

# Zur jüngsten Entwicklung in der Modellierung von turbulenten Verbrennungsprozessen mittels ODT

Tommy Starick<sup>1\*</sup>, Juan A. Medina M.<sup>1</sup>, Marten Klein<sup>1</sup>, Zoltan Jozefik<sup>2</sup> & Heiko Schmidt<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Numerische Strömungs- und Gasdynamik, BTU Cottbus-Senftenberg, Siemens-Halske-Ring 14, 03046 Cottbus, Deutschland

<sup>2</sup>ERC Inc./Air Force Research Lab, Edwards AFB, Ca., USA

\* Tommy.Starick@b-tu.de

b-tu

Brandenburgische  
Technische Universität  
Cottbus - Senftenberg

## One-Dimensional Turbulence (ODT) Modell

ODT ist ein stochastisches und abbildungsbasiertes Turbulenzmodell zur Simulation von turbulenten Strömungen, welches alle Zeit- und Längenskalen der Turbulenz auflöst [2]. In ODT wird das eindimensionale Rechengebiet als gedachte Linie durch das dreidimensionale Strömungsfeld verstanden, welches in Richtung des mittleren Gradienten einer Geschwindigkeit oder anderer skalarer Felder orientiert ist. Die Besonderheit von ODT liegt in der Modellierung der turbulenten Advektion durch stochastisch auftretende Wirbelereignisse (Fig. 1). Die molekulare Diffusion und Reaktionskinetik entlang des ODT-Rechengebietes wird mittels sich zeitlich entwickelnder, deterministischer Erhaltungsgleichungen berücksichtigt und vollständig aufgelöst.

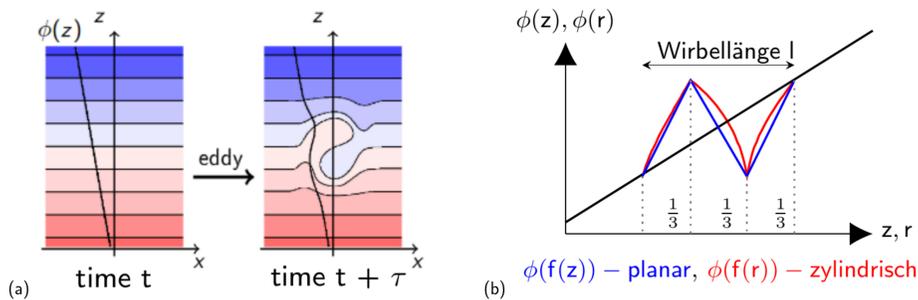


Figure 1: Schematische Darstellung eines Wirbelereignisses (a) und 1-D Modellierung (b) für Planar- und Zylinderkoordinaten.

Jedes Wirbelereignis ist charakterisiert durch die stochastisch ermittelten Größen: Wirbelposition, Wirbelgröße und Zeitpunkt des Wirbelereignisses. Ein Wirbelereignis sorgt für einen maßhaltenden Umordnungsprozess an der festgelegten Wirbelposition, welcher ein Aufsteilen der lokalen Gradienten der Strömungsgrößen zur Folge hat. Der Zeitpunkt für das Auftreten eines Wirbelereignisses wird auf Basis eines Poisson-Prozesses bestimmt. Die Wirbelposition  $z_0$  und Wirbelgröße  $l$  werden mithilfe angenommener Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDFs) ermittelt. Zur Berechnung der Akzeptanzwahrscheinlichkeit eines individuellen Wirbelereignisses in einem gegebenen Abtastzeitintervall wird die Wirbelrate  $\lambda$  für jeden Kandidaten eines Wirbelereignisses berechnet [4].

$$\lambda(l, z_0, \tau) = \frac{1}{l^2 \tau} \sim \frac{C}{l^3} \sqrt{\frac{\Delta E_{kin} - Z E_{vp}}{\rho^2}} \quad (1)$$

Hierbei steht  $\rho$  für die Dichte,  $\Delta E_{kin}$  für die Änderung der kinetischen Energie und  $E_{vp}$  für eine viskose Sanktionierung.  $C$  und  $Z$  sind dimensionslose Modellparameter von ODT, welche zuvor an einer Strömungskonfiguration kalibriert werden. Wirbelereignisse werden in der Zeit der Reihe nach getestet. Wird ein Wirbelereignis akzeptiert und implementiert, werden die deterministischen Diffusions- und Reaktionsgleichungen in der Zeit bis zum Zeitpunkt des Wirbelereignisses (plus dessen nominale Dauer  $\tau$ ) entwickelt.

## Planare Strahldüse

Planare Strahldüsen (Fig. 2) erlauben eine selektive Betrachtung des Mischungsvorgangs von passiven Skalaren (ohne Reaktionen) und ermöglichen so eine akkuratere Validierung von ODT [3].

