

4. Allgemeine Flammenstruktur der TECFLAM-Drallflamme

Um einen Eindruck der allgemeinen Flammenstruktur zu erhalten, wurden qualitative Messungen planarer Laser-induzierte Fluoreszenz (PLIF) an einer Flamme mit 150kW, Luftzahl 1,2 und Drallzahl 1,15 durchgeführt. Mit dieser Technik konnten zweidimensionale „Momentaufnahmen“ der Verteilungen von OH und dotiertem NO aufgenommen werden, die Effekte wie z.B. Brennstoffeinemischung, hohe Temperaturgradienten und den Verlauf von Reaktionszonen aufzeigen konnten. Mit der Kenntnis dieser Strukturen wurden außerdem die Positionen für das Messraster für die punktförmigen Raman-Messungen festgelegt. Zusätzlich wurde das Flammeneigenleuchten mit einer CCD-Kamera zeitaufgelöst aufgenommen. Diese Bilder zeigen Emissionen, die im Wesentlichen von den Radikalen OH und CH stammen, welche in den Reaktionszonen in elektronisch angeregten Zuständen gebildet werden, und geben einen Eindruck von der Struktur der Reaktionsgebiete. Zusätzlich wurden mit der gleichen Messmethode gemittelte Emissions-Verteilungen aufgenommen und entabelt, d.h. ein Quasi-Schnittbild erzeugt, welches die mittlere Lage der Reaktionszone aufzeigt.

4.1 PLIF an dotiertem NO als Brennstoffindikator

Für eine erste Abschätzung des Mischverhaltens der Drallflamme wurde die qualitative Brennstoffverteilung in Brennernähe mittels PLIF zweidimensional nachgewiesen. Da sich CH_4 nicht durch Laser-induzierte Fluoreszenz anregen lässt, wurde das Erdgas mit einer geringen Menge NO (70ppm) dotiert. Das NO wurde mit einer Laserstrahlung von $\sim 226\text{nm}$ angeregt und die emittierte Fluoreszenz mit einer CCD-Kamera detektiert. Die Messtechnik der planaren Laser-induzierten Fluoreszenz und der experimentelle Aufbau sind im Anhang beschrieben.

Die Abbildung 4.1 zeigt qualitative Verteilungen der NO-Fluoreszenz in Brennernähe. Dabei wurde das Laserlichtband ($h=35\text{mm}$, $d\approx 0,2\text{mm}$) vertikal durch die Brennermitte in die Brennkammer eingestrahlt. Zu sehen sind neben drei Momentaufnahmen (zeitliche Auflösung ca. 10ns) auch ein über 56 Aufnahmen gemitteltes Bild (rechts unten).

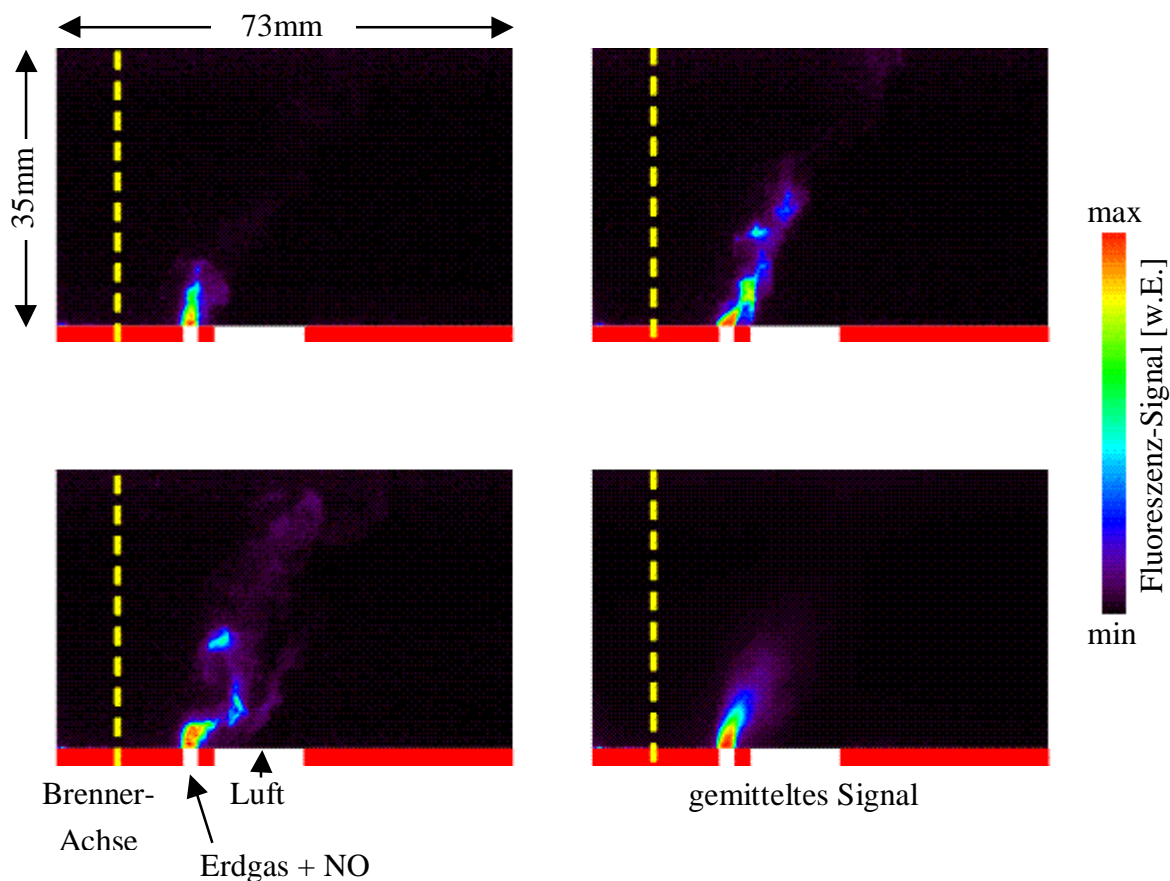


Abb. 4.1 Mit PLIF indirekt gemessene Verteilungen hoher Erdgaskonzentrationen am Düsenaustritt. Am unteren Bildrand sind jeweils die Öffnungen der Erdgas- und Luftdüse und die Brennerachse angedeutet.

In dem Fluoreszenz-Signal tragen nur sehr hohe Erdgaskonzentrationen ($>80\%$) zu einem erkennbaren Signal bei, da sich die NO-LIF-Signale nicht proportional aus den CH_4 - bzw. NO-Dichte ergeben. Grund hierfür ist einerseits die Fluoreszenzlöschung durch Molekülstöße. Während das CH_4 im Erdgas nur sehr wenig zur Fluoreszenzlöschung des NO beiträgt, vermindern Stöße des NO mit H_2O und CO_2 (in Mischungen von Erdgas mit Abgas auf der inneren Brennstoffseite) und mit O_2 (in Mischungen von Erdgas mit Luft auf der äußeren Brennstoffseite) die Intensität der Fluoreszenz erheblich [Paul96]. Diese Abhängigkeit der Fluoreszenzlöschung von der Gaszusammensetzung (und der Temperatur) wurde in den Aufnahmen nicht berücksichtigt. Ein weiterer Grund dafür, dass nur hohe Erdgaskonzentrationen zu einem erkennbaren Signal führen, ist andererseits, dass sich durch die Vermischung des Erdgases mit heißem Abgas die NO-Dichte im Messvolumen verringert ($P_{\text{NO}} \propto T^{-1}$). Aus diesen Gründen ist auch in der Flamme gebildetes NO in diesen Messungen nicht zu erkennen. Es sollten mit diesen Messungen lediglich Aussagen über Gebiete hoher NO-LIF-Intensitäten getroffen werden, mit denen sich Gebiete hoher Erdgas-Konzentrationen lokalisieren lassen.

Man erkennt in den Einzelpulsaufnahmen, dass der Brennstoffstrom ca. 5mm nach dem Austritt aus der Düse durch die stark verdrallte Luft in Strähnen und einzelne voneinander getrennte Gasballen aufgelöst wird und sich dadurch sehr schnell mit der Luft vermischt. Diese Mischung ändert ihre räumliche Struktur von Puls zu Puls, die Zone hoher Erdgaskonzentrationen fluktuiert um ein Gebiet, das im Mittel leicht nach außen geneigt ist. Das Erdgas wird also schon nach wenigen Millimetern durch die Zentrifugalkräfte der verdrallten Luftströmung nach außen gezogen und schnell verdünnt. In einer Höhe von ca. 10mm ist in der gemittelten Aufnahme nur noch eine sehr schwache NO-LIF-Intensität, also Erdgaskonzentrationen von weniger als 80%, zu erkennen.

4.2 PLIF an OH

Um einen Einblick in die räumlichen Strukturen der Drallflamme zu bekommen, wurden die OH-Verteilungen mittels planarer Laser-induzierter Fluoreszenz untersucht. OH-Radikale werden in den Reaktionszonen gebildet und liegen dort in Übergleichgewichtskonzentrationen vor. Jedoch sind sie auch in Gebieten hoher Temperaturen ($T \geq 1400\text{K}$) in nachweisbaren Konzentrationen vorhanden, sodass hohe OH-LIF-Signale die Reaktionszonen und Gebiete hoher Temperatur widerspiegeln.

Die Abbildung 4.2 zeigt Einzelpulsaufnahmen der Laser-induzierten Fluoreszenz des OH-Radikals über dem Brennermund. Die zeitliche Auflösung der Messung wird im Wesentlichen durch die Laserpulslänge von ca. 5ns bestimmt, während die räumliche Auflösung ca. 0,2mm beträgt. Der Versuchsaufbau und weitere Erklärungen zur Laser-induzierten OH-Fluoreszenz sind im Anhang aufgeführt. Die Abbildung besteht aus 8 Einzelpulsaufnahmen, die getrennt voneinander auf maximalen Kontrast skaliert worden sind, sodass die dargestellten OH-Fluoreszenz-Signale hinsichtlich der OH-Konzentrationen nicht unmittelbar miteinander verglichen werden dürfen. Es sollen nur Aussagen über die Strukturen der OH-reichen Gebiete gemacht werden.

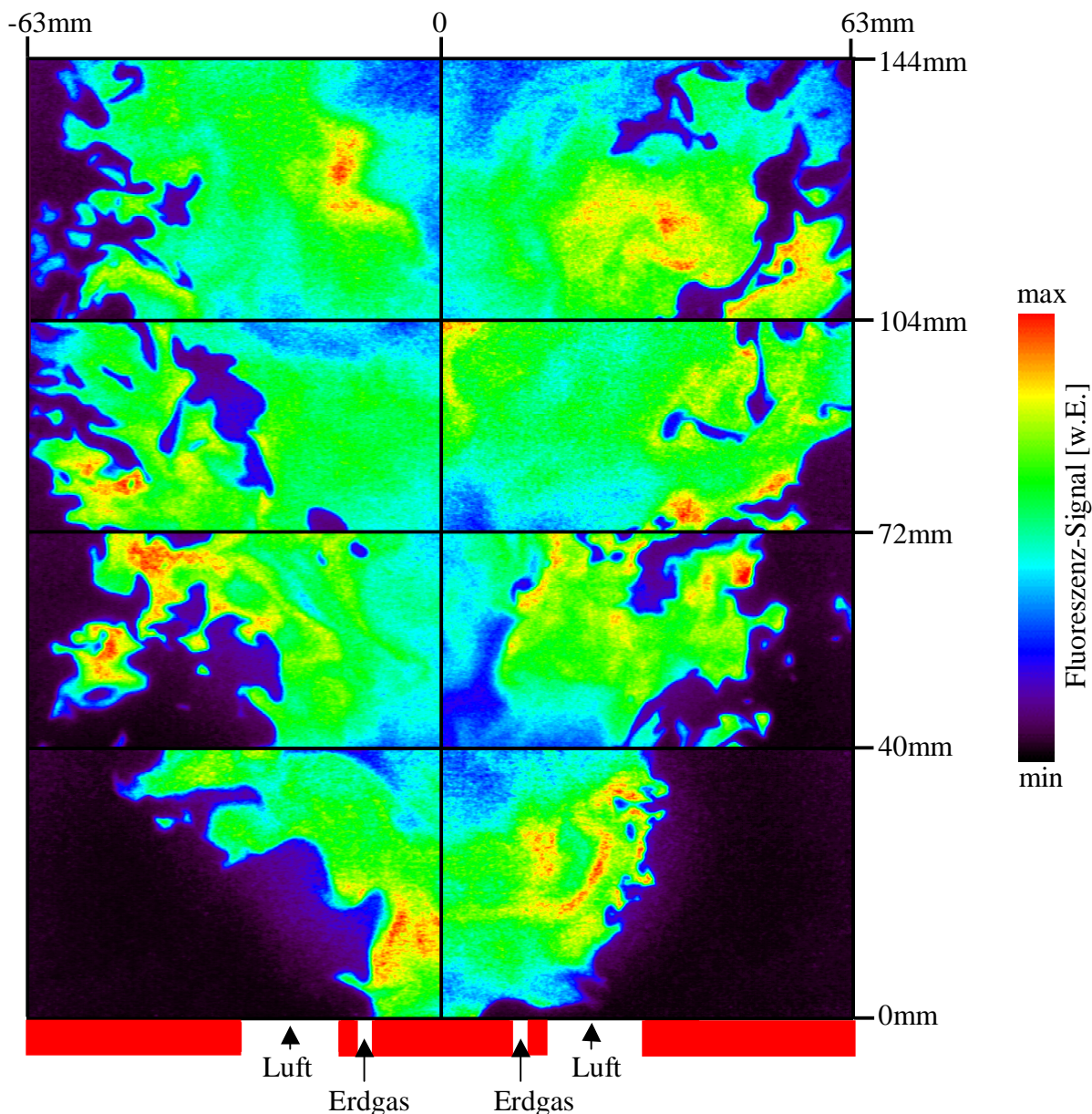


Abb. 4.2 Mit PLIF gemessene OH-Verteilungen im Einzelpuls (Abbildung setzt sich aus 8 Einzelbildern zusammen). Die dargestellte Ebene beinhaltet die Brennerachse. Die Eintrittsöffnungen für Erdgas und Luft sind angedeutet.

In den Aufnahmen erkennt man, dass die Gebiete hoher OH-Konzentrationen im Außenbereich durch die hohe Turbulenz stark gefaltet und zerklüftet sind, und in der 2D-Ansicht teilweise abgelöst sind. Die Übergänge von Gebieten mit und ohne OH verlaufen dort meistens abrupt, was auf hohe Temperatur-Gradienten schließen lässt. Hier spiegeln sich z.T. Lage und Form der Reaktionszonen wider. Da die Reaktionen in Gebieten mit $\Phi \approx 1$ (stöchiometrische Mischungen) stattfinden, zeigt die Abbildung auch teilweise Mischungsstrukturen zwischen Brennstoff und Luft.

Die homogenen und hohen OH-Konzentrationen im achsennahen Bereich der Flamme deuten auf hohe Temperaturen im inneren Rezirkulationsgebiet hin. Die Temperaturgradienten sind hier kleiner, die Übergänge hoher und niedriger OH-LIF-Signale verlaufen fließender.

Anhand der OH-Verteilungen lassen sich jedoch Gebiete mit reagierenden Gemischen und ausreagiertem heißen Abgas nicht eindeutig unterscheiden, sodass aus der Verteilung nicht ersichtlich ist, ob die Reaktionen unmittelbar am Düsenaustritt beginnen, oder ob hier heißes Abgas vorliegt

4.3 Zeitaufgelöste Messung der Flammenemissionen

Zur weiteren Analyse der räumlichen Struktur der Flammenfronten wurden Momentaufnahmen der Flammenemissionen mit einer CCD-Kamera aufgenommen (siehe Anhang für die Details der Aufnahmetechnik). Die Abbildung 4.3 zeigt solche Flammenemissionen aus der Standardflamme (150kW , $\lambda=1,2$ und $S=0,9$). Die Bilder sind mit einer Belichtungszeit von $10\mu\text{s}$ aufgenommen und zeigen breitbandige Emissionen im spektralen Empfindlichkeitsbereich der Kamera ($200\text{-}450\text{nm}$), überwiegend OH ($\lambda\approx 308\text{nm}$) und CH ($\lambda\approx 431\text{nm}$), die durch die Verbrennungsreaktionen im elektronisch angeregten Zustand gebildet werden (Chemilumineszenz). Bei den Aufnahmen handelt es sich um kein Lichtschnittverfahren, das heißt, dass der Detektor die Signale auf dem Weg durch die Flamme aufintegriert. Zu beachten ist, dass ein limitierter Detektions-Raumwinkel zu Signalverlusten an den äußeren Ecken der Bilder führt. Das Eigenleuchten der Flamme wurde dort teilweise durch die Fassungen der Brennkammer-Scheiben blockiert und konnte so nicht vollständig von der Kamera detektiert werden.

Die Verteilung der Chemilumineszenz weist, wie schon die OH-PLIF-Untersuchungen, auf eine stark zerklüftete Struktur hin, die jedoch aufgrund der fehlenden Ortsauflösung in Kamerarichtung fließender erscheint als bei den OH-Lichtschnittbildern. Deutlich zu erkennen ist, dass Verbrennungsreaktionen erst ab einer Höhe von ca. 20mm einsetzen. Die OH-reichen Gebiete der inneren Rezirkulationszone direkt über dem Brennermund (siehe Abbildung 4.2) sind hier nicht zu erkennen. Es liegen dort also keine angeregten OH-Radikale aus einer Reaktionszone vor, sondern OH-Radikale, die sich im elektronischen Grundzustand befinden (\Rightarrow ausreagiertes heißes Abgas).

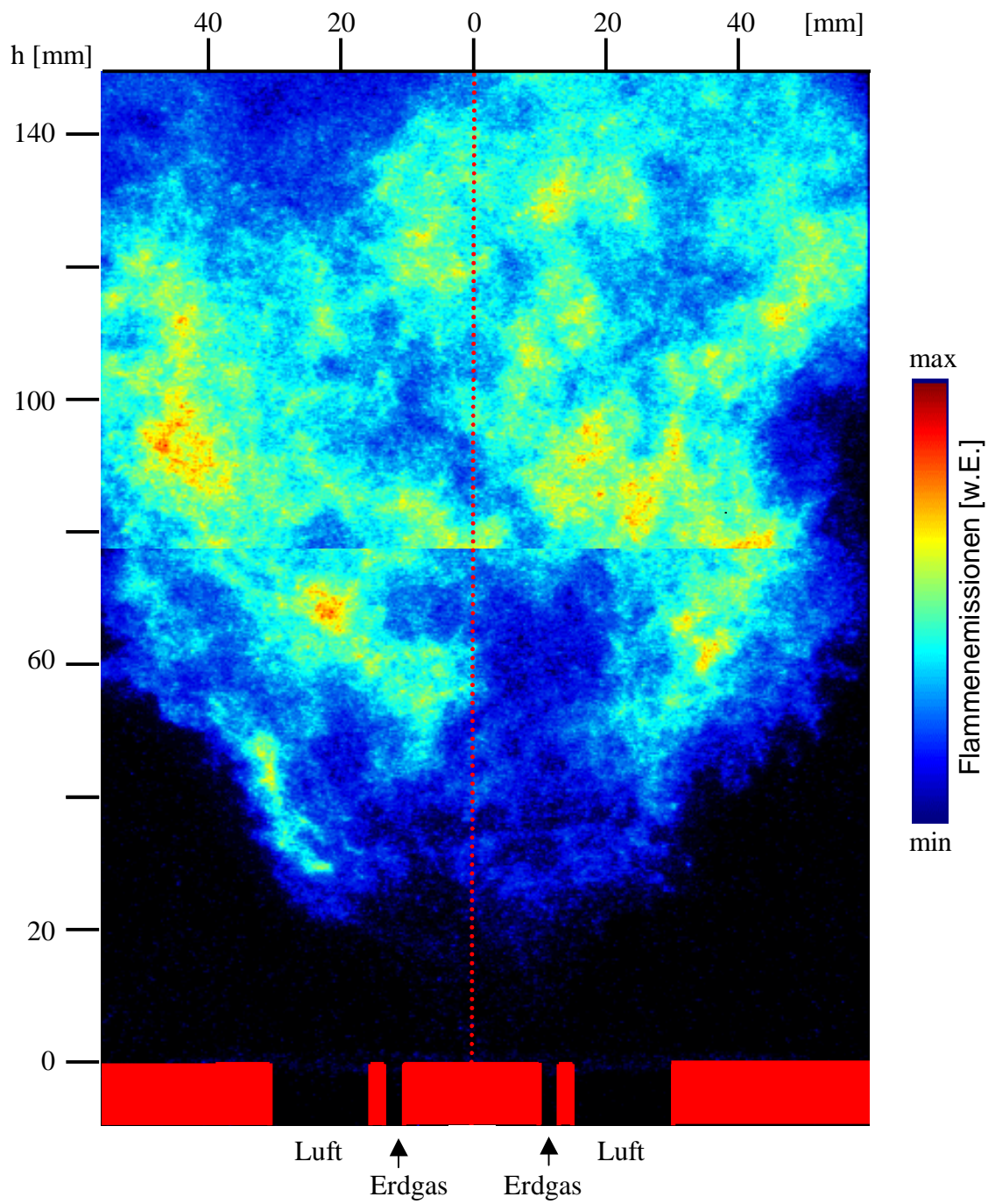


Abb. 4.3 Zeitaufgelöste Flammenemissionen (Abbildung setzt sich aus 2 Einzelbildern zusammen). Die Eintrittsöffnungen für Erdgas und Luft sind angedeutet. Die Brennerachse wird durch die gestrichelte Linie symbolisiert.

