

Ständige Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder, Arbeitskreis V
Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 152

ENTWICKLUNG VON KOHLENMONOXID BEI BRÄNDEN IN RÄUMEN

TEIL 2

von

Dr. rer. nat. Georg Pleß (Projektleiter)

Dipl.-Chem. Ursula Seliger

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt

Heyrothsberge

März 2008

BERICHTS-KENNBLETT

| | | | | |
|--|------------------|--|--------------------------|-----------------|
| Nummer des Berichtes: 152 | | Titel des Berichtes: Entwicklung von Kohlenmonoxid bei Bränden in Räumen | | ISSN: 0170-0060 |
| Autoren: Dr. rer. nat. Georg Pleß Dipl.-Chem. Ursula Seliger | | durchführende Institution: Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt Biederitzer Straße 5 D-39175 Heyrothsberge Direktor: Prof. Dr. rer. nat. habil. Reinhard Grabski | | |
| Nummer des Auftrages: 48 (1/2005)H | | auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder, Arbeitskreis V – Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung | | |
| Datum des Berichtes: 18.03.2008 | | | | |
| Seitenzahl: 81 | Bilder: *) 62 | Tabellen: 7 | Literaturverweise: 22 | |
| <p>Kurzfassung:</p> <p>Die Bildung von Kohlenmonoxid bei Bränden ist eine der wesentlichen Ursachen der Gefährdungen, die für beteiligte Personen auftreten können. Der Hauptanteil aller Brandopfer ist der Inhalation von toxischem Brandrauch geschuldet. Entsprechend der Aufgabenstellung wurden in einer mit Propangas befeuerten Versuchskammer, die mit entsprechender Messtechnik ausgestattet wurde, analytische Untersuchungen der Rauchgasschichten im Brandraum sowie in einem angrenzenden Raum durchgeführt. Zu untersuchen war speziell die Bildung von Kohlenmonoxid bei Variation der Energiefreisetzungsrate und der Breite der Türöffnung des Brandraumes in Abhängigkeit von den sich mit Brandverlauf einstellenden Randbedingungen Ventilation und Temperatur. Der Schwerpunkt der Untersuchungen war auf die Kohlenmonoxidbildung während der Brandentwicklungsphase ausgerichtet. Die Brandentwicklungsphase wurde in Anlehnung an die Temperaturkurven von Designfeuern mit quadratisch zur Zeit aufwachsender Energiefreisetzungsrate gestaltet und konnte durch eine programmierbare Propangasteuerung erreicht werden. Auf der Basis von Druckdifferenzmessungen in der Türöffnung des Brandraumes wurde versucht, die Ventilation des Raumes zu berechnen. Weiterhin wurde der Massestrom an Rauchgas und der darin enthaltenen Gase Kohlenmonoxid und Kohlendioxid vom Brandraum in den angrenzenden Raum berechnet. Es wurde die Entwicklung der Gaskonzentrationsprofile im Brandraum und dem angrenzenden Raum dargestellt. Diese bildeten die Grundlage für Berechnungen nach der Fractional-Effective-Dose-Methode für Ableitungen von Zeitintervallen, die für die Selbstrettung und Rettung verfügbar sind und somit für die Bewertung von Überlebenschancen von Personen in Brand- oder angrenzenden Räumen.</p> | | | | |
| <p>Schlagwörter:</p> <p>Brandversuche, Raumbrand, Kohlenmonoxid, Brandrauch, Toxizität, Temperatur, Gaskonzentration, Ventilation</p> | | | | |

*) Farbseiteninformationen des Forschungsberichtes auf CD-ROM können bei Kostenerstattung von 5 € beim Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Biederitzer Str. 5, 39175 Heyrothsberge, abgefordert werden.

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Einleitung | 4 |
| 2 | Versuche am Idf LSA | 4 |
| 2.1 | Versuchsaufbau | 4 |
| 2.2 | Verarbeitung der Messdaten..... | 8 |
| 2.2.1 | Ventilation | 8 |
| 2.2.2 | Rauchgasinhaltsstoffe und deren Yields | 10 |
| 2.3 | Versuchsdurchführung..... | 12 |
| 2.4 | Versuchsergebnisse | 13 |
| 2.4.1 | Theoretische Energiefreisetzungsrate | 13 |
| 2.4.2 | Messwerte in der Startphase | 13 |
| 2.4.3 | Untersuchung des vertikalen Konzentrationsprofils im Brandraum | 14 |
| 2.4.4 | Untersuchung des vertikalen Konzentrationsprofils im Flur..... | 43 |
| 2.4.5 | Untersuchung des horizontalen Konzentrationsprofils im Flur | 62 |
| 2.4.6 | Volumen- und Massenströme | 69 |
| 2.4.7 | CO- und CO ₂ -Yields..... | 70 |
| 2.4.8 | Bewertung der Ergebnisse nach dem FED-Konzept | 71 |
| 3 | Zusammenfassung und Schlussfolgerungen | 76 |
| 4 | Literatur | 78 |

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLIK

| Abkürzung | Erläuterung |
|------------------|---|
| A | - Aktivität |
| Abb | - Abbildung |
| COHb | - Carboxihämoglobin |
| dry | - trocken (ohne Wasseranteil im Gas) |
| FED | - Fractional Effective Dose |
| GER | - Globales Äquivalenzverhältnis |
| HB | - Hauptbrenner |
| HRR | - Heat Release Rate (Wärmefreisetzungsrate) |
| HU | - Handlungsunfähigkeit |
| IdF LSA | - Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt |
| kW | - Kilowatt |
| l | - Liter |
| L | - Leistung |
| min | - Minute |
| Min | - Minute |
| ml | - Milliliter |
| n | - normiert |
| NDIR | - nichtdispersive Infrarotspektroskopie |
| ppm | - Parts per Million |
| R | - Ruhe |
| s | - Sekunde |
| wet | - nass (mit Wasseranteil im Gas) |
| Zünd | - Zündung |

| Symbol | Erläuterung |
|-------------------------------|--|
| A | - Fläche der Ventilationsöffnung |
| b | - Türöffnungsbreite |
| c | - Molverhältnis |
| C | - Kohlenstoff |
| C ₃ H ₈ | - Propan |
| CO | - Kohlenmonoxid |
| CO ₂ | - Kohlendioxid |
| Δ | - Differenz |
| F | - Fractional Effective Dose (effektive Teildosis) |
| f(Re) | - von der Reynoldszahl abhängiger Korrekturfaktor (1,08-1,3) |
| h | - Höhe |
| H ₂ O | - Wasser, Wasserdampf |
| HC | - Hydrocarbon (Kohlenwasserstoff) |
| HCN | - Cyanwasserstoff, Blausäure |

| | | |
|----------------|---|--|
| i | - | Index für Stoff-Spezies |
| K | - | Grad Kelvin |
| K | - | Faktor $0,52 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^{5/2}$ |
| k_i | - | Geschwindigkeitsprofilkorrekturfaktor |
| k_p | - | Formfaktor für bidirektionale Sonde |
| m | - | Masse |
| \dot{m} | - | Massestrom |
| N_2 | - | Stickstoff |
| O_2 | - | Sauerstoff |
| P | - | Position |
| q | - | Strahlungsfluss kW/m^2 |
| \dot{Q} | - | Energiefreisetzungsrate |
| Re | - | Reynoldszahl |
| ρ | - | Gasdichte |
| ρ_0 | - | Gasdichte bei 0°C bzw. 273 K |
| t | - | Zeit |
| t_0 | - | Inkubationszeit zwischen Zündung und Beginn der Brandentwicklung |
| T | - | Temperatur |
| T_0 | - | Temperatur bei 0°C bzw. 273 K |
| v | - | Gasgeschwindigkeit |
| V | - | Volumen |
| \dot{V} | - | Volumenstrom |
| W | - | Watt |
| X | - | Molenbruch |
| Y | - | Yield |
| α_f | - | Brandwachstumskoeffizient |
| Φ | - | Äquivalenzverhältnis |
| Indices | - | Erläuterung |
| air | - | Luft |
| comp | - | Compartment, Raum |
| fuel | - | Brennstoff |
| in | - | rein, hinein |
| n | - | neutrale Zone |
| out | - | raus, hinaus |
| stöch | - | stöchiometrisch |
| t | - | Tür |
| 0 | - | Nullniveau, Bodenniveau |

1 EINLEITUNG

Im ersten Teil des Forschungsprojektes wurde anhand einer Literaturlauswertung gezeigt, dass die Bildung von Kohlenmonoxid bei Bränden einer der wesentlichen Faktoren der Gefährdungen ist, die für beteiligte Personen auftreten können. Der Hauptanteil aller Brandopfer ist der Inhalation von toxischem Brandrauch geschuldet. Diese Opfer werden nicht nur im Brandraum aufgefunden. Auf Grund der Ausbreitung des Brandrauches erleiden auch Personen tödliche Expositionen, die sich in entfernteren Räumen im Abzugsbereich des Rauches befinden.

Kohlenmonoxid ist aber auch mitverantwortlich für die Ausbreitung von Bränden über den Brandraum hinaus infolge von Nach- und Durchzündungen in der Gasphase, wodurch die Sicherheit von Einsatzkräften gefährdet wird. Es ist somit für die Brandbekämpfung ein unbedingtes Erfordernis, die Zusammensetzung der Rauchgase im Raum abhängig von der Zeit der Brandentwicklung, der Raumtemperaturen und der Belüftungsbedingungen zu kennen, um spezielle Entwicklungsstadien des Brandes, wie Flammenüberschläge mit anschließendem dauerhaften Brennen aller brennbaren Stoffe im Raum (Flashover) oder Durchzündungen von Gasen (Backdraft) im Raum rechtzeitig abschätzen zu können.

Die Untersuchung der Bildung und Verteilung von Kohlenmonoxid bei Raumbränden erfordert die Untersuchung des Brandes in seiner Gesamtheit. Dazu zählen eine umfassende analytische Bewertung der Gasphase sowie die Aufnahme von Randbedingungen wie Ventilation und Temperaturen.

Gemäß der Aufgabenstellung im ersten Teil des Forschungsprojektes wurde eine Literaturlauswertung vorgenommen, die vor allem Themen wie Brandstatistik, Toxizität von Brandrauch und Untersuchungen des Bildungsmechanismus und der räumlichen Verteilung von Kohlenmonoxid umfasste, sowie eine mit Propangas betriebene Versuchskammer aufgebaut, die mit entsprechender Messtechnik ausgestattet wurde. Die ersten orientierenden Versuche zielten darauf ab, die Bildung von Kohlenmonoxid in Abhängigkeit von den sich in einer stationären Brandphase einstellenden Randbedingungen Ventilation und Temperaturen zu untersuchen. Bei diesen Versuchen wurde über die Versuchszeit mit einer jeweils konstanten Brandlast gearbeitet. Im aktuellen Teil des Forschungsprojektes standen die Untersuchungen zur Ausbildung einer Rauchgasschicht, deren Zusammensetzung und hier besonders die Bildung von Kohlenmonoxid, sowie die Raumtemperaturen im Brandraum und einem angrenzenden Raum (Flur genannt) vor allem während der Brandentwicklungsphase im Brennpunkt des Interesses.

2 VERSUCHE AM IDF LSA

Für die Untersuchungen wurde der bei [Pleiß, Seliger 2007] dargestellte Versuchsaufbau (Brenner, Brandraum und Flur wie in den Abbildungen 38 und 39 gezeigt) benutzt und entsprechend der Aufgabenstellung verändert. Im Folgenden werden nur die Dinge beschrieben, an denen Veränderungen vorgenommen wurden.

2.1 Versuchsaufbau

Während für den ersten Teil des Forschungsprojektes nur mit dem Brandraum allein gearbeitet wurde, erhielt dieser nun Anschluss an den Flur. Einen Überblick zur Anordnung der Räume sowie der Installation der Messtechnik vermitteln die Skizze in Abbildung 1 und Fotos in Abbildung 2.

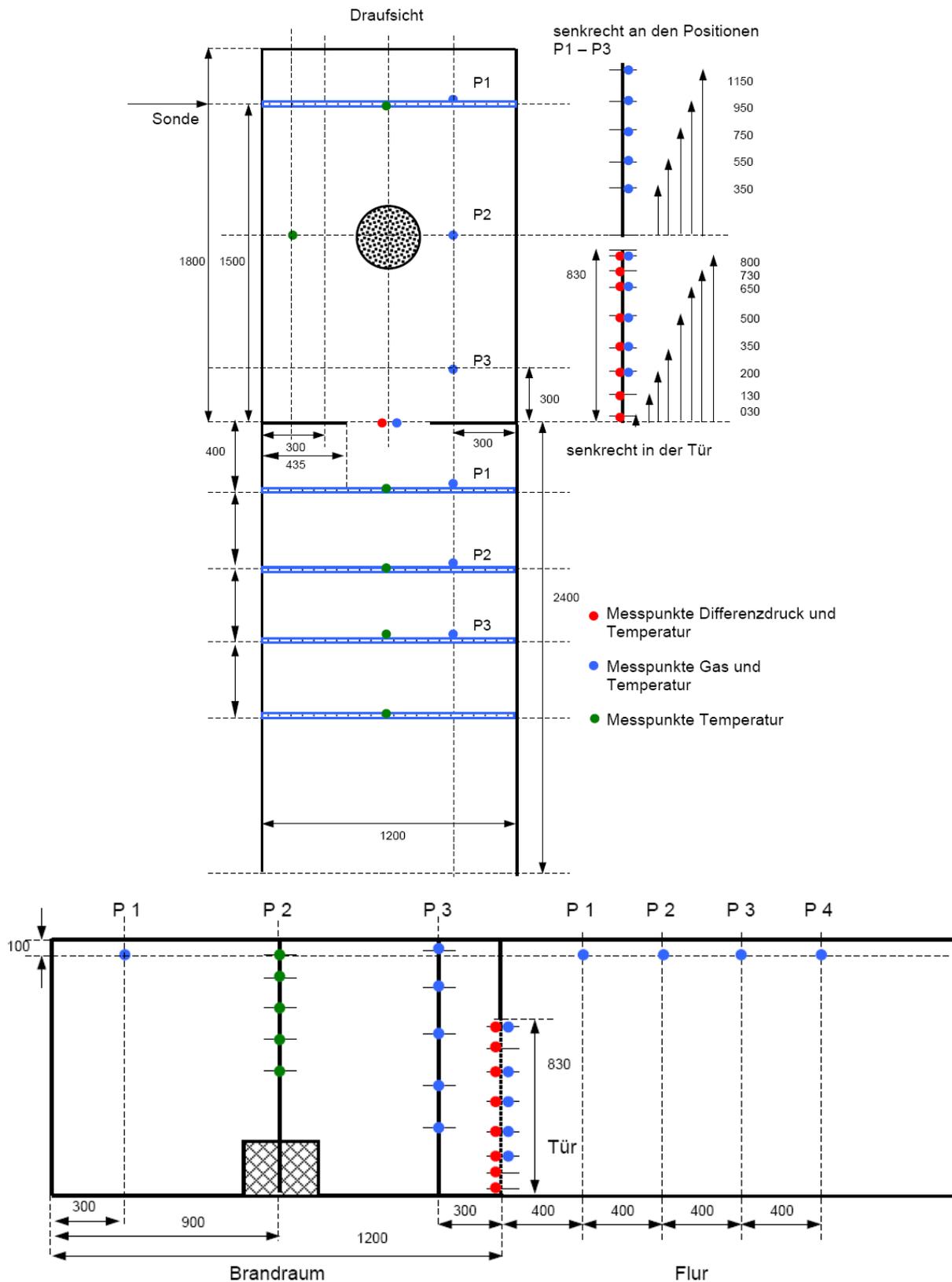


Abb. 1: Skizze der Messanordnung mit den Positionen der bidirektionalen Sonden, Thermoelemente und Gasprobenahmestellen



Abb. 2: Versuchseinrichtung mit Brandraum und Flur

Für die Auskleidung des Brandraumes musste ein anderes Material gefunden werden, da das bei [Pleiß, Seliger 2007] beschriebene Produkt nicht mehr auf dem Markt erhältlich war. Als geeigneter Ersatz mit ähnlichen Materialeigenschaften wurden Brandschutzbauplatten aus Pyrobor 600 der Firma Foseco eingeschätzt und verwendet.

Die Erkenntnisse zur Bildung von Kohlenmonoxid bei Raumbränden wurden vor allem aus Untersuchungen von stationären Brandphasen gewonnen. Für die Bewertung einer Gefährdung von Personen und Einsatzkräften beispielsweise nach dem FED-Konzept ist die Einbeziehung der Brandentwicklungsphase unerlässlich. In Abbildung 3 ist ein von [Blume 2003] gezeigter charakteristischer Brandverlauf nach [Twilt et al. 1997] dargestellt.

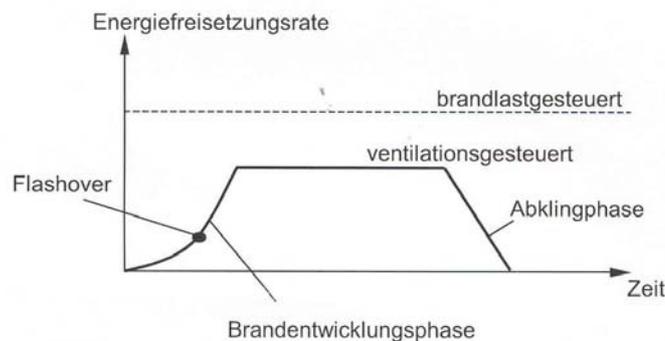


Abb. 3: Charakteristischer zeitlicher Verlauf der einzelnen Brandphasen nach [Twilt et al. 1997]

Für die Energiefreisetzungsrate in der Brandentwicklungsphase gibt [Drysdale 1998] eine zeitlich quadratische Abhängigkeit gemäß Gleichung 1 nach [Heskestad 1982] an. Der Faktor t_0 steht hierbei für eine Anfangs- oder Inkubationszeit nach der Zündung und α_f ist ein Brandwachstumskoeffizient, der Werte von 10^{-3} kW/s^2 bis 1 kW/s^2 für sehr langsame Brandentwicklungen bzw. sehr schnelle Entwicklung annehmen kann. Die Inkubationszeitspanne t_0 ist abhängig von der Natur der Zündquelle und deren Standort, somit variabel und schwer definierbar. Für verschiedene Koeffizienten α gibt [Drysdale 1998] eine grafische Darstellung der nach Gleichung 1 berechneten Energiefreisetzungsrate an (Abbildung 4).

$$\dot{Q} = \alpha_f (t - t_0)^2 \quad (1)$$

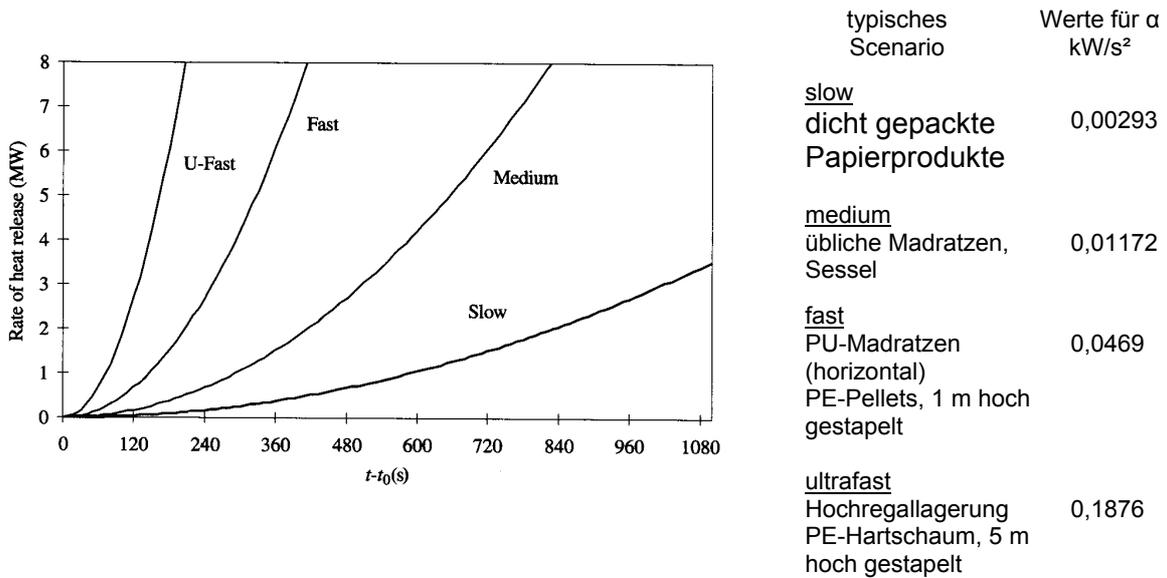


Abb. 4: zeitliche Entwicklung der Energiefreisetzungsrate nach der Inkubationszeit gemäß Gleichung 1 für verschiedene Brandwachstumskoeffizienten [Drysdale 1998]

An der Propangasversorgung wurden deshalb gravierende Veränderungen vorgenommen. Die vorhandenen Steuerelemente erwiesen sich als zu ungenau und erlaubten nur die Einstellung eines konstanten Gasflusses vor Versuchsbeginn. Zur Untersuchung von Brandentwicklungsphasen musste die Programmierung eines über die Versuchszeit veränderbaren Gasflusses ermöglicht werden. Hierfür wurden Massendurchflussregler der Firma Bronkhorst-Mättig in die Anlage integriert. Zur Versorgung des Zündbrenners wurden manuell einstellbare Regler für Gas und Luft ausgewählt, da diese Volumenströme über die Versuchszeit konstant zu halten waren. Der Massendurchflussregler für die Gasversorgung des Hauptbrenners wurde mit einer programmierbaren Bedieneinheit der Firma Wachendorff angesteuert. Die Software erlaubt die Voreinstellung konstanter und linear, stufenförmig oder quadratisch mit der Zeit aufwachsender Gasflüsse in vorgewählter Zeitspanne mit anschließender konstanter Phase. Die Massendurchflussregler setzen jeweils ein Analogsignal ab, welches in das Messwerterfassungssystem aufgenommen wurde. Die Bedienung des Massendurchflussreglers für die Versorgung des Hauptbrenners wurde an der Bedieneinheit manuell vorgenommen. Die Software ermöglicht auch eine Bedienung über einen PC, was aber in diesem Projekt nicht in Anspruch genommen wurde. Die vorhandenen Sicherheitselemente der Propangasversorgung wurden durch den Umbau in ihrer Funktionalität nicht verändert.

Zum Gasanalysesystem ist eine Anmerkung notwendig, welche die Anzeige des Gehaltes an Kohlenwasserstoffen (HC) im Gas betrifft. Die Analysatoren sind für Methan (Rosemount-Gerät) bzw. Hexan (HORIBA-Geräte) ausgelegt. Die Kalibrierung der Analysatoren erfolgte entsprechend für diese Anwendung mit einem Prüfgasgemisch, das 1 Vol% Propan in Stickstoff enthält. Der Rosemount-Analysator zeigte bei der Kalibrierung auch diesen Wert an. Bei Vorliegen von HC's mit kleinerem Molekül im Probegas kann der zur Anzeige gebrachte Wert wegen der Querempfindlichkeit dagegen ein Mehrfaches des tatsächlichen Gehaltes betragen. Genau entgegengesetzt reagieren die HORIBA-Analysatoren. Der Anwender dieser Analysatoren hat die Option der Wahl zwischen den Gasen Propan und Hexan am Bedienbutton, real erfolgt aber die Analyse nur in Hexan-Äquivalenten. Die Querempfindlichkeit für HC's mit geringerer C-Anzahl führt hier zu geringeren Anzeigewerten. Für die Aussage bezüglich des Gehaltes an Propan wurde vom Vertriebsservice der Firma HORIBA EUROPE GmbH ein Umrechnungsfaktor zur Anwendung bekanntgegeben, der aber nur eine Verschiebung des Ergebnisses durch Propan ausgleicht. Hierdurch kommt es zu erheblichen Unterschieden bei den HC-Ergebnissen, die deshalb lediglich zur Ableitung eines Trends verwertet werden konnten.

Für die Beobachtung vor allem der Versuche mit einer Energiefreisetzungsrate von 150 kW, und deren Aufzeichnung kam eine Kamera mit Schwenk-Neige-Technik zum Einsatz, die zum Schutz vor Wärmeeinwirkung in einem Metallgehäuse mit Luft- bzw. Wasserkühlung eingebaut ist. Die Optik der Kamera wird mit einem einstellbaren Luftgebläse von Ablagerungen durch Ruß und Asche frei gehalten.

2.2 Verarbeitung der Messdaten

Für die Verarbeitung der Messdaten zu Ergebnissen, die Aussagen zu den beim Brand gebildeten Rauchgasinhaltsstoffen in Bezug zu den Brandverhältnissen ermöglichen, wurden die einschlägig bekannten Verfahren angewandt, die im Folgenden kurz erläutert werden.

2.2.1 Ventilation

Die bei einem Raumbrand ablaufenden Reaktionen stehen in direktem Zusammenhang mit den Ventilationsverhältnissen des Raumes. Bewertungen der Energiefreisetzungsrate sowie die Bildung der Rauchgasprodukte werden üblicherweise durch den Bezug zu den Ventilationsverhältnissen vorgenommen, beispielsweise durch Anwendung des GER-Konzeptes. Eine schematische Darstellung der Schichtstruktur der Ventilation eines Raumbrandes gibt [Quintiere 2006] (Abbildung 5). Hierbei ist als wesentliche Öffnung ein Fenster angenommen.

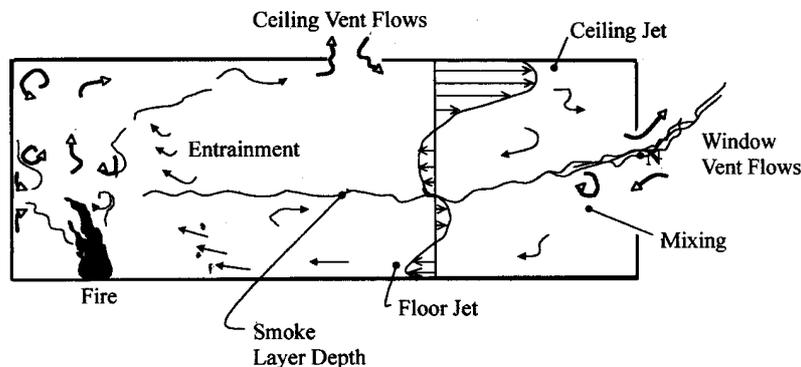


Abb. 5: Strömungsschema bei einem Raumbrand [Quintiere 2006]

Die sich einstellenden Strömungen entstehen durch Druckdifferenzen, die sich ebenso vertikal über Öffnungen ausbilden und mit bidirektionalen Sonden messbar sind. Aus den Messwerten lässt sich die Strömungsgeschwindigkeit durch Umstellen der Bernoullischen Gleichung (2) berechnen, wobei ein von der Reynoldszahl abhängiger Formfaktor k_p für bidirektionale Sonden einbezogen wird.

$$v = \frac{1}{k_p} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p \cdot T}{\rho_0 \cdot T_0}} \quad (2)$$

Diese Methode zur Bestimmung der Gasgeschwindigkeiten ist üblich und Gegenstand zahlreicher Publikationen. Der Volumenstrom ergibt sich dann durch den Bezug auf die

durchströmte Fläche mit Gleichung 3. Es wird ein weiterer Korrekturfaktor k_t für das Geschwindigkeitsprofil eingeführt.

$$\dot{V}(T) = A \cdot k_t \cdot v = A \cdot \frac{k_t}{k_p} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p \cdot T}{\rho_0 \cdot T_0}} \quad (3)$$

Für Berechnungen des Volumenstroms durch eine vertikale Öffnung, bei der Temperatur und Dichte einen Gradienten aufweisen, bietet sich die Normierung auf eine Temperatur an. [Will 2005] stellt die Normierung auf 25°C vor, ebenso ist die Normierung auf 0°C möglich. Gleichung 3 nimmt dann die Form von Gleichung 4 an.

$$\dot{V}_{273} = A \cdot \frac{k_t}{k_p} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot T_0}{\rho_0}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{T}} \quad (4)$$

[Emmons 2002] beispielsweise diskutiert die in dieser Arbeit angewandte Methode der Messung mittels bidirektionaler Sonden, vertikal angeordnet auf der Mittellinie einer Türöffnung. Für die Korrektur des Geschwindigkeitsprofils, welches sich quer über einer Öffnungsfläche einstellt, gibt er den Faktor 0,68 an. Für den Formfaktor k_p empfiehlt es sich bei den vorherrschenden Temperaturen und Gasgeschwindigkeiten gemäß der Untersuchungen von [McCaffrey, Heskestad 1976] den Wert 1,08 anzuwenden. Mit der Normierung auf eine Temperatur und damit eine Dichte in allen Flächenelementen kann die Berechnung des Masseflusses für die Ein- und Ausströmung durch eine Türöffnung über deren Breite b dann mit den Gleichungen 5 und 6 ausgeführt werden. Die untere und obere Grenze des Integrals sind hierbei für die Einströmung das Bodenniveau in der Türöffnung h_0 und die Höhe der neutralen Zone h_n , deren Lage interpoliert werden kann. Für die Ausströmung sind die Grenzen entsprechend h_n und die Höhe der Türöffnung h_t .

Einströmung kg/s $\dot{m}_{in} = b \cdot \frac{k_t}{k_p} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot T_0}{\rho_0}} \cdot \rho \cdot \int_{h_0}^{h_n} \sqrt{\frac{\Delta p}{T}} dy \quad (5)$

Ausströmung kg/s $\dot{m}_{out} = b \cdot \frac{k_t}{k_p} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot T_0}{\rho_0}} \cdot \rho \cdot \int_{h_n}^{h_t} \sqrt{\frac{\Delta p}{T}} dy \quad (6)$

Die Aussagen beziehen sich auf die Betrachtung der Verhältnisse im Brandraum als 2-Zonen-Modell eines voll entwickelten Raumbrandes mit Türöffnung unter Annahme einer oberen Heißgasschicht und einer unteren kalten homogenen Schicht, wie es schematisch in Abbildung 6 gezeigt wird.

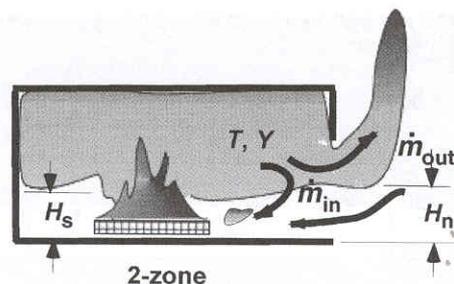


Abb. 6: schematische Darstellung der Verhältnisse bei einem Vollbrand im Raum nach dem 2-Zonen-Modell [Quintiere 2006]

Im quasi-stationären Zustand eines Brandes sollte die Beziehung nach Gleichung 7 gültig sein.

$$\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in} + \dot{m}_{fuel} \quad (7)$$

In der vorliegenden Arbeit wurde mit dem Flächenintegral der mathematischen Funktion des mittels Gleichung 2 für die Türöffnung berechneten vertikalen Geschwindigkeitsprofils über die Türbreite das ein- und ausströmende Volumen, auf 0°C normiert, mit den Gleichungen 8 und 9 berechnet. Diese unterscheiden sich von den Gleichungen 5 und 6 nur durch den Faktor Gaskichte. Für die Rauchgaskichte wurde ein Wert von 1,3 kg/m³ eingesetzt, der durch die Normierung für das gesamte Volumen gilt und als Konstante betrachtet werden kann.

$$\text{Einströmung m}^3/\text{s} \quad \dot{V}_{in} = b \cdot \frac{k_t}{k_p} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot T_0}{\rho_0}} \cdot \int_{h_0}^{h_n} \sqrt{\frac{\Delta p}{T}} dy \quad (8)$$

$$\text{Ausströmung m}^3/\text{s} \quad \dot{V}_{out} = b \cdot \frac{k_t}{k_p} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot T_0}{\rho_0}} \cdot \int_{h_n}^{h_t} \sqrt{\frac{\Delta p}{T}} dy \quad (9)$$

Die Berechnung des in den Brandraum eintretenden Luftmassenstroms wird für die Charakterisierung der Ventilationsverhältnisse eines Brandes benötigt, die anhand des sogenannten Zuluftverhältnisses, oder in der inversen Form als Global Equivalence Ratio (GER) bekannt, vorgenommen wird (Gleichung 10).

$$\Phi = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{air}} \right)}{\left(\frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{air}} \right)_{st\ddot{o}ch}} \quad (10)$$

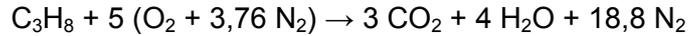
2.2.2 Rauchgasinhaltsstoffe und deren Yields

Weil vor Messung der Gaskonzentrationen zum Schutz der Analysatoren kondensierbare Bestandteile aus den Gasprobeströmen entfernt wurden, beziehen sich die Messwerte auf trockenes Gas (dry) und weisen demzufolge höhere Konzentrationen auf, als am Messort tatsächlich vorgelegen haben. Die Umrechnung auf reale Verhältnisse (nass, wet) kann deshalb nach Gleichung 11 erfolgen [Wieczorek 2003].

$$X_{i,wet} = (1 - X_{H_2O}) X_{i,dry} \quad (11)$$

[Gottuk, Lattimer 2002] schätzten ein, dass zuverlässige Messungen der Wasserdampfkonzentrationen schwer zu erhalten sind. Sie fanden in Abhängigkeit von den Bedingungen Schwankungen der Wasserdampfanteile von 10-20 %. Um Auskunft über die Anteile des entfernten Wassers geben zu können bzw. die gemessenen Konzentrationen auf „nasses“ Gas umrechnen zu können, ist es durchaus üblich, die Annahme zu treffen, dass

das Mol-Verhältnis c von H_2O zu CO_2 bei jedem Äquivalenzverhältnis das gleiche ist wie bei stöchiometrischen Bedingungen [Gottuk 1992], [Ewens 1994], [Lattimer 1996], [McKay 2002]. Bei der stöchiometrischen Verbrennung von Propan, die nach der Reaktionsgleichung



abläuft, ergibt sich das Mol-Verhältnis c von H_2O zu CO_2 gemäß Gleichung 12.

$$c = \frac{X_{\text{H}_2\text{O}}}{X_{\text{CO}_2}} = \frac{4}{3} \quad (12)$$

Demzufolge kann die Umrechnung der Messwerte nach Gleichung 13 erfolgen.

$$X_{i,\text{wet}} = \frac{X_{i,\text{dry}}}{1 + c (X_{\text{CO}_2,\text{dry}})} \quad (13)$$

Weniger zuverlässig wird diese Methode erst für Bedingungen in sehr brennstoffreicher Umgebung mit GER größer als 3,0 [Lattimer 1996]. Geringe Konzentrationen an CO sind laut [Wieczorek 2003] vernachlässigbar, für höhere schlägt [Floyd 2003] das Einbeziehen in die Umrechnung mit Gleichung 14 vor. Hierfür wurde die Annahme getroffen, dass der gesamte Wasserstoff aus dem Brennstoff entweder in den unverbrannten Kohlenwasserstoffen oder im Wasserdampf gebunden ist.

$$X_{i,\text{wet}} = \frac{X_{i,\text{dry}}}{1 + c (X_{\text{CO}_{\text{dry}}} + X_{\text{CO}_2,\text{dry}})} \quad (14)$$

Die sogenannten Yields der Rauchgasinhaltsstoffe stellen das Verhältnis der jeweils produzierten Stoffmasse zur Brennstoffmasse dar. Ihre Berechnung erfolgt somit nach Gleichung 15. Werden diese auf die aus dem Brennstoff maximal mögliche produzierbare Stoffmenge bezogen, ergeben sich normierte Yields.

$$Y_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{\text{fuel}}} = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{\text{fuel}}} \quad (15)$$

In der vorliegenden Arbeit wurde der aus der Türöffnung austretende Volumenstrom eines Stoffes aus seinem Anteil am austretenden Gesamtvolumenstrom, auf 0°C normiert, nach Gleichung 16 berechnet. Da der Volumenstrom das rechnerische Produkt aus Gasgeschwindigkeit und durchströmter Fläche ist, kann diese Anteilsberechnung mit dem jeweiligen Molenbruch (wet) X_i auch an nur einem Faktor, hier die Gasgeschwindigkeit, vorgenommen werden. Das vertikale Flächenintegral der Funktion der reduzierten Geschwindigkeiten über die Türbreite liefert dann den Stoffvolumenstrom $\dot{V}_{i,\text{out}}$. Da vorher eine Normierung auf 0°C erfolgte, gilt auch hier die Stoffdichte ρ_i im ganzen Volumen, woraus dann der Stoffmassenstrom $\dot{m}_{i,\text{out}}$ mit Gleichung 17 berechnet werden kann.

$$\text{Ausströmung } \text{m}^3/\text{s} \quad \dot{V}_{i,\text{out}} = b \cdot \frac{k_t}{k_p} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot T_0}{\rho_0}} \cdot \int_{h_n}^{h_t} X_i \sqrt{\frac{\Delta p}{T}} dy \quad (16)$$

Ausströmung kg/s

$$\dot{m}_{i,out} = b \cdot \frac{k_t}{k_p} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot T_0}{\rho_0}} \cdot \rho_i \cdot \int_{h_n}^{h_t} X_i \sqrt{\frac{\Delta p}{T}} dy \quad (17)$$

Bei der Berechnung wurden aus den Ergebnissen für die Gasgeschwindigkeitsberechnung Mittelwerte für die Zeitspanne von jeweils einer Minute über die Versuchszeit gebildet, ebenso aus den Messwerten der Gasanalyse.

2.3 Versuchsdurchführung

Jeder Versuch wurde bezüglich der Temperatur bei Umgebungsbedingungen bzw. bei höchstens 40 °C Innentemperatur der Kammer (herrührend vom vorhergehenden Versuch) begonnen. Die Differenzdruckaufnehmer wurden vor jedem Versuch auf Null zurückgesetzt. Die Gasanalysatoren erhielten pro Versuchstag eine Kalibrierung.

Als Versuchsbeginn galt die Aktivierung des Zündbrenners, der bei stabilem Brand den Start des Hauptbrenners ermöglichte. Das dauerte in der Regel etwa 30 - 60 s. Dann wurde das Programm für den Propangasfluss des Hauptbrenners gestartet. Zur Erzeugung einer Brandentwicklungsphase wie in Abbildung 4 dargestellt, wurde ein Zeitintervall von Start bis Erreichen der vollen Brennerleistung von 600 s vorgegeben. Die zeitliche Entwicklung der theoretischen Energiefreisetzungsrate für die Werte 80 kW, 120 kW und 150 kW sollte dann gemäß Abbildung 7 erfolgen.

