

KfK 4358  
November 1990

# **Die Natriumbrand- Untersuchungen in der FAUNA**

**Teil 1:  
Poolbrände und Aerosolverhalten**

**W. Cherdron, S. Jordan, W. Lindner  
Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik  
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Laboratorium für Aerosolphysik und Filtrertechnik  
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung

KfK 4358

**Die Natriumbrand-Untersuchungen in der FAUNA**  
Teil 1: Poolbrände und Aerosolverhalten

W. Cherdron, S. Jordan, W. Lindner

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

# Inhaltsverzeichnis

Seite

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Die physikalisch-chemischen Eigenschaften von Natrium</b>	<b>3</b>
2.1. Das Element Natrium	3
2.2. Wärmeleitung und Wärmekapazität	3
2.3. Dichte	4
2.4. Viskosität	4
2.5. Dampfdruck	5
<b>3. Beschreibung der FAUNA</b>	<b>7</b>
3.1. Experimentelle Schwerpunkte und Anlagenauslegung	7
3.2. Brandkessel	8
3.3. Natriumversorgung und -aufbereitung	9
3.4. Meßeinrichtungen und Gasversorgung des Brandkessels	9
3.5. Hilfsanlagen	11
3.6. Betriebseinrichtungen und Sicherheitssysteme	12
<b>4. Natrium-Poolbrände</b>	<b>13</b>
4.1. Versuchsaufbau	13
4.2. Durchgeführte Experimente	13
4.3. Beschreibung der Ergebnisse	14
4.3.1. Die Ergebnisse der Versuche F1 und F2	14
4.3.2. Die Ergebnisse der Versuche F3 und F4	16
4.3.3. Die Ergebnisse der Versuche F5 und F6	18
4.3.4. Die Ergebnisse des Versuches F7	20
4.3.5. Aerosolverhalten bei den Versuchen F1-F7	23
4.4. Zusammenfassung und Diskussion	25

	<b>Seite</b>
<b>5. Natriumbrandaerosole</b>	<b>31</b>
5.1. Charakterisierung von Natriumbrandaerosolen	
5.1.1. Einleitung	31
5.1.2. Freisetzung und physikalische Eigenschaften von Natriumbrandaerosolen	31
5.1.3. Aerosolverhalten in geschlossenen Containments	35
5.1.4. Chemische Eigenschaften von Natriumbrandaerosolen	37
5.1.4.1. Chemische Reaktionen	37
5.1.4.2. Versuche zur chemischen Umwandlung von Natriumbrandaerosolen	38
5.2. Wirkung von Aerosolen auf Anlagenkomponenten	41
5.2.1. Experimente an Umluftkühlern	41
5.2.1.1. Einleitung	41
5.2.1.2. Versuchsbedingungen und Versuchsaufbau	42
5.2.1.3. Versuchsergebnisse	45
5.2.1.3.1. Versuche für den belüfteten Bereich	45
5.2.1.3.2. Versuche für den inertisierten Bereich	46
5.2.1.4. Zusammenfassung und Schlußfolgerung	47
5.2.2. Test des SNR 300 Reventingssystem	48
5.2.2.1. Einleitung	48
5.2.2.2. Versuchsbedingungen und Versuchsaufbau	49
5.2.2.3. Versuchsergebnisse	50
5.2.2.4. Zusammenfassung	51
5.3. Filtration von Natriumbrandaerosolen	52
5.3.1. Einleitung	52
5.3.2. Glasfaserfilter	52
5.3.3. Sandbettfilter	53
5.3.4. Naßabscheider	53
5.3.5. Kombinierte Filtersysteme	54
5.3.6. Zusammenfassung	54

	<b>Seite</b>
<b>6. Natrium-Poolbrand-Codes</b>	56
6.1. Natrium-Poolbrand-Codes	56
6.2. SOFIRE-Modell	56
6.3. NABRAND-Modell	57
6.4. Vergleich zwischen SOFIRE und NABRAND	58
6.5. Wertung der Modellrechnungen	60
<b>7. Zusammenfassung und Diskussion über die Auswirkungen von Natrium-Poolbränden</b>	62
<b>8. Literatur</b>	
8.1. Zitierte Literatur	65
8.2. Eigene Veröffentlichungen im Rahmen des FAUNA Programms	66
<b>9. Abbildungen</b>	72

## **Verzeichnis der Abbildungen**

**Bild 2.1: Die Wärmeleitung von Natrium in Abhängigkeit von der Temperatur**

**Bild 2.2: Die Wärmekapazität von Natrium in Abhängigkeit von der Temperatur**

**Bild 2.3: Die Dichte von Natrium in Abhängigkeit von der Temperatur**

**Bild 2.4: Die kinematische Viskosität von Natrium in Abhängigkeit von der Temperatur**

**Bild 2.5: Der Dampfdruck von Natrium in Abhängigkeit von der Temperatur**

**Bild 3.1: Fotografie der FAUNA-Anlage**

**Bild 3.2: Schematische Darstellung der FAUNA-Anlage**

**Bild 3.3: Schematische Darstellung der Natrium-Anlage**

**Bild 4.1: Lage der Brandpfannen und Position der wichtigsten Thermoelemente bei den Lachenbrand-Versuchen**

**Bild 4.2: Schematische Darstellung der Natrium-Einfüllvorrichtung**

**Bild 4.3: Verlauf der Gastemperatur 4.10 m über der Brandpfanne beim Versuch F1**

- Bild 4.4:** Verlauf der Gastemperatur 4.10 m über der Brandpfanne beim Versuch F2
- Bild 4.5:** Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F1
- Bild 4.6:** Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F2
- Bild 4.7:** Verlauf der Gastemperatur in der Kesselmitte und im Rückströmbereich beim Versuch F1
- Bild 4.8:** Verlauf der Gastemperatur in der Kesselmitte und im Rückströmbereich beim Versuch F2
- Bild 4.9:** Verlauf der Sauerstoffkonzentration beim Versuch F1
- Bild 4.10:** Verlauf der Sauerstoffkonzentration beim Versuch F2
- Bild 4.11:** Verlauf der Natriumtemperatur beim Versuch F1 (1 cm und 2 cm über dem Pfannenboden)
- Bild 4.12:** Verlauf der Natriumtemperatur beim Versuch F1 (4 cm und 7 cm über dem Pfannenboden)
- Bild 4.13:** Verlauf der Gastemperatur in der Kesselmitte beim Versuch F3
- Bild 4.14:** Verlauf der Gastemperatur in der Kesselmitte und in Randnähe ("rechts") beim Versuch F3
- Bild 4.15:** Verlauf der Gastemperatur in der Kesselmitte und in Randnähe ("links") beim Versuch F3

- Bild 4.16:** Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F3
- Bild 4.17:** Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F3
- Bild 4.18:** Verlauf der Gastemperatur in der Kesselmitte beim Versuch F4
- Bild 4.19:** Vergleich der Gastemperatur verschiedener Meßstellen beim Versuch F4
- Bild 4.20:** Vergleich der Gastemperatur verschiedener Meßstellen beim Versuch F4
- Bild 4.21:** Vergleich der Gastemperatur verschiedener Meßstellen beim Versuch F4
- Bild 4.22:** Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F4
- Bild 4.23:** Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F4
- Bild 4.24:** Einfluß der Sauerstoffkonzentration auf den Brandverlauf beim Versuch F3
- Bild 4.25:** Einfluß der Sauerstoffkonzentration auf den Brandverlauf beim Versuch F4
- Bild 4.26:** Korrosion am Natriumeinlaßstutzen im Bereich der Flammenzone
- Bild 4.27:** Verlauf der Gastemperatur in der Kesselmitte beim Versuch F5
- Bild 4.28:** Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F5

**Bild 4.29: Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F5**

**Bild 4.30: Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F5**

**Bild 4.31: Verlauf der Sauerstoffkonzentration beim Versuch F5**

**Bild 4.32: Druckverlauf im Versuchskessel beim Versuch F5**

**Bild 4.33: Verlauf der Gastemperatur in der Kesselmitte beim Versuch F6**

**Bild 4.34: Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F6**

**Bild 4.35: Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F6**

**Bild 4.36: Verlauf der Sauerstoffkonzentration beim Versuch F6**

**Bild 4.37: Druckverlauf im Versuchskessel beim Versuch F6**

**Bild 4.38: Verlauf der Gastemperatur 40 cm über der Natrium-Oberfläche beim Versuch F7**

**Bild 4.39: Verlauf der Natriumtemperatur beim Versuch F7**

**Bild 4.40: Verlauf der Gastemperatur 4.10 m über der Natriumfläche beim Versuch F7**

**Bild 4.41: Verlauf der Natriumaerosol-Massenkonzentration beim Versuch F7**

**Bild 4.42: Natriumdampfdruck als Funktion der Pool-Temperatur**

- Bild 4.43:** Näherungsweise Berechnung der insgesamt verdampften Natriummenge beim Versuch F7
- Bild 4.44:** Verlauf der Natriumaerosol-Massenkonzentration bei den Versuchen F1 und F2
- Bild 4.45:** Verlauf der Natriumaerosol-Massenkonzentration bei den Versuchen F3 und F4
- Bild 4.46:** Vergleich verschiedener Meßmethoden für Natriumaerosol-Massenkonzentration
- Bild 5.1:** Nachrechnungen der Aerosol-Massenkonzentration mit verschiedenen Koagulationsformfaktoren F
- Bild 5.2:** Nachrechnungen der Aerosol-Massenkonzentration unter Berücksichtigung der turbulenten Koagulation
- Bild 5.3:** Nachrechnungen der Aerosol-Massenkonzentration eines Natrium-Spraybrandes
- Bild 5.4:** Vergleich zwischen dem gemessenen und mit PARDISEKO berechneten aerodynamischen Aerosoldurchmesser
- Bild 5.5:** Abhängigkeit der Natriumkarbonatbildung von der relativen Feuchte des Trägergases
- Bild 5.6:** Abhängigkeit des Natriumkarbonat-Anteils vom Aerosoldurchmesser
- Bild 5.7:** Berechneter Verlauf der Aerosolmassenkonzentration nach einem Störfall im inneren Containment (iC) und äußeren Containment (äC)

- Bild 5.8:** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für die Komponententests
- Bild 5.9:** Verlauf der Aerosolmassenkonzentration während der Versuche für den inertisierten Bereich
- Bild 5.10:** Schematische Darstellung des Containmentsystems des SNR 300
- Bild 5.11:** Schematische Darstellung des Versuchszustandes zum Reventing-Gebläse-Test
- Bild 5.12:** Natrium-Ablagerungen im Versuchskreislauf beim Reventing-Gebläse-Test
- Bild 5.13:** Übersicht über die Verteilung der Natriumablagerungen im Versuchskreislauf
- Bild 5.14:** Testbedingungen und Abscheidegrade für verschiedene Filtertypen
- Bild 5.15:** Schematische Darstellung des kombinierten Elektro-Filters
- Bild 7.1** Vergleich der Brandraten auf verschiedenen Brandflächen

## Einleitung

Noch bevor sich die nukleare Industrie entschied, Natrium als Kühlflüssigkeit in schnellen Brutreaktoren zu verwenden, war der Markt für Natrium nicht unbedeutend. Natrium wird in den verschiedensten Industriezweigen verwendet: Hauptabnehmer sind die pharmazeutische Industrie sowie die Mineralölindustrie für die Synthese von Tetraethylblei. Auch in der chemischen Industrie wird Natrium verwendet, insbesondere für die Herstellung von Waschpulver. Jährlich werden ca. 40 000 t metallisches Natrium in Europa hergestellt.

Mit dem Start des experimentellen Brutreaktorprogramms im Jahre 1951 in den USA eröffnete sich ein neuer Markt für metallisches Natrium. Inzwischen wird Natrium auch in Solarkraftwerken als wärmetransportierende Flüssigkeit benutzt.

Einige charakteristische Daten des Natriums erklären sofort, warum metallisches Natrium als Kühlmittel bzw. als wärmeleitende Flüssigkeit besonders geeignet ist:

Die thermische Leitfähigkeit von Natrium ist etwa hundertmal höher als die des Wassers. Die Wärmekapazität des Natrium beträgt etwa 1/3 der des Wassers. Zwischen der Schmelztemperatur von 98 °C und der Siedetemperatur von etwa 880 °C liegt eine hinreichend große Temperaturspanne, die das Natrium zu einer flexiblen Flüssigkeit für den Transport von Wärme macht. Die kinematische Viskosität entspricht der von Wasser bei etwa 90 °C.

Auch die nuklearen Eigenschaften des Natriums lassen das Metall als Reaktor-Kühlflüssigkeit geeignet erscheinen. Natrium hat einen geringen Absorptionsquerschnitt für Neutronen. Die Bildung von langlebigen radioaktiven Substanzen ist gering. Die Korrosionsrate mit den wichtigsten Strukturmaterialien ist ebenfalls gering.

Chemisch gesehen ist Natrium eine stark reduzierende Reagentie. Seine Affinität zum Sauerstoff erfordert allerdings einige Vorsichtsmaßnahmen. Natrium kann bereits bei 120 °C zu brennen anfangen, wenn es eine hinreichend große Oberfläche hat.

In Luft brennendes Natrium erzeugt nur 1/4 der Wärme, die beim Verbrennen der gleichen Menge Benzin in Luft erzeugt wird. Während der Siedepunkt des Natriums unter Normaldruck bei etwa 880 °C liegt, liegt der von Benzin bei 80 °C, d.h. die latente Verdampfungswärme für Natrium ist etwa zwölfmal so hoch wie die des Benzin. Aus diesen Gründen ist im Rahmen der Sicherheitsanalyse von schnellen Brutreaktoren die Beschreibung und Analyse von Natriumbränden, das

Verhalten der dabei freigesetzten Natriumbrandaerosole und der Schutz vor Natriumbränden von sehr großem Interesse sowohl für die Konstrukteure und Operateure als auch für die Genehmigungsbehörden von schnellen Brutreaktoren.

Einige Forschungsinstitute haben sich weltweit mit diesen Problemen beschäftigt. Hierzu gehören in den USA Atomics International, die Hanford Research and Developing Laboratories und die Firma SANDIA, in Frankreich CEA/CEN in Cadarache, in Japan The Japan Atomic Energy Research Institute und in England CEGB, in Deutschland INTERATOM in Bensberg und KfK/IRE in Karlsruhe. Darüberhinaus wurden Natriumbrandversuche in Indien im RRC Kalpakkam durchgeführt.

Wenn von Natriumreaktionen auf Betonflächen abgesehen wird, lassen sich Natriumbrände in drei Hauptkategorien einteilen:

1. Poolbrände (Lachenbrände)
2. Spraybrände und
3. Brände, die eine Kombination der Typen 1 und 2 sind. Diese entstehen z.B. durch auslaufendes Natrium aus Leitungen und Komponenten, die thermisch isoliert sind.

Aufbauend auf Versuchen, die bereits in den 60er Jahren im IRE des KfK durchgeführt wurden, sind im LAF in einem ca. 15-jährigen Forschungsprogramm die Kinetik und die Auswirkungen verschiedener Natriumbrände untersucht worden. Erste Versuche hierzu wurden in dem geschlossenen Kessel NABRAUS (ca. 5 m<sup>3</sup>) durchgeführt. Versuche in dem 220 m<sup>3</sup> großen FAUNA-Kessel schlossen sich an. Im Rahmen dieses Programms wurden zahlreiche Reaktorkomponenten des SNR 300 mit Hinblick auf ihr Verhalten während Natriumstörfällen untersucht.

Der folgende Bericht beschreibt die in der FAUNA-Anlage durchgeführten Natriumpoolbrandversuche sowie deren Auswirkungen auf verschiedene Reaktorkomponenten. Darüberhinaus werden die bei Natriumbränden freigesetzten Aerosole im Hinblick auf ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften analysiert. Abschließend wird versucht, die im Rahmen dieses Programmes erzielten Ergebnisse mit denen anderer Institutionen zu vergleichen und zu bewerten.

## 2. Die physikalisch-chemischen Eigenschaften von Natrium

### 2.1. Das Element Natrium

Natrium ist ein Alkalimetall mit dem Atomgewicht 22,99 und der Ordnungszahl 11. Wegen seiner Reaktionsfähigkeit kommt es in der Natur nicht elementar vor, sondern nur in Verbindungen. In der obersten Erdkruste (ca. 15 km) beträgt der Anteil des Natriums ca. 2,6%. Damit steht es in der Häufigkeit der Elemente an 6. Stelle. Die Dichte von Natrium beträgt ca.  $0,97 \text{ g cm}^{-3}$ , es schmilzt bereits bei ca.  $98^\circ\text{C}$ , seine Siedetemperatur beträgt  $880^\circ\text{C}$ . Die folgende Tabelle vergleicht einige wichtige Eigenschaften des Natriums mit den anderen Alkalimetallen:

	Lithium	Natrium	Kalium	Rubidium	Cäsium
Dichte bei $20^\circ\text{C}$ , [g/cm <sup>3</sup> ]	0,54	0,97	0,86	1,48	1,84
Atomgewicht	6,94	22,99	39,1	85,5	132,9
Schmelzpunkt [ $^\circ\text{C}$ ]	179,0	97,8	63,7	39,0	28,5
Siedepunkt [ $^\circ\text{C}$ ]	1317	878	760	688	705

Bei Zimmertemperatur läßt sich Natrium mit dem Messer schneiden, die Schnittstelle zeigt silberglänzendes Metall.

### 2.2. Wärmeleitung und Wärmekapazität

Natrium besitzt eine hervorragende Wärmeleitung, dies ist eine ideale Eigenschaft für den Einsatz als Kühlmittel.

Dazu kommt, daß sich in dem technisch interessanten Bereich um  $500^\circ\text{C}$  die Wärmeleitung nur unwesentlich ändert. Nach Sittig [1] kann für festes Natrium die Wärmeleitfähigkeit beschrieben werden als:

$$K = 0,324 - 0,4 \cdot 10^{-3} t$$

mit K in  $\text{cal} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s}) \cdot ^\circ\text{C}/\text{cm}$

und t in  $^\circ\text{C}$

für den Bereich zwischen  $0^\circ\text{C}$  und dem Schmelzpunkt.

Für flüssiges Natrium bis  $512^\circ\text{C}$  gilt:

$$K = 0,2166 - 0,116 \cdot 10^{-3} t$$

In Bild 2.1 ist diese Beziehung graphisch dargestellt.

Im Vergleich mit Wasser hat Natrium eine fast 100 mal größere Wärmeleitfähigkeit, die Wärmekapazität dagegen beträgt nur ca. 1/3 des Wertes von Wasser. Ebenfalls nach Sittig [1] läßt sich die Wärmekapazität darstellen mit

$$C_1 = 9,93555 - 2,8053 \cdot 10^{-2} T + 5,7883 \cdot 10^{-5} T^2$$

für festes Natrium (von 30°C bis zum Schmelzpunkt)

und

$$C_2 = 8,95811 - 4,5788 \cdot 10^{-3} T + 2,5409 \cdot 10^{-6} T^2$$

für flüssiges Natrium (bis 897°C)  
mit  $C_{1,2}$  in cal / (grad mol)  
und T in Kelvin

In Bild 2.2 ist  $C_2$  dargestellt für den Bereich von 100 °C bis 897°C.

### 2.3. Dichte

Für die Auslegung von Natriumanlagen ist auch die beträchtliche Dichteänderung in dem Temperaturbereich zwischen 100°C und 600°C von Bedeutung. In diesem Bereich nimmt die Dichte um den Faktor 0,87 ab. In der Literatur ist eine Vielzahl von Tabellen verfügbar, die die Temperaturabhängigkeit der Dichte von Natrium angeben. Für den praktischen Gebrauch ist jedoch die folgende Beziehung von hinreichender Genauigkeit:

$$\rho(t) = 0,9725 - 0,2011 \cdot 10^{-3} t - 0,15 \cdot 10^{-6} t^2$$

für festes Natrium, und

$$\rho(t) = 0,9490 - 0,223 \cdot 10^{-3} t - 0,0175 \cdot 10^{-6} t^2 \quad (1)$$

für flüssiges Natrium bis 640°C,

jeweils mit

$$\rho(t) \text{ in g/cm}^3$$

und t in °C.

Für flüssiges Natrium ist die Temperaturabhängigkeit der Dichte in Bild 2.3 dargestellt.

### 2.4. Viskosität

In dem Temperaturbereich zwischen dem Schmelzpunkt und 600°C ändert sich auch die Viskosität des Natriums erheblich. So nimmt von 100°C bis 600°C die Viskosität um fast den Faktor 3 ab. Verschiedene Autoren berichten über Messung der Viskosität, alle bekannten Werte lassen sich sehr gut beschreiben mit der Beziehung:

$$\log \eta = - 1.09127 + 382/(t + 313)$$

mit  $\eta$  (Viskosität) in  $10^{-2}$  Pa·s (2)  
und  $t$  (Temperatur) in °C  
wie sie in Sittig [1] angegeben ist.

In folgender Tabelle wird die Viskosität von Natrium mit der einiger anderer Stoffe verglichen.

**Dynamische Viskosität einiger Stoffe in kg/ms**

Natrium 500 °C	$\sim 0,2 \cdot 10^{-3}$
Wasser 20 °C	$\sim 1,0 \cdot 10^{-3}$
Wasser 50 °C	$\sim 0,55 \cdot 10^{-3}$
Alkohol 20 °C	$\sim 1,2 \cdot 10^{-3}$
Glycerin 20 °C	$\sim 1,5 \cdot 10^0$

Man erkennt, daß für die Erprobung von Natrium-Versuchsaufbauten (mit Einschränkungen) Wasser als Modellflüssigkeit verwendet werden kann.

Die so beschriebene Viskosität wird auch als dynamische Viskosität bezeichnet, als Unterschied zur kinematischen Viskosität. Als kinematische Viskosität wird der Quotient aus dynamischer Viskosität und der Stoffdichte bezeichnet. Hier geht in die Temperaturabhängigkeit noch die Dichte ein, so daß mit den Beziehungen (1) und (2) sich die kinematische Viskosität schreiben läßt als:

$$\nu = \frac{\exp(-1.09127 + 382/(t+313))}{0,9490 - 0,223 \cdot 10^{-3} t - 0,0175 \cdot 10^{-6} t^2}$$

mit  $t$  in °C

und  $\nu$  in  $m^2 s^{-1}$ ,

gültig für flüssiges Natrium bis zu einer Temperatur von  $t = 640^\circ C$ .

In Bild 2.4 ist die kinematische Viskosität für Natrium im Bereich zwischen  $t = 100^\circ C$  und  $t = 640^\circ C$  dargestellt.

## 2.5. Dampfdruck

Zwar spielt der Dampfdruck des Natriums in dem technisch interessanten Temperaturbereich keine sehr große Rolle, doch kann er bei einigen Experimenten durchaus von Bedeutung sein. Insbesondere kann kondensierter Natriumdampf

Rohrleitungen zusetzen und Ventilsitze undicht werden lassen. Schon allein aus diesem Grunde ist die Kenntnis des Dampfdruckes in Abhängigkeit von der Temperatur wichtig. Eine Beziehung für den Dampfdruck gibt Ditchburn und Gilmore [2]. Es ist:

$$\log P = 6,35419 - 5567/t - 0,5 \log T$$

mit P (Dampfdruck) in bar

und T (Natriumtemperatur) in Kelvin

Die in Bild 2.5 aufgetragene Abhängigkeit des Dampfdruckes von der Temperatur läßt erkennen, daß bei Natrium erst ab ca. 800 K ein deutlicher Anstieg des Dampfdruckes sichtbar ist.

### **3. Beschreibung der FAUNA**

#### **3.1. Experimentelle Schwerpunkte und Anlagenauslegung**

Die Forschungsanlage zur Untersuchung nuklearer Aerosole (abgekürzt: FAUNA) wurde nach mehrjähriger Planungs- und Bauzeit 1979 in Betrieb genommen.

Im FAUNA-Programm wurde der Brandablauf, das Aerosolverhalten und die Brandauswirkungen großer Natriumbrände in geschlossenen Volumina untersucht. Das bisherige Programm gliederte sich in folgende Schwerpunkte:

- Natriumbrandexperimente in Luft.  
Es wurden Pool- und Spraybrände durchgeführt.  
Bei Poolbränden ist die Brandfläche und die Pooltiefe variabel (maximal 12 m<sup>2</sup> bei 50 cm Tiefe). Bei Spraybränden betrug die größte Natriumausflußrate 56 kg/sec. Die Natriumtemperatur betrug für beide Brandarten maximal 550 °C (siehe Abschnitt 4).
- Natriumbrandexperimente bei verminderter Sauerstoffkonzentration.  
Diese Versuche wurden im Hinblick auf die Inertisierung eines Teiles des Containments beim SNR-300 durchgeführt. Es wurden ebenfalls Lachen- und Spraybrände untersucht (siehe Abschnitt 4.3.4).
- Chemische Analyse des Natriumbrandaerosoles und Test von Reaktorkomponenten unter Einwirkung von Brandaerosol. Dabei wurde untersucht, wie groß der Anteil der einzelnen chemischen Verbindungen (Na<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaHCO<sub>3</sub>) am gesamten beim Brand freigesetzten Aerosol ist. Dies ist im Hinblick auf die Umgebungsbelastung bei Na-Bränden und auf die Auslegung von aerosolgefährdeten Komponenten der Reaktoranlage von Bedeutung. So wurden u.a. Original-Komponenten von Lüftungsanlagen und vom Reventingsystem des SNR-300 mit Natriumbrandaerosol beaufschlagt und deren Betriebsverhalten untersucht (siehe Abschnitt 5.2).
- Bestimmung des Verhaltens von Na-Brandaerosol in geschlossenen Behältern. Hierbei wurde der zeitliche Verlauf der Aerosolmassenkonzentration während und nach dem Brand und die Aerosolablagerung am Boden und an den Wänden des Versuchsgefäßes gemessen. Die experimentellen Ergebnisse wurden mit Modellrechnungen verglichen (siehe Abschnitt 5.1.3).
- Test verschiedener Meßmethoden zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung und Massenkonzentration von Natriumbrandaerosol (siehe Abschnitt 5.1.2).

Die Arbeitsschwerpunkte des Versuchsprogrammes ergaben für den konstruktiven und den technischen Aufbau der FAUNA-Anlage folgende Bedingungen:

- Brandfläche variabel, maximal 12 m<sup>2</sup>.
- Durchführung von Pool-, Spray- und Kombibränden
- Evakuierbarkeit und Überdruckfestigkeit des Brandraumes
- Anschluß von Gaskreisläufen für Komponententests und zur chemischen Analyse des Brandaerosols
- Einsatz umfangreicher Meßtechnik, geringe Entfernung zu den Meßräumen

Diese Auslegungskriterien ermöglichten eine Vielfalt von Experimenten, wie sie derzeit nur in der FAUNA-Anlage möglich sind. Das Gesamtkonzept ist aus den Abbildungen 3.1 und 3.2 zu ersehen.

Die Anlage hat eine Ausdehnung von etwa 12 x 6 m<sup>2</sup>. Sie besteht aus einem dreigeschossigen Gebäudeteil mit einer Grundfläche von ca. 6 x 6 m<sup>2</sup> und einem zylindrischen 220 m<sup>3</sup> großen Versuchskessel, der dicht neben der nördlichen Gebäudewand steht. Der Kessel steht auf einem ca. 6 x 6 m<sup>2</sup> großen Raum, dessen Wände das Fundament für die Kesselaufgabe bilden. Dieser Raum ist vom Gebäudeteil zu begehen und dient zur Aufbereitung und Aufbewahrung des bereits eingeschmolzenen, unter Schutzgas befindlichen Natriums. In dem danebenliegenden Raum, dem Untergeschoß des Gebäudeteils, befinden sich die Betriebsüberwachung für die Natriumaufbereitungsanlage, die Schutzgasversorgung und die Notstromversorgung. Die Räume darüber sind überwiegend für Versuchsüberwachung (1. Geschoß) und Meßtechnik (2. Geschoß) vorgesehen. Ein Schlitz in der nördlichen Gebäudewand des 1. und 2. Geschosses erlaubt unmittelbaren Zugang zu Flanschen im Versuchskessel, für Probenahmen und elektrische Durchführungen. Die Anlage wird wegen der besseren Übersicht in folgende Teile aufgegliedert:

- Brandkessel
- Natriumversorgung und Aufbereitung
- Meßeinrichtungen und Gasversorgung des Kessels
- Hilfsanlagen
- Betriebseinrichtungen und Sicherheitssysteme

### **3.2. Brandkessel**

Als Brandraum dient eine Stahlgefäß mit 6 m Durchmesser und 6 m zylindrischer Höhe. Das Gefäß ist für 3 bar inneren Überdruck und Vakuum ausgelegt und hat ein Volumen von 220 m<sup>3</sup>. Der Behälter ist über einen kreisförmigen Einstieg begehbar. Die Brandpfannen sind auf einem Traggerüst mit 4 Auflagern am unteren Klöpperboden angebracht. Die Auflager der Pfannen sind mit einer elektronischen Wiegeeinrichtung versehen. Die Kesselinnenwände und alle Einbauten sind mit einem Zinkanstrich gegen Korrosion geschützt. Am zylindrischen Teil des Behälters ist eine Vielzahl von Flanschen und Durchführungen angebracht, die mit Versorgungsleitungen und Sonden für Meßzwecke bestückt sind.

### **3.3. Natriumversorgung und -aufbereitung**

Die Anlage zur Handhabung des Natriums (Abb. 3.3) besteht im wesentlichen aus 3 Lagertanks mit Verbindungsrohren und Ventilen, einer Einschmelzanlage und dem Schutzgassystem. Außer der Einschmelzanlage sind alle Komponenten in einem separaten Raum unterhalb des Versuchskessels untergebracht (Abb. 3.2). Aus einem der 3 Lagertanks wird die benötigte Menge Na für die Versuche pneumatisch in die Brandpfanne gedrückt. Bei Spraybränden wird das Na direkt aus dem Tank durch entsprechende Düsenanordnungen im Brandkessel verdüst. Der zweite Na-Lagertank bleibt ständig leer, um jederzeit für einen Na-Schnellablaß zur Verfügung zu stehen. Der dritte Lagertank wird zur Aufbewahrung von verunreinigtem Na benutzt, welches evtl. aus der Brandpfanne zurückgefördert wird. Die Natriumanlage steht ständig unter Schutzgas und wird von einer elektrisch überwachten zentralen Gasstation versorgt. Die drei Na-Tanks können getrennt und mit unterschiedlichen Drücken versorgt werden; jeder Kessel hat zwei Entlüftungsventile ins Freie. Die erforderlichen Gasventile sind magnetisch angetrieben. Zur Sicherheit gegen Stromausfall ist das gesamte Schutzgasversorgungssystem parallel mit handbetriebenen Ventilen ausgestattet.

### **3.4. Meßeinrichtungen und Gasversorgung des Brandkessels**

Der Meßraum befindet sich im Obergeschoß des FAUNA-Gebäudes. Die Gebäudewand ist über die gesamte Geschoßhöhe zu öffnen, so daß der Versuchskessel direkt vom Meßraum aus erreichbar ist. Die Meßdurchführungen in den Brandkessel sind somit während der Versuche zugänglich und es ergeben sich sehr kurze Wege zu den Meßgeräten. Dies ist besonders für alle Meßverfahren, bei denen Gas- bzw. Aerosolproben entnommen werden, von Vorteil. Der Meß-

raum wird durch eine separate Gasstation mit Spül- und Schutzgas versorgt. Die meßtechnische Ausrüstung wird je nach Versuchsziel variiert und ergänzt.

Die meßtechnische Grundausrüstung der Anlage besteht aus:

- a) Geräten zur Bestimmung der Brandkinetik, Meßmethoden zur Ermittlung der Containmentbelastung
  - Temperatur
  - Druck
  - O<sub>2</sub>-Verbrauch
  - Konvektion
  - Brandrate
- b) Geräten zur Messung der aerosolphysikalischen Größen des Brandaerosols
  - Massenkonzentration
  - Partikelgröße und -größenverteilung
  - Partikelzahl
  - Partikelform
- c) Methoden zur chemischen Analyse des Brandaerosols und der Brandrückstände und im Zusammenhang damit
  - CO<sub>2</sub>-Konzentration und Verbrauch
  - Relative Feuchte
  - O<sub>2</sub>-Konzentration und -Verbrauch.

An den Brandkessel ist eine Gasversorgungsstation angeschlossen, so daß der Brandablauf und die chemischen Reaktionen des Brandaerosols beeinflußt und quantitativ erfaßt werden können. Der Brandablauf wird durch die O<sub>2</sub>-Konzentration im Kessel und die Nachspeisung von verbrauchtem Sauerstoff beeinflußt, die verbrauchte O<sub>2</sub>-Menge wird gemessen und registriert. In der O<sub>2</sub>-Zuleitung ist aus Sicherheitsgründen eine Schnellschlußventil installiert. Damit wird im Falle der Überschreitung von zulässigen Werten für Kesseldruck und Kesseltemperatur die O<sub>2</sub>-Zufuhr unterbrochen. Dadurch wird die Brandintensität vermindert bzw. der Brand ganz gestoppt.

Der Ablauf der chemischen Reaktionen des Na-Brandaerosols ist u.a. von der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Umgebungsluft des Brandes abhängig. Bei ausreichendem CO<sub>2</sub>-Angebot entsteht als Reaktionsendprodukt ungefährliches Natrium-

karbonat. Die automatische Gasversorgungsstation gestattet die Einstellung und Konstanthaltung verschiedener CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, der CO<sub>2</sub>-Verbrauch wird registriert. Damit sind Aussagen über den chemischen Reaktionsablauf des Brandaerosols möglich. Das variable CO<sub>2</sub>-Angebot erlaubt weiterhin die Herstellung von Na-Brandaerosol bestimmter chemischer Zusammensetzung. Dies ist für Komponententests unter Einwirkung von Brandaerosol von Bedeutung.

Bereits im Inbetriebnahmejahr 1979 wurde für die Meßtechnik ein rechnergesteuertes Datenerfassungssystem eingesetzt. Alle on-line Daten, auch die Thermoelement-Spannungen, wurden über einen Scanner einem Digitalvoltmeter zugeführt. Die Meßstellenbelegung und der Abfragetakt waren frei wählbar. Die Daten wurden von einem Rechner original auf eine Bandkassette abgespeichert und außerdem protokolliert. (Bei dem Rechner handelt es sich um einen 9825 von Hewlett-Packard, Betriebssystem HPL.) Die notwendigen Umrechnungen und Zeichnungen wurden mit Hilfe desselben Rechners durchgeführt. Die Daten zum Betrieb und zur Sicherheit der Versuchsanlage wurden nicht von dem rechnergestützten System erfaßt, sondern separat erfaßt und verarbeitet. Diese Datentrennung hat sich sehr bewährt.

### 3.5. Hilfsanlagen

Die Anlage ist mit einer Reihe von Hilfsanlagen ausgestattet, die einen sicheren und störungsfreien Betrieb bzw. nach den Experimenten eine sichere Entsorgung gewährleisten. Die wichtigsten Hilfsanlagen sind die Abluftreinigungsanlage, die Behälterkühlung und eine Vakuumpumpe.

Bei den Experimenten werden große Mengen luftgetragener Partikel freigesetzt. Die TA-Luft schreibt für diese Aerosole eine maximale Emission von 120 mg Aerosol pro Kubikmeter freigesetztem Gas vor. Da die Aerosolmassenkonzentration im ungereinigten Abgas der Anlage einige Gramm pro Kubikmeter betragen kann, mußte eine Abgasreinigungsanlage installiert werden.

Die Abgasreinigung erfolgt in einem zweistufigen Rotationsnaßwäscher mit 2 in Reihe geschalteten Zerstäuberturbinen. Die Anlage fördert 3.000 m<sup>3</sup> Gas pro Stunde.

Bei Versuchen mit 12 m<sup>2</sup> Brandfläche wird eine Wärmemenge von ca. 10<sup>6</sup> kcal/h freigesetzt. Die Maximaltemperatur an der Außenwand des Versuchsbehälters wurde mit 80 °C festgesetzt. Dies wird durch eine Wasserkühlung gewährleistet. Am oberen Klöpperboden und am Behälterumfang ist eine Vielzahl von Düsen

angebracht, durch die der gesamte Behälter gleichmäßig berieselt werden kann. Bei maximalen Versuchsbedingungen wird eine Frischwassermenge von 70 m<sup>3</sup>/h benötigt. Durch Beimischung von Frischwasser wird gewährleistet, daß das Abwasser vor Abgabe in die Kanalisation auf 30 °C abgekühlt wird.

Der Versuchskessel ist mit einem Vakuumpumpstand versehen, welcher zwei Aufgaben zu erfüllen hat: Vor Experimenten mit O<sub>2</sub>-Konzentrationen kleiner 21% wird der Kessel evakuiert, danach die gewünschte O<sub>2</sub>-Konzentration eingestellt. Die Vakuumpumpe erfüllt zweitens eine Sicherheitsfunktion, denn im Falle eines unkontrollierten Na-Brandes im Kessel kann dieser schnell evakuiert und mit Stickstoff geflutet werden. Der Pumpstand besteht aus einer Wälzkolbenpumpe und einer Drehschieberpumpe und hat ein Saugvermögen von 2.000 m<sup>3</sup>/h bei 0,1 Torr.

### **3.6. Betriebseinrichtungen und Sicherheitssysteme**

Der Betrieb der Anlage erfolgt über zwei Schaltwarten, eine Hauptschaltwarte (im Mittelgeschoß befindlich), hier werden die Gesamtfunktionen der Anlage überwacht und eine Natriumschaltwarte (im Kellergeschoß), mit der die Handhabung des Natriums erfolgt. Zur Dosierung der Gase O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> für den Versuchsbetrieb steht ein Kontrollpult zur Verfügung. Die Schaltwarten übernehmen außer den betrieblichen Funktionen auch einen großen Teil der Sicherheitsvorkehrungen. Eine selbstanlaufende Notstromanlage hält bei Stromausfall alle wichtigen Steuer- und Kontrollfunktionen aufrecht.

Die Sicherheit der Anlage wird durch in die Betriebstechnik integrierte Sicherheitssysteme erreicht, hierbei wurden die entsprechenden Anlagenteile durch Logikschaltungen verknüpft.

Zu den Sicherheitssystemen gehören:

- Heizungsregelung und Überwachung
- Ampelanlage
- Rückmeldung der Ventilstellungen
- Kontrolle der Ventilstellungen
- Automatische Schutzgasversorgung
- Wassermelder im Brandkessel
- Überwachung der Wandtemperatur des Versuchskessels und des Kesseldrucks
- Brandüberwachung der Betriebsräume
- Notstromversorgung.

## 4. Natriumpoolbrände

### 4.1. Versuchsaufbau

Für diese Experimente wurden in den Kessel axialsymmetrisch in den Versuchskessel eingebaut. Die Lage ist in Bild 4.1 skizziert, zusammen mit den wichtigsten Thermoelemente. Die Brandpfannen waren axialsymmetrisch gefertigt und hatten folgende Maße:

Versuch F1, F2, F5, F7: 1,6 m Durchmesser = 2 m<sup>2</sup>

Versuch F3, F4: 3,9 m Durchmesser = 12 m<sup>2</sup>

Versuch F6: 2,5 m Durchmesser = 5 m<sup>2</sup>

Die Lagerung der Brandpfannen auf einer Wägeeinrichtung erlaubte eine (zusätzliche) Kontrolle der eingeführten Na-Menge. Das Natrium wurde aus den Vorratsbehältern durch eine beheizte Rohrleitung von 50 mm Durchmesser in die Brandpfanne befördert. Über den Füllstand der Vorratsbehälter wurde die Natriummenge kontrolliert. Die Einfüllvorrichtung (Bild 4.2) wurde so gestaltet, daß beim Einfüllen kein Spritzbrand zu erwarten war.

### 4.2. Durchgeführte Experimente

Wie bereits beschrieben, wurden die Brandpfannen axialsymmetrisch in den Versuchskessel eingebaut. Die folgende Tabelle zeigt die wichtigsten Versuchsbedingungen:

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Brandfläche m <sup>2</sup>	2	2	12	12	2	5	2
Natriummenge kg	150	250	500	500	350	350	120
Sauerstoffkonz. %	19-22	17-25	15-25	18-25	12-21	4-21	2 %
Brandpfanne beheizt und isoliert	ja	ja	ja	nein	nein	nein	ja

Tab. 4.1: Versuchsbedingungen der Natriumpoolbrände

Außerdem bestanden zwischen den einzelnen Versuchsbedingungen noch folgende Unterschiede:

- Bei den Versuchen F1 - F4 wurde der durch die Reaktion verbrauchte Sauerstoff durch reinen Sauerstoff ergänzt.
- Bei den Versuchen F1 - F3 wurde der Sauerstoff an der Kesselwand in der Höhe 1 m über der Pfanne eingegeben, beim Versuch F4 war die Sauerstoffzufuhr in 3 m Höhe in Richtung auf die Pfannenmitte.
- Bei den Versuchen F5 und F6 wurde der verbrauchte Sauerstoff nicht ergänzt.

Beim Versuch F7 kam es, bedingt durch den geringen Sauerstoffgehalt (2%) im Versuchskessel nicht zu einem Natriumbrand.

Die Durchführung der Experimente war für alle Versuche ähnlich: Nach einer Kontrolle der Installationen im Kessel wurde die Kesseltür verschlossen und verschraubt. Die für den Versuch geplante Natriummenge wurde in einem der Vorratsbehälter auf die erforderliche Temperatur vorgeheizt. Auf diese Solltemperatur wurden auch die Rohrleitungen eingestellt. Nach Erreichen der Solltemperaturen wurde die Datenerfassungsanlage gestartet und es wurden die Natriumventile zwischen Vorratsbehälter und Versuchskessel geöffnet. Der Versuchsbeginn war der Zeitpunkt des Natriumaustritts aus dem Einfüllrohr in die Brandpfanne. Meßtechnisch wurde dieser Zeitpunkt durch die in der Brandpfanne installierten Thermoelemente erfaßt.

### **4.3. Beschreibung der Ergebnisse**

#### **4.3.1 Die Ergebnisse der Versuche F1 und F2**

Der Verlauf eines Natriumbrandes läßt sich gut anhand des Temperaturverlaufes über der Brandpfanne beschreiben. Da sich Kessel und Brandpfanne in einer axialsymmetrischen Anordnung befanden (siehe Bild 4.1), ist es zunächst ausreichend, die Temperaturen vertikal über der Pfannenmitte zu betrachten, wie sie in Bild 4.3 und 4.4 dargestellt sind. Zum Zeitpunkt 0, also unmittelbar vor dem Einfüllen des Natriums, lagen die Temperaturen im Kessel infolge der beheizten Pfanne bei ca. 50 °C. Beim Versuch F1 war dann für die Dauer von ca. 50 Minuten nach dem Einfüllen ein starkes Anwachsen der Temperatur zu beobachten, ein Temperaturmaximum von fast 200 °C war nach ca. 70 Minuten erreicht. Der Temperaturgradient zu Beginn des Versuches F2 war nicht so steil wie bei dem Versuch F1, auch das Temperaturmaximum von ca. 190 °C wurde erst nach ca. 105 Minuten erreicht. Die kurzzeitigen Temperaturrückgänge, z.B. nach ca. 35 Minu-

ten (F1) oder 45 Minuten (F2), sind auf die Sauerstoffzugabe und die Strömungsverhältnisse im Versuchskessel zurückzuführen. Durch die in der Mitte angeordnete relativ kleine Brandfläche im Verhältnis zum Kesselquerschnitt ( $28.3 \text{ m}^2$ ) stellt sich eine ausgeprägte Konvektionsströmung ein. Diese Strömung läßt sich gut anhand der Temperaturen erkennen, die in Abhängigkeit vom Kesselquerschnitt in Bild 4.5 und 4.6 aufgetragen sind. Durch diese Strömungen konnte der noch nicht erwärmte Sauerstoff, der nahe der Kesselwand in Pfannenhöhe zugeführt wurde, die Thermolemente senkrecht über der Brandpfanne erreichen. Bereits die Temperaturen in der Rückströmung, wie sie in Bild 4.6 dargestellt sind, zeigten diese Temperaturschwankungen nicht mehr. Auch waren in der Rückströmung keine großen Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen horizontalen Meßstellen zu erkennen (Bild 4.7 und 4.8). Dies läßt auf eine gute Durchmischung am Übergang von Aufwärtsströmung zu Rückströmung und auf stabile Strömungskonfigurationen während des Brandes schließen. Dieser Zusammenhang zwischen Sauerstoffzuführung und den damit verbundenen Temperaturveränderungen wird durch Auftragung von Temperatur, Sauerstoffkonzentration und zeitlichem Verlauf der Sauerstoffzugabe verdeutlicht (Bild 4.9 und 4.10).

Die Strömungsgeschwindigkeit in der Rückströmung wurde mit Hilfe eines Heißfilmanemometers gemessen. Zwar sind die Bedingungen im Versuchskessel während Natriumbränden wegen Temperaturschwankungen und Aerosolbeladung für Heißfilmmessungen denkbar schlecht, jedoch konnten mit einer temperaturkompensierten, besonders robusten Sonde zumindest Mittelwerte gemessen werden. Es ergab sich eine durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit von ca.  $0,8 \text{ m/s}$  in der Rückströmung, was einer Geschwindigkeit von ca.  $11,3 \text{ m/s}$  in der Aufwärtsströmung über der Pfanne entspricht.

Da die chemische Zusammensetzung der Aerosole und des Pfannentrückstandes bekannt ist, läßt sich aus dem Verlauf der Sauerstoffkonzentration (Bild 4.9 und 4.10) die Brandrate bestimmen. Während der Versuchsabschnitte, in denen kein Sauerstoff nachgespeist wurde, konnte also die Masse des reagierten Natriums berechnet werden. In der folgenden Tabelle ist für diese Zeitintervalle die Brandrate bezogen auf Quadratmeter und Stunde angegeben. Die Gesamtbrandrate bezieht sich auf die gesamte Versuchsdauer und den insgesamt verbrauchten Sauerstoff.

Neben den Gastemperaturen wurde an vier Stellen die Temperatur in oder knapp über dem Natrium gemessen. Die Meßstellen lagen bei  $x = 0 \text{ cm}$  und  $y = 1 \text{ cm}$ ,

F1		F2	
Versuchszeit [min]	Brandrate [kg Na/m <sup>2</sup> h]	Versuchszeit [min]	Brandrate [kg Na/m <sup>2</sup> h]
0 - 30	20.8	0 - 45	16.8
40 - 60	26.3	60 - 105	19.8
75 - 85	37.3	115 - 140	25.3
100 - 110	22.0	150 - 175	18.9
Gesamtbrandrate	29.5		21.0

**Tab. 4.2: Brandraten der Versuche F1 und F2 für verschiedene Zeitabschnitte und Gesamtbrandrate für die ganze Versuchszeit**

2 cm, 4 cm und 7 cm (Bild 4.11 und 4.12), damit sind bei Brandbeginn alle Thermoelemente in das Natrium eingetaucht. Naturgemäß läßt sich zwischen den Schwankungen in der Gastemperatur und den Schwankungen in der Natriumtemperatur kein eindeutiger Zusammenhang herstellen: Die lokalen Temperaturmessungen im Natrium oder in Natriumnähe werden vor allem vom örtlichen Brandverlauf beeinflusst, der stark von momentanen Zuständen wie Oberflächenbewegungen und Krustenbildung abhängig ist. Diese Feinstruktur konnte natürlich von den Thermoelementen einige Meter über der Brandpfanne nicht mehr aufgelöst werden.

#### 4.3.2 Die Ergebnisse der Versuche F3 und F4

Die Versuche F3 und F4 wurden beide auf 12 m<sup>2</sup> Brandfläche mit jeweils 500 kg Natrium durchgeführt. Damit waren bei beiden Versuchen die für das Brandverhalten wesentlichen Parameter identisch. Unterschieden haben sich die beiden Versuche durch die Pfannenheizung und der Art der Sauerstoffzuführung.

Beim Versuch F3 war die Brandpfanne an der Unterseite mit Heizleitern versehen und isoliert. So war es möglich, die Brandpfanne vor dem Versuch auf die Natriumtemperatur vorzuheizen, außerdem verhinderte die Isolierung während des

Versuches zum großen Teil Wärmeabstrahlung nach unten. Dagegen war beim Versuch F4 die Brandpfanne nicht beheizt und unisoliert. Für den Einfluß auf den Brandverlauf dürfte dabei die unbeheizte Pfanne von untergeordneter Bedeutung sein; rein rechnerisch sinkt die Natriumtemperatur um weniger als 20 °C, wenn die Pfanne beim Natriumeinlaß nicht beheizt ist. Von größerer Bedeutung war, daß die Brandpfanne beim Versuch F4 nicht nach unten isoliert war, so daß ein Wärmefluß aus dem Natrium durch die Pfanne nach unten möglich war. Einen wesentlichen Einfluß auf das Brandverhalten zeigte auch die beim Versuch F4 veränderte Sauerstoffzuführung. Während beim Versuch F3 der Sauerstoff am Kesselrand ( $z = 1 \text{ m}$ ) zugeführt wurde (wie auch bei F1 und F2), wurde beim Versuch F4 der Sauerstoff in 3 m Höhe zugeführt. Wie der Versuch gezeigt hat, beeinflußt die Art der Sauerstoffzuführung deutlich den Brandverlauf, der trotz gleicher Natriummenge und Brandfläche bei den Versuchen F3 und F4 sehr unterschiedlich war. Betrachtet man den Temperaturverlauf des Versuches F3, wie er in Bild 4.13 für verschiedene Meßstellen dargestellt ist, so fällt auf, daß nach einem relativ gleichmäßigen Temperaturanstieg bis auf ca. 350 °C nach ca. 60 Minuten ein Temperaturmaximum von fast 800 °C erreicht wurde. Dieses Temperaturmaximum wurde nicht nur in der Kesselmitte ( $x = 0 \text{ m}$ ) gemessen, sondern auch an den Meßstellen in der Nähe des Randes (Bild 4.14 und 4.15). Dies wird besonders deutlich, wenn man die Temperaturen über dem Kesselquerschnitt aufträgt (Bild 4.16 und 4.17). Dieses Maximum bedeutete praktisch auch das Brandende, denn die Temperaturen fallen anschließend stark und gleichmäßig ab.

Völlig verschieden vom Versuch F3 sieht der Temperaturverlauf für den Versuch F4 aus (Bild 4.18). Nach einem starken Temperaturanstieg zu Brandbeginn wurde bereits nach ca. 18 Minuten ein Maximum von fast 450 °C erreicht. Ähnliche Maxima traten auch bei 30 Minuten, 44 Minuten und 50 Minuten auf. Dieser für F4 typische Temperaturverlauf war nicht nur an einigen Meßstellen zu beobachten, sondern konnte über den gesamten Kesselquerschnitt verfolgt werden (Bild 4.19, 4.20, 4.21). Die Darstellung der Temperatur zu verschiedenen Zeitpunkten über den Kesselquerschnitt zeigt wieder eine relativ gleichmäßige Verteilung (Bild 4.22 und 4.23), wie sie schon beim Versuch F3 beobachtet wurde.

Der Einfluß der unterschiedlichen Sauerstoffzufuhr bei den Versuchen F3 und F4 ist auch aus dem Temperaturverlauf gut zu erkennen. Die Sauerstoffzugabe am Kesselrand zeigte beim Versuch F3 keinen direkten Einfluß auf den Temperaturverlauf (Bild 4.24). Beim Versuch F4 allerdings beeinflußt die Sauerstoffzuführung, senkrecht über der Brandpfanne, den Brandverlauf unmittelbar, wie in Bild 4.25 deutlich erkennbar ist. Jedoch ist die Beeinflussung der Brandrate

derart, daß gerade beim Versuch F4, wo die Sauerstoffzugabe am Temperaturverlauf deutlich erkennbar ist, die Brandrate geringer ist als beim Versuch F3. Die aus der Sauerstoffkonzentration berechneten Brandraten sind in folgender Tabelle 4.3 zusammengestellt:

F3		F4	
Versuchszeit /min/	Brandrate /kg Na/m <sup>2</sup> h/	Versuchszeit /min/	Brandrate /kg Na/m <sup>2</sup> h/
30 - 40	28	7 - 15	23
40 - 51	43	19 - 25	26
69 - 74	85	30 - 37	29
		42 - 48	30
Gesamtbrandrate	33.0		27

**Tab. 4.3: Brandraten der Versuche F3 und F4 für verschiedene Zeitabschnitte und Gesamtbrandrate für die ganze Versuchszeit**

Die gegen Versuchsende bei F3 aufgetretenen hohen Brandraten sind auf die Wärmerückhaltung (Isolation) an der Pfannenunterseite zurückzuführen. Die mit dieser Brandrate verbundenen hohen Temperaturen führten während des Versuches zu Schäden an verschiedenen Meßeinrichtungen und Armaturen. Im Bereich der Flammenzone kam es zu Korrosionserscheinungen an Edelstahlkomponenten. Bild 4.26 zeigt den Natriumeinlaßstutzen im Bereich knapp über der Natriumoberfläche nach dem Versuch.

#### 4.3.3. Die Ergebnisse der Versuche F5 und F6

Die Versuche F5 und F6 unterschieden sich von den Versuchen F1 - F4 insbesondere durch die Art des Natriumfüllens in die Brandpfanne. Während bei den Experimenten F1 - F4 das Natrium über eine Leitung von 50 mm Durchmesser in kurzer Zeit spritzfrei eingefüllt wurde, wurde bei den Experimenten F5 und F6 das Natrium durch eine Öffnung von nur 7 mm Durchmesser in die Brandpfanne gespritzt, so daß während des Einfüllvorganges (ca. 20 Min.) ein kombinierter

Spritz-Pool-Brand vorlag. Außerdem wurde zur Messung des Druckverlaufs das Containment in den ersten 110 min bzw. 60 min völlig geschlossen gehalten, der verbrauchte Sauerstoff wurde nicht ergänzt.

