

Messung thermischer Kräfte auf Scheiben und poröse Scheiben in einem dünnen Gas

Christoph Dürmann

Abstract

In dieser Arbeit wurden thermische Kräfte behandelt, die auf Körper in einem dünnen Gas wirken. Sie entstehen durch Temperaturgradienten innerhalb der untersuchten Körper. Die Kräfte werden mit einem Torsionspendel in einer Vakuumkammer gemessen.

Bei niedrigem Druck sind die Kräfte proportional zur Fläche der Probe, wohingegen sie bei höherem Druck proportional zur Länge des Rands der Probe sind. Das Kraftmaximum liegt für verschieden große Proben bei unterschiedlichen Drücken, die antiproportional zu einer bestimmten charakteristischen Länge sind. Löcher in den Proben führen zu einem zusätzlichen Kraftbeitrag, dessen Maximalwert von der charakteristischen Länge der Löcher abhängt.

1. Thematische Einordnung

In dieser Arbeit wurden Kräfte auf Scheiben untersucht, die ein Modellsystem für Staubpartikel in einer protoplanetaren Scheibe darstellen. Diese Scheiben entstehen, wenn sich aus interstellarem Gas und Staub ein Stern entwickelt und aus ihrem Material entsteht innerhalb einiger Millionen Jahre das Planetensystem. Das Verständnis der wirkenden Kräfte ist wichtig, um den Prozess der Planetenentstehung nachvollziehen und mit den existierenden Beobachtungsdaten von Exoplaneten in Einklang bringen zu können.

2. Physikalischer Hintergrund

Die auftretenden Kräfte werden durch Photophorese und den Knudsen-Kompressor-Effekt verursacht. Beide Effekte wirken auf Teilchen, die auf entgegengesetzten Seiten verschiedene Oberflächentemperaturen besitzen. Die Kraft wirkt jeweils von der warmen Seite weg. In der Regel wird der Temperaturunterschied durch externe Heizung durch einfallende Strahlung erzeugt.

