

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

DSD – Brandschutz und Brandbekämpfung
in Wertstofflagern

Teil 3: Numerische Simulation von Tempera-
tur- und Strömungsfeldern infolge des
Brandes von stapelförmig gelagertem
Material mit dem Programmsystem
FLUENT

123,2

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN,
KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz
und zivile Verteidigung des Arbeitskreises V der
Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer

Forschungsbericht Nr. 123/2

DSD – Brandschutz und Brandbekämpfung in Wertstofflagern

Teil 3: Numerische Simulation von Temperatur- und Strömungsfeldern
infolge des Brandes von stapelförmig gelagertem Material
mit dem Programmsystem FLUENT

von
Dipl.-Ing. Monika Kutz

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt

Heyrothsberge
Februar 2001

BERICHTS-KENNBLETT

1. BERICHTSNUMMER

393 (IdF)

2. TITEL DES BERICHTES (KURZ)

CFD-Simulation von Brandgasströmungen in
Lagerstapeln mit Fluent

3. AUTOR(EN)

Dipl.-Ing. Monika Kutz

4. DURCHFÜHRENDE INSTITUTION (NAME/ANSCHRIFT)

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt
Biederitzer Straße 5
D-39175 Heyrothsberge
Direktor: Prof. Dr. rer. nat. habil. R. Grabski
Leitender Branddirektor

5. FÖRDERNDE INSTITUTION/AUFTRAGGEBER (NAME/ANSCHRIFT)

Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile
Verteidigung des Arbeitskreises V der Arbeitsgemeinschaft der
Innenministerien der Bundesländer

6. ABSCHLUßDATUM

Februar 2001

7. FÖRDER-/ AUFTRAGS-NR.

IMK 27(1/99)H

8. SEITENZAHL

53

9. ABBILDUNGEN

42

10. TABELLEN/DIAGRAMME

1 / 0

11. LITERATURANGABEN

8

12. KURZFASSUNG

Es wurden Untersuchungen der Brandgasausbreitung in Kartonstapeln infolge der Erwärmung durch eine unterhalb des Stapels angeordnete Poolquelle durchgeführt. In 2-dimensionalen Berechnungen wurden Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen im Spalt zwischen 2 Kartonstapeln bei Variation von Quellstärke und Spaltabstand bestimmt. Am Beispiel eines realen Brandversuches wurden die Möglichkeiten der numerischen Simulation zur Ermittlung von Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit der Brandgase gezeigt sowie Berechnungsergebnisse und Versuchsdaten gegenübergestellt.

13. SCHLAGWÖRTER

CFD-Berechnung, Heißgasströmung, Fluent,
Temperaturverteilung

14. VERÖFFENTLICHUNGSDATUM

Februar 2001

1. Inhaltsverzeichnis

1. Inhaltsverzeichnis	3
2. Einleitung	4
2.1. Numerische Simulation mit einem CFD-Tool	4
2.2. Nutzung des CFD-Tools Fluent	5
3. Fluentberechnungen	5
3.1. Problemstellung und Modellbildung	5
3.1.1. Modellgleichungen	7
3.2. Berechnung	8
3.2.1. Geometrie des Berechnungsgebietes	8
3.2.2. Berechnungsgitter	9
3.2.3. Rand- und Anfangsbedingungen, Stoffwerte	10
3.3. Parameterrechnungen	13
3.3.1. Erwärmung im Spalt infolge Poolbrandquelle	13
3.3.2. Brandgasausbreitung unter Berücksichtigung der Wärmeleitung im Karton	18
3.3.3. Brandgasausbreitung unter Berücksichtigung der Wärmeleitung im Karton bei verringertem Spaltabstand	25
3.3.4. Gegenüberstellung	27
3.4. Brandgasausbreitung in hohen Kartonstapeln	31
3.4.1. Berechnungsgeometrie	32
3.4.2. Brandgasströmung infolge Poolquelle	33
3.4.3. Brandgasströmung infolge Freisetzung aus den Kartoninnenflächen	38
3.4.4. Berechnungen zur Simulation des Versuches für die Brandgasausbreitung aus dem Feststoff	40
3.4.5. Ergebnisse der Simulationsrechnung zum Versuch	43
4. Zusammenfassung	45
5. Literatur	47
6. Anhang	48

2. Einleitung

Wie sich in den zahlreichen Versuchen zum Abbrandverhalten von Karton- und Palettenstapeln [Pleß, Seliger 1996; Glawe 1996] zeigte, sind Brände in Lagern durch verdeckte Brandflächen gekennzeichnet, die der Brandbekämpfung nur schwer zugänglich sind. Innerhalb kürzester Zeit entwickelt sich ein Brand hoher Intensität (voll entwickelter Brand).

Im Mittelpunkt dieser numerischen Untersuchungen steht der Prozess der Erwärmung des Gases, des Rauchgases und Brandmaterials (Kartons) und der Entwicklung der Heißgasströmung innerhalb der Lageranordnung in einem Raum. Für die Modellierung und numerische Berechnung wird das CFD-Tool Fluent genutzt.

Abbrandversuche von Kartonstapeln, die im Teil 2 dieses Vorhabens vorgestellt wurden, dienen als Vergleich für die Simulationsrechnungen.

Die zur Validierung zur Verfügung stehenden Daten sind Gasgeschwindigkeiten im Spalt, mittlere Temperaturen sowie Flammenhöhen-Zeit-Verläufe, die aus Videoaufnahmen des Brandverlaufes abgeleitet wurden.

Anhand von 2-dimensionalen Simulationsrechnungen werden Abhängigkeiten dargestellt, und Modellierungserfordernisse diskutiert.

2.1. Numerische Simulation mit einem CFD-Tool

Bei der numerischen Simulation werden auf Grundlage des beschreibenden Differentialgleichungssystems die physikalischen Größen durch Anwendung numerischer Verfahren ermittelt. Bei der hier zur Anwendung kommenden Methode der Finiten Volumen, wird das gesamte Berechnungsgebiet in finite Abschnitte unterteilt, wobei die Modellgleichungen für jeden Teilabschnitt zu lösen sind. Das resultierende Gleichungssystem, dessen Größe vor allem durch die Anzahl der Differentialgleichungen und die Anzahl der Teilabschnitte bestimmt wird, kann nur noch unter Einsatz moderner numerischer Verfahren und leistungsfähiger Rechentechnik gelöst werden. Im Ergebnis der Berechnung liegen die physikalischen Größen für jeden Teilabschnitt vor.

Für solche fluiddynamischen Berechnungen stehen inzwischen Berechnungspakete zur Verfügung, die durch Bereitstellung einer Bibliothek von Modellgleichungen und Lösungsverfahren eine durchgängige CFD-Modellierung ermöglichen, die von der Erstellung der Modellgleichungen und des Berechnungsgitters bis zur Darstellung der Berechnungsergebnisse reicht. Der Prozess der CFD-Modellierung erfordert dabei die Abfolge grundlegender Arbeitsschritte.

Folgende Simulationsschritte sind bei einer CFD-Berechnung durchzuführen:

- ◆ Problembeschreibung:
 - Aufstellen der Modellgleichungen,
 - Erzeugen des Berechnungsgitters,
 - Definition von Rand- und Anfangsbedingungen,
 - Definition von Stoffdaten,
 - Wahl der Lösungsverfahren
- ◆ Numerische Lösung (Kontrolle des Konvergenzverhaltens)
- ◆ Darstellung der Berechnungsergebnisse.

2.2. Nutzung des CFD-Tools Fluent

Als ein spezielles Programmsystem wird hier das kommerzielle CFD-Tool Fluent für die Simulation eingesetzt. Fluent basiert auf der Methode der Finiten Volumen, deren Grundlagen von [Patankar 1980] ausführlich beschrieben werden. Fluent bietet die Möglichkeit der Simulation von ein- und mehrphasigen Fluidströmungen unter Einbeziehung von Turbulenz, Wärme- und Stofftransportvorgängen, chemischen Reaktionen u. a. . Eine vollständige Übersicht zu den verschiedenen Modellierungsmöglichkeiten kann aus der Programmdokumentation [Fluent 98] gewonnen werden.

Im Prozess der Modellbildung werden die zu modellierenden Vorgänge mathematisch durch Differentialgleichungen beschrieben, die auf dem Prinzip der Bilanzierung von Masse, Energie, Impuls, chemischen Spezies u.a. basieren.

Die allgemeine Form dieser Differentialgleichung lautet:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S \quad (1)$$

ϕ ist hier die allgemeine abhängige Variable, Γ der Diffusionskoeffizient, S steht für den Quellterm, x_i steht für die Raumkoordinaten ($i=1,2,3$) und u_i für die Geschwindigkeitskomponenten in Richtung der Raumkoordinate. Die Bedeutung des Diffusionskoeffizienten und des Quellterms sowie die sich daraus ableitende Formulierung ist davon abhängig, welche physikalische Größe an Stelle der verallgemeinerten Variablen steht, d. h. um welche der Bilanzgleichungen es sich handelt.

Die einzelnen Terme der Gleichung (1) dokumentieren die verschiedenen Einzelphänomene, die in die Änderung der physikalischen Größe einfließen. So werden der erste Term auf der linken Seite als transienter Term, der zweite als konvektiver Term bezeichnet und auf der rechten Seite folgt nach dem Diffusionsterm der Quellterm.

Die Zusammenstellung des Satzes an Differentialgleichungen mit der Auswahl der entsprechenden Terme und Koeffizienten ist Bestandteil der Modellbildung mit dem CFD-Tool und soll im Folgenden anhand konkreter Beispiele gezeigt werden.

3. Fluentberechnungen

3.1. Problemstellung und Modellbildung

Das reale Problem stellt sich als Brand von 2 Kartonstapeln im Raum. Dabei ist vor allem die Entwicklung zum Brand zu untersuchen, um die These zu überprüfen, dass die Brandentwicklung innerhalb der Kanäle zwischen den Stapeln besonders intensiv verlaufen muss bzw. um aufzuzeigen, dass bei anderen Anordnungen ein veränderter Brandverlauf eintritt.

Das Versuchs-Szenario sei wie folgt beschrieben:

In einem Brandraum sind 2 Kartonstapel in einem Abstand von 10-20 cm angeordnet.

Jeder Kartonstapel befindet sich auf einer Palette, zwischen denen ebenerdig eine Zündwanne mit Benzin steht, die über eine Zeit von ca. 30-60s (Zeit in der die vorgegebene Menge Benzin verbrennt) eine Zündquelle für den Brand liefert.

Brandmaterial ist Karton-Pappe.

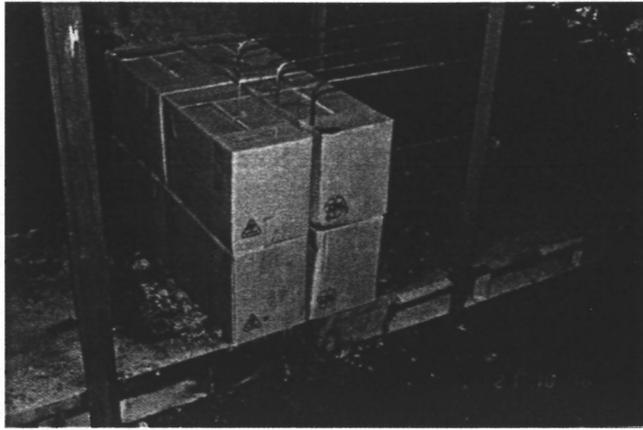


Bild 1: Versuchsanordnung zur Brandausbreitung zwischen Kartonstapeln der Höhe 0,8m

Zur Verdeutlichung ist in Bild 1 ein von [Glawe 1996] verwendeter ähnlicher Versuchsaufbau, jedoch mit geringerer Spaltbreite, gezeigt.

Noch vor Ausbrennen der Zündquelle entwickelt sich zwischen den Kartons, ausgehend von Brandflächen an den Innenflächen der Kartons, ein intensiver Brand.

Der erste Schritt der CFD-Berechnung mit Fluent bzw. oder einem anderen Tool ist die Modellbildung, in deren Verlauf eine Abstraktion des realen Vorgangs in eine mathematisch-physikalische Beschreibung der Vorgänge erfolgt. Diese Beschreibung muss dann innerhalb des Programmpaketes umgesetzt werden.

Die folgende vereinfachte Beschreibung der physikalischen Vorgänge wird als Grundannahme für die Modellbildung verwendet.

Mittels einer unterhalb des Stapel angeordneten Brandquelle (Poolbrandquelle) findet die Erwärmung von Luft und Brandmaterial (Karton) statt sowie die Ausprägung eines Strömungsfeldes im Spalt zwischen den Kartons. Infolge der Erwärmung des Brandmaterials werden Pyrolysegase freigesetzt, die mit dem Luftsauerstoff unter Freiwerden von Energie reagieren.

Eine weitere Vereinfachungen wird vorgenommen, indem auf die Modellierung der Verbrennungsreaktion verzichtet wird. Grund dafür ist, dass insbesondere bei Lageranordnungen unterschiedlichste Materialien vorhanden sind, angefangen von flüssigen potentiellen Brandstoffen wie Lösungsmittel über Plaste-Werkstoffe und Holz- bzw. Zelluloseprodukte, für die reaktionskinetische Daten und Reaktionsschemata und Quelldaten nicht oder nur teilweise vorhanden sind. Eine Einbeziehung der Reaktionskinetik führt damit eher zu einer Aufblähung des Berechnungsproblems als zu einer realistischeren Betrachtung.

Die Reaktion wird insofern berücksichtigt, dass die Reaktionsprodukte über die Randbedingungen in die Berechnung eingehen.

Durch die Modellierung des mehrkomponentigen Gases durch ein Einkomponentengas ergibt sich ein vereinfachtes Modell für die Rauchgasströmung, das durch das nachfolgend angegebene gekoppelte partielle Differentialgleichungssystem mathematisch beschrieben werden kann.

3.1.1. Modellgleichungen

[Fluent 98]

Massebilanz

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m \quad (2)$$

Impulsbilanz

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (3)$$

Energiebilanz

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + u_j (\tau_{ij})_{eff} \right) + S_h \quad (4)$$

k-ε-Modell (Standard- k-ε-Modell):

Erhaltung der turb. kinetischen Energie

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (5)$$

Erhaltung der Dissipation

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

Die Größen $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ in den Gleichungen (5) und (6) sind Konstanten des k-ε-Modells,

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ sind die turbulenten Prandtl-Zahlen, G_k, G_b sind die Turbulenzerzeugungsraten infolge turb. kinetischer Energie (Index k) und infolge des Auftriebs (Index b).

Hiermit liegen für die dreidimensionale instationäre Berechnung 6 gekoppelte Differentialgleichungen vor, mit denen für jedes Volumenelement des Berechnungsgebietes die veränderlichen physikalischen Größen u_1, u_2, u_3, T, k und ε ermittelt werden können.

Ergänzt werden diese Gleichungen u.a. durch Stoffgesetze, Rand- und Anfangsbedingungen und Modellansätze zur Kopplung der Gleichungen, wie den Modellannahmen für das k-ε-Modell.

Für die Gültigkeit des k-ε-Modell nach [Launder and Spalding 1972] wird eine vernachlässigbare molekulare Viskosität vorausgesetzt und für die turbulente Viskosität μ_t gilt die Beziehung (Wirbelviskositätsansatz):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

Für die Modell-Konstante C_μ gilt beim k-ε-Modell $C_\mu \approx 0,09$.

In wandnahen Bereichen ist das Turbulenzmodell nicht mehr gültig (molekularer Austausch ist nicht vernachlässigbar). Aus diesem Grund wird eine weitere Modellannahme eingefügt, die diesen „Defekt“ durch Definition einer Wandfunktion für die physikalischen Größen behebt. Durch die Wandfunktion wird der Bereich beschrieben, indem der Übergang von der laminaren Unterschicht bis zur voll turbulenten Strömung stattfindet. Die Wandfunktion wird auch für die Werte von k und ε definiert.

Die hier verwendeten Wandfunktionen basieren auf [Launder and Spalding 1974].

Definition des Wandgesetzes in der Formulierung als dimensionslose Größe lautet für die Geschwindigkeit:

$$U^* = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^*) \quad (8)$$

mit U^* als dimensionslose Geschwindigkeit, y^* als dimensionslose Wandschichtdicke, der empirischen Konstanten $E=9.81$ und der von Karman Konstanten $\kappa = 0,42$. Diese Funktion verläuft in Wandnähe linear, in der turbulenten Oberschicht logarithmisch.

Auch das Wandgesetz für die Temperatur beschreibt eine lineare Abhängigkeit in der Unterschicht und eine logarithmische Abhängigkeit im turbulenten Bereich der Wandschicht.

Für die genaue Formulierung des Wandfunktion für die Temperatur sowie für die Größen k und ε sei auf [Fluent 98] verwiesen.

3.2. Berechnung

Die numerische Simulation der Heißgasausbreitung in Lageranordnungen anhand des vorliegenden Differentialgleichungssystems soll zur Vereinfachung in einem 2-dimensionalen Berechnungsgebiet vorgenommen werden. Bei der 2-dimensionalen Betrachtungen entfällt eine der Impulsgleichungen, die anderen Gleichungen sind weniger umfangreich und bei der Unterteilung des Berechnungsgebietes muss in nur 2 Raumkoordinaten detailliert werden. Es ergibt sich ein geringerer numerischer Aufwand zur Lösung des resultierenden algebraischen Gleichungssystems als bei einem gleichartigen dreidimensionalen Problem.

Bei den Berechnungen macht sich das durch geringere Rechenzeiten bemerkbar, so dass eine Variation der Randbedingungen, Geometrie und Vernetzung des Gebietes in überschaubaren Zeitabschnitten möglich ist.

Hier soll der Weg beschritten werden, anhand von 2-dimensionalen Parameterrechnungen Erkenntnisse zu gewinnen, die dann für die Berechnung der Entwicklung und Ausbreitung von Heißgasströmungen in Lageranordnungen innerhalb von Räumen genutzt werden können.

3.2.1. Geometrie des Berechnungsgebietes

Abgeleitet von der realen Anordnung zweier Stapel in einem Brandraum, wie in Bild 1 dargestellt, wird ein Gebiet der Abmessungen von 4,8m Länge (x-Richtung) und 3,2m Höhe (y-Richtung) gewählt, in dem im Abstand von 20 cm zwei Körper (Hindernisse) von 0,4m Länge und 0,8m Höhe angeordnet sind. Die folgende Abbildung skizziert die Geometrie des 2-dimensionalen Gebietes, das einen Schnitt durch den Brandraum darstellt.

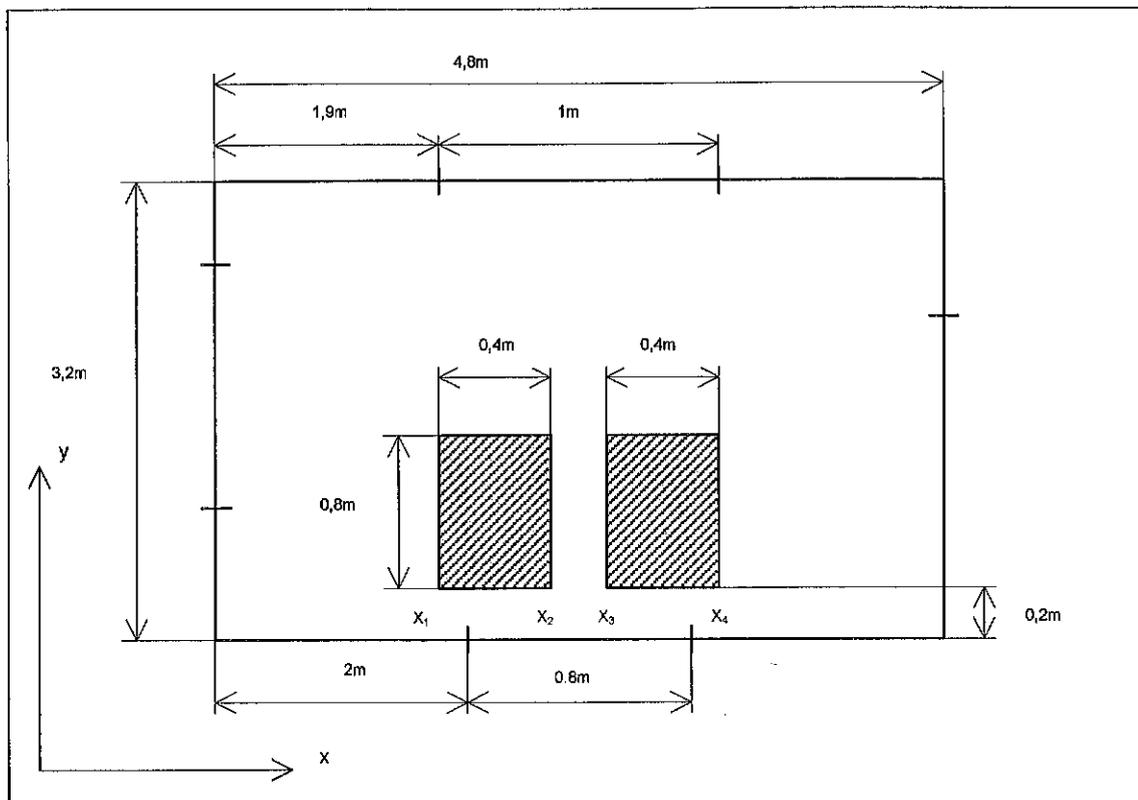


Bild 2: 2-dimensionales Berechnungsgebiet

3.2.2. Berechnungsgitter

Für die Simulationsrechnung gilt es nun das Berechnungsgitter zu erstellen. Das bedeutet, dass das Gebiet in Volumenelemente zu unterteilen ist, deren Größe die Änderungen der physikalischen Größen wiedergeben können. In Bereichen mit zu erwartenden starken Änderungen müssen kleine Gitterelemente gewählt werden. Das ist im vorliegenden Fall insbesondere für den Spalt zwischen den Kartons sowie an Orten von Wärme- und Massstromquellen (Pool) erforderlich.

In unserem Berechnungsbeispiel liegt eine rechtwinklige und gleichmäßige Geometrie vor, für die ein strukturiertes Gitter, das im zweidimensionalen Fall aus Rechteckelementen gebildet wird, geeignet ist. Strukturierte Gitter sind für Finite Volumen Verfahren allgemein besser geeignet als unstrukturierte Gitter, u. a. dadurch, dass spezielle Lösungsverfahren zur Beschleunigung des Berechnungsablaufes einsetzbar sind.

Bild 3 zeigt das Berechnungsgitter für das 2-dimensionale Berechnungsgebiet. Die Bereiche der Gitterverfeinerung zwischen den Kartons und zwischen Poolquelle und Kartonboden sind deutlich erkennbar.

Das Gebiet wurde in x-Richtung in 290 und in y-Richtung (Höhe) in 170 Elemente unterteilt. Damit ist eine Vernetzung in 47200 Volumenelemente vorhanden. Die mittlere Gitternetzweite beträgt 15-20mm, wobei im Spalt zwischen den Kartons bei ca. 20 Volumenelementen eine Längenabmessung von 10mm vorliegt.

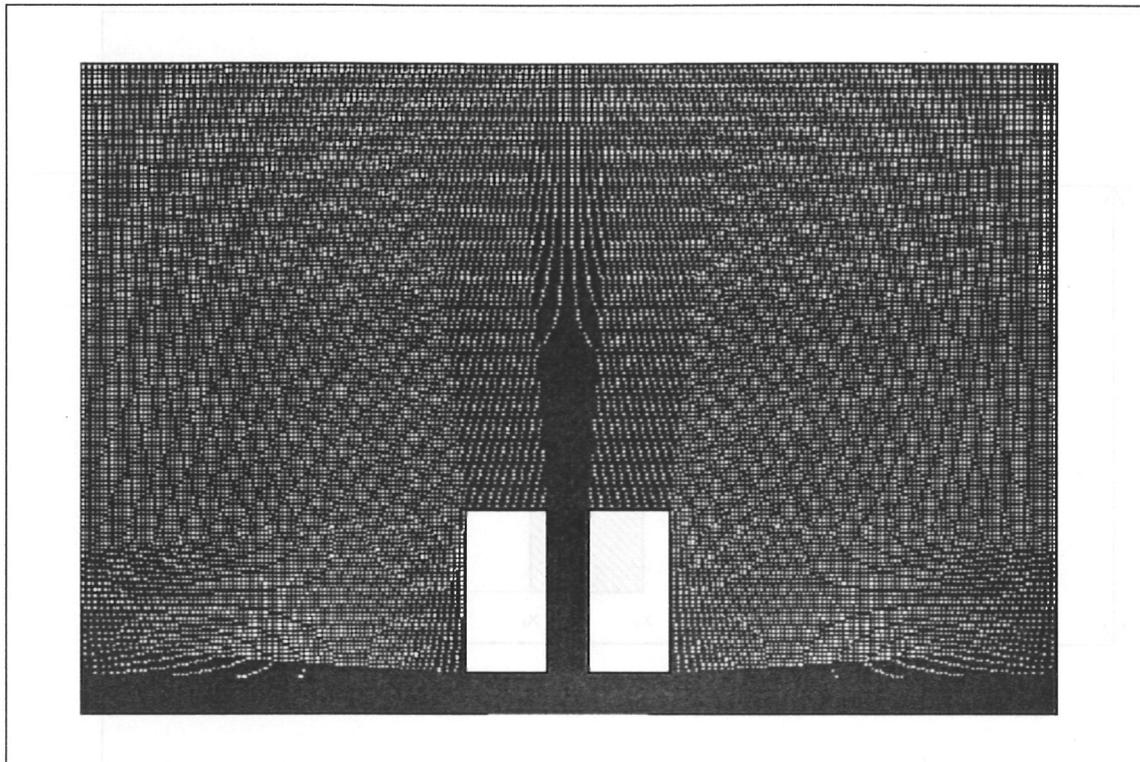


Bild 3: Strukturiertes 2-dimensionales Berechnungsgitter mit Quader- und Hexaeder-Elementen (47200 Volumenelemente)

3.2.3. Rand- und Anfangsbedingungen, Stoffwerte

Das spezielle Szenario für den zu modellierenden Vorgang wird durch die Definition der Randbedingungen angegeben. Für jede der zu berechnenden physikalischen Größen, das sind die Geschwindigkeiten, die Temperatur sowie die turbulente kinetische Energie und die Dissipation, sind Werte an den Rändern oder Werte zu den Änderungen der physikalischen Größen an diesen Rändern gefordert. Dazu gehören Angaben zu Wärme- und Massestromdichten.