Der Brandverlauf läßt sich zunächst anhand der Temperaturen über der Brandpfanne diskutieren. In Bild 4.27 sind die Temperaturen 4.10 m über der Brandpfanne und zwar genau in der Kesselachse ( $x = 0.0$  m) und  $\pm 30$  cm daneben ( $x = +30$ cm,  $x = -30$ cm) aufgetragen. Für die Zeit des Einfüllvorgangs - ca. 20 Minuten lang - ist ein unregelmäßiger Temperaturverlauf zu erkennen, ein kurzzeitiges Maximum von fast  $150$  °C trat nur unmittelbar nach Versuchsbeginn auf. Nach Ende des Einfüllvorgangs stellt sich ein stabiler Brandverlauf ein mit einem praktisch konstanten Temperaturverlauf bis zu dem Zeitpunkt  $t \approx 110$  min, zu dem wieder Sauerstoff in den Versuchskessel nachgefüllt wurde. Danach stiegen die Temperaturen über der Brandpfanne leicht an, um nach einer weiteren Sauerstoffzufuhr bei  $t \approx 150$  min ein Maximum von ca.  $250$  °C zu erreichen. Danach fielen die Temperaturen bis zum Brandende. Wie schon frühere Versuche zeigten, stellt sich insbesondere bei kleinen Brandflächen eine ausgeprägte Konvektionsströmung ein. Trotz axialsymmetrischer Anordnung der Brandpfanne im FAUNA-Kessel ist diese Strömung nicht symmetrisch bezüglich der Kesselachse. Dies wird durch den Einfüllvorgang verursacht. Durch das Einspritzen des Natriums von oben in Richtung Pfannenrand bildeten sich an dieser Stelle vermehrt Krusten und Rückstände aus Natrium und Brandprodukten. Nach dem Einfüllvorgang waren diese Krusten höher als der Natriumspiegel, so daß die tatsächliche Brandfläche nicht mehr mit der Pfannenfläche übereinstimmte. Diese Asymmetrie läßt sich gut aus der Darstellung der Temperaturprofile über den Ort zu verschiedenen Zeitpunkten erkennen (Bilder 4.28 - 4.30).

Aus dieser Art der Darstellung wird auch deutlich, daß in der Zeit zwischen 30 und 170 min sehr gleichmäßige Temperaturenverteilungen herrschten (Bild 4.30). In diesem Zeitraum war, wie schon erwähnt, der zeitliche Temperaturverlauf praktisch konstant, was auf stabile Brandverhältnisse schließen läßt, obwohl die Sauerstoffkonzentration von 21 % auf  $< 10$  % abfiel (Bild 4.31). Ein wichtiges Versuchsziel war die Bestimmung des Druckaufbaus und des Brandverhaltens bei völlig geschlossenem Versuchskessel, d.h. keine Druckentlastung über die Abgasreinigungsanlage, aber auch keine Ergänzung des verbrauchten Sauerstoffs. Erst nach 110 min Versuchszeit, als die Sauerstoffkonzentration auf  $\sim 9\%$  abgefallen war, wurde wieder Sauerstoff zugeführt. Bild 4.32 zeigt den zeitlichen Verlauf des Kesseldrucks. Mit Beginn des Einfüllvorgangs trat eine Druckspitze von ca. 160 mbar Überdruck auf, danach traten zwei weitere Druckspitzen bei 25 min

und 30 min auf. In dem Zeitraum des gleichmäßigen Brennens zwischen 30 und 110 min fiel der Druck leicht ab.

Von besonderem Interesse ist der Verlauf der Brandrate in dem Zeitraum ohne Sauerstoffnachfuhr. Wie Bild 4.31 zeigt, ist in diesem Zeitraum die Abnahme der Sauerstoffkonzentration linear, die daraus berechnete Brandrate beträgt  $18.4 \text{ kg Na/m}^2\text{h}$ . Diese Linearität bedeutet, daß bei diesem Experiment im Bereich zwischen 21 % und 10 % Sauerstoffkonzentration die Brandrate konstant ist.

Die Lage der Thermoelemente beim Versuch F6 ist identisch mit der von Versuch F5. Dadurch kann der Brandverlauf ähnlich wie bei F5 diskutiert werden. In Bild 4.33 ist der Brandverlauf 4.10 m über der Mitte der Brandpfanne und jeweils 30 cm rechts und links daneben dargestellt. Der Einfüllvorgang dauerte wieder ca. 20 Minuten und war geprägt von einem Temperaturmaximum von fast  $300^\circ\text{C}$ . Danach stellte sich bis ca. 45 Minuten ein stabiler Brandverlauf mit ca.  $170^\circ\text{C}$  ein. Zu diesem Zeitpunkt begannen die Temperaturen stark zu fallen, um bei 60 Minuten ca.  $120^\circ\text{C}$  zu erreichen. Zu diesem Zeitpunkt wurde zum erstenmal wieder Sauerstoff zugeführt, die Temperaturen stiegen auf über  $340^\circ\text{C}$ , um dann bis zum Brandende abzufallen. Bei größer werdender Brandfläche wurde die Konvektionsströmung immer weniger ausgeprägt. Damit wurden auch die Einflüsse des Einfüllvorgangs (Krustenbildung usw.) geringer. Dies ist auch aus der Darstellung der Temperaturprofile erkennbar (Bild 4.34, 4.35). Diese Darstellung zeigt auch die relativ gleichmäßige Temperaturverteilung in dem wichtigen Versuchszeitraum bis 60 min. In diesem Zeitraum fiel die Sauerstoffkonzentration auf 4 % ab (Bild 4.36), der lineare Abfall läßt auf eine konstante Brandrate über mehr als 40 Minuten schließen, sie betrug in diesem Zeitraum  $28.0 \text{ kg/m}^2\text{h}$ .

Der Druckaufbau war zu Versuchsbeginn am größten und erreichte nach ca. 6 min ein Maximum von fast 500 mbar Überdruck. Danach fiel der Überdruck während weiterer 50 min praktisch auf Null ab (Bild 4.37).

#### **4.3.4. Die Ergebnisse des Versuches F 7**

Die beim Versuch F7 verwendete Natriumpfanne ist identisch mit der Pfanne bei den Versuchen F1, F2 und F5. Dieser Versuch F7 wird zwar in die Reihe der Versuche F1 - F6 eingeordnet, jedoch - um das Ergebnis vorwegzunehmen - kam es bei diesem Versuch nicht zu einem Natriumbrand.

Zur Versuchsdurchführung gehörte insbesondere die Herstellung einer Versuchsatmosphäre mit nur ca. 2 Vol.% Sauerstoff. Dazu wurde das FAUNA-Containment mehrmals teilevakuiert und mit Stickstoff auf Normaldruck aufgefüllt.

Mit der Pfannenheizung wurde das in fester Form befindliche Natrium geschmolzen und auf 450 °C hochgeheizt. Während des Aufheizvorgangs war die Pfanne mit einem Deckel dicht verschlossen, um eine Aerosolfreisetzung und Reaktion mit dem Restsauerstoff vor Erreichen der Solltemperatur zu verhindern. Der eigentliche Versuchsbeginn ist damit durch das Öffnen des Pfannendeckels gegeben.

Sofort nach Versuchsbeginn war ein starker Abfall der Gastemperatur in der Natriumpfanne zu beobachten (Abb. 4.38). Auch die Natriumpool-Temperatur begann sofort zu sinken (Abb. 4.39). Es konnten keinerlei sichtbare exotherme Reaktionen (Flamme, Funken) wahrgenommen werden. Es wurde lediglich eine Aerosolentwicklung beobachtet.

Bedingt durch die Konvektionsströmung durch den heißen Natriumpool stiegen die Gastemperaturen im FAUNA-Containment, 4,10 m über dem Pool, kurzfristig auf knapp 70 °C an, um dann kontinuierlich zu sinken (Abb. 4.40). Wie schon bei früheren Untersuchungen ergab sich auch hier eine symmetrische Temperaturverteilung. Das Thermoelement axialsymmetrisch über dem Pool zeigt die höchste Temperatur, die Temperaturen rechts und links davon sind tiefer und verlaufen so ähnlich, daß sie in der graphischen Darstellung kaum zu unterscheiden sind.

Die luftgetragene Natrium-Massenkonzentration wurde mit dem kontinuierlich arbeitenden Meßgerät "SAMM" [4] gemessen. Sofort nach Versuchsbeginn (Abb. 4.41) stieg die Massenkonzentration stark an und erreichte in weniger als 20 Minuten den Maximalwert von 400 mg/m<sup>3</sup>. Danach wurde ein kontinuierlicher Abfall beobachtet. Nach 150 Minuten wurden nur noch 5 mg/m<sup>3</sup> gemessen.

10 Minuten nach Versuchsbeginn, also noch innerhalb des Anstieges der Massenkonzentration, wurde die erste Messung zur Aerosolgrößenverteilung durchgeführt. Der mit Hilfe eines Anderson-Impaktors MARK III bestimmte mittlere aerodynamische Durchmesser betrug 1,1 µm. Nach 60 Minuten hatte sich der aerodynamische Durchmesser mit einem Wert von 2,0 µm fast verdoppelt.

Bei dem vorliegenden Versuch ist auch die insgesamt aus der Lache freigesetzte Natriummenge von Interesse. Da dieser Vorgang ganz wesentlich vom Dampf-

druck und damit von der Temperatur der Lache bestimmt wird, wurde zunächst der Dampfdruck als Funktion der Pooltemperaturen berechnet.

Hierzu wurde die Gleichung von Ditchburn und Gilmour [2] verwendet:

$$\log p / \text{bar} / = 6,36 - \frac{5567}{T(K)} - 0,5 \log T(K)$$

mit p: Dampfdruck in bar

und T: Pooltemperatur in Kelvin

(1)

In Abb. 4.42 ist der Dampfdruck des Natriums in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Er steigt näherungsweise exponentiell an, demzufolge ist auch die Verdampfungsrate stark temperaturabhängig. In Analogie zu obiger Gleichung kann man die Verdampfungsrate eines Flüssigmetalls in allgemeiner Form durch die Beziehung

$$\log m = A - \frac{B}{T} - 0,5 \log T \quad (2)$$

beschreiben, wobei A und B experimentell zu bestimmende stoffspezifische Parameter sind. Für die Verdampfung von Natrium in eine Argonatmosphäre von 130 °C ergab sich aus Experimenten von Schütz und Sauter [3]:

$$\log m = 8,062 - \frac{5426}{T} - 0,5 \log T$$

mit den Einheiten  $\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$  für  $\dot{m}$  und Kelvin für T. Mit dieser Beziehung wurde die insgesamt verdampfte Natriummenge für den Versuch F7 näherungsweise berechnet (Näherung, weil Gastemperatur  $< 130$  °C und  $\text{N}_2$  statt Ar). Das Ergebnis ist in Abb. 4.43 dargestellt.

Diese Abbildung zeigt deutlich, daß der überwiegende Anteil der Natriumverdampfung in den ersten 20 Minuten des Experimentes stattfindet. Nach obiger Rechnung wurden insgesamt 48 g Natrium verdampft. Dieser Wert läßt sich, zumindest näherungsweise, mit den Messungen aus dem Experiment vergleichen.

Unter der Annahme, daß sich in den ersten Minuten des Experiments noch keine wesentlichen Aerosolabbauprozesse bemerkbar machen, andererseits der

überwiegende Anteil der Verdampfung nach wenigen Minuten erreicht ist, läßt sich die maximal gemessene Aerosolmassenkonzentration auf die gesamte im Versuchskessel enthaltene Aerosolmasse hochrechnen. Dies ergibt einen Wert von 88 g Natrium. Dieser gegenüber der Verdunstungsformel erhöhte Wert ist eine Folge der niedrigeren Gastemperatur, die eine verstärkte Konvektion und damit auch Verdampfung bewirkt.

Das verdampfte Natrium wird in der sauerstoffarmen Atmosphäre teilweise oxidiert, ohne daß es zu einer sichtbaren exothermen Reaktion kommt. Dies bestätigen auch durchgeführte Kleinversuche, daß nämlich eine "echte" Entzündung (Brand) in Atmosphären mit weniger als 4 % O<sub>2</sub> nicht eintritt.

#### 4.3.5. Aerosolverhalten bei den Versuche F 1 - F 7

Während die Messungen zur Branddynamik keine besonderen Schwierigkeiten bereiten und auch weitgehend automatisch durchgeführt werden können, sind die Messungen zur Aerosolphysik gerade während des Brandes - bedingt durch die hohe Massenkonzentration und die Druckschwankungen im Versuchskessel - wesentlich problematischer. Sowohl der CNC\*) (zur Messung der Teilchenzahl) als auch die Massenwaage\*) (zur Bestimmung der Massenkonzentration) arbeiten während des Brandes an ihrer (oberen) Nachweisgrenze. Diese Problematik trifft auch für die Geräte zu, die große Meßbereiche haben, wie z.B. Impaktor \*) und Zentrifuge \*).

Deshalb war die Verbesserung der Aerosolmeßtechnik, so daß sie auf Natriumbrände anwendbar ist, ebenfalls ein Versuchsziel dieser Brandversuche. So war beim Versuch F1 die Erprobung des Konzentrationsmeßgerätes "SAMM" [4] von besonderer Bedeutung. Das Gerät bestimmt nach Auflösen der Aerosole in einer wäßrigen Lösung den Natriumgehalt naßchemisch mit Hilfe einer Natriumelektrode. Nach geringfügigen Verbesserungen arbeitete das Gerät während sämtlicher Versuche verläßlich und einwandfrei.

-----  
\*) CNC: Condensation Nuclear Counter "Rich 100", Environment One Corporation  
Impaktor: Andersen Mark III  
Massenwaage: Particle Mass Monitor 3200 Am Thermosystems Inc.  
Zentrifuge: Aerosol-Spiral zentrifuge nach Prof. Stöber

Durch die Reaktion verdampften Natriums mit Sauerstoff in der Gasphase und anschließender Kondensation bzw. Koagulation des Reaktionsproduktes entstehen große Mengen Aerosole, die zum Teil in das Containment transportiert werden, zum Teil in die Lache sedimentieren. Die Aerosolerzeugungsrate hängt somit von der Temperatur der Lache, dem Sauerstofftransport (wie die Brandrate) und vom Gastransport über der Lache ab. Durch Bilanzierung der Brandrückstände nach den Versuchen wurden folgende Aerosolerzeugungsraten bestimmt:

Von dem luftgetragenen Natrium wurden ca. 40 % an den Wänden (ca. 65 % der Gesamtfläche) abgelagert, während 60 % auf den Boden sedimentierten.

Der in Bild 4.44 und 4.45 gezeigte Verlauf der Massenkonzentration für die Versuche F1 bis F4 wurde kontinuierlich unter Verwendung von "SAMM" gemessen, die Kontrollmessungen mit anderen Methoden zeigen dabei eine sehr gute Übereinstimmung. In Abb. 4.46 ist für einen Versuch der Verlauf der Massenkonzentration im linearen Zeitmaßstab für vier verschiedene Bestimmungsmethoden aufgezeichnet, nämlich mit SAMM, durch kontinuierliches Auswaschen der Aerosole in drei hintereinander angeordneten Waschflaschen, durch Probenahme auf Filtern mit anschließender Na-Bestimmung und Wägung und durch Messung mit Hilfe einer Massenwaage von TSI (insbesondere bei niedrigeren Konzentrationen). Die Auswertung und der Vergleich der Meßergebnisse zeigen, daß die Na-Massenkonzentration mit einer Genauigkeit von  $\pm 10\%$  bestimmt werden kann.

Trotz der unterschiedlichen Versuchsbedingungen zeigen die Versuche ein fast identisches Verhalten der Massenkonzentration. Typisch für Versuche dieser Art ist das schnelle Anwachsen der Massenkonzentration zu Brandbeginn und die hohe Konzentration von über  $10 \text{ g/m}^3$  während des Brandes. Nach Brandende geht die Massenkonzentration in einen logarithmischen Abfall über, so daß nach ca. 50 Stunden der Wert der Massenkonzentration um fast 5 Zehnerpotenzen abgenommen hat.

Wie schon erwähnt, ist die Bestimmung der Aerosolparameter während des Brandes besonders problematisch. So zeigen zwei unabhängige Messungen deutliche Unterschiede, obwohl die Probenahme zur gleichen Zeit begann und die verwendeten Geräte - Impaktor (I) und Zentrifuge (Z) - beide den aerodynamischen Durchmesser erfassen (siehe auch Bild 5.4).

Beim Vergleich dieser Werte ist auch die bei den beiden Geräten unterschiedliche Meßdauer zu berücksichtigen. Aufgrund des kleinen Durchsatzes und der Forderung, daß durch Titration nachweisbare Mindestmengen abgeschieden werden, ergibt sich bei der Zentrifuge eine Meßdauer von 30 Minuten. Dagegen sind beim Impaktor weniger als 10 Minuten Meßzeit ausreichend. Abb. 5.4 zeigt die während der Versuche gemessenen Partikeldurchmesser in Abhängigkeit von der Versuchszeit. Deutlich ist hier die Streuung der einzelnen Werte, insbesondere während des Natriumbrandes zu erkennen. Betrachtet man zusammengehörige Zentrifugen- und Impaktorwerte, so läßt sich bedingt durch die schwierigen Bedingungen eine Meßgenauigkeit für den aerodynamischen Partikeldurchmesser von  $\pm(30 - 50) \%$  ableiten.

Während eines Natriumbrandes liegt der mittlere aerodynamische Durchmesser bei allen Versuchen annähernd übereinstimmend bei 2 - 3  $\mu\text{m}$  und nimmt nach Ablauf des Brandes stetig ab, um nach ca. 20 Stunden etwa 1  $\mu\text{m}$  zu erreichen.

#### 4.4. Zusammenfassung und Diskussion

Es wurden sieben Versuche auf Flächen von 2 m<sup>2</sup>, 5 m<sup>2</sup> und 12 m<sup>2</sup> durchgeführt. Folgende Tabelle 4.7 faßt die wichtigsten Bedingungen und die gemessenen mittleren Brandraten zusammen: Bei den Versuchen F1 - F4 wurden die Sauerstoffkonzentrationen in den angegebenen Grenzen konstant gehalten.

Experiment	Fläche m <sup>2</sup>	Natrium kg	Sauerstoff Konz. %	Pooltiefe cm
F1	2	150	19-22	9
F2	2	250	17-25	15
F3	12	500	15-25	5
F4	12	500	18-25	5
F5	2	350	10-21	21
F6	5	350	4-21	9
F7	2	120	22	7

Tab. 4.7: Zusammenfassung der Versuchsbedingungen

Bei den Versuchen F5 und F6 wurde bis zum Erreichen der unteren Grenze der Sauerstoffkonzentration kein Sauerstoff zugeführt.

Beim Versuch F7 wurde eine Versuchsatmosphäre von 2 % O<sub>2</sub> eingestellt, um das

Verhalten eines Natriumpools in sauerstoffarmer Umgebung zu untersuchen. Der zeitliche Verlauf eines Natriumflächenbrandes läßt sich wie folgt beschreiben:

**Phase 1:** Mit dem Beginn des Einfüllvorganges Entzündung des Natriums, Brandbeginn und Aufheizen der Kesselatmosphäre auf ein der Brandfläche entsprechendes Niveau. Diese Phase dauert einige Minuten.

**Phase 2:** Relativ gleichmäßiges Brandverhalten, Gleichgewicht zwischen Wärmefreisetzung aus dem Natriumbrand und Wärmeabfuhr durch die Kesselwand. Eine Beeinflussung dieser Phase 2 ist zum Beispiel durch Sauerstoffzufuhr (Versuch F4) möglich.

**Phase 3:** Das Brandende ist geprägt durch langsames Absinken der Gastemperatur durch Nachlassen der Natrium-Luft-Reaktion. Je nach Pooltiefe kann die Verkrustung der Pooloberfläche oder der (fast) völlige Verbrauch des Natriums die Ursache für das Brandende sein.

Die Kinetik eines Natriumpoolbrandes wird im wesentlichen durch zwei Prozesse beherrscht: Erstens die Diffusion des Sauerstoffs durch die Flammenzone an die Natrium-Metalloberfläche, um dort mit dem metallischen Natrium zu Natriumoxid zu reagieren, und zweitens die Verdampfung von Natrium in die Flammenzone oberhalb der Natriumoberfläche. Die Reaktion des Sauerstoffs mit dem flüssigen Natrium verursacht die Krustenbildung auf der Metalloberfläche, während das verdampfende Natrium innerhalb der Flammenzone mit dem Sauerstoff reagiert und dort Natriumoxid bildet, was sofort kondensiert und als Aerosol in den Gasraum emittiert wird. Allerdings tritt bei einer starken Verdampfung des Natriums eine so hohe Aerosolerzeugung auf, daß nur ein Teil des Aerosols gasgetragen bleibt. Der größere Teil sedimentiert in kurzer Zeit auf die Natriumoberfläche und verstärkt die Krustenbildung.

Die Natriumbrandrate wird also im wesentlichen durch Prozesse, die die Diffusion des Sauerstoffs an die Natriumoberfläche beeinflussen, bestimmt sowie durch die Temperatur des Natrium an der Oberfläche des Pools, die im wesentlichen die Natriumverdampfungsrate bestimmt. Die Diffusion des Sauerstoffs an die Metalloberfläche kann sowohl durch die Temperatur des Gases als auch durch Gasströmungen zusätzlich beeinflußt werden. Hohe Temperaturen und Gasströmungen innerhalb des Brandraumes können die Natriumbrandrate erhöhen.

Da die Temperatur im Containment (FAUNA-Containment) im wesentlichen durch die Natriumbrandfläche bestimmt wird (dies ist aus den Abbildungen der

Experimente F1 und F2 bzw. F3 und F4 deutlich zu erkennen) sind in geschlossenen Räumen bei konstanter Sauerstoffzufuhr höhere Brandraten für größere Brandflächen zu erwarten, die allerdings einen bestimmten Wert nicht überschreiten. Ein Vergleich der mittleren Brandraten für die Versuche F3 und F4 mit den Versuchen F1 und F2 bestätigt diese Aussage.

Aus den Temperatur- und Strömungsmessungen zu den Poolbrandversuchen läßt sich ein gravierender Unterschied zwischen den Flächenbränden von 2 m<sup>2</sup> und den von 12 m<sup>2</sup> erkennen. Bei den 2 m<sup>2</sup>-Bränden wurde ein kaminähnlicher Auftrieb der Luft oberhalb der Brandfläche mit den relativ hohen Temperaturen in einer vergleichsweise langsamen Abwärtsbewegung der Containmentluft in den Randzonen des Gefäßes beobachtet. Dies führte während des Brandes zu einer annähernd konstanten Luftbewegung innerhalb des FAUNA-Containments. Im Gegensatz hierzu war während der 12 m<sup>2</sup>-Versuche ein annähernd konstantes Temperaturprofil über den ganzen Querschnitt des FAUNA-Containments gemessen. Für diesen Flächenbrand ist eine nicht konstante Gaswalze innerhalb des Containments anzunehmen. Rechnungen mit Hilfe eines turbulenten Strömungsmodells [6] bestätigen diese Strömungsmessungen.

Der Einfluß der Gasströmung innerhalb des Containments auf die Brandrate ist schwer abzuschätzen. Grundsätzlich ist davon auszugehen, daß eine hohe Turbulenz innerhalb der Gasatmosphäre die Natriumbrandrate erhöht. Einen Hinweis hierfür liefern die Ergebnisse des Brandexperimentes F4, bei dem ein Gasstrom direkt auf die Natriumbrandfläche geleitet wurde, was zu einer deutlichen Erhöhung der Natriumbrandrate geführt hat.

Die gemessenen vergleichsweise niedrigen Brandraten während und kurz nach dem Einfüllvorgang des Natriums sind somit zu erklären: Erstens durch die noch relativ niedrigen Temperaturen im Reaktionscontainment und zweitens durch die noch zu Beginn des Brandes vergleichsweise ruhige Containmentatmosphäre. Hinzu kommt, daß die Temperatur des eingelassenen Natriums unter der Gleichgewichtstemperatur während des Natriumbrandes lag. Diese Gleichgewichtstemperatur wird durch die verbrauchte Verdampfungswärme und die gebildete Reaktionswärme bestimmt. Wie die Versuche gezeigt haben, liegt diese Gleichgewichtstemperatur grundsätzlich unter der Siedetemperatur des Natriums von 880 °C. Allerdings werden an der Oberfläche des Natriums durchaus Temperaturen zwischen 800 und 850 °C erreicht. Da der Dampfdruck von Metallen erst nahe dem Siedepunkt ansteigt, hat die Natriumtemperatur insbesondere oberhalb 750 °C einen entscheidenden Einfluß auf die Brandrate. Aufgrund der guten

Wärmeleitfähigkeit von Natrium wird die Reaktionswärme von der Oberfläche des Natrium relativ schnell in den gesamten Pool verteilt, so daß diese Wärmeabfuhr in den Pool auch zu der vergleichsweise geringen Natriumbrandrate zu Beginn der Experimente beiträgt. Die Pooltiefe und die mit zunehmender Tiefe verbundene Wärmeabgabe über die Oberflächen hat somit auch einen entscheidenden Einfluß auf die gemessenen mittleren Brandraten. Bei den Versuchen F2 und F5 war die Pooltiefe im Vergleich zu den anderen Versuchen relativ groß. Bei diesen Versuchen wurden die niedrigsten mittleren Brandraten gemessen.

Bei einem Natriumpoolbrand mit größerer Pooltiefe wird das Ende des Natriumbrandes durch die Verkrustung der Pooloberfläche bestimmt, obwohl ein Großteil des Natriums noch nicht oxidiert ist.

Obwohl Brände auf gleicher Brandfläche nicht völlig gleichartig verlaufen, so lassen sich doch einige Schlußfolgerungen ziehen:

- Größere Brandflächen führen in geschlossenen Räumen zu größeren Brandraten. Dies ist eine Folge der hohen Wärmefreisetzung und der damit verbundenen stärkeren Aufheizung und Turbulenz des Gases über der Brandfläche und einer schnellen Temperaturerhöhung im Natriumpool.
- Herrschen in geschlossenen Räumen keine extremen Bedingungen hinsichtlich Temperatur und Gasströmung, so bildet sich im Verlauf eines Natriumbrandes eine Gleichgewichtstemperatur im Natrium aus, die einerseits gegeben ist durch die Reaktionsenthalpie und die Wärmeabfuhr durch Strahlung, Konvektion und Leitung aus dem Natriumpool. Diese Gleichgewichtstemperatur liegt zwischen 750 und 830 °C.
- Liegt die Anfangstemperatur des auslaufenden Natriums unterhalb dieser Gleichgewichtstemperatur, so nimmt die Brandrate mit der Branddauer zu.
- Bei größerer Pooltiefe wird das Brandende durch eine Verkrustung der Pooloberfläche bestimmt. Bei Bränden flacher Pools wird das Natrium nahezu vollständig zu Natriumoxid bzw. -peroxid oxidiert. Nahezu unabhängig von der Pooltiefe und der Natriumoberfläche betrug die Branddauer bei den hier diskutierten Brandversuchen ca. 120 Minuten.
- Unter normalen Containment-Bedingungen werden über die Branddauer gemittelte Brandraten zwischen 20 und 35 kg Na/m<sup>2</sup> h ermittelt, wobei der hohe Wert großflächigen und flachen Natriumpoolbränden zuzuordnen ist,

während der niedrige Wert sich auf Natriumbrände kleinerer Flächen mit großer Pooltiefe bezieht. Höhere Brandraten sind nicht zu erwarten.

- Die Brandrate hängt im wesentlichen von dem Sauerstofftransport an die Brandfläche und der Gastemperatur in der Umgebung des Brandes ab. Es wird damit die in den Natrium-Brandcodes SOFIRE II und NABRAND verwendete Beziehung

$$B(t) = B_0 \cdot \frac{n}{n_0} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1/2}$$

bestätigt. In dieser Gleichung bedeutet  $B_0$  die Anfangsbrandrate

$n$  = Anzahl der Sauerstoffmole zur Zeit  $T$

$n_0$  = Anzahl der Sauerstoffmole zur Zeit  $T_0$

$T$  = Gastemperatur zur Zeit  $t$

$T_0$  = ursprüngliche Gastemperatur zur Zeit  $t_0$

Die experimentell zu bestimmende Anfangsbrandrate  $B_0$  wurde durch diese Experimente zu  $B_0 = 22 \pm 3 \text{ kg Na/m}^2 \text{ h}$  bestimmt.

- Durch außergewöhnliche Einflüsse (hohe Temperaturen im Natrium infolge isolierter Brandfläche, hohe Gastemperaturen und hohe Gasgeschwindigkeiten) können sich kurzfristig (5 min bei Versuch F 3) höhere Brandraten ergeben, die jedoch nicht als typisch anzusehen sind.
- Ein brennender Natriumpool zeigt auch bei abnehmender Sauerstoffkonzentration (Versuche F5 und F6) noch eine "normale" Brandrate (Reaktionsrate).
- In einer Atmosphäre von 2 %  $\text{O}_2$  zeigt ein heißer Natriumpool keine exotherme Reaktion. Es ist lediglich eine Natrium-Aerosolfreisetzung aus der Lache zu beobachten.
- Aus den oben abgeleiteten Gesetzmäßigkeiten für Natriumpoolbrände lassen sich für die Minimierung der Auswirkung von Natriumbränden die folgenden Maßnahmen ableiten:
  1. Vermeidung jeglicher forcierter Ventilation im Brandraum
  2. Vermeidung von Sauerstoffzufuhr
  3. Entzug von Wärme durch gute Wärmeleitung sowohl aus dem Natriumpool als auch aus der Atmosphäre

Neben der Thermodynamik bei großflächigen Natriumbränden sind die aerosolphysikalischen Auswirkungen von Interesse. Der Verlauf der Aerosolmassen-

konzentration ist für alle Versuche typisch: nach einem relativ steilen Anstieg der Konzentration in den ersten 5 - 10 Minuten des Brandes bleibt diese Konzentration während des Brandes annähernd konstant. Während bei den kleineren Bränden maximale Massenkonzentrationen von etwa  $10 \text{ g Na}_2\text{O}_2/\text{m}^3$  gemessen wurden, lagen die entsprechenden Werte bei großen Brandflächen bis zum Faktor 5 höher. Nach dem Brand wurde ein exponentieller Abfall der Massenkonzentration beobachtet. Innerhalb von ca. 10 Stunden fiel die Konzentration um 5 Größenordnungen auf etwa  $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$  ab. Ein Vergleich der Massenkonzentrationsverläufe bestätigt die aus der Aerosolphysik abzuleitende Tatsache, daß aufgrund der Abscheideprozesse höhere Konzentrationen (F3) schneller abfallen als geringe (F1, F2). Bei den Versuchen wurde die Massenkonzentration der Aerosole sowohl mit einem kontinuierlich arbeitenden Gerät SAMM [4] als auch durch Auswaschen der Aerosole in mehreren hintereinander geschalteten Waschflaschen, durch Filterabscheidung und auch bei niedrigen Konzentrationen mit der Partikelmassenwaage bestimmt. Diese verschiedenen Methoden zeigen eine gute Übereinstimmung. Die Aerosole bestanden ausschließlich aus  $\text{Na}_2\text{O}_2$ . Die gemessenen (massenbezogenen, aerodynamischen) Durchmesser lagen für alle Versuche zwischen  $1,4 \text{ }\mu\text{m}$  und  $3 \text{ }\mu\text{m}$  während des Brandes, wobei die Durchmesser gegen Brandende anwachsen, um dann nach Brandende wieder abzunehmen.

## **5. Natriumbrandaerosole**

### **5.1. Charakterisierung von Natriumbrandaerosolen**

#### **5.1.1. Einleitung**

Die Charakterisierung nuklearer Aerosole ist entscheidend für die Berechnung des radiologischen und chemischen Quellterms nach Reaktorunfällen. Bei Störfällen in schnellen Brutreaktoren bedeuten Natriumbrände eine intensive Freisetzung von Natriumbrandaerosolen, die aus verschiedenen Natriumverbindungen bestehen und daher auch unterschiedliche physikalische Eigenschaften haben können. Bei derartigen Störfällen kann angenommen werden, daß die Radioaktivität an Natriumpartikel gebunden ist. Daher ist die Kenntnis der Aerosolerzeugungsrate, der physikalischen und chemischen Beschaffenheit und des Verhaltens dieser Aerosole in geschlossenen Containments, aber auch in der Atmosphäre von großer Wichtigkeit, insbesondere für die Abschätzung der Folgen derartiger Reaktorunfälle. Im Rahmen der im vorigen Kapitel beschriebenen Natriumpoolbrände wurden Versuche zur Aerosolcharakterisierung und zum Aerosolverhalten durchgeführt. Für spezielle Versuche stand ein Aerosoltestkreislauf zur Verfügung, in dem die chemische Umsetzung der Aerosole unter verschiedenen atmosphärischen Bedingungen untersucht wurde.

Im Rahmen eines EG-Programmes wurden an diesem Testkreislauf von verschiedenen Expertengruppen aus Europa gleichzeitig die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Partikeln gemessen, so daß ein umfangreicher Überblick über die Eigenschaften von Natriumbrandaerosolen vorhanden ist.

Die Versuchsanlage mit dem sich anschließenden Testkreislauf wurde bereits in Kapitel 3 eingehend beschrieben. Im Folgenden sollen die bei den verschiedenen Versuchen erzielten Ergebnisse zusammengefaßt werden.

#### **5.1.2. Freisetzung und physikalische Eigenschaften von Natriumbrandaerosolen**

##### **Partikelfreisetzung**

Bei Natriumbränden entstehen durch die Reaktion des verdampften Natriums mit Sauerstoff in der Gasphase und der anschließenden Kondensation bzw. Koagulation des Reaktionsproduktes große Mengen an Aerosolen, die zum Teil in das Containment transportiert werden, zum Teil aber auch in die Lache zurücksedimentieren. Die Aerosolerzeugungsrate hängt somit von der Temperatur des Na-

triums und dem Sauerstoff- bzw. Gastransport an die Brandfläche ab. Durch Bilanzierung der Brandrückstände nach Versuchen in geschlossenen Containers konnten die folgenden Aerosolerzeugungsraten (dies ist die pro m<sup>2</sup> und Stunde freigesetzte Aerosolmasse gemessen als kg Natrium) für Poolbrände ermittelt werden:

**Tab. 5.1: Aerosolfreisetzung bei Natriumpoolbränden**

Versuch Nr.	mittlere Na-Temp. °C	Brandrate kg Na/m <sup>2</sup> ·h	Aerosolfreisetzungsrates kg Na/m <sup>2</sup> ·h
F 2	620	21	2
F 3	700	33	9
F 4	680	27	4

Für Natriumpoolbrände kann also angenommen werden, daß zwischen 10 und 30% des brennenden Natriums als Aerosol freigesetzt wird [7].

Ein Natriumbrand ist eine Gasphasenreaktion zwischen dem verdampften Natrium und dem Sauerstoff der Atmosphäre. Die Größe dieser primär gebildeten Aerosole ist unbekannt. Die Lebensdauer der Primäraerosole ist relativ kurz, da sie aufgrund der hohen Massenkonzentration sofort koagulieren. Im Rahmen des FAUNA-Programms wurden Impaktormessungen nur wenige Zentimeter oberhalb der Flammenzone durchgeführt. Hier konnte angenommen werden, daß das Alter der Partikeln etwa 5 Sekunden betrug. Der aerodynamische Massendurchmesser dieser Aerosole unterschied sich nur geringfügig von dem eines gealterten Aerosols und lag zwischen 1 und 2 µm. Die Agglomeration vollzieht sich offensichtlich bereits in der Flammenzone des Natriumbrandes.

Eine wichtige Größe bei der Berechnung des radiologischen Quellterms nach Reaktorstörfällen ist der Durchmesser der Partikeln. Im Rahmen eines EG-Programmes wurde von mehreren Aerosolgruppen in Europa an dem Aerosolkreislauf der FAUNA-Anlage der Durchmesser und die Größenverteilung der Natriumbrandaerosole unter verschiedenen atmosphärischen Bedingungen gemessen [8, 9]. An diesen Meßvergleichen nahmen 6 Gruppen aus 5 Ländern der Europäischen Gemeinschaft teil. Für die Messungen wurden Impaktoren, Aerosolzentrifugen, Spektrometer und eine Sedimentationsbatterie eingesetzt. Für die optische Größenverteilung wurden ein Thermalpräzipitator und ein Elektronen-

mikroskop eingesetzt. Die meisten Instrumente wurden auch zur Bestimmung der Aerosolmassenkonzentration benutzt. Darüber hinaus wurde die Massenkonzentration mit dem automatisch arbeitenden naßchemischen Instrument SAMM [4] (vgl. Abschnitt 4) registriert. Die Größenverteilungen wurden bei verschiedenen Massenkonzentrationen gemessen.

**Tab. 5.2: Aerodynamic Mass Median Diameter (AMMD) und Standardabweichung  $\sigma_g$  beim EG-Meßvergleich ( $S_\sigma$  und  $S_{AMMD}$  sind die relativen Abweichungen).**

mittlere Massenkonzentration mg Na/m <sup>3</sup>	mittlerer AMMD ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_g$	$S_\sigma$ (%)	$S_{AMMD}$ (%)	Anzahl der Instrumente
50	1.42	1.83	28	18	5
	1.75	3.27	47	31	6
	1.41	2.89	56	28	7
200	1.01	1.91	27	23	7
	0.96	1.91	25	17	8
	1.02	1.91	27	21	9
200	1.21	1.85	11	16	10
	1.20	1.84	10	20	5
	1.14	1.88	19	16	6
	1.46	1.74	16	16	5
400	1.40	1.83	11	19	10
	1.54	2.02	19	14	6
	1.54	2.00	27	14	6
1200	1.50	1.76	9	13	9
	1.89	1.90	18	16	10
	1.75	1.89	17	18	9

Aus der Tabelle 5.2 können die gemessenen mittleren aerodynamischen Massendurchmesser sowie deren Verteilung abgelesen werden, und zwar bei den verschiedenen Tests, die sich insbesondere durch Massenkonzentration und relative Feuchte im Aerosolloop unterschieden. Aus den Versuchen kann geschlossen werden, daß jedes Instrument mit einer Genauigkeit von  $\pm 20\%$  während der Versuche gemessen hat. Aus den Meßwerten kann gefolgert werden, daß der mittlere aerodynamische Durchmesser der Partikeln leicht mit der Massenkonzentration ansteigt. Der AMMD lag bei den Messungen zwischen 1,2 und 1,9  $\mu\text{m}$ . Der  $\sigma$ -Wert der Verteilung lag bei einem Fehler von ca. 50 % zwischen 1,7 und 2,0. Aufgrund dieser Messungen konnte nicht klar entschieden werden, ob eine Lognormale Aerosolverteilung vorlag. Die Bestimmung der Partikelgröße mit Hilfe elektronenmikroskopischer Aufnahmen lieferte einen Aerosoldurchmesser, der

sehr gut mit dem aerodynamischen Partikeldurchmesser übereinstimmte. Hieraus läßt sich schließen, daß die Partikeln annähernd sphärisch geformt waren.

Die oben beschriebenen Versuche wurden ausschließlich bei freier Luftzufuhr durchgeführt, so daß anzunehmen ist, daß die Partikeln im wesentlichen aus Natriumkarbonat bestanden.

**Tabelle 5.3: Aerosol Massen- und Anzahlkonzentrationen**

Zeit [h]	Massenkonzentration [g Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /cm <sup>3</sup> ]	Anzahlkonzentration [P/cm <sup>3</sup> ]	berechneter Durchmesser ( $\rho = 2.805$ ) [ $\mu\text{m}$ ]	gemessener Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	Methode
0.5	$4.59 \cdot 10^{-6}$	$2.8 \cdot 10^5$	2.26	2.75	Impaktor
2.3	$6.1 \cdot 10^{-6}$	$2.5 \cdot 10^5$	2.57	2.05	Zentrifuge
"	"	"	"	3.70	Impaktor
"	"	"	"	0.52	Spektrometer
4.5	$4.29 \cdot 10^{-7}$	$3.0 \cdot 10^4$	2.16	1.80	Zentrifuge
"	"	"	"	2.08	Impaktor
27.0	$3.39 \cdot 10^{-9}$	$3.0 \cdot 10^3$	0.93	0.70	Zentrifuge

In der Tabelle 5.3 wurde für einen in einem geschlossenen Containment durchgeführten Brandversuch die gemessene Aerosolmassenkonzentration und die Partikelzahl zusammengestellt. Aus beiden Größen wurde ein volumenäquivalenter Durchmesser berechnet. Hierbei wurde angenommen, daß das Aerosol zu 100 % aus Natriumperoxid bestand und daß die Aerosole kompakte und runde Struktur besaßen. Für die Dichte wurde die Materialdichte  $\rho = 2,805 \text{ g/cm}^3$  angenommen. Der berechnete und gemessene Durchmesser stimmen relativ gut überein. An abgeschiedenen Natriumkarbonatpartikeln wurde eine Partikeldichte von 70 % der Materialdichte ermittelt [10].

Bisher ist es nicht gelungen, von Natriumoxydaerosolen elektronenmikroskopische Aufnahmen herzustellen, da aufgrund der chemischen Affinität von Natriumperoxyd zu Wasser eine aufwendige Präparationstechnik notwendig wäre. Basierend auf den Aufnahmen von Natriumkarbonataerosolen wird eine überwiegend runde Form der Aerosole, wie bereits oben beschrieben, angenommen. Ein Maß für die Abweichung der Partikeln von der Kugelgestalt hinsichtlich ihres dynamischen Verhaltens ist der dynamische Formfaktor

$$\kappa = \frac{D_M \cdot C(D_M)}{D_P \cdot C(D_P)}$$

$D_P$  = beweglichkeitsäquivalenter Durchmesser

$D_M$  = massenäquivalenter Durchmesser

mit der auf den massenäquivalenten bzw. beweglichkeitsäquivalenten Durchmesser bezogenen Cunningham-Korrektur  $C$ . Dieser Formfaktor  $\kappa$  wurde mit Hilfe einer Aerosolzentrifuge zu  $\kappa = 1,1$  für Natriumperoxydaerosole bestimmt. Dies bedeutet aerodynamisch eine nur geringfügige Abweichung von der Kugelgestalt. Während der Formfaktor  $\kappa$  die Abweichung der Partikel von der Kugelgestalt bezogen auf das aerodynamische Verhalten der Aerosole beschreibt, berücksichtigt der Koagulationsformfaktor  $F$  die Abweichung der Partikel von der Kugelgestalt bezogen auf das Koagulationsverhalten der Aerosole. Dieser Koagulationsformfaktor ist nur sehr schwer der Messung zugänglich. Wie später beschrieben wird, wurde er aus dem Vergleich des gemessenen und berechneten Aerosolverhaltens in geschlossenen Containments ermittelt. Gute Übereinstimmung erhält man beim Ansatz des Formfaktors  $F = 2 - 3$ . Der Einfluß des Koagulationsformfaktors auf den Verlauf der Massenkonzentration nach einem Natriumbrand ist allerdings nur gering. Koagulationsformfaktoren wurden von Zeller [11] für nukleare Aerosole bestimmt.

### 5.1.3. Aerosolverhalten in geschlossenen Containments

Der Verlauf der Aerosolmassenkonzentration ist für alle Natriumbrandversuche bei geschlossenem FAUNA-Containment ähnlich: Nach einem relativ steilen Anstieg der Konzentration in den ersten 5 bis 10 Minuten des Brandes bleibt diese hohe Konzentration während des Brandes annähernd konstant. Bei kleinflächigen Bränden wird eine maximale Konzentration von ca.  $10 \text{ g Na}_2\text{O}_2/\text{m}^3$  gemessen. Bei großen Brandflächen lagen die entsprechenden Werte um den Faktor 5 bis 10 höher. Nach dem Brand wurde ein exponentieller Abfall der Massenkonzentration beobachtet. Innerhalb von ca. 10 Stunden fiel die Konzentration um 5 Größenordnungen auf etwa  $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$  ab.

Mit Hilfe des Aerosolcodes PARDISEKO, Version 3b [12] wurde der während einiger Versuche gemessene Verlauf der Aerosolmassenkonzentration nachgerechnet. Für verschiedene angenommene Koagulationsformfaktoren ( $F$ -Werte) wurde der Verlauf der Massenkonzentration mit Meßwerten verglichen (Abb. 5.1). Die Aerosolmassenkonzentration wird insbesondere während des

Brandes unterschätzt, und zwar etwa um den Faktor 2. Dagegen erhält man eine ausgezeichnete Übereinstimmung, wenn unter Verwendung der gemessenen Partikeldaten der Verlauf der Massenkonzentration nach Brandende berechnet wird. Der Einfluß der Koagulationsformfaktoren ist gering, desgleichen die Berücksichtigung der Gravitationskoagulation als weiterer Aerosolprozeß. Die größte Abweichung vom experimentellen Meßwert ist während des Brandes zu erkennen. Hier liegt wohl auch die größte Unsicherheit der Eingabedaten.

Der Aerosolquellterm wird aus einer örtlichen Bilanzierung des abgelagerten Aerosols ermittelt. Die Freisetzungsrates wird dann mit der Natriumtemperatur während des Brandes korreliert.

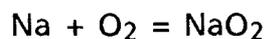
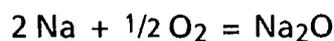
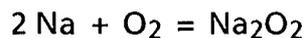
Aerosolcodes gehen von einer gleichmäßigen Mischung der Partikel im Containment aus. Während des Brandes treten insbesondere bei großen Brandflächen erhebliche Konzentrationsunterschiede im Containment auf, die z.T. auf die hohe Quellrate, aber auch die starken Turbulenzen zurückzuführen sind. Es zeigt sich, daß bei Nachrechnungen großflächiger Lachenbrände die Aerosolkonzentrationen stärker überschätzt werden als bei kleineren Bränden. Aus diesem Grunde wurde in der weiterentwickelten Version 4 des Aerosolcodes PARDISEKO der Einfluß von turbulenten Strömungen auf das Aerosolverhalten mit berücksichtigt. Die in PARDISEKO 4 [13] benötigten quantitativen Turbulenzdaten werden mit Hilfe des Rechenprogrammes CONVEC berechnet, das aus einem Berechnungsverfahren für Naturkonvektion von A.K. Rastogi und W. Rodi beruht und das im LAF I weiterentwickelt wurde. Aus Abb. 5.2 ist erkennbar, daß bei Berücksichtigung der Aerosolabscheideprozesse durch turbulente Koagulation die starken zeitlichen Änderungen der Massenkonzentration insbesondere kurz nach Beendigung des Brandes durch PARDISEKO 4 relativ gut wiedergegeben werden. Dies gilt insbesondere, wenn die Natriumbrandfläche klein ist gegenüber der Grundfläche des Containments. In Abb. 5.3 wurde die Aerosolmassenkonzentration nach einem Natriumspraybrand berechnet und mit den experimentellen Werten verglichen. Die Übereinstimmung ist sehr gut. Die zeitliche Änderung des mittleren massenäquivalenten Durchmessers konnte ebenfalls mit dem Rechencode PARDISEKO ermittelt und mit Meßwerten verglichen werden (vgl. Abb. 5.4). Berücksichtigt man, daß die Meßgeräte den aerodynamischen Partikeldurchmesser bestimmen und daß der Meßfehler relativ groß ist, so ist eine gute Übereinstimmung zu festzustellen.

Insbesondere zur Berechnung der Auswirkungen von Natriumbrand-Störfallszenarien ist die Genauigkeit von Aerosolcodes ausreichend.

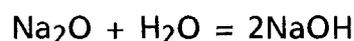
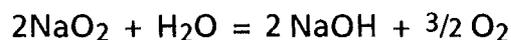
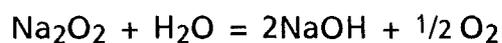
## 5.1.4. Chemische Eigenschaften von Natriumbrandaerosolen

### 5.1.4.1. Chemische Reaktionen

In normaler Atmosphäre verbrennt Natrium überwiegend zu Natriumoxid und Natriumperoxid. Das Natriumperoxid wird durch ein Überangebot an Natrium, z.B. auf einer Natriumoberfläche zu Natriumoxid reduziert. Unter extremen Bedingungen (Temperaturen über 400 °C) kann bei hohem Sauerstoffangebot auch Natriumsuperoxid entstehen. Der überwiegende Anteil des Natriumbrandaerosols besteht in Wasser- und CO<sub>2</sub>-freier Atmosphäre aus Natriumperoxid. Erst in O<sub>2</sub>-reduzierter Atmosphäre wird ein merklicher Anteil an Na<sub>2</sub>O beobachtet. Grundsätzlich wird wegen des hohen Überschusses an O<sub>2</sub> gegenüber anderen Spurengasen zuerst Natriumoxid gebildet.



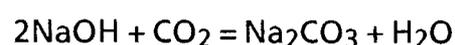
Im allgemeinen setzt sich bei einem Natriumbrand das primär gebildete Natriumoxid mit dem Wasserdampf in der Luft zu Natriumlauge um.



Bei Überschuß von Wasserdampf nehmen die Natriumoxidpartikeln so lange Wasser auf, bis der Wasserdampfdruck über der sich bildenden NaOH-Lösung gleich dem der umgebenden Luft ist. Für die Geschwindigkeit der Umwandlung von Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Partikeln in NaOH-Aerosole wird die Diffusion des Wasserdampfes an die Teilchen als der geschwindigkeitsbestimmende Schritt angesehen. Unter Zugrundelegung der Fuchs-Sutuginschen Theorie hat D. Cooper [14] die Reaktionszeiten berechnet, während der 0,1 - 10 µm große Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Partikeln bei 30 % relativer Feuchte in NaOH-Partikeln umgewandelt werden (Tab. 5.4).

Für relative Feuchten größer als 35 % wird das Reaktionsprodukt in Tropfenform vorliegen, unterhalb 35 % rel. Feuchte als Feststoffpartikel. Die Umwandlung vollzieht sich in Bruchteilen von Sekunden (rechnerisch).

Natronlauge-Partikeln reagieren mit dem CO<sub>2</sub> der Luft und bilden Natriumkarbonat-Aerosole.



**Tabelle 5.4: Umwandlungsgeschwindigkeit von Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>- in NaOH-Partikeln**

Teilchendurchmesser ( $\mu\text{m}$ )	Reaktionszeit (s)
0,1	$6 \cdot 10^{-6}$
0,3	$3,1 \cdot 10^{-5}$
1,0	$2,8 \cdot 10^{-4}$
3,0	$2,3 \cdot 10^{-3}$
10,0	$2,6 \cdot 10^{-2}$

Natriumkarbonat kann bis zum Dekahydrat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ) Kristallwasser aufnehmen. Bei der Karbonatbildung ist zwischen Reaktionen in der flüssigen Phase und in festen Agglomeraten von NaOH zu unterscheiden. Bei der Karbonatbildung in Tröpfchen kann die Reaktion entweder durch die Gasdiffusion zum Tropfen oder durch die Diffusion des Reaktanten im Tropfen bestimmt werden. Clough und Garland haben die Gasphasendiffusion nach der Fuchs'schen Theorie der Tropfenverdampfung und die Diffusion von  $\text{CO}_2$  im Tropfen nach Crank errechnet. Die Diffusion im Tropfen ist der reaktionsbestimmende Vorgang. Innerhalb weniger Sekunden sollten danach Natriumhydroxidtröpfchen im Karbonat umgewandelt sein. Die Umwandlung fester Natriumhydroxidpartikeln verläuft nach Abschätzung von Cooper [14] etwa um den Faktor 10 langsamer.

#### 5.1.4.2 Versuche zur chemischen Umwandlung von Natriumbrandaerosolen

Die Versuche zur chemischen Umwandlung von Natriumbrandaerosolen wurden in der FAUNA-Anlage und dem an sie angeschlossenen Meßkreislauf durchgeführt. Die technischen Daten dieses Loops sind im folgenden noch einmal kurz zusammengestellt.

- Gasdurchfluß: maximal 20 000 m<sup>3</sup>/h
- maximale Gastemperatur: 75 °C
- relative Feuchte: bis zu 80 % bei 75 °C
- Looplänge: ca. 60 m
- Rohrdurchmesser: 700 mm

Die Natriumbrandaerosole wurden durch einen Natriumbrand in einer Pfanne von ca. 40 cm Durchmesser erzeugt. Probenahmen erfolgten in verschiedenen Abständen von der Aerosolquelle. Neben der Probenahme unmittelbar an der Brandstelle wurden Partikeln mit einem Alter von 60 bzw. 260 Sekunden

gezogen. An diesen Probenahmestellen wurde jeweils die Massenkonzentration und die größenabhängige chemische Zusammensetzung der Partikeln analysiert. Dabei wurde die Natriumhydroxid-, Natriumkarbonat- und Natriumhydrogenkarbonat-Konzentration im Partikel bestimmt. Die Versuche wurden bei relativen Feuchten zwischen 3 und 50 % durchgeführt (Abb. 5.5).

Der Einfluß der relativen Feuchte auf die Partikelgröße kann der Tabelle 5.5 entnommen werden. Die Partikeln haben einen Durchmesser von 1 µm bei relativen Feuchten <20% und ca. 2 µm bei relativen Feuchten >50%. Die Ursache hierfür ist, daß Natriumhydroxidpartikeln bei relativen Feuchten >35% tropfenförmig vorliegen, d.h. diese Partikeln enthalten große Mengen von Wasser.

**Tab. 5.5: Partikeldurchmesser bei unterschiedlichen Feuchten**

Exp.	Relative Feuchte [%]	Massenkonzentration [mgNa/m <sup>3</sup> ]	mittlerer aerodynamischer Massendurchmesser nach			
			5 Sekunden		260 Sekunden	
			d	σ <sub>g</sub>	d	σ <sub>g</sub>
1	5	400	-	-	0.9	4.7
2	20	250	1.1	3.9	1.1	3.3
3	50	200	2.1	3.2	2.0	3.3
4	56	250	1.9	3.8	1.9	3.5
5	56	130	-	-	1.6	4.2

Weiterhin bestätigen die Messungen, daß Natriumhydroxidpartikeln sehr schnell in Natriumkarbonatpartikeln umgewandelt werden. Der Natriumkarbonatanteil von Partikeln mit einem aerodynamischen Massendurchmesser von 2 µm wurde bei unterschiedlichen relativen Feuchten und nach verschiedenen Zeiten gemessen. Die Umwandlung von Natriumhydroxid in Natriumkarbonat ist bei 50 % relativer Feuchte um den Faktor 5 schneller als bei 5 % relativer Feuchte (vergl. Abb. 5.5). Bei hohen relativen Feuchten sind nach ca. 260 Sekunden nahezu sämtliche Natriumhydroxidpartikeln in Natriumkarbonatpartikeln umgewandelt. Bei niedrigen relativen Feuchten um 5 % sind dagegen nach 260 Sekunden nur 20 % des Natriums in Natriumkarbonat umgewandelt. In Übereinstimmung mit den theoretischen Überlegungen werden trockene Partikeln wesentlich langsamer als nasse Partikeln in Karbonat umgesetzt.

Es hat sich gezeigt, daß bei allen Experimenten die Reaktionsraten wesentlich niedriger sind als die nach der Theorie vorhergesagten Umwandlungsraten. Dies hat seine Ursache darin, daß nasse Teilchen an der Oberfläche zu Karbonat umgewandelt werden und dann dort eine feste Kristallstruktur bilden. Das Innere dieser Partikeln enthält weiterhin Natriumhydroxid. Die Umwandlung dieses Natriumhydroxid wird durch die umgebende Kristallstruktur der Partikeln verzögert. In diesem Fall sollten kleinere Partikeln einen höheren Anteil an Natriumkarbonat enthalten als große Partikeln. Diese Annahme zu erhärten wurde ein Zwei-Stufen-Impaktor mit Natriumbrandaerosolen verschiedenen Alters beladen und die Partikeln auf ihren Natriumkarbonatanteil hin untersucht. Aus der Abb. 5.6 ist zu ersehen, daß Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser um  $0,5 \mu\text{m}$  einen höheren Karbonatanteil haben als Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser von  $1 \mu\text{m}$ . Gealtertes Aerosol bei hohen relativen Feuchten enthält 20 % Natriumhydrogen-Karbonat. Die Untersuchungen haben weiterhin gezeigt, daß deponierte Natriumkarbonat-Partikeln eine Porosität von etwa 30% haben.

