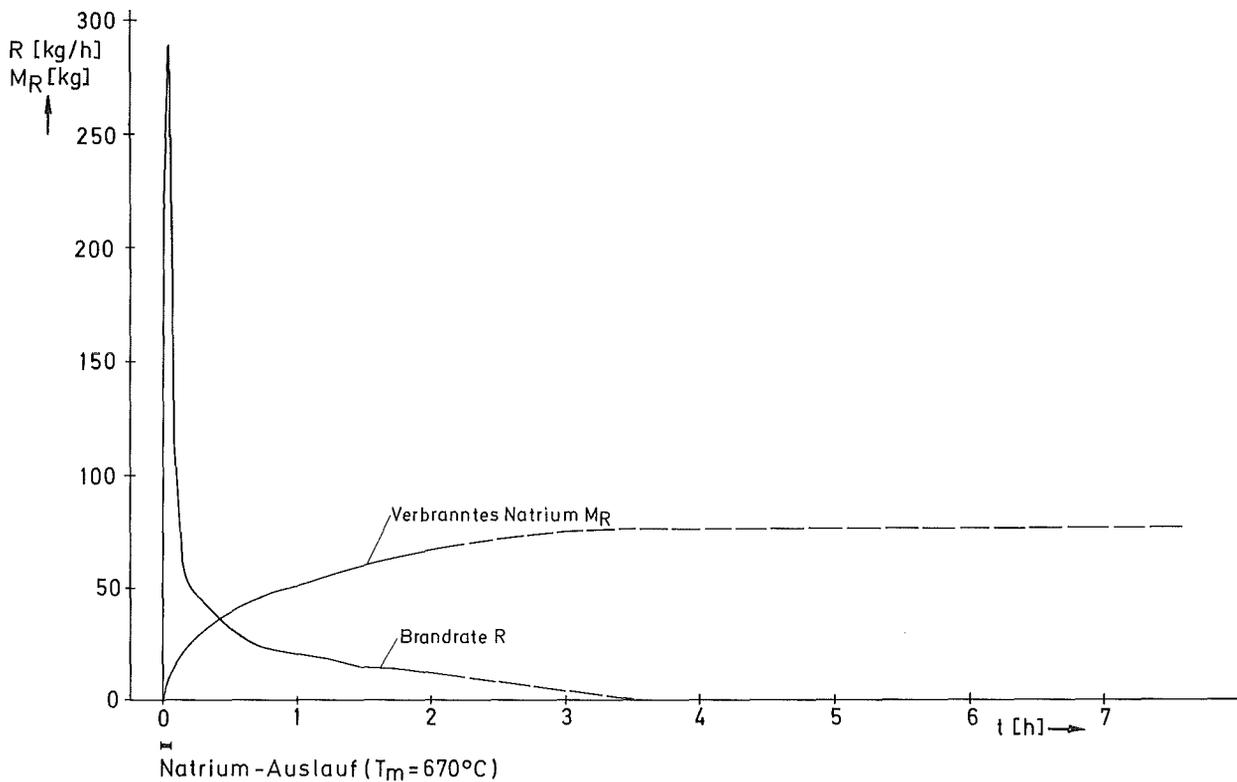
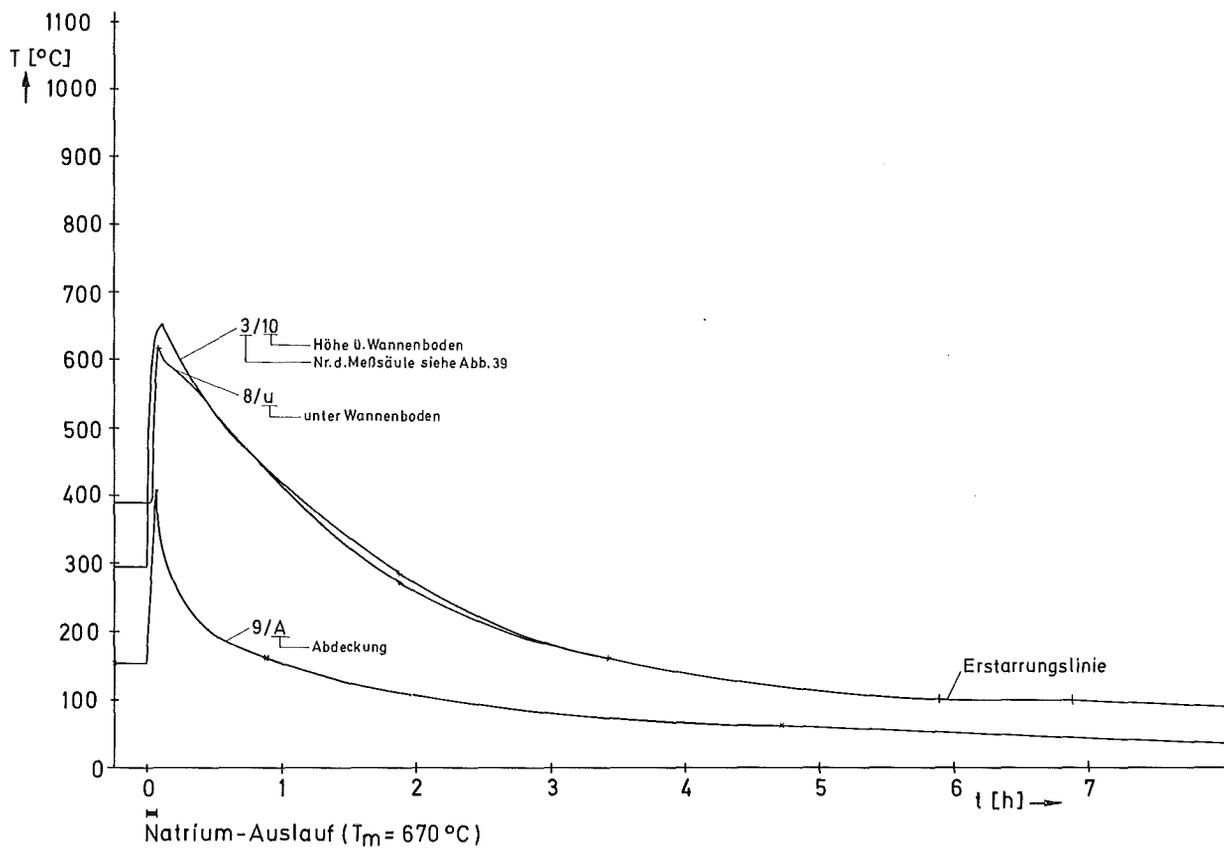
Abb. 54



GFK
IRE

Wanne $4,5\text{m}^2$ Vergleich Vers.Nr.23 u.25
Temperaturverläufe u. Reaktionsraten

