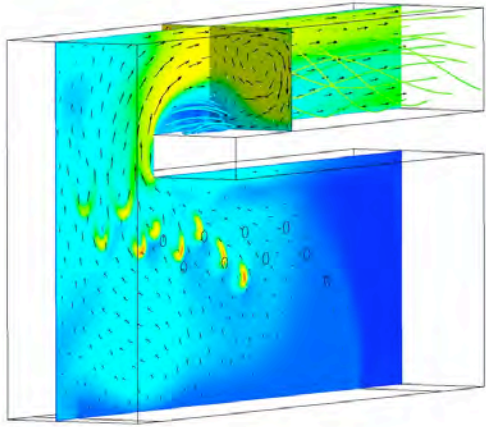


Strömungsoptimierung von Feuerräumen mittels Experiment und Computational Fluid Dynamics (CFD)

Marc-André Baillifard

Thomas Nussbaumer

Hochschule Luzern – Technik & Architektur



1. Einleitung

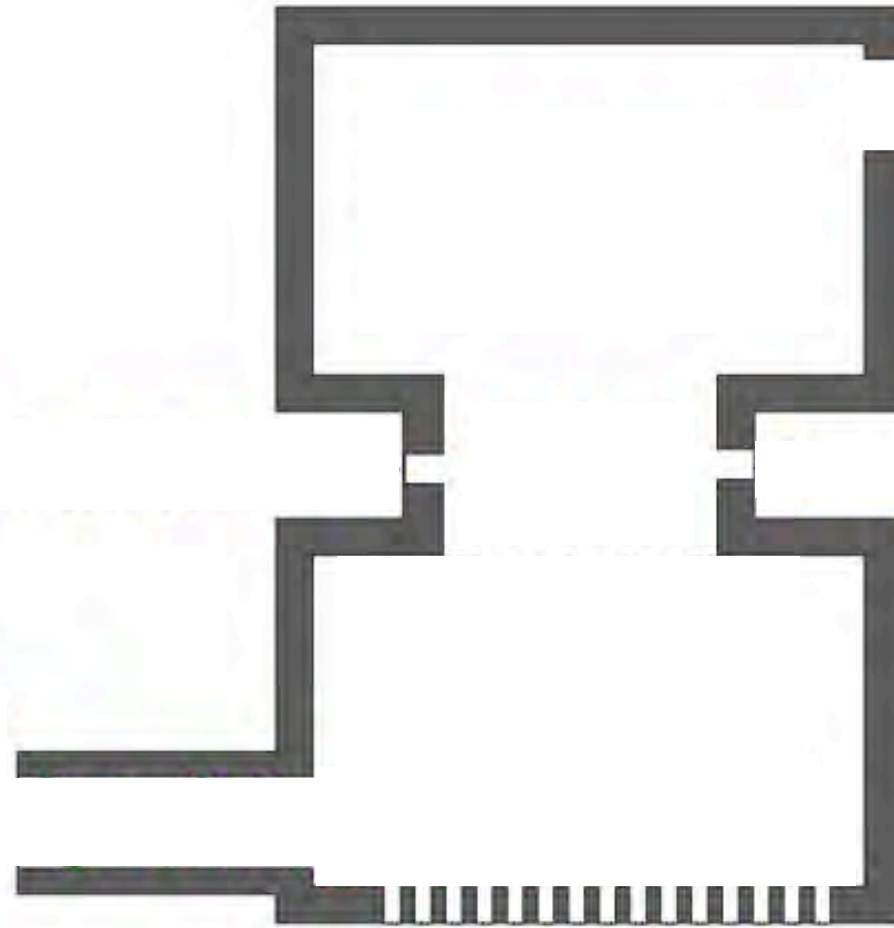
2. CFD

3. Experimente

4. Ergebnisse

5. Schlussfolgerungen

Prozess der Holzverbrennung



Basis

- Für eine gegebene Vergasung wird die Ausbrandqualität durch die Gasphasenreaktionen bestimmt
- Unvollständige Gasphasenreaktionen => CO, H₂, CH₄, C_xH_y, ...

These 1

Vollständige Gasphasenreaktion setzt T T T voraus, also:

- Mischung zwischen Gasen und Verbrennungsluft
- Ausreichende Verweilzeit der Gase nach der Mischung
- Ausreichend hohe Temperatur ($T > 850^{\circ}\text{C}$)

These 2

Holzfeuerungen mit wärmegeämmter Brennkammer erreichen $T > 850^{\circ}$, so dass **Mischung** und **Verweilzeit** entscheidend sind

Ziel 1

Methodik zur Bestimmung der **Strömungsverhältnisse**, darunter **Mischung und Verweilzeitspektrum**

Ziel 2

Optimierung von **Gas/Luft-Mischung** und **Brennraumgeometrien**

Strömungsoptimierung von Feuerräumen

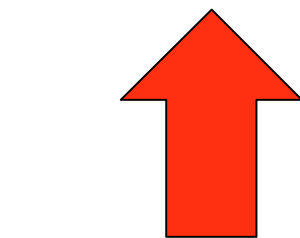
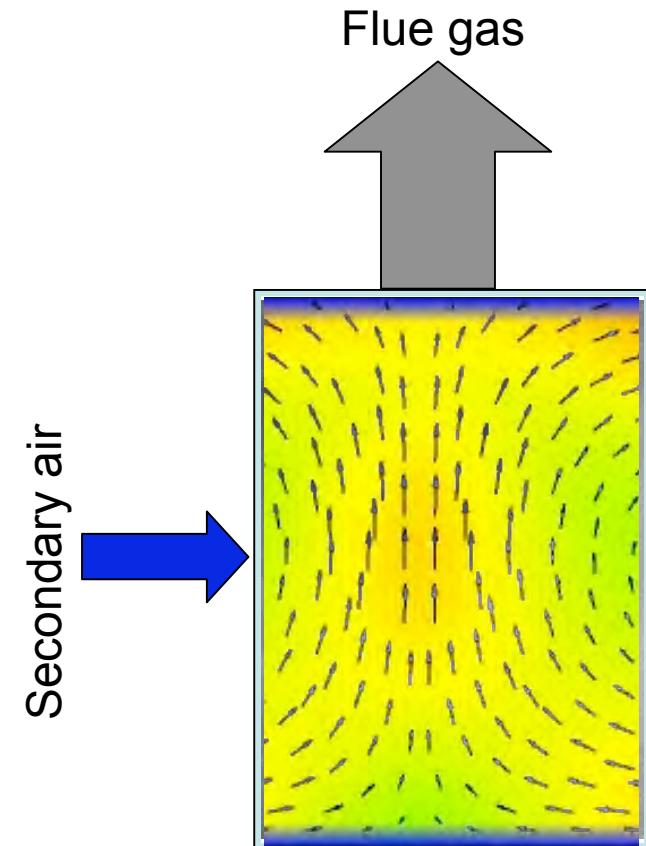
1. Experimente

- a) Reale Situation: Sehr komplex
- b) Modell-Experimente: z.B. Wind-tunnels für Auto- oder Flugzeuge (kalte Strömungen ohne Reaktion)

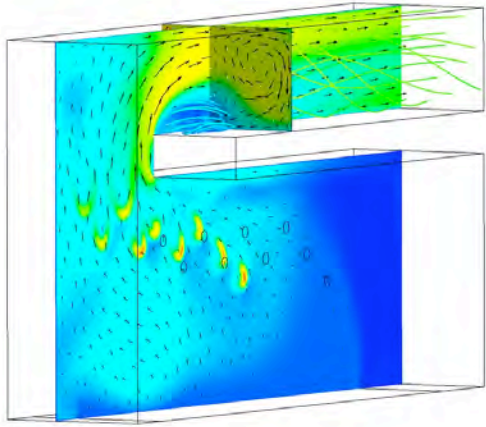
2. Modellierung

- a) **CFD** Computational Fluid Dynamics
- b) **CFRD** mit chemischen **R**eaktionen
Computational **R**eactive Fluid Dynamics