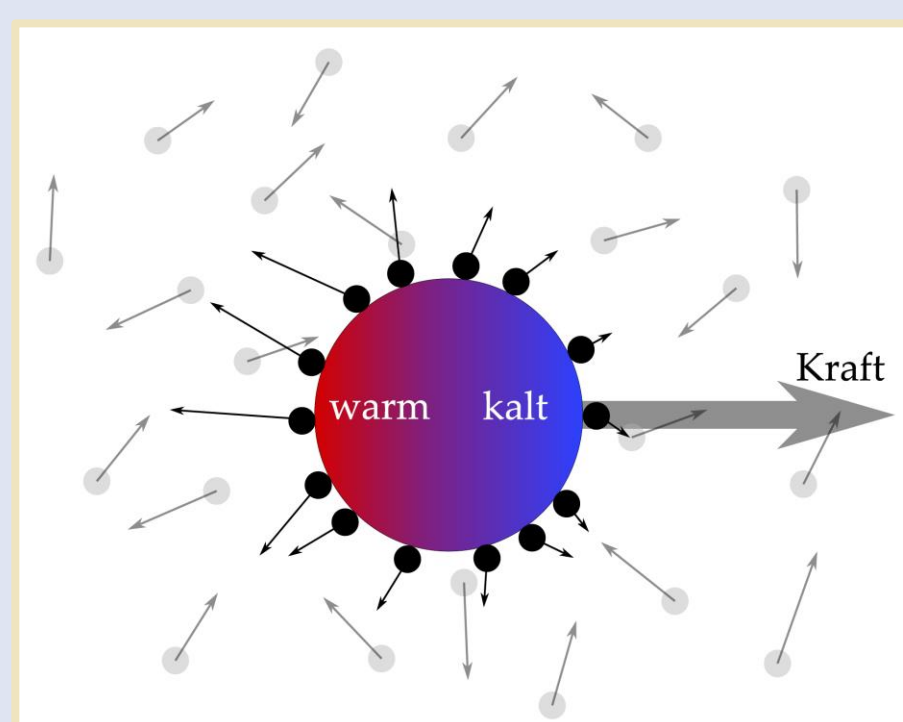


Abb. 2: Veranschaulichung der Photophorese für große Knudsenzahlen

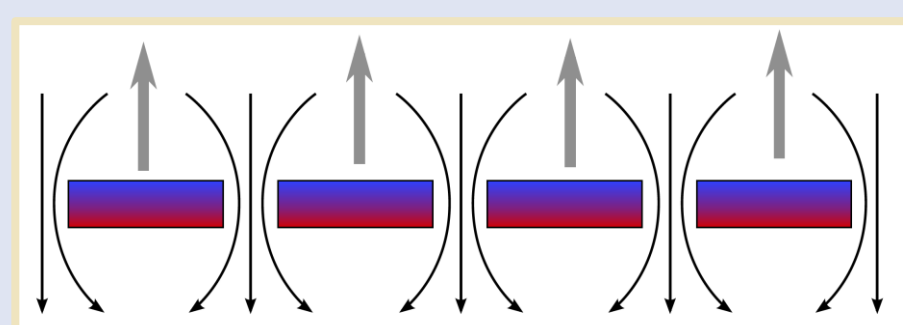


Abb. 3: Durch den Knudsen-Kompressor-Effekt hervorgerufene Knudsen-Kraft als Analogie zur Photophorese

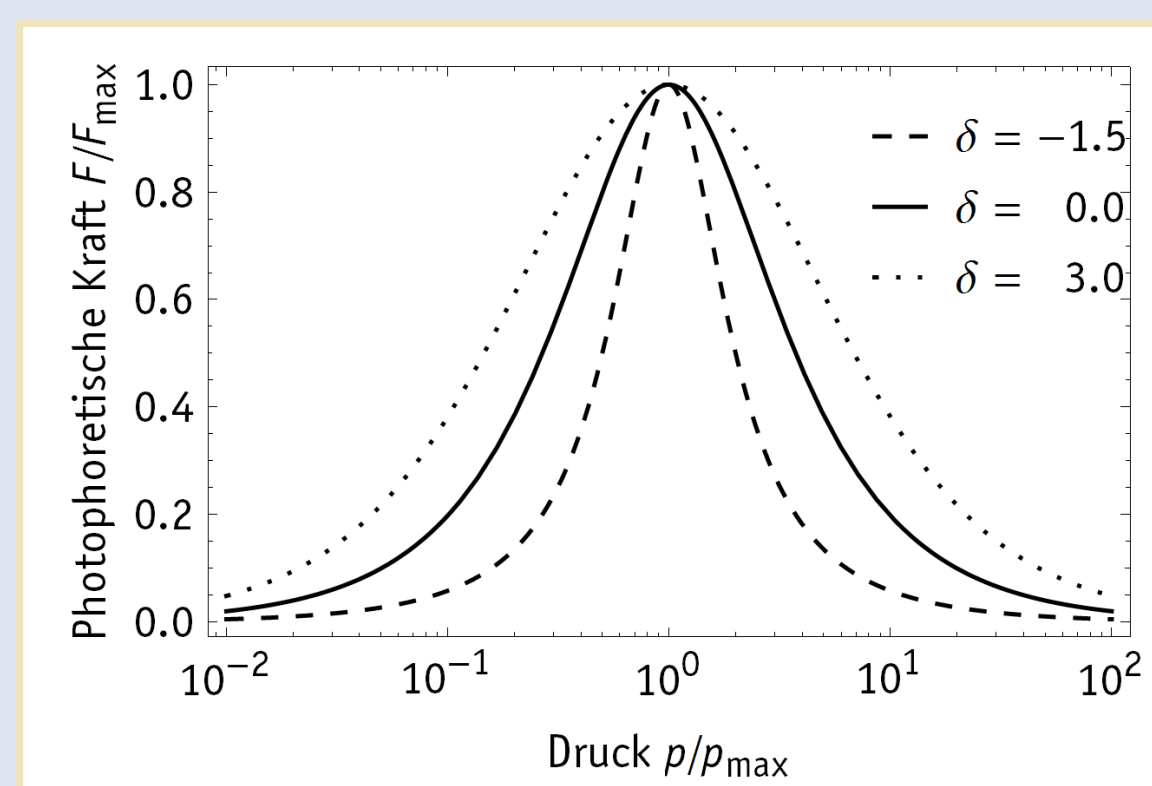


Abb. 4: Druckabhängigkeit der photophoretischen Kraft

3. Experiment

Zur Messung der Kräfte wird eine Torsionswaage benutzt, mit der mittels Bildauswertung die Auslenkung gemessen wird. Es können Kräfte bis auf 100 nN genau bestimmt werden.

