

# Numerische Untersuchung der Flammenform eines vorgemischten, unverdrallten Multijetbrenners

A. Schwagerus<sup>1\*</sup>, P. Habisreuther<sup>2</sup> und N. Zarzalis<sup>1</sup>

\*alexander.schwagerus@kit.edu

<sup>1</sup> Engler-Bunte-Institut, Teilinstitut Verbrennungstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland

<sup>2</sup> Institut für Technische Chemie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland

## Zusammenfassung

Um die immer strikter werdenden Vorschriften bezüglich der Abgasemissionen zu erfüllen, ist es notwendig, neue Brennerkonzepte zu erforschen und genauer zu verstehen. Eines dieser neuen Brennerkonzepte ist der Matrixbrenner, der eine Gruppe von nicht-verdrallten Strahlflammen erzeugt. Zur Auslegung solcher Brenner sind Kenntnisse über fundamentale Brenneigenschaften notwendig. Vergangene Untersuchungen berichteten bereits in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen über eine signifikante Änderung der Flammenform, die Gegenstand der aktuellen Arbeit ist. Zu diesem Zweck werden unterschiedliche Matrixbrenner unter Änderung der Betriebsbedingungen mithilfe eines Grobstruktur- und tabellierten Chemie-Ansatzes numerisch simuliert. Zunächst werden die beiden Flammenformen genauer charakterisiert und verglichen und ein Algorithmus zur Identifikation der Flammenform vorgestellt. Weiterhin wird ein Korrelationsansatz zur Vorhersage des Flammenumschlagpunktes auf Basis des Peclet-Kriteriums vorgeschlagen.

## Einleitung

Eine substanzielle Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen kann nur durch den Einsatz erneuerbarer Energiequellen im großen Maßstab erreicht werden, wobei insbesondere Wind- und Solarenergie im Fokus stehen. Deren intermittierendes Vorkommen stellt jedoch eine große Herausforderung für das Energieversorgungssystem dar, da die Spitzen des erneuerbaren Energieangebots meist nicht mit denen der nachgefragten Leistung überlappen. Da bislang noch keine kosteneffizienten Speichermöglichkeiten im erforderlichen Maße vorhanden sind, ist es notwendig, neue Technologien für aktuelle Kraftwerke zu entwickeln, die eine flexiblere Betriebsweise ermöglichen, ohne dass diese zu signifikanten Verschlechterungen in Betriebsdauer, Kosten oder Emissionen führen. Ein neues Konzept, das im Vergleich zu konventionell eingesetzten Drallbrennern interessant für die Anwendung in der Gasturbine erscheint, besteht aus einer Gruppe vorgemischter, unverdrallter Strahlflammen. Für die Auslegung eines solchen Matrixbrenners sind Kenntnisse über die zugrunde liegenden Phänomene im Brennersystem elementar.

Der hier betrachtete Matrixbrenner wurde bereits von Bhagwan et al. [1] experimentell untersucht, wobei insbesondere der Einfluss verschiedener geometrischer Parameter der Düse auf die Abblasegrenzen (engl. Lean Blow Out, LBO) und das nicht-reaktive Strömungsfeld im Fokus stand. Die Autoren berichteten, dass sich die Düsen bei einem konstanten globalen Querschnittsflächenverhältnis geometrisch ähnlich verhalten und die Abblasegrenzen durch eine Korrelation auf Basis der Peclet-Zahl beschrieben werden können. Weitere LBO-Experimente am Matrixbrenner wurden von Weis et al. [2] durchgeführt, die die Korrelation der LBO-Grenzen bei einer zusätzlichen Variation der Querschnittsfläche des Brenners untersuchten. Sie beobachteten, dass Düsen mit einem höheren Querschnittsverhältnis (engl. Dump Ratio *DR*) einen erweiterten Betriebsbereich haben und untersuchten die Verwendung einer auf der Damköhler-Zahl basierenden Korrelation, um die geometrischen und thermodynamischen Einflüsse auf die LBO-Grenzen vorherzusagen.

Da Experimente kostenintensiv sind und der Zugang zu physikalischen Größen in der Brennkammer sehr eingeschränkt ist, wurde in einer weiteren Untersuchung überprüft, ob die Abblasegrenzen auch mittels numerischer Strömungssimulationen auf Basis der „Flame-Generated-Manifold“-Modellierung vorhergesagt werden können [3]. Es konnte gezeigt werden, dass mit dem entwickelten numerischen Aufbau eine sehr gute Übereinstimmung zu den experimentell ermittelten Abblasegrenzen mit einer