## 5.2. Wirkung von Aerosolen auf Anlagenkomponenten

### 5.2.1. Experimente an Umluftkühlern

#### 5.2.1.1 Einleitung

Wesentliche Auslegungsmerkmale des Containmentsystems des SNR 300 sind aus der Analyse des Bethe-Tait-Störfalls abgeleitet. Hierbei wird angenommen, daß der Reaktordoppeltank birst und das Kühlmittel sowie Teile des Cores in die Bodenkühleinrichtung gelangen. Dieser angenommene Störfall führt zur Aktivitätsfreisetzung, zu Kühlmittleckagen und zur Freisetzung von Nachwärme in das Containmentsystem.

Aerosolphysikalische und thermodynamische Folgen dieser Freisetzung geben die wesentlichen Randbedingungen für die Betriebstüchtigkeit der Maschinen und elektrotechnischen Systeme des Containments, insbesondere auch für die, die in der Nach-Bethe-Tait-Phase betrieben werden müssen. Zur Sicherstellung der Nachwärmeabfuhr in der NBT-Phase ist ein aktiver Wärmeentzug aus dem äußeren Containment vorgesehen. Diese Funktion erfüllen die Umluftkühlanlagen in dem belüfteten Bereich und in dem inertisierten Bereich des äußeren Containments. Die dominante Stellung, die diese Kühlsysteme im Sicherheitskonzept des SNR 300 einnehmen, fordert den experimentellen Nachweis der Funktionstüchtigkeit unter störfallspezifischen Betriebsbedingungen. Der Nachweis der Funktionstüchtigkeit dieser Kühler wurde durch Experimente in der FAUNA/ULK-Anlage in Zusammenarbeit mit der Firma Interatom durchgeführt [15].

Primäres Ziel der Untersuchungen war es also, sowohl für den inertisierten als auch für den belüfteten Bereich des SNR 300-Containments die vorgesehenen Kühleinrichtungen auf ihre Funktionstüchtigkeit hin zu testen bzw. Optimierungsänderungen vorzunehmen. Der Funktionsnachweis wurde an Testkomponenten im Maßstab 1:4 im Vergleich zu den Originalkomponenten durchgeführt. Der Nachweis der Funktionstüchtigkeit der Kühler und der Gebläse konzentrierte sich auf folgende Störungen:

- a) Zusetzen der Kühler durch Beaufschlagung mit dem beim Natriumbrand entstehenden Reaktionsprodukten wie Natriumoxid-, Natriumperoxid-, Natriumhydroxid- und Natriumkarbonat-Aerosolen und der daraus resultierenden Minderung der Kühlerkapazität mit Auswirkung auf die Wärmeabfuhr.

- b) Beeinträchtigung der Gebläse (wie z.B. elektrische Kurzschlüsse, Unwucht, Zersetzen von Metallteilen), damit verbundene Abnahme der Förderleistung und somit Minderung der Transportkapazität mit negativen Auswirkungen auf die Wärmeabfuhr.

Das Programm wurde in 2 Phasen durchgeführt. In der ersten Phase wurden die für den belüfteten Bereich vorgesehenen Komponenten getestet. In der zweiten Phase wurden die für den inertisierten Bereich vorgesehenen Komponenten getestet.

#### 5.2.1.2 Versuchsbedingungen und Versuchsaufbau

Die Bedingungen für die Versuche sowohl der Phase 1 als auch der Phase 2 entsprechen den thermodynamischen und aerosolphysikalischen Daten, die sich aus den Berechnungen für den Bethe-Tait-Störfall für den SNR 300 ergaben. Für die Versuche in der ersten Phase betrug der Sollwert für die Aerosolmassenkonzentration etwa  $200 \text{ mg/m}^3$  und der Volumenstrom durch die Kühlkomponenten ca.  $11\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ . Die Trägergastemperatur lag bei  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , die relative Feuchte bei 40 - 50 %. Die Versuchsdauer wurde mit 100 Stunden festgelegt (vergl. Tabelle 5.6). In der zweiten Versuchsphase (inertisierter 1b-Bereich) sollte die Aerosolkonzentration bei  $300 \text{ mg Na/m}^3$  in den ersten 50 Stunden und  $200 \text{ mg Na/m}^3$  in den 50 Stunden danach betragen. Der Volumenstrom war mit  $25\,000 \text{ m}^3$  annähernd doppelt so groß wie in der ersten Versuchsphase. Die Trägergastemperatur betrug hier  $69 \text{ }^\circ\text{C}$ , die relative Feuchte 15 - 20 %. Die gesamte Versuchsdauer betrug bei diesen Versuchen 200 Stunden, wobei die ersten 100 Stunden mit und die zweiten 100 Stunden ohne Aerosolbeaufschlagung durchgeführt wurden. Die nach den Rechnungen zu erwartenden Aerosolkonzentrationen im inneren und äußeren Containment sind in der Abb. 5.7 dargestellt. Man kann dieser Darstellung entnehmen, daß in den ersten 100 Stunden die Konzentration der Aerosole im äußeren Containment von etwa  $180 \text{ mg/m}^3$  auf  $10 \text{ mg/m}^3$  abgefallen ist. Es wird angenommen, daß sich die in das äußere Containment gelangenden Aerosole langfristig in die Bereiche 2 und 1b verteilen. Dann kann dieser Aerosolkonzentrationsverlauf trotz unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung der Aerosole auch für den Bereich 1 b repräsentativ angenommen werden.

**Tab. 5.6: Versuchsbedingungen für die Tests zur Untersuchung der Komponenten Axialgebläse und Glattrohrkühler (inertisierter Bereich 1b) und Rippenkühler (belüfteter Bereich 2).**

	Bereich 1b		Bereich 2
1. Gasdurchsatz	~25 000 m <sup>3</sup> /h		10 000 m <sup>3</sup> /h
2. Gastemperatur	69 °C vor dem Kühler 35 °C hinter dem Kühler		ca. 50°C
3. Kühlwassertemperatur	28 °C Eintritt 32 °C Austritt		
4. Feuchte des Fördergases	30 gH <sub>2</sub> O/kg Gas, bezogen auf die - Eintrittstemperatur (69°C) 15 % RF - Mischtemperatur (40 °C) 60 % RF - Austrittstemperatur (35 °C) 80% RF		40 - 50 % RF
5. Gesamte Versuchszeit mit Aerosolbeaufschlagung	100 h		100 h
6. Versuchszeit nach Beendigung der Aerosolbelastung	ca. 100 h		100 h
	<b>Phase 1 (0-50 h)</b>	<b>Phase 2 (50-100 h)</b>	
7. Aerosolzusammensetzung	NaOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> u. NaOH
8. Mittlere Aerosolkonzentration	500 mg/m <sup>3</sup> NaOH	500 mg/m <sup>3</sup> Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O	150 - 250 mg/m <sup>3</sup> als Na
9. Na-Anteil am Aerosol	290 mg/m <sup>3</sup> Na	190 mg/m <sup>3</sup> Na	
10. CO <sub>2</sub> -Gehalt im Fördergas	praktisch 0	330 ppm	erste 10 h: 330 ppm danach: <30 ppm

Die chemische Zustandsform der Aerosole ergibt sich aus den möglichen Leckagewegen und den chemischen Reaktionspartnern im Reaktorcontainment. In der Anfangsphase nach Störfallbeginn kann man davon ausgehen, daß die im inneren Containment entstandenen Aerosole durch Druckausgleichsprozesse direkt in den angrenzenden Bereich 1b (belüftet) und in den Bereich 2 gelangen. Dabei reagieren sie beim Durchtritt durch den Beton mit dem vorhandenen Wasser bzw. mit Wasserdampf der Containmentatmosphäre zu Natriumhydroxid. Abschätzungen zeigen, daß immer genügend Wasser zur vollständigen Reaktion der Natriumoxidaerosole zu Natriumhydroxid vorhanden ist. Nach Beendigung

der Druckausgleichsphase (nach ca. 50 Stunden) kommt es durch den Reventingbedingten Druckaufbau im belüfteten Bereich des äußeren Containments zu Rückleckagen in den inertisierten Bereich 1b. Dabei werden aufgrund der Gaszusammensetzung überwiegend Natriumkarbonataerosole eingetragen. Das Verhalten der Kühlsysteme bei Beladung durch beide möglichen Aerosolzustandsformen, nämlich Natriumhydroxidaerosole und Natriumkarbonataerosole, war also zu testen.

Der Versuchsaufbau kann der Abb. 5.8 entnommen werden. Die Natriumaerosole wurden kontinuierlich in der FAUNA-Anlage durch Natrium-Spraybrand erzeugt. Hierzu wurde das heiße Natrium von einem der Vorratsbehälter in den FAUNA-Kessel gedrückt und durch eine Düse in die Atmosphäre versprüht. Zur Gewährleistung des ständigen Natriumdurchflusses über einige Tage hinweg war unter anderem eine gute Beheizung des gesamten Rohrleitungssystems von ganz besonderer Bedeutung. Das durch die Düse in den FAUNA-Behälter versprühte Natrium verbrannte zu fast 100 % und bildete somit zu 100 % Natriumoxidaerosole.

Durch das Gebläse in den Kreislauf angesaugt, passierte das Trägergas den Erhitzer, den Befeuchter und wurde durch den Kühler gedrückt. Entsprechend der Aerosolmassenkonzentration vor dem Gebläse und nach dem Kühler wurde das Trägergas über einen Bypass direkt oder über den FAUNA-Kessel dem Kühler zugeführt. Aerosolablagerung an den Komponenten und auch sonstige Verluste wurden durch den Brandkessel ausgeglichen und dem Kühler so stets die geforderte Aerosolkonzentration zugeleitet. Der Testkühler wurde beiderseits über 2 Wasserkreisläufe, einen geschlossenen (Sekundärseite) und einen offenen (Primärseite) gekühlt. Seine Kühlkapazität wurde über die Temperaturdifferenz  $\Delta T = T_E - T_A$  ( $T_E$  = Wassereintritt,  $T_A$  = Wasseraustritt) kontrolliert. Die Instrumentierung des Versuchskreislaufes ist aus dem Blockdiagramm (Abb. 5.8) ersichtlich. Die Natriummassenkonzentration wurde mit dem Meßgerät SAMM (vgl. Kap. 3) bestimmt. Dieses Gerät arbeitet naßchemisch mit Hilfe einer Natriumionenelektrode. Mit Hilfe des SAMM-Gerätes wurde ein optisch arbeitendes Aerosoldichte-Meßgerät geeicht (Fa. SICK, Type RM 41/01), um die Massenkonzentration im Versuchskreislauf zu steuern. Die technischen Angaben zu den Kühlerkomponenten sind der Tabelle 5.7 zu entnehmen.

Tab. 5.7: Spezifikationen der Kühler

Luftkühler (Wärmetauscher)	1b-Bereich	2-Bereich
Fa. GEA, Typ	18-1400/885/ 3-ET2-FEG1-D5	13-1250/832-2, 5-ETB-FE 41-D5
Luftmenge	25.000 m <sup>3</sup> /h	10.000 m <sup>3</sup> /h
Wärmeleistung	215 868 kcal/h	53747 kcal/h
Luftwiderstand	45 mm WS	14,3 mm WS
Luft Eintritt	69.3 °C	50.5 °C
Luft Austritt	35.0 °C	31.0 °C
Kühlwassereintritt	28.0 °C	ΔT = 4 °C
Kühlwasseraustritt	32.0 °C	ΔT = 4 °C
Wassermenge	-	10,8 m <sup>3</sup> /h
Wasserwiderstand	-	6440 mm WS

### 5.2.1.3 Versuchsergebnisse

#### 5.2.1.3.1 Versuche für den belüfteten Bereich

Bei diesen Versuchen wurde die Funktionstüchtigkeit eines Rippenkühlers, der für den Einsatz in den Bereich 2 vorgesehen war, getestet. In den ersten 35 Stunden lagen die Versuchsergebnisse innerhalb der Sollwerte. Sowohl der Differenzdruck am Kühler als auch der Gasdurchsatz lagen bei den Sollwerten. Die Aerosolkonzentration schwankte hier zwischen 330 mg Na/m<sup>3</sup> und 150 mg Na/m<sup>3</sup> als Natriumkarbonat bzw. Natriumhydroxid. Ab der 35. Stunde zeigte die am Kühler gemessene Temperaturdifferenz, daß der Kühler nicht mehr die volle Kühlleistung erbrachte. Die Temperaturdifferenz auf der Sekundärseite des Wärmetauschers zeigte eine abnehmende Tendenz, was eine Verschlechterung des Wirkungsgrades bedeutete. Der Grund hierfür war, daß zu diesem Zeitpunkt die bereits auf dem Kühler abgelagerten Aerosole die Funktion des Kühlers negativ beeinträchtigten. Der Differenzdruck am Kühler stieg über den maximal zulässigen Wert von 80 mm Wassersäule an und das Gebläse konnte nicht mehr den maximalen Gastrom fördern. Der Versuch wurde bei höherer relativer Feuchte weitergeführt. Dies führte weitgehend zu einem Auswaschen der am Kühler haftenden Aerosole. In der Folge fiel der Differenzdruck am Kühler ab und der Gasdurchsatz stieg wieder an. Auch die Temperaturdifferenz auf der Sekundärseite des Wärmetauschers stieg über den Sollwert von  $\Delta T = 4^{\circ}\text{C}$ . Ein Reduzieren der relativen Feuchte hatte zur Folge, daß der Differenzdruck wieder

steil anstieg, ebenfalls erreichte der geförderte Massenstrom nicht mehr den Sollwert. Der Versuch wurde unterbrochen. Der Einfluß der relativen Feuchte auf das Ablagerungsverhalten der Partikeln auf der Kühleroberfläche gab den Hinweis für die folgende Verbesserung am Kühler:

Am Kühler wurde eine Wassereinspritzanlage angebracht, die automatisch diskontinuierlich die Kühleranströmfläche besprühte. Es ergab sich in weiteren Versuchen, daß für die Sicherstellung der Funktionstüchtigkeit des Rippenkühlers ein Wasservolumenstrom von 3 m<sup>3</sup>/h erforderlich war. Die mit diesem verbesserten Kühlsystem durchgeführten Versuche führten zu den folgenden Ergebnissen:

- Der Gasdurchsatz blieb während der gesamten Versuchszeit konstant beim Sollwert von 10 000 m<sup>3</sup>/h.
- Der Differenzdruck am Kühler überschritt nie den kritischen Druck von 75 mm Wassersäule.
- Die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  auf der Sekundärseite des Wärmetauschers blieb während der gesamten Versuchszeit konstant.

Somit kann geschlossen werden, daß der Wirkungsgrad des Kühlers unbeeinträchtigt blieb.

Der Kühler wurde über 118 Stunden Versuchszeit hinweg getestet, wobei die Aerosolkonzentration mit 150 mg Na/m<sup>3</sup> als Natriumkarbonat bzw. Natriumhydroxid annähernd konstant blieb. Der mittlere aerodynamische Partikeldurchmesser wurde während der gesamten Versuchszeit mit etwa 1 µm gemessen. Gemittelt über die gesamte Versuchszeit betrug die Aerosolablagerung in Gebläse, Kühler und Rohrleitung ca. 2,5 % der gesamten Aerosolmenge, die durch diese Komponenten hindurchgeführt wurde.

#### **5.2.1.3.2 Versuche für den inertisierten Bereich**

Für diese Versuche wurde der Kreislauf umgerüstet. Die Änderungen am Kreislauf betrafen im wesentlichen das Austauschen von Gebläse und Kühler. Erste Untersuchungen zeigten, daß der Glattrohrkühler unwesentlich mit Ablagerungen behaftet war. Dagegen war das Axialgebläse nach einigen Stunden nicht mehr funktionsfähig, da seine Flügelräder (Material: Legierung auf Aluminiumbasis) infolge der korrosiven Wirkung der Natronlauge- bzw. Natriumoxidaerosole in Zusammenhang mit der hohen Temperatur von ca. 70 °C stark beschädigt waren. Weiterhin zeigte sich, daß die Natronlauge auch auf die elektrische Verdrahtung der Gebläsemotoren korrosiv eingewirkt hatte. Diese Erfahrungen machten Änderungen am Gebläse notwendig: Die Laufräder wurden für einen zweiten Versuch aus Stahl gefertigt.

Während des Beladungsversuches stieg der Differenzdruck über dem Kühler leicht an und der Durchsatz fiel um maximal 10 % ab. Während der ersten 50 Stunden wurden im wesentlichen Natriumhydroxydaerosole, in den restlichen 50 Stunden natriumkarbonathaltige Aerosole den Testkomponenten zugeführt (vgl. Abb. 5.9). Während der ersten Phase des Versuches waren keine nennenswerten Beläge auf den Kühlerrohren zu erkennen. Hier fiel der gemessene Gasdurchsatz lediglich um 2,5 % ab. Während der zweiten Versuchsphase, d.h. in der Nachlaufphase von ca. 100 Stunden, fiel der Motor der zweiten Stufe des Gebläses durch Kurzschluß aus. Der Kreislauf wurde bis zur Öffnung mit einem einzigen Gebläse weiterbetrieben. Der Durchsatz betrug während dieser Zeit 10 000 m<sup>3</sup>/h. Aus den darauffolgenden Untersuchungen des Motors ging hervor, daß der Ausfall nicht aufgrund von Aerosolablagerungen oder eventueller Laugenangriffe hervorgerufen wurde.

An der Anströmfläche des Glattrohrkühlers waren Aerosolablagerungen zu erkennen, die aber offensichtlich während des Betriebes die Leistung des Kühlers nur unwesentlich beeinträchtigt hatten. Unterhalb der Kühlrohre war eine Schlammschicht zu beobachten, die sich durch Abrutschen der Ablagerungen der ersten Rohrreihe und Ablagerungen aus dem Kreislauf gebildet hatte. Auf der Abstromseite des Kühlers war kein Belag sichtbar.

#### **5.2.1.4 Zusammenfassung und Schlußfolgerung**

In enger Zusammenarbeit mit der Firma Interatom wurden eine Reihe von Versuchen durchgeführt, um die original SNR 300-Komponenten unter Bethe-Tait-Störfallbedingungen zu testen. Bei allen Versuchen konnte festgestellt werden, daß unter den eingestellten Testbedingungen die Funktionstüchtigkeit der Gebläse des Radial- und des Axialgebläses über die gesamte Versuchsdauer voll erhalten blieb. Die Funktionstüchtigkeit des Rippenkühlers, der für den Bereich 2 des SNR 300 (belüftetes Containment) vorgesehen war, konnte durch Einbau einer Wassereinspritzvorrichtung sichergestellt werden. Der Glattrohrkühler für den Bereich 1b - das ist der inertisierte Bereich - zeigte während der Versuche keine bemerkenswerte Minderung seiner Leistung (vgl. Tab. 5.8).

**Tabelle 5.8: SNR 300-Komponententests unter Störfallbedingungen**

Komponenten	Störfall Szenario	Testbedingungen	Testergebnisse
Radialgebläse	Wärme- Abfuhr aus Containment nach Bethe- Tait Störfall	belüftetes Containment 10.000 m <sup>3</sup> /h 50°C, 40% r.h. 0-100 h: 500 mg/m <sup>3</sup> Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 100-200 h: 0 mg/m <sup>3</sup>	keine Ertüchtigung notwendig
Rippenkühler	Wärme- Abfuhr aus Containment nach Bethe- Tait Störfall	belüftetes Containment 10.000 m <sup>3</sup> /h 50°C, 40% r.h. 0-100 h: 500 mg/m <sup>3</sup> Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 100-200 h: 0 mg/m <sup>3</sup>	Ertüchtigung: Diskontinuierliches Besprühen des Kühlers mit 3 m <sup>3</sup> Wasser/h
Axialgebläse	Wärme- Abfuhr aus Containment nach Bethe- Tait Störfall	inertisiertes Containment 25.000 m <sup>3</sup> /h, 70 °C, 15% r.h., 0-50 h: 500 mg/m <sup>3</sup> NaOH 50-100 h: 500 mg/m <sup>3</sup> Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 100-200 h: 0 mg/m <sup>3</sup>	Ertüchtigung: - Gebläse Flügelrad - Motorwicklung
Glattrohr- Kühler	Wärme- Abfuhr aus Containment nach Bethe- Tait Störfall	inertisiertes Containment 25.000 m <sup>3</sup> /h 70°C, 15% r.h. 0-50 h: 500 mg/m <sup>3</sup> NaOH 50-100 h: 500 mg/m <sup>3</sup> Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 100-200 h: 0 mg/m <sup>3</sup>	Keine Ertüchtigung notwendig

## 5.2.2. Test des Reventingsystems

### 5.2.2.1. Einleitung

Das Containmentsystem des SNR 300 ist so aufgebaut, daß bei einem Störfall mit Natriumbrand Leckagen aus dem äußeren Containment nicht unkontrolliert entweichen können. Das wird dadurch erreicht, daß aus dem Ringspalt - dem sog. Reventingspalt - zwischen äußerem Containment und Umhüllung für eine bestimmte Zeit während des Störfalles Luft abgepumpt und in das äußere Containment zurückgefördert wird (siehe Abb. 5.10). Diese Vorgehensweise erfordert eine störungsfreie Funktion des Reventinggebläses unter Störfallbedingungen. Im Rahmen des SNR 300-Genehmigungsverfahrens wurde deshalb beschlossen, das Reventingsystem unter Störfallbedingungen zu testen. Das Versuchsprogramm wurde gemeinsam mit der Firma Interatom durchgeführt.

### 5.2.2.2 Versuchsbedingungen und Versuchsaufbau

Bei der Festlegung der Versuchsbedingungen wurde der Unfallablauf, der Aerosolherzeugungsmechanismus, der Aerosoltransport, die chemische Zusammensetzung des Störfallaerosols sowie der Zustand der Luft im Reventingspalt berücksichtigt. Um ein möglichst umfangreiches Bild über die Funktion des Reventingsystems zu erhalten, wurden 3 Versuche durchgeführt, wobei hauptsächlich die Aerosolmassenkonzentration im Reventingspalt und die Betriebszeit des Gebläses variiert wurden. In Tab. 5.9 sind die Versuchsbedingungen im einzelnen aufgelistet, sie basieren auf verschiedenen Störfallannahmen und -abläufen [16].

Tab. 5.9: Versuchsbedingungen

Betriebszustand bzw. -bedingung	Versuch 1		Versuch 2		Versuch 3	
	Phase 1 m. Aerosol	Phase 2 o. Aerosol	Phase 1	Phase 2	Phase 1	Phase 2
Aerosolmassenkonzentration im Reventingspalt	370 mg/m <sup>3</sup>	---	1050	---	1500	---
Gebläseförderleistung	800-1100 m <sup>3</sup> /h	1100	1000-1200	1200	1250-1350	1350
Betriebszeit h	150	150	38	150	150	150
Differenzdruck mbar	80-120	110-120	80-120	120	110-160	160
Drehmoment mkp	4-6	4-5	4-7	4-5	4-7	4-5
Temperatur vor Gebläse	25-30	20-23	28-32	20-23	33-35	20-23
Temperatur hinter Gebläse °C	40-42	33-38	40-45	33-38	45-48	33-38
rel. Feuchte, %						
r.F. 1	60-70	60-70	60-70	60-70	60-75	60-75
r.F. 2	---	60-70	---	60-70	70	70
r.F. 3	---	---	---	---	70	70

Der Versuchsaufbau ist schematisch in Bild 5.11 dargestellt. Um möglichst zweifelsfreie Aussagen über die Funktion zu erhalten, wurde das gesamte System im Originalmaßstab 1:1 aufgebaut; dies gilt für alle Komponenten und die Leitungsführung, der Reventingspalt hatte die Originalbreite von 300 mm.

Das Störfallaerosol wurde mit Hilfe eines Natriumspraybrandes erzeugt. Die im SNR 300-Containment sicherlich auftretende "Alterung" und die davon abhängi-

ge chemische Zusammensetzung des Aerosols, gegeben durch den Transport aus dem Containment in den Reventingspalt, wurde im Versuch erreicht, indem das Aerosol nicht unmittelbar nach der Entstehung in den Reventingspalt geleitet wurde. Die aerosolhaltige Luft wurde zunächst durch das 4 m<sup>3</sup> große Reaktionsgefäß geleitet. Mit dem CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O in der Förderluft fand hier die gewünschte "Alterung" durch die Reaktion zu Natriumkarbonat statt. Am Eintritt in den Reventingspalt wurde die Aerosolmassenkonzentration und die chemische Zusammensetzung gemessen. Die Bedingungen für den Na-Spraybrand wurden so eingestellt, daß die in Tab. 5.9 angegebenen Konzentrationen erreicht wurden. Am Ende der Teststrecke wurde zur Rückhaltung des Na-Aerosols ein kontinuierlich arbeitender Naßabscheider installiert. Durch Messung des Abscheidegrades und der Bestimmung der im Washwasser abgeschiedenen Natriummenge und durch die Messung der in das Gesamtsystem gegebenen Na-Menge konnte die im Kreislauf abgelagerte Natriummenge bestimmt werden. Zusätzlich zu dieser Gesamtbilanz wurde nach jedem Versuch das Reventingsystem zerlegt und die Ablagerungen in den einzelnen Komponenten und Anlagenteilen bestimmt.

### 5.2.2.3 Versuchsergebnisse

Die Gebläseförderleistung wurde während der Versuche gemessen. Während der Beaufschlagung mit Aerosol wurde eine Zunahme der Förderleistung festgestellt. Die Erklärung dieses Effektes liegt darin, daß bei dem verwendeten Drehkolbengebläse die fertigungsbedingten Ungenauigkeiten des Spaltes zwischen Drehkolben und Gehäuse durch die Ablagerungen von Aerosol ausgeglichen wurden und der gesamte Spalt durch Ablagerungen verkleinert wurde.

Nach Beendigung der Versuche wurde das Gebläse zerlegt, um die Auswirkungen der Beaufschlagung mit Aerosol zu untersuchen und eine quantitative Analyse der Ablagerungen vorzunehmen. Dabei wurden keinerlei Beschädigungen an Drehkolben und Gehäuse festgestellt. Das abgelagerte Material war durch die Reibung zwischen Kolben und Gehäuse verfestigt; es konnte jedoch mechanisch entfernt werden.

Vor dem Zusammenbau wurden alle Flächen an Kolben und Gehäuse mit verdünnter Salzsäure gereinigt und glattgeschliffen. Nach der Montage wurde der Luftspalt zwischen Kolben und Gehäuse genau vermessen. Das Gebläse war damit wieder voll funktionsfähig.

Neben der Kenntnis des Verhaltens und Zustands des Gebläses während und nach dem Versuch war die Wirkung und der Verbleib des zugegebenen Aerosols im

Rohrleitungssystem von Interesse. Deshalb wurde die in das System geförderte Aerosolmenge und die aus dem System entweichende Menge gemessen. Dies erfolgte durch Massenkonzentrationsmessungen im Reventingspalt und durch Bestimmung des Wirkungsgrades der Abgasreinigungsanlage und des darin zurückgehaltenen Natriums. Diese Messungen machten bereits während der Versuche deutlich, daß nur ein geringer Teil des zugegebenen Aerosols in der Anlage abgelagert wurde (siehe Abb. 5.12). Diese Darstellung läßt keinerlei Rückschlüsse auf die örtliche Verteilung der Ablagerungen zu. Es ist jedoch zu erkennen, daß in der Anfangsphase der Beladung mit Aerosol große Mengen abgelagert wurden, die sich dann teilweise wieder gelöst haben.

Die örtliche Verteilung der Ablagerungen wurde durch Zerlegen und Reinigen einzelner Teile des gesamten Systems bestimmt. In Abb. 5.13 ist dargestellt, welche einzelnen Teile analysiert wurden und welche Mengen Natrium sich jeweils abgelagert hatten. Die Summe dieser Ablagerungen stimmt unter Berücksichtigung der hier möglichen Genauigkeit gut mit den in Abb. 5.12 dargestellten Werten überein. Es wurde festgestellt, daß alle Ablagerungen im Verhältnis zu den Rohrquerschnitten klein sind, d.h. eine Funktionsbeeinträchtigung des Reventingsystems etwa durch verstopfte Rohrleitungen nicht zu erwarten ist. Die Ablagerungen bestanden alle aus pulvrigem, lose anhaftendem Material und waren leicht zu entfernen.

#### **5.2.2.4 Zusammenfassung**

Die im Rahmen des Genehmigungsverfahrens für den SNR 300 gemeinsam mit Interatom durchgeführten Untersuchungen ergaben zu keinem Zeitpunkt Funktionsstörungen des Reventingsystems. Die Ergebnisse können auf den SNR 300 direkt übertragen werden, da die Versuche mit Originalkomponenten durchgeführt wurden und das gesamte System bezüglich Größe und Leitungsführung im Maßstab 1:1 getestet wurde.

### 5.3. Filtration von Natriumbrandaerosolen

#### 5.3.1. Einleitung

Die bei Natriumbränden entstehenden Aerosole stellen aufgrund ihrer toxischen und chemisch aggressiven Eigenschaften eine Umweltbelastung dar. Insbesondere aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften sind zur Rückhaltung von Natriumbrandaerosolen oftmals herkömmliche Abscheideverfahren auszuschließen.

Unterschiedliche Filteranlagen wurden getestet und zum Teil weiterentwickelt, um Abgasströme von Natriumbrandaerosolen zu reinigen [17]. Für die Filtration begrenzter Aerosolmengen wurden Glasfaserfilter und Sandbettfilter eingesetzt. Für nahezu unbegrenzte Aerosolmengen wurden Naßwäscher und elektrostatische Abscheider getestet. Glasfaser und Sandbettfilter wurden in einem geschlossenen Gasloop untersucht, während die Naßwäscher und elektrostatischen Abscheider in einem offenen Loop getestet wurden. Die Standzeiten für die Filteranlagen schwankten zwischen einigen Stunden und einigen Tagen. Die Natriumbrandaerosole wurden durch kontinuierliche Natriumspraybrände oder durch Natriumpoolbrände erzeugt.

#### 5.3.2. Glasfaserfilter

Käufliche Glasfaserfilter von HEPA-Qualität (CEAG F2) mit Metallrahmen wurden mit Natriumoxidaerosolen beladen. Die Aerosolmassenkonzentration lag rohgasseitig zwischen 0,6 und 6 g/m<sup>3</sup>. Die Anströmgeschwindigkeit betrug 1,7 m/min. Mit zunehmender Beladung stieg der Differenzdruck über dem Filter sehr schnell an, von 0,2 auf 3 kPa. Dieser Maximalwert entsprach je nach relativer Feuchte einer spezifischen Beladung von 20 bis 100 g/m<sup>2</sup>. Der Abscheidegrad betrug bis zu einer spezifischen Beladung von 50 g Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> 99,98%. Ein höherer Differenzdruck als 3 kPa am Filter führte zu einer Zerstörung des Filtermaterials.

Die Abstandshalter, Dichtung und der Filterrahmen waren durch die Natriumoxidaerosole stark korrodiert. Nach einigen Tagen Lagerung wurden an beladenen Filtern exotherme Reaktionen beobachtet, insbesondere bei hoher relativer Feuchte. Die Filtermaterialien wurden durch die Reaktionswärme zerstört.

Herkömmliche Glasfaserfilter zeigen zwar einen hohen Abscheidegrad für Natriumbrandaerosole, sind aber insbesondere bei hohen Feuchten für die Filtration von Natriumbrandaerosolen ungeeignet.

### 5.3.3. Sandbettfilter

Mit Hinblick auf die obigen Resultate wurden mehrlagige Sandbettfilter entwickelt und optimiert. Sandbettfilter haben sich als inert gegenüber aggressiven Natriumbrandaerosolen gezeigt. Gebrochene Basalt- und Lavasande unterschiedlicher Körnung wurden verwendet. Das Sandbettfilter war grundsätzlich so aufgebaut, daß die Porosität mit der Bettiefe abnahm. Porosität und Dicke der Schichten des Sandbettfilters wurden hinsichtlich des Filterabscheidegrades und der Beladbarkeit optimiert. Es wurden Abscheidegrade von 99,98%, die dem HEPA-Standard entsprechen, erreicht. Die Beladungskapazitäten für diese Abscheidegrade betragen etwa 500 g/m<sup>2</sup>. Diese Werte wurden bei Anströmgeschwindigkeiten von 1 m/min erzielt. Verglichen mit einem Glasfaserfilter stieg der Differenzdruck am Filter nur langsam an. Höhere Beladbarkeiten können mit einem Sandbett-Vorfilter erzielt werden, welches aufgrund seiner permeableren Schichtung einen Abscheidegrad von 99% aufweist. Die Beladbarkeit dieses Filters beträgt 1000g/m<sup>2</sup>. Für dieses Filter kann die Anströmgeschwindigkeit auf 15 m/min erhöht werden.

### 5.3.4. Naßabscheider

Lösliche Partikeln vergrößern ihren Durchmesser bei hohen relativen Feuchten. Ein 1 µm großes Natriumoxidteilchen vergrößert seinen Durchmesser um den Faktor 4 bis 5 bei relativen Feuchten nahe 100 %. Bei den meisten konventionell verfügbaren Naßwäschern wird dieser Vorteil des Kondensationsprozesses auf Partikeln ausgenutzt, um hohe Abscheidegrade zu erzielen. Sowohl ein einstufiger als auch ein zweistufiger Naßwäscher des Rotating Disk-Sprayer-Typs wurden getestet. Der Differenzdruck über dem Wäscher war niedriger als 1 kPa. Ungefähr 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup> Wasser pro Stufe wurden gebraucht, um 1 m<sup>3</sup> Luft auszuwaschen.

Der Abscheidegrad einer einzelnen Wäscherstufe betrug 70%. Der zweistufige Wäscher hatte einen Abscheidegrad von 93%, während eine Kombination beider Wäscher einen Abscheidegrad von 98% erzielte. Der gemessene geringe Anstieg des Abscheidegrades in der dritten Stufe ist vermutlich auf das Anwachsen der Natriumoxidpartikeln in der mit Wasserdampf gesättigten Luft zurückzuführen.

Weiterhin wurde ein mechanisch arbeitender Wäscher/Desintegrator nach Theisen eingesetzt. In diesem Gerät wird der Auswaschprozess dadurch erreicht, daß Stäbe die Wassertropfen zu feinen Partikeln zerschlagen und gleichzeitig eine hohe Turbulenz im Abgas verursachen. Hierdurch soll die Abscheidung des

Aerosols verstärkt werden. Mit diesem Desintegrator wurde ein Abscheidegrad von 60% erzielt.

Die Testbedingungen und die gemessenen Abscheidegrade an den verschiedenen Wäschertypen sind in der Abb. 5.14 zusammengestellt.

### 5.3.5. Kombinierte Filtersysteme

Zur Abscheidung von Natriumbrandaerosolen wurde weiterhin ein Filtrationssystem getestet, das aus einem Venturi-Wäscher, einem elektrostatischen Abscheider und einem Tiefbett-Waschfilter bestand. Der Venturi-Wäscher hat einen hohen Abscheidegrad für Partikeln  $>2 \mu\text{m}$ . Die Anströmgeschwindigkeit des Rohgases wurde im Venturi von 9 m/sec auf 20 m/sec erhöht. Die Druckdifferenz betrug 4 kPa. Das so vorgereinigte Rohgas wurde danach durch ein Tiefbett-Waschfilter geleitet. Dieses Tiefbettfilter bestand aus Teleret-Material, das sowohl von der Frontseite als auch von der Oberseite mit Wasser besprüht wurde. Diesem Vorfilter folgte ein Tropfenabscheider. Das so vorgereinigte Gas floß durch einen Ionisator. Die drahtförmigen Elektroden hatten eine Spannung bis zu 25.000 V. Die geerdeten Anodenplatten wurden mit Wasser gereinigt. Die elektrostatisch aufgeladenen Partikeln wurden in der Absorptionsstufe abgeschieden. Diese bestand aus einem mit Wasser besprühten Tiefbettfilter. Diese letzte Stufe arbeitete nach demselben Prinzip wie der waschende Abscheider der zweiten Stufe. Eine schematische Darstellung dieses Filtrationssystems wird in Abb. 5.15 gezeigt. Es wurde bei Aerosolmassenkonzentrationen zwischen 300 und 600 mg/m<sup>3</sup> als Natriumkarbonat getestet. Der Abscheidegrad des Gesamtsystems betrug  $99,89 \pm 0,03\%$ . Jede Stufe des Systems trug in unterschiedlichem Maße zu dem Gesamtabseidegrad bei. Der Abscheidegrad in den ersten beiden Stufen betrug 92,79% (vergl. Abb. 5.14).

### 5.3.6. Zusammenfassung

Abb. 5.14 gibt einen Überblick über die experimentellen Parameter und die an den verschiedenen Filteranlagen erzielten Abscheidegrade.

Glasfaserfilter sind für die Filtration von Natriumbrandaerosolen, insbesondere über eine lange Versuchszeit hinweg, nicht verwendbar, obwohl Abscheidegrade von 99,98% erzielt wurden und die Beladungskapazität etwa 50 g/m<sup>2</sup> betrug. Nach einer Standzeit von einigen Tagen können sie durch chemische Reaktionen zerstört werden.

Mehrschichten-Sandbettfilter sind für die Filtration von Natriumbrandaerosolen geeignet. Bei einem Abscheidegrad von 98,8% können Beladungskapazitäten bis zu 1000 g/m<sup>2</sup> erreicht werden. Für Abscheidegrade von 99,98% mit Sandbettfiltern werden Beladungskapazitäten von 500 g/m<sup>2</sup> erzielt.

Für die kontinuierliche Abscheidung von Natriumbrandaerosolen sind Naßabscheider geeignet. Wäscher vom Typ Disk-Sprayer haben einen Abscheidegrad von 70% pro Wäscherstufe. Höhere Abscheidegrade werden bei kontinuierlicher Filtration mit kombinierten Filtersystemen erreicht. Die Kombination eines Venturi-Wäschers mit einem nassen Tiefbettfilter und einem elektrostatischen Abscheider erzielte für Natriumbrandaerosole einen Abscheidegrad von nahezu 99,9%.

## 6. Natrium-Poolbrand-Codes

### 6.1. Einleitung

Zur theoretischen Beschreibung des Ablaufes und der thermodynamischen Auswirkungen von Natriumpoolbränden wurden weltweit eine Reihe von umfangreichen Programmsystemen entwickelt. Zur Voraus- bzw. Nachrechnung der FAUNA-Versuche wurden 2 Modelle herangezogen:

1. Der Atomic International-Code SOFIRE II und
2. der Interatom-Code NABRAND.

Beide Rechenprogramme wurden in ausführlicher Literatur [18 und 19] beschrieben. An der FAUNA-Anlage wurden Natrium-Poolbrände auch mit dem Ziel durchgeführt, die Rechencodes zur Beschreibung der Auswirkungen der Flächenbrände zu verifizieren.

### 6.2. SOFIRE II-Modell

Im Sinne einer kompakten Darstellung soll das Modell kurz erläutert werden. Der Brand setzt sogleich an der Oberfläche des Natriums ein, die sich in Luft oder O<sub>2</sub>-haltiger Atmosphäre befindet. Einfüllvorgänge gehen in die Rechnung nicht ein. Die Wärmeproduktion findet auf der gesamten Natriumoberfläche gleichmäßig statt. Der Transport der Wärme findet quasi-stationär wie folgt statt:

- an das Natrium per Wärmeleitung; von dort aus an den Boden der Brandpfanne und schließlich an die Umgebung unterhalb der Brandpfanne
- an den Gasraum oberhalb der Brandpfanne per Konvektion und Strahlung. Von dort aus geht ein Teil der Wärme an die Wände des Behälters
- an die Wände des Behälters direkt über Strahlung.

Die Brandrate wird im SOFIRE II-Modell wie folgt definiert:

$$B_R(t) = H_G \cdot \rho_G \cdot S \cdot \frac{M_{O_2}(t)}{M_{Luft}(t)} [kg/m^2 \cdot h]$$

mit	$H_G$	= Gas-Transport-Koeffizient [m/h]
	$M_{O_2}/M_{Luft}$	= O <sub>2</sub> -Anteil in der Verbrennungsluft [kg O <sub>2</sub> /kg <sub>Luft</sub> ]
	$\rho_G$	= Dichte des Gases [kg/m <sup>3</sup> ]
	$S$	= stöchiometrisches Mengenverhältnis der Reaktanden [kgNa/kgO <sub>2</sub> ]

Die wichtigsten Größen hierbei sind  $H_G$  und  $S$ .

Die Ableitung des Gas-Transport-Koeffizienten  $H_G$  basiert auf der Analogie zwischen Wärme- und Stofftransport und erweist sich als proportional zum Diffusionskoeffizienten.

Der Diffusionskoeffizient  $D$  wird im Sofire II-Modell nach einer von Sutherland [19] abgeleiteten Gleichung berechnet. In [19] wurde gezeigt, daß die in neuerer Zeit von Hirschfelder abgeleitete Beziehung

$$D = 4,48 ((T_{Na} + T_G) \cdot 0,5)^{1,5} / p \quad [\text{cm}^2/\text{s}]$$

mit  $P = \text{Druck [atm]}$

eine genauere Berechnung des Diffusionskoeffizienten erlaubt.

Da für die Brandrate  $BR$  im SOFIRE II-Modell

$$BR \sim D$$

gilt, können je nach verwendeter Beziehung gravierende Unterschiede auftreten.

Für  $S$  wird das stöchiometrische Mengenverhältnis  $Na/O_2$  aus der Reaktionsproduktanalyse benutzt.

### 6.3. Das NABRAND-Modell

Anders als im SOFIRE II-Modell hat man im NABRAND-Modell die Möglichkeit, eine endliche Einfüllzeit des Natriums zu berücksichtigen. Zu Beginn bildet die unterste Schicht die Lachenoberfläche. Wenn der Füllstand diese Marke überschreitet, wird mit einer nächsten Schicht gerechnet usw..

Die Energieproduktion findet nicht auf der Natriumoberfläche statt, sondern in einem fiktiven Raum oberhalb der Natriumoberfläche statt. Diese Betrachtungsweise - auch "Flammen-Modell" genannt - sieht im einzelnen so aus:

Über der Natriumoberfläche bildet sich eine dünne Schicht aus Natriumdampf, darüber ein Flammentepich (ca. 10 mm). Der Flammentepich ist das energieproduzierende Volumen. Der Transport der Wärme findet nun wie folgt statt:

- An das Natrium per Wärmeübergang, von dort aus per Wärmeleitung an den Boden der Brandpfanne und schließlich an die Umgebung unterhalb der Brandpfanne.
- An den Gasraum oberhalb der Brandpfanne per Konvektion und Strahlung.
- An die Wände des Behälters direkt über Strahlung.

Die Brandrate wird proportional der O<sub>2</sub>-Gewichtskonzentration in und nach der kinetischen Gastheorie proportional der Wurzel aus der Gastemperatur angesetzt:

$$B(t) = B_0 \frac{M_{O_2}(t)}{M_{O_2,0}} \cdot \left( \frac{T_G(t)}{T_{G,0}} \right)^{1/2}$$

Diese Beziehung, die wesentlich einfacher ist als beim SOFIRE-Modell, enthält eine Konstante, die Anfangsbrandrate B<sub>0</sub>. Diese kann empirisch bestimmt werden und hat im NABRAND-Code für normale atmosphärische Bedingungen den Wert

$$B_0 = 35 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h.}$$

Dieser sehr konservative Wert liegt dem Sättigungswert der Brandrate für große (> 12 m<sup>2</sup>) Brandflächen sehr nahe.

In FAUNA-Experimenten lag B<sub>0</sub> bei 22 ± 3 kg/(m<sup>2</sup>·h).

#### 6.4. Vergleich zwischen SOFIRE und NABRAND

Beide Modelle verwenden zwar die gleichen Eingabestoffdaten, modellmäßig unterscheiden sich die beiden Codes jedoch wesentlich. Während im SOFIRE 2-Modell die Natriumoberfläche den Brandherd darstellt, wird im NABRAND-Modell ein sogenanntes Flammenmodell eingeführt. Beim SOFIRE 2-Modell geht die auf der Natriumoberfläche produzierte Wärme in den Gasraum per Konvektion und Strahlung und in den Natriumpool per Wärmeleitung über. Beim NABRAND-Modell dagegen verteilt sich die in einem Volumen von 10 mm oberhalb der Natriumoberfläche produzierte Wärme in Richtung Gasraum und Natriumoberfläche durch Konvektion und Strahlung, wobei die Strahlung in das Natrium vernachlässigt wird. Diese unterschiedliche Betrachtungsweise führt zwangsläufig dazu, daß im NABRAND-Modell die thermische Belastung der Wände bei sonst gleichen Randbedingungen höher ist als im SOFIRE-Modell.

Durch die Einführung des Flammenmodells ist der Rechencode NABRAND verglichen mit dem Code SOFIRE konservativer.

Im Rahmen des FAUNA-Programms wurden beide Modelle miteinander verglichen, und darüber hinaus wurden FAUNA-Versuche zur Verifikation beider Codes durchgeführt. Es sind dies die im vorderen Teil beschriebenen FAUNA-Versuche F5 und F6. Für die vergleichenden Rechnungen wurden die in beiden Codes anzugebenden Anfangsbrandraten auf  $B_0 = 22,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ h})$  festgesetzt. Dieser Wert entspricht den gemessenen Anfangsbrandraten bei FAUNA-Versuchen. Für die Brandrechnungen ist es in beiden Codes erforderlich, das Verhältnis der als Reaktionsprodukt entstehenden Natriumoxidmenge zur Natriumperoxidmenge anzugeben. Beste Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen ergab, daß 75% des Reaktionsproduktes in Natriumoxid übergeführt wurden und 25% in Natriumperoxid. Für die Berechnung der Natriumbrandrate ist es erforderlich, den Gastransportkoeffizienten für Sauerstoff an die Brandfläche zu kennen. Hierzu wurde das SOFIRE 2 Modell dahingehend geändert, daß die zur Berechnung des Diffusionskoeffizienten  $D$  angegebene Gleichung nach Sutherland durch die Beziehung von Hirschfelder ersetzt wurde. Diese Beziehung erlaubt eine genauere Berechnung des Diffusionskoeffizienten [18, 19].

Der Vergleich einiger Nachrechnungen mit den experimentellen Ergebnisse zeigt:

- Der  $\text{O}_2$ -Verbrauch wird am besten durch die modifizierte Version des NABRAND-Codes wiedergegeben, wobei die Abweichungen zum SOFIRE II nicht sehr groß sind.
- Beim Nachrechnen des Druckverlaufes im Containment sind deutliche Diskrepanzen - sowohl zwischen den Codes selbst als auch gegenüber dem Experiment - zu sehen. Trotz der Erfassung des Druckanstieges zu Beginn durch den NABRAND-Code überschätzen im weiteren Brandverlauf die Codes den gemessenen Behälterdruck erheblich.
- Der Gastemperaturverlauf wird in der Phase des reinen Flächenbrandes relativ gut beschrieben. In der Anfangsphase werden insbesondere beim Versuch F 6 Unterschiede bis zu ca. 100 Grad errechnet. Dies ist jedoch durchaus auf die spezifischen Anfangsbedingungen bei der Versuchsdurchführung zurückzuführen. Hierbei wurde das flüssige Natrium über eine enge (7 mm Durchmesser) Düse in die Brandpfanne eingeleitet.

- Der Natriumtemperaturverlauf wird, abgesehen von der Endphase, durch NABRAND relativ schlecht wiedergegeben. Bei der Beurteilung der Ergebnisse, insbesondere des Versuches F 6, muß der Tatsache Rechnung getragen werden, daß die Thermoelemente zur Erfassung der Natriumtemperaturen erst nach einigen Minuten mit Natrium überdeckt wurden. Daher zeigen sie zum Beginn des Brandes sicherlich nicht die Natriumtemperatur an, sondern einen Temperaturwert, der im wesentlichen Natrium-Flammentemperaturen wiedergibt.

### 6.5. Wertung der Modellrechnungen

Sowohl aus den Vergleichsrechnungen als auch aus den Nachrechnungen der experimentellen Versuche können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden: Die Auswirkungen des Brandes werden von beiden Codes überschätzt und zeigen insbesondere bei der Rechnung des Druckverlaufes im Brandraum erhebliche Abweichung in konservativer Richtung gegenüber dem Experiment. Dies ist eine Frage der Überschätzung der Brandrate in beiden Codes. Der Verlauf der Gas- und Natriumtemperaturen wird dagegen mit Abweichungen, die kleiner als 30% sind, wiedergegeben. Im Folgenden sollen noch einige Gründe für die Diskrepanzen zwischen den theoretischen Modellen untereinander als auch zwischen Theorie und Experimenten gegeben werden:

- Die Modelle sind so aufgebaut, daß sie den Brandprozeß annähernd gut beschreiben, hingegen spezielle natriumspezifische Vorgänge wie Krustenbildung und Reaktionen in der Dampfschicht nur begrenzt berücksichtigen.
- Eingabedaten wie Wärmeübergangszahl und Emissionsfaktoren sind nicht ausreichend genau bekannt.
- Die Modelle nehmen die Gastemperatur als ortsunabhängig an. Die Experimente zeigen dagegen, daß je nach Geometrie der Anlage und auch der Brandpfanne unterschiedlich starke, gerichtete Konvektionen auftreten und daher das Gas, das zur Flammen- bzw. zur Natriumoberfläche hinströmt, nicht immer gleiche Temperatur wie die Gasschichten oberhalb des Flammenteppichs hat.
- Die in den Modellen angenommene Abhängigkeit der spezifischen Brandrate vom Sauerstoffangebot muß aufgrund der soeben beschriebenen Konvek-

tionsströmung und deren Einfluß auf die Brandrate mit einem sehr großen Unsicherheitsfaktor angenommen werden.

- Die Annahme, daß das Produkt zu 75% aus Natriumoxid und zu 25% aus Natriumperoxid besteht, ist sicher über den gesamten Brandverlauf nicht konstant anzusehen, wie bei den Modellen vorausgesetzt wird.
- Natriumeinlaufprozesse bzw. Natriumleckagen, die zu einem Natriumpoolbrand führen, werden sowohl von NABRAND als auch von SOFIRE 2 nur begrenzt berücksichtigt.

Die die Codes vergleichenden Rechnungen sowie die Vergleiche der Codeberechnung mit den Experimenten führten zu Verbesserungen an beiden Codes als auch zu Empfehlungen für eine bessere Modellierung sowohl der Brandraten als auch der Wärmeübergänge, wie sie in den Codes beschrieben werden.

## 7. Zusammenfassung und Diskussion über die Auswirkung von Natrium-Poolbränden

Zur Untersuchung des Brandverhaltens wurden 7 Versuche durchgeführt; folgende Tabelle 7.1 faßt die wichtigsten Bedingungen und die mittleren Brandraten zusammen:

Experiment	Fläche m <sup>2</sup>	Natrium kg	Sauerstoff Konz. %	Pooltiefe cm	Brandrate kg/(m <sup>2</sup> · h)
F1	2	150	19-22	9	29
F2	2	250	17-25	15	21
F3	12	500	15-25	5	33
F4	12	500	18-25	5	27
F5	2	350	21-10	21	18
F6	5	350	21-4	9	28
F7	2	120	≤ 2	7	-

Tab. 7.1: Zusammenfassung der Versuchsbedingungen

Die Sauerstoffkonzentration wurde bei den Versuchen F1 - F4 in den angegebenen Grenzen konstant gehalten. Bei den Versuchen F5 und F6 wurde bis zur unteren Grenze kein Sauerstoff zugeführt. Beim Versuch F7 hat kein Natriumbrand eingesetzt.

Die Kinetik eines Pool-Brandes wird im wesentlichen beherrscht von zwei Prozessen: Verdampfung von Natrium aus dem Pool in die Flammenzone und Diffusion von Sauerstoff zur Flammenzone. Damit wird die Poolfläche zur entscheidenden Größe bei Poolbränden:

- Größere Brandflächen führen in geschlossenen Räumen zu größeren Brandraten, bedingt durch die hohe Wärmefreisetzung und die damit verbundene stärkere Aufheizung des Gases über der Brandfläche und die schnellere Aufheizung des Natriums im Pool.
- **Aber:** Größere Brandflächen behindern, trotz starker turbulenter Konvektion, die Sauerstoffzufuhr zur Mitte des Pools.

Dies bedeutet, daß die Brandrate zwar mit der Fläche zunimmt, aber bei größeren Brandflächen einen Sättigungswert erreicht. Wie Bild 7.1 zeigt, nimmt für die FAUNA-Experimente die Brandrate mit der Fläche zu. Für die französischen ESMERALDA-Experimente [20], auf deutlich größeren Flächen, findet sich keine

weitere Zunahme der Brandrate mehr. Selbst unter der Berücksichtigung, daß kleinere Pooltiefen zu höheren Brandraten führen, zeigt sich die Abhängigkeit der Brandrate von der Poolfläche nur bis etwa 12 m<sup>2</sup>, bei größeren Flächen wird ein Sättigungswerte von 35 kg/(m<sup>2</sup>·h) oder weniger erreicht.

Parallel zu den experimentellen Arbeiten wurden Programmentwicklungen durchgeführt. Insbesondere das von Interatom entwickelte NABRAND-Modell [19] wurde fortlaufend verbessert und verifiziert. Es erlaubt eine gute Berechnung des Brandverlaufes von Poolbränden.

Neben der Energiefreisetzung ist bei Natriumbränden auch die Aerosolfreisetzung von Bedeutung. Bei Poolbränden muß mit Aerosolfreisetzungsraten von 2 bis 9 kg/(m<sup>2</sup>·h) gerechnet werden (Experimente F2 - F4), so daß zwischen 10% und 30% des brennenden Natriums als Aerosol freigesetzt wird [7]. Im FAUNA-Containment führen solche Freisetzungen zu einer Massenkonzentration von rund 10 g Na/m<sup>3</sup>. Der mittlere aerodynamische massenbezogene Durchmesser der Partikeln liegt dabei zwischen 1,2 und 1,9 µm. Das Aerosolverhalten kann mit dem Rechenprogramm PARADISEKO-IV zufriedenstellend berechnet werden. Der Einfluß dieses Aerosolsystems auf Anlagenkomponenten ist von besonderer Bedeutung bei Störfallbetrachtungen. Es wurden deshalb Versuche durchgeführt, um an Original -SNR 300-Komponenten die Funktionstüchtigkeit unter Störfall-Aerosol-Bedingungen zu untersuchen. Bei allen Versuchen konnte festgestellt werden, daß unter den eingestellten Testbedingungen die Funktionstüchtigkeit der Gebläse (des Radial- und des Axialgebläses) über die gesamte Versuchsdauer voll erhalten blieb. Die Funktionstüchtigkeit des Rippenkühlers, der für das belüftete Containment vorgesehen war, konnte durch Einbau einer Wasserspritzvorrichtung sichergestellt werden. Der Glattrohrkühler für den inertisierten Bereich zeigt während der Versuche keine bemerkenswerte Minderung seiner Leistung.

