

---

# Untersuchung und Validierung des Tröpfchenkondensationsmodells von ANSYS CFX

---

Bachelorarbeit  
Technische Universität Berlin  
Institut für Strömungsmechanik und technische Akustik  
Fachgebiet Numerische Fluidodynamik  
Berlin, Juli 2020

Autor: Knoblauch, Fabian Maximilian  
Matrikelnummer: 394178  
Studiengang: B.Sc. Physikalische Ingenieurwissenschaften  
Betreuer: Prof. Dr. Julius Reiss (Technische Universität Berlin)  
Dr. Andreas Spille-Kohoff (CFX Berlin)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Notation</b>	<b>7</b>
1.1	Verwendete Symbole . . . . .	7
1.1.1	Lateinische Buchstaben . . . . .	7
1.1.2	Griechische Buchstaben . . . . .	9
1.2	Häufig verwendete Indizes . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>11</b>
2.1	Equilibrium und Tröpfchenkondensation . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Physikalische Grundlagen</b>	<b>12</b>
3.1	Strömungsmechanische Grundlagen und Erhaltungsgleichungen . . . . .	12
3.1.1	Das Reynolds'sche Transporttheorem . . . . .	12
3.1.2	Massenerhaltung . . . . .	13
3.1.3	Impulserhaltung nach Navier-Stokes . . . . .	13
3.1.4	Energieerhaltung . . . . .	13
3.2	Die Phasentransformation des Wassers . . . . .	14
3.3	Grundlagen der Numerischen Strömungssimulation mit dem Finite-Volumen-Verfahren	16
<b>4</b>	<b>Theorie zur Modellierung von Tröpfchenkondensation</b>	<b>19</b>
4.1	Modellierung der Tröpfchenbildung . . . . .	28
4.1.1	Homogene Tröpfchenbildungsrate . . . . .	28
4.1.2	Nicht-isotherme Korrektur . . . . .	31
4.2	Modellierung des Tröpfchenwachstums . . . . .	32
4.2.1	Modell nach Gyarmathy . . . . .	32
4.2.2	Modell nach Young . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Das Modell in ANSYS CFX</b>	<b>35</b>
5.1	Aufbau der modellspezifischen Transportgleichungen . . . . .	35
5.2	Tröpfchenbildungsrate und kritischer Radius . . . . .	36
5.3	Oberflächenmassentransfer . . . . .	36
5.4	Wärmetransfer . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Verifikation und Modellnachbau</b>	<b>38</b>
6.1	Geometrie und Betriebsparameter . . . . .	38
6.2	Verifikation und Nachmodellierung der Tröpfchenbildungsrate . . . . .	40
6.3	Verifikation und Nachmodellierung des gesamten Modells . . . . .	45
<b>7</b>	<b>Sensitivität der Modellparameter</b>	<b>50</b>
7.1	Condensation Rate Relaxation Factor . . . . .	50
7.2	Nucleation Bulk Tension Factor . . . . .	51
7.3	Modell zur Berechnung der Tröpfchenoberflächenspannung $\sigma$ . . . . .	55
<b>8</b>	<b>Mögliche Erweiterungen für das Tröpfchenkondensationsmodell von ANSYS CFX</b>	<b>60</b>
8.1	Untersuchung der nicht-isothermen Korrektur nach Kantrowitz . . . . .	60
8.2	Untersuchung des Tröpfchenwachstums nach Young . . . . .	64
<b>9</b>	<b>Validierung anhand von Messwerten und Vergleich mit dem Equilibriumsmodell</b>	<b>68</b>
9.1	Validierung anhand von Messwerten . . . . .	68
9.2	Ergebnisvergleich mit dem Equilibriumsmodell . . . . .	71

<b>10 Anwendungsbeispiele</b>	<b>74</b>
10.1 Würfel in Überschallströmung . . . . .	74
10.1.1 Setup . . . . .	74
10.1.2 Ergebnisbetrachtung und Vergleich mit dem Equilibriummodell . . . . .	75
10.2 Teil-geöffnetes Ventil . . . . .	81
10.2.1 Setup . . . . .	81
10.2.2 Ergebnisbetrachtung und Vergleich mit dem Equilibriummodell . . . . .	82
<b>11 Fazit und Ausblick</b>	<b>87</b>
<b>12 Abbildungsverzeichnis</b>	<b>88</b>
<b>13 Tabellenverzeichnis</b>	<b>91</b>
<b>14 Quellen</b>	<b>92</b>