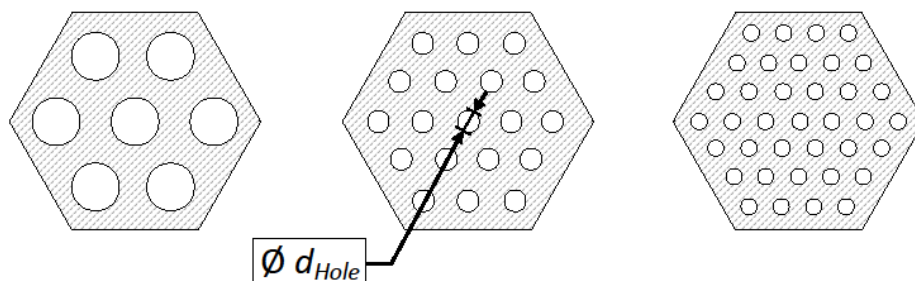
durchschnittlichen Abweichung von etwa 10 % erreicht werden konnte. Weiterhin deuteten die numerischen Untersuchungen auf einen Umschlagpunkt in der Flammenform hin: Während sich bei Bedingungen fern des Abblasepunktes (niedriger Volumenstrom bzw. kleine Luftzahl) mehrere isolierte Strahlflammen bilden, entsteht bei Annäherung an die magere Abblasegrenze eine gemeinsame konische Flamme. Da sich die beiden Flammenformen maßgeblich in ihren Flammencharakteristiken unterscheiden und somit unterschiedliche Anforderungen an die Brennkammer stellen, ist eine Vorhersage dieses Umschlagpunktes von großem Interesse. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, diese Wissenslücke zu schließen, indem Flammenumschlagpunkte numerisch untersucht werden und ein Korrelationsansatz unter Berücksichtigung des Einflusses verschiedener geometrischer und thermodynamischer Parameter vorgeschlagen wird.

### Beschreibung des Brennersystems

Der Matrixbrenner wurde am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie in Kooperation mit Siemens entwickelt und wurde bereits experimentell als auch numerisch untersucht [1-3]. Das Brennersystem besteht aus einer Brennkammer, die eine sechseckige Querschnittsfläche aufweist, und einer Düse, die zylindrische Bohrungen enthält. Die Bohrungen sind in einem speziell definierten Muster angeordnet, wodurch konstante minimale Abstände zwischen benachbarten Bohrungen und zur Wand gewährleistet sind. Mithilfe verschiedener Düsen, die sich in der Anzahl der Löcher und dem Lochdurchmesser  $d_{Hole}$  unterscheiden, wurde der Einfluss verschiedener geometrischer Parameter untersucht. Geometrische Details der Düsen sind in Tabelle 1 aufgeführt, während schematische Skizzen in Abb. 1 gegeben sind. Der Brenner wurde unter atmosphärischen Druckbedingungen mit einem vorgemischten Erdgas-Luft-Gemisch betrieben, welches auf die Vorwärmtemperatur  $T_0$  (zwischen  $50^\circ\text{C}$  und  $400^\circ\text{C}$ ) vorgewärmt wurde. Eine detaillierte Beschreibung des untersuchten Brenners ist in [1] zu finden.

**Tabelle 1.** Kenngrößen der untersuchten Düsen

Düse	Anzahl Löcher	Lochdurchmesser $d_{Hole}$	Dump Ratio DR
D1	7	$1,65 d_{Ref}$	2,8
D2	19	$d_{Ref}$	2,8
D3	37	$0,72 d_{Ref}$	2,8



**Abbildung 1:** Skizze der genutzten Düsen (von links: D1, D2, D3) [3]

### Numerischer Aufbau

Alle für die Studie durchgeführten numerischen Untersuchungen wurden unter Verwendung des Open-Source-C++-Paketes *OpenFOAM* durchgeführt. Zur Modellierung der Turbulenz wurde ein Grobstrukturansatz (engl. *Large-Eddy-Simulation*, LES) verwendet. Die Schließung der Gleichung zur Berechnung des Spannungstensors wurde durch das *WALE*-Subgrid-Modell [4] erreicht, das im Vergleich zu klassischen Modellen wie dem Standard-Smagorinsky-Modell insbesondere in wandnahen Regionen eine bessere Wiedergabe der Turbulenz ermöglicht [5, 6]. Für die Diskretisierung der zeitlichen, wie auch der räumlichen Ableitungen wurden Schemata zweiter Ordnung verwendet. Für jede untersuchte Düse wurde ein numerisches Rechengitter erstellt, welche jeweils etwa 1,2 Millionen Zellen beinhalten. Da eine LES-Simulation die zeitaufgelöste Beschreibung der eintretenden turbulenten

Strukturen am Domänenanlass erfordert, wurde ein von Klein et al. [7] vorgeschlagener Turbulenzgenerator implementiert [8]. Diese Methode basiert auf der digitalen Filterung einer Reihe von unkorrelierten Zufallsdaten, um korrelierte Geschwindigkeitsfelder gemäß benutzerdefinierter Turbulenzeigenschaften zu erzeugen. Die erforderlichen Turbulenzparameter wurden in mehreren nicht-reaktiven Simulationen der Brennkammerströmung an die Messungen der mittleren Geschwindigkeit und der turbulenten kinetischen Energie von Bhagwan et al. angepasst [1]. Weitere Details zum numerischen Aufbau der Rechnung sind in [3] zu finden.

### Verbrennungsmodellierung

In dieser Arbeit wurde zur Reduktion des erforderlichen Berechnungsaufwandes ein Modell der „*Flame Generated Manifold*“-Methode (kurz FGM-Methode) [9] genutzt. Bei diesem Modellierungsansatz wird im Gegensatz zur direkten Lösung detaillierter Reaktionsmechanismen die Vielfalt möglicher Reaktionspfade eingeschränkt. In dem hier genutzten Ansatz wird die Chemie auf eine einzige Reaktionsfortschrittvariable  $c$  reduziert. Die Definition des Reaktionsfortschrittes  $c$  ist in Gl. (1) dargestellt und basiert auf einer charakteristischen Variable  $Y_C$ , die den Verlauf einer Summe charakteristischer Massenanteile darstellt. Zur Berechnung des Reaktionsfortschrittes wird der charakteristische Massenanteil mit den Werten im unverbrannten ( $u$ ) und verbrannten ( $b$ ) Zustand in Relation gesetzt. In dem hier genutzten Modell ist die charakteristische Variable durch die Summe der Massenanteile an  $CO$  und  $CO_2$ , den Hauptprodukten der Kohlenstoffoxidation, gegeben. Für die Korrelation des Reaktionsfortschrittes mit den thermodynamischen Größen der Flamme wird ein Modellreaktionssystem benötigt, für das die eindimensionale vorgemischte Flamme gewählt wurde. Diese wurde für die untersuchten Betriebsbedingungen mithilfe des Open-Source Programms *Cantera* und des detaillierten *GRI 3.0* Mechanismus [10] berechnet.