Es stellt sich die Frage, warum sich die Flamme nicht am Brennermund stabilisiert, obwohl sich in der Scherschicht zwischen Erdgas- und Luftströmung schon am Düsenaustritt nah-stöchiometrische und somit reaktionsfähige Gemische bilden (wie auch durch Raman-Messungen bei $h=10\text{mm}$ später belegt wird). Die Flamme kann sich dort allerdings nicht stabilisieren, da die zur Stabilisierung benötigten heißen Gase und Radikale aus der inneren Rezirkulationszone durch den kalten Erdgasstrom von den reaktionsfähigen Gemischen abgeschirmt werden. Eine Stabilisierung ohne Rezirkulation wird durch die hohen Strömungsgeschwindigkeiten für Erdgas und Luft am Austritt verhindert. Erst nach ca. 20mm ist der Erdgasstrom hinreichend mit Abgas und Luft verdünnt, sodass die reaktionsfähigen Mischungen zünden können.

Die Abbildung zeigt weiterhin, dass die Reaktionsgebiete in vielen Bereichen nicht zusammenhängend sind und sich in kleinere Inseln aufteilen. Trotz des aufintegrierten Signals sind dunkle Gebiete in der Abbildung zu erkennen (Gebiete ohne Reaktion), wo entweder kein brennbares Gemisch vorhanden ist oder die Reaktionen noch nicht gestartet, vollständig abgeschlossen oder unterbrochen wurden. Näheren Aufschluss über die Lage der Reaktionszonen bieten entabelte Bilder der Chemilumineszenz.

4.4 Gemittelte und entabelte Flammenemissionen

Abbildung 4.4 zeigt auf der linken Seite die gemittelte Chemilumineszenz, aufgenommen mit einer Belichtungszeit von $600\mu\text{s}$. Es ist eine größtenteils homogene Verteilung zu erkennen, die die äußere Begrenzung der Reaktionszonen aufzeigt (im unteren Drittel). Man erkennt auch hier, dass die Reaktionen erst ab einer Höhe von ca. 20mm einsetzen. Die stärksten Signale der Chemilumineszenz sind in einer Höhe von 75mm bis 140mm zu erkennen. Ab ca. 180mm wird das Signal der Flammenemissionen schwächer, da hier die Reaktionen größtenteils abgeschlossen sind.

Auf der rechten Seite ist das Ergebnis der Entabelung dargestellt (siehe Anhang). Die Entabelung nutzt die Zylindersymmetrie der Flamme aus und rechnet das über den Flammendurchmesser integrierte Signal zurück, sodass in der Abbildung die Chemilumineszenz einer Quasi-Ebene durch die Brennermitte zu sehen ist. Man erkennt, dass die Reaktionszonen im Mittel in den äußeren Bereichen der Flamme zu finden sind. Die Einbuchtungen und die anschließenden hohen Signale der entabelten Flammenemissionen an den Rändern der Abbildung (zwischen $h=80\text{mm}$ und $h=180\text{mm}$) sind auf Randeffekte der Kamera zurückzuführen, und zeigen nicht das tatsächliche Eigenleuchten.

Die Struktur auf der Flammenachse ist auf Unregelmäßigkeiten der Flammensymmetrie zurückzuführen und ergibt sich aus der Entabelungsprozedur (kein echtes Chemilumineszenz-Signal). In der inneren Rezirkulationszone ist nur wenig Signal vorhanden, hier finden nur noch vereinzelt chemische Prozesse statt.

Die Reaktionszonen liegen auf einem sich nach oben öffnenden Kegel (mit einem Öffnungswinkel von ca. 90° , bei $S=0,9$) und erstrecken sich in axialer Richtung von ca. 20mm bis zu einer Höhe von 180mm.

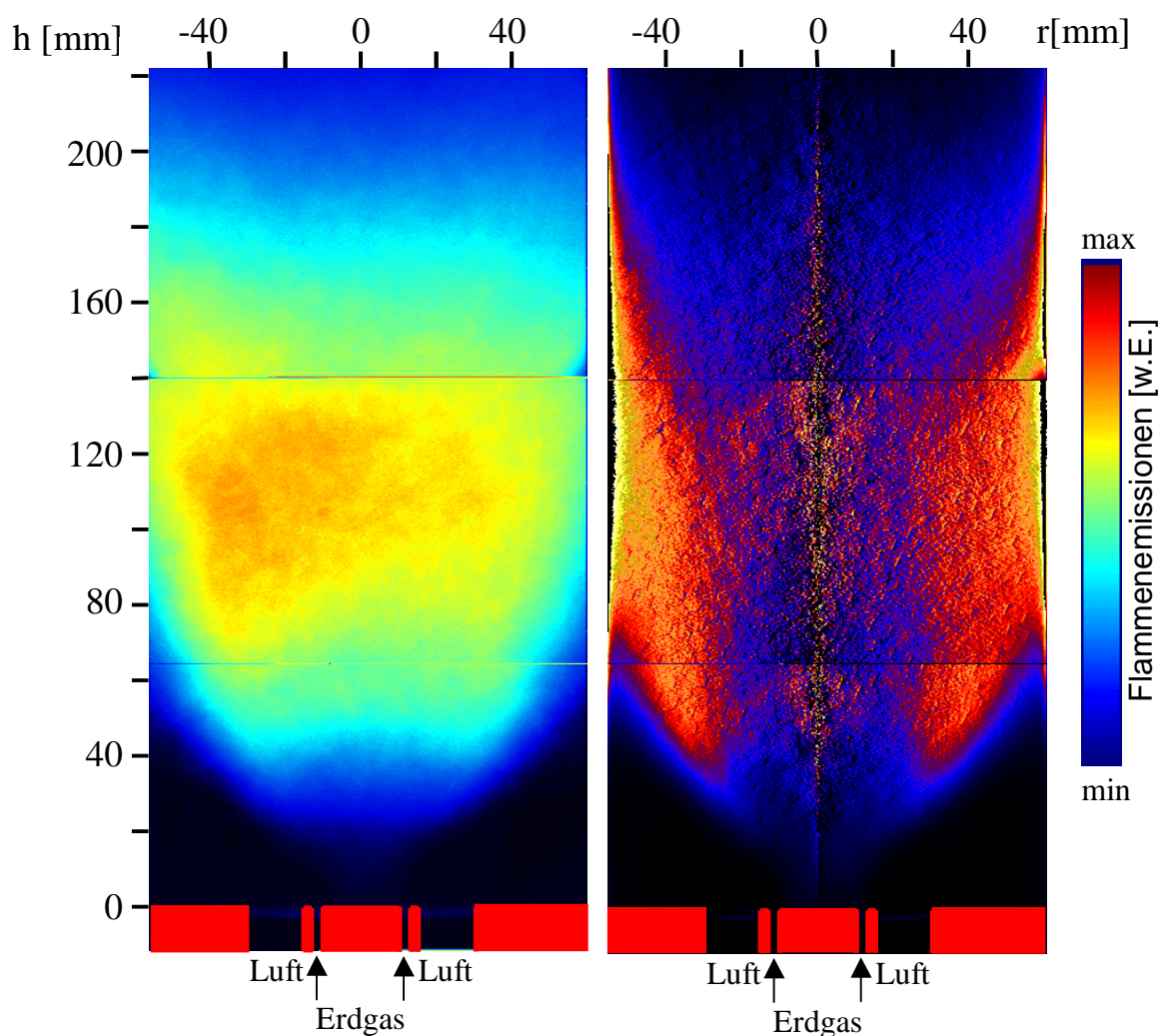


Abb. 4.4 Gemittelte (links) und entabelte (rechts) Chemilumineszenz der Standardflamme (Abbildungen setzen sich aus jeweils 3 Einzelbildern zusammen). Die Eintrittsöffnungen für Erdgas und Luft sind angedeutet.

4.5 Brennergnaes Strömungsfeld der TECFLAM-Drallflamme

Abbildung 4.5 versucht die Ergebnisse der Struktur-Untersuchungen an der TECFLAM-Drallflamme qualitativ zusammenzufassen und zeigt schematisch die Lage und Form der einzelnen Zonen der Flamme.

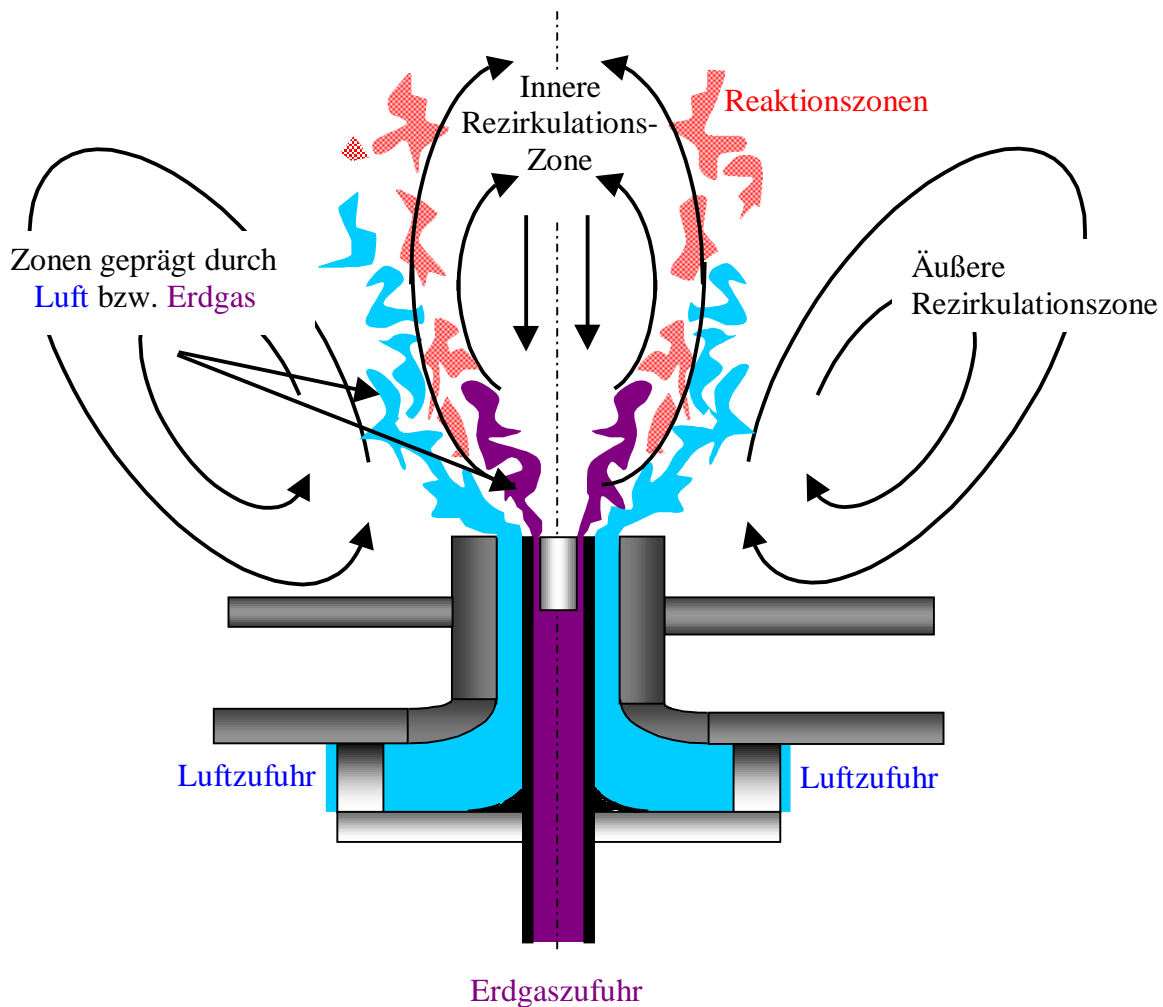


Abb. 4.5 Schematische Darstellung des generellen Strömungsbildes.

Die TECFLAM-Drallflamme kann durch 3 Hauptzonen charakterisiert werden: die innere Rezirkulationszone, die äußere Rezirkulationszone und die Mischzone zwischen Erdgas und Luft mit den reagierenden Mischungen. Die innere Rezirkulationszone zeichnet sich durch heiße, OH-reiche Abgase aus und erstreckt sich stromaufwärts bis zum Brennermund. Sie bringt heiße Gasgemische und Radikale zurück zur Flammenwurzel und sorgt für die Stabilisierung der Flamme. Die äußere Rezirkulationszone bringt ausreagierte Gasgemische zurück zur Lufteinmischung. Im Bereich der äußeren Rezirkulationszone konnte kein OH

nachgewiesen werden, was darauf hindeutet, dass die Temperaturen hier deutlich niedriger sind als in der inneren Rezirkulationszone. In der Mischzone treten kaltes Erdgas und Luft in den Brennraum, die sich schnell zu brennbarem Frischgas in der Scherzone vermischen. Der kalte Erdgasstrom verhindert zunächst aber eine Zündung des Gemisches, er schirmt es von der inneren Rezirkulationszone am Brennermund ab. Erst ab einer Höhe von ca. 20mm kommt es zur Zündung vereinzelter Gasballen. Die hohe Turbulenz und sich damit ausbildende kleinere Wirbel sind für die Zerklüftung und Ablösung einiger Strukturen verantwortlich. Damit bildet sich auch keine zusammenhängende Flammenfront aus. Ab einer Höhe von ca. 180mm ist wie im brennernen Bereich keine Reaktion mehr in den Emissionsbildern zu erkennen. In dieser Höhe sind die Reaktionen größtenteils abgeschlossen, ein Teil der Abgase wird durch die Rezirkulation wieder zum Brennermund zurückgeführt, während sich das restliche Abgas mit dem Gas aus der äußeren Rezirkulationszone vermischt. Dadurch erhält die Flamme die kurze, kompakte Form und kann in weiten Regelungsbereichen (Luftzahl, Drallzahl, thermische Leistung) mit guter Zündstabilität betrieben werden. Das generelle Bild der Strukturen der Flamme, wie es hier aufgezeigt ist, wird durch die Untersuchungsergebnisse der TECFLAM-Kooperationspartner bestätigt. Diese Arbeiten sind zu finden bei [Habiser.97, Kremer97, Schäfer97, Kremer98 und Landen.98], und ergeben insgesamt einen ausführlichen Einblick in die globalen Abläufe der Verbrennungsprozesse.

Mit den 2D-Untersuchungen kann die räumliche Struktur der Drallflammen qualitativ beschrieben werden. Weiterführende Informationen über den inneren Zustand der Flamme, die eine detaillierte Quantifizierung der Temperatur, der molaren Zusammensetzung und deren Korrelationen erlauben, liefern die Ergebnisse der Raman-Messungen.

5. Ergebnisse der Raman-Messungen

In diesem Kapitel werden Ergebnisse aus den Raman-Messungen am TECFLAM-Drallbrenner präsentiert und diskutiert. Die Ergebnisse beziehen sich auf Messungen in der Standardflamme (150kW, $S=0,9$ und $\lambda=1,2$). Die Mittelwerte \bar{x} werden über eine Ensemble-, bzw. Reynolds-Mittelung bestimmt, auf die sich auch die RMS-Fluktuationen x' (Root Mean Squares) beziehen.

$$\text{Mittelwert:} \quad \bar{x} = 1/N \cdot \sum_{i=1}^N x_i,$$

$$\text{RMS-Fluktuation:} \quad x' = \sqrt{1/N \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Dabei ist N die Anzahl der Einzelpulsmessungen pro Messort ($N=300$). Dichte-gewichtete Mittelwerte und Fluktuationen (Favre-Mittelung) wurden ebenfalls berechnet und stehen neben den Einzelpulsergebnissen als Datensatz im Internet zur Verfügung [TEC. web].

5.1 Radiale Profile der Temperatur, des Mischungsbruches und der Molenbrüche

Bevor der thermochemische Zustand der reagierenden Gase dargestellt und diskutiert wird, soll zunächst der allgemeine Zustand der Flamme anhand der gemittelten Ergebnisse näher betrachtet werden. Die Mischung ist hierbei von besonderer Bedeutung. Sie bestimmt größtenteils das globale Verhalten der Flamme und ist eine wichtige Größe für die mathematische Simulation.

Abbildung 5.1 zeigt radiale Profile des Mischungsbruches f (Mittelwerte und RMS-Fluktuationen) für die Höhen 10, 20, 40 und 90mm oberhalb des Brennermundes. Für $h=10$ mm tritt erwartungsgemäß eine starke Variation des mittleren Mischungsbruches f über den Radius auf. Der Mischungsbruch steigt ausgehend von $f=0,092$ auf der Brennerachse (innere Rezirkulationszone) auf einen Maximalwert von $f=0,58$ bei $r=14$ mm. Diese Position liegt über der Brennstoffeinmischung und wird durch eine hohe Erdgaskonzentration geprägt. Ab $r=14$ mm fällt der Mischungsbruch durch die Einmischung von Luft und liegt bei $r=23$ mm im stöchiometrischen Bereich ($f_{\text{stöch}}=0,055$). Das Minimum von $f=0$ wird in der Höhe von 10mm bei $r=30$ mm erreicht, man befindet sich hier direkt im nach außen geneigten Luftstrom. Ab $r=45$ mm bleibt der Mischungsbruch konstant bei $f=0,047$. Dieser Mischungsbruch entspricht der global eingestellten Luftzahl von $\lambda=1,2$.

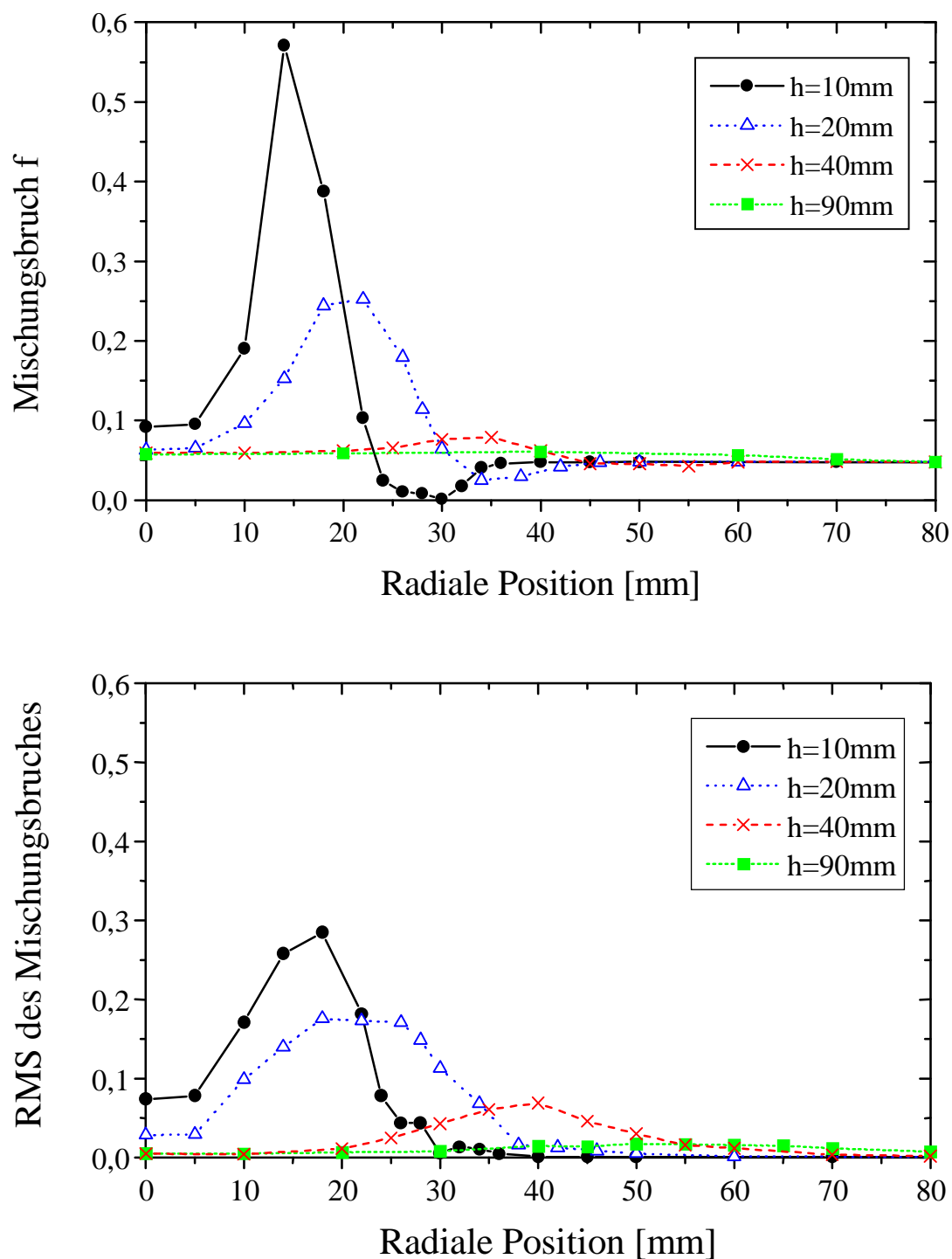


Abb. 5.1 Radiale Profile des Mischungsbruches unterschiedlicher Messhöhen: Mittelwerte (oben) und RMS-Fluktuationen (unten) der Standardflamme.

