

# Entwicklung eines semianalytischen Berechnungswerkzeuges zur Modellierung des Stoffeintrages durch technische Zerstäuber für die Auslegung und Optimierung verfahrenstechnischer Prozesse

Dipl.-Ing. D. Beerbaum, Dr.-Ing. D. Bernhardt und Prof. Dr.-Ing. M. Beckmann // TU Dresden // Professur für Energieverfahrenstechnik // 01062 Dresden  
Dr.-Ing. Tobias Jakobs und Prof. Dr.-Ing. T. Kolb // Karlsruher Institut für Technologie // Institut für Technische Chemie // 76021 Karlsruhe

## Motivation

Ergänzend zu CFD-basierten Berechnungsmodellen welche den Nachteil des hohen Berechnungsaufwandes mit sich bringen soll ein vereinfachter analytischer Modellansatz zur Berechnung des Stoffeintrags in einen Reaktor durch technische Zerstäuber entwickelt werden.

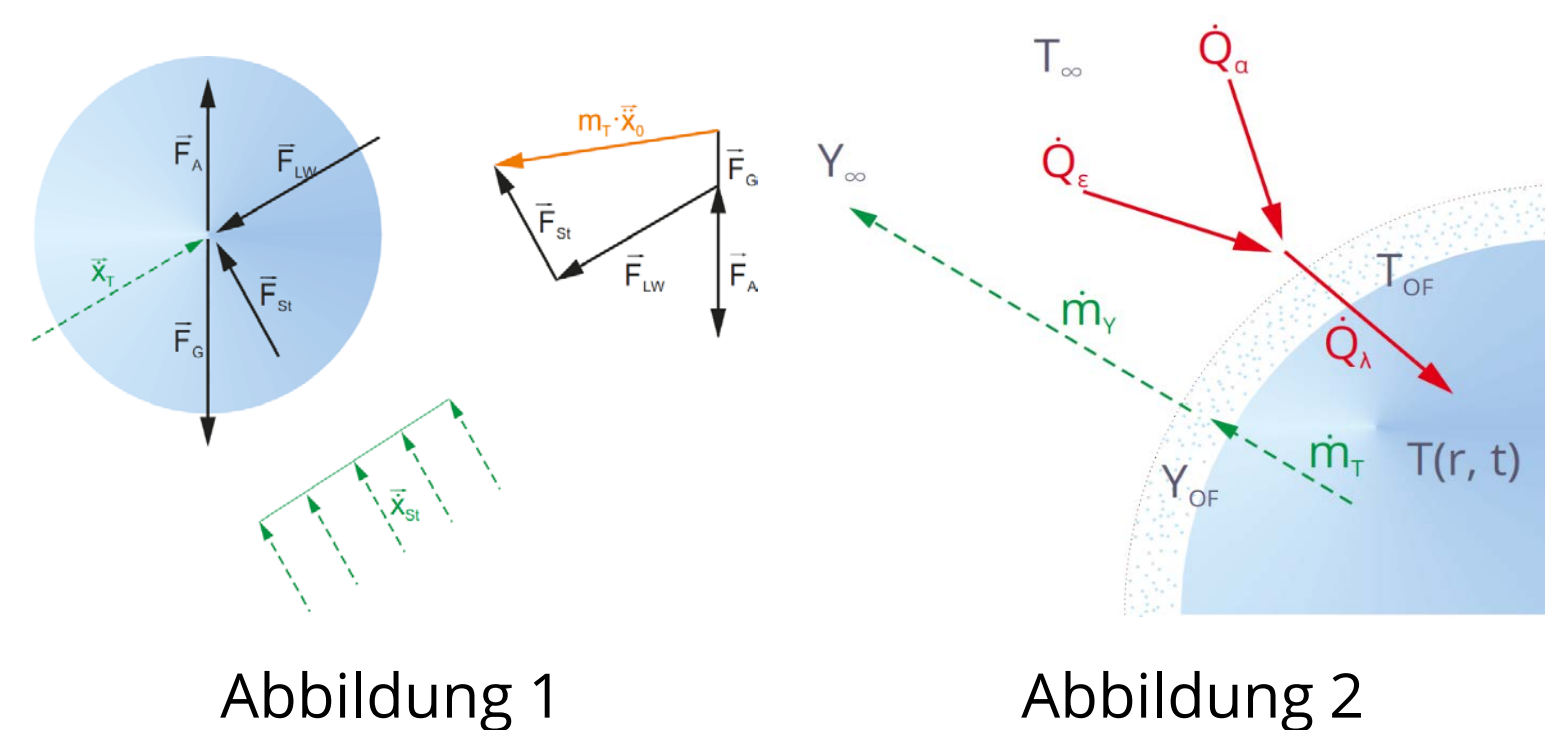


Abbildung 1

Abbildung 2

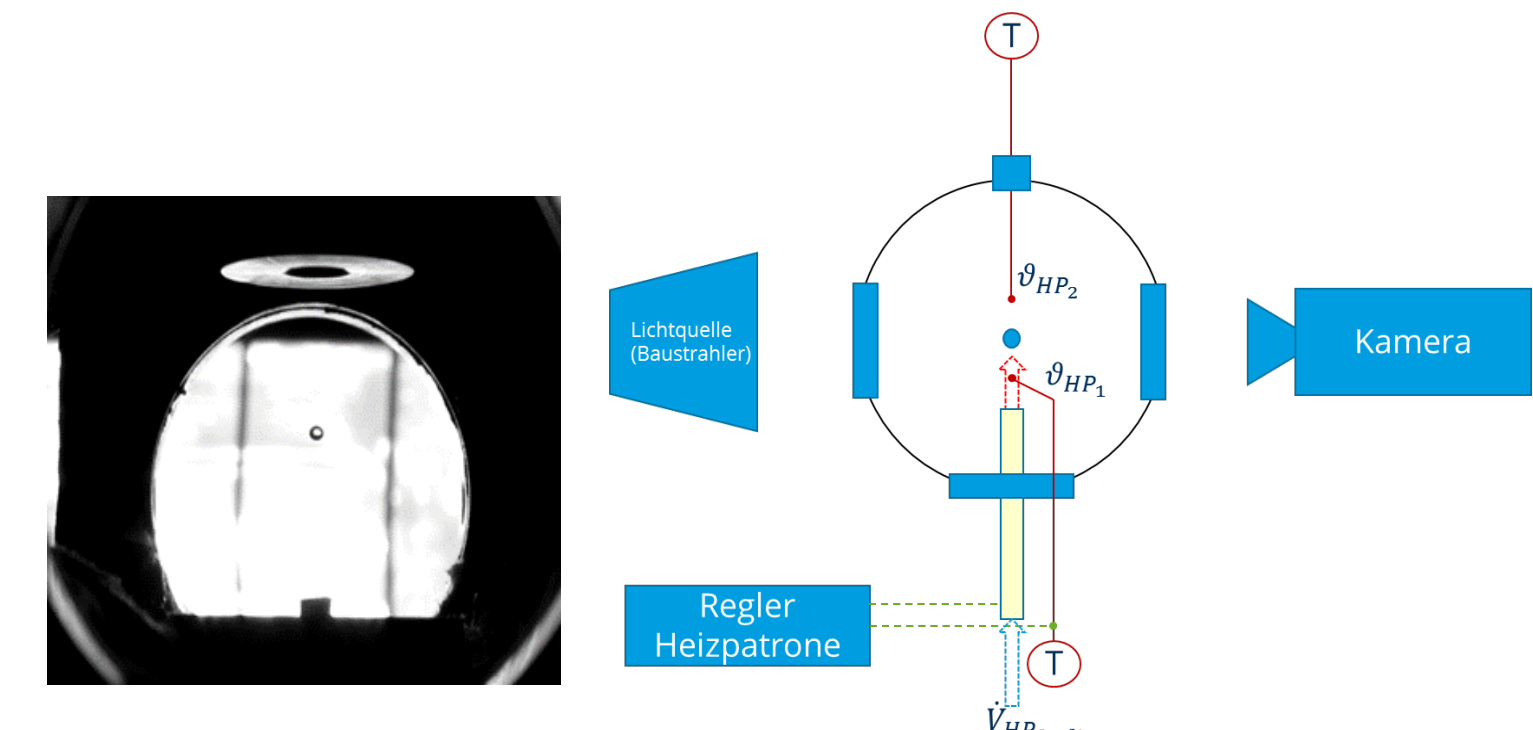


Abbildung 3

Abbildung 4

## Modellkonzept

Der Ansatz besteht in einer analytischen physikalischen Beschreibung der Tropfenverdampfung entlang einer Flugbahn.

Die Beschreibung der Tropfenbahn erfolgt über das Gleichgewicht der am Tropfen angreifenden Kräfte (Abbildung 1).

