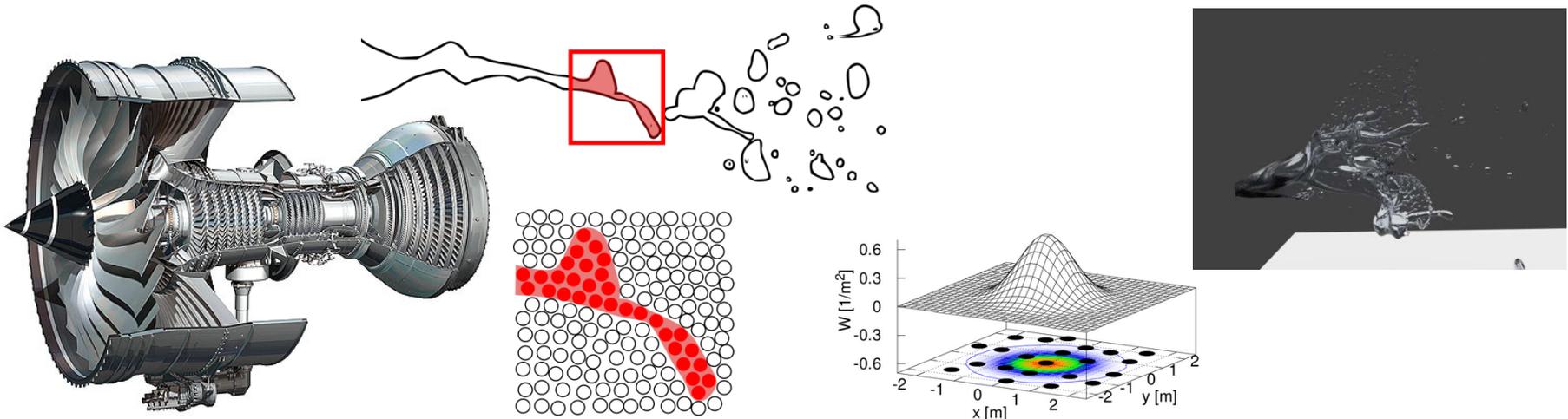


# Die Langrange'sche Smoothed Particle Hydrodynamics Methode zur Simulation von Mehrphasenströmungen in Flugtriebwerken und Gasturbinen

H.-J. Bauer, C. Höfler, R. Koch, S. Braun,  
L. Wieth, T. Dauch, M. Keller, S. Gepperth,  
W. Kurz

Institut für Thermische Strömungsmaschinen  
Prof. Dr.-Ing. Hans-Jörg Bauer

ITS



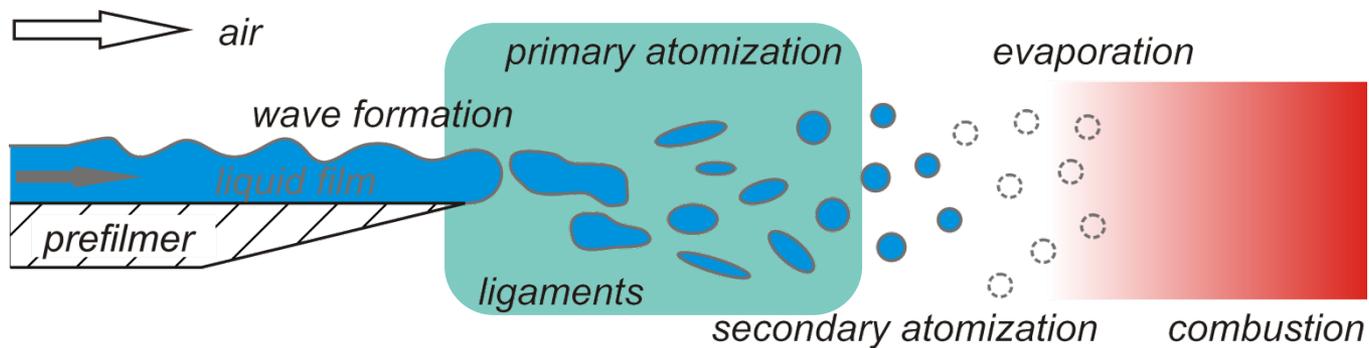
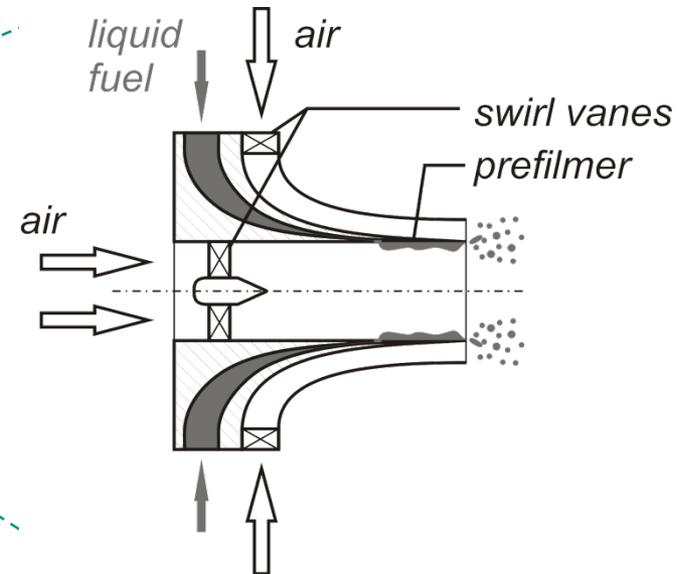
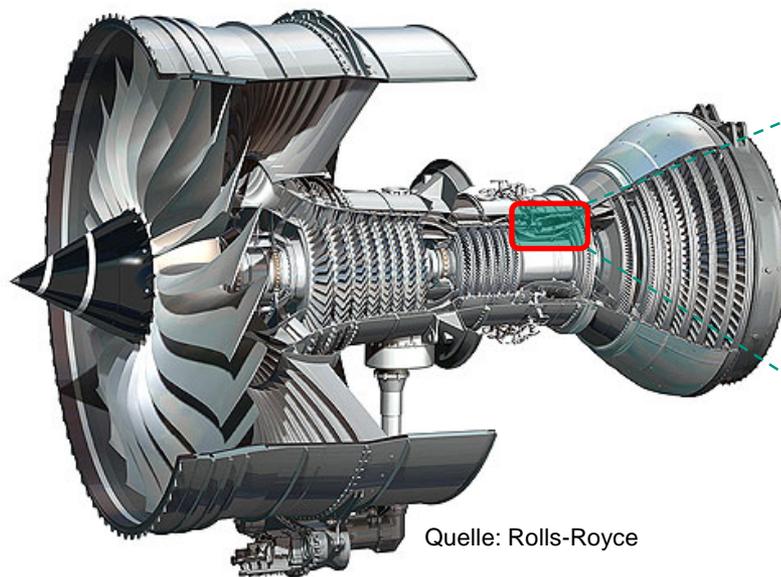
# Vorwort

- Dieser Vortrag wird gehalten anlässlich des Festkolloquiums an der BTU Cottbus zum **60. Geburtstag**

von *Herrn Prof. Dr.-Ing Arnold Kühhorn*

- Die **SPH-Methode** stellt einen neuen Ansatz zur direkten numerischen Simulation von **Mehrphasenströmungen** mit starken Wechselwirkungen zwischen den Phasen dar.
- Am ITS wurde diese Methode erstmals erfolgreich zur Beschreibung des **Primärzerfalls** von Brennstoff an **luftgestützten Zerstäuberdüsen** von Flugtriebwerken eingesetzt. Experimentell beobachtete Phänomene wie **Blasenzerfall** und **schwingende Kraftstofflamellen** werden von der Simulation hochaufgelöst wiedergegeben.
- Weitere Anwendungsfälle aus dem Triebwerksbereich stellen die Zweiphasenströmungen in **Lagerkammern** oder **Getrieben** dar. Die SPH Methode besitzt jedoch noch weit über diese Anwendungen hinausgehendes Potential, z.B. in der **Strömungs-Struktur-Interaktion** oder der **Aeroakustik**.
- Herzliche Glückwünsche an den Jubilar und weiterhin hervorragenden wissenschaftlichen Erfolg!

