

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Ausgangspunkt, Konzept und Zielsetzung</b>	<b>3</b>
2.1 Rauheitseinfluss in laminaren Strömungen . . . . .	3
2.2 Konzept des Versuchsstandes . . . . .	5
2.3 Ziel der Arbeit . . . . .	7
<b>3 Theoretische Grundlagen</b>	<b>9</b>
3.1 Thermodynamische Grundlagen . . . . .	9
3.1.1 Der Erste Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	9
3.1.2 Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	10
3.2 Strömungsmechanische Grundlagen . . . . .	12
3.2.1 Vorüberlegungen . . . . .	13
3.2.2 Die Navier–Stokes-Gleichungen . . . . .	16
3.2.3 Der hydraulische Durchmesser . . . . .	17
3.2.4 Der ebene Kanal . . . . .	18
3.3 Analytische Betrachtung der rs-Strömung . . . . .	20
3.3.1 Herleitung mit der erweiterten Bernoulli-Gleichung . . . . .	20
3.3.2 Analytische Betrachtung nach Savage . . . . .	23
3.4 Entropieproduktion in Strömungen (Dissipationsmodell) . . . . .	24
3.4.1 Entropieproduktion im ebenen Kanal . . . . .	26
3.4.2 Poiseuille-Zahl der radialsymmetrischen Strömung . . . . .	27
3.5 Oberflächenrauheit . . . . .	28
3.5.1 Technische Rauheit . . . . .	29
3.5.2 Nikuradses Sandrauheitskonzept . . . . .	30
3.5.3 Herausforderungen bei der Modellierung von Rauheiten . . . . .	32
<b>4 Versuchsstand</b>	<b>33</b>
4.1 Funktionsweise . . . . .	33
4.1.1 Spezifikation des Versuchsstandes . . . . .	34
4.1.2 Abmessungen des Kanals . . . . .	35
4.2 Fertigung . . . . .	36
4.2.1 Fertigung der Kreisplatten . . . . .	37
4.2.2 Fertigung der Wafer . . . . .	39
4.3 Charakterisierung der radialsymmetrischen Strömung . . . . .	42
4.3.1 Ist die Strömung stationär? . . . . .	42
4.3.2 Ist die Strömung laminar/turbulent? . . . . .	42
4.3.3 Ist die Strömung näherungsweise als inkompressibel zu betrachten? . . . . .	42
4.3.4 Ist die Kontinuumstheorie anwendbar? . . . . .	43
4.3.5 Ist die Strömung ausgebildet? . . . . .	44
4.3.6 Verändern sich Form und Lage der Kreisplatten? . . . . .	44

4.3.7	Existiert ein Temperatureinfluss? . . . . .	46
4.3.8	Existiert ein Druckeinfluss? . . . . .	46
4.3.9	Wie groß ist der Minimaldruck? . . . . .	47
4.3.10	Wie sieht der Druckverlauf im Kanal aus? . . . . .	47
4.3.11	Zusammenfassung der Einflussgrößen . . . . .	47
4.4	Versuchsdurchführung . . . . .	48
4.4.1	Einstellen der Kanalhöhe . . . . .	49
4.4.2	Einstellen des Massenstroms . . . . .	50
4.4.3	Temperaturmessung . . . . .	50
4.4.4	Druckmessung . . . . .	51
4.4.5	Verwendung der Siliziumwafer . . . . .	51
4.4.6	Messdatenerfassung . . . . .	52
4.4.7	Versuchsauswertung . . . . .	52
4.5	Vorteile des Versuchsstandes . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Dissipationsmodell</b>	<b>57</b>
5.1	Die Simulationssoftware Fluent . . . . .	57
5.2	Überlegungen zum Dissipationsmodell . . . . .	58
5.2.1	Arten von Rauheit . . . . .	58
5.2.2	Wo liegt die Wand? . . . . .	59
5.2.3	Definition von $D_h^*$ für raue Kanäle . . . . .	61
5.2.4	Definition eines Rauheitskennwerts . . . . .	62
5.3	Der Einfluss von Wandrauheiten . . . . .	63
5.3.1	Wandrauheiten im ebenen Kanal . . . . .	63
5.3.2	Wandrauheiten in der Kreisplattenströmung . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Messergebnisse und Modellvalidierung</b>	<b>77</b>
6.1	Messfehler . . . . .	78
6.2	Messungen zum Rauheitseinfluss . . . . .	79
6.3	Validierung des Dissipationsmodells . . . . .	80
<b>7</b>	<b>Mögliche Mikroeffekte</b>	<b>85</b>
7.1	Luft als Fluid . . . . .	85
7.2	Helium als Fluid . . . . .	88
7.3	Überlegungen zu Skalierungseffekten . . . . .	93
<b>8</b>	<b>Fehleranalyse</b>	<b>97</b>
8.1	Messfehler der Sensoren . . . . .	97
8.2	Zufällige Fehler . . . . .	98
8.3	Überprüfung des Messaufbaus . . . . .	98
8.4	Parallelität . . . . .	100
8.5	Beeinflussung durch die Messbohrungen . . . . .	100
8.6	Beeinflussung durch den Wafer . . . . .	102
8.7	Oberflächenprofil der Kreisplatten . . . . .	103
8.8	Unterschiede der Simulationssoftware . . . . .	104
<b>9</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>107</b>
9.1	Rauheitseffekte . . . . .	107
9.2	Mikroeffekte . . . . .	110
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>113</b>

---

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>115</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>121</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>123</b>