

**KfK 5005
Juni 1992**

Abschätzung der Wärmeabfuhr durch Naturkonvektion bei einem alternativen Containmentkonzept

**H. J. Neitzel
Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung**

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik

Projekt Nukleare Sicherheitsforschung

KfK 5005

**Abschätzung der Wärmeabfuhr durch Naturkonvektion bei
einem alternativen Containmentkonzept**

H. J. Neitzel

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

Abschätzung der Wärmeabfuhr durch Naturkonvektion bei einem alternativen Containmentkonzept

Zusammenfassung

Durch ein neuartiges Containmentkonzept für zukünftige Druckwasserreaktoren soll gewährleistet werden, daß auch nach schwersten Unfällen das Containment intakt bleibt und die Nachwärme passiv durch Naturkonvektion an die Luft abgeführt wird.

Das vorgeschlagene Verbund-Containment besteht aus einer inneren Stahlschale von 60 m Durchmesser und 38 mm Wandstärke sowie einem äußeren etwa 2 m starken Stahlbetonmantel. Dazwischen befindet sich ein Ringraum von etwa 80 cm radialer Tiefe, der durch längslaufende Rippen in kaminartige etwa 50 cm breite Kanäle unterteilt ist.

In diesen Kanälen wird die Nachwärme durch Naturkonvektion an die Luft abgegeben. Durch Einsatz von Filtern wird verhindert, daß die durch eventuelle Leckagen in den Ringraum austretenden Spaltgase in die Umgebung gelangen.

Für die Wärmeübertragung auf der Luftseite wurden rechnerische Abschätzungen durchgeführt. Es ergab sich, daß eine Nachwärmeleistung von 8 MW abgeführt werden kann, was für einen 1300 MWe Druckwasserreaktor ausreichend zu sein scheint.

Estimates of decay heat removal by natural air convection for a new containment concept

Abstract

A new containment concept for future pressurized water reactors should ensure that the containment remains intact even in severe accidents and that the decay heat can be removed by natural air convection in a passive way. The composite containment proposed consists of an inner steel shell of 60 m diameter with a 38 mm wall thickness and an outer reinforced concrete shell of about 2 m wall thickness. The annulus of about 80 cm radial width is bridged by longitudinal support ribs placed at intervals of about 50 cm on the circumference forming in this way individual chimneys.

In these chimneys the decay heat is removed by natural air convection to the environment. Filters prevent eventual fission gas leakages into the annulus from being released to the environment.

Estimates have been performed to assess the coolability by natural air convection. It has been shown that a decay heat of about 8 MW can be removed which seems to be sufficient for a 1300 MWe PWR.

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	1
2.	PHYSIKALISCHE BEZIEHUNGEN	2
	2.1 Wärmeleitung in der Stahlhülle	3
	2.2 Wärmeübergang im Kamin	3
3.	ERGEBNISSE DER ABSCHÄTZUNGSRECHNUNGEN	8
4.	SCHLUSSFOLGERUNGEN	11
	LITERATURVERZEICHNIS	13

Verzeichnis der Abbildungen

- 1 Verbund-Containment mit passiver Kühlung durch Naturkonvektion
- 2 Passive Containment-Kühlung ohne Kühlluft-Filterung, Anordnung der Durchdringungen in einem gesonderten gefilterten Ringraum
- 3 Wärmetransport-Mechanismen vom Stahl-Containment an die Luft
- 4 Thermohydraulik der Containment-Kühlung ohne Filterung der Kühlluft
- 5 Thermohydraulik der Containment-Kühlung mit Filterung der Kühlluft
- 6 Thermohydraulik der Containment-Kühlung mit Filterung der Kühlluft und vergrößerter Filteranströmfläche
- 7 Einfluß der Strahlung bei großen Emissionsverhältnissen
- 8 Einfluß der Strahlung bei kleinen Emissionsverhältnissen
- 9 Einfluß der Emissionsverhältnisse

1. EINLEITUNG

Es wurde ein neues Containmentkonzept für zukünftige Druckwasserreaktoren vorgeschlagen [1], welches die Folgen von Kernschmelzunfällen beherrschen soll. Bei einem angenommenen Kernschmelzunfall verdampft die Wärmeleistung der in der Kernfängerkonstruktion befindlichen Schmelze einen Teil des im Containment eingeschlossenen Wassers. Wird das Containment gekühlt, so schlägt sich der Dampf an der inneren Containmentwand nieder und das Kondensat fließt zur Schmelze zurück und verdampft dort wieder. Erklärtes Ziel des neuen Containmentkonzeptes ist es, die Wärme von der Stahlhülle vollständig passiv, d.h. ohne aktive Maßnahmen wie Zwangsbelüftung oder Berieselung, abzuführen.

Durch Einsatz von Filtern soll verhindert werden, daß eventuelle Leckagen von Spaltgasen in die Umgebung gelangen.

Wie in Abb. 1 dargestellt, besteht das Containment aus einer inneren Stahlschale von 60 m Durchmesser und 38 mm Wandstärke sowie einem äußeren etwa 2 m starken Stahlbetonmantel. Dazwischen befindet sich ein Ringraum von etwa 80 cm radialer Tiefe. Der Ringraum ist durch längslaufende, im Stahlbetonmantel verankerte Rippen in kaminartige Kanäle unterteilt. Die im Abstand von etwa 50 cm angebrachten Rippen haben die Aufgabe, die bei hoher Innendruckbelastung, wie z.B. bei einer Wasserstoffdetonation, sich verformende Stahlhülle abzustützen und die Last in die Stahlbetonwand abzutragen (Verbund-Containment).

Die kaminartigen Kanäle stehen unten und oben mit der Außenluft in Verbindung und werden über die Stahlhülle durch die Nachwärme beheizt. Somit tritt Naturkonvektion auf, so daß die Nachwärme an die Außenluft abgegeben wird.

Für die Wärmeübertragung in den Kaminen wurden die im folgenden dargestellten rechnerischen Abschätzungen durchgeführt. Als Vereinfachung wird ein zylindrisches Containment mit einer effektiven Höhe von 40 m angenommen. Weiterhin wird angenommen, daß an der Innenseite der Stahlschale eine gleichmäßige Temperatur von gegebener maximaler Größe herrscht. Die Rechnung kann sich somit auf einen Kanal beschränken. Die Wärme wird in der Stahlschale durch Wärmeleitung transportiert. An der Außenseite der Stahlschale wird durch Naturkonvektion ein Teil der Wärme an die im Kanal strömende Luft abgegeben. Ein weiterer Teil der Wärme geht durch Wärmestrahlung einerseits an die gegenüber liegende Wand des Stahlbetonmantels über, andererseits an die seitlichen

Wände, die durch die Rippen gebildet werden. Für jede der vier Wände wird für die abschätzende Rechnung jeweils eine einheitliche mittlere Temperatur angenommen, die aufgrund von Wärmebilanzen berechnet wird.

Für den Wärmeübergang an die Luft wird die Nusselt-Beziehung für die freie Konvektion an einer senkrechten, ebenen Platte verwendet.

Der Stahlbetonmantel kann wegen der großen Wandstärke und der schlechten Wärmeleitung als adiabat angesehen werden.

Für die Filterung der Spaltgase werden zwei Möglichkeiten betrachtet. Im einen Fall wird der gesamte Kühlluftstrom am Austritt gefiltert, was jedoch erhebliche Filterflächen erfordert und wegen des hohen Druckabfalls am Filter eine langsame Kühlluftströmung mit hoher Aufheizung der Luft zur Folge hat. Im anderen Fall bleibt, wie in Abb. 2 dargestellt, der Kühlluftstrom vollkommen ungefiltert. Die Filterung beschränkt sich auf eventuelle Leckagen aus potentiell zum Ringraum hin undichten Durchführungen [2]. Die Durchführungen sind dabei konzentriert im unteren Teil des Containments angeordnet und münden in einen besonderen Ringraum, welcher zur Außenluft hin abgedichtet und mit Filtern versehen ist. Die Filterfläche kann dabei relativ klein bleiben. Schleusen und Frischdampfleitungen sowie andere Leitungen größeren Durchmessers, die nicht in diesem unteren Teil des Containments angeordnet werden können, sind auch bei heutigen Druckwasserreaktoren getrennt abgedichtet und eventuelle Leckagen münden nicht in den Ringraum.