## Kraftstoffaufbereitung in Flugtriebwerken

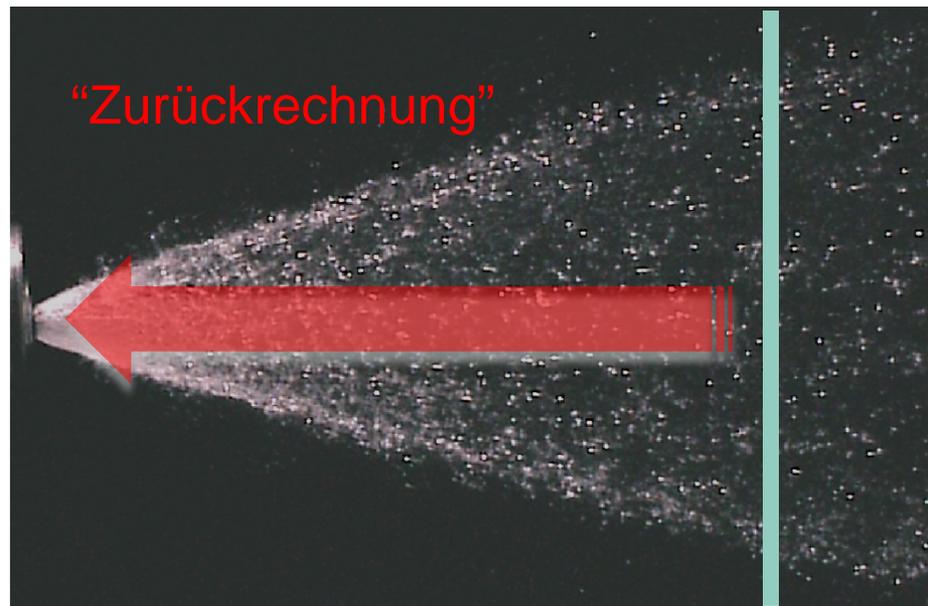


- Stand der Technik zur Charakterisierung von Zerstäuberdüsen

PDA:

- Tropfengröße
- Tropfengeschwindigkeit

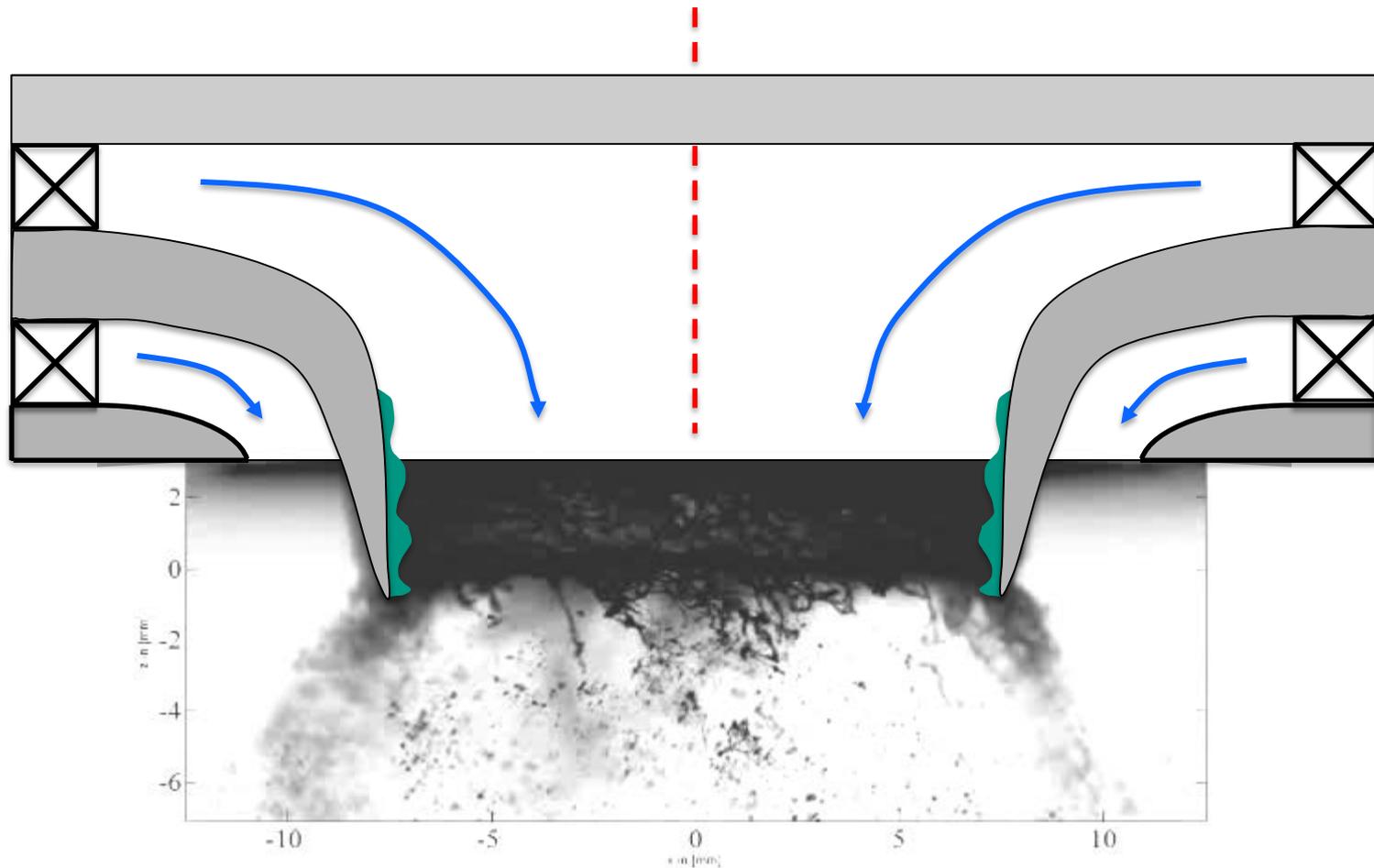
Tropfen-  
Startbeding-  
ungen



Korrelationen für

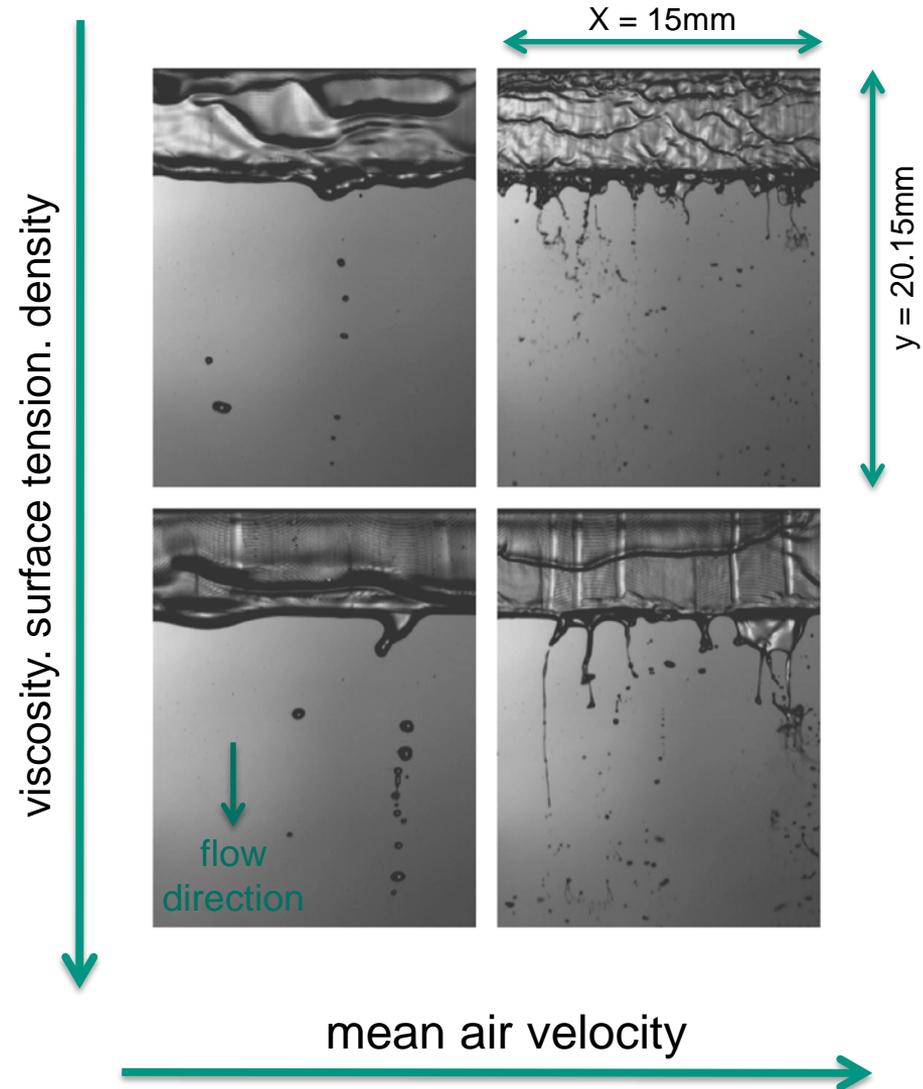
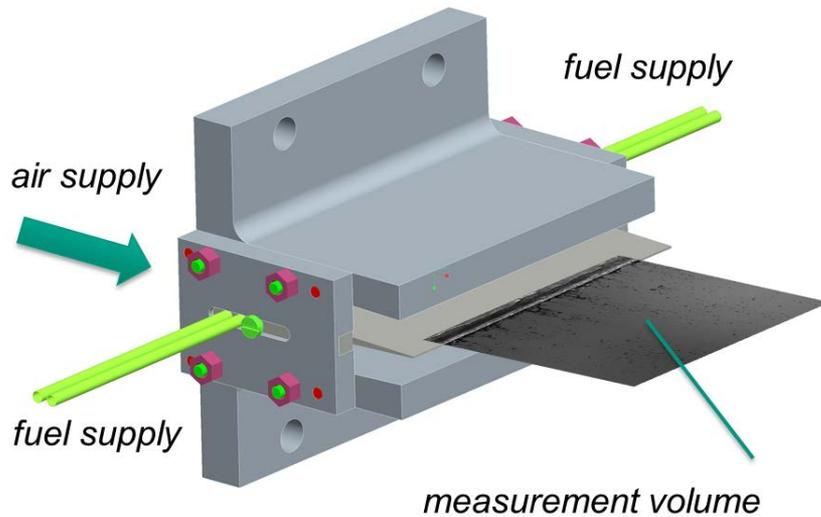
$$\text{SMD} = f(\text{AFR}, D_{\text{Düse}}, \text{Fluideigenschaften}, \dots)$$