$$c = \frac{Y_C - Y_{C,u}}{Y_{C,b} - Y_{C,u}}, \quad Y_C = Y_{CO} + Y_{CO_2} \quad (1)$$

Zur Lösung des reaktiven Feldes der Brennkammer wird eine Transportgleichung für die LES-gefilterte charakteristische Variable  $\widetilde{Y}_C$  gemäß Gl. (2) gelöst. Die Schmidt-Zahl wurde als konstant mit einem Wert von  $Sc_t = 0,7$  angenommen. Um die Gleichung zu schließen, ist eine Berechnungsmethode für den LES-gefilterten Quellterm  $\widetilde{\omega}_{Y_C}$  erforderlich. Zu diesem Zweck wurde ein kombinierter Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionsansatz (engl. *Joint Presumed Probability Density Function model*, JPDF-Modell) verwendet, der bereits für eine Reihe verschiedener Brennersysteme erfolgreich angewendet wurde [11-13]. Die Grundidee des JPDF-Modells besteht darin, dass der gefilterte Quellterm mithilfe einer bekannten prinzipiellen Form der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) des Reaktionsfortschrittes und nach Maßgabe der durch Transportgleichungen bestimmten statistischen Momente dieser Funktion berechnet werden kann.

$$\frac{\partial \bar{\rho} \widetilde{Y}_C}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \widetilde{u} \widetilde{Y}_C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{eff}}{Sc_t} \frac{\partial \widetilde{Y}_C}{\partial x_j} \right) + \widetilde{\omega}_{Y_C} \quad (2)$$

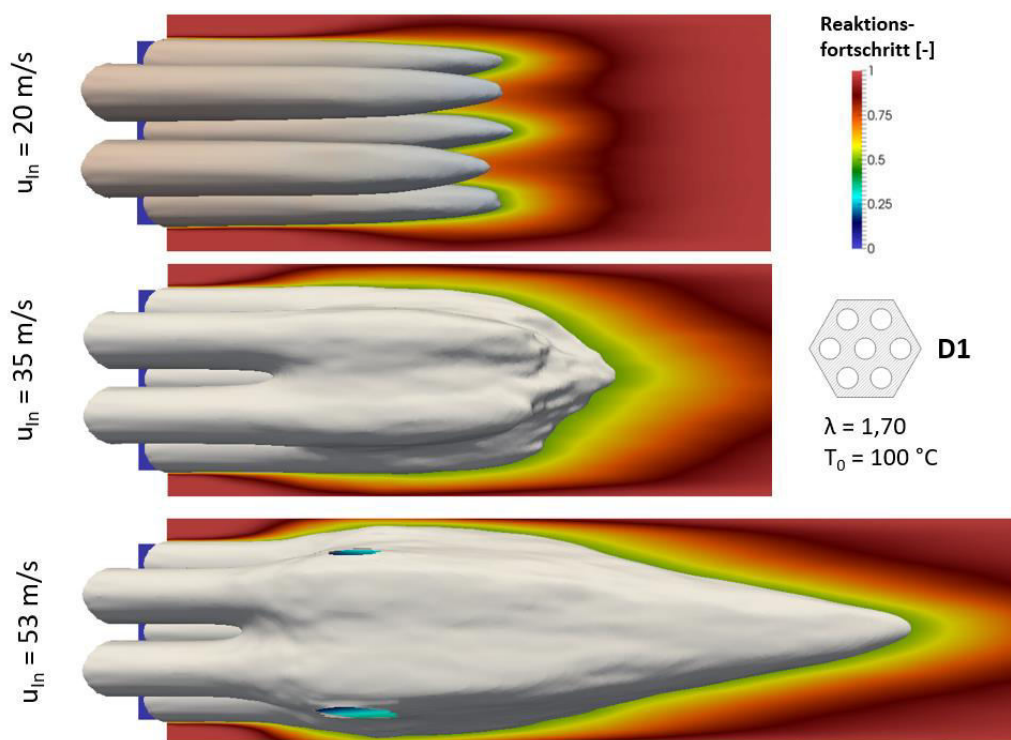
Unter der Annahme, dass die PDF durch eine Beta-Verteilung beschrieben werden kann, ist die PDF durch zwei Variablen festgelegt: dem mittleren charakteristischen Massenanteil  $\widetilde{Y}_C$  und der zugehörigen Varianz  $Y_C''$ . Da eine exakte Gleichung für die Schließung der Varianz nicht bekannt ist, wird in der vorliegenden Arbeit ein Gradientenansatz analog zum bekannten Smagorinsky-Modell der LES-Turbulenzmodellierung nach Gl. (3) verwendet. In dieser Gleichung hat die Konstante den Wert  $C_{Y_C''} = 0,1$ , während  $\Delta$  die Filterbreite des LES-Modells beschreibt. Mithilfe der Variablen  $\widetilde{Y}_C$  und  $Y_C''$  kann die PDF bestimmt und der Quellterm mit einem Algorithmus, der auf den Arbeiten von Liu et al. [14] basiert, durch Integration nach Gl. (4) berechnet werden. Um die Berechnungen zu beschleunigen, wurde der Reaktionsquellterm vor der Hauptsimulation als Funktion von  $\widetilde{Y}_C$  und  $Y_C''$  für jedes untersuchte Mischungsverhältnis berechnet und in einer mehrdimensionalen Tabelle gespeichert.