2. PHYSIKALISCHE BEZIEHUNGEN

Zur Berechnung der abführbaren Wärme an den Luftstrom müssen aufgrund von Wärmebilanzen an allen Wänden eines Kanals die zugeordneten Temperaturen bestimmt werden.

Geschwindigkeit und Temperaturerhöhung der Kühlluft ergeben sich aus Enthalpie- und Impulsbilanz für die Luftströmung.

Wie in Abb. 3 verdeutlicht, geschieht der Wärmetransport von der Stahlhülle an die Kühlluft über folgende Mechanismen:

In der Wand der Stahlhülle wird die gesamte Wärme durch Wärmeleitung transportiert. Der Wärmeübergang an die Kühlluft geschieht mittels Naturkonvektion entlang der vier Wände des Kanals, wobei zwischen den einzelnen Wänden ein Strahlungsaustausch stattfindet.

2.1 Wärmeleitung in der Stahlhülle

Die Temperaturdifferenz über die Stahlhülle errechnet sich aus der Beziehung

$$Q = A \cdot \frac{\lambda}{\delta} \cdot \Delta T \quad (1)$$

- Q = Wärmestrom
- A = wärmeübertragende Fläche
- λ = Wärmeleitfähigkeit der Stahlhülle
- δ = Wandstärke der Stahlhülle
- ΔT = Temperaturdifferenz über die Stahlhülle

2.2 Wärmeübergang im Kamin

Im Kamin findet der Wärmeübergang an die Luft statt. Zwischen den Wänden wird die Wärme durch Strahlung transportiert, während die Luft die Wärme konvektiv von den Wänden aufnimmt (siehe Abb. 3).

Die Wand 1 ist die Außenseite der Stahlhülle, Wand 2 ist die Innenseite des Stahlbetonmantels und Wand 3 die von der Kühlluft angeströmte Fläche der Rippe.

Für die drei verschiedenen Wände gelten folgende Wärmebilanzen.

$$Q = Q_{K1} + Q_{S12} + 2 \cdot Q_{S13} \quad (2)$$

$$Q_{S13} = Q_{K3} + Q_{S32} \quad (3)$$

$$Q_{K2} = Q_{S12} + 2 \cdot Q_{S32} \quad (4)$$

- Q = gesamter Wärmestrom
- Q_{K1} = konvektiver Wärmestrom an der Außenseite der Stahlhülle
- Q_{K2} = konvektiver Wärmestrom an der Innenseite des Stahlbetonmantels
- Q_{K3} = konvektiver Wärmestrom an der Rippenwand

Q_{S12} = Strahlungswärmestrom von der Außenseite der Stahlhülle zur Innenseite des Stahlbetonmantels

Q_{S13} = Strahlungswärmestrom von der Außenseite der Stahlhülle zur Rippenwand

Q_{S32} = Strahlungswärmestrom von der Rippenwand zur Innenseite des Stahlbetonmantels

Die aus diesen Bilanzen sich ergebenden Wandtemperaturen T_{W1} , T_{W2} und T_{W3} sind als Mittelwerte über die gesamte Erstreckung der jeweiligen Wand zu verstehen.

Für den konvektiven Wärmeübergang an die Luft wird eine zwischen Eintritt und Austritt gemittelte Temperatur verwendet.

Jeder konvektive Term berechnet sich nach der Gleichung

$$Q_K = A \cdot \alpha \cdot (T_W - T_L) \quad (5)$$

Q_K = konvektiver Wärmestrom an der betrachteten Wand

A = Fläche der Wand

T_W = mittlere Wandtemperatur

T_L = mittlere Lufttemperatur

α = Wärmeübergangszahl

Die Wärmeübergangszahl α hängt nach Definition wie folgt mit der Nusselt-Zahl Nu zusammen.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot H}{\lambda} \quad (6)$$

H = Kanalhöhe

λ = Wärmeleitfähigkeit der Luft, gemittelt zwischen Wand und Kernströmung, d.h. bei $T_M = 0,5 \cdot (T_W + T_L)$

Es wird angenommen, daß bei diesem Fall der Naturkonvektion die Rayleigh-Zahl Ra entscheidend ist, wobei gilt

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (7)$$

$$Gr = \frac{g \cdot H^3 \cdot \beta \cdot (T_W - T_L)}{\nu^2} \quad (8)$$

- Gr = Grashof-Zahl
- Pr = Prandtl-Zahl der Luft
- g = Erdbeschleunigung
- H = Kanalhöhe
- β = thermischer Ausdehnungskoeffizient der Luft
- T_w = Wandtemperatur
- T_L = Lufttemperatur
- ν = kinematische Zähigkeit der Luft

Sämtliche Stoffwerte der Luft [3], ausgenommen der Ausdehnungskoeffizient, sind bei der mittleren Grenzschichttemperatur zwischen Wand und Kernströmung zu nehmen. Für den Ausdehnungskoeffizienten ist die Temperatur T_L der Kernströmung zu wählen.

Für die Naturkonvektion an senkrechten ebenen Wänden gelten für den laminaren bzw. den turbulenten Bereich nach [4] folgende Korrelationen

$$\text{Nu} = 0,53 \cdot \text{Ra}^{1/4} \quad (9)$$

für den Bereich $10 \leq \text{Ra} \leq 2 \cdot 10^9$
und

$$\text{Nu} = 0,104 \cdot \text{Ra}^{1/3} \quad (10)$$

für den Bereich $2 \cdot 10^9 < \text{Ra} \leq 2 \cdot 10^{10}$

Nach [3] ist die Beziehung (10) auch bis zu Rayleigh-Zahlen bis 10^{12} anzuwenden.

Der Strahlungsaustausch zwischen zwei Wänden i und k ergibt sich nach der Beziehung

$$Q_{Sik} = \frac{\sigma \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_k \cdot A_i \cdot \phi_{ik}}{1 - (1 - \varepsilon_i) \cdot (1 - \varepsilon_k) \cdot \phi_{ik} \cdot \phi_{ki}} \cdot (T_i^4 - T_k^4) \quad (11)$$

- σ = Strahlungskonstante des schwarzen Körpers
- ε = Emissionsverhältnis
- ϕ = Einstrahlzahl
- A = Fläche
- T = absolute Temperatur

Die Berechnungsformeln für die Einstrahlzahlen zwischen zwei endlichen Flächen, die in einem bestimmten Winkel zueinander stehen, sind in [3] angegeben.

Der Massenstrom und die Aufheizung der Luft lassen sich aus Impuls- und Enthalpiebilanz über die Kanalhöhe bestimmen.

Der von den Wänden abgegebene gesamte Wärmestrom Q erhöht die Enthalpie der Luft nach folgender Beziehung

$$Q = F \cdot \rho \cdot w \cdot c_p \cdot (T_A - T_E) \quad (12)$$

F = Querschnitt des Kanals

ρ = Dichte der Luft

w = Geschwindigkeit der Luft

c_p = spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck

T_E = Luft-Eintrittstemperatur

T_A = Luft-Austrittstemperatur

Geschwindigkeit und Stoffwerte der Luft sind gemittelt zwischen Ein- und Austritt. Die Stoffwerte sind [3] zu entnehmen.

Nach dem Impulssatz muß der Auftrieb aufkommen für die Beschleunigung der Luft aus der Ruhe inklusive Einlaufverluste, die Reibung im Kanal und gegebenenfalls den Filterwiderstand. Für die Druckverluste ergibt sich somit folgende Bedingung

$$\Delta p_E + \Delta p_R + \Delta p_F = \Delta p_g \quad (13)$$

Δp_E = Einlaufdruckverlust (Beschleunigung und Einlauf)

Δp_R = Reibungsdruckverlust

Δp_F = Filterdruckverlust

Δp_g = Auftriebsterm

Hierbei gilt für den Auftriebsterm

$$\Delta p_g = g \cdot (\rho_E - \rho) \cdot H \quad (14)$$

g = Erdbeschleunigung

seite des Betonmantels bzw. des Liners ist ebenfalls von Bedeutung, da diese wegen Wärmespannungen im Beton begrenzt ist. Weiterhin sind die Aufheizung der Luft sowie der Auftrieb bzw. der gesamte Druckabfall von Interesse. In den Abb. 4 bis 6 werden diese Größen in Abhängigkeit der dabei abführbaren Wärme dargestellt.

