

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	xiii
Abbildungsverzeichnis	xv
Nomenklatur	xix
Kurzfassung	xxv
Abstract	xxvii
1 Einführung in die Thematik	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Problemstellung	3
1.2.1 Kenngrößen von Raketenantrieben	4
1.2.2 Auslegungskriterien und thermische Belastung	5
1.2.3 Kühlung von Raketenantrieben	10
2 Stand der Forschung	13
2.1 Experimentelle Arbeiten zur Filmkühlung	13
2.2 Numerische Untersuchungen zur Filmkühlung	19
2.3 Schlussfolgerung und Ziel der Arbeit	20
3 Konvektiver Wärmeübergang	23
3.1 Grundlagen	23
3.2 Heißgasseitiger Wärmeübergang in Raketenbrennkammern	25
4 Filmkühlung in Raketenbrennkammern	29
4.1 Grundlagen	30
4.2 Definitionen des Wirkungsgrades der Filmkühlung	31
4.3 Zweidimensionale Modellierung der Filmkühlung	34
4.3.1 Wärmesenkemodelle	34
4.3.2 Strömungsmodelle	38
4.3.3 Kombinierte Modelle	39
4.3.4 Vergleichende Darstellung der Modelle	40
4.4 Einflussparameter der Filmkühlung	43
4.5 Dreidimensionale Darstellung der Filmkühlung	47
4.6 Wärmeübergang bei Filmkühlung	50
5 Versuchsaufbau	53

5.1	Forschungs- und Technologieprüfstand P8	53
5.2	DLR-Brennkammer E: Komponenten und Messtechnik	53
5.2.1	Einspritzkopf	55
5.2.2	Zylindersegment	57
5.2.3	Düsensegment	59
5.2.4	Filmleger	61
5.3	Versuchssequenzen am Prüfstand P8	67
5.3.1	Untersuchungen mit injektornahem Filmleger (Filmleger 1)	67
5.3.2	Untersuchungen mit Filmleger vor dem Düsensegment (Filmleger 2)	70
6	Messsystem und Messverfahren	73
6.1	Temperaturen	73
6.1.1	Oberflächentemperaturen	73
6.1.2	Wandtemperaturen	75
6.2	Heißgasseitiger Wärmeübergang und Wärmeströme	78
6.2.1	Kalorimetrische Methode	79
6.2.2	Gradientenmethode	81
6.2.3	Inverse Methode	81
7	Experimentelle Ergebnisse	83
7.1	Untersuchungen zur Filmkühlung in Umfangsrichtung im zylindrischen Segment	83
7.1.1	Temperaturverlauf in Umfangsrichtung	84
7.1.2	Filmkühleffektivität in Umfangsrichtung	90
7.1.3	Superpositionsprinzip der Filmkühlung	96
7.1.4	Axiales Verhalten der Filmkühleffektivität in Umfangsrichtung	98
7.2	Untersuchungen zur Filmkühlung in axialer Richtung im Zylindersegment	103
7.2.1	Temperaturabsenkung durch Kühlfilmeinfluss	103
7.2.2	Filmkühlung bei unbeschleunigter Strömung	105
7.2.3	Empirische Beschreibung des Verhaltens der Filmkühlung	109
7.2.4	Einfluss des Geschwindigkeitsverhältnisses und der Schlitzhöhe	114
7.2.5	Wärmeübergang bei Filmkühlung	117
7.2.6	Stationäres turbulentes Verhalten in der Brennkammer	122
7.3	Untersuchungen zur Filmkühlung im Bereich beschleunigter Strömung	125
7.3.1	Temperaturverlauf im Düsensegment	126
7.3.2	Filmkühleffektivität bei beschleunigter Strömung	126
7.3.3	Wärmeübergang bei beschleunigter Strömung	130
7.4	Reproduzierbarkeit der experimentellen Ergebnisse	131
8	Zusammenfassung und Ausblick	133
	Literaturverzeichnis	135
A	Fehlerabschätzung	153
A.1	Oberflächentemperaturen	154
A.2	Wirkungsgrad der Filmkühlung	156
A.3	Wärmestromdichten	157

B Brennkammer E (BKE)	159
B.1 Anordnung der Messtechnik	159
B.1.1 Zylindersegment	159
B.1.2 Düsensegment	160
B.2 Beispieldiagramme	161
B.3 Messstellenplan und Fließschema von Brennkammer E	166
B.4 Schnittbild BKE	167
B.5 Vergleich von BKE mit einem Vulcain 2-ähnlichen Triebwerk	169
C Photographien	171
C.1 Brennkammer E und Prüfstand P8	171
C.2 Filmleger	173