Liegen Meßwerte zu den geforderten physikalischen Größen nicht vor, müssen empirische Werte bzw. theoretische Untersuchungen genutzt werden, um für den zu modellierenden Vorgang sinnvolle Randbedingungen zu wählen. Bei instationären Berechnungen sind diese Randbedingungen zu jedem Zeitschritt vorzugeben.

Anfangsbedingungen sind dagegen nur zu Beginn der Berechnung für jede physikalische Größe anzugeben. Sie beschreiben den Anfangswert der Variablen in jeder Zelle des Berechnungsgebietes.

Neben den Anfangs- und Randbedingungen sind Stoffgesetze und konkrete Stoffwerte zu definieren.

Das Brandgas wird als ideales Gas definiert mit den Stoffwerten von Luft, für das Karton-Material werden die Stoffwerte von Holz gesetzt. Für die Umfassungswände gelten entsprechend der vorhandenen Raumauskleidung mit Schamotte-Ziegel diese Materialkennwerte. Aus Tabelle 1 sind die gesetzten Stoffwerte ersichtlich.

Tabelle1: Verwendete Stoffwerte für Fluid und Feststoff

Stoff	Dichte ρ in kg/m ³	Spezifische Wärmekapazität c_p in kg/m ³	Thermische Leitfähigkeit λ in W/mK	Viskosität ν in kg/ms
Luft	1,189	1006,43	0,0242	$1,7894 \cdot 10^{-05}$
Schamotte	1800	880	0,835	-
Holz	700	2310	0,173	-

Als konkrete Randbedingungen werden gesetzt:

- ◆ Umfassungswände als adiabate Wand mit $T=300K$

Geschwindigkeiten an der Wand $u_1=0, u_2=0,$

Turbulente kinetische Energie k mit $\frac{\partial k}{\partial n} = 0$, Dissipation ε aus k

$$\text{nach } \varepsilon = \frac{C_{\mu}^{3/4} k_P^{3/4}}{k y_P} \quad (9).$$

(der Index P steht für die der Wandzelle benachbarte Zelle)

- ◆ Ein- und Ausströmöffnungen als sogenannte Pressure-Outlets, bei denen durch Vorgabe einer Druckdifferenz von Null zwischen Innen- und Außendruck ein Zu- oder Abströmen gewährleistet ist, entsprechend der berechneten Druckverhältnisse.

Geschwindigkeiten mit $\frac{\partial u_1}{\partial n} = 0$ und $\frac{\partial u_2}{\partial n} = 0$

Für die Werte von k und ε wird eine Turbulenzintensität von 10% vorgegeben bei einer charakteristischen Länge von 0,1m (0,1*Höhe der Ausströmöffnung). Die Wahl von Turbulenzintensität und charakteristischer Länge ist eine mögliche Vorgehensweise [Fluent 98], wenn keine konkreten Meßwerte vorliegen.

- ◆ Kartonwände als adiabate Wand wie die Umfassungswände mit $T=300K$

Geschwindigkeiten an der Wand $u_1=0, u_2=0,$

Turbulente kinetische Energie k mit $\frac{\partial k}{\partial n} = 0$, Dissipation ε aus k nach Gl. (9)

- ◆ Einströmränder für die Heißgasfreisetzung:

Es werden Parameterrechnungen für verschiedene Randbedingungen für die Geschwindigkeit und Temperatur an den Einströmrändern durchgeführt. Hier wird als Beispiel die Randbedingung für den Pool für Parameterrechnung A3 (vgl. S.12) genannt.

Pool als Mass-Flow-Inlet in Fluent:

- Vorgabe eines Massestromes von $\dot{m}=0,01$ kg/s, aus dem programmintern die Geschwindigkeiten u_1 und u_2 ermittelt werden unter Nutzung der als RBD angegeben Temperatur $T=1500K$, der Stoffwerte von Luft und Anwendung des idealen Gasgesetzes.
- k und ε durch Definition eines Turbulenzgrades von 10% und einer charakteristischen Länge von 0,1m.

Für die Anfangsbedingungen werden folgende Werte gesetzt:

- Geschwindigkeit $u_1=0$, $u_2=0$,
- Temperatur $T=300K$,
- Turbulente kinetische Energie $k=1$ und Dissipation $\varepsilon=1$ als Standard-Anfangswerte bei Verwendung des k - ε -Turbulenzmodells.

Zu modellieren ist der Vorgang der Erwärmung des Gases im Spalt durch einen Pool, der Entwicklung der Strömung im Spalt nach Zündung durch den Brennstoffpool mit der Heißgasfreisetzung aus den infolge Erwärmung aufbereiteten Brandstoffflächen.

Die zeitliche Abfolge der verschiedenen Vorgänge wird durch die Definition der Randbedingungen an den Brandgasfreisetzungsf lächen angegeben.

1. Vorgang der Erwärmung infolge Benzinpool:

Zur Berechnung Erwärmung infolge Benzinpools wird als Randbedingung eine konstante Wärme- und Massestromdichte für das entstehende und senkrecht zur Oberfläche freigesetzte Rauchgas aus dem Poolbrand angegeben.

2. Vorgang der Heißgasfreisetzung an Brandstoffflächen (nach Zündung):

Entsprechend der ermittelten Temperatur- und Strömungsfelder wird der Prozeß der Heißgasfreisetzung aus dem Karton-Brennstoff zugeschaltet, indem abschnittsweise ein Masse- und Wärmestrom als Randbedingung für die freisetzende Fläche definiert wird. Diese Heißgasfreisetzung hat nicht die Größe und Temperatur des Pyrolysegas-massestromes, sondern des infolge der Verbrennung des Pyrolysegases entstehenden Rauchgasmassestromes, der senkrecht aus der Oberfläche austritt und für den dann als Randbedingung ebenfalls eine Wärme- und Massestromdichte angegeben werden kann.

In den nachfolgenden Parameterrechnungen wird für verschiedene Poolstärken (Variation von Temperatur des freigesetzten Massestromes aus dem Pool) das resultierende Strömungs- und Temperaturfeld ermittelt.

Insbesondere die Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung im Spalt, auch als Kanal bezeichnet, soll für die Parameterrechnungen verglichen werden. Für die Auswertung werden Temperatur- und Geschwindigkeitsprofile in verschiedenen Raumhöhen benutzt.

Das nachfolgende Bild 4 zeigt eine grafische Darstellung dieser Höhenlinien im Berechnungsgebiet.

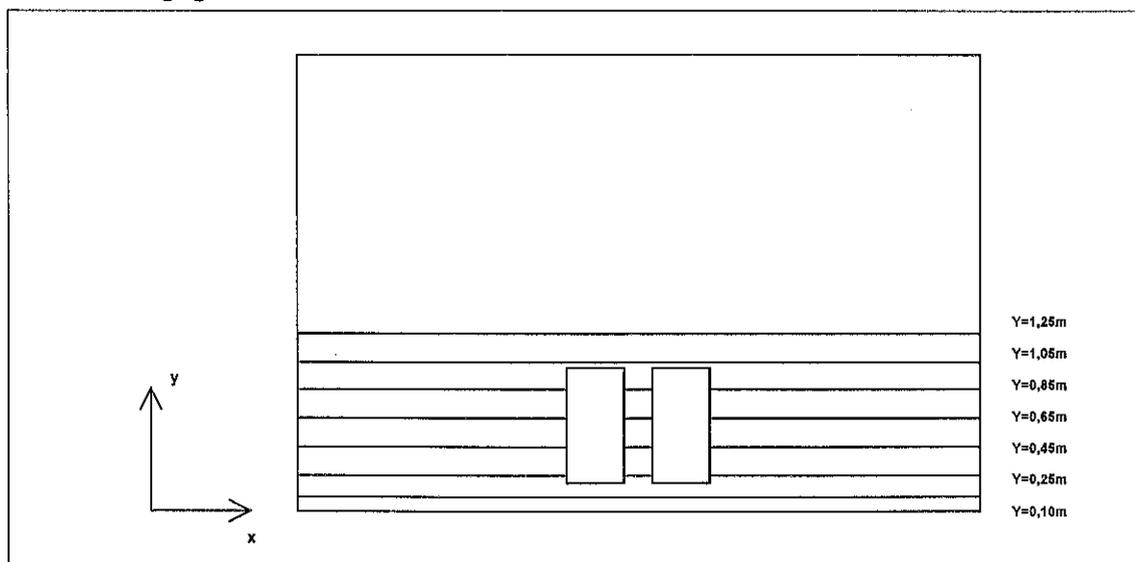


Bild 4: Höhenlinien im 2-dimensionalen Modellraum, für die Linienplots der berechneten Variablen dargestellt werden sollen

3.3. Parameterrechnungen

3.3.1. Erwärmung im Spalt infolge Poolbrandquelle

3.3.1.1. Geometrie und Berechnungsgitter

Es wird das in Bild 3 dargestellte Berechnungsgitter mit 47200 Volumenelementen verwendet. Es ist ein strukturiertes Gitter mit Hexaederelementen.

3.3.1.2. Rand- und Anfangsbedingungen

Parameterrechnungen für unterschiedliche Wärmestromdichten des Pools

Es wurden Simulationsrechnungen für 3 verschiedene Freisetzungstemperaturen bei konstant gehaltenem Massestrom an Heißgas aus dem Brennstoffpool durchgeführt.

Randbedingung Massestrom

Die Wahl der Größe des Massestromes ist bei den Parameterrechnungen nicht direkt aus dem Experiment abgeleitet. Unter Nutzung von empirischen Daten zu Abbrandgeschwindigkeiten brennbarer Stoffe und Brandgasvolumenströmen [Baschkirzew 1974] lässt sich für einen Benzin-Poolbrand im Vollbrandstadium ein Massestrom von ca. 0,1 kg/s für die Abmessung des modellierten Pools ermitteln. Im Hinblick auf die zu modellierende Entwicklungsphase der Heißgasströmung wird als Randbedingung 1/10 dieses Massestromes gesetzt.

Randbedingung Temperatur

Einfluss auf die Brandgastemperaturen bei Poolbränden haben neben dem Brennstoff u.a. die Poolabmessungen und Verbrennungsbedingungen.

Flammentemperaturen von Poolbränden über 0,3m Durchmesser werden z. B. für den Brennstoff Kerosin mit 990°C angegeben, allgemein für Alkohole 1200°C [Rashbash 1956]. Für „Smoke“ aus natürlichen Bränden werden Temperaturen bis 1100K als gute Approximation genannt [Drysdale 1992].

Bei den Berechnungen ist eine sofortige Wahl großer Werte in den Randbedingungen mit Problemen bei der numerischen Lösung verbunden. Es hat sich eine Lösungsstrategie bewährt, bei der eine schrittweise Erhöhung der Randbedingungswerte von relativ geringen Temperaturen (800K) auf höhere Temperaturwerte erfolgt.

Die Randbedingung für die Massestromtemperatur für die Parameterrechnungen sind innerhalb des Temperaturbereiches von 800K und 1500K gewählt worden.

Randbedingungen für den Pool für die Parameterrechnungen A2, A3, A4:

A2 - Massestrom $\dot{m} = 0,01 \text{ kg/s}$ und Temperatur $T=1000\text{K}$

A3 - Massestrom $\dot{m} = 0,01 \text{ kg/s}$ und Temperatur $T=1500\text{K}$

A4 - Massestrom $\dot{m} = 0,01 \text{ kg/s}$ und Temperatur $T=800\text{K}$

Die Definition der Randbedingungen an den übrigen Rändern und der Anfangsbedingungen erfolgt wie in Abschnitt 3.2.3. beschrieben. Die Brennstoffkartons sind als Hindernisse im Modellgebiet enthalten, so dass deren Umrandung Wände mit den angegebenen Randbedingungen sind.

Für die turbulenten Größen in Wandnähe wird eine Wandfunktion mit linearem Verlauf in direkter Wandnähe und logarithmischem Verlauf im turbulenten Bereich gewählt (vgl. Abschnitt 3.1.1.). Dies ist die Standardoption zur Veknüpung des Randwertes mit dem berechneten Wert der turbulenten Strömung.

3.3.1.3. Berechnungsergebnisse

Die Ergebnisse der instationären Berechnung mit einer Zeitschrittweite von $\Delta t=0,1s$ über einen Zeitraum von 10s sind in Bild 5 und 6 anhand der Isoflächendarstellung des Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldes für die Parameterrechnung A2 dargestellt.

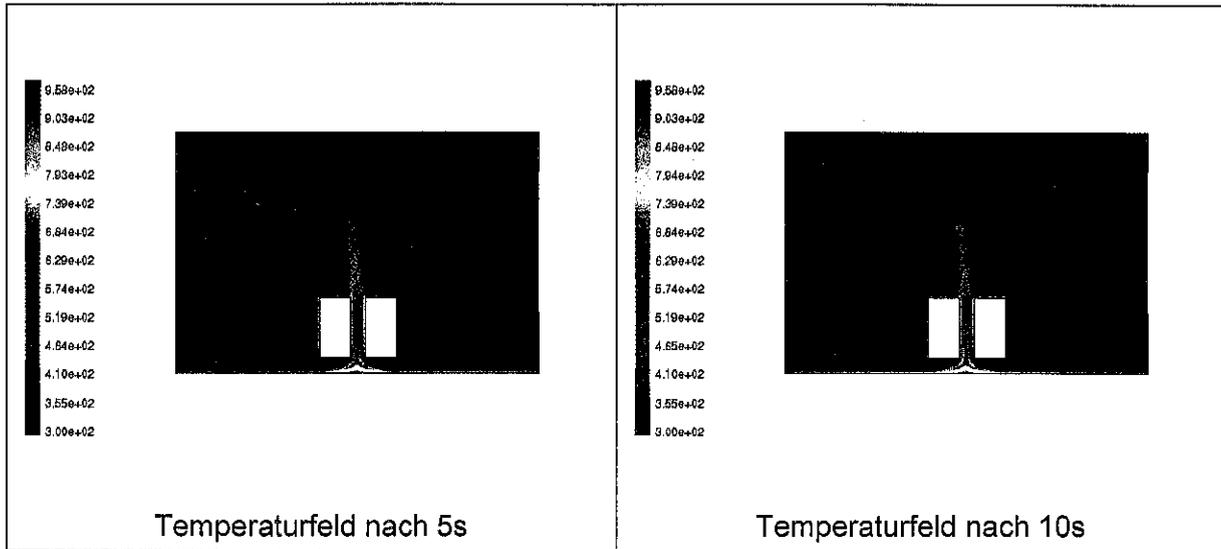


Bild 5: Grafische Darstellung des berechneten Temperaturfeldes nach 5s und nach 10s andauernder Heißgasfreisetzung aus dem Brennstoffpool (Berechnungsfall A2)

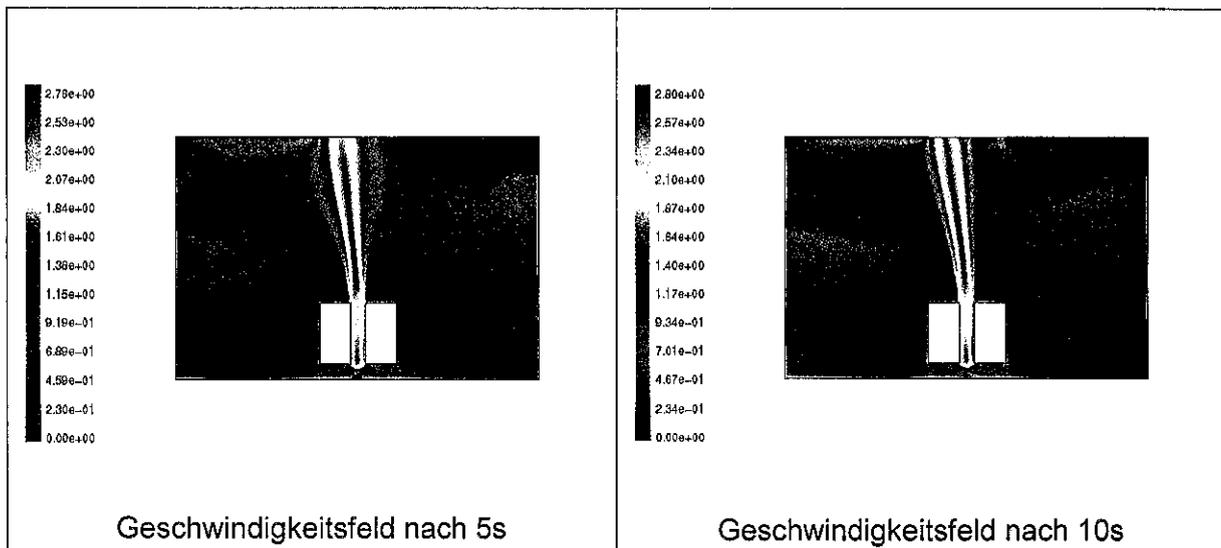


Bild 6: Grafische Darstellung des berechneten Geschwindigkeitsfeldes nach 5s und nach 10s andauernder Heißgasfreisetzung aus dem Brennstoffpool (Berechnungsfall A2)

Solche Isoflächenplots zeigen anschaulich die Verteilung einer physikalischen Größe im vorliegenden Modellraum. Eine quantitative Beurteilung anhand der Isolinen- und Isoflächendarstellungen ist nur begrenzt möglich. So ist z. B. aus der Darstellung in Bild 5 der Maximalwert der Temperaturen erkennbar, jedoch nicht die Größe und Verteilung der Temperaturen im Spalt zwischen den Kartons, gleiches gilt für das in Bild 6 dargestellte Geschwindigkeitsfeld.

Für konkrete Vergleiche von berechneten Größen an ausgewählten Stellen im Gebiet, wie z. B. im Spalt zwischen den Hindernissen, sind Diagramme besser geeignet.

Der Vergleich der Ergebnisse der Parameterrechnungen soll anhand von Linienplots der Temperatur und Geschwindigkeit als Funktion einer Ortskoordinate vorgenommen werden.

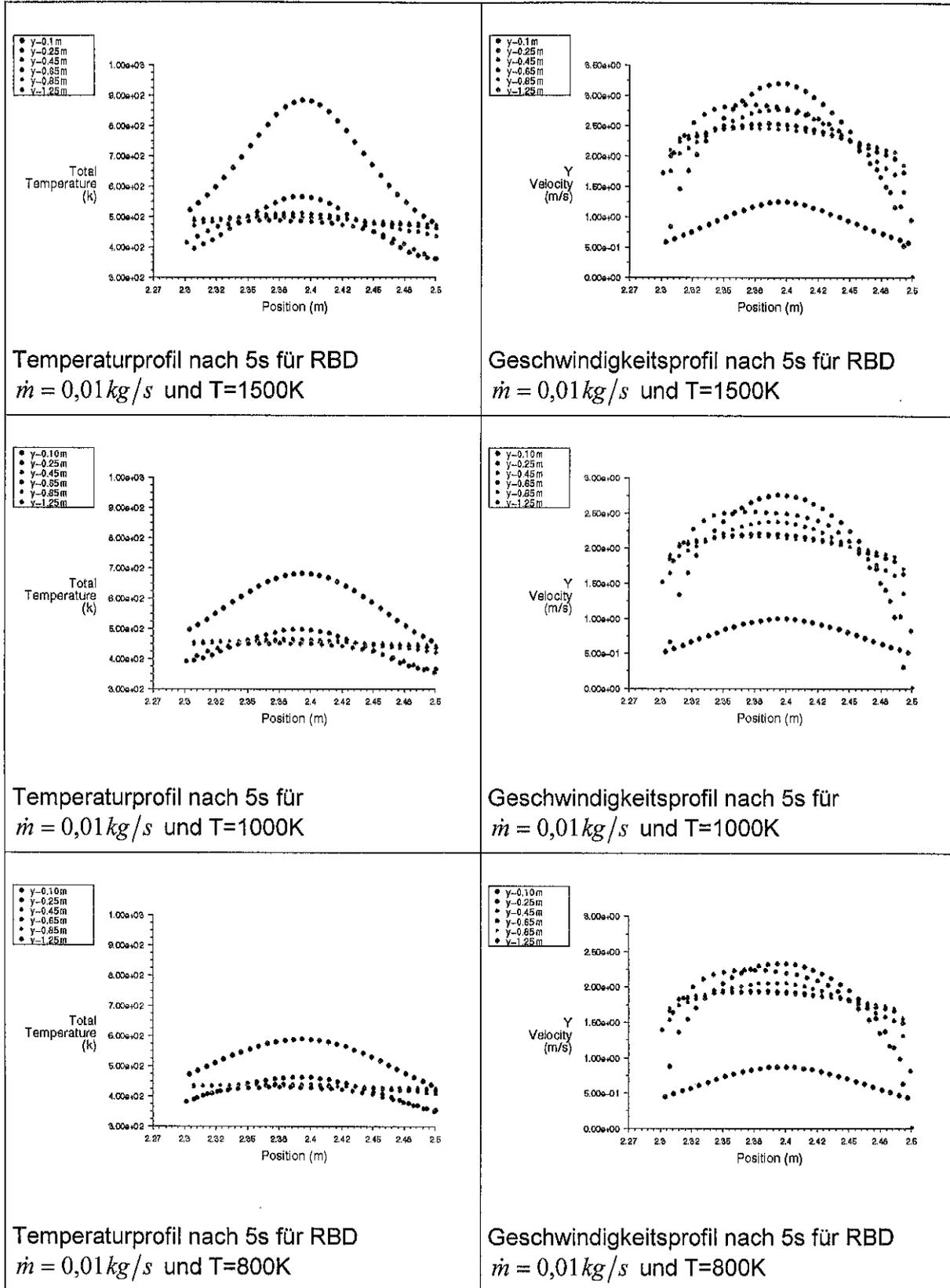


Bild 7: Temperaturprofile und Geschwindigkeitsprofile im Spalt nach 5s infolge Masse- und Wärmestromquelle für verschiedene Höhen (ohne Berücksichtigung des Wärmeüberganges in den Feststoff)

Trägt man die entlang einer Y-Gitterlinie (dargestellt in Bild 4) berechneten Temperaturen und Geschwindigkeiten über die X-Koordinate auf, erhält man aussagekräftige Temperatur- und Geschwindigkeitsprofile. Wird die X-Koordinate auf den Bereich des Spaltes begrenzt, der für die vorliegende Versuchsanordnung bei $x_2=2,3\text{m}$ und $x_3=2,5\text{m}$ (siehe Bild 2) liegt, ergeben sich Geschwindigkeits- und Temperaturprofile im Spalt.

Im Bild 7 sind die ermittelten Profile nach 5s der Heißgasausbreitung aus dem Pool für verschiedene Höhen (Y-Koordinaten: 0,1m, 0,25m, 0,45m, 0,65m, 0,85m u. 1,25m) für die Parameterrechnungen gegenübergestellt.

Für die Beurteilung der Geschwindigkeit im Spalt wird die vertikale Geschwindigkeitskomponente u_2 verwendet.

Die Geschwindigkeitsprofile zeigen einen deutlichen Anstieg der Geschwindigkeit im Spalt und gegenüber der durch die Randbedingung vorgegebenen Gasgeschwindigkeiten.

Vergleicht man die in verschiedenen Höhen ermittelten Temperaturprofile eines Berechnungsfalles, so erkennt man in der Höhe von 0,1m, d. h. noch unterhalb der Kartons, ein parabelförmiges Profil mit ausgeprägtem Spitzenwert der Temperatur in Spaltmitte. Mit zunehmender Höhe und Eintritt der Strömung in den Spalt flachen diese Profile ab.

In der Höhe $Y=0,25\text{m}$, dicht nach Eintritt der Strömung in den Spalt zeigt sich noch ein Parabelprofil für die Temperaturverteilung über die Spaltbreite, in größerer Höhe ist dann eine konstante Verteilung vorhanden mit einem niedrigeren Wert im Vergleich zum Maximalwert der Parabelkurve.