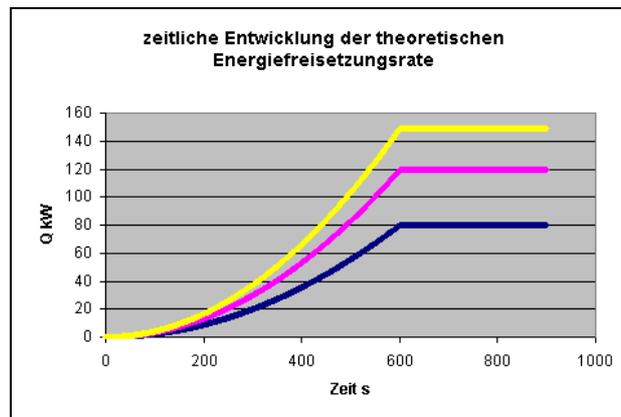


Abb. 7: zeitliche Entwicklung der theoretischen Energiefreisetzungsrate entsprechen der Programmierung des Propangasflusses

Es wurden Versuche mit theoretischen Energiefreisetzungsraten von 80 kW, 120 kW und 150 kW durchgeführt. Bei 80 kW wurde der Einfluss verschiedener Ventilation durch Veränderung der Türweite auf die Bildung von CO untersucht. Es gab die Einstellungen weit (0,33 m), schmal (0,165 m) und Schlitz (0,095 m). Hiefür wurden Messungen in der Türöffnung und im hinteren Teil des Brandraumes vorgenommen. Zusätzlich wurde ein Versuch mit 120 kW bei schmaler Türweite durchgeführt. Auf Messungen in der Türöffnung bei einer Energiefreisetzungsrate von 150 kW wurde verzichtet, da hierbei bereits Flammen aus der Tür austraten. Bei allen drei genannten Energiefreisetzungsraten wurden die vertikalen und horizontalen Konzentrationsprofile im Brandraum und im Flur ermittelt.

2.4 Versuchsergebnisse

Für die Verarbeitung der Messwerte wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Messgeräte arbeiten ohne Trägheit und Anzeigefehler.
- Die Gase verhalten sich wie ideale Gase.
- Der mit der Luft eintretende Stickstoff nimmt nicht an der Verbrennung teil.

Bei der Auswertung der Versuche wurden die Messwerte der Gaskonzentrationen generell auf wet-Bedingungen umgerechnet. Zusätzlich erfolgte eine Korrektur der zeitlichen Zuordnung der Messwerte um die Durchflusszeit der Probesonden und Schlauchleitungen.

2.4.1 Theoretische Energiefreisetzungsrate

Hier ist anzumerken, dass der Gasfluss am Massendurchflussregler durch einen unteren Grenzwert beschränkt ist, der bei 2 % des Arbeitsbereichsendes liegt, in diesem Fall bei 6 l/min. Somit war die Zündung des Hauptbrenners erst möglich, wenn die zeitliche Entwicklung der Sollwertvorgabe aus der Programmierung diesen unteren Grenzwert überschritten hatte. Sichtbar ist das in den grafischen Darstellungen der theoretischen Energiefreisetzungsraten (Abbildung 8) in der Stufe des Kurvenverlaufs zu Beginn der Brandentwicklungsphase. Ausgeglichen wurde die Anfangsphase etwas durch den mit einer Rate von 1 kW arbeitenden Zündbrenner.

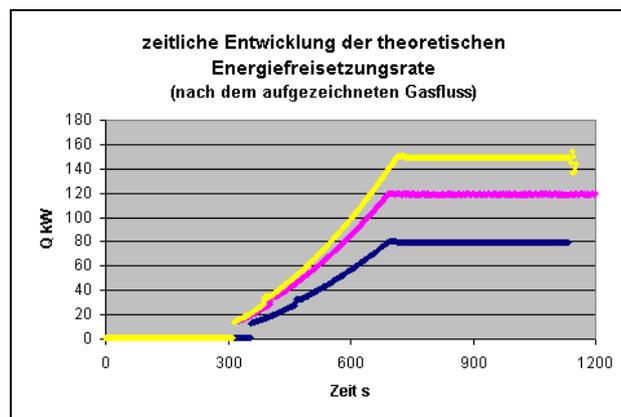


Abb. 8: aus den Messwerten des Propangasflusses berechnete theoretische Energiefreisetzungsrate

2.4.2 Messwerte in der Startphase

Bedingt durch den Start des Zündbrenners, bei dem die Massendurchflussregler für eine sehr kurze Sequenz ihre volle Leistung erreichten, die weit über dem angegebenen oberen Grenzwert des Regelbereiches lag, wurden schlagartig Propangas und Luft in den Brandraum eingetragen. Daraus resultierten Spitzen im Kurvenverlauf der grafischen Darstellung der Messwerte für HC. Abbildung 9 zeigt Momentaufnahmen vom Zündbrennerstart. Ebenso hatte dieser Fakt Einfluss auf die Berechnung der CO₂-Yields für die Startphase. Da der Propangasfluss am Massendurchflussregler des Zündbrenners manuell auf einen konstanten Wert eingestellt wurde, bestand keine Integration in die Messwernerfassung. Somit wurde der für die Startphase berechnete CO₂-Massestrom auf den eingestellten Propangasfluss bezogen. Ähnliche Auswirkungen hatte die Zündung des Hauptbrenners, dessen „Topf“ sich erst mit Propan füllen musste,

bevor eine Entflammung an dessen Oberfläche eintrat. In diesem Moment wurden kurzzeitig die Druckverhältnisse und damit die Strömungsverhältnisse im Brandraum beeinflusst.

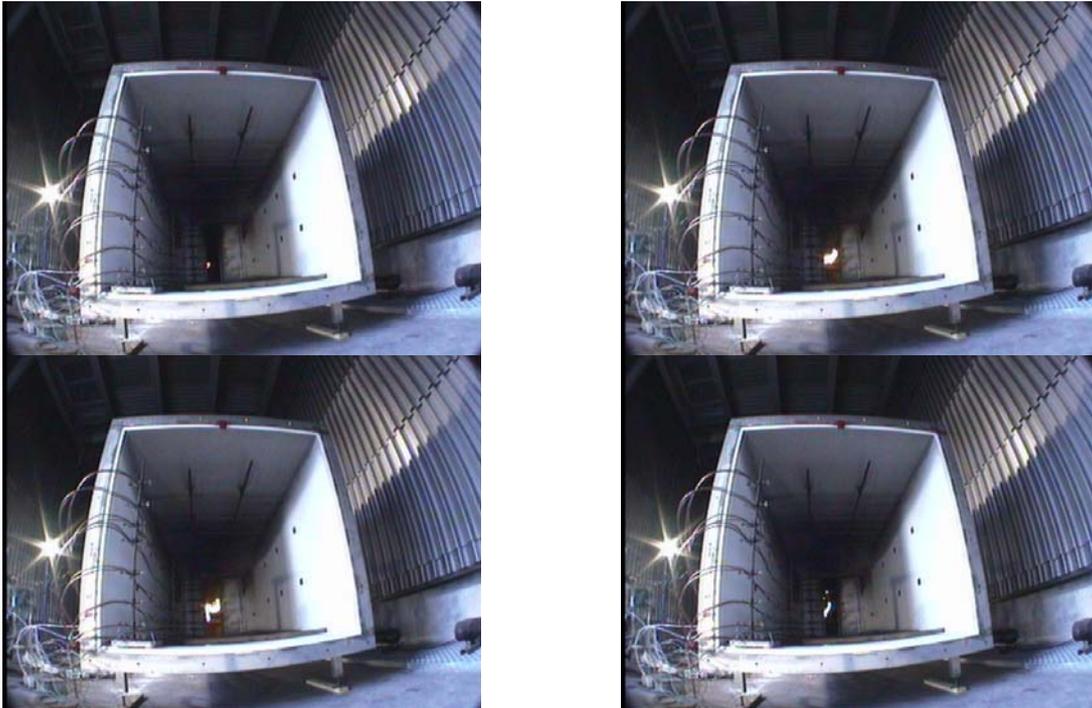


Abb. 9: Ausschnitte aus einer Aufzeichnung des Zündbrennerstarts

Mit der Zündung des Hauptbrenners (HB – Zündung) wird die eigentliche Brandentwicklungskurve gestartet, die aufgrund der verzögerten Startphase (Beginn bei 6 l/min Propangasfluss) nicht ganz die programmierte Zeit von 600 s bis zur vollen Leistung in Anspruch nimmt. Für die Auswertung wird grundsätzlich der Zündbeginn des Hauptbrenners zugrunde gelegt.

2.4.3 Untersuchung des vertikalen Konzentrationsprofils im Brandraum

Bei einer theoretischen Energiefreisetzungsrate von 80 kW wurde bei Türöffnungsbreiten von 0,165 m (Spalt) und 0,095 m (Schlitz) an drei Messorten im Brandraum (Position 1: hinterer Teil jeweils 0,3 m von der Rück- bzw. Seitenwand entfernt, Position 2: Mitte neben dem Brenner 0,3 m von der Seitenwand entfernt, Position 3: vorderer Teil jeweils 0,3 m von der Vorder- bzw. Seitenwand entfernt) das vertikale Konzentrationsprofil der Rauchgasschicht bestimmt. Zusätzlich lieferte die 0,1 m quer unter der Decke eingebaute Sonde der Bauart nach Abbildung 44 bei [Pleß, Seliger 2007] einen Mittelwert der Gaskonzentrationen über die Breite des Brandraumes. In den Abbildungen 10, 12 und 14 ist die zeitliche Entwicklung der Temperaturen, der Gaskonzentrationen sowie das daraus berechnete CO/CO₂-Verhältnis an den vertikal übereinander liegenden Messpunkten 1 – 5 dargestellt (Nummerierung der Messpunkte von oben nach unten). Zum Vergleich zeigt jeweils eine Grafik die Messwerte, welche mit der Querschnittssonde erhalten wurden. Zusätzlich geben in die Grafiken eingefügte Linien Auskunft über die Phasen der Brandentwicklung. Jede Darstellung beginnt mit der Zündung des Zündbrenners. Als Markierungen sind die Zeitpunkte für das Entflammen des Hauptbrenners (HB Zünd), das Erreichen des Vollbrandes (HB volle L) sowie das Abschalten beider Brenner enthalten.

Die Messwerte der Gaskonzentrationen wurden zusätzlich jeweils über den Zeitabschnitt von einer Minute gemittelt und für jeden Messpunkt grafisch dargestellt (Abbildung 11, 13 und 15). Diese Form der Auswertung führte zu übersichtlicheren Ergebnissen für die Bewertung des Konzentrationsprofils in der Rauchgasschicht.

Wie aus den Abbildungen 11, 13 und 15 ersichtlich ist, stellt sich das Konzentrationsprofil der Gase CO₂ und O₂ in vertikaler Richtung an allen drei Messpositionen relativ einheitlich dar. Gut erkennbar ist der nahezu lineare Anstieg der CO₂-Konzentrationen und die Abnahme der Konzentrationen an O₂ in der sich ausbildenden Rauchgasschicht bis zu einer Höhe von etwa 0,5 m über dem Boden während der Entwicklungsphase des Brandes. An der Grenze zur darunter liegenden Raumatmosphäre (Messstelle 0,35 m über dem Boden) waren deutlich geringere Konzentrationen feststellbar, was durch Vermischungsprozesse mit der einströmenden Luft und der damit verbundenen Verdünnung der Konzentrationen erklärbar ist. Mit dem Übergang zur Vollbrandphase veränderte sich das Konzentrationsprofil dahingehend, dass die Rauchgaskonzentration in einer Höhe von 0,55 m nicht so stark anstieg, wie in dem darüber liegenden Volumen. Dort zeigten die Messergebnisse für eine Schichtdicke von etwa 0,55 m (d. h. ab etwa 0,65 m über dem Boden) in vertikaler Richtung eine relativ homogene Rauchgaszusammensetzung an. Insgesamt war die Ausbildung der Rauchgasschicht durch eine rasche Änderung der Konzentrationen während der Entwicklungsphase des Brandes und langsame Änderung während des stationären Brandes gekennzeichnet.

Die gemessenen Konzentrationen an den Positionen 1 und 3 stimmen sehr gut überein, ein Ergebnis, das so nicht erwartet wurde. Verglichen wurden die Gaskonzentrationen (wet), welche zum Ende der Brandentwicklung und 5 Minuten nach Erreichen der vollen Brandleistung (Plateauphase der Brandentwicklung) an den Messpunkten 1 und 2 (0,05 m bzw. 0,15 m unter der Raumdecke) auftraten, weil hier bei Messung an Position 1 ein direkter Vergleich mit den Werten aus der Querschnittsonde (0,1 m unter der Raumdecke) möglich ist. Außerdem bieten die Ergebnisse aus der Querschnittsonde einen Anhaltspunkt zur Bewertung der Versuche untereinander hinsichtlich von Abweichungen im Brandverlauf trotz gleicher Randbedingungen. In Tabelle 1 sind diese Werte zusammengefasst. Ein Vergleich von Messergebnissen, die zwar unter gleichen Bedingungen, aber aus verschiedenen Versuchen erhalten wurden, wird auch in anderen Publikationen durchgeführt und ausgewertet.

Tabelle 1: Gaskonzentrationen (wet) nach Brandentwicklung (1) und 5 min Vollbrand (2) bei einer Türbreite von 0,165 m und 80 kW

| Messpunkt | CO Vol% | | CO ₂ Vol% | | O ₂ Vol% | | HC Vol% | |
|------------------------|---------|------|----------------------|------|---------------------|-----|---------|-------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Querschnitt Position 1 | | | 7,9 | 9,3 | 6,3 | 4,2 | 0,06 | 0,18 |
| Position 1 | 0,11 | 0,4 | 7,2 | 8,8 | 7,5 | 4,8 | 0,001 | 0,006 |
| Querschnitt Position 1 | | | 8,0 | 9,25 | 5,8 | 3,4 | 0,06 | 0,2 |
| Position 2 | 0,12 | 0,35 | 7,5 | 9,0 | 6,5 | 4,0 | 0,001 | 0,008 |
| Querschnitt Position 1 | | | 7,5 | 9,0 | 6,3 | 4,3 | 0,09 | 0,14 |
| Position 3 | 0,09 | 0,3 | 7,1 | 8,5 | 7,7 | 4,7 | 0,0005 | 0,003 |

In der Nähe der Türöffnung findet demnach keine große Vermischung der Rauchgase mit der einströmenden Luft statt. Hier ist nur ein Einfluss im unteren Schichtbereich (bis 0,55 m über dem Boden) erkennbar. Dieser wirkt sich bis zur Position 2 aus. Das heißt, dass von der Türöffnung aus bis zum Brenner (vorderer Teil des Brandraumes) die Rauchgasschicht im unteren Bereich durch einströmende Luft stärker beeinflusst wird, als es im hinteren Teil des Brandraumes der Fall ist. In unmittelbarer Nachbarschaft zum Brenner (Position 2) kommen geringfügig höhere Konzentrationen an CO₂, und HC vor sowie dementsprechend auch nur etwas geringere O₂-Konzentrationen. Bei den CO-Konzentrationen ist eine leichte Verringerung vom hinteren zum vorderen Teil des Brandraumes zu erkennen.

Auf den ersten Blick scheinen die Konzentrationen von CO und HC in der Rauchgasschicht kein so einheitliches Profil aufzuweisen, wie es bei CO₂ und O₂ der Fall ist. Dies ist lediglich

der Darstellung der Messwerte geschuldet, die vergleichsweise in weitaus geringeren Konzentrationen auftreten. Die hier sichtbaren Konzentrationsunterschiede in vertikaler Ausdehnung der Rauchgasschicht liegen im Zehntel- bzw. Hundertstel-Prozent-Bereich oder darunter (ppm). Die zum Beginn des Versuches und zum Zeitpunkt der Zündung des Hauptbrenners auftretenden Propankonzentrationen sind technologisch bedingt. Eine stabil brennende Flamme am Zündbrenner war bei jedem Versuch erst nach mehrfachen Startversuchen einstellbar, so dass es zur Freisetzung von geringen Mengen Propan kam. Nach Öffnen der Gasversorgung des Hauptbrenners musste sich das Brennervolumen mit Propan füllen und an dessen Oberfläche ein zündfähiges Gemisch ausbilden. Auch hierbei wurde kurzzeitig Propan in die Raumatmosphäre freigesetzt. Das sporadische Auftreten von CO-Konzentrationen im Bereich der Nachweisgrenze der Analysatoren war bereits im Anfangsstadium jedes Versuches (nur Zündbrenner aktiv) feststellbar. Eine beständige Anzeige von CO-Konzentrationen, dann in der Folge auch mit ansteigenden Werten, erfolgte erst ca. 3 Minuten nach Zündung des Hauptbrenners während der Brandentwicklung in einem Stadium der Energiefreisetzung von etwa 40 kW – 50 kW.

Die zum Vergleich mit der Querschnittssonde 0,1 m unter der Decke des Brandraumes gemessenen Gaskonzentrationen (durch einen technischen Defekt fehlen hier die Aufzeichnungen für CO) zeigen bei den drei unter gleichen Randbedingungen durchgeführten Versuche erwartungsgemäß fast gleiche Ergebnisse. Ausdruck für einen annähernd gleichen Brandverlauf ist auch der an dieser Sonde gemessene gleiche Temperaturverlauf über die Branddauer (T quer in der Grafik). Ansonsten ergaben die Temperaturmessungen im hinteren Teil des Brandraumes niedrigere Werte, als verständlicherweise neben dem Brenner auftreten. Die höheren Temperaturen im vorderen Bereich der Rauchgasschicht könnten auf die etwas zur Ausgangsöffnung gerichtete Plume und auf einem höheren stofflichen Umsatz im vorderen Teil der Brennkammer hinweisen.

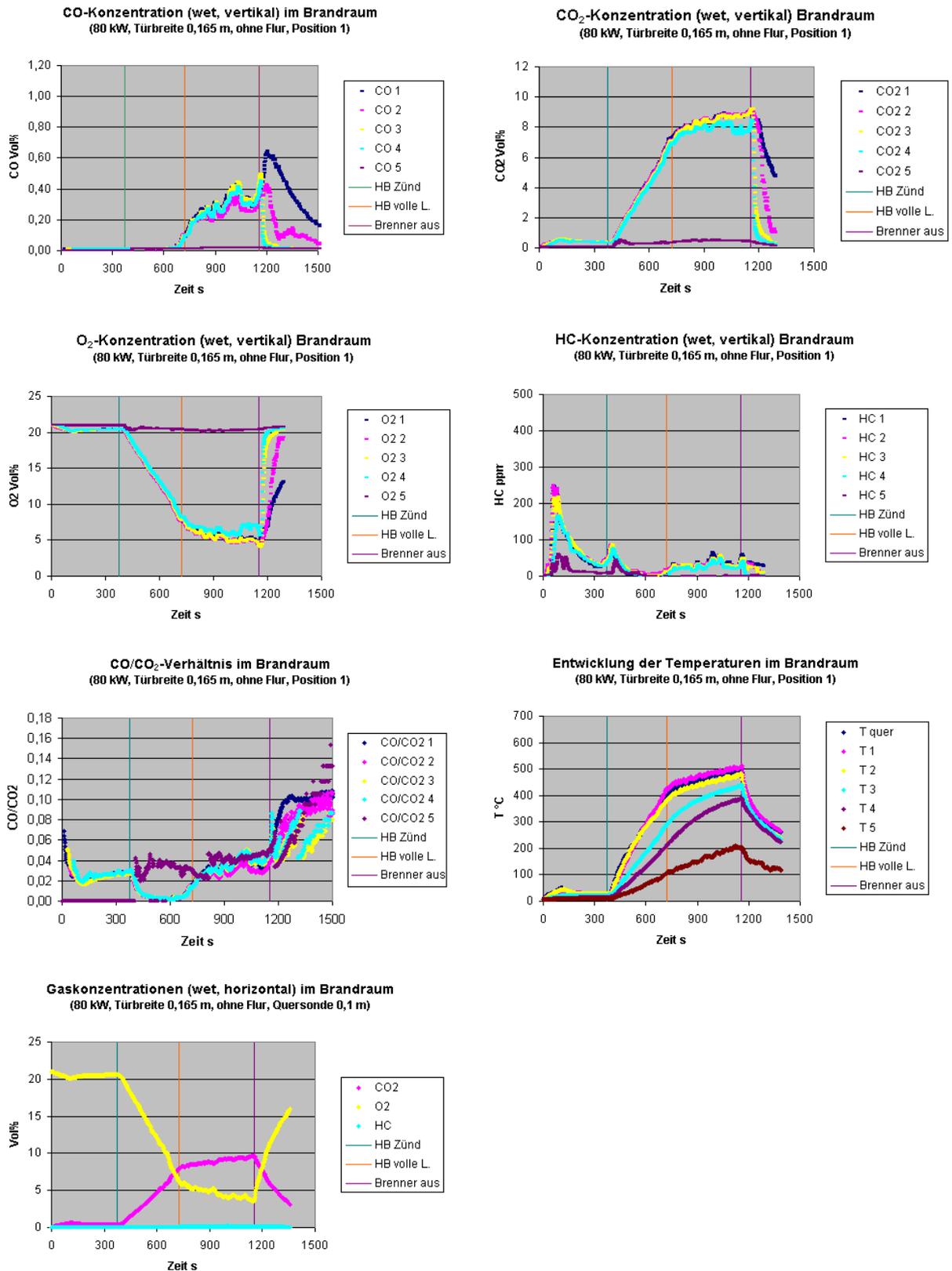


Abb. 10: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 1 im Brandraum (vertikale Messung) bei 80 kW und einer Türbreite von 0,165 m

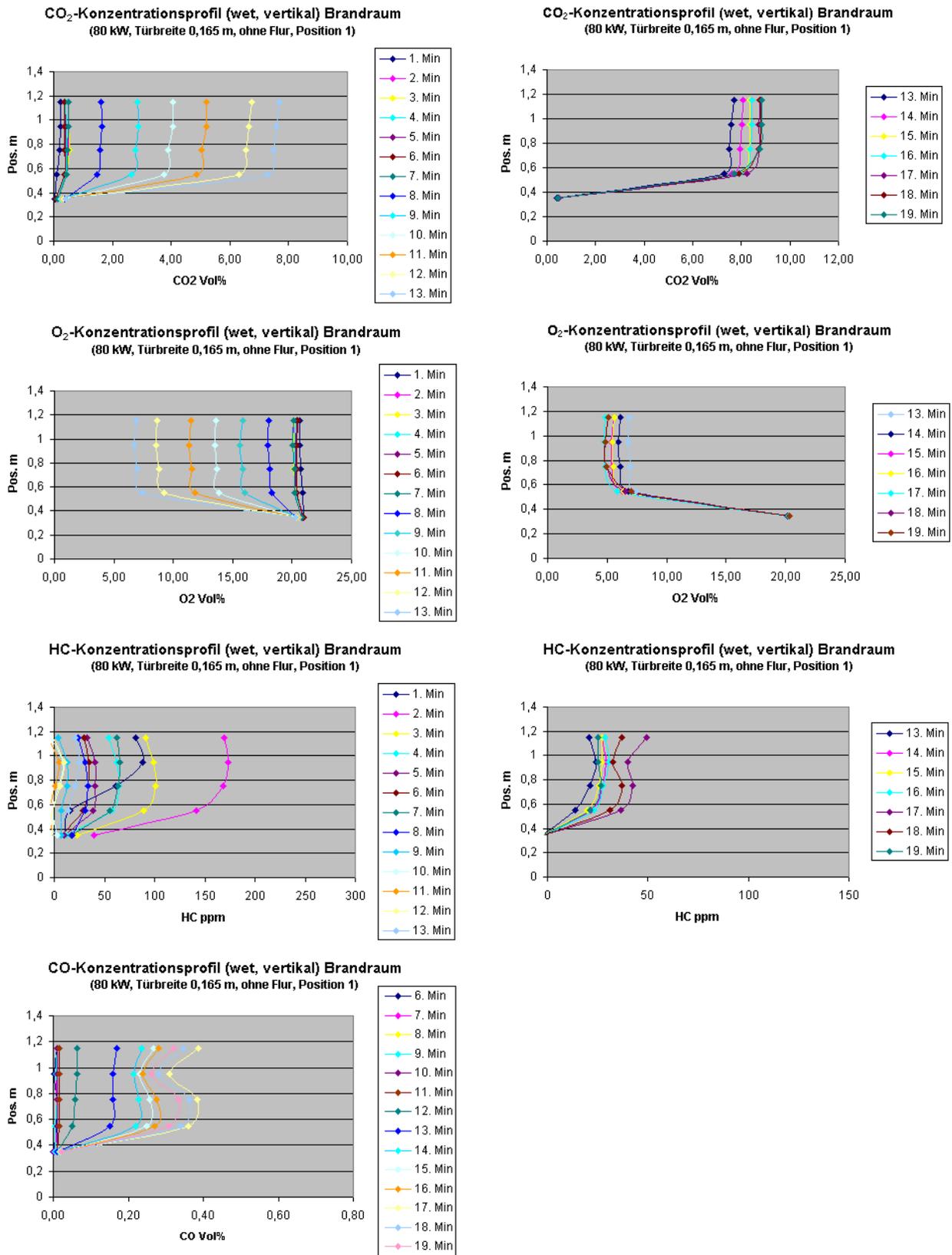


Abb. 11: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 1 im Brandraum auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 80 kW und einer Türbreite von 0,165 m

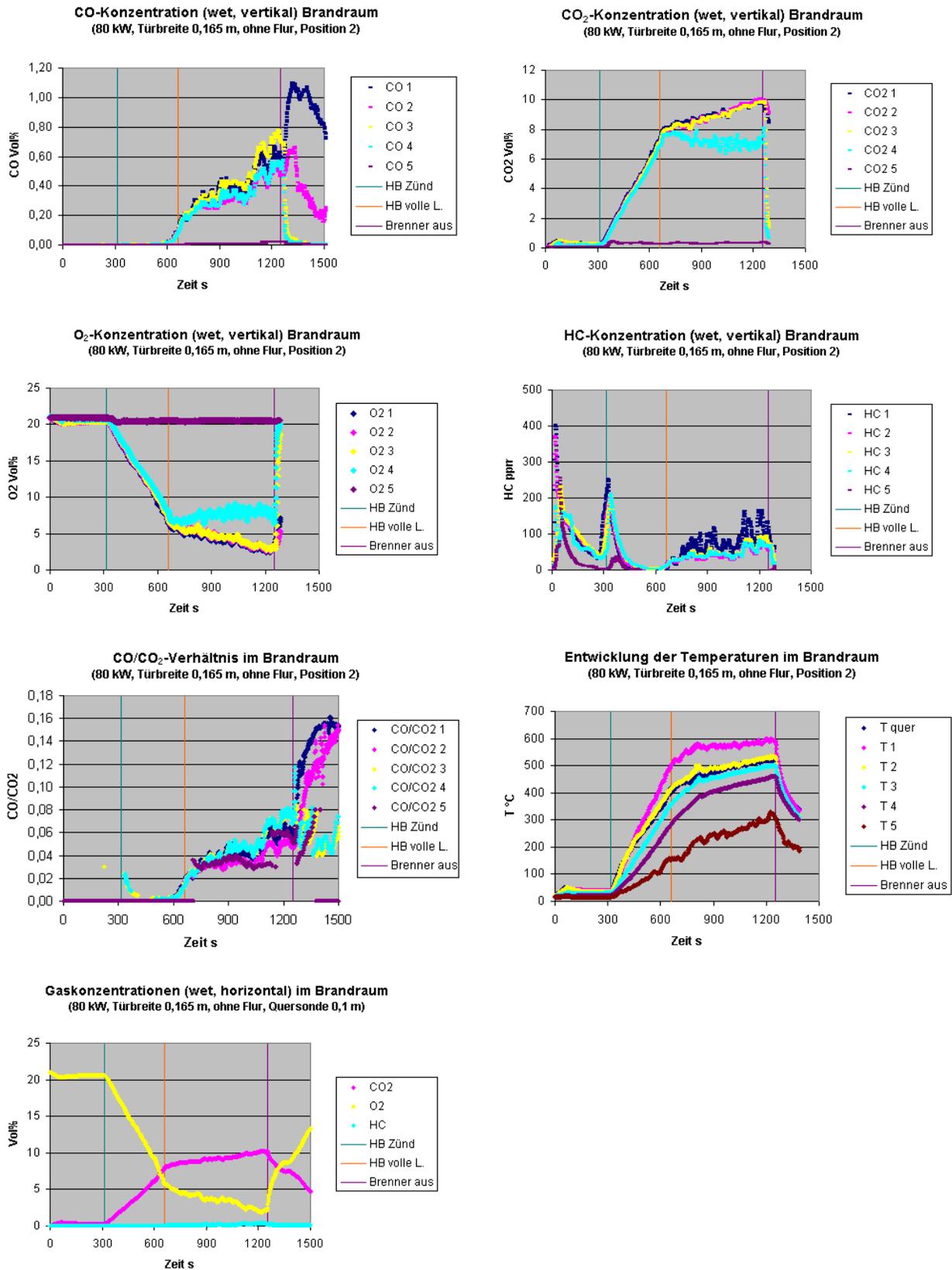


Abb. 12: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 2 im Brandraum (vertikale Messung) bei 80 kW und einer Türbreite von 0,165 m

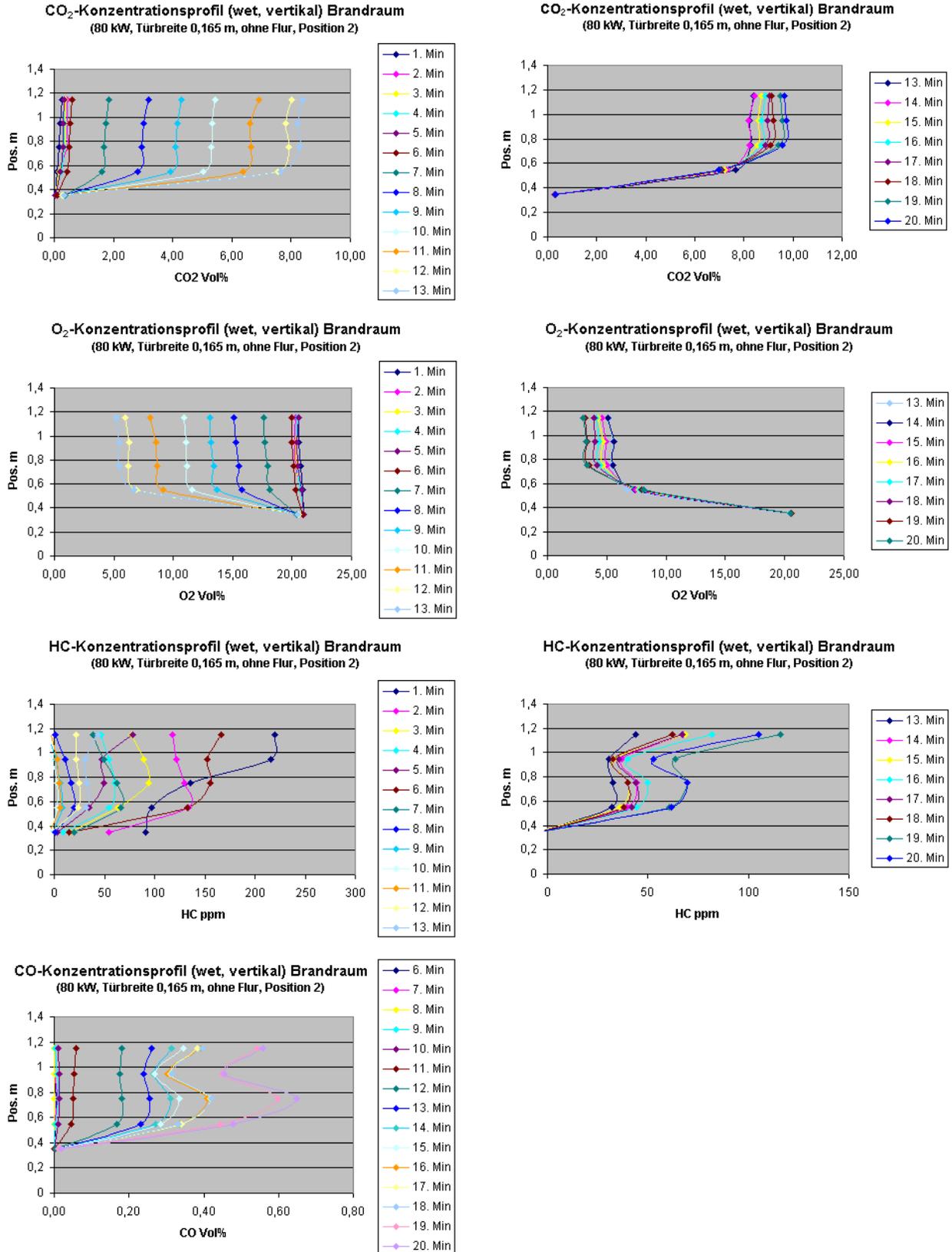


Abb. 13: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 2 im Brandraum auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 80 kW und einer Türbreite von 0,165 m

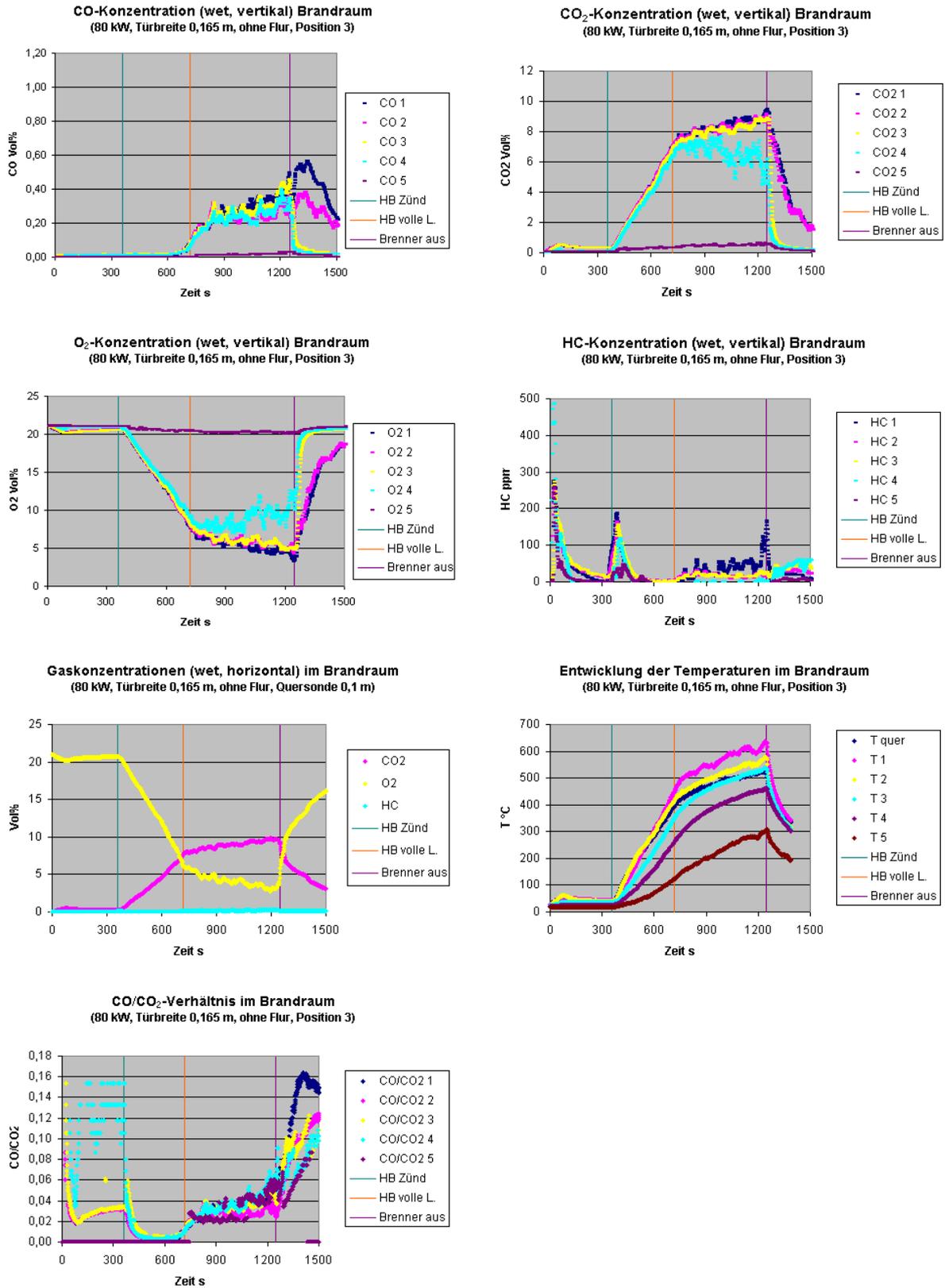


Abb. 14: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 3 im Brandraum (vertikale Messung) bei 80 kW und einer Türbreite von 0,165 m

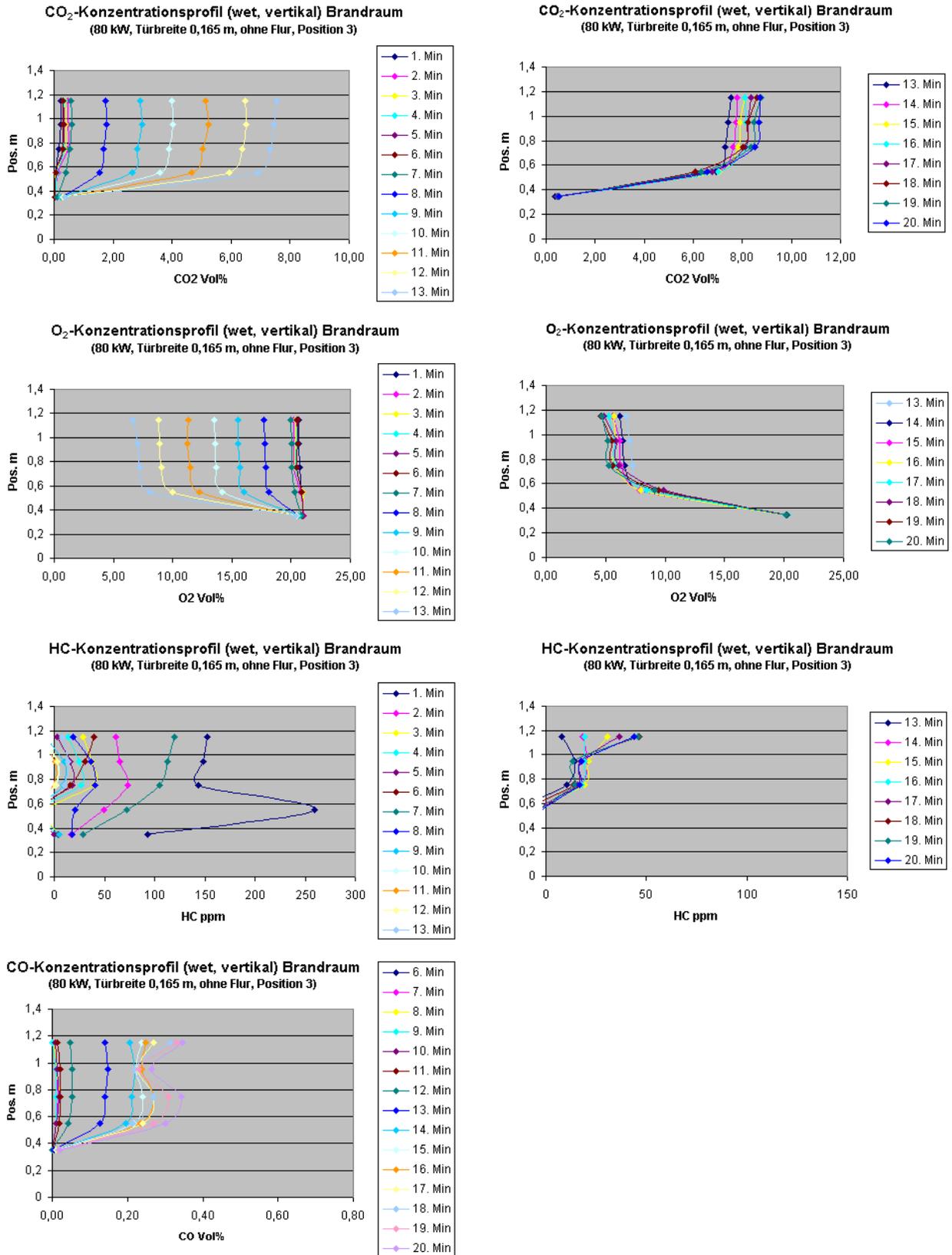


Abb. 15: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 3 im Brandraum auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 80 kW und einer Türbreite von 0,165 m

Mit gleichen, wie den zuvor genannten Parametern wurden Versuche bei einer Türöffnungsbreite von 0,095 m durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 16 –21 grafisch dargestellt. Auch bei diesen Versuchen zeigten sich die Gaskonzentrationen in der Rauchgasschicht in vertikaler Richtung bis zu einer Höhe von 0,5 m relativ einheitlich. Die darunter befindliche Grenzschicht zur Raumluft ist, wie schon bei den vorgenannten Versuchen, durch eine deutliche Abnahme der Konzentrationen gekennzeichnet. Die während der Vollbrandphase aufgetretenen Abweichungen in der Höhe von 0,55 m sind nicht mehr so stark, wie bei den Versuchen mit Türöffnungsbreite von 0,165 m, was ein deutlicher Hinweis auf das Anwachsen der Rauchgasschichtdicke ist. In der Vollbrandphase traten bei den CO- und HC-Konzentrationen größere vertikale Differenzierungen auf (geringere Konzentrationen in der Höhe von 1 m), die sich in etwas höheren CO₂-Konzentrationen bzw. geringeren O₂-Konzentrationen in dieser Schichthöhe spiegeln. Dieses Ergebnis lässt ein Gebiet erhöhter Reaktivität im Rauchgas bei etwa 1 m Höhe vermuten. Geringe Differenzierungen im vertikalen Konzentrationsprofil der Gase CO und CO₂, die reaktionsbedingt sind, können etwas stärker hervortreten, wenn aus den Messwerten das CO/CO₂-Verhältnis berechnet wird, wie aus den Abbildungen ersichtlich ist.