Modellierung und Experimente werden parallel verwendet



Gasification
gases



1. Einleitung



2. CFD

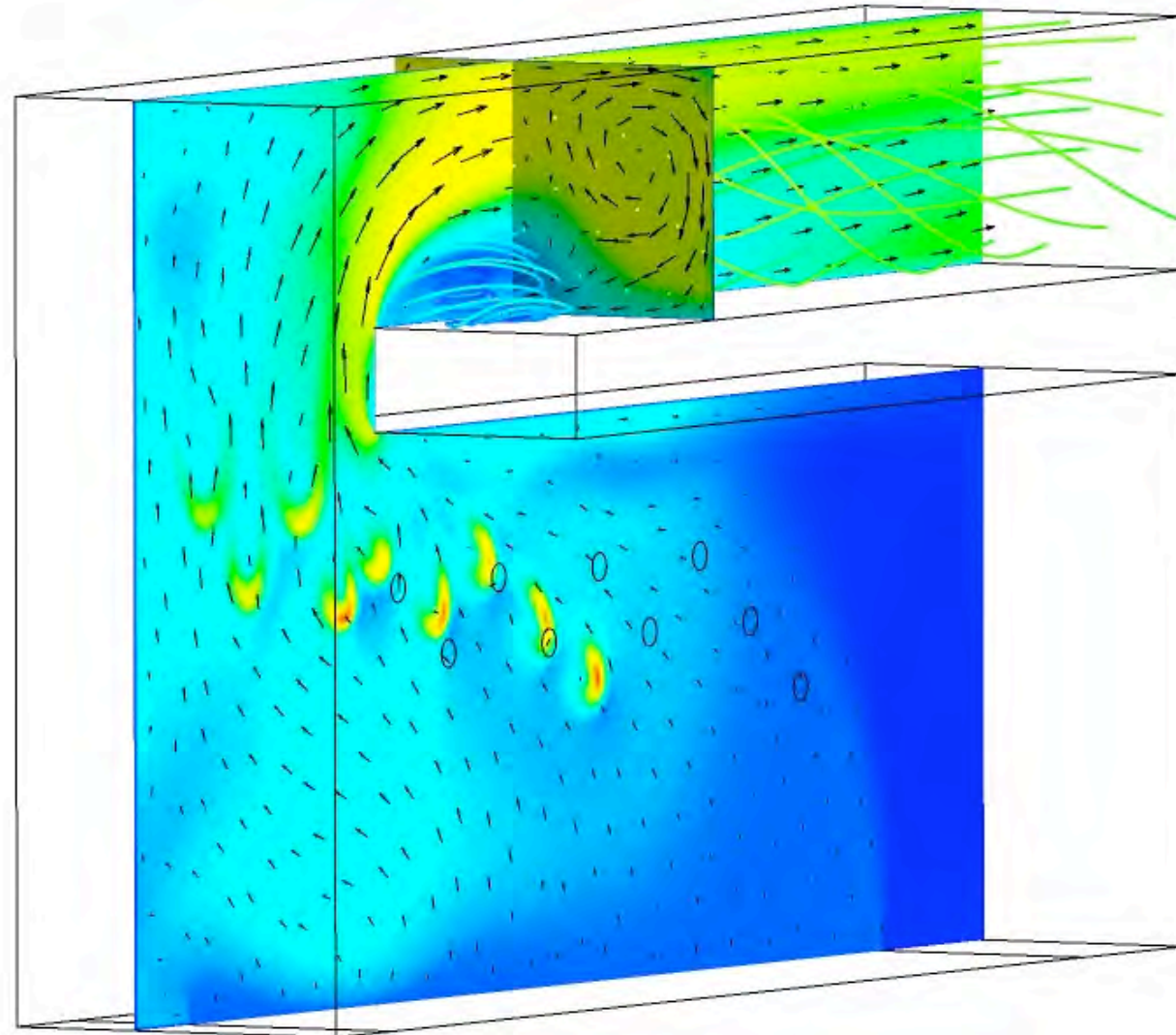
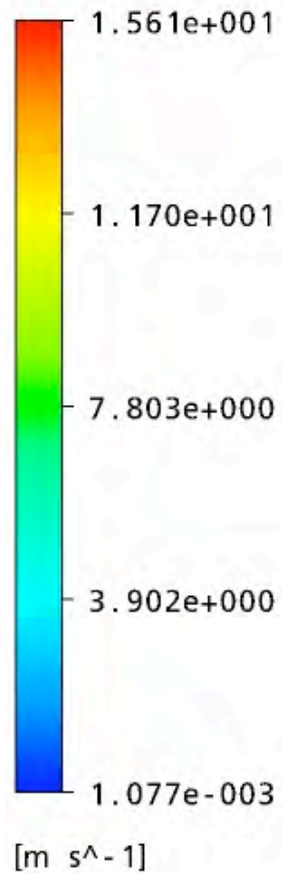
3. Experimente

4. Ergebnisse

5. Schlussfolgerungen

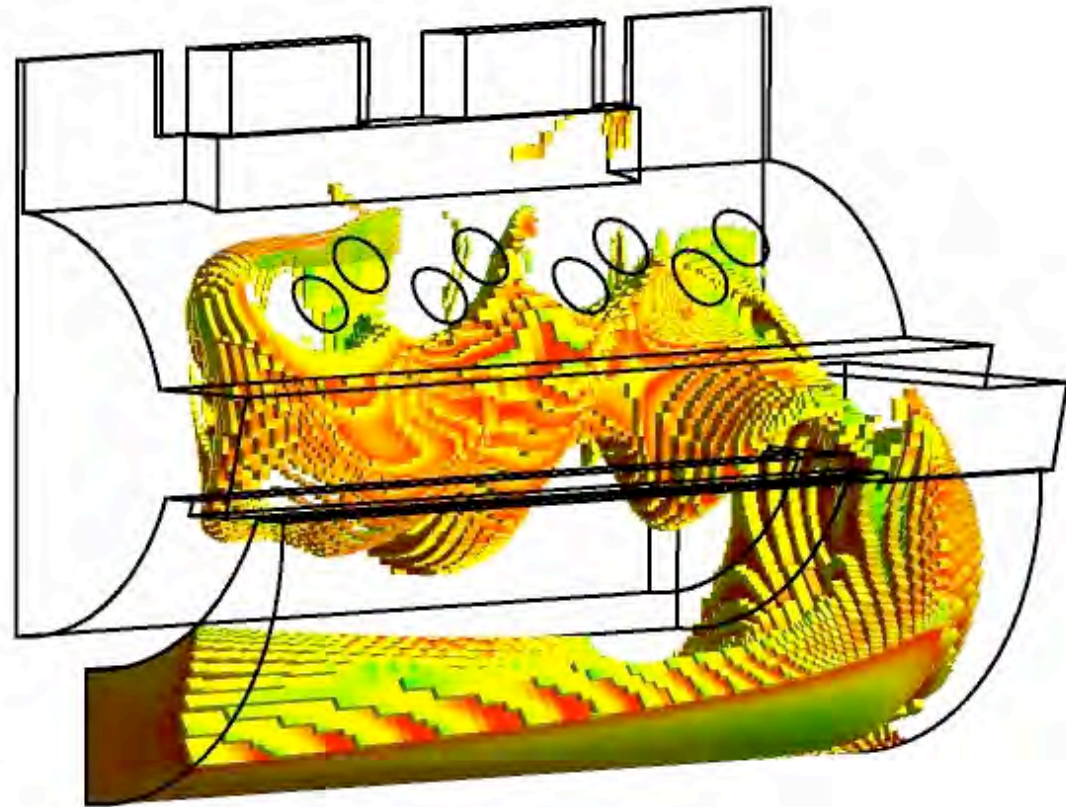
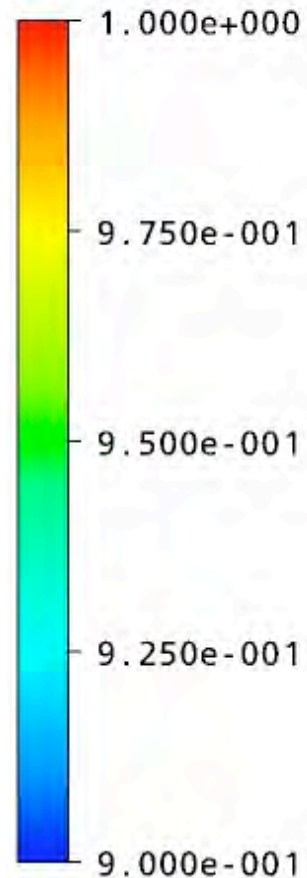
CFD: 1. Strömungsvisualisierung: **Qualitative** Bewertung

Velocity
(Streamline 1 Figure 1)



