

Technologietag ERCOFTAC Süddeutschland

Vorhersage von Verbrennungslärm mittels eines hybriden LES/CAA Ansatzes

F. Flemming, A. Sadiki, J. Janicka

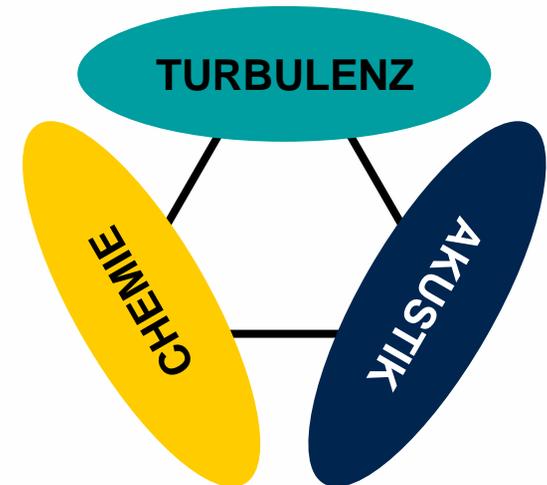
6. Oktober 2006

Stuttgart

- **Motivation**
- **LES/CAA Ansatz**
- **Testfall & Setup**
- **Ergebnisse**
- **Zusammenfassung**

■ Technische Verbrennungssysteme

- Komplexe Systeme
- Niedrige Emissionen
- Stabile Bedingungen
- Kleine Mach Zahlen
- Raue Umgebung für Equipment
- Kosten experimenteller Untersuchungen



■ Numerische Methoden

- Beschränkt auf ein Themenfeld
- Weiterentwicklung instationärer Beschreibungen
- Extrem spezialisierte Codes in der Wissenschaft
- Zunehmende Computerleistung erlaubt mehr Details

➔ **Verschiedene Techniken kombinieren**

- **Motivation**
- **LES/CAA Ansatz**
- **Testfall & Setup**
- **Ergebnisse**
- **Zusammenfassung**

■ Verschiedene Skalen für Verbrennungslärm

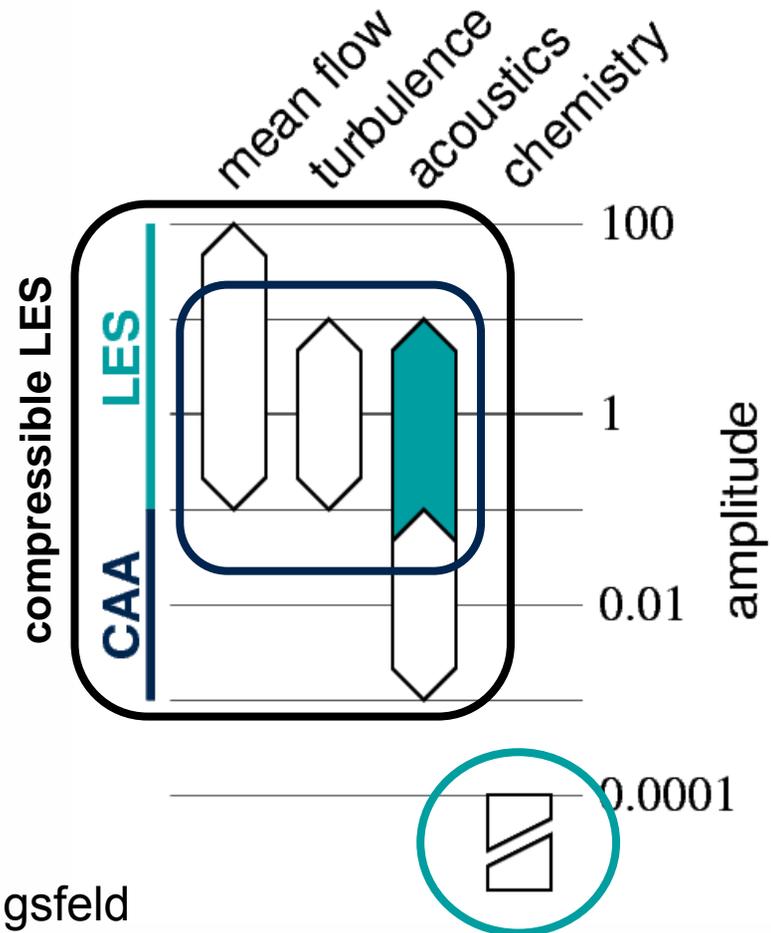
- Mittleres Strömungsfeld
- Turbulenz
- Akustik
- Chemie → immer modelliert

■ Trennung der turbulenten Strömung und Akustik

- LES für das Strömungsfeld
- CAA für die Akustik
- Zwei Sätze von Variablen
- Spezialisierte Techniken

■ Instabilität / Rückkopplung nur mit Modellierung

- Skalen sind nicht mehr klar getrennt
- Einfluss der Akustik auf das Strömungsfeld