Genau wie bei den Versuchen mit einer Türöffnungsbreite von 0,165 m lassen sich bei diesen Versuchen Unterschiede in den Konzentrationen an den verschiedenen Raumpositionen in gleicher Größenordnung erkennen. Es wurden wieder die Werte zum Ende der Brandentwicklungsphase und nach 5 Minuten Vollbrand gegenübergestellt (Tabelle 2). Bei annähernd gleichen Konzentrationen an der Querschnittsonde der drei zum Vergleich stehenden Versuche, traten im hinteren Raumteil (Position 1) die höchsten CO-Konzentrationen bei entsprechend geringeren CO₂- und O₂-Konzentrationen auf. In der Nähe der Türöffnung (Position 3) wurden zwar etwas geringere CO₂- und HC-Konzentrationen gemessen, aber der Anteil von CO war der gleiche, wie in der Raummitte. Die Verschlechterung der Raumbelüftung durch Verringerung der Türbreite führte bei gleicher theoretischer Energiefreisetzungsrate zu einer insgesamt größeren Rauchsichtdicke, die sauerstoffärmer und brennstoffreicher war und einen deutlichen Anstieg der CO-Bildung aufwies. CO-Konzentrationen an der Nachweisgrenze waren auch bei diesen Versuchen während des Brandes des Zündbrenners feststellbar. Permanent anhaltende und ansteigende Werte traten 30 s nach Zündung des Hauptbrenners in dessen Nähe (Position 2) bei einer Energiefreisetzungsrate von 15 kW, und ca. 2 min nach Zündung an den Positionen 1 und 3 bei 30 kW bzw. 35 kW auf.

Tabelle 2: Gaskonzentrationen (wet) nach Brandentwicklung (1) und 5 min Vollbrand (2) bei einer Türöffnungsbreite von 0,095 m und 80 kW

| Messpunkt | CO Vol% | | CO ₂ Vol% | | O ₂ Vol% | | HC Vol% | |
|------------------------|---------|------|----------------------|-------|---------------------|------|---------|------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Querschnitt Position 1 | | | 9,2 | 10,13 | 3,4 | 0,92 | 0,9 | > 2 |
| Position 1 | 0,9 | 1,65 | 8,5 | 9,25 | 3,7 | 1,6 | 0,055 | 0,1 |
| Querschnitt Position 1 | | | 8,8 | 10,18 | 3,8 | 0,93 | 0,6 | > 2 |
| Position 2 | 0,8 | 1,4 | 8,5 | 9,5 | 4,0 | 1,7 | 0,06 | 0,1 |
| Querschnitt Position 1 | | | 9,1 | 10,3 | 3,5 | 0,98 | 0,7 | > 2 |
| Position 3 | 0,75 | 1,4 | 8,4 | 9,35 | 4,0 | 1,75 | 0,028 | 0,05 |

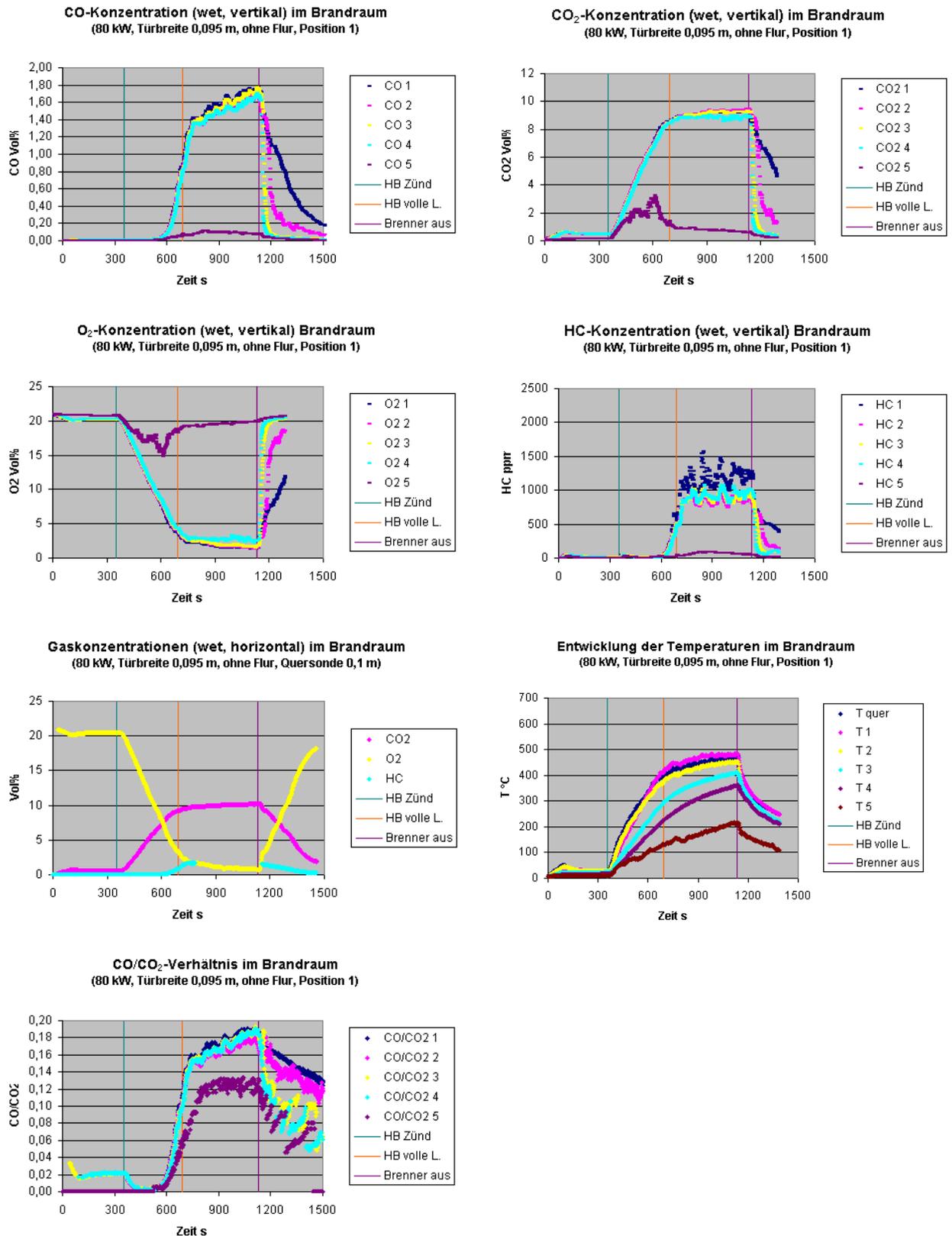


Abb. 16: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 1 im Brandraum (vertikale Messung) bei 80 kW und einer Türbreite von 0,095 m

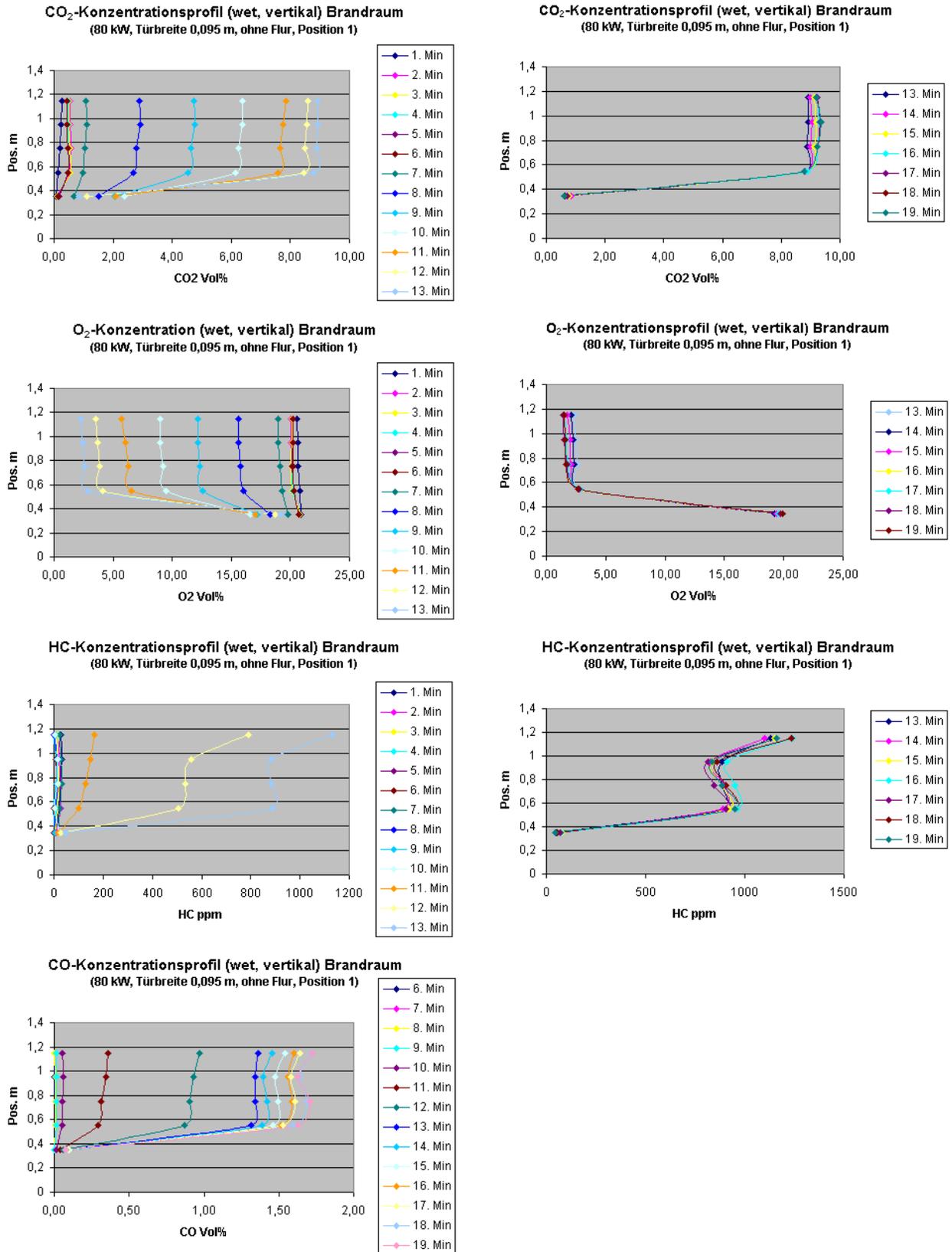


Abb. 17: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 1 im Brandraum auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 80 kW und einer Türbreite von 0,095 m

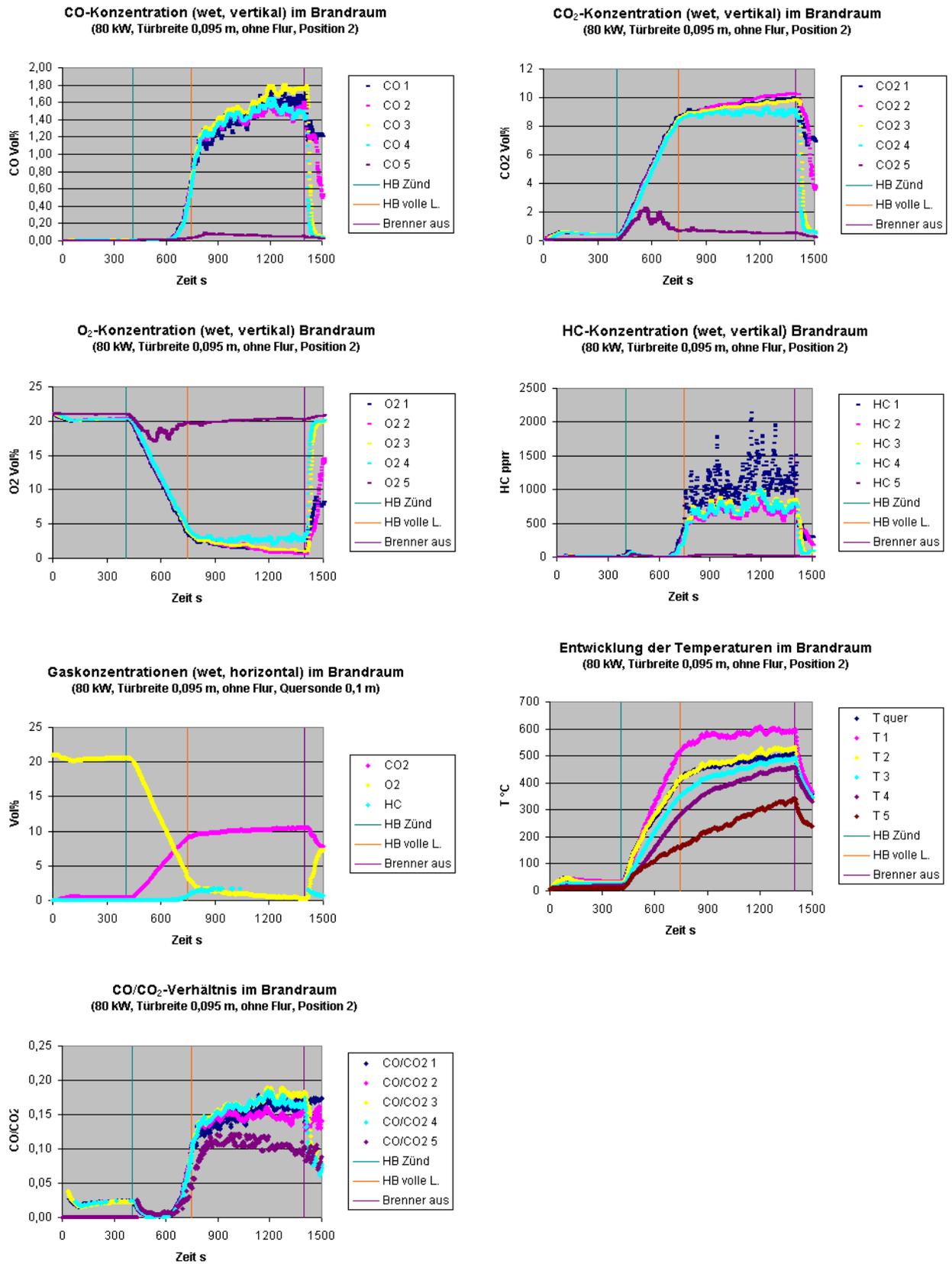


Abb. 18: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 2 im Brandraum (vertikale Messung) bei 80 kW und einer Türbreite von 0,095 m

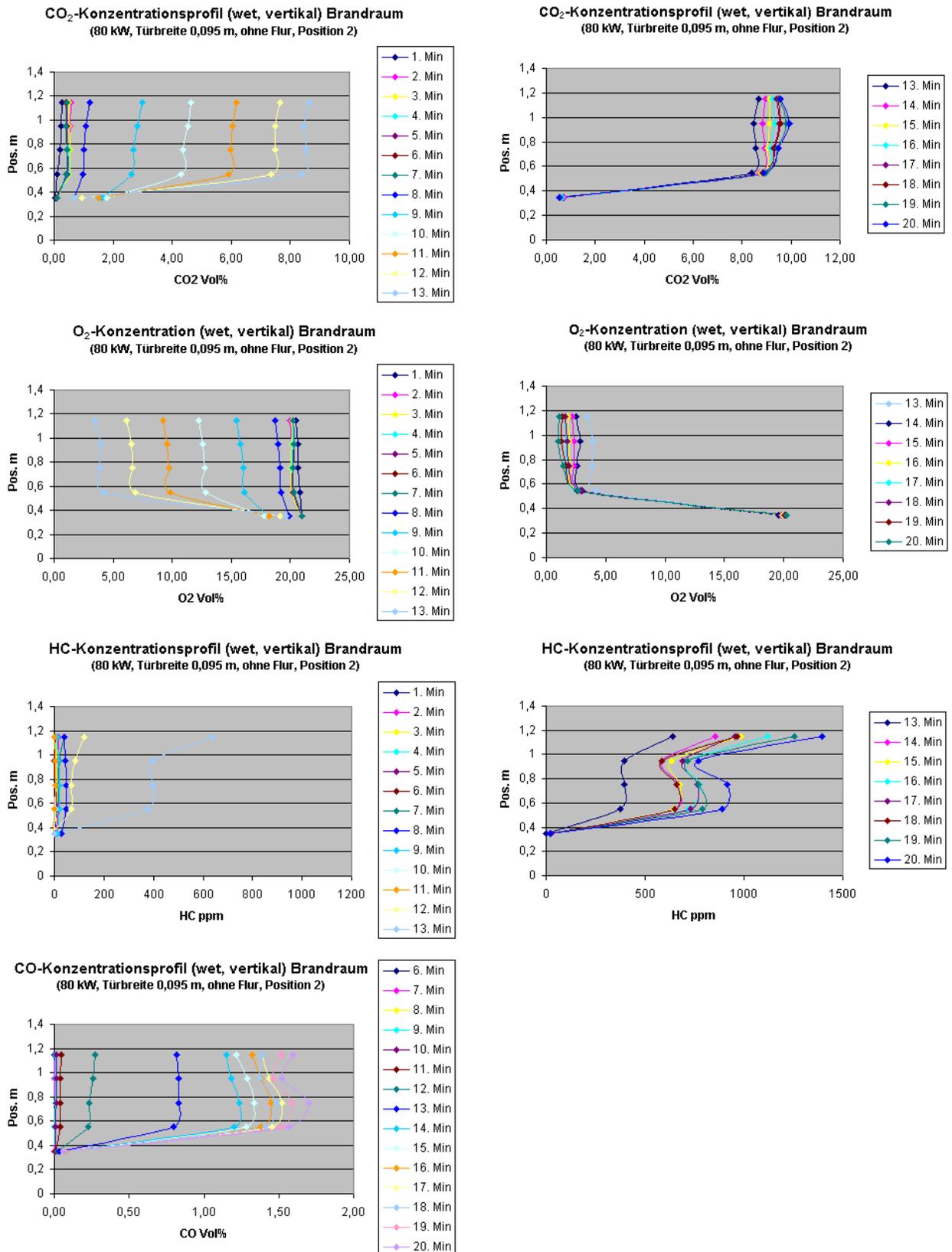


Abb. 19: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 2 im Brandraum auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 80 kW und einer Türbreite von 0,095 m

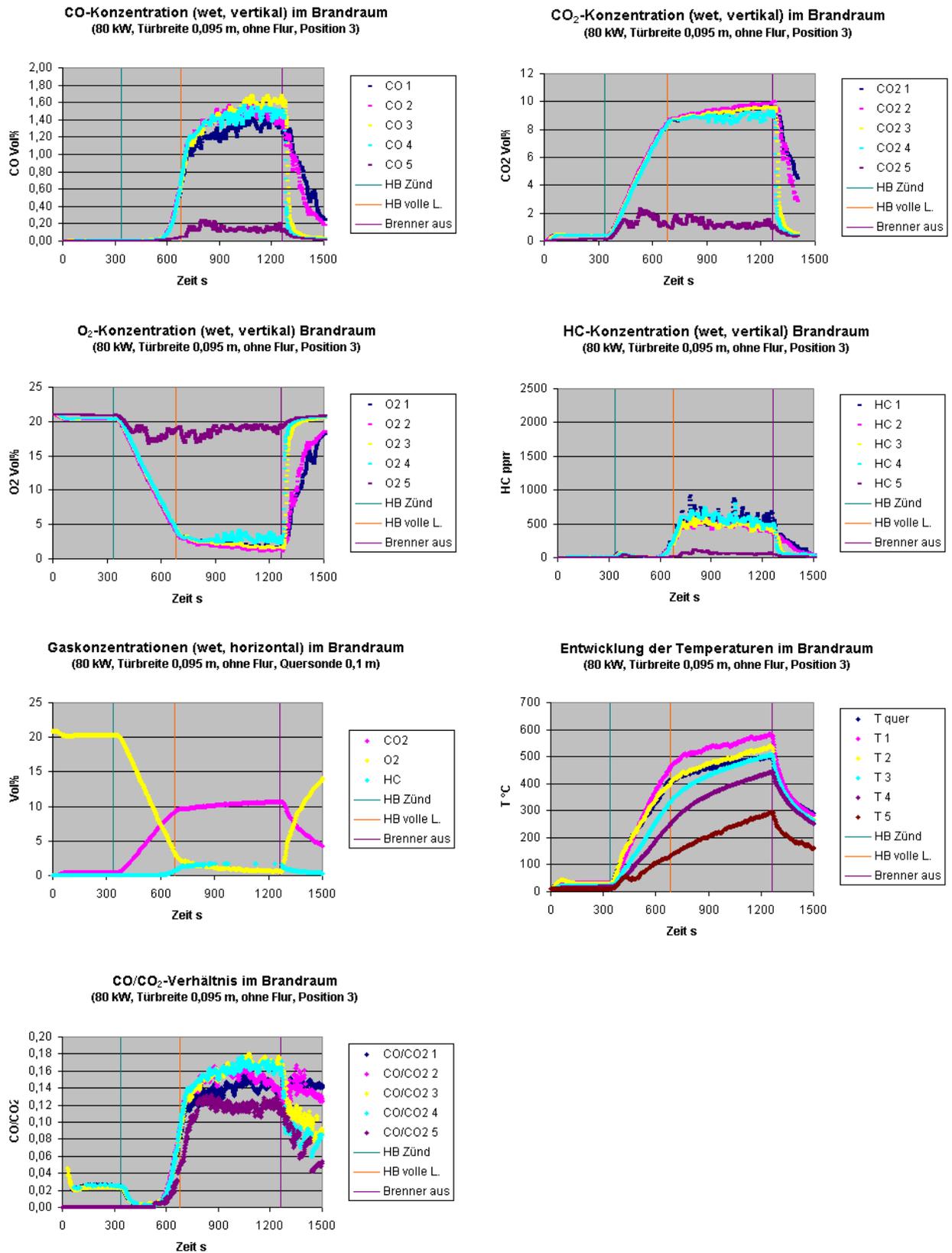


Abb. 20: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 3 im Brandraum (vertikale Messung) bei 80 kW und einer Türbreite von 0,095 m

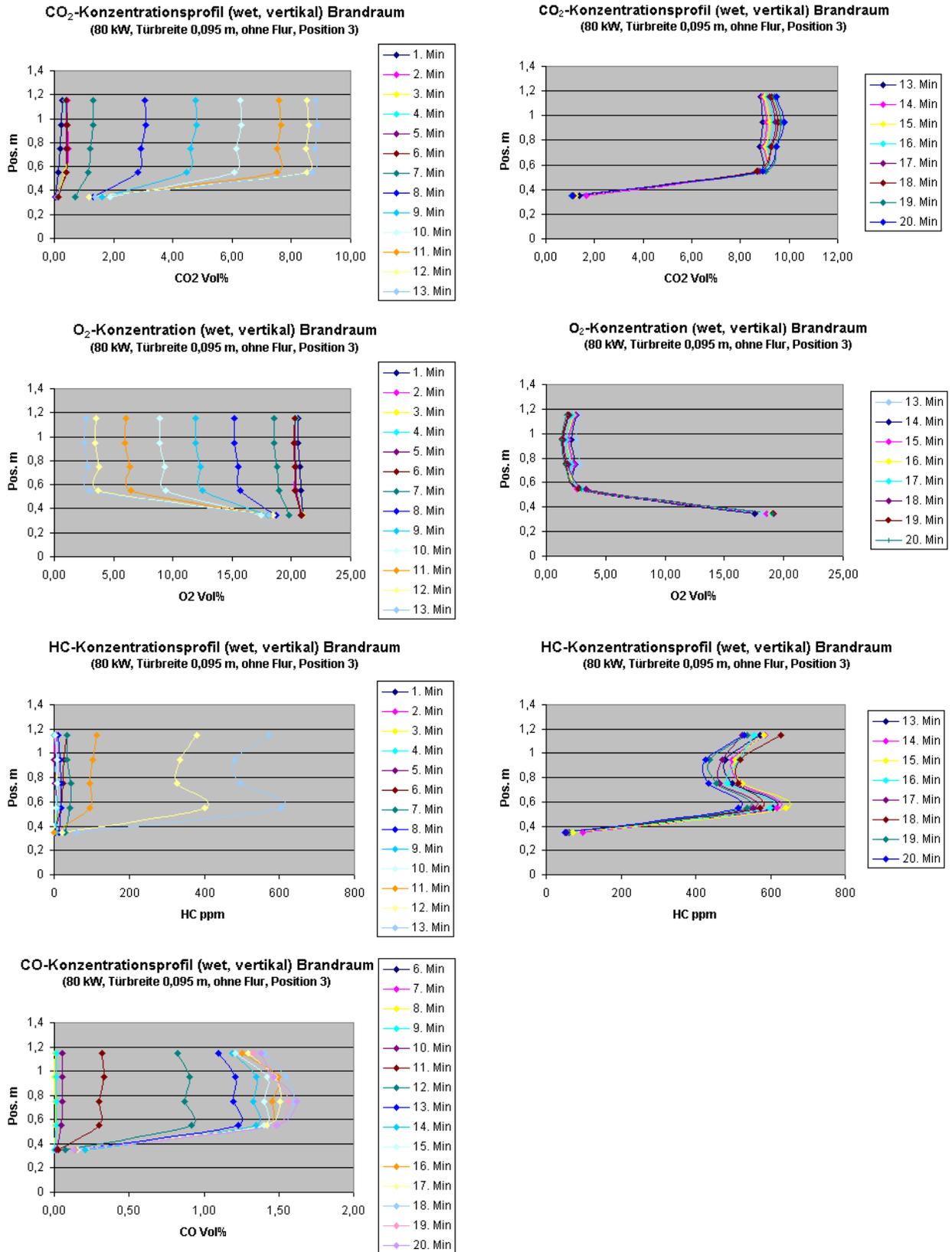


Abb. 21: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 3 im Braundraum auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 80 kW und einer Türbreite von 0,095 m

Die Untersuchungen zum vertikalen Konzentrationsprofil in der Rauchgasschicht im Brandraum wurden fortgesetzt mit der Durchführung von Bränden, bei denen sich die Energiefreisetzungsraten in der gleichen Zeitspanne von 10 Minuten bis 120 kW entwickelten. Die Türöffnungsbreiten betragen wieder 0,165 m und 0,095 m. Die Ergebnisse für die Türöffnungsbreite von 0,165 m sind in den Abbildungen 22 –25 dargestellt. Auch hier zeigte sich in der Rauchgasschicht eine relativ homogene Zusammensetzung in vertikaler Richtung. Eine gute Übereinstimmung lag wieder mit den Ergebnissen aus der Querschnittsonde vor. Erwartungsgemäß war die Rauchgaskonzentration insgesamt intensiver als bei 80 kW, d. h. es traten geringere Anteile an O₂ auf, höhere Anteile an CO₂, und wesentlich höhere Anteile an unverbrannten Kohlenwasserstoffen und CO. Grenzschichteneinflüsse auf die Gaskonzentrationen im Rauchgasvolumen in der Messhöhe von 0,55 m traten hier deutlicher hervor, d. h. der Unterschied zu dem darüber befindlichen Volumen war größer. Da aber die Konzentrationen insgesamt ausgeprägter waren, lagen die Werte an dieser Stelle über denen der Versuche mit 80 kW und gleicher Türöffnungsbreite. Unterschiede in den Gaskonzentrationen zwischen den Messpositionen 1 (hinterer Raumteil) und 2 (vorderer Raumteil) traten nur in der gleichen Größenordnung, wie bei den vorangegangenen Versuchen auf, wie die Werte in Tabelle 3 belegen. Die Temperaturen jedoch waren im vorderen Raumteil um 200 °C höher als im hinteren. Während sich im hinteren Raumteil in der Vollbrandphase die Gaskonzentrationen in den oberen Schichten wieder spiegelbildlich verhielten, lagen an den äquivalenten Messorten im vorderen Raumteil trotz höherer Temperatur etwas geringere Konzentrationen an unverbrannten Kohlenwasserstoffen, CO und CO₂ vor und O₂ entsprechend etwas höher. Auf Grund der höheren Energiefreisetzungsrates erreichten die Gaskonzentrationen bereits während der Brandentwicklungsphase Werte, die bei den Versuchen mit 80 kW erst in der Vollbrandphase auftraten.

Die CO-Bildung in der Vollbrandphase ist vergleichbar mit der bei den Versuchen mit 80 kW und einer Türöffnungsbreite von 0,095 m. Auch hier treten anhaltende und steigende Werte bei Erreichen einer Energiefreisetzungsrates von etwa 50 kW knapp 3 Minuten nach Zündung des Hauptbrenners auf.

Tabelle 3: Gaskonzentrationen (wet) nach Brandentwicklung (1) und 5 min Vollbrand (2) bei einer Türöffnungsbreite von 0,165 m und 120 kW

| Messpunkt | CO Vol% | | CO ₂ Vol% | | O ₂ Vol% | | HC Vol% | |
|------------------------|---------|-----|----------------------|------|---------------------|-----|---------|------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Querschnitt Position 1 | | | 10,0 | 10,5 | 1,3 | 0,2 | 1,3 | > 2 |
| Position 1 | 1,3 | 1,7 | 9,2 | 9,8 | 1,9 | 0,8 | 0,05 | 0,09 |
| Querschnitt Position 1 | | | 10,4 | 11,3 | 1,8 | 0,4 | 1,1 | > 2 |
| Position 3 | 1,2 | 1,5 | 9,3 | 10,3 | 1,8 | 0,3 | 0,05 | 0,1 |

Der Versuch bei 120 kW und einer Türöffnungsbreite von 0,095 m, dessen Ergebnisse in den Abbildungen 26 – 27 grafisch dargestellt sind, zeigte den auf Grund der schlechteren Ventilation zu erwartenden Anstieg der Rauchgasschichtdicke, deutlich erkennbar am Verlauf der Messergebnisse in der Höhe von 0,55 m. Das darunter gelegene Volumen wurde ebenfalls stärker vom Rauchgas durchsetzt. Die Bestandteile der unvollständigen Verbrennung CO und HC traten in weitaus höherer Konzentration auf, entsprechend dazu eine verringerte CO₂-Bildung bei gleichwertig geringem Sauerstoffgehalt. Dazu passt die mit 500 °C relativ niedrige Temperatur. Der Beginn der CO-Bildung konnte dem Auftreten einer Energiefreisetzungsrates von ungefähr 40 kW zugeordnet werden, die ca. 2 min nach Zündung des Hauptbrenners erreicht war.