# Motivation: Zerstäubung an Airblast- Düse



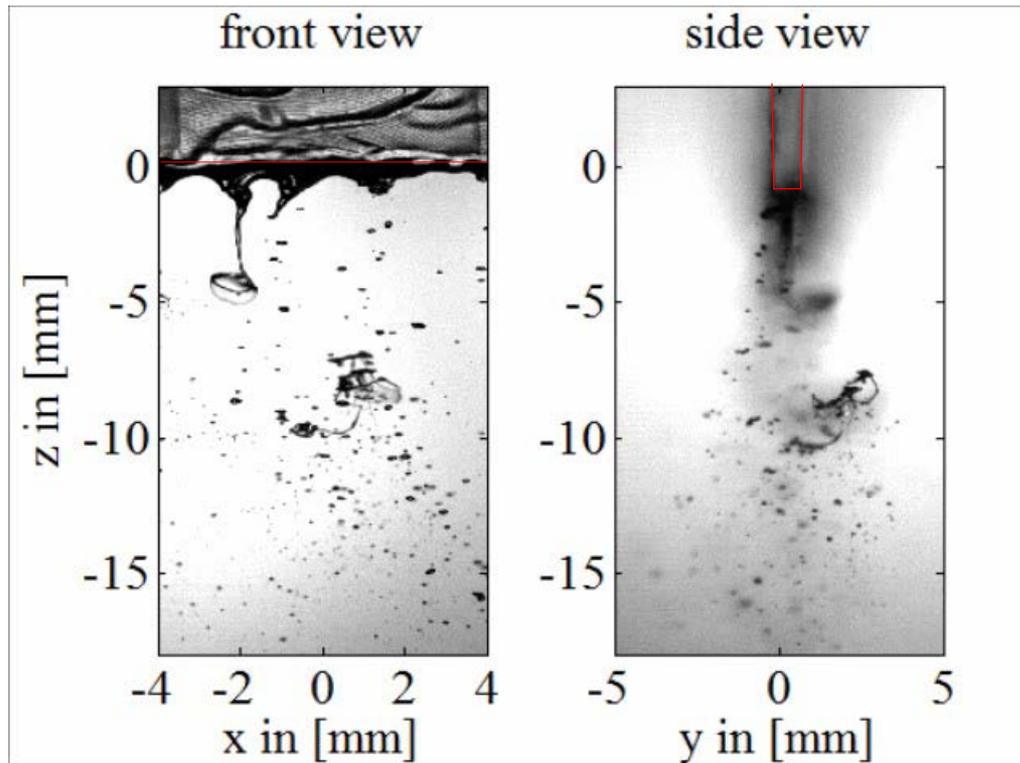
# Motivation: Planare generische "Air Blast Düse"

High-speed videography



# Motivation: Planare generische "Air Blast Düse"

- Zerstäubungsprozess: Primärzerstäubung



high speed recording @ 15 kHz,  $\overline{u_g} = 40 \text{ m/s}$ ,  $\dot{V}/b = 25 \text{ mm}^2/\text{s}$

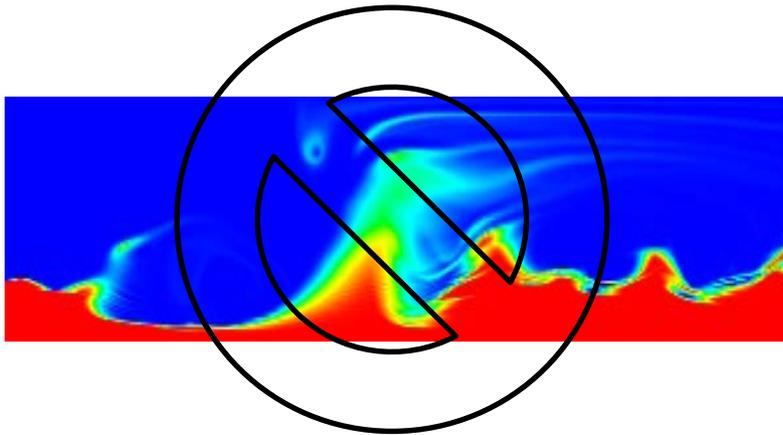
## Numerische Herausforderungen

- Mehrphasenströmungen
  - Grenzflächenrekonstruktion
  - Oberflächenspannung
  - Hohe Dichte- und Viskositätsverhältnisse an der Phasengrenzfläche
- 3- dimensionale Effekte
- Randbedingungen
- Auflösung ( $> 4$  Größenordnungen)
  - zeitlich
  - örtlich



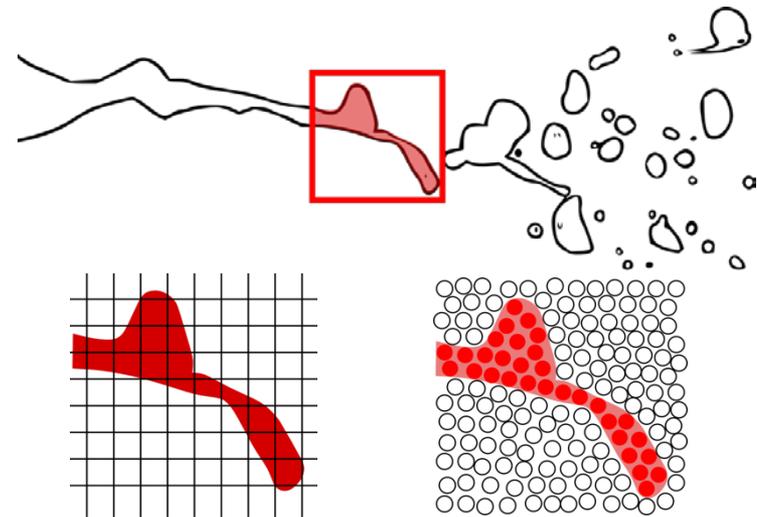
## Motivation

- Tiefergreifendes Verständnis der Zerstäubung
- Überwindung der Nachteile gitterbasierter Methoden

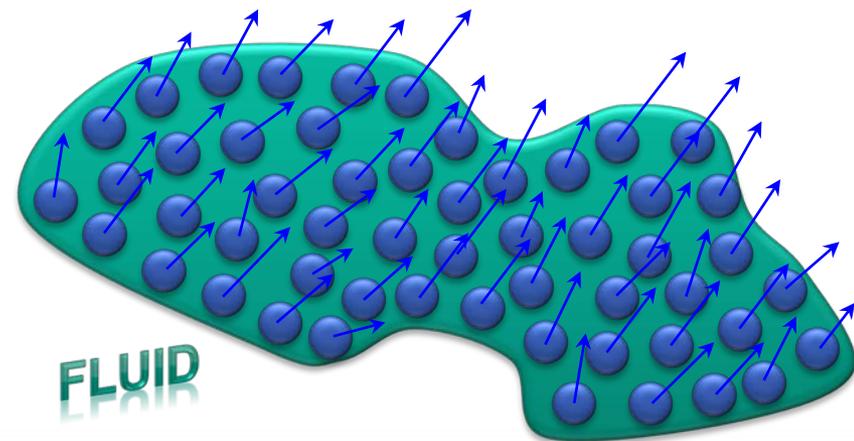


## SPH Methode

- Örtliche Diskretisierung mittels Partikel  $\rightarrow$  automatischer Transport der Phasengrenzfläche
- Zugrunde liegende Physik: Navier-Stokes Gleichungen

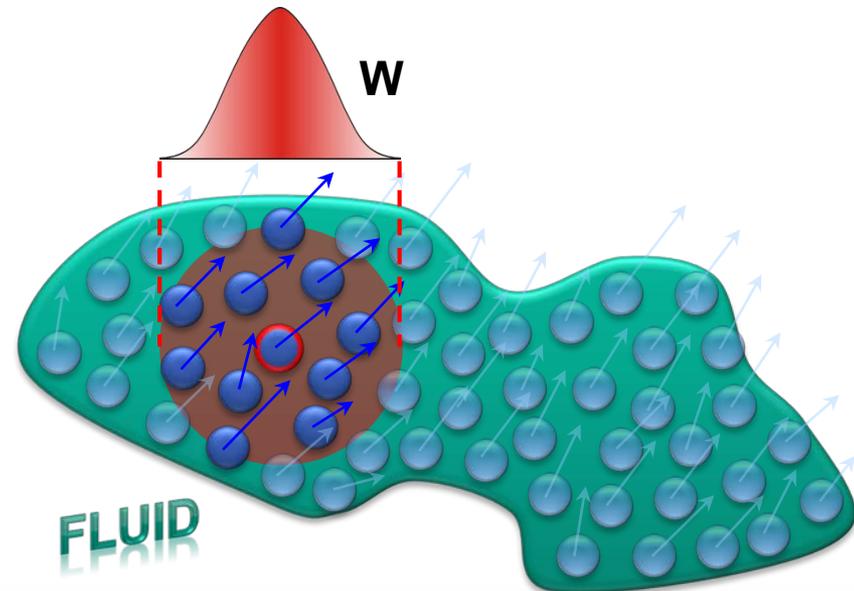


- Lagrange'sches Bezugssystem
- Bewegliche örtliche Diskretisierungsstellen (Partikel)
- Partikel repräsentieren ein Teilvolumen des Fluids
- Lokal physikalische Eigenschaften werden den Partikeln zugeordnet
- Interpolationen über benachbarte Partikel → Navier-Stokes Gleichungen