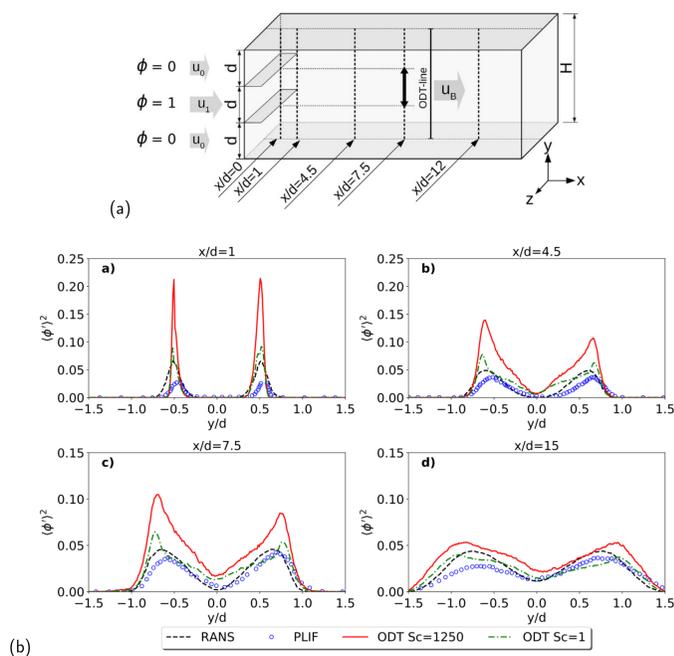


Figure 2: Schematischer Aufbau der betrachteten planaren Strahldüse (a) und Varianz des passiven Skalars  $\langle \phi \rangle^2$  für vier stromabwärts gelegenen Positionen (b) [3]. Reprinted from Publication Chemical Engineering Science, 204, M. Klein, Ch. Zenker, H. Schmidt, Small-scale resolving simulations of the turbulent mixing in confined planar jets using one-dimensional turbulence, 186-202, Copyright (2018), with permission from Elsevier.

## n-Heptan Selbstzündung

Innere motorische Verbrennungsvorgänge von Otto-, Diesel- und HCCI-Motoren stellen besondere Herausforderungen an die Simulation aufgrund der turbulenten Strömung gekoppelt mit chemischen Reaktionen in komplexen dreidimensionalen Brennraumgeometrien. In dem hier untersuchten Fall wird der Einfluss von Temperatur- und Zusammensetzungsinhomogenitäten auf die Selbstzündung von mageren n-Heptan-Gemischen ( $\phi = 0.45$ ) in einem geschlossenen System mittels ODT untersucht. Fig. 3 zeigt den Vergleich der zeitlichen Verläufe für Druck und Wärmefreisetzungsrate von DNS-Resultaten von Luong et al. [5] und örtlich und Ensemble-gemittelten ODT-Ergebnissen.

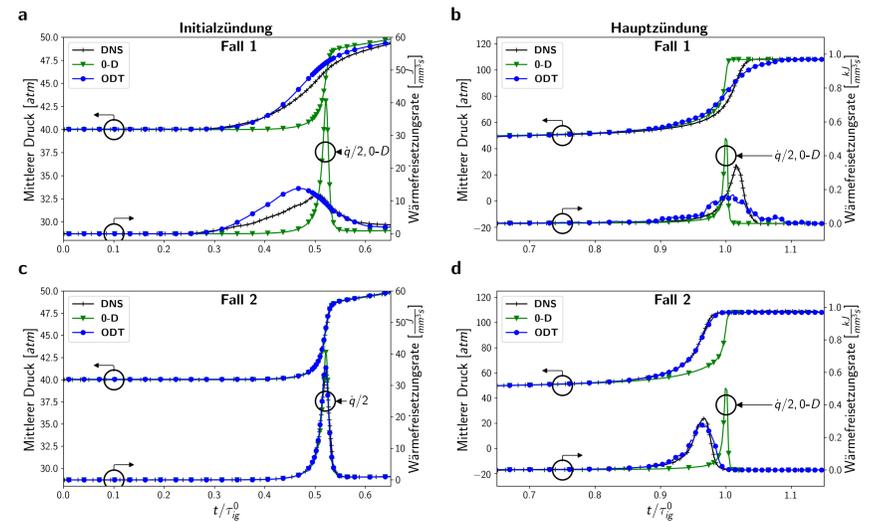


Figure 3: Verläufe der örtlich und Ensemble-gemittelten ODT-Ergebnisse für die Wärmefreisetzungsrate und den Druck. In Fall 1 (oben) wird ein homogenes Gasgemisch mit Temperaturinhomogenitäten betrachtet und in Fall 2 (unten) ein Gasgemisch mit Inhomogenitäten in der chemischen Zusammensetzung und homogener Anfangstemperatur.

