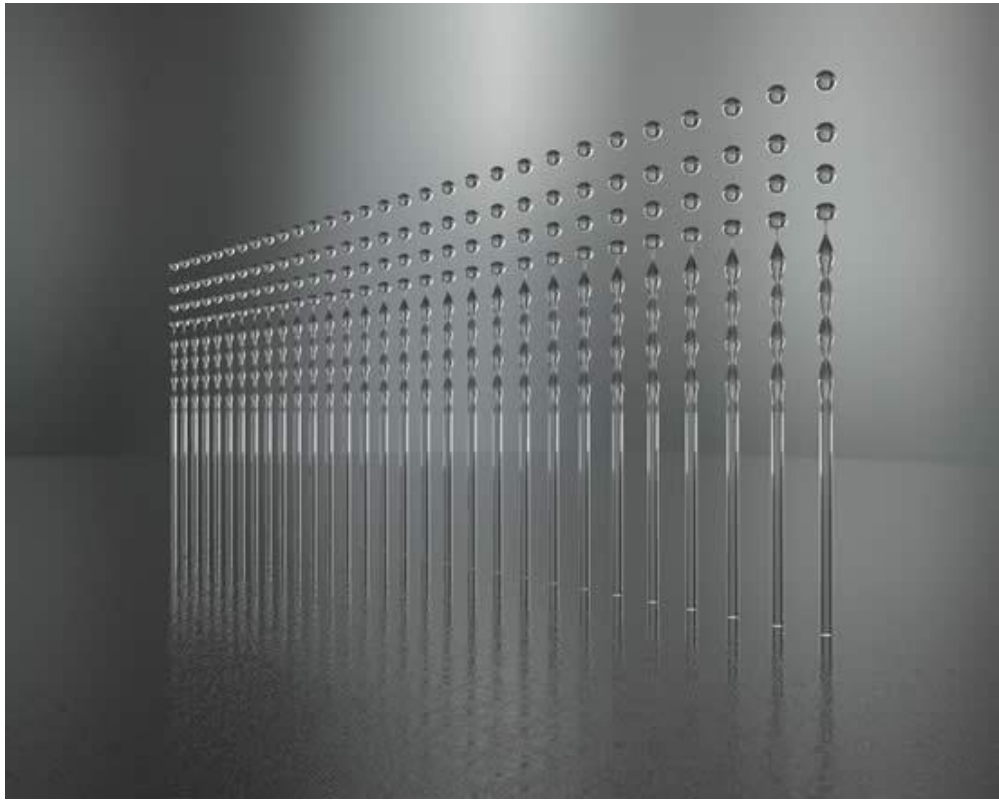
Simulation des Rayleigh-Zerfalls eines Flüssigkeitsstrahls mit ANSYS FLUENT

Mario Ramlow
Technische Hochschule Wildau [FH]
m.ramlow@gmx.net

Dr. Andreas Spille-Kohoff
CFX Berlin Software GmbH
andreas.spille@cfx-berlin.de



Quelle: http://www.medspray.nl/technology.html

ANSYS Conference & 32nd CADFEM Users' Meeting 2014
June 04-06, 2014 – Nürnberg

Gliederung

- Motivation
- Theorie des Strahlzerfalls
  - Grundlagen
  - Zerfallsbereiche
  - Rayleigh-Zerfall
- Simulation des Rayleigh-Zerfalls
  - Simulationsbedingungen
  - Validierung der Ergebnisse
  - Sensitivität der Ergebnisse
  - Simulation in 3D
- Fazit und Ausblick

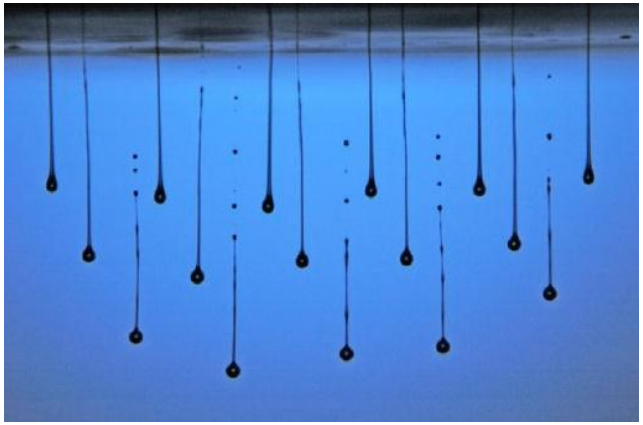
Quelle: Wadhwa, Navish Jung, Sunghwan "Non-coalescence of jets" virginia tech, 2011

Motivation

- Strahlzerfall umfasst weites Spektrum in der Praxis
  - Tropfenbildung beim Tintenstrahlprozess
  - Bildung feinster Tropfen zur Verbrennung
  - Bildung von Aerosolen
  - Bildung gleichmäßiger Tropfen beim Spritzlackieren

- Viele Anwendungsbereiche, in denen eine experimentelle Untersuchung schwierig ist

→ Großes Potential für die numerische Simulation



Quelle: Villermaux, Emmanuel „physics of liquid jets“ reports on progress in physics, 2007

Quelle: http://hypescience.com/27506-spray-vidro-liquido/

Quelle: http://www.zeit.de/zeit-wissen/2010/s1/Asthma

Gliederung

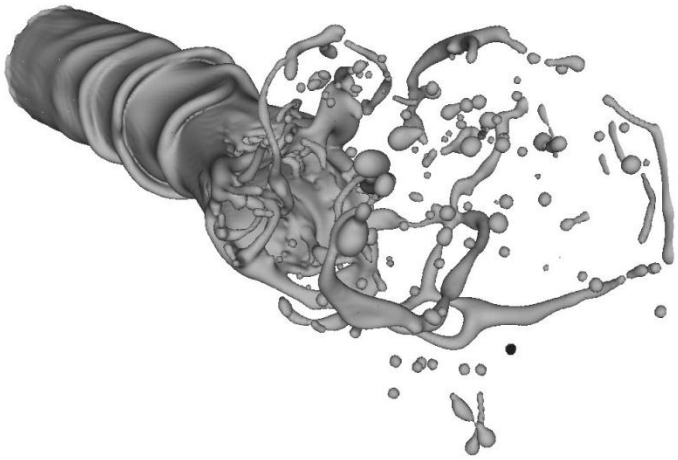
- Motivation
- Theorie des Strahlzerfalls
  - Grundlagen
  - Zerfallsbereiche
  - Rayleigh-Zerfall
- Simulation des Rayleigh-Zerfalls
  - Simulationsbedingungen
  - Validierung der Ergebnisse
  - Sensitivität der Ergebnisse
  - Simulation in 3D
- Fazit und Ausblick

Quelle: Wadhwa, Navish Jung, Sunghwan "Non-coalescence of jets" virginia tech, 2011

Theorie des Strahlzerfalls
Grundlagen

CFX Berlin

- Unterscheidung in:
  - Primärzerfall:
    → Zerfall des eigentlichen Strahls in Tropfen und Ligamente
  - Sekundärzerfall:
    → Zerfall abgelöster Tropfen durch Scherkräfte



Quelle: Fuster,Daniel „3D liquid breakup at low Reynolds number", http://www.danielfuster.com/galerias/atomization/atomization.html

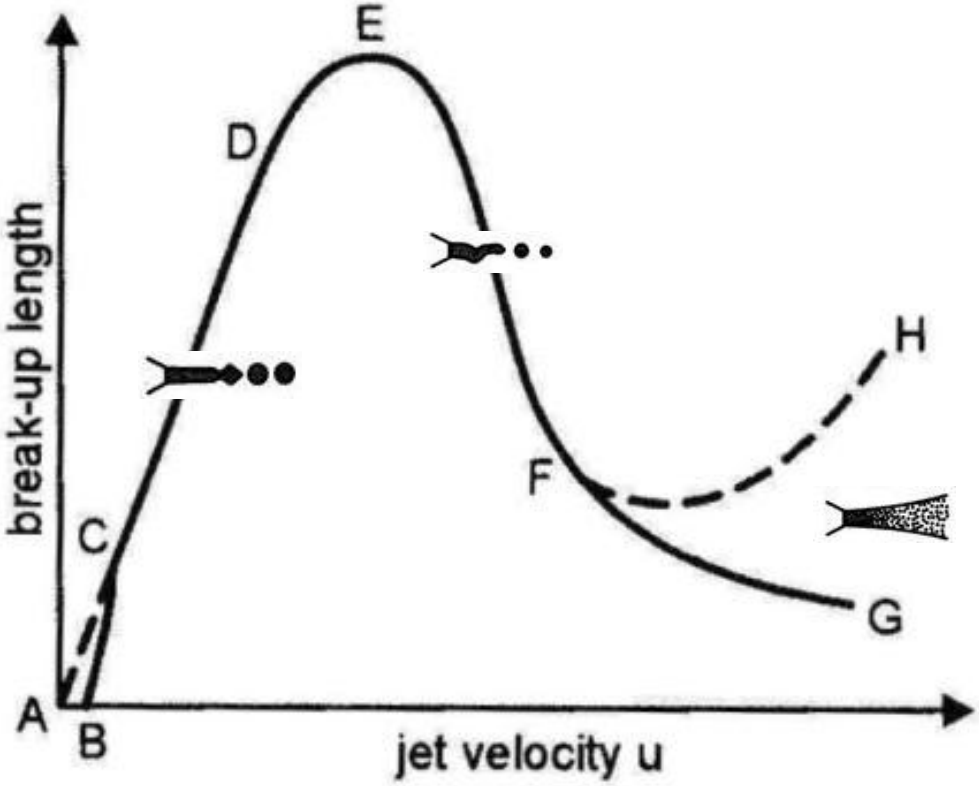
- Beschreibung des Strahlzerfalls durch Weber-Zahl