Basierend auf neueren Rechnungen [6] kann angenommen werden, daß infolge der hohen Wärmekapazität der im Containment befindlichen Strukturen (nahezu 13200 m³ Beton, 490 m³ Stahl) der maximale Wärmestrom, der bei einem 1300 MWe Druckwasserreaktor an die Umgebung abgeführt werden muß, etwa 8 MW beträgt.

Abb. 4 zeigt Temperaturen und Drücke für den Fall der Naturzugkühlung ohne Filterung der Luft. Daraus ist zu entnehmen, daß für diesen Ausgangsfall die Nachwärme von 8 MW bei relativ niedrigen Temperaturen und Drücken abführbar ist. Die Stahlhülle nimmt dabei an ihrer Innenseite eine Temperatur von 148°C an, was einem Wasserdampfdruck von 4,5 bar entspricht. Der Liner des Betonmantels hat eine Temperatur von 83°C, und die Luft erreicht eine mittlere Temperatur von 40°C, was einer Austrittstemperatur der Luft von 50°C entspricht. Der gesamte Druckabfall im Kamin bleibt mit 15 Pa sehr niedrig.

Weitere, im Diagramm nicht dargestellte Werte sind bei 8 MW Nachwärme eine Wärmeübergangszahl an der Stahlhülle von 4,5 W/m²K, eine Rayleigh-Zahl von $2,9 \cdot 10^{14}$, eine Nusselt-Zahl von 6900 sowie eine mittlere Luftgeschwindigkeit von 2,8 m/s bei einer Reynolds-Zahl von 10^5 .

Abb. 5 zeigt den Fall, daß der gesamte Kühlluftstrom gefiltert wird, und zwar mit einer Filterfläche, die mit 125 m² gleich groß ist wie der gesamte Strömungsquerschnitt der Kamine.

Für 8 MW Nachwärme ergeben sich dabei unzulässige Temperaturen und Drücke, nämlich 240°C Stahlhüllentemperatur entsprechend 33,5 bar Innendruck, 201°C Betonliner-Temperatur und 145°C mittlere Lufttemperatur im Kamin. Der Druckabfall geht mit 124 Pa fast ausschließlich auf das Konto des Filters. Die Luftgeschwindigkeit ist mit 0,3 m/s wesentlich geringer als im Fall ohne Filter.

Will man zulässige Temperaturen erreichen, so muß man, falls das Konzept der Kühlluft-Filterung beibehalten werden soll, die Filteranströmfläche vergrößern, wodurch wegen der geringeren Anströmgeschwindigkeit der Druckabfall am Filter verkleinert wird. Abb. 6 zeigt den Fall, bei dem die Filterfläche um den Faktor

2,5 auf 314 m² vergrößert ist. Hierbei ergeben sich für 8 MW Nachwärme eine Stahlhüllentemperatur von 194°C und ein Innendruck von 13,8 bar. Die Betonlinertemperatur ist jedoch mit 144°C immer noch sehr hoch, ebenso die Luftaustrittstemperatur von 157°C.

Für den Fall, daß die Filterung nach Abb. 2 auf Leckagen an Durchführungen beschränkt wird, kann praktisch das in Abb. 4 dargestellte Ergebnis für den Fall der Naturzugkühlung ohne Filterung übernommen werden, bei dem 8 MW Nachwärmeleistung bei einer Stahlhüllen-Temperatur von 148°C und einer Betonlinertemperatur von 83°C abgeführt werden können.

Alle durchgeführten Rechnungen haben gezeigt, daß der Strahlungsaustausch zwischen den Wänden der Kamine eine bedeutende Rolle spielt.

Der Einfluß der Strahlung auf den Wärmeübergang im Kamin ist am Beispiel der Naturzugkühlung ohne Filterung der Kühlluft in den Abbildungen 7 bis 9 dargestellt.

Abb. 7 zeigt abhängig von der gesamten abgeführten Wärme neben der dabei vorhandenen Stahlhüllen-Temperatur den Anteil des Wärmestroms, der direkt an der Stahlhülle durch Naturkonvektion an die Luft übergeht, und den Anteil, der von der Stahlhülle durch Wärmestrahlung zunächst an die Betonwand und die Rippen abgegeben wird, und erst dort durch Konvektion an die Luft übergeht.

Bei den dabei angenommenen Emissionskoeffizienten der Wände von 0,9 ist der Strahlungsanteil sogar größer als der direkte konvektive Anteil. Die Summe der beiden Anteile ergibt selbstverständlich den gesamten Wärmestrom.

Um zu verdeutlichen, wie wichtig die Emissionskoeffizienten sind, sind diese in Abb. 8 auf 0,2 heruntergesetzt, was etwa geschmireltem Stahl entspricht.

In diesem Falle ist der Strahlungsanteil wesentlich geringer als der direkte konvektive Anteil an der Stahlhülle, was aber zur Folge hat, daß nunmehr die Stahlhüllen-Temperatur bei gleicher abführbarer Wärme wesentlich höher bzw. unzulässig hoch ist.

In Abb. 9 sind in Abhängigkeit vom Emissionsverhältnis der Wände für 8 MW abführbare Wärme die Temperaturen der Stahlhülle und des Betonliners sowie der Containment-Innendruck dargestellt.

Für Emissionsverhältnisse zwischen 0,1 und 1,0 verringert sich die Stahlhüllentemperatur von 236°C auf 141°C, und der entsprechende Druck von 31 bar auf 3,8

ρ_E = Dichte der Luft am Eintritt
 ρ = mittlere Dichte der Luft im Kamin
 H = Kaminhöhe

Der Einlaufdruckverlust ergibt sich nach [3] zu

$$\Delta p_E = (1 + \zeta_E) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \quad (15)$$

ρ = mittlere Dichte der Luft im Kamin
 w = mittlere Geschwindigkeit der Luft
 ζ_E = Einlaufdruckverlustbeiwert

Der Ansatz für die Reibung längs der Kanalwände lautet

$$\Delta p_R = \zeta \cdot \frac{H}{D_h} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \quad (16)$$

ζ = Widerstandsbeiwert
 H = Kaminhöhe
 D_h = hydraulischer Durchmesser des Kamins
 ρ = mittlere Dichte der Luft
 w = mittlere Geschwindigkeit der Luft

Der Widerstandsbeiwert ζ ist von der Reynolds-Zahl Re abhängig, wobei

$$Re = w \cdot \frac{D_h}{\nu} \quad (17)$$

ν = kinematische Zähigkeit der Luft bei mittlerer Temperatur

Nach [3] gilt für den laminaren Bereich die Korrelation

$$\zeta = 64 / Re \quad \text{für} \quad Re < 3000 \quad (18)$$

und für den turbulenten Bereich

$$\zeta = 0,3164 / Re^{1/4} \quad \text{für} \quad Re > 3000 \quad (19)$$

Im turbulenten Bereich wird alternativ zur Gleichung (19) bei bekannter absoluter mittlerer Rauigkeit K des Kamins die Bedingung

$$1 / \sqrt{\zeta} = 2 \cdot \lg \left(\frac{D_h}{K} \right) + 1,14 \quad (20)$$

benutzt. Dabei wird hier der größere der sich aus den Bedingungen (19) und (20) ergebenden Werten verwendet.

Der Filter-Druckverlust errechnet sich nach [5] aus folgender Beziehung

$$\Delta p_F = 370 \cdot w + 21 \cdot w^2 \quad (21)$$

mit w in m/s und Δp_F in Pa.

Sämtliche Gleichungen sind über die Temperaturen der Luft und der Wände sowie über die Strömungsgeschwindigkeit der Luft gekoppelt. Das Gleichungssystem (1) bis (21) läßt sich jedoch auf zwei Gleichungen reduzieren, die wegen der Nicht-Linearitäten iterativ gelöst werden müssen. Dazu ist das Rechenprogramm C2000 entwickelt worden, mit dessen Hilfe die im folgenden dargestellten Ergebnisse berechnet wurden.