CFD: 2. Mischungseffizienz: Quantitativer Vergleich

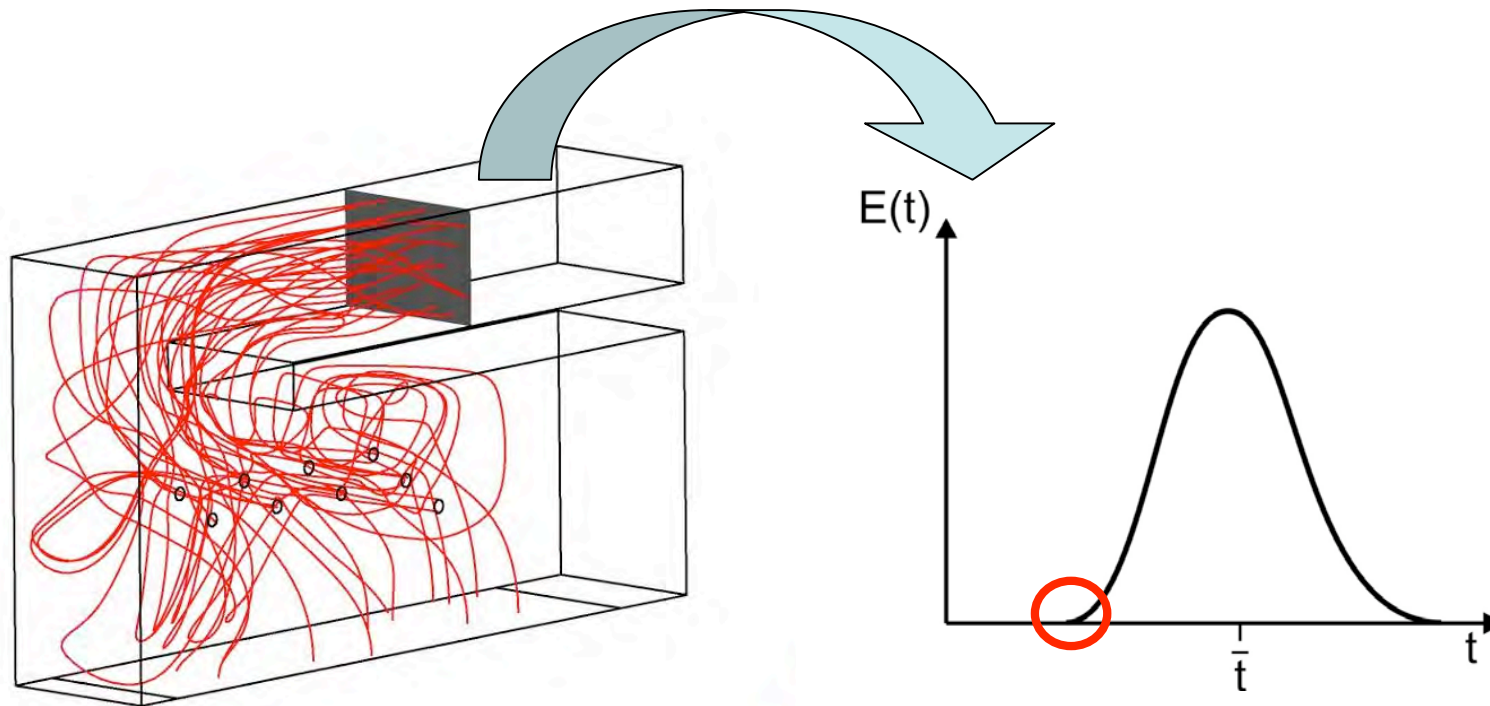
MixingEff
(Volume 1 Figure 7)



Regionen mit Mischungseffizienz > 95%

CFD: 3. Verweilzeitspektrum

- CFD erlaubt das Berechnen von Verweilzeitspektren



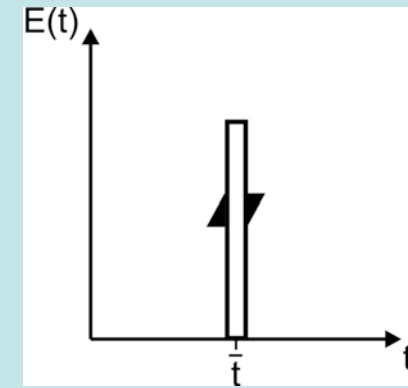
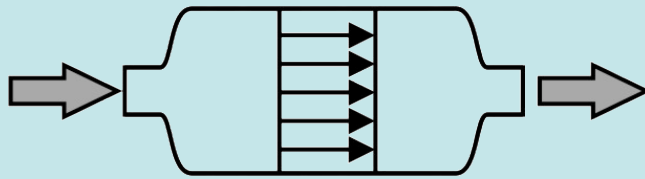
Mit Verweilzeitspektren kann man:

- Geometrien **quantitativ vergleichen**
- **Schwachstellen** von Geometrien erkennen

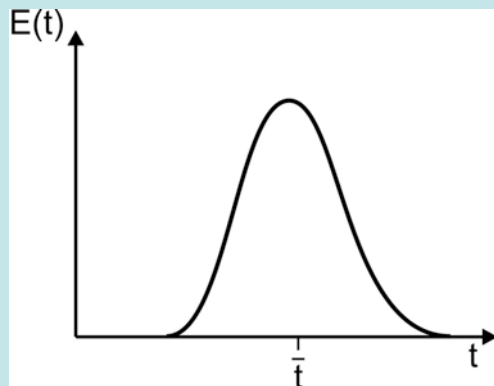
Verweilzeitspektren

Idealfall

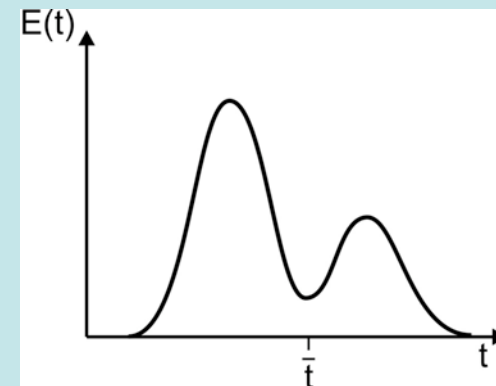
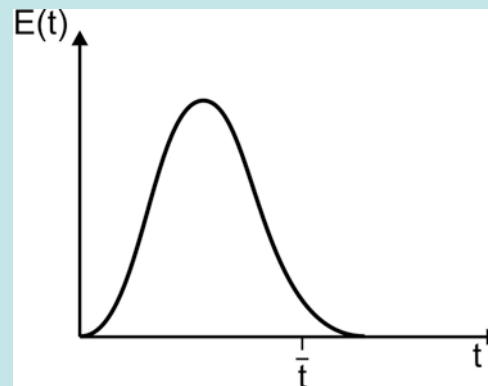
Pfropfenströmungsreaktor PSR