Die Waage befindet sich in einer Vakuumkammer, damit der Umgebungsdruck zwischen 10^{-3} und 10 mbar variiert werden kann. Mit einer Halogenlampe wird die Probe auf einer Seite beleuchtet und dadurch erwärmt, so dass die thermischen Kräfte eine Auslenkung des Pendels bewirken.

Als Proben wurden 2 Lochrasterplatten mit unterschiedlich vielen Löchern sowie drei Filzplatten unterschiedlicher Durchmesser verwendet.

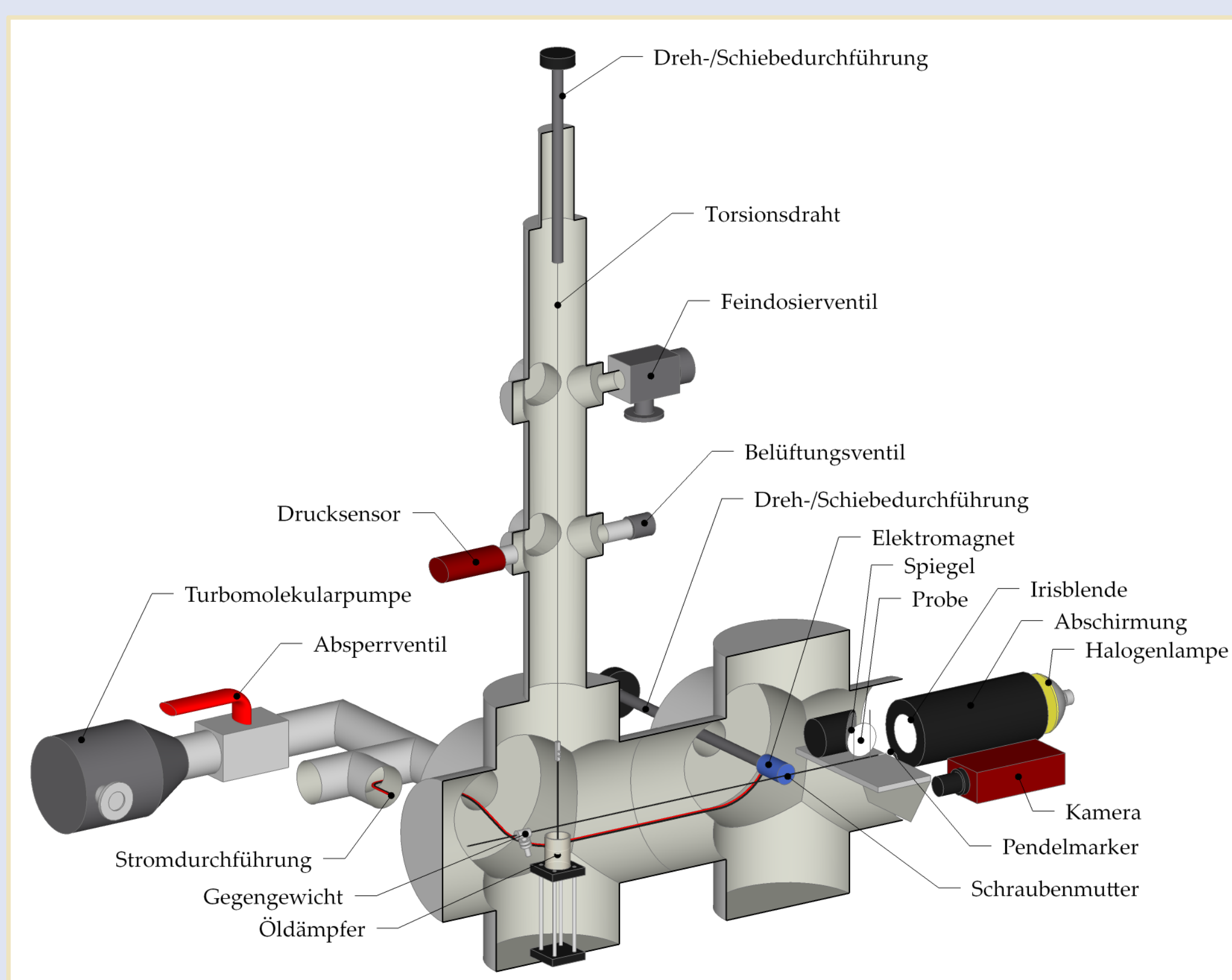


Abb. 5: Experimentelles Setup der Vakuumkammer mit Torsionspendel, Beleuchtung und Kamera

Abb. 6: Lochrasterplatte als Probe mit definierten Kanälen

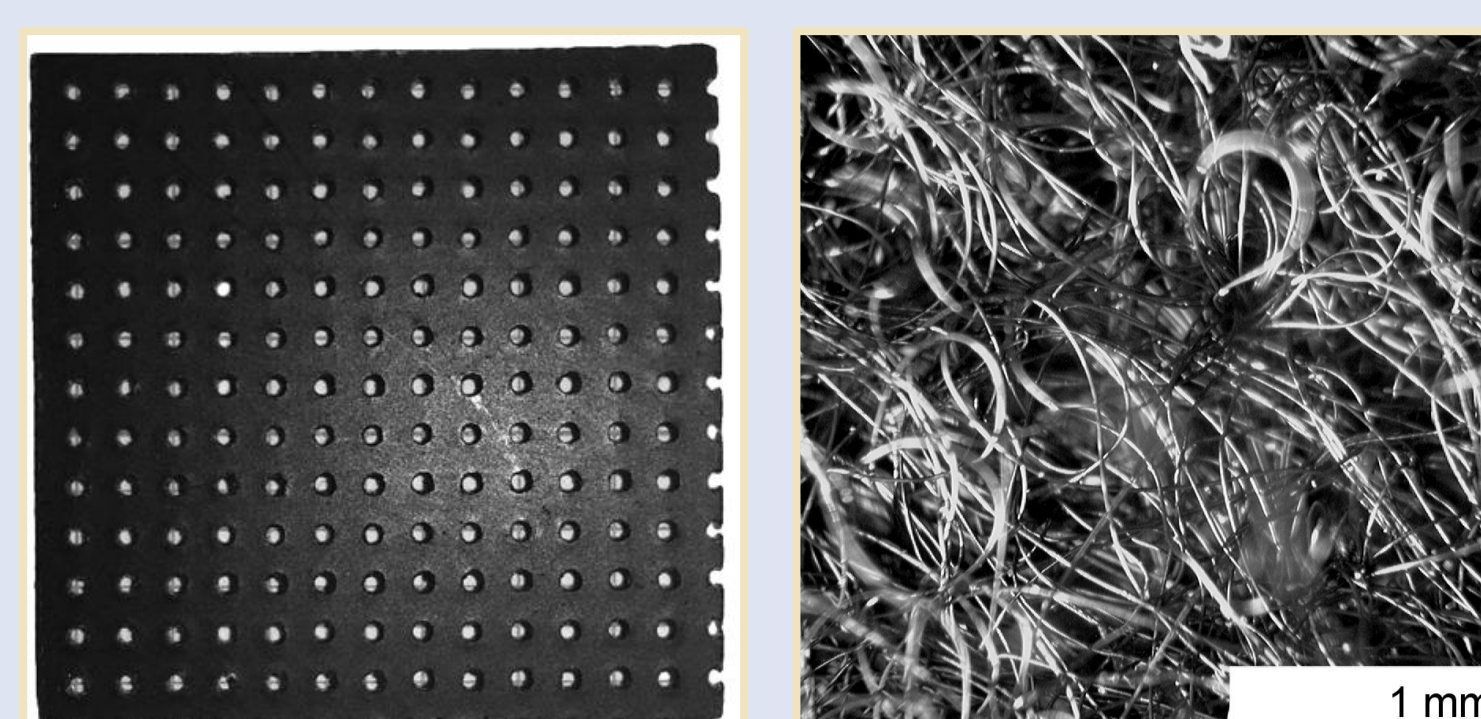
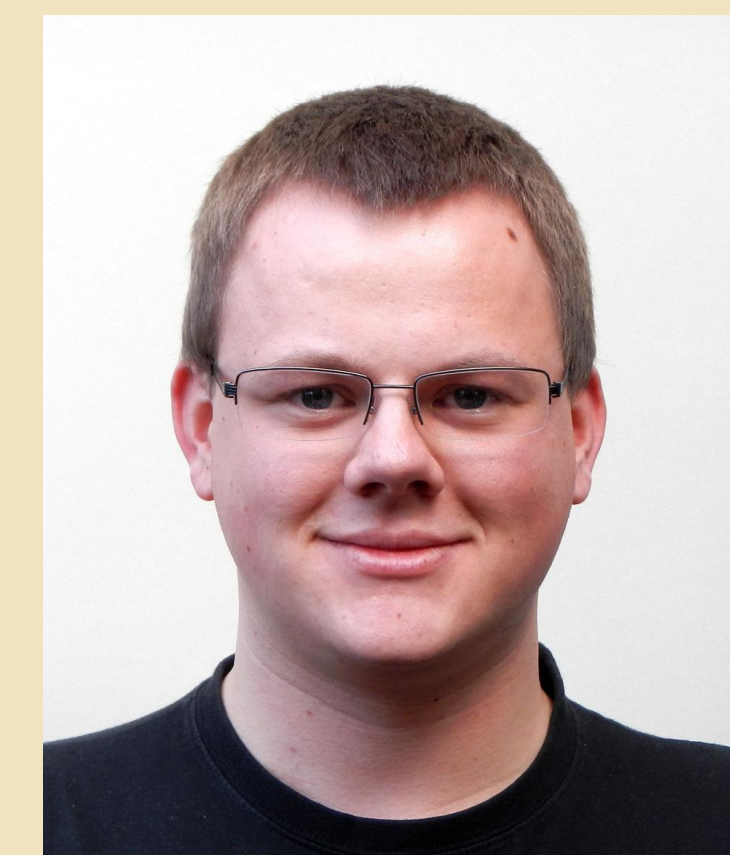


