

HVG-Mitteilung Nr. 2066

Untersuchung des Strahlungsverhaltens von Gas-Luft-Flammen durch das GWI durch numerische Simulation sowie Umsetzung der Ergebnisse am GWI Versuchsofen im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens Nr. 80 ZN „Spektral“

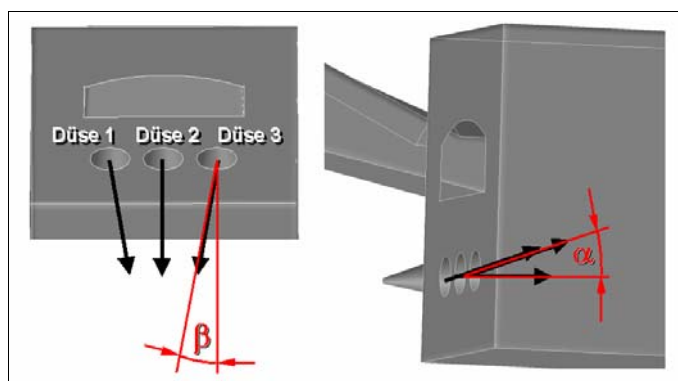
Teil 2: Optimierung des direkten Wärmetransportes von der Flamme ins Glasbad mit bestehenden Brennersystemen

A. Scherello, A. Giese, M. Kösters, Gaswärme-Institut, Essen

Aufbauend auf den in Teil 1 "Ergebnisse erster Untersuchungen am GWI" veröffentlichten Resultaten wurde beschlossen, zu versuchen, ein bestehendes Brennersystem in Underport-Bauweise so zu modifizieren, dass durch eine Umsetzung eine Verbesserung der direkten Wärmeübertragung auf das Glasbad erzielt werden kann. Die modifizierten Underportsysteme sollten zunächst am Beispiel der GWI-Versuchsbrennkammer numerisch simuliert werden, um dann im Anschluss mittels einer weiteren Versuchsreihe die mathematische Modellierung zu bestätigen.

Ziel der Berechnungen war, Varianten zu finden, die eine langgestreckte Verbrennungszone aufweisen. Dadurch sollte erreicht werden, dass bei U-Flammenwannen im Bereich des blanken Glasspiegels – also am Quellpunkt der Glasbadströmung – verstärkt Flammenstrahlung durch CO_2 , H_2O und Ruß in das Glasbad übertragen wird. Zur Realisierung dieses verlängerten Ausbrands wurde das sogenannte "Unterschießen" als geeignet ausgewählt. Dabei werden die Brennstoffstrahlen der drei Brennerlanzen derart zueinander ausgerichtet, dass einer oder mehrere Brennstoffjets von der Luftzufuhr über den Brennerhals abgeschirmt werden. Dadurch kommt es zu einer verzögerten Mischung, einer zusätzlichen lokalen Rußentstehung mit den damit verbundenen Vorteilen der Wärmeübertragung und einer verlängerten Ausbrandzone.

Ergebnisse



In Tabelle 1 sind die Einstellungen der einzelnen Brennerlanzen für die Unterschießvarianten aufgeführt. Hierin bedeuten α und β die Einstellwinkel der Lanzen entsprechend Bild 11, w die Brennstoffgeschwindigkeit in [m/s] und V den Brennstoffanteil in [Vol.-%].