## Methan/Luft Freistrahlf Flamme

Bei der Energieumwandlung von chemischer zu thermischer Energie, sei es bei Flugzeugtriebwerken, Gasturbinen oder Heizungssystemen, kommen oftmals Brenner zum Einsatz. In dem untersuchten Fall (Fig. 4) strömt ein kaltes Methan/Luft-Gemisch durch eine Düse in eine Umgebungsströmung aus heißen Verbrennungsgasen, welche durch mehrere Wasserstoff/Luft Flammen erzeugt wird [1]. Die Freistrahlf Flamme demonstriert einen Anwendungsfall von ODT auf offene Systeme, welcher eine Transformation der Zeit in einen stromabwärts befindlichen Position erfordert. Dies ist über eine Advektion des ODT-Rechengebietes in Strömungsrichtung basierend auf einer stetig aktualisierten Hauptströmungsgeschwindigkeit umgesetzt, wodurch auch 2-D Visualisierungen (Fig. 5) der Methan/Luft Freistrahlf Flamme ermöglicht werden [6].

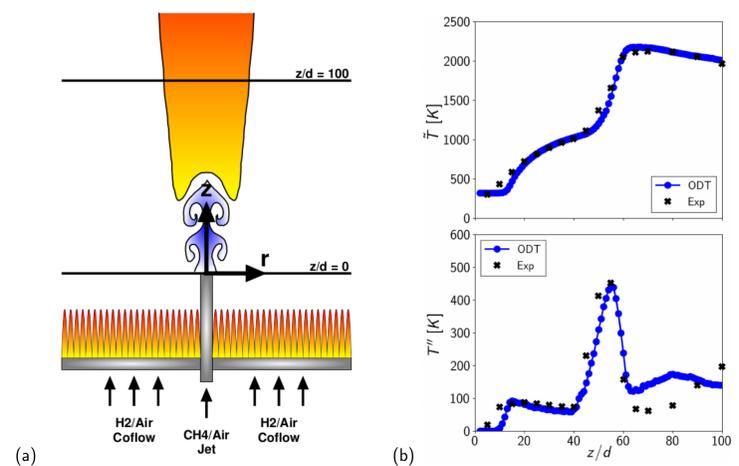


Figure 4: Aufbau der Methan/Luft Freistrahlf Flamme (a) und Vergleich der ODT-Ergebnisse für die Favre-gemittelten Mittellinienprofile für Temperatur und Temperaturfluktuationen mit experimentellen Messungen von Cabra et al. [1] (b).

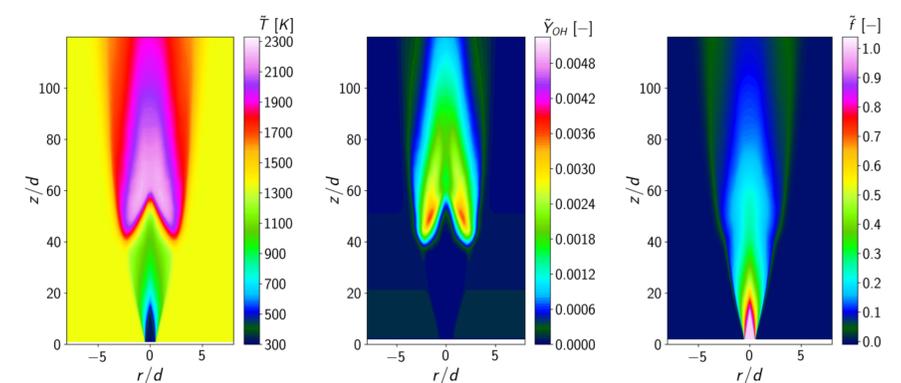


Figure 5: Zweidimensionale Visualisierung der Freistrahlf Flamme für die Favre-gemittelte Temperatur (links), Massenanteil von OH (mittig) und Mischungsanteil (rechts).

## References

- [1] R. Cabra, J.-Y. Chen, R. W. Dibble, A. N. Karpetis, and R. S. Barlow. Lifted methane-air jet flames in a vitiated coflow. *Combustion and Flame*, 143:491–506, 2005.
- [2] A. Kerstein. One-dimensional turbulence: model formulation and application to homogeneous turbulence, shear flows, and buoyant stratified flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 392:277–334, aug 1999.
- [3] M. Klein, C. Zenker, and H. Schmidt. Small-scale resolving simulations of the turbulent mixing in confined planar jets using one-dimensional turbulence. *Chemical Engineering Science*, 204:186–202, 2019.
- [4] D. Lignell, V. Lansinger, J. Medina, A. Kerstein, H. Schmidt, M. Fislter, and M. Oevermann. One-Dimensional Turbulence modeling for cylindrical and spherical flows: model formulation and applications. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, nov 2018.
- [5] M. Luong, G. Yu, T. Lu, S. Chung, and C. S. Yoo. Direct numerical simulations of ignition of a lean n-heptane/air mixture with temperature and composition inhomogeneities relevant to HCCI and SCCI combustion. *Combustion and Flame*, 162:4566–4585, Sept. 2015.
- [6] T. Starick, D. Lignell, and H. Schmidt. One-dimensional turbulence modelling of a lifted methane/air jet flame in a vitiated coflow. *Proceedings of International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, Southampton, UK*, 2019.