3. ERGEBNISSE DER ABSCHÄTZUNGSRECHNUNGEN

Die Berechnungen wurden für ein Containment von 60 m Durchmesser und einer effektiven zylindrischen Höhe von 40 m, über welche die Nachwärme von der Stahlhülle an die Luft abgeführt wird, durchgeführt. In allen Fällen haben die Einzelkanäle einen Querschnitt von 0,50 m × 0,80 m. Die Stege bzw. Rippen sind 0,10 m breit. Somit sind am Umfang 314 Kanäle angeordnet. Die Stahlhülle hat eine Wandstärke von 38 mm. Für sämtliche Kanalwände wird für einen möglichst guten Strahlungsaustausch ein Emissionsverhältnis von 0,9 verwendet, welches durch geeignete Behandlung der Wände erreicht werden soll. Als absolute mittlere Rauigkeit der Strömungskanäle wird 1 mm angenommen. Für ungünstige Wetterverhältnisse wird eine Eintrittstemperatur der Luft von 30°C gewählt.

Wichtige Ergebnisse sind die sich einstellende Temperatur der Stahlhülle und der dazugehörige Wasserdampfdruck im Containment. Die Temperatur an der Innen-

bar. Die Temperatur des Betonliners steigt dabei zwar an, jedoch unwesentlich von 45°C auf 85°C.

4. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Wegen des großen Wärmespeichervermögens der Einbauten des Reaktor-Containments erreicht die von der Stahlhülle abzuführende Nachwärme nach neuesten Angaben Werte, die für einen 1300 MWe Druckwasserreaktor etwa 8 MW betragen.

Nach den oben dargestellten Abschätzungsrechnungen ist dieser Wärmestrom mit Hilfe des geschilderten Verbund-Containments bei guten Strahlungseigenschaften der Wände auf passivem Wege durch Naturkonvektion an die Luft abführbar.

Diese Aussage gilt mit größerer Sicherheit dann, wenn die Luft gar nicht gefiltert werden muß oder wenn die Filterung sich auf geringe Teilbereiche des Containments beschränken kann. Die Stahlhülle nimmt dabei eine Temperatur von ca. 150°C an, was einem Wasserdampfdruck von ca. 5 bar entspricht. Die Temperatur des Betonliners ist etwa 85°C, und die Luft heizt sich von 30°C auf 50°C auf. Wird der gesamte Kühlluftstrom gefiltert, so kann die Nachwärme nur dann abgeführt werden, wenn eine Temperatur der Stahlhülle von ca. 200°C bzw. ein Innendruck von ca. 16 bar zugelassen wird und außerdem eine Filterfläche von 314 m² zur Verfügung gestellt wird. Der Betonliner nimmt dabei jedoch eine Temperatur von 144°C an, und die Luft heizt sich auf 157°C am Austritt auf.

Am Beispiel der Nachwärmeabfuhr ohne Filterung des Kühlluftstromes wurde gezeigt, daß der Strahlungsaustausch zwischen den Kaminwänden von großer Bedeutung ist und daß darauf geachtet werden muß, daß die Wände möglichst große Emissionsverhältnisse aufweisen.

Da die Rechnungen unter vereinfachenden Annahmen durchgeführt wurden, sind sowohl aufwendigere Rechnungen als auch Experimente notwendig.

Die im KfK in Konstruktion befindliche Versuchsanlage PASCO (passive containment cooling) soll dazu dienen, den Wärmeübergang bei einem einseitig beheizten Rechteckkanal mit variablen, relativ großen Abmessungen zu untersuchen und

Möglichkeiten aufzuzeigen, durch konstruktive Maßnahmen, wie etwa durch Turbulenzpromotoren, den Wärmeübergang zu verbessern.

Der maximale Querschnitt des Kanals ist etwa $500 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ und die maximale Höhe 8 m.

Von besonderer Bedeutung dürfte dabei der Wärmeübergang in den Ecken des Rechteckkanals sein sowie der Einfluß der zwischen 2 m und 8 m variablen Höhe. Weiterhin sollen Hinweise dafür gewonnen werden, ob die Untersuchung auf noch größere Höhen entsprechend der beim Reaktor vorhandenen Höhe von ca. 40 m ausgedehnt werden muß.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] H. H. Hennies, G. Kessler, J. Eibl; Improved Containment Concept for Future Pressurized Water Reactors; Int. Workshop on "Safety of Nuclear Installations of the Next Generation and Beyond", August 28-31, 1989, Chicago, IL; USA, IAEA-TECDOC 550, 1990, S. 361.
- [2] F.J. Erbacher, B. Goeller, R. Krieg: persönliche Mitteilung
- [3] VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 4. Auflage, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1984.
- [4] GENERAL ELECTRIC Heat Transfer and Fluid Flow Data Books, Section 504.2, Page 4, Feb. 1973.
- [5] V. Ruedinger, U. Ensinger: "Investigations into the Behavior of HEPA-Filters at High Temperature, Air Humidity and Elevated Differential Pressure", KfK 3350, July 1983, pp. 4400-21 to 4400-36.
- [6] H. Alsmeyer, F.J. Erbacher, W. Scholtyssek: "Decay Heat Removal after a PWR Core Meltdown Accident", to be published: International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants (ANP '92), October 25-29, 1992, Tokyo, Japan.