Mit zunehmender Höhe flacht der erreichte Mischungsbruchbereich sehr schnell ab. Bei $h=20\text{mm}$ liegt der Mischungsbruch zwischen $f=0,25$ ($r=24\text{mm}$) und $f=0,025$ ($r=34\text{mm}$). Sowohl das Maximum als auch das Minimum sind nach außen verschoben, da die eingedüsten Frischgase durch die Zentrifugalkräfte der verdrallten Luft nach außen gezogen werden. Im äußeren Bereich der Flamme liegt der Mischungsbruch wieder nahezu konstant bei $f=0,047$. Für $h=40\text{mm}$ und $h=90\text{mm}$ erkennt man einen relativ flachen Mischungsbruchverlauf, der im achsennahen Bereich eher auf der brennstoffreichen und im äußeren Bereich eher auf der brennstoffarmen Seite liegt.

Die Variationen der RMS-Fluktuationen des Mischungsbruches nehmen ebenfalls mit der Höhe ab, ihre Maxima verschieben sich ebenso wie die Extremwerte mit zunehmender Höhe nach außen. Die Positionen der Maxima deuten auf die Form und Lage der Scherschicht zwischen Erdgas- und Luftstrom hin, da hier der Mischungsbruchgradient am größten ist und durch leichte Änderungen der Strömung durch die Turbulenz der Mischungsbruch stark fluktuiert. Die Schwankung des Mischungsbruchs liegt bei der Höhe $h=10\text{mm}$ im Extremfall bei $0,28$ ($r=18\text{mm}$), bei $h=20\text{mm}$ bei $0,18$ ($r=18\text{mm}$) und bei $h=40\text{mm}$ bei $0,07$ ($r=40\text{mm}$). Für $h=90\text{mm}$ schwankt die RMS-Fluktuation leicht um $0,01$.

Insgesamt zeigt sich eine effektive Vermischung der Gase durch die Verdrallung der Luft. Die Positionen der Maxima belegen, dass der Radialimpuls der Luft auch den Erdgasstrom nach außen zieht. In einer Höhe von $h=90\text{mm}$ liegen fast nur noch solche Gasgemische vor, deren Mischungsbruch dem der globalen Luftzahl $1,2$ entspricht.

Abbildung 5.2 zeigt die radialen Profile der Temperatur (Mittelwert und RMS-Fluktuation) zu den Höhen $h=10, 20, 40$ und 90mm . Bei $h=10\text{mm}$ findet man die höchste Mitteltemperatur ($T=1780\text{K}$) auf der Flammenachse. Nach außen nimmt die Temperatur rasch ab und liegt im Bereich von $r=20-30\text{mm}$ bei 300K . Dieses Gebiet ist durch die Eindüsung des Erdgases und der Luft gekennzeichnet und die niedrigen Temperaturen zeigen, dass hier weder Wärmefreisetzung stattfindet noch heißes Abgas herantransportiert wird. Im weiteren Verlauf steigt die Temperatur wieder auf ca. 1200K an und bleibt auf diesem Niveau bis zur äußersten Messposition von $r=150\text{mm}$. Mit zunehmender Messhöhe verbreitern sich die Profile und sind nach außen verschoben. Die höchsten Mittelwerte der Temperatur finden sich nahe der Flammenachse bei $h=40\text{mm}$ und liegen bei 2000K . Die Profile der Temperatur flachen ebenso wie der Verlauf des Mischungsbruches mit zunehmender Messhöhe ab. Während die Temperatur z.B. bei $h=20\text{mm}$ zwischen 1950K (bei $r=0\text{mm}$) und 350K (bei $r=30\text{mm}$) liegt, bewegt sich der Temperaturverlauf der Höhe $h=90\text{mm}$ zwischen 1980K (bei $r=0\text{mm}$) und 970K (bei $r=70\text{mm}$).

Die RMS-Fluktuationen der Temperatur spiegeln die Scherschichten zwischen den kalten Frischgasströmen und heißen Abgasen wider. Gerade bei $h=10\text{mm}$ sind deutlich zwei Maxima zu erkennen. Bei $r=10\text{mm}$ liegen die Fluktuationen der Temperatur bei 500K (Scherschicht zwischen innerer Rezirkulationszone und Erdgasstrom) und bei $r=32\text{mm}$ betragen sie 210K (Scherschicht zwischen äußerer Rezirkulationszone und Luftstrom).

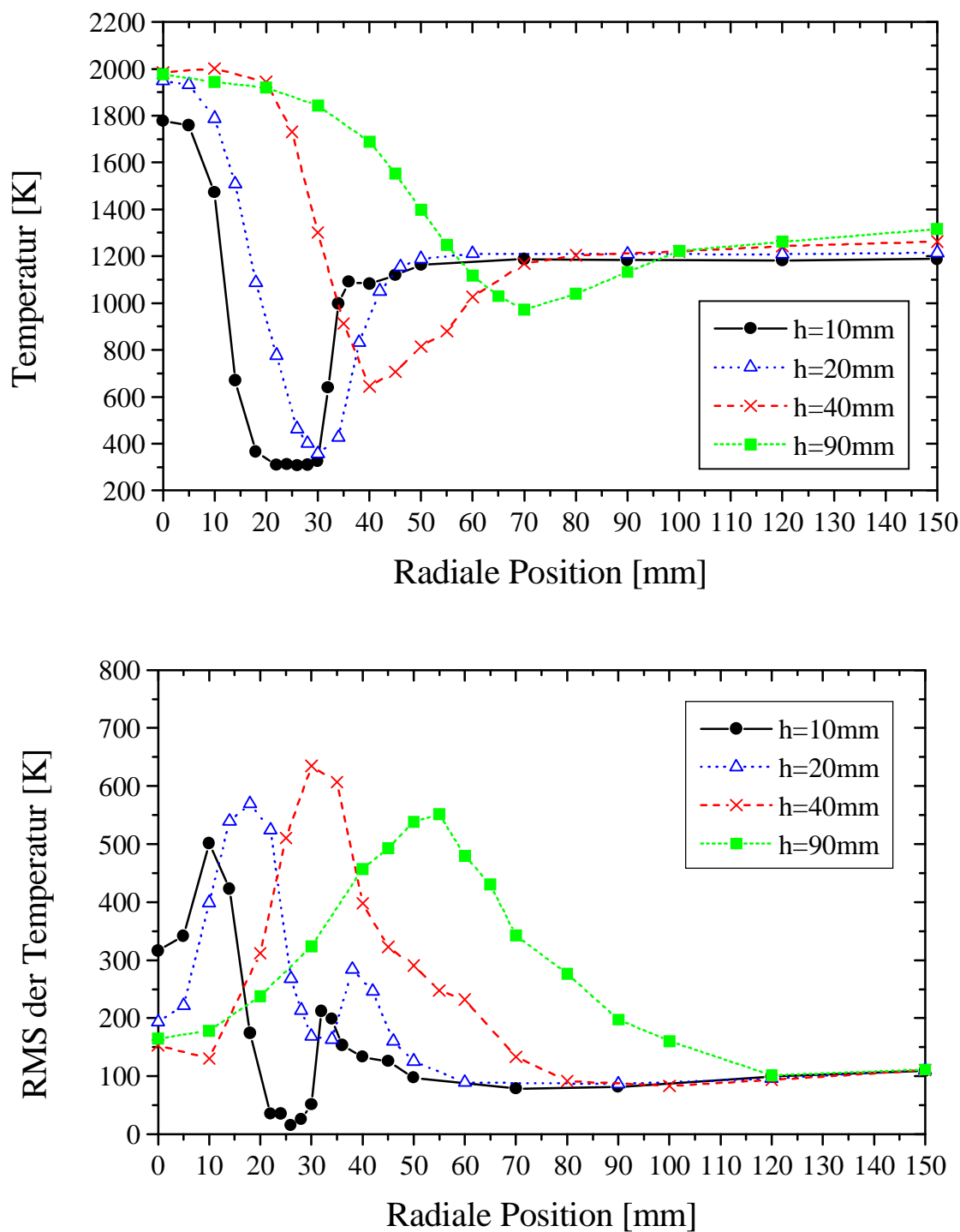


Abb. 5.2 Radiale Profile der Temperatur unterschiedlicher Messhöhen: Mittelwerte (oben) und RMS-Fluktuationen (unten) der Standardflamme.

Auf der Achse sind ebenfalls große Schwankungen zu erkennen (ca. 300K), die jedoch mit zunehmender Höhe schnell abnehmen. Die maximalen Fluktuationen nehmen bis zu einer Messhöhe von $h=40\text{mm}$ zu und betragen dort bei einer radialen Position von 30mm ca. 650K. In der äußeren Rezirkulationszone sind nur geringe Fluktuationen zu finden.

Anhand radialer Profile der Molenbrüche zu der Messhöhe 10mm , deren Mittelwerte in Abbildung 5.3 dargestellt sind, soll im Folgenden ein Einblick in die Speziesverteilungen gegeben werden. In der inneren Rezirkulationszone ($r\approx 0-7\text{mm}$) bestimmen hauptsächlich Gasgemische aus ausreagiertem Abgas und Erdgas die Zusammensetzung. Es liegen hohe Molenbrüche der Produkte ($X_{\text{CO}_2}=0,078$ und $X_{\text{H}_2\text{O}}=0,17$) und maximale Molenbrüche der Zwischenprodukte ($X_{\text{CO}}\approx 0,02$ und $X_{\text{H}_2}\approx 0,01$) vor. Der CH_4 -Molenbruch beträgt $0,05$ und O_2 ist im Mittel mit $X_{\text{O}_2}\approx 0,01$ vorhanden. Direkt über der Erdgaseindüsung fällt der N_2 -Molenbruch ausgehend von $X_{\text{N}_2}=0,66$ in der inneren Rezirkulationszone auf ein Minimum von $0,25$ ($r=18\text{mm}$). Der CH_4 -Molenbruch hat dort sein Maximum von $X_{\text{CH}_4}=0,63$. Weiter außen, über der Lufteindüsung bei $r=26-30\text{mm}$, findet man die Maxima von N_2 ($X_{\text{N}_2}=0,779$) und O_2 ($X_{\text{O}_2}=0,207$). CH_4 ist in diesem Gebiet nicht mehr zu finden. Ebenso sind die mittleren Molenbrüche der Produkte und Zwischenprodukte in dem Gebiet der Frischgaseindüsung auf Null gefallen, lediglich H_2O ist mit $X_{\text{H}_2\text{O}}\approx 0,008$ zu finden (entspricht dem Wasseranteil in der Raumluft). In der äußeren Rezirkulationszone ($r>40\text{mm}$) liegt ein Gemisch aus Abgas und Luft vor, das sich aus N_2 ($X_{\text{N}_2}=0,72$), O_2 ($X_{\text{O}_2}=0,033$), CO_2 ($X_{\text{CO}_2}=0,08$) und H_2O ($X_{\text{H}_2\text{O}}=0,16$) zusammensetzt. Der kleine Anteil CO dürfte auf den Mittelungsfehler zurückzuführen sein, der sich aus der Vermeidung negativer Molenbrüche ergibt (siehe Abschnitt 3.5).

Die Fluktuationen in der Messhöhe $h=10\text{mm}$ (Abbildung 5.4) für O_2 , N_2 und CH_4 sind in der Scherschicht zwischen einströmendem Erdgas und Luft ($r=18\text{mm}$) maximal. Die Produkte (CO_2 und H_2O) bilden zwei Maxima der RMS-Fluktuationen des Molenbruches aus, die sich in den Scherschichten der Rezirkulationsgebiete und den jeweiligen einströmenden Frischgasen ($r=14\text{mm}$ und $r=32\text{mm}$) befinden. Die relativ hohen Fluktuationen des CH_4 -Molenbruchs deuten darauf hin, dass aufgrund der Turbulenz, die in der Scherschicht zwischen innerer Rezirkulationszone und Erdgasstrom erzeugt wird, häufiger CH_4 -Gasballen oder -Strahlen in die innere Rezirkulationszone eindringen. Ab $r=40\text{mm}$ fallen die Fluktuationen auf einen geringen Wert und bleiben nach außen hin konstant.

Die radialen Molenbruchverläufe zeigen ein mit der Höhe zunehmendes Abflachen der Profile in Analogie zur Temperatur und zum Mischungsbruch. Die Zusammensetzung der Gasgemische nähert sich mit zunehmender Höhe dem des Abgases mit $\lambda=1,2$ an, während die RMS-Fluktuationen mit steigendem Ausbrand abnehmen. Es wird an dieser Stelle auf die Darstellung der radialen Molenbruchverläufe von weiteren Höhen verzichtet, da sie im Wesentlichen mit den gezeigten Profilen der Temperatur übereinstimmen und daher keine neuen Erkenntnisse liefern.

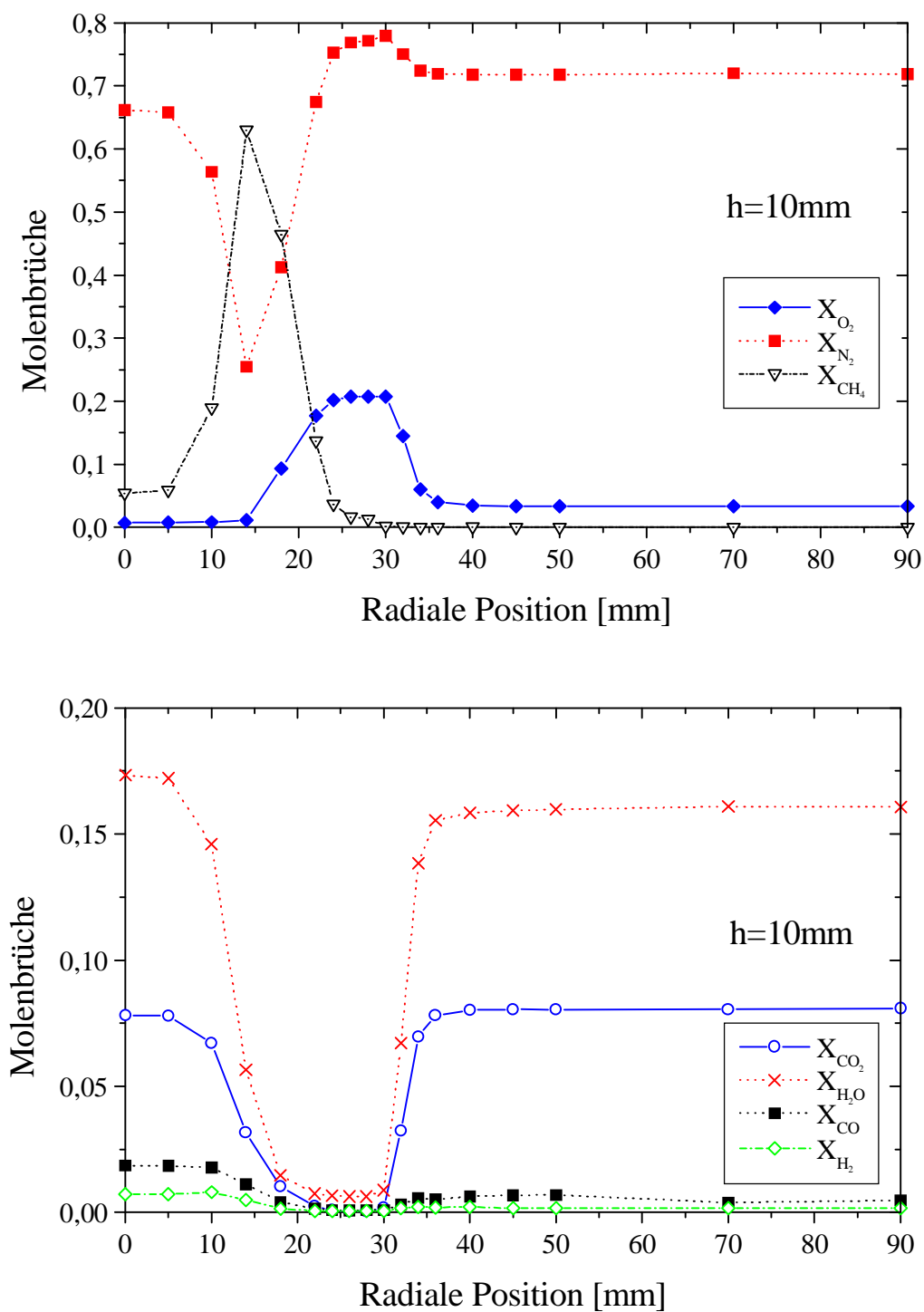


Abb. 5.3 Radiale Profile der Molenbruch-Mittelwerte der Höhe $h=10\text{mm}$: O_2 -, CH_4 - und N_2 -Molenbruch (oben) und CO_2 -, H_2O -, CO -, und H_2 -Molenbruch (unten).

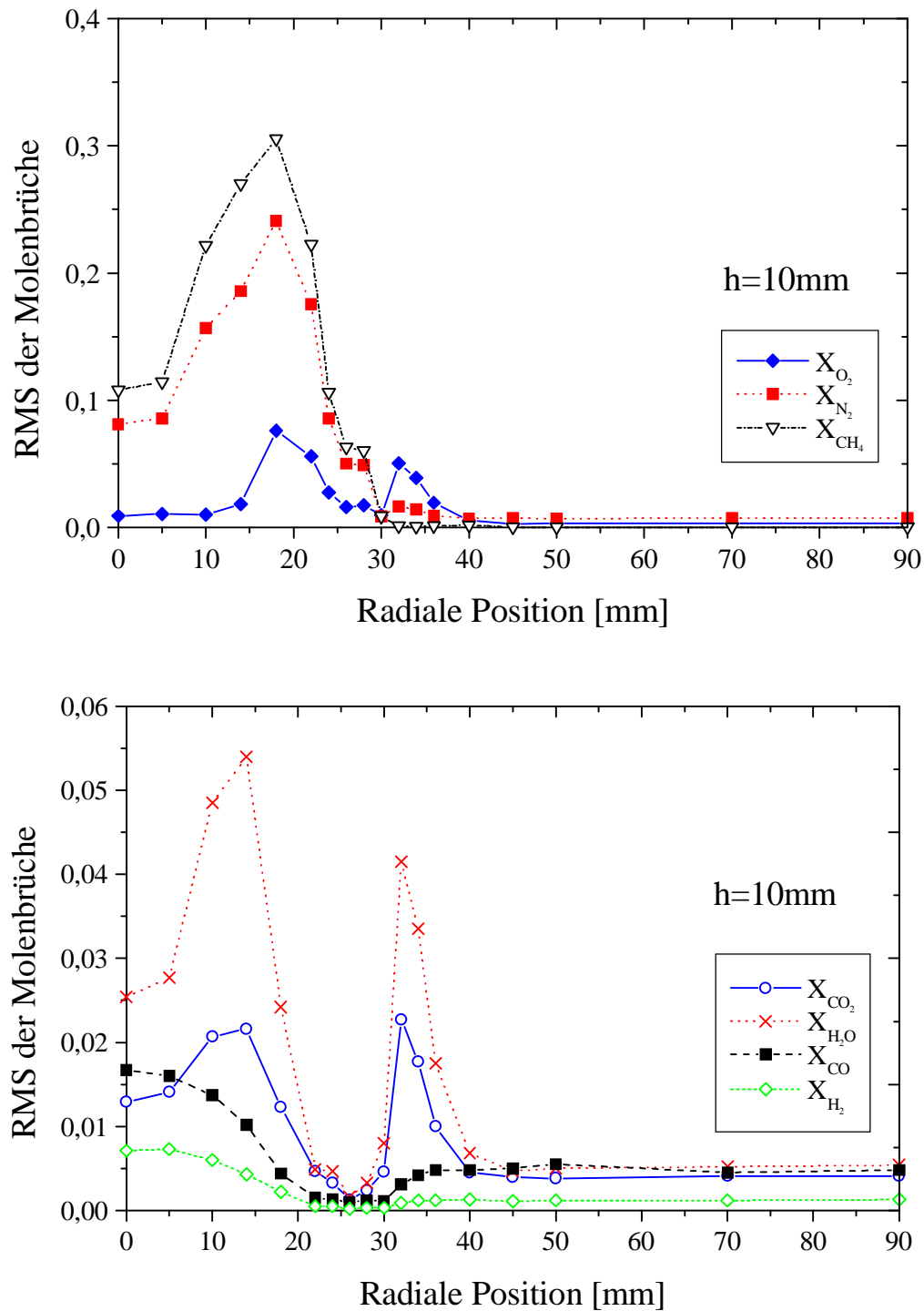


Abb. 5.4 RMS-Fluktuationen der Molenbrüche der Höhe $h=10\text{mm}$: O_2 -, CH_4 - und N_2 -Molenbruch Fluktuationen (oben) und CO_2 -, H_2O -, CO -, und H_2 -Molenbruch Fluktuationen (unten).