Grundlage für die Entwicklung der Verdampfungsmodelle ist die Beschreibung der Einzeltropfenverdampfung durch das D<sup>2</sup>-Gesetz. Das D<sup>2</sup>-Gesetz geht von einer Limitierung der Verdampfungsrate durch den Wärmetransport in den Tropfen und einer Limitierung durch den Stofftransport von der Phasengrenze in die Umgebung aus (siehe Abbildung 2). Zur Berücksichtigung der Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und Gas, sowie der daraus resultierenden Temperaturgradienten im Tropfen-inneren, wird ein Ansatz nach Abramzon und Sirignano verwendet [1].

## Validierung des Modellansatzes

Der entwickelte Berechnungsansatz für die Tropfenverdampfung ist durch experimentelle Verdampfungsversuche an schwebenden Einzeltropfen (Abbildung 3) in einem Ultraschall-Levitator validiert. Die Abnahme des Tropfendurchmessers beim Verdampfen mit einer luftdurchströmten Heizpatrone zeichnet eine Hochgeschwindigkeitskamera auf (Abbildung 4). Die experimentellen Untersuchungen sind mit verschiedenen Reinstoffen, Zweistoffgemischen, Lösungen und Suspensionen durchgeführt worden. Dabei konnte ein Temperaturbereich von 20 – 150 °C realisiert werden. Die Auswertungen zeigen gute Übereinstimmung der Modellansätze mit den Versuchsdaten (siehe Abbildung 5).