Low-Mach LES
FLOWSI



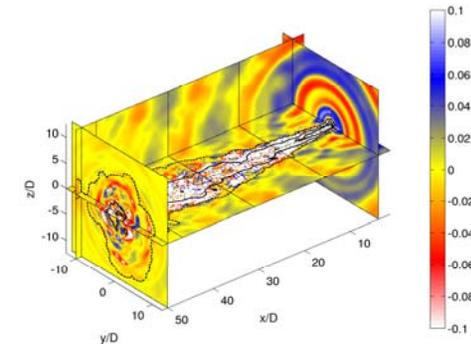
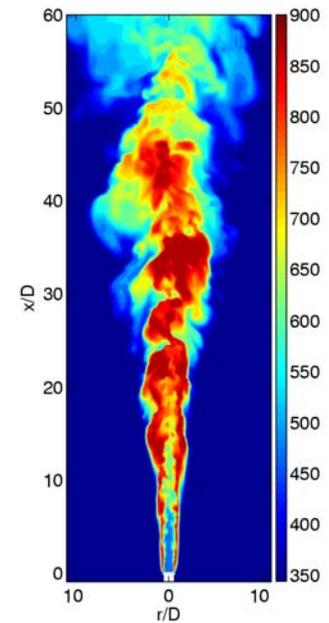
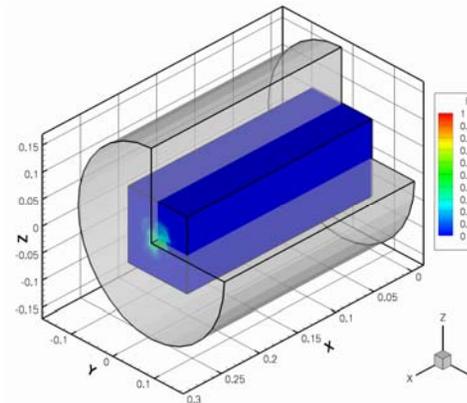
Eingebettete
Quellregion



Wellenausbreitung
*CLAWPACK**

Erweitert mit

- Lokaler Schallgeschwindigkeit
- Akustischen „Quellen“



Erweitert für

- Transiente Strömungseigenschaften
- Akustische „Quellen“ der LES

*<http://www.amath.washington.edu/~claw>

■ Wellengleichung für Druckfluktuationen

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x_i \partial x_i} = c^2 \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (\rho u_i u_j - \tau_{ij}) + c^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{1}{c^2} p - \rho \right)$$

■ Vereinfachungen für Verbrennungslärm

$$\underbrace{\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x_i \partial x_i}}_{\text{CAA}} = \underbrace{-c^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2}}_{\text{LES}}$$

■ Überführung in ein System hyperbolischer Gleichungen erster Ordnung

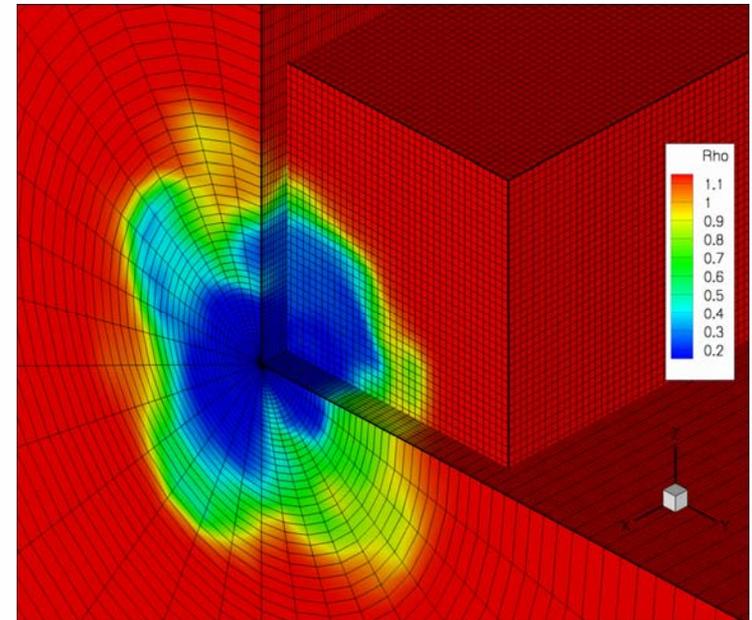
$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \partial p / \partial t \\ -\partial p / \partial x \\ -\partial p / \partial y \\ -\partial p / \partial z \end{bmatrix} \Rightarrow \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x} + \mathbf{B} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial y} + \mathbf{C} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial z} = \mathbf{s}$$

■ Schnittstelle zwischen LES und CAA

- Räumlicher und zeitlicher Abgleich nötig

■ Räumlicher Abgleich

- Kartesisches Gitter innerhalb des zylindrischen LES Gitters
- Erforderliche Größen multilinear interpolieren
- Akustische Quellen berechnen
- CAA Löser verwendet das kartesische Gitter