Bild 11: Einstellwinkel der Brennerlanzen

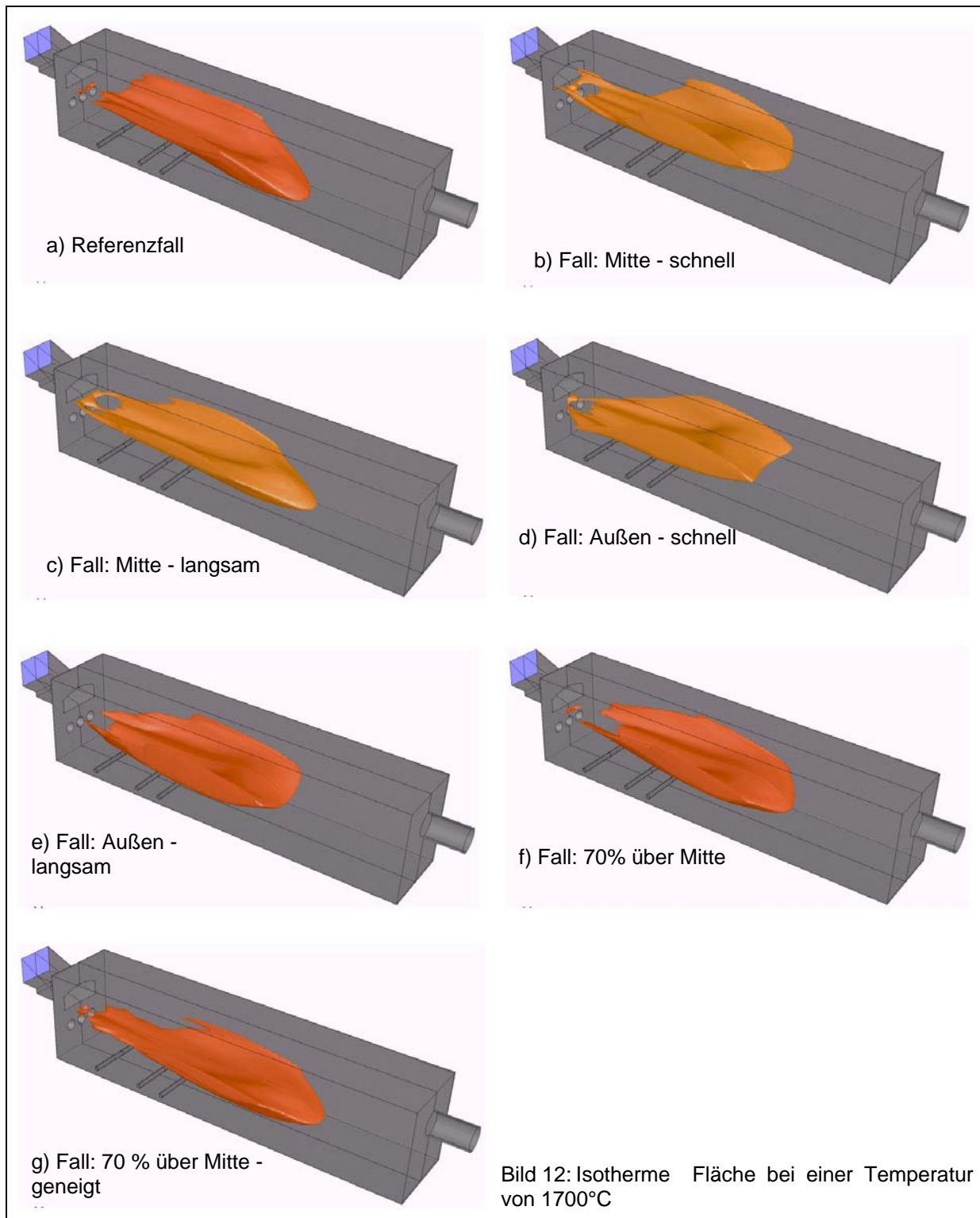
Unterschießvariante		Düse 1				Düse 2				Düse 3			
		α	β	w	V	α	β	w	V	α	β	w	V
a	Referenzfall	12 °	0 °	40	33	12 °	0 °	40	33	12 °	0 °	40	33
b	Mitte – Schnell	12 °	5 °	40	33	0 °	0 °	80	33	12 °	5 °	40	33
c	Mitte – Langsam	12 °	5 °	40	33	0 °	0 °	20	33	12 °	5 °	40	33
d	Außen – Schnell	0 °	5 °	40	33	12 °	0 °	80	33	0 °	5 °	40	33
e	Außen – Langsam	0 °	5 °	40	33	12 °	0 °	20	33	0 °	5 °	40	33
f	70 % über Mitte	12 °	0 °	40	15	12 °	0 °	25	70	12 °	0 °	40	15
g	70 % über Mitte – geneigt	12 °	5 °	40	15	0 °	0 °	25	70	12 °	5 °	40	15