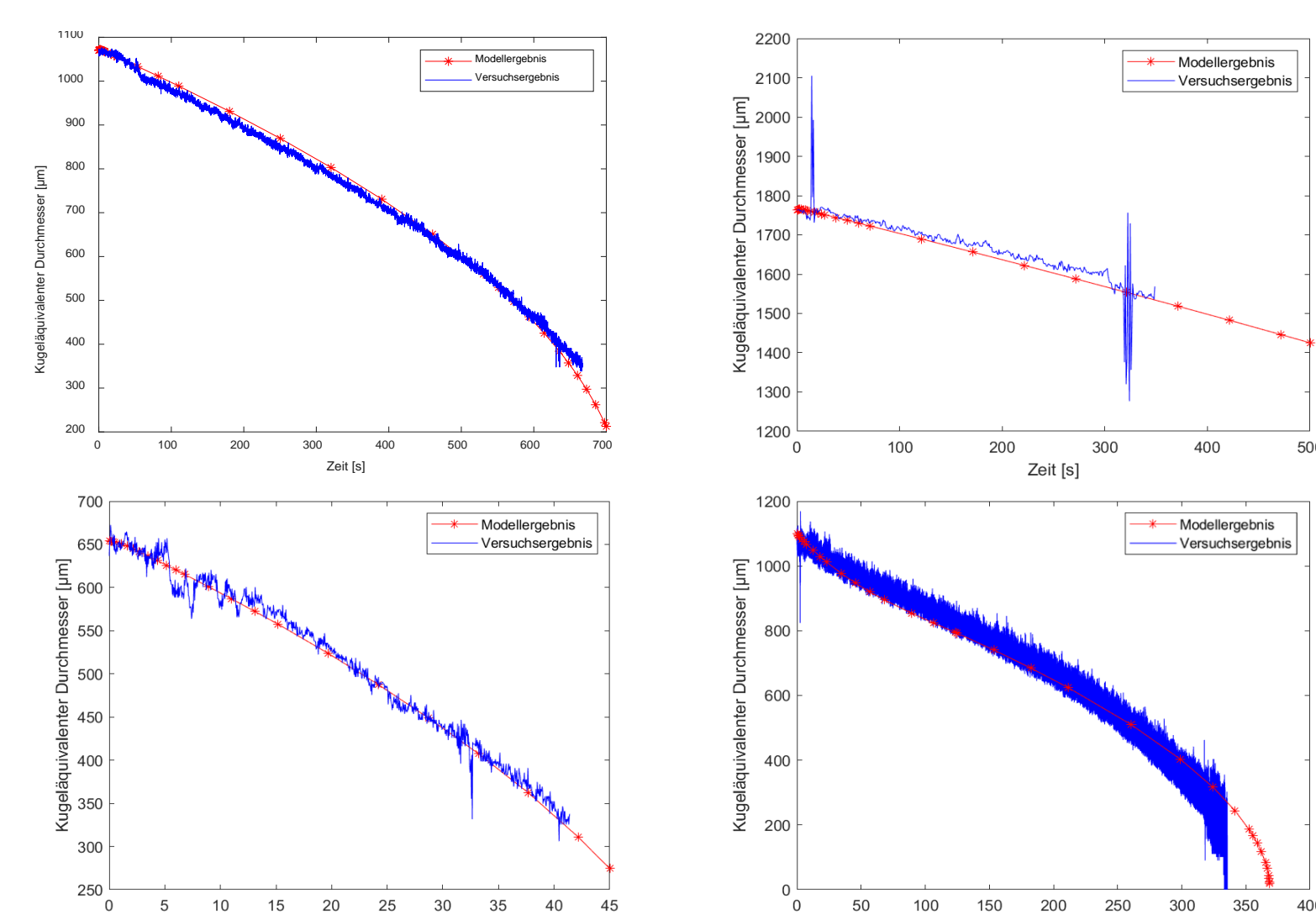
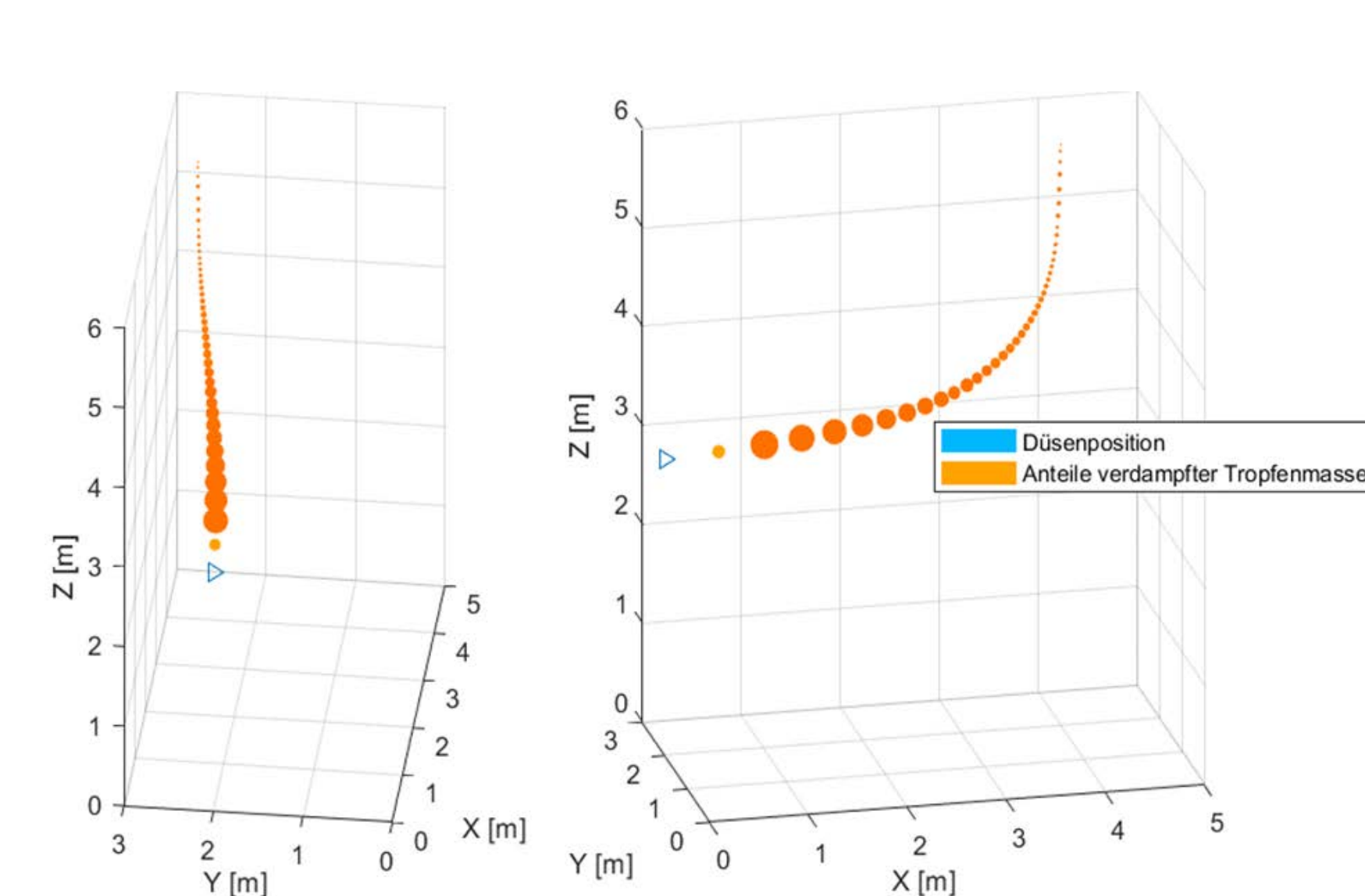