$$Y_C'' = C_{Y_C''} \cdot \Delta^2 \left( \frac{\partial \widetilde{Y}_C}{\partial x_j} \right)^2 \quad (3)$$

$$\tilde{\omega}_{Y_c} = \int_0^1 \dot{\omega}_{Y_c} \cdot PDF(c) dc \quad , \quad PDF(c) = f(\tilde{Y}_c, Y_c'') \quad (4)$$

### Umschlag der Flammenform

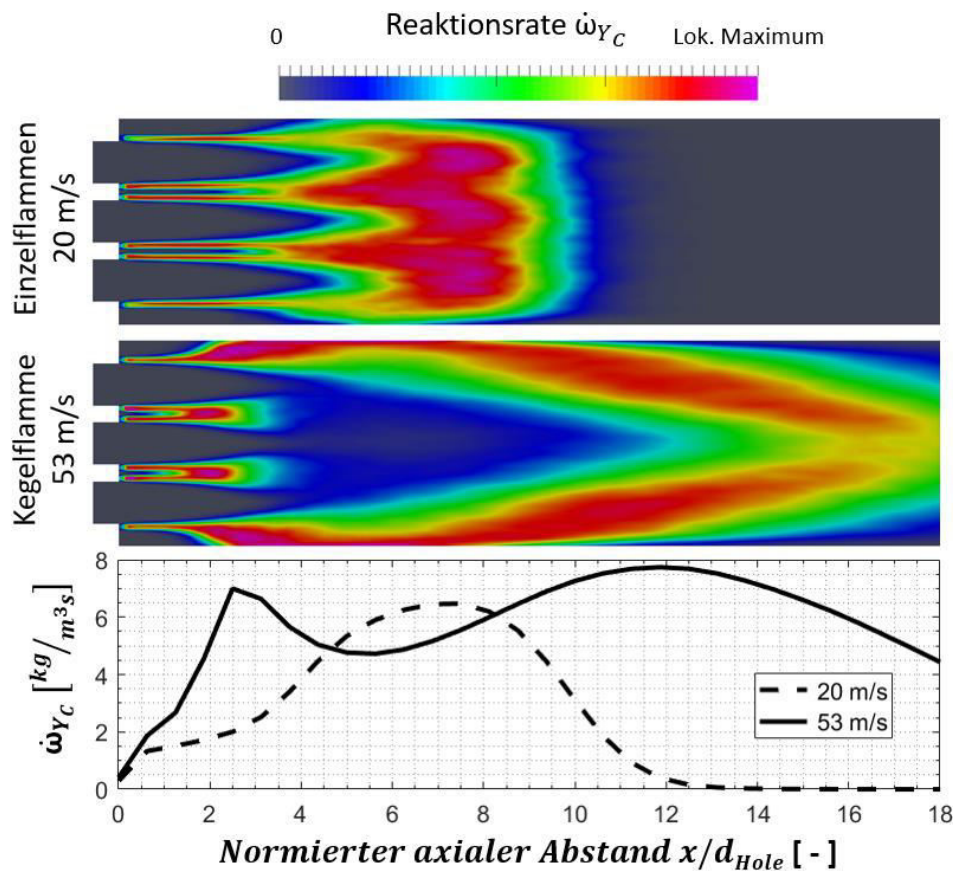
Der Matrixbrenner weist in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen verschiedene Flammenformen auf. Eine Illustration dieses Phänomens ist in **Abbildung 2** gegeben, in der die Flammenoberfläche anhand der Isofläche  $c = 0,5$  bei verschiedenen Einlassgeschwindigkeiten abgebildet ist. Bei der niedrigsten Geschwindigkeit von 20 m/s bilden sich Strahlflammen über jeder Bohrung aus, deren Oberfläche klar von den benachbarten Flammen getrennt ist. Bei einer Steigerung der Einlassgeschwindigkeit auf 35 m/s sind nahe der Düse noch die einzelnen Strahlflammen zu erkennen, jedoch können diese nicht mehr einzeln stabilisieren und es bildet sich nach einer „Abhebehöhe“ eine gemeinsame kegelförmige Flammenfront aus, in dem die einzelnen Jets nicht mehr zu unterscheiden sind. Wird die Geschwindigkeit weiter auf 53 m/s erhöht (unterstes Bild) bleibt die Abhebehöhe der Kegelflamme annähernd konstant, jedoch wird der resultierende Flammenkegel deutlich länger. Bei einer weiteren Erhöhung des Massenstroms kommt es zum globalen Ausblasen der Flamme. Diese Änderung der Flammenform kann auch beobachtet werden, wenn bei gleichbleibendem Massenstrom die Luftzahl erhöht wird [3].



