

<b>Vorwort</b>	<b>i</b>
<b>Übersicht</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Forschung</b>	<b>5</b>
2.1 Grenzschichtumschlag und Profilverluste . . . . .	5
2.1.1 Profilverluste und Grenzschichtverhalten . . . . .	6
2.1.2 Topologie der laminaren Ablöseblase . . . . .	8
2.2 Aktive Grenzschichtbeeinflussung . . . . .	10
2.2.1 Pneumatische Wirbelgeneratoren . . . . .	11
2.2.2 Kontinuierlich arbeitende VGJs in laminaren Strömungen . . . . .	14
2.2.3 Gepulst arbeitende VGJs in laminaren Strömungen . . . . .	16
2.3 Schlussfolgerung und Zielsetzung . . . . .	19
2.3.1 Schlussfolgerung . . . . .	19
2.3.2 Zielsetzung . . . . .	20
<b>3 Versuchsanlage und Messtechnik</b>	<b>23</b>
3.1 Versuchsanlage . . . . .	23
3.2 Hitzdrahtanemometrie . . . . .	25
3.2.1 Konstant Temperatur Anemometrie . . . . .	25
3.3 Particle Image Velocimetry . . . . .	27
3.3.1 Prinzipielle Funktionsweise der Standard PIV . . . . .	27
3.3.2 Ergänzungen und stereoskopische PIV . . . . .	30
<b>4 Experiment, Aktuatorik und Voruntersuchungen</b>	<b>35</b>
4.1 Ebenes Plattenexperiment mit Druckgradient . . . . .	35
4.1.1 Versuchsaufbau und Durchführung der Messungen . . . . .	35
4.1.2 Vorversuche zur ebenen Plattengrenzschicht . . . . .	42
4.2 Pneumatische Wirbelgeneratoren . . . . .	44
4.2.1 Auslegung und Aufbau der Aktuatorik . . . . .	44

4.2.2	Numerisches Modell des Aktuatorsystems . . . . .	48
4.2.3	Vorversuche zum Aktuatorssystem . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Datenreduktion</b> . . . . .	<b>55</b>
5.1	Mittelwerte und statistische Momente . . . . .	55
5.1.1	Kontinuierlich erfasstes Zeitsignal (Hitdrahtanemometrie) . . . . .	56
5.1.2	Stochastisch erfasstes Zeitsignal (PIV) . . . . .	56
5.1.3	Phasenmittelwert . . . . .	57
5.1.4	Standardabweichung . . . . .	57
5.1.5	Statistische Momente höherer Ordnung . . . . .	58
5.2	Integrale Grenschichtparameter . . . . .	58
5.2.1	Verdrängungsdicke $\delta_1$ . . . . .	58
5.2.2	Impulsverlustdicke $\delta_2$ . . . . .	59
5.2.3	Formparameter $H_{12}$ . . . . .	59
5.3	Integrales Impulsflussverhältnis $\eta_{BL}$ . . . . .	59
5.4	Fouriertransformation und Leistungsspektrum . . . . .	61
5.5	Intermittenzfaktor $\gamma$ . . . . .	62
5.5.1	TERA-Verfahren . . . . .	62
5.5.2	Beschreibung des genutzten Verfahrens . . . . .	63
5.6	Wandreibungsbeiwert $c_f$ . . . . .	65
5.7	Charakterisierung der Längswirbelstrukturen . . . . .	67
5.7.1	Wirbelkernposition . . . . .	67
5.7.2	Wirbelstärke und Zirkulation . . . . .	68
5.7.3	Wirbelkerndurchmesser . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Das unbeeinflusste Strömungsfeld</b> . . . . .	<b>71</b>
6.1	Die transitionale Ablöseblase . . . . .	72
6.1.1	Topologie der Strömungsfelder im Mittenschnitt . . . . .	72
6.1.2	Experimente bei $Re_\infty = 300.000$ und $Re_\infty = 100.000$ . . . . .	74
6.1.3	Experimente bei $Re_\infty = 160.000$ und $Re_\infty = 80.000$ . . . . .	78
6.1.4	Einfluss des Turbulenzgrades der Außenströmung . . . . .	79
6.1.5	Zweidimensionalität der ebenen Plattenströmung . . . . .	80
6.2	Ablösung, Transition und Instabilität . . . . .	81
6.2.1	Transitionsmodi der Ablöseblase . . . . .	81
6.2.2	Untersuchungen zur Scherschichtinstabilität . . . . .	83
6.3	Zusammenfassung . . . . .	86
<b>7</b>	<b>Das beeinflusste Strömungsfeld</b> . . . . .	<b>87</b>
7.1	Beeinflussung mithilfe stationärer VGJs . . . . .	87
7.1.1	Topologie des Strömungsfeldes im Mittenschnitt . . . . .	87
7.1.2	Einfluss des Ausblasortes und der Ausblasrate . . . . .	91
7.1.3	Transitionsbeginn und Impulstransport . . . . .	93
7.1.4	Der induzierte Längswirbel . . . . .	99
7.1.5	Einfluss des Druckgradienten . . . . .	106

7.1.6	Einfluss der Reynoldszahl und des Turbulenzgrades . . . . .	108
7.1.7	Wirkungsweise kontinuierlich arbeitender VGJs . . . . .	111
7.2	Beeinflussung mithilfe gepulster VGJs . . . . .	112
7.2.1	Zeitaufgelöste Betrachtung des Strömungsfeldes . . . . .	112
7.2.2	Einfluss der Ausblasfrequenz auf das Strömungsfeld . . . . .	118
8	<b>Zusammenfassung</b>	<b>123</b>
A	<b>Anhang - Fehlerrechnung</b>	<b>127</b>
A.1	Hitzdrahtanemometrie . . . . .	127
A.1.1	Frequenzantwort und Grenzfrequenz . . . . .	127
A.1.2	Kalibration . . . . .	128
A.1.3	Umgebungsbedingungen . . . . .	132
A.1.4	Anemometer und Datenerfassung . . . . .	133
A.1.5	Gesamtfehler . . . . .	133
A.2	Particle Image Velocimetry . . . . .	135
A.2.1	Einflussfaktoren der Messunsicherheit . . . . .	135
A.2.2	Fehlerabschätzung . . . . .	137
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>139</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>145</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>147</b>
	<b>Lebenslauf</b>	<b>157</b>