Die vorliegenden Untersuchungen zu Natrium-Poolbränden zeigen, daß die experimentelle Grundlage ausreicht, um Natrium-Poolbrände gut zu verstehen. Die wesentlichen Ergebnisse sind:

- Bei den Brandraten von Poolbränden gibt es bei ansteigenden Flächen eine Sättigung von rund 35 kg/(m<sup>2</sup>·h) oder kleiner.
- Der NABRAND-Code ist in der Lage, Poolbrände mit guter Übereinstimmung mit dem Experiment zu rechnen.

- Das Aerosolverhalten und die Aerosoleigenschaften bei Poolbränden sind gut bekannt und erlauben die Übertragung auf andere Brandflächen und Containments.
- Der Einfluß des Aerosolsystems auf Anlagenkomponenten wurde getestet, die Funktionstüchtigkeit der Original-SNR-300-Komponenten wurde nachgewiesen.

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, daß Natrium-Poolbrände und ihre Auswirkungen gut verstanden sind. Dies gilt sowohl für die Energiefreisetzung als auch für die Aerosolproblematik.

Berücksichtigt man auch die Ergebnisse und Erfahrungen anderer Forschungseinrichtungen, so läßt sich aus diesem Teil der Untersuchungen im FAUNA-Programm ableiten, daß beim Eintreten von Natrium-Pool-Bränden in natriumtechnischen Anlagen die Auswirkungen ausreichend bekannt sind. Damit können solche Anlagen sicher gegen die hier diskutierten Störfallauswirkungen ausgelegt werden.

## 8. Literatur

### 8.1. Zitierte Literatur

- [1] Sittig, M., Natrium  
Chapman + Hall, London 1956
- [2] Ditchburn, R.W., and Gilmour, J.C., The Vapor Pressures of Monatomic Vapors
- [3] Schütz, W., Sauter H., Experimental Determination of Sodium Evaporation Rates, Nuclear Science and Engineering, 80, 667-672 (1982)
- [4] Cherdrón, W., Hofmann, Ch., Jordan, S., Experience on Measurement Methods for Sodium Fire Aerosols, Proceedings of the CSNI Specialists' Meeting on Nuclear Aerosols in Reactor Safety, April 15-17, 1980, Gatlinburgh
- [5] Cherdrón, W., Jordan, S., Determination of Sodium Fire Aerosol Process Coefficients From FAUNA-Experiments, Proceedings of the CSNI Specialists' Meeting on Nuclear Aerosols in Reactor Safety, April 15-17, 1980, Gatlinburgh
- [6] Cherdrón, W., Berechnung der Konvektionsströmung bei Natriumflächenbränden in geschlossenen Behältern.  
Jahrestagung Kerntechnik 84, Frankfurt 22-24. Mai, 1984  
Kerntechnische Ges. e.V. Deutsches Atomforum e.V.  
Eggenstein-Leopoldshafen:  
Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik 1984, S. 227-30  
Frankfurt
- [7] W. Cherdrón, S. Jordan: Die Natriumbrandversuche in der FAUNA-Anlage auf Brandflächen bis 12 m<sup>2</sup>, KfK 3041
- [8] S. Jordan et al.: Intercomparison Test of various aerosol measurement techniques for sodium fire aerosols.  
Specialist Meeting on Nuclear Aerosols in Reactor Safety, Karlsruhe, Sept. 4-6, 1984  
KfK-3800 (Februar 1985) S. 295-304  
CSNI-95 (Februar 1985)
- [9] W. Cherdrón, C. Hassa, S. Jordan, W. Lindner: Intercomparison test of various Aerosol Measurement Techniques, EUR 9203 EN, 1984

- [10] Cherdrón, W., Jordan, S., Characterization and behaviour of sodium fire aerosols, experiments and calculations. 2nd Int. Aerosol Conf.: Aerosol Formation and Reactivity, Berlin, Sept. 22-26, 1986
- [11] Zeller, W., Direct measurement of Aerosol Shape Factors, Aerosol Science and Technology Vol. 4, No. 1, 1985
- [12] H. Bunz, PARADISEKO IIIb. Ein Computerprogramm zur Berechnung des Aerosolverhaltens in geschlossenen Behältern, KfK 2903, April 1980
- [13] H. Bunz, PARADISEKO IV. Ein Computerprogramm zur Berechnung des Aerosolverhaltens in geschlossenen Behältern, KfK 3545, November 1983
- [14] D.W. Cooper, "Prediction of the rates of chemical transformation of Sodium fire aerosols", Proc. CSNI-Specialists Meeting on Nuclear Aerosols in Reactor Safety, April 15-17, 1980, Gatlinburg, Tenn., S. 129-138
- [15] A. Alexis, Ertüchtigung der Kühlsysteme des SNR 300 für die NBT-Phase (ULK-Programm), KfK-PSB-Bericht Nr. 1611, 1982
- [16] Oeynhausén, Schmitz, Interatom, Vertrauliche Mitteilung
- [17] W. Cherdrón, S. Jordan, W. Lindner, The Filtration of Sodium Fire Aerosols, Jahrestagung der Gesellschaft für Aerosolforschung, Bologna, 1982
- [18] A. Alexas, Verbesserung und Verifikation von Rechencodes zur Beschreibung von Natriumflächenbränden, KfK-PSB-Bericht Nr. 2041, 1982
- [19] Alexas, A., Entwicklung eines Rechencodes zur Beschreibung von Natrium-Sprüh- und Flächenbränden, KfK-2824, Sept. 1979
- [20] R. Rzekiecki et al.: Large sodium pool fires in a closed or in a naturally vented cell. Science and Technology of Fast Reactor Safety, BNES, London 1986.

## **8.2. Eigene Veröffentlichungen im Rahmen des FAUNA-Programms**

Alexas, A.; Cherdrón, W.; Jordan, S.; Lindner, W.; Schikarski, W.;  
Sodium fire aerosol experimental and analytical results - large scale tests in  
FAUNA. Fast Reactor Safety Technology, Proc. of the Internat. Meeting, Seattle,  
Wash., August 19-23, 1979. La Grange Park, Ill.: American Nuclear Soc. 1979,  
Vol. II, S. 874-83

Alexas, A.; Cherdrón, W.; Jordan, S.; Lindner, W.;  
Dynamisches Verhalten von Brandaerosolen in geschlossenen Containments.  
Stoeber, W.; Jaenicke, R. (Hrsg.): Aerosols in Science, Medicine and Technology -

the Biomedical Influence of the Aerosol. - 7th conf., Düsseldorf, 3-5 October, 1979

Mainz: Gesellschaft für Aerosolforschung 1979. S. 102-107

Alexas, A.; Cherdron, W.; Jordan, S.;

Untersuchungen von großen Natriumbränden im Containment der FAUNA-Anlage, Jahrestagung Kerntechnik 80, Reaktortagung 1980, Berlin, 25.-27. März 1980, Kerntechnische Ges. e.V., Deutsches Atomforum e.V., Eggenstein-Leopoldshafen, Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik 1980, S. 383-86

Cherdron, W.; Hoffmann, Ch.; Jordan, S.;

Experience on measurement methods for sodium fire aerosols, Proceedings of the CSNI Specialists' Meeting on Nuclear Aerosols in Reactor Safety, April 15-17, 1980, Gatlinburgh

Cherdron, W.; Jordan, S.;

Determination of sodium fire aerosol process coefficients from FAUNA-experiments, Proceedings of the CSNI Specialists' Meeting on Nuclear Aerosols in Reactor Safety, April 15-17, 1980, Gatlinburgh

Cherdron, W.; Alexas, A.; Jordan S.;

Thermodynamische Auswirkung von großflächigen Natrium-Bränden Jahrestagung Kerntechnik 81, Reaktortagung 1981, Düsseldorf 24.-26. März 1981 Kerntechnische Ges. e.V., Deutsches Atomforum e.V., Eggenstein-Leopoldshafen, Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik 1981, S. 211-14

Alexas, A.; Cherdron, W.; Jordan, S.;

Auswirkung von großflächigen Natriumbränden, Atomwirtschaft-Atomtechnik, 26 (1981) S. 663-65

Cherdron, W.; Alexas, A.; Jordan, S.;

Consequences of large scale sodium pool fires, experiment and code validation Internat. Topical Meeting on Liquid Metal Fast Breeder Reactor Safety and Related Design and Operational Aspects, Lyon, F, July 19-23, 1982

Cherdron, W.; Jordan, S.;

Physical and chemical characterisation of sodium fire aerosols Internat. Topical Meeting on Liquid Metal Fast Breeder Reactor Safety and Related Design and Operational Aspects, Lyon, F, July 19-23, 1982

Cherdron, W.; Jordan, S.; Lindner, W.;

Sodium spray fires in closed containments and their code validation

Internat. Topical Meeting on Liquid Metal Fast Breeder Reactor Safety and Related Design and Operational Aspects, Lyon, F, July 19-23, 1982

Cherdron, W.; Jordan, S.; Lindner, W.; Charpenel, J.;

Störfallspezifische Natrium-Spray-Brände

Jahrestagung Kerntechnik 83, Reaktortagung 1983, Berlin 14.-16. Juni 1983

Kerntechnische Ges. e.V., Deutsches Atomforum e.V., Eggenstein-Leopoldshafen, Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik 1983, S. 439-42

Cherdron, W.; Jordan, S.;

Die Natriumbrandversuche in der FAUNA-Anlage, August 1983, KfK 3041

Cherdron, W.; Jordan, S.; Schikarski, W.; Schütz, W.;

Untersuchungen zu Natriumbränden, zur Aerosolfreisetzung und zum Aerosolverhalten bei schweren Störfällen, KfK-Nachrichten, 15(1983) S. 272-86

Cherdron, W.; Jordan, S.; Lindner, W.;

Sodium fire particles - chemical transformation and properties. Liquid Metal Engineering and Technology, Proc. of the 3rd Internat. Conf. Oxford, GB, April 9-13, 1984, London, British nuclear Society, 1984, Vol. 2, S., 287-90

Cherdron, W.; Jordan, S.; Charpenel, J.;

Thermodynamic consequences of sodium spray fires, experiments and calculations, Liquid Metal Engineering and Technology, Proc. of the 3rd Internat. Conf. Oxford, GB, April 9-13, 1984, London, British Nuclear Energy Society, 1984, Vol. 2, S. 309-13

Cherdron, W.;

Berechnung der Konvektionsströmung bei Natriumflächenbränden in geschlossenen Behältern, Jahrestagung Kerntechnik 84, Frankfurt, 22.-24. Mai 1984, Kerntechnische Ges. e.V., Deutsches Atomforum e.V., Eggenstein-Leopoldshafen, Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik 1984, S. 227-30

Cherdron, W.; Hassa, C.; Jordan, S.; Lindner, W.;

Intercomparison tests of various aerosol measurement techniques  
EUR-9203-EN (1984)

Boulaud, D.; Casselmann, C.; Cherdron, W.; Deworm, J.B.; Jordan, S.; Mitchell, J.; Prodi, V.; Tarroni, G.;

Intercomparison tests of various aerosol measurement techniques

1st Internat. Aerosol Conf., Minneapolis, Minn. September 17-21, 1984

Cherdron, W.; Bunz, H.; Jordan, S.;

Properties of sodium fire aerosols and recalculation of their behaviour in closed containments

Schikarski, W.O.; Schöck, W.; (Hrsg.) Nuclear Aerosols in Reactor Safety, Karlsruhe, September 4.-6. 1984, KfK-3800 (Februar 85), S. 395-405, CSNI-95, (Februar 85)

Jordan, S.; Boulaud, D.; Casselmann, C.; Cherdron, W.; Deworm, J.B.; Mitchell, J.; Prodi, V.; Tarroni, G.; Intercomparison tests of various aerosol measurement techniques for sodium fire aerosols

Schikarski, W.O.; Schöck, W.; (Hrsg.): Specialist Meeting on Nuclear Aerosols in Reactor Safety, Karlsruhe, Sept. 4-6, 1984  
KfK-3800 (Februar 1985) S. 295-304  
CSNI-95 (Februar 1985)

Cherdron, W.; Bunz, H.; Jordan, S.;

Properties of sodium fire aerosols and recalculation of their behaviour in closed containments, Schikarski, W.O.; Schöck, W.; (Hrsg.) Nuclear Aerosols in Reactor Safety, Karlsruhe, September 4.-6. 1984, KfK-3800 (Februar 85), S. 395-405, CSNI-95, (Februar 85)

Jordan, S.; Boulaud, D.; Casselmann, C.; Cherdron, W.; Deworm, J.B.; Mitchell, J.; Prodi, V.; Tarroni, G.;

Intercomparison tests of various aerosol measurement techniques for sodium fire aerosols, Schikarski, W.O.; Schöck, W.; (Hrsg.) Nuclear Aerosols in Reactor Safety, Karlsruhe, September 4.-6. 1984, KfK-3800 (Februar 85), S. 295-304, CSNI-95, (Februar 85)

Cherdron, W.; Charpenel, J.;

Experimente und Nachrechnungen zur Weiterentwicklung des Natriumbrand-Codes PULSAR, Jahrestagung Kerntechnik 85, München, 21.-23. Mai 1985  
Kerntechnische Ges. e.V., Deutsches Atomforum e.V., Eggenstein-Leopoldshafen, Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik 1985, S. 283-86

Cherdron, W.; Charpenel, J.;

Thermodynamic consequences of sodium spray fires in closed containments  
Part 1 - Experiments, KfK-3829 (Juni 85), auch CEA Cadarache, Rapport No. EF.22.11.R/84.547

Charpenel, J.; Cherdron, W.;

Thermodynamic consequences of sodium spray fires in closed containments

Part 2 - Calculations with PULSAR

KfK-3831 ( Juni 85), auch CEA Cadarache, Rapport No. EF.22.11.R/84.504

Cherdron, W.;

Experimentelle Untersuchungen zur Auswirkung kombinierter Natriumbrände in geschlossenen Containments, Jahrestagung Kerntechnik 86, Aachen, 8.-10. April 1986, Kerntechnische Ges. e.V., Deutsches Atomforum e.V., Eggenstein-Leopoldshafen, Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik 1986, S. 135-38

Charpenel, J.; Cherdron, W.;

Closed containment experiments and code development of sodium spray fires Cadarache-Bericht ES.00.11.X/86.315 (Juillet 86)

Cherdron, W.; Jordan, S.;

Characterization and behaviour of sodium fire aerosols, experiments and calculations, 2nd Internat. Aerosol Conf.: Aerosol Formation and Reactivity, Berlin, September 22-26, 1986

Cherdron, W.;

Experimental results of large scale sodium spray fires, Internat. Conf. on the Science and Technology of Fast Reactor Safety, St. Peter Port, Guernsey, GB, May 11.-16., 1986

Cherdron, W.; Jordan, S.; Schikarski, W.; Charpenel, J.;

Sodium pool and spray fire, on the state of the art, 4th European Nuclear Conf. and 9th FORATOM Congress (ENC 86) on Nuclear Energy of Today and Tomorrow, Geneve, CH, June 1.-6., 1986

Charpenel, J.; Malet, J.C.; Cherdron, W.; Malamas, M.;

Closed containment experiments and code development of sodium spray fires. Cadarache-Bericht ES.00.11.X/86.315 (Juillet 86)

Cherdron, W.; Charpenel, J.;

Influence of the jet-direction on the consequences of sodium fires. Jahrestagung Kerntechnik 88, Travemünde, 17.-10. Mai 1988, Kerntechnische Ges. e.V., Deutsches Atomforum e.V., Bonn: INFORUM 1988 S. 271-74

Jordan, S.; Cherdron, W.; Malet, J.C.; Rzekiecki, R.; Himeno, Y.;

Sodium aerosol behaviour in Liquid-metal fast breeder reactor containments. Nuclear Technology, 81(1988) S. 183-92

Cherdron, W.;

Zum Verhalten eines brennenden Natriumpools auf einer Betonfläche

Jahrestagung Kerntechnik 89, Düsseldorf, 9.-11. Mai 1989, Kerntechnische  
Ges. e.V., Deutsches Atomforum e.V., Bonn: INFORUM 1989 S. 231-34

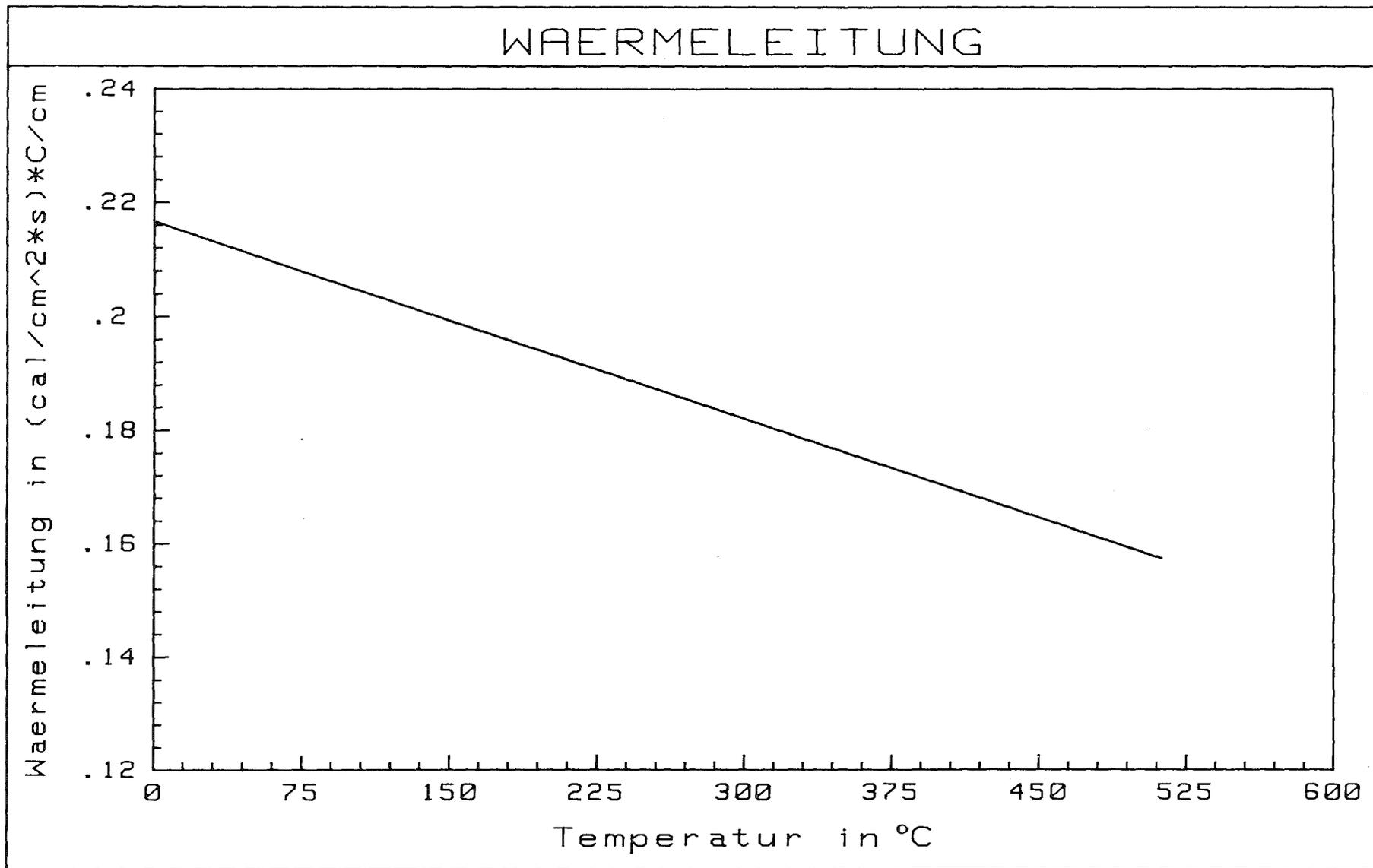


Bild 2.1: Die Wärmeleitung von Natrium in Abhängigkeit von der Temperatur

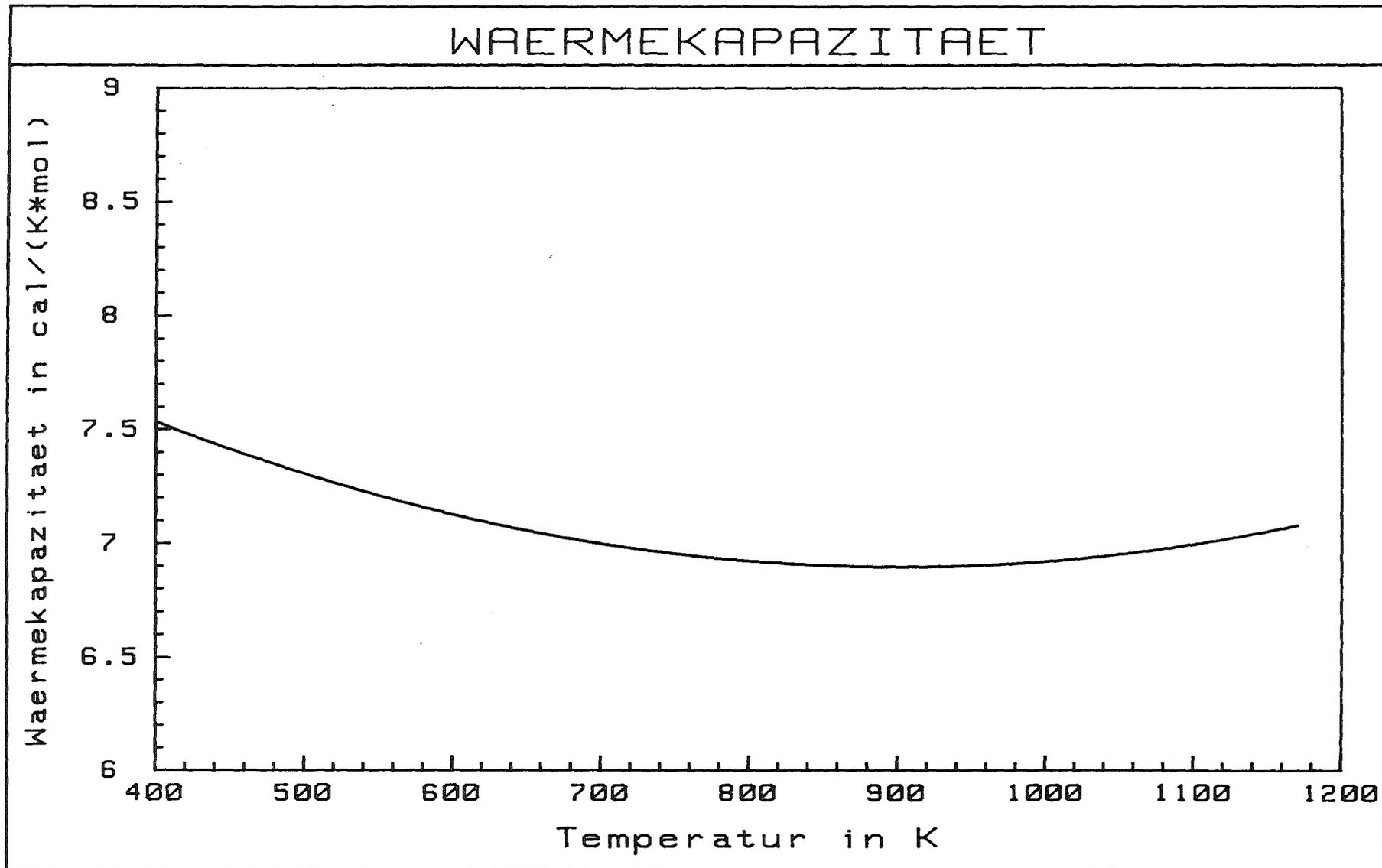


Bild 2.2: Die Wärmekapazität von Natrium in Abhängigkeit von der Temperatur

# DICHTE

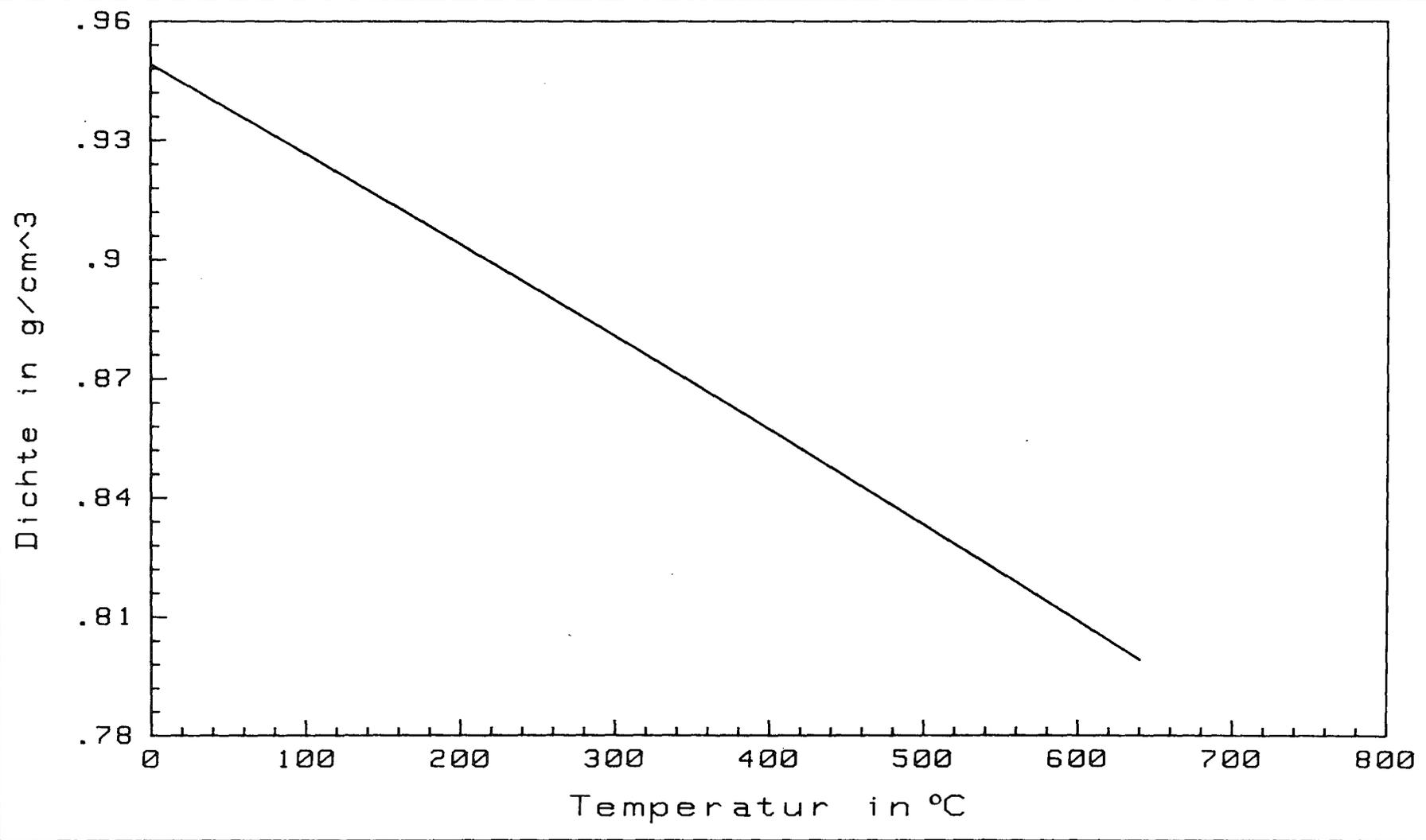


Bild 2.3: Die Dichte von Natrium in Abhängigkeit von der Temperatur

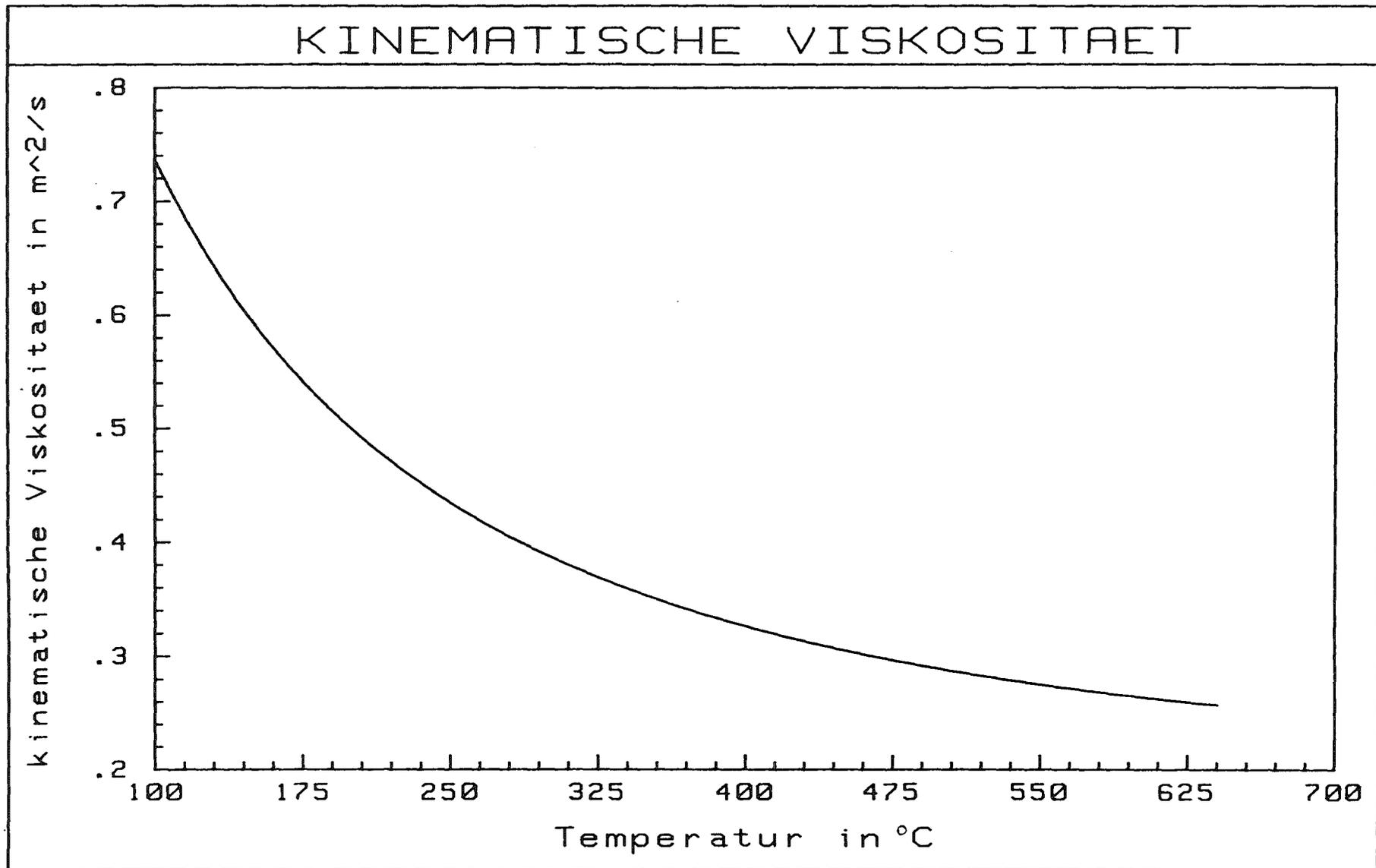


Bild 2.4: Die kinematische Viskosität von Natrium in Abhängigkeit von der Temperatur

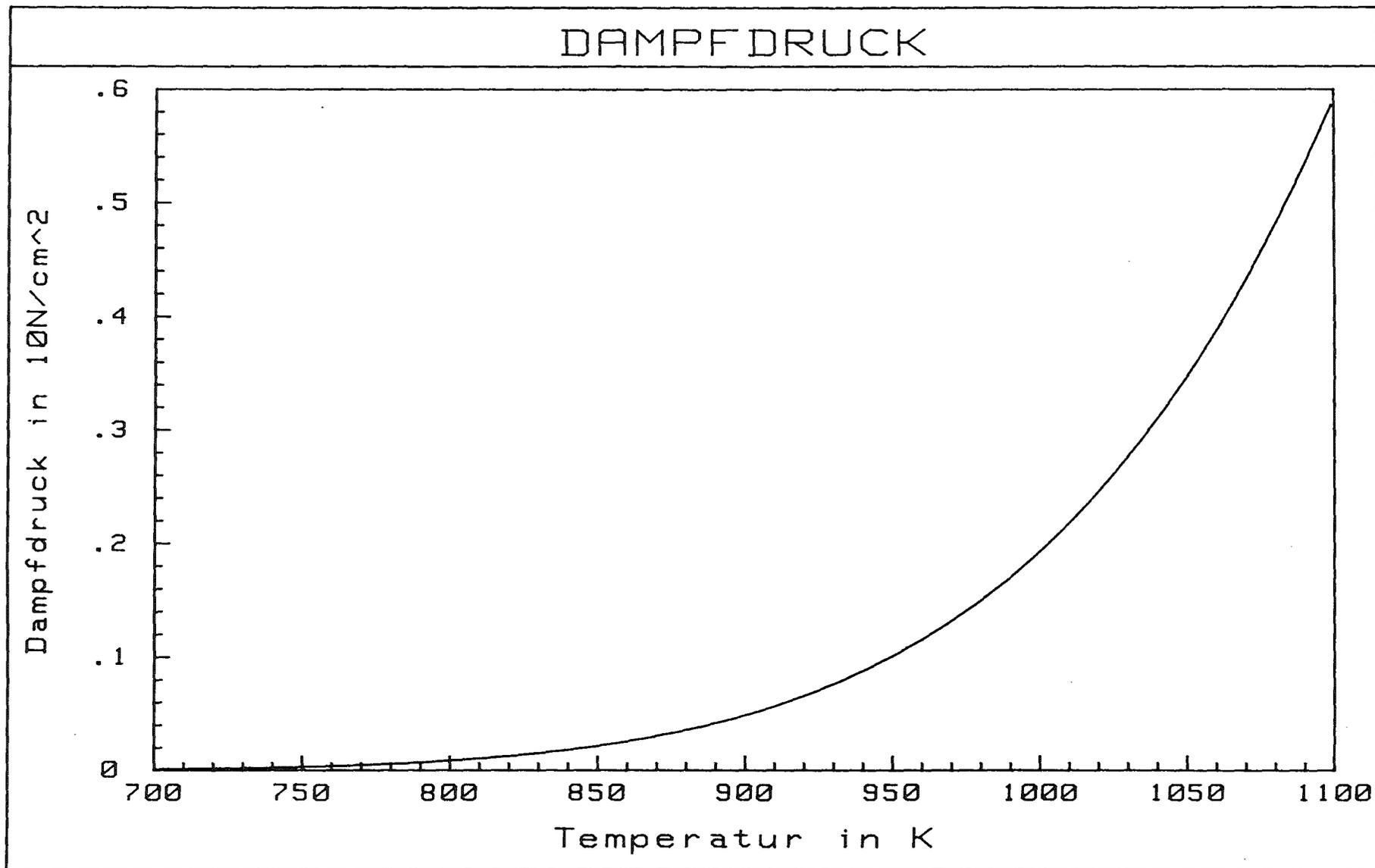
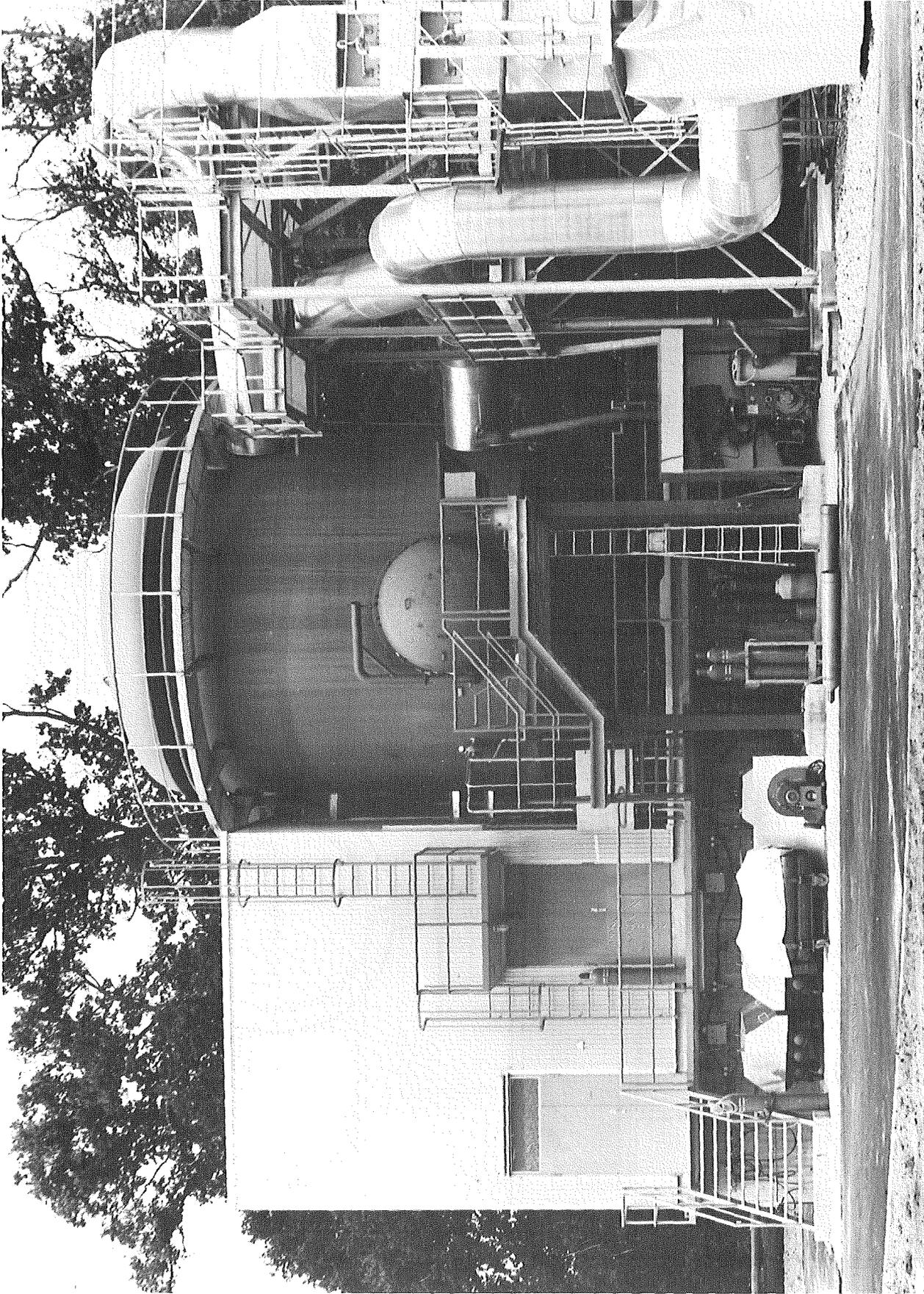


Bild 2.5: Der Dampfdruck von Natrium in Abhängigkeit von der Temperatur



**Bild 3.1:** Fotografie der FAUNA-Anlage

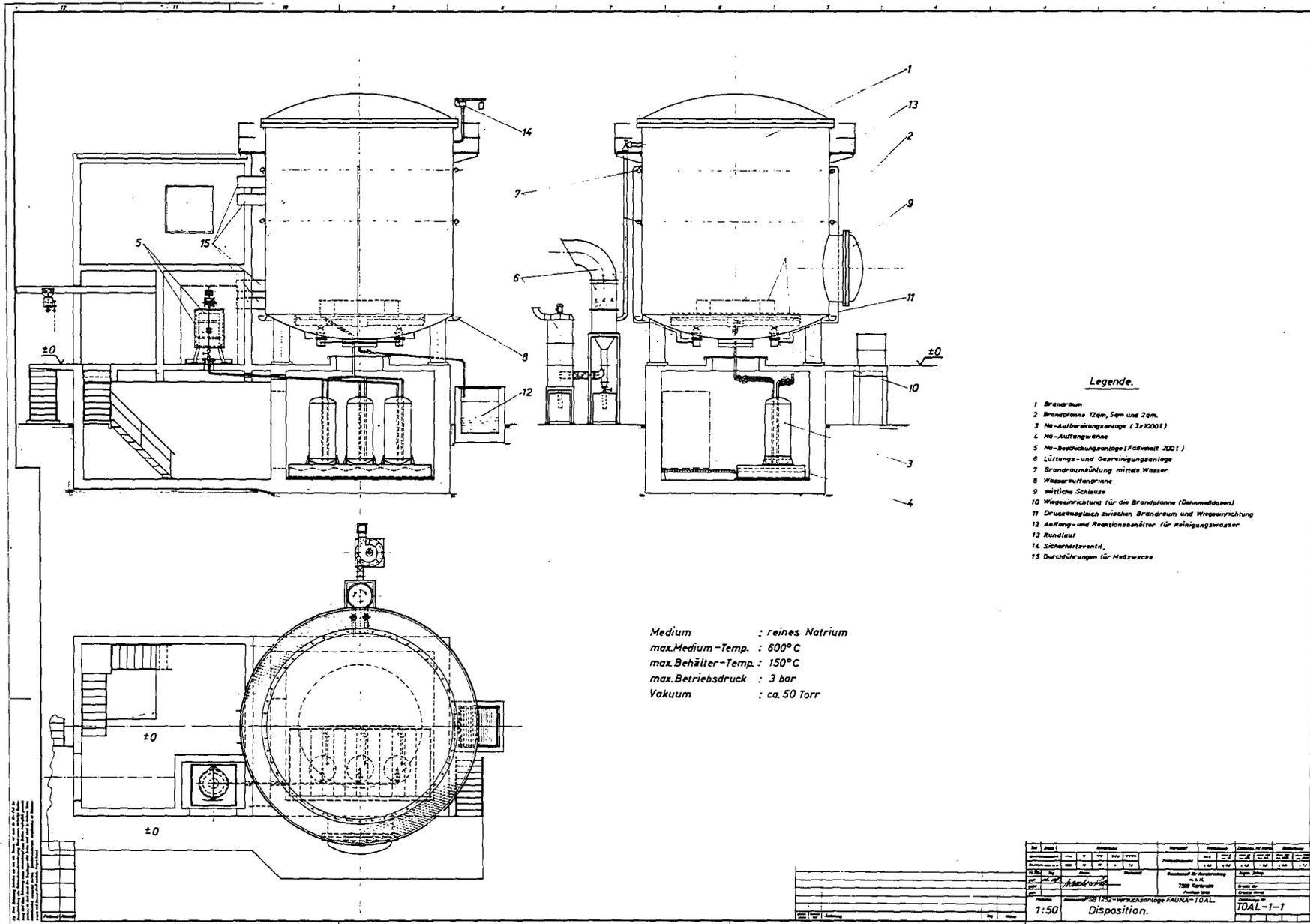
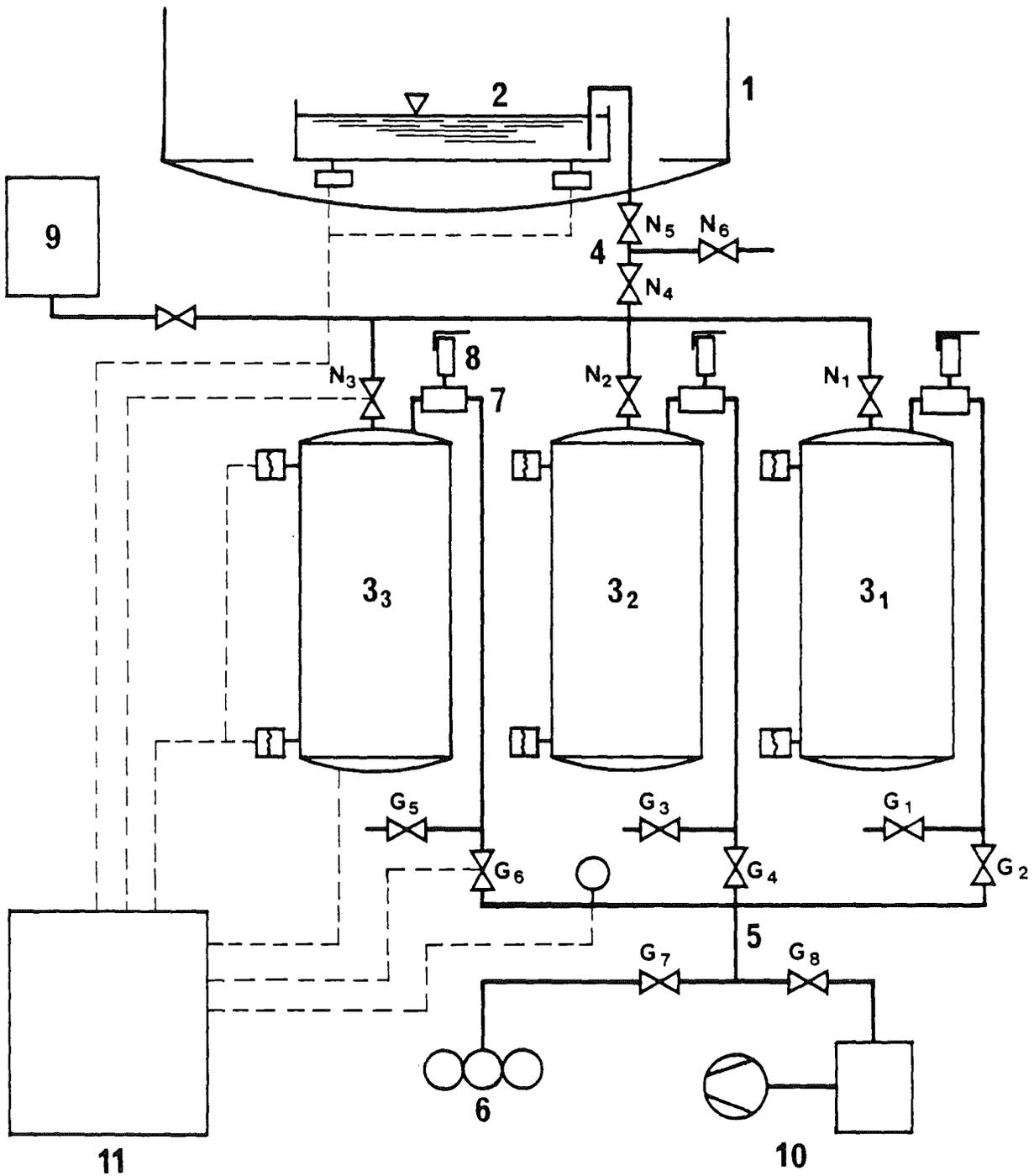


Bild 3.2: Schematische Darstellung der FAUNA-Anlage



- |   |  |    |                            |
|---|--|----|----------------------------|
| 1 | Brandkessel                                      | 7  | Natriumdampffalle          |
| 2 | Brandpfanne                                      | 8  | Sicherheitsventil          |
| 3 | Natriumtank (1-3)                                | 9  | Natrium - Einschmelzanlage |
| 4 | Natriumventile (N <sub>1</sub> -N <sub>6</sub> ) | 10 | Vakuumpumpe und -kessel    |
| 5 | Gasventile (G <sub>1</sub> -G <sub>8</sub> )     | 11 | Meßwertanzeige             |
| 6 | Schutzgasstation                                 |    |                            |

Bild 3.3: Schematische Darstellung der Natrium-Anlage

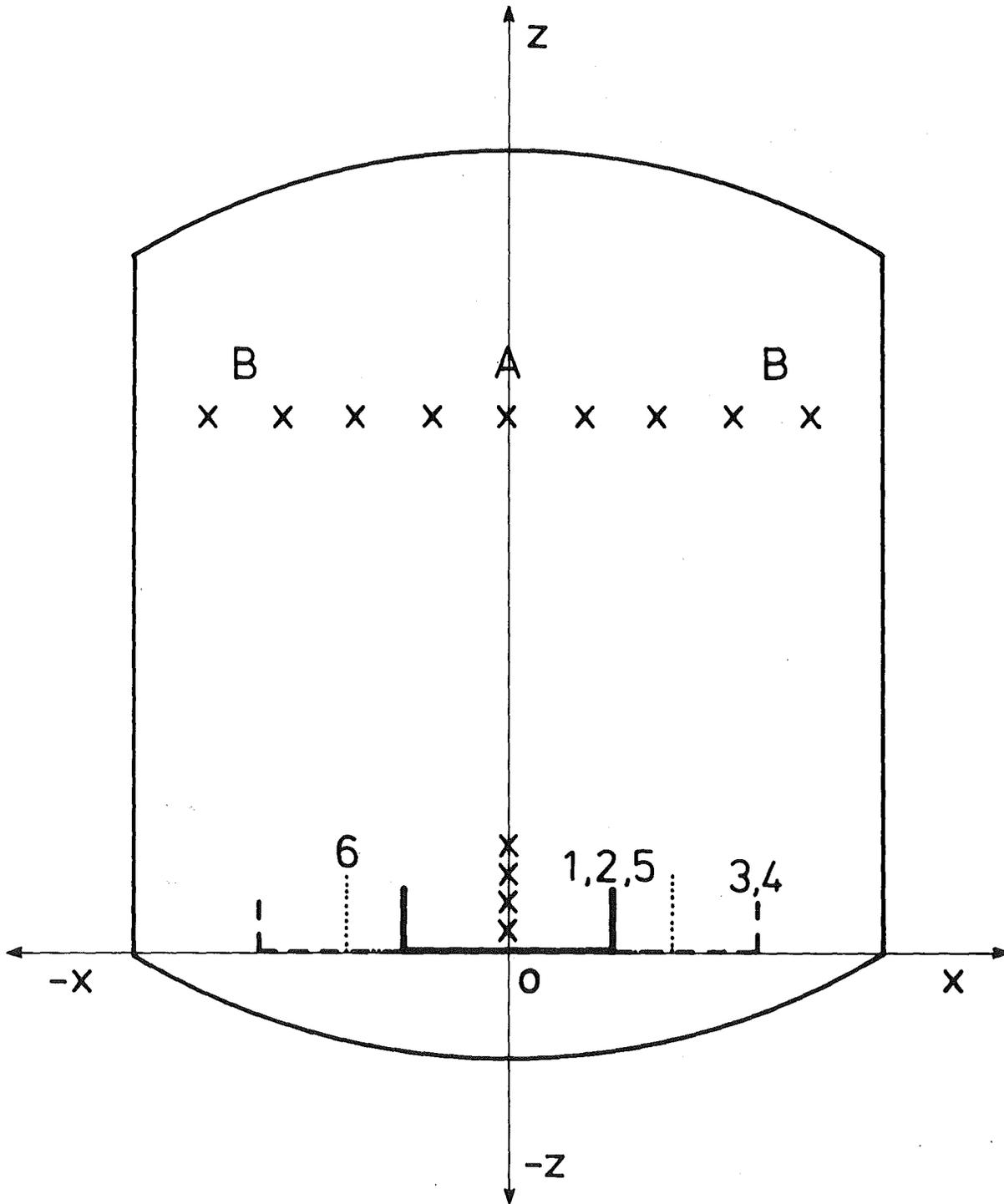


Bild 4.1: Lage der Brandpfannen und Positionen der wichtigsten Thermoelemente bei den Lachenbrand-Versuchen

