

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
2 Ausgangspunkt, Konzept und Zielsetzung	3
2.1 Rauheitseinfluss in laminaren Strömungen	3
2.2 Konzept des Versuchsstandes	5
2.3 Ziel der Arbeit	7
3 Theoretische Grundlagen	9
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
4 Versuchsstand	33
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
5	Dissipationsmodell	57
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
6	Messergebnisse und Modellvalidierung	77
6.1	Messfehler	78
6.2	Messungen zum Rauheitseinfluss	79
6.3	Validierung des Dissipationsmodells	80
7	Mögliche Mikroeffekte	85
7.1	Luft als Fluid	85
7.2	Helium als Fluid	88
7.3	Überlegungen zu Skalierungseffekten	93
8	Fehleranalyse	97
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
9	Diskussion der Ergebnisse	107
9.1	Rauheitseffekte	107
9.2	Mikroeffekte	110
10	Zusammenfassung	113

Literaturverzeichnis	115
Abbildungsverzeichnis	121
Tabellenverzeichnis	123