5.2 2D-Darstellungen der Temperatur und des Mischungsbruches

Nach der Diskussion der radialen Profile soll nun das Gesamtbild der Flamme behandelt werden. Abbildung 5.5 zeigt eine zweidimensionale Mischungsbruchverteilung und die dazugehörigen RMS-Fluktuationen der Standardflamme. Für diese Darstellung wurden die in einem Punktraster gemessenen Daten per Computerprogramm interpoliert und zweidimensional aufgetragen. Aus Symmetriegründen ist jeweils nur eine Hälfte der Flamme abgebildet. Zur Verdeutlichung von Details und Hervorhebung von Gebieten mit nahstöchiometrischen Gemischen wurde der Mittelwert des Mischungsbruches dabei als Differenz zum stöchiometrischen Mischungsbruch $f-f_{\text{stöch}}$ ($f_{\text{stöch}}=0,055$) dargestellt.

Die gepunktete Linie lokalisiert den Bereich stöchiometrischer Mischung und trennt somit brennstoffreiche Mischungen im Innern der Flamme von dem brennstoffarmen Bereich im Außenteil. Sie verläuft im unteren Teil der Flamme in der Scherschicht zwischen Erdgas und Luft und erstreckt sich bis in eine Höhe von 190mm. Auf der Achse wird sie durch die Rückströmung leicht nach unten gedrückt, sodass sie insgesamt „herzförmig“ erscheint. Deutlich zu sehen sind die Gebiete der Eindüsung von Erdgas und Luft und die Mischzonen, in denen die größten Gradienten und die höchsten Fluktuationen des Mischungsbruches auftreten. Dabei reicht der Luftstrom ($f-f_{\text{stöch}}<-0,0075$) deutlich weiter in die Flamme hinein als der Brennstoffstrom ($f-f_{\text{stöch}}>0,01$). Die Fluktuationen nehmen mit steigender Höhe schnell ab und liegen bei $h=200\text{mm}$ bereits unter 0,005 ($\pm 10\%$) des Mischungsbruchwertes. Die Reaktionszonen liegen in einem Gebiet, das sich in der Abbildung nahe der Linie der stöchiometrischen Mischungen befindet und das in die brennstoffreichen Gebiete hineinreicht (bis $r\approx 30\text{mm}$ für $h=30\text{mm}$ und $r\approx 50\text{mm}$ für $h=80\text{mm}$, siehe Kapitel 4.4). Dieses Gebiet ist ebenfalls durch hohe Fluktuationen im Mischungsbruch charakterisiert.

Die äußere Rezirkulationszone weist einen mittleren Mischungsbruch $f-f_{\text{stöch}}$ von $-0,0075$ bis $-0,005$ auf ($f-f_{\text{stöch}}=-0,008$ für Luftzahl $\lambda=1,2$). In der inneren Rezirkulationszone herrschen hingegen durchweg brennstoffreiche Gemische vor. Ab einer Höhe von 250mm liegt im gesamten Bereich ein nahezu konstanter Mischungsbruch zwischen $f=0,0475$ und $f=0,0525$ vor. Die Fluktuationen des Mischungsbruches sind in den Rezirkulationszonen mit $<0,01$ ($\pm 20\%$) in der Inneren und $<0,005$ ($\pm 10\%$) in der Äußeren und in Messhöhen $>200\text{mm}$ vergleichsweise gering.

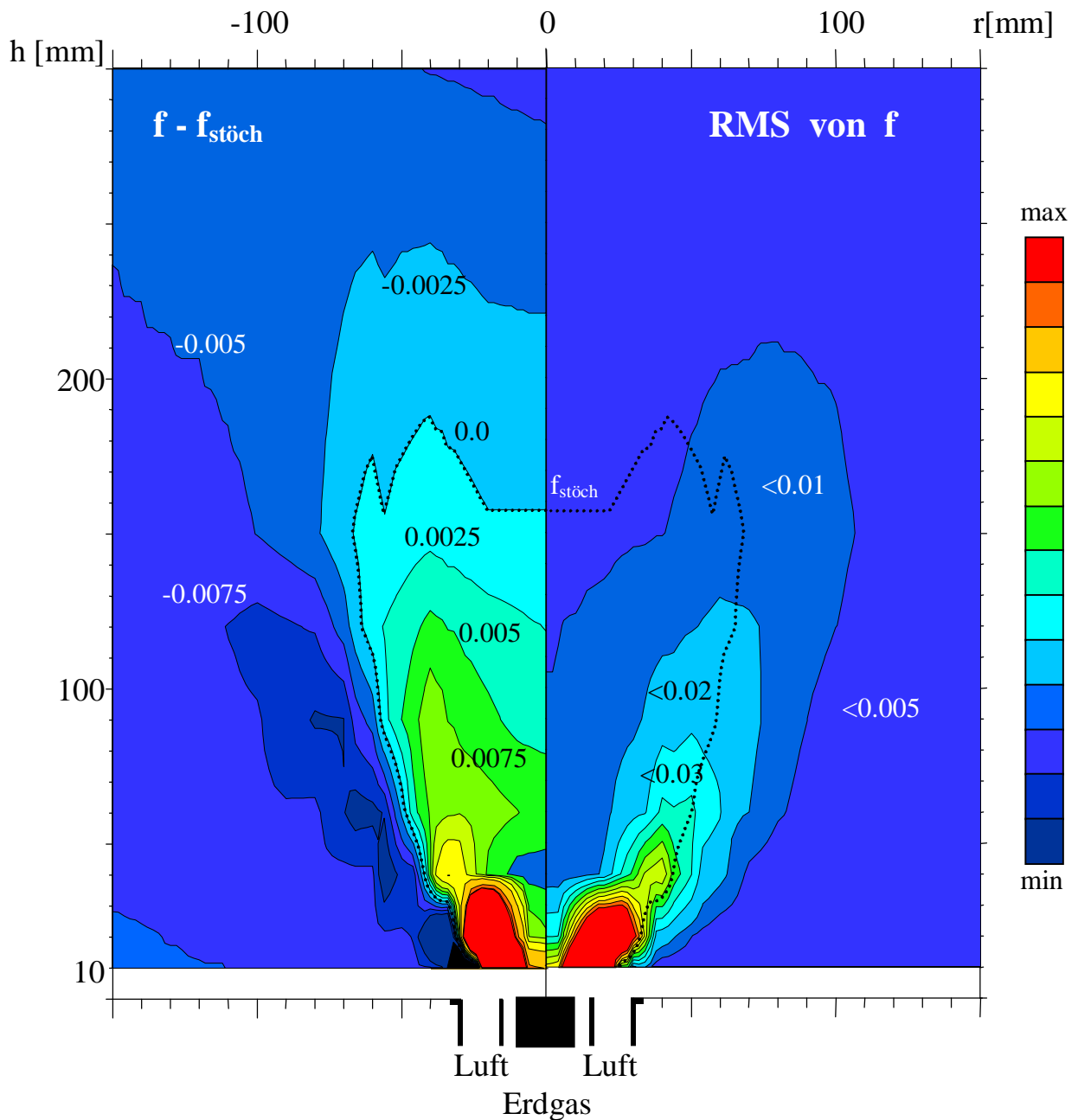


Abb. 5.5 Mischungsbruchverteilung (Ensemble-Mittelwert links und RMS-Fluktuation rechts) der Standardflamme. Aufgetragen ist die Differenz zum stöchiometrischen Mischungsbruch ($f - f_{\text{stöch}}$). Die gepunktete Linie deutet den Bereich stöchiometrischer Mischung an. Dargestellt ist ein Ausschnitt der Brennkammer bis $r=150\text{mm}$ und $h=300\text{mm}$. Die Brennkammerwand befindet sich bei $r=250\text{mm}$.

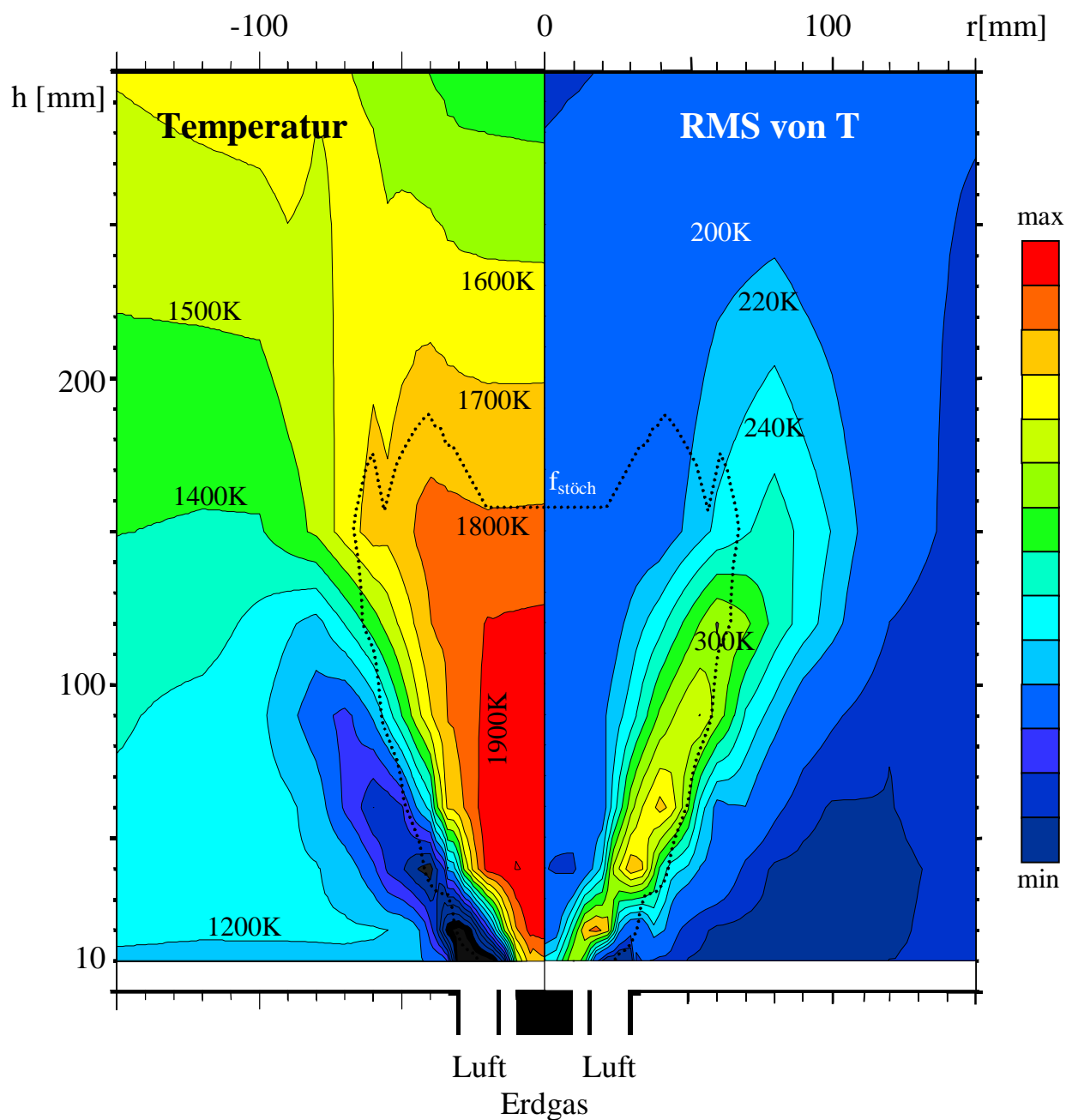


Abb. 5.6 Temperaturverteilung (Ensemble-Mittelwert links und RMS-Fluktuation rechts) der Standardflamme. Die gepunktete Linie deutet den Bereich stöchiometrischer Mischungen an. Dargestellt ist ein Ausschnitt der Brennkammer bis $r=150\text{mm}$ und $h=300\text{mm}$. Die Brennkammerwand befindet sich bei $r=250\text{mm}$.

Abbildung 5.6 stellt die Verteilung der Temperaturmittelwerte und Fluktuationen der Standardflamme zweidimensional für eine Hälfte der Flamme dar. Auch hier erkennt man die in Kapitel 4 diskutierten Strömungsgebiete: (1) die innere Rezirkulationszone mit hohen Temperaturen ($T > 1800\text{K}$), (2) die äußere Rezirkulationszone mit Temperaturen zwischen 1200K und 1500K und (3) die Mischzone mit den niedrigsten Temperaturen (300K bei $h=10\text{mm}$, $r=22-28\text{mm}$).

Die höchsten mittleren Temperaturen sind in der inneren Rezirkulationszone zu finden, wo sie ein geschlossenes Gebiet um die Flammenachse herum bilden. Die Temperaturen liegen dort mit $T=1900-2000\text{K}$ nur wenig unterhalb der maximalen adiabatischen Flammentemperatur von ca. 2230K (für CH_4/Luft -Flammen bei $\lambda=0,96$) und fluktuieren nur gering (im Mittel 200K). Aus dem hohen Temperaturniveau lässt sich schließen, dass heißes Abgas durch die Rückströmung schnell in dieses Gebiet gelangt und nur wenig thermische Energie durch Wärmestrahlung oder Wandkontakt verliert. Das Gebiet der Reaktionszonen (siehe oben) liegt in der Mischzone und weist hohe Fluktuationen (bis 320K) auf. Obwohl hier fast die gesamte Wärmeenergie durch die Reaktionen freigesetzt wird, liegen die mittleren Temperaturen aufgrund dieser Fluktuationen mit $T=1000-1600\text{K}$ deutlich unter der adiabatischen Flammentemperatur. Die Einzelpulsdarstellungen (Kapitel 5.3) liefern hierzu weitere Details und werden diese Aspekte näher erläutern.

Die maximalen Temperaturfluktuationen findet man in der Scherschicht zwischen innerer Rezirkulation und dem Erdgasstrom. Hier finden sich ebenfalls die höchsten mittleren Temperaturgradienten (bis zu 50K/mm). In der äußeren Rezirkulationszone befinden sich Gemische, die durch Wärmestrahlung und Wandkontakte thermische Energie an die Brennkammerwand (bei $r=250\text{mm}$) abgegeben haben. Dabei ist die Temperatur umso niedriger, je weiter die Probe durch die äußere Rezirkulation nach unten transportiert wurde. Die Fluktuationen sind dort mit weniger als 180K in dem betrachteten Ausschnitt der Brennkammer minimal. Ebenso geringe Fluktuationen finden sich im gesamten Gebiet $h > 200\text{mm}$, da aufgrund der schnellen Mischvorgänge in diesen Höhen die Temperaturverteilung nahezu homogen ist. Die Temperatur liegt hier bei ca. 1600K .

5.3 Thermochemischer Zustand der Flamme

Nachdem das globale Verhalten der Flammen dargestellt und diskutiert worden ist, soll in diesem Abschnitt der thermochemische Zustand der reagierenden Gase näher betrachtet werden. Durch die simultane Bestimmung der Hauptspezieskonzentrationen, des Mischungsbruches und der Temperatur liefert die Raman-Messtechnik Informationen über den Grad der Mischung und den Reaktionsfortschritt. Der Mischprozess und die Interaktion zwischen turbulentem Strömungsfeld und chemischer Reaktion bestimmen in weiten Teilen die Verbrennungsprozesse der Drallflamme. Ohne tiefere Einblicke in dieses komplexe Wechselspiel ist das Gesamtverhalten der Flamme nicht verständlich.

Für den Verbrennungsablauf ist der Startbereich der Flamme von besonderem Interesse, da er die gesamte Flammenstruktur beeinflusst. Deshalb werden zunächst die Einzelpuls-Ergebnisse der Messhöhe $h=10\text{mm}$ dargestellt und ausführlich diskutiert. Danach folgen exemplarisch die Darstellungen der Temperatur aus Messungen in unterschiedlichen Höhen, um den Verlauf der Mischungen und Reaktionen zu verfolgen und zu analysieren.

Die Abbildungen 5.7 bis 5.12 zeigen die Korrelationen (Scatterplots) zwischen dem Mischungsbruch und der Temperatur bzw. den Molenbrüchen der einzelnen Spezies. Jedes Symbol stellt das Ergebnis einer Raman-Einzelpuls-Messung dar. Die Messungen wurden an unterschiedlichen radialen Positionen durchgeführt und werden durch die Verwendung unterschiedlicher Symbole in 4 Gruppen eingeteilt:

- (1) O symbolisiert Messungen aus der inneren Rezirkulationszone ($r=0-10\text{mm}$),
- (2) X symbolisiert Messungen aus einem Gebiet nahe der Erdgaseindüsung ($r=14-22\text{mm}$),
- (3) \triangle symbolisiert Messungen aus einem Gebiet nahe der Lufteindüsung ($r=22-36\text{mm}$) und
- (4) \blacklozenge symbolisiert Messungen aus der äußeren Rezirkulationszone ($r=40-150\text{mm}$).

Zusätzlich zu den Einzelpulsen sind verschiedene Kurven eingezeichnet, die helfen sollen, den thermochemischen Zustand der Flamme zu beschreiben und zu quantifizieren. Die Kurven zeigen Ergebnisse aus Rechnungen, die von Chen [Chen00, Miller84] für laminare Gegenstromdiffusionsflammen mit zwei unterschiedlichen Streckungsparametern (nahe dem Gleichgewicht mit $a=1\text{s}^{-1}$ und nahe der Flammenlöschung mit $a=400\text{s}^{-1}$) durchgeführt wurden, einer adiabatischen Gleichgewichtsrechnung (mittels Computerprogramm NASA [Gordon71]) und einer Rechnung für reine Mischung ohne jegliche chemische Reaktion. Die Rechnungen beinhalten nicht den Transport durch das turbulente Strömungsfeld in der untersuchten Drallflamme und dienen lediglich der Beurteilung des thermochemischen Zustandes der Flamme. Durch die Auftragung der Messgrößen in Mischungsbruch-Koordinaten können die Temperatur und Gaszusammensetzung unabhängig von den Transportprozessen betrachtet werden.

Da der in der adiabatischen Gleichgewichtsrechnung berücksichtigte thermische Zerfall von CH_4 weitaus mehr Zeit benötigt als den reagierenden Gasen in einer turbulenten Flamme typischerweise zur Verfügung steht, sollte diese Rechnung nur für Vergleiche mit Messungen mit einem Mischungsbruch $f < 0,08$ herangezogen werden. Ebenfalls zu beachten ist, dass für die Rechnungen mit Ausnahme der reinen Mischung reines CH_4 als Brennstoff und trockene Luft als Oxidator benutzt wurden und es daher gerade in sehr extremen Mischungsbruchbereichen zu kleinen Abweichungen von den gemessenen Ergebnissen kommt. Die Rechnungen für die Gegenstromdiffusionsflammen wurden mit einer Lewis-Zahl $Le=1$ durchgeführt, da Effekte aufgrund bevorzugter Diffusion in den untersuchten Drallflammen nicht festgestellt wurden.