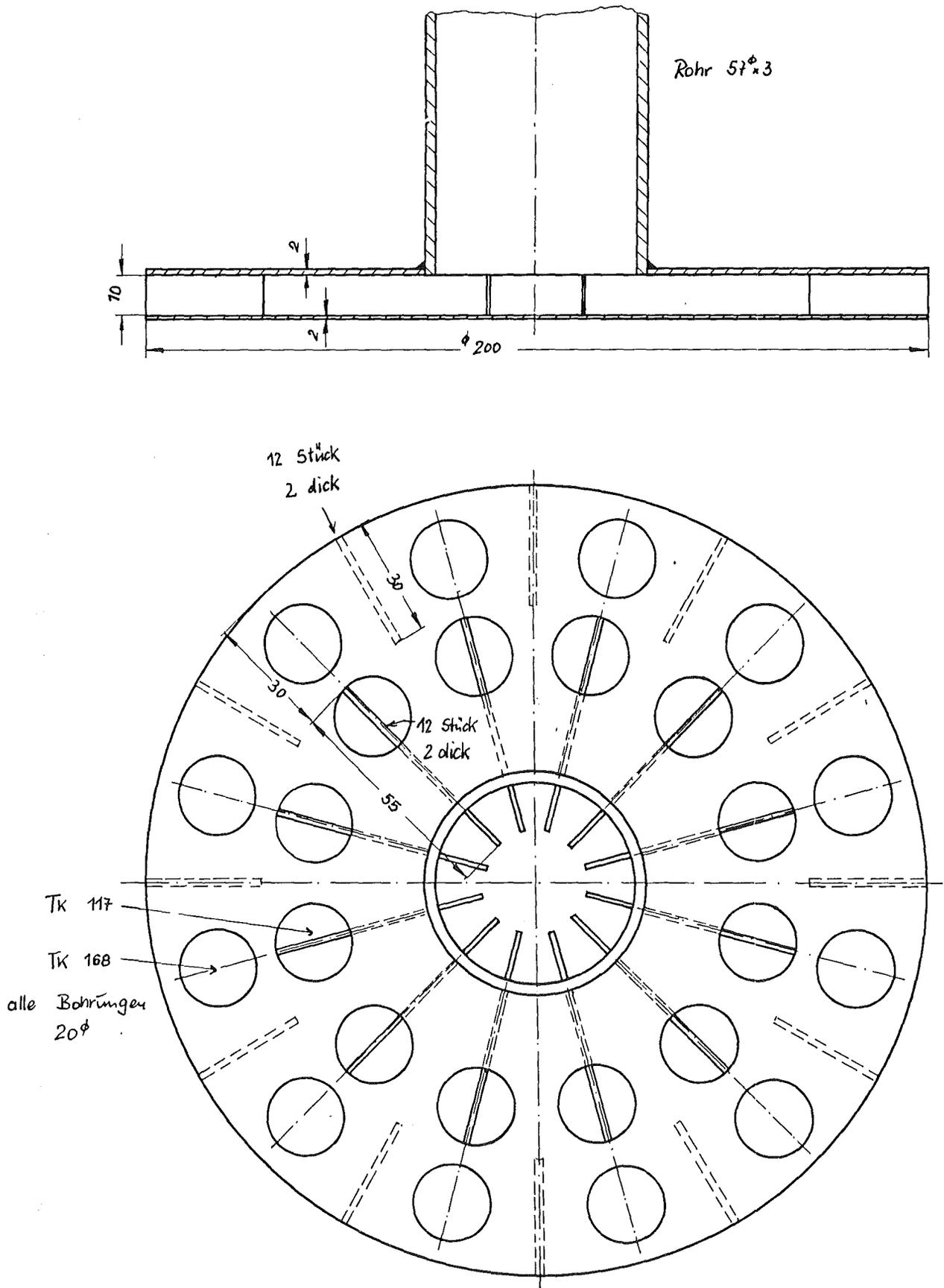


Bild 4.2: Schematische Darstellung der Natrium-Einfüllvorrichtung

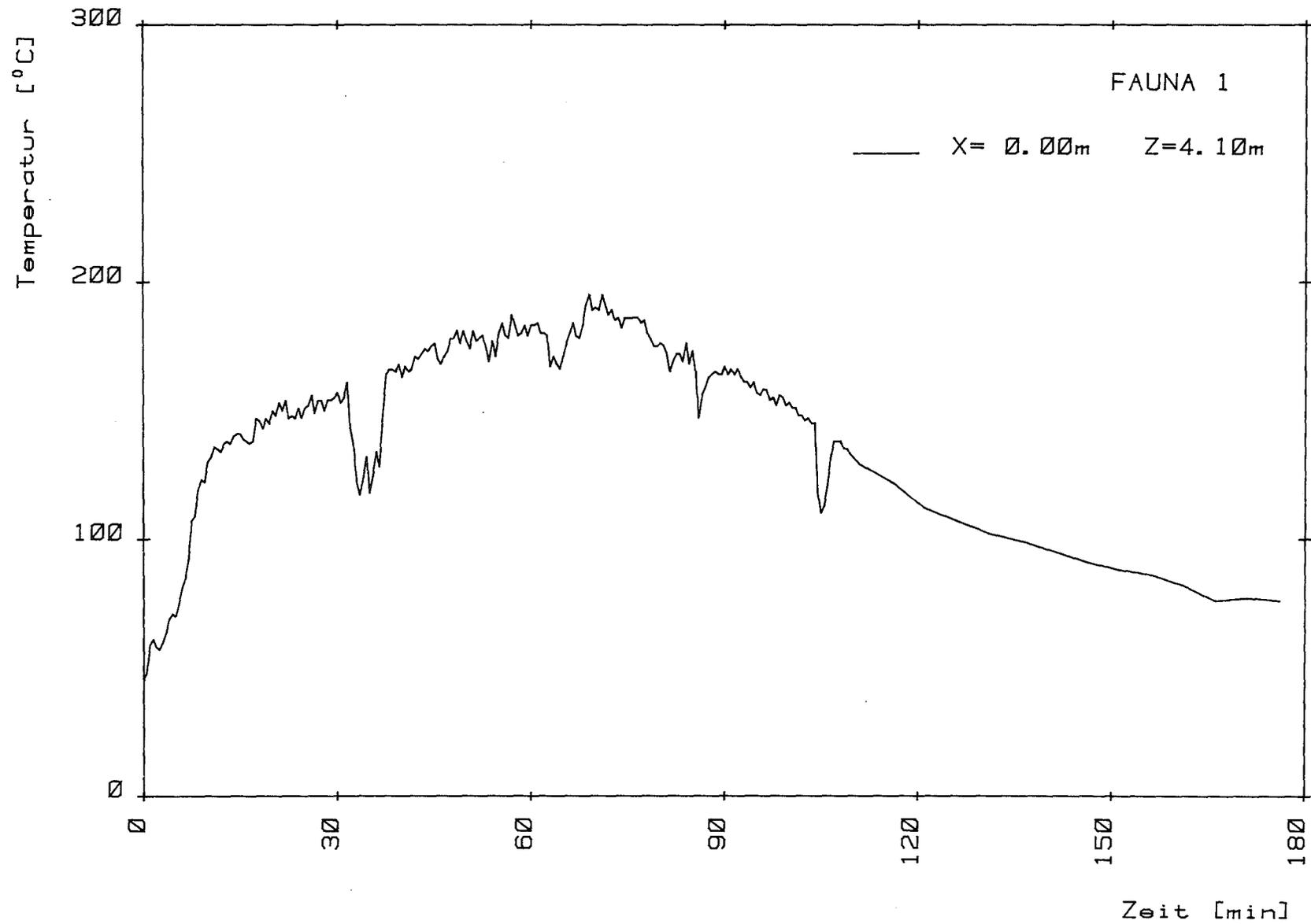


Bild 4.3: Verlauf der Gastemperatur 4.10 m über der Brandpfanne beim Versuch F1

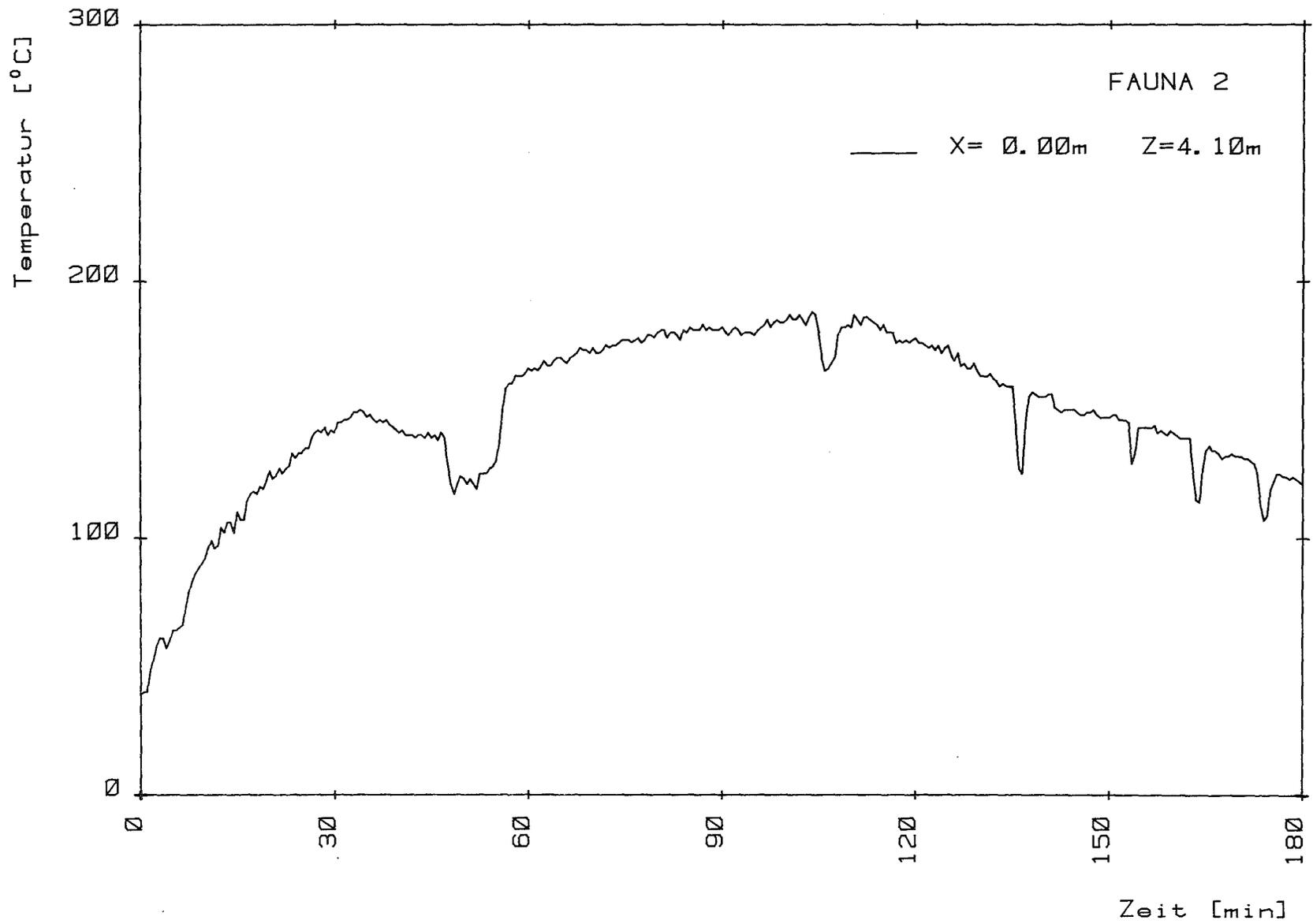


Bild 4.4: Verlauf der Gastemperatur 4.10 m über der Brandpfanne beim Versuch F2

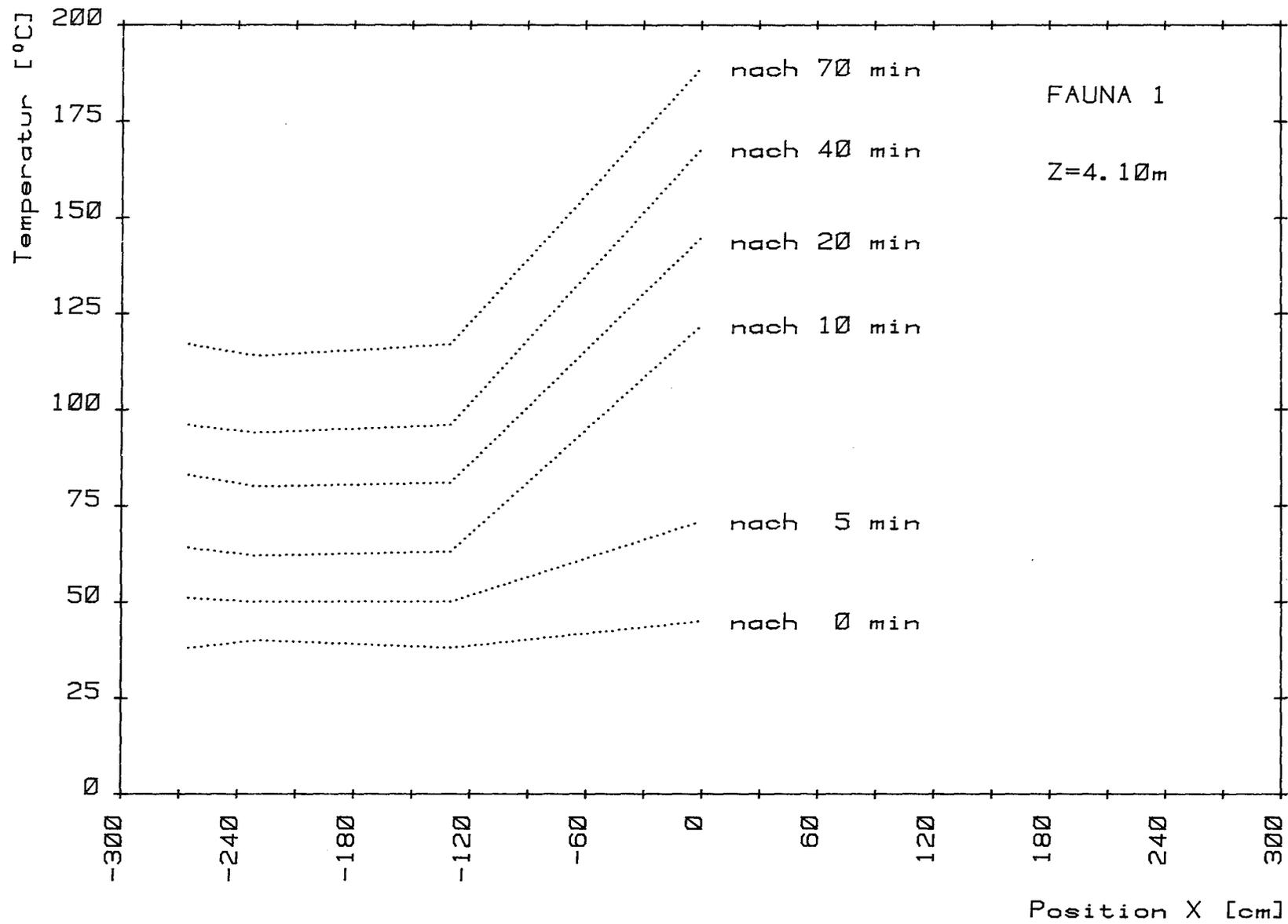


Abb. 4.5: Temperaturverteilung über den Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten

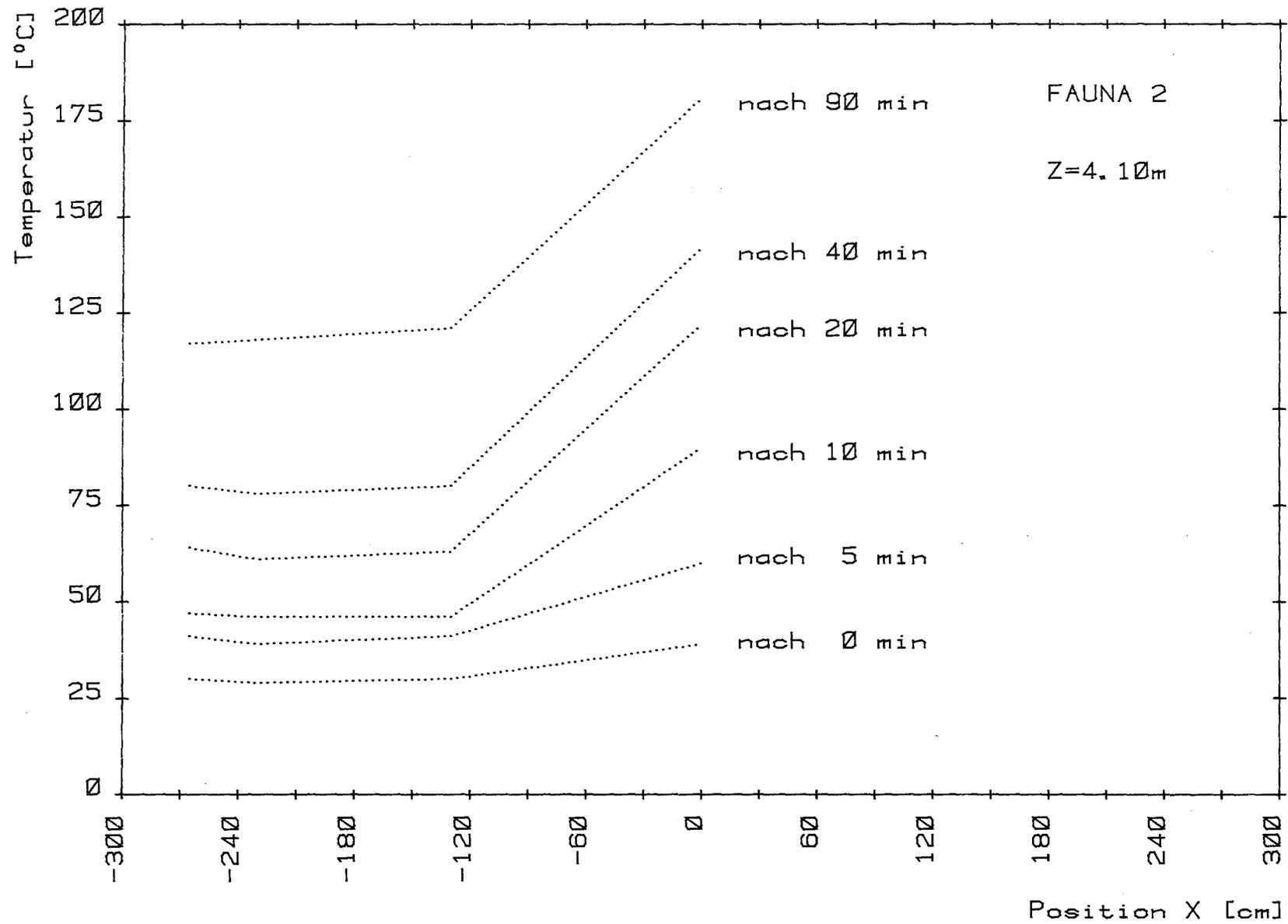


Bild 4.6: Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F2

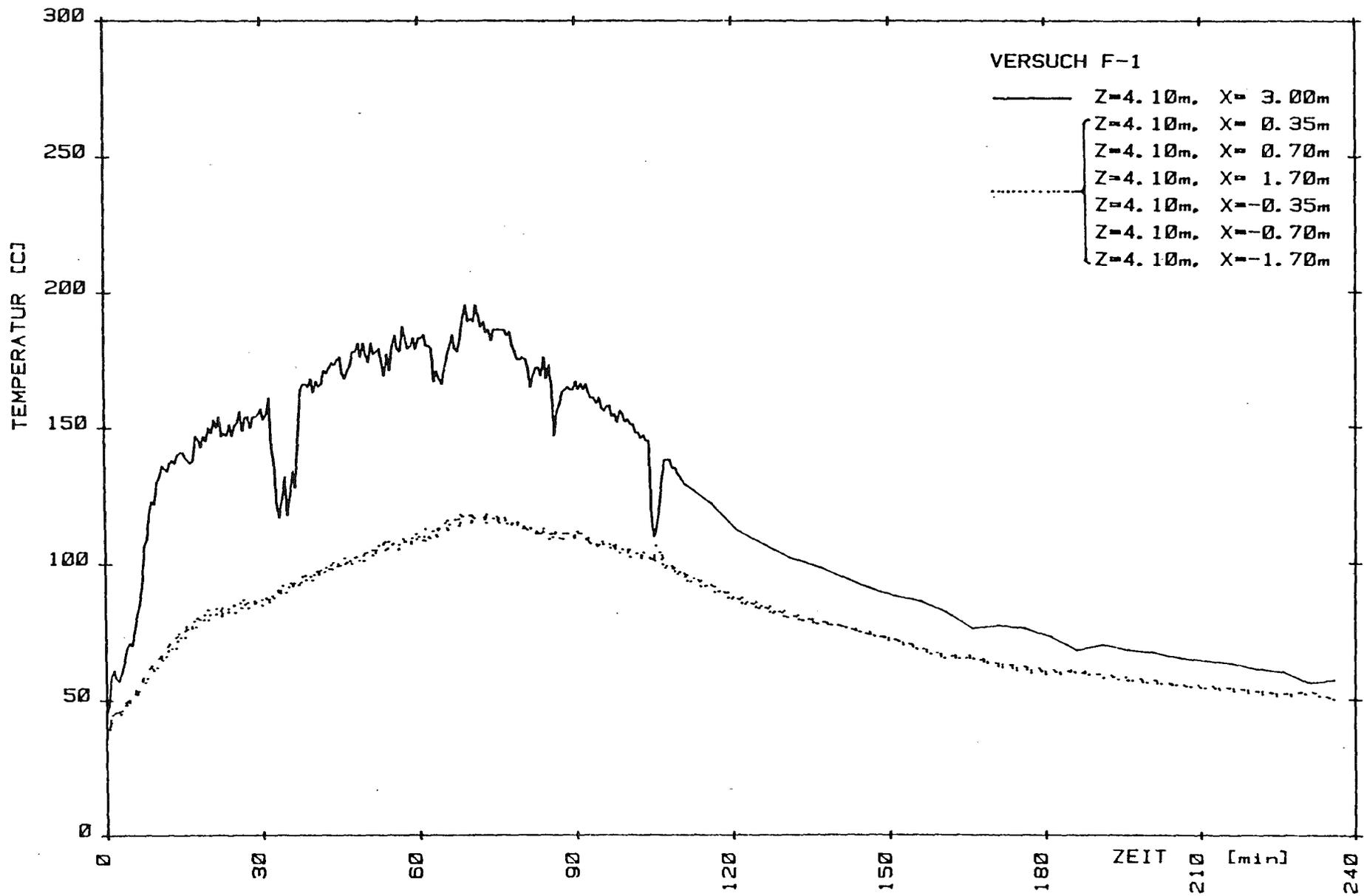


Bild 4.7: Verlauf der Gastemperatur in der Kesselmitte und im Rückströmbereich beim Versuch F1

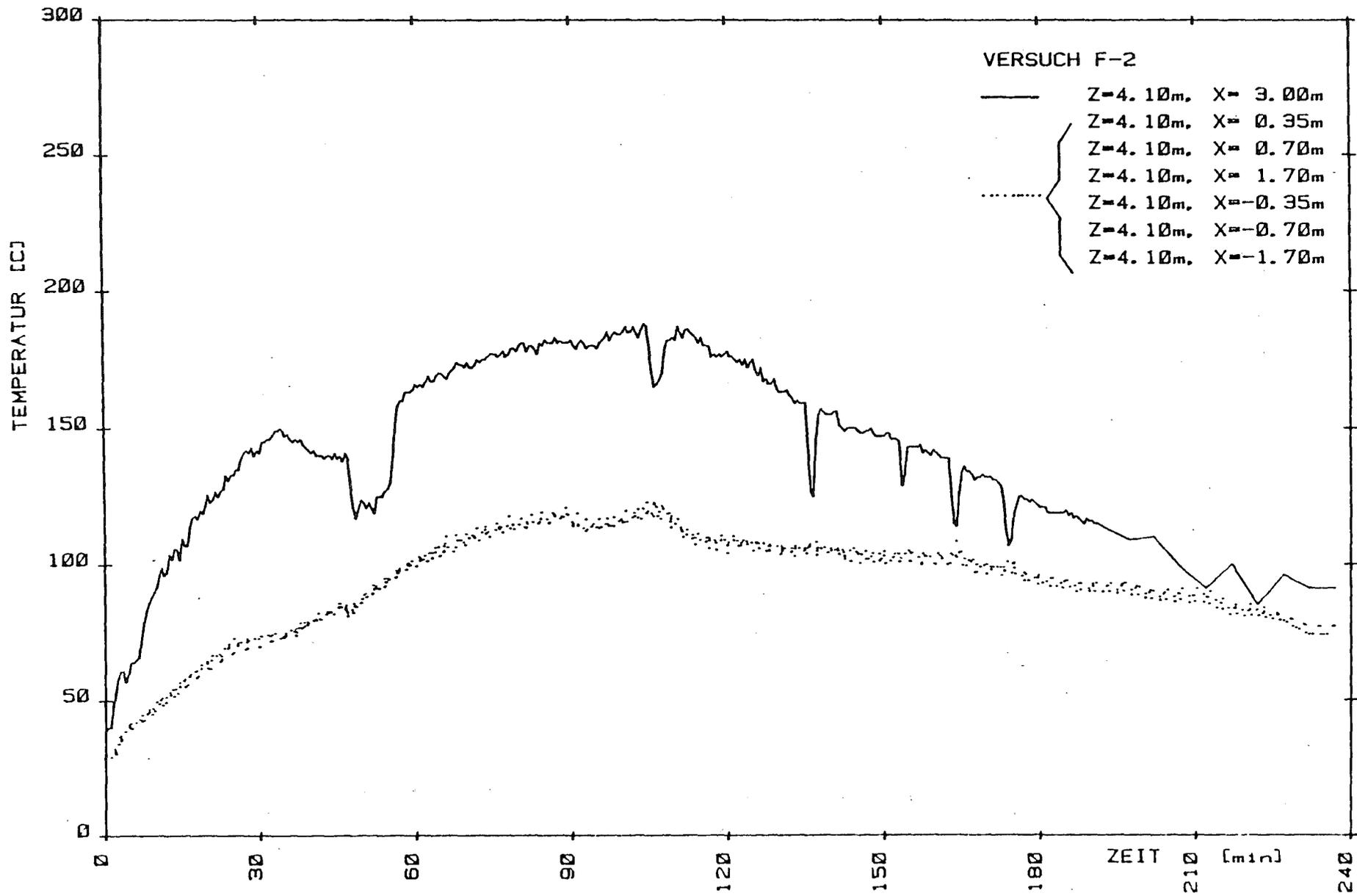


Bild 4.8: Verlauf der Gastemperatur in der Kesselmitte und im Rückströmbereich beim Versuch F2

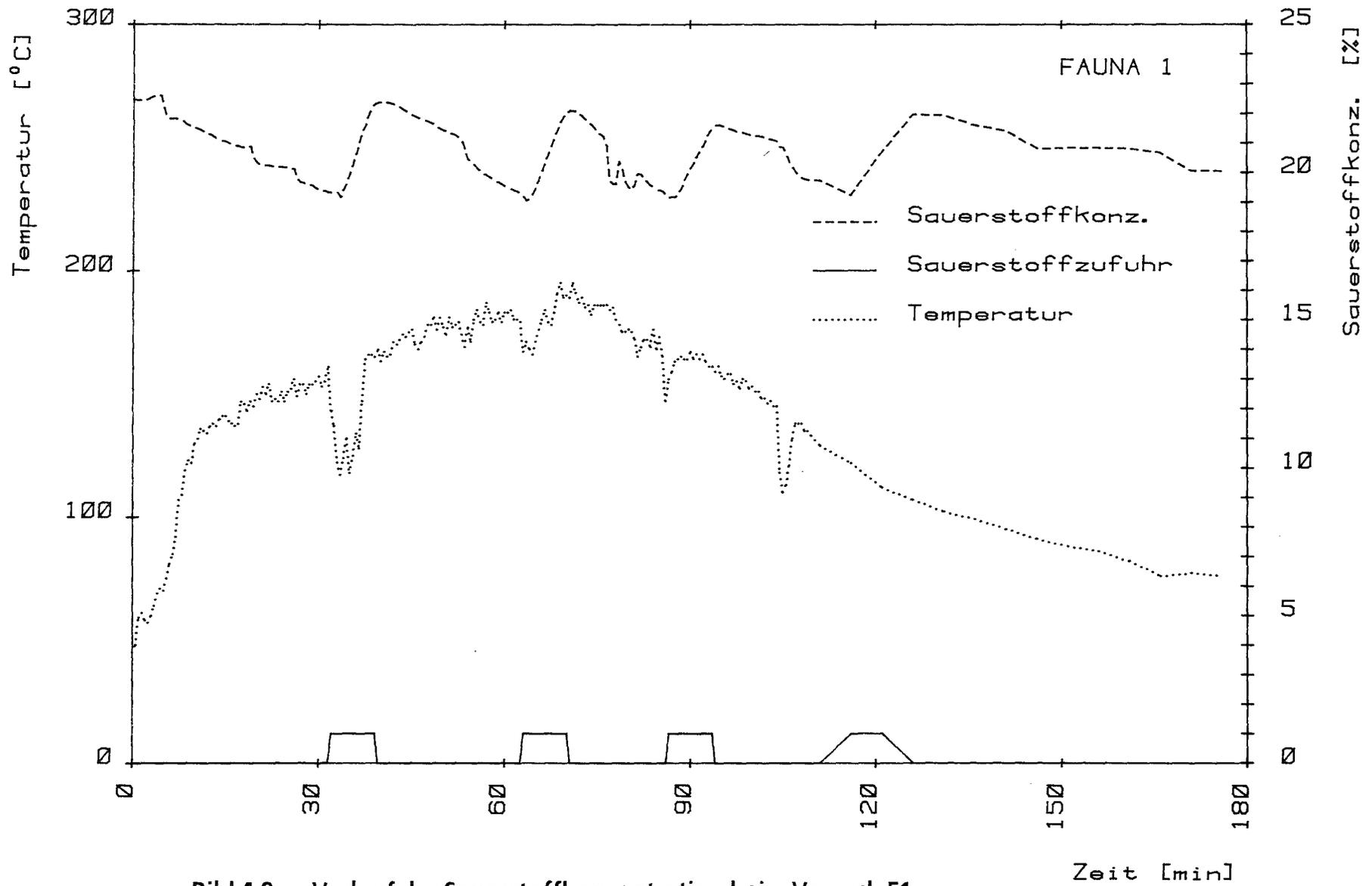


Bild 4.9: Verlauf der Sauerstoffkonzentration beim Versuch F1

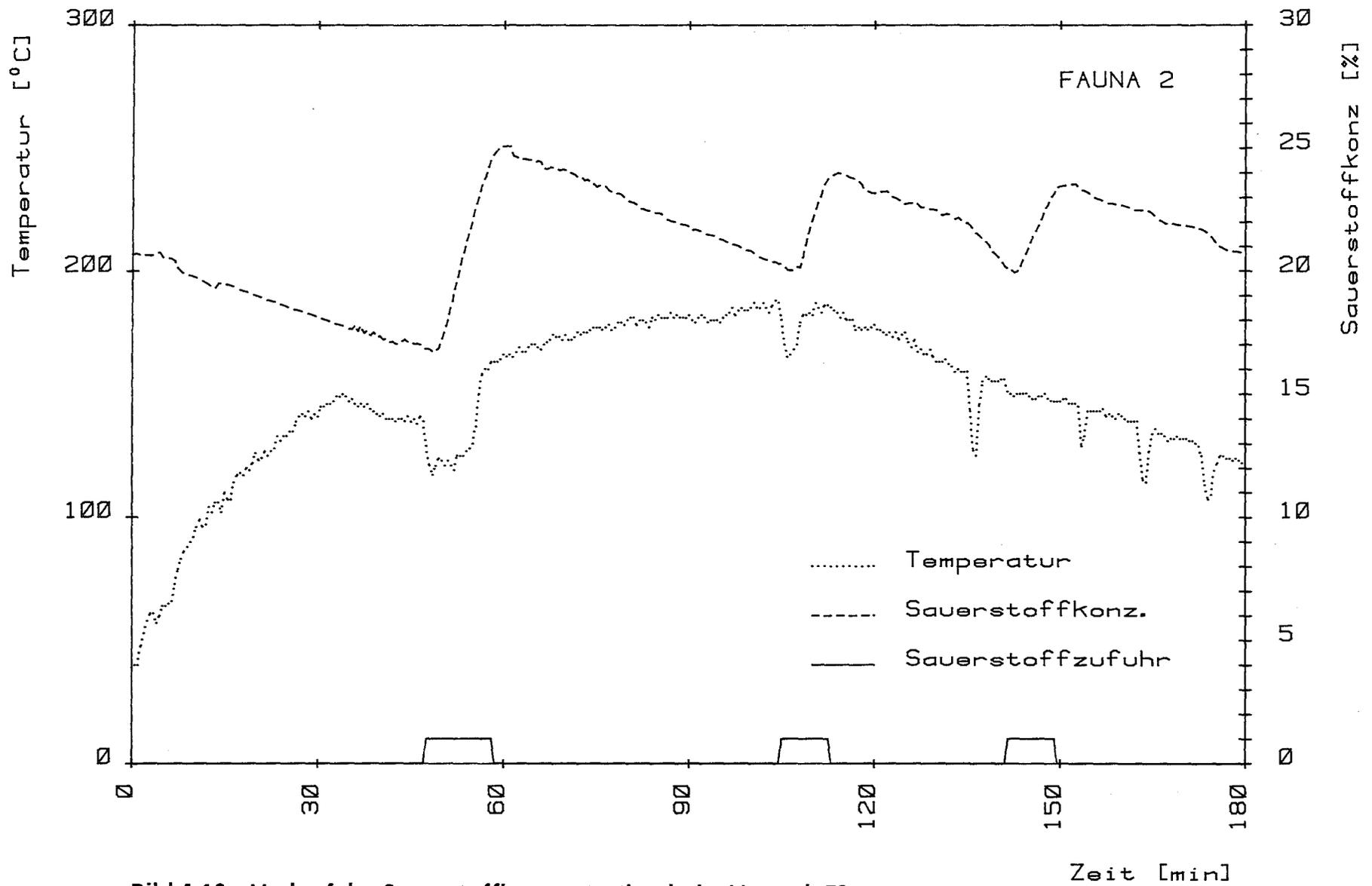


Bild 4.10: Verlauf der Sauerstoffkonzentration beim Versuch F2

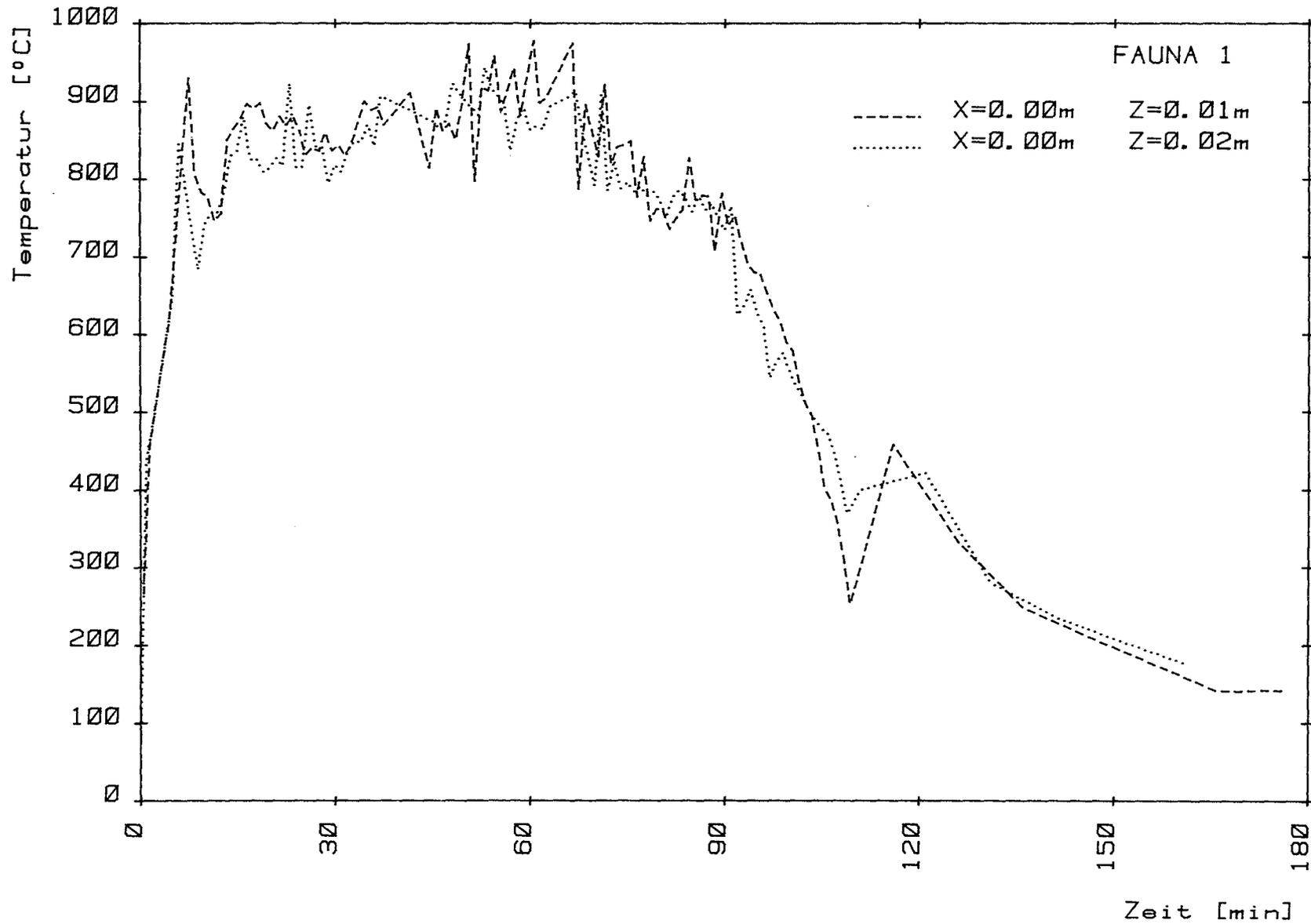


Bild 4.11: Verlauf der Natriumtemperatur beim Versuch F1 (1 cm und 2 cm über dem Pfannenboden)

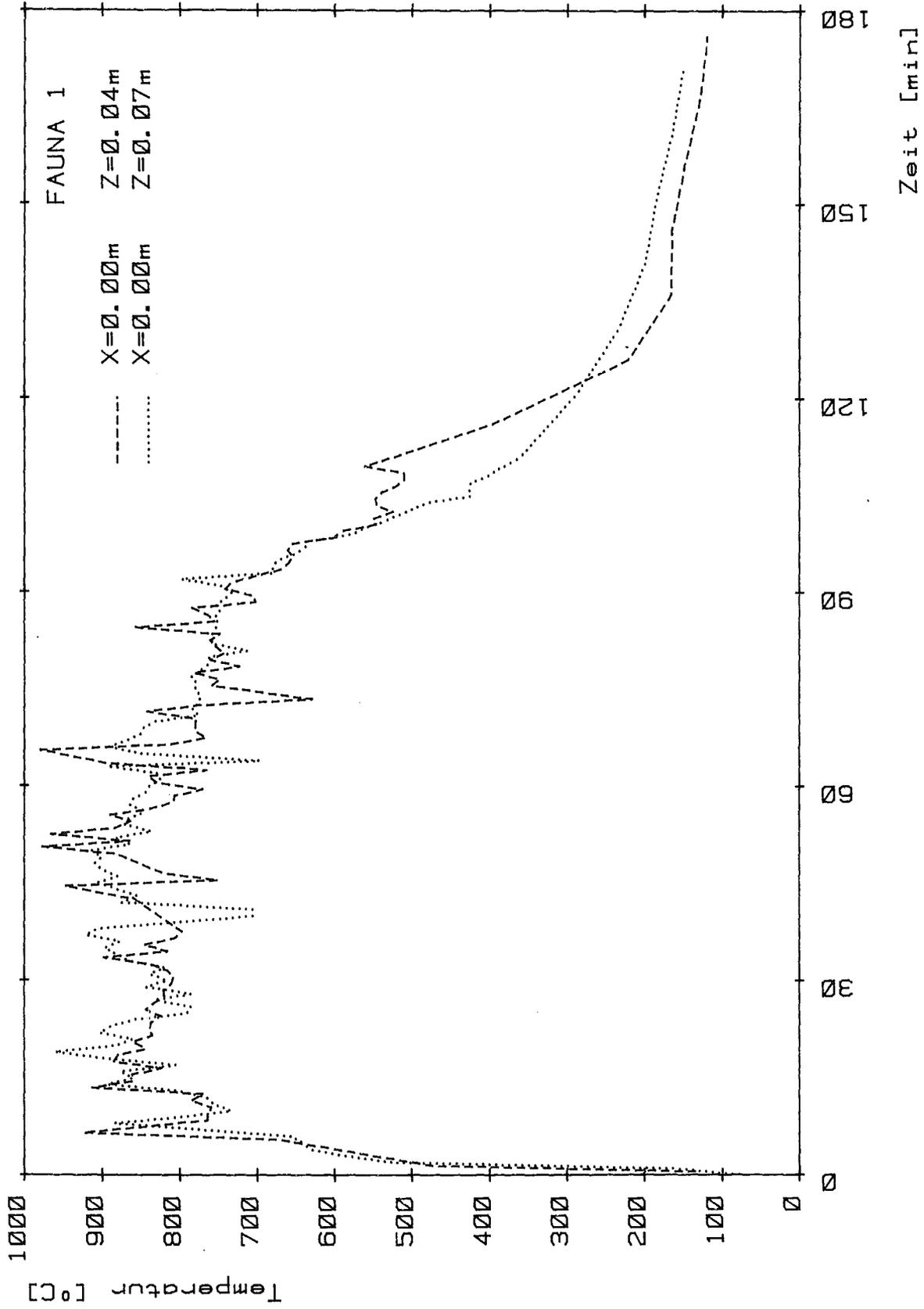


Bild 4.12: Verlauf der Natriumtemperatur beim Versuch F1 (4 cm und 7 cm über dem Pfannenboden)

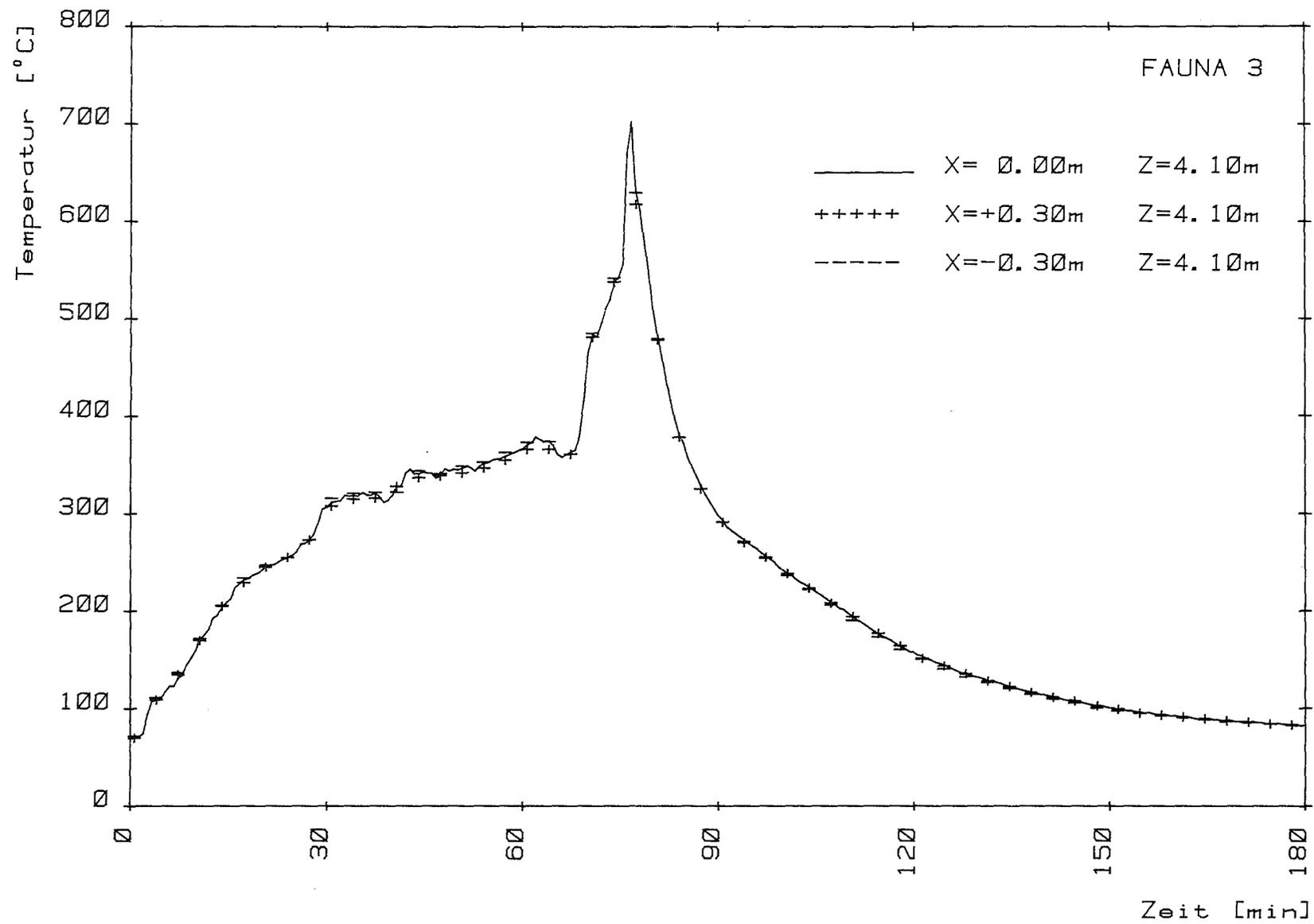
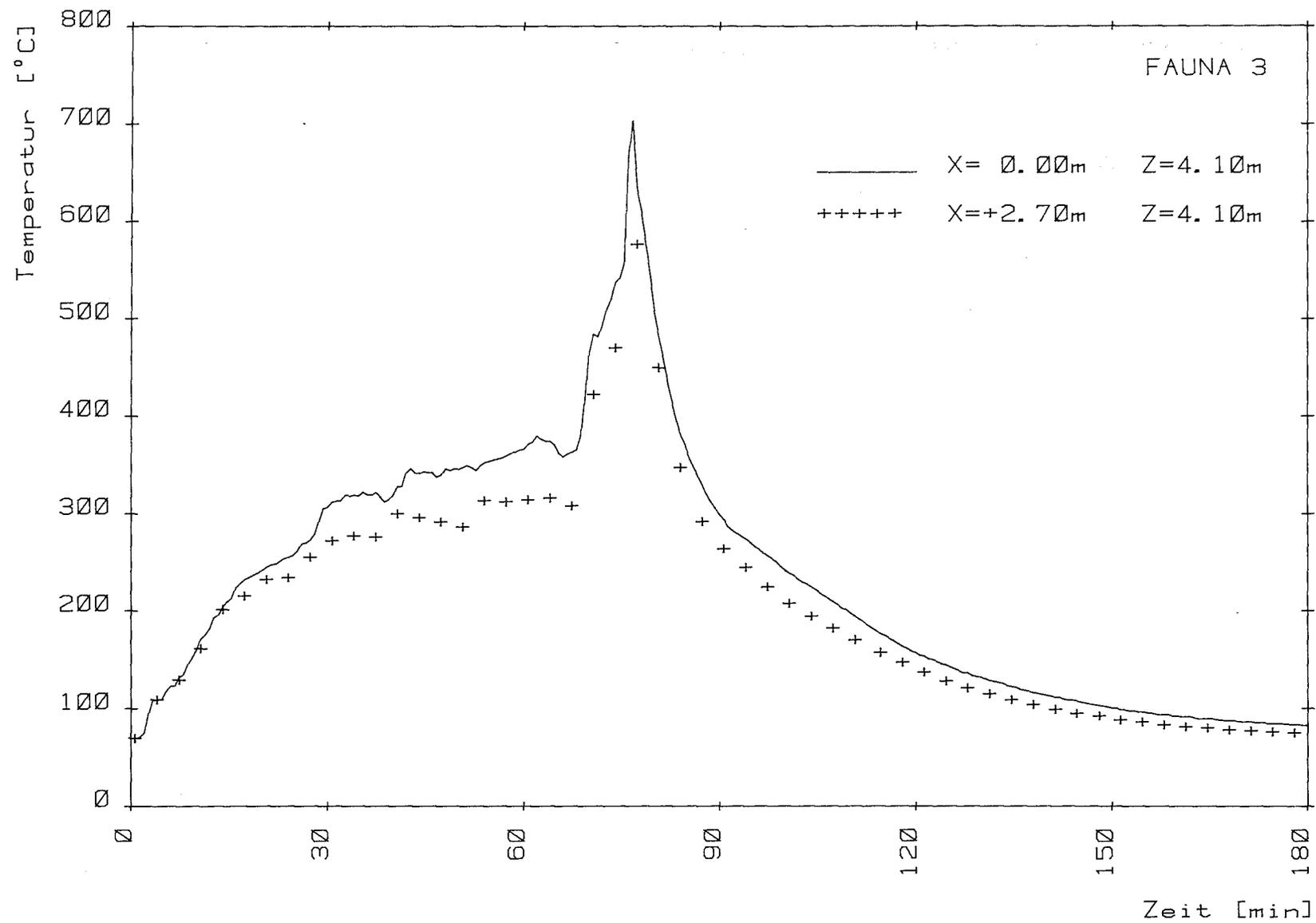


Bild 4.13: Verlauf der Gastemperatur in der Kesselmitte beim Versuch F3



**Bild 4.14:** Verlauf der Gastemperatur in der Kesselmitte und in Randnähe ("rechts") beim Versuch F3

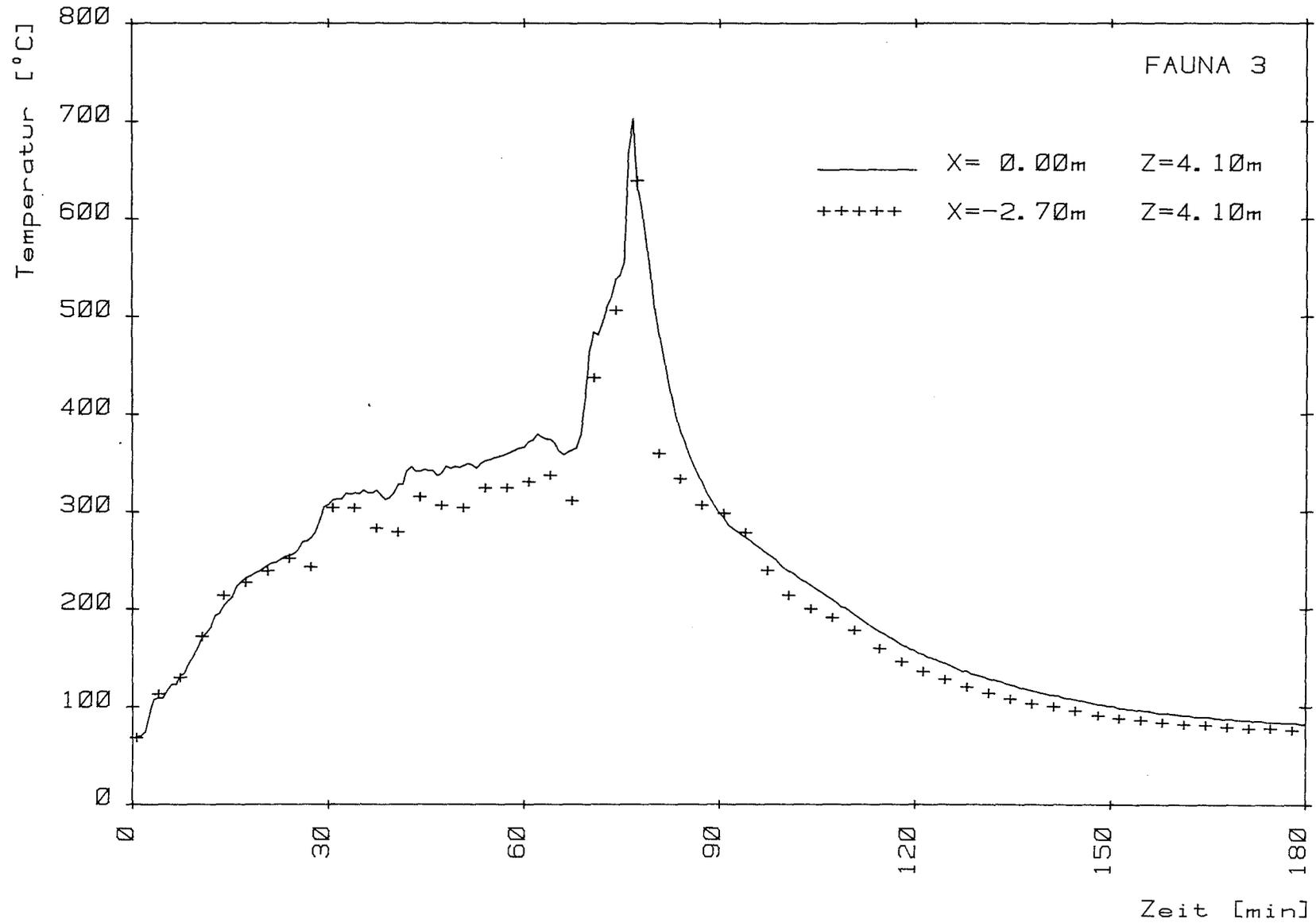


Bild 4.15: Verlauf der Gastemperatur in der Kesselmitte und in Randnähe ("links") beim Versuch F3