**Abbildung 2:** Flammenoberfläche repräsentiert durch die Isofläche  $c = 0,5$  bei verschiedenen Einlassgeschwindigkeiten  $u_{in}$

Die Flammenform hat einen großen Einfluss auf die Verteilung der Reaktionszone. Dies ist anhand von Schnittbildern der Reaktionsrate der beiden Flammenformen in **Abbildung 3** aufgezeigt. Das untere Diagramm zeigt dabei den Verlauf der zeitlich und über eine Fläche quer zur Hauptströmungsrichtung gemittelten Reaktionsrate über den axialen Abstand zur Düse. Während sich die Hauptreaktionszone für die einzelnen Strahlflammen zum Ende der Strahlflammen konzentriert, wird für die Kegelflamme eine recht gleichmäßige Verteilung über den gesamten axialen Verlauf der Kegelflamme beobachtet. Die Kegelflamme weist zwei lokale Maxima auf, zu Beginn der Kegelflamme und bei etwa  $2/3$  der Kegelflammengänge. Darüber hinaus bestehen große Unterschiede in der radialen Verteilung: Während die Reaktionszone bei den Einzelflammen im Zentrum konzentriert ist und zu den Wänden hin abfällt, bildet sich bei der Kegelflamme ein nahezu reaktionsfreies Zentrum aus und die Reaktionsfronten

befinden sich sehr nah an den Brennkammerwänden. Dieser Zustand stellt höhere Anforderungen an die genutzten Werkstoffe der Brennkammer und hat eine größere Anfälligkeit gegenüber Wärmeverlusten. Weiterhin wird beim Umschlag zur Kegelflamme eine starke Vergrößerung des Flammenvolumens beobachtet, was bei der Dimensionierung der Brennkammer berücksichtigt werden muss, um einen vollständigen Ausbrand zu gewährleisten. Eine Vorhersage dieses Umschlagpunktes ist daher für zukünftige Anwendungen von großem Interesse.



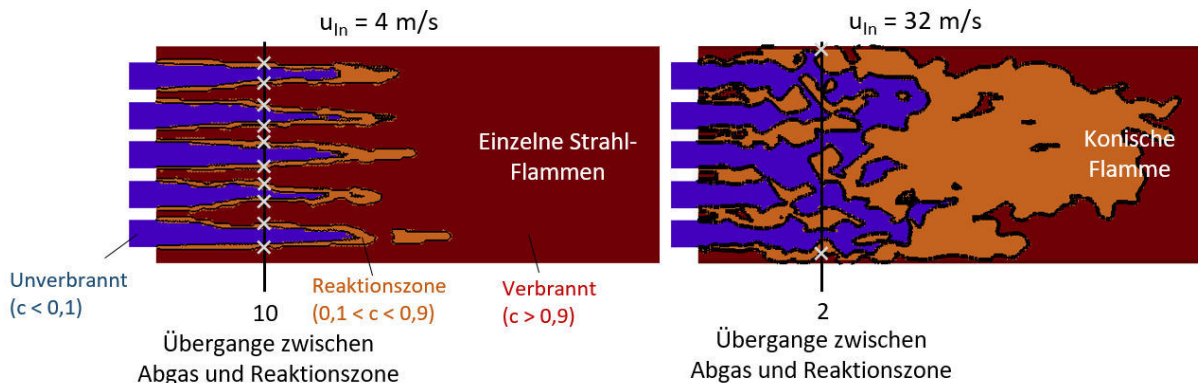
**Abbildung 3:** Verteilung der zeitlich gemittelten Reaktionsrate bei den beiden Flammenformen

### Bestimmung der Flammenform

Zur genaueren Untersuchung des Flammenumschlages wurden Simulationen der drei Düsen unter Erhöhung des Gesamtvolumenstroms bei konstanter Luftzahl durchgeführt. Es wurde zunächst eine niedrige Geschwindigkeit eingestellt, bei der sich einzelne Strahlflammen ausbilden, woraufhin die Geschwindigkeit schrittweise alle 0,04 s um  $\Delta U$  (je nach Betriebspunkt zwischen 3 und 5 m/s) erhöht wurde. Die zum jeweiligen Zeitpunkt vorliegende Flammenform wurde anhand von Schnittbildern der Verteilung des Reaktionsfortschrittes automatisiert bestimmt. Da die simulierte Zeitspanne konstanter Geschwindigkeit nicht hinreichend für eine aussagekräftige zeitliche Mittelung der berechneten Felder ist, wurde die Flammenform anhand momentaner Verteilungen des Reaktionsfortschrittes bestimmt.

Zur Bestimmung der Flammenform wurde die Verteilung der Abgaszonen herangezogen. Bei der Flammenform der einzelnen Strahlflammen ist jede einzelne Flamme von Abgas umgeben, wodurch sich auf radialen Linien in der Brennkammer viele Übergänge zwischen Abgas und Reaktionszone ergeben. Im Gegensatz dazu breitet sich bei der konischen Flamme die Reaktionszone über nahezu den gesamten Radius der Brennkammer aus und die Abgaszonen werden aus dem Zentrum an die Wand gedrückt. Aus diesem Grund wird auf radialen Linien jeweils nur ein Übergang von Abgas zu Reaktionszone an jeder Wand festgestellt. Die Anzahl der radialen Abgas-Reaktionszonen-Übergänge kann daher als Indikator für die Flammenform genutzt werden. Eine exemplarische Auswertung der Flammenform mit der Düse D3 ist in **Abbildung 4** für zwei verschiedene Zeitpunkte während der Durchsatzenerhöhung abgebildet. Für die Auswertung wurden diese Schnittbilder zunächst anhand des