Realität: gut

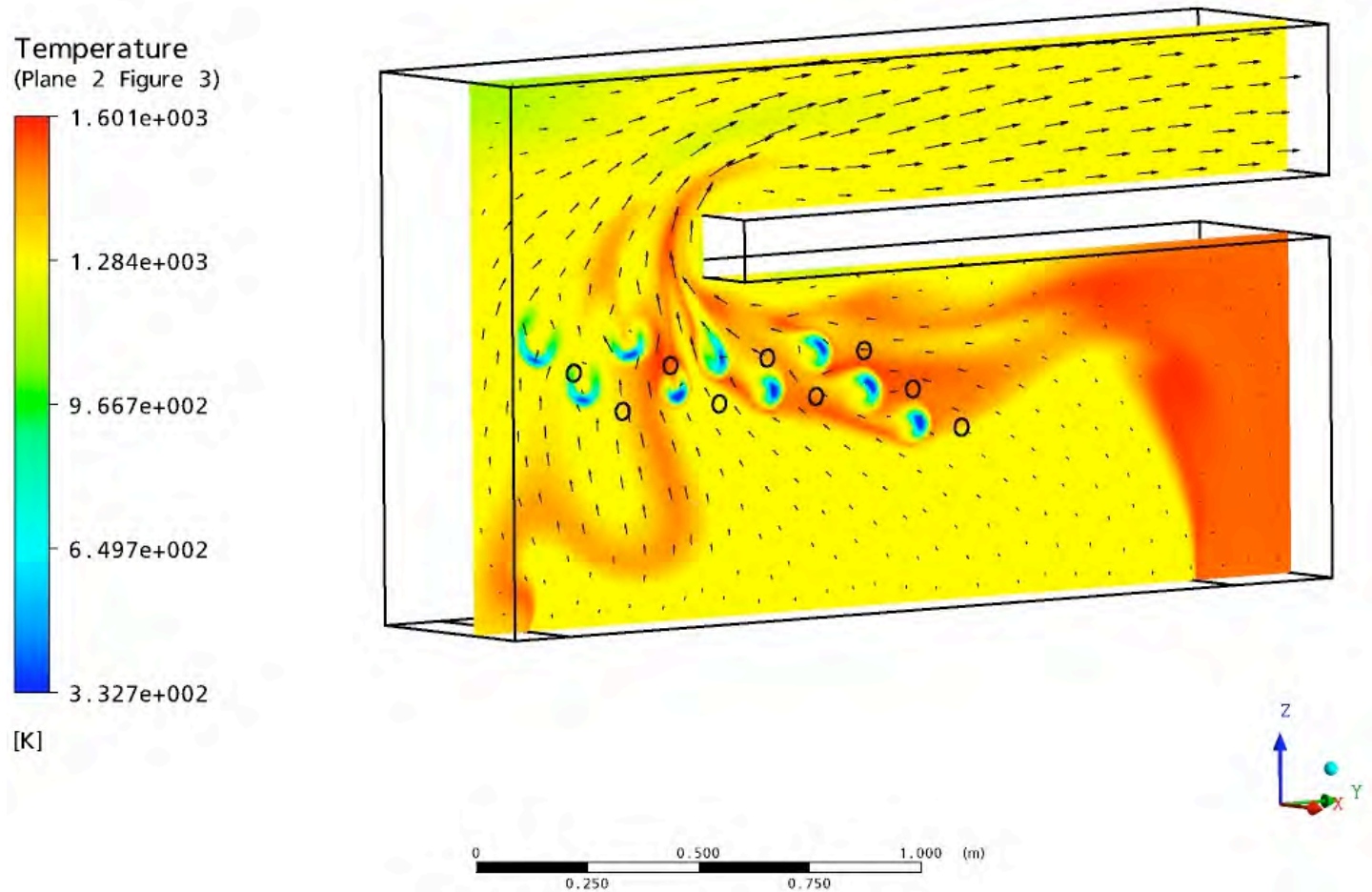


Realität: weniger gut



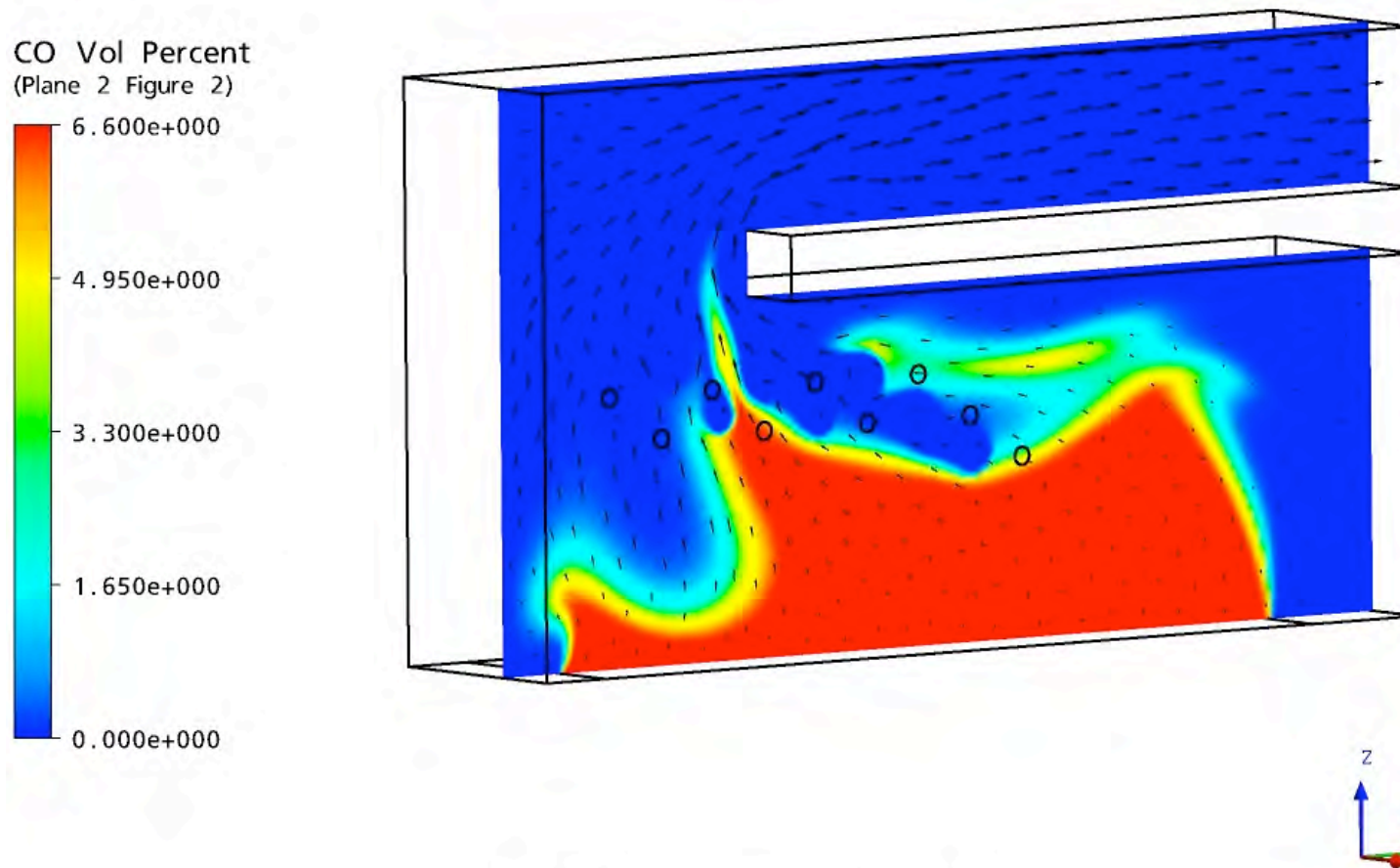
CFRD (I)

CFRD erlaubt die Visualisierung von Temperaturen



CFRD (II)

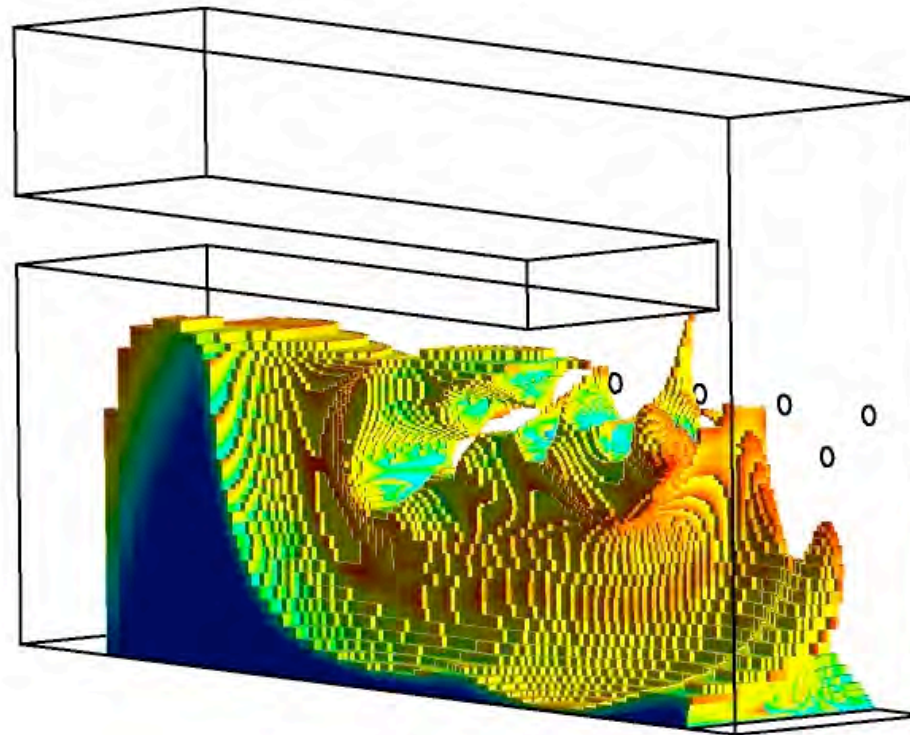
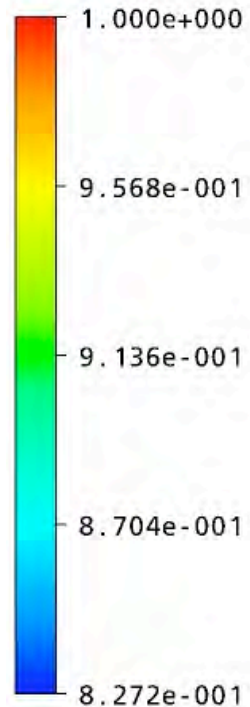
CFRD erlaubt die Visualisierung von Schadstoffen (CO, NO_x)