Tab. 1: Einstellungen der Unterschießvarianten

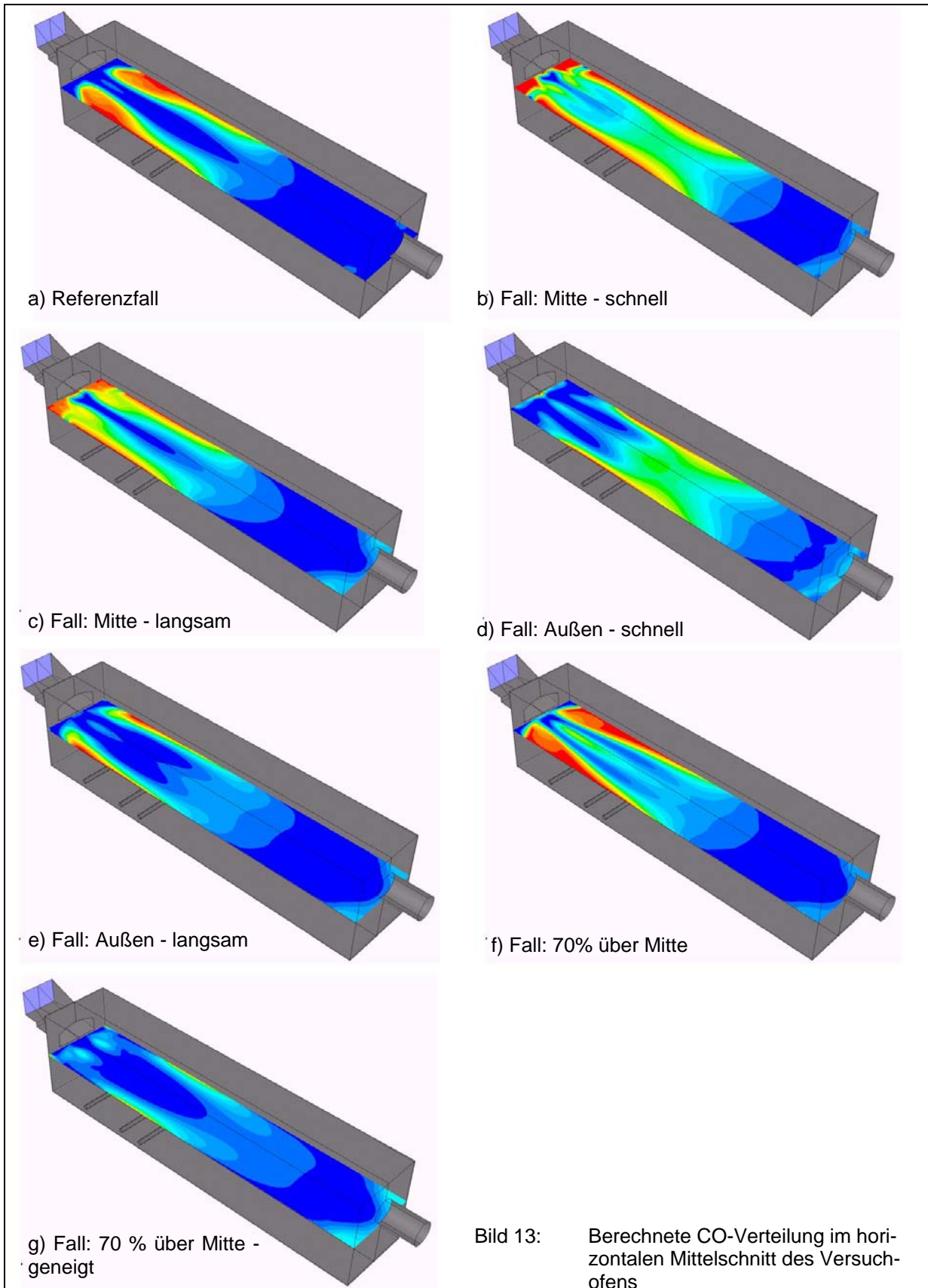
Untersuchung des Strahlungsverhaltens von Gas-Luft-Flammen