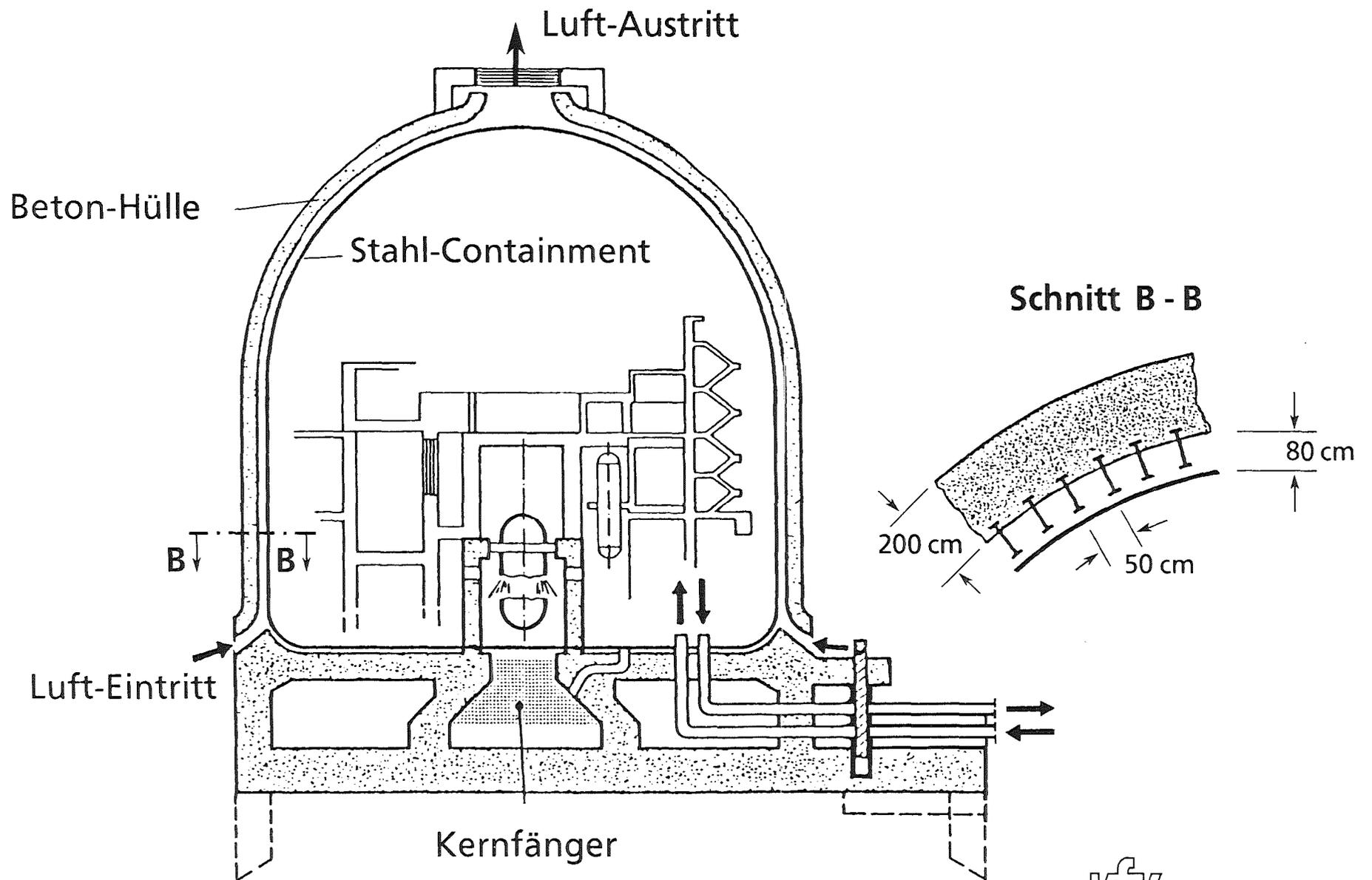


Abb. 1 Verbund - Containment mit passiver Kühlung durch Naturkonvektion

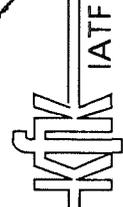
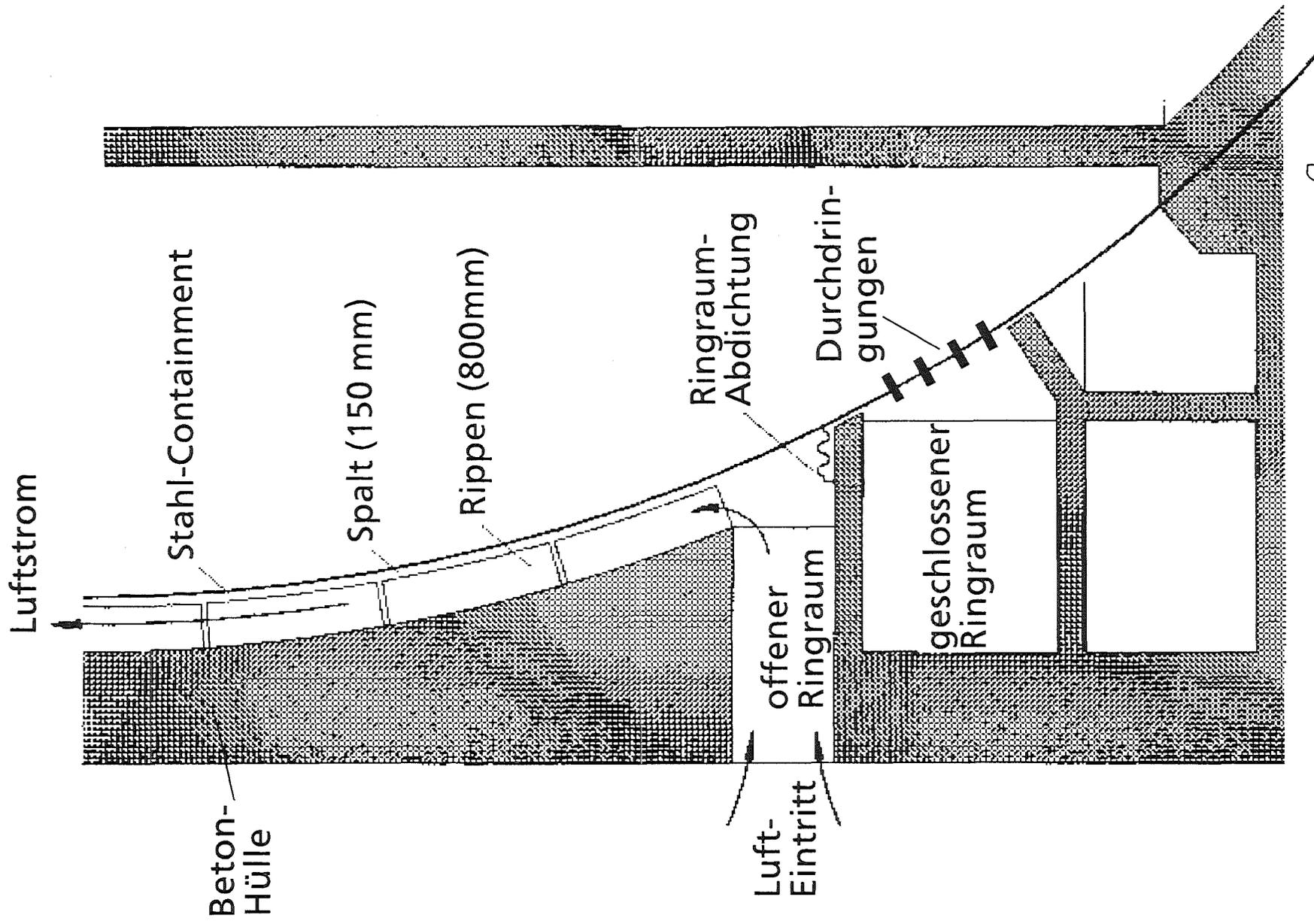


Abb. 2 Passive Containment - Kühlung ohne Kühlung -
 Filterung, Anordnung der Durchdringungen in
 einem gesonderten gefilterten Ringraum