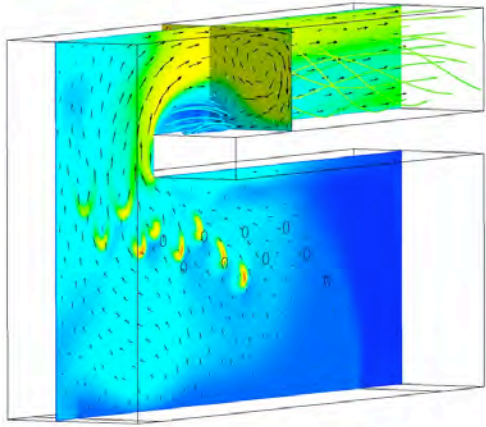
CFRD (III)

CFRD erlaubt die Visualisierung von Regionen mit Sauerstoffmangel

Lambda
(Volume 1 Figure 6)



Regionen mit $\text{Lambda} < 1$



1. Einleitung
2. CFD
- ➔ 3. Experimente
4. Ergebnisse
5. Schlussfolgerungen

Hintergrund für Modellversuche

Modell beschreibt Realität korrekt, sofern „ähnlich“:

1. geometrisch, 2. kinematisch, 3. dynamisch

- **Dimensionsanalyse** ermöglicht die Definition von einer Gruppe von dimensionslosen Kennzahlen

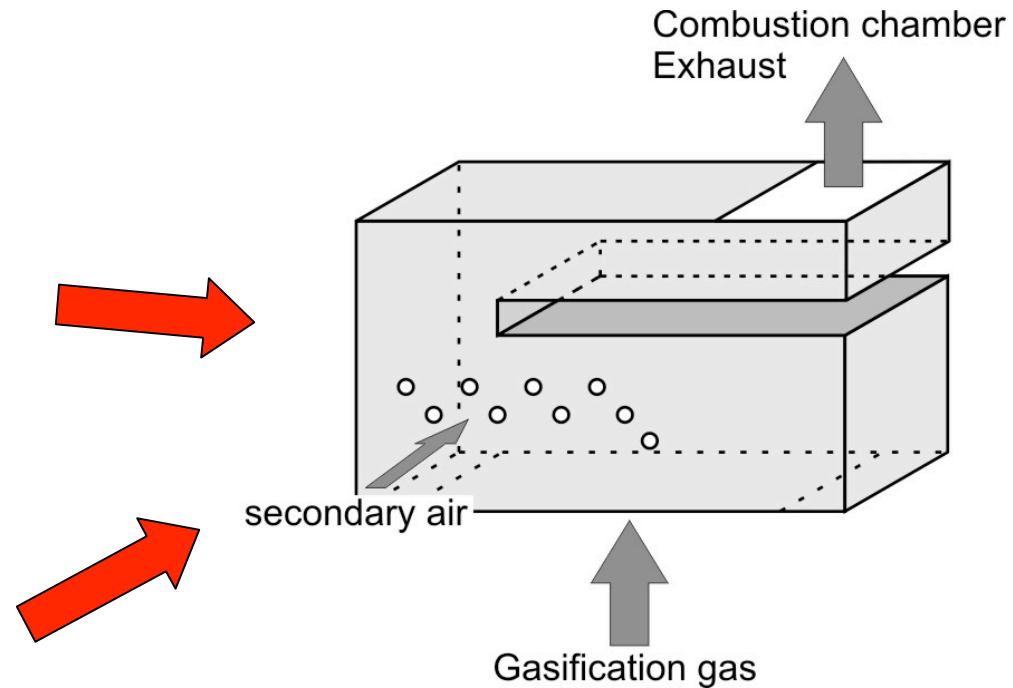
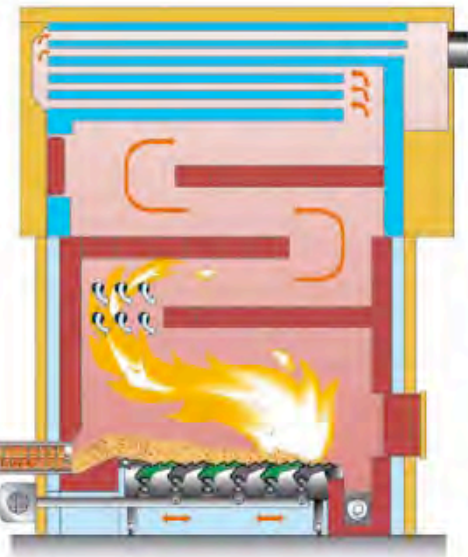
→ Kennzahlen Modell = Kennzahlen Realität

- Die Wahl der dimensionslosen Kennzahlen ist wichtig

Dimensionslose Kennzahlen

Rolle	Name	Definition	Merkmal
Chemie	Damköhler	$Da = \frac{\tau_t}{\tau_c}$	Da $\gg 1$ -> Chemie schnell
Turbulenz & Mischung	Reynolds	$Re = \frac{U \cdot L}{\nu}$	Re $> \sim 2300$ -> Str. turbulent
Diffusion	Schmidt	$Sc = \frac{\nu}{D}$	
Auftrieb	Richardson	$Ri = \frac{g' \cdot H}{U^2}$	Ri $\ll 1$ -> kein Auftrieb
Kompressibilität	Mach	$Ma = \frac{U}{a}$	Ma < 0.3 -> inkompressibel

Beispiel: Modell einer 1 MW Rostfeuerung



Modell-Fluid: Luft, 20°– 80°C

Modell-Massstab: 1 : 5

Modell Aufbau (1)



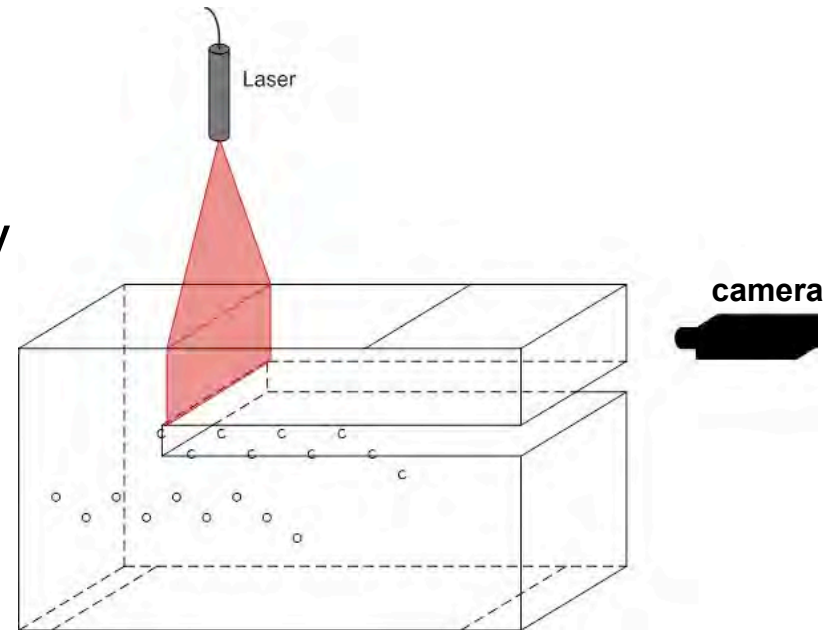
Modell Aufbau (2)



Messmethoden

1. Strömungsvisualisierung mit Tracer (Rauch, Partikel)

- Zugabe von Partikel in einen der zwei Ströme
- Beleuchtung einer Ebene (Laser)
- Bildaufnahme & Analyse qualitativ oder quantitativ mit PIV