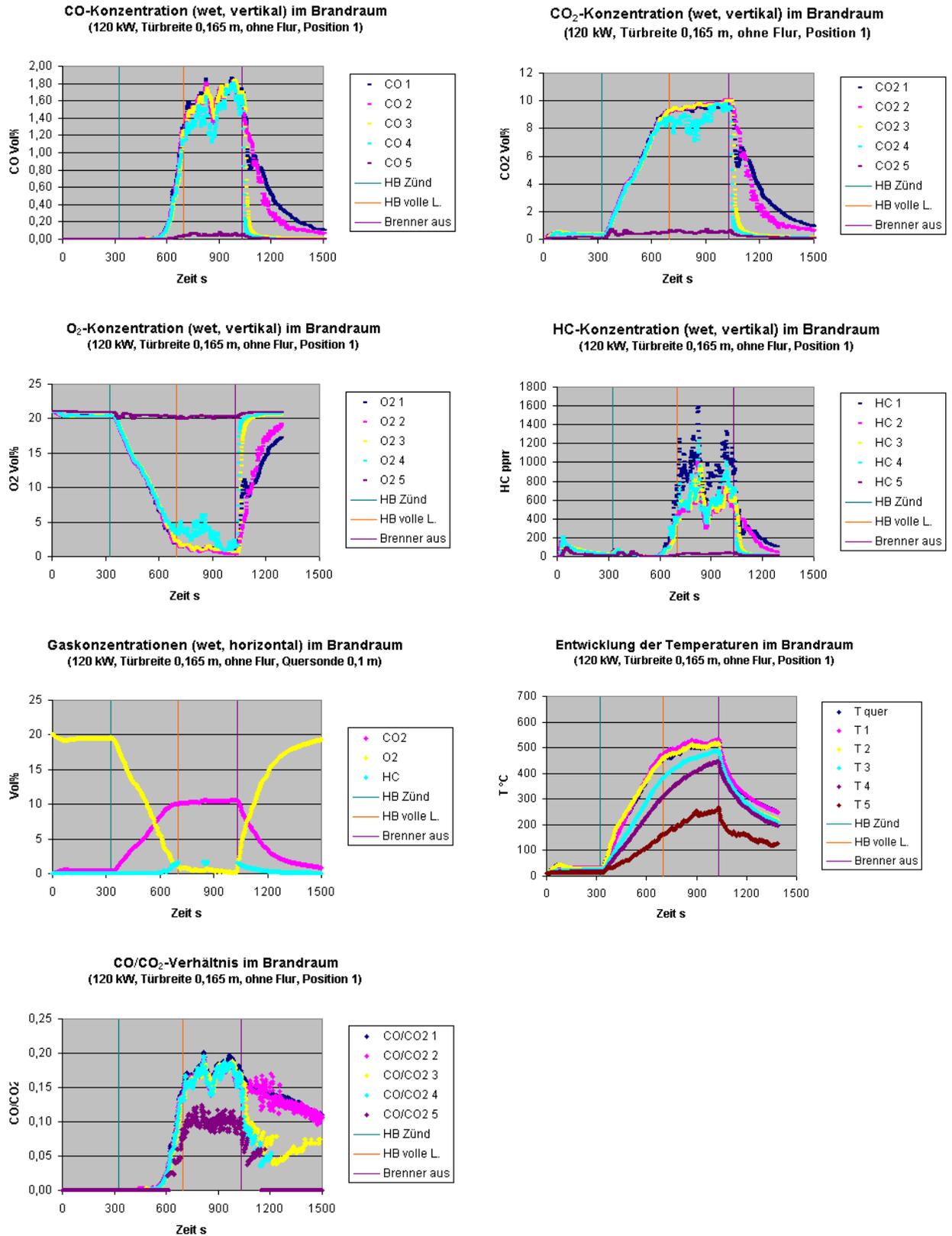
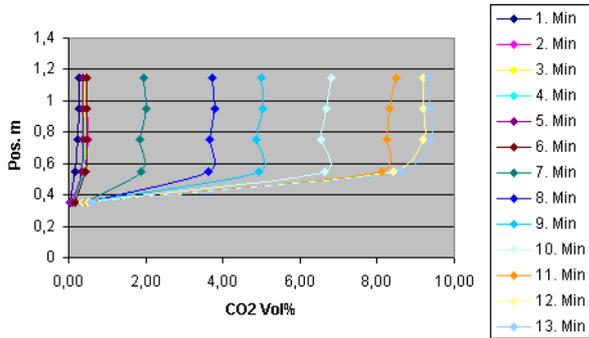
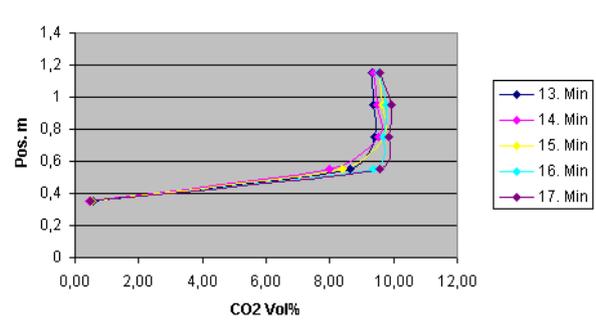


Abb. 22: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 1 im Brandraum (vertikale Messung) bei 120 kW und einer Türbreite von 0,165 m

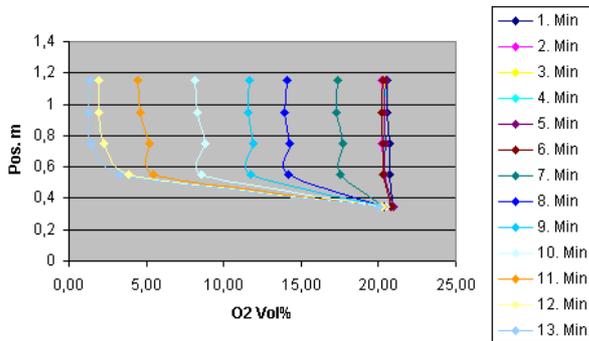
CO₂-Konzentrationsprofil (wet, vertikal) Brandraum
(120 kW, Türbreite 0,165 m, ohne Flur, Position 1)



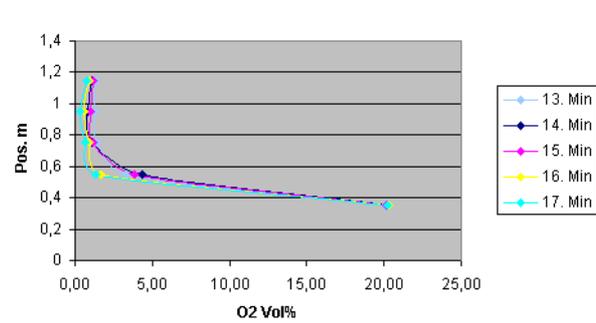
CO₂-Konzentrationsprofil (wet, vertikal) Brandraum
(120 kW, Türbreite 0,165 m, ohne Flur, Position 1)



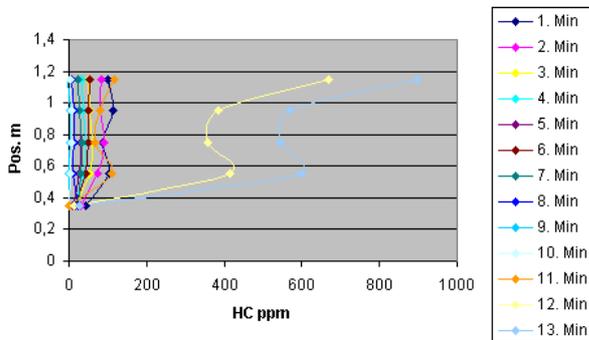
O₂-Konzentrationsprofil (wet, vertikal) im Brandraum
(120 kW, Türbreite 0,165 m, ohne Flur, Position 1)



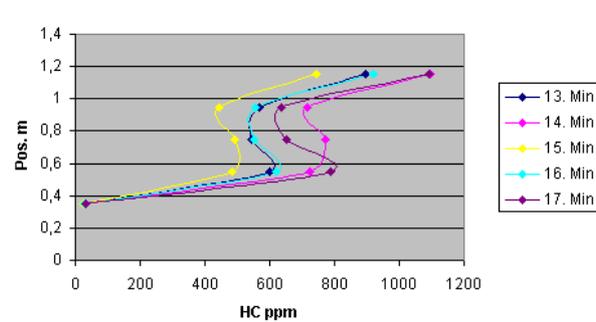
O₂-Konzentrationsprofil (wet, vertikal) im Brandraum
(120 kW, Türbreite 0,165 m, ohne Flur, Position 1)



HC-Konzentrationsprofil (wet, vertikal) Brandraum
(120 kW, Türbreite 0,165 m, ohne Flur, Position 1)



HC-Konzentrationsprofil (wet, vertikal) Brandraum
(120 kW, Türbreite 0,165 m, ohne Flur, Position 1)



CO-Konzentrationsprofil (wet, vertikal) Brandraum
(120 kW, Türbreite 0,165 m, ohne Flur, Position 1)

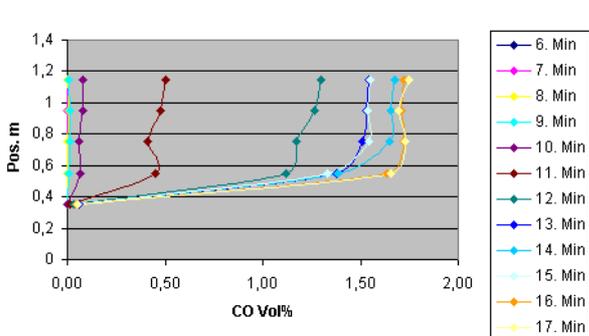


Abb. 23: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 1 im Brandraum auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 120 kW und einer Türbreite von 0,165 m

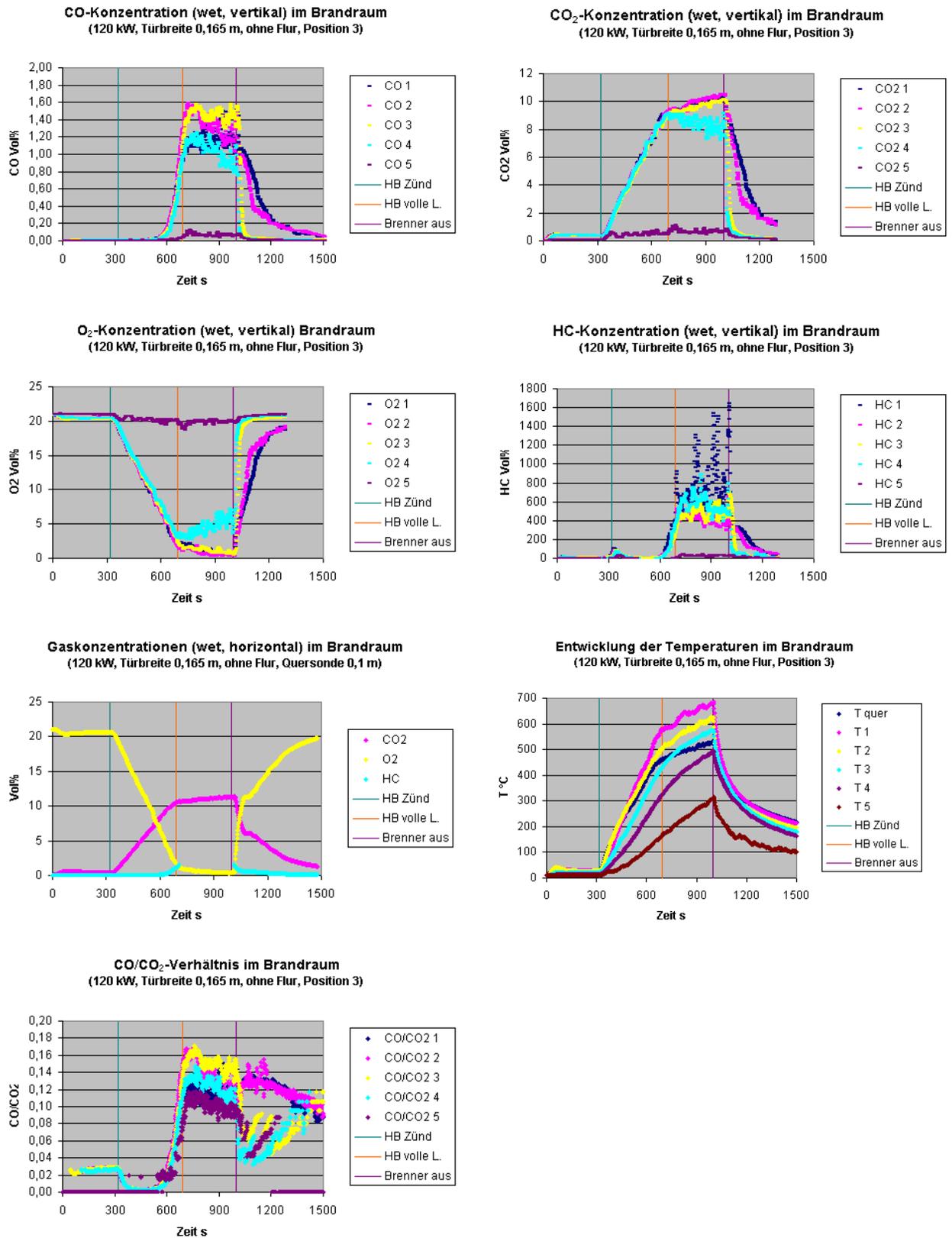


Abb. 24: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 3 im Brandraum (vertikale Messung) bei 120 kW und einer Türbreite von 0,165 m

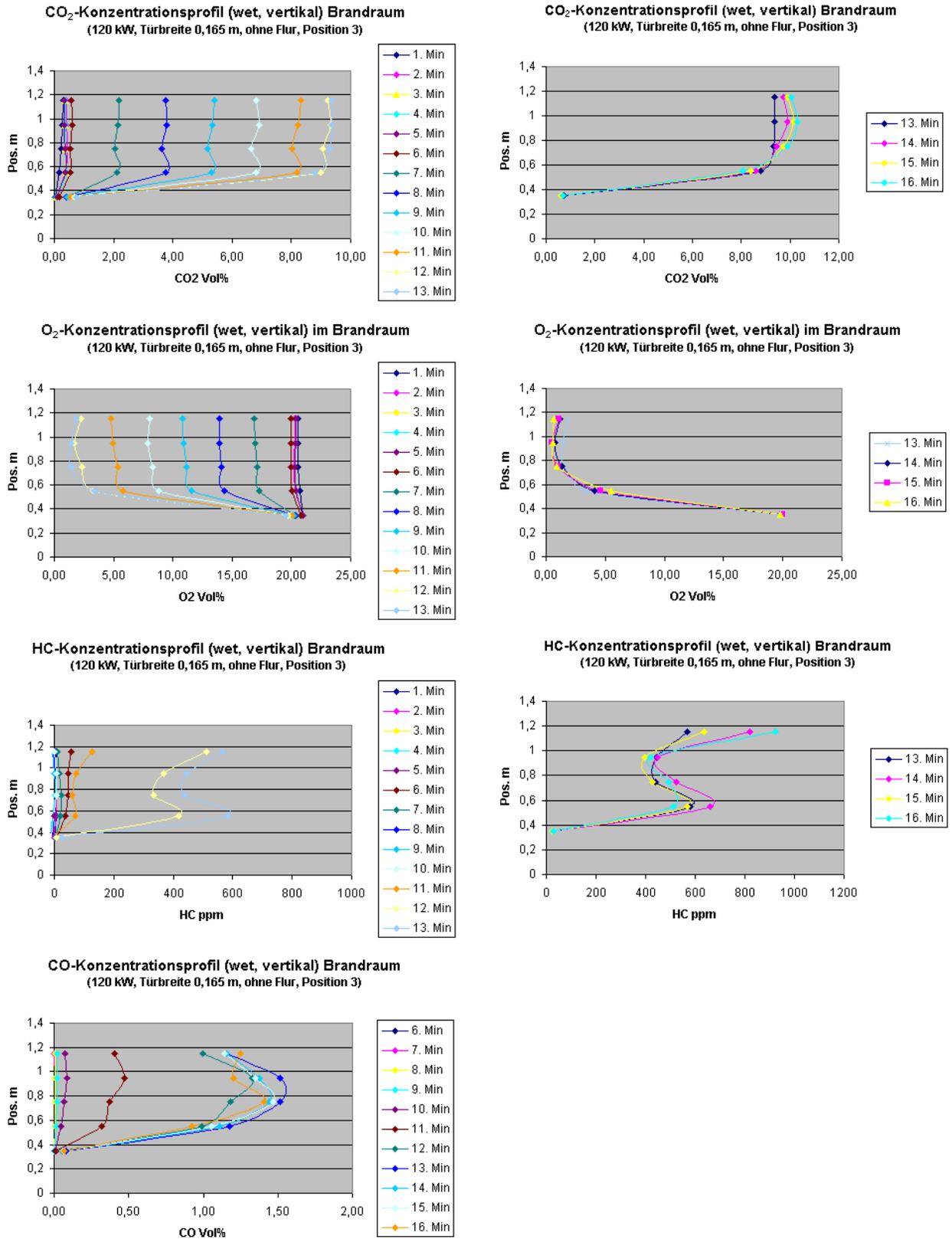


Abb. 25: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 3 im Brandraum auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 120 kW und einer Türbreite von 0,165 m

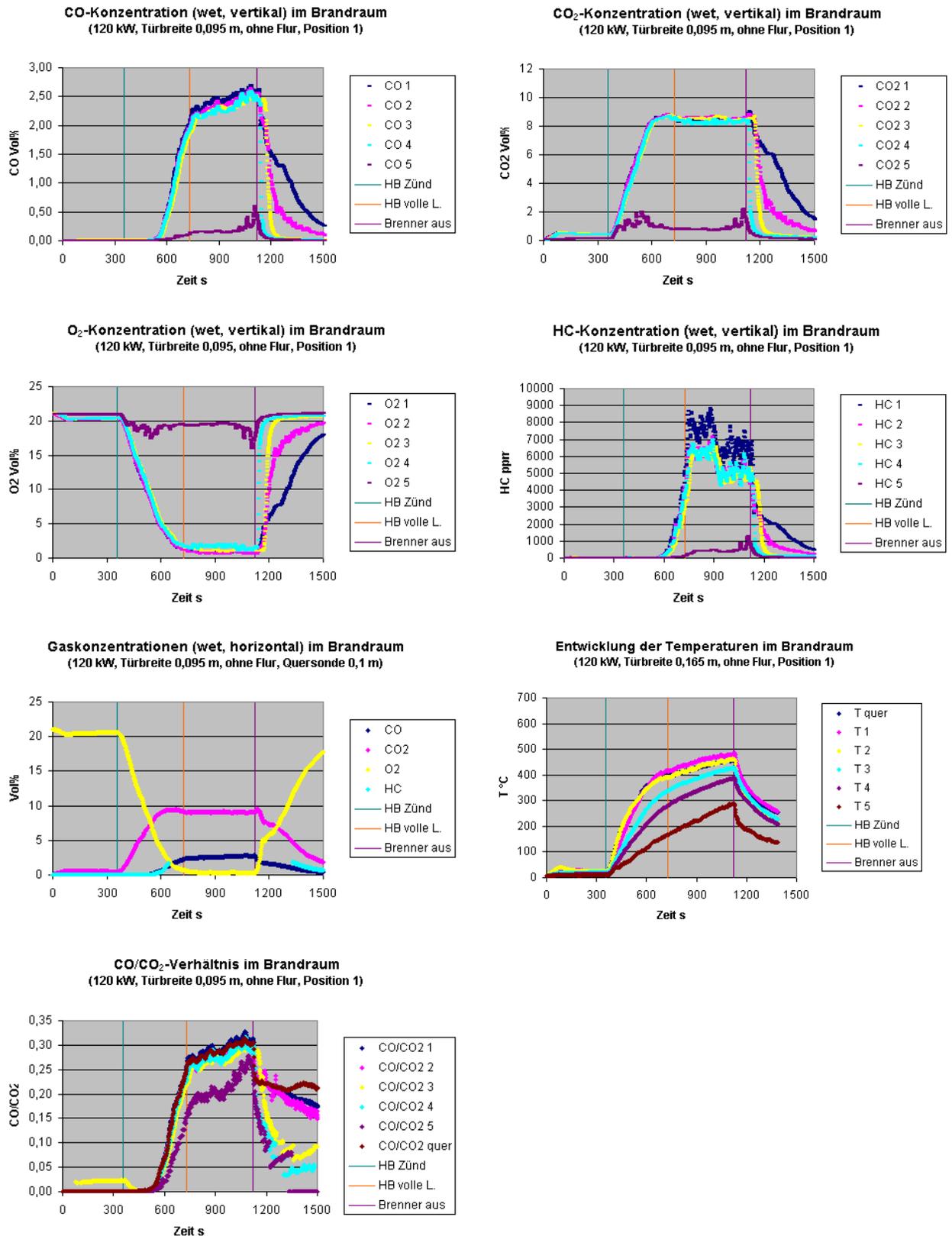


Abb. 26: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 1 im Brandraum (vertikale Messung) bei 120 kW und einer Türbreite von 0,095 m

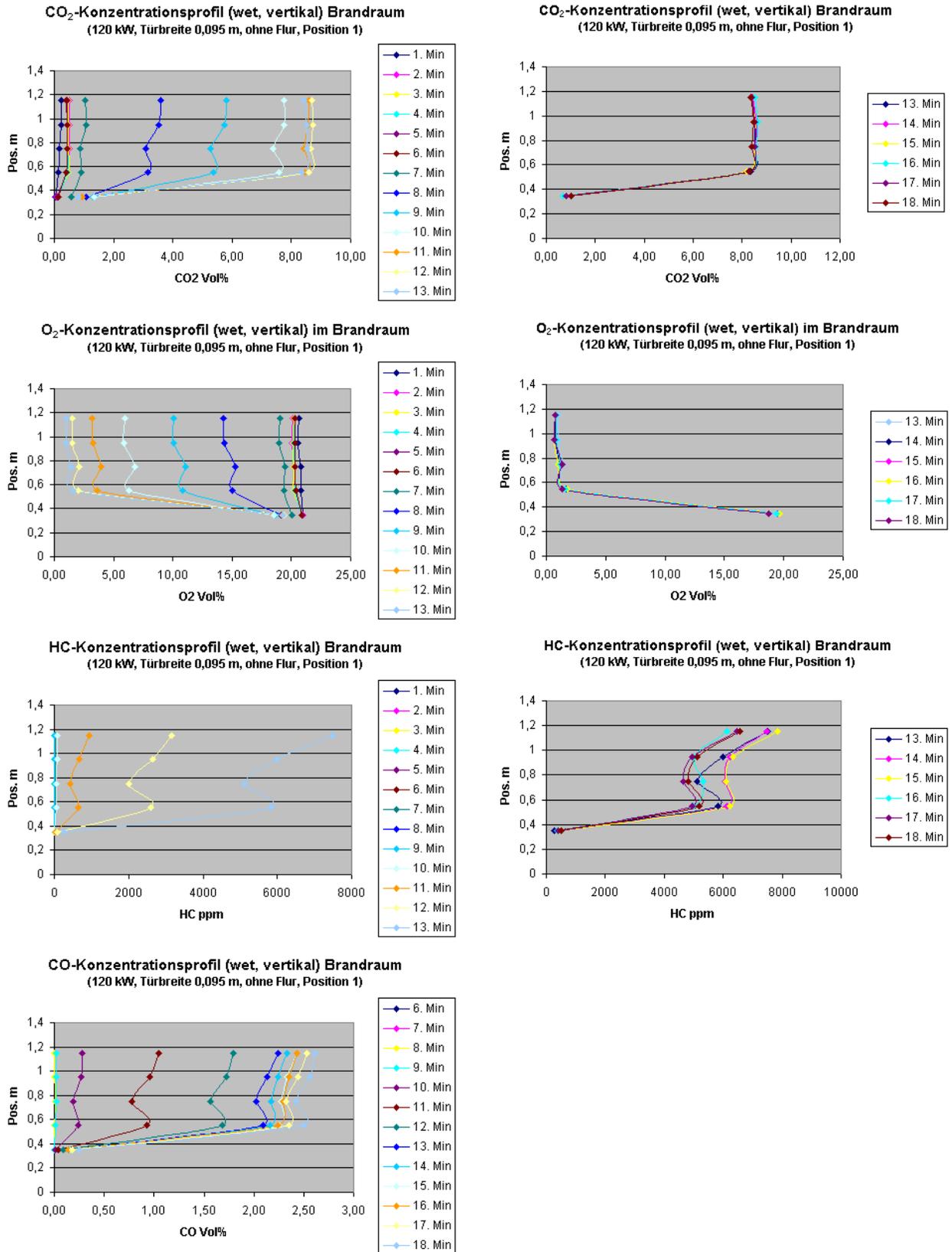


Abb. 27: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 1 im Brandraum auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 120 kW und einer Türbreite von 0,095 m

Den Abschluss der Untersuchungen zum vertikalen Konzentrationsprofil in der Rauchgasschicht im Brandraum bildeten Versuche bei einer theoretischen Energiefreisetzungsrate von 150 kW (Abbildungen 28 – 31). Diese wurden nur bei einer Türöffnungsbreite von 0,165 m durchgeführt, da bei diesen Ventilationsbedingungen die Flammen während der Vollbrandphase bereits aus dem Brandraum heraustreten und somit keinen Einfluss mehr auf die Verhältnisse im Brandraum ausüben. Deshalb wurde die Vollbrandphase zeitlich auch nicht mehr so ausgedehnt.

Die Gaskonzentrationen zeigten ein vergleichbares vertikales Profil mit denen der bereits vorgestellten Versuche: Homogenität im oberen Volumen mit beginnender Beeinflussung ab einer Messhöhe von 0,55 m. Diese Beeinflussung trat etwas stärker im vorderen Raumteil auf. Ersichtlich ist weiterhin, dass die Gaskonzentrationen bereits kurz vor dem Ende der Brandentwicklungsphase vom nahezu linearen Anstieg in eine fast stationäre Phase übergingen. Es traten die höchsten, der bei diesen Versuchen festgestellten Konzentrationen an Rauchgasbestandteilen der unvollständigen Verbrennung auf. Auch hier setzte die CO-Bildung etwa 2 Minuten nach Zündung des Hauptbrenners und Erreichen einer Energiefreisetzungsrate von etwa 40 kW ein. In der Tabelle 4 sind die Messwerte zum Ende der Brandentwicklungsphase sowie die nach 2 Minuten Vollbrand erreichten Konzentrationen aufgeführt.

Tabelle 4: Gaskonzentrationen (wet) nach Brandentwicklung (1) und 2 min Vollbrand (2) bei einer Türöffnungsbreite von 0,165 m und 150 kW

| Messpunkt | CO Vol% | | CO ₂ Vol% | | O ₂ Vol% | | HC Vol% | |
|------------------------|---------|------|----------------------|------|---------------------|------|---------|------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Querschnitt Position 1 | 2,2 | 2,65 | 10,4 | 10,0 | 0,15 | 0,04 | > 2 | > 2 |
| Position 1 | 1,8 | 2,4 | 9,3 | 8,9 | 0,6 | 0,4 | 0,17 | 0,35 |
| Querschnitt Position 1 | | | 11,9 | 11,8 | 0,3 | 0,15 | > 2 | > 2 |
| Position 3 | 1,5 | 1,8 | 9,6 | 9,8 | 0,5 | 0,3 | 0,11 | 0,16 |

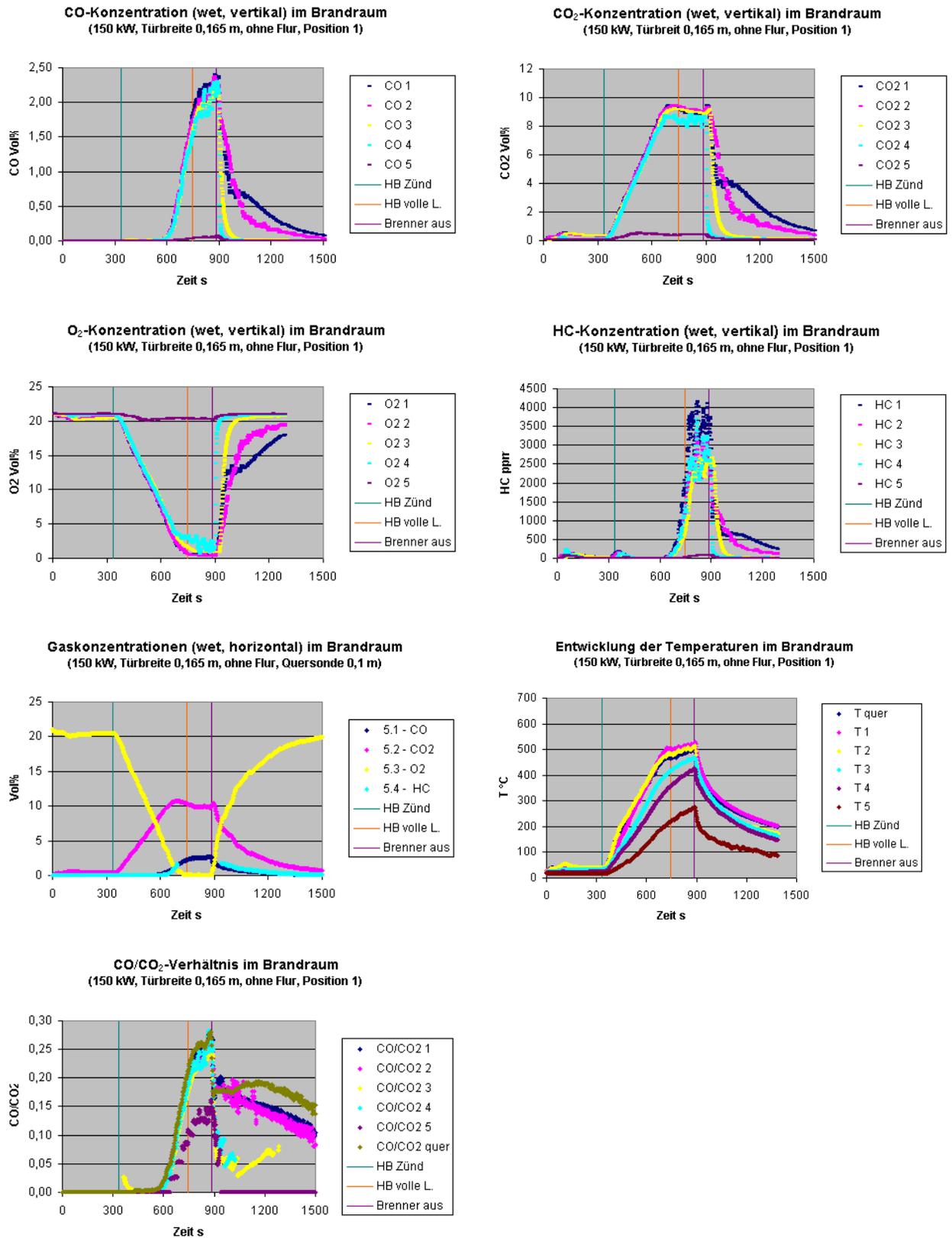


Abb. 28: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 1 im Brandraum (vertikale Messung) bei 150 kW und einer Türbreite von 0,165 m

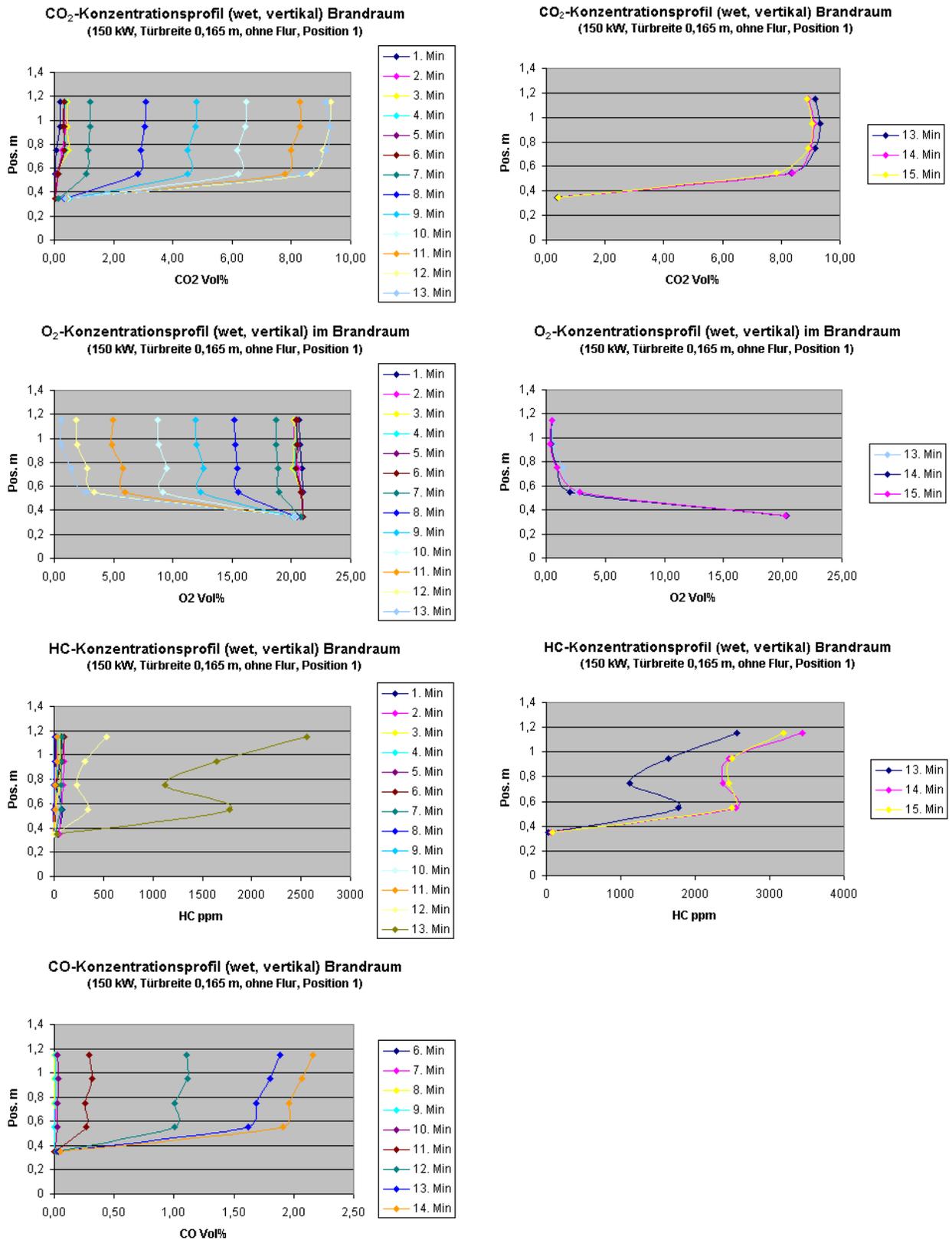


Abb. 29: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 1 im Brandraum auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 150 kW und einer Türbreite von 0,165 m

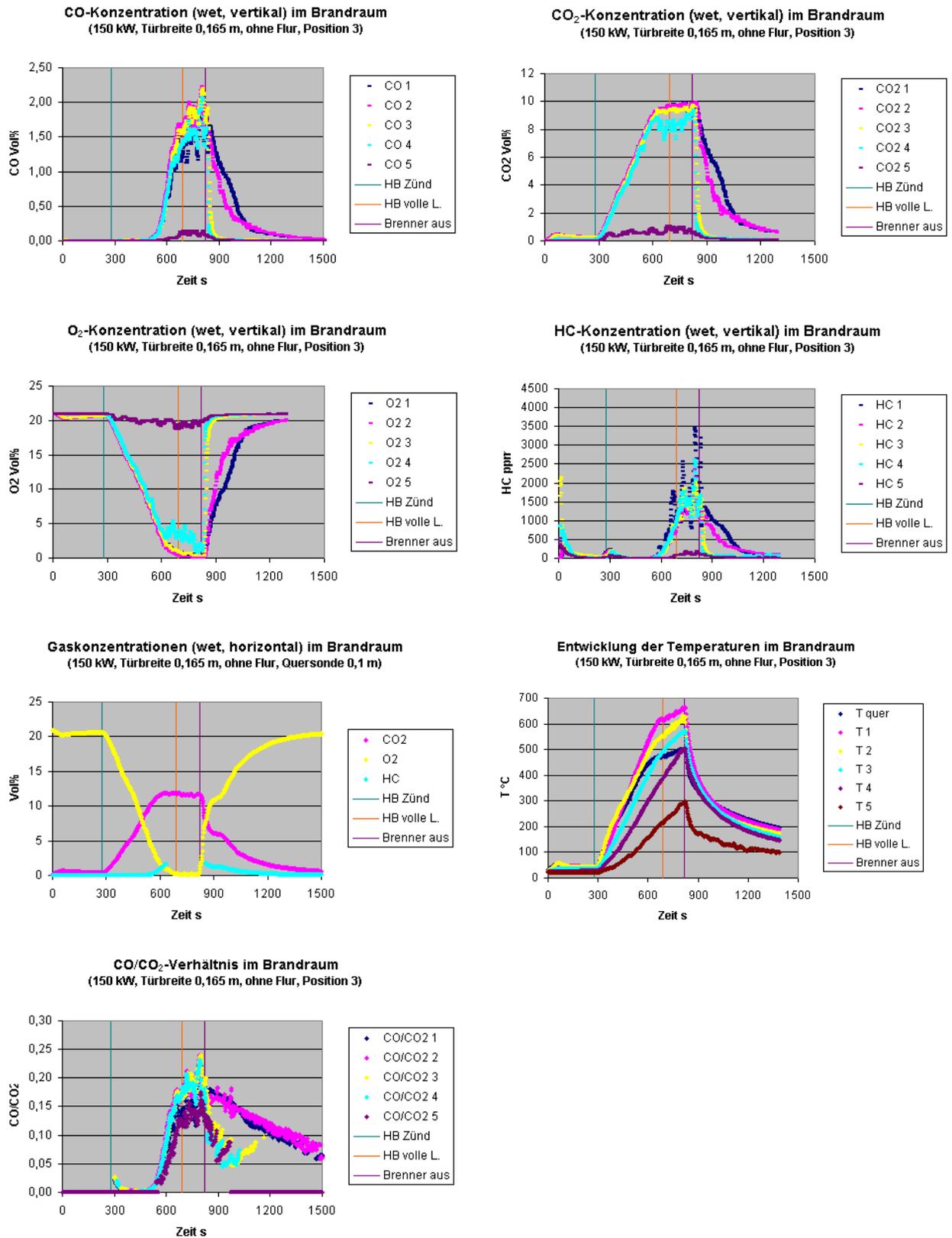
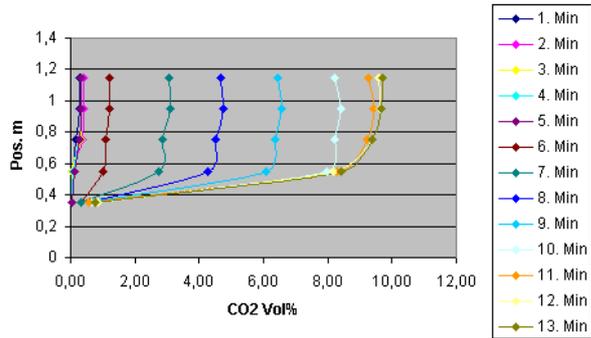
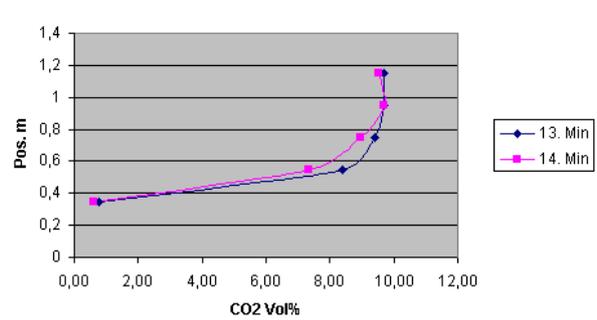


Abb. 30: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 3 im Brandraum (vertikale Messung) bei 150 kW und einer Türbreite von 0,165 m

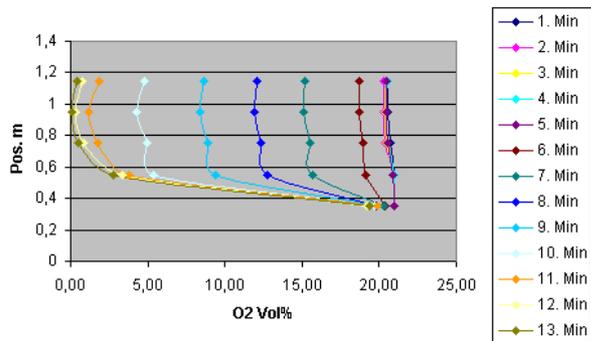
CO₂-Konzentrationsprofil (wet, vertikal) Brandraum
(150 kW, Türbreite 0,165 m, ohne Flur, Position 3)



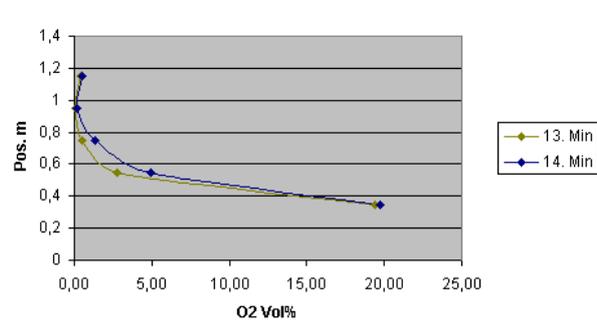
CO₂-Konzentrationsprofil (wet, vertikal) Brandraum
(150 kW, Türbreite 0,165 m, ohne Flur, Position 3)



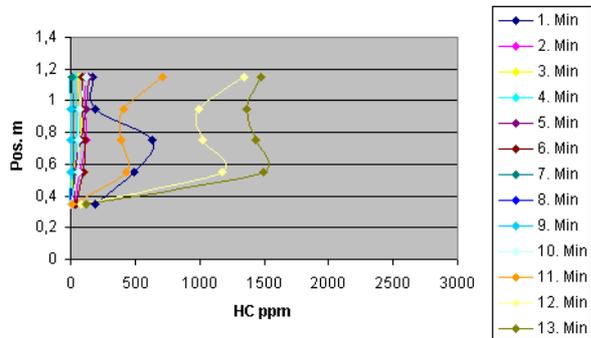
O₂-Konzentrationsprofil (wet, vertikal) im Brandraum
(150 kW, Türbreite 0,165 m, ohne Flur, Position 3)



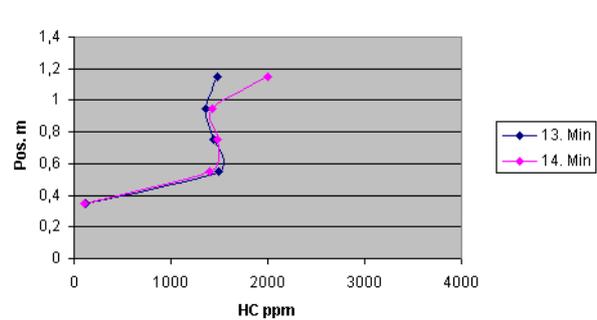
O₂-Konzentrationsprofil (wet, vertikal) im Brandraum
(150 kW, Türbreite 0,165 m, ohne Flur, Position 3)



HC-Konzentrationsprofil (wet, vertikal) Brandraum
(150 kW, Türbreite 0,165 m, ohne Flur, Position 3)



HC-Konzentrationsprofil (wet, vertikal) Brandraum
(150 kW, Türbreite 0,165 m, ohne Flur, Position 3)



CO-Konzentrationsprofil (wet, vertikal) Brandraum
(150 kW, Türbreite 0,165 m, ohne Flur, Position 3)

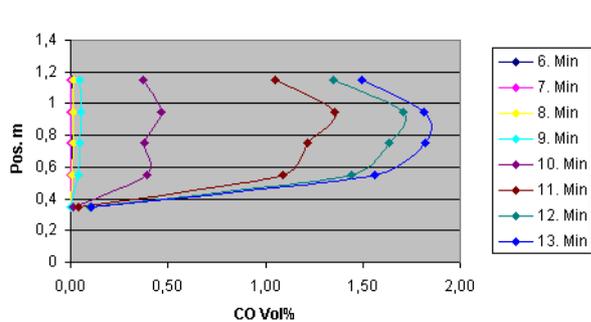


Abb. 31: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 3 im Brandraum auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 150 kW und einer Türbreite von 0,165 m

Aus den Untersuchungen zum vertikalen Konzentrationsprofil der Rauchgasschicht im Brandraum konnte abgeleitet werden, dass bei gleichbleibenden Randbedingungen bezüglich der Entwicklung der Energiefreisetzungsrate und der Ventilationsöffnung eine relativ gute Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse gegeben war.