## 11 Fazit und Ausblick

Sowohl bei der Betrachtung der Anwendungsbeispiele in Kapitel 10 als auch in Abschnitt 9.2 wird stark deutlich, dass das Equilibriumsmodell und das Tröpfchenkondensationsmodell durchaus unterschiedliche Ergebnisse hervorbringen. Der Ergebnisunterschied kann dabei moderat ausfallen, wie bei der Ventildurchströmung in Abschnitt 10.2.2, er kann jedoch auch außerordentlich groß sein, wie bei der Würfelumströmung in Abschnitt 10.1.2.

Daher ist es meines Erachtens unbedingt notwendig bei der Wasserdampfkondensationssimulation beide Modelle zu betrachten, um die Validität der Simulationsergebnisse einschätzen zu können.

Da die Werte des Tröpfchenkondensationsmodells sich von den Referenzmesswerten in Kapitel 9.1 signifikant unterscheiden, ist meines Erachtens nach eine Modelloptimierung anhand von umfassenden Messwerten nötig.

Weiterhin hat sich für das Tröpfchenkondensationsmodell gezeigt, dass es sehr sensibel auf Parameteränderungen und Modellmodifikationen reagiert. Gerade die Lokation und Stärke der Tröpfchenbildung verändern sich deutlich und damit auch die Lokation und Anzahl der Tröpfchen. Das Modell verfügt über mehrere, nicht explizit festgelegte Parameter, wie den Kondensationskoeffizienten  $q_c$  oder das Modell für die Berechnung der Tröpfchenoberflächenspannung  $\sigma$ . Aufgrund der Empfindlichkeit des Modells bezüglich dieser Parameter ist es meines Erachtens nach unbedingt nötig, für die Parameter ein Kalibrierungsschema zu finden, das es ermöglicht, die jeweiligen optimalen Parameter für verschiedene Geometrien und Betriebsbedingungen zu ermitteln, damit die Modellergebnisse in verschiedensten Situationen möglichst realitätsnah sind. Dafür wäre eine aufwendige Messkampagne nötig, um die Simulationsergebnisse von Modellen mit verschiedenen Parametern evaluieren zu können. Auch die möglichen Modellerweiterungen sollten in dieser Weise betrachtet werden.

In den Kapiteln 7 und 8 wurde deutlich, dass sich das Kondensationsgebiet bei Modellunterschieden weniger in Strömungsrichtung verschiebt, als vielmehr quer zur Strömung. Daher ist es meines Erachtens äußerst wichtig, bei der Ermittlung von Messwerten nicht nur Messpunkte in Strömungsrichtung zu betrachten, wie (Starzmann u. a. [15]) es getan hat, sondern auch mehrere Messpunkte quer zur Strömungsrichtung aufzunehmen. Dies wird sehr gut deutlich anhand der starken Verschiebung des Kondensationsgebietes bei unterschiedlichen Modellen zur Berechnung der Tröpfchenoberflächenspannung  $\sigma$  in Kapitel 7.3, die sich in im Druckverlauf entlang der Strömungsrichtung deutlich weniger signifikant äußert.

Daher sind meines Erachtens nach die Messwerte, wie sie in (Starzmann u. a. [15]) gegeben sind und hier für die Beurteilung des Tröpfchenmodells genutzt wurden, unzureichend für eine Optimierung des Modells über die Anpassung von Parametern oder die in Abschnitt 8 vorgestellten Modellerweiterungen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Tröpfchenkondensationsmodell eine sehr große Chance bietet, die Wasserdampfkondensation besser zu berechnen, als mit dem Equilibriumsmodell. Dafür ist jedoch eine Analyse bezüglich der Modellerweiterungen und -parameter nötig, für die deutlich umfangreichere Messwerte benötigt werden, als jene aus (Starzmann u. a. [15]). Ein aufgrund dieser Analyse optimiertes und validiertes Modell verspricht, die Wasserdampfkondensation außerordentlich realitätsgreu berechnen zu können.