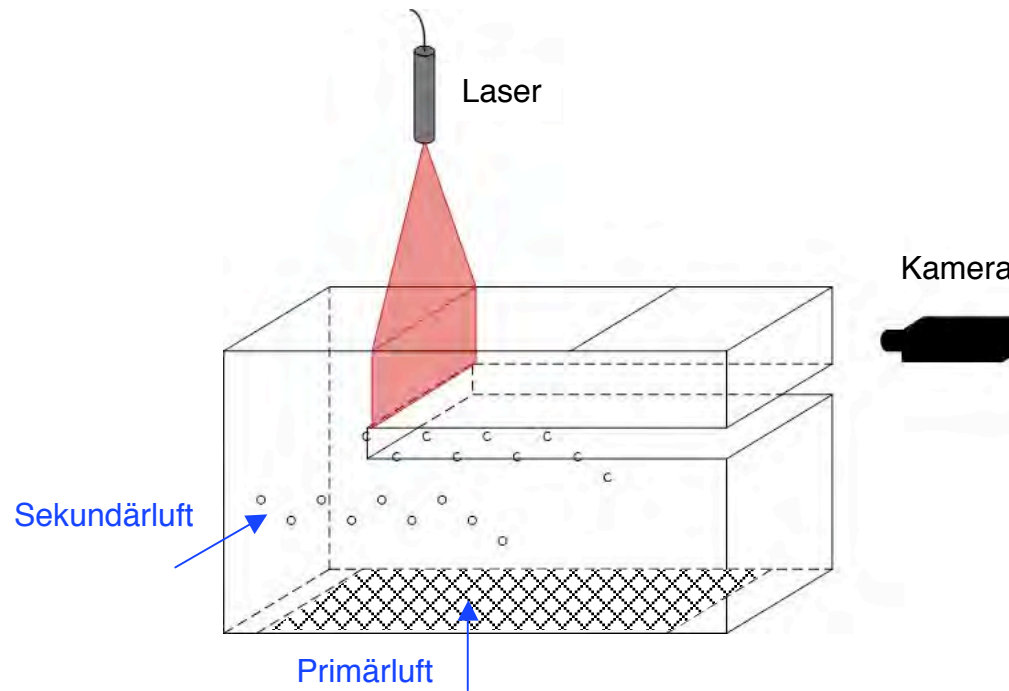


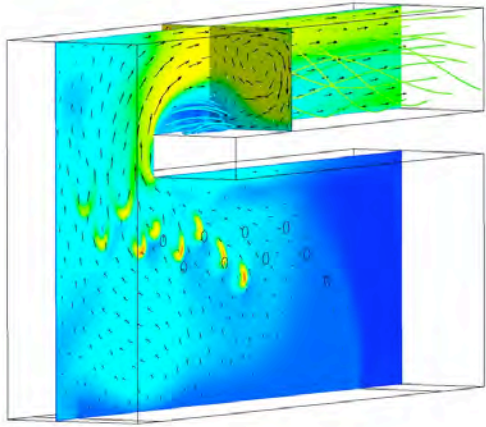
2. Geschwindigkeitsverteilung mit Hitzdraht-Anemometer

3. Mischungsqualität mit Partikeln

- Erster Schritt wie 1
- Bildauswertung: Mischungsgrad ist abhängig von der Partikeldichte

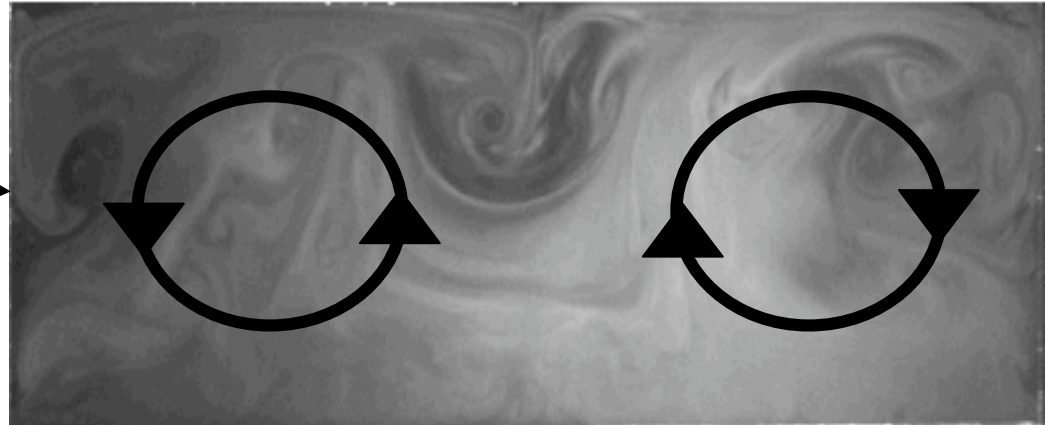
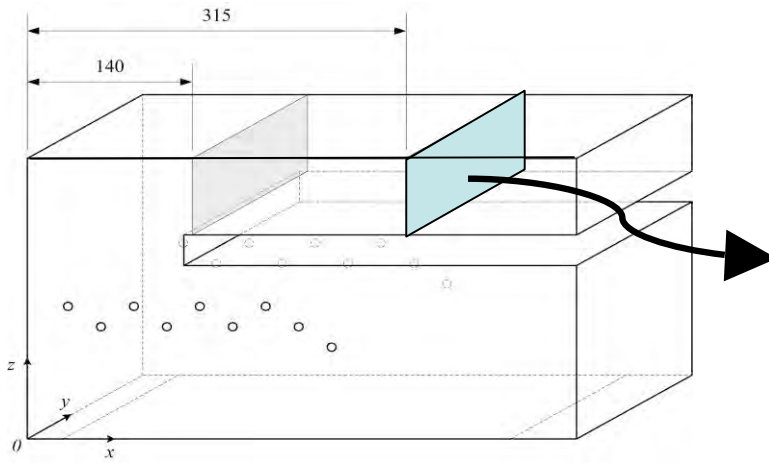
Messmethoden



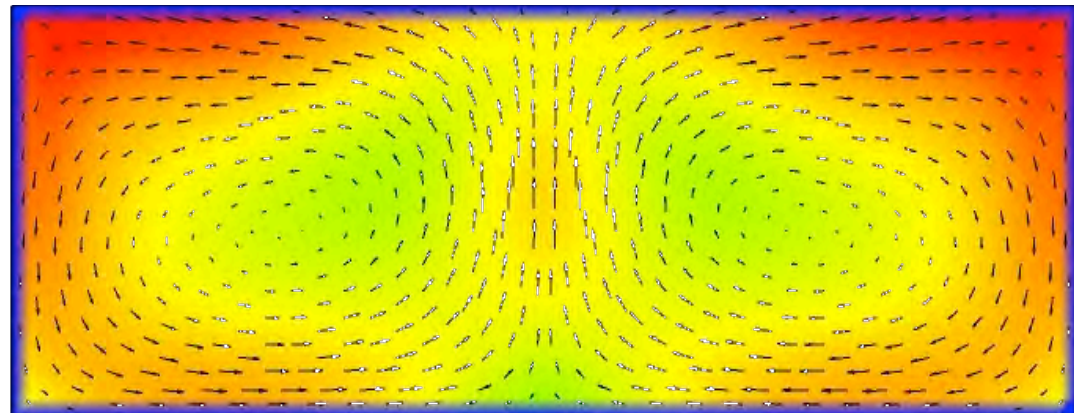


1. Einleitung
2. CFD
3. Experimente
- ➔ 4. **Ergebnisse: Vergleich Messung/Experiment**
5. Schlussfolgerungen

1. Strömungsvisualisierung



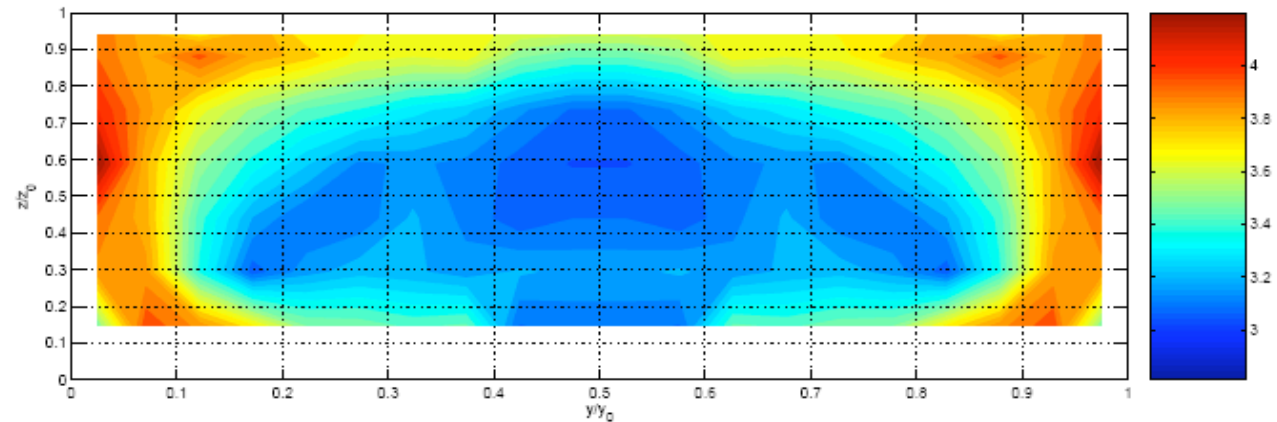
Strömungsvisualisierung mit Partikeln



CFD Ergebnisse (CFX, SST Turbulenz Modell)