Reaktionsfortschrittes in drei Gebiete unterteilt: unverbranntes Frischgas ( $c < 0,1$ ), Reaktionszone ( $0,1 < c < 0,9$ ) und Abgas ( $c > 0,9$ ). Eine radiale Auswertelinie ist in den beiden Bildern jeweils als schwarze Linie eingezeichnet, in der die Übergänge zwischen Abgas und Reaktionszone gezählt werden. Im Falle einzelner Strahlflammen (linkes Bild) ergeben sich pro Strahlflamme zwei Übergänge, was für diese Düse 10 Übergänge ergibt. Bei einer gemeinsamen konischen Flamme (rechtes Bild) werden nur noch zwei Übergänge gezählt. Solche Auswertelinien wurden in regelmäßigen axialen Abständen zur Düse, beginnend nach einem Lochdurchmesser bis zum Ende der Flamme ausgewertet. In dieser Untersuchung wurde die Flammenform als Kegelflamme registriert, falls mindestens die Hälfte der ausgewerteten radialen Linien exakt zwei Übergänge aufwies. Für jede Einlassgeschwindigkeit wurde die Flammenform in zehn Momentaufnahmen ermittelt und die dominant vorliegende Flammenform bestimmt. Mit diesem Kriterium konnte für alle untersuchten Luftzahlen und Düsen eindeutig ein kritischer Geschwindigkeitsschritt bestimmt werden, bei dem ein Übergang von Einzelflammen hin zur konischen Flamme erfolgt.



**Abbildung 4:** Beispielhafte Auswertung der Flammenform anhand der Zählung der Übergänge zwischen Abgas (rot) und Reaktionszone (orange)

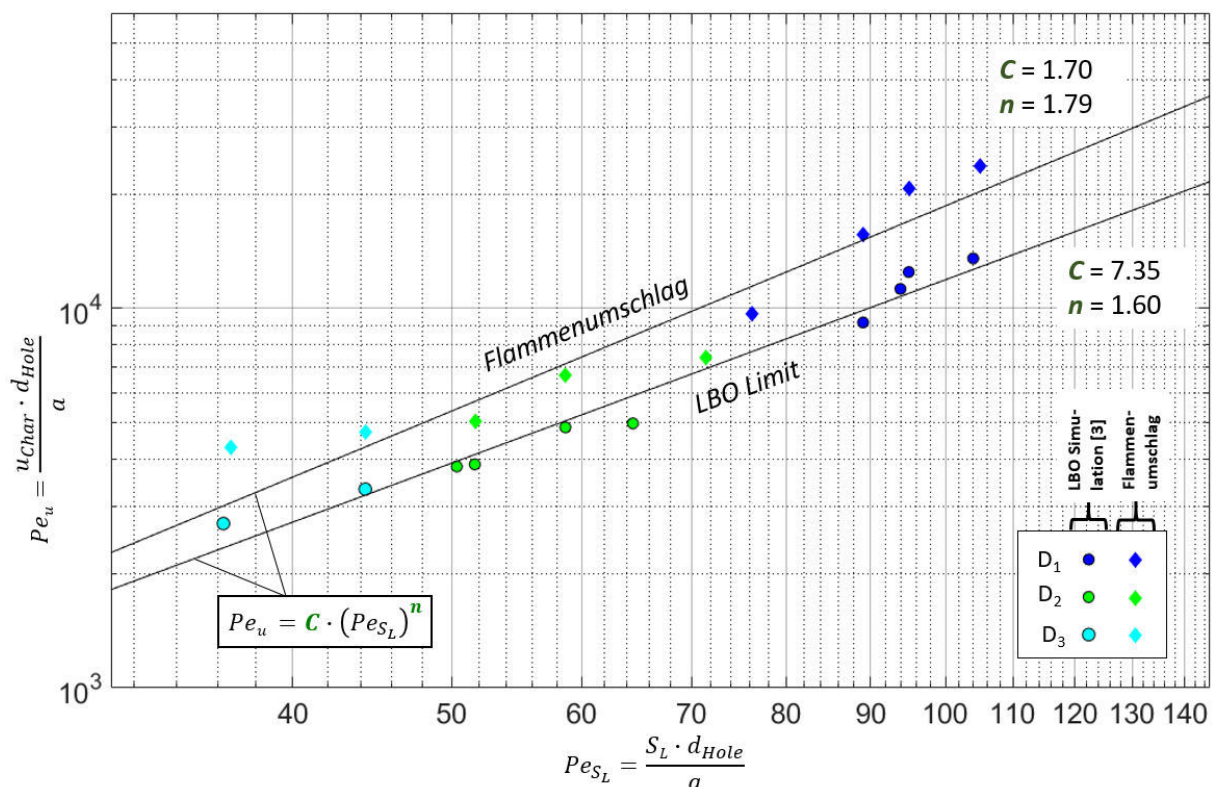
Die im vorherigen Abschnitt beschriebene Auswertung wurde für alle drei Düsen und für eine Vielzahl von Betriebsbedingungen durchgeführt. Da die Flammencharakteristiken der beiden Flammentypen sehr unterschiedlich sind, ist es von großem Interesse mithilfe einer einfachen Korrelation eine Vorhersage des Umschlagpunktes zu ermöglichen. Der Umschlag der einzelnen Strahlflammen zur konischen Flamme erfolgt, sobald sich die einzelnen Strahlflammen nicht mehr stabilisieren können und die Flamme im Anschluss „abgehoben“ in Form der gemeinsamen Kegelflamme brennt. Deshalb wird vorgeschlagen für die Vorhersage des Umschlagpunktes ein Kriterium analog zum Abblasen einer Einzelflamme zu nutzen, wie es z.B. durch das Peclet-Kriterium gegeben ist, das bereits erfolgreich für die Vorhersage des globalen Abblasens des Matrixbrenners genutzt wurde [1]. Das Peclet-Kriterium beruht auf zwei Peclet-Zahlen, die mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten gebildet werden und ist durch folgende Gleichung beschrieben:

$$Pe_u = C \cdot Pe_{S_L}^n \quad (5)$$

$$\left( \frac{u_{char} \cdot d_{Hole}}{a} \right) = C \cdot \left( \frac{S_L \cdot d_{Hole}}{a} \right)^n \quad (6)$$

Hierbei beschreiben  $C$  und  $n$  brennerspezifische Parameter,  $a$  die Temperaturleitfähigkeit und  $S_L$  die laminare Flammengeschwindigkeit. Für die Nutzung des Peclet-Kriteriums muss eine für das Phänomen relevante, charakteristische Geschwindigkeit  $u_{char}$  gewählt werden. Im Falle des globalen Abblasens wurde in unserer vorangegangenen Veröffentlichung vorgeschlagen, hierfür die volumetrische Brennkammer-geschwindigkeit  $u_{char} = u_{BK} = u_{in} / DR$  zu nutzen [3], da kurz vor dem globalen Ausblasen eine lange konische Flamme vorliegt, die weit in die Brennkammer reicht und das Abblasen an der Vorderkante beginnt. Im Falle des Umschlagpunktes der Flammenform, dem „Abblasen“ der einzelnen Strahlflammen, ist die volumetrische Brennkammergeschwindigkeit keine sinnvolle charakteristische Geschwindigkeit, da die einzelnen Strahlflammen nahe der Düse brennen, in dem die

Querschnittserweiterung zur Brennkammer noch keine dominante Rolle spielt. Daher wird hier zur Beschreibung des Umschlagpunktes als charakteristische Geschwindigkeit die volumetrische Lochgeschwindigkeit  $u_{char} = u_{In}$  gewählt. Mithilfe der charakteristischen Geschwindigkeit können die zuvor bestimmten Umschlagpunkte in einem Peclet-Diagramm dargestellt werden. In **Abbildung 5** sind dazu sowohl die in dieser Arbeit numerisch bestimmten Umschlagpunkte als auch die bereits in [3] berichteten numerisch bestimmten globalen Abblasepunkte in einem Peclet-Diagramm zusammengefasst, wobei die individuellen charakteristischen Geschwindigkeiten genutzt wurden. Zunächst ist zu erkennen, dass die Umschlagpunkte sehr gut als Potenzabhängigkeit mithilfe einer Linie im Diagramm approximiert werden können, was zeigt, dass das Peclet-Kriterium hierfür anwendbar ist. Die angepassten Peclet-Linien für die Umschlagpunkte und für das globale Abblasen sind als Linien eingezeichnet. Es ist zu sehen, dass beide Kurven eine ähnliche Steigung im Diagramm und damit eine ähnliche Potenzabhängigkeit aufweisen. Weiterhin ist zu sehen, dass die Umschlagpunkte bei höheren  $Pe_u$  Werte liegen, was bedeutet, dass die einzelnen Strahlflammen, bezogen auf ihre charakteristische Geschwindigkeit, stabiler als die Kegelflammen sind. Dies ist zu erwarten, da die Strahlflammen, vergleichbar zu frei brennenden Strahlflammen, rezirkulierte Abgase ansaugen können, was zu einer erhöhten Stabilität führt.



**Abbildung 5:** Berechnete Übergänge der Flammenform und globale Abblasepunkte dargestellt in einem Peclet-Diagramm

### Fazit

In dieser Arbeit wurde der Flammenumschlag vor der Abblasegrenze in einem Matrixbrenner bei verschiedenen Betriebsbedingungen und Düsen untersucht. Hierzu wurden Simulationen mithilfe eines Grobstrukturansatzes und der Verwendung einer chemischen Tabelle durchgeführt. Zeitlich gemittelte Felder der beiden Flammentypen zeigen starke Unterschiede in der Verteilung der Reaktionszonen: Während die Einzelflammen eine lokal konzentrierte Reaktionszone am Ende der Einzelflammen aufzeigen, verteilt sich bei der konischen Flamme die Reaktionszone auf die gesamte Flammenlänge, bildet jedoch auf der Hauptströmungsachse zunächst ein reaktionsfreies Zentrum. Ein Kriterium zur Identifizierung der Flammenform auf Basis der Verteilung der Abgaszonen konnte für eine Vielzahl an Betriebsbedingungen und Düsen zur Bestimmung des Flammenumschlagpunktes verwendet werden. Zur

Vorhersage der Umschlagpunkte wurde ein Korrelationsansatz auf Basis des Peclet-Kriteriums vorgestellt.

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch das Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Union im Rahmen des Projekts TurboReflex unter der Fördervereinbarung Nr. 764545. Weiterhin bedanken sich die Autoren für die Unterstützung durch das Land Baden-Württemberg durch den Hochleistungsrechner bwHPC.