Die Maximalen Temperaturen im Spalt erreichen auch bei Vorliegen der Gastemperatur von $T=1500\text{K}$ aus dem Pool (Berechnungsfall A3) nur einen Wert von $T=580\text{K}$ in der Höhe des Spalteintrittes. Die in den darüberliegenden Höhen berechneten Spalttemperaturen erreichen Werte von $T=500\text{K}$.

Die ermittelten Temperaturen im Spalt liegen nicht im Bereich der Zündtemperaturen von Holz- und Zelluloseprodukten. Drysdale gibt z. B. einen allgemeinen Wert für die kritische Oberflächentemperatur einer vertikalen Holzprobe von $T=350^\circ\text{C}$ an, bei der die Pilot-Zündung stattfindet, für Materialien wie PMMA oder Papier liegt diese Temperatur mit 270°C noch darunter. Die Zündung der Pyrolysegase findet in den Versuchsanordnungen durch die Flamme des Poolbrandes statt.

Die Temperaturprofile zeigen, dass örtlich Temperaturen erzielt werden können, die im Bereich der Pyrolyse- und Zündtemperaturen liegen. Bereits eine dort stattfindende Pyrolyse, denkbar z. B. an den Bodenflächen der Kartons, kann dann zur Beschleunigung der Heißgasentstehung und -ausbreitung führen.

Ein solches Szenario sei als Beispiel betrachtet und die berechnete Temperaturverteilung im Bild 8 grafisch dargestellt.

Die Randbedingungen für die Kartonwände werden geändert, indem sie als Brandgasquelle ähnlich wie die Poolquelle definiert werden und Werte für den Massestrom, die Temperatur des Gases und die Turbulenzgrößen k und ϵ , wie für den Einströmrand in Abschnitt 3.2.3. beschrieben, vorgegeben werden.

Massestrom und Temperatur werden wie folgt definiert:

ab $t_2=5,0\text{s}$: Masse- und Wärmestrom aus der Bodenfläche mit $\dot{m} = 0,010\text{ kg/s}$ und $T=1500\text{K}$,
ab $t_3=7,5\text{s}$: Masse- und Wärmestrom aus den Innenflächen mit $\dot{m} = 0,005\text{ kg/s}$ und $T=1500\text{K}$.

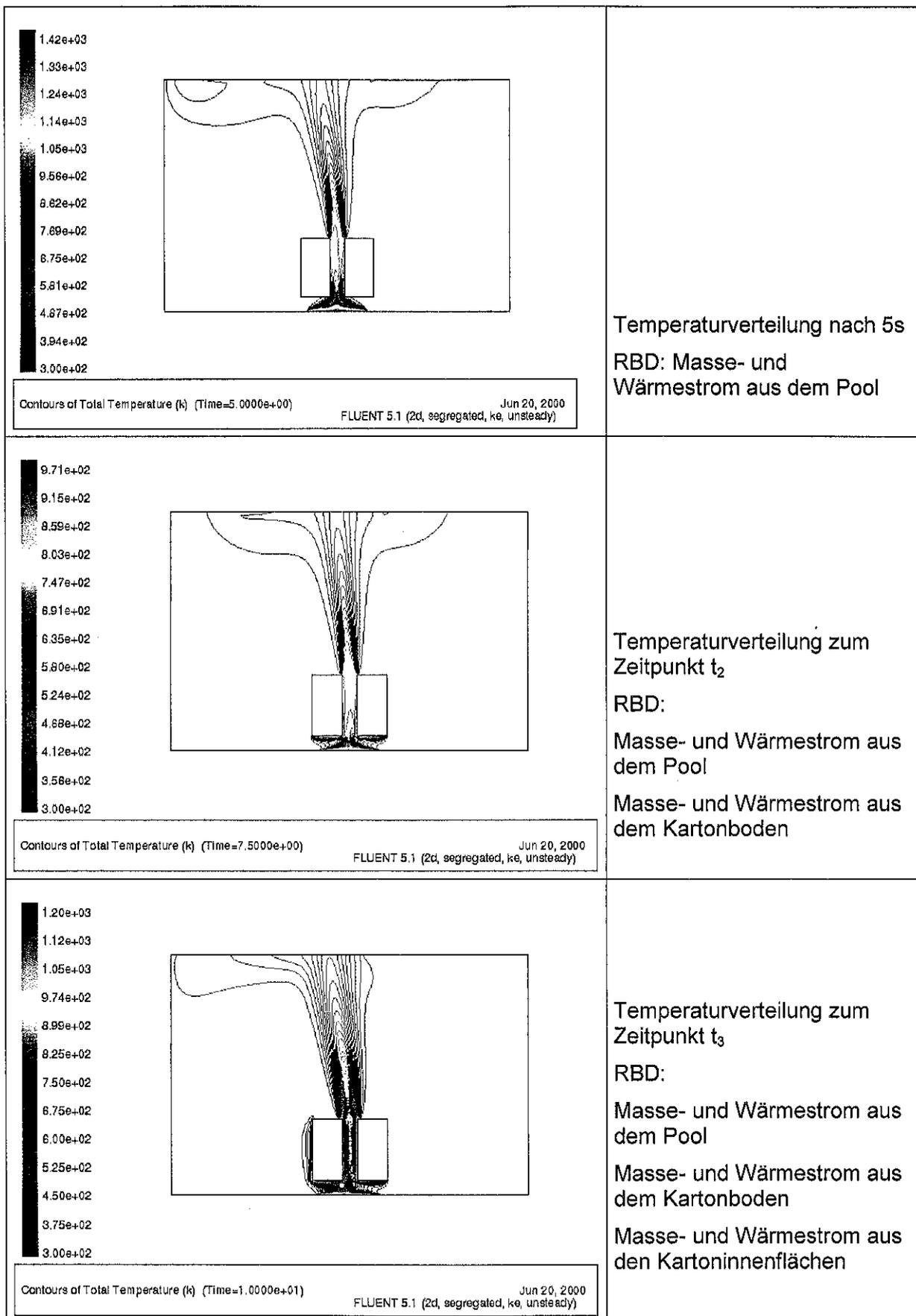


Bild 8: Szenario einer möglichen Brandgasfreisetzung

Überlegungen, die der Wahl des Brandszenario und damit der Wahl der Randbedingungen zugrunde liegen, sind:

- Brandgastemperaturen variieren entsprechend des Brandstoffes und des zur Verfügung stehenden Sauerstoffes. Hier wird als Beispiel eine Freisetzungstemperatur von $T=1500\text{K}$ gesetzt, die im Bereich der Temperaturen liegen, die für Kohlenwasserstoff-Flammen angegeben werden (vgl. 3.3.1.2.)
- Die Massefreisetzung aus der Bodenfläche des Feststoffs erfolgt zuerst, da unterhalb der Kartons die höchsten Temperaturen berechnet werden.
- Die Massefreisetzung aus den Innenflächen der Kartons beginnt infolge angenommener Temperaturerhöhung im Spalt auf Zündtemperatur nach 7,5s.
- Das Einsetzen einer Brandgasfreisetzung aus den Kartoninnenflächen nach 5s, da bereits nach 5s eine ausgeprägte Heißgasströmung im Spalt zwischen den Kartons vorhanden ist, die sich in den weiteren Berechnungsschritten lediglich geringfügig ändert. Profile flachen ab bei geringer Abnahme der Maximalwerte von Geschwindigkeit und Temperatur (vgl. Bild 7)

Schlußfolgerungen

Die zeitliche und größenmäßige Vorgabe von Brandgasfreisetzungsraten für bestimmte Ränder (Kartonflächen) sind noch sehr willkürlich.

Nachteil dieser Untersuchungen ist, dass die Kartons nur als Hindernis modelliert wurden. Dadurch bleibt ein Wärmeübergang in den Feststoff unberücksichtigt. Zur Berechnung der Materialtemperatur ist die Modellierung zu erweitern, indem die Kartons als Festkörper mit spezifischen Stoffeigenschaften ins Berechnungsgebiet einbezogen werden.

Aus den bisherigen Berechnungen können die folgenden Erkenntnisse abgeleitet werden:

- ◆ Die Beeinflussung des Ausbreitungsverhaltens durch eine aufgeprägte einseitige Strömung (siehe Bild 8) erschwert die Berechnung. Die Anordnung der Ein- und Ausströmöffnung wird geändert.
- ◆ Der Wärmeübergang in den Feststoff wird in die Berechnung einbezogen.
- ◆ Poolquelle als Masse- und Wärmestromquelle wird weiter verwendet

3.3.2. Brandgasausbreitung unter Berücksichtigung der Wärmeleitung im Karton

Unter Zugrundelegen der im Abschnitt 3.1.1.(Modellbildung) beschriebenen Gleichungen, der Randbedingungen für die Umfassungswände und den Benzinpool und den Anfangsbedingungen (siehe 3.2.3.) werden die Ausbreitung der Heißgasströmung im Kanal und die Erwärmung des angrenzenden Materials untersucht über einen Zeitraum von 20s.

Zur Betrachtung von Wärmeübergangsprozessen zwischen Fluid und Festkörpern werden zwei Bereiche innerhalb des Berechnungsgebietes unterschieden, die über Randbedingungen miteinander gekoppelt sind.

3.3.2.1. Geometrie und Berechnungsgitter

Die Abmessungen des Modellraumes werden beibehalten, nur die Anordnung der Öffnungen (symmetrisch) geändert. Das neu generierte strukturierte Gitter weist 38900 Volumenelemente auf, in die der Modellraum mit Fluid und Festkörper (Karton) unterteilt wird.

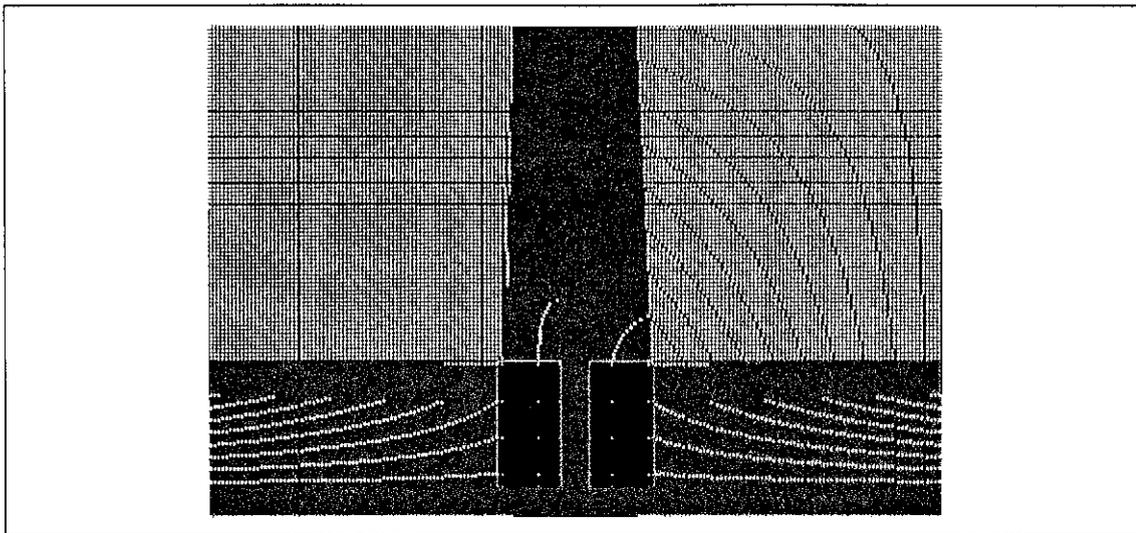


Bild 9: Berechnungsgitter für Fluid und Feststoff (42500 Volumenelemente)

In Bereichen mit zu erwartenden Änderungen der physikalischen Größen ist die feinere Detaillierung deutlich zu erkennen. Für den Bereich der Festkörper (Kartons) wurden jeweils 1800 Elemente (30x60) verwendet. Für den Abstand von 0,2m zwischen Pool und Kartonunterseite liegt eine Unterteilung in 20 Elemente vor, für den Spaltabstand von 0,2m in 34 Elemente. In der Darstellung des Berechnungsgebietes in Bild 9 ist die symmetrische Anordnung der beiden Einströmränder im Gegensatz zu der nichtsymmetrischen Anordnung der Ränder (z. B. in Bild 8) erkennbar.

3.3.2.2. Randbedingungen, Anfangsbedingungen

Die Randbedingungen für die Umfassungswände und die Ein- und Ausströmränder sind die in Abschnitt 3.2.3. beschrieben.

Bei der Definition der Randbedingungen für die Kartonwände wird die Modellannahme der adiabaten Wand fallengelassen.

An den Rändern zwischen Fluid und Festkörper werden dafür Übergangsbedingungen definiert. Die direkte Kopplung zwischen Fluid und Festkörper erfolgt nach der Übergangsbedingung

$$h_f(T_f - T_w) = -\lambda_s \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{wall} \quad (10)$$

mit h_f als Wärmeübergangskoeffizienten für das Fluid (Luft), der Temperatur des Fluides T_f , der Wandtemperatur T_w , der Wärmeleitfähigkeit des Körpers λ_s und mit n als Normalenrichtung für den Temperaturgradienten.

Randbedingungen für den Pool werden für k und ε wie in 3.2.3. gewählt, die Geschwindigkeiten durch Vorgabe des Massestromes von $\dot{m} = 0,01 \text{ kg/s}$ und für die Temperatur die des freigesetzten Heißgases. Es werden die Parameterrechnungen für verschiedene Freisetzungstemperaturen durchgeführt.

Anfangsbedingungen werden für den Bereich des Feststoffes und des Fluids benötigt.

Für das Fluid gelten ebenfalls die in Abschnitt 3.2.3. gemachten Angaben. Für den Feststoff wird eine Temperatur von $T=300\text{K}$ als Anfangstemperatur des Körpers definiert. Die Werte der Geschwindigkeiten sowie k und ε sind Null (Festkörper).

Die Stoffwerte für den Karton, für den stellvertretend als Material Holz verwendet wird, sind in Tabelle 1 genannt.

3.3.2.3. Berechnungsergebnisse

Für 3 verschiedene Randbedingungen für den Pool:

B1 - $\dot{m} = 0,01 \text{ kg/s}$ und $T=800\text{K}$

B2 - $\dot{m} = 0,01 \text{ kg/s}$ und $T=1000\text{K}$

B3 - $\dot{m} = 0,01 \text{ kg/s}$ und $T=1200\text{K}$

wurden instationäre Parameterrechnungen mit Zeitschrittweiten von $\Delta t=0,05\text{s}$ in den ersten 100 Zeitschritten und nachfolgend mit der Zeitschrittweite von $\Delta t=0,1\text{s}$ durchgeführt. Die Ergebnisse werden anhand der Geschwindigkeits- und Temperaturdiagramme ausgewertet.

Im Bild 10 des Anhanges sind diese Geschwindigkeits- und Temperaturprofile nach 20s dargestellt. Die Berechnungen sind eine Weiterführung der Berechnungen aus dem vorigen Abschnitt unter Berücksichtigung des Wärmeüberganges in den Festkörper und verdeutlichen die Heißgasentwicklung bei Aufrechterhaltung des Poolbrandes konstanter Größe über zunächst 20s.

In den Bildern 11 und 12 sind für die Parameterrechnungen B1, B2 und B3 die nach 5s, 10s, 15s und 20s ermittelten Spalttemperaturen dargestellt, für die Höhen $Y=0,25\text{m}$ und $Y=0,65\text{m}$. In der Höhe von $Y=0,25\text{m}$, direkt nach Eintritt in den Spalt ist das typische Eintrittsprofil mit hohen Maximalwerten und zum Rand abnehmenden Temperaturwerten vorhanden (Bild 11).

Mit weiterem Voranschreiten der Strömung in den Spalt ändern sich die Profile für Temperatur und Geschwindigkeit von einer parabelförmigen Verteilung zur konstanten Verteilung über die Spaltbreite (vgl. auch Bild 10 des Anhanges).

Eine zeitliche Änderung des in der Höhe von $Y=0,25\text{m}$ berechneten Temperaturprofils ist nicht zu registrieren. Das nach 5s vorhandene Temperaturprofil bleibt in den folgenden Zeitschritten erhalten.

In größerer Höhe, bei $Y=0,65\text{m}$, ist bereits eine nahezu konstante, aber geringere Temperatur über die Spaltbreite als in der Höhe von $Y=0,25\text{m}$ vorhanden (Bild 12).

Im Ergebnis der Parameterrechnungen B1 bis B3 werden maximale Temperaturen im Spalt im Bereich von 430K bis 480K ermittelt. Direkt nach Eintritt des Heißgasstromes in den Spalt liegen die Temperaturen etwas höher, im Bereich von 470K bis 530K.

Damit sind die Gastemperaturen im Spalt bedeutend geringer als die durch die Randbedingungen vorgegebenen Freisetzungstemperaturen. Ein Vergleich der Parameterrechnung B1 und B3 zeigt, dass eine um 400K höhere Freisetzungstemperatur am Pool, nur eine um ca. 30K höhere Gastemperatur im Spalt bewirkt.

Das deutet darauf hin, dass eine Zumischung von kaltem Gas zur Freisetzungssquelle stattfindet. Um das zu analysieren sind die Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen an der Freisetzungsstelle in den Bildern 13 und 14 als Isoflächenplot für die Temperatur und als Vektordarstellung für die Geschwindigkeit, für den Berechnungsfall B3 (Freisetzungstemperatur $T=1200\text{K}$) vergrößert dargestellt.

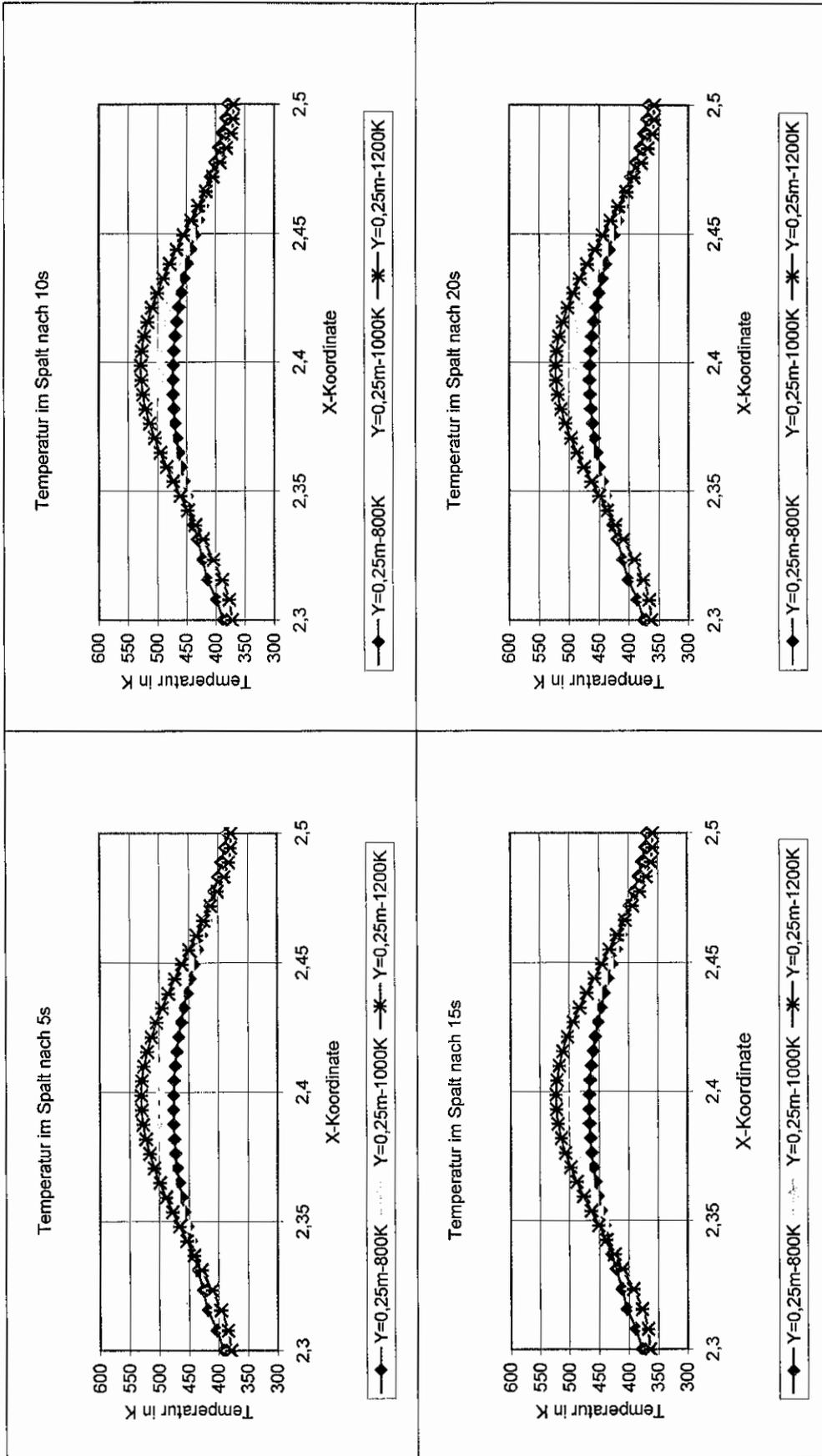


Bild 11: Temperaturprofile im Spalt bei Höhe Y=0,25m und Spaltbreite von 20cm

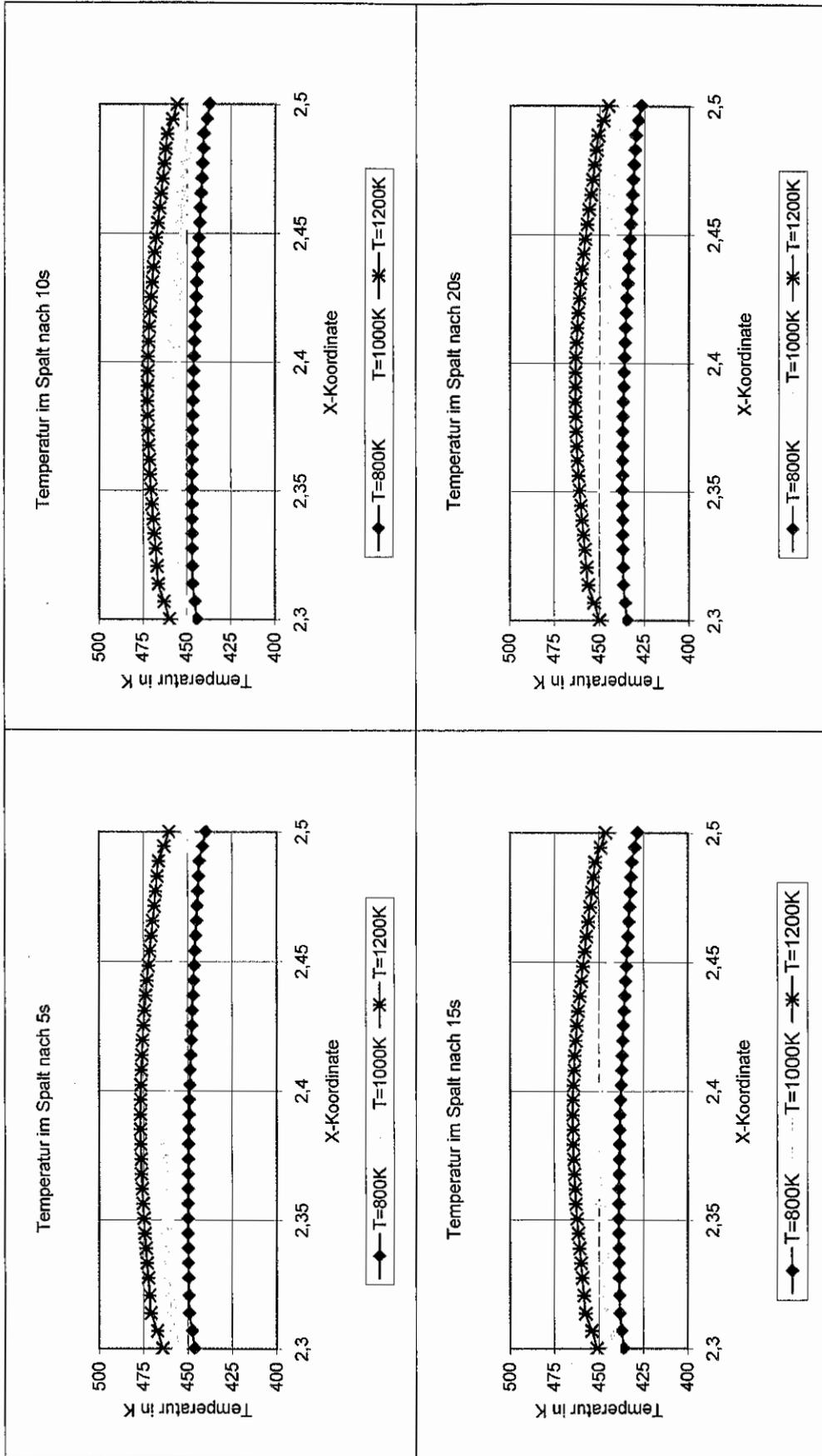


Bild 12: Temperaturprofile im Spalt bei Höhe $Y=0,65\text{m}$ und Spaltbreite von 20cm

Die Isoflächendarstellung der Temperatur für den Bereich der Freisetzungsquelle und Spalteinströmung nach 20s zeigt Bild 13. Das parabelförmige Temperaturprofil am Spalteintritt (vgl. Bild 11) ist auch im Isoflächenplot gut ablesbar. Infolge der höheren Temperatur am Spalteintritt ist eine Beschleunigung der Gasströmung an diesem Ort zu verzeichnen (Bild 14). Anhand der Geschwindigkeitsvektoren in Bild 14 lässt sich eine an den Kartonaußenflächen nach unten gerichtete Strömung erkennen, die auf eine Zumischung kalter Gase hinweist.