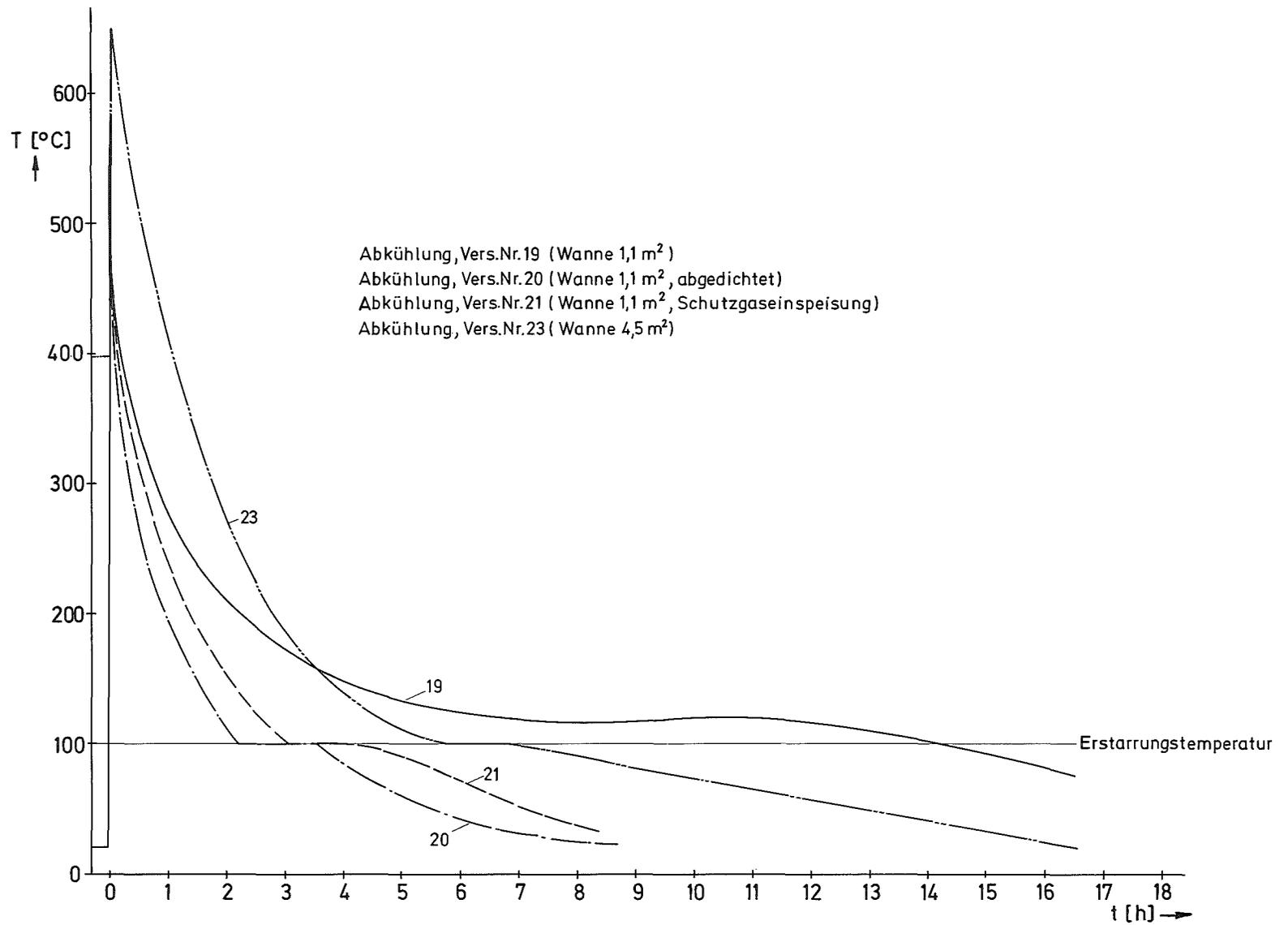
Abb. 55



GFK
IRE

Wanne m. Abdeckung $4,5\text{m}^2$; Vers. Nr. 23
Temperaturverlauf, Brandrate

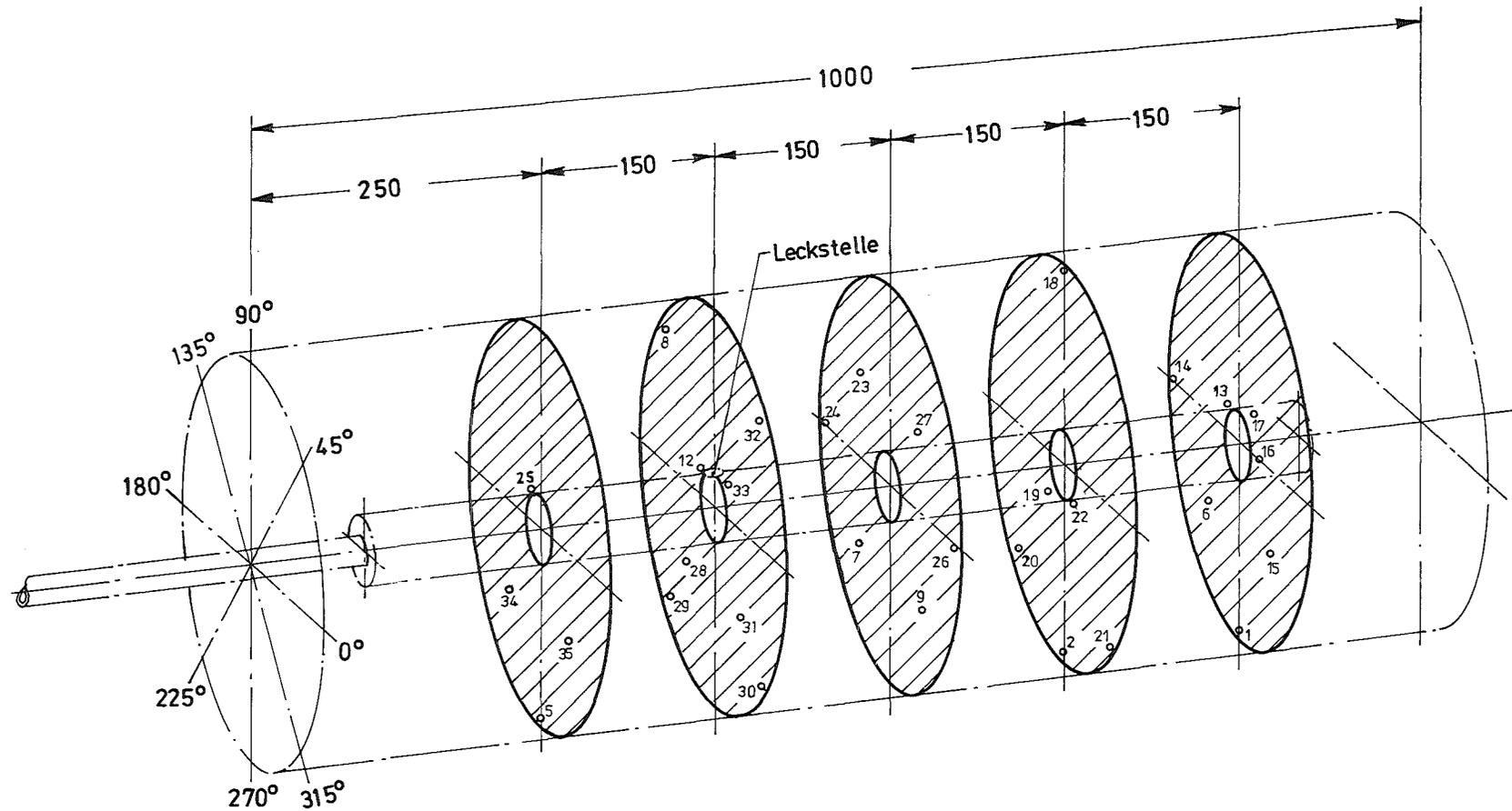
Abb. 56



GFK
IRE

Wanne mit Abdeckung; Vers. Nr. 19, 20, 21 u. 23
Temperaturverläufe

Abb. 57

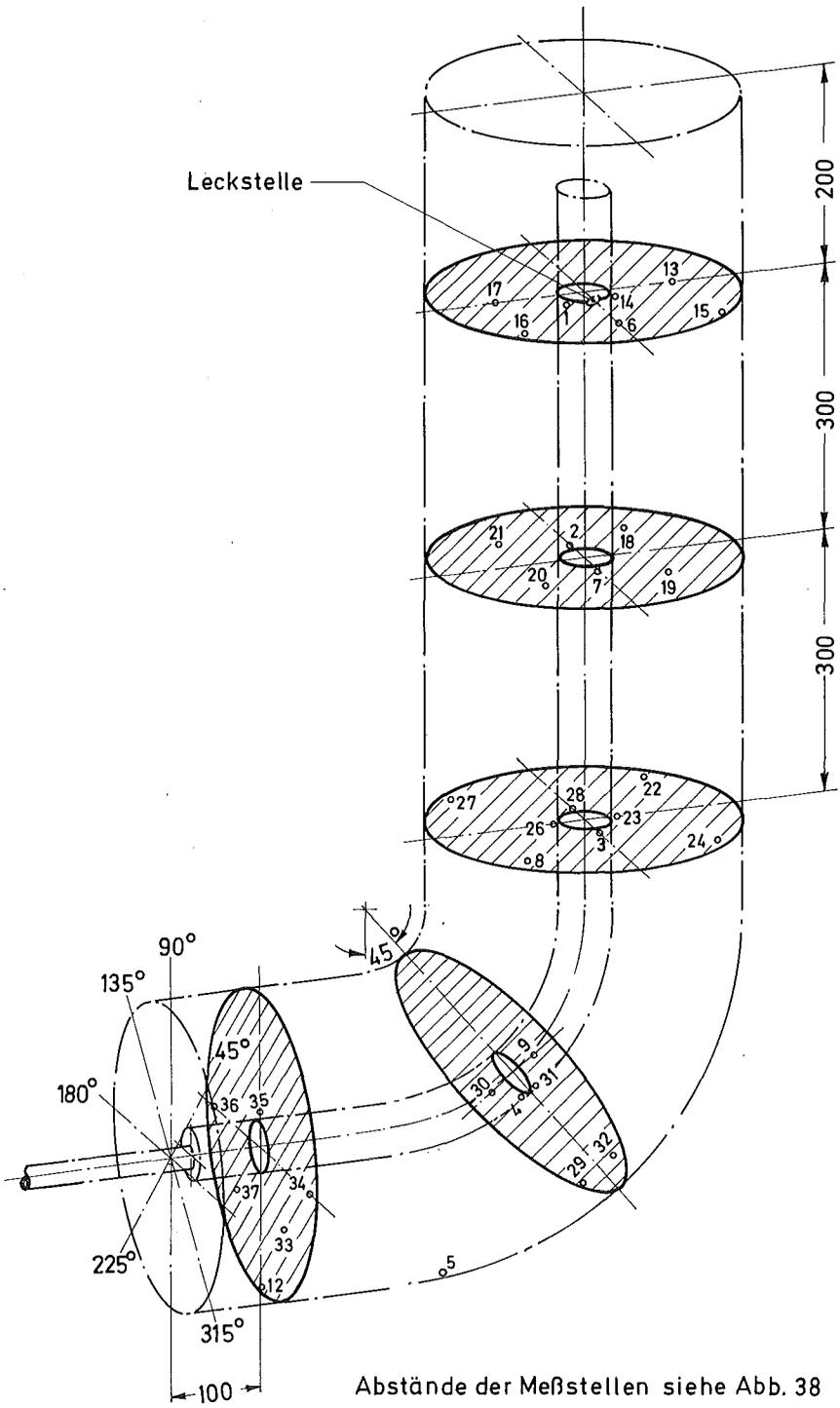