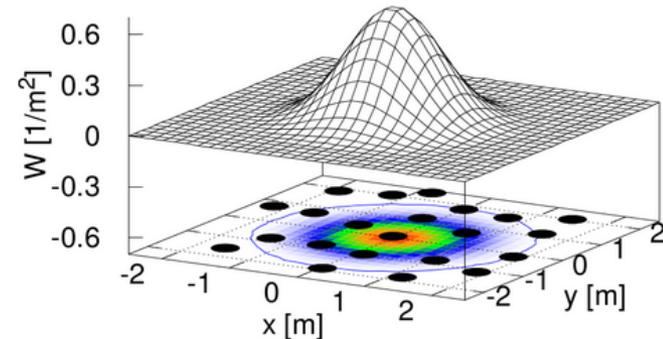
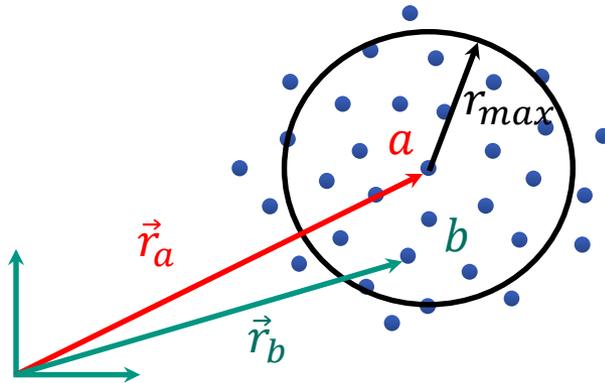


- Lagrange'sches Bezugssystem
- Bewegliche örtliche Diskretisierungsstellen (Partikel)
- Partikel repräsentieren ein Teilvolumen des Fluids
- Lokal physikalische Eigenschaften werden den Partikeln zugeordnet
- Interpolationen über benachbarte Partikel → Navier-Stokes Gleichungen

Interpolation der physikalischen Eigenschaften eines Partikels basierend auf der kompakten Gewichtungsfunktion  $\mathbf{W}$



## ■ Mathematischer Ansatz



■ Integral-Darstellung

$$f(\vec{r}_a) = \int f(\vec{r}_b) \delta(\vec{r}_a - \vec{r}_b) d\vec{r}_b$$

■ Integral-Interpolation

$$f_i(\vec{r}_a) = \int f(\vec{r}_b) W(\vec{r}_a - \vec{r}_b, h) d\vec{r}_b$$

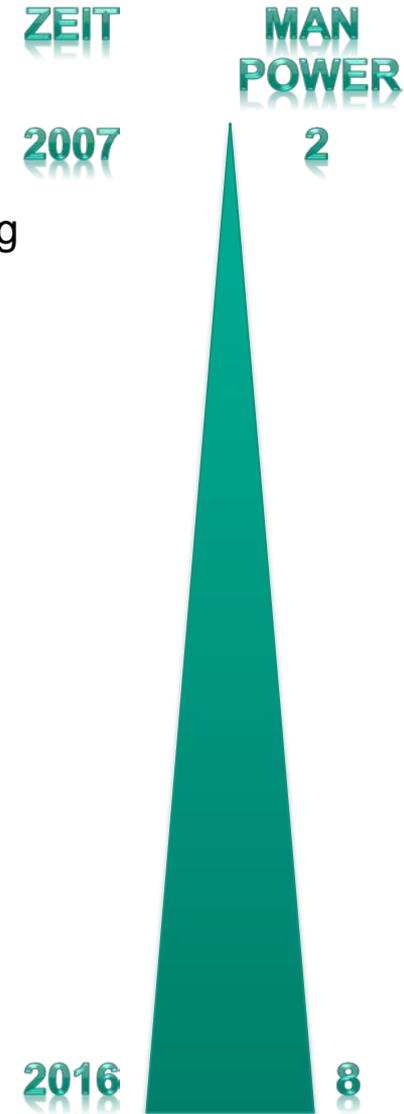
■ Summen-Interpolation

$$f_s(\vec{r}_a) = \sum \frac{m_b}{\rho_b} f(\vec{r}_b) W(\vec{r}_a - \vec{r}_b, h)$$

$$\nabla f_s(\vec{r}_a) = \sum \frac{m_b}{\rho_b} f(\vec{r}_b) \nabla_a W(\vec{r}_a - \vec{r}_b, h)$$

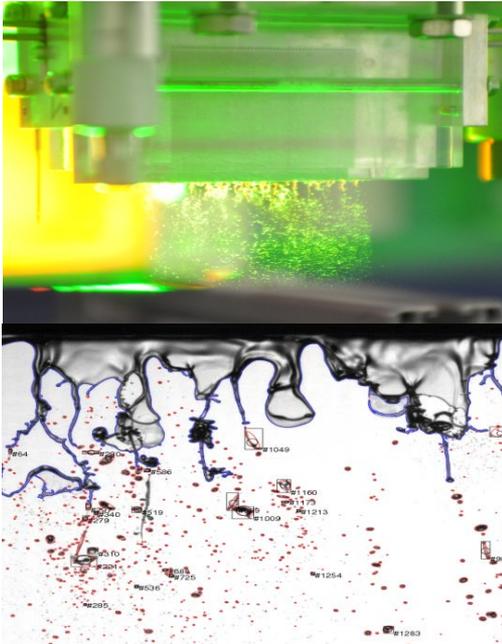
# SPH @ ITS – Code

- 3D Simulationen
- Kompressible Navier-Stokes Gleichungen
- Schwach kompressibler Ansatz mittels geeigneter Zustandsgleichung
- Energieerhaltung
- Explizites Zeitschrittverfahren
- Oberflächenspannungseffekte
- Randbedingungen: feste/bewegte Wände (mit/ohne Haftbedingung), Periodizität, Einlass/Auslass, Symmetrie
- Lastausgeglichene Parallelisierung (MPI)
- Realistische Dichte- und Viskositätsverhältnisse (Luft – Kraftstoff)
- Erhöhter Druck
- 3-Phasensysteme: Kontaktwinkel, Benetzung
- Erzeugung komplexer Geometrien
- Korrekturmethode
- ...



# Primärzerfall – Experiment & Simulation

## Experiment



- High-speed Videos
- Particle tracking velocimetry

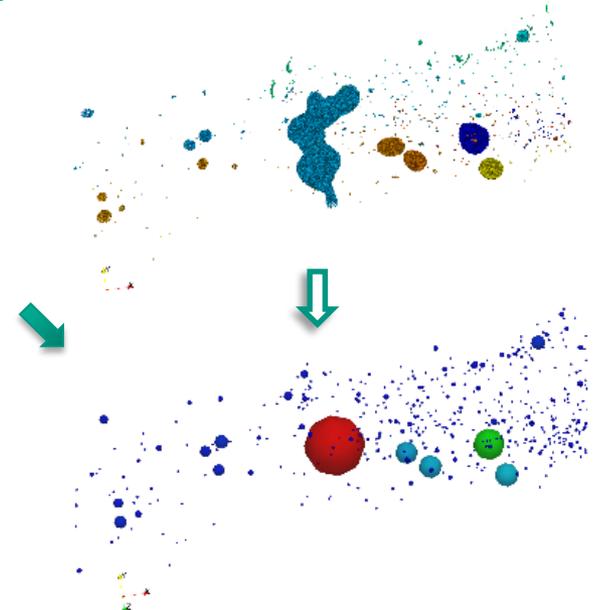
- *Ebener Filmleger*
- *Umgebungsdruck*
- *Fluide: Luft & Kraftstoff*
- *50 m/s Luftgeschwindigkeit*