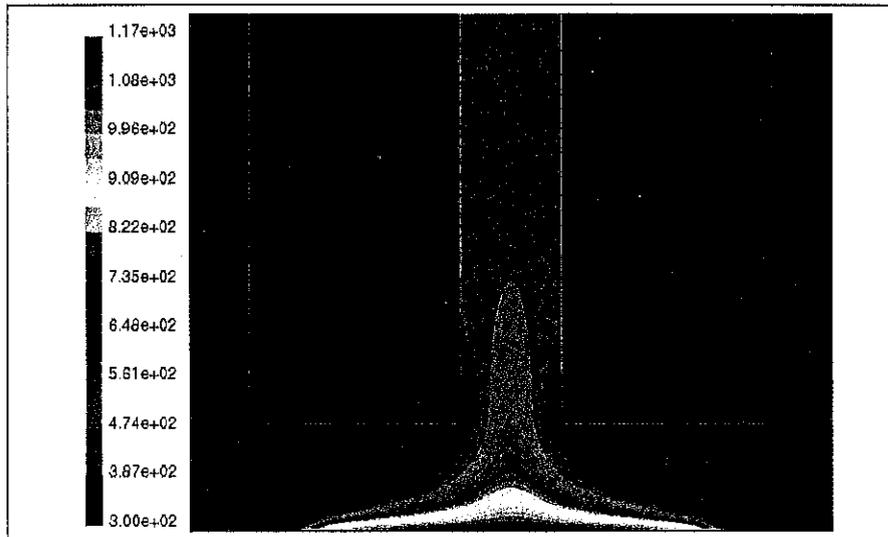


Bild 13: Temperaturverteilung im Bereich der Spalteinströmung nach 20s bei Spaltbreite von 20cm (Freisetzungstemperatur $T=1200\text{K}$)

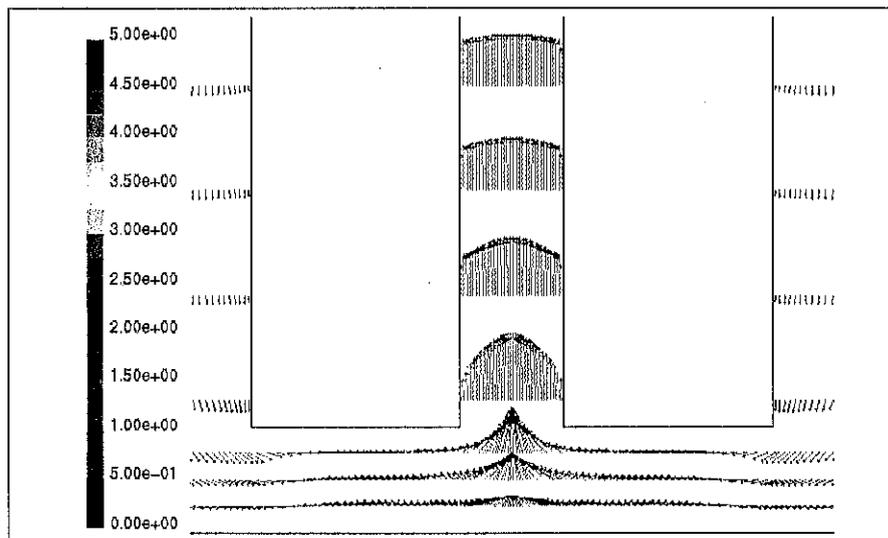


Bild 14: Geschwindigkeitsprofile in verschiedenen Höhen im Bereich der Spalteinströmung nach 20s (20cm Spaltbreite)

Die berechneten Verteilungen von Geschwindigkeit und Temperatur im Spalt unterscheiden sich nicht von denen, die ohne Berücksichtigung des Wärmeüberganges in den Festkörper ermittelt wurden.

Anhand des Isoflächenplots für die Temperatur ist keine Erwärmung des Kartonmaterials erkennbar. Die Analyse der Berechnungsergebnisse zeigt, dass der Wärmeübergang vom Fluid in den Feststoff berücksichtigt wird. Die Erwärmung des Feststoffes infolge der

Heißgasströmung erweist sich in den ersten 20s der Ausbreitung gegenüber der Fluidwärmerung vernachlässigbar klein ist. Bei konstant beibehaltenen Freisetzungsraten wird erst nach ca. 1min Dauer eine geringe Materialerwärmung registriert.

Eine Weiterführung der Berechnungen über eine Freisetzungsdauer bis zu 60 min mit beibehaltener konstanter Freisetzungsrates zeigt eine kontinuierliche Temperaturerhöhung im Feststoff.

Im Bild 15 sind zur Veranschaulichung die berechneten Materialtemperaturen in einer ausgewählten Höhe nach 70s, 170s, 320s und 10min dargestellt.

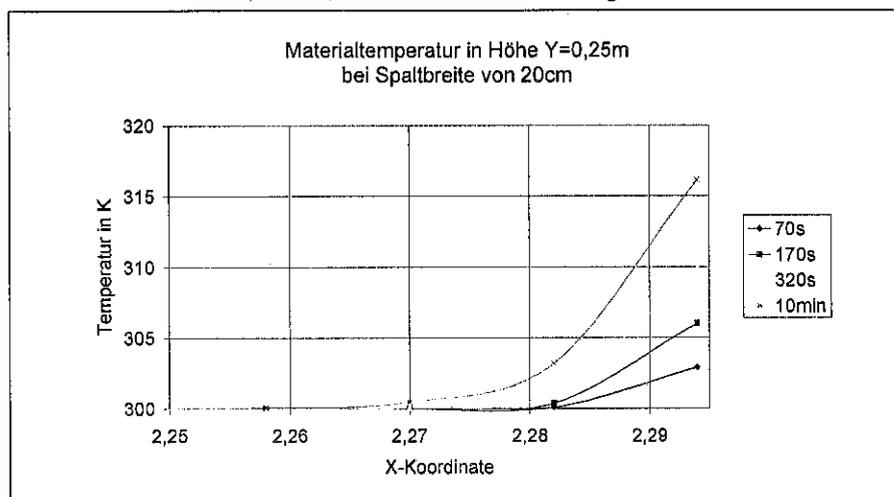


Bild 15: Temperatur im Material in Höhe Y=0,25m nach 70s, 170s, 320s und 10min bei Spaltbreite 20cm

Im Bild 16 des Anhanges sind für alle 4 Höhen die Materialtemperaturkurven im Zeitintervall von 0 bis 10min gezeigt. Bild 17 des Anhanges zeigt als Übersicht die Materialtemperaturen zu fortgeschrittenen Zeitpunkten, nach 30, 40, 50 und 60min konstanter Freisetzung. Mit Ausnahme des Einströmquerschnittes ist eine nahezu konstante Temperaturverteilung über die Kartonhöhe (Y-Koordinate) vorhanden. Im Ergebnis der Berechnung wird nach 60min eine Temperatur von 375K ermittelt. Dieser Wert ist der für den Zellmittelpunkt berechnete Temperaturwert in der äußeren Volumenelementzelle.

Die zugrundeliegenden instationären Rechnungen wurden bis zur Freisetzungsdauer von 70s mit einer Zeitschrittweite von $\Delta t=0,5s$ durchgeführt. Für die darauffolgenden Berechnungen wurde die Zeitschrittweite auf $\Delta t=5s$ erhöht.

Schlussfolgerungen

Die Gastemperatur im Spalt hat bereits nach 20s einen konstanten Wert erreicht.

Die bei der Spaltbreite von 20cm ermittelten Temperaturen sind zu gering, um eine schnelle Brandgasfreisetzung aus den Materialflächen in Gang zu setzen.

Während dieser Zeit ist der Wärmeübergang in das Material gegenüber den konvektiven Wärmeübergangsprozessen innerhalb des Gases unwesentlich. Erst bei Voraussetzung einer andauernden und konstanten Spaltströmung lässt sich eine Materialerwärmung registrieren. Temperaturen, die in den Bereich der Zündtemperaturen gelangen, werden nicht erreicht (vgl. Bild 17 des Anhanges).

3.3.3. Brandgasausbreitung unter Berücksichtigung der Wärmeleitung im Karton bei verringertem Spaltabstand

Für den bereits untersuchten Berechnungsfall B3 mit einer Poolquellstärke von $\dot{m} = 0,01 \text{ kg/s}$ und $T=1200\text{K}$ soll die Ermittlung der Brandgasausbreitung unter Berücksichtigung des Wärmeüberganges in den Feststoff bei verringerter Spaltbreite vorgenommen werden.

3.3.3.1. Berechnungsgeometrie, Gitter, Rand- und Anfangsbedingungen

Die Abmessungen des Berechnungsgebietes, Rand- und Anfangsbedingungen entsprechen denen aus dem vorigen Abschnitt. Aufgrund des verringerten Kartonabstandes in X-Richtung auf 10cm wird ein neues Gitter erzeugt.

Dieses Berechnungsgitter weist ebenfalls 42500 Hexaeder-Elemente für Fluid und Festkörper auf, wobei zur Detaillierung des Kartonabstandes in X-Richtung 20 Elemente gewählt werden. Die Volumenelementlänge in X-Richtung beträgt damit 5mm.

Bei der Wahl der Zeitschrittweite für die instationären Berechnungen wurde wie bei den vorangegangenen Rechnungen (Abschnitt 3.3.2.3.) verfahren, d. h. mit $\Delta t=0,05\text{s}$ begonnen und mit $\Delta t=0,1\text{s}$ nach ca. 5s weitergerechnet. Die Simulation wurde für eine 20s andauernde konstante Heißgasfreisetzung aus dem Pool durchgeführt.

3.3.3.2. Berechnungsergebnisse

Im Vergleich zu den Berechnungen mit der Spaltbreite von 20cm werden in der Anfangsphase bis 20s bei Verringerung der Breite auf 10cm deutlich höhere Gastemperaturen und Geschwindigkeiten im Spalt erzielt.

Eine anschauliche Darstellung der ermittelten Temperaturfelder ist durch die Isoflächendarstellung möglich. In Bild 18 ist die Temperaturverteilung nach 20s gezeigt. Die Geschwindigkeitsprofile in den verschiedenen Höhen (Bild 19) zeigen nach Spalteintritt eine gleichbleibende konstante Geschwindigkeit über den Spaltquerschnitt und die Spalthöhe.

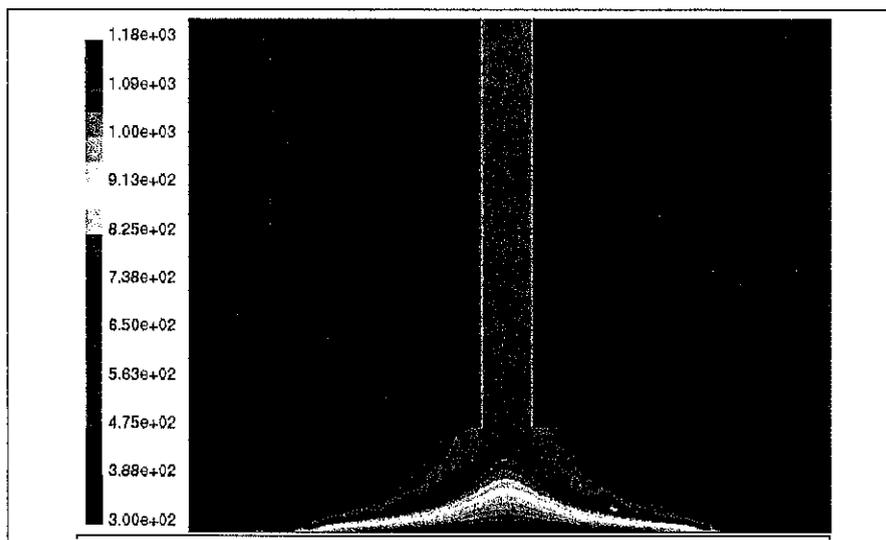


Bild 18: Temperaturverteilung im Bereich der Spalteinströmung nach 20s bei Spaltbreite von 10cm

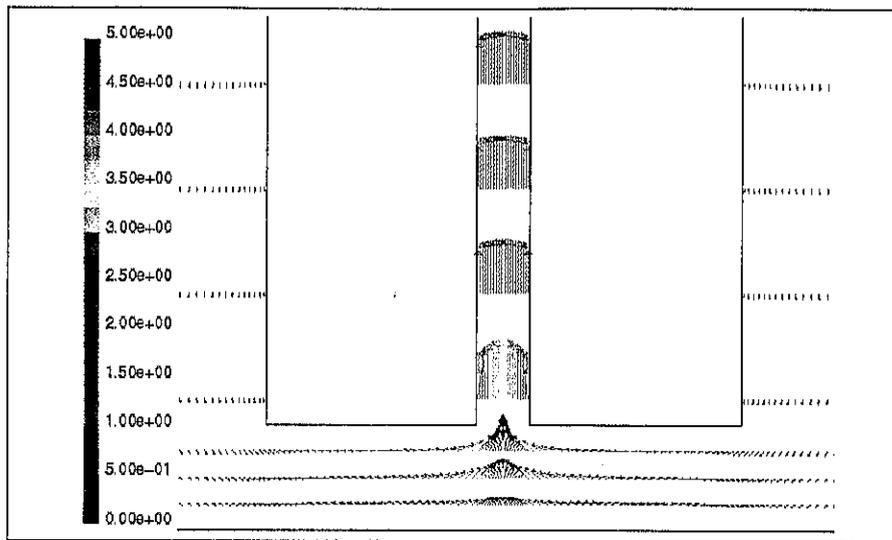


Bild 19: Geschwindigkeitsprofile in verschiedenen Höhen im Bereich der Spalteinstromung nach 20s (10cm Spaltbreite)

Materialtemperaturen

Auch bei verringertem Spaltabstand ist der Wärmeübergang in das Material gegenüber den konvektiven Prozessen in der Gasphase in dem betrachteten kurzen Zeitabschnitt von 20s vernachlässigbar. Unter Voraussetzung einer über die Dauer von 60min gleichbleibenden Heißgasströmung durch den Spalt der Breite von 10cm wurde die Erwärmung im Feststoff berechnet. Bild 20 zeigt die zeitliche Änderung der Materialtemperatur in der Höhe $Y=0,25\text{m}$ anhand der nach 70s, 170s, 320s und 10min ermittelten Temperaturwerte. Mit zunehmender Höhe (in Y-Richtung) sinken die Materialtemperaturen geringfügig. In Bild 21 des Anhanges sind als Diagrammübersicht die Temperaturkurven für die verschiedenen Höhen im Zeitintervall bis 10min dargestellt. Die Materialtemperaturen nach 30, 40, 50 und 60min bei der Spaltbreite von 10cm sind in Bild 22 des Anhanges dargestellt. Nach 60min werden hier maximale Materialtemperaturen von 475K ermittelt, d. h. wesentlich höhere Temperaturen als bei breiterem Spalt.

Aufgrund des geringen Kartonabstandes bei beibehaltener Größe des Pools werden auch die Kartonbodenflächen erwärmt. Aus diesem Grund sind auch in der unteren Ebene bei $Y=0,25$ ähnlich hohe Temperaturwerte wie in den darüberliegenden Höhen vorhanden (im Gegensatz zur Verteilung bei 20cm breitem Spalt, vgl. Bild 17 des Anhanges).

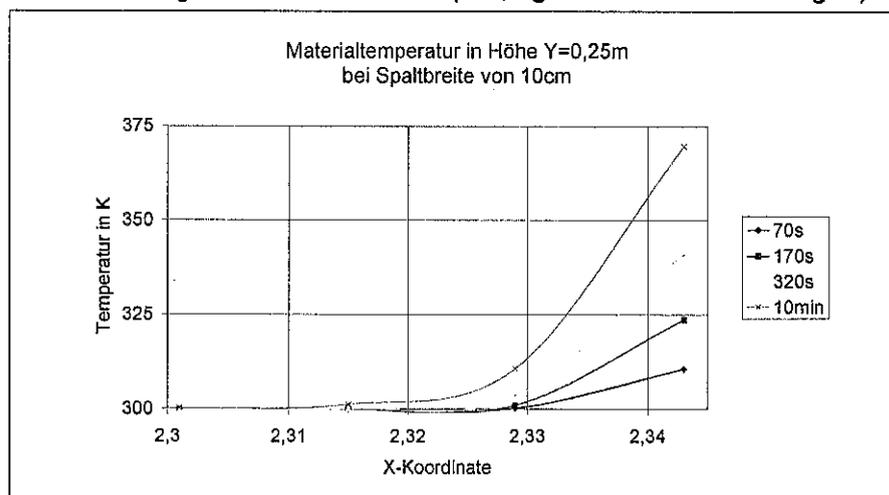


Bild 20: Temperatur im Material in Höhe $Y=0,25\text{m}$ nach 2.5min, 5min, 10min und 15min bei Spaltbreite 10cm

3.3.4. Gegenüberstellung

Als Zusammenfassung werden nachfolgend die für die unterschiedlichen Spaltbreiten vorgenommenen Berechnungen anhand der grafischen Darstellungen direkt gegenübergestellt.

Temperaturen und Geschwindigkeiten im Spalt

Die direkte Gegenüberstellung der Strömungsgeschwindigkeiten im Spalt in Bild 23 zeigt eine deutlich höhere Geschwindigkeit bei geringerer Spaltbreite an.

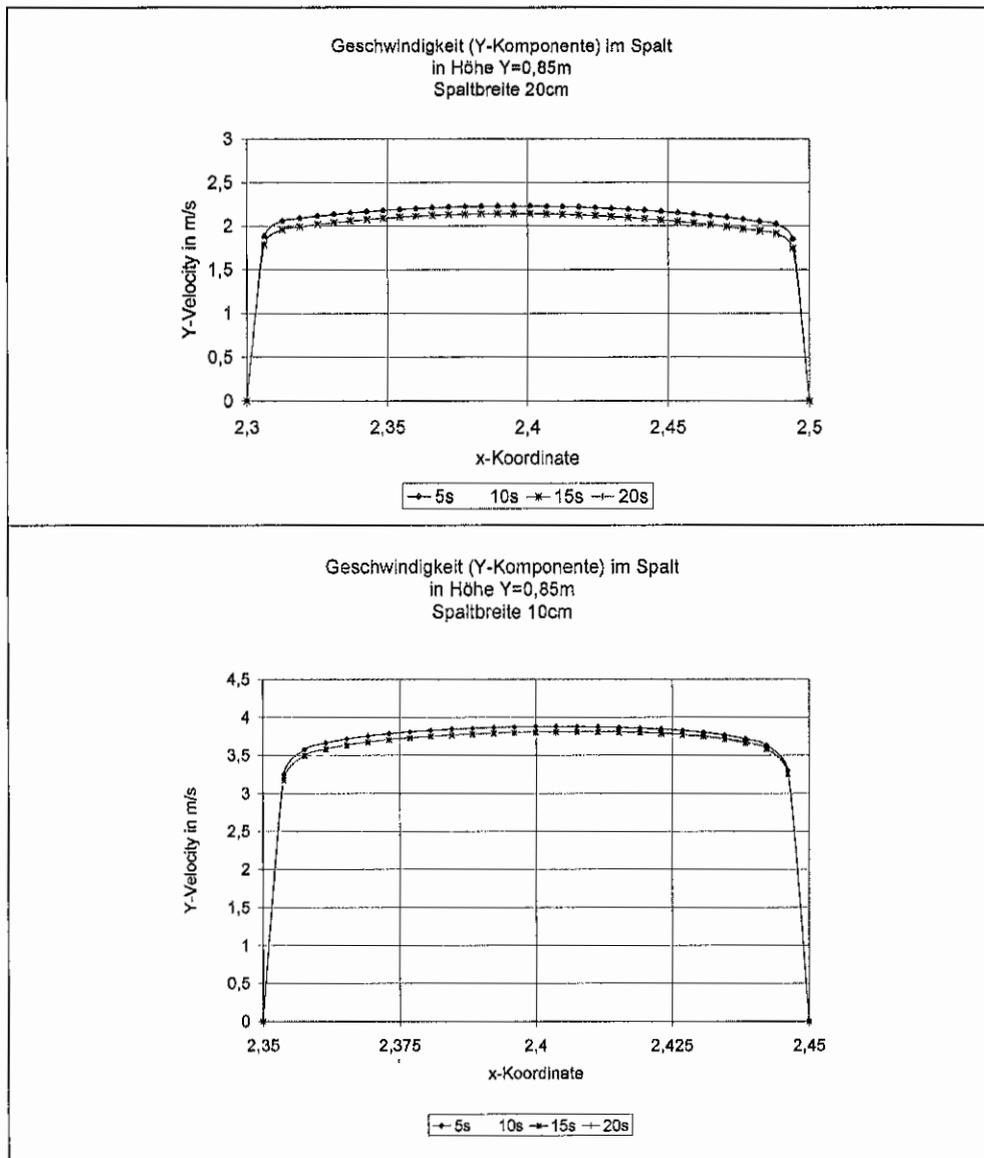


Bild 23: Gegenüberstellung der Geschwindigkeit im Spalt in Höhe $Y=0,85\text{m}$ für verschiedene Spaltbreiten

In Bild 24 werden die berechneten Temperaturverteilungen im Spalt infolge eines Gasmassstromes aus der Zündwanne mit der Temperatur von 1200K bei 10 und 20 cm Spaltabstand gegenübergestellt.

Aus dem Vergleich werden die weit höheren Temperaturen bei der geringeren Spaltbreite ersichtlich. Der Temperaturunterschied von 200K zeigt sich in jeder der betrachteten Höhen.

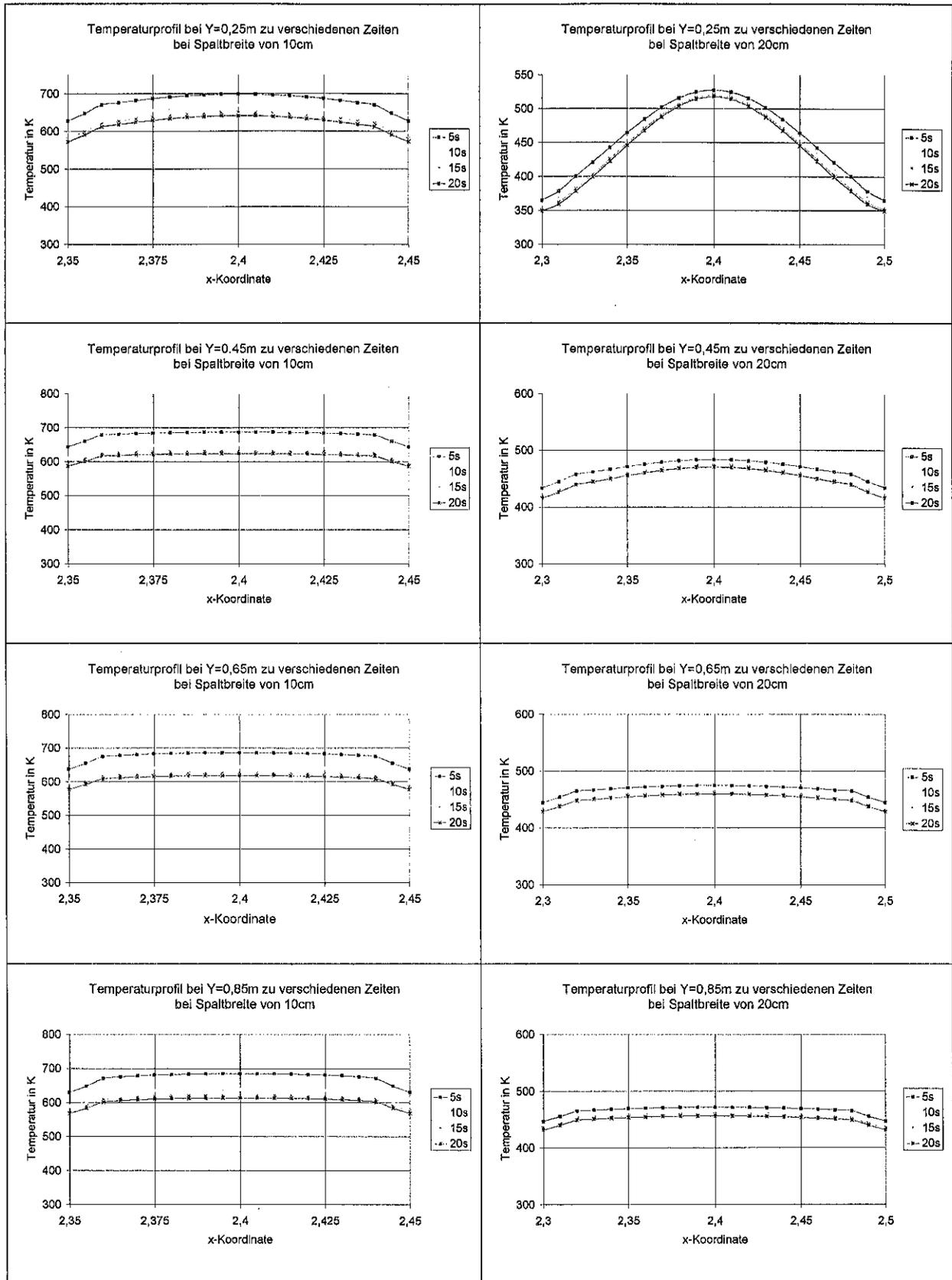


Bild 24: Gegenüberstellung der berechneten Temperaturen im Spalt bei 10 und 20cm Kartonabstand und gleicher Pool-Quellstärke

Materialtemperaturen

Die daraus resultierenden unterschiedlichen Materialtemperaturen sind für die verschiedenen Spaltbreiten für das Zeitintervall von 0-10min im Bild 25 gegenübergestellt.