Abbildung 5

## Vollständige Modellierung

Aus der Koppelung von Tropfenbewegung und Verdampfung resultiert ein DGL-System. Die Lösung des Gleichungssystems liefert zeitlich und räumlich aufgelöst die Stofffreisetzung bei der Verdampfung eines Tropfens (siehe Abbildung 6). Angewendet auf ein Tropfenkollektiv, welches über die Betriebsparameter der Düse und der resultierenden Spraycharakteristik beschrieben ist, kann der Stoffeintrag in einen Reaktionsraum unter Berücksichtigung der dort vorherrschenden Bedingungen bestimmt werden. Abbildung 7 zeigt den lokalen Massenanteil an verdampften Sprühmedium, der durch eine Düse in einen Reaktorraum eingetragen wird. Dabei ist der Reaktor durch eine Diskretisierung in 10x10x10 Volumenelemente aufgeteilt. Jede farbige Kugel repräsentiert ein Volumenelement mit Anteil am verdampften Sprühmedium. Die Strömung im Reaktor hat großen Einfluss auf die Verteilung. So wird das verdampfte Medium mit der Strömung in Z-Richtung verteilt und ausgetragen. Das DGL-System wurde hierzu in einen MATLAB-Code überführt. Die benötigte Rechenzeit liegt mit gewöhnlicher Hardware in einem Bereich kleiner 10 Minuten.

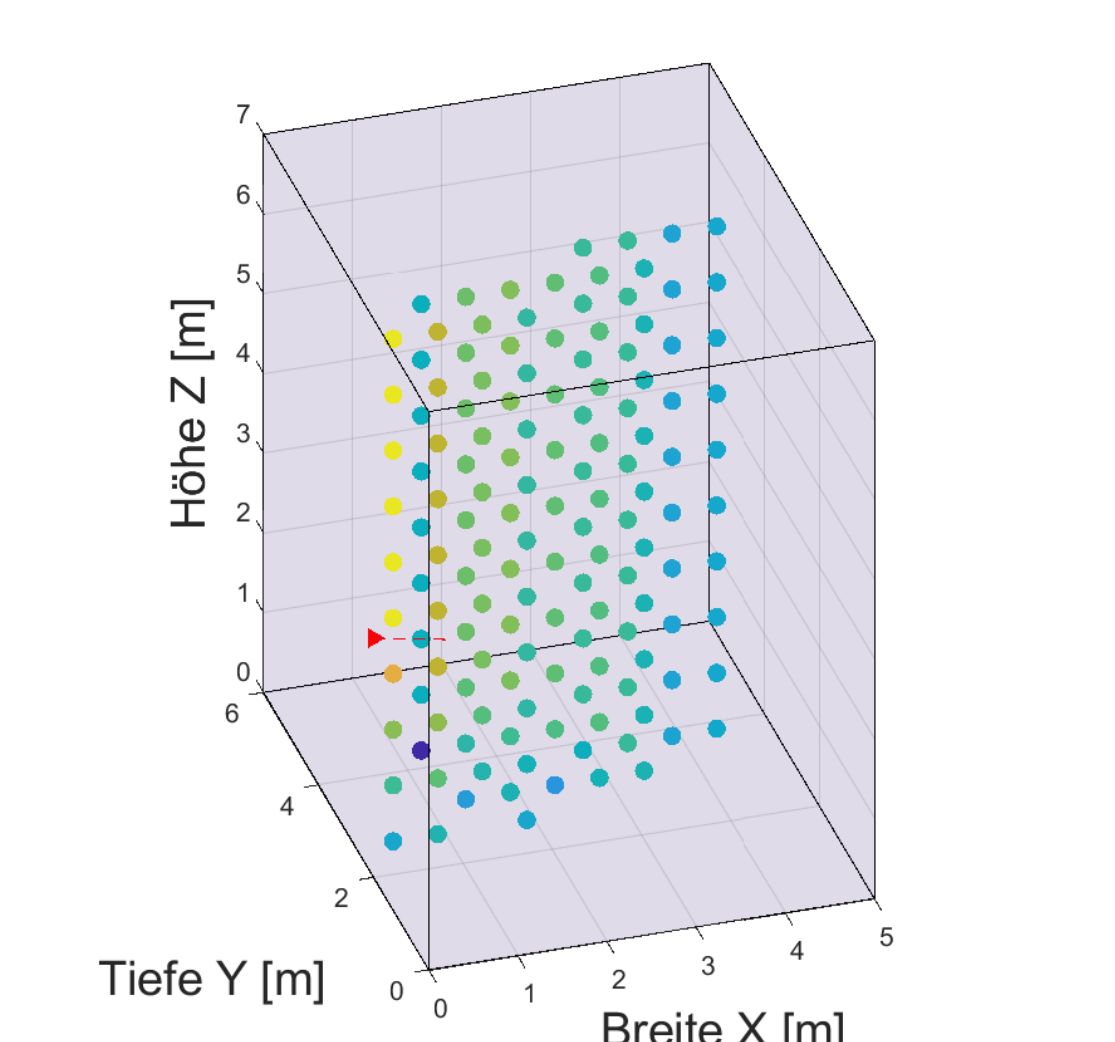
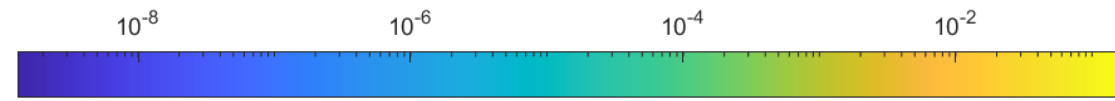