Abstände der Meßstellen siehe Abb. 38

GFK
IRE

Horizontale Rohrleitung
Lage der Meßstellen

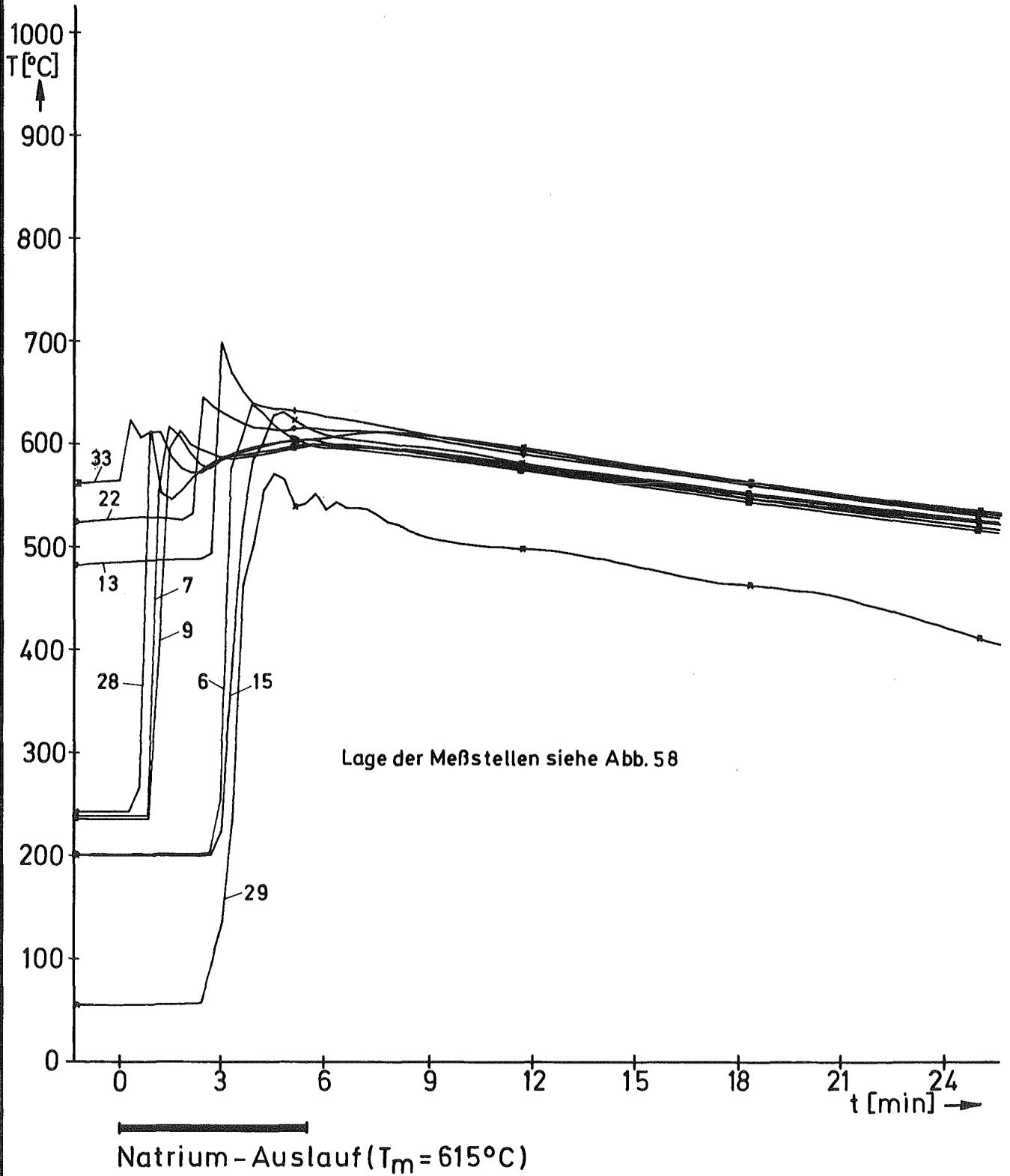
Abb.58



GFK
IRE

Vertikale Rohrleitung
Lage der Meßstellen

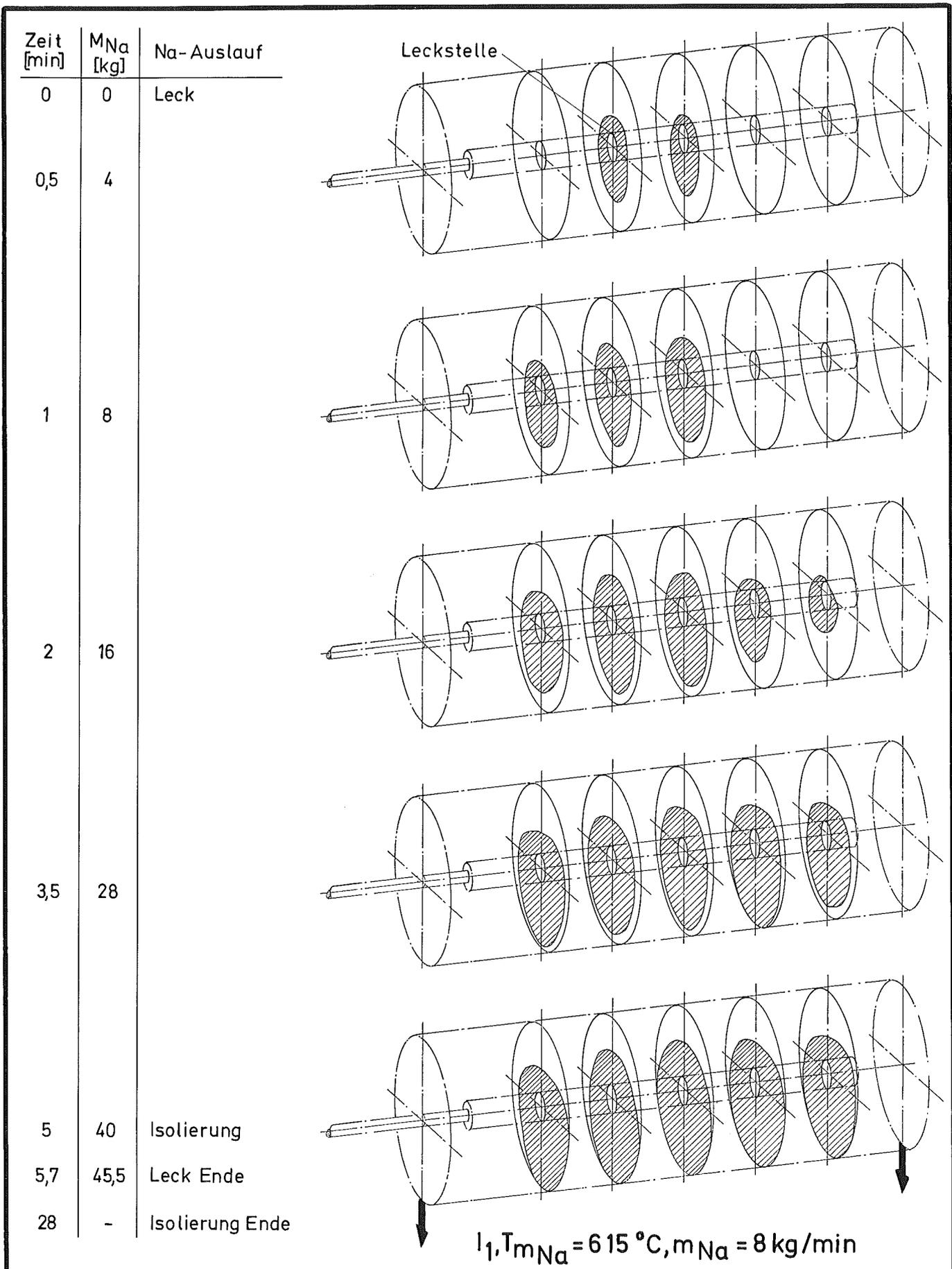
Abb. 59



GFK
IRE

Horizontale Rohrleitung; Vers.Nr.12
Temperaturverlauf

Abb. 60