$$We = \frac{Trägheitskraft}{Oberflächenkraft} = \frac{\rho v^2 L}{\sigma}$$

→ Zerfall abhängig von Geschwindigkeit und Radius des Strahls

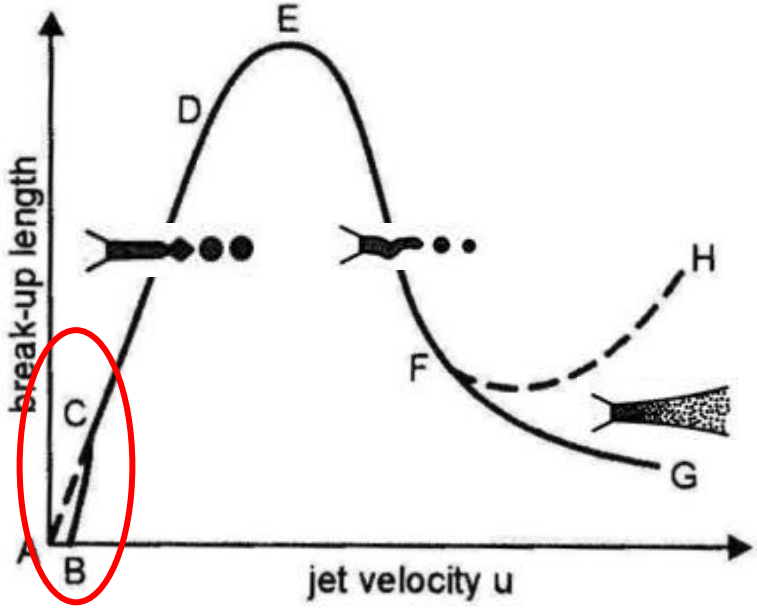
Gliederung

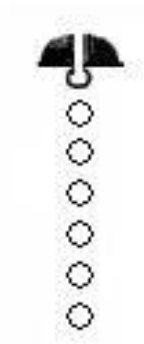
- Motivation
- Theorie des Strahlzerfalls
  - Grundlagen
  - Zerfallsbereiche
  - Rayleigh-Zerfall
- Simulation des Rayleigh-Zerfalls
  - Simulationsbedingungen
  - Validierung der Ergebnisse
  - Sensitivität der Ergebnisse
  - Simulation in 3D
- Fazit und Ausblick



Theorie des Strahlzerfalls
Zerfallsbereiche

- A-B-C: Abtropfen
  - Keine Bildung eines Strahls durch zu geringe Geschwindigkeit

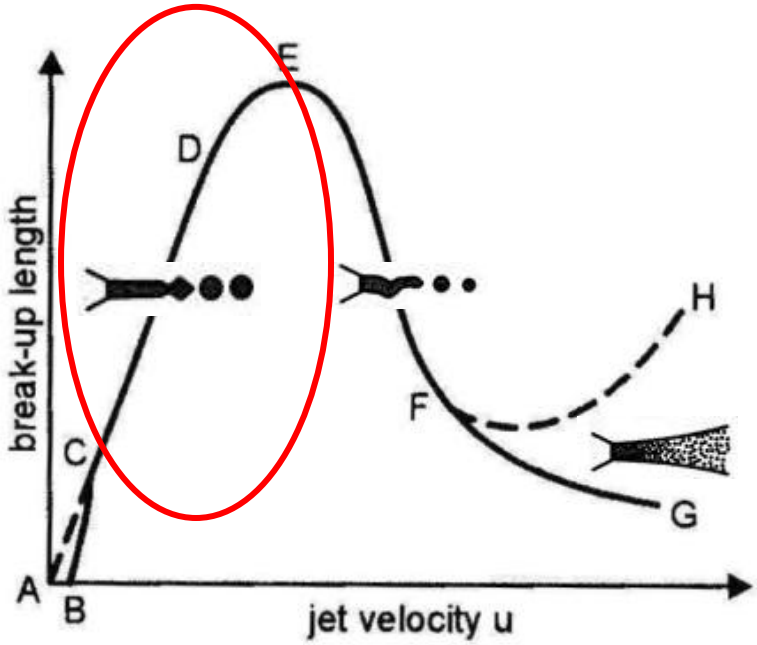


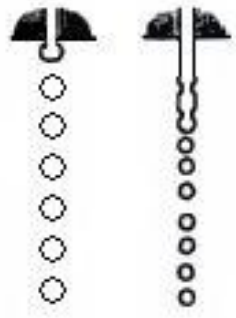


A-B-C

Theorie des Strahlzerfalls
Zerfallsbereiche

- A-B-C: Abtropfen
  - Keine Bildung eines Strahls durch zu geringe Geschwindigkeit
- C-D-E: Rayleigh-Zerfall
  - Zerfall allein durch Oberflächenspannung
  - Tropfen > Strahldurchmesser

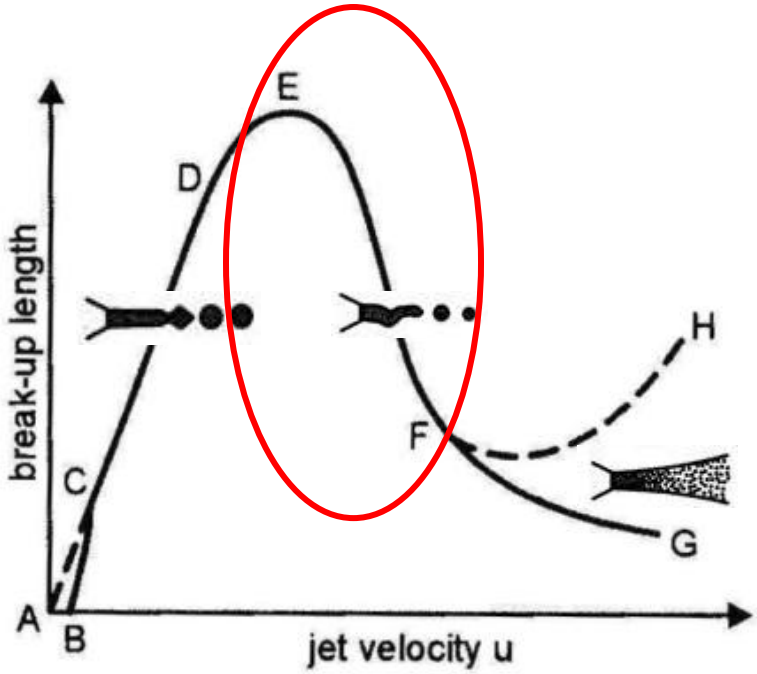


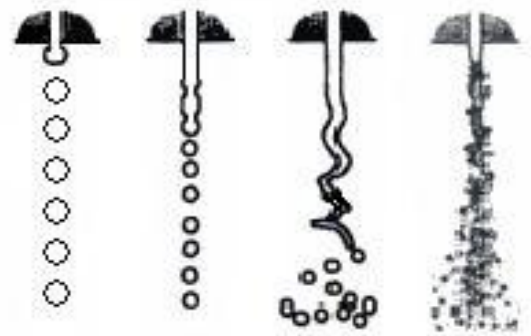


A-B-C C-D-E

Theorie des Strahlzerfalls
Zerfallsbereiche

- A-B-C: Abtropfen
  - Keine Bildung eines Strahls durch zu geringe Geschwindigkeit
- C-D-E: Rayleigh-Zerfall
  - Zerfall allein durch Oberflächenspannung
  - Tropfen > Strahldurchmesser
- E-F: windinduzierter Zerfall
  - Zunehmender Einfluss aerodynamischer Kräfte
  - Tropfen ~ Strahldurchmesser

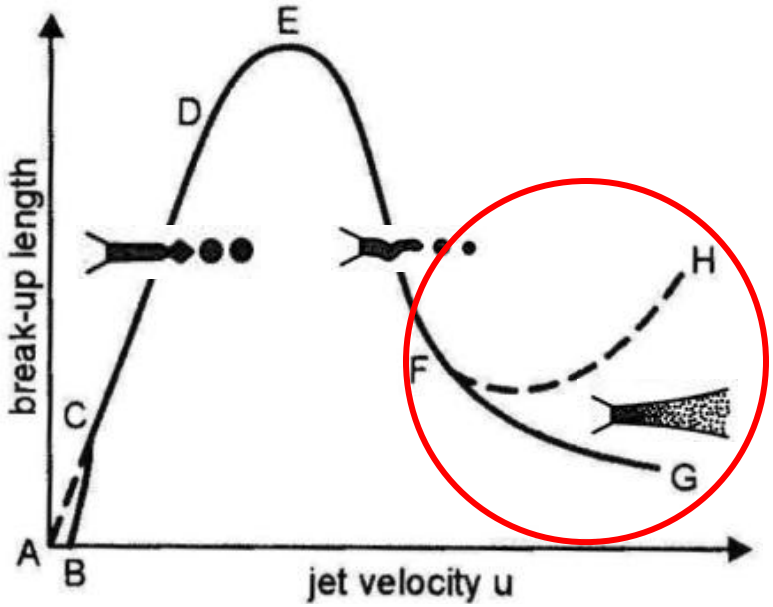


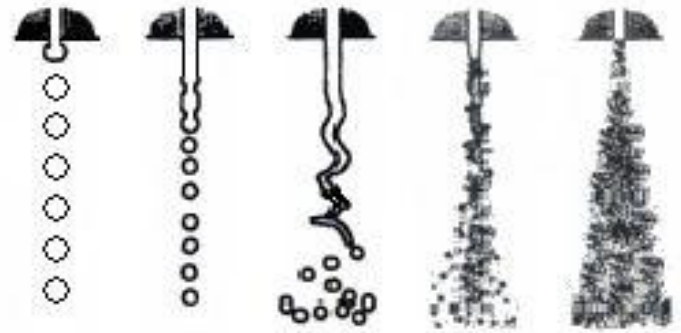


A-B-C C-D-E E-F

Theorie des Strahlzerfalls
Zerfallsbereiche

- A-B-C: Abtropfen
  - Keine Bildung eines Strahls durch zu geringe Geschwindigkeit
- C-D-E: Rayleigh-Zerfall
  - Zerfall allein durch Oberflächenspannung
  - Tropfen > Strahldurchmesser
- E-F: windinduzierter Zerfall
  - Zunehmender Einfluss aerodynamischer Kräfte
  - Tropfen ~ Strahldurchmesser
- F-G-H: Zerstäubung
  - Weitgehend chaotischer Zerfall des Strahls (aerodynamische Kräfte, Turbulenz, Kavitation)
  - Tropfen << Strahldurchmesser