■ Zeitlicher Abgleich

- Räumlicher Abgleich wird in jedem Zeitschritt durchgeführt
- LES und CAA Zeitschritt ist konstant gehalten

- **Motivation**
- **LES/CAA Ansatz**
- **Testfall & Setup**
- **Ergebnisse**
- **Zusammenfassung**

■ Offene, turbulente, nicht-vorgemischte Jetflamme

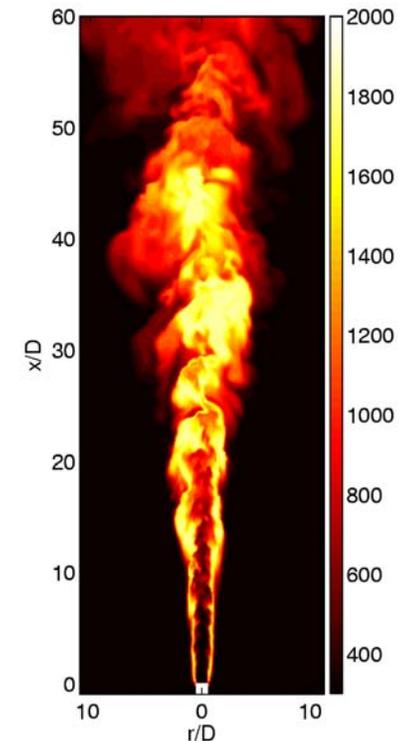
- Benchmark Flamme des TNF Workshop

■ Existierende Messungen

- Strömungsgeschwindigkeiten (LDA)
- Chemische Eigenschaften (Raman/Rayleigh, LIF)
- Schallintensitätsmessungen

■ Eigenschaften

- | | | |
|-----------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| ■ Brennstoff | 50/50 | vol% H ₂ /N ₂ |
| ■ Düsendurchmesser | D = 8 | mm |
| ■ Axiale Jetgeschwindigkeit | U _{jet} = 34.8 | m/s |
| ■ Coflow-Geschwindigkeit | U _{coflow} = 0,2 | m/s |
| ■ Reynolds Zahl | Re = 10000 | |
| ■ Mach Zahl | Ma = 0,1 | |
| ■ Stöch. Flammenlänge | L _{st} = 34 | D |



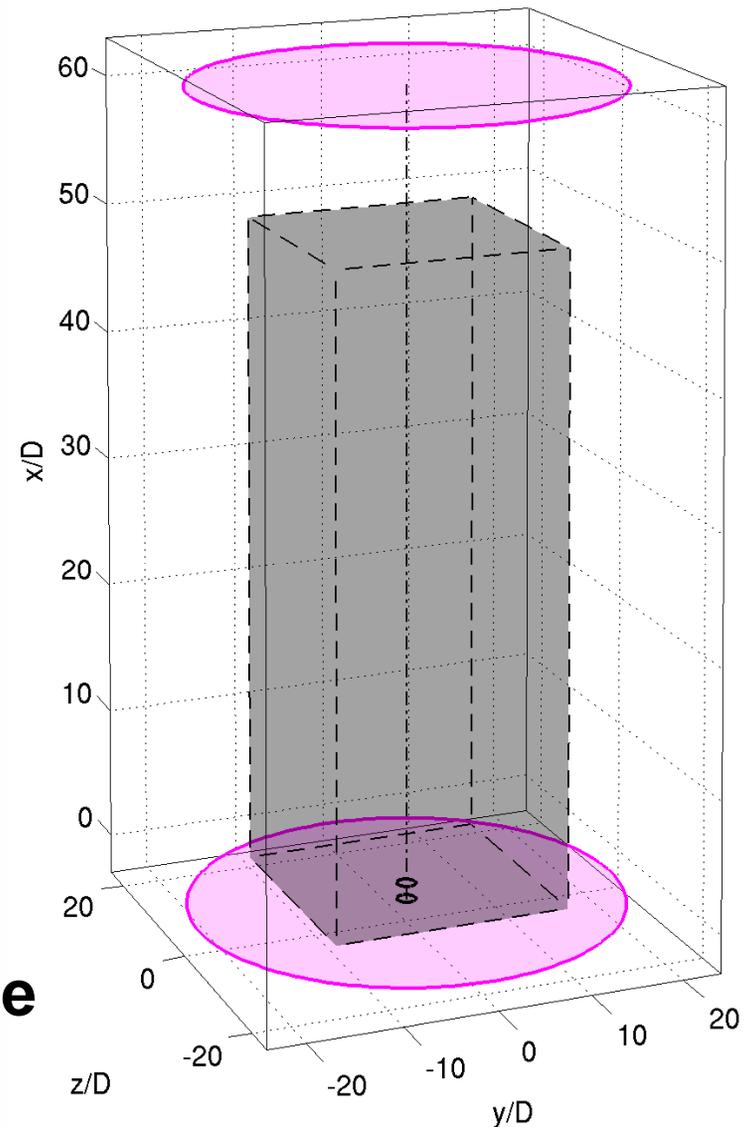
■ LES Setup

- Versetztes zylindrisches Gitter
- Düse in die Domain hineingezogen
- 512 x 32 x 60 Zellen
- 0,5m x 2π x 0,18m
- $\Delta t_{LES} = 1,0 \cdot 10^{-6}s$