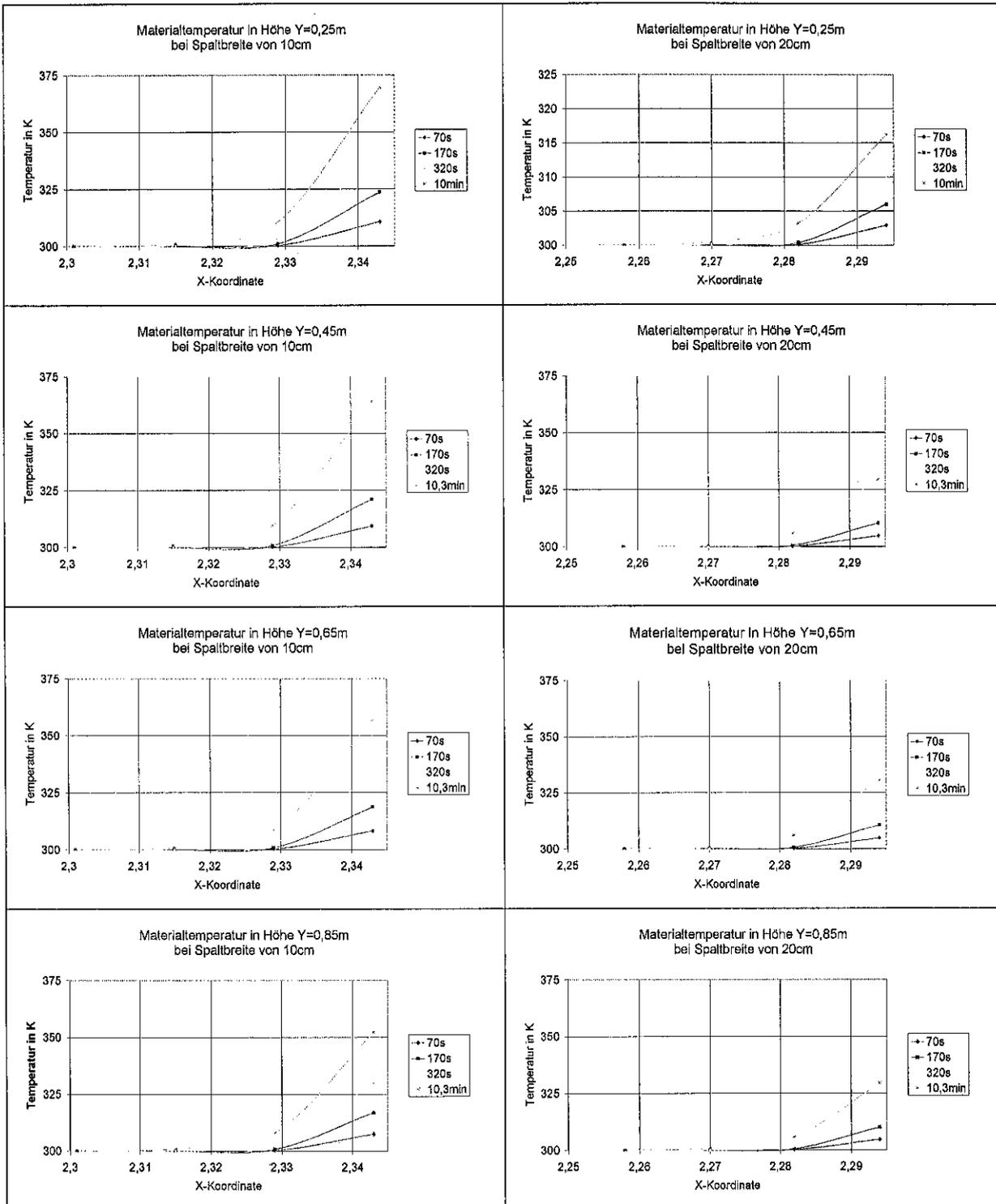


Bild 25: Gegenüberstellung der Materialerwärmung in den verschiedenen Höhen bei gleicher Poolquellstärke und verschiedenem Spaltabstand

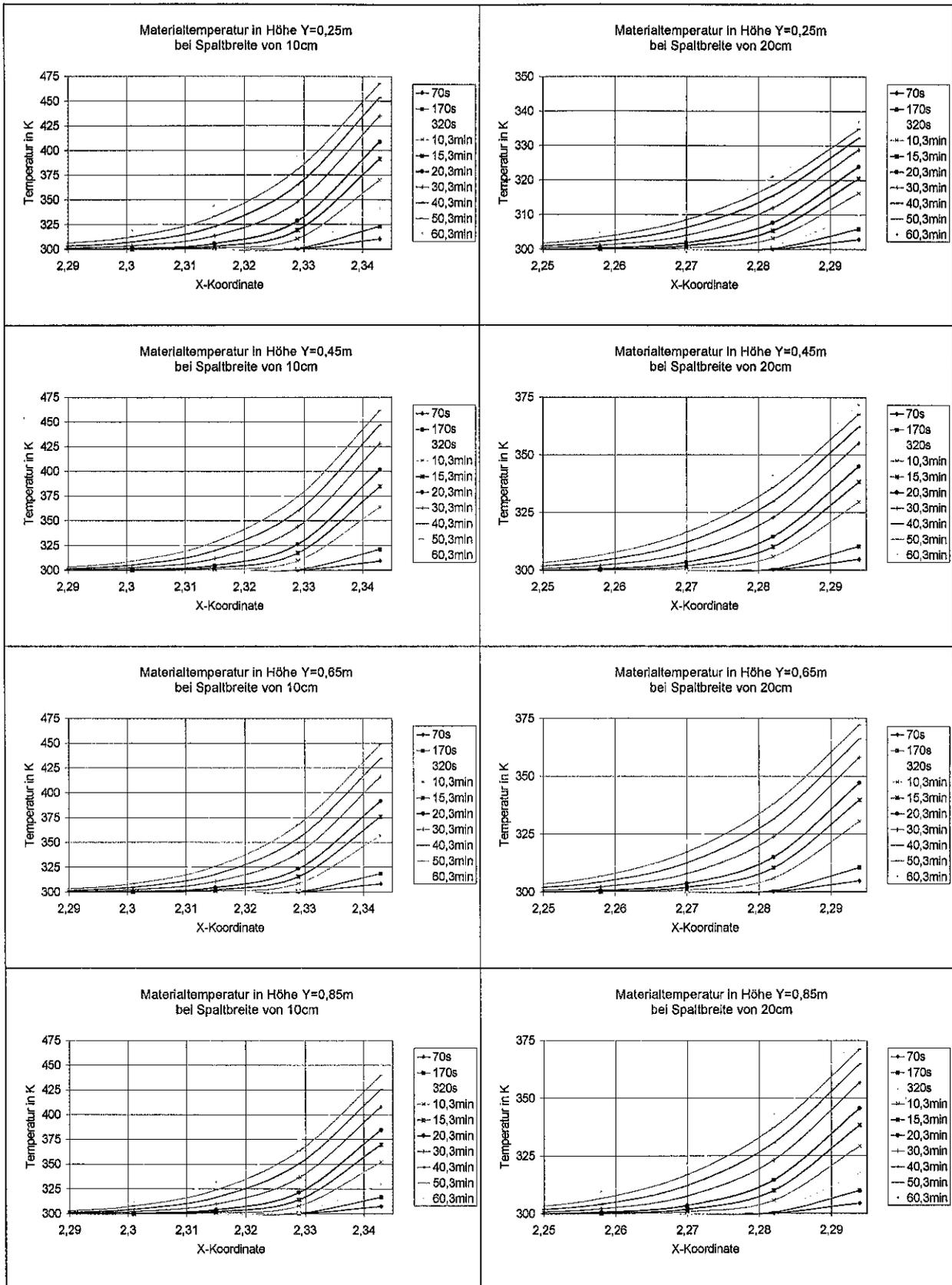


Bild 26: Gegenüberstellung der Materialerwärmung in den verschiedenen Höhen bei gleicher Poolquellstärke und verschiedener Spaltbreite über eine Dauer von 60min

Bild 26 zeigt eine Gegenüberstellung der Materialerwärmung im untersuchten Zeitintervall von 70s bis 60min. Erwartungsgemäß werden bei geringerer Spaltbreite deutlich höhere Temperaturen erzielt.

Die maximale Temperatur ist bei der Spaltbreite von 20cm mit 375K sehr gering. Aber auch die bei der geringeren Spaltbreite von 10cm berechnete Materialtemperatur von 475K nach 60min erreicht nicht die für die Selbstzündung erforderliche Temperatur.

Nach oben hin, in Richtung der positiven Y-Koordinate, sinken die Feststofftemperaturen bei beiden Spaltbreiten.

Schlussfolgerungen

Infolge eines Poolbrandes unterhalb von stapelförmig gelagertem Material bildet sich innerhalb kurzer Zeit eine ausgeprägte heiße Auftriebsströmung im Spalt.

Für die untersuchten Anordnungen, gekennzeichnet durch Spaltabstände von 10cm und 20cm bei einer Stapelhöhe von 0,8m, wurden nach 20s gleichbleibende Strömungsverhältnisse innerhalb des Spaltes ermittelt.

Bei der geringeren Spaltbreite wurden deutlich höhere Gasgeschwindigkeiten und Gastemperaturen berechnet. Infolgedessen ist bei schmalerem Spalt eine stärkere Erwärmung des Feststoffes zu verzeichnen.

Die Wärmeleitungsvorgänge in Feststoffen gehen in größeren Zeitmaßstäben vor sich. Bei den Berechnungen werden somit erst zu fortgeschrittenen Zeitpunkten, nach 30 bis 60min, deutliche Temperaturerhöhungen ermittelt. Für die rasche Brandentwicklung innerhalb des Spaltes spielen diese Vorgänge keine Rolle.

In den nachfolgenden Untersuchungen wird der Wärmeübergang in den Feststoff nicht weiter untersucht.

Für die gewählten Randbedingungen am Pool, Heißgasfreisetzungstemperatur $T=1200\text{K}$ und Gasmassstrom der Größe $\dot{m} = 0,01\text{kg/s}$, werden bereits nach 20s Temperaturen von 700K und Gasgeschwindigkeiten von 4m/s bei der Spaltbreite von 10cm berechnet.

3.4. Brandgasausbreitung in hohen Kartonstapeln

Zu den experimentellen Untersuchungen der Brandausbreitung in Kanälen bei Stapelhöhen von 1,5-3,6m [Pleiß, Seliger 2001] sind unter Nutzung der Modellierung aus den vorangegangenen Berechnungen Simulationsrechnungen zur Brandgasausbreitung in Lagerstapeln größerer Höhe durchgeführt worden. Die verwendete Versuchsanordnung ist aus Bild 27 ersichtlich. Der gezeigte Versuchsaufbau befindet sich in einem Brandraum mit den Hauptabmessungen von 4,8m x4,8m Grundfläche und einer Raumhöhe von 5,8m.



Bild 27: Versuchsanordnung für Brandversuche mit hohen Kartonstapeln im großen Brandraum des Brandhauses

3.4.1. Berechnungsgeometrie

Geometrie

Für die 2d-Simulation dieses Versuches wird als Berechnungsgebiet ein gedachter Schnitt durch den Brandraum verwendet. Das Gebiet hat die Abmessung von 4,8m Breite und 5,8m Höhe. In Bild 28 ist der 2-dimensionale Modellraum skizziert.

Die Kartonstapel sind in X-Richtung mittig im Raum angeordnet bei einem Kartonabstand von 10cm. Die Kartonhöhe eines Stapels beträgt 2,5m bei 0,4m Breite. Zwischen Pool und Kartonboden ist ein vertikaler Abstand von 20cm vorhanden.

Analog zu den vorangegangenen Berechnungen sollen die Temperatur- und Geschwindigkeitsprofile in verschiedenen Höhen zur Auswertung benutzt werden

Die Lage der Schnittlinien für die Auswertung ist in Bild 28 dargestellt.

Ein- und Ausströmöffnungen wurden symmetrisch angeordnet, erkennbar durch die rot hervorgehobenen Umrandungen des Berechnungsgebietes.

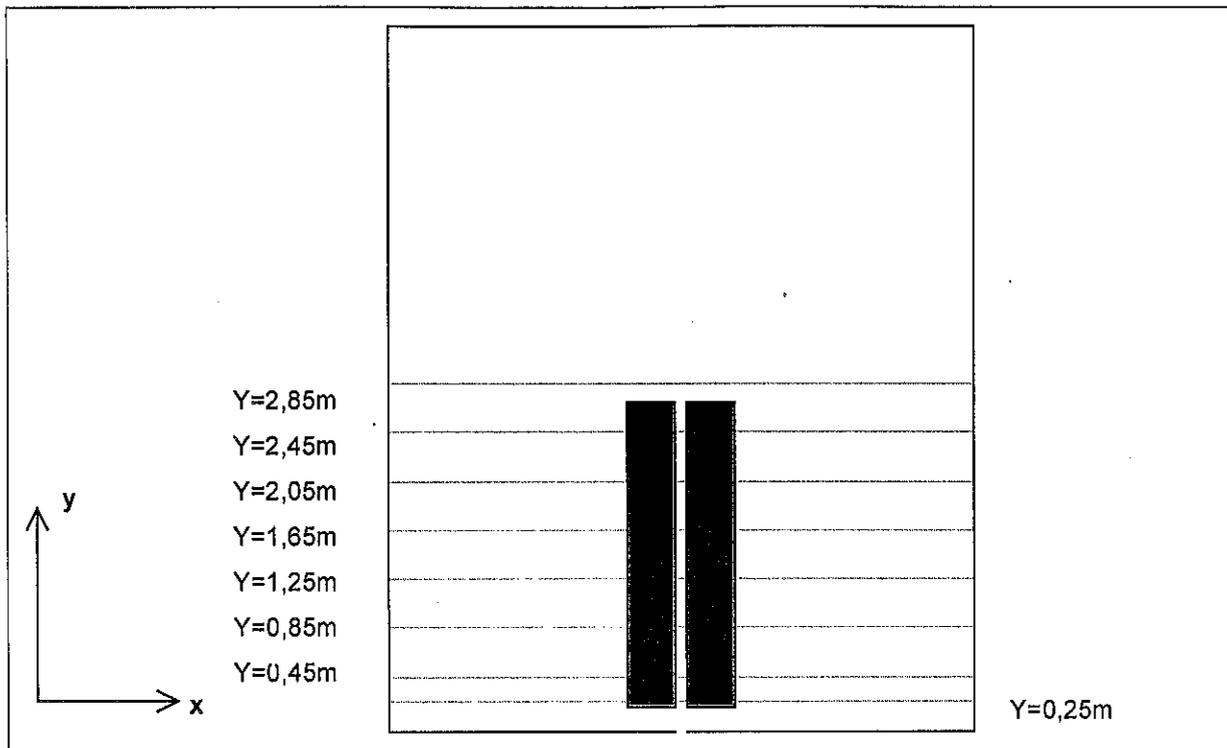


Bild 29: Skizze der Versuchsanordnung im 2-dimensionalen Modellraum

Berechnungsgitter

Es wird ein strukturiertes Gitter verwendet, das für diese Geometrie in 73500 Hexaederelemente (300 Elemente in X-Richtung und 245 Elemente in Y-Richtung) unterteilt wird.

Es sollen nacheinander zuerst die Brandgasausbreitung aus dem Brennstoffpool und dann die Brandgasausbreitung aus den Brandflächen des Kartonstapels betrachtet werden.

3.4.2. Brandgasströmung infolge Poolquelle

3.4.2.1. Rand- und Anfangsbedingungen

Die Randbedingungen für die Umfassungswände und die Ein- und Ausströmöffnungen werden wie bei den Berechnungsfällen aus Abschnitt 3.3.2. gewählt.

Die Kartonwände werden für die Simulation der Heißgasausbreitung aus der Zündwanne (Poolquelle) als nichtadiabate Wände beschrieben (vgl. 3.3.2.2.).

Als Randbedingung für den Pool, der beim verwendeten Versuchsaufbau nur zwischen den Stapeln angeordnet ist (Abmessung von 0,1m) wird ein Massestrom von $\dot{m} = 0,05 \text{ kg/s}$ mit einer Temperatur von $T = 1200 \text{ K}$ gesetzt, die übrigen Werte analog zu Abschnitt 3.2.3. Die Größe des Brandgasmassestromes aus einem Benzinpool ist anhand empirischer Daten [Baschkirzew 1974] für einen Pool der Größe $0,1 \text{ m}^2$ ermittelt worden, die Temperatur von $T = 1200 \text{ K}$ wurde als angenommene Brandgastemperatur wie bei Parameterrechnung B3 festgelegt.

Für die Anfangsbedingungen gelten ebenfalls die Angaben aus Abschnitt 3.3.2 .

3.4.2.2. Berechnungsergebnisse

Die Berechnungen wurden mit Zeitschrittweiten von $\Delta t = 0,05 \text{ s}$ zum Beginn durchgeführt, die dann vergrößert wurden auf $\Delta t = 0,1 \text{ s}$.

Es bildet sich eine Heißgasströmung innerhalb des Kanales, die bei der gewählten Poolquellstärke bereits nach 5s eine nahezu konstante Geschwindigkeit innerhalb des Kanales von 4m/s erreicht, am Einströmquerschnitt werden max. Geschwindigkeiten von 5,4m/s berechnet.

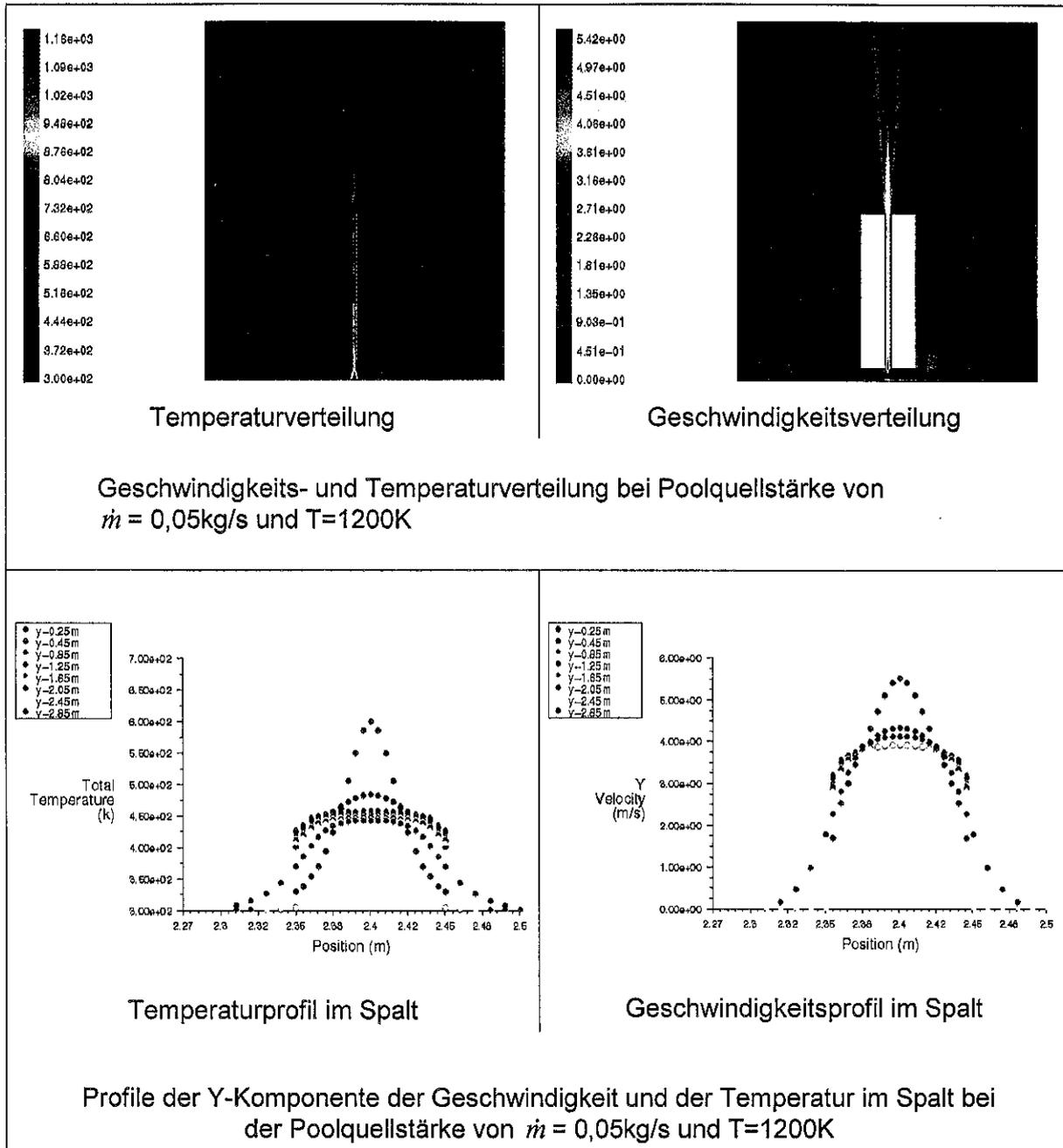


Bild 30: Strömungs- und Temperaturfeld sowie Profile von Geschwindigkeit und Temperatur infolge Heißgasausbreitung aus einem Brennstoffpool der Quellstärke von $\dot{m} = 0,05\text{kg/s}$ und $T=1200\text{K}$

Infolge der spezifischen Anordnung der Poolquelle zu den Kartonstapeln wird eine reine Durchströmung des Kanals ermittelt, bei der zusätzlich zum Anfangsimpuls infolge des Auftriebes eine Beschleunigung des Heißgasmassstromes erfolgt.

Isoflächendarstellungen für die Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung nach 30s der Ausbreitung von Heißgas aus dem Pool verdeutlichen das (Bild 30 oben).

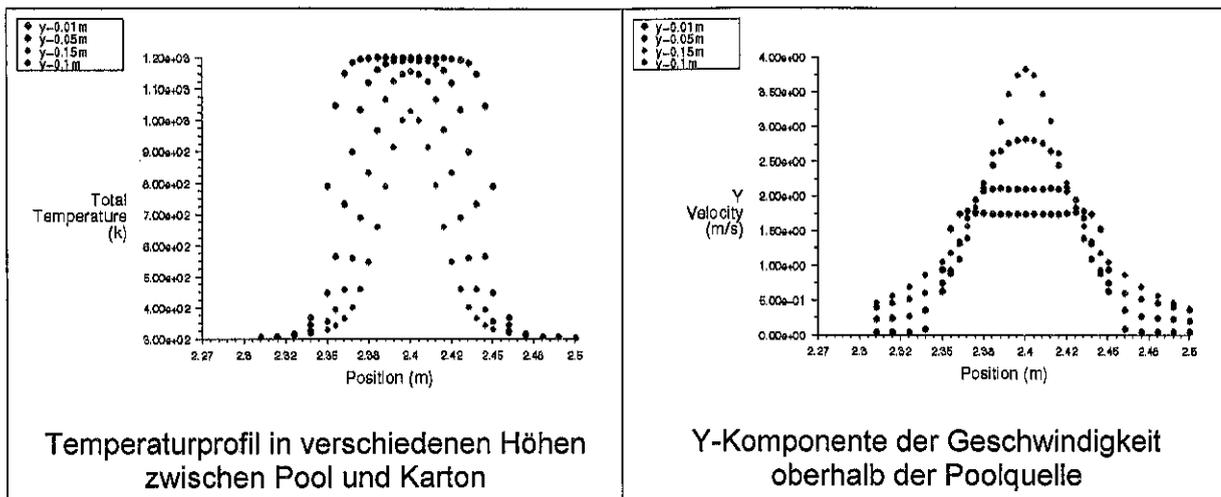


Bild 31: Temperatur- und Geschwindigkeitsprofil aus der Poolquelle bei Poolquellstärke von $\dot{m} = 0,05\text{kg/s}$ und $T=1200\text{K}$

Bild 31 zeigt die Temperatur- und Geschwindigkeitscharakteristik infolge der gewählten Randbedingung. Die direkte Angabe der Temperatur spiegelt sich in dem Temperaturprofil in der Höhe von $Y=0,01\text{m}$ wider, das man als konstante Verteilung von $T=1200\text{K}$ über die Poolbreite ansehen kann (geringe Abweichung, da der Wert in Höhe $Y=0,01\text{m}$ ein für das Volumenelement berechneter Wert ist). Die sich u. a. aus dem Massestrom von $\dot{m}=0,05\text{kg/s}$ ergebende Randbedingung für die Geschwindigkeit (Y-Komponente der Geschwindigkeit) ist ebenfalls als konstanter Wert mit $u_2=1,8\text{m/s}$ erkennbar.