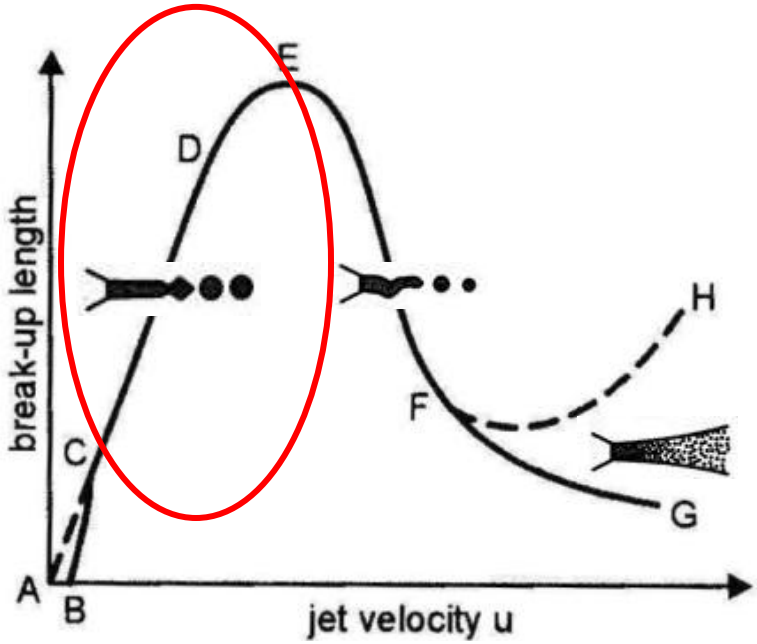


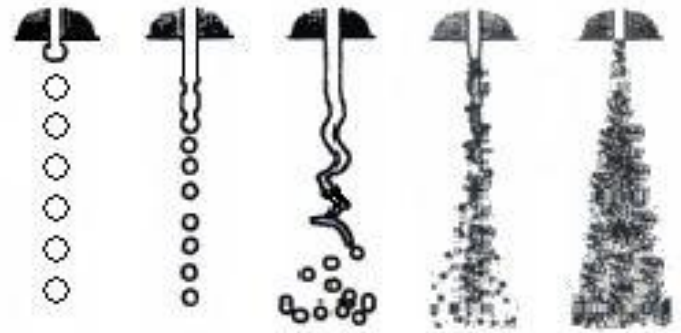


A-B-C C-D-E E-F F-G-H

Theorie des Strahlzerfalls
Zerfallsbereiche

- A-B-C: Abtropfen
  - Keine Bildung eines Strahls durch zu geringe Geschwindigkeit
- C-D-E: Rayleigh-Zerfall
  - Zerfall allein durch Oberflächenspannung
  - Tropfen > Strahldurchmesser
- E-F: windinduzierter Zerfall
  - Zunehmender Einfluss aerodynamischer Kräfte
  - Tropfen ~ Strahldurchmesser
- F-G-H: Zerstäubung
  - Weitgehend chaotischer Zerfall des Strahls (aerodynamische Kräfte, Turbulenz, Kavitation)
  - Tropfen << Strahldurchmesser





A-B-C C-D-E E-F F-G-H

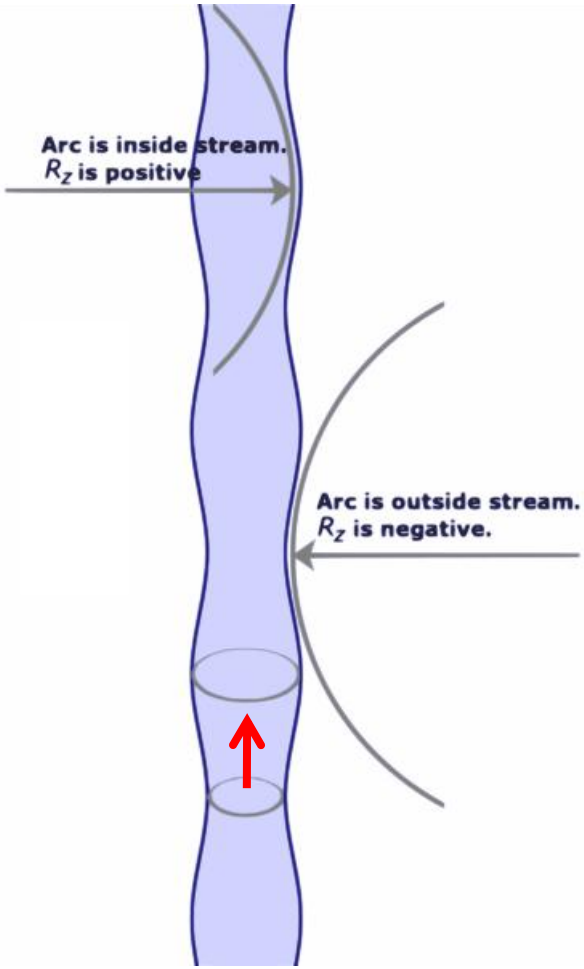
Theorie des Strahlzerfalls
Rayleigh-Zerfall

- Strahl ist durch zylindrische Form bestrebt Oberfläche zu reduzieren
  → Plateau-Rayleigh-Instabilität

- Instabilität führt zur Anregung kleiner Störungen
  → Entstehen anwachsender Wellen

- Physikalisch durch zwei Effekte:
  – Druckdifferenz durch unterschiedliche Strahldurchmesser
  – Kräfte durch Krümmung des Strahls in axialer Richtung

- Analytische Betrachtung des Zerfalls durch Lord Rayleigh ab 1880 (lineare Stabilitätstheorie)

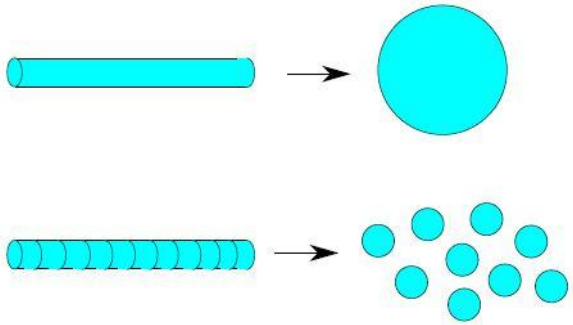


Quelle: http://en.wikipedia.org/wiki/File:SurfTensWavyJet.svg

Theorie des Strahlzerfalls
Rayleigh-Zerfall - lineare Stabilitätstheorie

CFX Berlin

- Grundlage ist Betrachtung der Oberflächenenergie zwischen gestörtem und ungestörtem Freistrahl

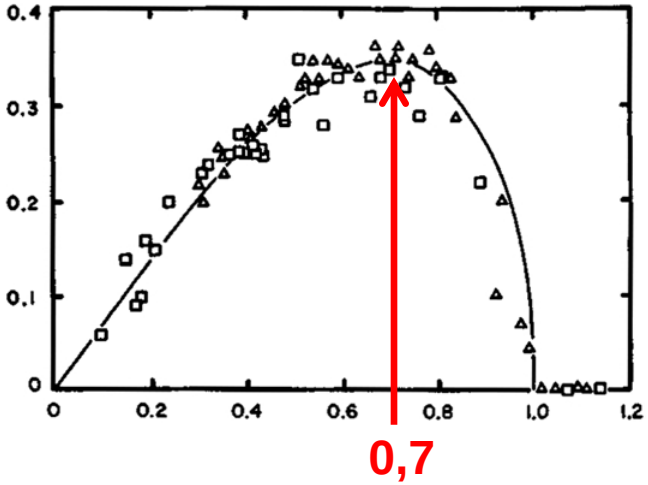


- Ergibt Anregung einer periodischen Störung nur für Wellenzahlen mit

$$\rightarrow \quad k < \frac{1}{r_0}$$

- Durch zusätzliche Betrachtung der zeitlichen Änderung der Amplitude einer Störung ergibt sich ein Optimum für

$$\rightarrow \quad k \cdot r_0 \approx 0{,}7 \qquad \text{bzw.} \qquad \lambda_{opt} \approx 9 \cdot r_0$$



Quelle: Eggers, Jan and Villermaux, Emmanuel *„physics of liquid jets“* IOP Publishing, 2007