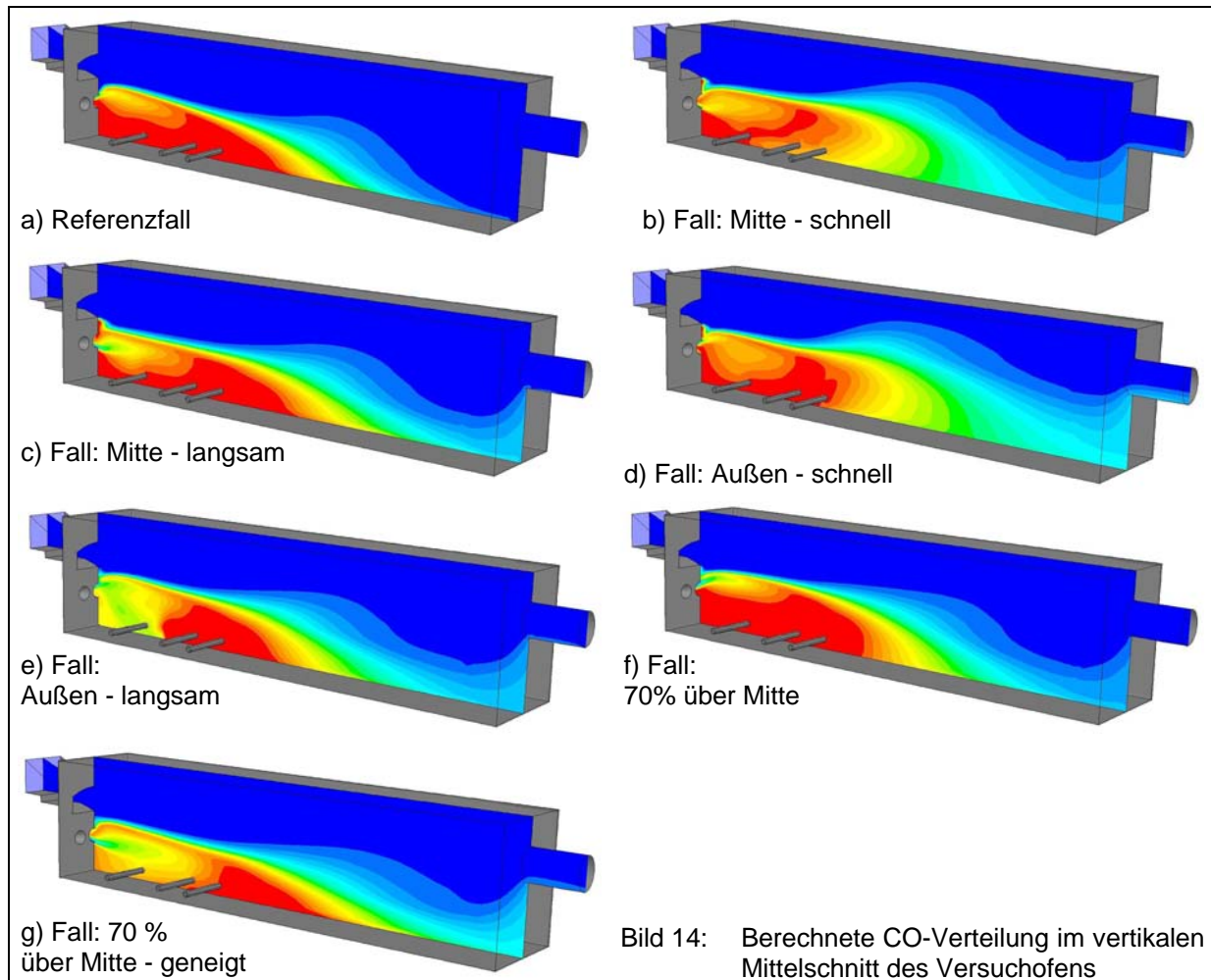
Die Ergebnisse der Simulationen sind in den Bildern 12 bis 16 dargestellt. Bild 12 zeigt die Fläche konstanter Temperatur bei 1700°C im Ofenraum.

Anhand dieser Bilder ist zu erkennen, dass durch die verschiedenen Winkel- und Geschwindigkeits-einstellungen der Brennerlanzen ein deutlicher Einfluss auf die CO-Verteilung, die Flammenlage und -form genommen werden kann.



Die Isothermen aus Bild 12 spiegeln die Lage der Flamme der einzelnen Verbrennungsfälle wider. Bei einigen Fällen beginnt die Reaktion sehr nah am Brennerport, was auf eine frühe Mischung schließen lässt. Parallel dazu weisen die meisten dieser Fälle kürzere Temperaturzonen auf. Außerdem treten einige Fälle (b und d) auf, bei denen die Flammenlage steiler nach oben – also von einem fiktiven Glasbad weg – ausgerichtet ist.