Das Konzentrationsprofil der Rauchgasschicht stellte sich in vertikaler Richtung relativ homogen dar, wobei ein deutliches Konzentrationsgefälle vom hinteren zum vorderen Teil des Brandraumes zu erkennen war. In der Grenzschicht zur Raumatmosphäre traten Abweichungen vor allem durch Vermischung und Verdünnung auf. Der Anteil des CO gerade in diesem Bereich der Rauchgasschicht zeigte dagegen Abweichungen, die nicht durch Verdünnen hervorgerufen werden können. Die grafischen Darstellungen der Konzentrationen für CO und CO₂ zeigen zwar sinkende Werte in Richtung der angrenzenden Raumatmosphäre, aber das zueinander veränderte Verhältnis der Gase ist hieraus nicht erkennbar. Dieses Ergebnis ist deutlicher ablesbar aus der Darstellung des CO/CO₂-Verhältnisses, das für die Versuche mit 120 kW und 150 kW nochmals in feinerer Graduierung in der Abbildung 32 gegenübergestellt ist.

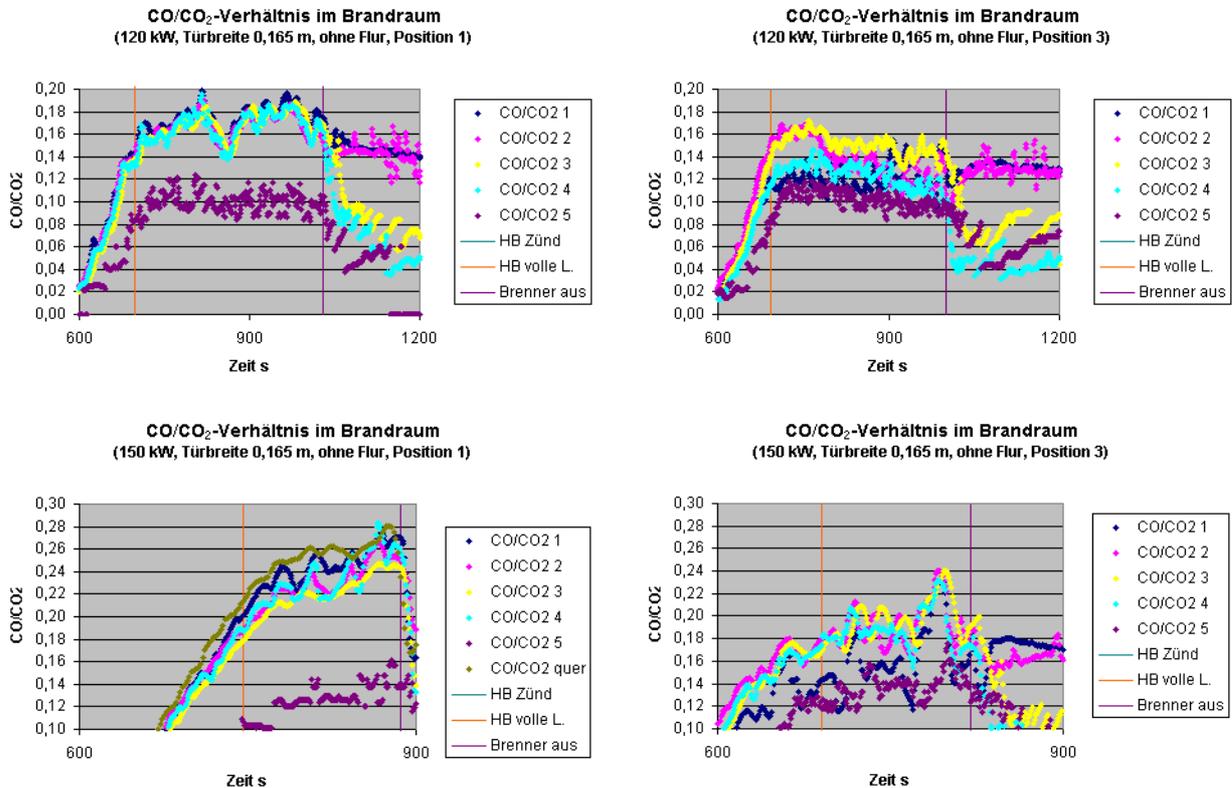


Abb. 32: CO/CO₂-Verhältnisse an vertikalen Messpunkten im Brandraum mit einer Türbreite von 0,165 m bei 120 kW und 150 kW

2.4.4 Untersuchung des vertikalen Konzentrationsprofils im Flur

Um Aussagen über die Verteilung des aus dem Brandraum ausströmenden Rauchgases im angrenzenden Raum (Flur) treffen zu können, wurden auch hier Messungen an mehreren Positionen gemäß Skizze (Abbildung 1) vorgenommen. Informationen zur Rauchgaszusammensetzung im Brandraum wurden wieder durch die Messungen mittels Querschnittsprobe 0,1 m unter der Raumdecke erhalten. Die Türöffnungsbreite wurde konstant bei 0,165 m belassen, ansonsten wurde das Versuchsregime beibehalten. Da der Flur am zum Brandraum entgegengesetzten Ende über den gesamten Raumquerschnitt offen war, konnte der Brandrauch ungehindert abströmen. Die sich einstellende Rauchgasschichtdicke war deshalb nur von den Strömungsverhältnissen abhängig und wesentlich geringer als im Brandraum.

Bei 80 kW theoretischer Energiefreisetzungsrates wurde das vertikale Konzentrationsprofil an zwei Positionen (0,4 m und 0,8 m von der Türöffnung des Brandraumes entfernt) im Flur untersucht. Deutlich erkennbar aus den Abbildungen 33 – 36 ist der Konzentrationsgradient in der Rauchgasschicht, der auf die Ausbildung einer Grenzschicht zur Umgebungsluft in einer Höhe von > 0,75 m bis < 0,95 m über dem Boden hinweist. Messwerte mit ganz geringen Konzentrationen, z. T. an der Nachweisgrenze, wurden zeitweise auch an den darunter liegenden Messstellen erhalten.

Die zeitliche Entwicklung der Rauchgaskonzentrationen im Brandraum war bei beiden Versuchen fast identisch, erkennbar u. a. am gleichen Verlauf des CO/CO₂-Verhältnisses. Die grafischen Darstellungen der Rauchgaskonzentrationen an den Messpositionen 1 und 2 im Flur (Abbildungen 34 und 36) zeigen eine stärker werdende Differenzierung in den Werten der Messhöhen 1,15 m und 0,95 m. Die auf den ersten Blick paradox erscheinenden etwas höheren Werte an CO, CO₂ und HC bzw. niedrigeren Werte an O₂ in der Messhöhe 1,15 m an Position 2 waren unterschiedlichen Vermischungsbedingungen mit Luft geschuldet. Die Messposition 1 lag näher zur Türöffnung. Hier besaß der aus der Tür austretende Rauchgasstrom noch eine etwas stärkere Schichtdicke, hatte sich aber noch nicht über den gesamten Querschnitt des Flures ausgebreitet. Am Standort der Messsonde in Position 2 war der Rauchgasstrom besser über den Querschnitt verteilt, deshalb in der Schichtdicke abgeflachter und in Messhöhe 0,95 m den Grenzschichteinflüssen stärker ausgesetzt.

Das Auftreten von CO in der Rauchgasschicht im Flur begann an der Messposition 1 an oberster Messstelle mit Werten an der Nachweisgrenze (0,01 Vol%) nach Zünden des Hauptbrenners etwa zeitgleich mit den im Brandraum gemessenen Werten bei einer Energiefreisetzung von etwa 30 kW. Kurz nach Beginn des Anstiegs der CO-Konzentration im Brandraum bei 55 kW war dann ebenfalls CO an der zweitobersten Messstelle im Flur nachweisbar. Mit Übergang zur Vollbrandphase erhöhten sich die Konzentrationen. Tabelle 5 zeigt einen Vergleich der Gaskonzentrationen von Messstelle 1 und Querschnittsprobe.

Tabelle 5: Gaskonzentrationen (wet) nach Brandentwicklung (1) und 5 min Vollbrand (2) bei einer Türöffnungsbreite von 0,165 m und 80 kW im Brandraum (Querschnitt) und im Flur

| Messpunkt | CO Vol% | | CO ₂ Vol% | | O ₂ Vol% | | HC Vol% | |
|------------------------|---------|------|----------------------|-----|---------------------|------|---------|--------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Querschnitt Position 1 | 0,2 | 0,5 | 8,1 | 9,5 | 5,9 | 3,8 | 0,08 | 0,2 |
| Flur Position 1 | 0,02 | 0,1 | 2,0 | 2,1 | 17,2 | 17,2 | 0,0005 | 0,0005 |
| Querschnitt Position 1 | 0,2 | 0,5 | 8,0 | 9,3 | 5,7 | 3,5 | 0,05 | 0,2 |
| Flur Position 2 | 0,01 | 0,08 | 2,3 | 2,4 | 16,6 | 16,5 | 0,0002 | 0,0007 |

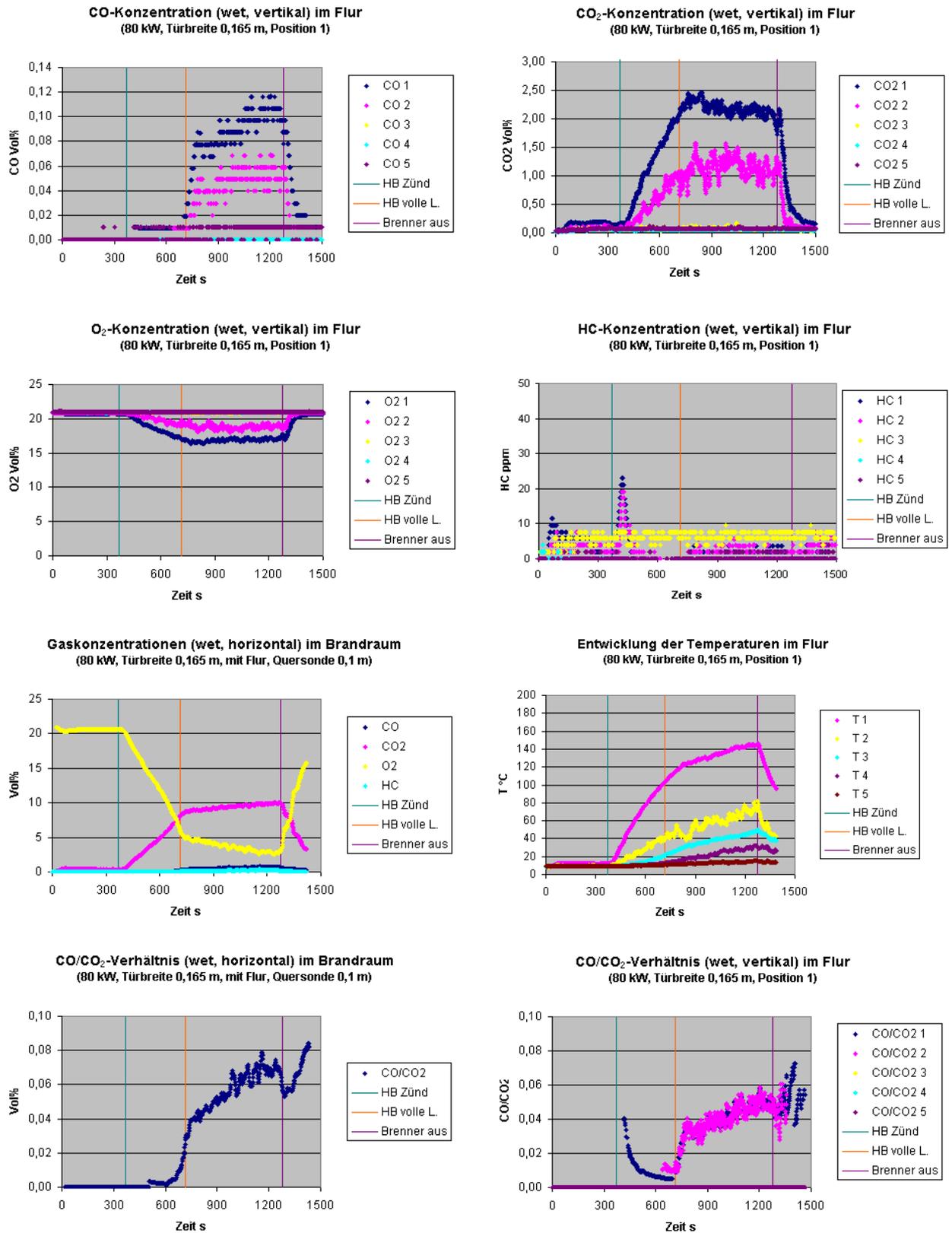


Abb. 33: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 1 im Flur (vertikale Messung) im Vergleich zum hinteren Teil des Brandraumes (horizontale Messung) bei 80 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

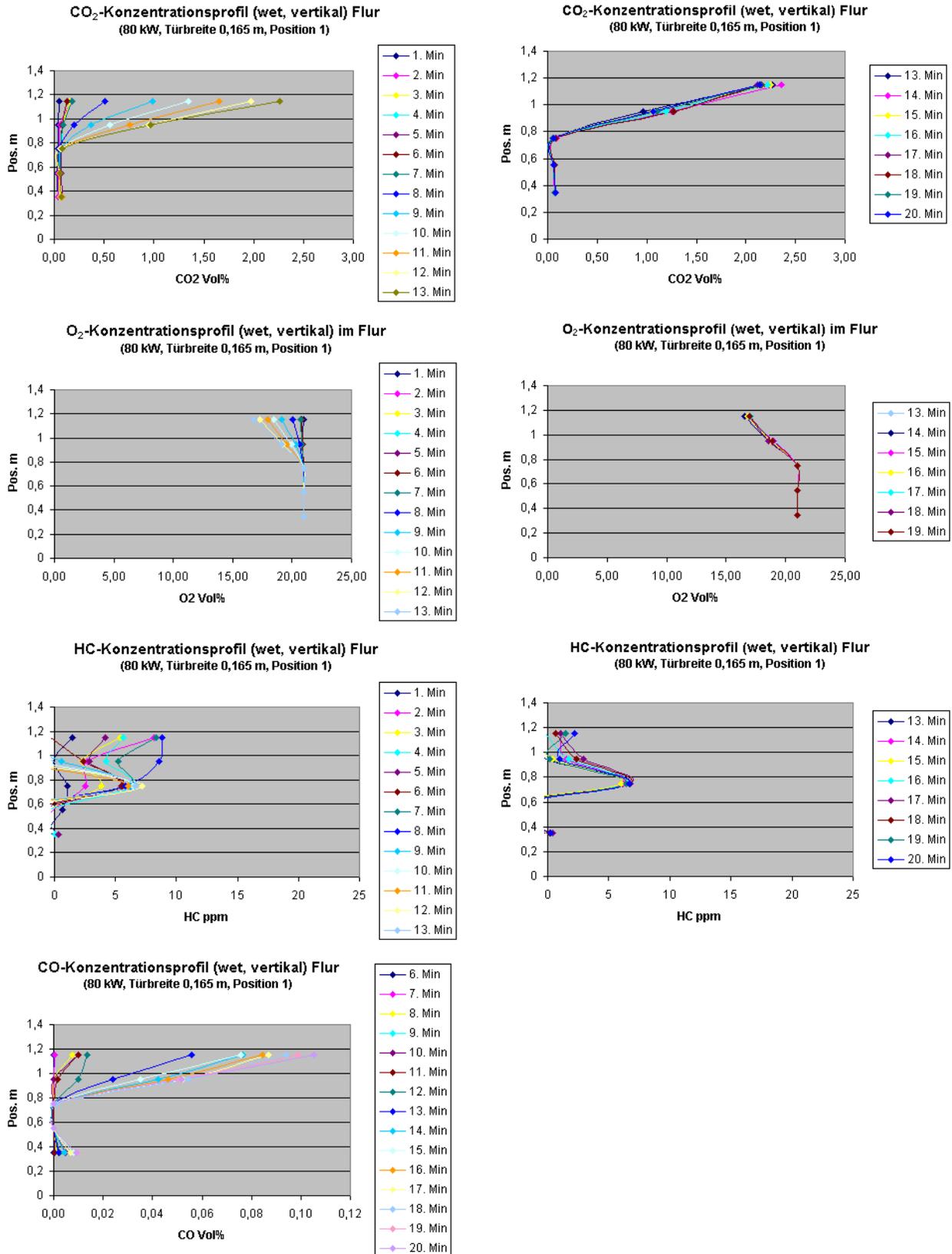


Abb. 34: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 1 im Flur auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 80 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

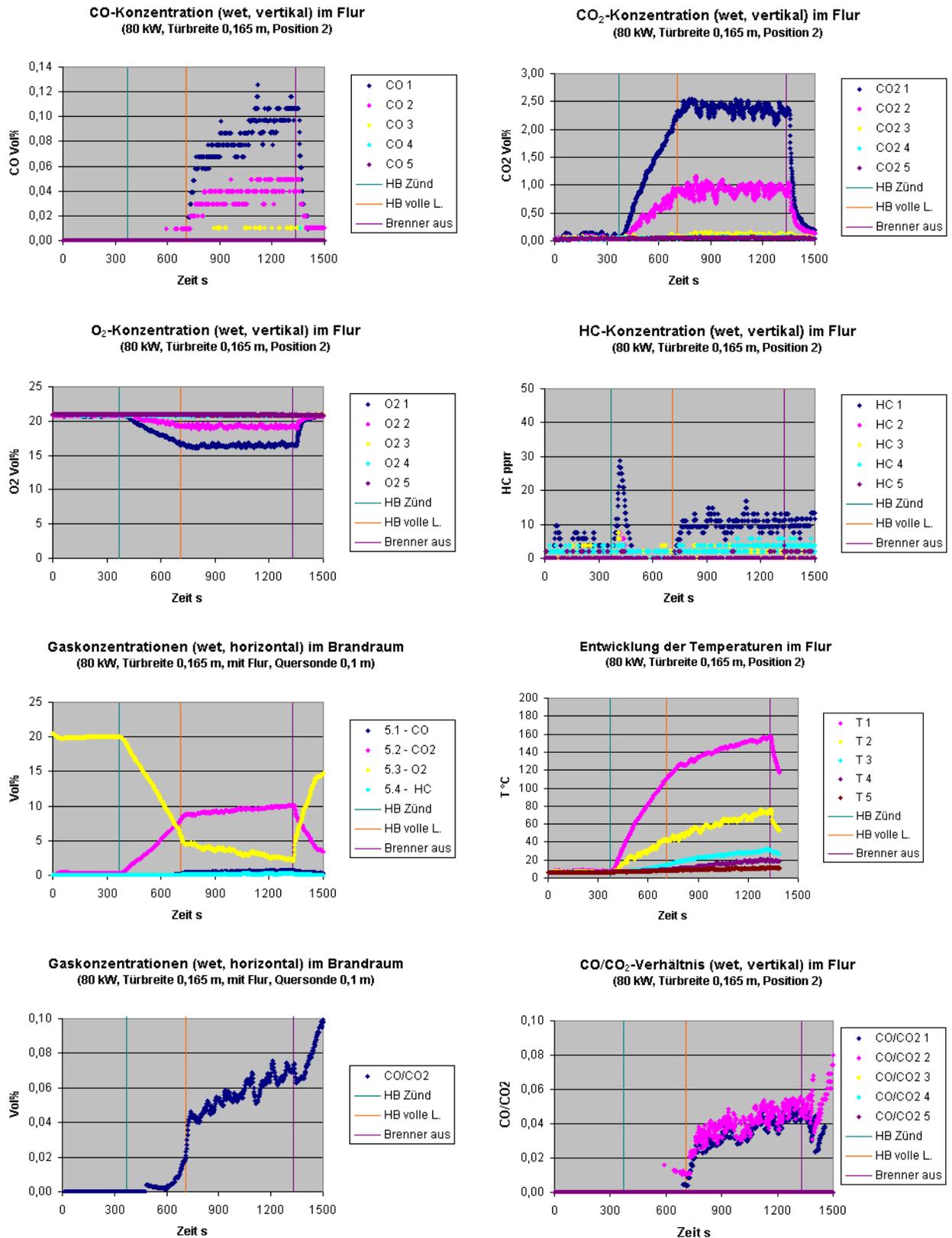


Abb. 35: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 2 im Flur (vertikale Messung) im Vergleich zum hinteren Teil des Brandraumes (horizontale Messung) bei 80 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

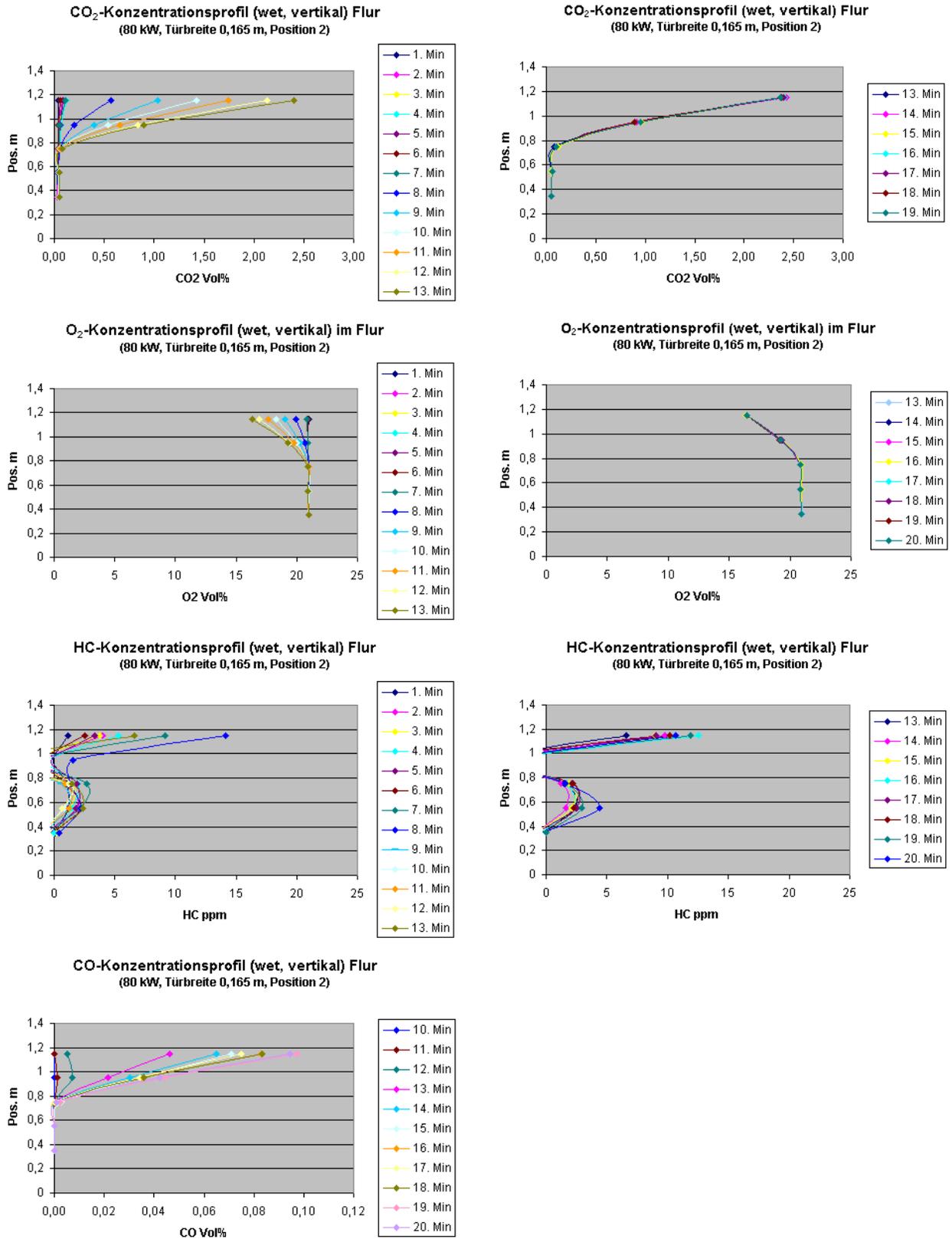


Abb. 36: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 2 im Flur auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 80 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

Die Versuche mit einer theoretischen Energiefreisetzungsrate von 120 kW erbrachten hinsichtlich der Rauchgasverteilung gleiche Ergebnisse, wie die mit 80 kW ausgeführten. Auch die Konzentrationen an CO₂ und O₂ waren fast gleich. Nur der Anteil der aus unvollständiger Verbrennung resultierenden Rauchgasbestandteile CO und HC war erheblich angestiegen. Eine leichte Reduzierung der Konzentrationen an CO, CO₂ und HC an den Messpositionen im Flur während des Brandes wurden wahrscheinlich durch Veränderungen im Einmischen von Luft hervorgerufen, da auch die O₂-Konzentration entsprechend anstieg. Bei diesen Versuchen war, genau wie bei den vorangegangenen, das CO/CO₂-Verhältnis an den Messpositionen entlang des Rauchgasausbreitungsweges etwa gleichbleibend. Es gab Unterschiede mit gleichem Trend zu dem jeweils mit den Messwerten aus dem hinteren Teil des Brandraumes berechneten Ergebnis. Diese können jedoch nur als Anhaltspunkt verstanden werden, denn dass die im restlichen Raum ablaufenden Prozesse hinsichtlich der Bildung von CO und CO₂ einen unterschiedlichen Konzentrationsgradienten über die Raumtiefe verursachten, wurde bereits erwähnt und in Abbildung 32 gezeigt. Die Messwerte sind in den Abbildungen 37 – 42 grafisch dargestellt sowie in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Gaskonzentrationen (wet) nach Brandentwicklung (1) und 5 min Vollbrand (2) im Brandraum (Querschnitt) und im Flur (120 kW, Türöffnungsbreite 0,165 m)

| Messpunkt | CO Vol% | | CO ₂ Vol% | | O ₂ Vol% | | HC Vol% | |
|------------------------|---------|------|----------------------|-------|---------------------|------|---------|-------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Querschnitt Position 1 | 1,35 | 1,84 | 9,7 | 10,0 | 1,25 | 0,3 | 1,5 | > 2 |
| Flur Position 1 | 0,3 | 0,35 | 2,5 | 2,0 | 16,0 | 17,3 | 0,01 | 0,019 |
| Querschnitt Position 1 | 1,4 | 1,9 | 9,9 | 10,25 | 1,0 | 0,3 | 1,6 | > 2 |
| Flur Position 2 | 0,35 | 0,38 | 2,6 | 2,4 | 15,5 | 16,2 | 0,0124 | 0,023 |
| Querschnitt Position 1 | 1,3 | 1,6 | 9,7 | 10,1 | 0,8 | 0,25 | 1,7 | > 2 |
| Flur Position 3 | 0,3 | 0,35 | 2,8 | 2,7 | 15,3 | 15,4 | 0,009 | 0,015 |

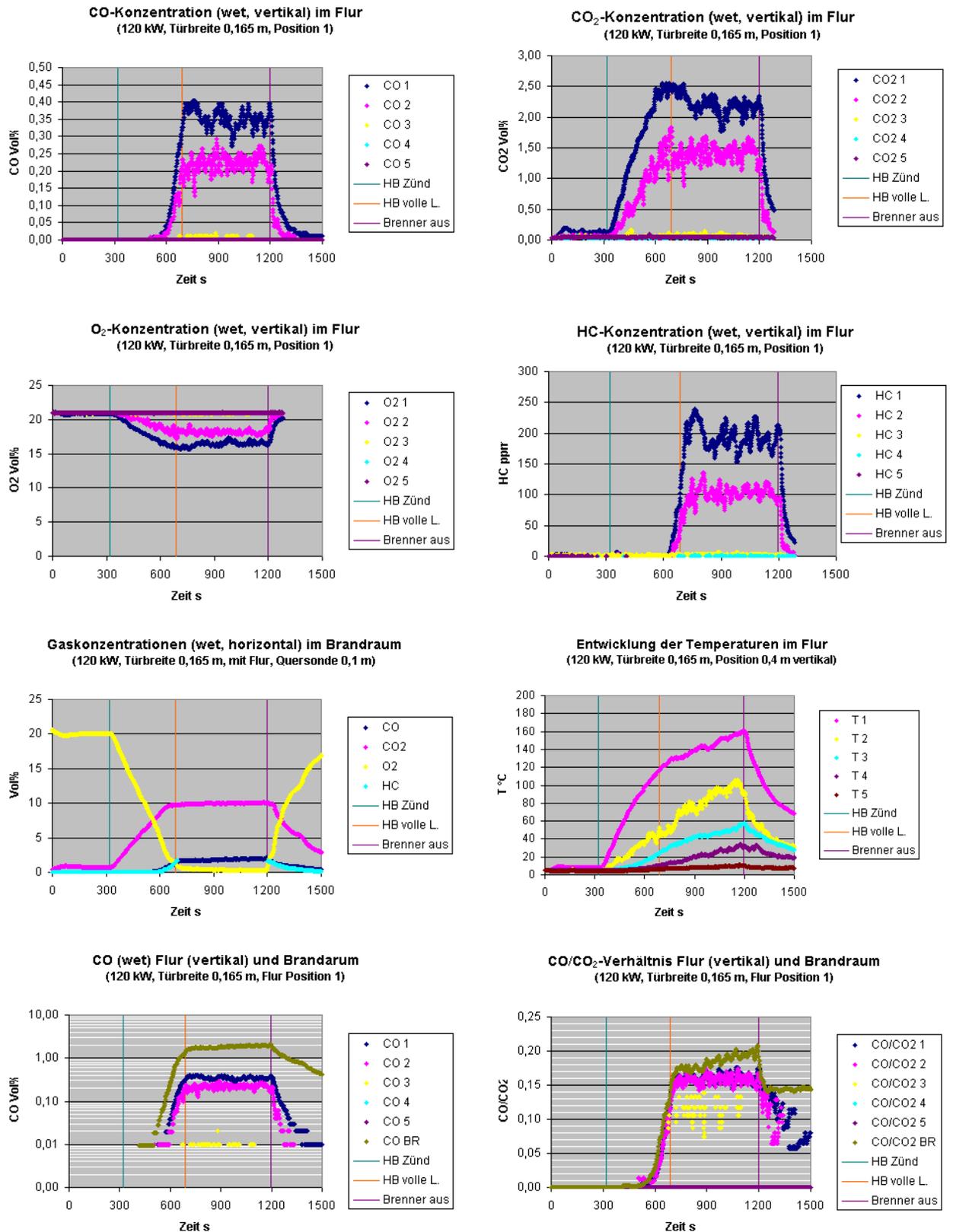


Abb. 37: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 1 im Flur (vertikale Messung) im Vergleich zum hinteren Teil des Brandraumes (horizontale Messung) bei 120 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

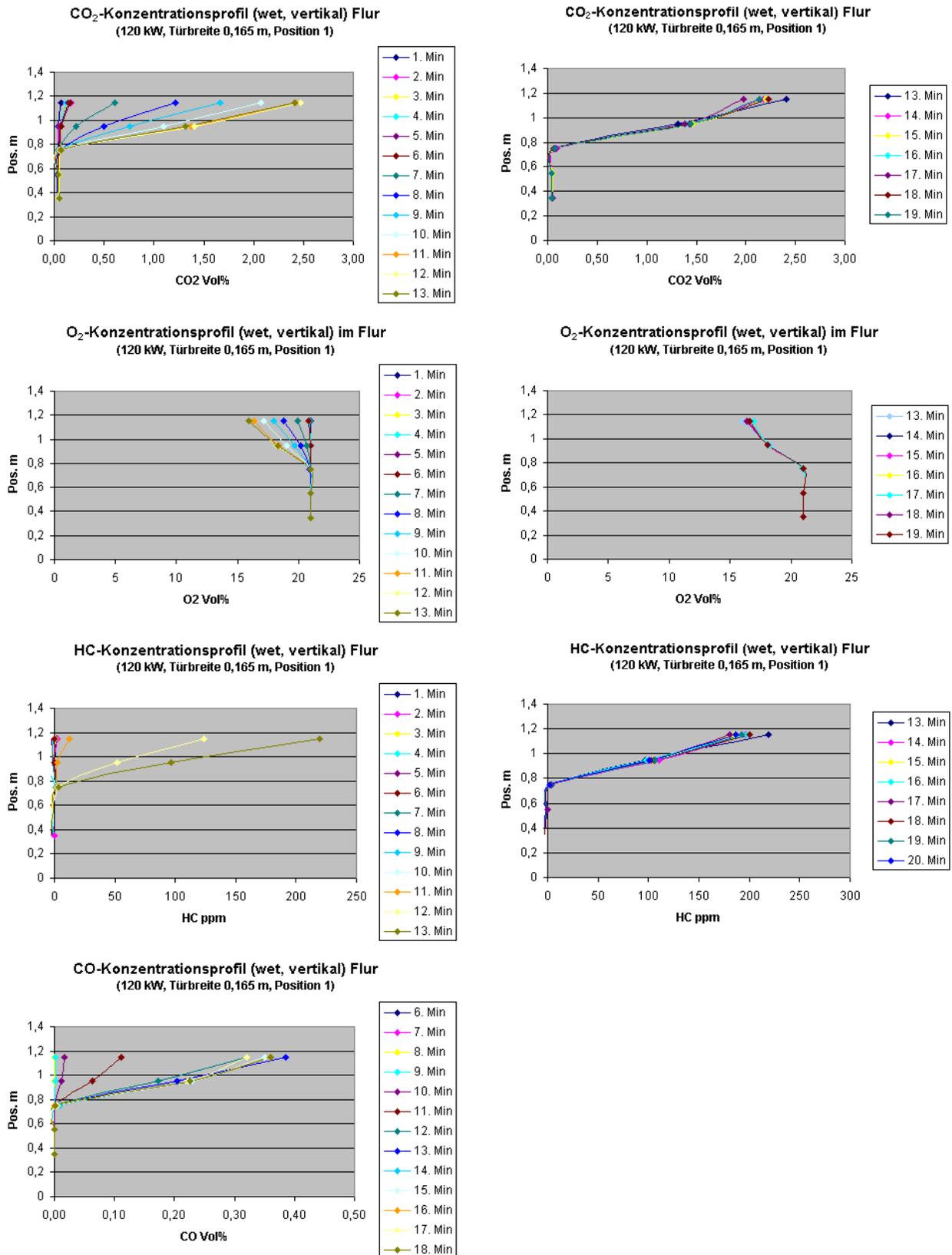


Abb. 38: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 1 im Flur auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 120 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