## Simulation



- 3D SPH
- 38 Mio. Partikel
- 960 CPUs
- Nur Darstellung der Phasengrenzfläche

## Auswertung



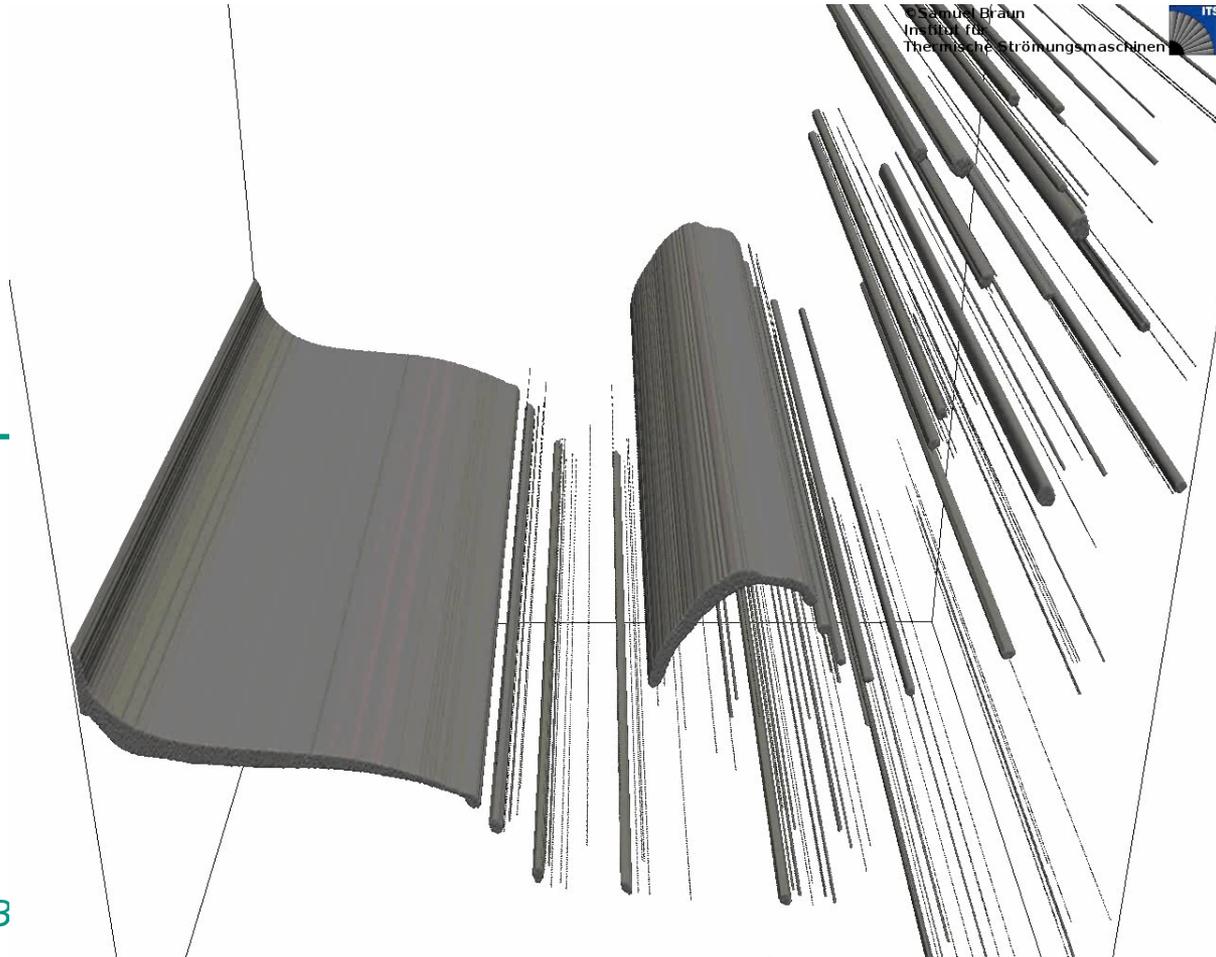
- Post processing
- Instantane Tropfendetektion
- Tropfenstatistik
- → embedded SPH

## Fluid-Parameter

- *Fluide: Luft/Shellsol D70*
- *Luftgeschwindigkeit: 50m/s*
- *Filmhöhe: 80 $\mu$ m*
- *Hinterkantendicke: 230 $\mu$ m*

## Computing-Parameter

- *Domänengröße: 6 x 6.23 x 4mm*
- *Partikelabstand: 5 $\mu$ m*
- *Partikelzahl: 1.2e9*
- *Zeitschritte gesamt: 771073*
- *Datengröße 792 Zeitschritte: 49TB*
- *CPUs: 2560*
- *Simulationsdauer: 44d10h*
- *Simulationskosten: 2728960 CPUh  $\approx$  136448 € (@1€ pro Knotenstunde)*

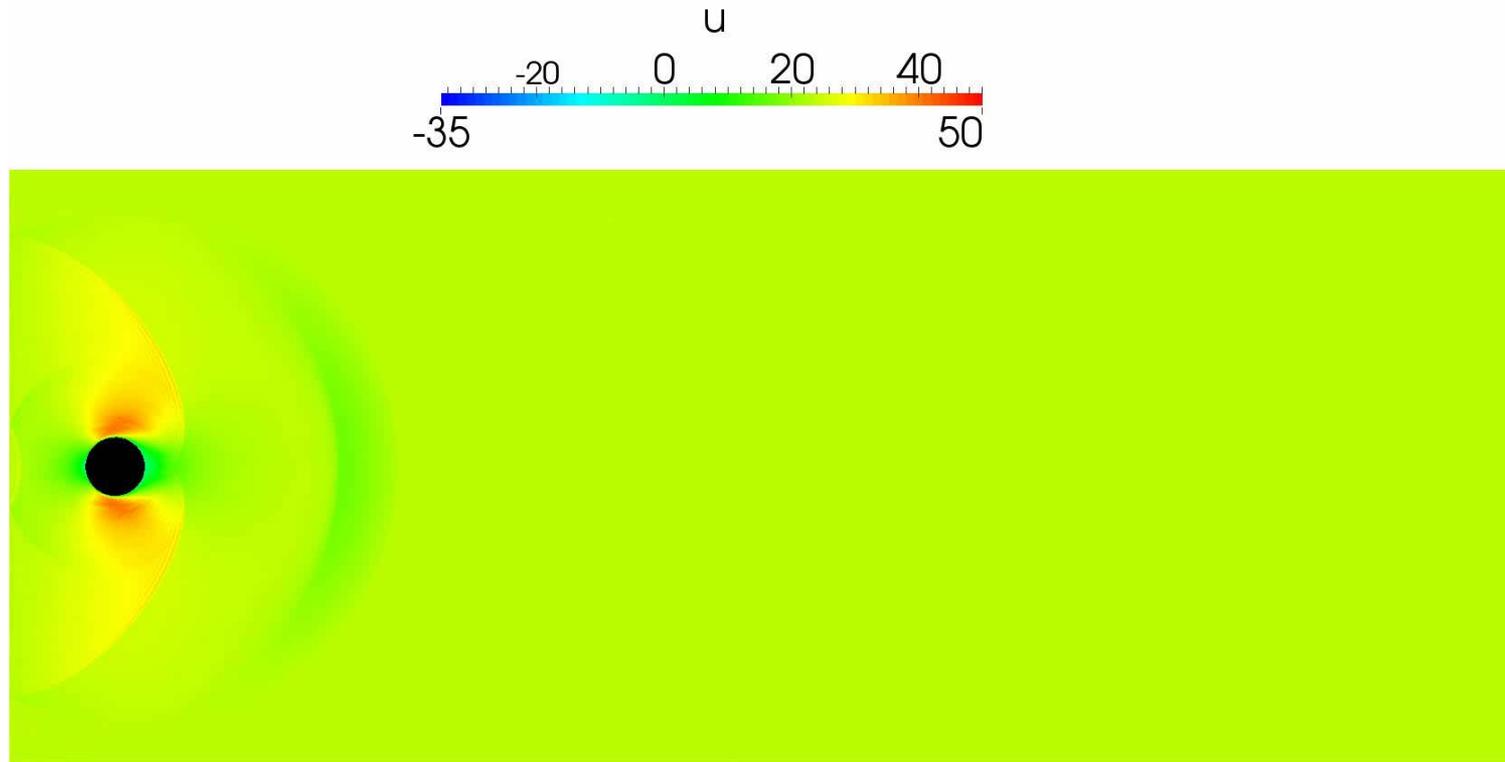


## ■ Rendering



# Sekundärzerfall

- Reines DF2 in Luft  $u_{\text{Luft}}=23 \text{ m/s} \rightarrow We=24$

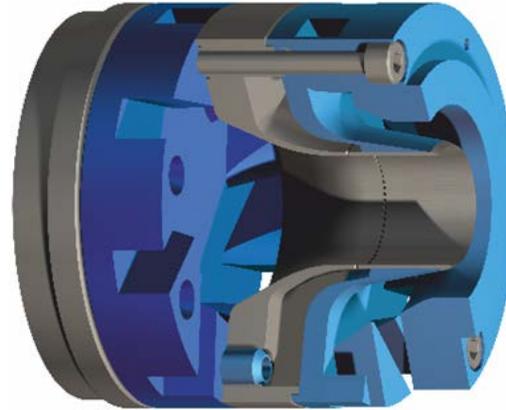


Time: 0.0000000 s

# Rußminderung in RQL-Brennkammern

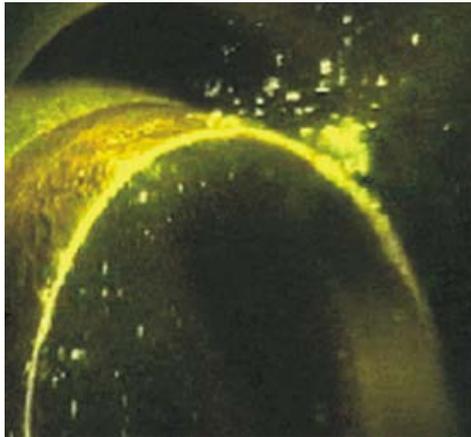
Verdunstung & Verbrennung & Rußentstehung