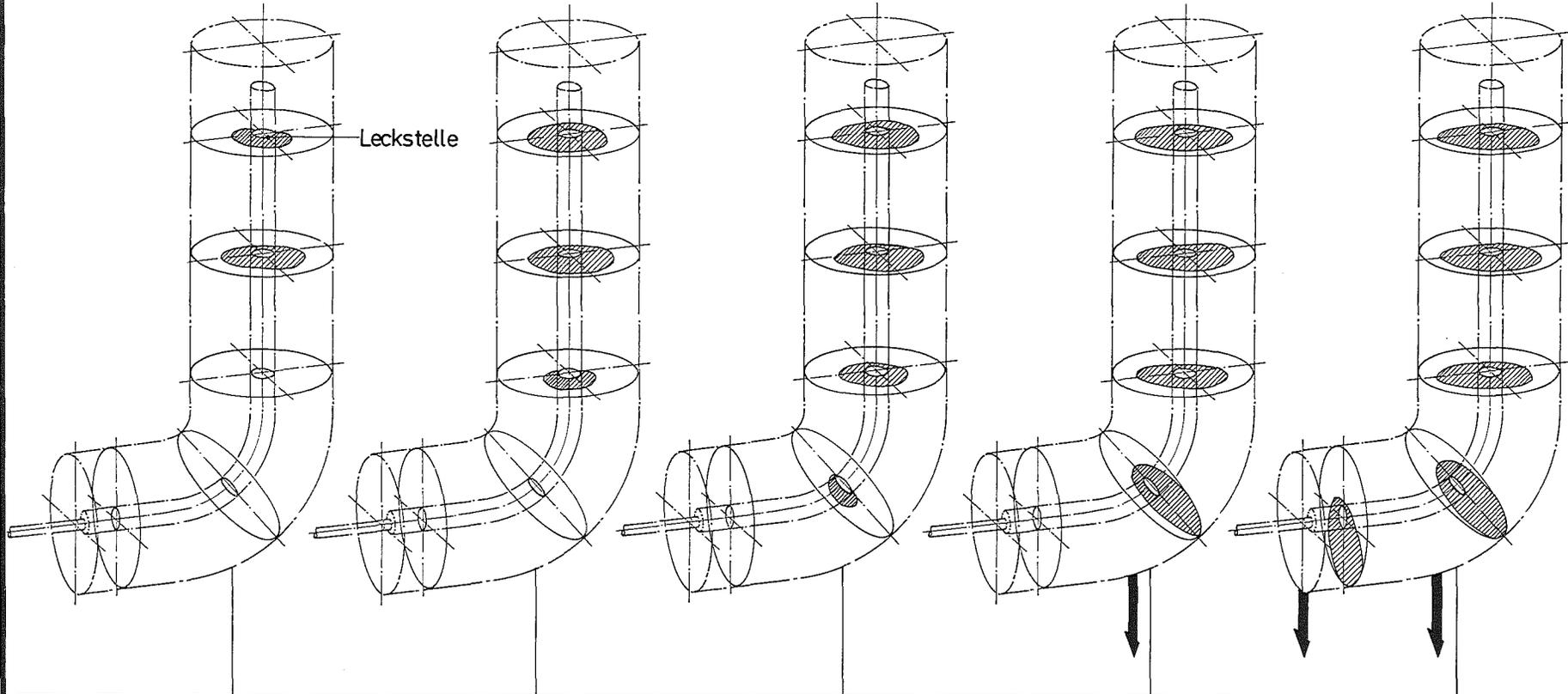


**GFK
IRE**

Horizontale Rohrleitung, Vers.Nr.12
Ausbreitung des Natriums

Abb. 61

$I_1, T_{mNa} = 580^\circ C, m_{Na} = 8 \text{ kg/min}$

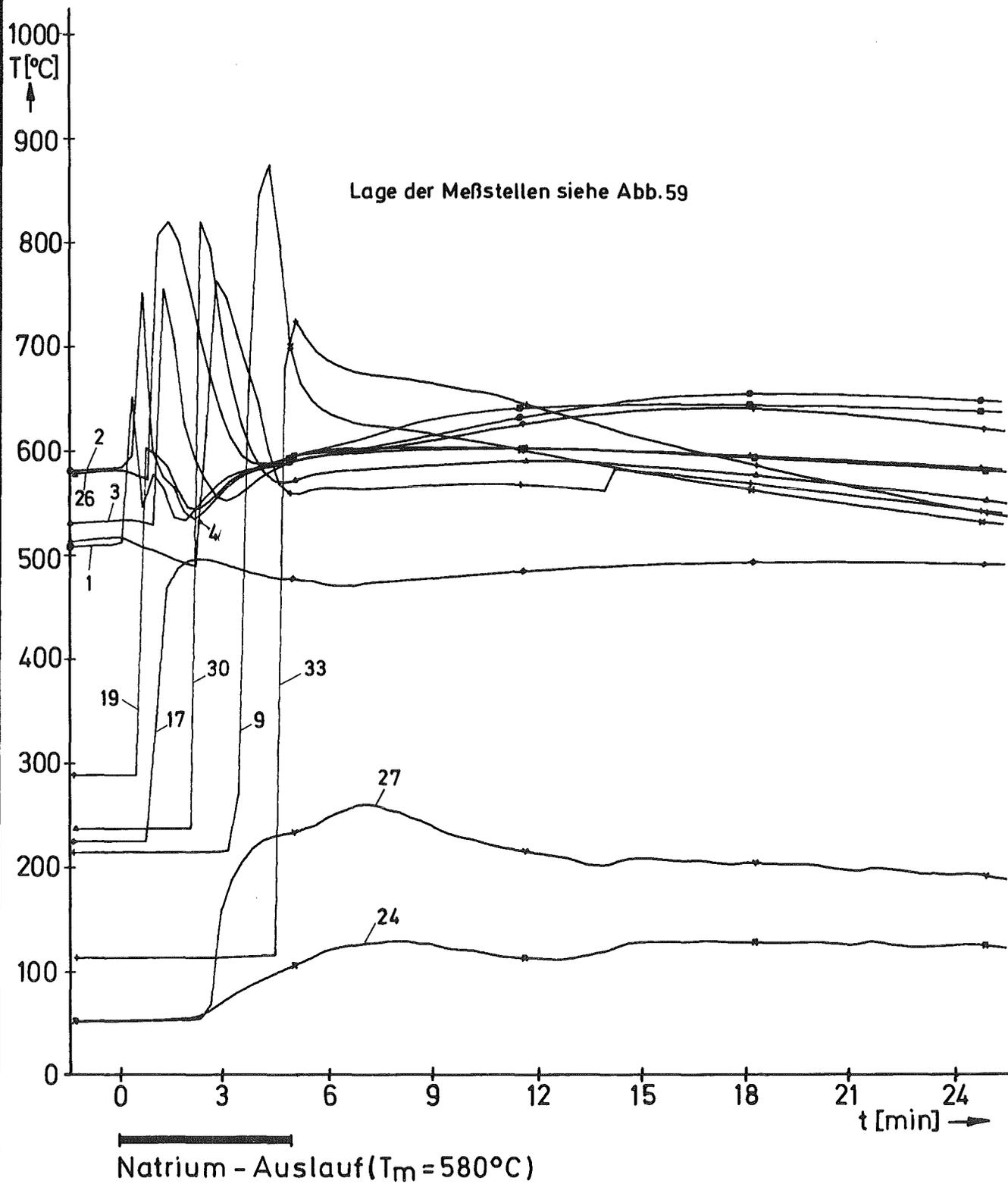


Zeit [min]	0	0,5	1	2	4	5	16
M_{Na} [kg]	0	4	8	16	32	40,5	-
Na - Auslauf	Leck		Isolierung			Leck Ende	Isolierung Ende