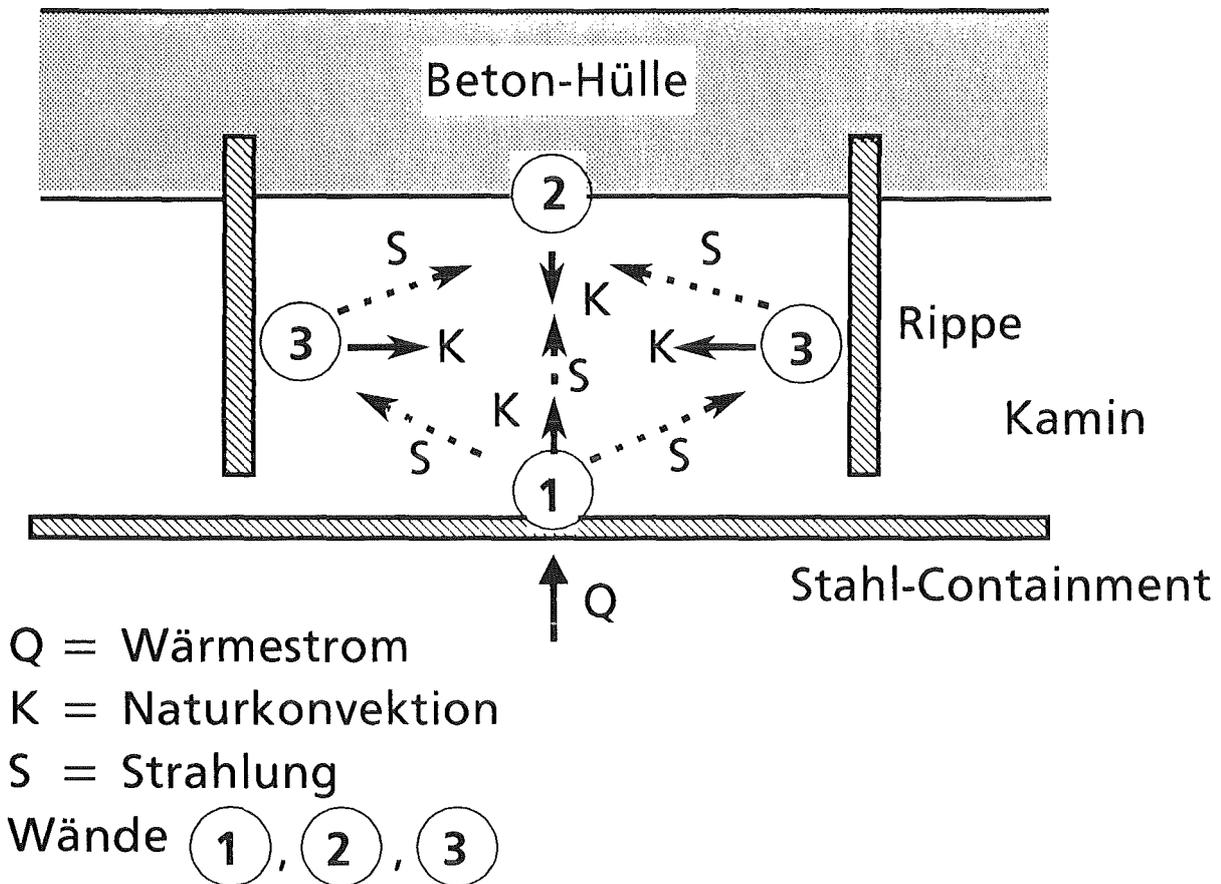


Abb. 3 Wärmetransport - Mechanismen vom
 Stahl - Containment an die Luft

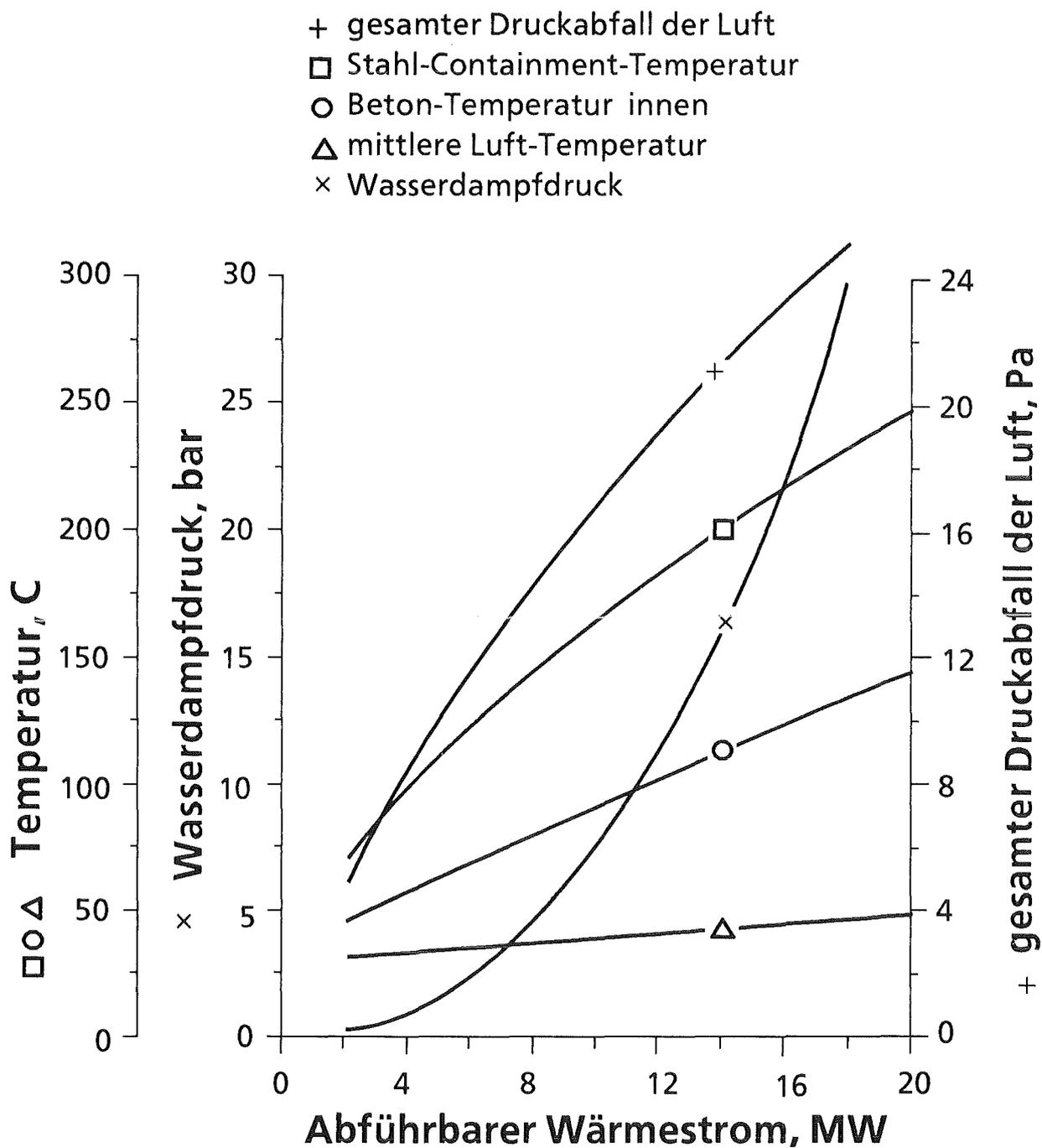


Abb. 4 Thermohydraulik der Containment - Kühlung ohne Filterung der Kühlluft

Filter - Anströmfläche: 125 m²

- + gesamter Druckabfall der Luft
- Stahl-Containment-Temperatur
- Beton-Temperatur innen
- △ mittlere Luft-Temperatur
- × Wasserdampfdruck