Welche Beschleunigung der Gasmassestrom erfährt, wird aus dem Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung am Rand Pool (Bild 31) und den im Verlauf der Berechnung ermittelten Geschwindigkeiten im Spalt (Bild 30) in den verschiedenen Höhen deutlich.

Der Freisetzungsgeschwindigkeit von $1,8\text{m/s}$ am Pool steht eine Geschwindigkeit am Kanalaustritt von 4m/s gegenüber.

Im Bereich der Spalteinströmung in der Höhe von $Y=0,25\text{m}$ ist ein Anwachsen der Geschwindigkeitskomponente u_2 bis auf den Wert von ca. 6m/s zu verzeichnen. Bei der Temperatur ist im selben Maße ein Absinken der Temperatur vom Randwert $T=1200\text{K}$ auf den Wert von $T=600\text{K}$ in der Höhe von $Y=0,25\text{m}$ zu erkennen. Innerhalb des Spaltes werden konstante Verteilungen über die Spaltbreite ermittelt.

Die berechneten Temperaturen erreichen nur sehr geringe Werte von max. 450K .

Da die Massestromraten auf Grundlage empirischer Daten ermittelt wurden, bei denen z. B. für die Abbrandgeschwindigkeiten Bereiche angegeben werden, ist zum Vergleich für eine Größe des Massestromes von $\dot{m} = 0,1\text{kg/s}$ eine weitere Berechnung durchgeführt worden.

Die Ergebnisse sind in Bild 32 grafisch dargestellt.

Wie zu erwarten, werden bei größerem Massestrom größere Geschwindigkeiten und Temperaturen im Spalt ermittelt.

Auch bei größerem Massestrom von $\dot{m} = 0,1\text{kg/s}$ ändert sich das nach 5s Freisetzung aus dem Pool berechnete Strömungs- und Temperaturfeld im Spalt in den folgenden Zeitschritten nur noch geringfügig. Aufgrund der berechneten konstanten Gastemperatur von 600K über die gesamte Spaltlänge, wird eine Brandgasfreisetzung über die gesamte Kartoninnenfläche angenommen. Die berechneten Temperaturen seien als ausreichend angesehen, eine Brandgasfreisetzung aus den Kartoninnenflächen zu gewährleisten. Gestützt wird diese Annahme durch die von [Pleiß, Seliger 2001] ermittelten experimentellen Werte zu den Geschwindigkeiten (Bild 34) und Beobachtungen der Flammenausbreitung im Spalt (Bild 33).

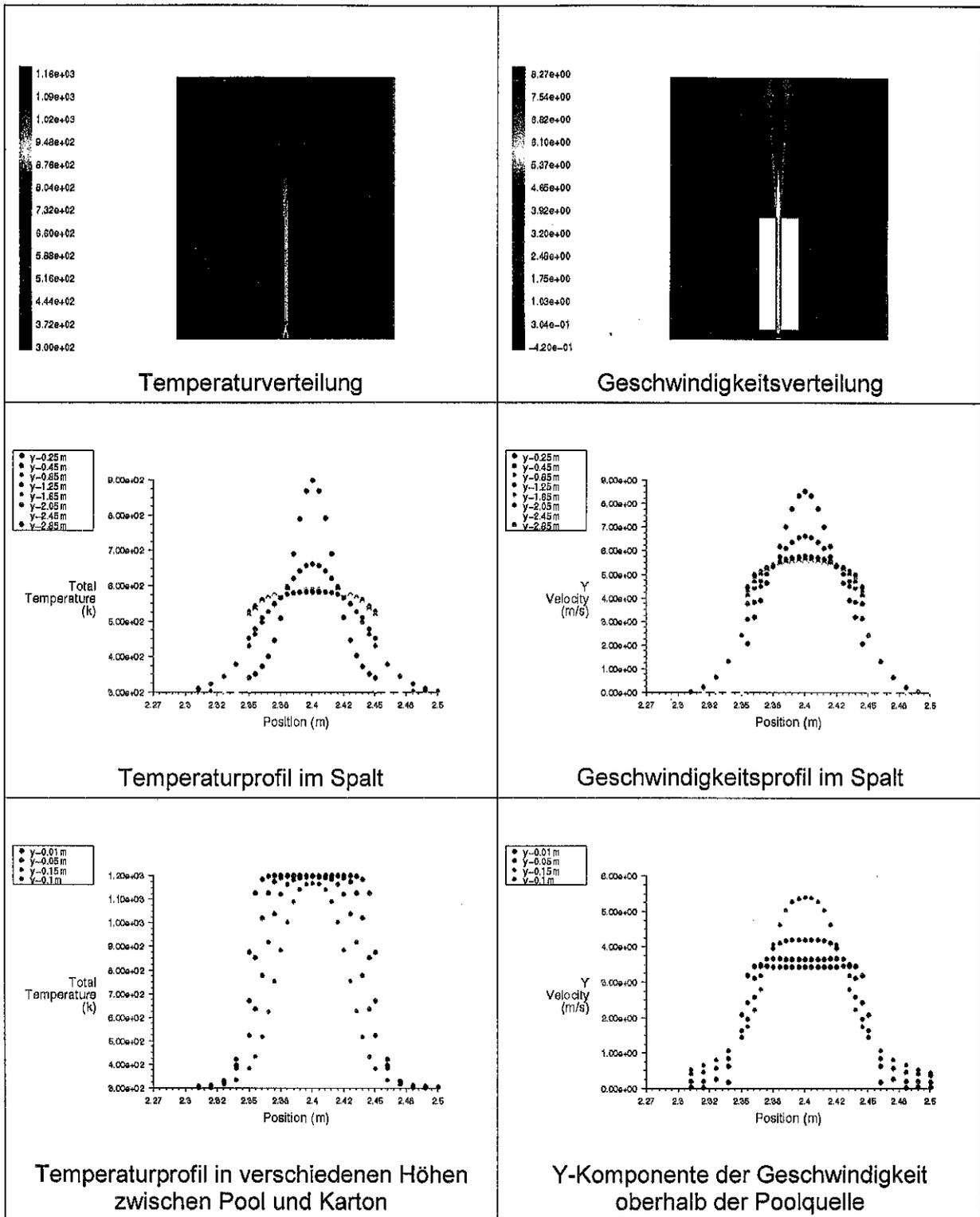


Bild 32: Temperaturen und Geschwindigkeiten (Y-Komponente) infolge Heißgasfreisetzung aus einer Poolquelle mit den Quellstärkeangaben von $\dot{m} = 0,1\text{kg/s}$ und $T=1200\text{K}$

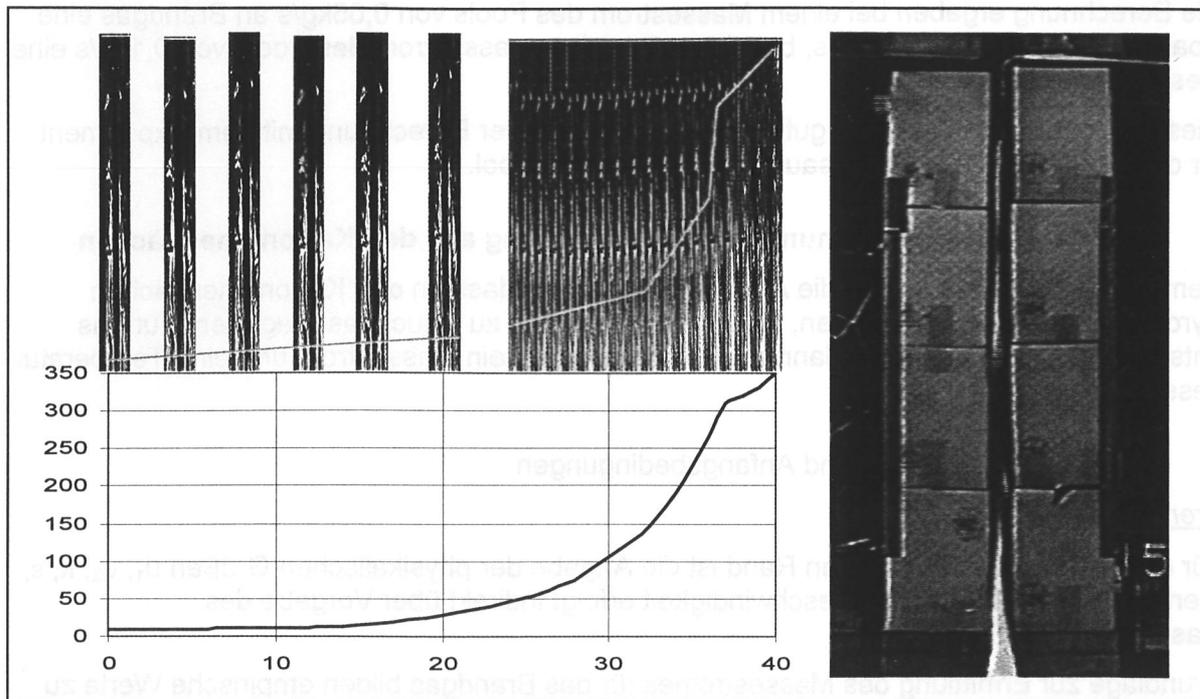


Bild 33: Flammenhöhe im Spalt (links: Auswertung der Flammenausbreitung anhand von Videosequenzen, rechts: Videoaufnahme der Flammenausbreitung zu einem Zeitpunkt [Pleiß, Seliger 2001])

Aus Bild 33 ist in den ersten 30s ein allmähliches Ansteigen der Flammenhöhe zu beobachten. Erst nach ca. 30s wächst diese Flammenhöhe sehr schnell an. Die Flamme kann vom Modell nicht wiedergegeben werden. Das schnelle Ansteigen der Flamme nach 30s deutet darauf hin, dass aus der Kartonoberfläche Pyrolysegase austreten, die die weitere Flammenausbreitung fördern.

Diese sehr schnelle Flammenausbreitung über die Höhe des Spaltes (vgl. Bild 33, rechte Abb.) bildet den Ausgangspunkt für den schnellen Abbrand. In der Modellierung wird das durch eine Randbedingung an den Kartoninnenseiten beschrieben, die den Brandgasmassstrom über die gesamte Stapelhöhe zugleich vorgibt.

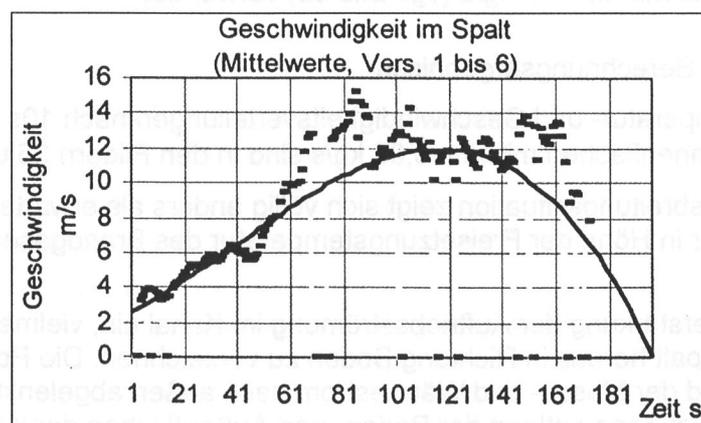


Bild 34: Mittlere Geschwindigkeiten im Spalt

Die aus den Experimenten ermittelte Geschwindigkeits-Zeit-Kurve weist nach 30s Brandentwicklung Spaltgeschwindigkeiten im Bereich von 5-6 m/s auf.

Die Berechnung ergaben bei einem Massestrom des Pools von 0,05kg/s an Brandgas eine Spaltgeschwindigkeit von 4 m/s, bei einem Brandgasmassenstrom des Pools von 0,1kg/s eine Geschwindigkeit von 6 m/s.

Diese Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung der Berechnung mit dem Experiment für den Abschnitt der Brandgasausbreitung aus dem Pool.

3.4.3. Brandgasströmung infolge Freisetzung aus den Kartoninnenflächen

Dem weiteren Vorgehen liegt die Annahme zugrunde, dass an den Kartoninnenflächen Pyrolysegase freigesetzt werden, die mit Luftsauerstoff zu Rauchgas reagieren. Für das entstehende Rauchgas kann dann als Randbedingung ein Massestrom und eine Temperatur gesetzt werden.

3.4.3.1. Rand- und Anfangsbedingungen

Brennstoffflächen

Für den Brandgas freisetzenden Rand ist die Angabe der physikalischen Größen u_1 , u_2 , k , ε , T erforderlich. Die Wahl der Geschwindigkeit erfolgt indirekt über Vorgabe des Massestromes.

Grundlage zur Ermittlung des Massestromes für das Brandgas bilden empirische Werte zu Abbrandgeschwindigkeiten ($54 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$) und den bei der Verbrennung Holz entstehenden Rauchgasvolumen ($4,9 \text{ m}^3/\text{kg}$) [Baschkirzew 1974]. Es ergeben sich Rauchgasmassenströme von ca. 0,05 - 0,1kg/s für eine Kartoninnenfläche des 2,5m hohen Stapels bei einer angenommenen Freisetzungstemperatur von 1200°C , so dass als Randbedingung der Massestrom von $\dot{m} = 0,05 \text{ kg/s}$ als Randbedingung und in einer weiteren Rechnung $\dot{m} = 0,1 \text{ kg/s}$ gesetzt wird. Die Temperatur des aus den Brandflächen austretenden Gases wird mit $T=1200\text{K}$ definiert.

Der Massestrom wird für die gesamte Innenfläche als konstanter Wert gesetzt. Die Richtung des austretenden Massestromes ist normal zur Oberfläche

Bei Zugrundelegen der in den Versuchen ermittelten Abbrandrate von 10-15 kg/min würde bei Voraussetzung, dass die Brandgase nur an den Innenseiten der Kartonstapel freigesetzt werden, ein Rauchgasmassenstrom von ca. 0,5kg/s als Randbedingung gesetzt werden.

Als Anfangsbedingungen für die weitere Berechnung wird das ermittelte Strömungsfeld infolge Brennstoffpools mit $\dot{m} = 0,1\text{kg/s}$ (vgl. Bild 32) verwendet.

3.4.3.2. Berechnungsergebnisse

Die berechneten Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen nach 10s Heißgasausbreitung aus den Kartoninnenflächen mit $\dot{m} = 0,05 \text{ kg/s}$ sind in den Bildern 35 und 36 gezeigt.

Die hier ermittelte Ausbreitungssituation zeigt sich völlig anders als erwartet. Im Spalt ist eine konstante Temperatur in Höhe der Freisetzungstemperatur des Brandgases vorhanden (Bild 35).

Es stellt sich keine Verstärkung der Auftriebsströmung im Kanal ein, vielmehr ist eine Strömung aus dem Spalt heraus in Richtung Boden zu verzeichnen. Die Poolquelle wird praktisch blockiert und der Masse- und Wärmestrom nach außen abgelenkt. Die Heißgasströmung steigt dann entlang der Boden- und Außenflächen der Kartons nach oben (siehe Bild 36).

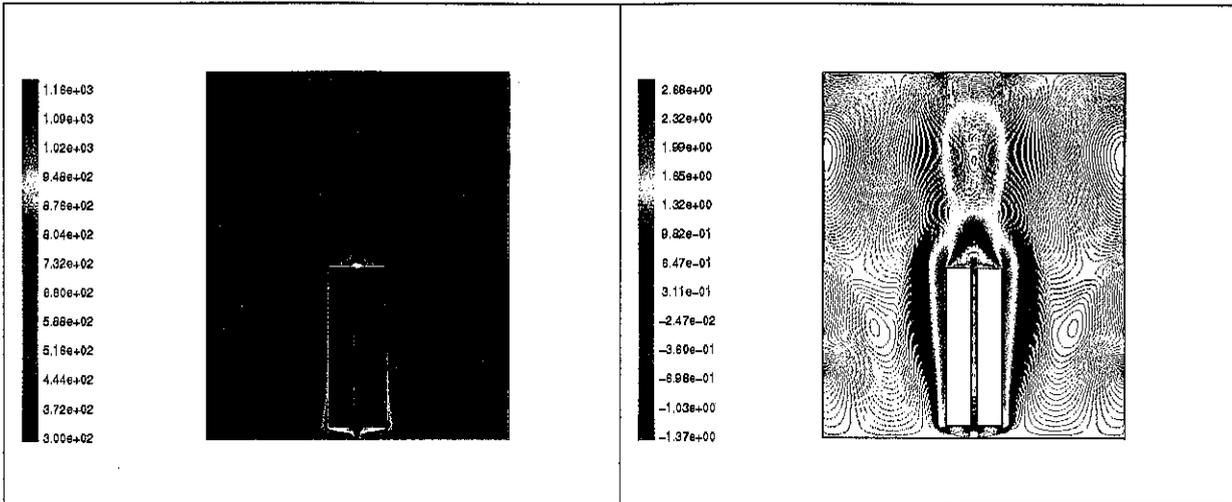
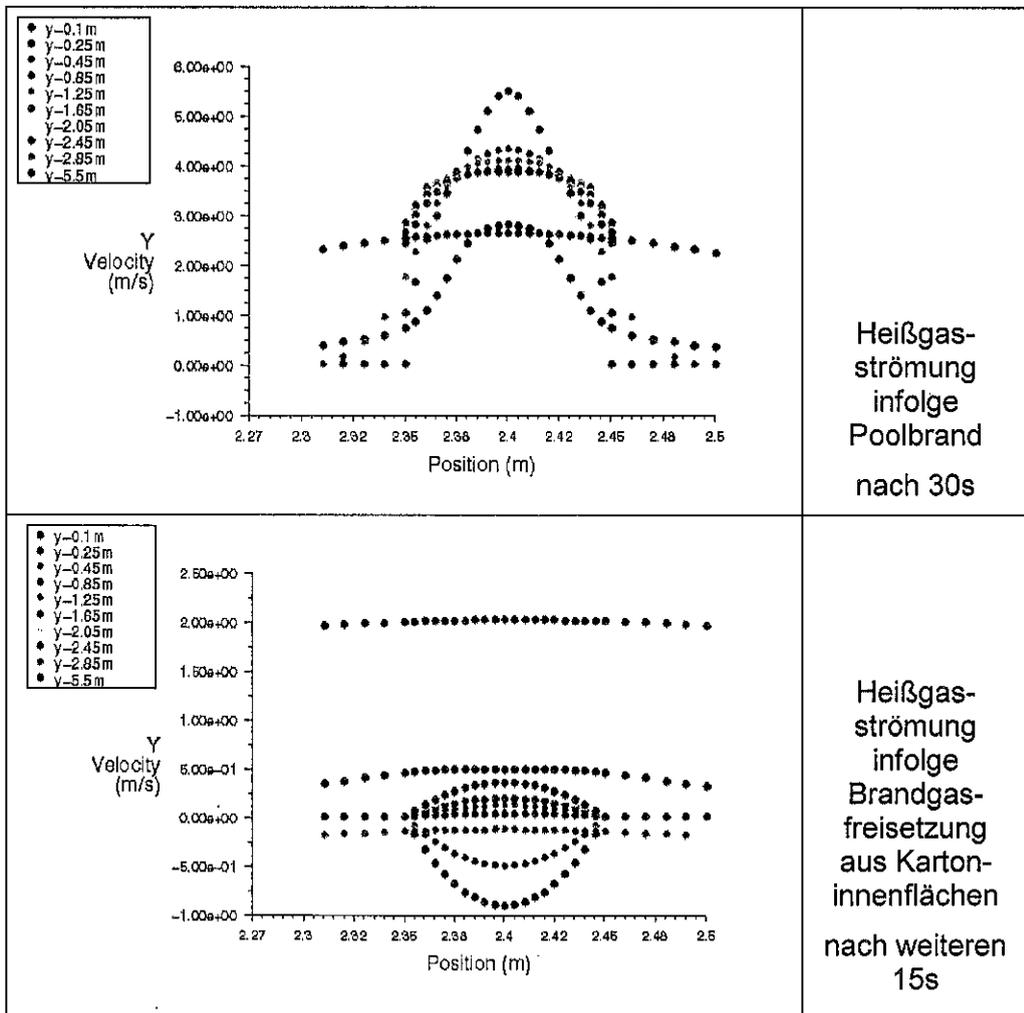


Bild 35: Temperaturverteilung nach 10s Brandgasfreisetzung aus den Kartoninnenflächen

Bild 36: Geschwindigkeitsverteilung nach 10s Brandgasfreisetzung aus den Kartoninnenflächen

Anhand der Geschwindigkeitsprofile für die Y-Komponente der Geschwindigkeit in Bild 37 für verschiedene Höhen ist zu erkennen, wie sich die Strömungsrichtung in den Ebenen $Y=0,25m$ und $Y=0,45m$ im Vergleich zur Auftriebsströmung infolge des Poolbrandes umkehrt. Die Auftriebsströmung im Spalt kommt zum Erliegen.



Heißgasströmung infolge Poolbrand nach 30s

Heißgasströmung infolge Brandgasfreisetzung aus Kartoninnenflächen nach weiteren 15s

Bild 37: Geschwindigkeitsprofile (Y-Komponente) im Spalt

Die Y-Komponente der Geschwindigkeit im Innern des Stapels (Höhen von $Y=0,85\text{m}$ bis $Y=2,45\text{m}$) fällt auf Werte zwischen 0 und $0,2\text{m/s}$. Am Eintritt der Strömung in den Spalt ist eine Umlenkung der ursprünglich vertikal nach oben gerichteten Heißgasströmung zu verzeichnen. Diese vertikale Komponente der Geschwindigkeit steigt von vorher $u_2=3\text{m/s}$ in positiver Y-Richtung nach 15s auf $u_2=1\text{m/s}$ in entgegengesetzter Richtung.

Das nach 15s ermittelte Strömungsfeld bleibt in den folgenden Zeitschritten im Bereich um die Kartonstapel erhalten, lediglich die Temperatur innerhalb des Raumes, unterhalb der Decke wächst langsam an.

Das hier berechnete Ausbreitungsverhalten spiegelt den beobachteten Versuchsablauf nicht wider.

Auswertung

Nachdem die Phase der Heißgasausbreitung durch eine Poolquelle gut durch das Modell wiedergegeben wurde, stellen die darauffolgenden Berechnungen nicht zufrieden.

Für die Nichtübereinstimmung von Experiment und CFD-Berechnung können folgende Gründe verantwortlich sein:

1. Gitter und zeitliche Auflösung sind ungeeignet, um die physikalischen Vorgänge nachbilden zu können.
2. Randbedingungen sind unrealistisch.
3. Entscheidende Vorgänge werden vom Modell nicht erfasst.

Der Beginn der Brandgasfreisetzung ist mit dem physikalischen Vorgang der Zündung von Pyrolysegasen durch die Flammenspitze des Poolbrandes verbunden. Bei Ausbildung von Flammen im Spalt, wie in Bild 33 gut zu erkennen, muss davon ausgegangen werden, dass die Temperaturen lokal auf Flammentemperatur ansteigen können. In die Formulierung der Randbedingungen geht das nicht ein. Die gewählten Randbedingungen prägen durch den senkrecht zur Oberfläche gerichteten Brandgasmassstrom ein konstantes Temperaturfeld auf, das real nicht vorhanden ist.

Die fehlende Auftriebsströmung lässt sich durch die gewählten Randbedingungen nicht erklären. Hier sind Ursachen in der Zeitschrittweite und der Detaillierung des Gebietes zu suchen.

Um realistischere Berechnungsergebnisse für die Brandgasfreisetzung aus den Kartonstapeln zu erzielen, müssen Änderungen im Problembeschreibungsfile (Case-File in Fluent) vorgenommen werden.

3.4.4. Berechnungen zur Simulation des Versuches für die Brandgasausbreitung aus dem Feststoff

Die erforderlichen Verbesserungen bei der Modellierung werden durch die folgenden Schritte vorgenommen:

1. Eine Schrittweite von $0,1\text{s}$ für die Phase der Heißgasfreisetzung aus den Kartonflächen ist zu grob. Bei den Berechnungen werden Zeitschrittweiten von $0,02\text{s}$ bis $0,05\text{s}$ in der Anfangsphase verwendet.
2. Das verwendete Gitter weist ein ungünstiges Volumenelement-Längenverhältnis von $\Delta y/\Delta x=0,023/0,016$ auf, lokal zwischen den Kartons mit $\Delta y/\Delta x=0,02/0,005$ ist es noch größer (ideal 1). Das Gitter wird lokal geändert, so dass innerhalb des Spaltes ein Längenverhältnis von 1 vorhanden ist.
3. Das Modell spiegelt keine Flammenausbreitung wider sowie keine Reaktion. Innerhalb des Spaltes vorhandene Temperaturmaxima (z. B. infolge Flammenspitzen), die zu einer Beschleunigung der Strömung im Spalt führen, sind nicht vorhanden. Dieser Mangel

muss durch die Randbedingungen behoben werden. Das kann dadurch geschehen, dass der Massestrom eine Geschwindigkeitskomponente in Y-Richtung erhält bzw. in der Mitte des Spaltes Anfangsbedingungen (zum Beginn der Brandgasfreisetzung aus den Kartonflächen) für die Temperatur in Höhe der Flammentemperatur zugeordnet werden.