■ CAA Setup

- Kartesisches Gitter
- 200 x 100 x 100 Zellen
- 0,4m x 0,2m x 0,2m
- $\Delta x_i = 0,002m$
- $\Delta t_{CAA} = 1,0 \cdot 10^{-6}s$

■ Zeitreihe für unterschiedliche x/D bei r/D = 10



■ Verschiedene Eigenschaften des CAA Setups

- Zeitschrittweite $\Delta t = 1 \cdot 10^{-6} \text{ s}$
- Gitterauflösung $\Delta x_i = 0,002 \text{ m}$
- Umgebungsschallgeschw. $c \approx 350 \text{ m/s}$

■ Frequenzauflösung nach Shannon Kriterium

- Nyquist-Frequenz $f_{\text{Nyq}} = (2 \cdot \Delta t)^{-1} = 500 \text{ kHz}$

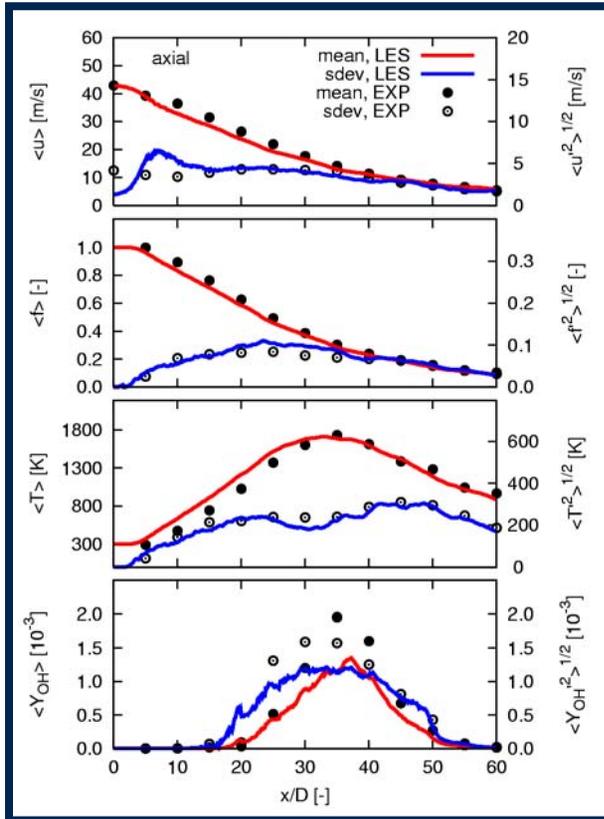
■ Konservative Annahme: 20 Punkte pro Wellenlänge

- Kürzeste Wellenlänge $\lambda = 20 \cdot \Delta x_i = 0,04 \text{ m}$
- Grenzfrequenz $f_{\text{cut}} = c/\lambda = 8,25 \text{ kHz}$

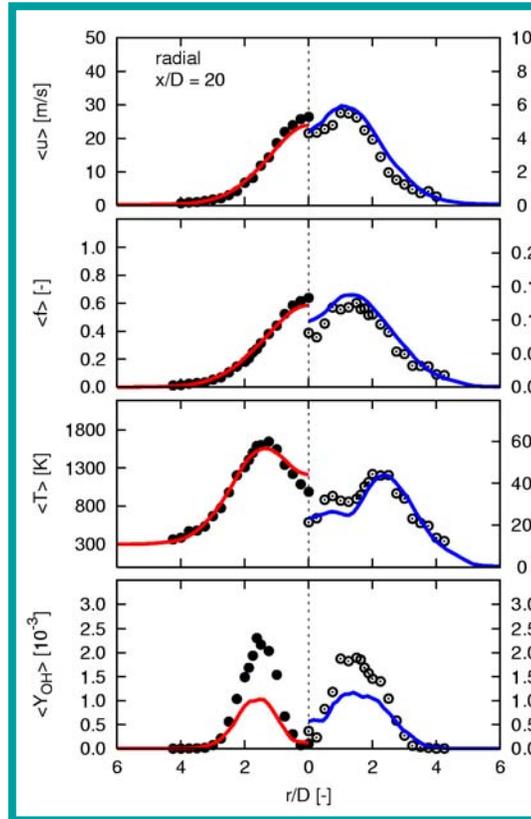
➔ Frequenzauflösung ist ausreichend

- **Motivation**
- **LES/CAA Ansatz**
- **Testfall & Setup**
- **Ergebnisse**
- **Zusammenfassung**