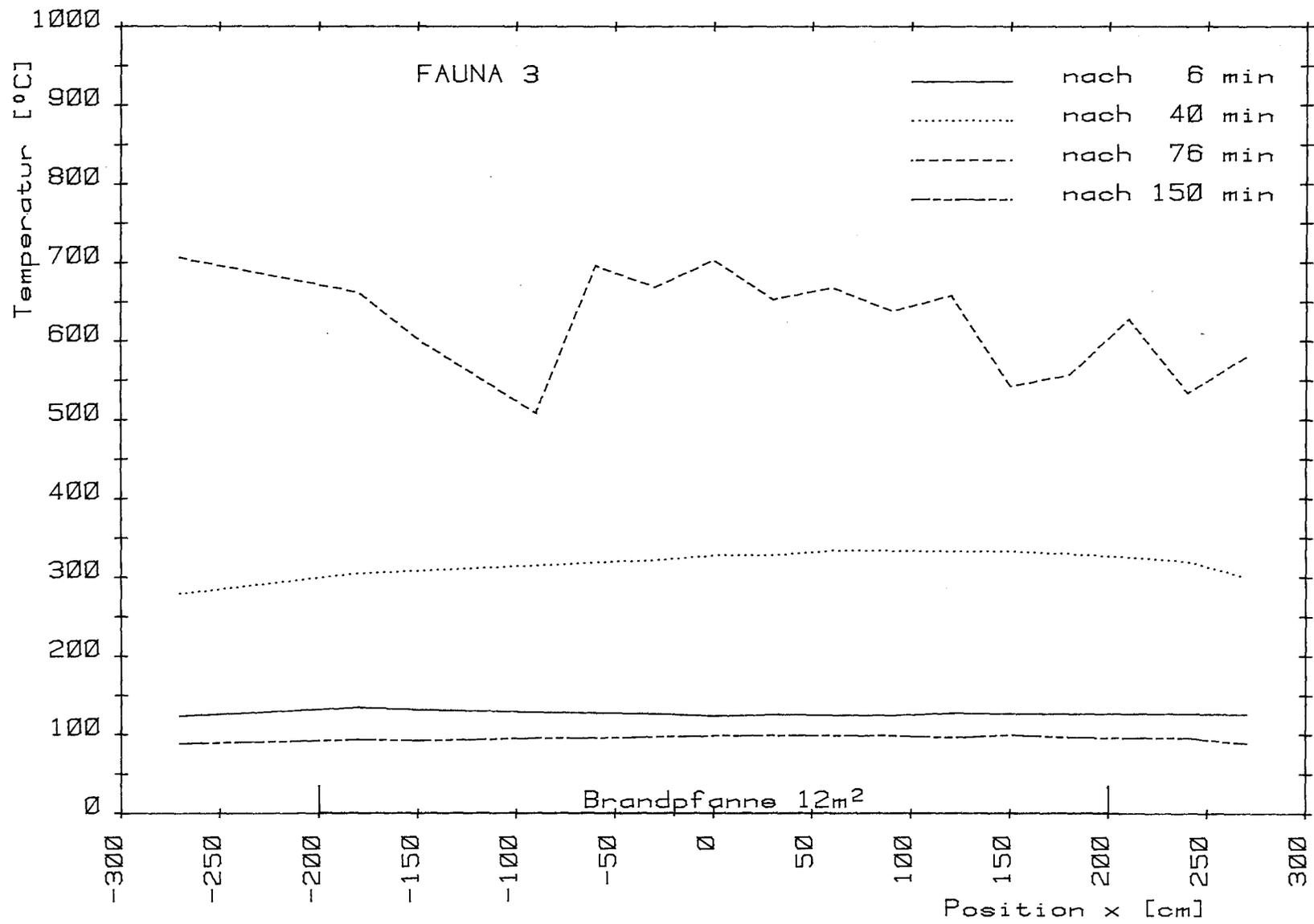


Bild 4.16: Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F3

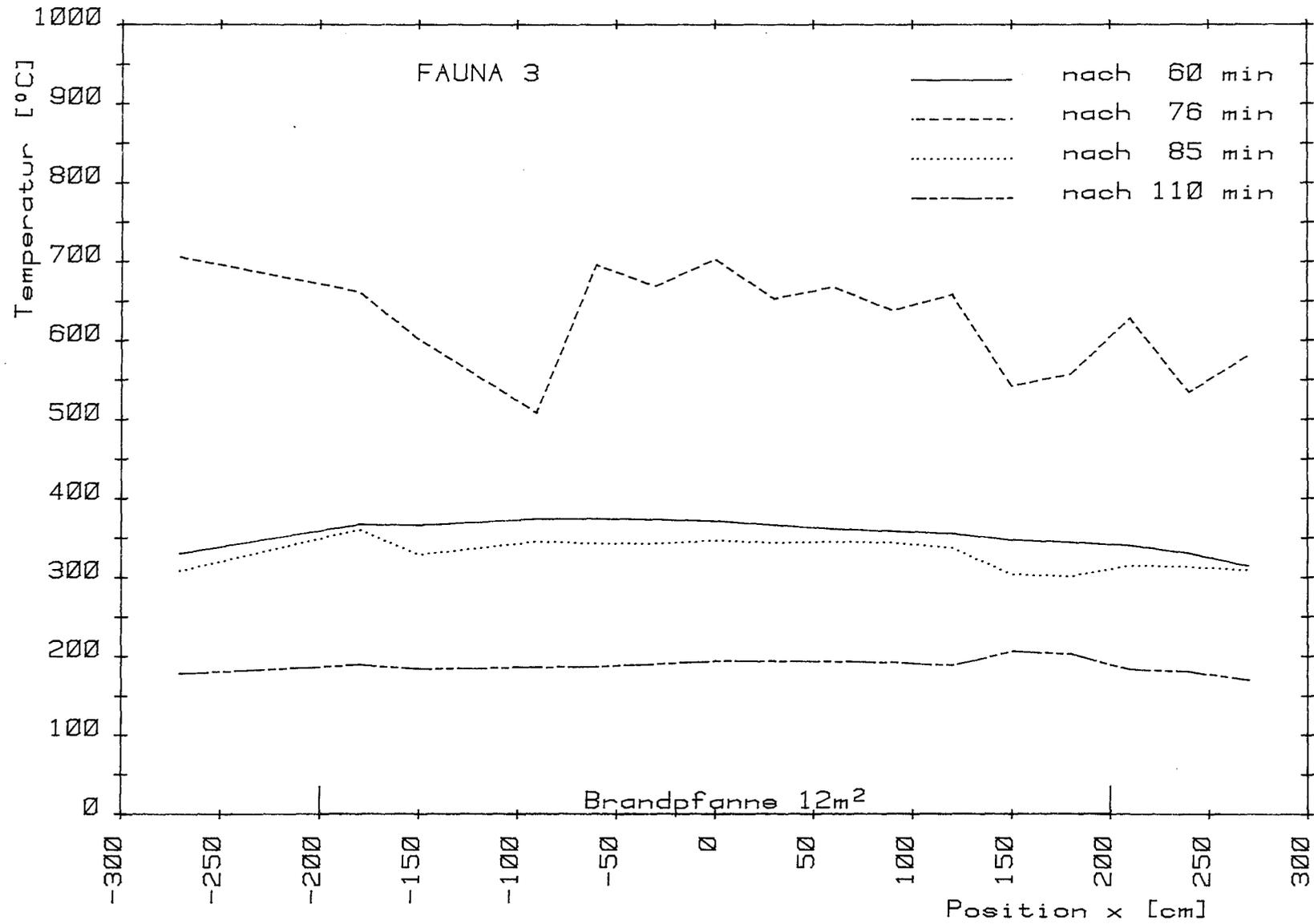


Bild 4.17: Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F3

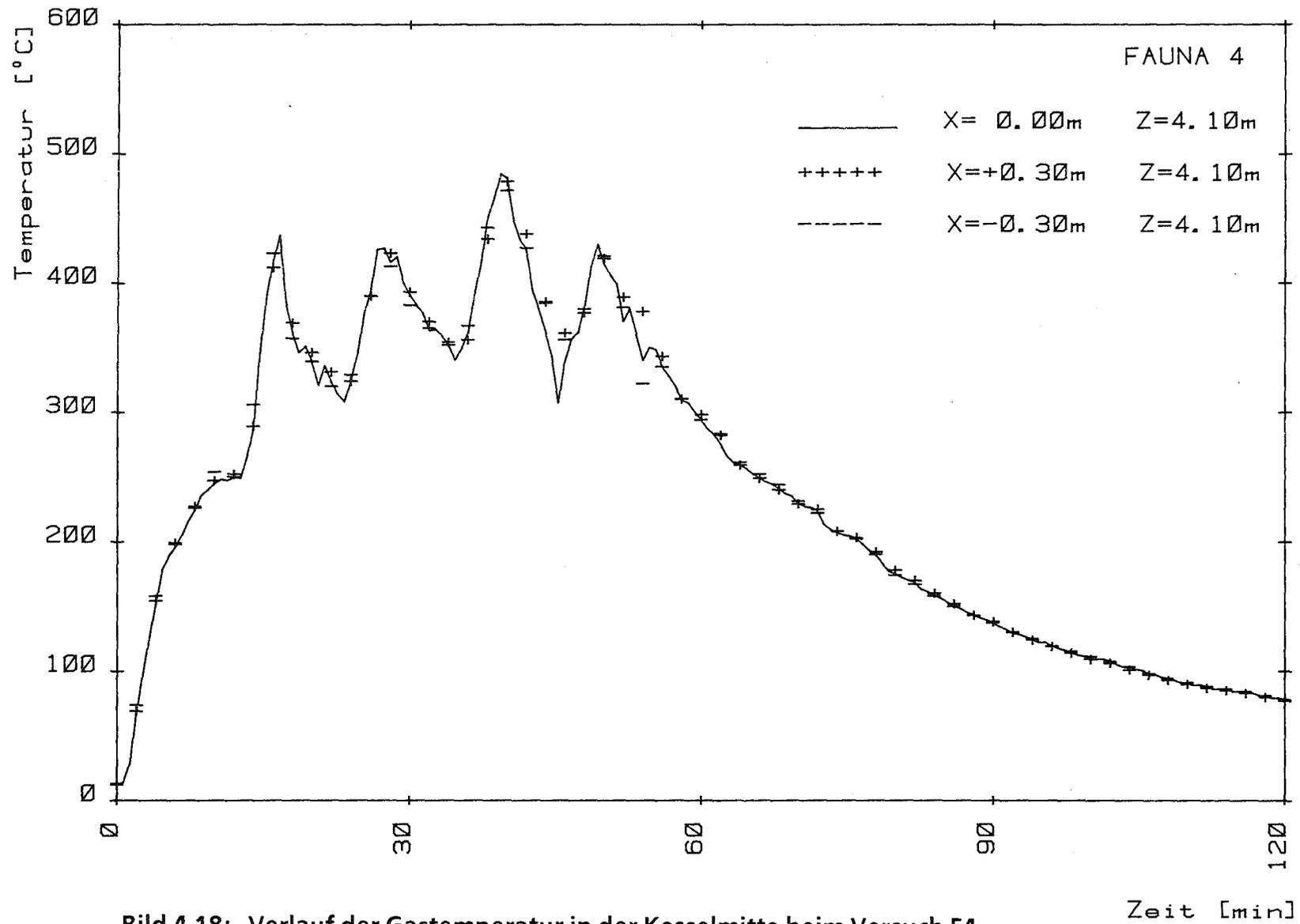


Bild 4.18: Verlauf der Gastemperatur in der Kesselmitte beim Versuch F4

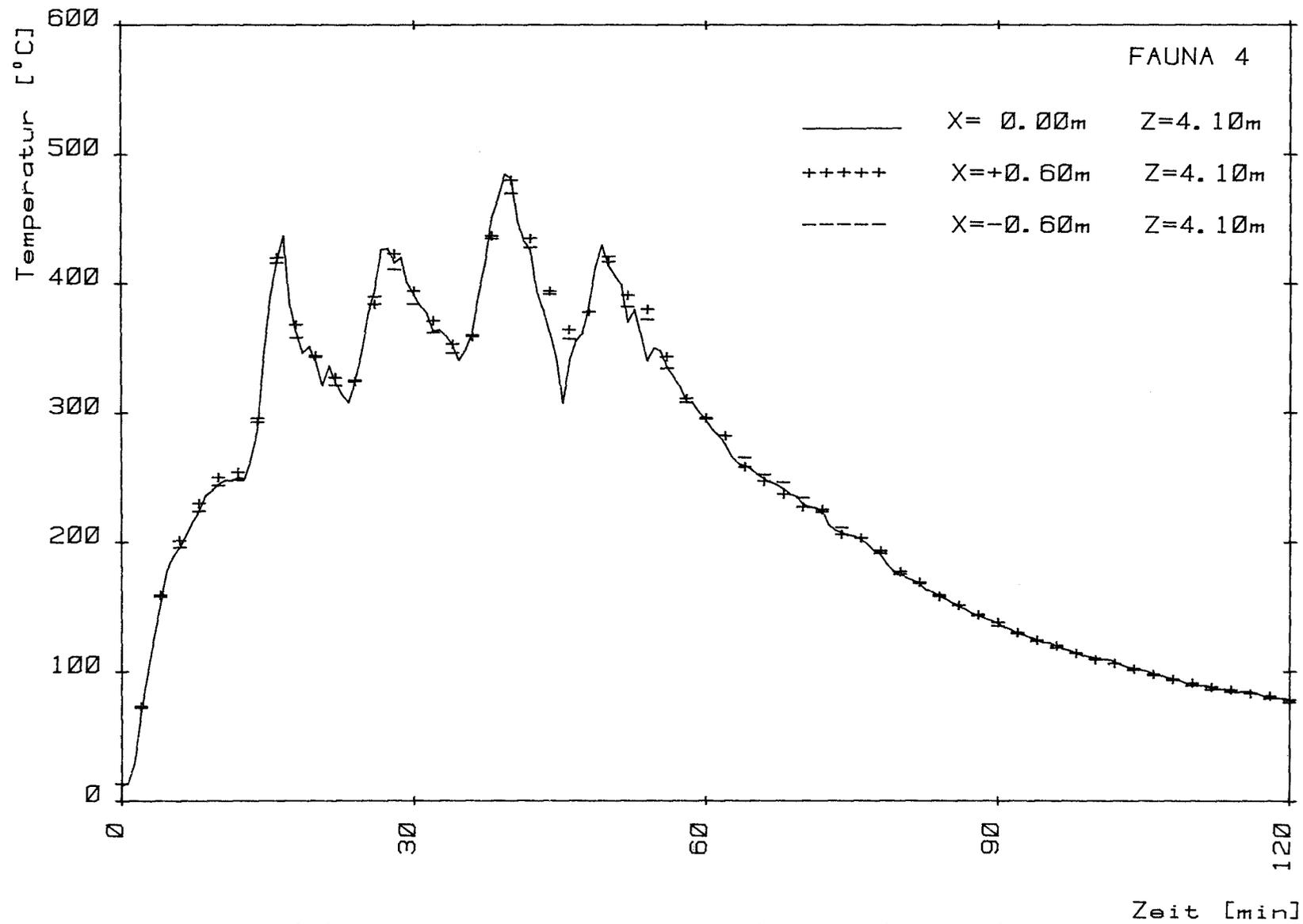


Bild 4.19: Vergleich der Gastemperatur verschiedener Meßstellen beim Versuch F4

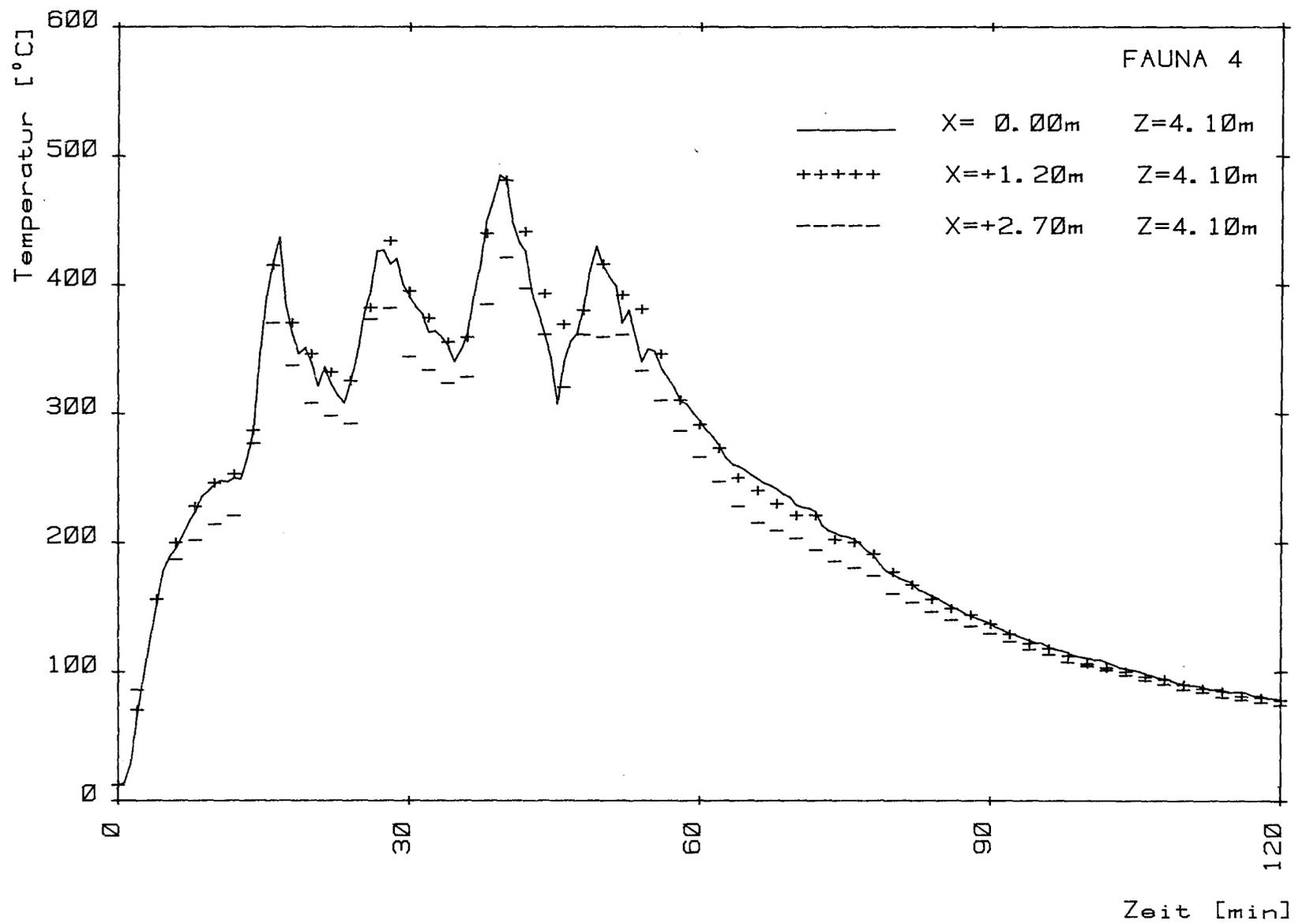


Bild 4.20: Vergleich der Gastemperatur verschiedener Meßstellen beim Versuch F4

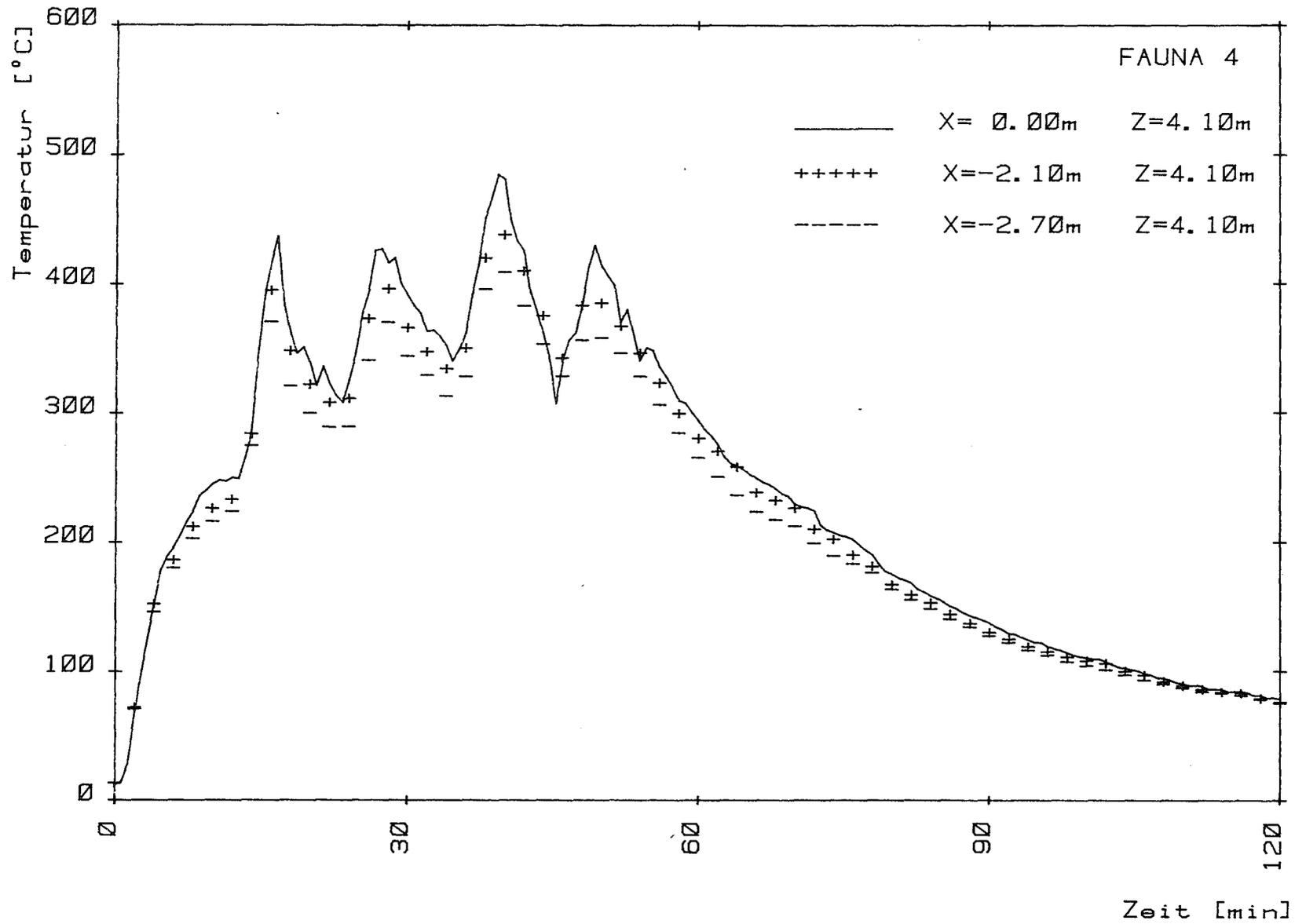


Bild 4.21: Vergleich der Gastemperatur verschiedener Meßstellen beim Versuch F4

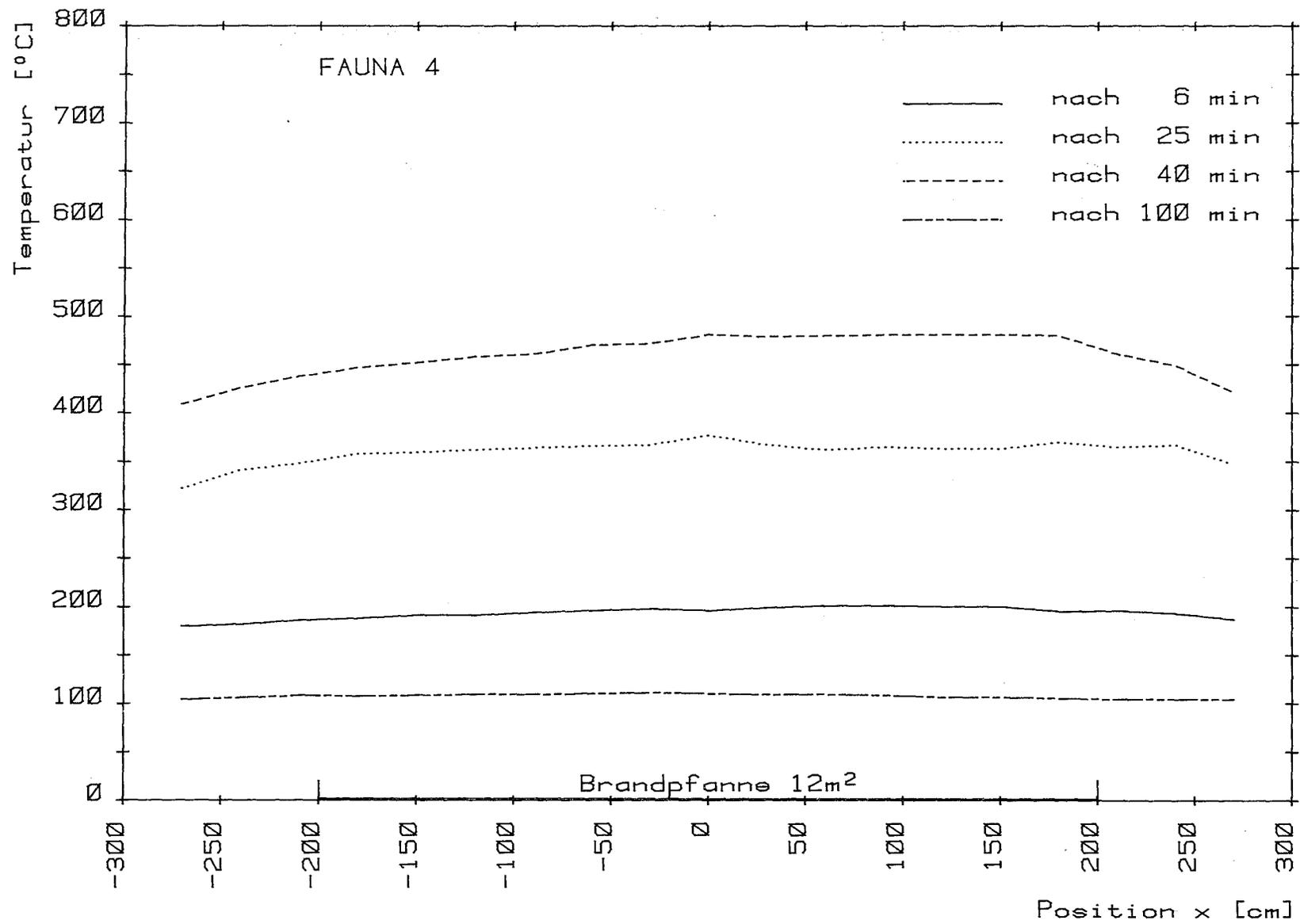


Bild 4.22: Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F4

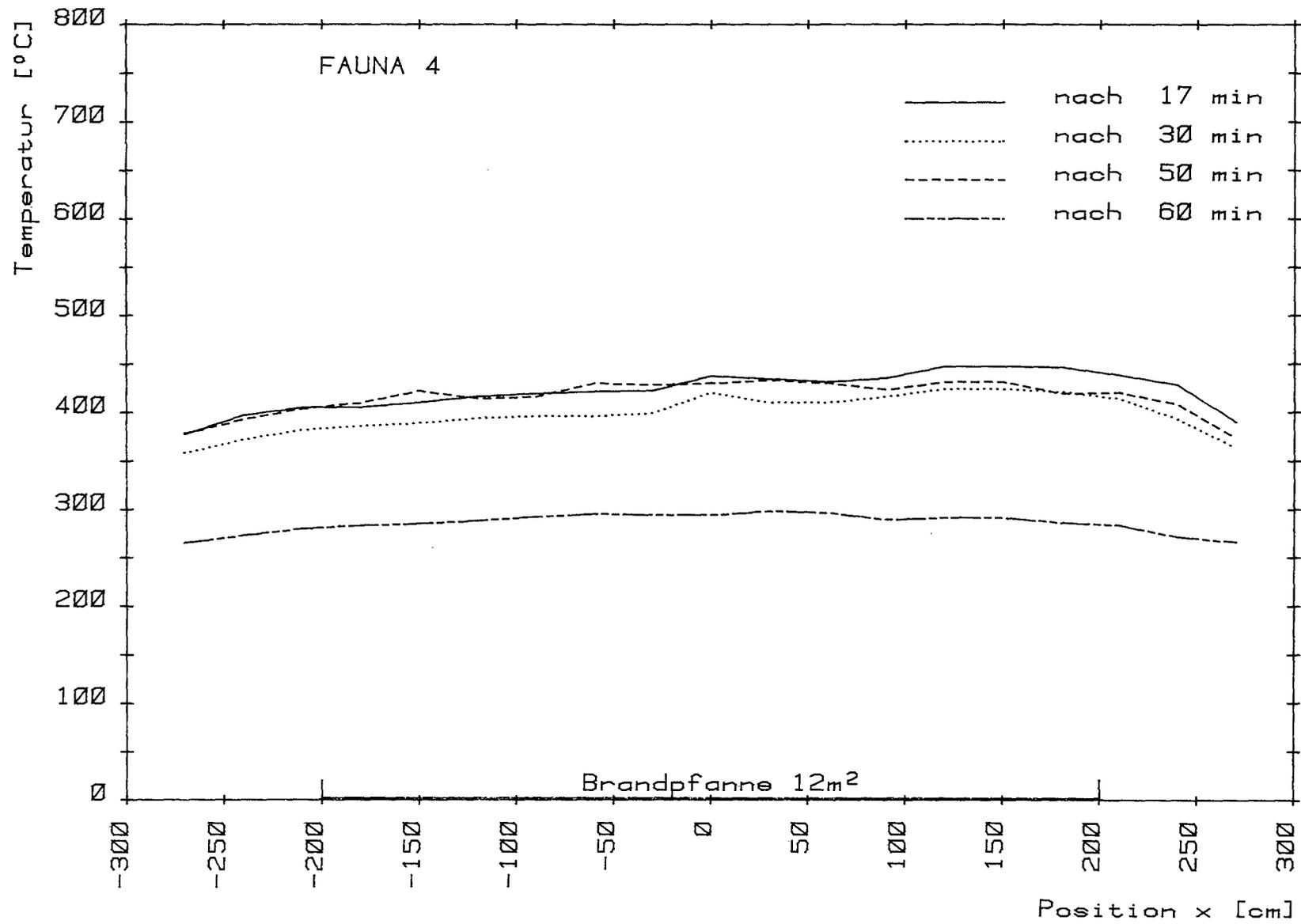


Bild 4.23: Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F4

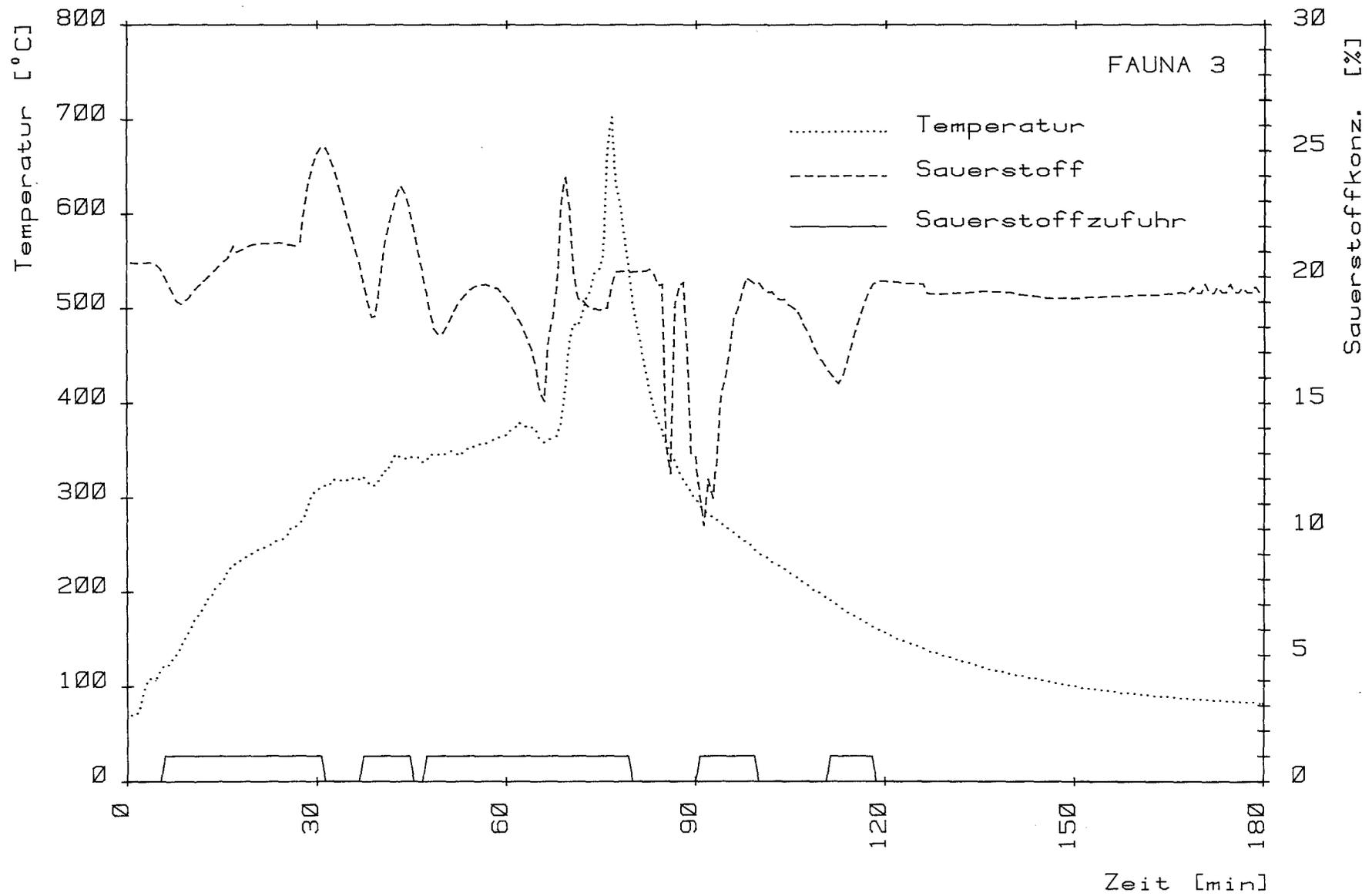


Bild 4.24: Einfluß der Sauerstoffkonzentration auf den Brandverlauf beim Versuch F3

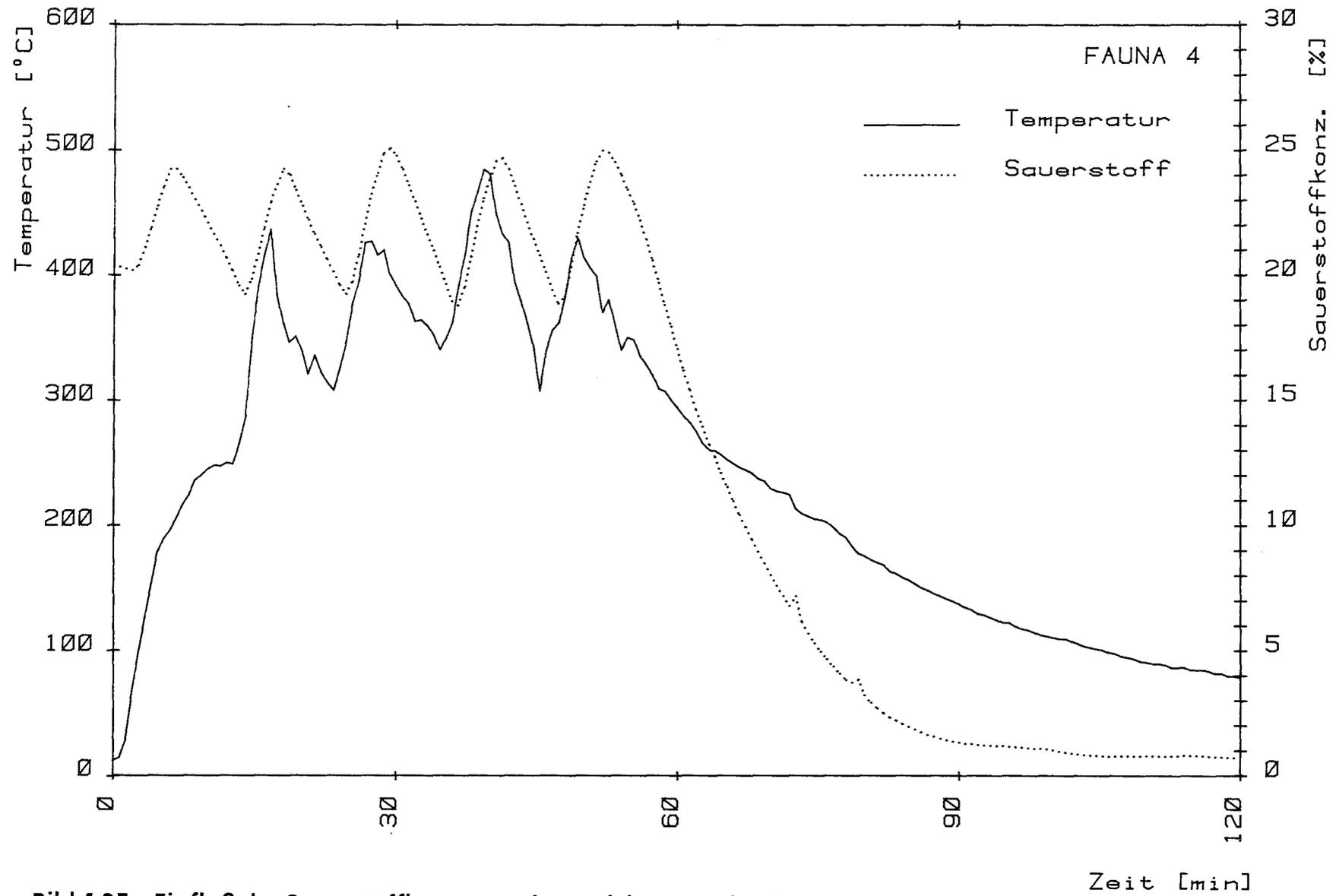
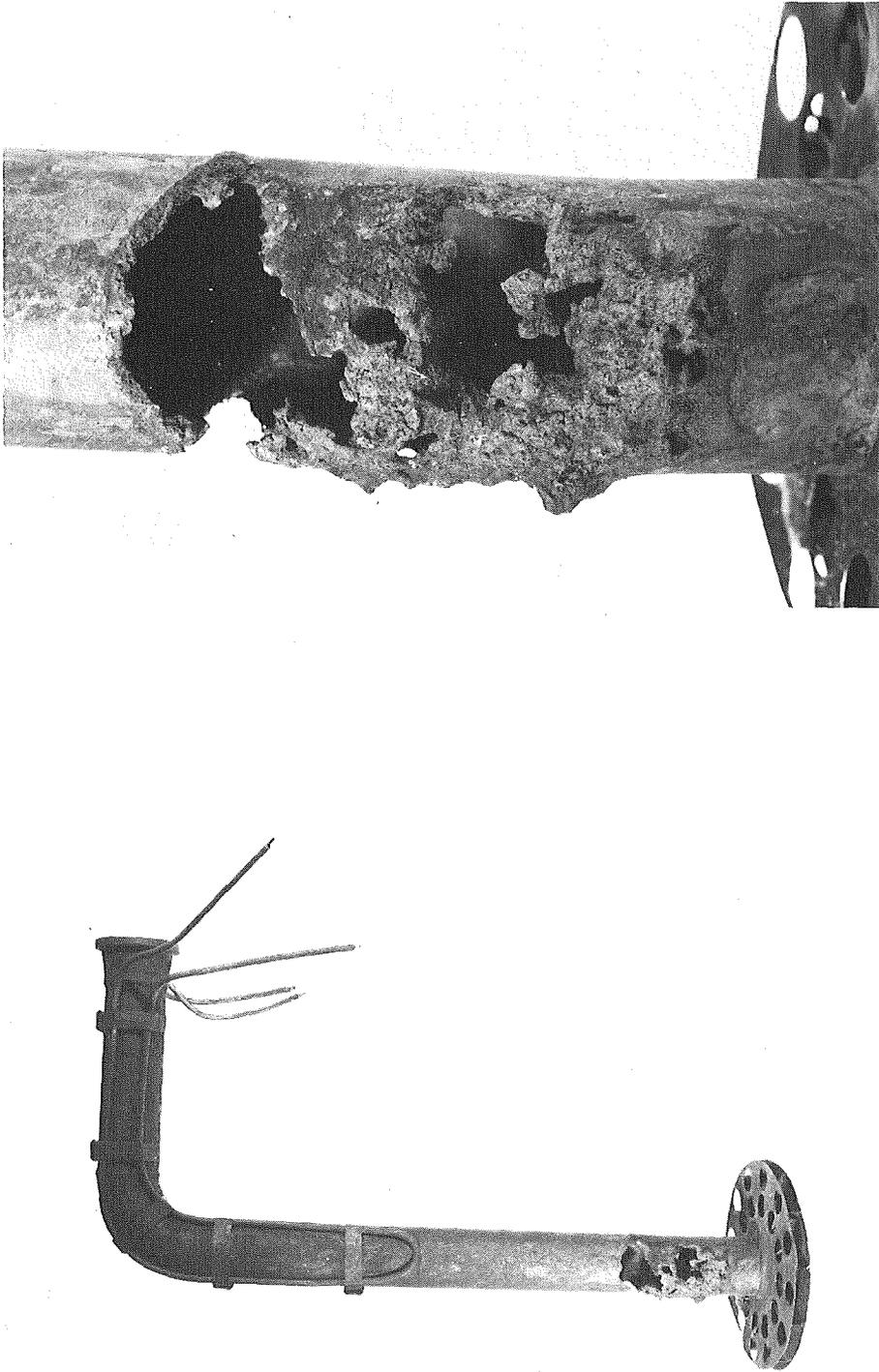


Bild 4.25: Einfluß der Sauerstoffkonzentration auf den Brandverlauf beim Versuch F4