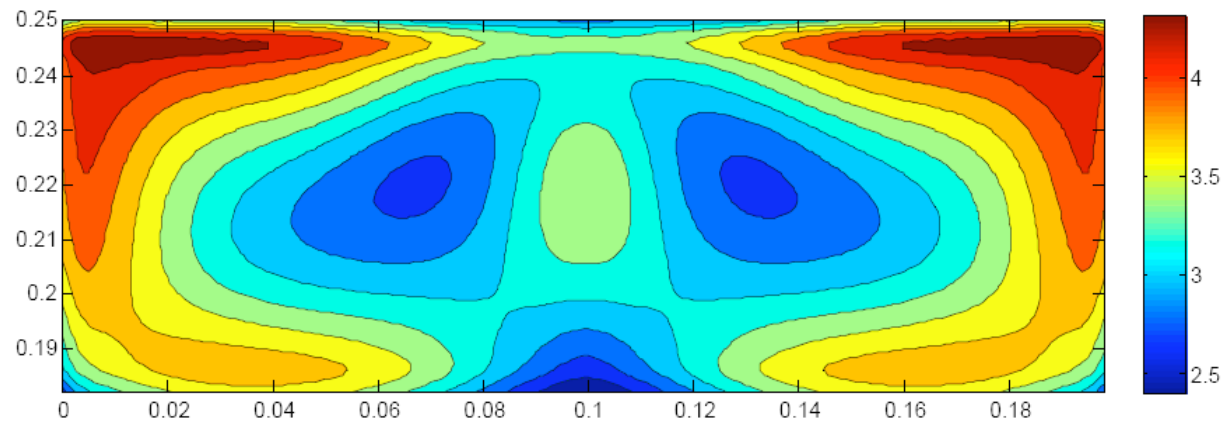
2. Geschwindigkeitsfeld

Messung



Höchste Geschwindigkeit am Rand

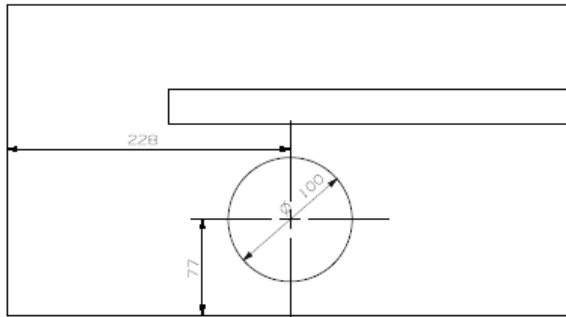
CFD-Berechnung
(CFX, SST Turbulenz
Modell)



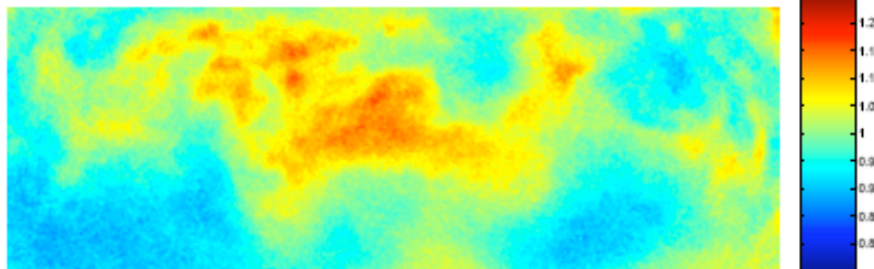
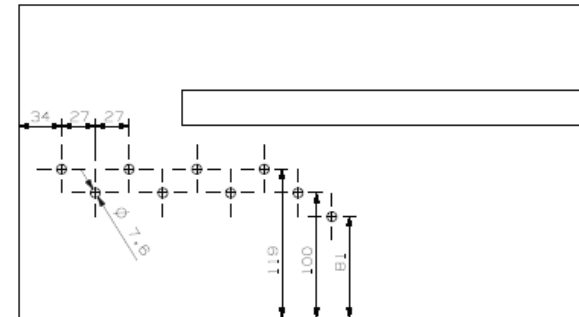
-> CFD und Experimente stimmen gut überein

3. Mischung (Beispiel Brennkammer Rostfeuerung)

Fall 1

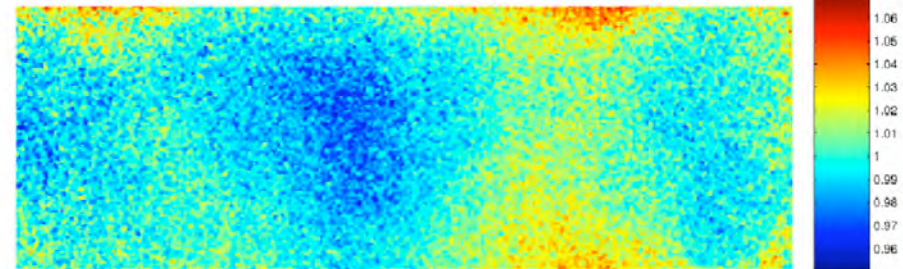


Fall 2



Mischungsrate: $0.75 < \xi(x, y) < 1.25$

Mischungseffizienz: $\bar{\eta} = 0.954$

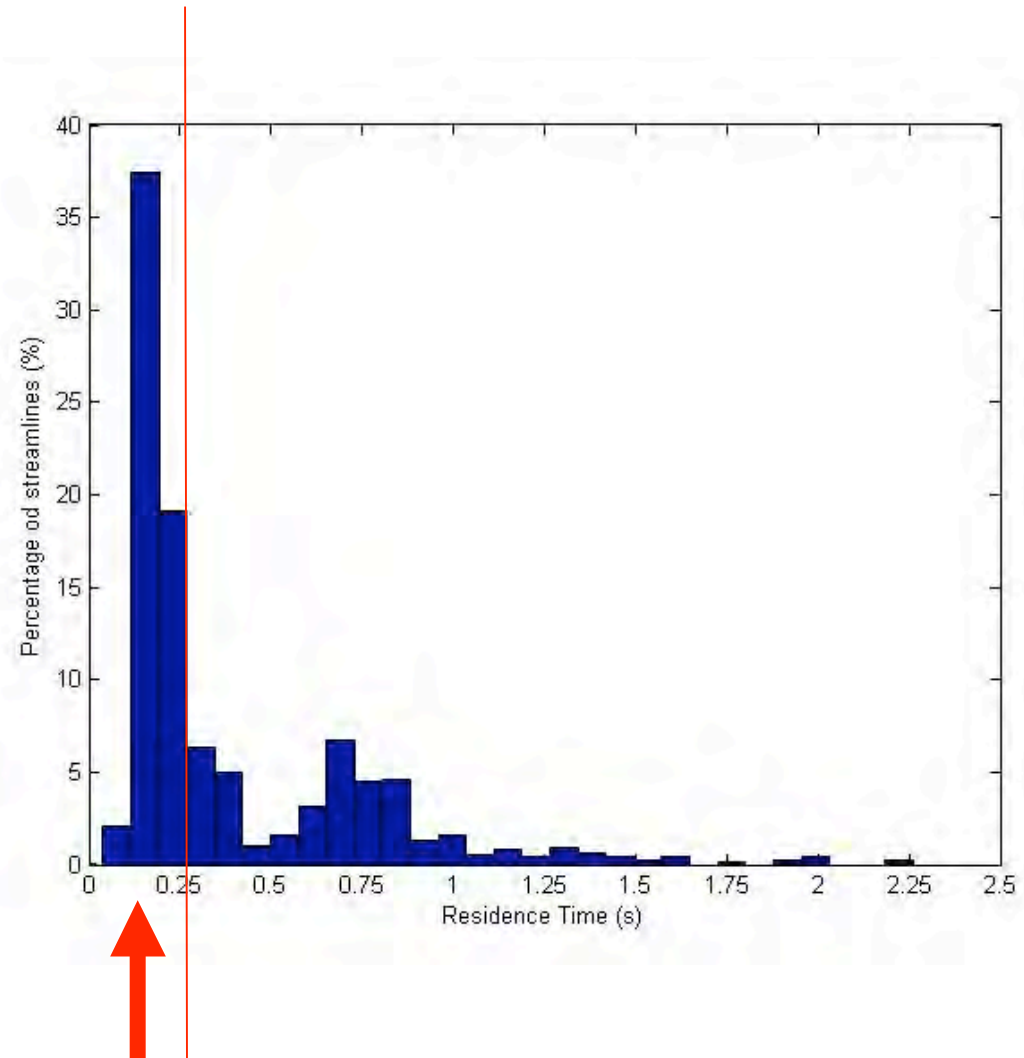
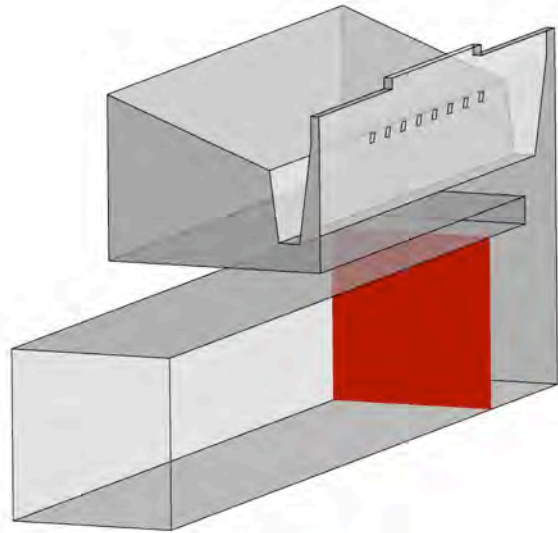