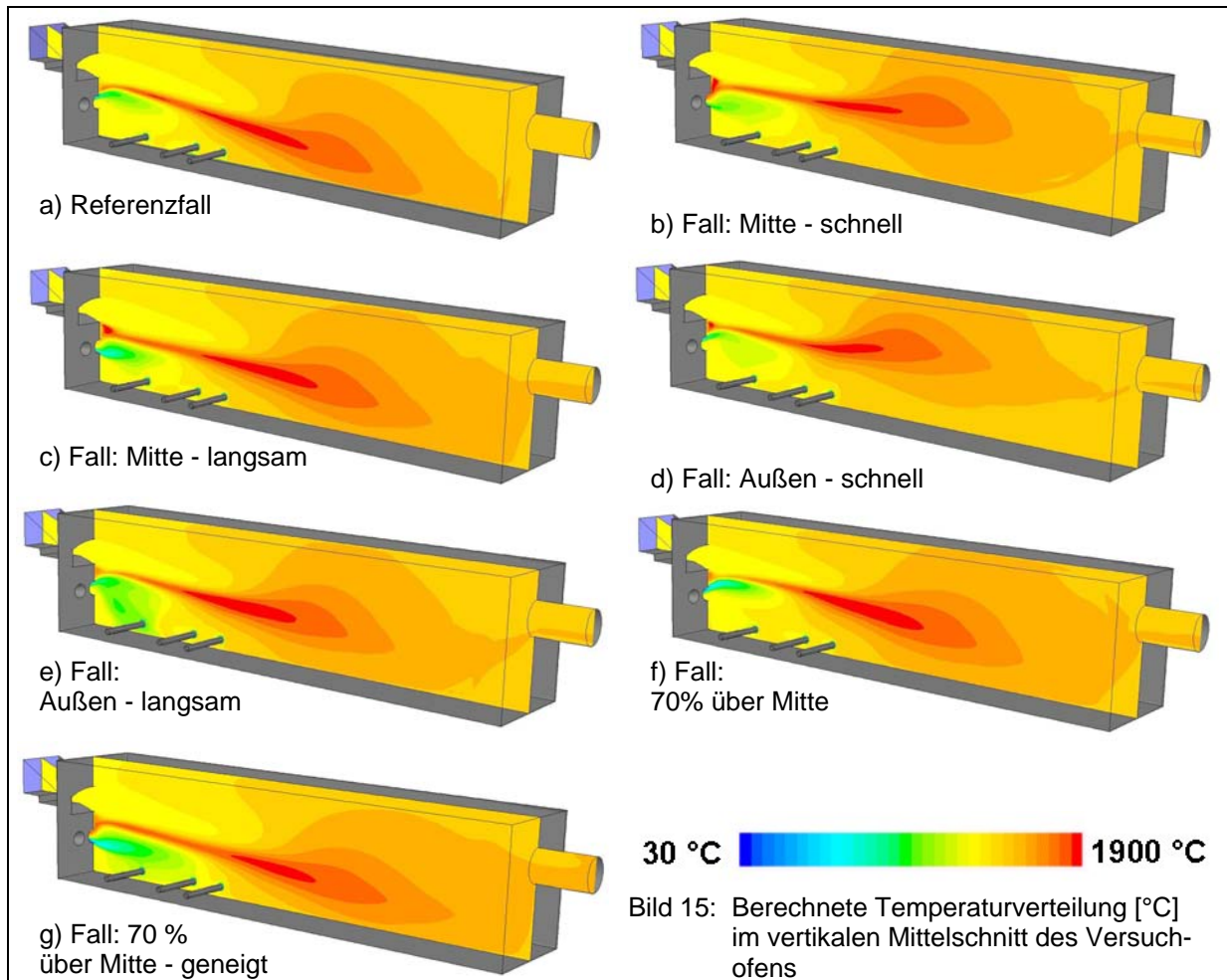


Zur genaueren Betrachtung werden in den Abbildungen 13 bis 16 die berechneten CO- und Temperaturverteilungen in der waagerechten und senkrechten Mittelebene des Versuchsofens dargestellt. Die CO-Verteilung wurde unter anderem deshalb zur Bewertung der Flammen herangezogen, weil CO in Kombination mit der Sauerstoff- und Temperaturverteilung als unverbrannte Komponente Hinweise auf die Lage einer möglichen Rußbildung geben kann. Danach lässt lediglich Fall g): "70 % über Mitte – geneigt" auf eine verzögerte und in Längsrichtung verschobene Reaktion schließen, da hier erst nach den die Wärmesenke simulierenden Kühlrohren die Zone der hohen CO-Konzentrationen beginnt.

Auch die in Bild 15 dargestellten Temperaturen zeigen für "Fall g): 70 % über Mitte – geneigt" eine langgestreckte und flach verlaufende Verteilung. Im Gegensatz zu den Fällen b) und d) liegen die Zonen höchster Temperatur bei den anderen Fällen zum Boden des Versuchsofens hin geneigt. Dabei weist Fall g) die kleinste Fläche der Hochtemperaturzone ($> 1900\text{ °C}$) auf, was auf geringere NO_x -Werte schließen lässt.