Bevor der thermochemische Zustand der Gasgemische diskutiert werden soll, sind an dieser Stelle zwei weitere Anmerkungen zu machen. (1) Bei der vorangegangenen Diskussion ist zu beachten, dass Ungenauigkeiten in der experimentellen Bestimmung des Mischungsbruches die Scatterplots beeinflussen. So sind, wie bereits angesprochen, die Mischungsbrüche aufgrund des höheren CO_2 -Gehaltes im Erdgas möglicherweise um 2% zu klein. Messunsicherheiten bei der Bestimmung der Spezieskonzentrationen können zu einem weiteren systematischen Fehler des Mischungsbruches von 2-3% beitragen. (2) Es ist fraglich, ob die Rechnungen für die Gegenstromdiffusionsflammen den thermochemischen Zustand turbulenter Flammen korrekt widerspiegeln. Untersuchungen an unterschiedlichen turbulenten Diffusionsflammen haben gezeigt, dass selbst Rechnungen mit detaillierten Reaktionsmechanismen, insbesondere bei brennstoffreichen Gemischen, von Messresultaten erheblich abweichen [z.B. Barlow00]. Des Weiteren ist bei der Interpretation die „Vorgeschichte“ der Gaszusammensetzung von Bedeutung, insbesondere die chemischen Prozesse im Randbereich der inneren Rezirkulationszone. Die in dieser Arbeit gegebenen Erläuterungen des Flammenverhaltens sind deshalb nur als Ansatz für die Interpretationen zu verstehen. Sie zeigen einen Trend auf und erheben nicht den Anspruch einer vollständigen, quantitativen Analyse des thermochemischen Zustandes.

Es wird zunächst die Korrelation zwischen Temperatur und Mischungsbruch vorgestellt (Abb. 5.7) und gemäß der verschiedenen Zonen der Flamme erläutert. Allgemein betrachtet zeigt die Abbildung eine bimodale Temperaturverteilung, die sich über einen großen Mischungsbruchbereich von 0,0 bis 0,93 erstreckt. Man erkennt deutlich einen „heißen“ und einen „kalten“ Zweig in der Temperaturverteilung. Messungen nahe der Flammenachse bei $r=0-10\text{mm}$ (Symbol O in der Abbildung) stammen größtenteils aus der inneren Rezirkulationszone. Diese Messungen zeigen analog zu den Strukturanalysen aus Kapitel 4 hauptsächlich nah-stöchiometrische ($f_{\text{stoch}}=0,055$) und leicht brennstoffreiche Gemische, deren Temperaturen nahe bei den Werten liegen, wie sie für das adiabate Gleichgewicht und für die Gegenstromdiffusionsflamme mit $a=1\text{s}^{-1}$ und $a=400\text{s}^{-1}$ berechnet wurden. Dieses Gebiet zeichnet sich überwiegend durch ausreagierte Gase aus, die nur wenig Wärmeenergie abgegeben haben.

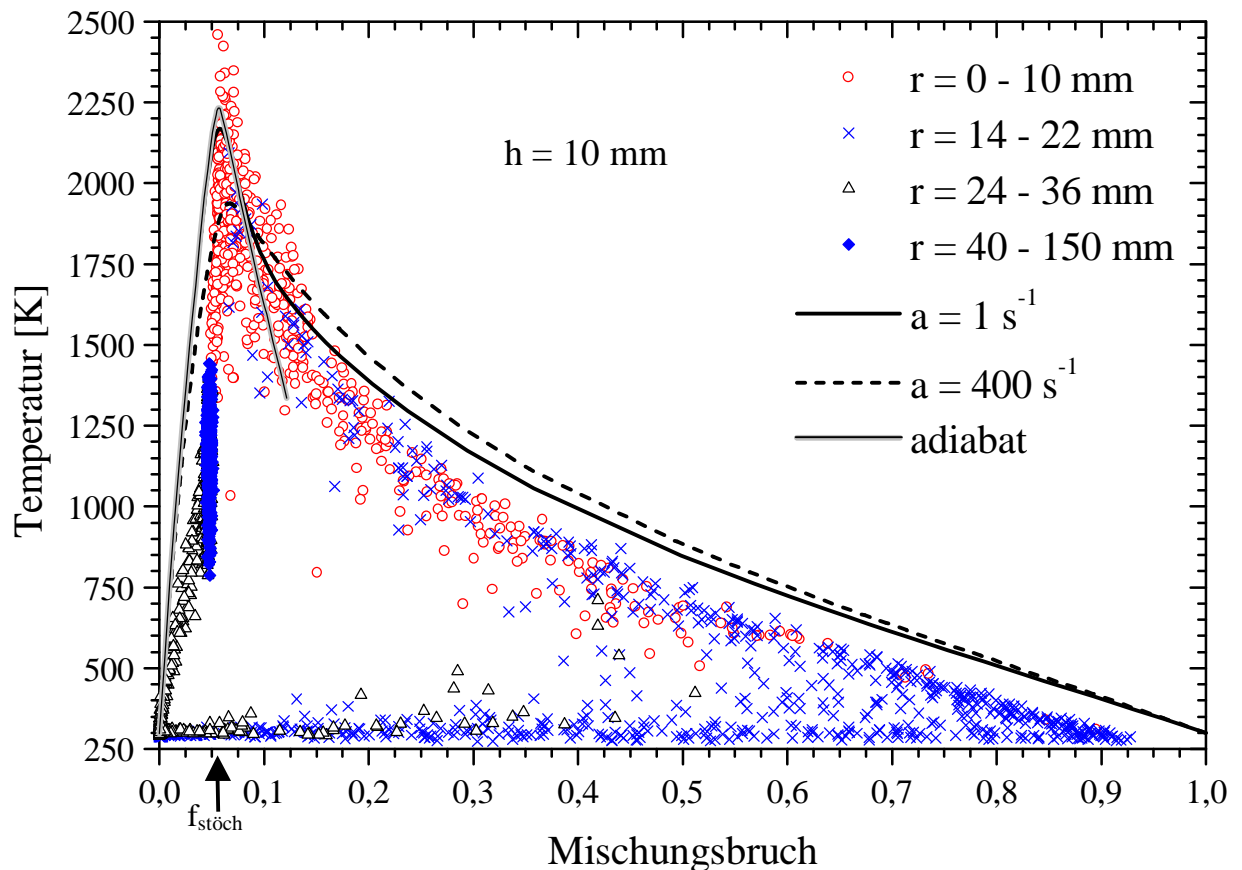


Abb. 5.7 Korrelationen zwischen Mischungsbruch und Temperatur bei $h=10\text{mm}$. Die Symbole repräsentieren Einzelpulsmessungen aus unterschiedlichen Regionen der Flamme.

Verschiebt man die Position des Messortes innerhalb der Flamme nach außen, so gelangt man in Gebiete, die hauptsächlich durch die Erdgaseindüsung geprägt werden ($r=14\text{-}24\text{mm}$, Symbol X). Hier bestimmen Mischungen aus heißem Abgas der inneren Rezirkulationszone mit kaltem Erdgas die Temperatur- und Mischungsbruchverteilung. Mit wachsendem Erdgasanteil im Messvolumen steigt der Mischungsbruch und sinkt die Temperatur, die für $f > 0,15$ rund 150K unterhalb der berechneten Vergleichskurve mit $a=1\text{s}^{-1}$ und rund 200K unterhalb der Kurve mit $a=400\text{s}^{-1}$ liegt.

Die Messwerte erreichen einen Mischungsbruch von maximal $f=0,93$, was einem Erdgasanteil von 96% entspricht. Für größere radiale Positionen folgen die Messwerte dem „kalten“ Zweig der bimodalen Verteilung; die Abnahme des Mischungsbruches spiegelt dabei den steigenden Einfluss der Luft im Messvolumen wider. Diese Gasgemische aus Erdgas und Luft weisen alle eine Temperatur von 300K auf und haben noch nicht reagiert. Selbst nahe des stöchiometrischen Mischungsbruches ist keine chemische Reaktion zwischen Erdgas und Luft in dieser Region der Flamme zu erkennen (in Übereinstimmung mit den Flammenemissions-Untersuchungen). Die zündfähigen Mischungen werden in dieser Höhe noch durch den kalten Erdgasstrom von den zur Zündung benötigten heißen, radikalhaltigen Abgasen der inneren Rezirkulationszone abgeschirmt.

Ab $r \approx 26\text{mm}$ (Symbol Δ) überwiegen brennstoffarme Mischungen aus Erdgas und Luft, und der Mischungsbruch fällt direkt über der Lufteindüsung auf 0,0. Weiter außen, in der Scherschicht zwischen Luft und Abgas der äußeren Rezirkulationszone, steigen die Temperaturen wieder an. Je größer der Abgasanteil im Messvolumen, desto höher ist die Temperatur und desto näher liegt der Mischungsbruch bei 0,047. Dieser Mischungsbruch entspricht der global eingestellten Luftzahl von $\lambda=1,2$. Die Temperaturen liegen unterhalb von den berechneten Kurven, was darauf hindeutet, dass sich das Abgas in der äußeren Rezirkulationszone aufgrund der langen Aufenthaltsdauer zwar im chemischen Gleichgewicht befindet, die Temperaturen aber durch Wärmeverluste wie Strahlung und Wandkontakt abgesenkt sind.

Für $r \geq 40\text{mm}$ (Symbol \blacklozenge) liegen die Messpositionen in der äußeren Rezirkulationszone, der Mischungsbruch beträgt dort ohne größere Variationen 0,047 und die gemessenen Temperaturen liegen zwischen 800K und 1500K. Auch hier liegt ausreagiertes Abgas vor, dessen Temperatur durch Wärmeverluste gesunken ist. Der Grad der Abkühlung spiegelt dabei die Dauer der Wärmeabstrahlung und des Wandkontaktes wider.

Für eine genauere Charakterisierung des thermochemischen Zustandes werden die Scatterplots der Temperatur und der Molenbrüche X_i im Zusammenhang betrachtet. Erst das Zusammenspiel der einzelnen Messgrößen kann Aufschluss über den Einfluss des turbulenten Strömungsfeldes auf die Chemie geben. Im Folgenden sind die Abbildungen der Korrelationen zwischen Mischungsbruch und den einzelnen Spezies dargestellt. Die Interpretationen des thermochemischen Zustandes erfolgen getrennt für die Hauptzonen der Flamme.

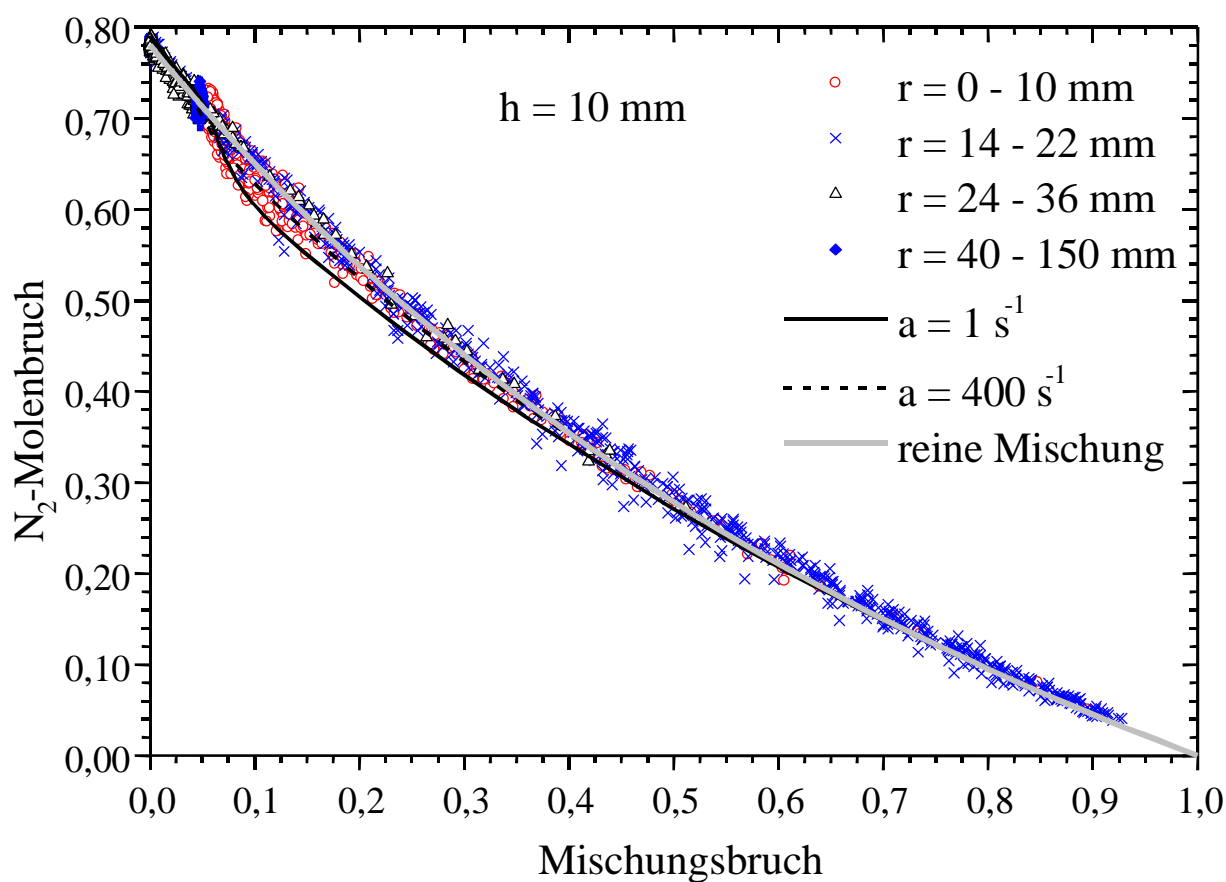


Abb. 5.8 Korrelationen zwischen Mischungsbruch und N_2 -Molenbruch bei $h=10$ mm. Da sich die N_2 -Konzentrationen durch die chemischen Prozesse der Verbrennung nur gering ändern, liegen die Vergleichskurven eng beieinander.

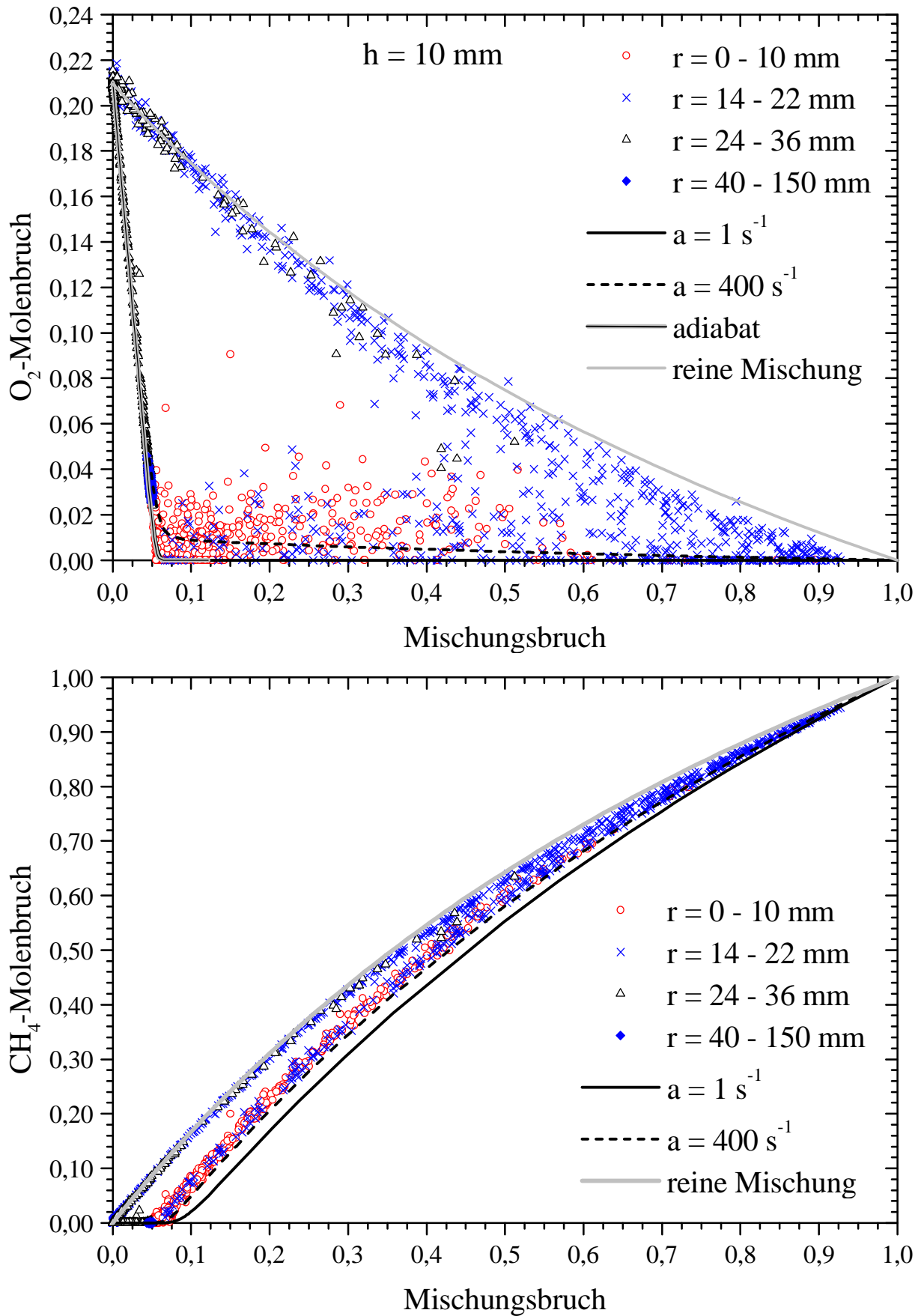


Abb. 5.9 Korrelationen zwischen Mischungsbruch und O_2 -Molenbruch (oben) bzw. Mischungsbruch und CH_4 -Molenbruch (unten) bei $h=10$ mm.

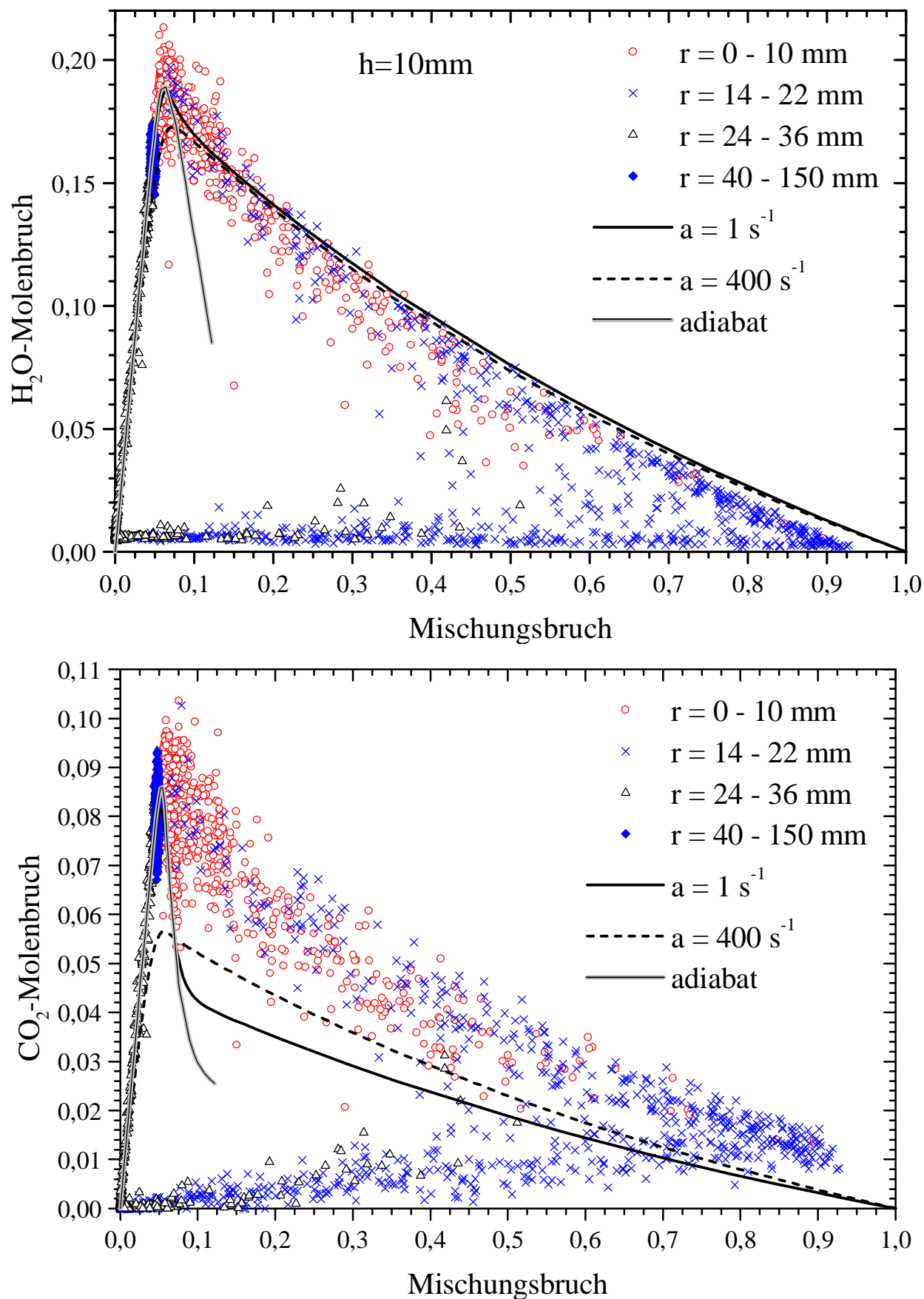


Abb. 5.10 Korrelationen zwischen Mischungsbruch und H₂O-Molenbruch (oben) bzw. Mischungsbruch und CO₂-Molenbruch (unten) bei h=10mm.