3.4.4.1. Berechnungsergebnisse für die Simulation des Versuchs

Als besser angepasste Randbedingung für die Kartoninnenflächen wird ein Massestrom von $\dot{m} = 0,05 \text{ kg/s}$, der nicht normal zur Oberfläche, sondern unter Vorgabe einer Y-Komponente von 0,9 und einer X-Komponente von 0,2 definiert wird, mit einer Temperatur von $T = 1200 \text{ K}$ angegeben.

Mit der geänderten Gittergeometrie und einer Schrittweite von $\Delta t = 0,02 \text{ s}$ werden nach 3s der Heißgasausbreitung aus den Kartonflächen die in Bild 38 dargestellten Berechnungsergebnisse erzielt.

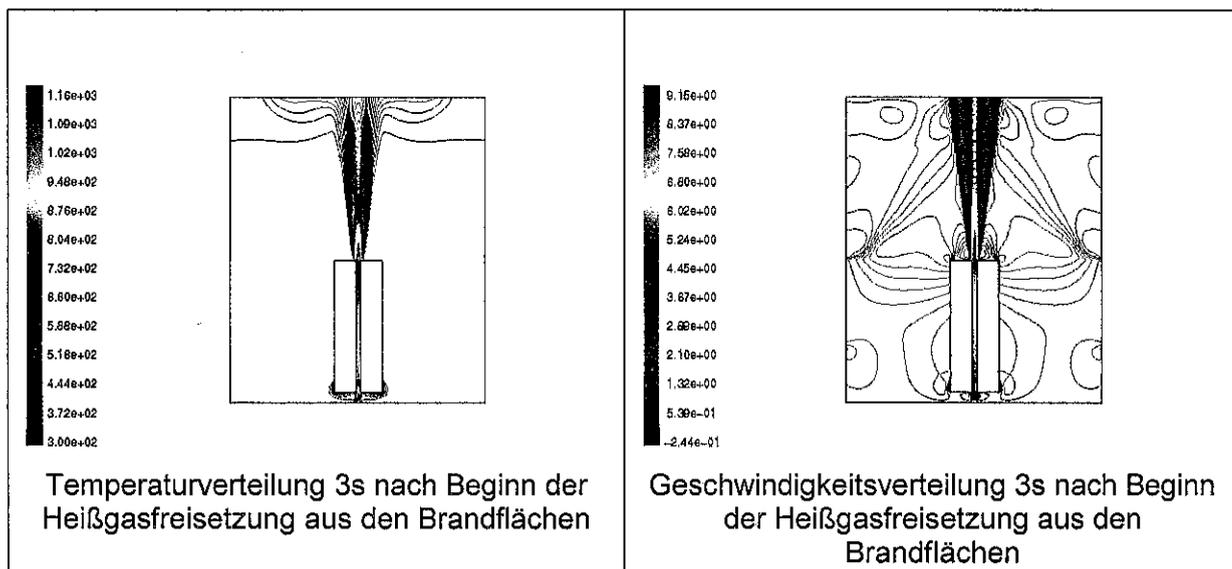


Bild 38: Isolinien­darstellung von Temperatur und Geschwindigkeitskomponente u_2 bei Heißgasfreisetzung aus den Kartoninnenflächen mit $\dot{m} = 0,05 \text{ kg/s}$ und $T = 1200 \text{ K}$

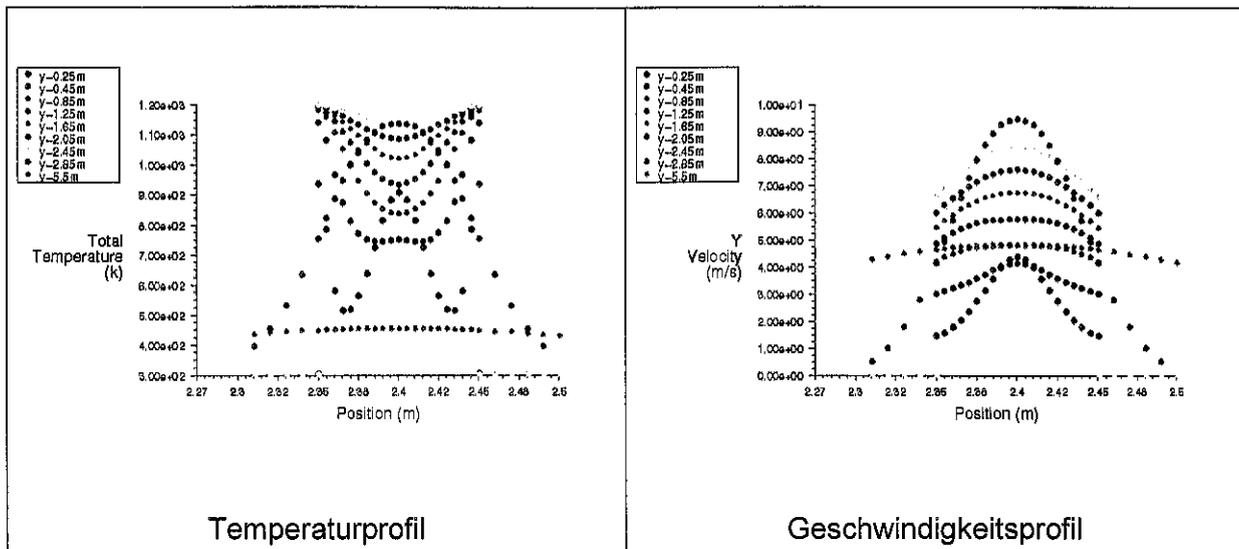


Bild 39: Temperaturprofile und Profile der Geschwindigkeitskomponente u_2 nach Heißgasfreisetzung aus den Kartoninnenflächen mit $\dot{m} = 0,05\text{kg/s}$ und $T=1200\text{K}$

Es wird eine starke Auftriebsströmung ermittelt, initiiert durch die Randbedingungen an den Kartoninnenwänden. Auch die Temperaturverteilung im Spalt spiegelt mit einer Oberflächentemperatur von $T=1200\text{K}$ direkt die Randbedingung wider. Die berechneten Geschwindigkeiten im Spalt (in Y-Richtung) steigen von 4m/s am Einströmquerschnitt mit der Höhe des Spaltes auf 8m/s an. Oberhalb der Stapel werden ca. 10m/s ermittelt.

Die Berechnung der weiteren Brandgasausbreitung setzt ein Ansteigen des Brandgasmassenstromes aus den Kartonflächen voraus.

Berechnungsergebnisse mit einem Massenstrom von $\dot{m} = 0,1\text{kg/s}$ sind im Bild 40 dargestellt.

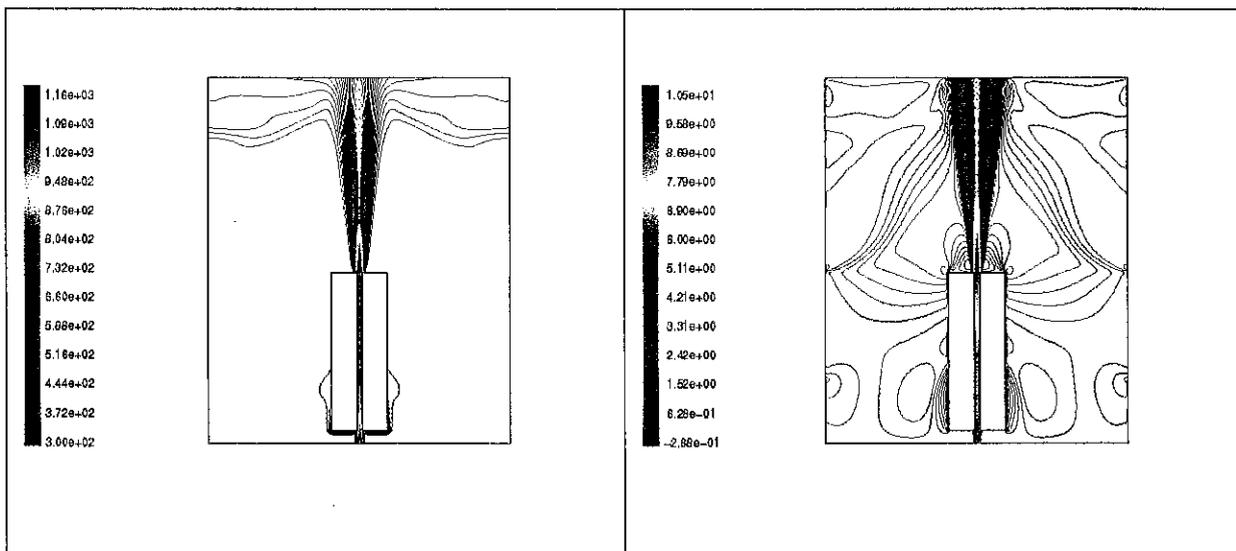


Bild 40: Isoliniendarstellung von Temperatur und Geschwindigkeitskomponente u_2 bei Heißgasfreisetzung aus den Kartoninnenflächen mit $\dot{m} = 0,1\text{ kg/s}$ und $T=1200\text{K}$

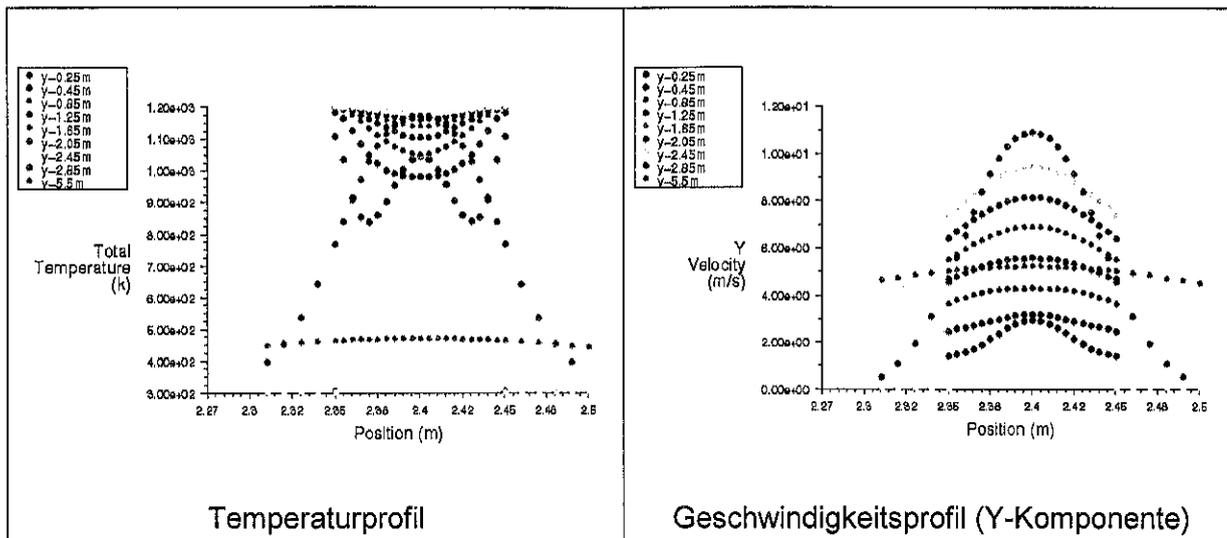


Bild 41: Temperaturprofile und Profile der Geschwindigkeitskomponente u_2 nach Heißgasfreisetzung aus den Kartoninnenflächen mit $\dot{m} = 0,1\text{kg/s}$ und $T=1200\text{K}$

Das allgemeine Verteilungsbild (Bild 40) ist unverändert. Die maximalen Geschwindigkeiten erreichen Werte von ca. 11m/s über dem Spalt (bei $Y=2.85\text{m}$). Innerhalb des Spaltes ist ein Anwachsen der Geschwindigkeit von unten nach oben zu beobachten.

Mit zunehmendem Massestrom sind höhere Geschwindigkeiten im oberen Teil des Spaltes zu verzeichnen, in den unteren Ebenen ($Y=0.25\text{m} - Y=0.85\text{m}$) geringere Geschwindigkeiten als bei kleinerem Massestrom. Die Temperaturverteilung im Spalt nähert sich einer konstanten Temperaturverteilung im Spalt in der Höhe der Temperatur des freigesetzten Massestromes aus den Kartoninnenflächen.

Die Brandausbreitung aus den Kartoninnenflächen erfordert eine Formulierung der Randbedingung für den Massestrom, die die vom Modell nicht erfasste Flamme (Zündflamme aus dem Pool) berücksichtigt.

Temperaturverteilungen ergeben sich zum Teil aus den vorgegebenen Randbedingungen und werden im Spalt nur noch als konstanter Wert der Freisetzungstemperatur ermittelt.

Modellierung der Brandgasausbreitung in hohen Kartonstapeln als Brandgasströmung zeigt in der Ermittlung der Spaltgeschwindigkeit in der Brandentwicklungsphase eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment.

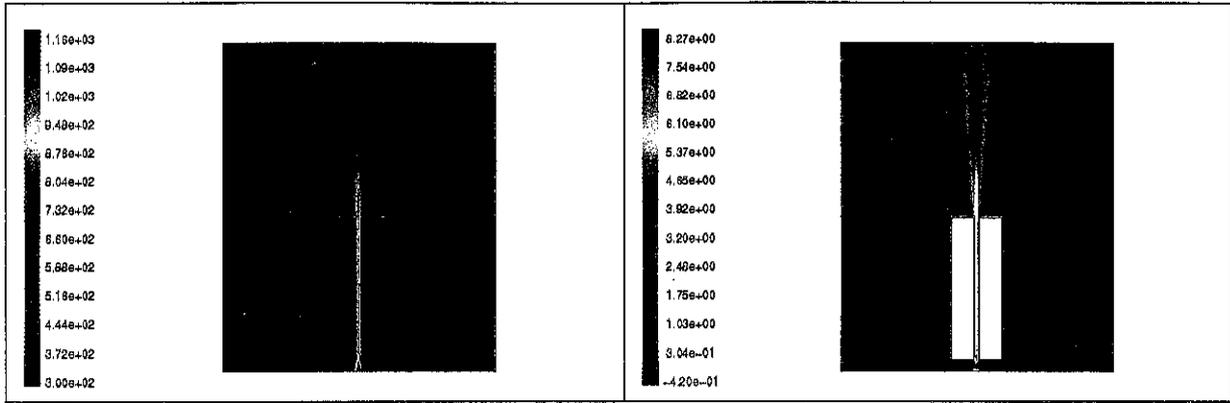
In der Phase des Vollbrandes, der in den Versuchen durch den Abbrand des Kartoninhaltes und dem Zusammenfallen der Kartons gekennzeichnet ist, wird keine Übereinstimmung erzielt. Geometrie und Stoffwerte ändern sich während des Brandablaufes, so dass Modell und Experiment immer weniger übereinstimmen.

3.4.5. Ergebnisse der Simulationsrechnung zum Versuch

Zusammenfassend die Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen für die drei modellierten Etappen der Brandgasausbreitung für den Kartonstapelbrand:

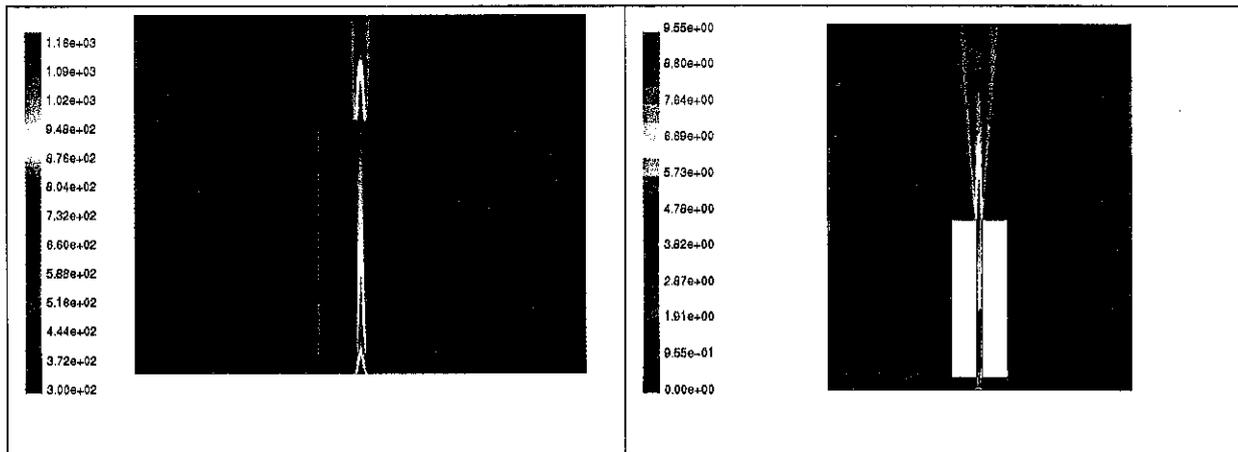
1. Brandgasausbreitung infolge Pool
2. Brandgasausbreitung aus den Brandflächen in der Brandausbreitungsphase bei geringem Massestrom
3. Brandgasausbreitung aus den Brandflächen in der Brandausbreitungsphase mit größerem Massestrom

1.



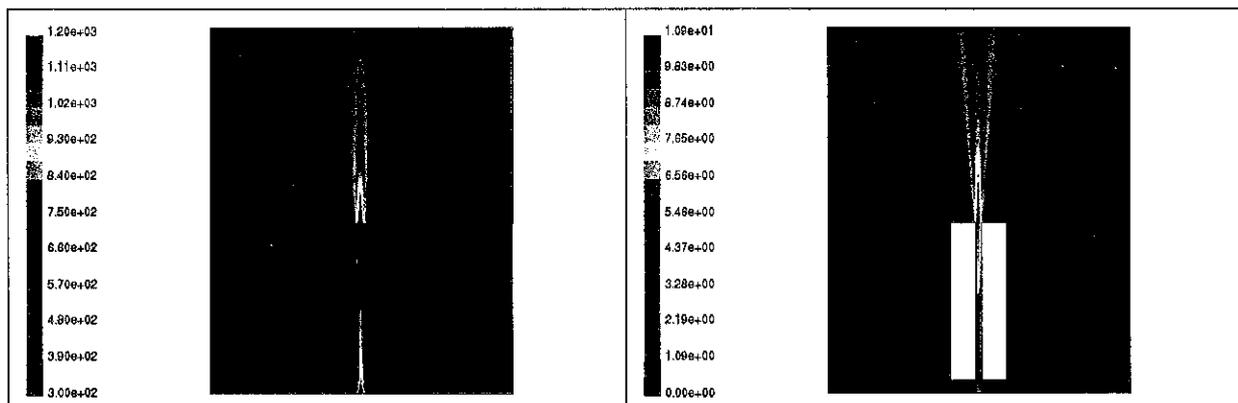
Brandgasausbreitung infolge Pool mit $\dot{m} = 0,1\text{kg/s}$ und $T=1200\text{K}$

2.



Brandgasausbreitung aus den Brandflächen in der Brandausbreitungsphase mit $\dot{m} = 0,05\text{kg/s}$ und $T=1200\text{K}$

3.



Brandgasausbreitung aus den Brandflächen in der Brandausbreitungsphase mit $\dot{m} = 0,1\text{kg/s}$ und $T=1200\text{K}$

Bild 42: Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung für drei modellierte Ausbreitungsetappen aus dem Brandversuch mit hohen Kartonstapeln

Die Simulation der Brandgasausbreitung in Kartonstapeln von 2,5m Höhe und 10cm Kanalbreite infolge Poolquelle in Größe der Spaltbreite zeigt eine vertikale Auftriebsströmung hoher Geschwindigkeit. Es findet eine reine Durchströmung des Kanals statt, bei der außer den Kartoninnenflächen keine weiteren Materialflächen erwärmt werden (keine Umströmung der Kartonstapel), so dass nur diese als Brandflächen modelliert werden.

In den Berechnungen der Brandgasströmung aus dem Pool, bei denen für die Brandgasmasseströme empirische Daten der Abbrandgeschwindigkeit und eine Temperatur von $T=1200\text{K}$ zugrundegelegt werden, sind Geschwindigkeiten im Spalt von 4-6 m/s ermittelt worden, die gut mit dem Versuch übereinstimmen.

Infolge Brandgasfreisetzung aus den Kartoninnenflächen, für die zur Modellierung der Brandentwicklung die Masseströme schrittweise vergrößert werden, sind Geschwindigkeiten von max. 11m/s oberhalb des Spaltes bei dem Massestrom von $\dot{m} = 0,1\text{kg/s}$ und $T=1200\text{K}$ berechnet worden. Der im Experiment gemessene maximale Geschwindigkeitswert liegt mit ca. 14m/s höher, was durch das Vorhandensein von Flammen am Spaltausgang verursacht sein könnte.

Die Geschwindigkeit im Spalt ist nach 5s unveränderlich und über die Höhe des Stapels konstant (ausgenommen am Spalteintritt).

Temperaturverteilungen ergeben sich zum Teil aus den vorgegebenen Randbedingungen und werden im Spalt nur noch als konstanter Wert der Freisetzungstemperatur ermittelt.

In der Phase des Vollbrandes, der in den Versuchen durch den Abbrand des Kartoninhaltes und dem Zusammenfallen der Kartons gekennzeichnet ist, wird keine Übereinstimmung erzielt. Geometrie und Stoffwerte ändern sich während des Brandablaufes, so dass Modell und Experiment zunehmend voneinander abweichen.

4. Zusammenfassung

Die Simulation der Brandgasausbreitung in Kartonstapeln wurde für niedrige und hohe Kartonstapel durchgeführt. Brandgas wurde als nichtreagierendes Einkomponentengas mit veränderlichen Stoffeigenschaften nach dem Idealen Gasgesetz modelliert.

Es wurde das Szenario der Zündung mittels Benzinpool vorausgesetzt, das eine sehr schnelle Ausprägung einer starken Auftriebsströmung zwischen den Kartonstapeln zur Folge hat.

Für die Quellstärke der Brandgasfreisetzung sind Gasmasseströme und Temperaturen unter Zugrundelegen empirischer Daten zu Abbrandgeschwindigkeiten und Rauchgasvolumen gesetzt worden.

Infolge Benzinpools bildet sich im Spalt eine konstante Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung aus. Die Gasgeschwindigkeit im Spalt ist im Vergleich zur Freisetzungsgeschwindigkeit des Brandgases aus dem Pool deutlich höher.

Die Variation der Spaltbreite bei Berechnungen mit niedrigen Kartonstapeln (Höhe 0,8m) ergibt bei geringerer Spaltbreite von 10cm höhere Geschwindigkeiten und Gastemperaturen im Kanal als bei einer Spaltbreite von 20cm. Demzufolge ist bei der geringeren Spaltbreite auch eine stärkere Erwärmung des Brandmaterials zu verzeichnen. Da für Wärmeübergangsvorgänge in Feststoffe größere Zeitmaßstäbe gelten, spielen diese Vorgänge für die rasche Brandausbreitung bei Kartonstapelbränden eine untergeordnete Rolle.

Für hohe Kartonstapel ist eine Simulationsrechnung durchgeführt worden, deren Szenario aus einem Brandversuch abgeleitet wurde. In dem Versuch findet die Brandgasfreisetzung aus den Kartonstapeln nur an den Kartoninnenflächen statt.

Der Brandverlauf wird abschnittsweise modelliert, wobei für jeden betrachteten Zeitabschnitt für die Quellstärke der brandgasfreisetzenden Fläche ein konstanter Massestrom gesetzt wird, entsprechend der Abbrandgeschwindigkeit innerhalb des Zeitintervalls.

Die unterschiedlichen Brandverlaufsetappen, die modelliert wurden, sind:

- Brandgasausbreitung im Spalt infolge Poolbrandquelle konstanter Abbrandrate,
- Brandgasausbreitung infolge Brandgasfreisetzung aus Karton-Brandflächen mit anwachsender Abbrandrate in der Brandentwicklungsphase,
- Brandgasausbreitung infolge Brandgasfreisetzung aus Karton-Brandflächen mit konstanter Abbrandrate im Stadium des Vollbrandes.

Bei der rechnerischen Nachbildung des Brandversuches wurde der Brandverlauf als Aufeinanderfolge charakteristischer Temperatur- und Strömungsfelder für den jeweiligen Abschnitt dargestellt, wobei die zeitliche Zuordnung aus der Versuchsdokumentation (Video) gewonnen wurde.

Diese Vorgehensweise zeigte eine gute Übereinstimmung in den Geschwindigkeiten.

Ein Vergleich der Temperaturen zwischen Experiment und Rechnung ist nicht sinnvoll, da zum Teil die Temperatur als Randbedingung vorgegeben wurde.

Die hier vorgenommenen Untersuchungen basieren auf einem vereinfachten 2-dimensionalen Berechnungsmodell mit vereinfachten Annahmen zu den Randbedingungen. Dementsprechend sind die aus dem Modell ableitbaren Aussagen ebenfalls begrenzt.