Abb. 7: Vergrößerung einer Filzplatte als Probe mit hoher Porosität und Mikrokanälen



Christoph Dürmann, M.Sc.
Betreuer: Prof. Dr. Gerhard Wurm



Abb. 1: Aufnahmen zweier protoplanetarer Scheiben im Orionnebel (PRC95-45b, McCaughrean (MPIA), O'Dell (Rice University), NASA)

4. Ergebnisse

Anhand der Messung der Druckabhängigkeit der Kräfte auf die Lochplatten mit 169 bzw. 352 Löchern können die verschiedenen Anteile der Kraft durch die gesamte Probe und die Löcher voneinander unterschieden werden. Die jeweiligen Kraftanteile passen gut zu den geometrischen Eigenschaften der Probe, wie in Tab. 1 dargestellt.

	keine Öffnungen	169 Öffnungen	352 Öffnungen
Fläche der Probe [cm ²]	12.25 (100 %)	11.27 (92.0 %)	10.17 (83.0 %)
$F_{max,F}$ [μN]	3.11 (100 %)	2.87 (92.3 %)	2.69 (86.5 %)
Anzahl Löcher		62.3 (54.2 %)	115.0 (100 %)
Randlänge [cm]		169 (48.0 %)	352 (100 %)
$F_{max,P}$ [μN]		0.461 (45.3 %)	1.02 (100 %)

Tab. 1: Aufschlüsselung der Kräfte in Flächen- ($F_{max,F}$) und Randabhängigen ($F_{max,P}$) Anteil