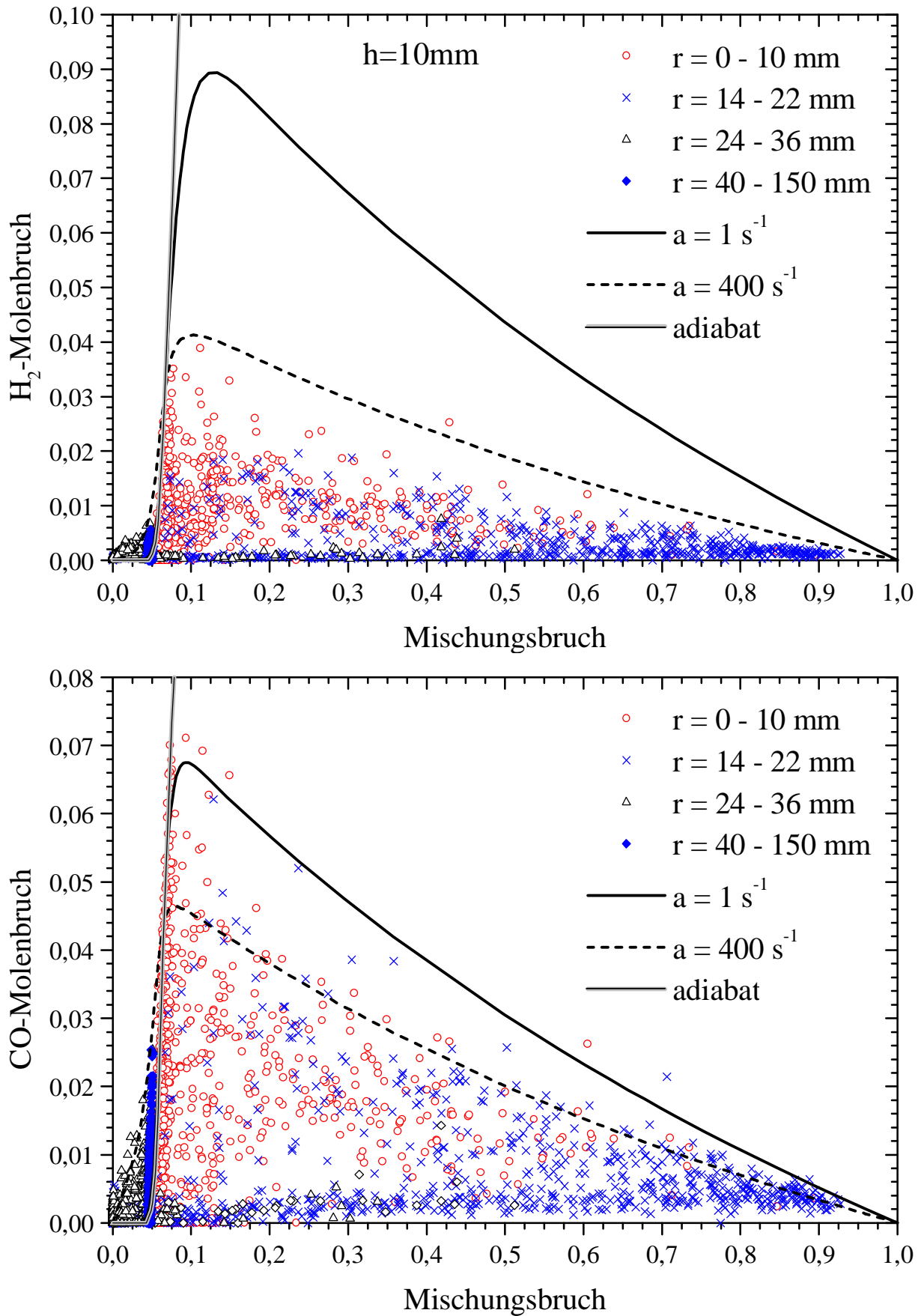


Abb. 5.11 Korrelationen zwischen Mischungsbruch und H_2 -Molenbruch (oben) bzw. Mischungsbruch und CO-Molenbruch (unten) bei $h=10\text{mm}$.

Der thermochemische Zustand von Gasgemischen in der äußeren Rezirkulationszone

In der äußeren Rezirkulationszone ($r=40-150\text{mm}$, Symbol \blacklozenge) sind die Temperaturen bei $h=10\text{mm}$ gegenüber dem adiabatischen Gleichgewicht aufgrund von Wärmeverlusten um 600K bis 1200K herabgesetzt. Der Mischungsbruch ist nahezu konstant und liegt zwischen $0,045$ und $0,052$ ($0,047$ entspricht $\lambda=1,2$). Der N_2 -Molenbruch in Abbildung 5.8 zeigt, wie im gesamten Mischungsbruchbereich, eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Kurven. Stickstoff ist an den Hauptreaktionen der Verbrennung nicht beteiligt, sodass hier selbst die Rechnungen für die Gegenstromdiffusionsflamme und für die reine Mischung relativ eng beieinander liegen. Der N_2 -Molenbruch lässt in dieser Flamme keine Rückschlüsse auf den thermochemischen Zustand der Flammen zu und wird im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

Die O_2 -Konzentrationen folgen gut dem Verlauf des adiabatischen Gleichgewichtes und liegen mit ca. $2-5\%$ in der Nähe der Konzentration für die globale Luftzahl $\lambda=1,2$ von $3,2\%$ (Abb. 5.9 oben). Methan ist in diesem Gebiet der Flamme nicht zu finden, die CH_4 -Konzentrationen liegen bei 0% . Die Molenbruchverteilungen für die Reaktionsprodukte H_2O und CO_2 (Abb. 5.10) zeigen eine gute Übereinstimmung mit der eingezeichneten Kurve für das adiabatische Gleichgewicht, während die Rechnungen für gestreckte laminare Flammen, insbesondere für hohe Streckungsraten, beim CO_2 im Vergleich zu den Messergebnissen zu geringe Molenbrüche ergeben. Die H_2 -Molenbrüche liegen bei $0,0 < X_{\text{H}_2} < 0,006$ und sind im Rahmen der Messgenauigkeit praktisch Null (Abb. 5.11 oben). Die CO -Molenbrüche variieren zwischen $0,0$ und $0,025$ (Abb. 5.11 unten). Hier ist zu beachten, dass der Messfehler relativ hoch ist (vereinzelt über 50%) und zum erheblichen Teil für die beobachtete Streuung verantwortlich ist. Im Mittel beträgt der CO -Molenbruch nur $0,005$ und ist somit nahe an der Nachweisgrenze.

Insgesamt sind in dieser Region der Flamme die Fluktuationen der Molenbrüche gering. Die Messungen zeigen, dass es sich hier um Mischungen von ausreagiertem Abgas und Luft handelt, die sich nahezu im chemischen Gleichgewicht befinden. Die Gase in der äußeren Rezirkulationszone hatten also genügend Zeit, um Fluktuationen in der Zusammensetzung auszugleichen, das chemische Gleichgewicht zu erreichen und einen beträchtlichen Teil ihrer Energie durch Wärmestrahlung oder aufgrund von Wandkontakt abzugeben.

Der thermochemische Zustand von Gasgemischen in Gebieten nahe der Lufteindüsung

Das Gebiet, das durch die Lufteindüsung beeinflusst wird ($r=26-36\text{mm}$, Symbol Δ), kann in zwei Bereiche eingeteilt werden. Von außen kommend gelangt man zuerst in ein Gebiet, in dem Mischungen aus heißem Abgas der äußeren Rezirkulationszone und kalter Luft vorliegen. Der Mischungsbruch liegt hier zwischen 0,0 und 0,04 und die Temperaturen zwischen 300K und ca. 1200K. Sie liegen unter den berechneten Temperaturen für die Gegenstromdiffusionsflammen, da das Abgas aus der äußeren Rezirkulation bereits Wärmeenergie abgegeben hat. Einzelpulsmessungen mit einem Mischungsbruch von $f=0,0$ ergeben Zusammensetzungen der Proben, die der reinen Luft entsprechen (mit einem Wasseranteil von ca. 0,8%). Die gemessenen Restkonzentrationen der Zwischenprodukte H_2 und CO sind im Wesentlichen auf die Ungenauigkeiten der Messung niederkonzentrierter Spezies zurückzuführen. Verschiebt man den Messort weiter zur Brennerachse, so gelangt man in die Scherschicht zwischen den eingedüsten, kalten Frischgasen. Die Molenbrüche der Edukte O_2 und CH_4 stimmen mit den berechneten Werten für die reine Mischung überein. H_2O zeigt in diesem Bereich einen Molenbruch, der der Luftfeuchtigkeit der Raumluft entspricht, und auch der CO_2 -Molenbruch liegt nahe 0,0. Die Molenbrüche zeigen in Übereinstimmung mit den Temperaturwerten, dass in diesem Bereich der Flamme selbst bei einem stöchiometrischen Mischungsbruch keine chemische Reaktion stattfindet.

Der thermochemische Zustand von Gasgemischen in Gebieten nahe der Brennstoffeindüsung

Die Gebiete der Luft- und Brennstoffeindüsung sind aufgrund der turbulenten Fluktuationen nicht eindeutig voneinander abzugrenzen, jedoch zeigen die Molenbrüche im Bereich $r=14-22\text{mm}$ (Symbol X) überwiegend Mischungen, die durch die Brennstoffeindüsung bestimmt werden. Der Mischungsbruchbereich erreicht in dieser Region direkt über der Erdgaseindüsung Werte von $f>0,9$. Betrachtet man zunächst nur den „kalten“, nicht-reagierten Zweig der Verteilungen (Mischungen aus der Scherschicht der Frischgase), stellt man für die Molenbrüche der meisten Spezies eine gute Übereinstimmung mit dem zu erwartenden Ergebnis fest: die Edukte CH_4 und O_2 folgen nahezu den berechneten Werten der reinen Mischung (O_2 liegt für $f>0,25$ leicht unterhalb den berechneten Werten), H_2 und CO sind im Rahmen der Messgenauigkeit nicht vorhanden, und der H_2O -Molenbruch entspricht der Luftfeuchtigkeit. Auffallend sind die relativ hohen CO_2 -Molenbrüche. Laut Analyse der Stadtwerke sollte der CO_2 -Gehalt im Erdgas ca. 0,2% betragen ($X_{\text{CO}_2}=0,002$), die Raman-Messungen ergeben hier jedoch 1% ($X_{\text{CO}_2}=0,01$). Dieser Wert wurde auch in separaten Messungen in einer reinen Erdgas-Strömung bestätigt.

Es konnte nicht eindeutig geklärt werden, ob das für den Betrieb des Drallbrenners benutzte Erdgas sich von dem unterscheidet, an dem die Analysen der Stadtwerke durchgeführt wurden, oder wie die um einen Faktor 5 höhere CO_2 -Konzentration zu erklären seien. Aufgrund des geringen Einflusses auf das Gesamtverhalten der Flamme ist die Diskrepanz jedoch nur von untergeordneter Bedeutung. Es soll jedoch erwähnt werden, dass für die Berechnung des Mischungsbruches die Angaben zur Erdgaszusammensetzung der Stadtwerke benutzt worden ist. Mit dem aus den Raman-Messungen bestimmten CO_2 -Gehalt verschiebt sich der Mischungsbruch um ca. 2% zur Brennstoffseite, sodass das Maximum der Mischungsbruch-Verteilung dann bei $f=0,95$ liegen würde. Unter Berücksichtigung dieses Aspektes entsprechen auch die CO_2 -Molenbrüche dem zu erwartenden Verlauf.

Der „heiße“, reagierte Zweig der Verteilung zeigt in diesem Gebiet ein recht komplexes Verhalten, das zum größten Teil durch die Zeitskalen der Turbulenz und den verschiedenen chemischen Prozesse beeinflusst wird. Es handelt sich hier um Mischungen aus Erdgas und heißem Abgas aus der inneren Rezirkulationszone, deren Einzelpulsergebnisse (Symbol X) sich teilweise mit den Ergebnissen von $r=0-10\text{mm}$ (Symbol O) überlagern. Es fällt auf, dass viele Proben (Einzelpuls-Messresultate) einen signifikanten O_2 -Gehalt aufweisen (bis $X_{\text{O}_2}=0,04$). Da der Erdgasstrom im unteren Bereich der Flamme den Luftstrom von der inneren Rezirkulationszone abschirmt, muss der Sauerstoff über die Rezirkulation in den achsennahen Bereich gelangen. So widerlegen auch die hohen Temperaturen in der inneren Rezirkulationszone das direkte Eindringen kalter Luftballen in die innere Rezirkulationszone. Der Sauerstoff stammt vielmehr aus brennstoffarmen Verbrennungen oder Abgas/Luft-Gemischen, d.h. es wird O_2 -haltiges Abgas von außen in die innere Rezirkulationszone transportiert. Da in vielen Proben auch CH_4 vorhanden ist, liegt eine bei erster Betrachtung widersprüchliche Koexistenz von (nicht-reagiertem) Methan und Sauerstoff bei hohen Temperaturen vor. Hierfür können im Wesentlichen zwei Effekte verantwortlich sein:

(1) Die verdrallte turbulente Strömung bewirkt eine schnelle Vermischung im Bereich des Brennermundes. Bei Strömungsgeschwindigkeiten von typischerweise 10m/s im unteren Bereich der Flamme liegt das Strömungszeitmaß bei $h=10\text{mm}$ in der Größenordnung von 1ms (mit großen Fluktuationen aufgrund des statistischen Charakters des Strömungsfeldes). Das Zeitmaß für die chemischen Reaktionen hängt stark von der Temperatur ab (für Elementarreaktionen wie der Ketteneinleitung der Verbrennung exponentiell, Arrheniusgesetz) und erstreckt sich typischerweise im Bereich von einigen μs bis zu einigen 100ms . So beträgt die Zündverzugszeit z.B. für Gemische aus Methan, Luft und für ein der Drallflamme typisches Abgas bei 1500K mehrere Millisekunden ([Braun00], siehe Anhang) und wird für tiefere Temperaturen länger [Warnatz93]. Durch die vergleichbaren Zeitskalen der turbulenten Mischung und der chemischen Prozesse in diesem Bereich der Flamme wird der thermochemische Zustand stark durch die Chemie-Turbulenz-Wechselwirkung beeinflusst und die relativ hohen Zündverzugszeiten können die Koexistenz von CH_4 und O_2 ermöglichen.

(2) Andererseits könnte die begrenzte räumliche Auflösung ($0,6 \times 0,6 \times 0,6$)mm³ der Messungen Mittelungseffekte über angrenzende Gaspakete im Messvolumen verursachen. Einzelpulsaufnahmen der durchgeführten OH-PLIF-Untersuchungen zeigen, dass selbst innerhalb des kleinen Messvolumens der Raman-Messungen hohe Gradienten in der OH-Fluoreszenz auftreten. Somit können auch leicht unterschiedliche Gasgemische (mit z.B. CH₄- oder O₂-Anteilen) eng nebeneinander liegen und gemeinsam detektiert werden. In diesem Fall würde eine Durchmischung auf molekularer Basis, und damit chemische Reaktionsfähigkeit, lediglich in dem Grenzgebiet der beiden Mischungen zu finden sein.

Es erscheint plausibel, dass beide Effekte eine Rolle bei der Koexistenz von Methan und Sauerstoff spielen. Die im Vergleich zur Rechnung ($a=1s^{-1}$) höheren Konzentrationen von CH₄ (Abb. 5.9 unten) sind ebenfalls in qualitativer Übereinstimmung mit dieser Interpretation, und auch die Temperaturabsenkung (Abb. 5.7) kann damit zumindest teilweise begründet werden. Allerdings ergeben sich für den CO₂-Molenbruch deutlich höhere Werte als für $a=1s^{-1}$ zu erwarten sind. Zum einen Teil liegt das an dem CO₂-Anteil im Erdgas, zum anderen an den relativ hohen CO₂-Konzentrationen in der inneren Rezirkulationszone, aus der das hier beschriebene CO₂ stammt (siehe Abschnitt über den thermochemischen Zustand von Gasgemischen in der inneren Rezirkulationszone).

Die gemessenen Molenbrüche der Zwischenprodukte H₂ und CO liegen größtenteils unterhalb der berechneten Kurven und weisen eine große Streuung auf, die nicht allein durch Messungenauigkeiten begründet werden kann. Vielmehr überträgt sich die große Schwankung der Konzentrationen von H₂ und CO in der inneren Rezirkulationszone durch Mischung des Abgases mit Erdgas auf den Bereich nahe der Brennstoffeindüsung. Die Konzentrationen von H₂ und CO werden je nach Grad der Verdünnung des Abgases herabgesenkt. Die chemischen Reaktionen können in diesem Bereich der Flamme durch die mit der Mischung verbundene Temperaturabsenkung nur sehr langsam ablaufen.

Der thermochemische Zustand von Gasgemischen in der inneren Rezirkulationszone

Die Einzelpulsmessungen für $r=0-10$ mm (O-Symbol) zeigen Ergebnisse, die größtenteils durch die heißen Abgase der inneren Rezirkulationszone dominiert werden. Direkt in der inneren Rezirkulationszone, im achsennahen Bereich der Flamme ($r=0-5$ mm), befinden sich nah-stöchiometrische bis leicht brennstoffreiche Gemische mit $0,05 < f < 0,075$. Diese Proben enthalten wenig Methan (bis $X_{CH_4}=0,015$) und wenig Sauerstoff ($0,0 < X_{O_2} < 0,02$). Die Temperaturen liegen größtenteils zwischen 1700K und 2000K und befinden sich somit etwas unterhalb des adiabatischen Gleichgewichtes und der Rechnung mit $a=1s^{-1}$ (in der Ausschnittsvergrößerung zu erkennen, Abb. 5.12). Die leichte Temperaturabsenkung gegenüber den Rechnungen ist vermutlich teilweise auf Wärmestrahlung zurückzuführen und hat damit auch eine Verringerung der Temperaturwerte der zuvor diskutierten Mischungen im Bereich der Erdgaseindüsung zu Folge.

Die H₂O-Konzentrationen befinden sich in der inneren Rezirkulationszone in guter Übereinstimmung mit den Rechnungen ($a=1s^{-1}$ und adiabatisch) und CO₂ wird bei $f=0,05$ am besten durch die Gleichgewichtsrechnung wiedergegeben. Für brennstoffreichere Gemische ($f>0,05$) folgen die Messpunkte allerdings nicht den gerechneten Werten, sondern bleiben zunächst nahezu auf dem Niveau von $X_{CO_2}=0,08$. Eine Erklärung dafür ist, dass die CO₂-Konzentrationen mit zunehmendem Einmischen des Erdgases, d.h. wachsendem f , ein reines Mischungsverhalten zeigen, ohne wesentliche Einflüsse chemischer Reaktionen. Die ansteigenden Molenbrüche der Zwischenprodukte H₂ und CO lassen sich in diesem Bereich ($0,05<f<0,075$) näherungsweise durch das adiabatische Gleichgewicht und die Rechnung mit $a=1s^{-1}$ beschreiben. H₂ und CO zeigen in den Rechnungen im Vergleich zu den anderen Spezies die größten Molenbruchgradienten im Bereich $f\approx f_{stöch}$ und kommen daher in der inneren Rezirkulationszone in sehr unterschiedlichen Konzentrationen vor. Deshalb weisen auch Mischungen aus Erdgas und Abgas aus dieser Zone unterschiedlich große Anteile dieser Spezies auf. Insgesamt entspricht also der thermochemische Zustand der Gase in der inneren Rezirkulationszone nahe der Flammenachse praktisch dem adiabatischen Gleichgewicht.