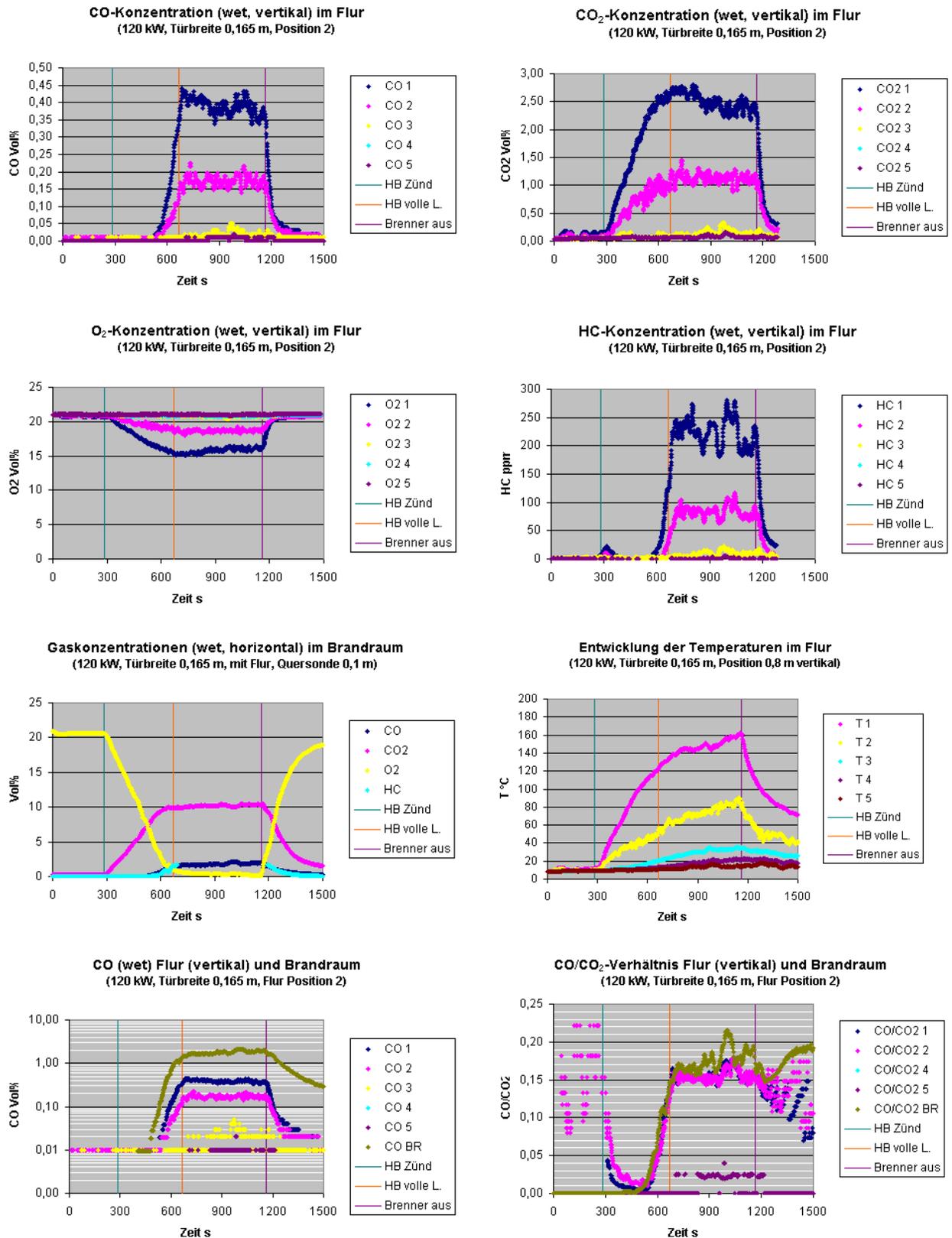


Abb. 39: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 2 im Flur (vertikale Messung) im Vergleich zum hinteren Teil des Brandraumes (horizontale Messung) bei 120 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

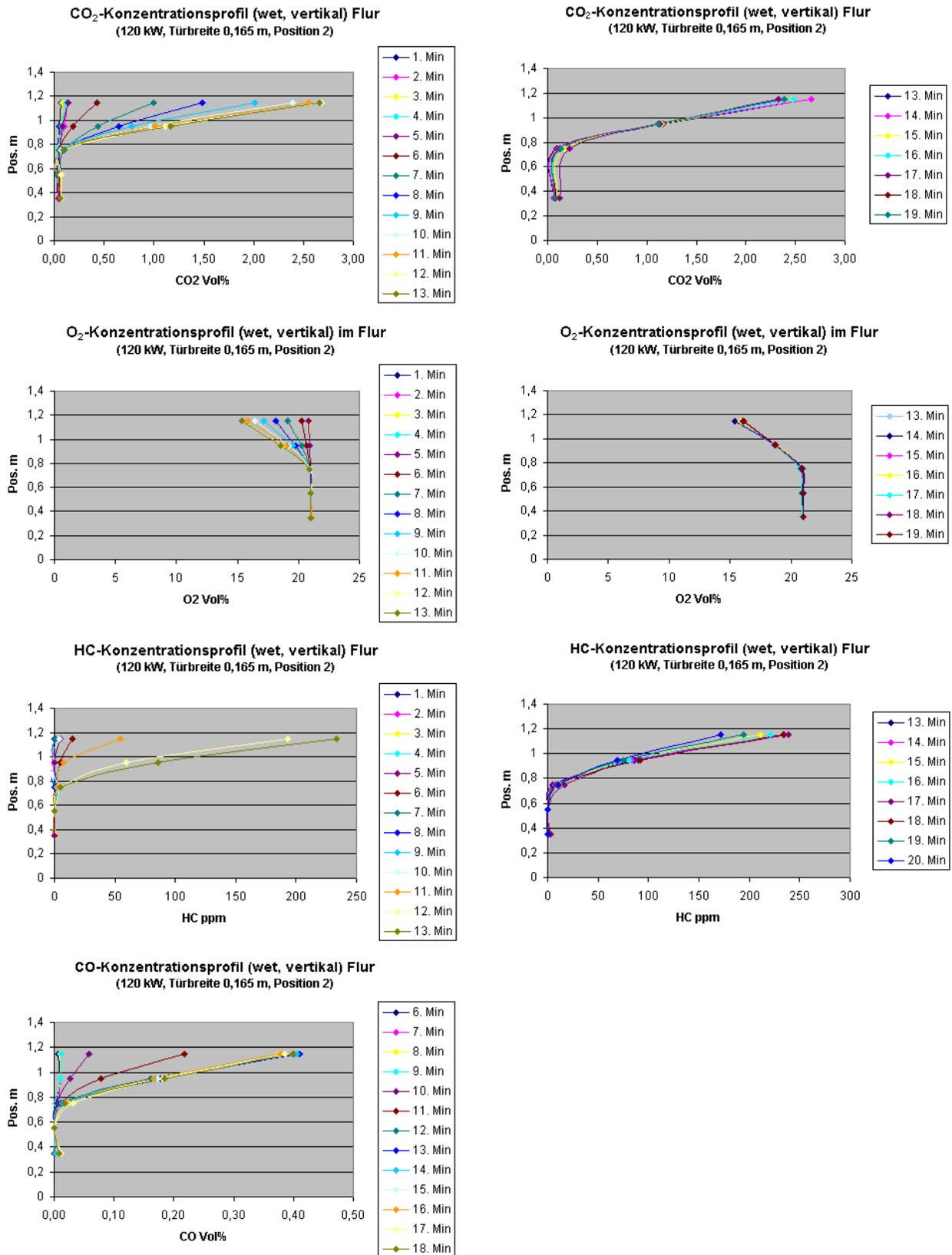


Abb. 40: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 2 im Flur auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 120 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

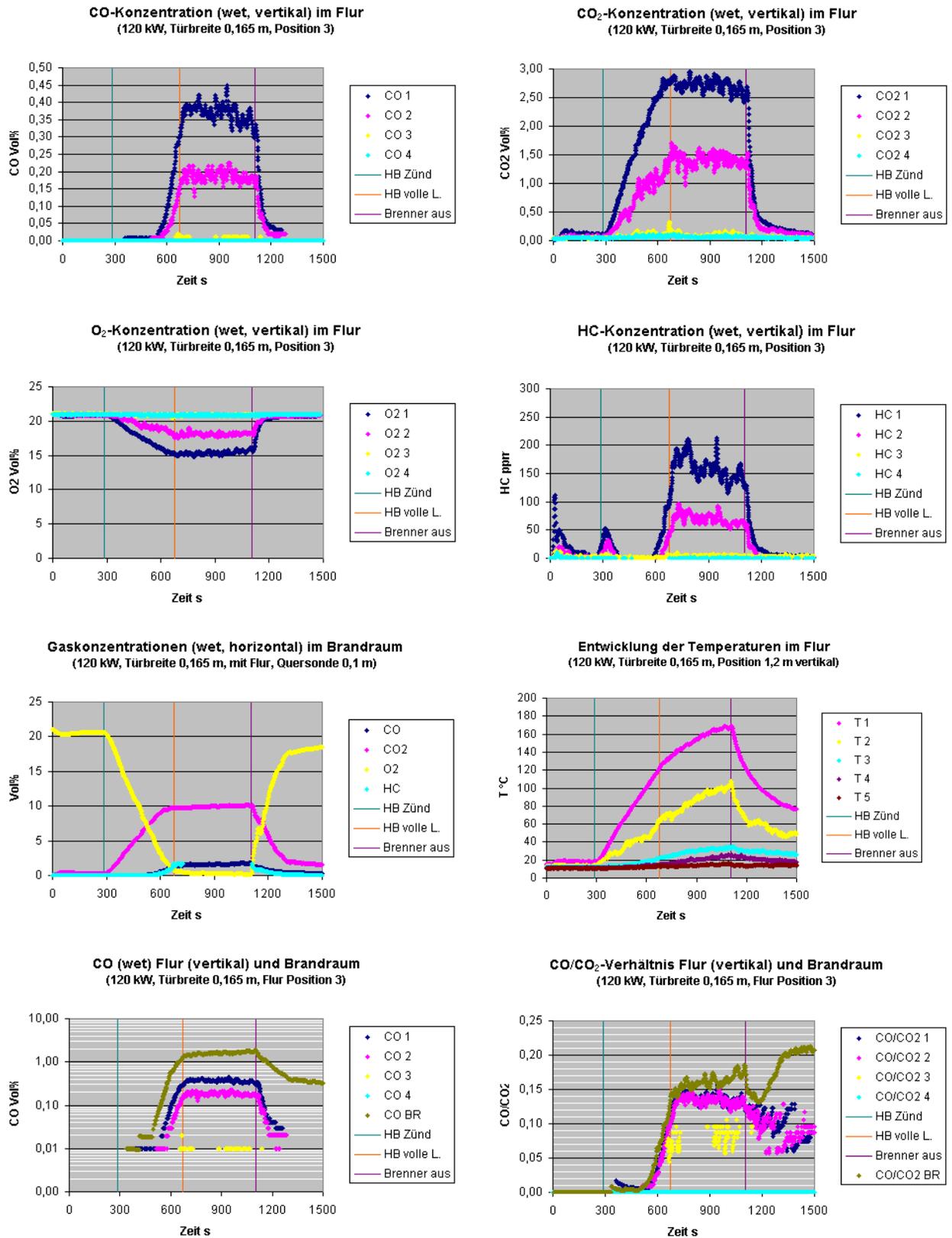


Abb. 41: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 3 im Flur (vertikale Messung) im Vergleich zum hinteren Teil des Brandraumes (horizontale Messung) bei 120 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

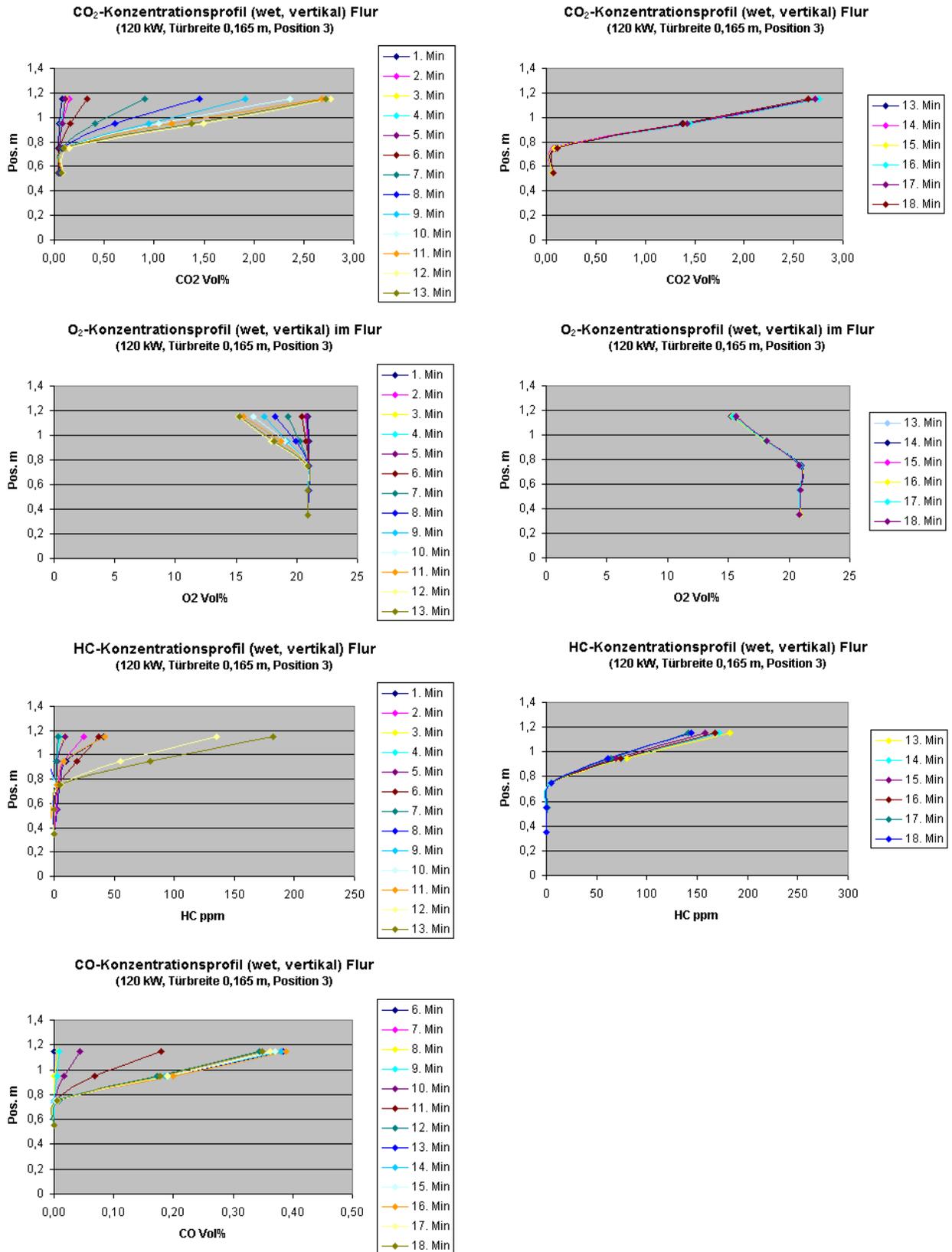


Abb. 42: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 3 im Flur auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 120 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

Bei den Versuchen, die mit einer theoretischen Energiefreisetzungsrate von 150 kW durchgeführt wurden, stellten sich erwartungsgemäß zu den vorangegangenen Versuchen abweichende Ergebnisse ein. Bei dieser Energiefreisetzungsrate traten nach dem Übergang in die Vollbrandphase die Flammen aus der Türöffnung in den Flur aus. Das brennstoffreiche Gemisch der Plume konnte hier unter günstigeren Ventilationsbedingungen durchzünden, was letztendlich zu Konzentrationsveränderungen in der abziehenden Rauchgasschicht führte. Während die verminderten Konzentrationen an CO₂ und O₂, die im hinteren Teil des Brandraumes gemessen wurden, im Vergleich zu denen der Brände mit 80 kW bzw. 120 kW nicht so augenscheinlich sind, treten die wegen der unvollständigeren Verbrennung gestiegenen Anteile an CO und HC deutlicher hervor. Die stationären Werte wurden schneller erreicht (hier schon vor Eintritt in die Vollbrandphase), weil wegen des steileren Anstiegs der Energiefreisetzungsrate die Ventilation eher zum bestimmenden Faktor wurde. Vergleichswerte für zwei Zeitpunkte im Versuchsablauf sind in der Tabelle 7 aufgeführt. Der Einfluss des „Nachverbrennens“ der brennstoffreichen Rauchgase im Flur auf die Rauchgaszusammensetzung ist aus diesen punktuellen Werten nicht gut ersichtlich. Hierüber geben die grafischen Darstellungen in den Abbildungen 43 – 48 deutlicher Auskunft. Sinkende CO- und HC-Konzentrationen während des Brandverlaufs, sogar messbare steigende CO₂-Konzentration mit verminderter O₂-Konzentration an Messposition 2, verbunden mit einem entsprechenden Temperaturanstieg resultierten aus den Nachverbrennungen im Flur. Diese Wirkungen finden sich in größeren Abweichungen des Verlaufs der CO/CO₂-Verhältnisse von Brandraum und Flur wieder.

Tabelle 7: Gaskonzentrationen (wet) nach Brandentwicklung (1) und 4 min Vollbrand (2) im Brandraum (Querschnitt) und im Flur (150 kW, Türöffnungsbreite 0,165 m)

| Messpunkt | CO Vol% | | CO ₂ Vol% | | O ₂ Vol% | | HC Vol% | |
|------------------------|---------|------|----------------------|------|---------------------|------|---------|-------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Querschnitt Position 1 | 1,96 | 2,53 | 9,4 | 9,1 | 0,36 | 0,15 | >2 | > 2 |
| Flur Position 1 | 0,45 | 0,4 | 2,4 | 2,4 | 15,8 | 15,9 | 0,042 | 0,045 |
| Querschnitt Position 1 | 1,74 | 2,6 | 10,4 | 9,95 | 0,6 | 0,09 | >2 | > 2 |
| Flur Position 2 | 0,5 | 0,5 | 2,7 | 2,6 | 15,0 | 15,3 | 0,048 | 0,05 |
| Querschnitt Position 1 | 1,88 | 2,57 | 9,7 | 9,3 | 0,4 | 0,2 | >2 | > 2 |
| Flur Position 3 | 0,5 | 0,5 | 2,65 | 2,55 | 15,1 | 15,4 | 0,06 | 0,062 |

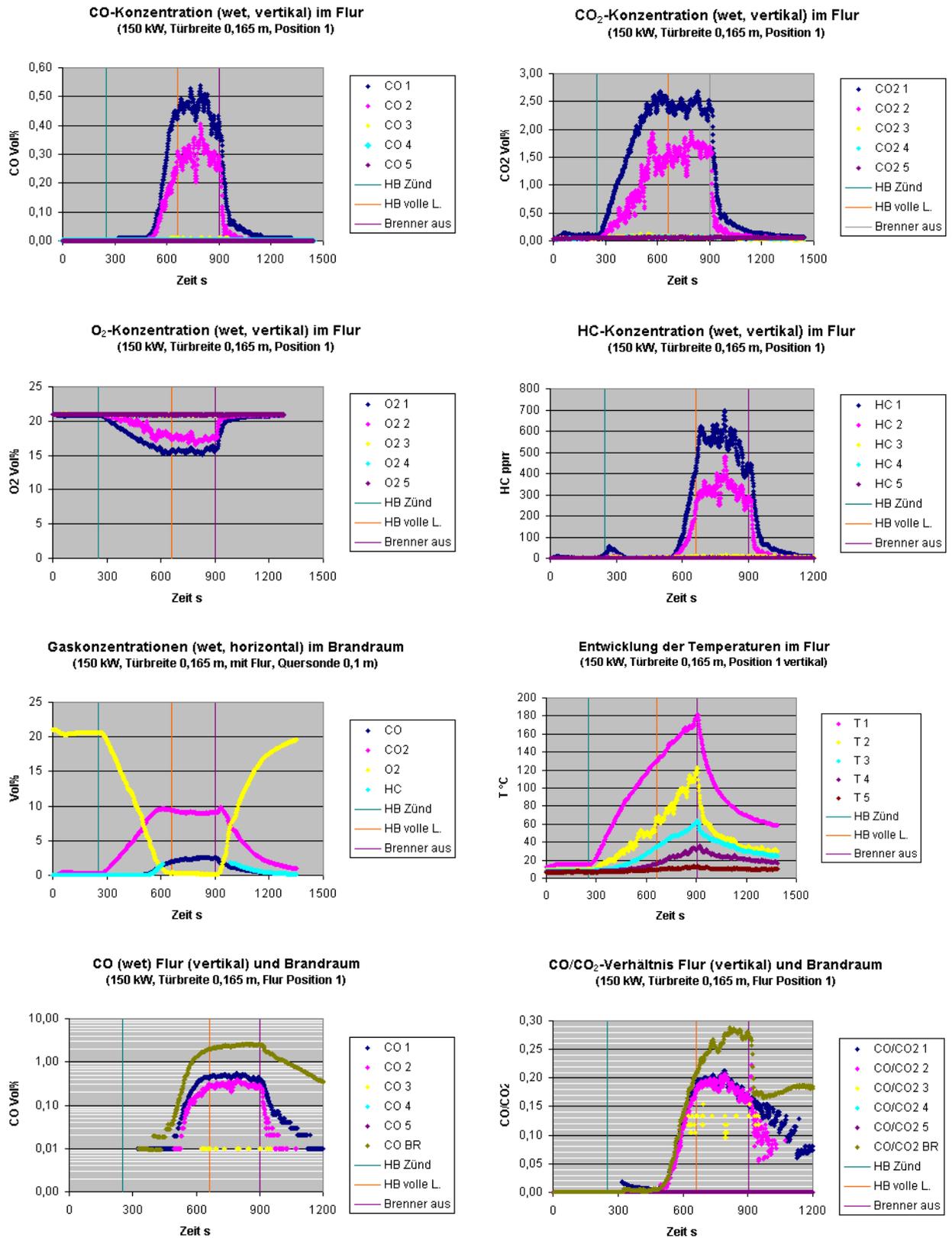


Abb. 43: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 1 im Flur (vertikale Messung) im Vergleich zum hinteren Teil des Brandraumes (horizontale Messung) bei 150 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

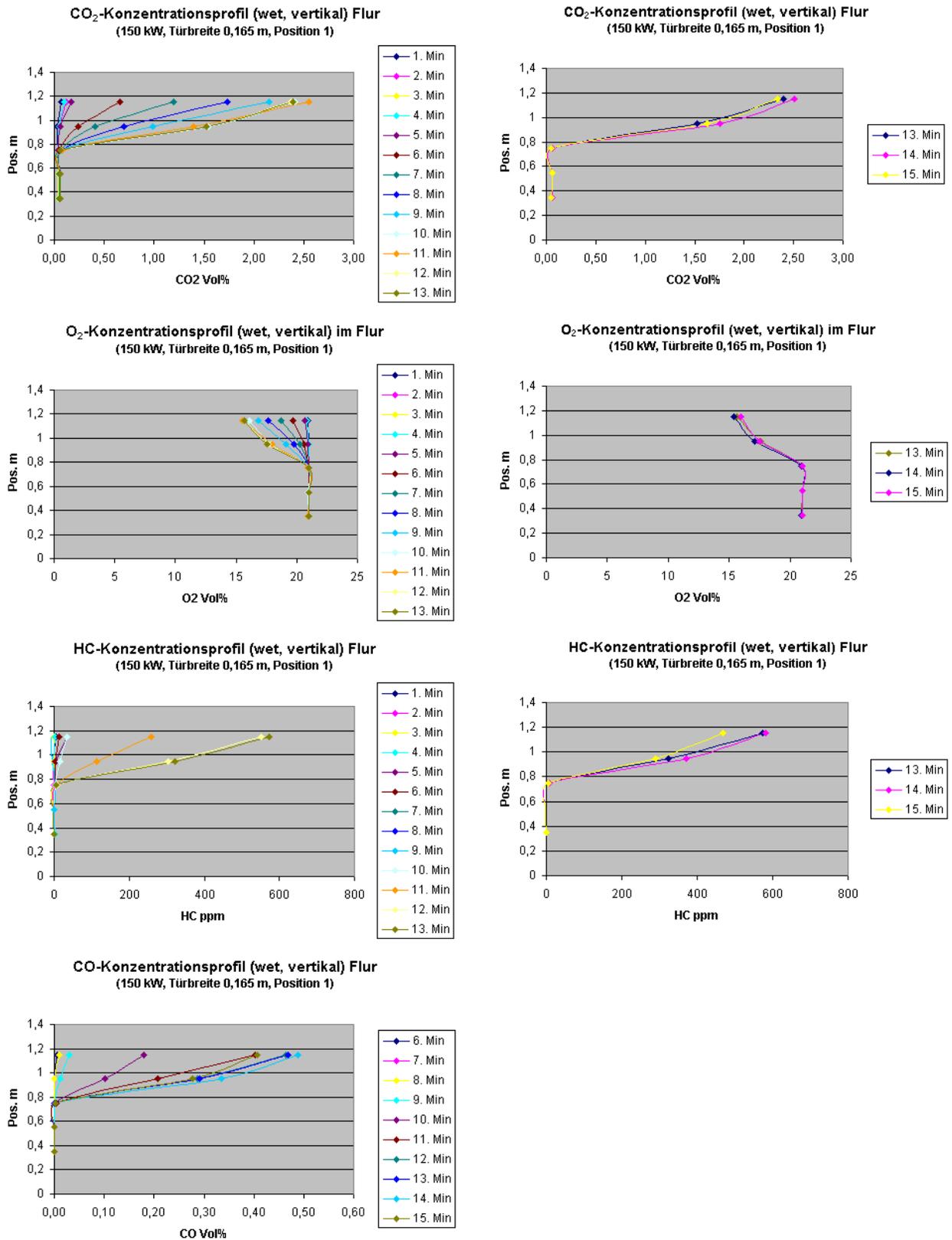


Abb. 44: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 1 im Flur auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 150 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

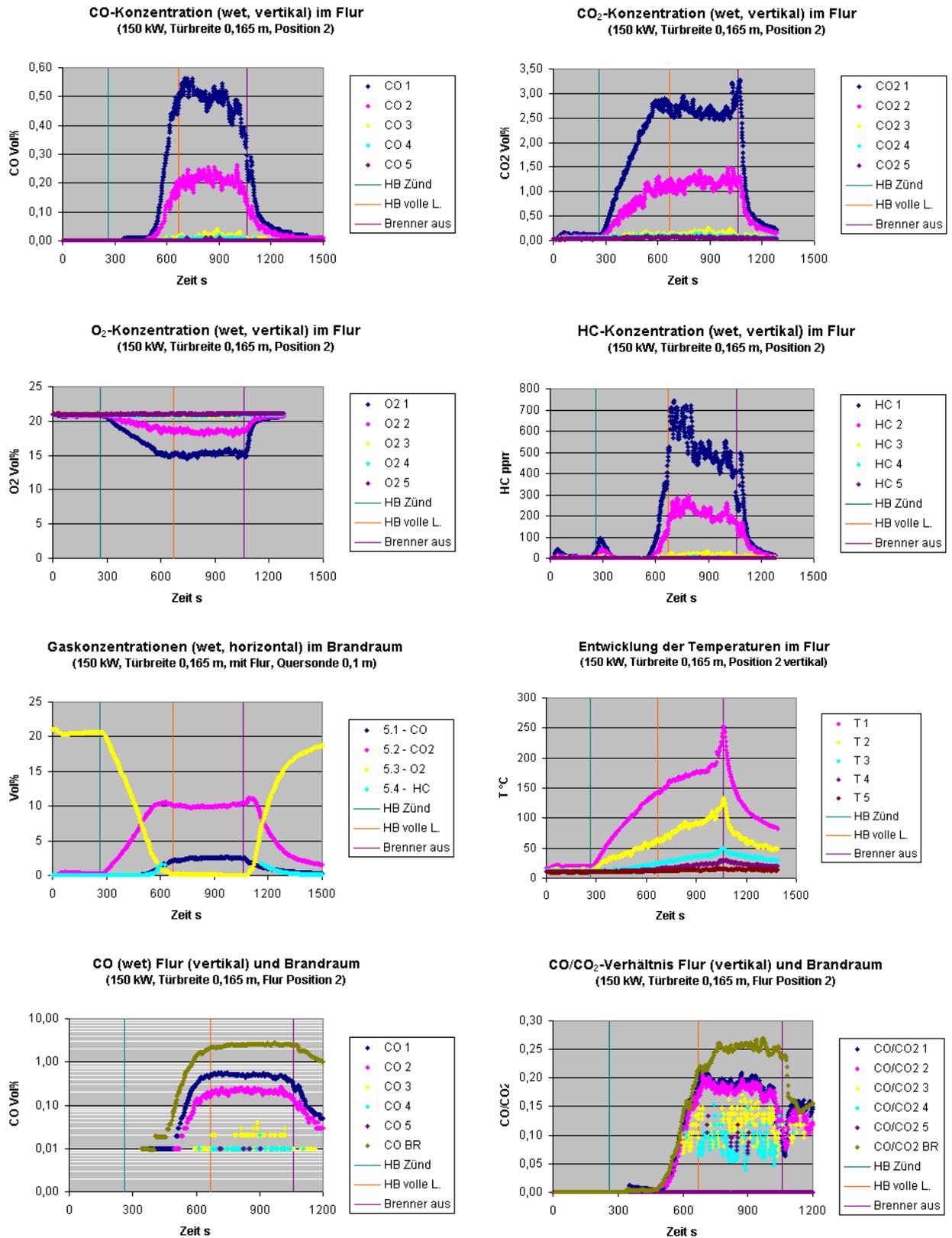


Abb. 45: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 2 im Flur (vertikale Messung) im Vergleich zum hinteren Teil des Brandraumes (horizontale Messung) bei 150 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

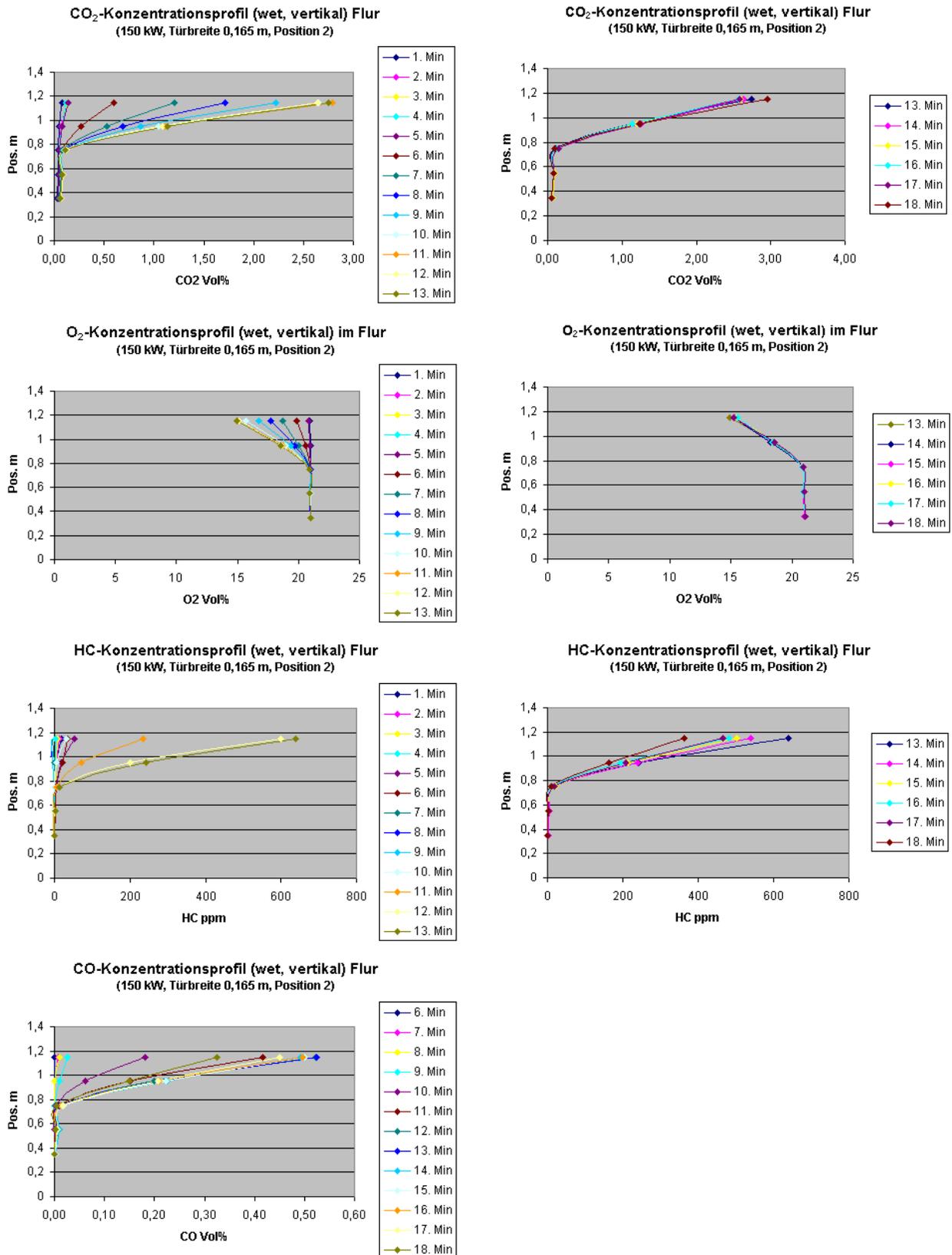


Abb. 46: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 2 im Flur auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 150 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

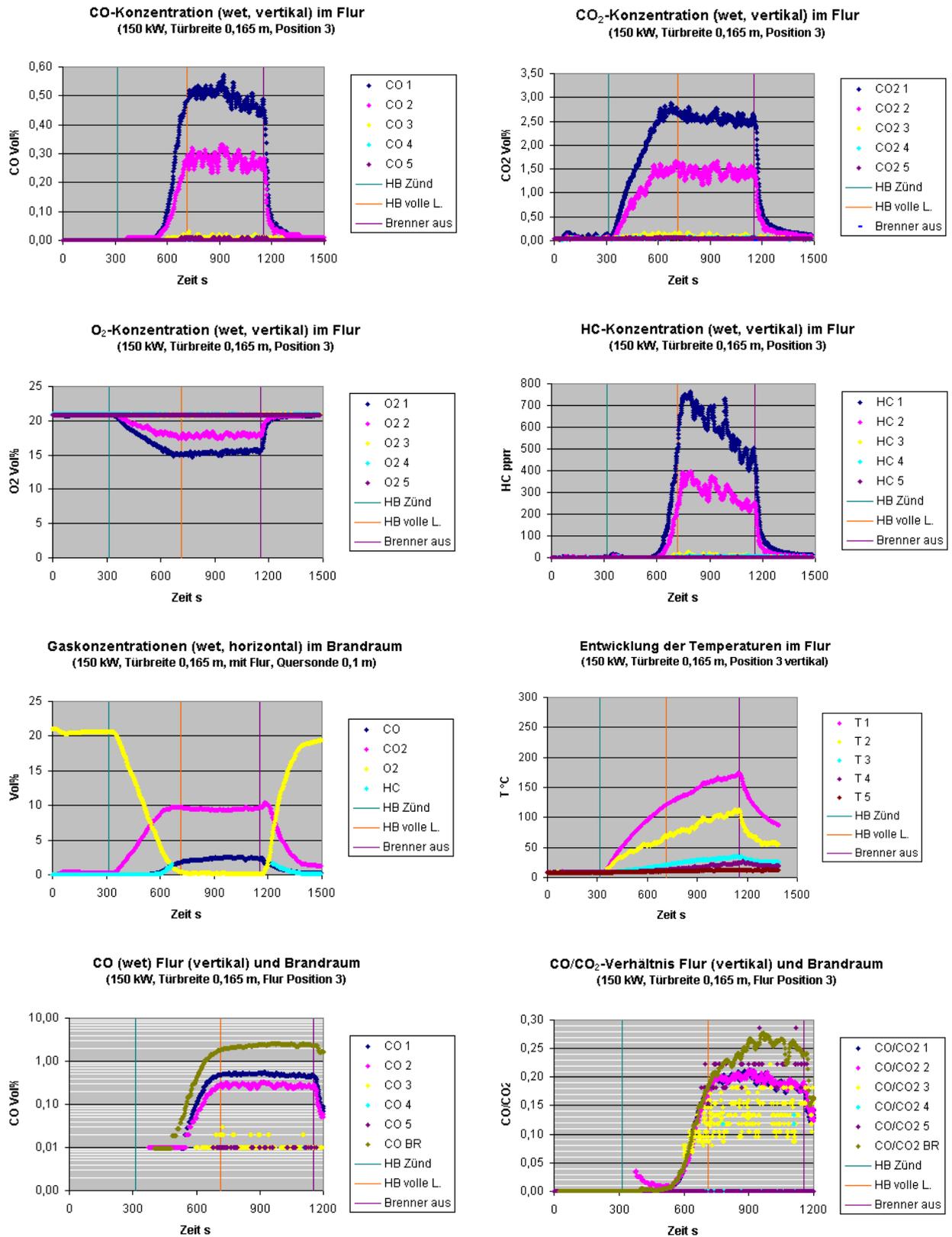


Abb. 47: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen an der Position 3 im Flur (vertikale Messung) im Vergleich zum hinteren Teil des Brandraumes (horizontale Messung) bei 150 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

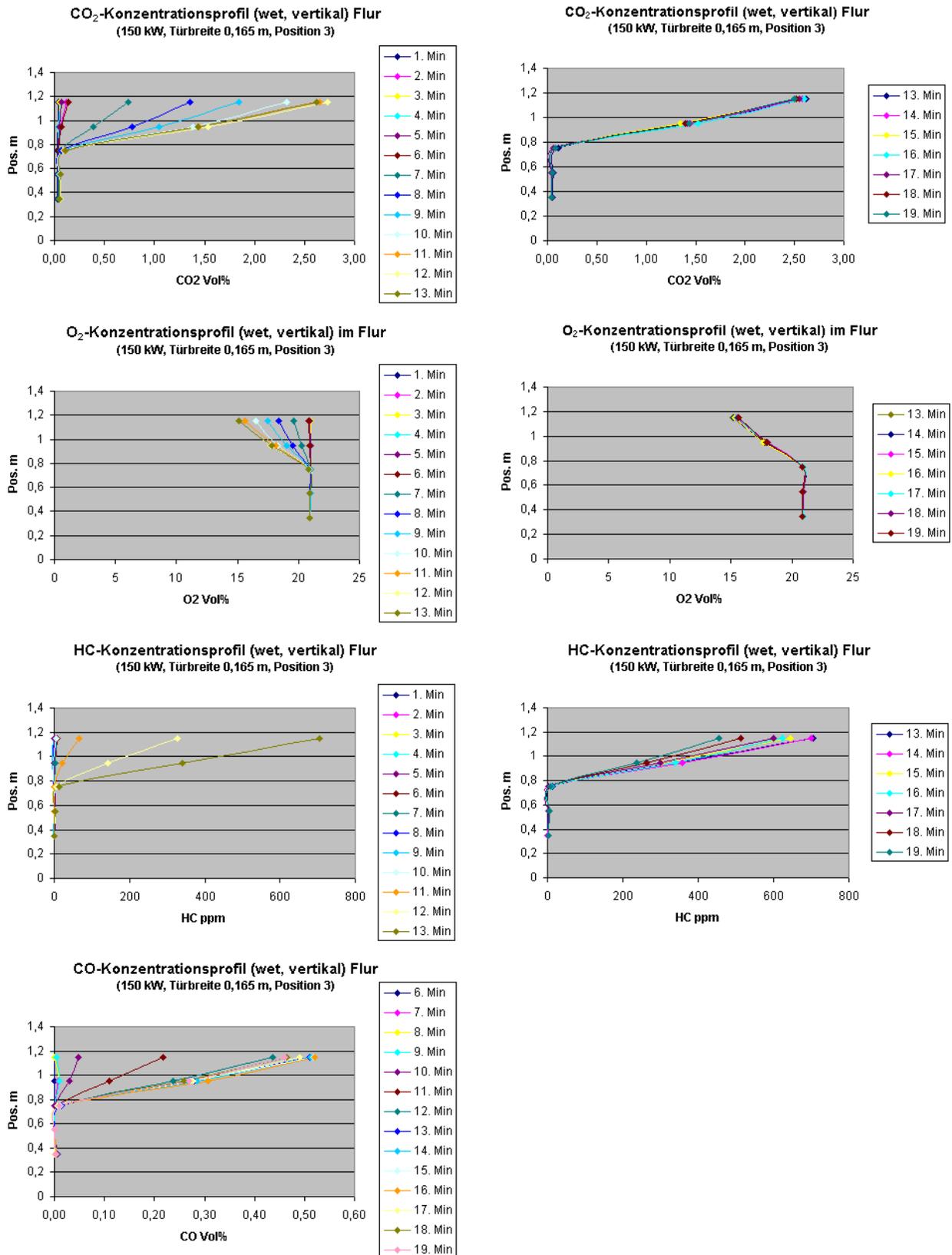


Abb. 48: Darstellung der Konzentrationsprofile an der Position 3 im Flur auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 150 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

2.4.5 Untersuchung des horizontalen Konzentrationsprofils im Flur

Ergänzend zu den punktuellen Messungen in vertikaler Richtung an drei verschiedenen Messpositionen in der Raumatmosphäre des Flures wurden in dieser Versuchsreihe mittels der in Abbildung 44 von [Pleiß, Seliger 2007] beschriebenen Sonden über den Querschnitt des Flures in einem Abstand von 0,1 m zur Raumdecke Messungen im abströmenden Rauchgas vorgenommen. Es wurden 4 Sonden entsprechend der in Abbildung 1 gezeigten Anordnung in verschiedenen Abständen zur Türöffnung des Brandraumes unter der Decke des Flures platziert. Der Vorteil bei diesen Messungen lag in der zeitgleichen Erfassung der Gaskonzentrationen in zwei Raumdimensionen, quer und längs zur Ausbreitungsrichtung des Rauchgases, wobei in der ersteren nur ein Querschnittswert erhältlich war, und somit Aussagen zur Strukturierung in dieser Richtung nicht möglich waren.