$0.95 < \xi(x, y) < 1.07$

$\bar{\eta} = 0.989$

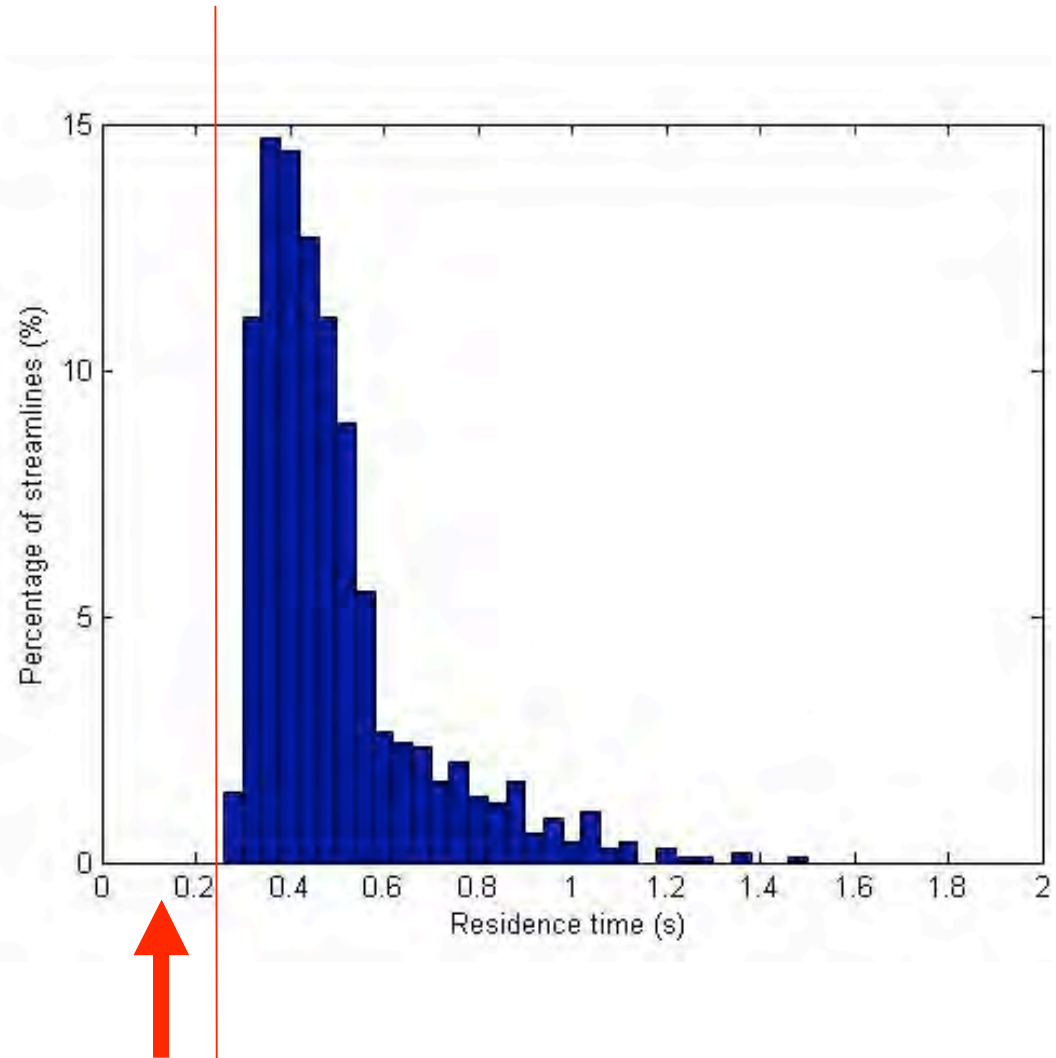
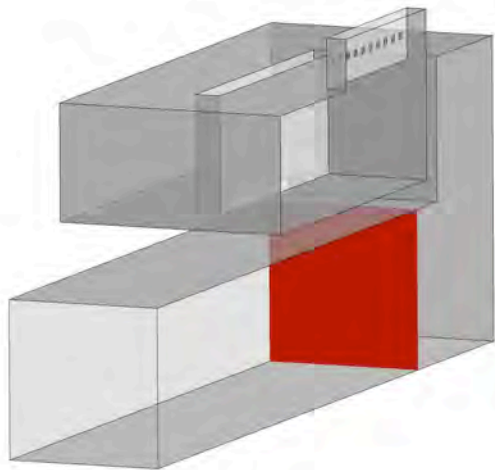
CFD: Verweilzeitspektrum (Brennraum Stückholzkessel)

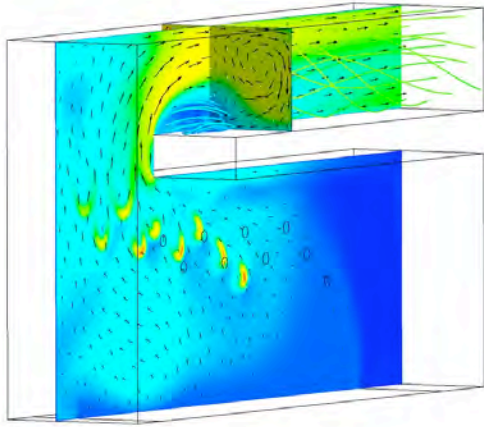
Fall 1



CFD: Verweilzeitspektrum (Brennraum Stückholzkessel)

Fall 2





1. Einleitung
2. CFD
3. Experimente
4. Ergebnisse
- ➔ 5. Schlussfolgerungen

Schlussfolgerungen zur Methode

1. **CFD und Modell-Experimente** sind geeignete und sich **ergänzende** Methoden zur Optimierung der Strömungsverhältnisse wie Mischung und Brennkammergeometrie
 2. **CFD ermöglicht**
 - eine schnelle Einschätzung der Qualität einer Brennkammer
 - umfangreiche Parametervariationen und Variantenvergleiche
 - eine detaillierte Optimierung der Strömung
 3. **Modell-Experimente ermöglichen**
 - eine Bewertung der Mischungsqualität
 - daraus eine Abschätzung der Ausbrandqualität
 - die Validierung von CFD und wichtiger Phänomene wie Wirbel
- **Das vorgestellte Vorgehen hat grosses Potenzial für Verbesserungen**

Erste Schlussfolgerungen zu Feuerungstechnik

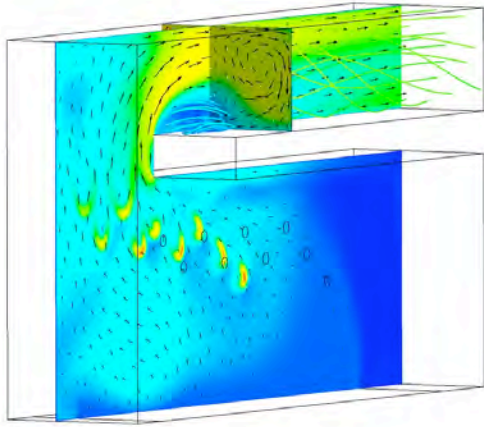
1. Gute Vormischung („Düse“ für Sekundärluft) ist vorteilhaft, kann aber kaum 100% Mischung sicher stellen. Somit sind auch die Strömung und **Geometrie der Brennkammer** entscheidend.
2. Das Beispiel eines Feuerraums zeigt, dass oft bereits **durch die Strömungsführung allein** (d.h. ohne Chemie) ein grosses Verbesserungspotenzial ausgeschöpft werden kann.
3. Das Beispiel einer Rostfeuerung bei Nennlastbedingungen zeigt, dass die Strömung durch **Wirbel** entscheidend beeinflusst wird und die **Ausbrandqualität verbessern** kann.

Mit CFD und Modell-Experimenten können Wirbel und weitere Phänomene optimal ausgenutzt werden, um damit zum Beispiel das Teillastverhalten zu verbessern.

Ausblick

1. CFD und Modell-Experimente können für Weiterentwicklungen genutzt werden
2. Dreidimensionale Kaltmodelle für Strömungsmessungen können mit Rapid Prototyping „3D-Printer“ direkt ab CAD hergestellt werden
3. Mit Messungen an Feuerungen können die Verbesserungen validiert werden





Verdankung

Kommission für Technische Innovation (KTI)

Liebi LNC AG

Trpimir Brzovic

Prof. Dr. Th. Rösgen, ETH Zürich