Aerodynamik  
→

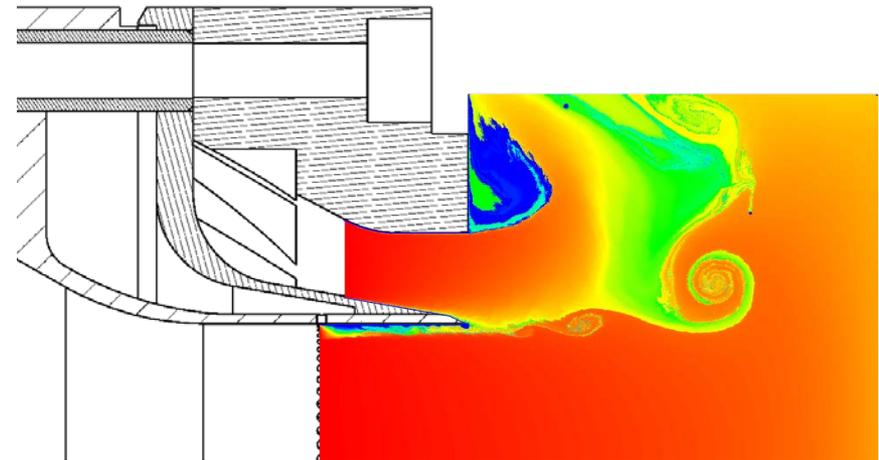


*Ruß* ↓

Zerstäubung



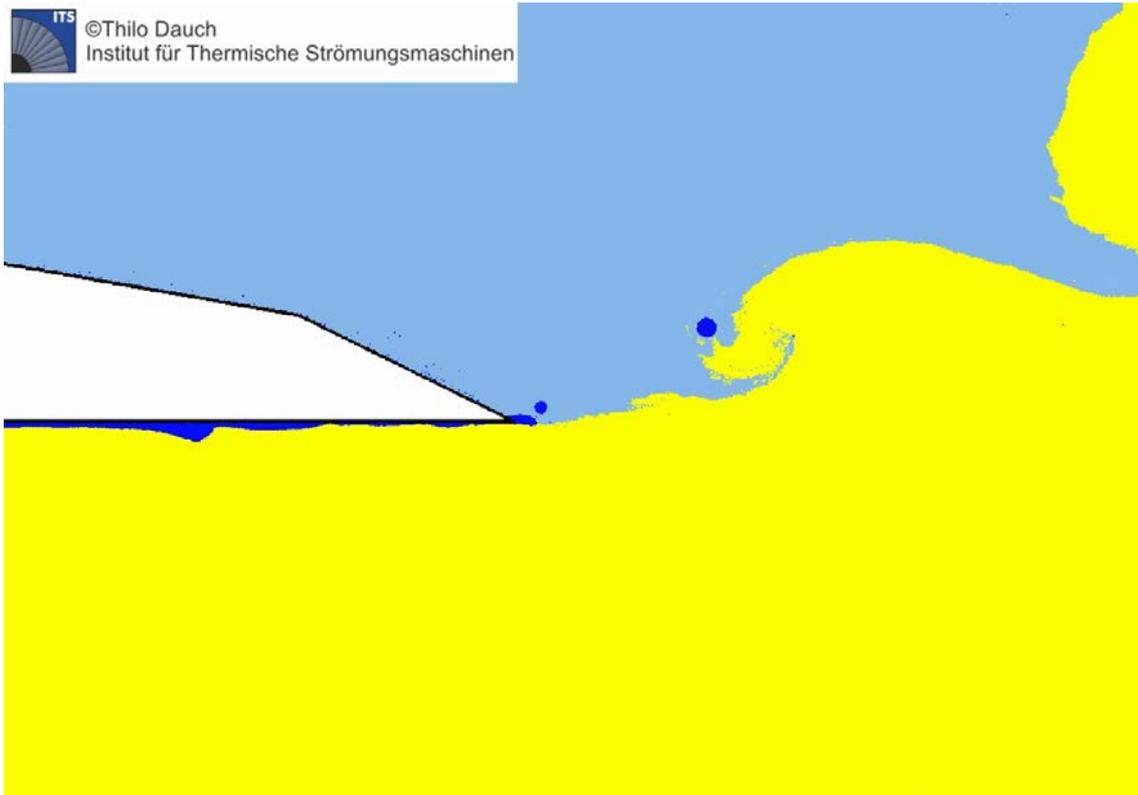
*Experiment*



*Simulation*

# Rußminderung in Zerstäubern

## ■ Swirlcup: 1.01 bar – Fluide



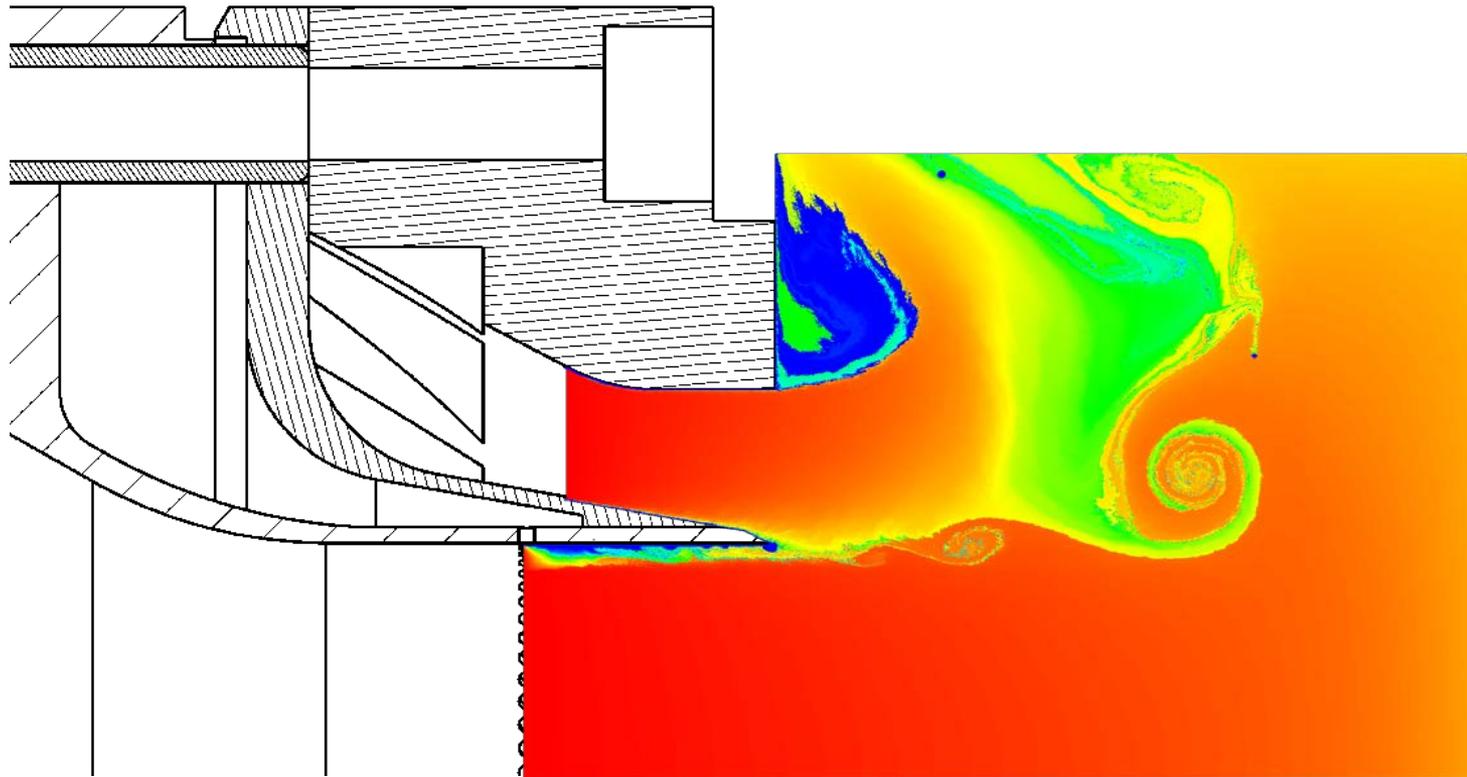
Quantity	Baseline
$p$ / bar	1.01
$T$ / K	298.15
$\rho$ / kg/m <sup>3</sup>	1.19
$\dot{m}_L$ / g/s	15.0
$\dot{m}_B$ / g/s	0.70

### Weitere Parameter

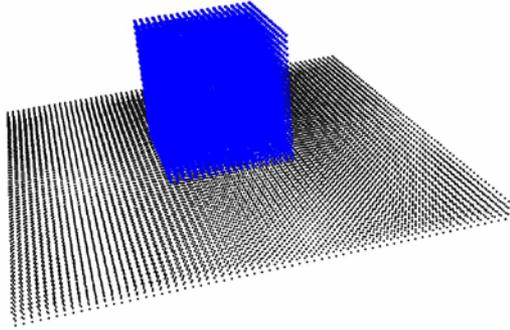
- $h_{film,in} = 100 \mu m$
- Drallzahl: 0.67 (Prim. & Sek.luft)
- $D_{prim. Luft} = 7.5 mm$
- Diskretisierung.:  $dx = 5 \mu m$
- # Partikel: ~ 10 Mio.
- Echtzeit: 25 ms
- 350'000 CPUh