Die Brände wurden unter den gleichen Bedingungen ausgeführt, wie bei denen zur Untersuchung des vertikalen Konzentrationsprofils. Die Erwartung, in den Ergebnissen der Versuche mit 150 kW einen deutlichen Einfluss des Nachverbrennens im Flur auf die Gaszusammensetzung zu finden, vor allem auf den CO-Gehalt, erfüllte sich nicht. Vielmehr war ein Trend ablesbar, wonach die im Brandraum gebildete CO₂-Menge immer einen Anteil von etwa 9 – 10 % im Rauchgas ausmachte. Die Anteile von Restsauerstoff wurden mit steigender Energiefreisetzungsrate immer geringer und tendierten gegen 0, was das Austreten von Flammen aus dem Brandraum zur Folge hatte bei 150 kW. Damit verbunden waren ein deutlich steigender Anteil an CO und unverbrannten HC's in der Rauchgasschicht im Brandraum. Bei den Messungen des vertikalen Konzentrationsprofils im Brandraum wurden keine großen Unterschiede zwischen dem vorderen und hinteren Raumteil festgestellt.

Im Flur war in Ausbreitungsrichtung des Rauchgases eine Abnahme der Konzentrationen an CO, CO₂ und HC sowie eine Zunahme an O₂ durch Verdünnung der Rauchgasschicht erkennbar. Bei HC trat dieser Konzentrationsunterschied besonders zwischen der ersten und zweiten Messposition bei 150 kW hervor, weil hier eine Abnahme des Gehaltes durch das Nachverbrennen bedingt war. Ein damit verbundener deutlich messbarer Einfluss auf die Konzentrationen an CO, CO₂ und O₂ konnte nicht festgestellt werden, denn diese Gase lagen im Prozentbereich vor, während das Aufkommen an HC im ppm-Bereich lag.

Wenn bei fast gleichbleibender Produktionsrate von CO₂ die des CO ansteigt, steigt entsprechend das CO/CO₂-Verhältnis an. Eine Verdünnung der Rauchgase sollte auf diesen Wert keinen Einfluss haben. Die im Flur gemessenen Konzentrationen an CO und CO₂, bzw. das daraus berechnete CO/CO₂-Verhältnis zeigte mit steigender Energiefreisetzungsrate eine immer größer werdende Abweichung zu dem, was jeweils für die Zusammensetzung der Rauchgasschicht im hinteren Teil des Brandraumes berechnet wurde. Der Trend der Abweichungen war proportional zur steigenden Energiefreisetzungsrate, obwohl bei Bränden mit 120 kW kein Flammenauschlag beobachtet wurde, bei 150 kW dagegen bei jedem Versuch. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 49 – 54 dargestellt.

Ein Vergleich der punktuell ermittelten Messwerte mit denen aus den Querschnittsonden erhaltenen ergab geringe Abweichungen. Idealerweise sollte hier jeweils der Wert des obersten Messpunktes aus vertikaler Messung in den Positionen 1, 2 und 3 mit den Werten aus horizontaler Messung in den Positionen 0,4 m, 0,8 m und 1,2 m übereinstimmen. Abweichungen traten in der Größenordnung von bis zu 1 % bei O₂, 0,5 % bei CO₂, 0,1 % bei CO und bis zu 150 ppm bei HC auf. Die Abweichungen wurden größer mit Entfernung von der Türöffnung des Brandraumes.

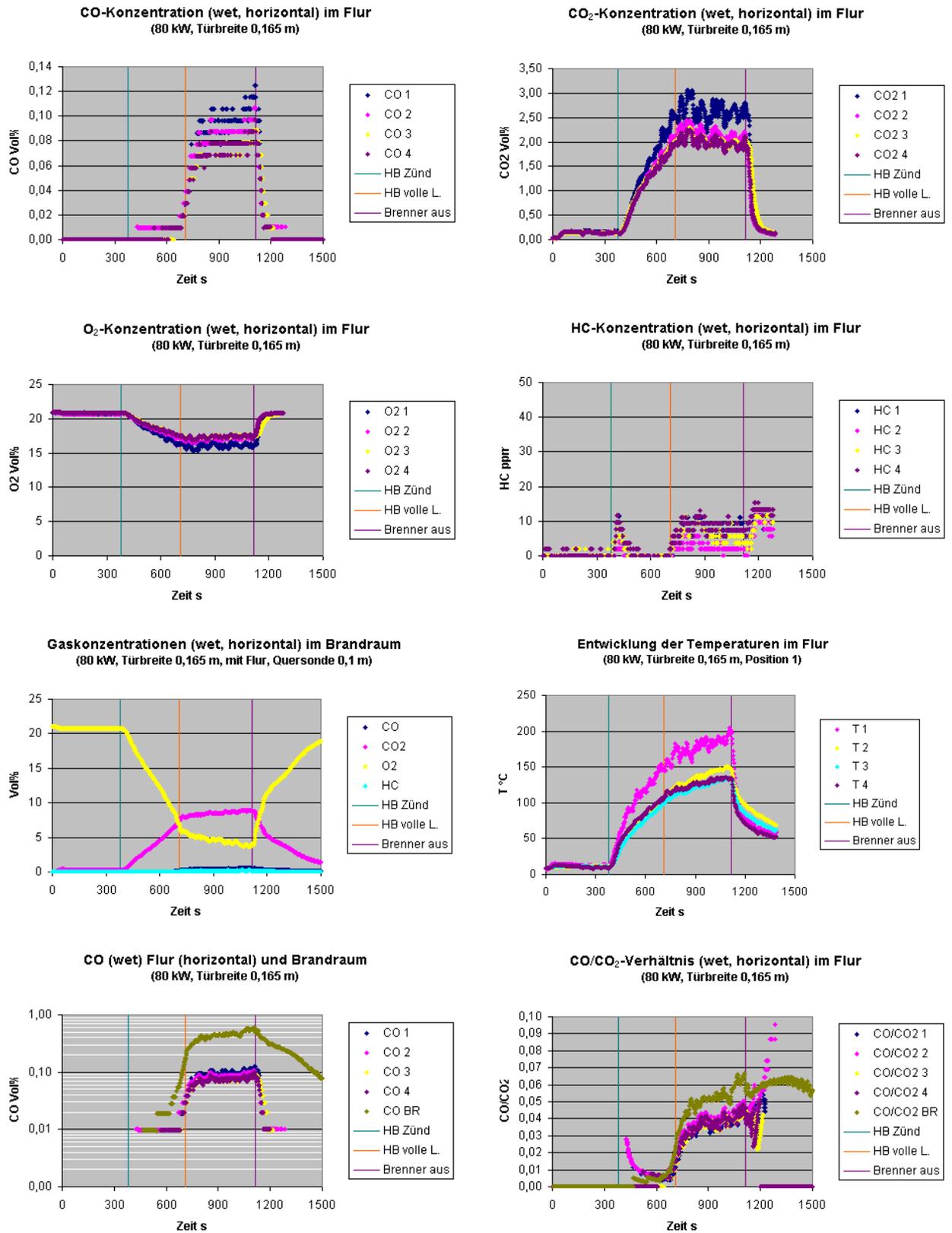


Abb. 49: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen 0,1 m unter der Raumdecke im Flur (horizontale Messung) im Vergleich zum hinteren Teil des Brandraumes (horizontale Messung) bei 80 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

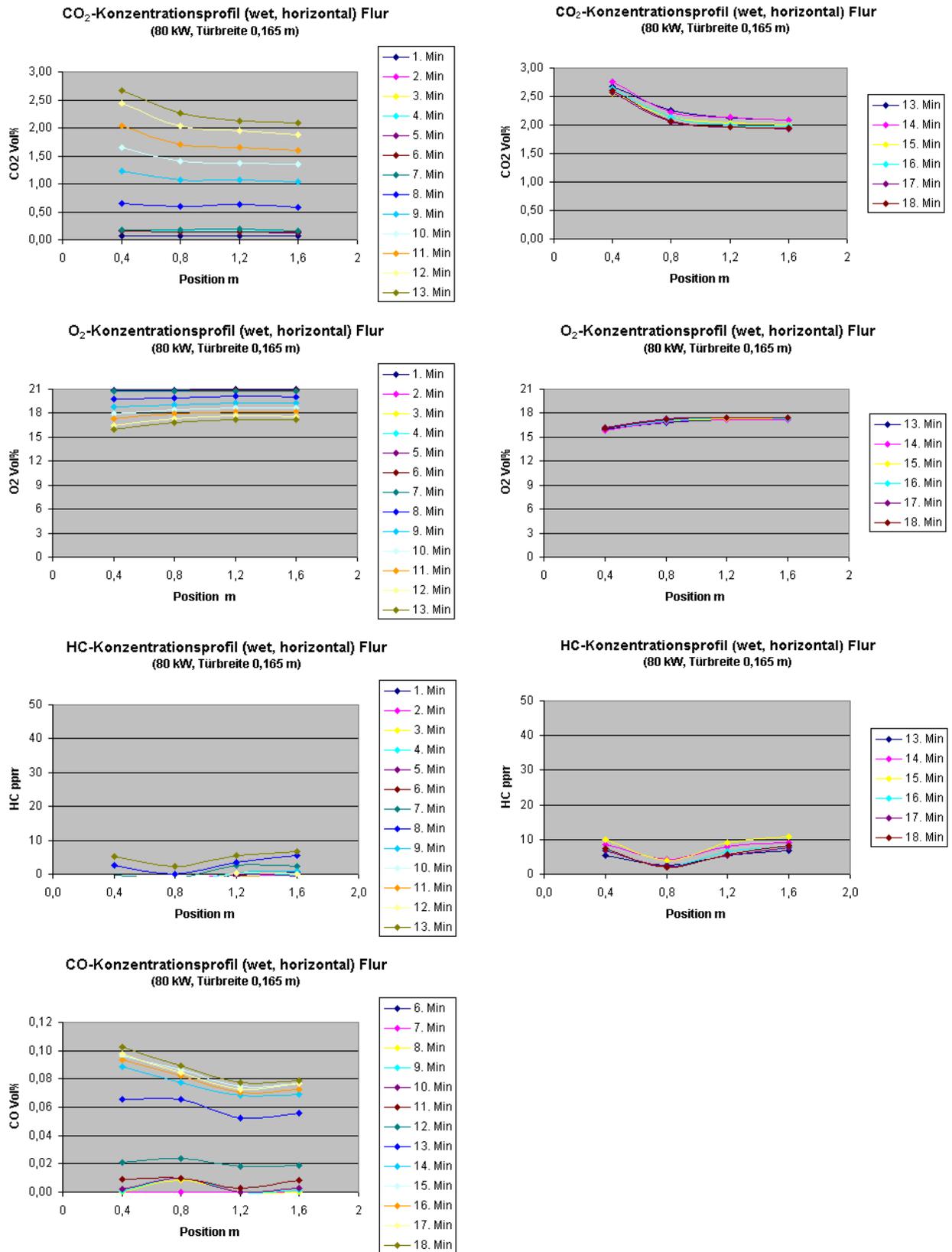


Abb. 50: Darstellung der Konzentrationsprofile 0,1 m unter der Raumdecke im Flur auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 80 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

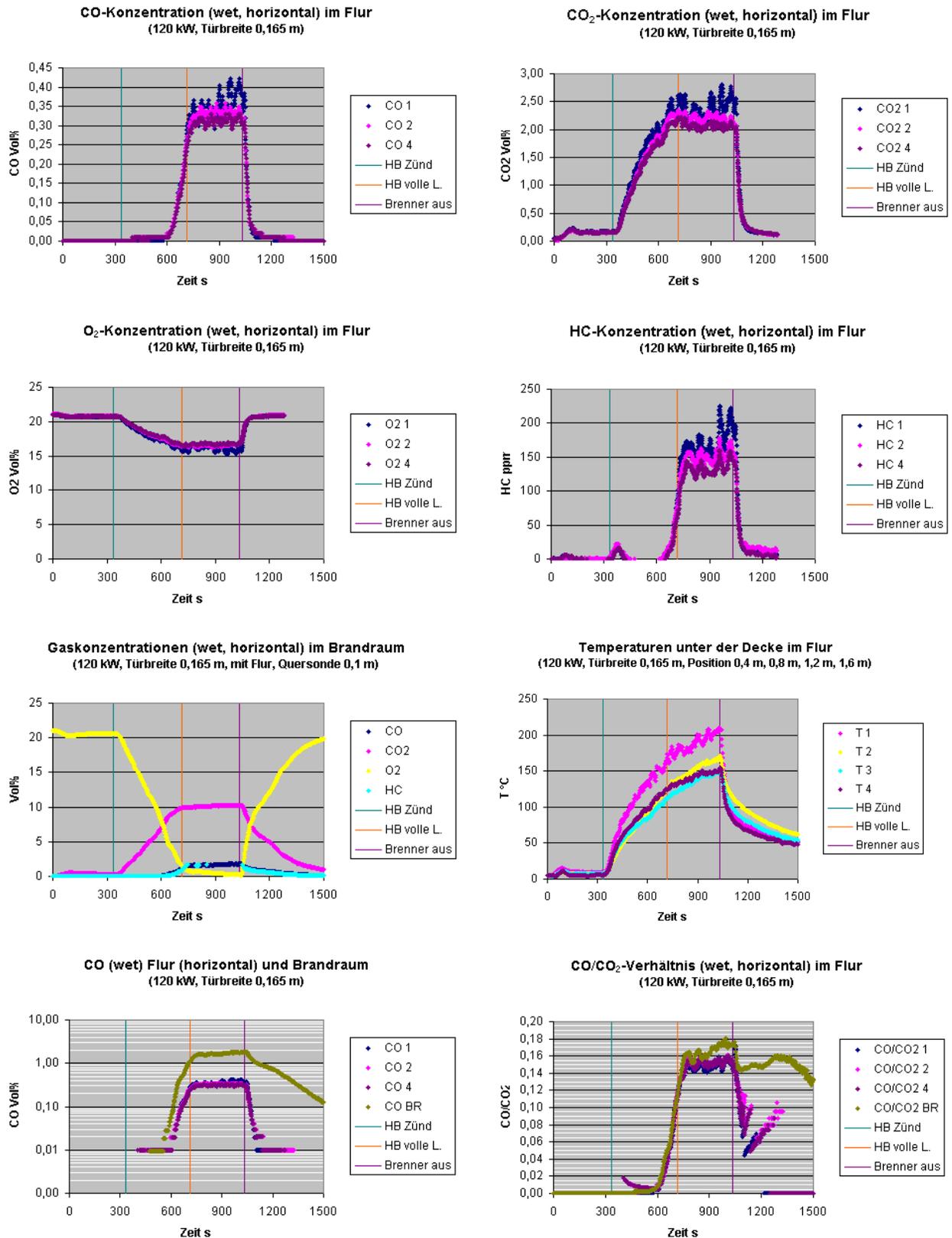


Abb. 51: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen 0,1 m unter der Raumdecke im Flur (horizontale Messung) im Vergleich zum hinteren Teil des Brandraumes (horizontale Messung) bei 120 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

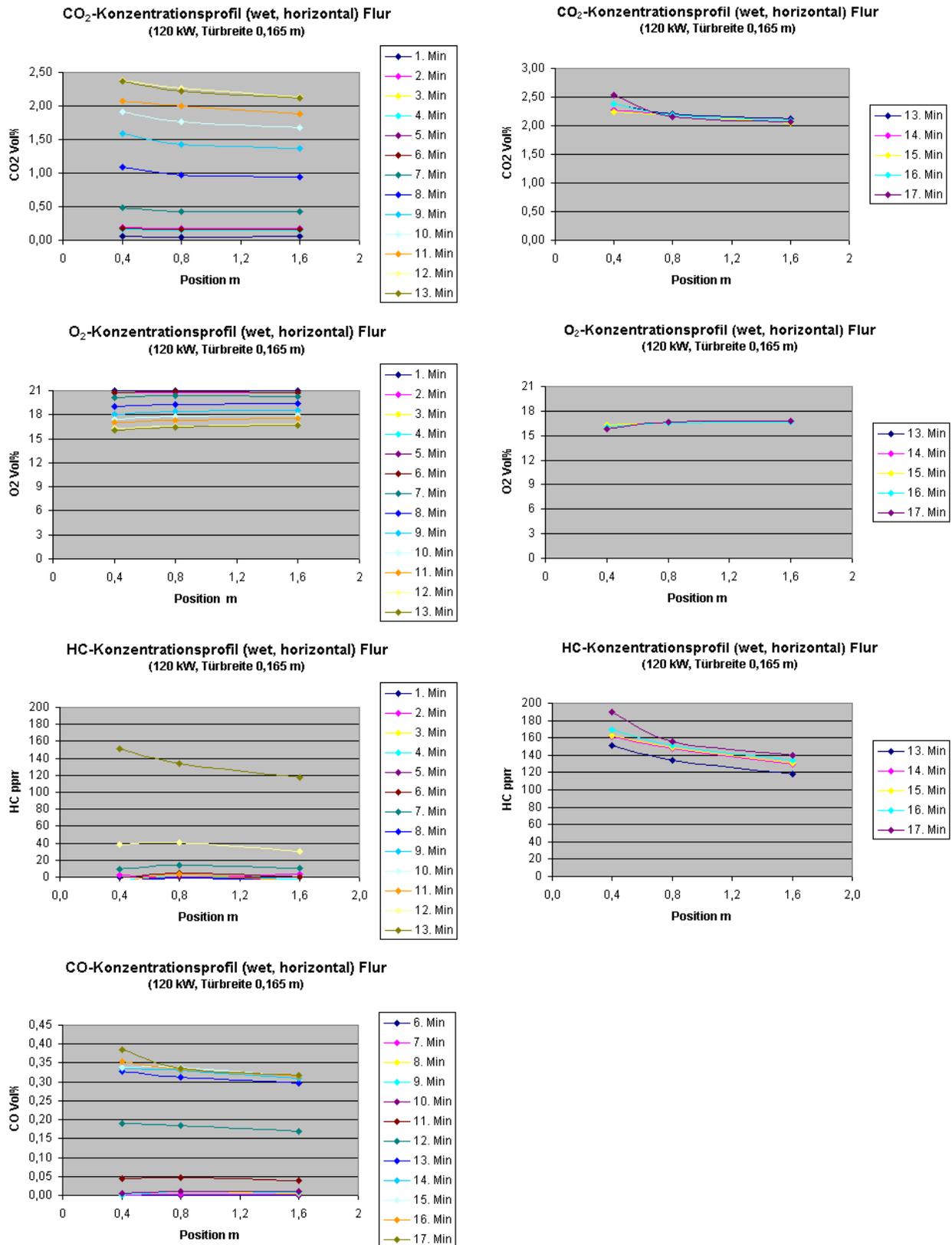


Abb. 52: Darstellung der Konzentrationsprofile 0,1 m unter der Raumdecke im Flur auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 120 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

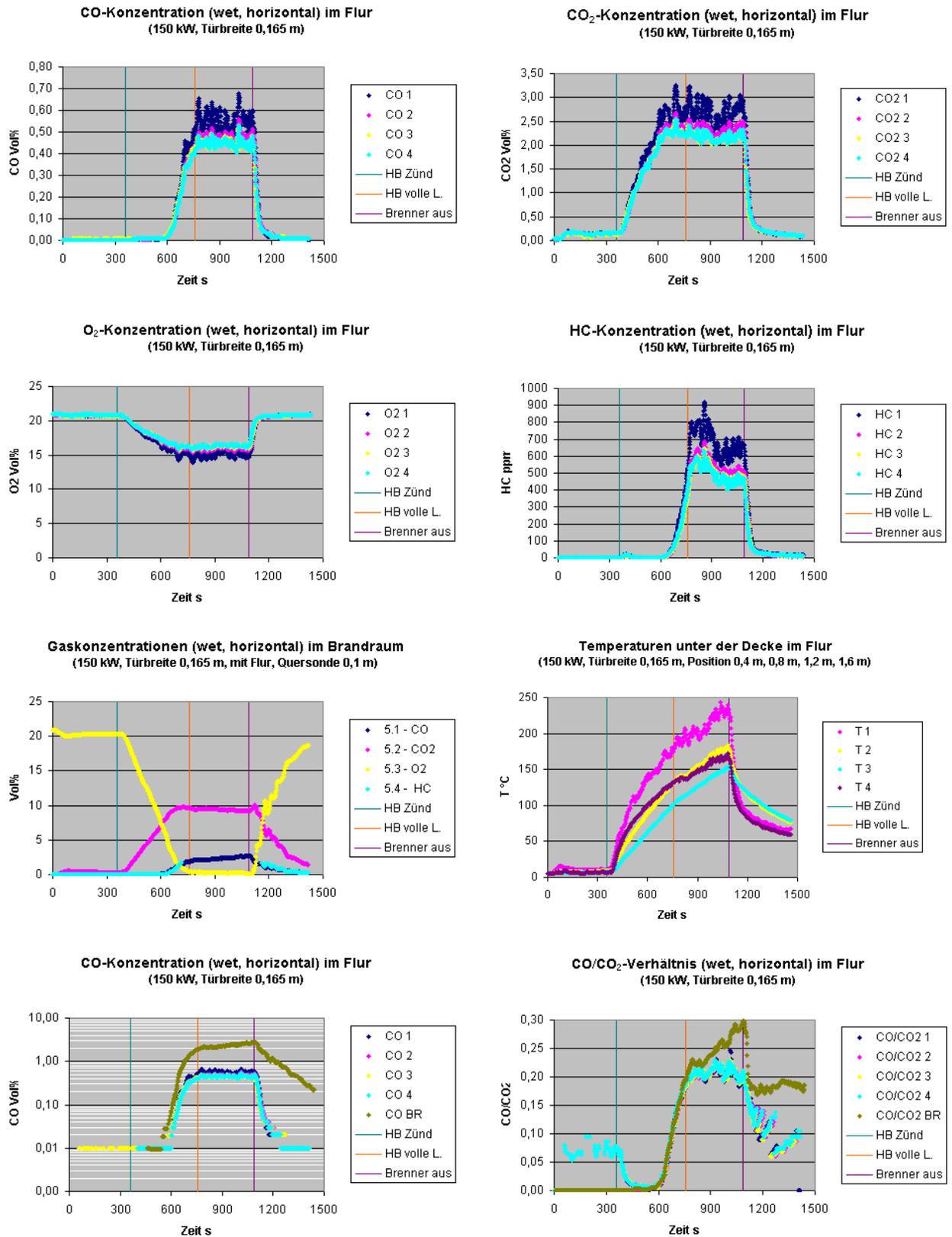


Abb. 53: Darstellung der Entwicklung der Gaskonzentrationen, Temperaturen und des CO/CO₂-Verhältnisses in den Brandphasen 0,1 m unter der Raumdecke im Flur (horizontale Messung) im Vergleich zum hinteren Teil des Brandraumes (horizontale Messung) bei 150 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

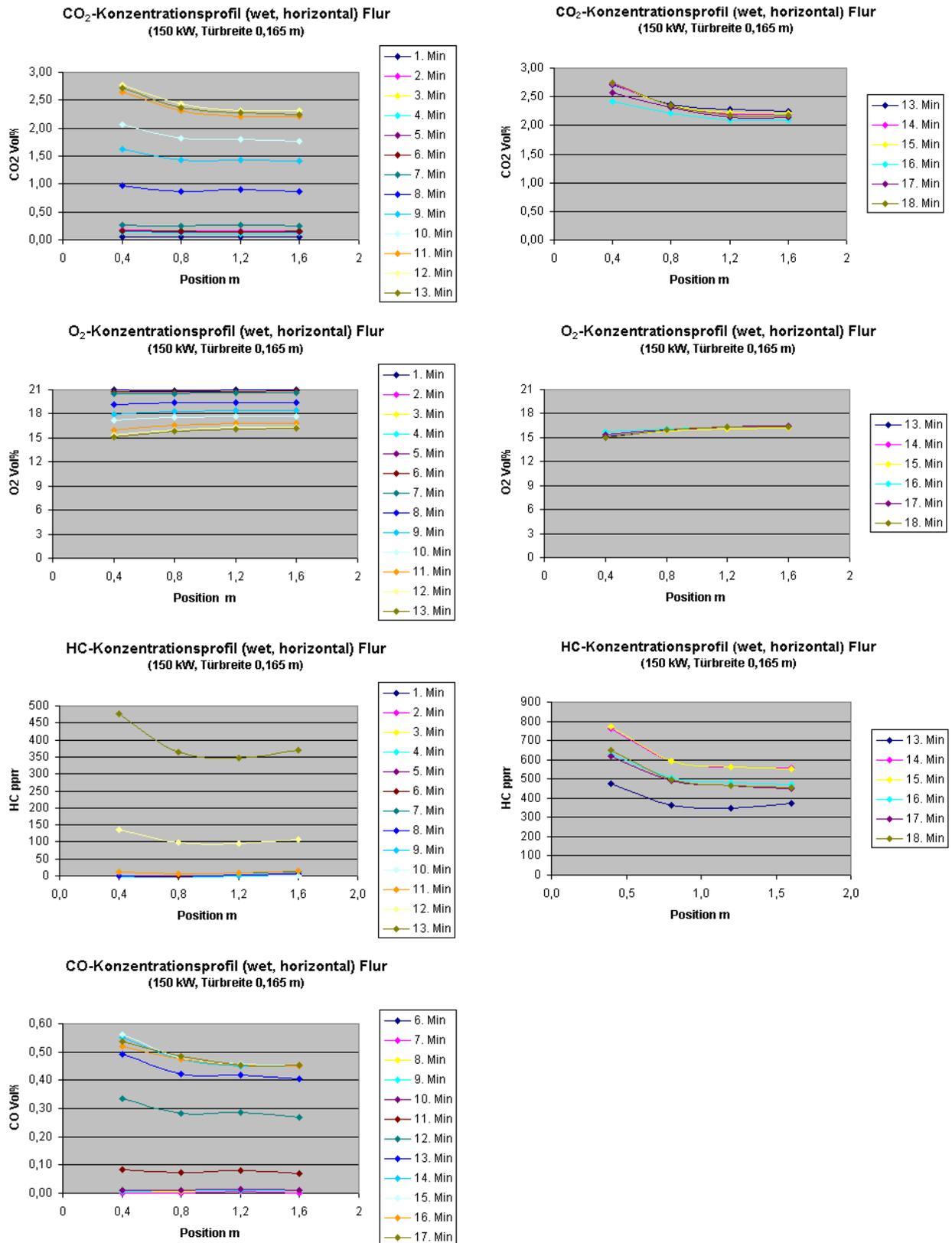


Abb. 54: Darstellung der Konzentrationsprofile 0,1 m unter der Raumdecke im Flur auf der Basis von Mittelwerten pro Minute Versuchszeit bei einem Brand mit 150 kW und einer Türbreite des Brandraumes von 0,165 m

2.4.6 Volumen- und Massenströme

Die durch die Türöffnung des Brandraumes ein- und austretenden Volumen- und Massenströme wurden nach der in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Methode berechnet. In Abbildung 56 sind die Ergebnisse dargestellt. Die Massebilanz der ein- und austretenden Masseströme nach Gleichung 7 spiegelt sich in den Ergebnissen nicht wider. Selbst die Hinzurechnung des Brennstoffmassesstromes für Zünd- und Hauptbrenner sowie die am Zündbrenner eingetragene Luft (gelbe Markierungen) gleichen die Differenz nicht aus. [Forell 2007] setzte sich mit experimentellen Methoden zur Untersuchung der Ventilation bei Raumbränden auseinander und diskutierte Versuchsergebnisse aus verschiedenen Publikationen, bei denen die Berechnung aus Messdaten, die mittels bidirektionaler Sonden und Thermoelemente erhalten wurden, offensichtlich zu geringe Lufteinträge erbracht hatte. Mit der Berechnung der Ventilation auf der Basis von Temperaturdifferenzen nach [Janssens, Tran 1992] erhielt [Forell 2007] Werte für die Lufteinströmung, die weit darüber lagen und mehr den Ergebnissen einer vergleichenden Berechnung mit der nach [Kawagoe 1958] benannten Gleichung (18) entsprachen. Als mögliche Fehlerquellen für diese abweichenden Ergebnisse diskutierte [Forell 2007] eine ungenaue Platzierung der bidirektionalen Sonden, d. h. nicht auf der Linie des Geschwindigkeitsmaximums gelegen und nicht korrekt in Strömungsrichtung justiert. Vollständig konnten die Gründe nicht geklärt werden.

$$\dot{m}_{in} = K \cdot A \cdot \sqrt{H_t} \quad \text{kg/s} \quad (18)$$

Die Ergebnisse, die in dieser Arbeit erreicht wurden, weisen die gleiche Diskrepanz auf. Zur Veranschaulichung wurden in den grafischen Darstellungen die Ergebnisse der Berechnung für den Lufteintritt nach Gleichung (18) mit eingefügt, die zumindest dann während der Vollbrandphase etwa hätten erreicht werden sollen. Die Nutzung des Faktors $0,52 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^{5/2}$ für K in Gleichung (18) ist nach [Forell 2007] möglich, da während der Vollbrandphase die Temperaturen im Innenraum höher als 500 K waren. Außerdem liegt hier fast eine Übereinstimmung mit den von ihm dargestellten Berechnungsbeispielen vor (blaue Kurve in Abbildung 55), da zur Zeit der Versuche Außentemperaturen von etwa 283 K herrschten.

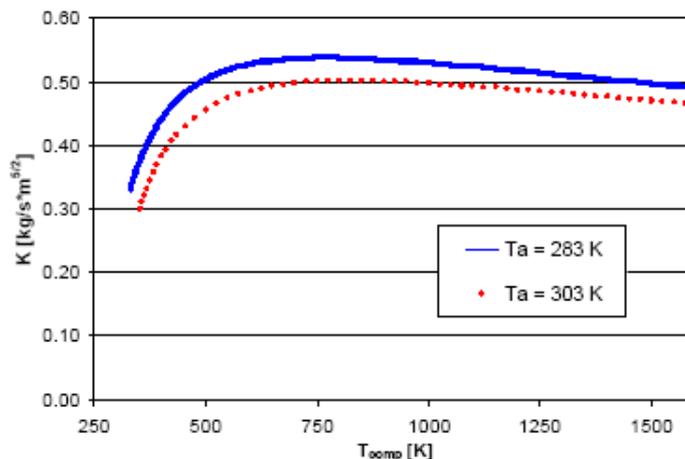


Abb. 55: Wert des Faktors K aus Gleichung 18 in Abhängigkeit von der Temperatur im Innenraum bei einem Geschwindigkeitsprofilfaktor von 0,68 [Forell 2007]

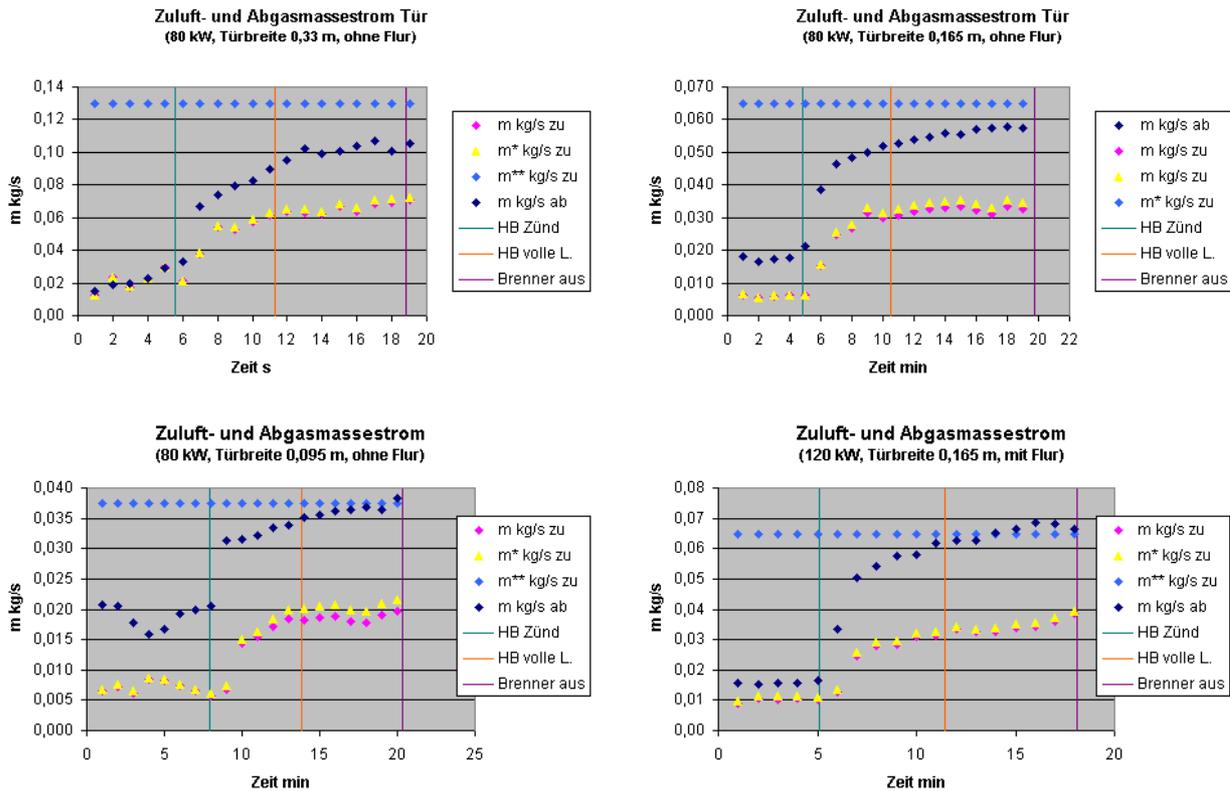


Abb. 56: Zuluft- und Abgasmassestrom bei theoretischer Energiefreisetzungsrate von 80 kW und 120 kW und verschiedenen Türöffnungsbreiten
 * + Luft- und Propanmassestrom Zünderbrenner, + Propanmassestrom Hauptbrenner
 ** Zuluftmassestrom nach Kawagoe-Gleichung (18)

Mit Verringerung der Türöffnungsbreite wurde die Differenz zwischen Zuluft- und Abgasmassestrom größer, während sich der Verlauf des berechneten Abgasmassestroms in der Vollbrandphase den mittels Kawagoe-Gleichung berechneten Werten für die einströmende Luft immer mehr annäherte. Die bidirektionalen Sonden für die Messung der Druckdifferenzen sowohl für den Einström- wie auch für den Ausströmbereich lagen auf einer vertikalen Linie. Ihre Position wurde während der Versuche mit 80 kW nicht verändert. Vor Durchführung des Versuches mit 120 kW erfolgte der Anbau des Flures und damit eine neue Justierung der Sonden, was am Trend der Ergebnisse aber keine Veränderung brachte. Für Versuche mit 150 kW wurden wegen des Flammenaustritts keine Messungen in der Türöffnung ausgeführt.

2.4.7 CO- und CO₂-Yields

Die Ergebnisse der Berechnung des CO- und CO₂-Massestroms aus der Türöffnung und der Bezug auf den Brennstoffmassestrom als CO- und CO₂-Yields sowie der normierten CO- und CO₂-Yields belegen, dass eine gute Wiederfindung des Kohlenstoffgehaltes vom Brennstoff in den Kohlenoxiden gegeben war und somit der berechnete Abgasmassestrom dem tatsächlichen Austrag aus der Türöffnung nahe kommt, wie aus der Abbildung 57 ersichtlich ist. Das spricht eigentlich dafür, dass der oder die Fehler bei der Berechnung des eintretenden Luftstromes nicht mit der ungenauen Positionierung der Sonden begründet werden können.