GFK
IRE

Vertikale Rohrleitung; Versuch Nr.11
Ausbreitung des Natriums

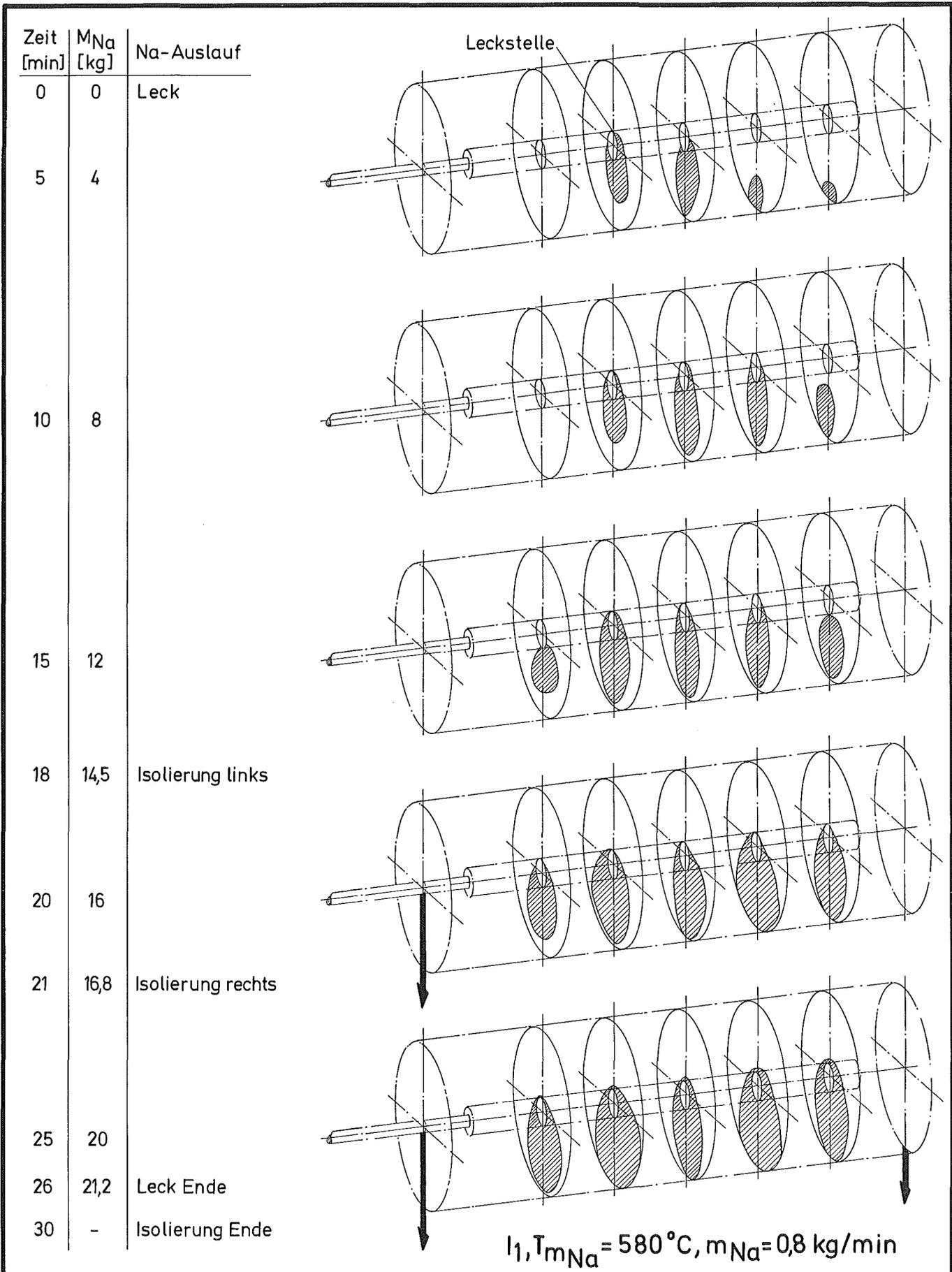
Abb. 62



**GFK
IRE**

Vertikale Rohrleitung; Vers. Nr. 11
Temperaturverlauf

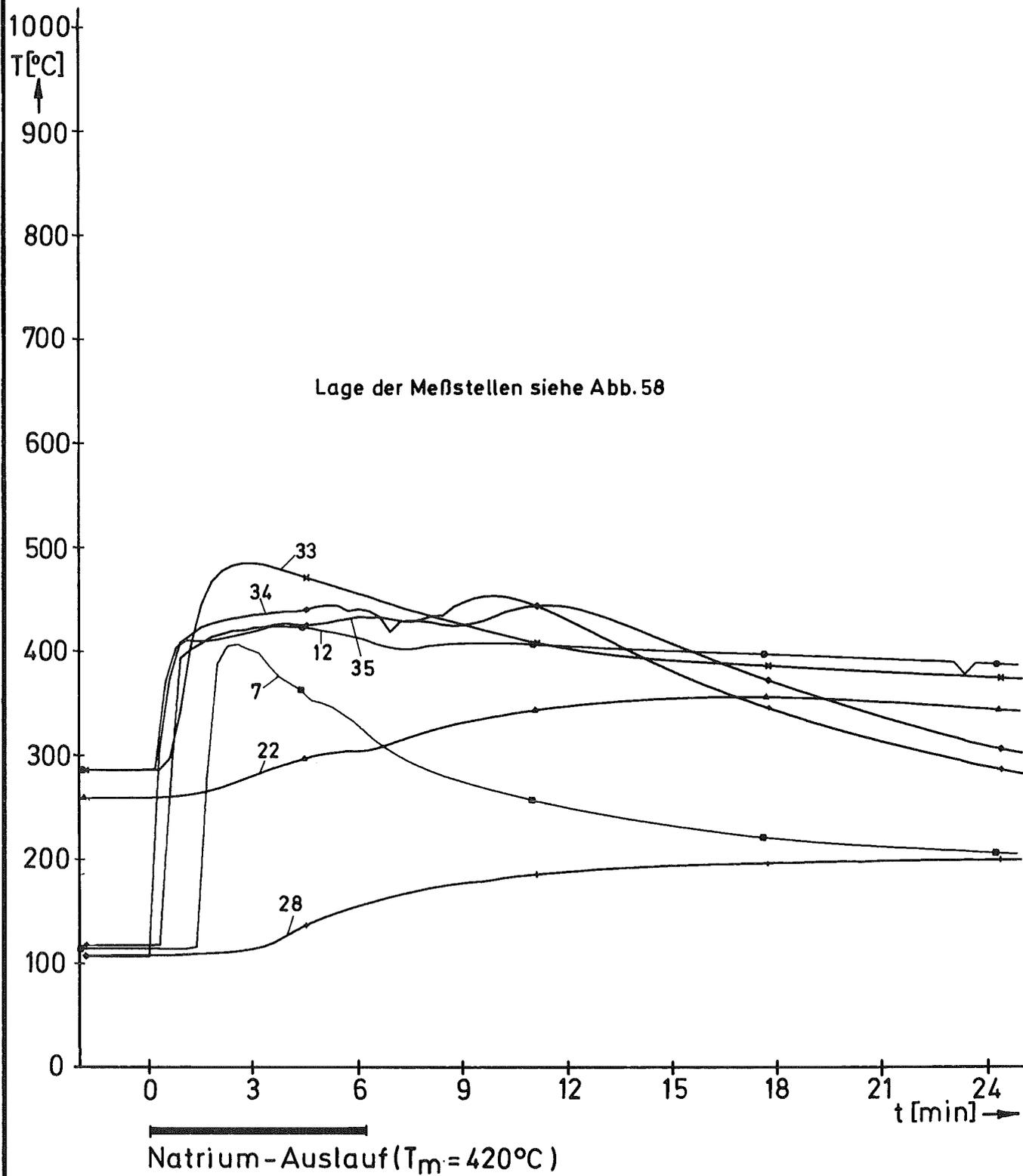
Abb. 63



**GFK
IRE**

Horizontale Rohrleitung; Vers. Nr. 9
Ausbreitung des Natriums