### Literatur

- [1] Bhagwan, R., Schwagerus, A., Weis, C., Habisreuther, P., Zarzalis, N., Huth, M., Koestlin, B., and Dederichs, S., 2019. “*Combustion characteristics of natural gas fueled, premixed turbulent jet flame arrays confined in a hexagonal combustor*”. In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Vol. 58615, American Society of Mechanical Engineers, p. V04AT04A018.
- [2] Weis, C., Schwagerus, A., Faller, S., Bhagwan, R., Habisreuther, P., and Zarzalis, N., 2019. “*Determination of a correlation for predicting lean blow off limits of gaseous fueled, premixed turbulent jet flame arrays enclosed in a hexagonal dump combustor*”. In Proceedings of the European Combustion Meeting 2019, p. S5 AIII 48.
- [3] Schwagerus, A.; Habisreuther, P.; Zarzalis, N., (2021). *Lean-Blow-Out Simulation of Natural Gas Fueled, Premixed Turbulent Jet Flame Arrays with LES and FGM-Modeling*, in Proceedings of the ASME Turbo Expo 2021: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (GT2021), ASME, June 7-11, 2021, Virtual, Online, p. GT2021-58938, (doi:10.1115/GT2021-58938)
- [4] Nicoud, F., and Ducros, F., 1999. “*Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor*”. Flow, turbulence and Combustion, 62(3), pp. 183–200.
- [5] Ben-Nasr, O., Hadjadj, A., Chaudhuri, A., and Shadloo, M., 2017. “*Assessment of subgrid-scale modeling for large eddy simulation of a spatially-evolving compressible turbulent boundary layer*”. Computers & Fluids, 151, pp. 144–158.
- [6] Yilmaz, I., and Davidson, L., 2015. “*Comparison of SGS models in large-eddy simulation for transition to turbulence in Taylor–Green flow*”. In Conference on modelling fluid flow.
- [7] Klein, M., Sadiki, A., and Janicka, J., 2003. “*A digital filter based generation of inflow data for spatially developing direct numerical or large eddy simulations*”. Journal of computational Physics, 186(2), pp. 652–665.
- [8] Van Oijen, J., Donini, A., Bastiaans, R., ten Thije Boonkkamp, J., and De Goey, L., 2016. “*State-of-the-art in premixed combustion modeling using flamelet generated manifolds*”. Progress in Energy and Combustion Science, 57, pp. 30–74.
- [9] Galeazzo, F. C. C., Zhang, F., Zirwes, T., Habisreuther, P., Bockhorn, H., Zarzalis, N., and Trimis, D., 2020. *Implementation of an efficient synthetic inflow turbulence generator in the open-source code openfoam for 3D LES/DNS applications*. 23rd Results and Review Workshop of the HLRS, Oct. 08.-09.
- [10] Smith, G. P., M. Golden, D., Frenklach, M., Moriarty, N. W., Eiteneer, B., Goldenberg, M., and et al., 1999. *GRIMECH 3.0*.
- [11] Wetzal, F., Habisreuther, P., and Zarzalis, N., 2006. “*Numerical investigation of lean blow out of a model gas turbine combustion chamber using a presumed jpdf-reaction model by taking heat loss processes into account*”. In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Vol. 42363, pp. 41–49.
- [12] Habisreuther, P., Philipp, M., Eickhoff, H., and Leuckel, W., 2002. “*2.3 mathematical modeling of turbulent swirling flames*”. High Intensity Combustors-Steady Isobaric Combustion: Final Report of the Collaborative Research Centre 167 ”Hochbelastete Brennräume-Stationäre Gleichdruckverbrennung”, p. 156.



- [13] Philipp, M., Hoffmann, S., Habisreuther, P., Lenze, B., and Eickhoff, H., 1992. “*Experimental and numerical study concerning stabilization of strongly swirling premixed and nonpremixed flames*”. In Symposium (International) on Combustion, Vol. 24, Elsevier, pp. 361–368.
- [14] Liu, F., Guo, H., Smallwood, G., Gülder, Ö., and Matovic, M., 2002. “*A robust and accurate algorithm of the beta-pdf integration and its application to turbulent methane–air diffusion combustion in a gas turbine combustor simulator*”. International journal of thermal sciences, 41(8), pp. 763–772.

## Repository KITopen

Dies ist ein Postprint/begutachtetes Manuskript.

Empfohlene Zitierung:

Schwagerus, A.; Habisreuther, P.; Zarzalis, N.

[Numerische Untersuchung der Flammenform eines vorgemischten, unverdrallten Multijetbrenners.](#)

2021. 30. Deutscher Flammentag, Deutsche Sektion des Combustion Institutes und DVV/VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt Dinkelacker, Friedrich; Pitsch Heinz; Scherer, Viktor (eds.).

doi: [10.5445/IR/1000139413](https://doi.org/10.5445/IR/1000139413)

Zitierung der Originalveröffentlichung:

Schwagerus, A.; Habisreuther, P.; Zarzalis, N.

[Numerische Untersuchung der Flammenform eines vorgemischten, unverdrallten Multijetbrenners.](#)

2021. 30. Deutscher Flammentag, Deutsche Sektion des Combustion Institutes und DVV/VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt Dinkelacker, Friedrich; Pitsch Heinz; Scherer, Viktor (eds.), 919–927.

Lizenzinformationen: [KITopen-Lizenz](#)