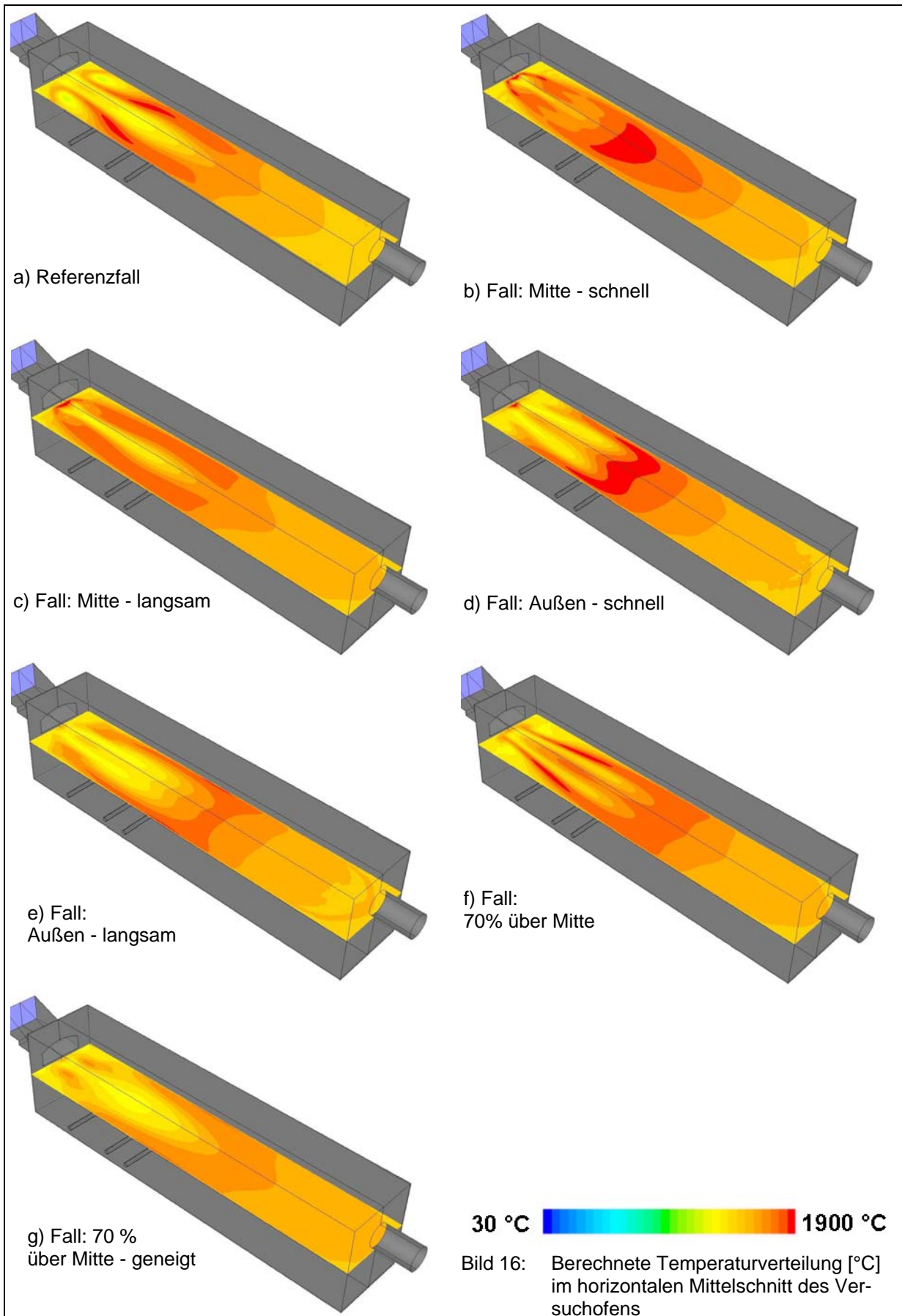
Ähnliche Rückschlüsse liefern auch die horizontalen Temperaturverteilungsebenen aus Bild 16. Hier werden bei den Fällen b) und d) die höchsten Temperaturen festgestellt. Für Fall g) wird die gleichmäßigste Verteilung mit einem sich erst relativ spät entwickelnden Maximum berechnet.