Gliederung

- Motivation
- Theorie des Strahlzerfalls
  - Grundlagen
  - Zerfallsbereiche
  - Rayleigh-Zerfall
- Simulation des Rayleigh-Zerfalls
  - Simulationsbedingungen
  - Validierung der Ergebnisse
  - Sensitivität der Ergebnisse
  - Simulation in 3D
- Fazit und Ausblick

Quelle: Wadhwa, Navish Jung, Sunghwan "Non-coalescence of jets" virginia tech, 2011

Simulation des Rayleigh-Zerfalls
Einführung

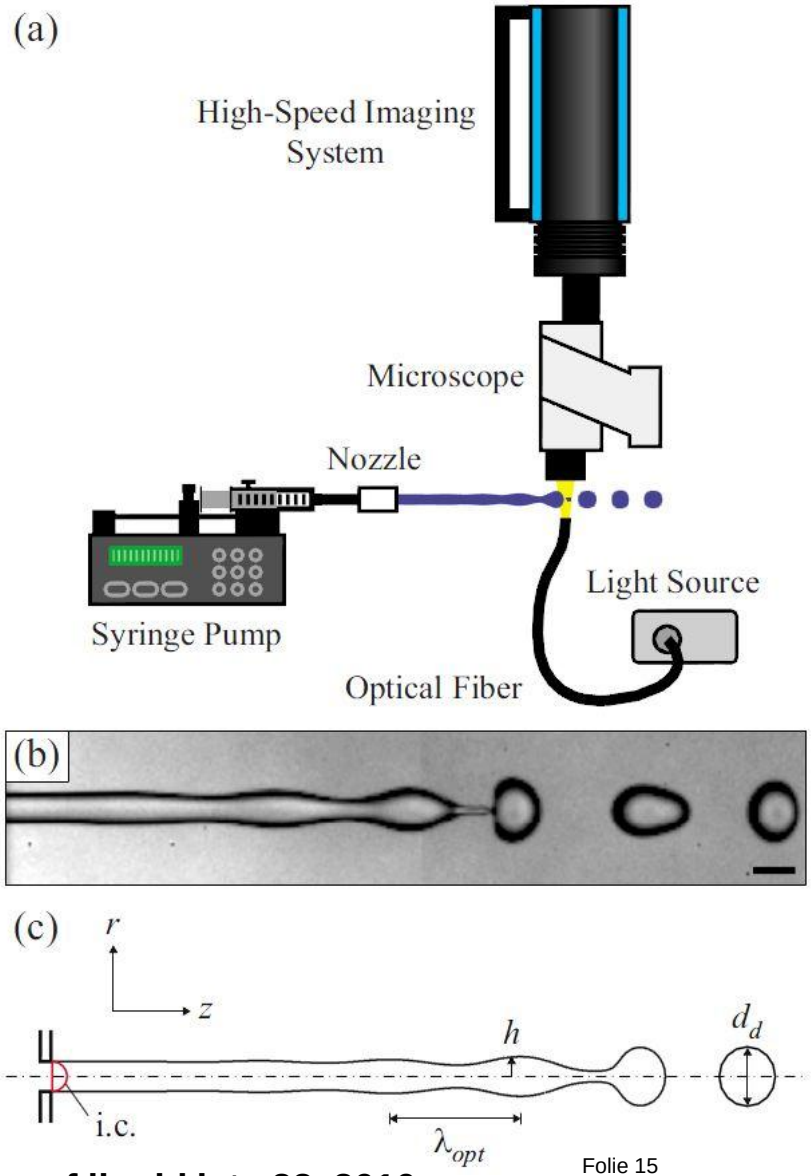
CFX Berlin

- Aufsetzen eines Referenzfalls zur späteren Validierung

- Daten stammen aus Untersuchung des Rayleigh-Zerfalls für sehr geringe Strahldurchmesser (18,5 µm)

  → Hohe Austrittsgeschwindigkeit (5,4 m/s)
  → Gravitation kann vernachlässigt werden

- Experimentelle Untersuchung zur Validierung eines numerischen Modells

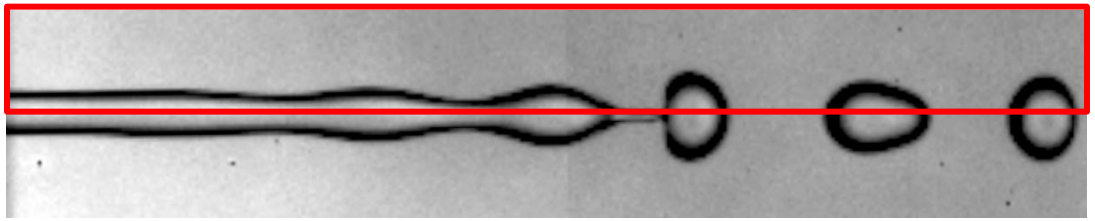


Quelle: von Hoeve, Wilm *„Breakup of diminutive Rayleigh jets„* physics of liquid jets 22, 2010

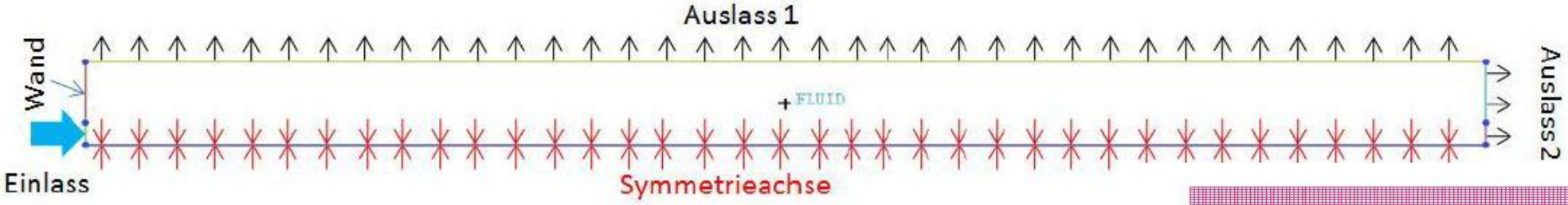
Simulation des Rayleigh-Zerfalls
Simulationsbedingungen

CFX Berlin

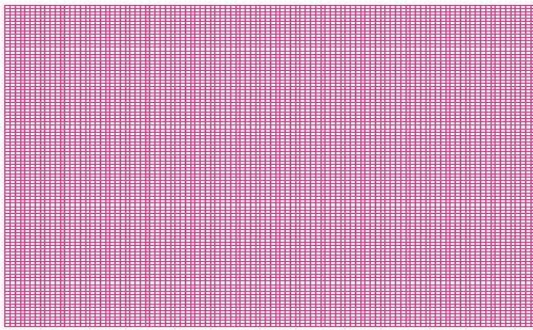
- Geometrie
  - Ausnutzung der Symmetrie des Freistrahls:
    - → zweidimensional
    - → axialsymmetrisch
  - Keine Berücksichtigung der Strömung in der Düse
  - Einlasshöhe: 18,5 µm
  - 70 µm x 1200 µm



Quelle: von Hoeve, Wilm „*Breakup of diminutive Rayleigh jets*„ physics of liquid jets 22, 2010



- Gitter
  - Möglichst Seitenverhältnis 1:1
  - 140 x 2400 Gitterpunkte
    = 336 000 Gitterpunkte



Simulation des Rayleigh-Zerfalls
Simulationsbedingungen

CFX Berlin

- Modelle und numerische Startbedingungen
  - Mehrphasenmodell:
    - Volume of Fluid:
      - » Explicit
      - » Geo Reconstruct
    - Surface tension: *67,9* mN/m
  - Zeitschrittweite: 0,08 µs (damit CFL-Zahl < 1)

- Stoff- und Randbedingungen

	Phase 1 (weiß)	**Phase 2 (blau)**
Stoff	Luft	Wasserähnliche Lösung
Dichte	*1,225* kg/m^3	*1098* kg/m^3
Viskosität	*0,0178* mPa s	*3,65* mPa s
Volumenanteil (Start)	*100* %	*0* %
Massenfluss	*0* g/s	*6,38* g/s (5,4 m/s)

Simulation des Rayleigh-Zerfalls
Mechanismus zur gezielten Anregung

CFX Berlin

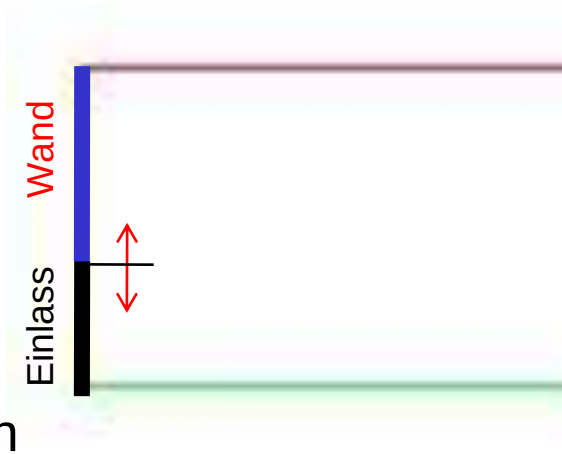
- Simulation stellt immer einen idealisierten Zustand dar
  → Störungen, welche die Instabilität des Freistrahls anregen, müssen erzeugt werden

- Nachahmung durch Modulation des Radius mit optimaler Wellenlänge nach Stabilitätstheorie und minimaler Amplitude:

  → $\lambda_{opt} = 9 \cdot r_0$ und $A = 0{,}005 \cdot r_0$ (0,5%)