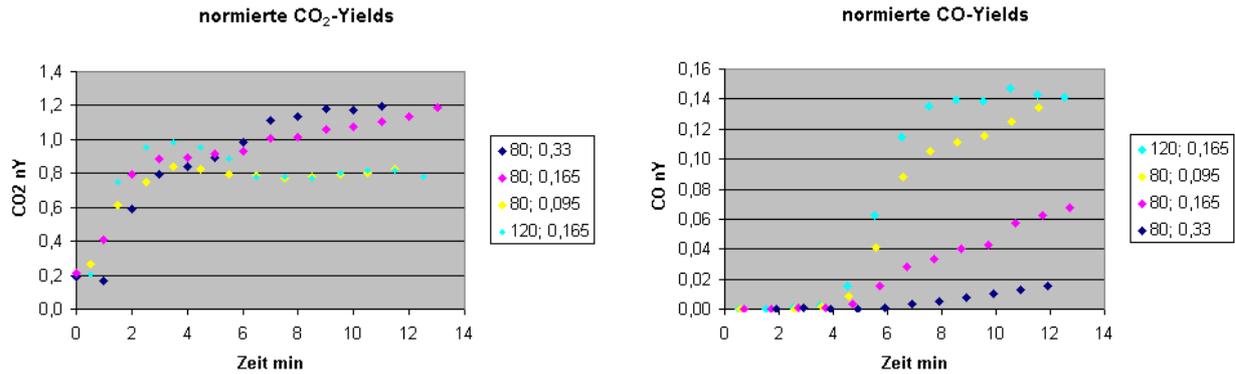


Abb. 57: normierte CO- und CO₂-Yields bei theoretischen Energiefreisetzungsraten von 80 kW und 120 kW und unterschiedlichen Türöffnungszeiten ab Zündung des Hauptbrenners

Aus Abbildung 57 ist ersichtlich, dass die CO-Bildung einsetzte, bevor der Hauptbrenner seine volle Leistung erreichte, was bei ungefähr 6 Minuten Brandzeit der Fall war. Je schlechter die Ventilation war, hier ausgedrückt durch die Türöffnungsweite, desto eher begann die CO-Bildung.

2.4.8 Bewertung der Ergebnisse nach dem FED-Konzept

Ein Kriterium für die Bewertung der Belastung bzw. der Überlebenschancen von Personen in Brandräumen ist die Berechnung der einwirkenden toxischen Dosis der Brandgase nach dem Konzept der „Fractional Effective Dose“ (FED-Konzept), wie es von [Purser 2002] dargestellt wird. Hier wird nicht nur die Toxizität des Kohlenmonoxids betrachtet, sondern die Gesamtheit der Wirkungen eines Brandes. Weitere Erläuterungen sowie die der Berechnung zugrundeliegenden Gleichungen sind im Bericht zum ersten Teil dieses Projektes von [Pleiß, Seliger 2007] zu finden.

Für die in Abbildung 58 dargestellten Ergebnisse der Berechnungen wurden die Konzentrationen an CO, CO₂ und O₂ herangezogen, die sich ab Zündung des Hauptbrenners im hinteren Teil des Brandraumes einstellten. HCN, das bei der toxischen Bewertung von Rauchgaswirkungen unbedingt zu beachten ist, hatte bei der Verbrennung von Propan keine Relevanz. Wie aus den Darstellungen der Konzentrationsprofile ersichtlich ist, waren die sich ausbildenden Rauchgasschichten in vertikaler Richtung relativ homogen. Für die Berechnung der FED wurden die Mittelwerte einer jeden Messposition pro Minute Branddauer über die vertikale Ausdehnung der Rauchgasschicht nochmals gemittelt. Der Einfluss der Raumtemperatur wurde nicht einbezogen. Die Berechnungen wurden für eine Person mit einem Körpergewicht von 70 kg ausgeführt, die sich in den zwei Situationen Ruhe oder leichte Aktivität befindet. Dadurch bedingt sind zwei unterschiedliche Atemminutenvolumina, die sich auf die zeitliche Entwicklung des COHb-Levels auswirken. Beeinflusst wird das zusätzlich durch die atemfrequenzsteigernde Wirkung des CO₂. Die toxische Wirkung des CO₂ wird in der Berechnung nur berücksichtigt, wenn sie größer als die Wirkung des O₂-Mangels ist. Die Berechnung der FED ist in erster Linie darauf ausgelegt, den Zeitpunkt des Eintritts der Handlungsunfähigkeit bzw. Bewusstlosigkeit zu bestimmen, der mit Überschreiten des Grenzwertes 1 erreicht ist. Kriterium für diesen Zeitpunkt sind bestimmte COHb-Level in Abhängigkeit von der körperlichen Aktivität und die Konzentrationen der anderen toxischen Gase. Wird die Berechnung auf die tödlich wirkenden COHb-Level abgestellt, stellt das Erreichen des Grenzwertes 1 den Zeitpunkt des Eintritts des Todes dar. Das ist aber von der Berechnung her nur für die Dosis des CO klar definiert. Somit stellen die in der Abbildung 58 präsentierten Ergebnisse den Zeitpunkt des Eintritts von Handlungsunfähigkeit (HU) bzw. Bewusstlosigkeit als Gesamtwirkung der Rauchgase bei Ruhe (R) und leichter Aktivität (A) dar. Der Zeitpunkt des Eintritts des Todes

basiert auf dem Erreichen eines tödlichen COHb-Levels im Zusammenwirken mit O₂-Mangel und gesteigerter Atemfrequenz.

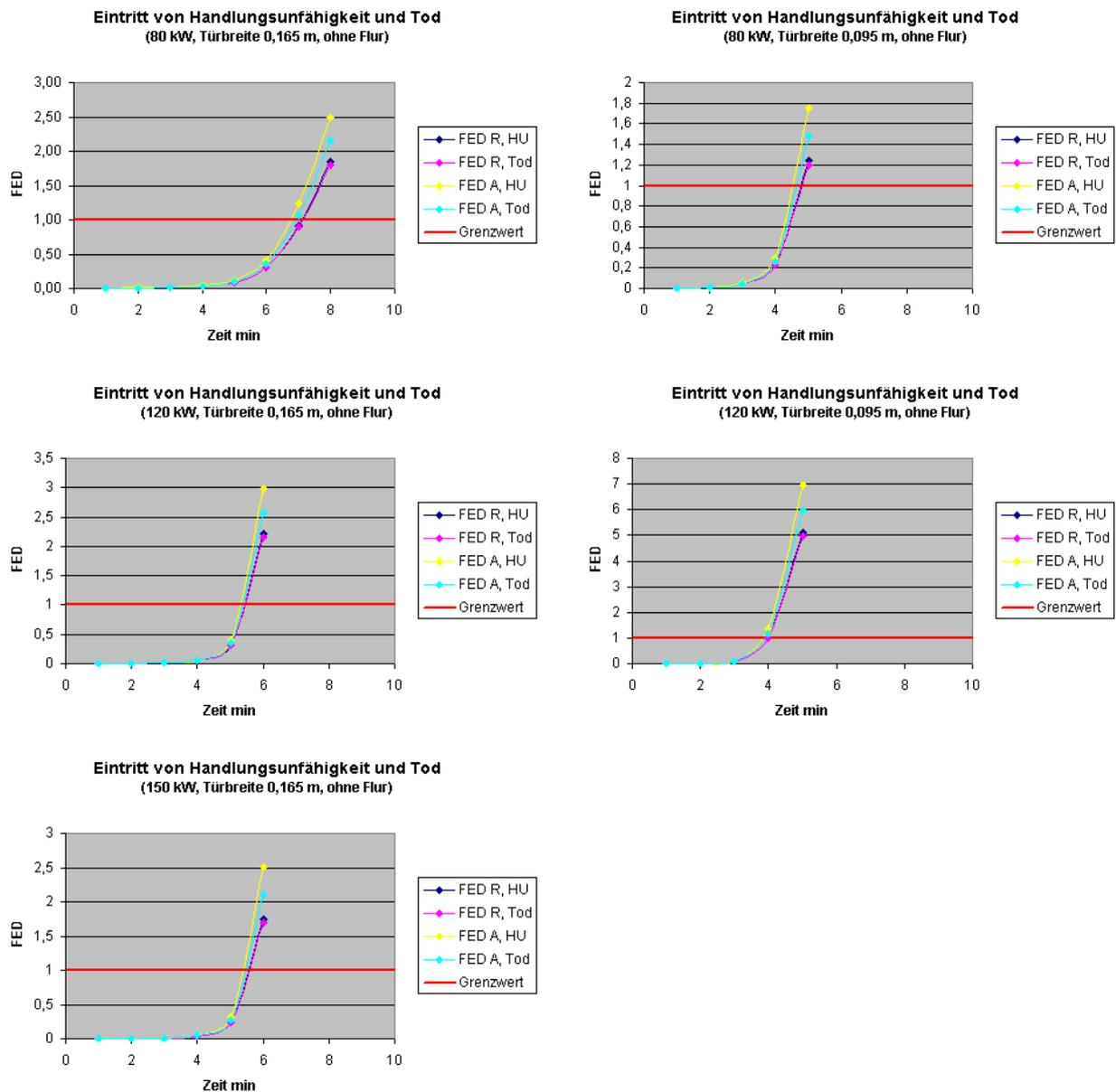


Abb. 58: Zeitpunkt des Eintretens von Handlungsunfähigkeit und Tod bei theoretischen Energiefreisetzungsraten von 80 kW, 120 kW und 150 kW sowie Türöffnungszeiten von 0,165 m und 0,095 m für eine Person in den Situationen Ruhe und leichte Aktivität

Klar ersichtlich ist, dass die toxischen Wirkungen der Rauchgase im Brandraum innerhalb von wenigen Minuten zu Handlungsunfähigkeit und Tod führen würden. Bemerkenswert ist, dass auf der Basis dieser Berechnungen dem CO in der Rauchgasschicht nicht allein der Hauptanteil der toxischen Wirkung zugeschrieben werden muss. Vielmehr tritt die kritische Situation fast in gleichem Maße durch den sich sehr schnell entwickelnden O₂-Mangel ein. Zur Veranschaulichung sind in den Abbildung 59 und 60 die Teilergebnisse aus der Berechnung der FED für vier Versuche dargestellt. Erwartungsgemäß sollte beim Brand mit 150 kW am schnellsten der kritische Wert von FED = 1 überschritten werden. Dass hierbei ein Ergebnis vergleichbar mit dem Brand von 120 kW erhalten wurde, könnte der Tatsache geschuldet sein, dass nicht mehr der ganze Brennstoff im Brandraum zum Umsatz kam. Es

bildete sich im angrenzenden Flur eine Flamme aus, in der das durch die Türöffnung austretende brennstoffreiche Gemisch verbrannte.

Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Verhältnisse in der Rauchgasschicht, die bedingt durch die Türöffnung nicht völlig raumfüllend war sondern in den angrenzenden Raum (Flur) abziehen konnte. Für Personen, die sich im Brandraum unterhalb einer Rauchgasschicht befinden, werden vorrangig die Temperatureinflüsse von Bedeutung sein. Die Gaskonzentrationen im abziehenden Rauchgas unter der Raumdecke des Flures waren bereits stark verdünnt und wiesen einen deutlichen vertikalen Konzentrationsgradienten auf, da wegen des ungehinderten Abflusses die Schichtdicke nur etwa 0,3 m betrug. Eine Berechnung der toxischen Wirkung nach dem FED-Konzept wurde vorgenommen mit den Messwerten, die bei den Bränden mit 120 kW und 150 kW mit einer Querschnittssonde 0,1 m unter der Raumdecke im Flur in der Entfernung von 0,8 m und 1,6 m zur Türöffnung des Brandraumes erhalten wurden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 61 dargestellt.

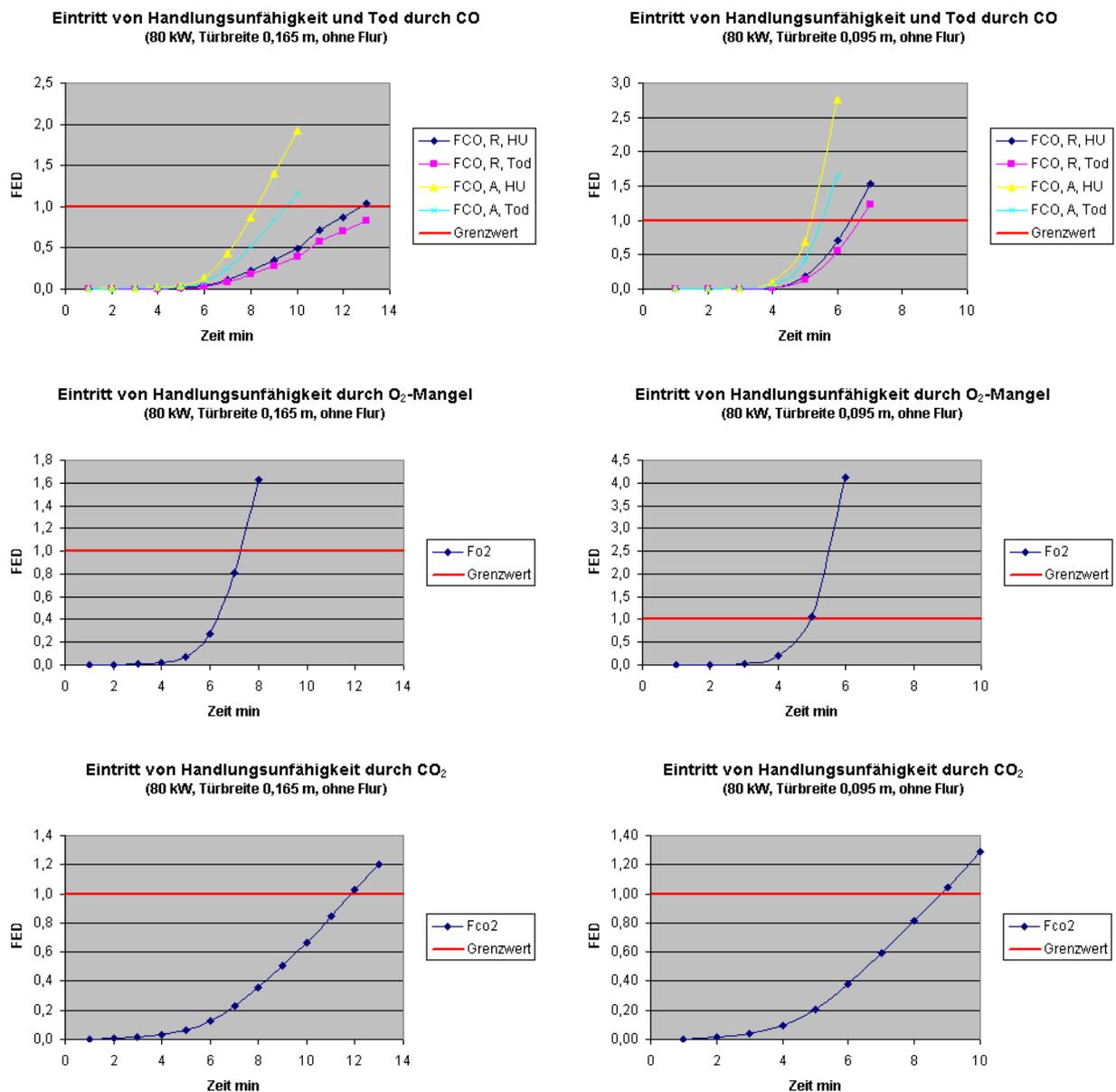


Abb. 59: Gegenüberstellung der Einzelergebnisse zur Berechnung der FED für eine Person in den Situationen Ruhe und leichte Aktivität bei einem Brand mit 80 kW und Türöffnungsbreiten von 0,165m und 0,095 m

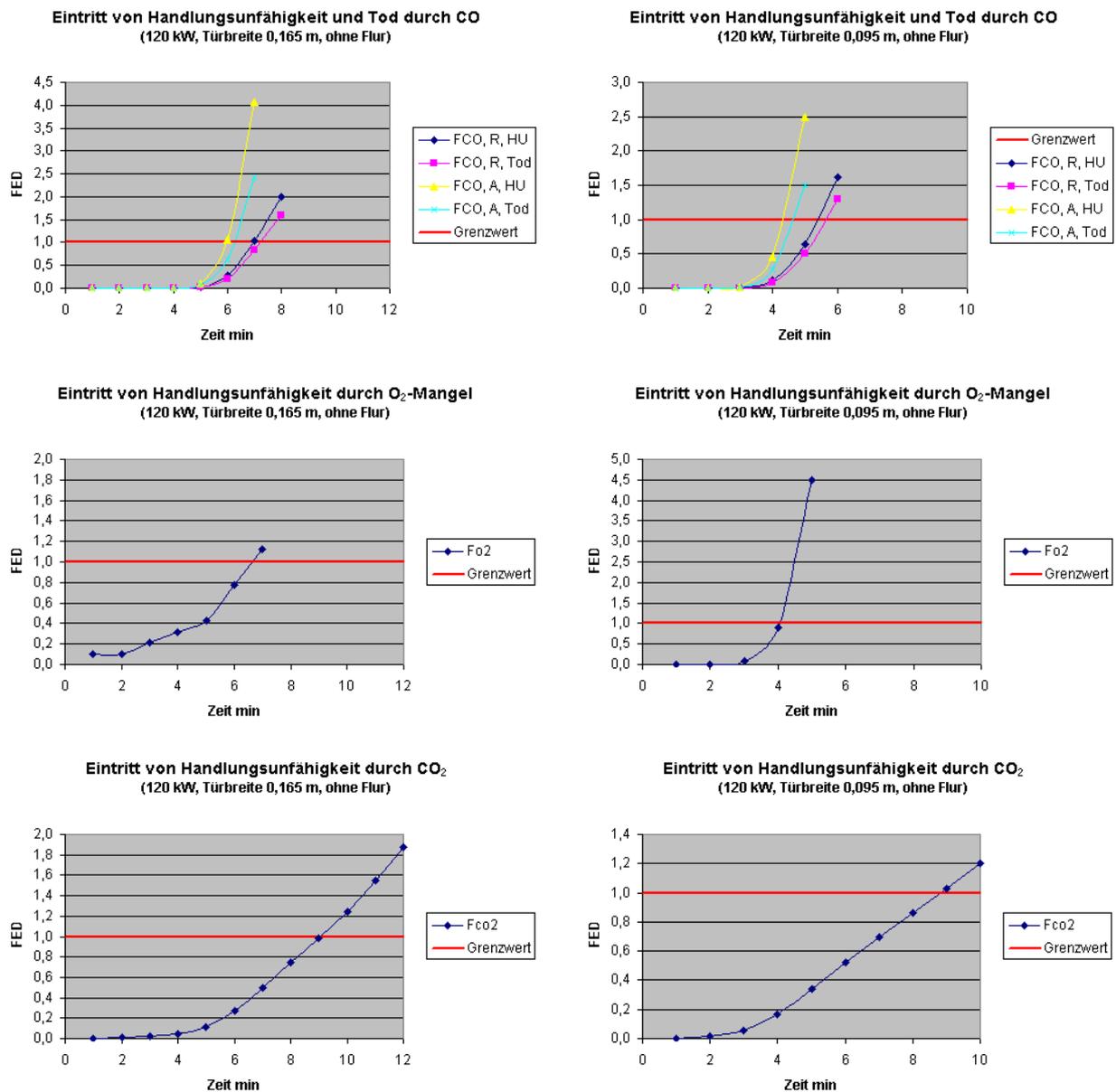


Abb. 60: Gegenüberstellung der Einzelergebnisse zur Berechnung der FED für eine Person in den Situationen Ruhe und leichte Aktivität bei einem Brand mit 120 kW und Türöffnungsbreiten von 0,165m und 0,095 m

Für die Berechnung der toxischen Wirkung der Rauchgasschicht im Flur (Ergebnisse in Abbildung 61) wurden die CO₂-Konzentrationen herangezogen, da deren Wirkung in diesem Fall größer wäre als die der verminderten O₂-Konzentration. Im Vergleich zu den Verhältnissen im Brandraum ergab sich hier eine deutlich erkennbare größere Zeitspanne bis zu dem Zeitpunkt, an dem lebensbedrohliche Symptome einsetzen würden. Die Rechenbeispiele wurden für die Verhältnisse in der Rauchgasschicht ausgeführt, unterhalb dieser herrschten völlig andere Bedingungen. Die Verbrennung des aus der Tür des Brandraumes austretenden brennstoffreichen Gemisches bei dem Versuch mit 150 kW wirkte sich gemäß der berechneten Werte der FED nicht situationsverbessernd auf die Verhältnisse im Flur aus. Es gab zumindest bei dieser Konstellation der Versuchsdurchführung keinen Anhaltspunkt dafür, dass die zusätzliche Verbrennung im Flur, die zwar unter günstigeren Ventilationsverhältnissen stattfand, zu einer nachträglichen, und zusätzlich zur Verdünnung stattfindenden, spürbaren Verminderung der CO-Konzentration führen würde.

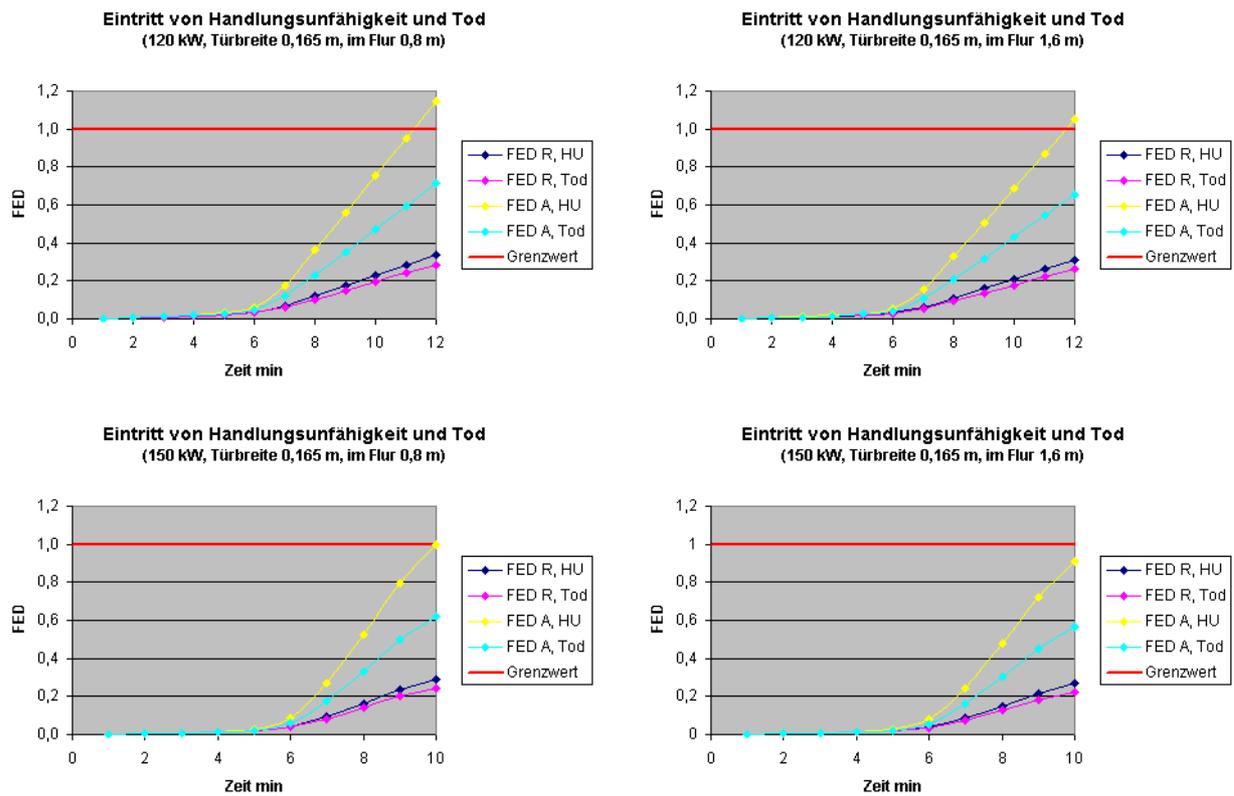


Abb. 61: Zeitpunkt des Eintretens von Handlungsunfähigkeit und Tod bei theoretischen Energiefreisetzungsraten von 120 kW und 150 kW sowie einer Türöffnungsbreite von 0,165 m im Brandraum für eine Person in den Situationen Ruhe und leichte Aktivität im Flur

Für einen Brand von 2 Brandlastpaletten mit gemischten Materialien (Versuch 7), den [Kunkelmann 1998] in einem Raum mit den Maßen 5 x 5 m Grundfläche und 2,75 m Höhe ausführte, wurde im ersten Teil dieses Projektes von [Pleiß, Seliger 2007] eine Berechnung der FED vorgenommen. Dieser Versuch wurde nochmals herangezogen, um einen Vergleich mit einem in diesem Projekt durchgeführten Propangasbrand von 150 kW anzustellen. Hierfür wurden der von [Kunkelmann 1998] berechnete Wärmestrom und die aus dem Gasmassstrom des Propangasbrandes berechnete theoretische Energiefreisetzungsrate auf das jeweilige Raumvolumen bezogen und die mit den gemessenen Gaskonzentrationen berechnete FED in Abbildung 62 gegenübergestellt. Wird der zeitliche Verlauf der theoretischen Energiefreisetzungsrates des Propangasbrandes ab Startzeitpunkt des Hauptbrenners (3 min vor dessen Entflammen) dargestellt, deckt sich dieser gut mit dem Verlauf der Energiefreisetzungsrates der brennenden Brandlastpaletten. Für die Berechnung der FED aus den Rauchgaskonzentrationen des Brandes der Brandlastpaletten wurden nur die Konzentrationen an CO und CO₂ herangezogen, während die Berechnung für den Propangasbrand mit den Messdaten von CO, CO₂ und O₂ ausgeführt wurde. Das Eintreten von kritischen Situationen für Personen entsprechend den Berechnungen der FED fällt in eine Zeitspanne von 5,5 – 7 min nach Beginn der Brandentwicklungsphase.

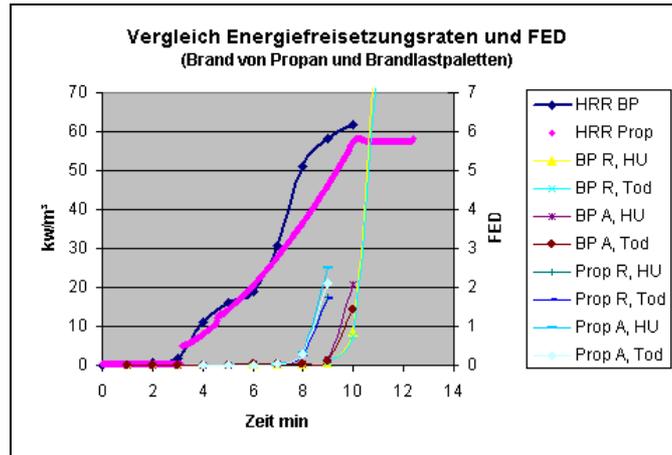


Abb. 62: Vergleich der Energiefreisetzungsraten (bezogen auf das Raumvolumen) und der FED für einen Brand von Propan (Prop) mit einer Energiefreisetzungsrate von 150 kW und für einen von [Kunkelmann 1998] untersuchten Brand von 2 Brandlastpaletten (BP)

3 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

In diesem Teil des Forschungsprojektes wurde der Schwerpunkt auf die Untersuchung der Bildung von Kohlenmonoxid bei Bränden in Räumen während der Brandentwicklungsphase gelegt, um Ableitungen hinsichtlich von Fluchtzeiten und Überlebenschancen darin befindlicher Personen sowie erforderlicher Einsatzzeiten zu ermöglichen. Anhand der durchgeführten Brandversuche konnte gezeigt werden, dass die Bildung von Kohlenmonoxid bei Raumbränden in Abhängigkeit von der Brandgröße sowie der Ventilationsverhältnisse erfolgte. Bei Propangasbränden, deren Energiefreisetzungsrate sich quadratisch zur Brandzeit entwickeln konnte und somit den Verlauf eines realen Brandgeschehens nahe kamen, setzte die CO-Bildung in Abhängigkeit zu den genannten Versuchsparametern in einer Zeitspanne von bis zu 3 Minuten nach Zündung des Hauptbrenners ein. Zu diesem Zeitpunkt kann noch von einer guten Ventilation des Brandraumes ausgegangen werden. Diese Ergebnis steht im Einklang mit dem von [Forell 2007], der nach Auswertung verschiedener experimenteller Arbeiten zu der Aussage kam, dass auch während gut ventilierter Brände die CO-Bildung in einem bestimmten Umfang (basic level) stattfindet. Die Untersuchung der Rauchgasschicht in horizontaler und vertikaler Richtung ergab eine relativ homogene Zusammensetzung hinsichtlich der Gaskonzentrationen und im Speziellen der des CO. Das Ergebnis bestätigt die Erkenntnisse von [Pitts 2001], wonach bei Temperaturen der Heißgasschicht bis 700 K die gebildete CO-Konzentration „eingefroren“ ist, d. h. es finden keine nachträglichen Reaktionen statt, die zu einer Konzentrationsabnahme führen. Mit Reaktionen wäre erst ab Temperaturen von über 900 K zu rechnen, die bei den Versuchen allerdings während der Vollbrandphase teilweise erreicht wurden.

Eine Berechnung der Zeitpunkte, zu welchen Personen, die den toxischen Wirkungen der bei den Versuchen festgestellten Rauchgaskonzentrationen ausgesetzt wären, handlungsunfähig werden bzw. deren Tod eintritt, ergaben je nach Brandgröße und Ventilation ein Zeitlimit von 4 bis 7 Minuten für den Brandraum mit offener Tür. Schädigende Wirkungen der Raumtemperatur wurden in die Berechnungen nicht mit einbezogen. Der als Grenzkriterium von [Purser 2002] angegebene Wert von 2,5 kW/m², der unterhalb einer Rauchgasschicht von 200 °C wirkt und für wenige Minuten erträglich ist, würde mit den Bedingungen der hier durchgeführten Versuche wirksam werden. Für Personen, die den abziehenden Rauchgasen in angrenzenden Räumen (hier Flur) ausgesetzt wären, würde sich das Zeitlimit in den hier berechneten Beispielen auf das etwa Doppelte verlängern.

Sofern ein guter Abzug realisiert werden kann, sollten sich unterhalb der Rauchgasschicht noch bessere Chancen für Personen ergeben. Bei allen im Rahmen dieser Arbeit ausgeführten Versuchen wurde Propan als Brandstoff verwendet. Damit sind die hier abgeleiteten Aussagen auch nur für ähnliche Brandstoffe relevant. Es sind keine direkten Aussagen ableitbar auf Brände, in welchen andere Brandstoffe (z. B. HCN freisetzende) involviert sind. Ebenso sind Verhältnisse, die sich in geschlossenen bzw. verbundenen Räumen ausbilden in ihrer Entwicklungs- und Endphase nicht abschätzbar. Es kann allerdings erfahrungsgemäß unter schneller zu erreichendem Sauerstoffmangel mit deutlich kürzeren Zeiten bis zum Eintritt kritischer Situationen für Personen gerechnet werden.

Somit konnten die in der ersten Berichterstattung getroffenen Schlussfolgerungen mit weiteren Versuchsergebnissen gestützt und präzisiert werden.

- ◆ Innerhalb weniger Minuten bilden sich hinsichtlich thermischer und toxischer Exposition kritische Situationen aus, wodurch die Überlebenschancen von im Brandraum befindlichen Personen bei Wohnungsbränden rapide sinken. Die für die Rettung aus dem Brandraum zur Verfügung stehende Zeitspanne unterschreitet die mögliche Eintreffzeit der Hilfskräfte der Feuerwehr im Normalfall.
- ◆ Vor dem Hintergrund der Veränderungen durch generelle Energiesparmaßnahmen wird die Entwicklung unterventilierter Brände im Wohnbereich unterstützt. Es kommt deutlich schneller zu kritischen Situationen für die Bewohner. In Brandräumen, in denen das Feuer seinen Ausgangspunkt hat, können die Bewohner diesen Situationen fast ausschließlich durch Selbstrettung entgehen.
- ◆ Zeitlich gestaffelt dazu entwickeln sich die Verhältnisse in den zum Brandraum benachbart gelegenen Räumen. Hier sind besonders durch offene Türen verbundene Räume betroffen.
- ◆ Lösungswege, die Selbstrettung der Personen zu unterstützen bzw. zu ermöglichen liegen in der Früherkennung der Brände durch Brandmelder, aber auch in einer Installation von automatischen Löschanlagen im Bereich des Wohnungsbaues. Entsprechende gesetzliche Vorgaben zur Installation von Brandmeldern sind bereits in einigen Bundesländern in Bauordnungen umgesetzt.
- ◆ Im Interesse der Sicherheit der Bevölkerung im Wohnbereich sollte auch darüber zu entscheiden sein, dass zukünftig in modernen Wohnbauten Brandschutzeinrichtungen installiert werden.
- ◆ Ein unbedingtes Erfordernis besteht darin, die Bevölkerung darüber aufzuklären, dass ein Brand im Anfangsstadium entdeckt werden muss, um ausreichend Zeit für eine Selbstrettung zu erhalten. Der Einsatz von Brandmeldern erfordert auch seine entsprechende Wartung und Pflege, die nur von den Bewohnern realisiert werden kann..
- ◆ Die Aufklärung der Bevölkerung muss auch umfassen, dass sich in Nachbarschaft zum Brandraum kritische Verhältnisse entwickeln können und die Überlebenschancen in diesen Räumen ebenfalls schneller sinken können, als die Feuerwehr einzutreffen vermag und daraus die Notwendigkeit der Selbstrettung erwächst.

4 LITERATUR

[Blume 2003]

Blume, G.: Ingenieurmodell zur brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen auf der Basis von experimentell ermittelten Verbrennungseffektivitäten, Dissertation Fachbereich Bauingenieurwesen der technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2003

[Drysdale 1998]

Drysdale, D.: An Introduction to Fire Dynamics, 2nd Edition, John Wiley and Sons Ltd., 1998

[Emmons 2002]

Emmons, H. W.: Vent Flows, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, Section 2, Chapter 3, (2002)

[Ewens 1994]

Ewens, D.: The Transport and Remote Oxidation of Compartment fire Exhaust Gases, Master of Science Thesis, Virginia Polytechnic Institute, 1994

[Floyd 2003]

Floyd, J.: Hughes Associates Inc., unpublished data, 2003, zitiert in: Wieczorek, C.: Carbon Monoxide Generation and Transport from Compartment Fires, Doctoral Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Mining and Minerals Engineering, 2003

[Forell 2007]

Forell, B.: A Methodology to assess Species Yields of Compartment Fires by means of an extended Global Equivalence Ratio Concept, Dissertation Fachbereich Bauingenieurwesen der technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2007

[Gottuk 1992]

Gottuk, D. T.: The Generation of Carbon Monoxide in Compartment Fires, Doctoral Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1992

[Gottuk, Lattimer 2002]

Gottuk, G.; Lattimer, B.: Effect of Combustion Conditions on Species Production, Society of Fire Protection Engineering Handbook, 3rd edition, Section 2, Chapter 5, (2002)

[Heskestad 1982]

Heskestad, G.: Engineering relations for fire plumes, Society of Fire Protection Engineers, Technology Report 82-8, zitiert in [Drysdale 1985]

[Janssens, Tran 1992]

Janssens, M.; Tran, H. C.: Data Reduction of Room Tests for Zone Model Validation, Journal of Fire Sciences, 1992, Vol. 10, pp. 529-555

[Kawagoe 1958]

Kawagoe, K.: Fire Behaviour in Rooms, Report of the Building Research Institute, No. 27, The Building Research Institute, Tokyo, 1958

[Kunkelmann 1998]

Kunkelmann, J.: Auswirkungen des Einsatzes ortsfester Wassernebel-Löschanlagen auf die Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten Fassaden, Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V – Unterausschuss „Feuerwehrangelegenheiten, Forschungsbericht Nr. 108, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe 1998

[Lattimer 1996]

Lattimer, B., "The Transport of High Concentrations of Carbon Monoxide to Locations Remote from the Burning Compartment," Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Department of Mechanical Engineering, Blacksburg, VA (1996), zitiert in [Wieczorek 2003]

[McCaffrey, Heskestad 1976]

McCaffrey, B. J.; Heskestad, G.: A Robust Bidirectional Low-Velocity Probe for Flame and Fire Application, *Combustion and Flame*, 26, 125-127 (1976)

[McKAY 2002]

McKay, C.: Carbon Monoxide Generation in a Compartment with a Doorway during a Fire, Virginia Polytechnic Institute and State University, Masterarbeit, Blacksburg, Virginia, 2002

[Pitts 2001]

Pitts, W. M.: Toxic Yield, in Cox (Ed.) *Technical Basis for Performance Based Fire Regulations*, Proceedings, New York 2001, pp. 76-87, zitiert von [Forell 2007]

[Pleß, Seliger 2007]

Pleß, G.; Seliger, U.: Entwicklung von Kohlenmonoxid bei Bränden in Räumen, Teil 1, Brandschutzforschung der Bundesländer – Bericht Nr. 145 – Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, 2007

[Purser 2002]

Purser, D. A.: Toxicity Assessment of Combustion Products, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Third Edition, Section 2, Chapter 6, (2002)

[Quintiere 2006]

Quintiere, J. G.: *Fundamentals of Fire Phenomena*, John Wiley & Sons, LTD, 2006

[Twilt et al. 1997]

Twilt, L. ; Cajot, L. G.; Joyeux, D.; van Oerle, N. J.: Fire Characteristics for Use in a Natural Fire Safety Concept of Building Structures, Annex 3 of Technical Report No. 7 of Natural Fire safety Concept, Semestrial Report for the period 1.7.97-31.12.97, zitiert von [Blume 2003]

[Will 2005]

Will, J.: Entwicklung eines sauerstoffkalorimetrischen Verfahrens zur Bestimmung von Brandparametern bei unterschiedlich ventilerten Bränden, Dissertation Fachbereich Bauingenieurwesen der technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2005

[Wieczorek 2003]

Wieczorek, C.: Carbon Monoxide Generation and Transport from Compartment Fires, Doctoral Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Mining and Minerals Engineering, 2003