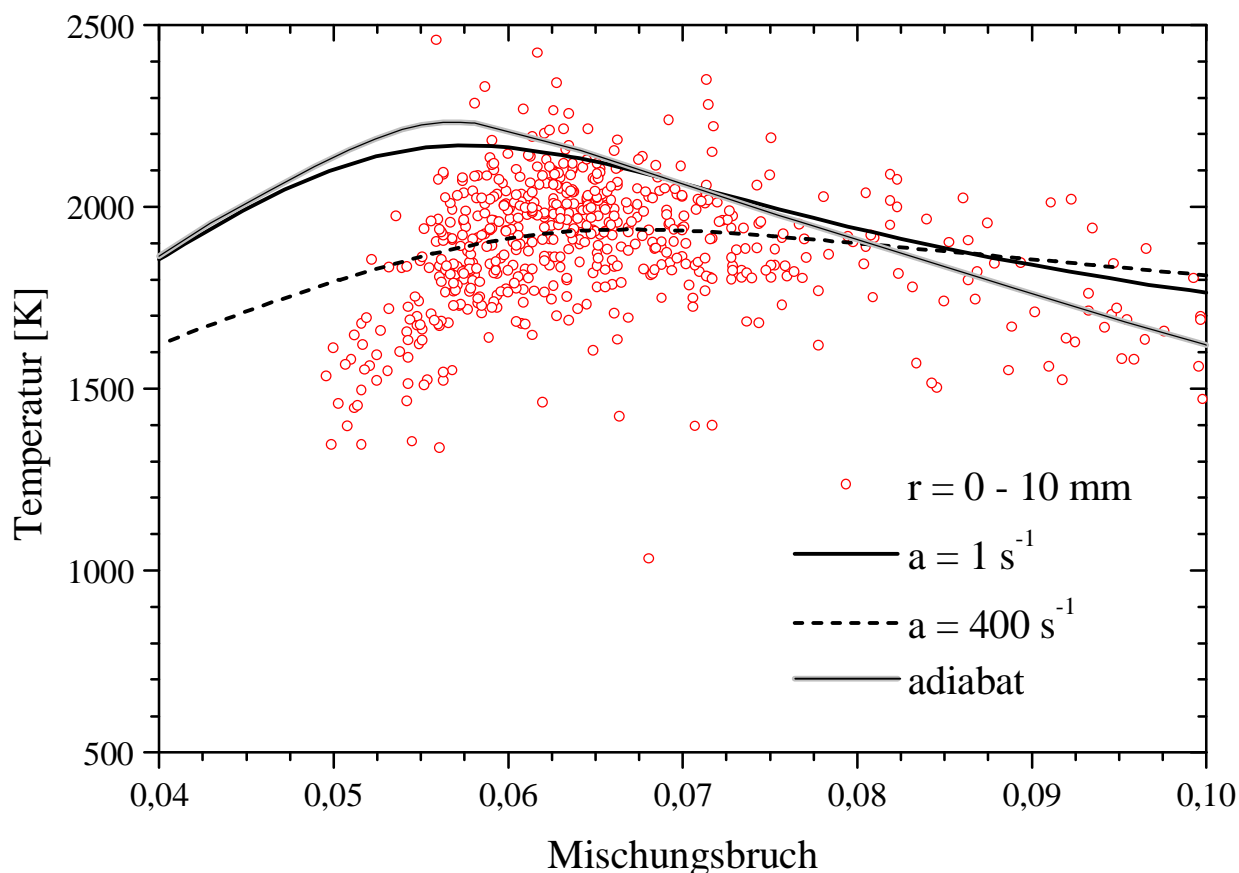


Abb. 5.12 Korrelation zwischen Mischungsbruch und Temperatur bei $h=10\text{mm}$ (Mischungsbruchbereich von $0,04 < f < 0,10$). Dargestellt sind Einzelpulsmessungen aus der inneren Rezirkulationszone.

Im Randbereich der inneren Rezirkulation ($r=10\text{mm}$) werden die Proben zunehmend durch Einmischen von CH_4 aus der Erdgasdüse beeinflusst. Im Mischungsbruchbereich $0,075 < f < 0,125$ liegen die Temperaturen zwischen 1500K und 2000K , die CH_4 -Molenbrüche bei $0,01 < X_{\text{CH}_4} < 0,1$ und die O_2 -Molenbrüche bei $0,0 < X_{\text{O}_2} < 0,025$. Sofern O_2 in der Probe zur Verfügung steht, kann es mit CH_4 ausreagieren, es sei denn, es ist noch nicht auf molekularer Ebene gemischt. Befindet sich CH_4 dagegen in einer heißen, sauerstofffreien Umgebung, kann es nicht „verbrennen“, sondern nur pyrolytisch abgebaut werden. Die Pyrolyse beschreibt die thermische Spaltung von Molekülen unter Abwesenheit von Sauerstoff und ist für Kohlenwasserstoffe ein endothermer Prozess mit stark temperaturabhängigen Reaktionszeiten. Beispielhafte Rechnungen für ein Gemisch aus 5% Erdgas und 95% Abgas ergaben für 1900K einen Methanabbau im Millisekunden-Bereich (in 1ms werden ca. 50% Methan abgebaut). Dementsprechend steigt der Molenbruch von H_2 in 1ms von $X_{\text{H}_2}=0,003$ auf $0,034$. Der Sauerstoff aus H_2O und insbesondere CO_2 wird dabei teilweise für die Oxidation der CH_4 -Spaltprodukte verbraucht, sodass der CO_2 -Molenbruch um $0,01$ auf $X_{\text{CO}_2}=0,072$ sinkt, und der CO -Gehalt von $X_{\text{CO}}=0,008$ auf $0,018$ steigt, während der H_2O -Gehalt bei $X_{\text{H}_2\text{O}}=0,175$ nahezu

konstant bleibt. Da die Zeitskalen der Pyrolyse in der gleichen Größenordnung wie die Zeitskalen des turbulenten Strömungsfeldes liegen, sind, je nach Fortschritt der Pyrolyse, große Variationen der Konzentrationen von H_2 , CO und der Temperatur zu erwarten. Die im Vergleich zu den Rechnungen größtenteils niedrigeren Messwerte von H_2 und CO um $f \approx 0,1$ und die großen Fluktuationen dieser Molenbrüche sind in qualitativer Übereinstimmung mit dieser Interpretation und spiegeln, zumindest z.T., das konkurrierende Wechselspiel zwischen den Zeitskalen für Transport und Pyrolyse wider.

Bei weiterer Einmischung von kaltem Erdgas (steigendem Mischungsbruch) sinkt die Temperatur und pyrolytische Prozesse werden verlangsamt, bis sie bei ca. $T \leq 1700K$ praktisch keine Rolle mehr spielen. Die Pyrolyse hat also nur in einem kleinen Temperatur- und Mischungsbruchfenster einen Einfluss auf den Zustand der Flamme. Durch den turbulenten Transport können teilweise pyrolysierte Gasgemische in die Scherschicht zwischen innerer Rezirkulationszone und Erdgaseinströmung gelangen. Durch die Mischung mit Erdgas übertragen sich also auch auf diesem Wege Fluktuationen der Molenbrüche von H_2 und CO auf brennstoffreichere Gebiete ($f > 0,1$), wie sie in den Messungen zu beobachten sind.

Fasst man die Messergebnisse bei $h=10mm$ zusammen, so zeigt sich, dass insbesondere die Korrelationen zwischen Temperaturen, Molen- und Mischungsbrüchen einen aufschlussreichen Einblick in den thermochemischen Zustand der untersuchten Flamme gewähren. Die verschiedenen Flammenzonen sind dabei durch stark unterschiedliche chemische und thermische Prozesse geprägt und zeigen daher auch unterschiedliche thermochemische Zustände: (1) In den Rezirkulationszonen liegt annähernd chemisches Gleichgewicht vor, wobei in der äußeren Rezirkulationszone die Temperatur durch Wärmeverluste stark herabgesetzt ist. (2) In den Gebieten hoher Strömungsgeschwindigkeiten und starker Gradienten ist das Verhalten der Flamme besonders durch die Mischvorgänge geprägt, und es zeigen sich deutliche Effekte der Chemie-Turbulenz-Wechselwirkung, wie Zündverzug und ein unterschiedlicher Fortschritt pyrolytischer Prozesse.

Da die Flamme bei $h=10mm$ noch nicht gezündet hat (Zündung und Stabilisierung setzen ungefähr bei $h=20mm$ ein), wurde bisher nicht die Interaktion zwischen dem turbulenten Strömungsfeld und den Reaktionszonen betrachtet. Diese Effekte sind in den Scatterplots größerer Messhöhen zu erkennen und werden im folgenden Abschnitt anhand der Korrelation zwischen Temperatur und Mischungsbruch erläutert.

Temperatur- und Speziesverteilungen unterschiedlicher Messhöhen

Nachdem der Startbereich der Flamme eingehend analysiert wurde, soll in diesem Abschnitt die Entwicklung der Flamme mit zunehmender Höhe betrachtet werden. Dabei sind zunächst die Temperatur und der Mischungsbruch als exemplarische Messgrößen gewählt, da sie wie keine andere Messgröße die betrachteten Effekte aufzeigen. Die Abbildung 5.13 zeigt die Korrelationen zwischen Temperatur und Mischungsbruch zu den Messhöhen $h=10, 20, 40, 60, 90$ und 150mm auf Einzelpulsbasis. Neben den Messergebnissen sind die Resultate der Rechnungen zu den gestreckten Gegenstrom-diffusionsflammen [Chen00, Miller84] aufgetragen.

Es fällt auf, dass die Breite der Mischungsbruchverteilung stromabwärts schnell abnimmt. Während bei einer Messhöhe von 10mm noch Gemische mit $f_{\min}=0,0$ bis $f_{\max}=0,93$ vorhanden sind, fällt der maximale Wert des Mischungsbruches bei $h=20\text{mm}$ auf $f_{\max}=0,8$ und bei $h=40\text{mm}$ auf $f_{\max}=0,47$. Dieses Ergebnis demonstriert die effiziente und schnelle Vermischung von Erdgas und Luft durch das verdrallte Strömungsfeld. Ab einer Höhe von ca. 60mm ist in den Messergebnissen auch keine Proben aus reiner Luft mehr zu erkennen, der minimale Wert des Mischungsbruches liegt bei $h=90\text{mm}$ bei $f_{\min}=0,01$ und bei $h=150\text{mm}$ bei $f_{\min}=0,035$. Insgesamt nähert sich der Mischungsbruchbereich relativ schnell $f=0,047$ an, der der globalen Luftzahl von $\lambda=1,2$ entspricht.

In den Temperaturverteilungen lassen sich wiederum einzelne Bereiche der Flamme lokalisieren, die schon bei $h=10\text{mm}$ zu sehen waren:

- (1) Das innere Rezirkulationsgebiet, mit nah stöchiometrischen bis leicht brennstoffreichen Gemischen hoher Temperatur.
- (2) Die äußere Rezirkulationszone mit durch Strahlungsverluste abgesenkten Temperaturen und einem Mischungsbruch nahe $f=0,047$.
- (3) Die Scherschicht zwischen äußerer Rezirkulationszone und Luft, mit brennstoffarmen Gemischen ($0,0 < f < 0,047$) und ebenfalls abgesenkten Temperaturen, die sich allerdings in größeren Höhen ($h > 60\text{mm}$) mit anderen Zonen überlagert und nicht mehr eindeutig identifiziert werden kann.

Mit zunehmender Höhe verschwindet aufgrund des Einsetzens der Verbrennungsreaktionen der bimodale Charakter der Temperatur-Verteilung, wie er in den Scatterplots bei $h=10\text{mm}$ beobachtet wurde. So ist er bei $h=40\text{mm}$ nicht mehr zu erkennen, und schon bei $h=20\text{mm}$ verlaufen bei $f > 0,2$ der heiße und kalte Zweig der Temperatur-Verteilung ineinander.

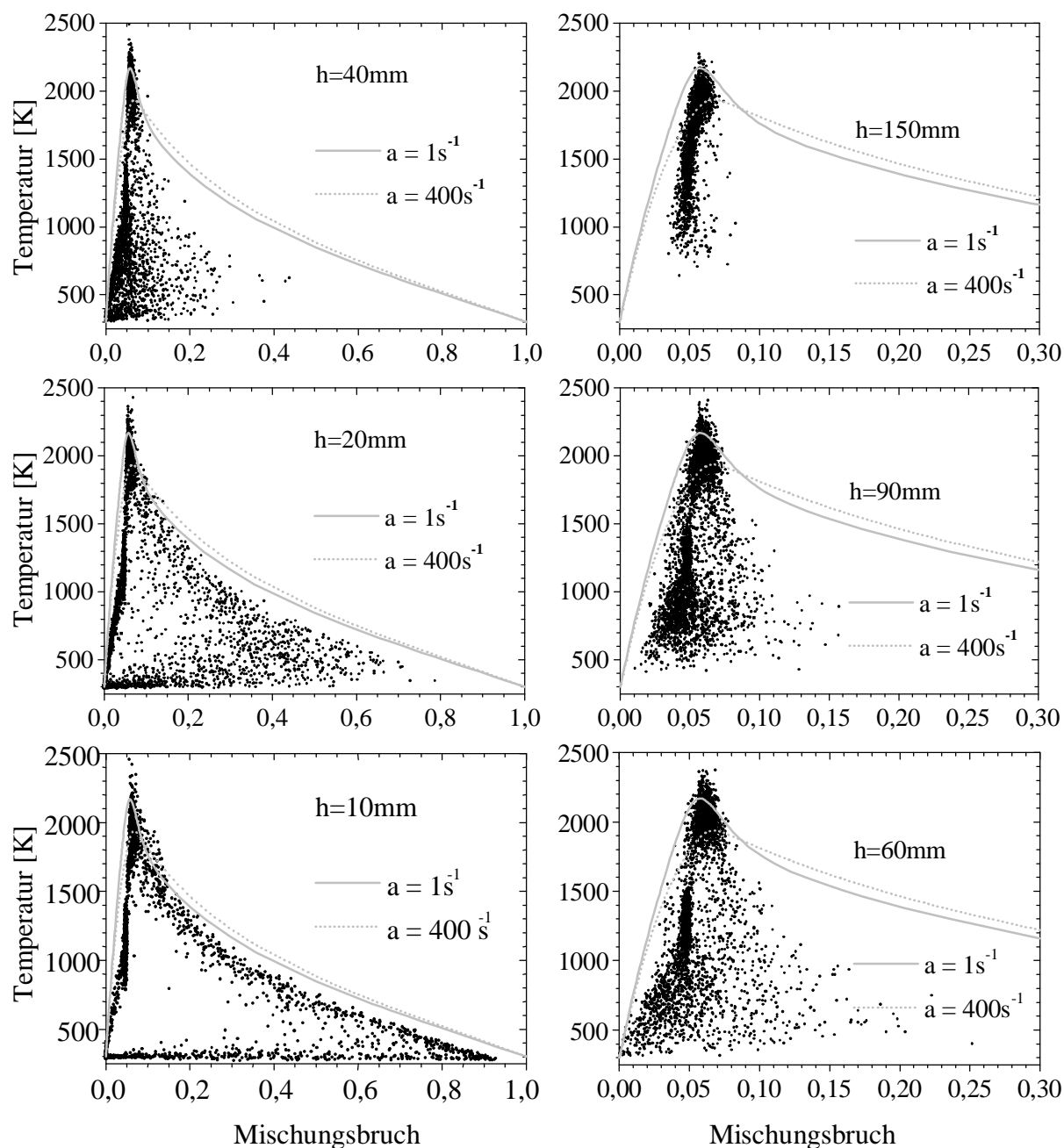


Abb. 5.13 Entwicklung der „Temperatur-Scatterplots“ mit zunehmender Höhe. Bei den Abbildungen auf der rechten Seite ist die Mischungsbruchachse zur besseren Darstellung auf den Bereich von 0,0 bis 0,3 beschränkt.

Im Gegensatz zu $h=10\text{mm}$ zeigen sich ab $h=20\text{mm}$ neben unreaktierten Mischungen bei Raumtemperatur und ausreaktierten Gemischen bei ca. 2000K nun auch Proben mit mittleren Temperaturen, insbesondere auch im Bereich um $f_{\text{stöch}}$. Sie spiegeln das Vorhandensein verschiedenster Mischungs- und Reaktionszustände wider. Der thermochemische Zustand der Proben im mittleren Temperaturbereich lässt sich als teilweise reagiert bezeichnen. Hierfür können mehrere Ursachen verantwortlich sein:

(1) Lokale Flammenlöschung:

Die hohen Geschwindigkeiten und Geschwindigkeitsgradienten im Bereich der Reaktionszone nahe des Brennermundes können durch Wechselwirkung mit den chemischen Prozessen lokal zur Flammenlöschung führen und nicht-ausreagierte Gasgemische im Messvolumen zurücklassen. Diese Verlöschung tritt unregelmäßig an unterschiedlichen Positionen auf und bekommt so einen statistischen Charakter. Mischen nicht-ausreagierte Gaspakete mit brennstoffreichen Gemischen, so ergibt sich über einen weiten Teil des Mischungsbruches die beobachtete, stark fluktuierende Temperaturverteilung. Visuelle Beobachtungen und ein hoher Geräuschpegel der Flamme sowie die Untersuchungen der Chemilumineszenz gaben weitere Hinweise auf Instabilitäten in Form lokaler Flammenlöschung und Wiederingzündung. Bei erhöhter Drallzahl tritt sogar wiederholt eine totale Verlöschung der Flamme auf. Man kann davon ausgehen, dass lokale Flammenlöschung in den untersuchten Drallflammen eine Rolle spielt und für die starken Temperaturschwankungen mit verantwortlich ist.

(2) Zündverzug:

Durch Mischung von Abgas und Frischgas können zündfähige Gemische gebildet werden, dessen Zündverzug von der Temperatur und Gaszusammensetzung abhängt. Für typische Zusammensetzungen der hier diskutierten Proben liegen die Zündverzugszeiten für $T \approx 1750\text{K}$ bei 1ms und für $T \approx 1250\text{K}$ schon bei 10ms [Braun00] (siehe Tabelle A1 im Anhang). In der gleichen Größenordnung liegt auch das Zeitmaß der Strömung und Mischung im Nahbereich der Flamme (bei Austrittsgeschwindigkeiten von $>20\text{m/s}$ für Erdgas und Luft). Aufgrund des Zündverzugs können also reaktionsfähige Gemische auftreten und detektiert werden, bevor sie zünden und ausreagieren. Je höher die Temperatur derartiger Gemische ist, desto kürzer sind die Zündverzugszeiten. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit ein ausreagiertes Gemisch in den Messungen zu detektieren.

(3) Mittelungseffekte:

Befinden sich Brennstoff und Luft unvermischt nebeneinander, so sind die Verbrennungsprozesse nur in der Grenzschicht zwischen ihnen möglich. Werden solche Gasstrahlen gemeinsam innerhalb des Messvolumens detektiert, so ermöglichen die jeweiligen Zusammensetzungen und Temperaturen der einzelnen Gasstrahlen einen weiten Bereich der gemessenen Mischungsbrüche und Temperaturen. Dieser Effekt dürfte allerdings hauptsächlich nahe den Reaktionszonen zu beobachten sein, da hier die größten Temperatur- und Molenbruchgradienten auftreten, also die Möglichkeit gegeben ist, dass Gaspakete mit stark unterschiedlicher Zusammensetzung und Temperatur eng beieinander zu finden sind. Die Wahrscheinlichkeit, mit dem Messvolumen ein solches Gebiet zu erfassen, wurde mit Hilfe der OH-PLIF-Einzelpulsmessungen abgeschätzt, wobei die Gradienten der LIF-Intensität stellvertretend für den qualitativen Gradienten der Temperatur benutzt wurde. Die Gebiete

hoher Gradienten, die durch die Grenze der sichtbaren OH-Fluoreszenz abgeschätzt wurden (siehe Abb. 4.2), fluktuieren in der radialen Richtung in einer Höhe von $h=40\text{mm}$ in einem Streifen von ca. 20mm Breite ($25\text{mm} < r < 45\text{mm}$). Das Messvolumen ist dagegen mit einer Breite von 0,6mm um den Faktor 33 kleiner, sodass die Wahrscheinlichkeit mit dem Messvolumen die Zone hoher Gradienten zu erfassen dementsprechend nur bei ca. 3% liegt und so die zahlreichen Ereignisse mit „teilweise“ reagierte Proben nicht erklären kann.