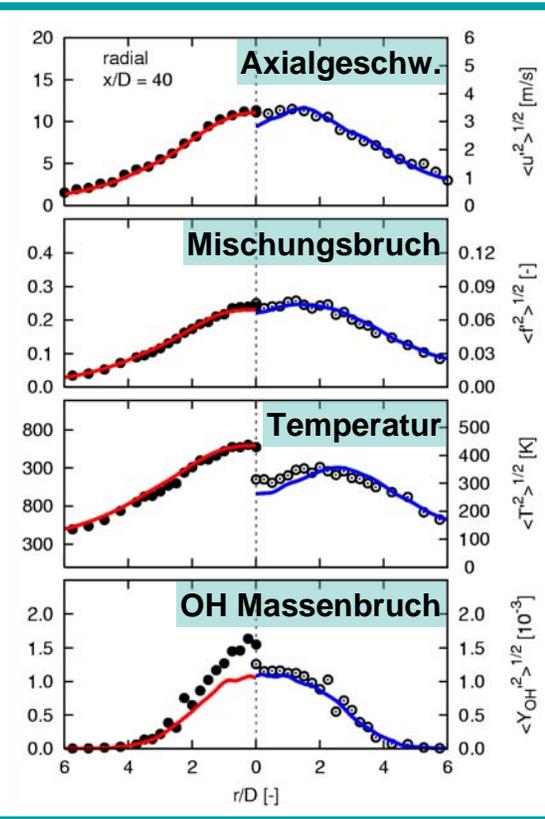
■ Axiale und radiale Profile



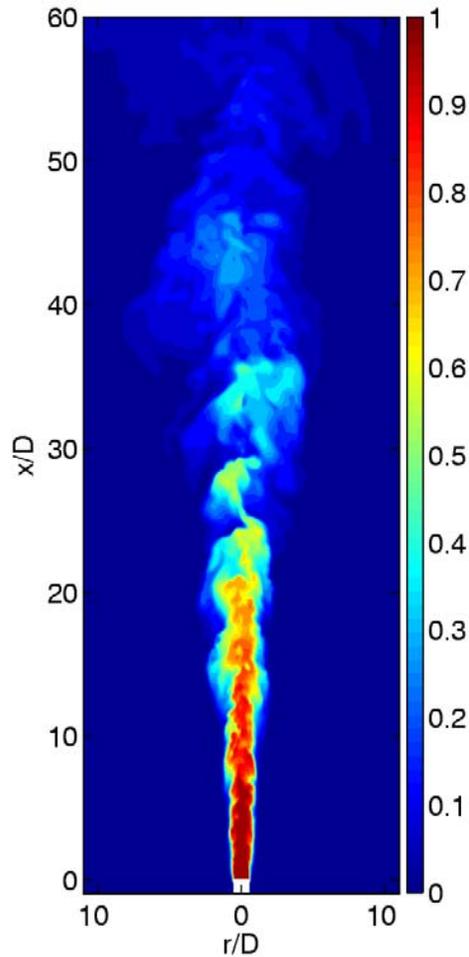
axial



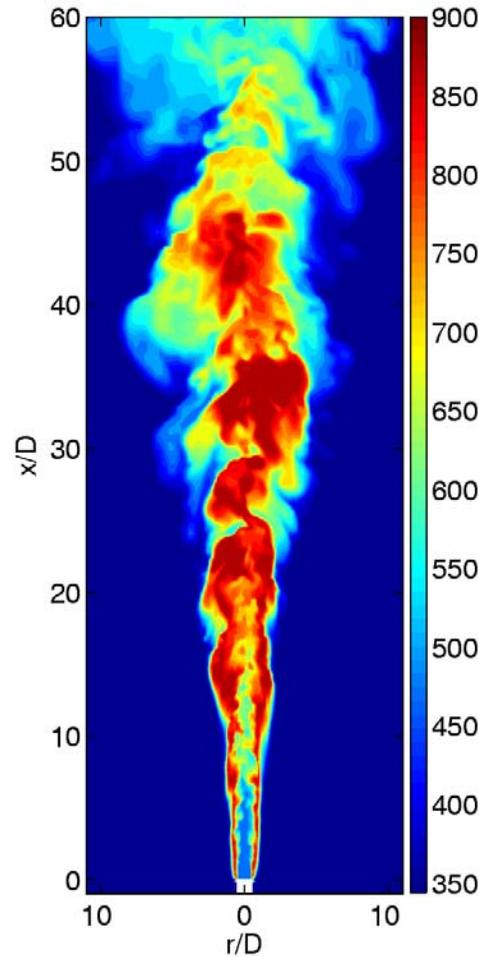
radial
 $x/D = 20$



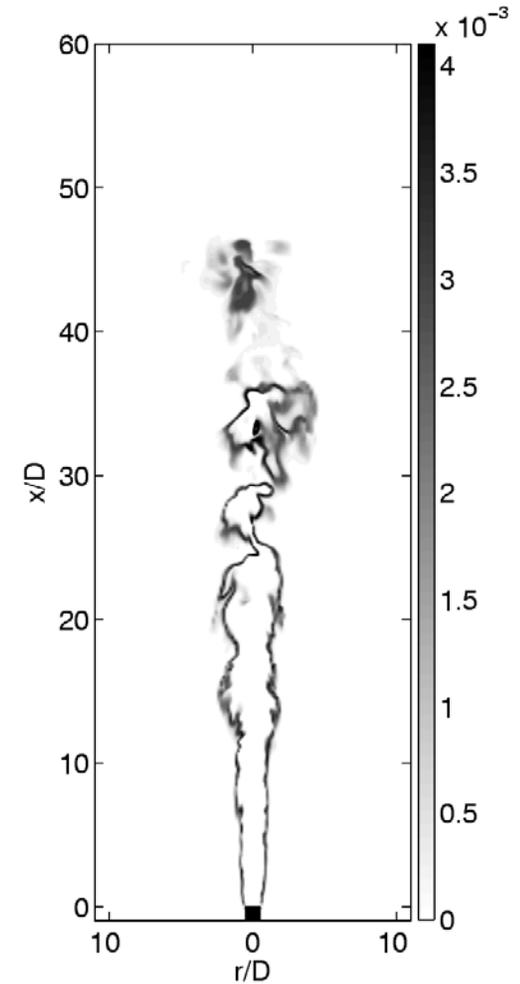