Den Ergebnissen der numerischen Simulation folgend wurden in einer weiteren Versuchskampagne die Fälle c), f) und g) experimentell untersucht. In Bild 17 sind die gemessenen Temperaturverteilungen in der horizontalen Mittelebene der genannten Fälle sowie die des Referenzfalles dargestellt. Zur Übersichtlichkeit wurden die Bezeichnungen a), c), f) und g) beibehalten. Im Vergleich mit den numerisch simulierten Verteilungen aus Bild 16 werden Abweichungen bei den Spitzentemperaturen in der Hauptverbrennungszone, aber auch Übereinstimmungen bezüglich der Temperaturverläufe und der Temperaturniveaus festgestellt.



So weisen Messung und Berechnung für den Referenzfall a) eine sich in Strömungsrichtung erweiternde Senke in der Mitte der Hauptreaktionszone auf, deren Konturen gut wieder gegeben werden. Darüber hinaus stimmen die Temperaturen am Ofenaustritt miteinander überein. Dies gilt auch für Fall c). Hier werden auch das Temperaturniveau am hinteren Brennkammerende und die Lage der Hauptflamme zutreffend berechnet. Der schmale Streifen kleinerer Temperaturen in der Mitte der Flamme konnte jedoch messtechnisch nicht erfasst werden. Dies trifft ebenfalls auf Fall f) zu. Die im Falle der numerischen Simulation berechneten schmalen Bereiche mit starken Temperaturgradienten lassen sich experimentell nicht nachweisen, da die starken turbulenten instationären Schwankungen in den stationären Simulationen nicht erfasst werden; Form und Niveau der Temperaturverteilung weisen allerdings gleiche Tendenzen und weitestgehende Übereinstimmung auf. Dies gilt besonders für Fall g). Wie bereits numerisch simuliert, lässt sich hier experimentell ebenfalls eine sehr flache Temperaturverteilung feststellen, die sowohl auf eine verzögerte Vermischung, eine gleichmäßigere Wärmefreisetzung und Übertragung sowie geringere NO_x -Emissionen schließen lässt.

Dies wird durch die in Bild 18 dargestellten NO_x -Messwerte bestätigt. Fall a), c) und f) weisen ähnliche NO_x -Verteilungen auf. Einzig bei Fall g) werden analog zu den niedrigeren Temperaturen die geringsten NO_x -Werte erreicht.



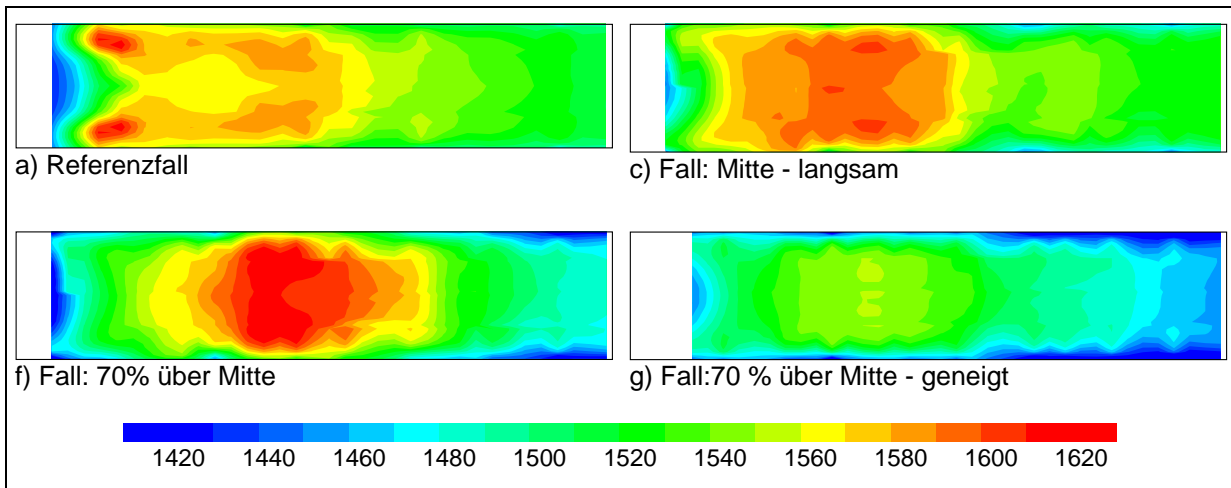


Bild 17: Messtechnisch erfasste Temperaturverteilung [°C] im horizontalen Mittelschnitt des Versuchofens