In den beiden ersten Fällen werden die chemischen Reaktionen durch das turbulente Strömungsfeld unterdrückt oder verzögert. Durch vergleichbare Zeitskalen für die Strömung und die Chemie tritt ein konkurrierendes Wechselspiel zwischen diesen Einflüssen auf, und die Gasgemische erreichen nicht das adiabatische oder chemische Gleichgewicht. Bei der Interpretation des Flammenverhaltens sollte beachtet werden, dass die verdrallte Strömung eine sehr schnelle Vermischung von Gaspaketen unterschiedlichsten Ursprungs bewirkt. Während bei $h=10\text{mm}$ nur Mischungen benachbarter Gebiete (innere Rezirkulationszone - Ergas - Luft - äußere Rezirkulationszone) auftreten, sind in größeren Höhen Mischungen weiterer Zusammensetzungen (z.B. Mischungen aus Abgas der inneren Rezirkulationszone und Luft oder Mischungen mit teilweise reagierte Proben) zu beobachten. Ab $h\approx 60\text{mm}$ gibt es keine reinen Erdgas/Luft-Gemische (d.h. $T=300\text{K}$) mehr, stattdessen können Zusammensetzungen aus Abgas, Erdgas und Luft immer wieder zu zündfähigen Gemischen führen, bis schließlich der gesamte Brennstoff verbraucht ist. Mit zunehmender Höhe nähert sich der Zustand der Flamme dem des ausreagiertem Abgases, und es verringert sich die Anzahl der Einzelpulsmessungen von Proben mit niedrigen Temperaturen ($T_{\min}=700\text{K}$ bei $h=150\text{mm}$). Die maximale Temperatur bleibt über einen großen Höhenbereich konstant, erst ab $h=150\text{mm}$ sinkt sie leicht auf $T\approx 2250\text{K}$. Diese Temperaturen gehören zu frisch reagierte Gasgemischen, die nur wenig Wärmeenergie durch Strahlung oder Wandkontakt verloren haben.

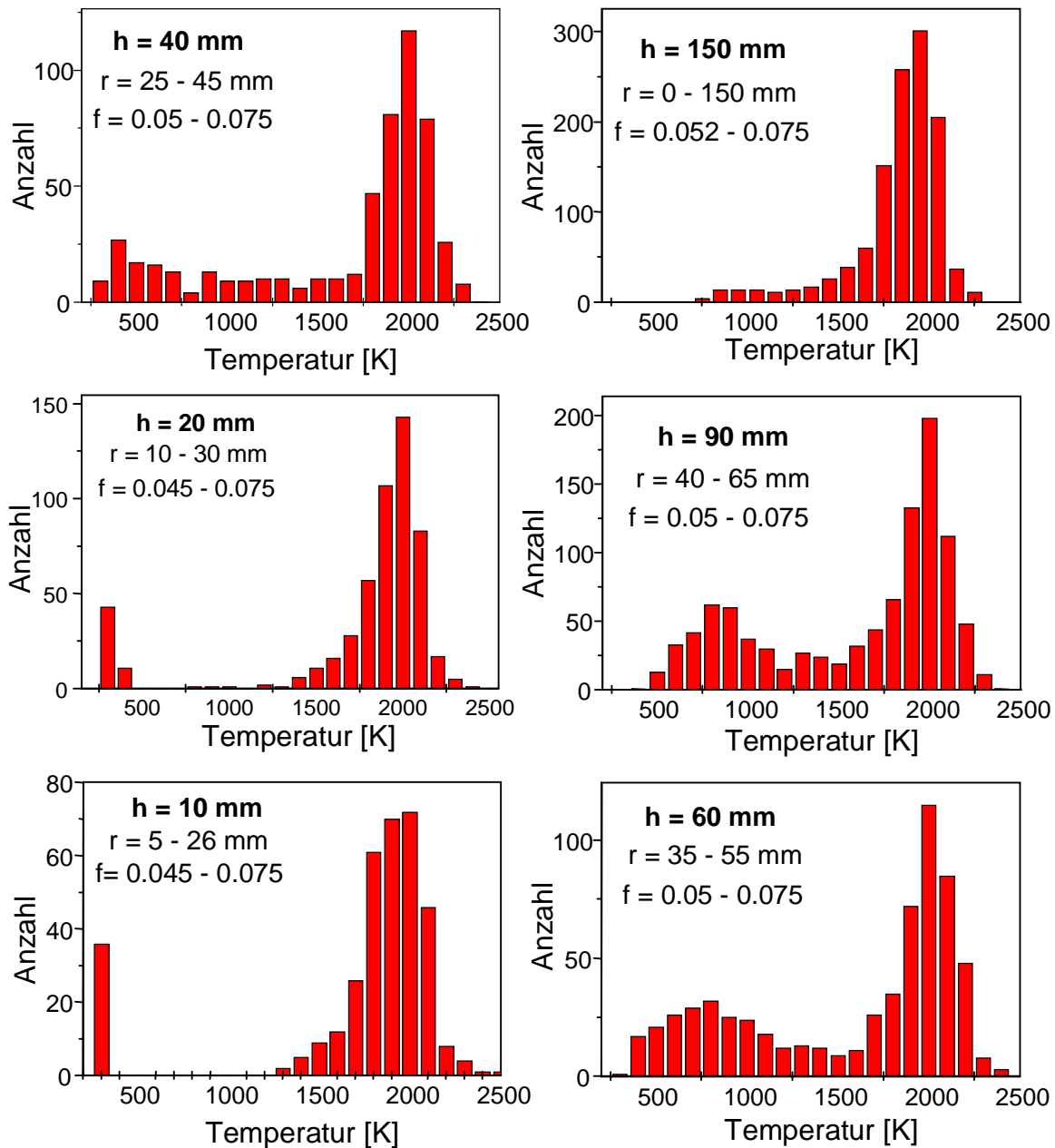


Abb. 5.14 Histogramme der Temperaturverteilungen (PDFs), konditioniert im Hinblick auf die radiale Position und den Mischungsbruch.

Zur Verdeutlichung der Chemie-Turbulenz-Wechselwirkung zeigt Abbildung 5.14 experimentell ermittelte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDFs) der Temperatur zu den verschiedenen Messhöhen, dargestellt als Histogramme. Dabei wurden die Einzelpulsmessungen im Hinblick auf radiale Position und Mischungsbruch gefiltert, um möglichst nur Proben aus dem Bereich der Reaktionszonen mit nah-stöchiometrischen Mischungsbrüchen, d.h. von der Zusammensetzung her zündfähige Gemische, zu betrachten. Der Sinn dieser Auswahl liegt darin, den Fortschritt des Ausbrandes dieser Gemische zu verfolgen, wobei hier die Temperatur als Maß für den Ausbrand herangezogen wird.

In der Abbildung ist die bimodale Form der Temperaturverteilung bis $h=20\text{mm}$ deutlich zu erkennen, d.h. dass die Gemische entweder noch nicht reagiert haben oder ausreagiert sind. Ab $h=40\text{mm}$ wird die Verteilung breiter, es treten Temperaturen von 300K bis 2300K in den Messungen auf. Allerdings ist bei $h=60\text{mm}$ und $h=90\text{mm}$ eine verminderte Häufigkeit für Messungen mit 1200K bis 1600K zu erkennen. Dieses lokale Minimum kann auf die bereits angesprochenen Zündverzugszeiten zurückgeführt werden. Mischt sich heißes Abgas mit kalten Frischgasen zu einem zündfähigen Gas, so beeinflusst die aus der Mischung resultierende Temperatur entscheidend die Zündverzugszeit. Es werden weniger Proben mit Temperaturen von 1200K bis 1600K in den Messungen detektiert, da hier der Zündverzug relativ gering ist und die Gasgemische schnell durchreagieren und somit in der Temperatur steigen. Für $T < 1200\text{K}$ verhindern die relativ langen Zündverzugszeiten eine schnelle Freisetzung von Wärmeenergie. Die Histogramme enthalten gegenüber den Scatterplots zwar keine zusätzliche Information, geben aber den quantitativen Inhalt der PDFs deutlich wieder.

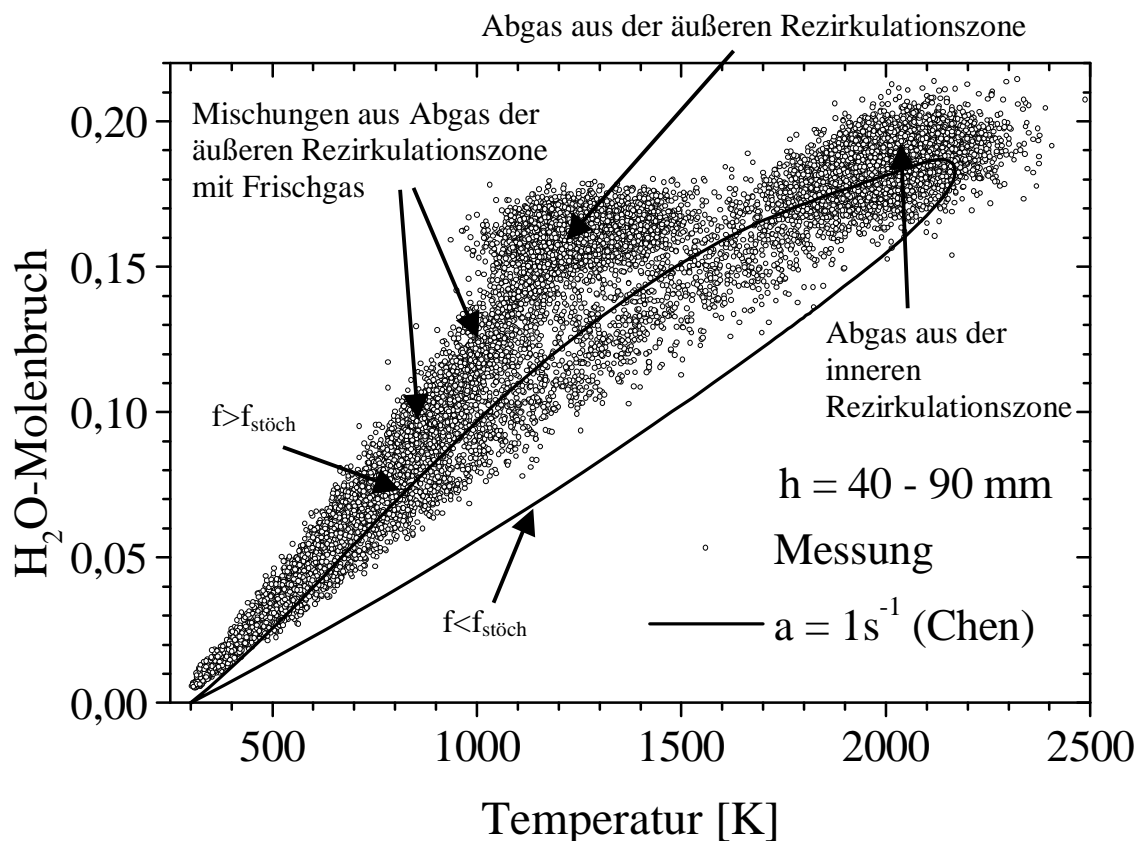


Abb. 5.15 Korrelation zwischen dem H₂O-Molenbruch und der Temperatur. Die Messungen stammen aus den Höhen $h=40, 60$ und 90mm . Die zwei H₂O-Molenbruchwerte der Rechnung zu der gleichen Temperatur ergeben sich aus einem brennstoffreichen und einen brennstoffarmen Zweig.

Zur weiteren Untersuchung des thermochemischen Zustands der Flamme werden einige Spezieskonzentrationen aus unterschiedlichen Messhöhen betrachtet. Dazu sind in den Abbildungen 5.15 und 5.16 die Korrelationen zwischen den Molenbrüchen von H_2O , CO_2 bzw. CO und der Temperatur zu den Höhen $h=40, 60$ und 90mm und die Rechnungen zu der Gegenstromdiffusionsflamme mit $a=1\text{s}^{-1}$ dargestellt. Die Abbildungen zeigen Einzelpulsergebnisse, die aus den unterschiedlichen Gebieten der Flamme stammen. In Abbildung 5.15 liegen die Messergebnisse aus der äußeren Rezirkulationszone für den H_2O -Molenbruch eng zusammen bei $X_{\text{H}_2\text{O}}=0,16$ mit Temperaturen zwischen $T=900\text{K}$ bis 1500K . Diese Punkte befinden sich aufgrund der Abkühlung des Abgases durch Wärmestrahlung und Wandkontakt nicht auf der berechneten Kurve. Ausgehend von diesen Punkten erstreckt sich ein Zweig zu tieferen Temperaturen, der ebenfalls nicht auf der eingezeichneten Kurve liegt. Diese Messergebnisse stammen aus Mischungen von Frischgas mit Abgas aus der äußeren Rezirkulationszone. Für die Diskussion der teilweise reagierten Gemische und Effekte der Chemie-Turbulenz-Wechselwirkung ist dieser Zweig nicht von Bedeutung. Die Messpunkte, die sich bei $X_{\text{H}_2\text{O}}\approx 0,18$ und $T\approx 2000\text{K}$ anhäufen, stammen aus der inneren Rezirkulationszone und befinden sich im Einklang mit der Rechnung. Die restlichen Punkte im mittleren Temperaturbereich gehören größtenteils zu den teilweise reagierten Gemischen. Auch hier zeigt sich eine klare Korrelation zwischen H_2O -Molenbruch und der Temperatur, die im Wesentlichen dem Resultat der Rechnung für brennstoffreiche Gemische folgt.

Die CO_2 -Verteilung (5.16 oben) zeigt ebenfalls eine gute Korrelation zwischen dem CO_2 -Molenbruch und der Temperatur für die Messungen aus der inneren Rezirkulationszone und den verschiedenen Mischungen mit dem Abgas aus dieser Zone. Dieser Zweig der Verteilung liegt über den gesamten Temperaturbereich nahezu auf dem brennstoffreichen Teil der eingezeichneten Kurve (Rechnung mit Streckungsparameter $a=1\text{s}^{-1}$). Es ist eine leichte Erhöhung der CO_2 -Molenbrüche zu erkennen, was auf den CO_2 -Anteil im Erdgas zurückzuführen ist. In der Abbildung sind wieder die abgesenkten Temperaturen für die Einzelpulsmessungen aus der äußeren Rezirkulationszone zu erkennen. Die CO -Verteilung (5.16 unten) variiert zwar stärker im gesamten Temperaturbereich, liegt aber für höhere Temperaturen ($T>1800\text{K}$) nahe der berechneten Kurve für $a=1\text{s}^{-1}$. Die Variationen sind auf die Messfehler aufgrund des geringen CO -Anteils im Abgas der äußeren Rezirkulationszone zurückzuführen. Insgesamt zeigen auch der CO_2 - und der CO -Molenbruch eine gute Korrelation mit der Temperatur und stimmen für die teilweise reagierten Gasproben gut mit den Resultaten der Rechnung für brennstoffreiche Gemische überein.

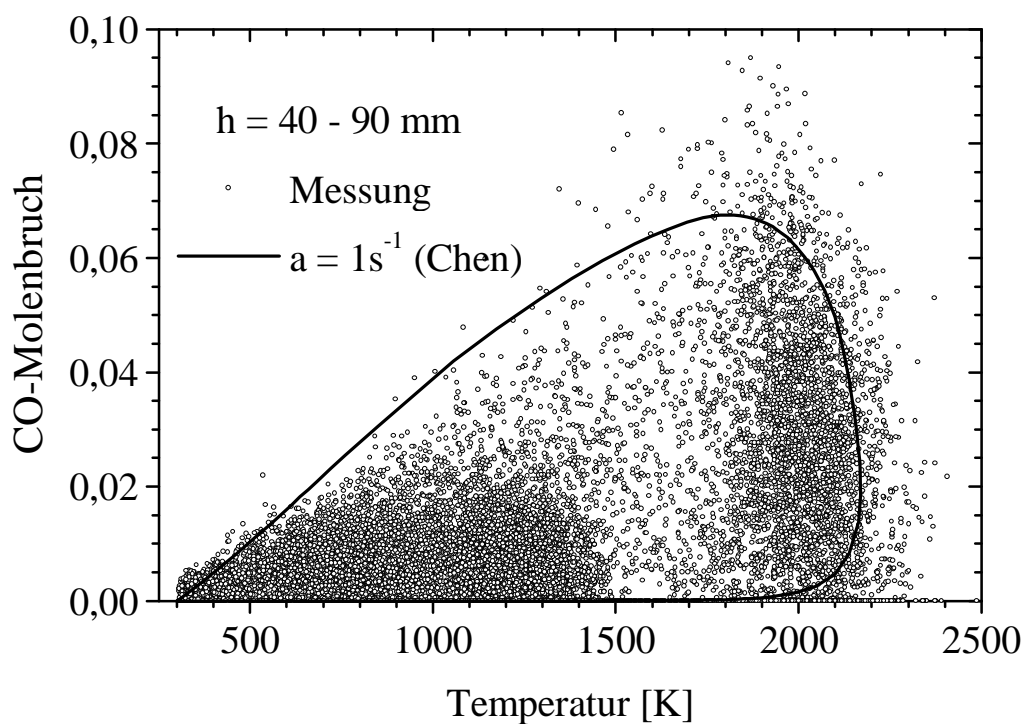
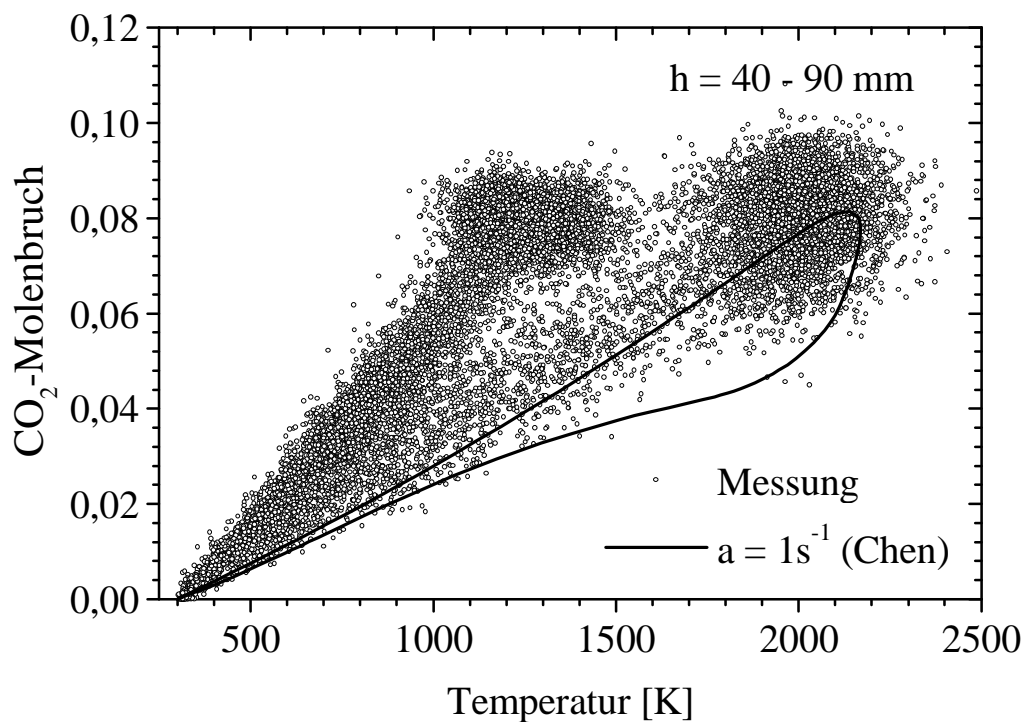


Abb. 5.16 Korrelationen zwischen dem CO₂- (oben), bzw. CO-Molenbruch und der Temperatur. Die Messungen stammen aus den Höhen h=40, 60 und 90mm.

Anhand der dargestellten Scatterplots und der Histogramme lässt sich der Nahbereich der Flamme in zwei Gebiete einteilen: (1) bei $h=10\text{mm}$ zeigt sich eine bimodale Verteilung der Temperatur und der Molenbrüche für Edukte und Produkte über den gesamten Mischungsbruchbereich. Verbrennungsreaktionen sind in dieser Höhe nicht zu finden, vielmehr bestimmen Mischprozesse und Pyrolyse das Verhalten der Flamme im Startbereich. (2) Ab $h=20\text{mm}$ setzen die Startprozesse der Verbrennung ein. Die bimodalen Verteilungen lösen sich auf, große Schwankungen der Einzelpulsmessungen bestimmen das Bild der Flamme. Effekte wie lokale Flammenlöschung und Zündverzug spielen hier die entscheidende Rolle in der Interpretation des thermochemischen Zustandes.