radial
 $x/D = 40$



Mischungsbruch [-]



Schallgeschw. [m/s]



Massenbruch OH [-]

Starke Quellen

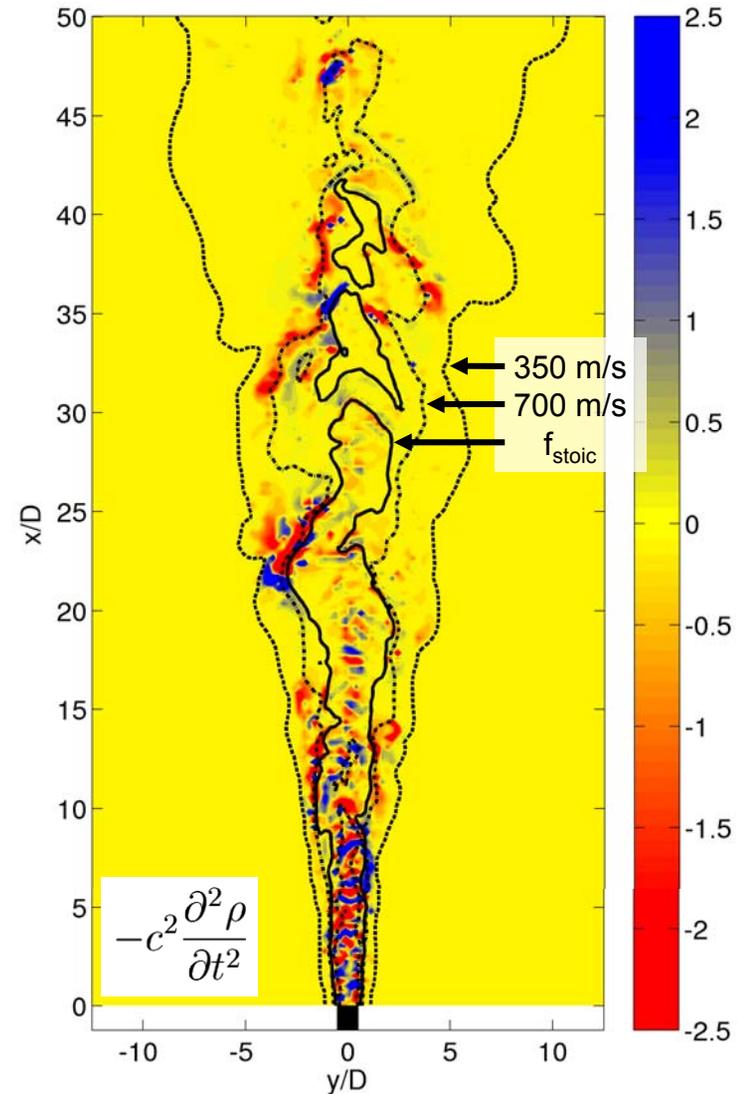
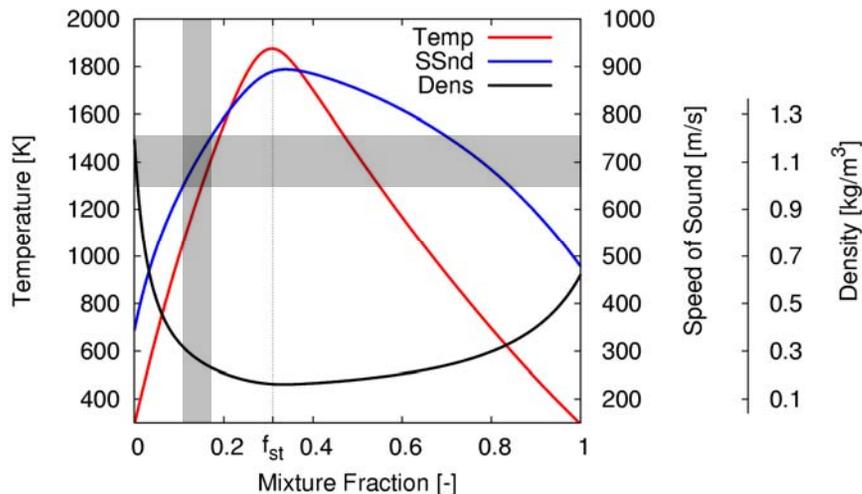
Stromauf:

→ Große Dichtefluktuationen in der Umgebung der Düse

Stromab:

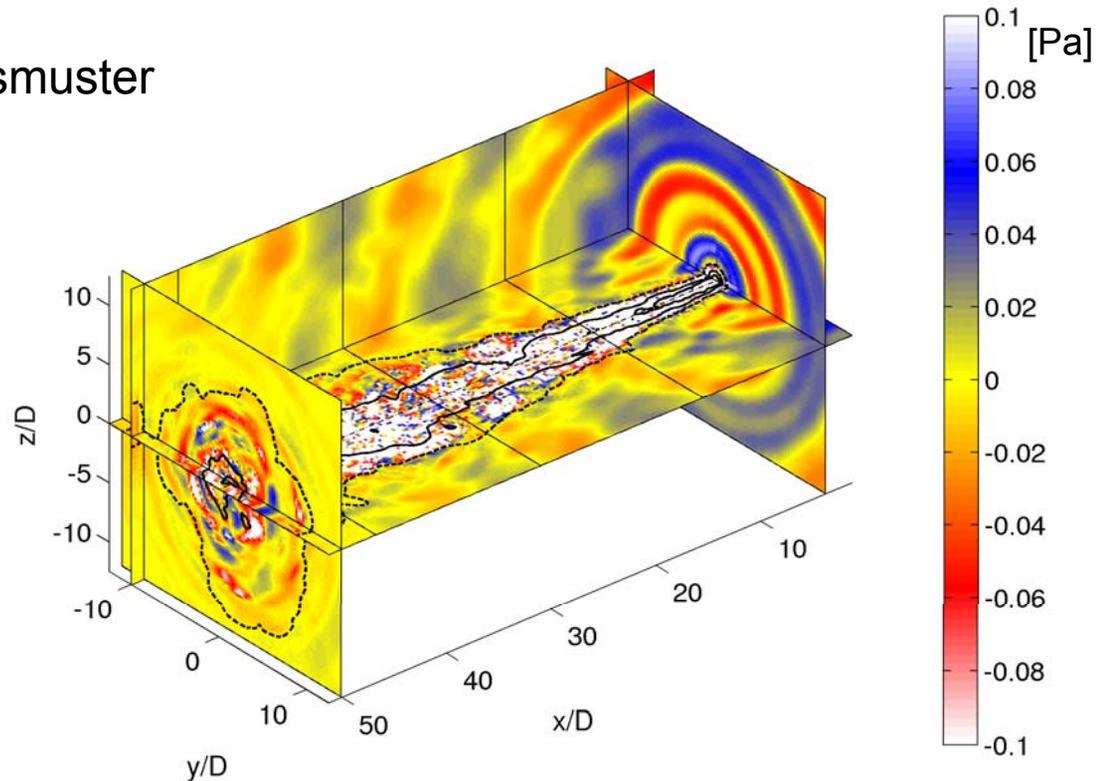
→ Bei magerer Mischung
→ Große Dichtegradienten

$$dp/dt = dp/df \cdot df/dt$$



■ Akustisches Druckfeld

- Stärkster Lärm stammt in der Düsengegend
- Radiales Ausbreitungsmuster um die Achse
- Unkorrelierter Lärm stromab der Flamme
- Phasenunterschiede in axialer Richtung bei konstantem Radius