**Bild 4.26: Korrosion am Natriumeinlaßstutzen im Bereich der Flammenzone**

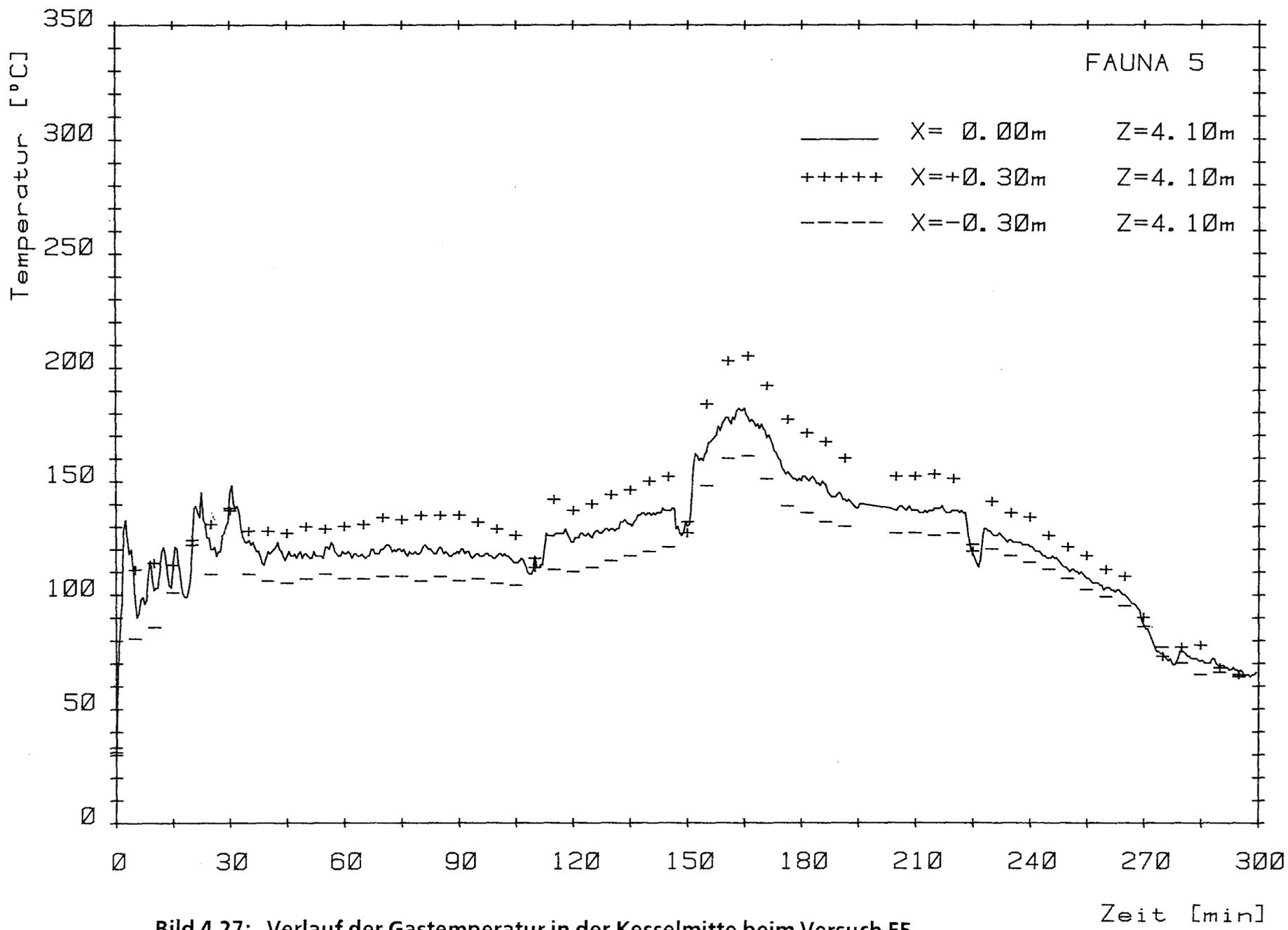


Bild 4.27: Verlauf der Gastemperatur in der Kesselmitte beim Versuch F5

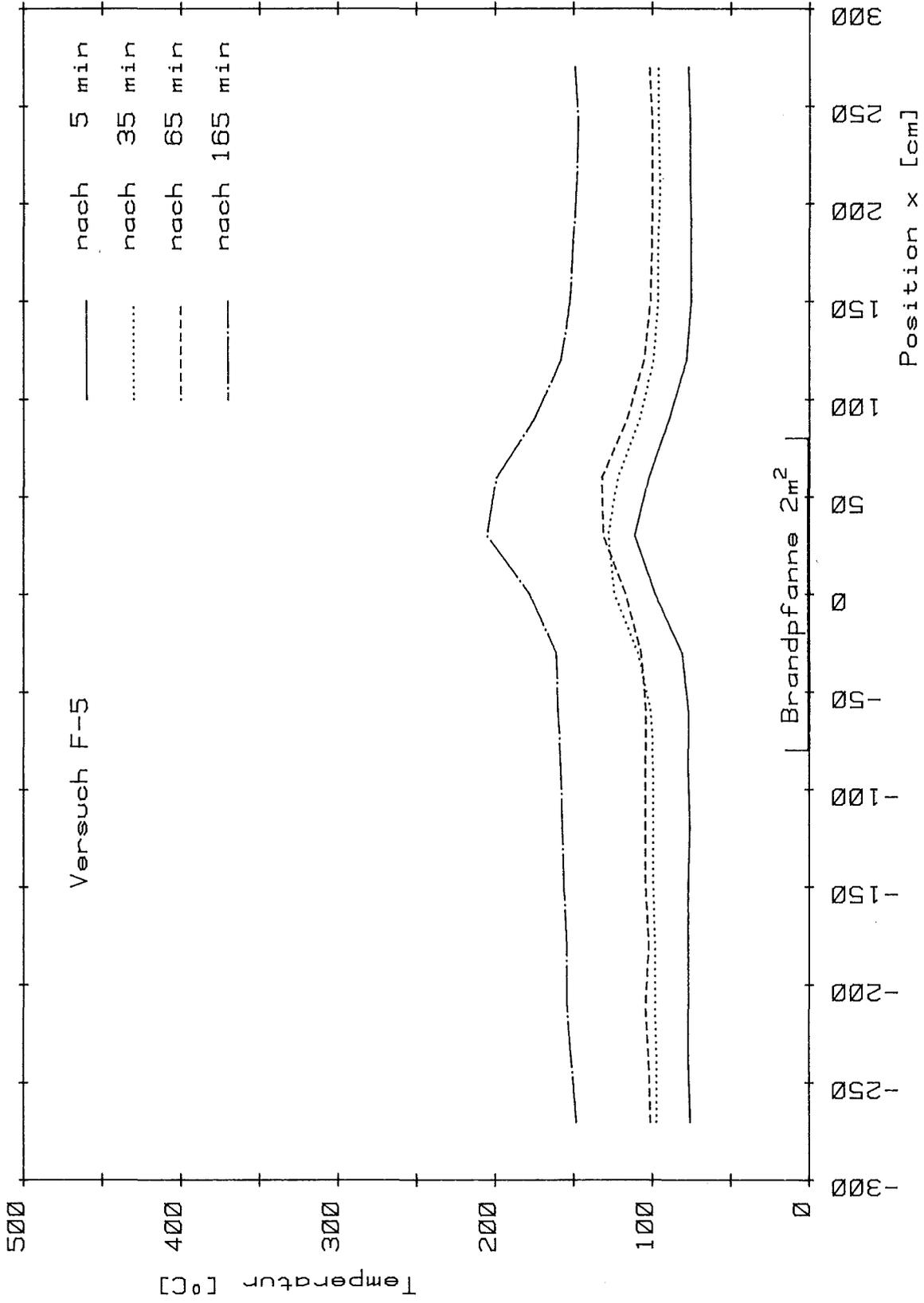


Bild 4.28: Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F5

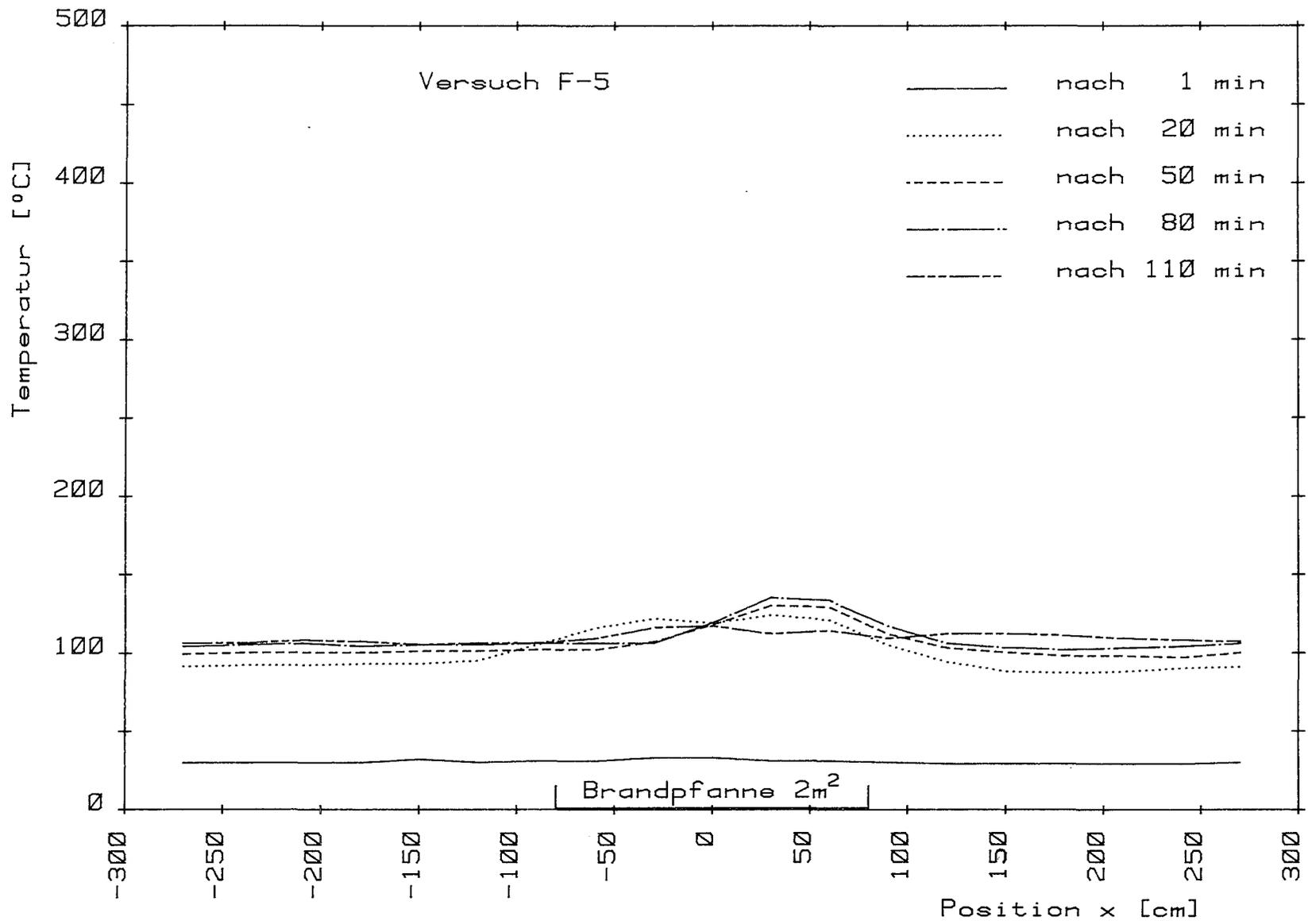


Bild 4.29: Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F5

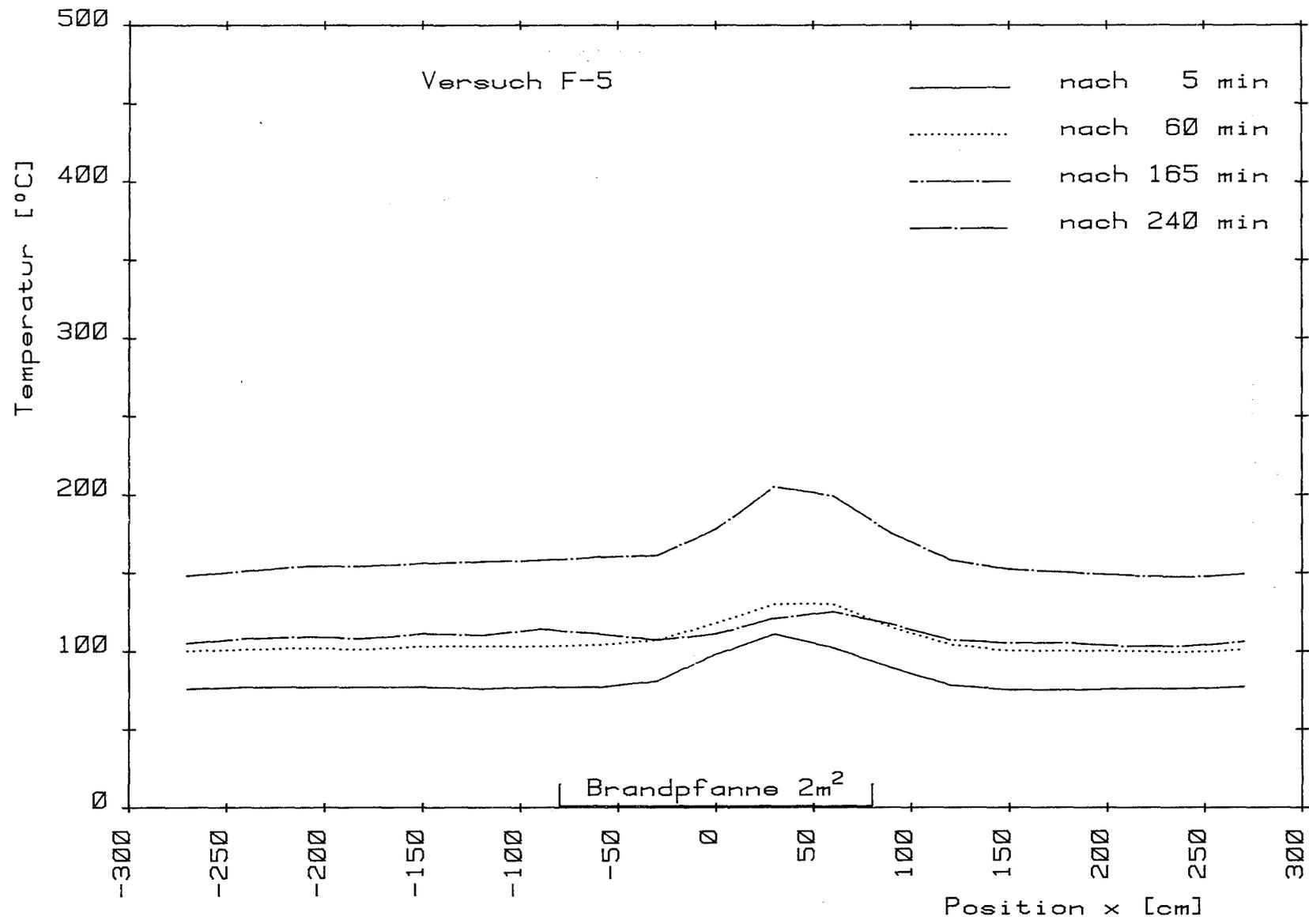


Bild 4.30: Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F5

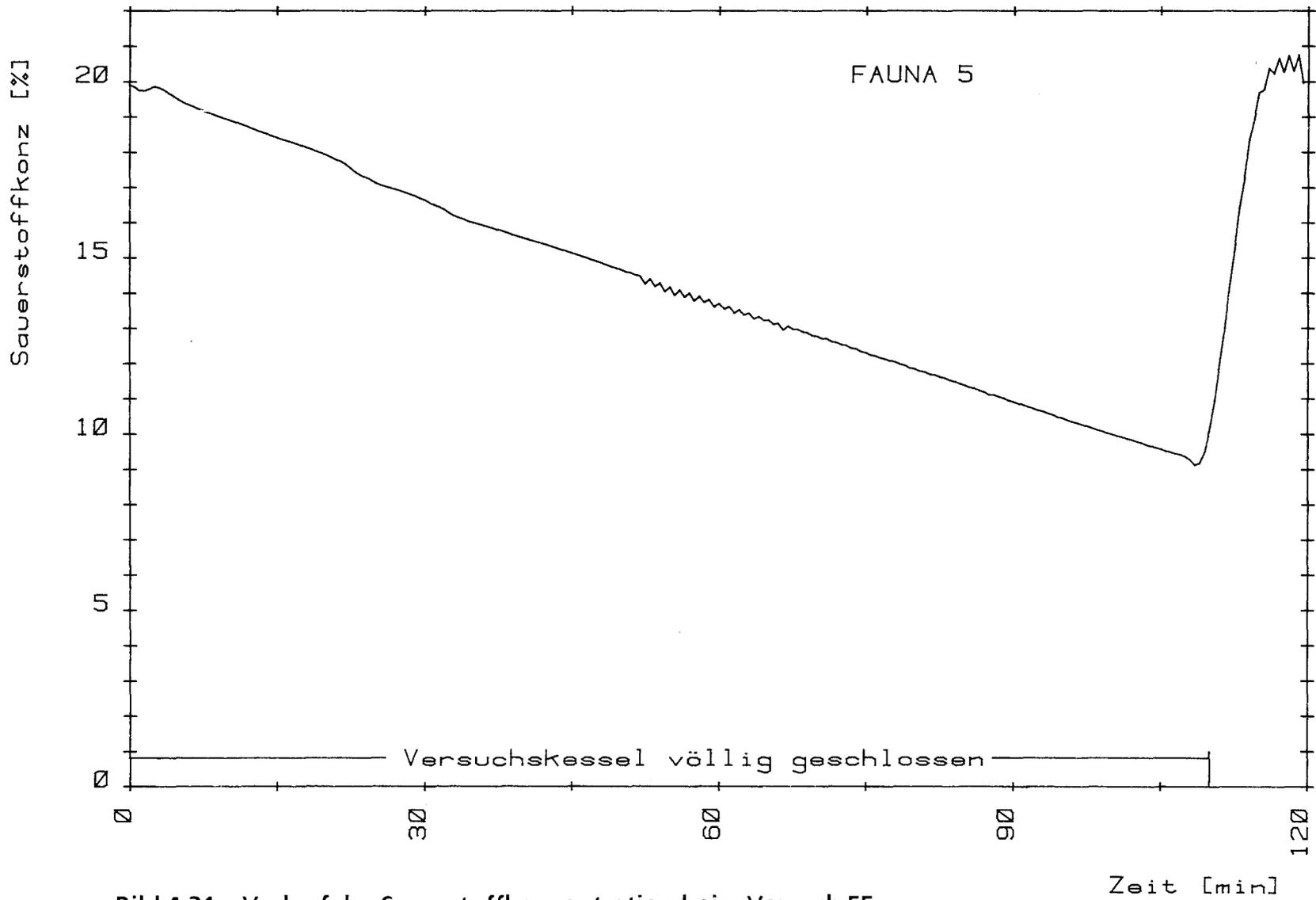


Bild 4.31: Verlauf der Sauerstoffkonzentration beim Versuch F5

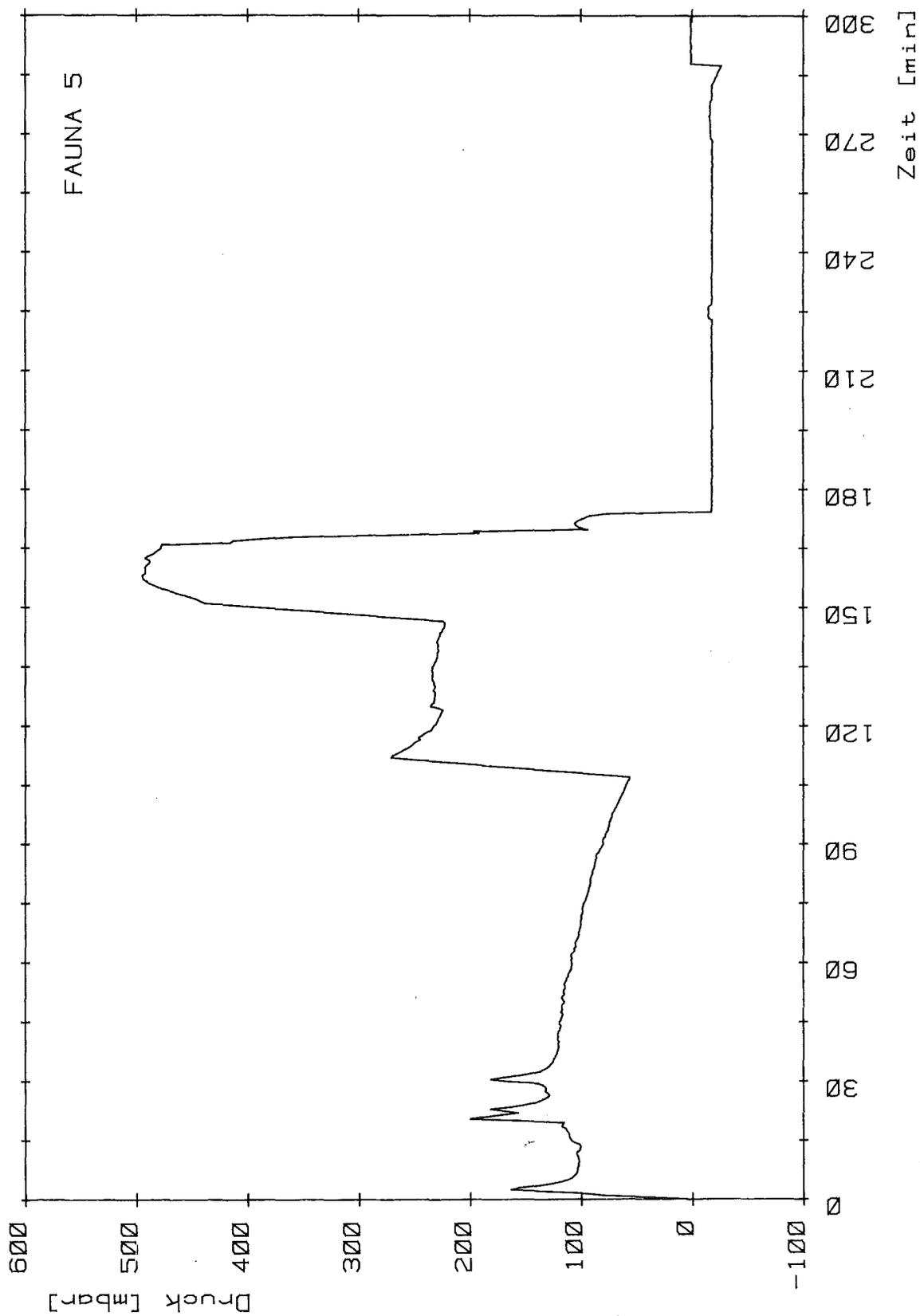


Bild 4.32: Druckverlauf im Versuchskessel beim Versuch F5

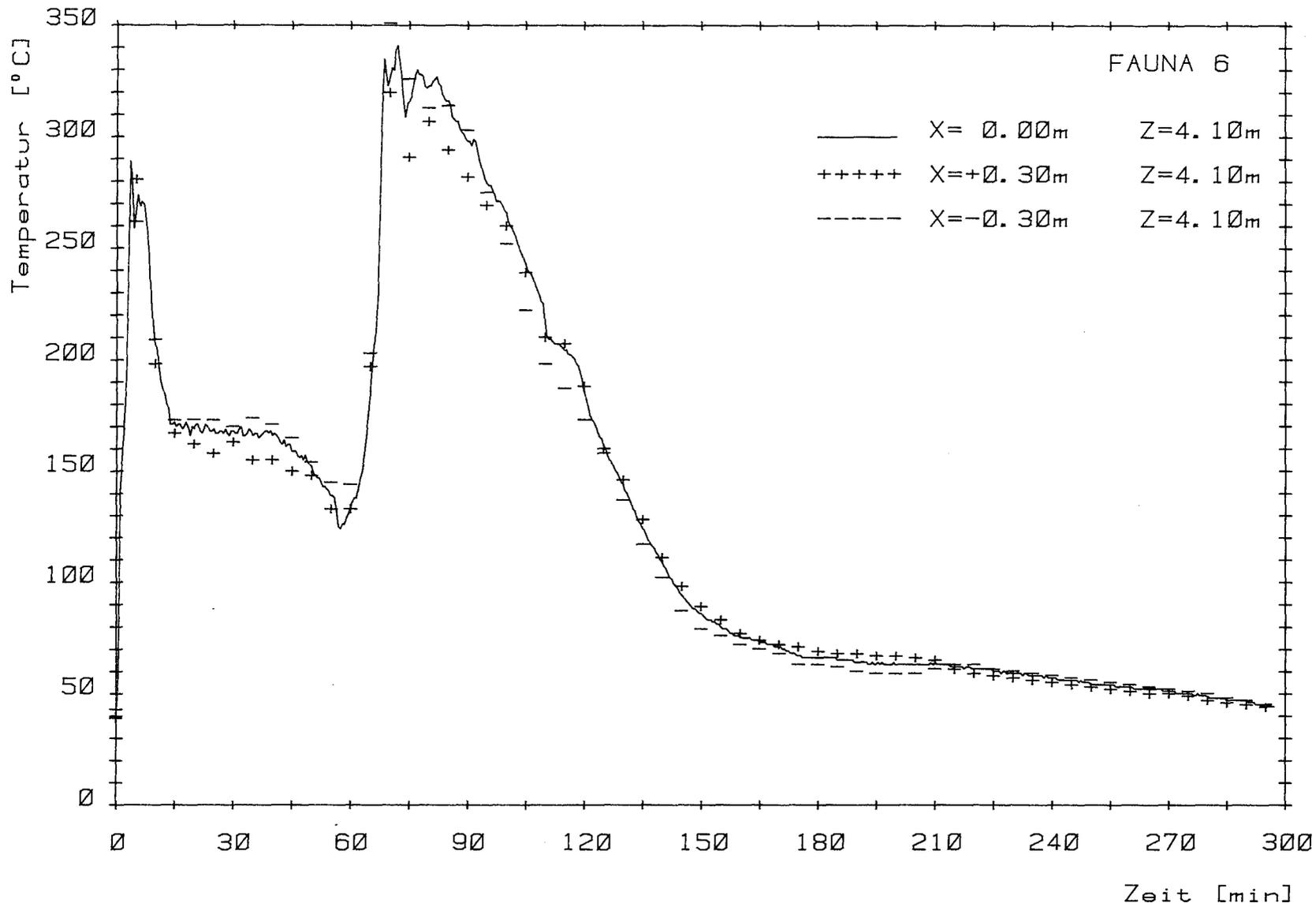


Bild 4.33: Verlauf der Gastemperatur in der Kesselmitte beim Versuch F6

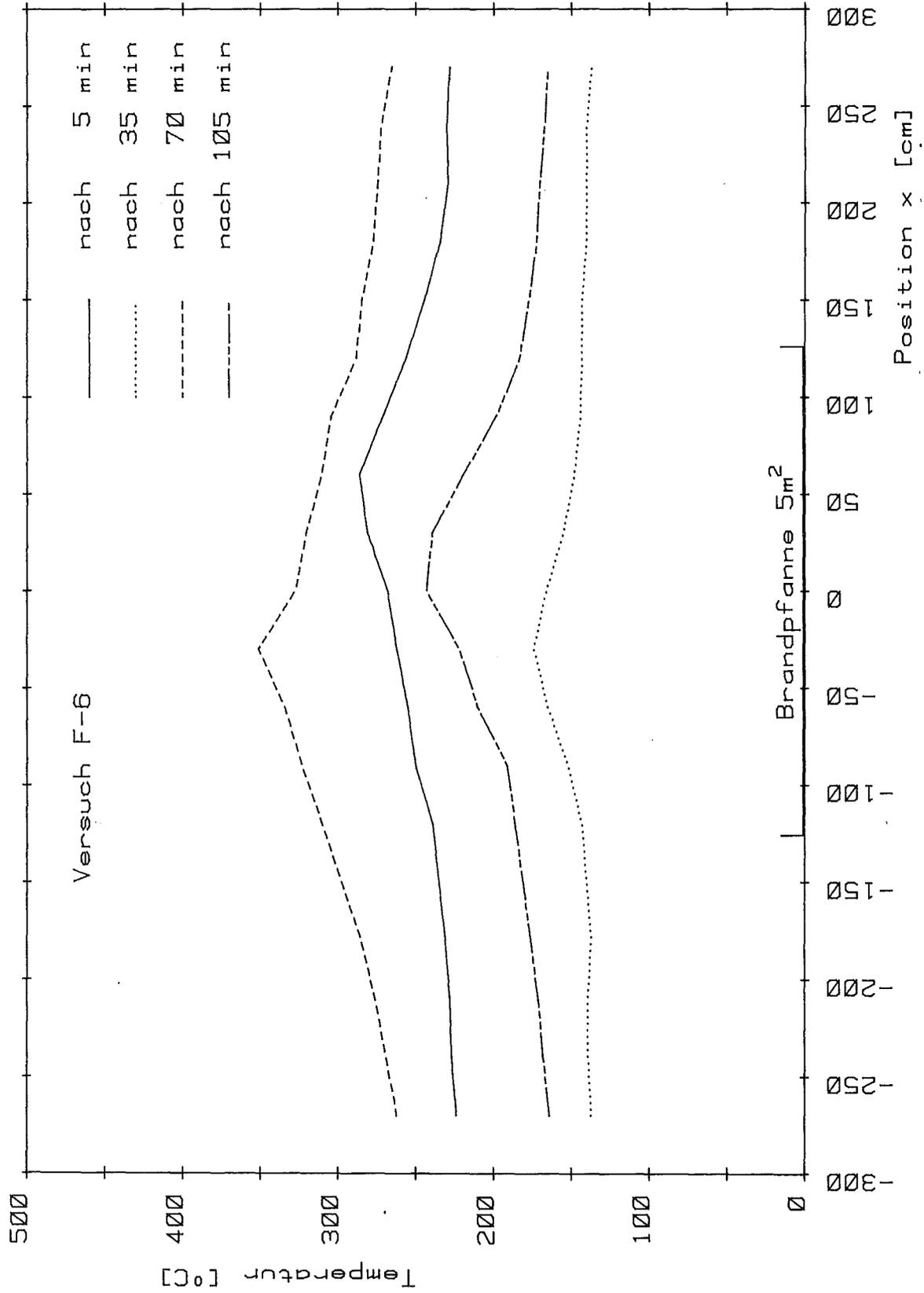


Bild 4.34: Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F6

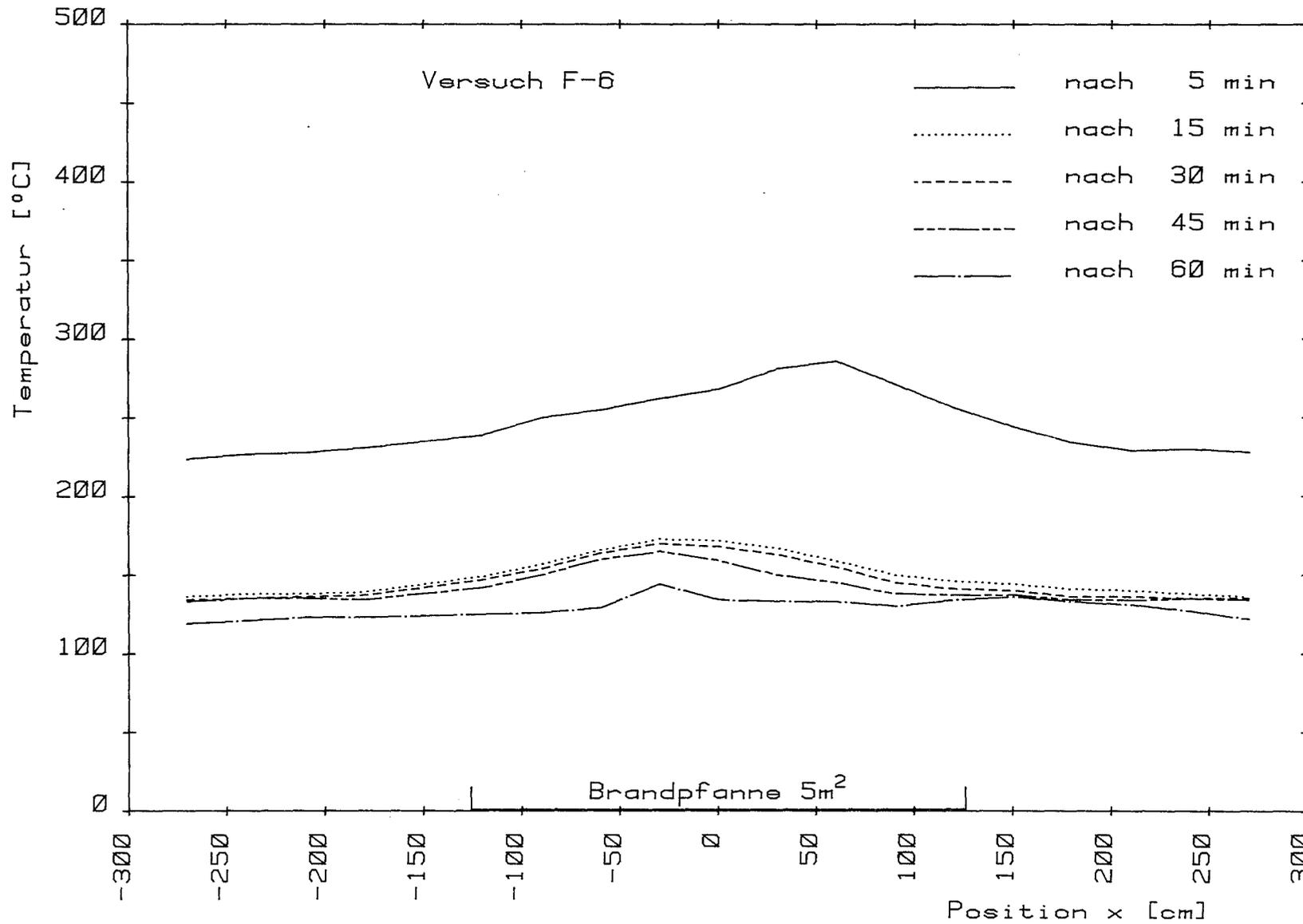


Bild 4.35: Temperaturverteilung über dem Kesselquerschnitt zu verschiedenen Versuchszeiten beim Versuch F6

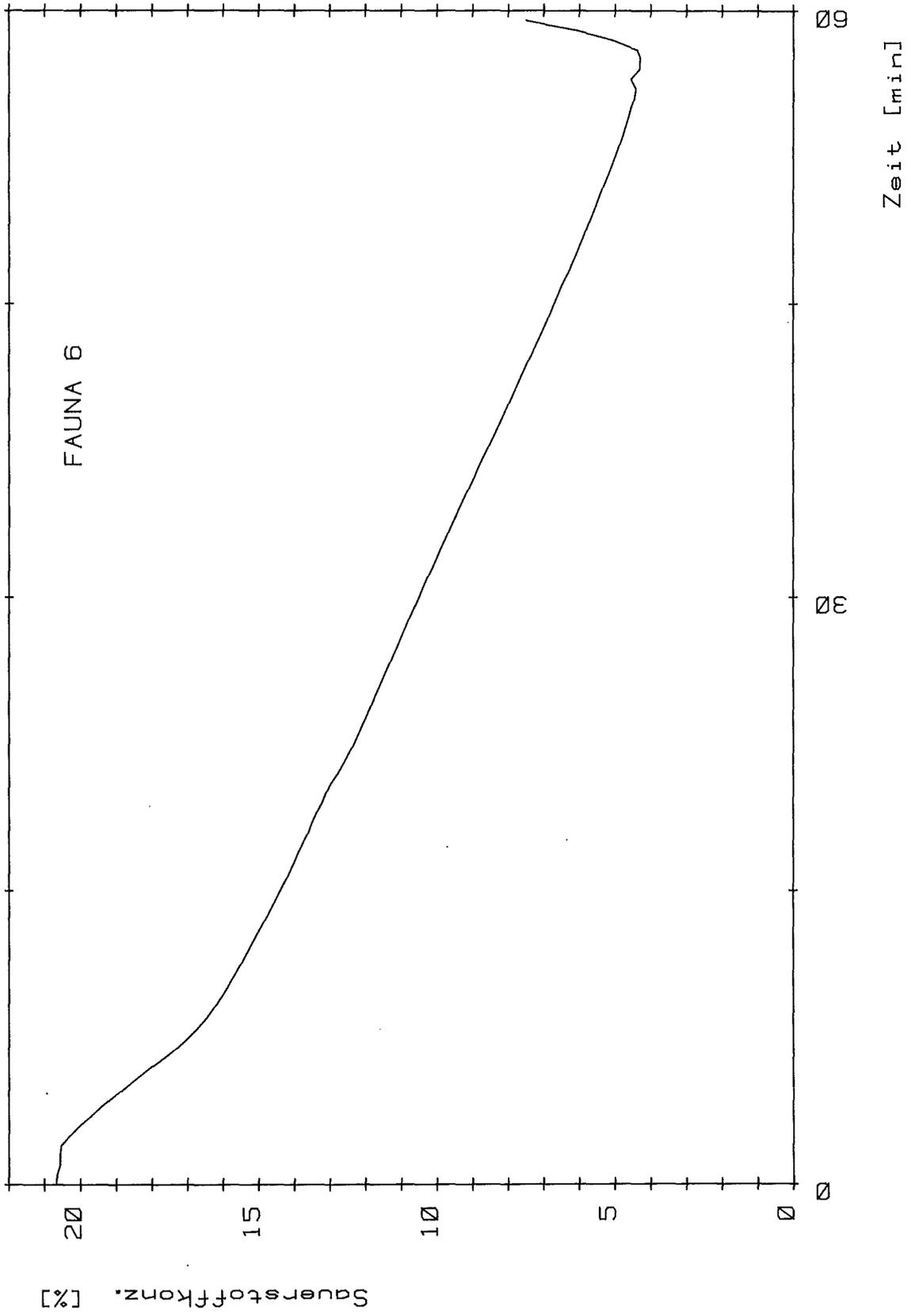


Bild 4.36: Verlauf der Sauerstoffkonzentration beim Versuch F6

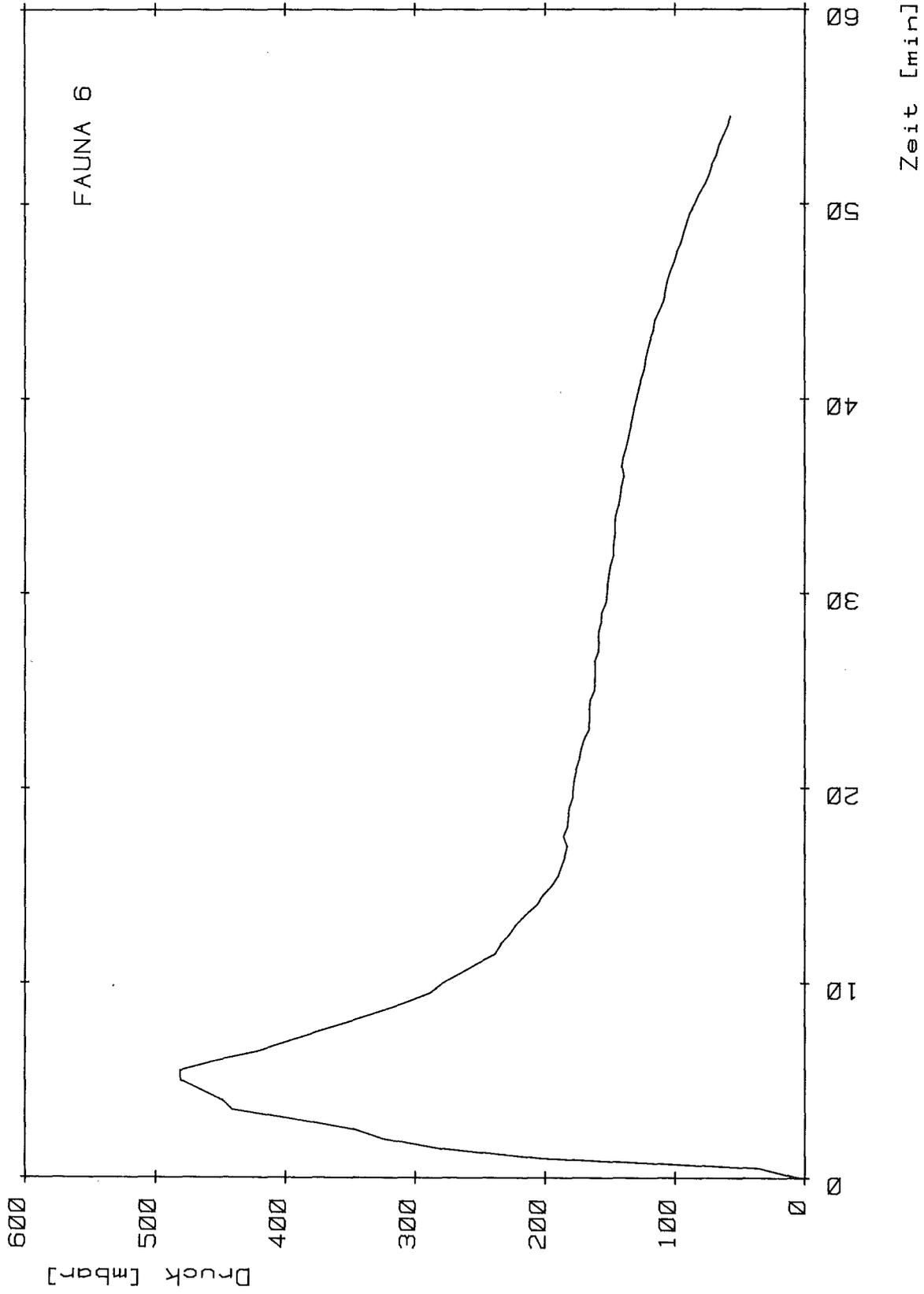


Bild 4.37: Druckverlauf im Versuchskessel beim Versuch F6

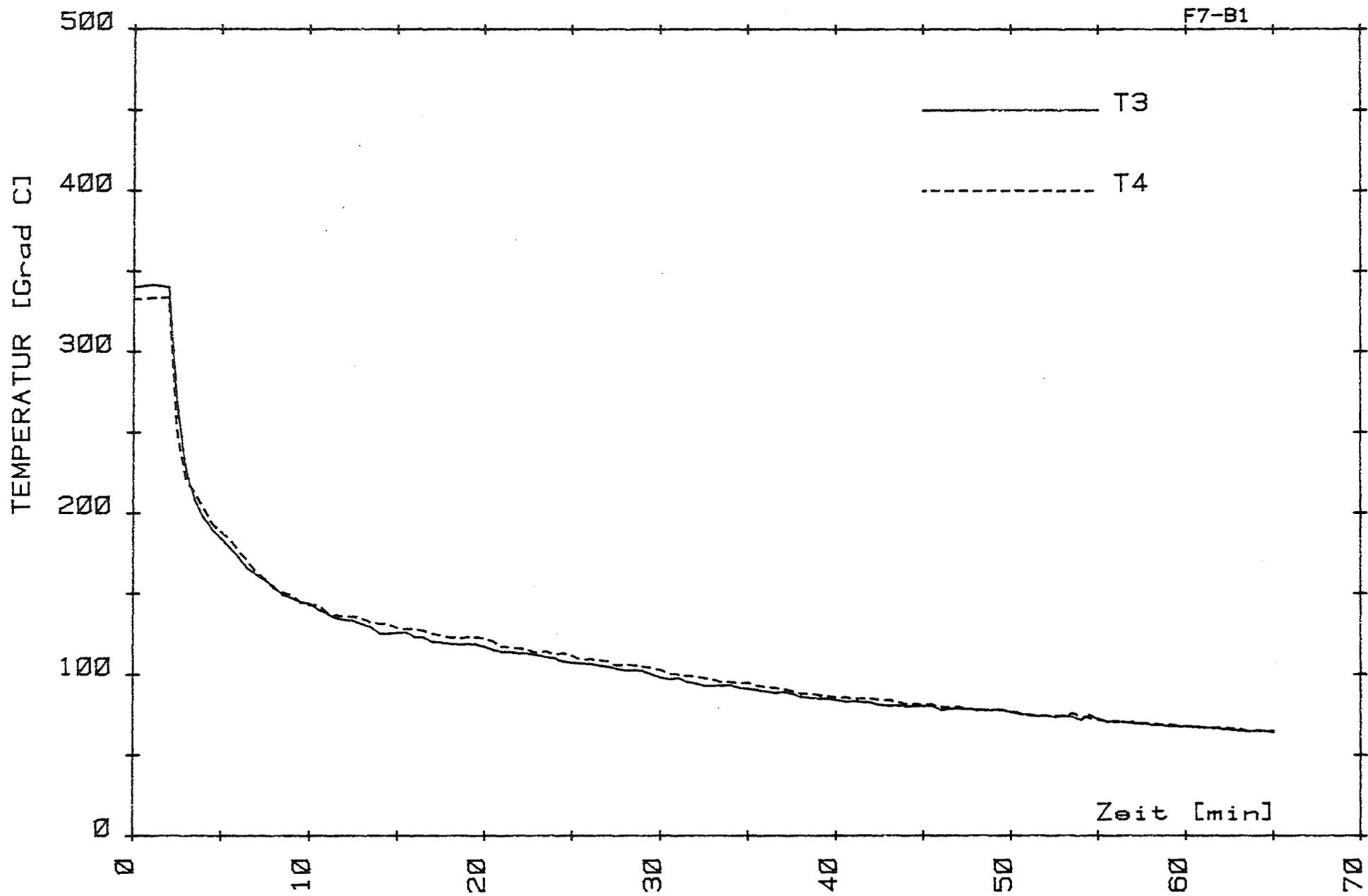


Bild 4.38: Verlauf der Gastemperatur 40 cm über der Natrium-Oberfläche beim Versuch F7

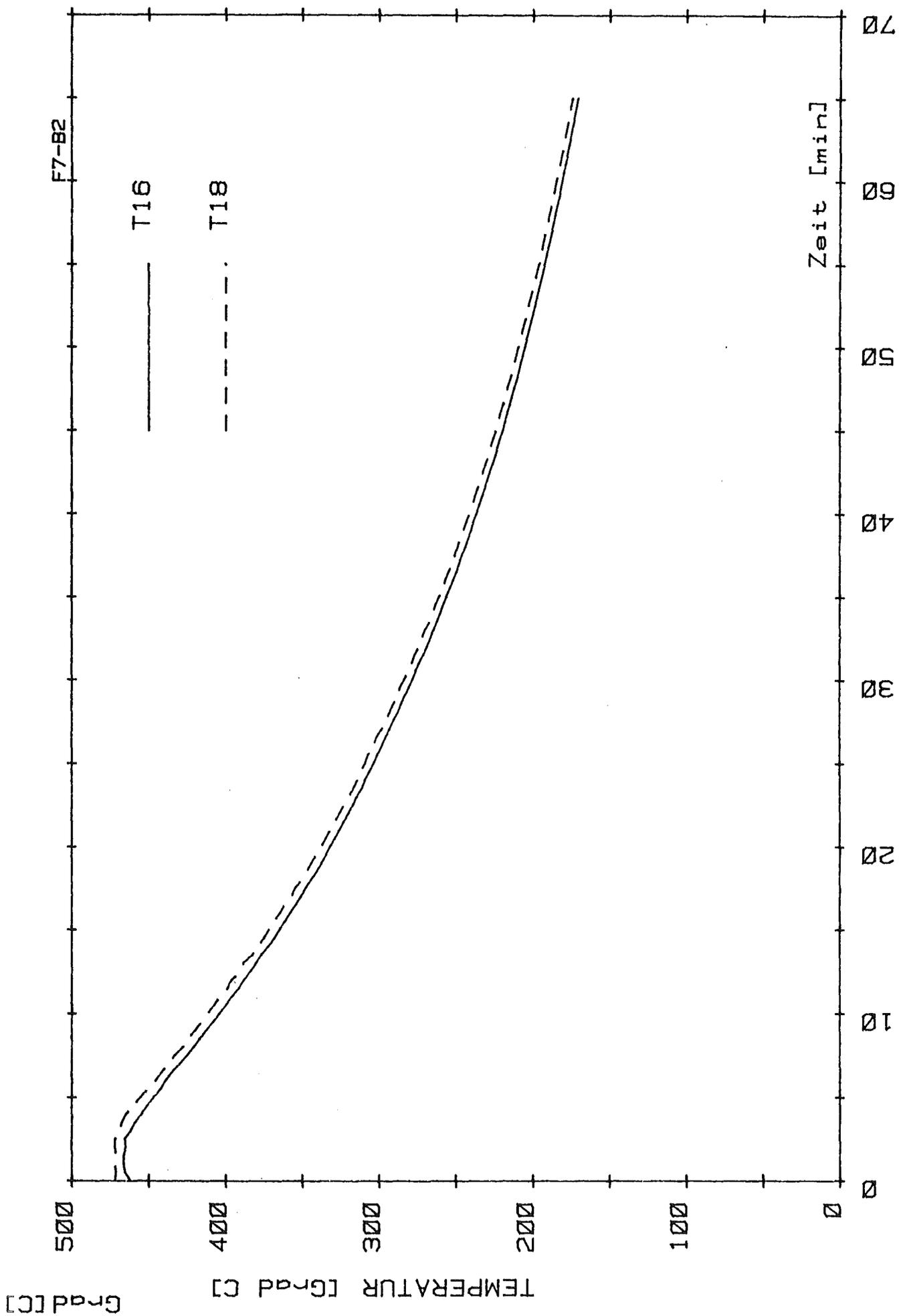


Bild 4.39: Verlauf der Natriumtemperatur beim Versuch F7

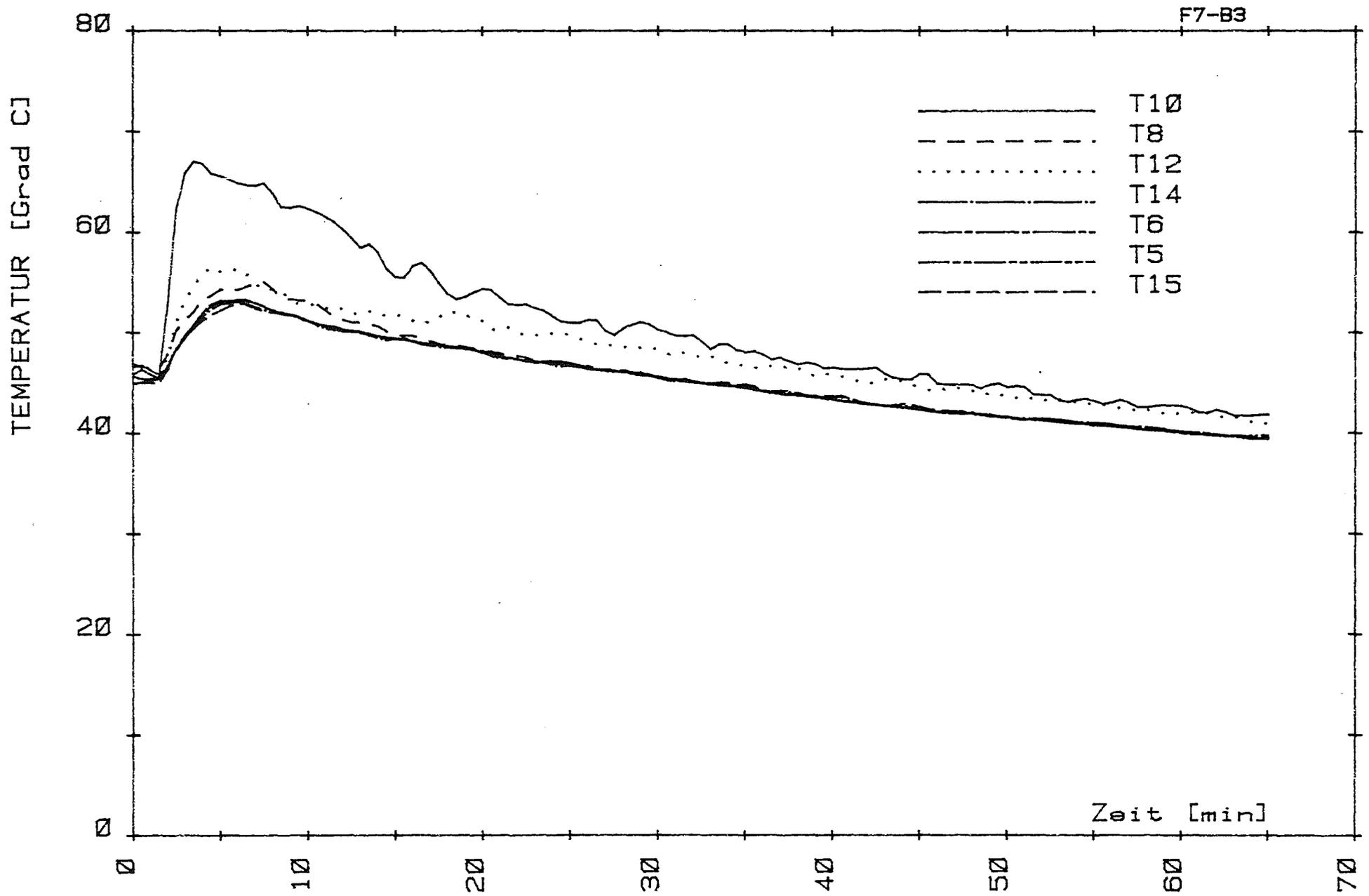


Bild 4.40: Verlauf der Gastemperatur 4.10 m über der Natriumfläche beim Versuch F7

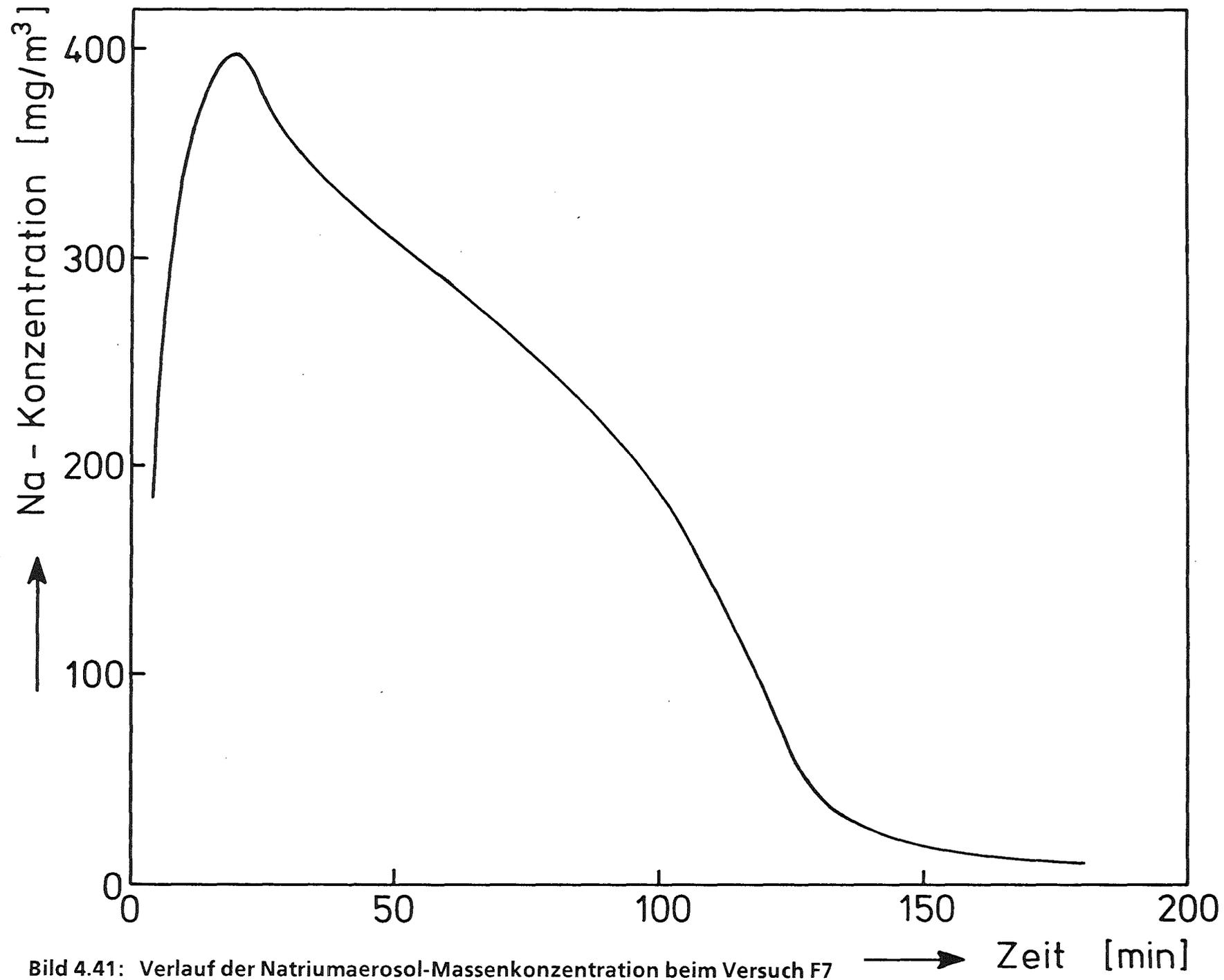


Bild 4.41: Verlauf der Natriumaerosol-Massenkonzentration beim Versuch F7

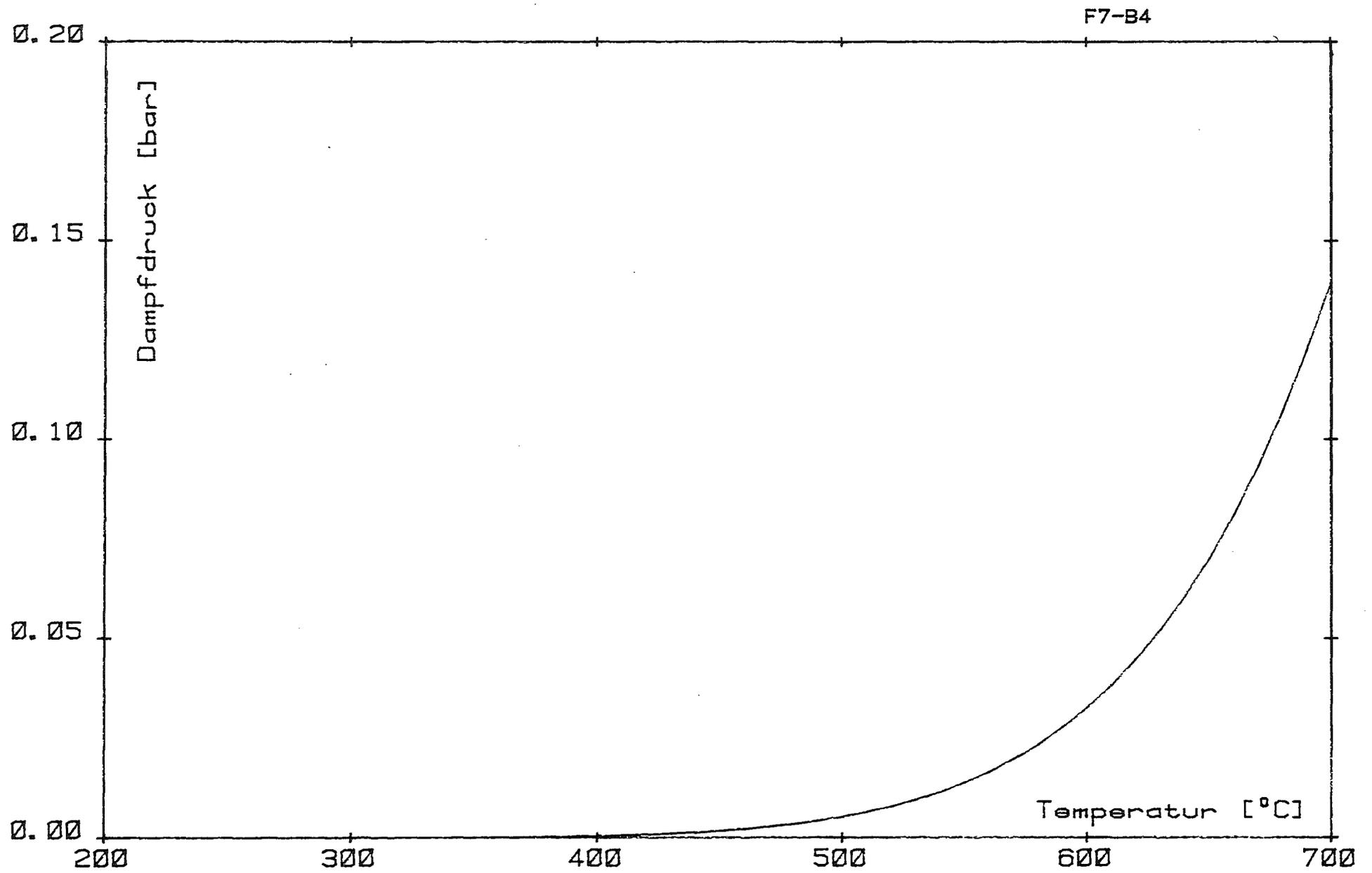


Bild 4.42: Natriumdampfdruck als Funktion der Pool-Temperatur

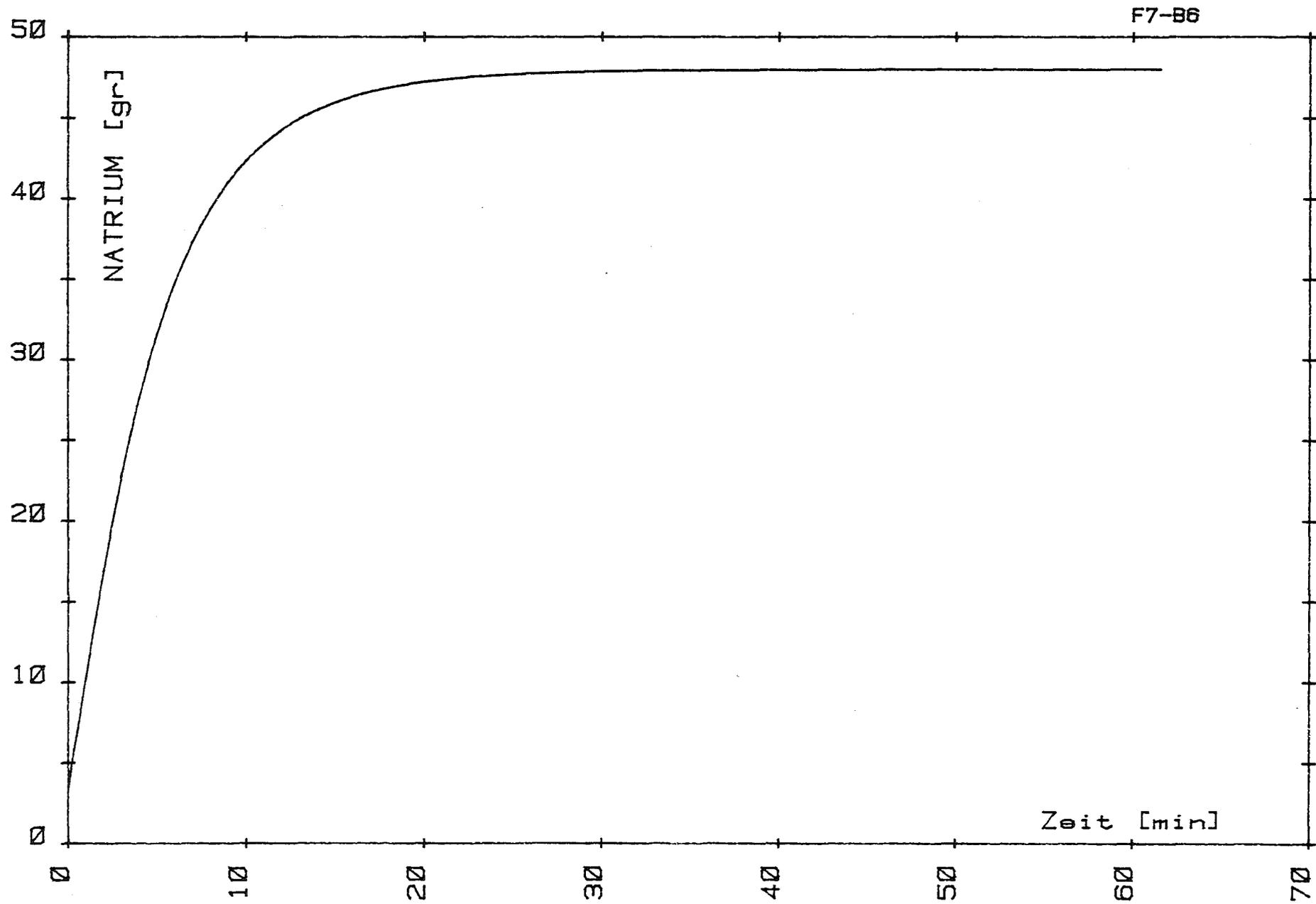


Bild 4.43: Näherungsweise Berechnung der insgesamt verdampften Natriummenge beim Versuch F7

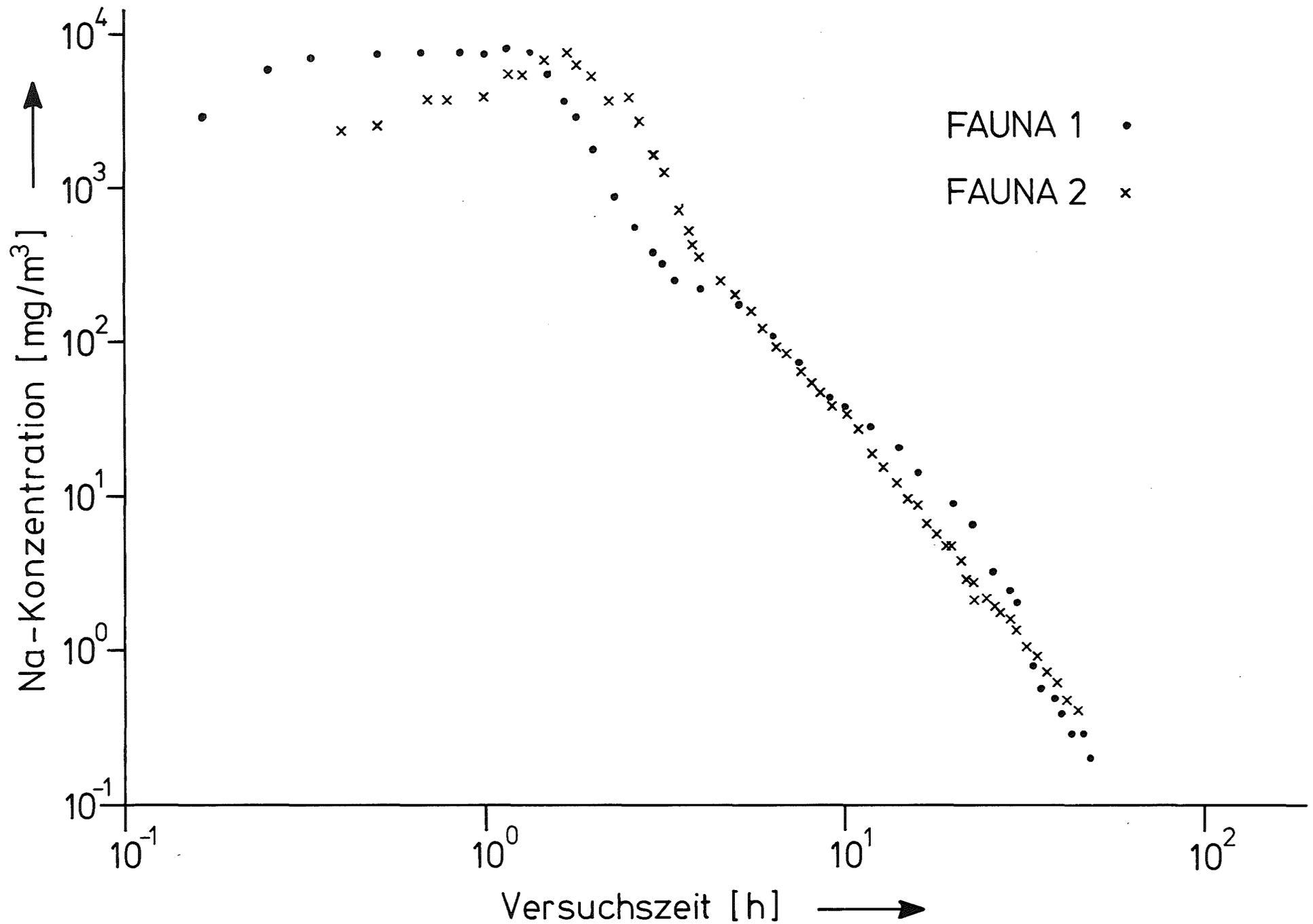


Bild 4.44: Verlauf der Natriumaerosol-Massenkonzentration bei den Versuchen F1 und F2

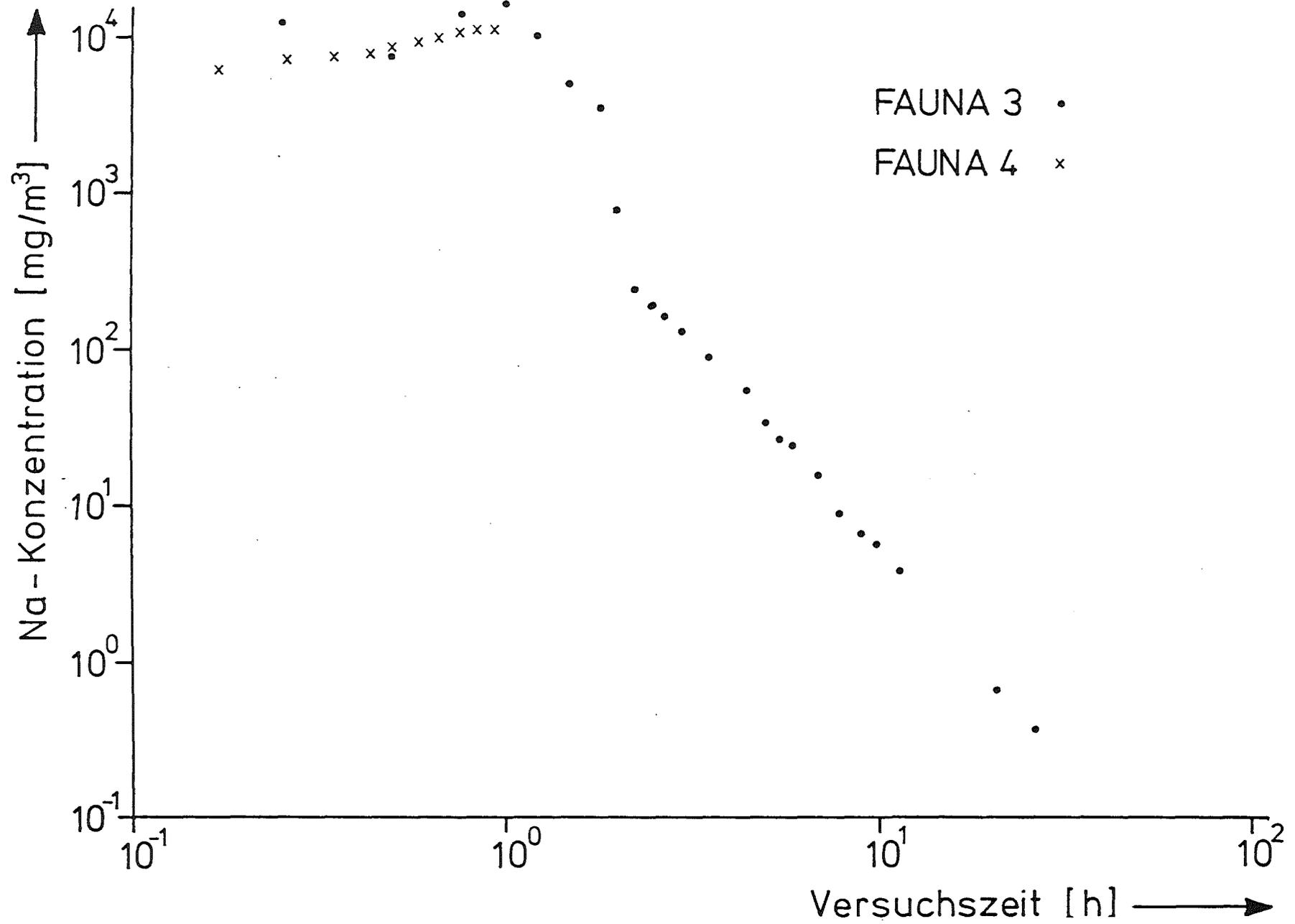


Bild 4.45: Verlauf der Natriumaerosol-Massenkonzentration bei den Versuchen F3 und F4