Anfangsbedingungen:

Düsenposition $\vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ :	$\begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} m$
Tropfengeschwindigkeit $t=0$ , $\vec{x} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix}$ :	$\begin{pmatrix} 49 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix} \frac{m}{s}$
Tropfenradius $t=0$ :	250 $\mu m$
Tropfentemperatur $t=0$ :	303 K
Umgebungsgeschwindigkeit $\vec{X} = \begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix}$ :	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} \frac{m}{s}$
Umgebungstemperatur:	1000 K
Sprühmedium:	Wasser
Umgebungsmedium:	Luft

Abbildung 6

normierter Massenanteil am verdampften Spray



Anfangsbedingungen:

Dimensionen Reaktor BxTxH:	5x6x7 m
Düsenposition $\vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ :	$\begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} m$
Düsenausrichtung (x/y-Ebene):	15°
Düsenausrichtung (x/z-Ebene):	-20°
Tropfentemperatur (t=0):	30 °C
Umgebungsgeschwindigkeit $\vec{X} = \begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix}$ :	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 10 \end{pmatrix} \frac{m}{s}$
Umgebungstemperatur:	1050 °C
Sprühmedium:	Wasser
Umgebungsmedium:	Rauchgas

Abbildung 7

### Abbildungen:

- Abb. 1: Kräftegleichgewicht am Einzeltropfen unter Berücksichtigung der Gravitations-, Auftriebs- und aerodynamischen Kräfte sowie die Kräfteinwirkung durch eine Strömung der umgebenden Gasphase
- Abb. 2: Phänomenologische Beschreibung der Verdampfung nach D<sup>2</sup>-Gesetz
- Abb. 3: Schwebender Tropfen im Levitator
- Abb. 4: Messaufbau am Levitator (Draufsicht)
- Abb. 5: Vergleich Verdampfungsversuche einzelner Tropfen mit Modellergebnissen der Verdampfung (oben links: Wasser bei 32 °C, oben rechts: Wasser bei 75 °C, unten links: 50 M-% Ethanol 50 M-% Wasser bei 33 °C, unten rechts: 25 M-% Ammoniak 75 M-% Wasser bei 32 °C)
- Abb. 6: Lokale Anteile an verdampfter Tropfenmasse (Kugelgröße repräsentiert Massenanteil) mit Anfangsbedingungen
- Abb. 7: Lokale Massenanteile an verdampften Sprühmedium im Reaktorraum mit Anfangsbedingungen

### Literatur:

- 1 Abramzon B., Sirignano W. A.: Droplet vaporization model for spray combustion calculations, International Journal of Heat and Mass Transfer, 32, 9, S. 1605 – 1618, 1989