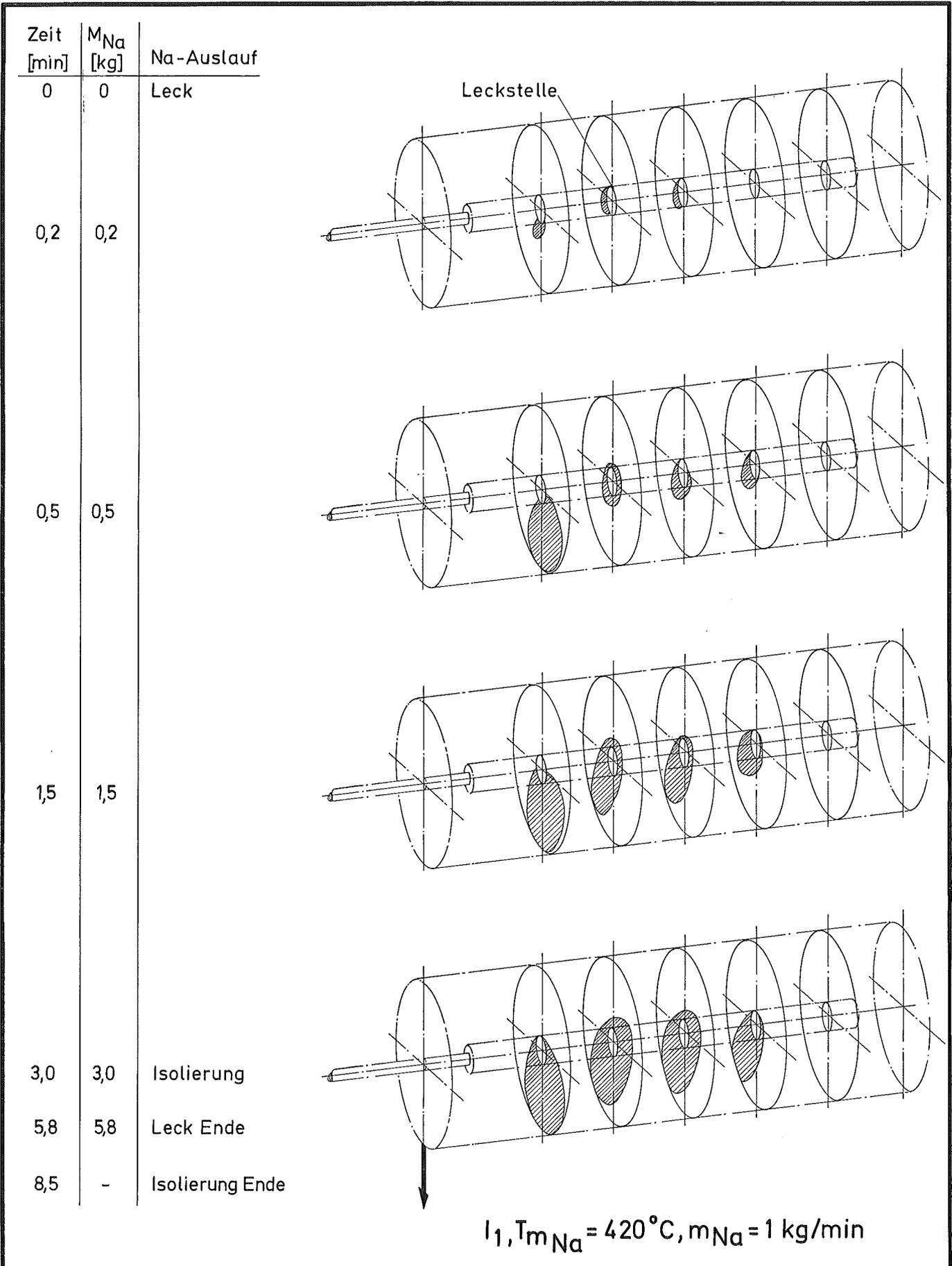
Abb. 65



GFK
IRE

Horizontale Rohrleitung; Vers. Nr. 6
Temperaturverlauf

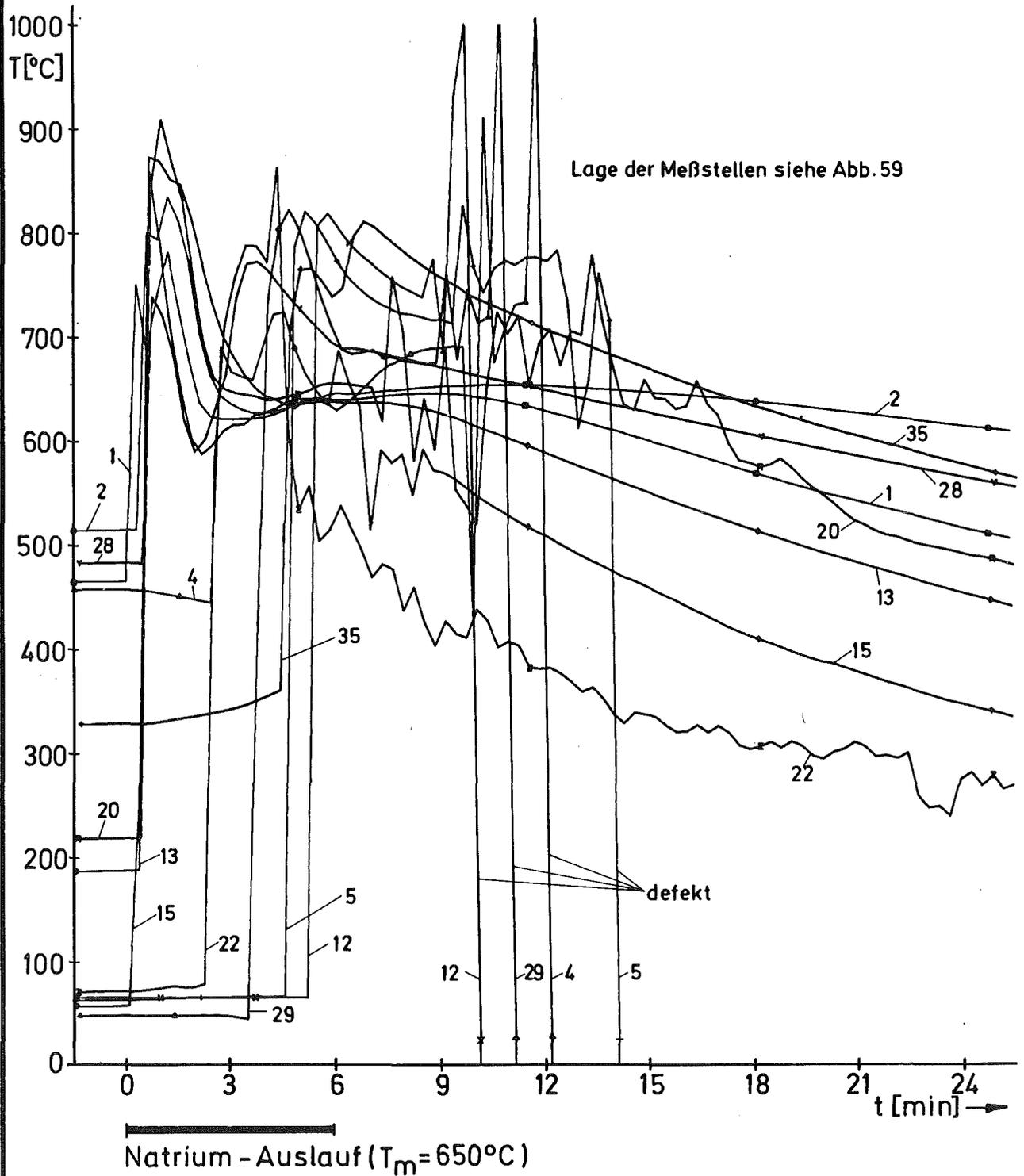
Abb. 66



**GFK
IRE**

**Horizontale Rohrleitung, Vers. Nr. 6
Ausbreitung des Natriums**

Abb. 67

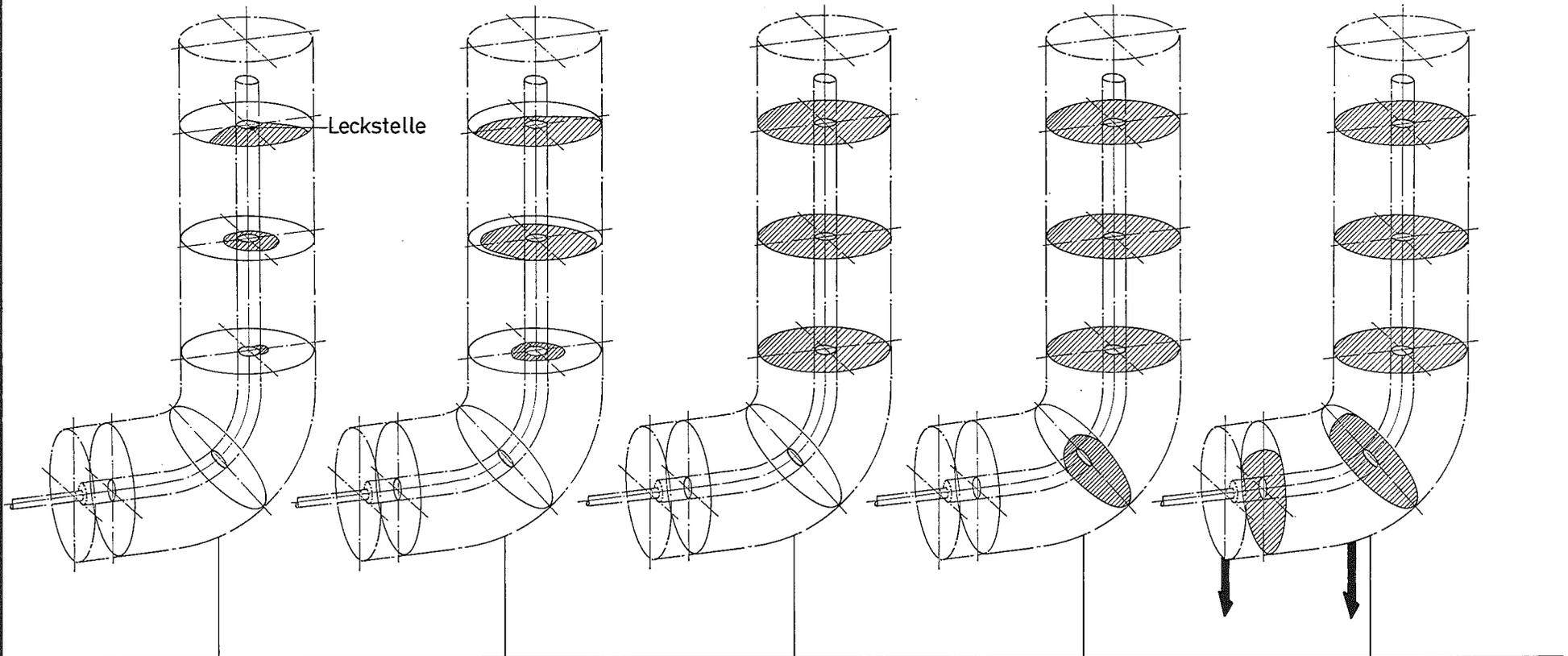