- Änderung des Radius über Gitterverformung im Bereich des Einlass

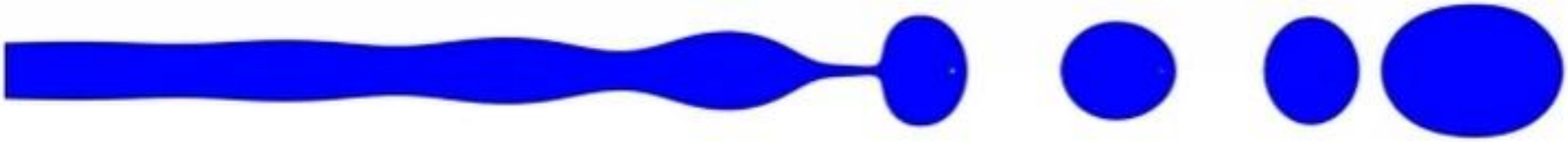
- Kann über UDFs (*user defined functions)* in ANSYS FLUENT programmiert und angepasst werden



Simulation des Rayleigh-Zerfalls
Vergleich mit/ohne Anregung

CFX Berlin

Ungestörter Freistrahl



Freistrahl mit Anregung

Gliederung

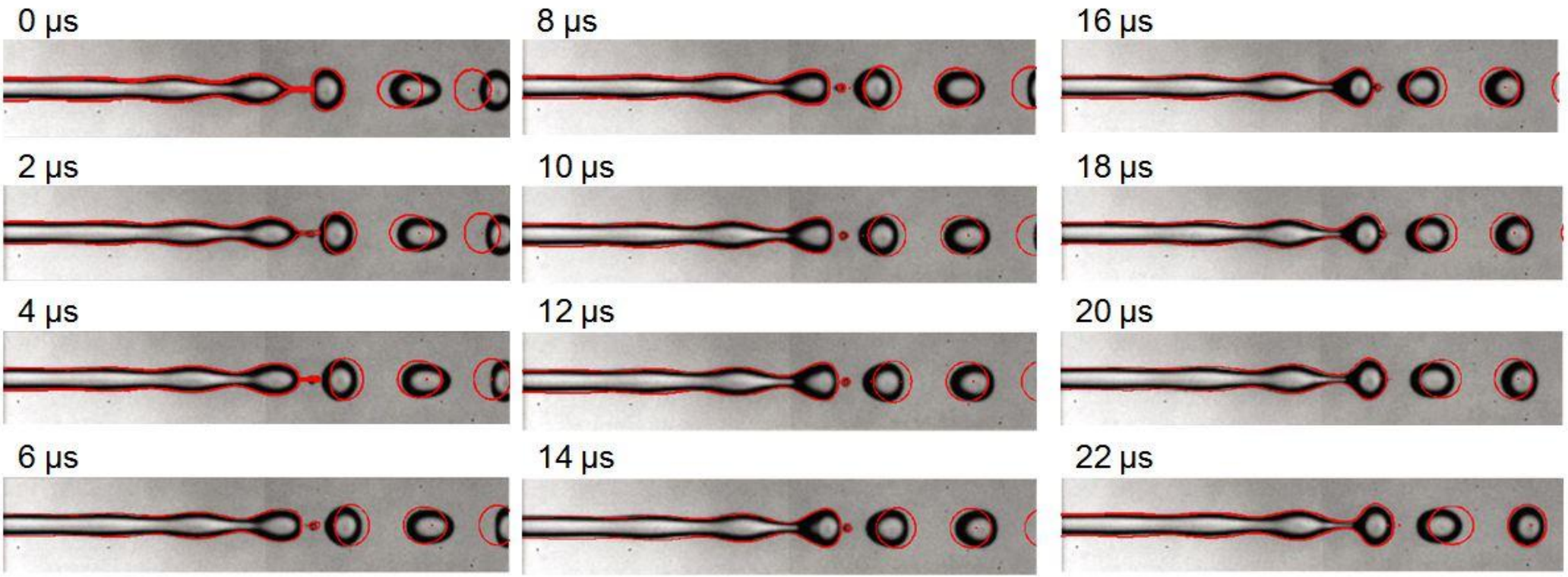
- Motivation
- Theorie des Strahlzerfalls
  - Grundlagen
  - Zerfallsbereiche
  - Rayleigh-Zerfall
- Simulation des Rayleigh-Zerfalls
  - Simulationsbedingungen
  - Validierung der Ergebnisse
  - Sensitivität der Ergebnisse
  - Simulation in 3D
- Fazit und Ausblick

Quelle: Wadhwa, Navish Jung, Sunghwan "Non-coalescence of jets" virginia tech, 2011

Simulation des Rayleigh-Zerfalls
Validierung der Ergebnisse

CFX Berlin

- Sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse für:
  - Form des Strahls
  - Tropfengröße und Erfassung der Dynamik
  - Bildung von Satellitentropfen



Gliederung

- Motivation
- Theorie des Strahlzerfalls
  - Grundlagen
  - Zerfallsbereiche
  - Rayleigh-Zerfall
- Simulation des Rayleigh-Zerfalls
  - Simulationsbedingungen
  - Validierung der Ergebnisse
  - Sensitivität der Ergebnisse
  - Simulation in 3D
- Fazit und Ausblick

Quelle: Wadhwa, Navish Jung, Sunghwan "Non-coalescence of jets" virginia tech, 2011

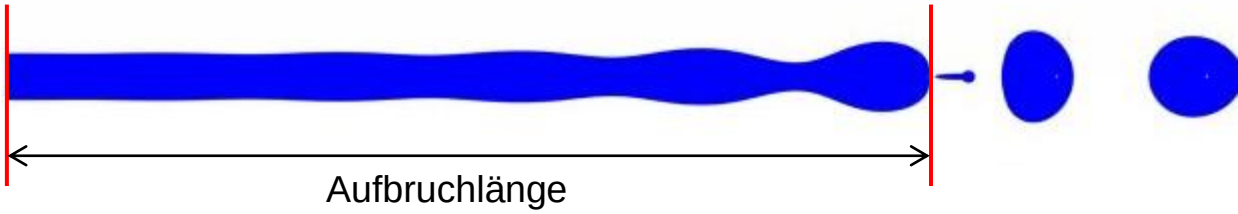
Simulation des Rayleigh-Zerfalls
Sensitivität der Ergebnisse

CFX Berlin

- Untersucht wurde der Einfluss verschiedener Parameter auf die Simulationsergebnisse
  - Anregungsparameter
  - Stoffeigenschaften

- Betrachtet werden:
  - Aufbruchlänge
  - Entstehung von Satellitentropfen

- Referenzfall ist immer durch rote Linie gekennzeichnet



Simulation des Rayleigh-Zerfalls
Sensitivität der Ergebnisse - Anregungsparameter

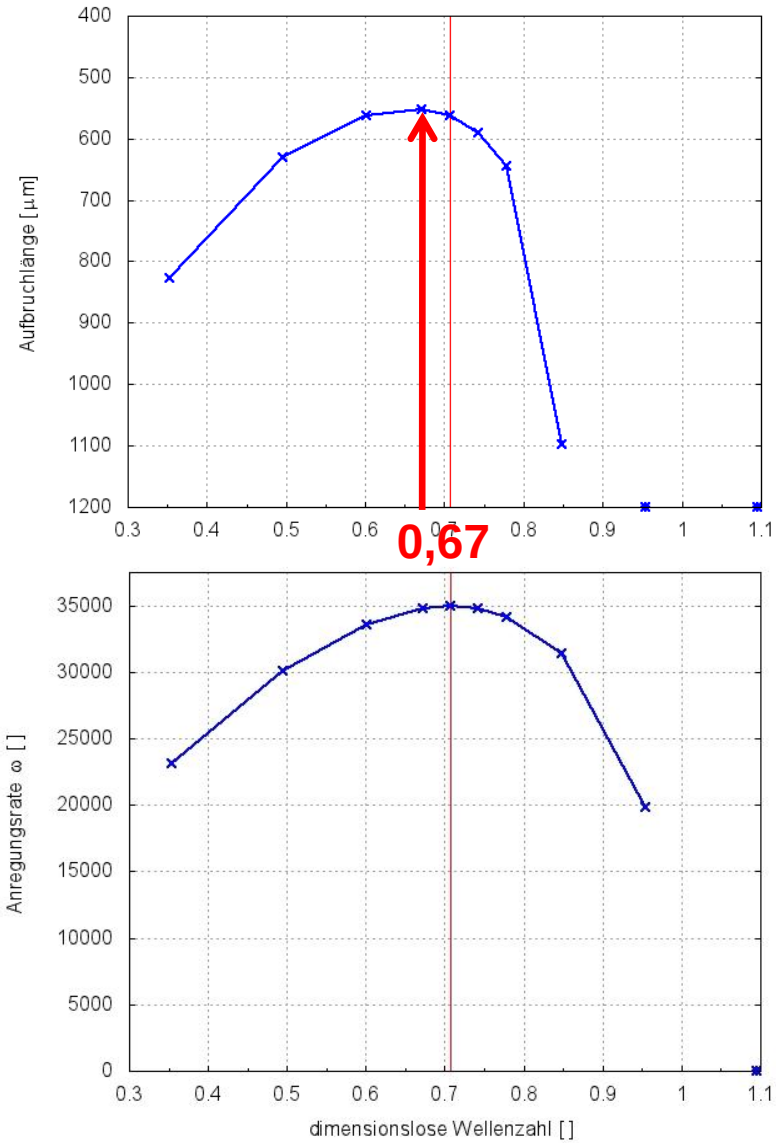
CFX Berlin

- Kreisfrequenz
  - Vergleich mit Theorie durch Umrechnen der Kreisfrequenz in dimensionslose Wellenzahl