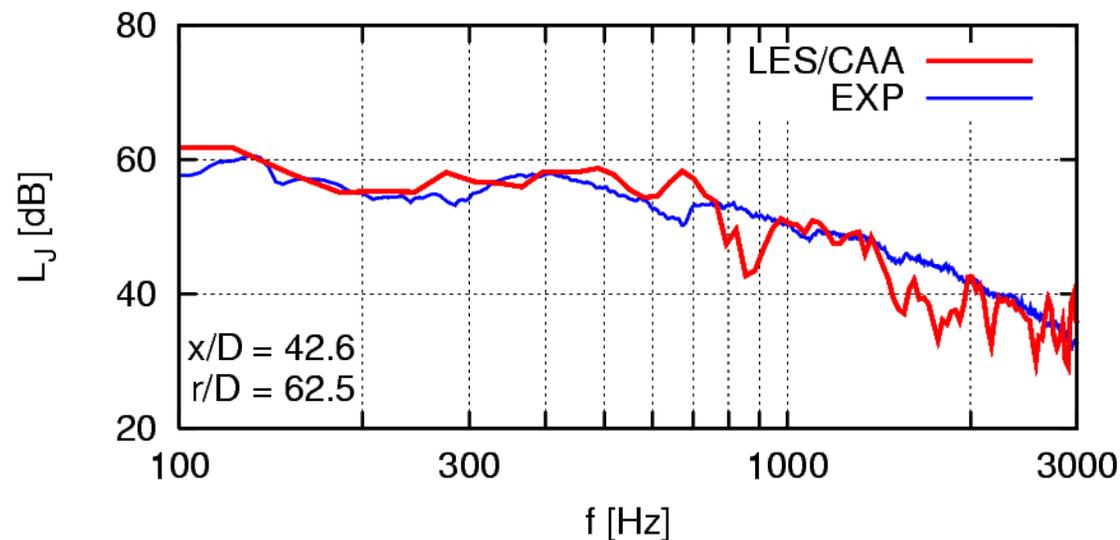


■ Vergleich der Schallintensität

- FFT mit 2^{14} Samples über die Zeitreihen
- Schalldruckspektrum umgerechnet in Schallintensität

$$J = \frac{\sigma_p^2}{\rho_0 c_0} \sim \frac{1}{r^2} \quad L_J = 10 \log \left(\frac{J}{10^{-12} [\text{W}/\text{m}^2]} \right)$$

- Skalierung von $r/D = 10 \rightarrow r/D = 62.6$



- **Motivation**
- **LES/CAA Ansatz**
- **Testfall & Setup**
- **Ergebnisse**
- **Zusammenfassung**

- **Zwei etablierte und validierte Tools verknüpft**
 - Kombination einer low-Mach LES und eines Wellenausbreitungsverfahrens zur Beschreibung von Verbrennungslärm im Nahfeld einer offenen, turbulenten, nicht-vorgemischten Flamme
- **LES löst das Strömungsfeld**
 - Gute Übereinstimmung mit experimentellen Messungen
 - Eignung zur Extraktion weiterer Informationen und als Basis zur CAA
- **CAA bestimmt das akustische Druckfeld**
 - Der meiste Lärm wird in Düsennähe erzeugt
 - Gute Übereinstimmung für Frequenzen bis 3000 Hz
- **Ziel: Model zur Beschreibung der Rückkopplung**
 - Thermoakustische Instabilitäten als zukünftiges Ziel
 - Kopplung durch eine Modulation der LES Einstrombedingungen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Danksagung

- **M. Freitag** – grundlegende Parallelisierung von *FLOWSI*
- **A. Nauert** und **R. Piscoya** – Schallintensitätsmessungen
- Finanzielle Unterstützung: DFG – FOR 486 und SFB 568
- Hessischer Hochleistungsrechner (HHLR) an der TU Darmstadt

CLAWPACK – R.J. LeVeque et al., 1994-2006
<http://www.amath.washington.edu/~claw>

FLOWSI – Inst. Energie- und Kraftwerkstechnik
<http://www.ekt.tu-darmstadt.de>

- **Fundamentale Eigenschaften LES → *FLOWSI***
 - Favre gefilterte Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls
 - Low-Mach Annahme → Inkompressibel, aber variable Dichte
 - Mischungsbruchansatz für nicht-vorgemischte Verbrennung
 - Stationäres Flamelet Model mit presumed β -PDF Ansatz
 - Speicherung der Chemietabelle in künstlichen neuronalen Netzen
 - Finite Volumen Ansatz auf einem versetzten zylindrischen Gitter
 - 2. Ordnung im Raum
 - explizites 3. Ordnung low-storage Runge-Kutta in der Zeit
 - CHARM Limiter für den konvektiven Mischungstransport
 - Parallelisiert mit MPI durch ein spezielles Gebietszerlegungsverfahren
 - Einstrombedingungen mittels artifizieller Turbulenz (Klein, 2003)

- **Fundamentale Eigenschaften CAA → CLAWPACK***
 - Genereller Löser für gekoppelte hyperbolische Gleichungssysteme mit variablen Koeffizienten
 - Verwendung 2. Ordnung Godunov Methode im finite Volumen Kontext
 - Äquidistantes kartesisches Gitter
 - 2. Ordnung genau für glatte Lösungen
 - Van Leer Limiter zur Vermeidung von Oszillationen
 - Stückweise konstante Fluid Eigenschaften
→ ideal geeignet zur Kombination mit LES
 - Parallelisiert mit MPI
 - Löser ist in der Literatur ausgiebig validiert und angewendet worden

*<http://www.amath.washington.edu/~claw>

LeVeque, R. J., *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2002