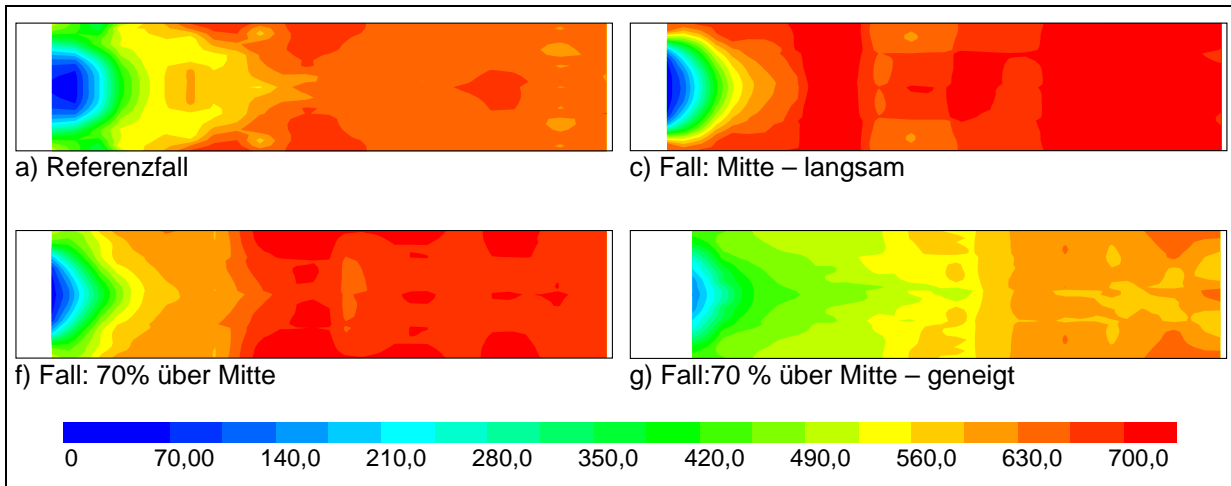


Bild 18: Messtechnisch erfasste NO_x-Verteilung [ppm] im horizontalen Mittelschnitt des Versuchofens

In Tabelle 2 sind die Abgasmesswerte der Versuche aufgelistet. Es wird deutlich, dass die Varianten der Fälle c), f) und g) hinsichtlich NO_x eine Verbesserung gegenüber dem Referenzfall darstellen. Dessen höherer NO_x-Wert kann nur teilweise mit einer leicht höheren Luftzahl begründet werden. Auch in Bezug auf den Ausbrand sind mit den hier betrachteten Varianten keine Nachteile verbunden. Die im Vergleich zu Glasschmelzwannen höheren NO_x-Emissionswerte beruhen auf der erhöhten volumenspezifischen Feuerraumbelastung der GWI-Brennkammer sowie einer strömungstechnisch ungünstigeren Situation der internen Rezirkulation von Abgas.

Unterschießvariante		O ₂	CO	NO _x	
		[Vol.-%]	[ppm]	[ppm]	[mg/Nm ³ , 8 %]
a	Referenzfall	2,70	6	923	1344
c	Mitte – Langsam	2,02	52	642	901
f	70 % über Mitte	2,19	22	666	944
g	70 % über Mitte – geneigt	1,97	26	548	767

Tab. 2: Abgasmesswerte der Versuche

Weiteres Vorgehen

Basierend auf der Vergleichbarkeit zwischen numerischen Ergebnissen und experimentell ermittelten Werten wird zunächst Variante g) mittels numerischer Simulation auf den Fall einer in Betrieb befindliche Glasschmelzwanne übertragen. Die Ergebnisse dieser Simulation werden den Kollegen der TNO zur Verfügung gestellt, die eine gekoppelte Simulation für Oberofen und Schmelze durchführen. Dabei wird bei der Strahlungswärmeübertragung die Unterteilung in mehrere spektrale Banden vorgenommen, um auch die Einstrahlung in tiefere Glasbadschichten zu berücksichtigen.

Parallel dazu werden die Erkenntnisse an der ausgesuchten Glasschmelzwanne umgesetzt und durch die Projektpartner – speziell durch Einsatz eines Spektralradiometers durch HVG – messtechnisch begleitet.



Die Forschungsarbeiten wurden mit der freundlichen Unterstützung der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF), Köln, (AiF-Nr.: 80ZN) und der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG), Offenbach am Main, durchgeführt. Finanziert wurde das Projekt mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit, Berlin. Wir danken allen genannten Institutionen.