    → $$k \cdot r_0 = \frac{r_0 \cdot \omega}{v}$$

  - Gute Übereinstimmung für Verlauf der Kurve
  - Abweichung in Extrema zeigt Vereinfachungen der <u>linearen</u> Theorie
  - Kürzeste Aufbruchlänge für

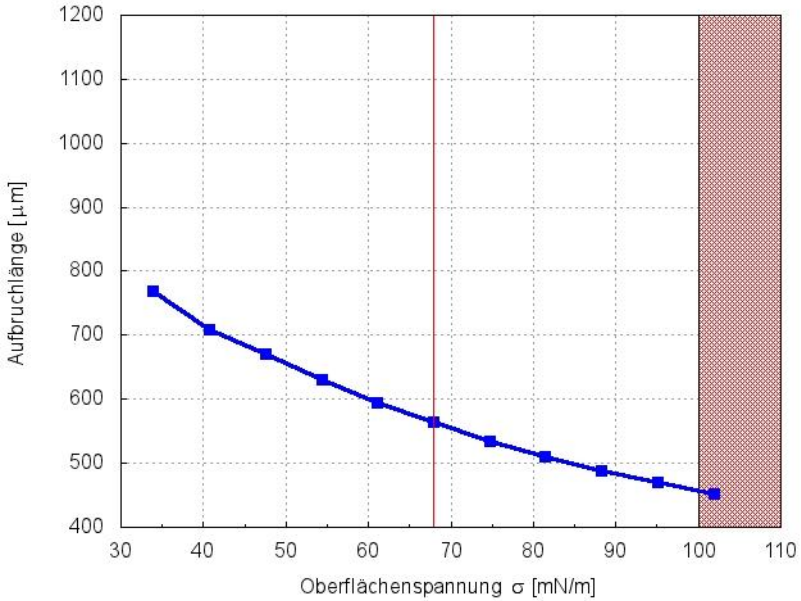
    → $$k \cdot r_0 \approx 0{,}67$$

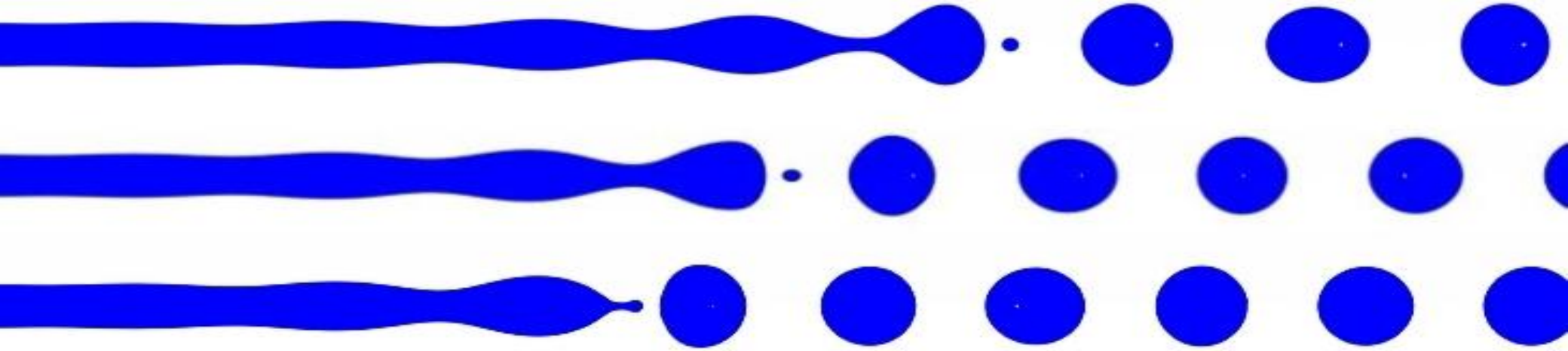


Simulation des Rayleigh-Zerfalls
Sensitivität der Ergebnisse - Stoffeigenschaften

CFX Berlin

- Oberflächenspannungs-Koeffizient
  - Aufbruchlänge nimmt mit steigender Oberflächenspannung ab
  - Nichtlinearer Zusammenhang zwischen Aufbruchlänge und Oberflächenspannungs-Koeffizient
  - Lineare Theorie: Anregungsrate ~ $\sqrt{\sigma}$

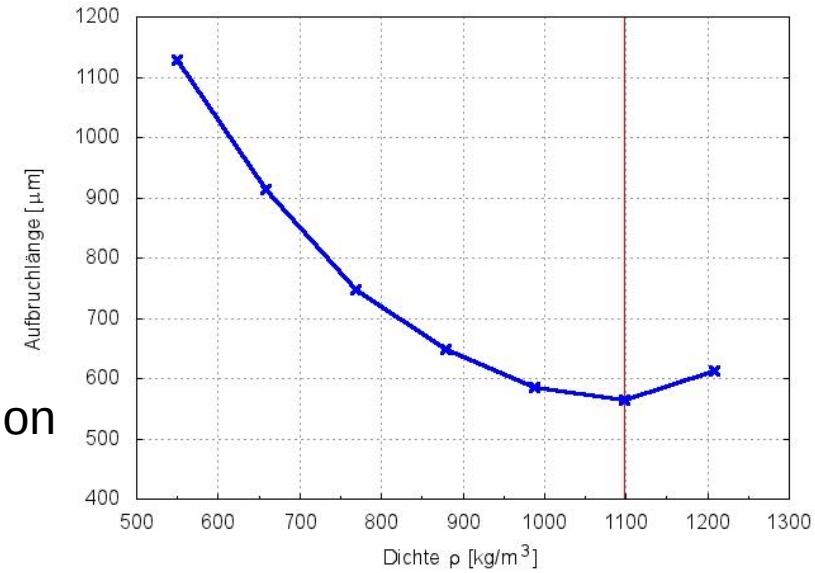


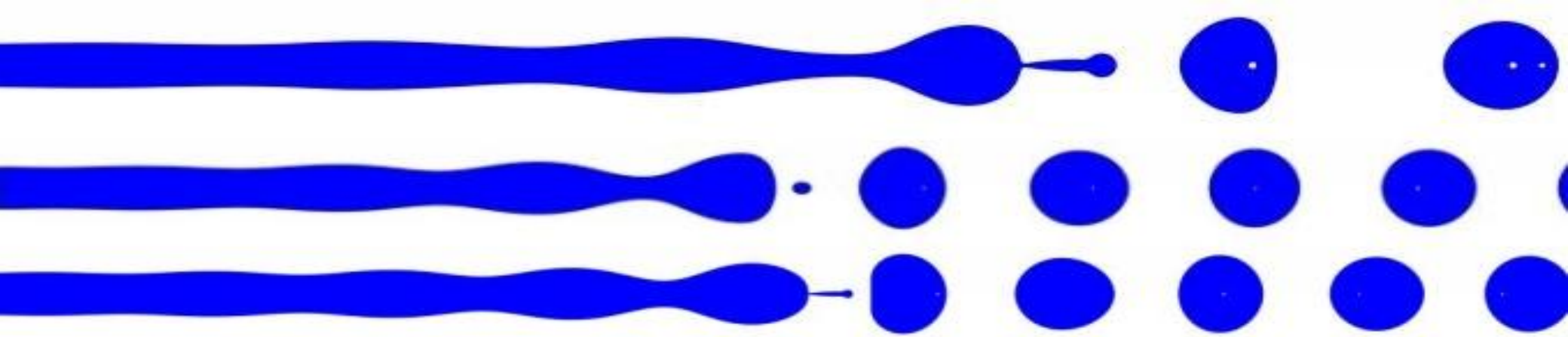


Simulation des Rayleigh-Zerfalls
Sensitivität der Ergebnisse - Stoffeigenschaften

CFX Berlin

- Dichte
  - Änderung führt zu zwei Effekten:
    1. Änderung der Anregungsrate
    2. Änderung der Geschwindigkeit des Strahls
  - Überlagerung bestätigt den durch Simulation erzielten Verlauf der Aufbruchlänge
  - Änderung der Wellenlänge und der Anregung