GFK
IRE

Vertikale Rohrleitung; Vers. Nr. 13
Temperaturverlauf

Abb. 68

$I_2, T_{mNa} = 650^\circ C, m_{Na} = 8 \text{ kg/min}$

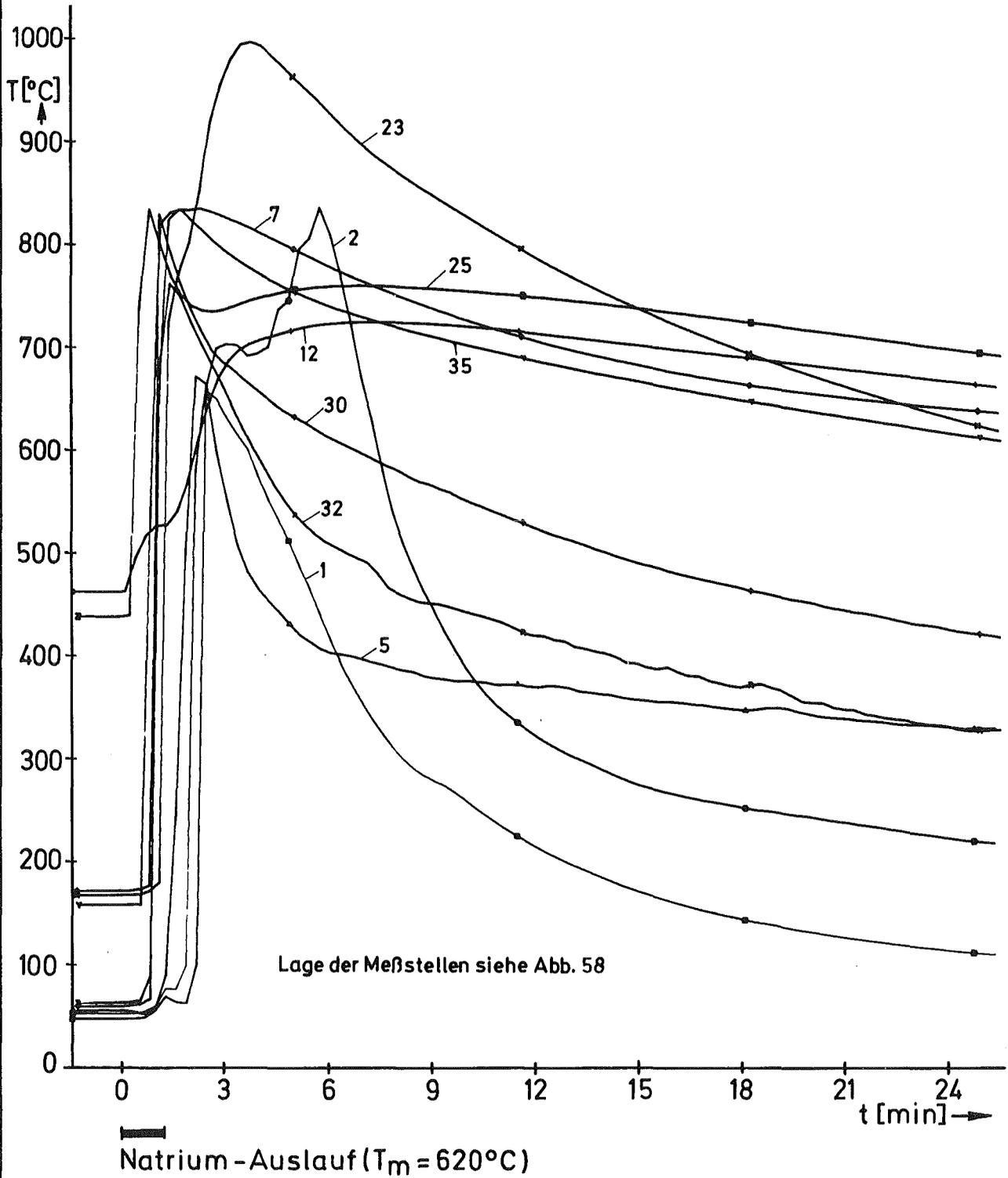


Zeit [min]	0	0,5	1	2,5	4	5	6	30	
M_{Na} [kg]	0	4	8	20	32	40	48,5	-	
Na - Auslauf	Leck					Isolierung		Leck Ende	Isolierung Ende