# Rußminderung in Zerstäubern

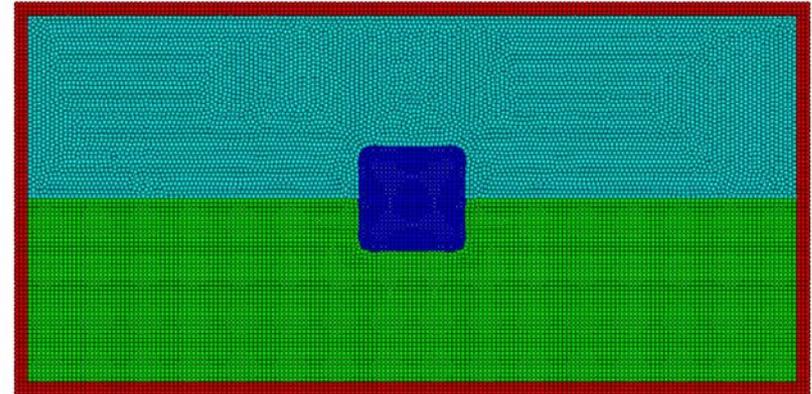
- Swirlcup: 1.01 bar – Aufenthaltszeit



## ■ 3-Phasen-Wechselwirkung



Statischer Kontaktwinkel  $60^\circ$

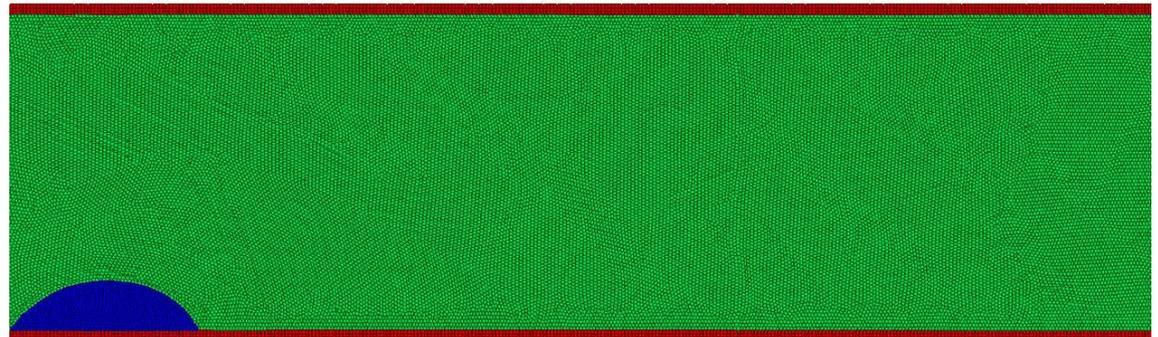


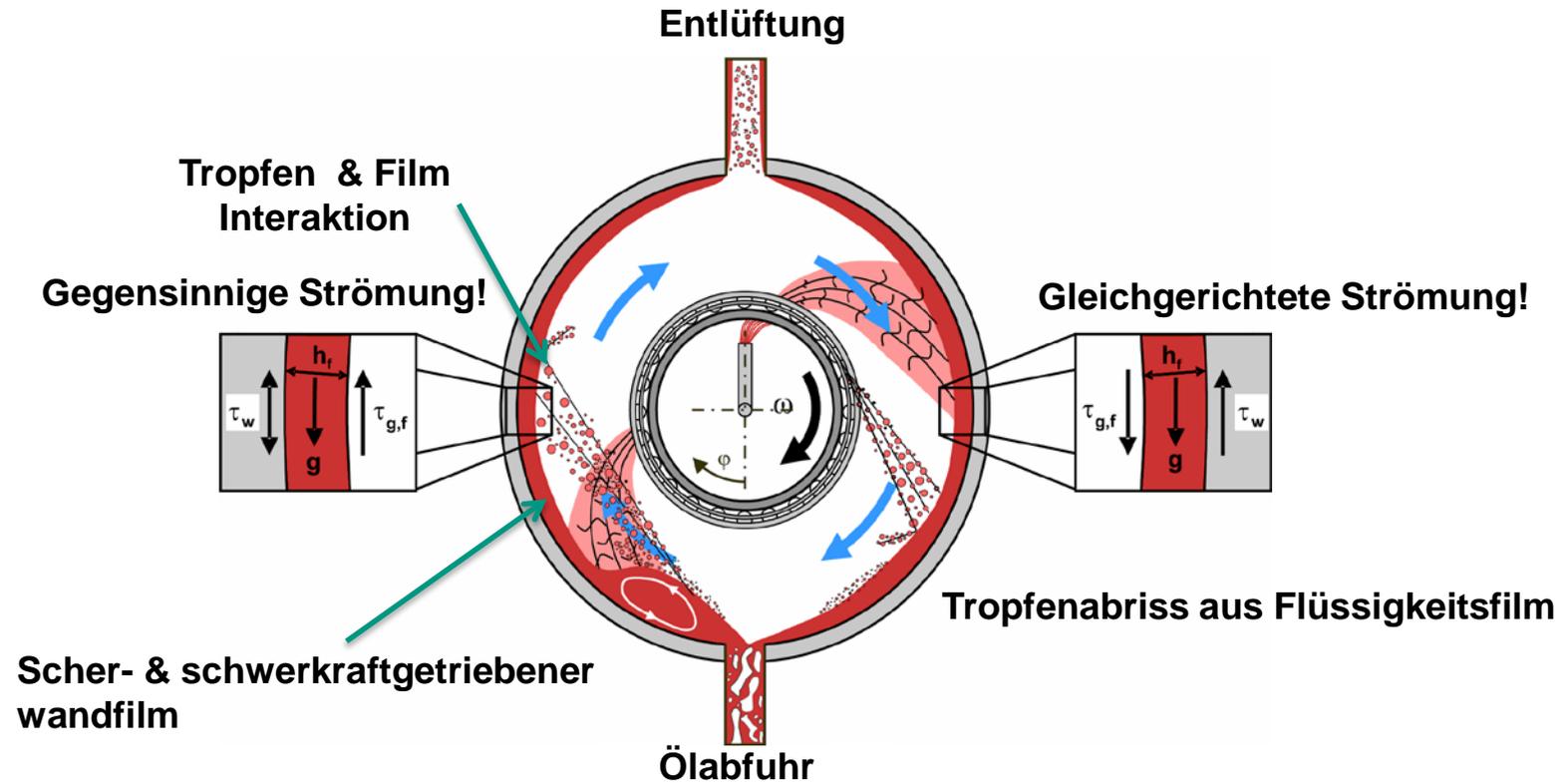
Statische 3-Phasenwechselwirkung von  
Wasser, Luft und Dekan

***Dynamische Fluid-  
Wand-Wechselwirkung  
von Heptan***

***Experiment:***

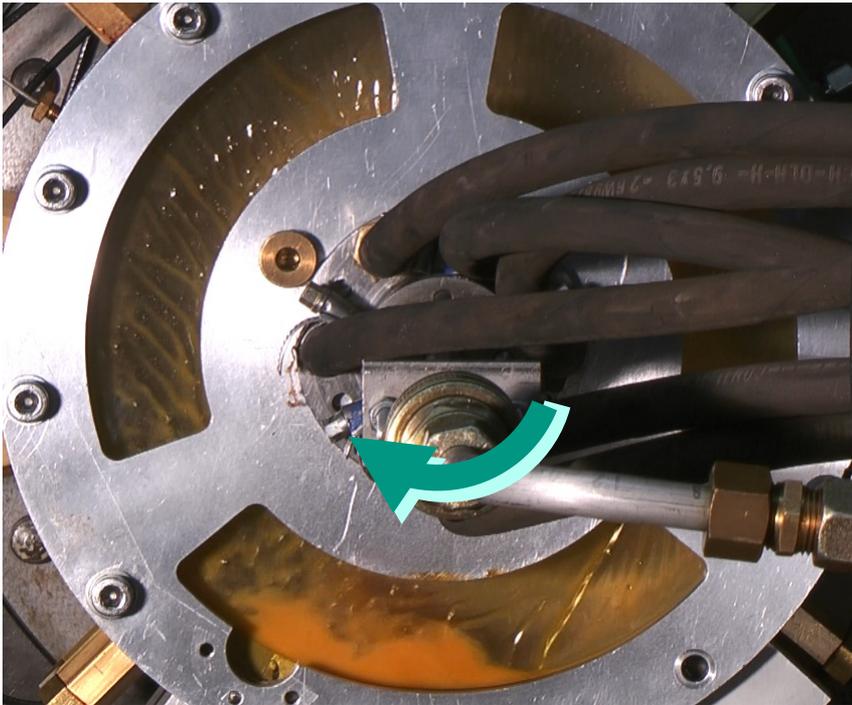
- $\Theta_S = 56.77^\circ$
- $\Theta_a = 58.4 \pm 1.0^\circ$
- $\Theta_{ri} = 45.7 \pm 1.8^\circ$