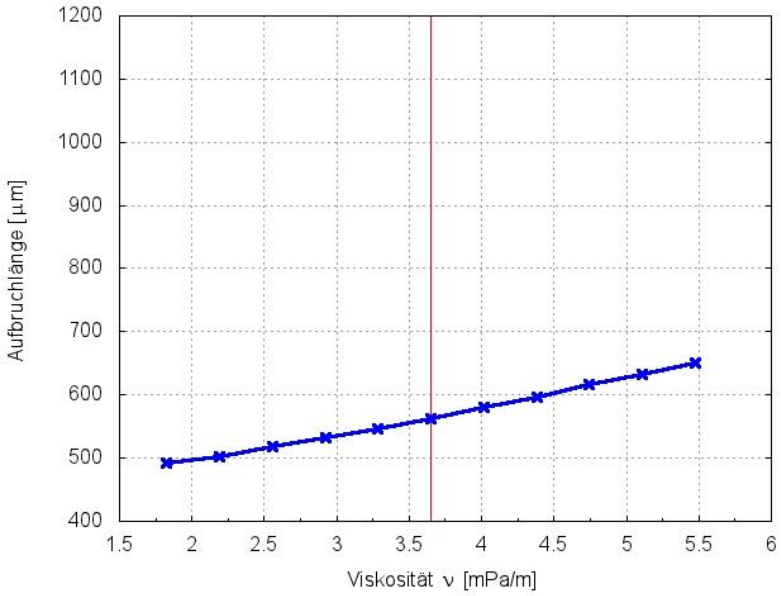


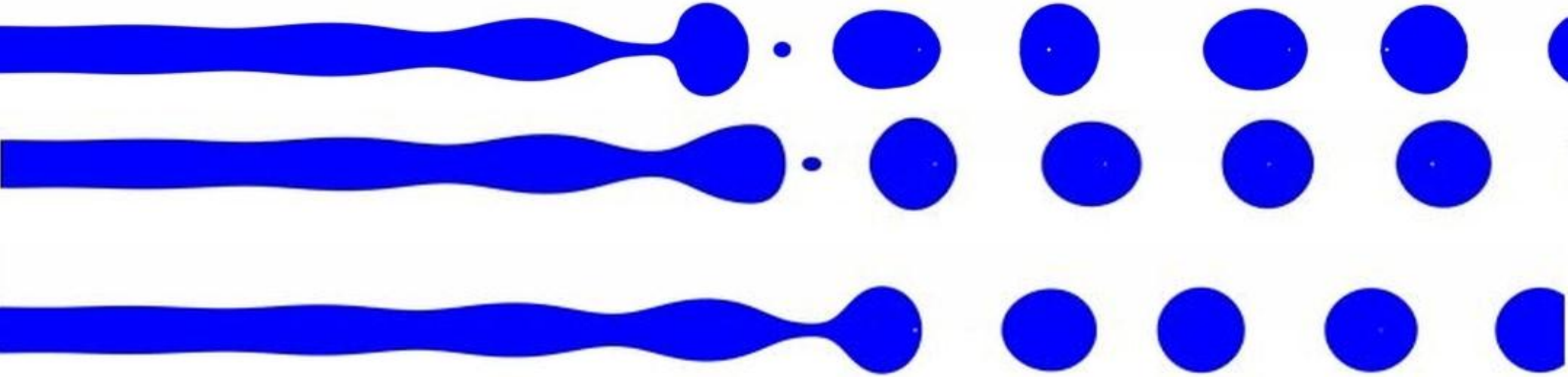


Simulation des Rayleigh-Zerfalls
Sensitivität der Ergebnisse - Stoffeigenschaften

CFX Berlin

- Viskosität
  - Wurde in der Stabilitätstheorie vernachlässigt
  - Linearer Anstieg der Aufbruchlänge
  - Entspricht theoretischer Vorstellung, dass Viskosität die „Stabilität“ des Strahls erhöht

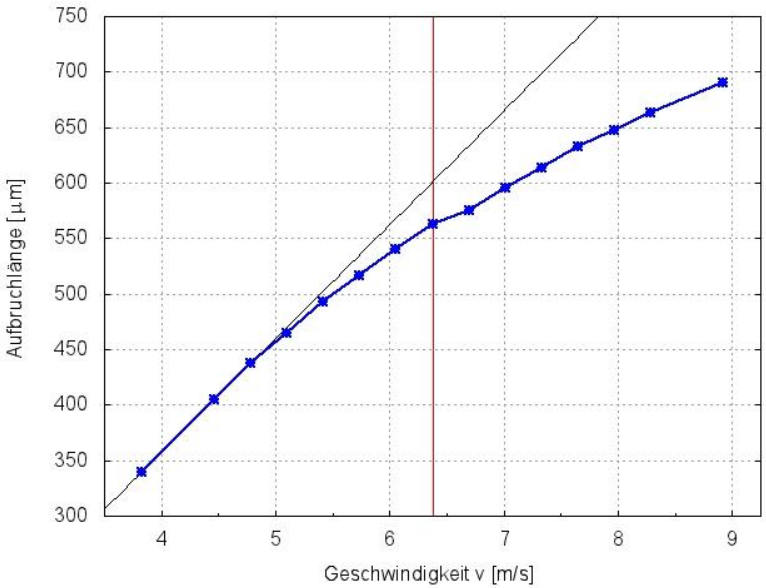


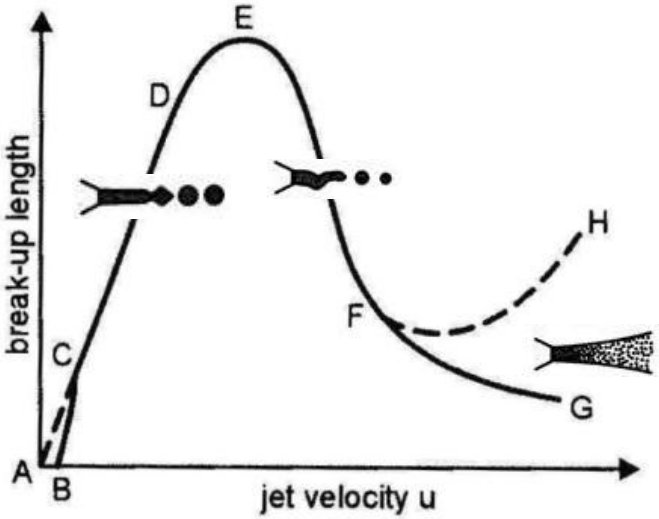


Simulation des Rayleigh-Zerfalls
Sensitivität der Ergebnisse - Austrittsgeschwindigkeit

CFX Berlin

- In der Theorie besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Aufbruchlänge und der Geschwindigkeit
- Simulation zeigt leichte Abweichung vom linearen Verlauf
- Ursache:
  - Lineare Theorie berücksichtigt nicht die aerodynamischen Kräfte
- Simulation kann Zusammenhang genauer darstellen

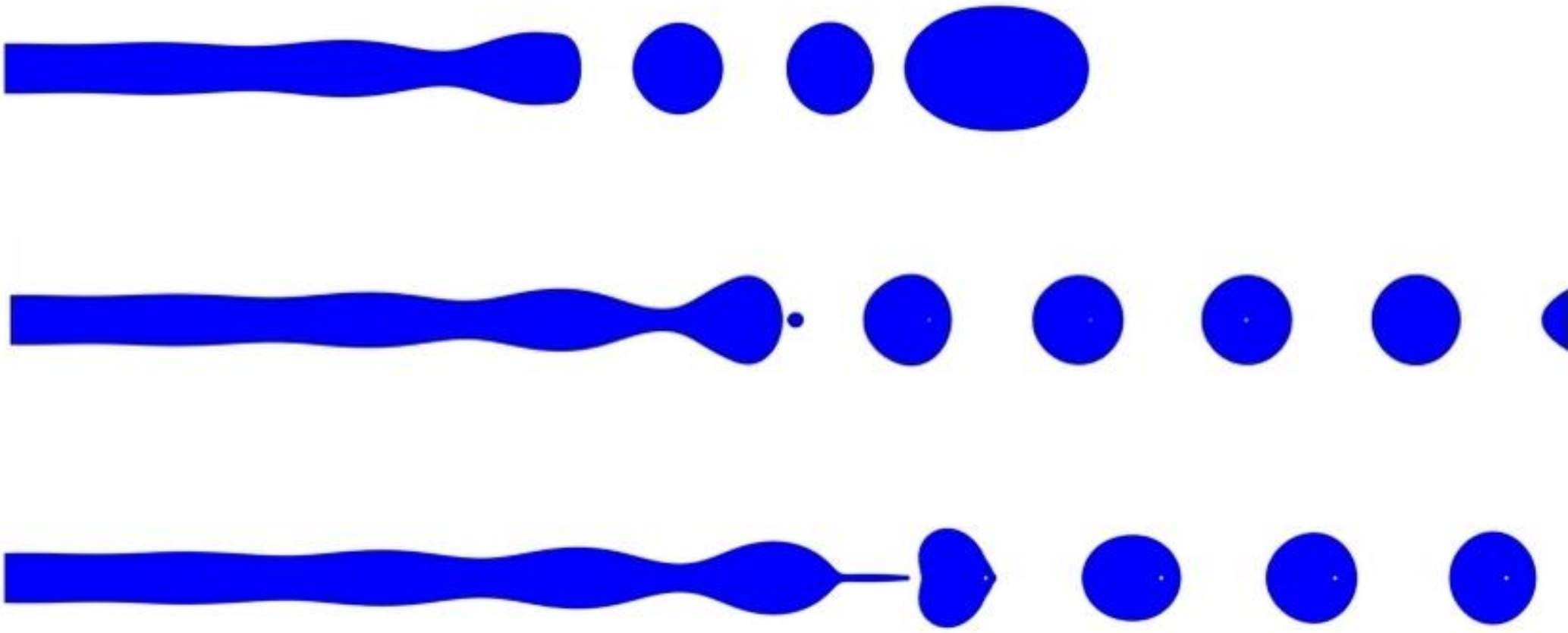




Simulation des Rayleigh-Zerfalls

Sensitivität der Ergebnisse - Austrittsgeschwindigkeit

CFX Berlin



Gliederung

- Motivation
- Theorie des Strahlzerfalls
  - Grundlagen
  - Zerfallsbereiche
  - Rayleigh-Zerfall
- Simulation des Rayleigh-Zerfalls
  - Simulationsbedingungen
  - Validierung der Ergebnisse
  - Sensitivität der Ergebnisse
  - Simulation in 3D
- Fazit und Ausblick

Quelle: Wadhwa, Navish Jung, Sunghwan "Non-coalescence of jets" virginia tech, 2011