GFK
IRE

Vertikale Rohrleitung Versuch Nr.13
Ausbreitung des Natriums

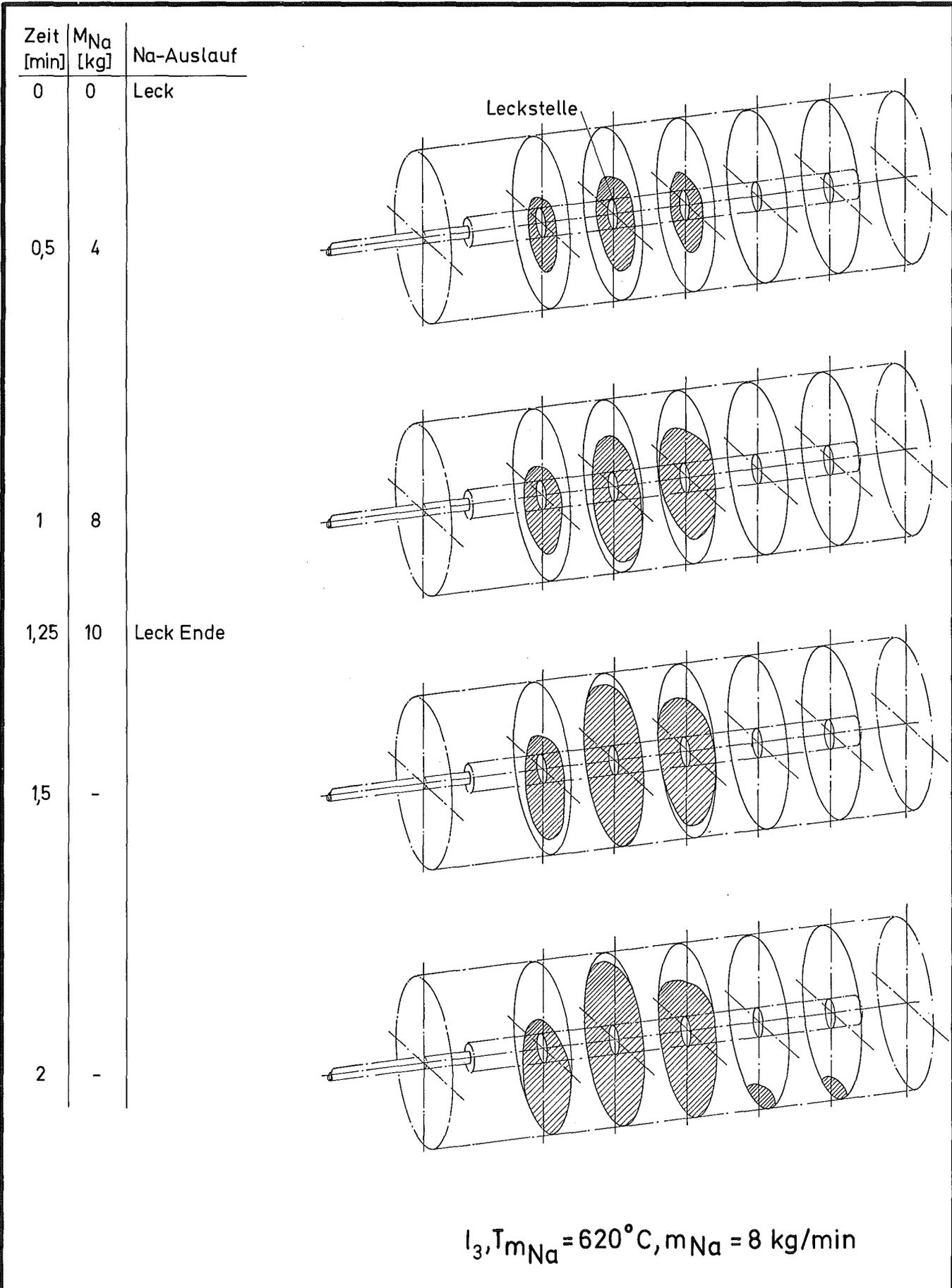
Abb. 69



GFK
IRE

Horizontale Rohrleitung; Vers. Nr. 18
Temperaturverlauf

Abb. 70

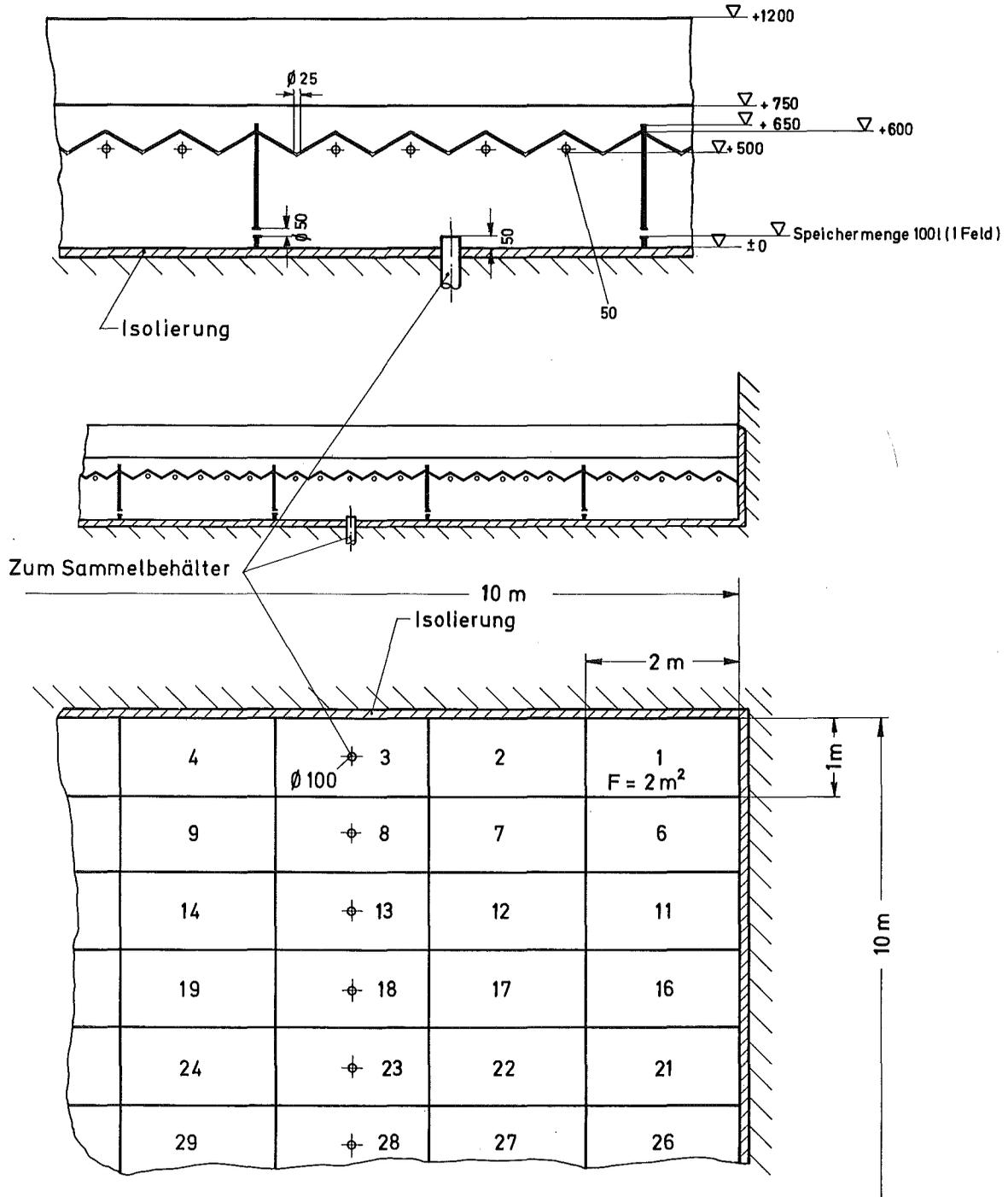


GFK
IRE

Horizontale Rohrleitung; Vers.Nr.18
Ausbreitung des Natriums

Abb. 71

Vergrößerter Ausschnitt



GFK
IRE

Auffangwannensystem 100 m^2
für 50 m^3 Auffangvolumen

Abb. 72