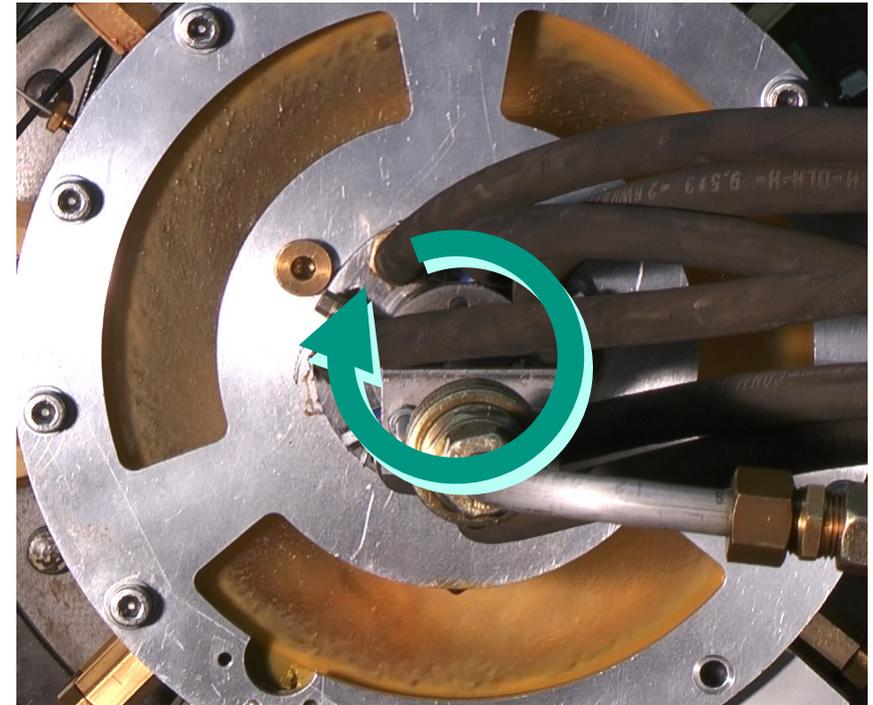


# Zwei grundlegende Strömungsregime

- Luft/Öl-Strömung bei geringer Wellendrehzahl



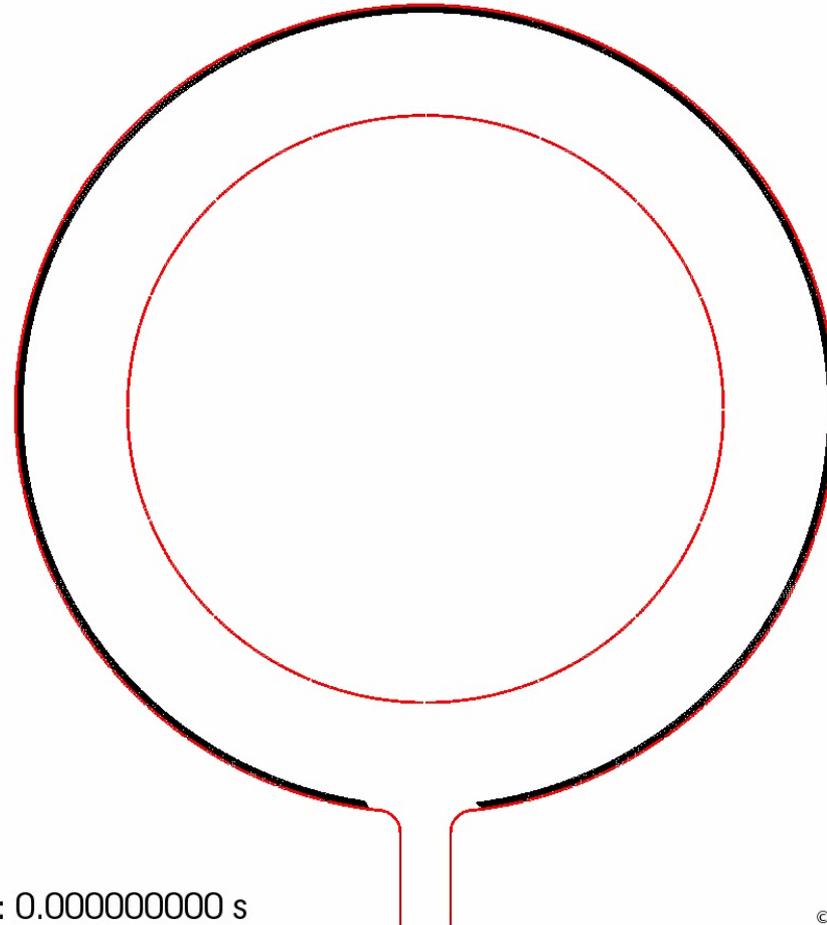
- Luft/Öl-Strömung bei hoher Wellendrehzahl



# Lagerkammer: $n=15000$ rpm

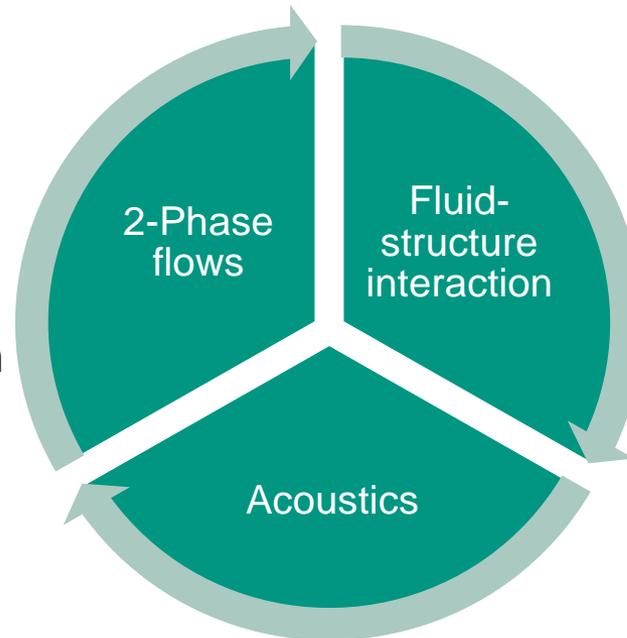
## Setup:

- # Partikel:  $\sim 325.000$
- Rechenzeit:  $\sim 18.432$  CPUh
- Echtzeit:  $\sim 1.0$  s



Time: 0.000000000 s

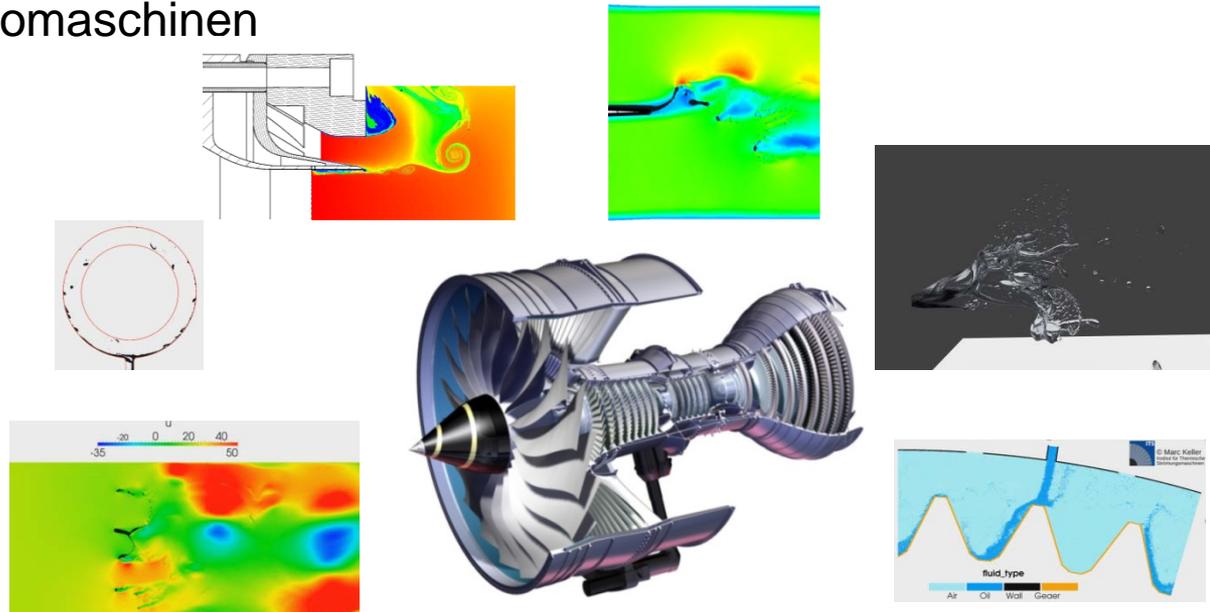
- Mehrphasenströmungen
- Primärzerfall
- Sekundärzerfall
- Fluid-Wand Interaktion
- Kontaktwinkel
- Nicht-Newton'sche Medien
- Benetzung
- Lagerkammerströmung
- Öl-Zahnrad Interaktion
- Strömung in Mikrokanälen
- Verdunstung
- Wärmeübergang



- Festkörpermodellierung
- Interaktion zwischen Fluid und Festkörper

- Luftschall
- Strukturschall

- Werkzeug zur zuverlässigen und effizienten Modellierung der physikalischen Vorgänge in Turbomaschinen
  - Tiefergehendes Verständnis der physikalischen Phänomene
  - Verständnis der komplexen Interaktionen
  - Ableitung allgemeingültiger Korrelationen
  - Entwicklung von Richtlinien zur Auslegung von Komponenten in Turbomaschinen



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