Simulation des Rayleigh-Zerfalls
Simulation in 3D

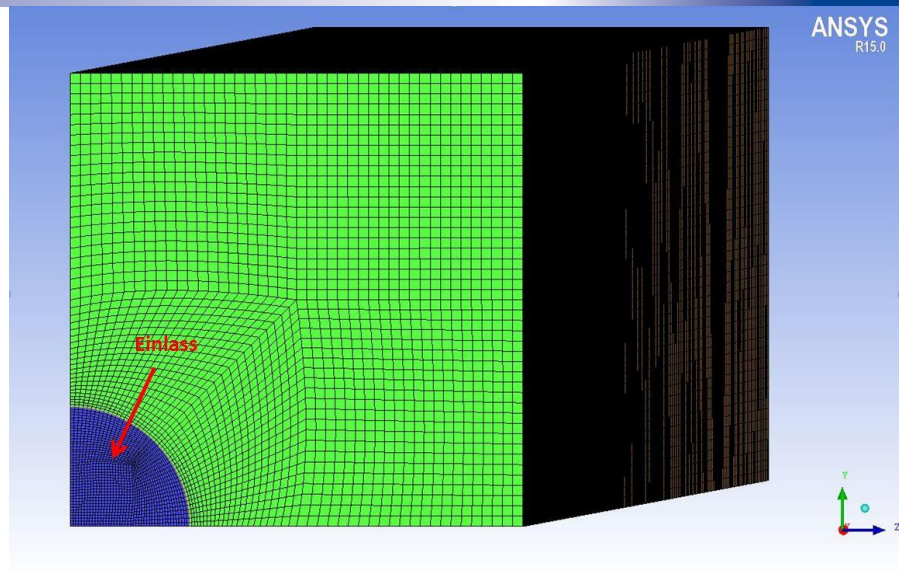
CFX Berlin

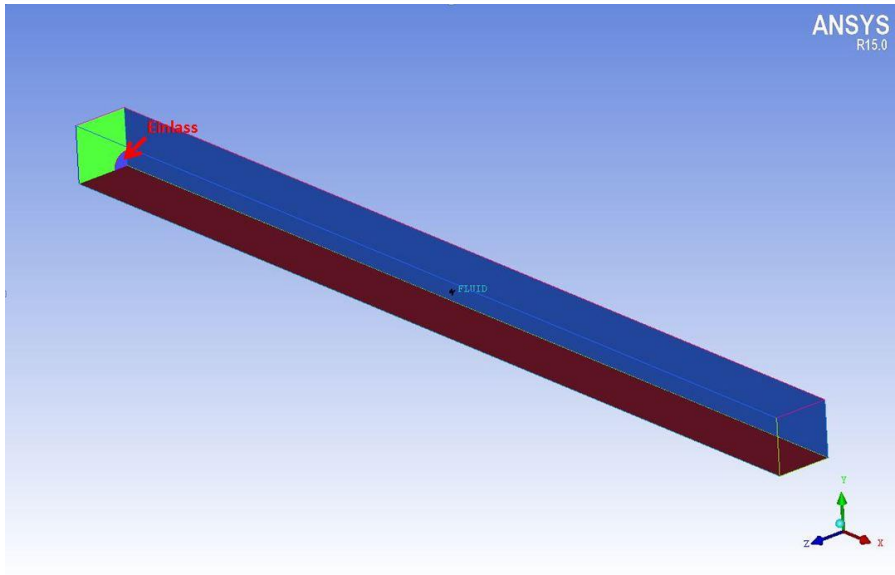
- Ausnutzung der Symmetrie
  → Viertelmodell

- Start und Randbedingungen wurden aus zweidimensionalem Referenzfall übernommen

- Schrittweise Vergröberung des Gitters nach außen

- Für das Rechengebiet ergeben sich:
  – 4.300.000 Elemente

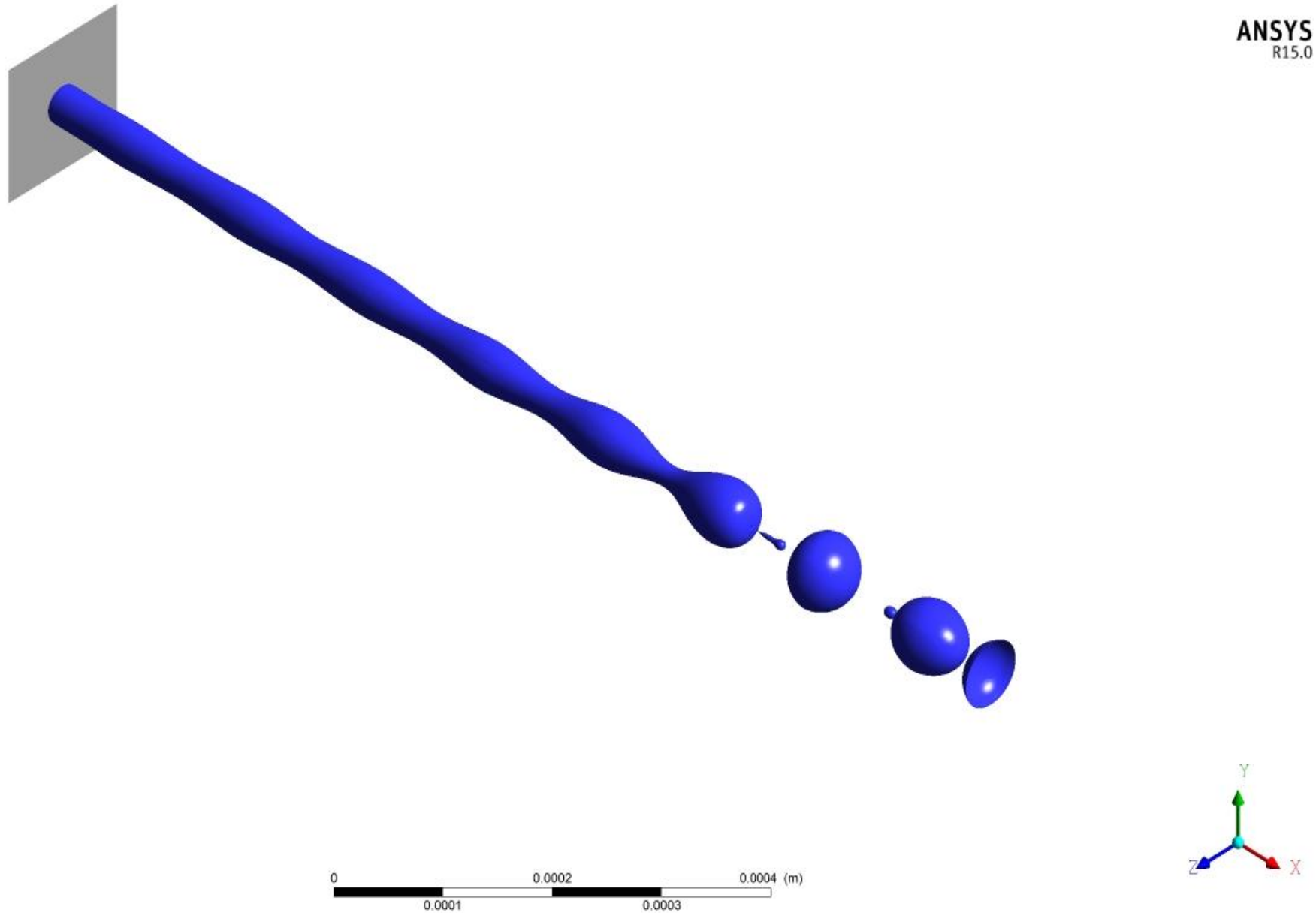




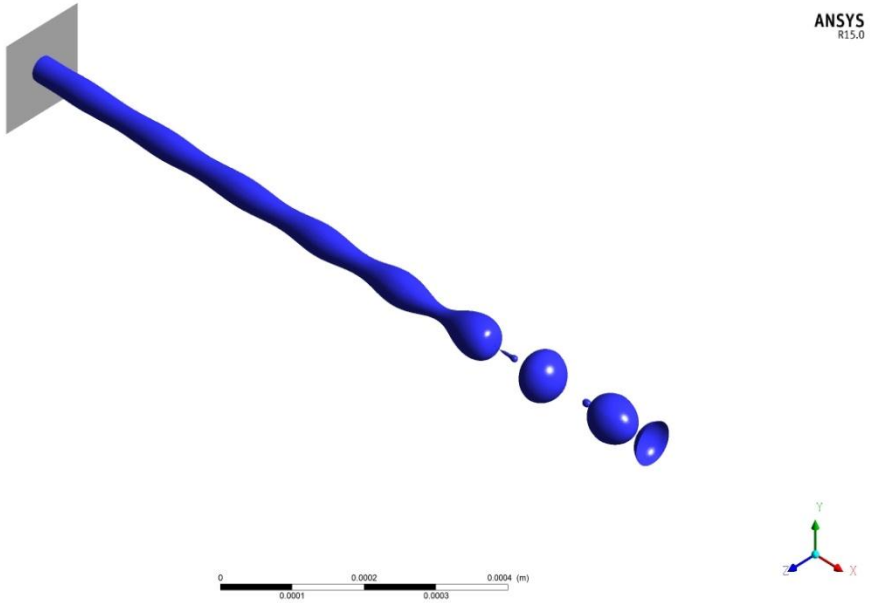
Simulation des Rayleigh-Zerfalls

Simulation in 3D

CFX Berlin



Fazit und Ausblick

- Fazit
  - Simulation des Rayleigh-Zerfalls mit gezielter Anregung und Reduzierung auf zweidimensionales Modell
  - Validierung zeigte hervorragende Übereinstimmung der Simulationsergebnisse
  - Einfluss verschiedener Parameter auf den Strahlzerfall konnte gezeigt und durch Stabilitätstheorie bestätigt werden

- Ausblick
  - Berücksichtigung der Strömung in der Düse
  - Erfassung des Einflusses des Umgebungsgases
  - Simulation des windinduzierten Zerfalls