

# Inhaltsverzeichnis

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

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