Der Vergleich von Experiment und Rechnung konnte nur punktuell anhand von gemessenen und berechneten Geschwindigkeiten im Spalt erfolgen.

Das hier verwendete Modell stellt einen Ausgangspunkt für Modellerweiterungen dar, die dann auch größere Aussagemöglichkeiten für die Brandgasausbreitung erlauben.

Eine Erhöhung der Aussagefähigkeit des Berechnungsmodells kann jedoch nicht allein durch Erweiterung auf den dreidimensionalen Fall erreicht werden, sondern schon durch Verbesserungen bei der Formulierung der Randbedingungen.

Der Einfluss der Randbedingungen wurde in Abschnitt 3.4.3.2 verdeutlicht, in dem infolge ungenauer Randbedingungen ein den Beobachtungen widersprechender Ausbreitungsverlauf ermittelt wurde. In jedem Falle ist eine kritische Betrachtung der Ergebnisse der numerischen Berechnungen erforderlich. Auf experimentelle Daten kann dabei nicht verzichtet werden. Um eine Modellvalidierung vornehmen zu können, ist die Erfassung von Messwerten der physikalischen Größen an den Rändern unumgänglich. Dazu gehören vor allem die Abbrandgeschwindigkeiten.

Ein komplexeres Modell erfordert im Allgemeinen auch sehr detaillierte Randbedingungen, die dann auch als experimentelle Daten für die Modellvalidierung zu Verfügung stehen sollten.

5. Literatur

[Pleß, Seliger 1996]

Pleß, G.; Seliger, U.: Brandschutz bei recyclingfähigen Stoffen – Konzepte für Wertstoff-Zwischenlager des Dualen Systems Deutschland (DSD) und für Reifenlager aus der Sicht der mobilen Brandbekämpfung und Ableitung von Löschrategien, Institut der Feuerwehr Sachsen Anhalt, Heyrothsberge 1996

[Pleß, Seliger 2001]

Pleß, G.; Seliger, U.: Forschungsbericht Nr. 123/1: DSD – Brandschutz und Brandbekämpfung in Wertstofflagern, Teil 2: Zündung von Sprayflaschen, Selbstentzündung von Agglomerat aus der Mischfraktion, Brandentwicklung und Brandbekämpfung, Institut der Feuerwehr Sachsen Anhalt, Heyrothsberge Februar 2001

[Glawe 1996]

Glawe, M.: Untersuchung möglicher Brandflächen innerhalb von Brandabschnitten verschiedener Lager im Verhältnis zur Lagerfläche und Ableitung wesentlicher Bedingungen zur Ausbildung verdeckter Brände, Diplomarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Apparate- und Umwelttechnik, 1996

[Patankar 1980]

Patankar, S. V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere, Wasington, D.C., 1980

[Launder and Spalding 1972]

Launder, B. E., Spalding, D. B.: Lectures in Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, London, England, 1972

[Fluent 98]

FLUENT5 User's Guide Volume 1-4, Fluent Deutschland GmbH, July 1998

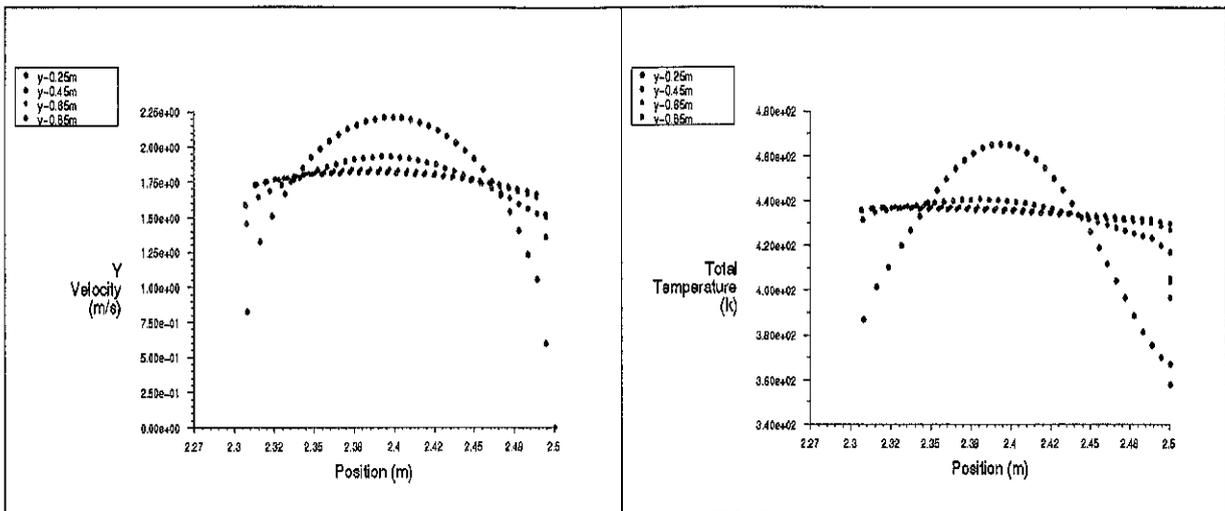
[Drysdale 1992]

Drysdale, D.: An Introduction of Fire Dynamics, John Wiley and Sons, Chichester, 1985, Repr. 1992

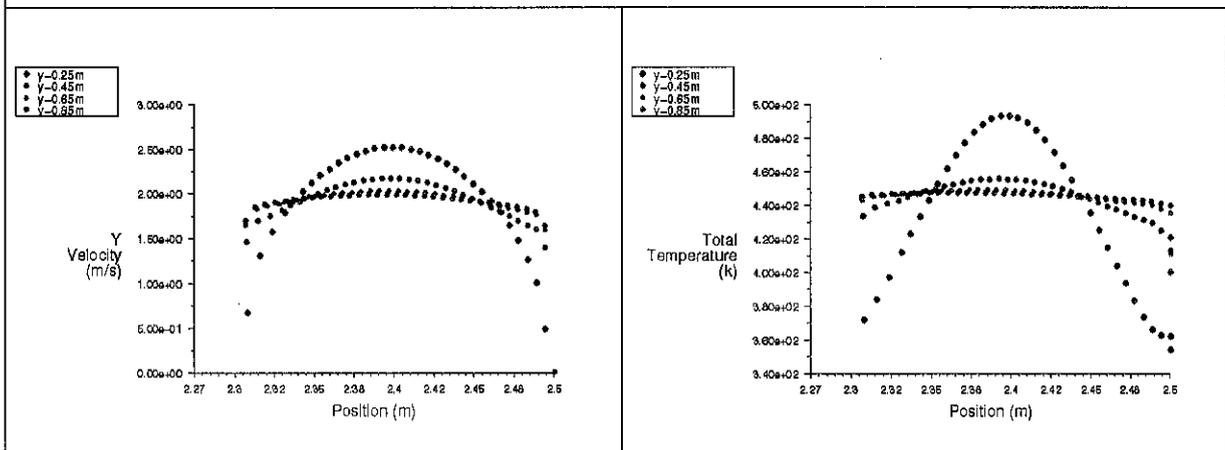
[Baschkirzew 1979]

Baschkirzew, M. P.: Brandschutz Aufgaben zur Wärmeübertragung, Staatsverlag der DDR, Berlin 1979

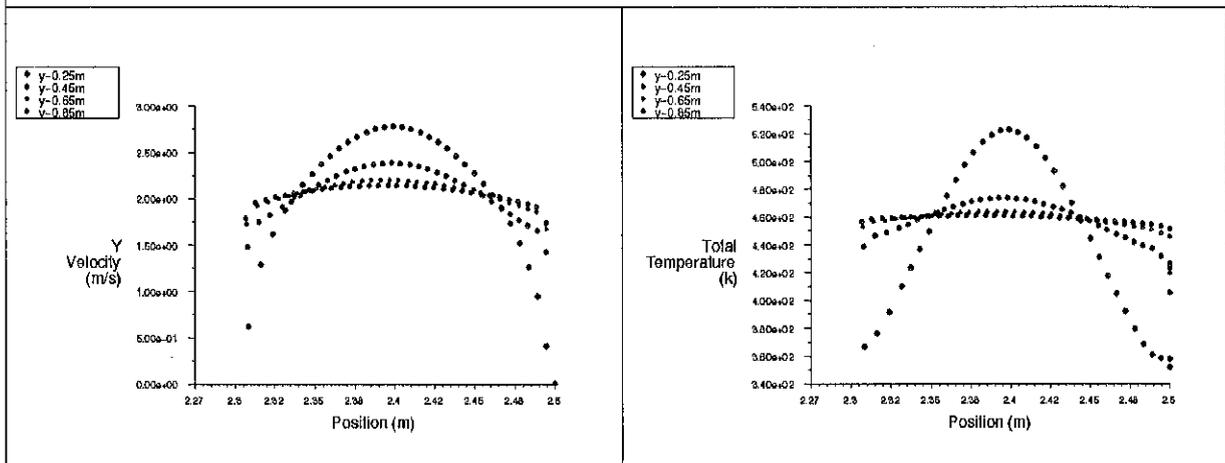
6. Anhang



Temperatur- und Geschwindigkeitsprofile nach 20s bei $\dot{m} = 0,01 \text{ kg/s}$ und $T=800\text{K}$



Temperatur- und Geschwindigkeitsprofile nach 20s bei $\dot{m} = 0,01 \text{ kg/s}$ und $T=1000\text{K}$



Temperatur- und Geschwindigkeitsprofile nach 20s bei $\dot{m} = 0,01 \text{ kg/s}$ und $T=1200\text{K}$

Bild 10: Temperatur und Geschwindigkeitsprofile im Spalt (Spaltbreite 20cm) für Parameterrechnungen B1, B2, B3

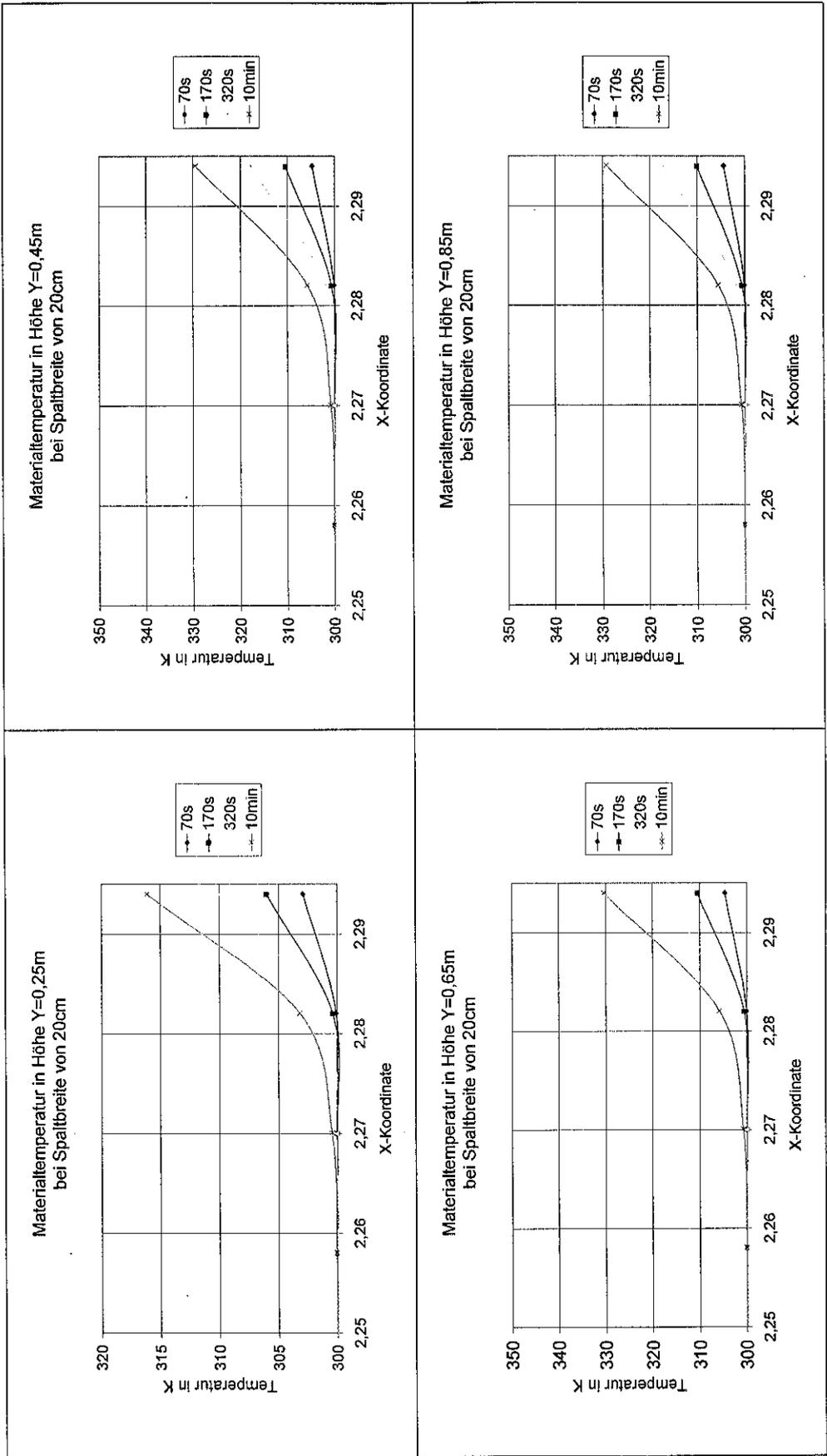


Bild 16: Materialtemperatur in den verschiedenen Höhen nach 70s, 170s, 320s und 10min bei Spaltbreite von 20cm

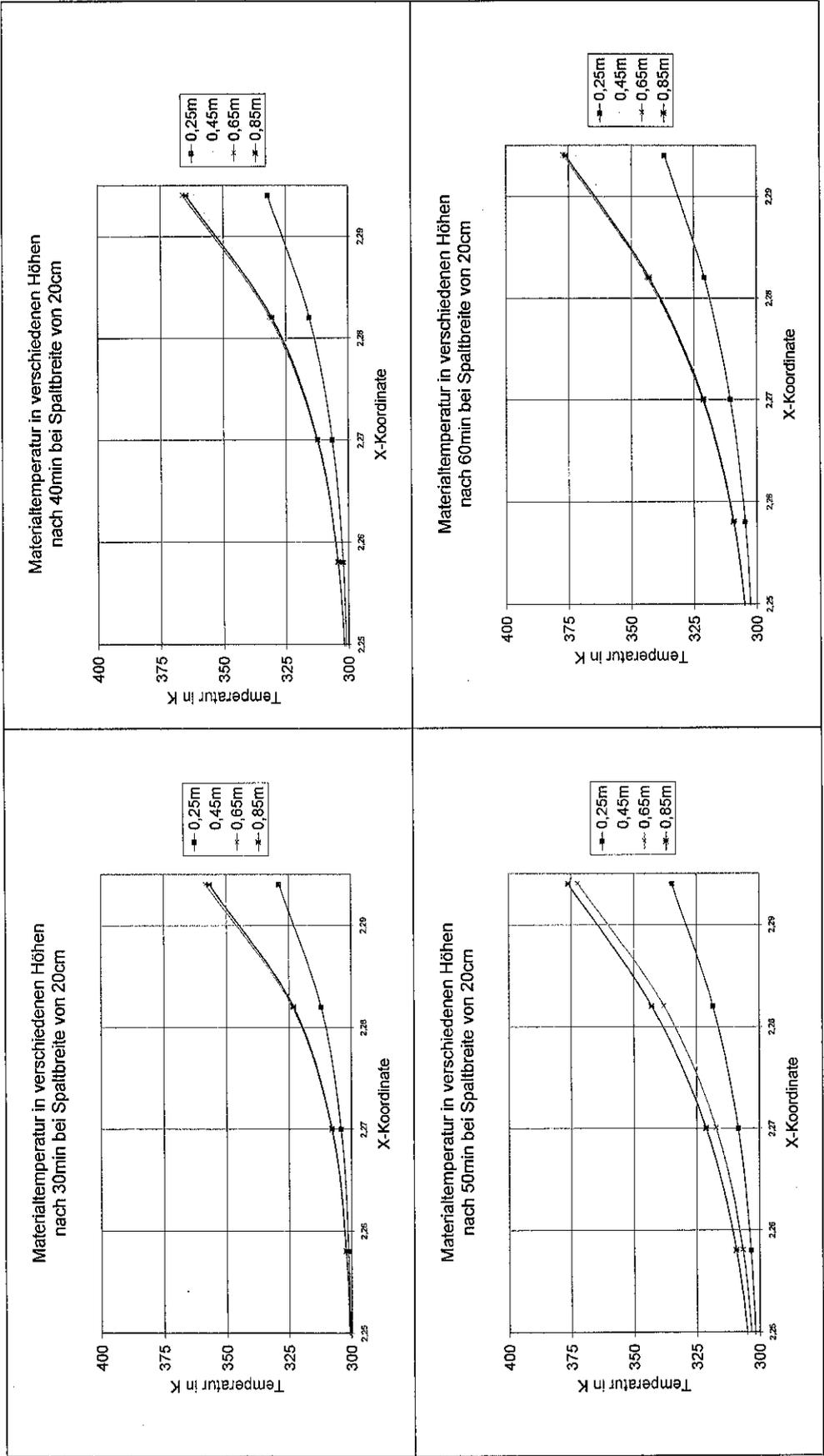


Bild 17: Materialtemperatur in den verschiedenen Höhen nach 30min, 40min, 50min, 60min bei 20cm Spaltbreite

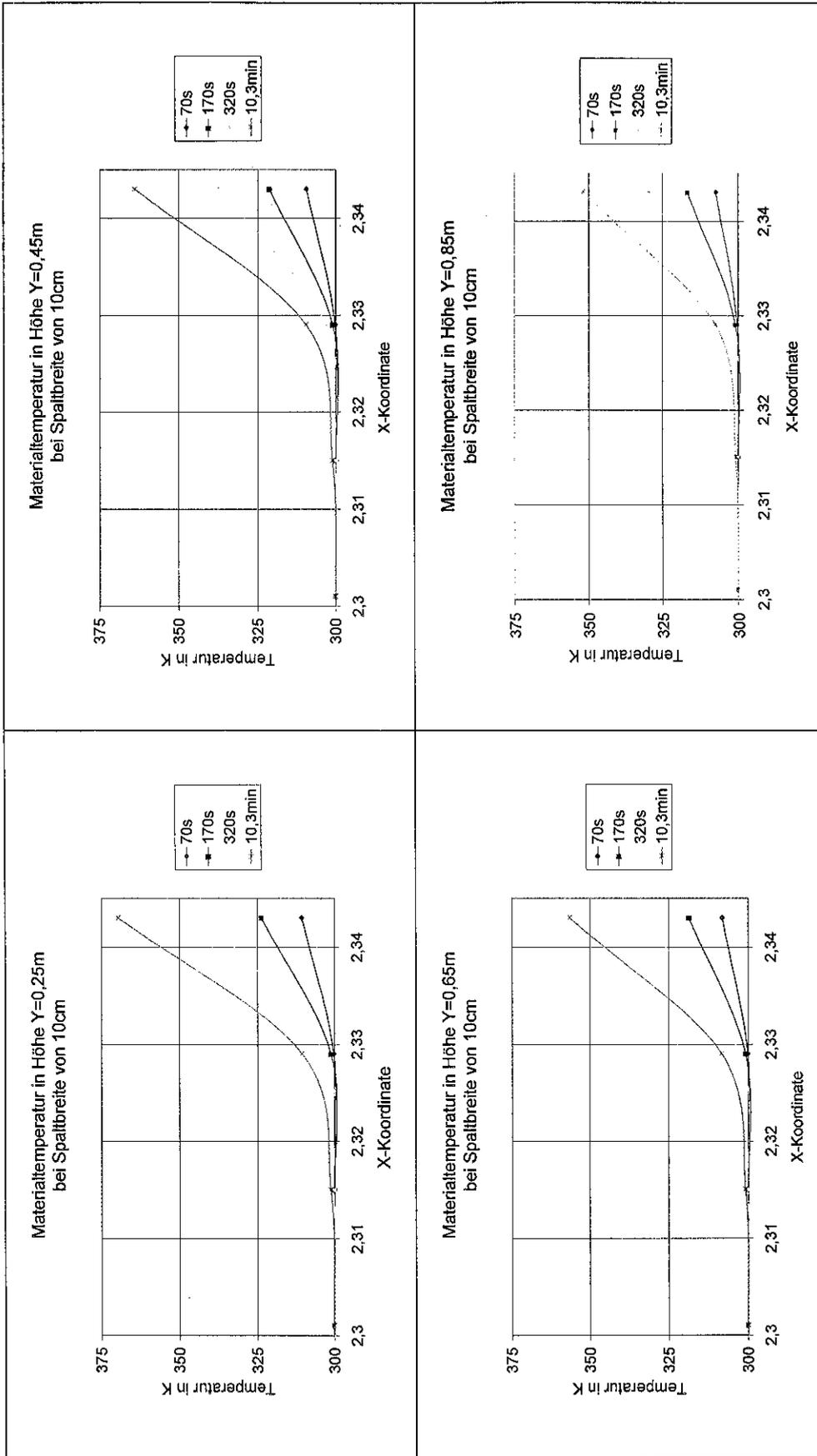


Bild 21: Materialtemperatur in den verschiedenen Höhen nach 70s, 170s, 320s und 10min bei Spaltbreite von 10cm

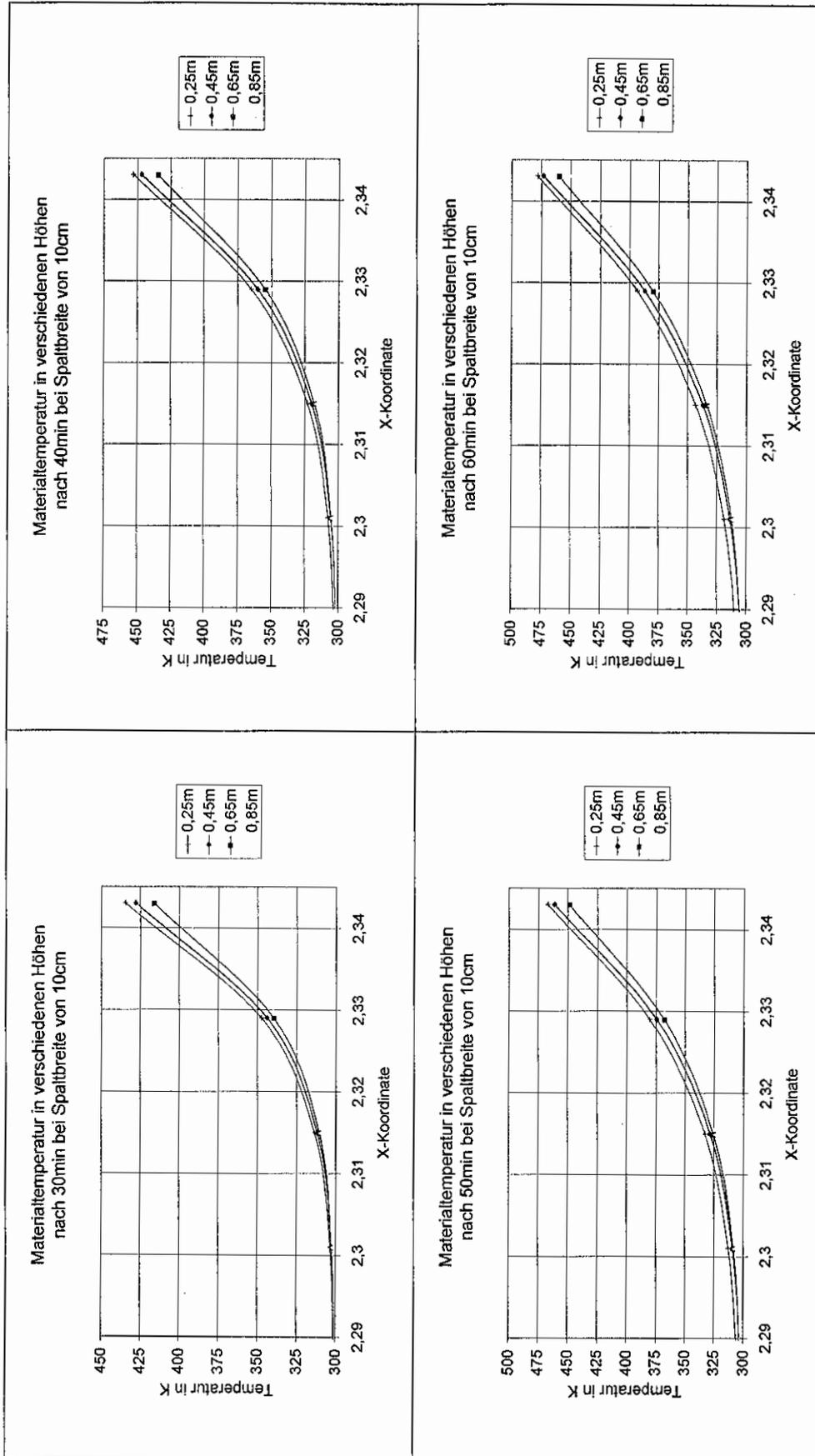


Bild 22: Materialtemperatur in den verschiedenen Höhen nach 30min, 40min, 50min, 60min bei 10cm Spaltbreite