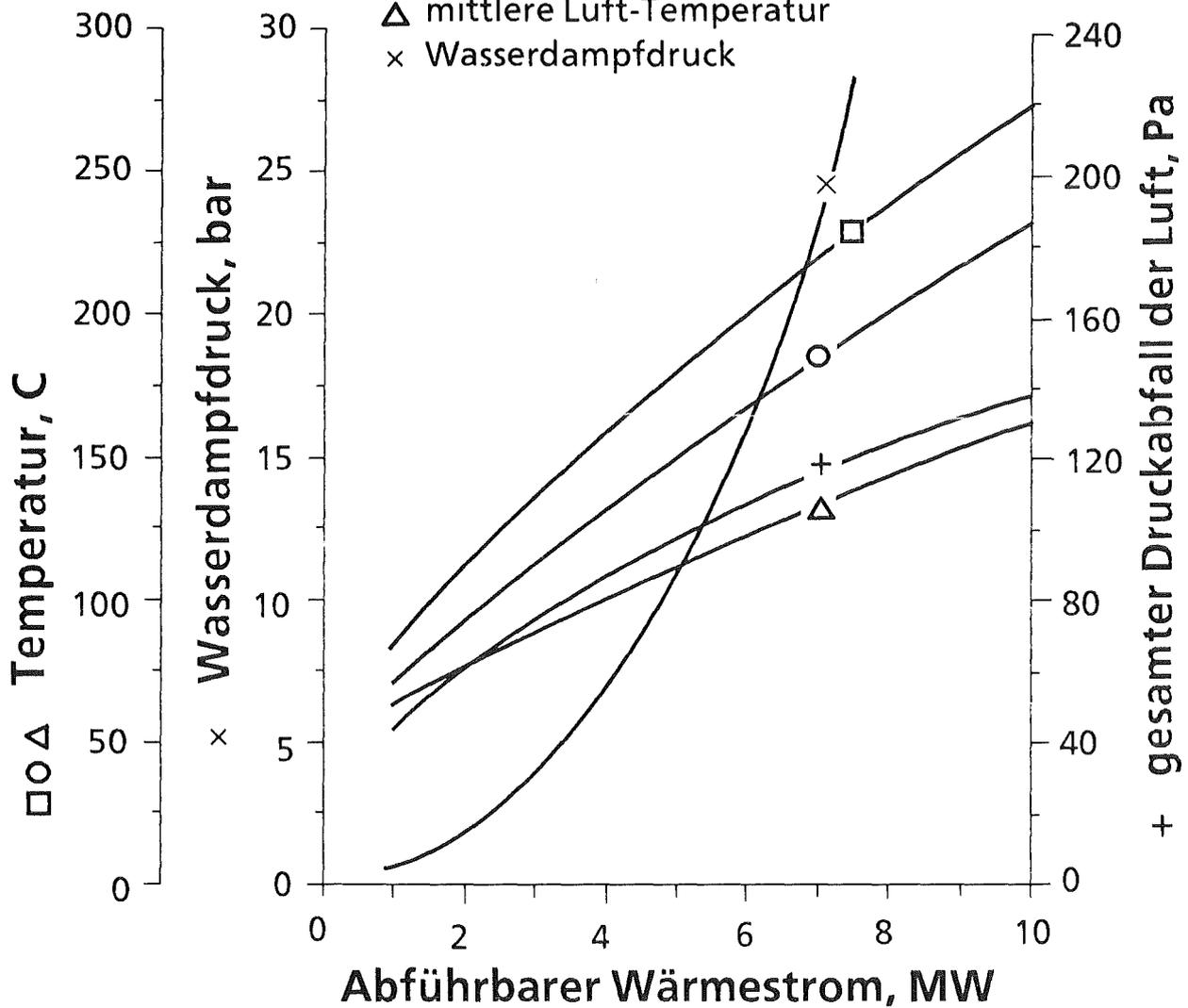


Abb. 5 Thermohydraulik der Containment - Kühlung mit Filterung der Kühlluft

Filter - Anströmfläche: 314 m²

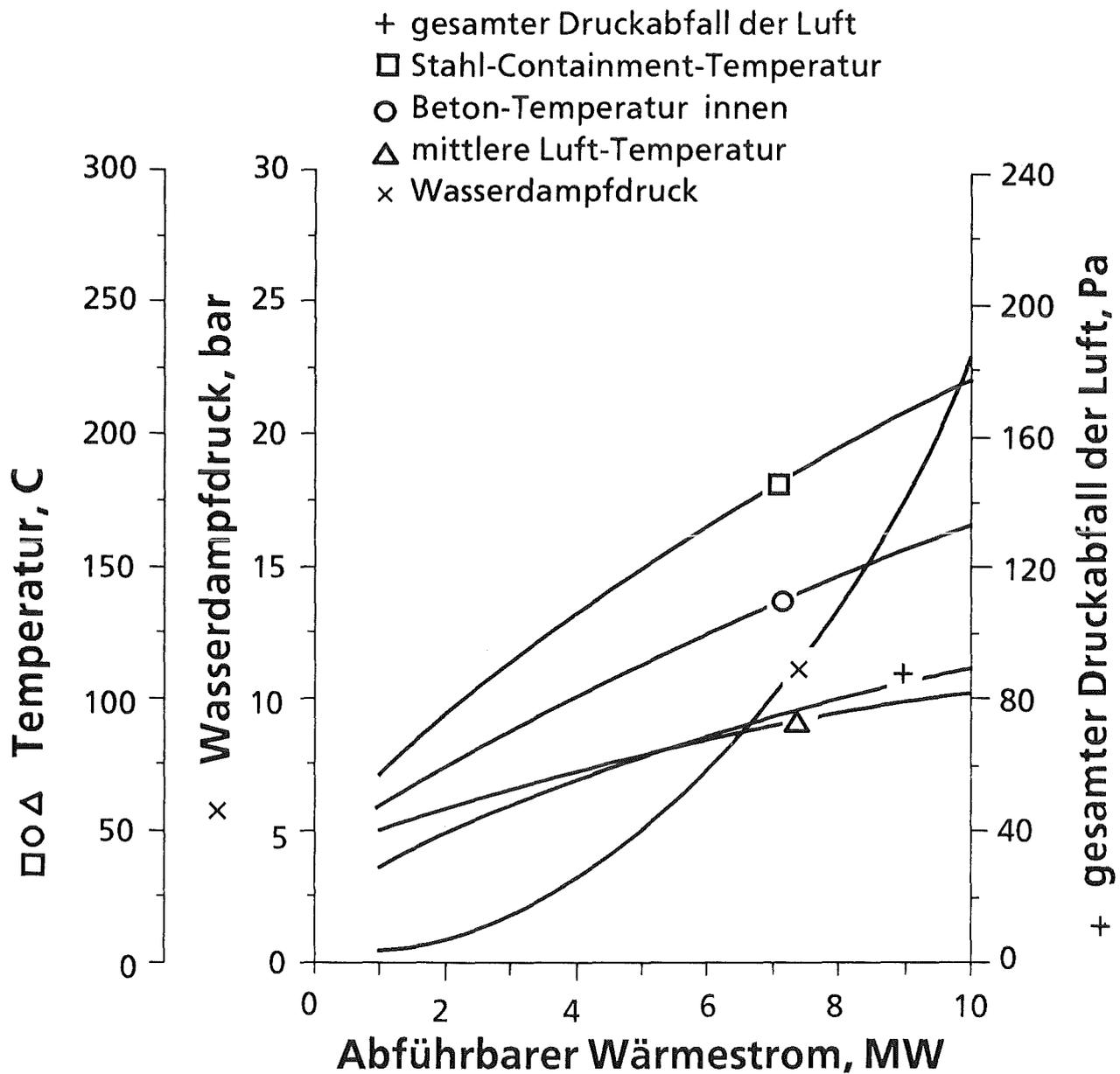


Abb. 6 Thermohydraulik der Containment - Kühlung mit Filterung der Kühlluft und vergrößerter Filteranströmfläche

● Emissionsverhältnisse: 0,9
 ● ohne Kühlluft - Filterung

+ Stahl-Containment-Temperatur
 □ gesamter abführbarer Wärmestrom
 △ Strahlungswärmestrom
 ○ konvektiver Wärmestrom

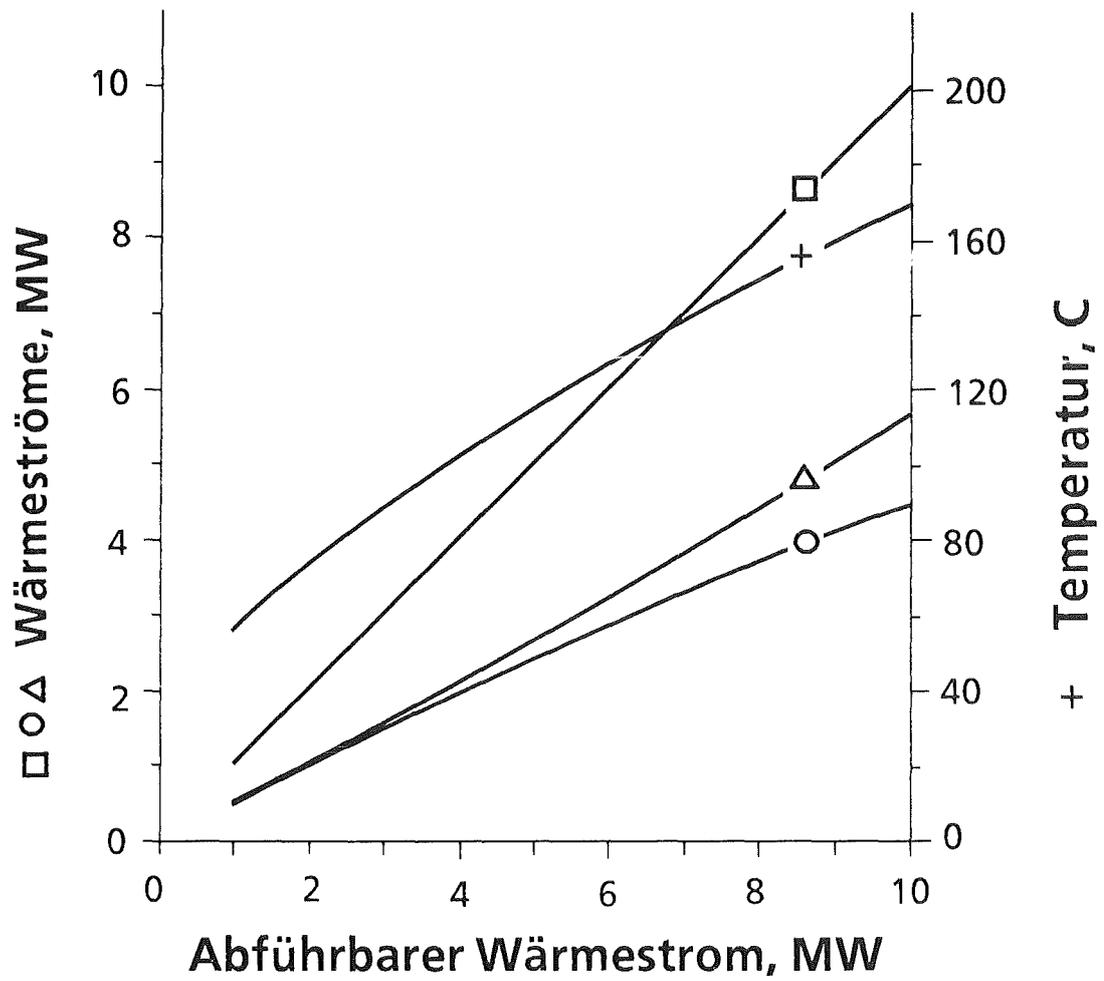


Abb. 7 Einfluß der Strahlung bei großen Emissionsverhältnissen

- Emissionsverhältnisse: 0,2
- ohne Kühlluft - Filterung

- + Stahl-Containment-Temperatur
- gesamter abführbarer Wärmestrom
- △ Strahlungswärmestrom
- konvektiver Wärmestrom