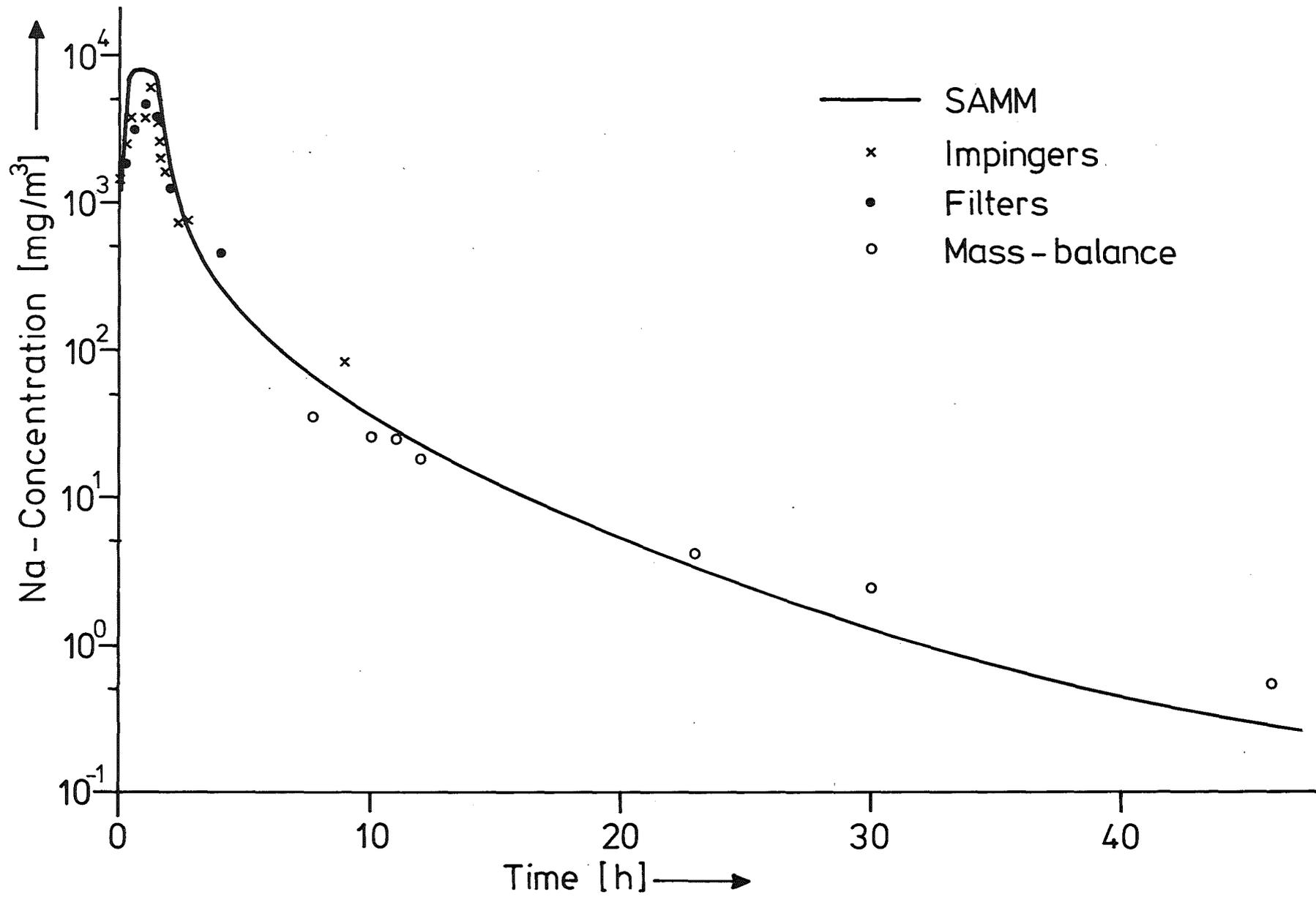


Bild 4.46: Vergleich verschiedener Meßmethoden für Natriumaerosol-Massenkonzentration

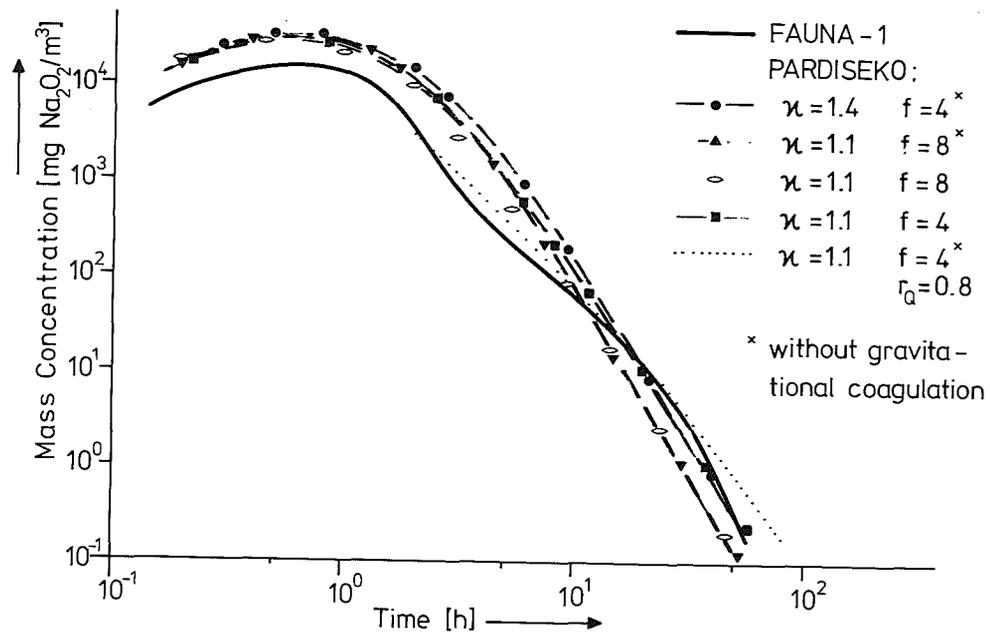


Bild 5.1: Nachrechnungen der Aerosol-Massenkonzentration mit verschiedenen Koagulationsformfaktoren F

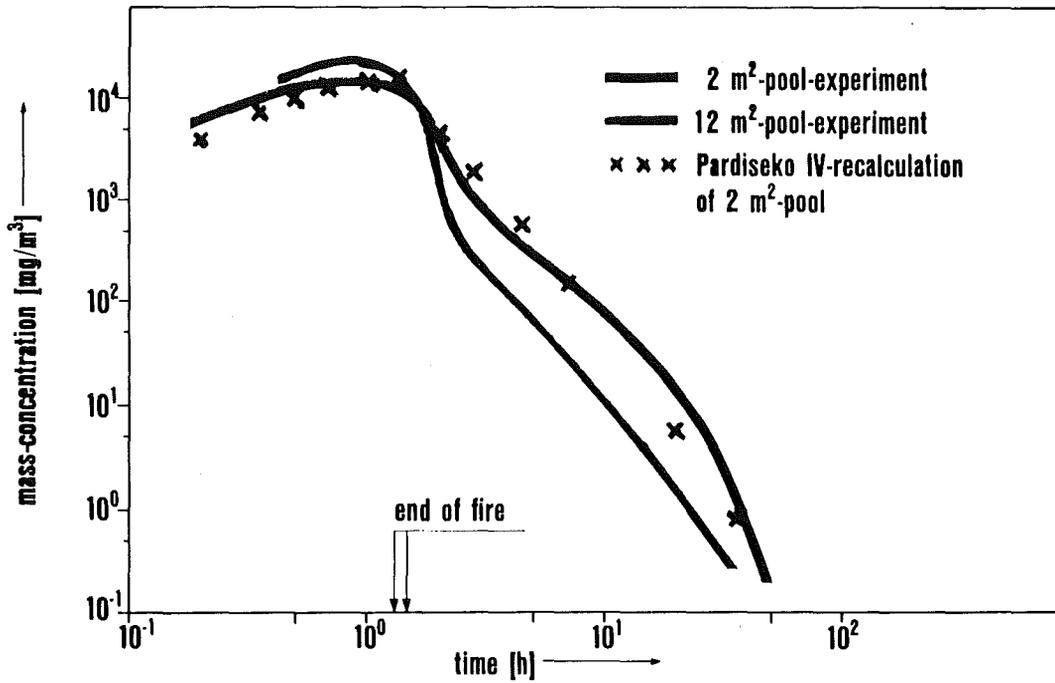


Bild 5.2: Nachrechnungen der Aerosol-Massenkonzentration unter Berücksichtigung der turbulenten Koagulation

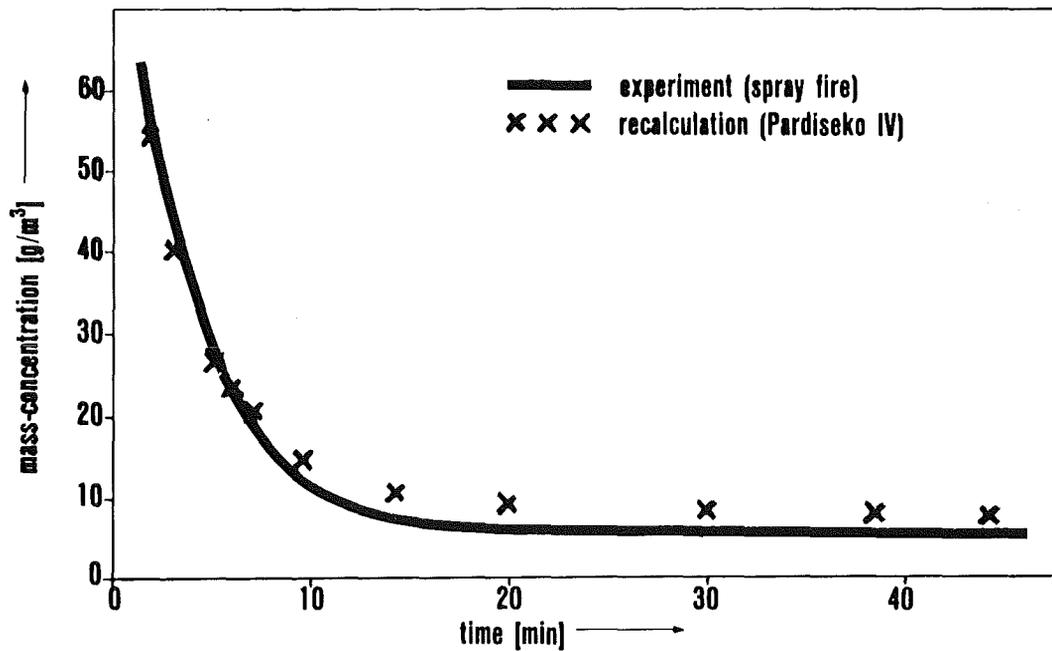


Bild 5.3: Nachrechnungen der Aerosol-Massenkonzentration eines Natrium-Spraybrandes

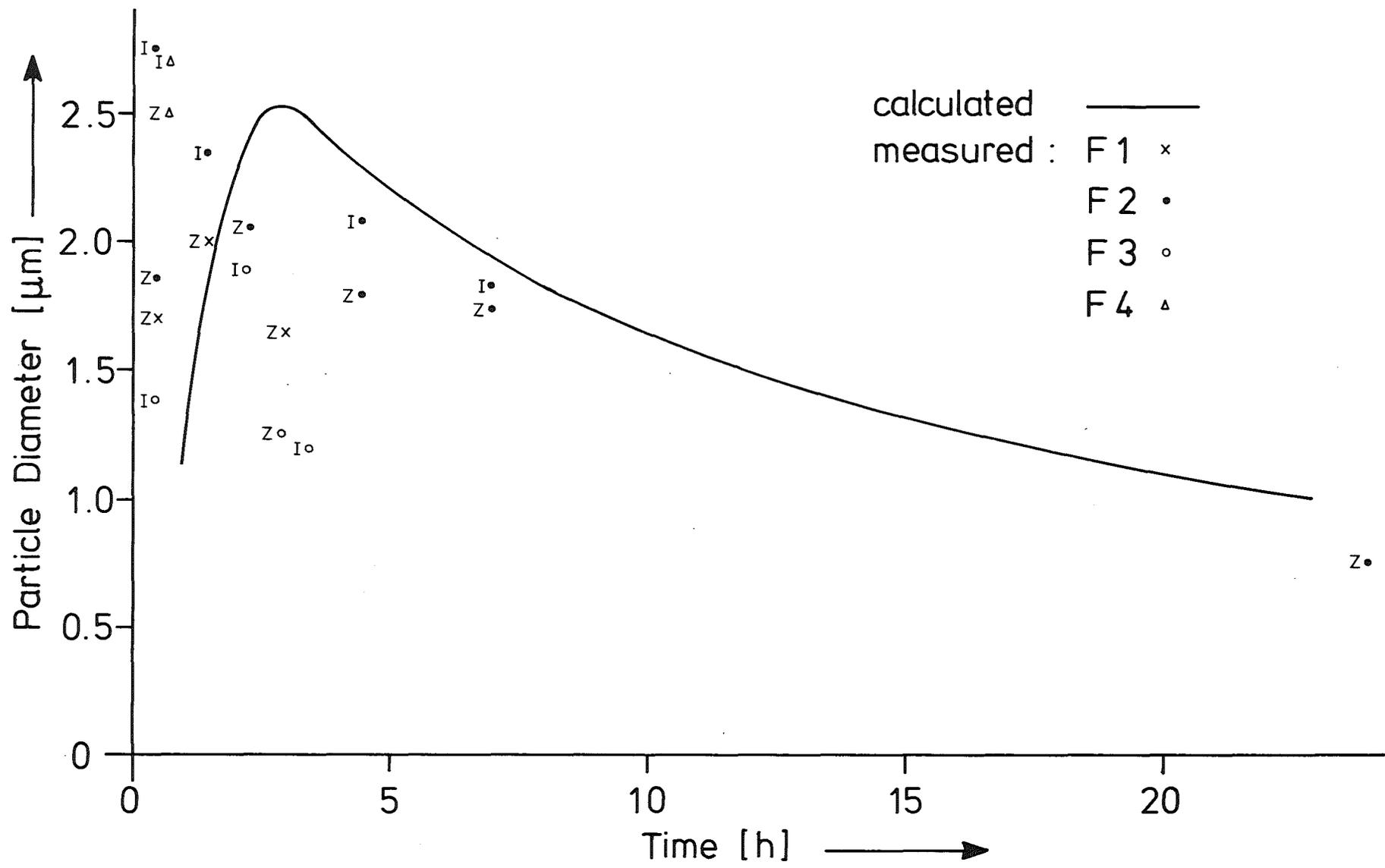


Bild 5.4: Vergleich zwischen dem gemessenen und mit PARDISEKO berechneten aerodynamischen Aerosoldurchmesser

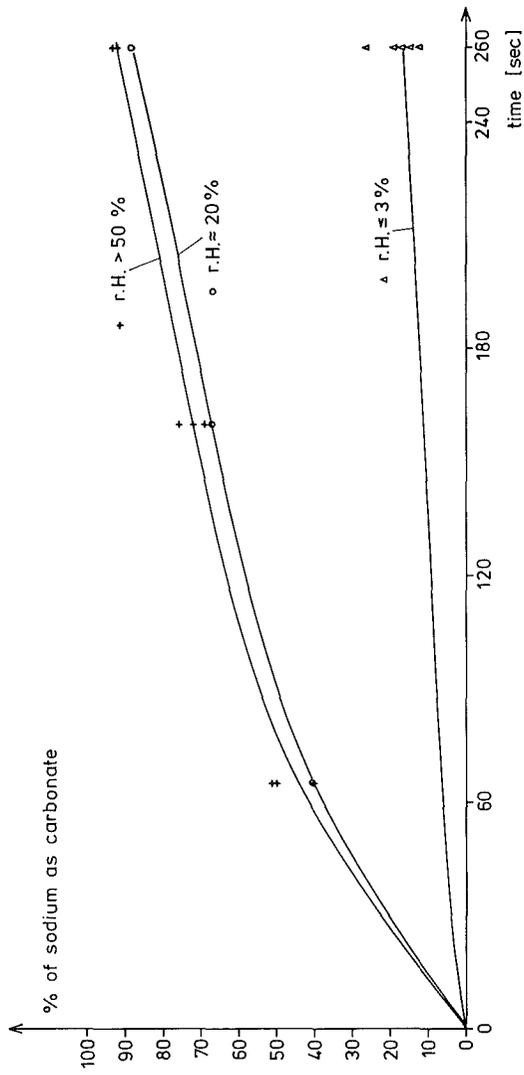
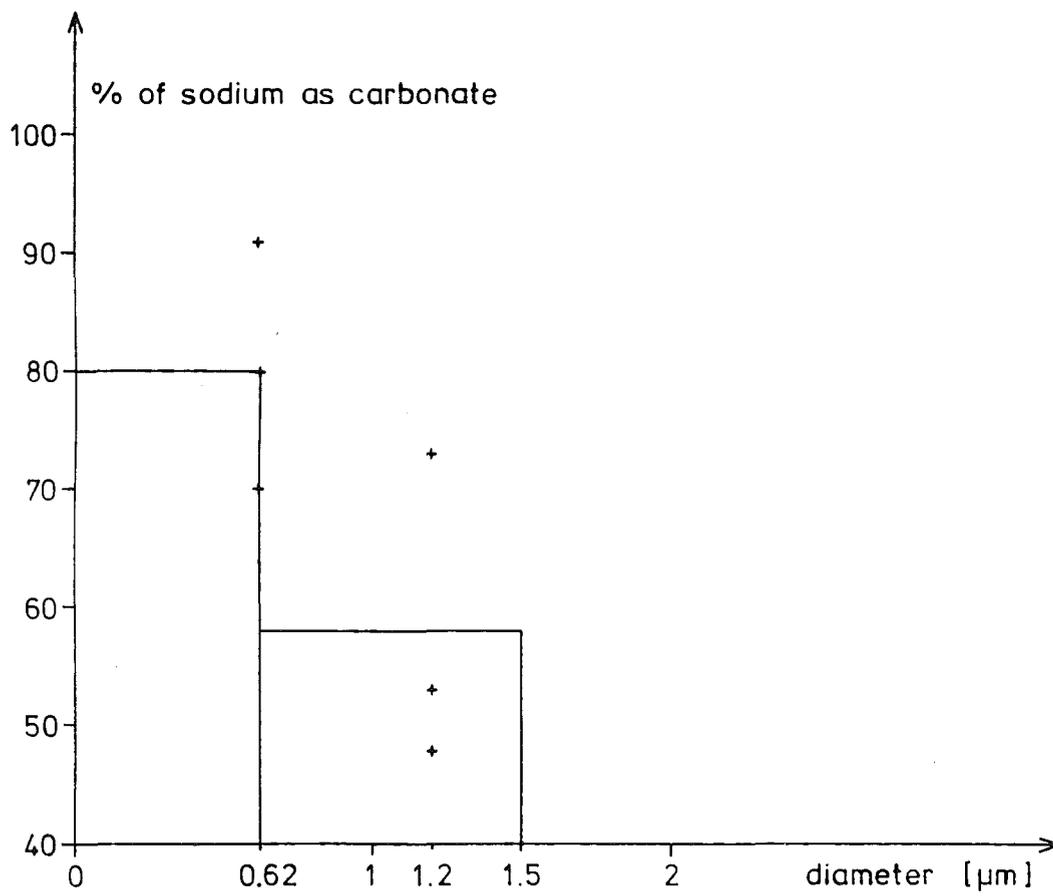
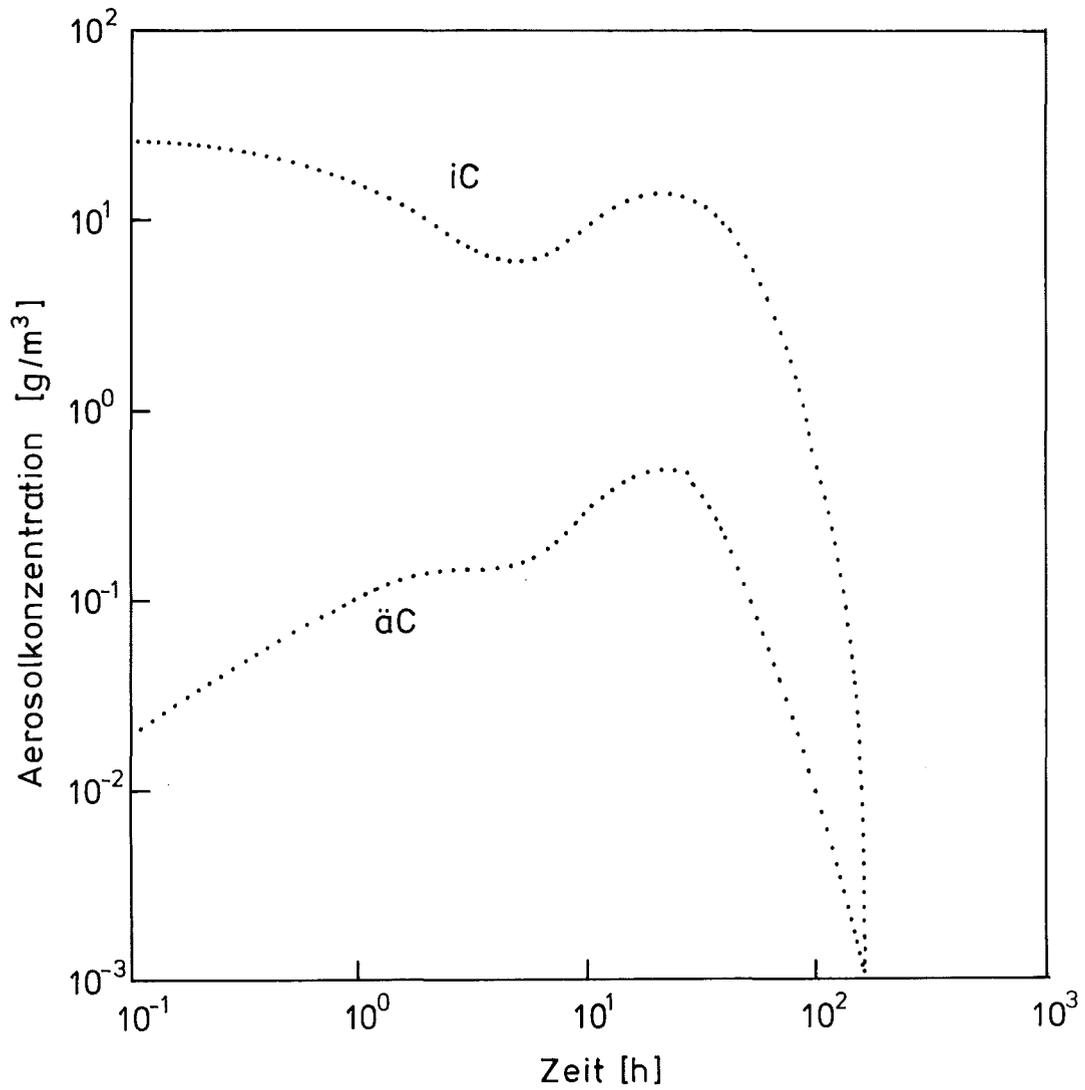


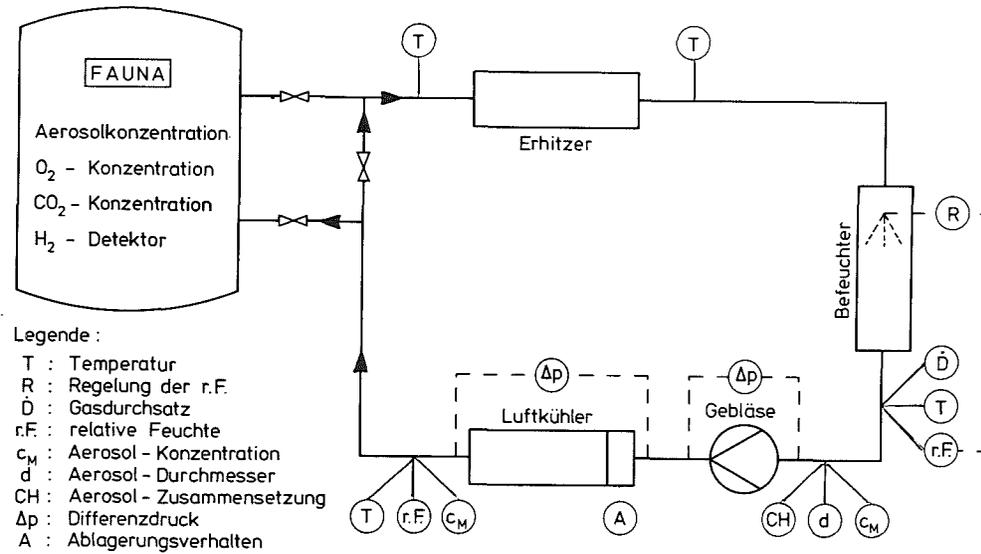
Bild 5.5: Abhängigkeit der Natriumkarbonatbildung von der relativen Feuchte des Trägergases



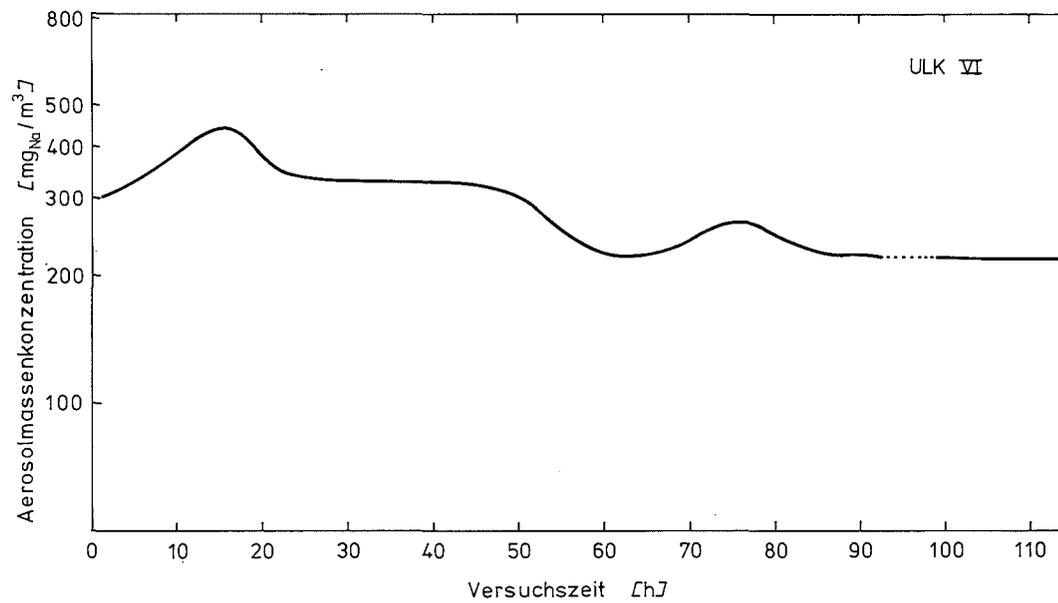
**Bild 5.6:** Abhängigkeit des Natriumkarbonat-Anteils vom Aerosoldurchmesser



**Bild 5.7:** Berechneter Verlauf der Aerosolmassenkonzentration nach einem Störfall im inneren Containment (iC) und äußeren Containment (äC)



**Bild 5.8:** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für die Komponententests



**Bild 5.9:** Verlauf der Aerosolmassenkonzentration wahren der Versuche fur den inertisierten Bereich

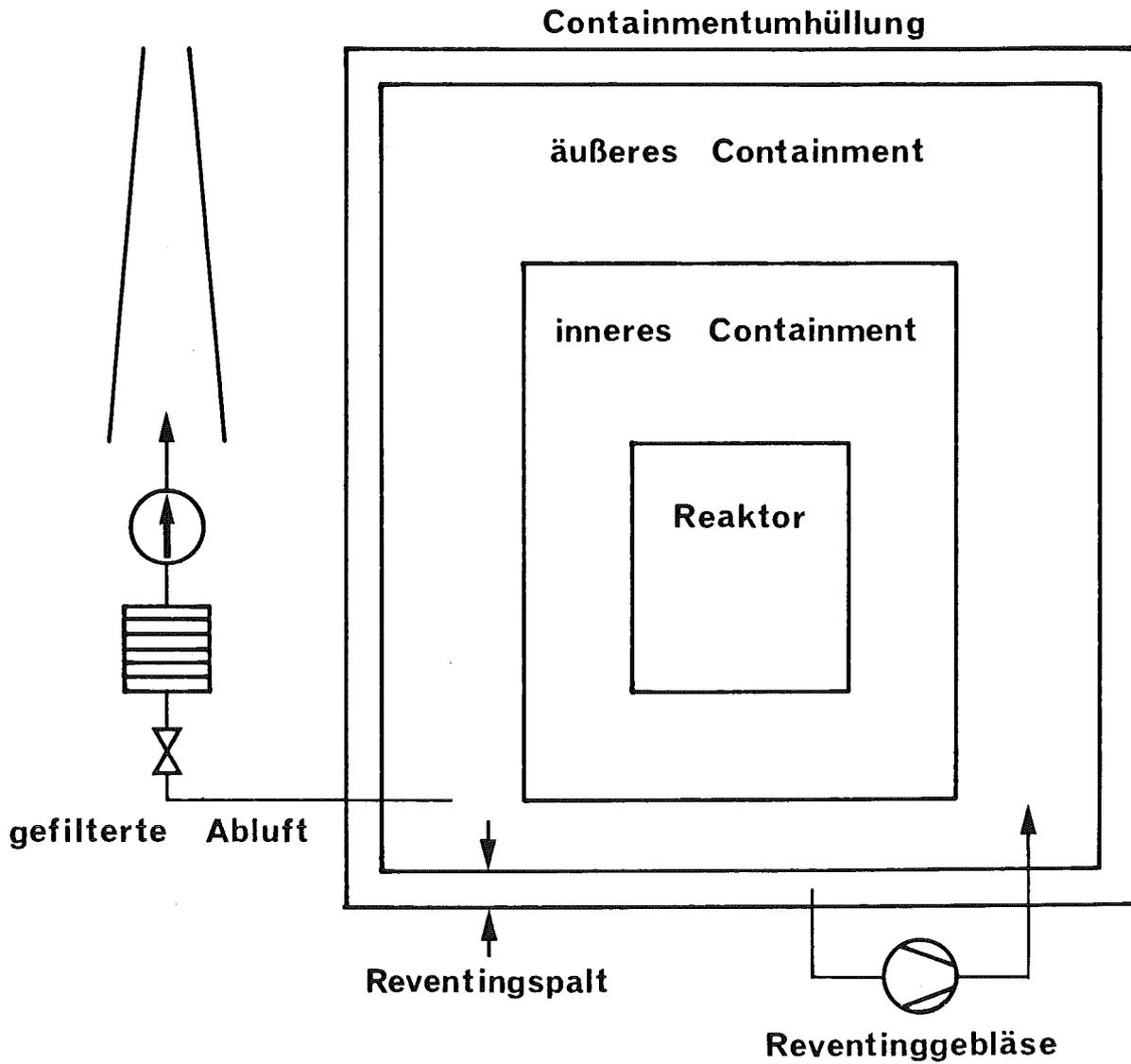
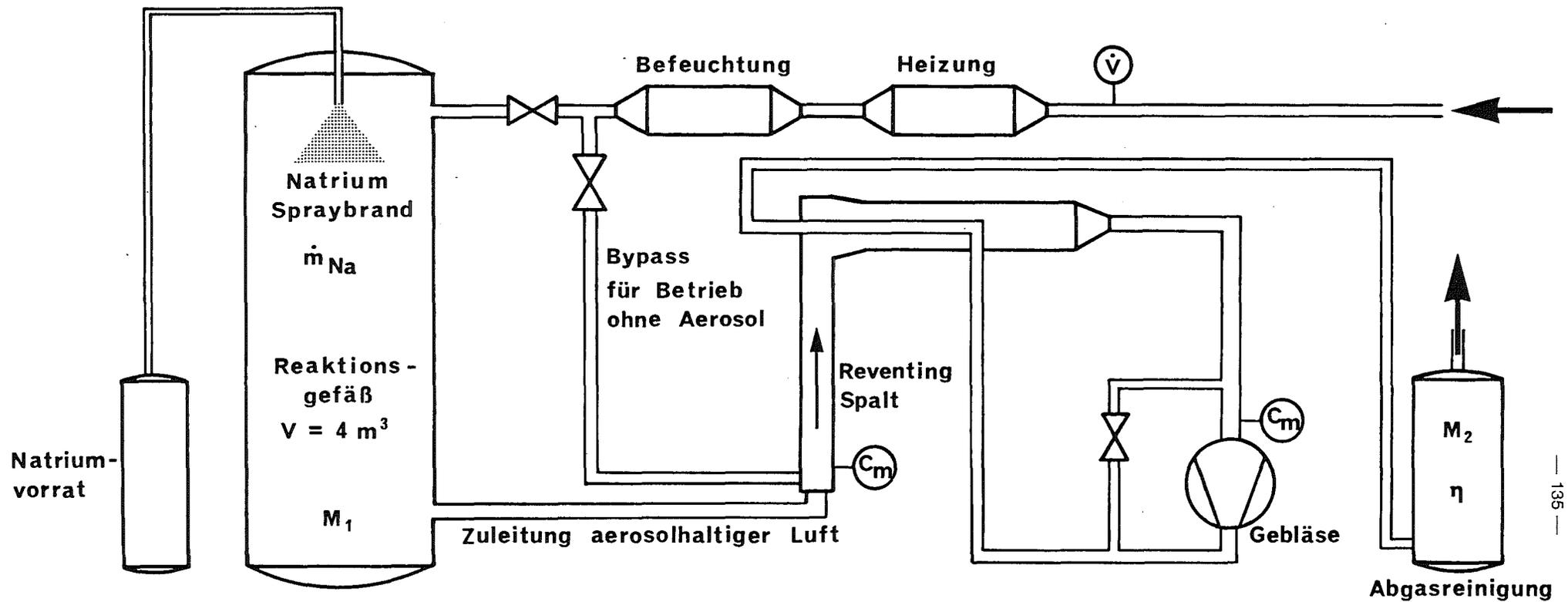


Bild 5.10: Schematische Darstellung des Containmentsystems des SNR 300



Meßgrößen :

$\dot{m}_{\text{Na}}$  = Natriumverbrauch [kg/h]

$M_1$  = Brandrückstände [kg]

$C_m$  = Aerosolmassenkonzentration

$M_2$  = zurückgehaltenes Na [kg]

$\eta$  = Abscheidegrad [%]

$\dot{V}$  = Volumenstrom [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

Bild 5.11: Schematische Darstellung des Versuchszustandes zum Reventing-Gebläse-Test

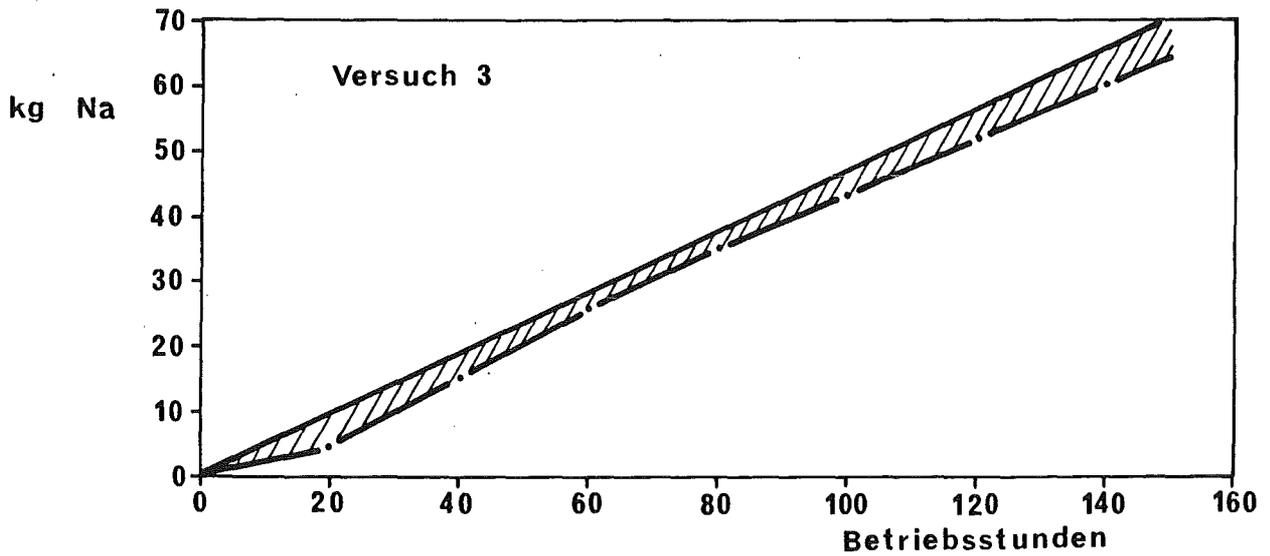
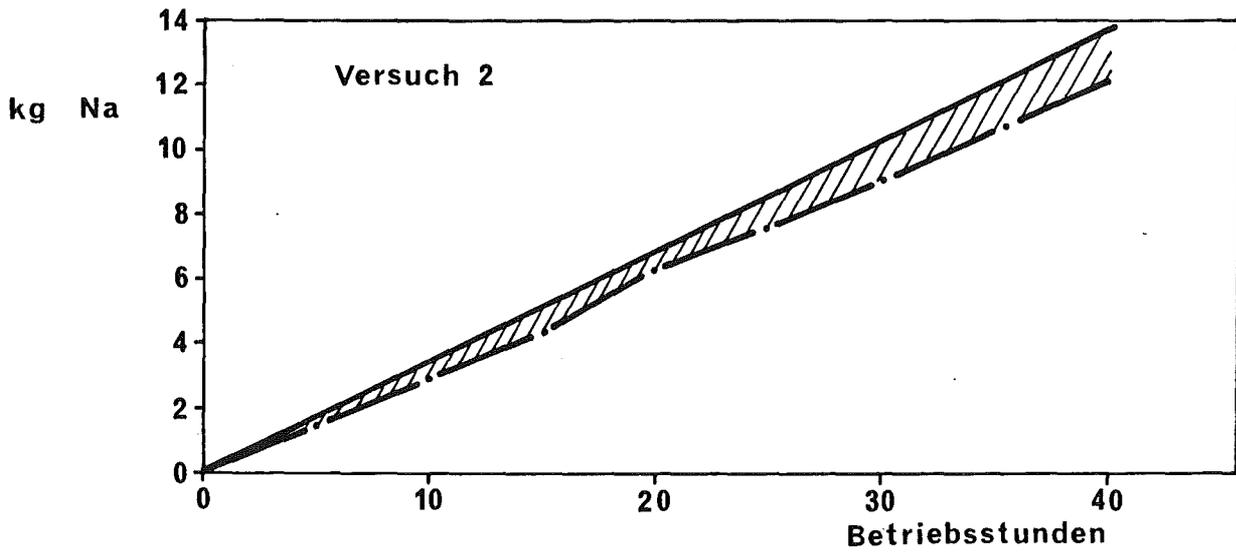
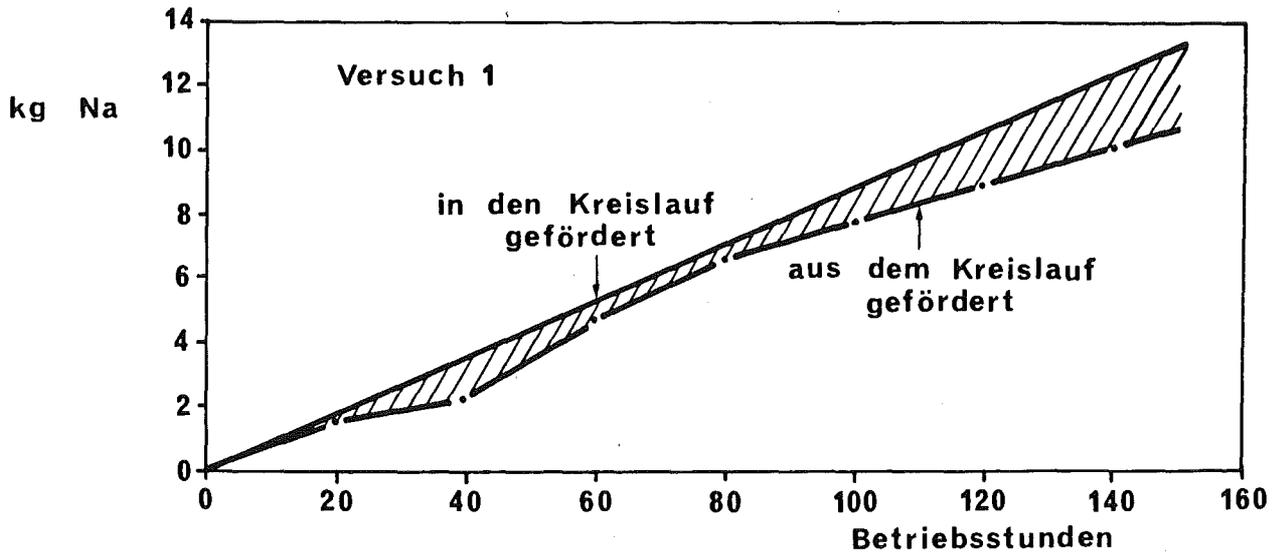
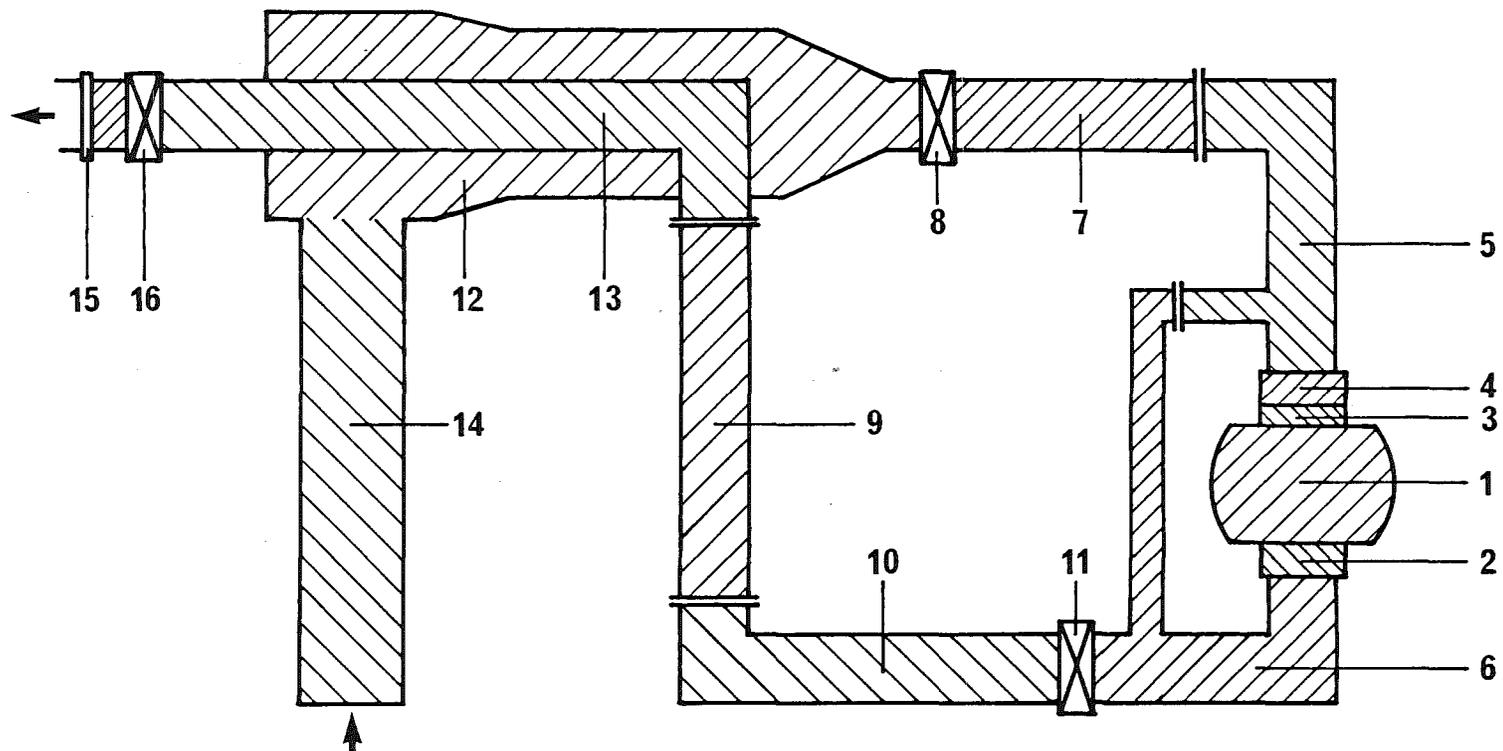


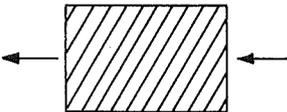
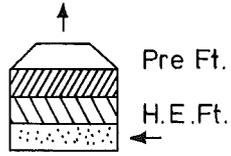
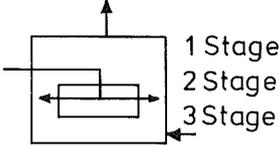
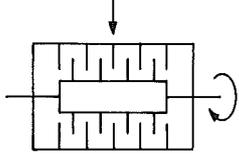
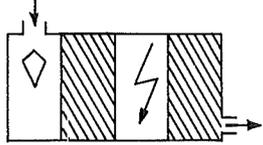
Bild 5.12: Natrium-Ablagerungen im Versuchskreislauf beim Reventing-Gebläse-Test



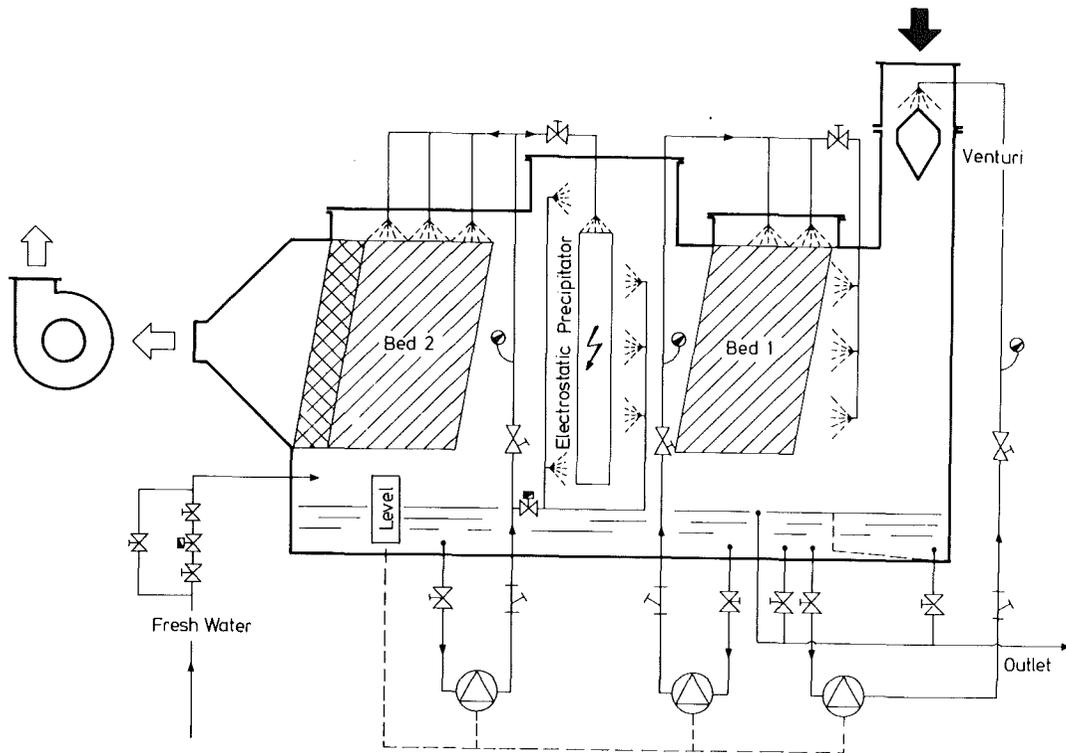
Ablagerungen in Gramm Na	1 Gebläse	2 Kompensator Drucks.	3 Zwischen- stück	4 Kompensator Saug.	5 Rohr- bogen Saug.	6 Rohr- bogen Drucks.	7 gerades Rohr Saug.	8 Klappe Saug.	9 gerades Rohr Drucks.	10 Rohr- knie Drucks.	11 Regel- klappe	12 Doppel mantel	13 Aus- gang Drucks.	14 Reven- ting Spalt	15 Drossel- scheibe	16 Drossel- klappe
Versuch 1	70	4	6	10	80	10	-	-	12	-	-	-	-	-	150	450
Versuch 2	40	2	5	10	50	-	-	-	10	-	-	-	-	-	100	180
Versuch 3	420	28	22	66	750	117	105*	20	10	46*	5	965*	85	2170*	230	1200

\* Summen aus Versuch 1 bis 3

Bild 5.13: Übersicht über die Verteilung der Natriumablagerungen im Versuchskreislauf

Filter Type	Aerosol Mass Concentration mg/m <sup>3</sup>	Efficiency %	Specific Load g/m <sup>2</sup>	Pressure Drop.init. kPa	Flow Velocity m/min
 Fiberglasfilter	600 to 6000	99.98	50	0.2	1.7
 Sandbedfilter	600 to 6000	99.0  99.98	1200  500	0.05  0.2	15  1
 Wet Scrubber ( Disc-Sprayer )	500 to 3000	70 93 98	no limitation	< 0.1 < 0.1 < 0.1	
 Desintegrator	500 to 3000	60	no limitation	< 0.1	
 Venturi + Ionizing Wet Scrubber	300 to 600	99.87	no limitation	5	

**Bild 5.14: Testbedingungen und Abscheidegrade für verschiedene Filtertypen**



Operating Components	Aerosol Mass Concentration mg/m <sup>3</sup>	Efficiency %
Venturi + dry Deep Bed Packing		89.27
Venturi + Washing Deep Bed Packing	300 to	92.79
Venturi + Washing Deep Bed Packing + Ionisation	600	99.89

**Bild 5.15: Schematische Darstellung des kombinierten Elektro-Filters**

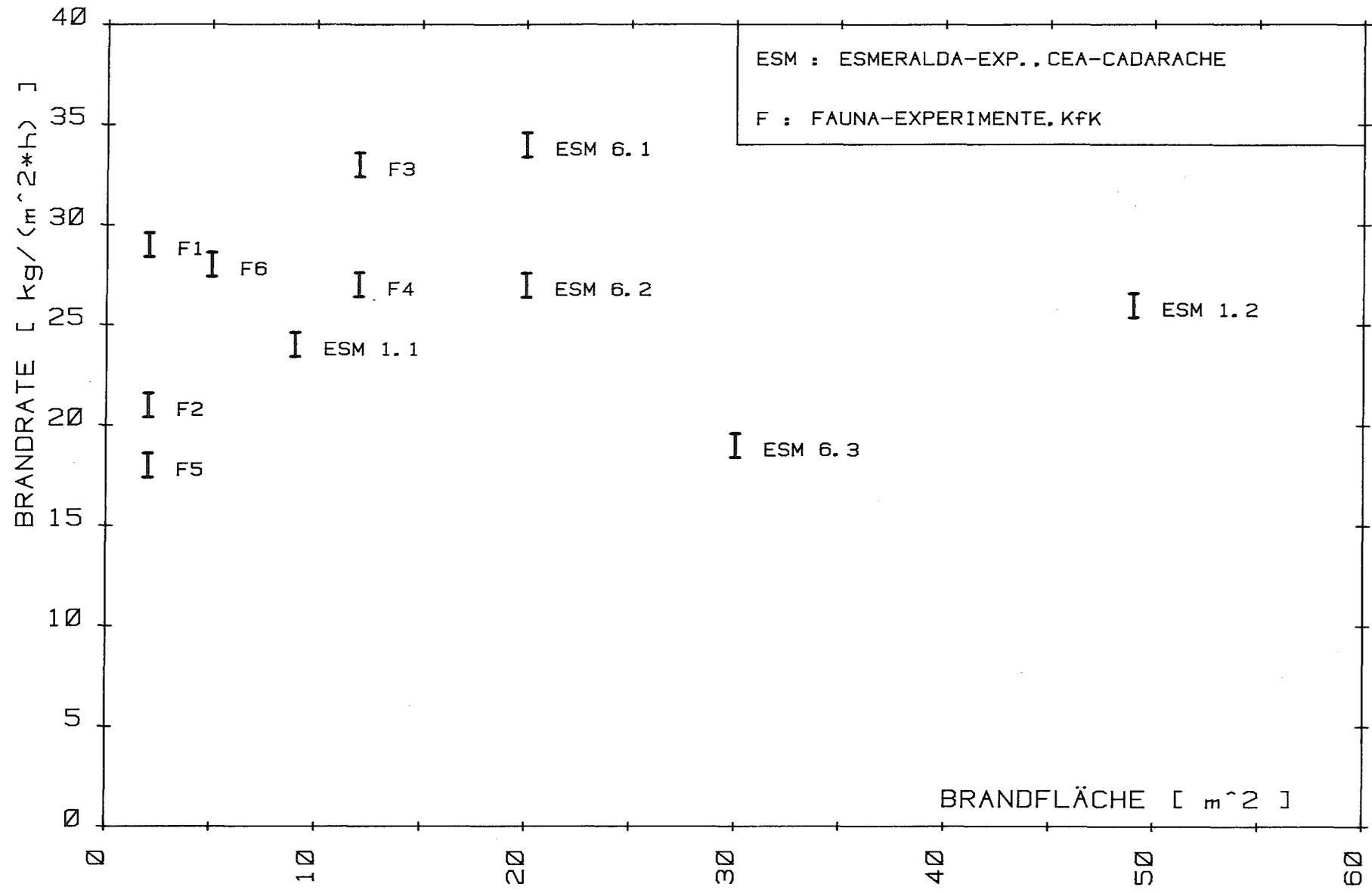


BILD 7.1 : VERGLEICH DER BRANDRATEN AUF VERSCHIEDENEN BRANDFLÄCHEN