

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINFÜHRUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivation .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Literaturüberblick.....</b>	<b>2</b>
1.2.1	Fokus der Literaturrecherche.....	2
1.2.2	Analytische Untersuchung zu Filmkühlung in Raketentriebwerken .....	3
1.2.3	Numerische Untersuchungen zu Filmkühlung in Raketentriebwerken .....	5
1.2.4	Fazit der Literaturrecherche .....	6
<b>1.3</b>	<b>Ziele dieser Arbeit .....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>GRUNDLAGEN .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1</b>	<b>Flüssigkeitsraketenantriebe.....</b>	<b>9</b>
2.1.1	Einführung .....	9
2.1.2	Kenn- und Vergleichsgrößen von Raketenschubkammern.....	13
2.1.3	Unsicherheiten bei der Versuchsdurchführung und Datenerfassung .....	22
<b>2.2</b>	<b>Kühlung von Raketenschubkammern .....</b>	<b>23</b>
2.2.1	Kühlungsarten .....	23
2.2.2	Filmkühlung.....	25
2.2.3	Charakterisierung eines Kühlfilms.....	42
<b>3</b>	<b>VERWENDETES NUMERISCHES VERFAHREN .....</b>	<b>45</b>
<b>3.1</b>	<b>Grundgleichungen .....</b>	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b>Lagrange-Ansatz .....</b>	<b>46</b>
<b>3.3</b>	<b>Verbrennungsmodellierung und Stoffwerte .....</b>	<b>50</b>
3.3.1	Globalchemie-Ansatz .....	50
3.3.2	PPDF-Gleichgewichts-Ansatz.....	52
3.3.3	Flüssigkeits- und Gasstoffwerte in Rocflam-II .....	53
<b>3.4</b>	<b>Rechnernetz und Wärmeübergang.....</b>	<b>54</b>
<b>3.5</b>	<b>Randbedingungen .....</b>	<b>56</b>
<b>3.6</b>	<b>Fluid – Struktur – Kühlmittelkopplung.....</b>	<b>57</b>
<b>3.7</b>	<b>Allgemeines Vorgehen der numerischen Filmberechnung .....</b>	<b>59</b>
<b>4</b>	<b>FILMMODELLIERUNG .....</b>	<b>61</b>
<b>4.1</b>	<b>Modellierung eines Flüssigfilms in Rocflam-II.....</b>	<b>61</b>
4.1.1	Genereller Ablauf der Flüssigfilmberechnung .....	61

4.1.2	Modellierungsansätze der Flüssigfilmberechnung .....	64
4.2	Modellierung eines transkritischen Filmfluids in Rocflam-II.....	74
4.2.1	Dichtes-Gas-Ansatz .....	75
4.2.2	Lagrange-Ansatz .....	75
4.2.3	Erweitertes Flüssigfilmmodell .....	76
4.2.4	Theoretischer Vergleich der Modellierungsansätze .....	78
4.3	Chemische Aspekte der Filmkühlungsmodellierung.....	79
4.4	Stand der Modellierung in Rocflam-II zu Beginn dieser Arbeit .....	81
5	SIMULATIONSERGEBNISSE .....	85
5.1	Vorstellung der LFA-Brennkammer .....	86
5.2	Flüssiges Filmfluid .....	93
5.2.1	Treibstoffkombination MMH / NTO mit MMH-Film und Strahlungskühlung.....	93
5.2.2	Treibstoffkombination MMH / NTO mit NTO-Film und Strahlungskühlung.....	98
5.2.3	Treibstoffkombination MMH / NTO mit MMH-Film und Regenerativkühlung .....	103
5.2.4	Treibstoffkombination Jet A-1 / O <sub>2</sub> mit Kerosin-Film ( $\epsilon = 2,8$ ).....	113
5.2.5	Treibstoffkombination H <sub>2</sub> / O <sub>2</sub> mit Wasser-Film in Überschallströmung .....	122
5.3	Transkritisches Filmfluid .....	126
5.3.1	Vergleich der Modellierungsarten eines transkritischen Filmfluids .....	126
5.3.2	Treibstoffkombination Jet A-1 / O <sub>2</sub> mit Kerosin-Film ( $\epsilon = 2,8$ ).....	130
5.3.3	Treibstoffkombination Jet A-1 / O <sub>2</sub> mit Kerosin-Film ( $\epsilon = 5$ ).....	137
5.4	Zusammenfassung aller Simulationsergebnisse.....	142
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	147
	LITERATURVERZEICHNIS .....	151
	VERÖFFENTLICHUNGEN .....	161
A	WEITERE LITERATURSTELLEN ZU FILMKÜHLUNG UND -STRÖMUNG .....	165
A.1	Allgemeine analytische Untersuchungen zu Filmkühlung und -strömung.....	166
A.2	Allgemeine numerische Untersuchungen zu Filmkühlung und -strömung .....	167
B	VERGLEICH DER FLUID-STRUKTUR-KOPPLUNGSANSÄTZE .....	171
C	GASFÖRMIGES FILMFLUID .....	175
C.1	Treibstoff Kombination H <sub>2</sub> / O <sub>2</sub> mit Wasserstoff-Film .....	175
C.2	Treibstoffkombination Jet A-1 / O <sub>2</sub> mit Methan-Film ( $\epsilon = 5$ ) .....	178