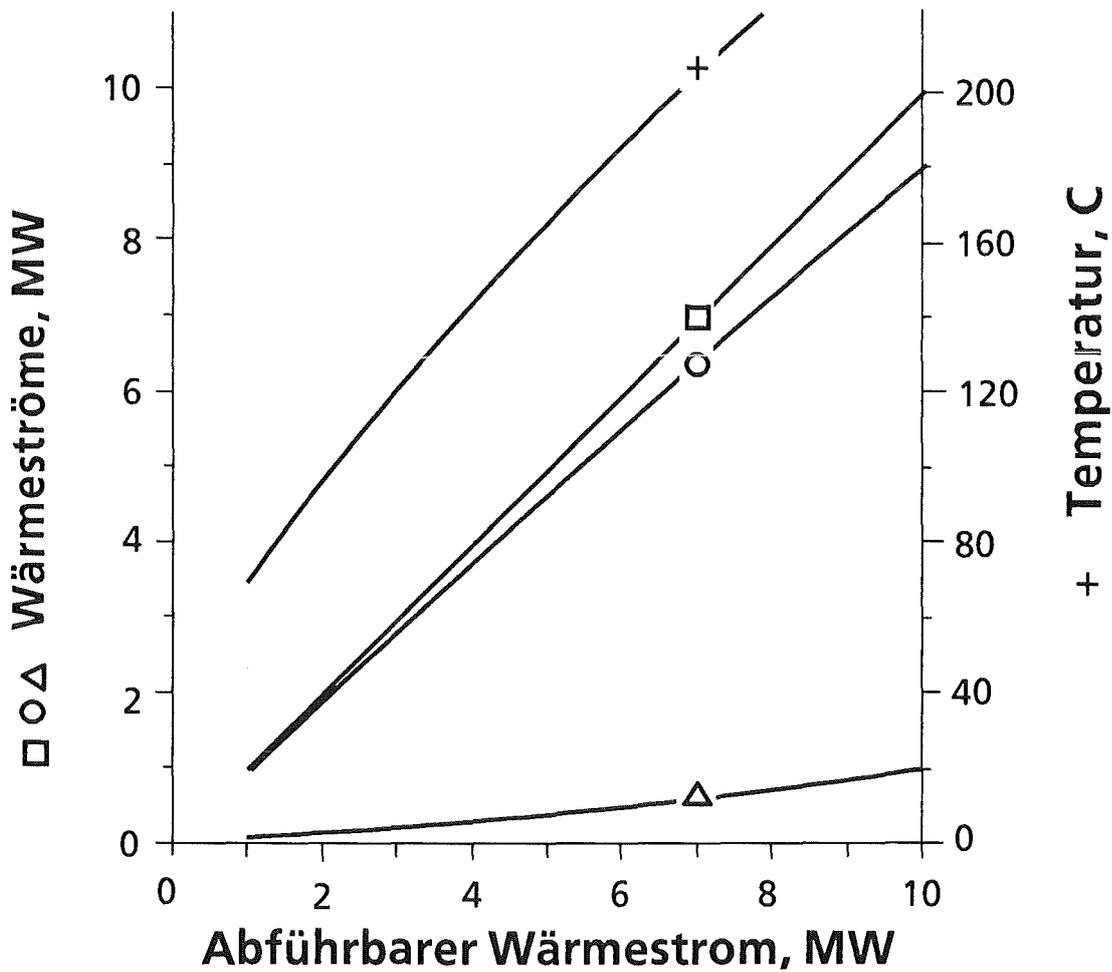


Abb. 8 Einfluß der Strahlung bei kleinen Emissionsverhältnissen

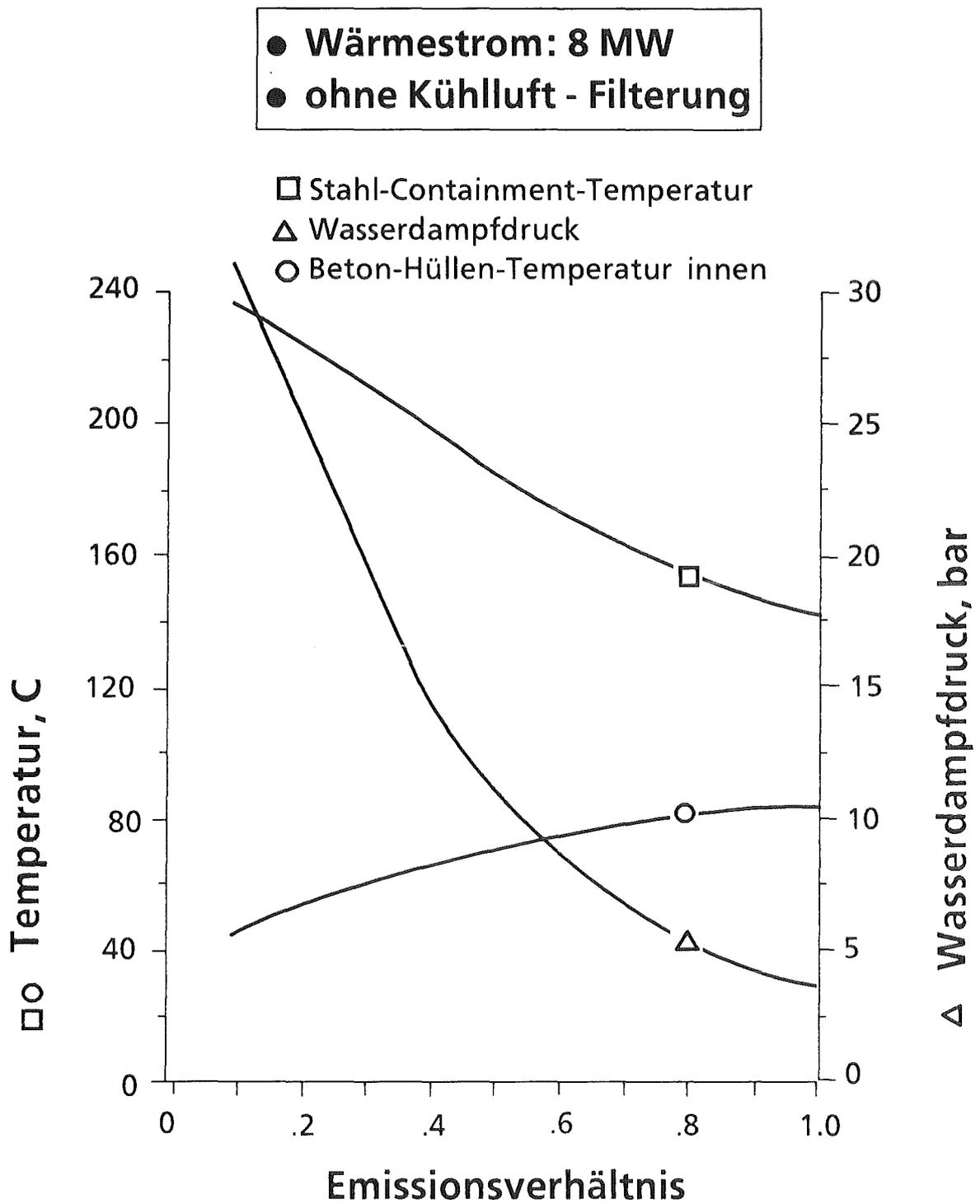


Abb. 9 Einfluß der Emissionsverhältnisse