Anhand der gewonnenen Daten kann die charakteristische Länge l bestimmt werden, die maßgeblich für den Optimaldruck ist, bei dem die Kraft maximal wird. Sie hängt von Radius r und Dicke d ab:

$$l = r^{0.35} \cdot d^{0.65}$$

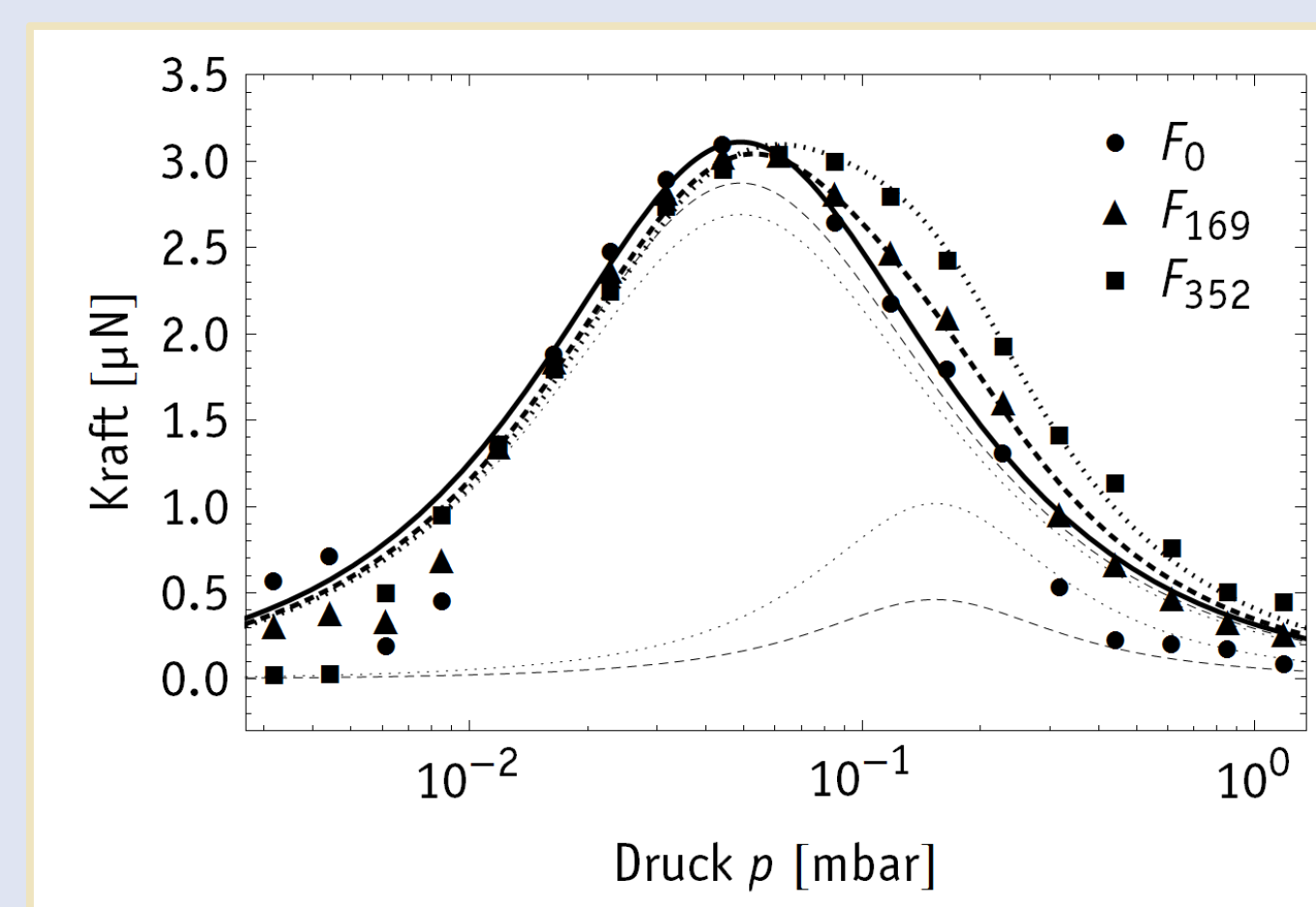


Abb. 8: Druckabhängigkeit der Kraft auf die Lochrasterplatten. Gefittet sind die einzelnen Anteile der Kraft durch Gesamtplatte und Löcher.

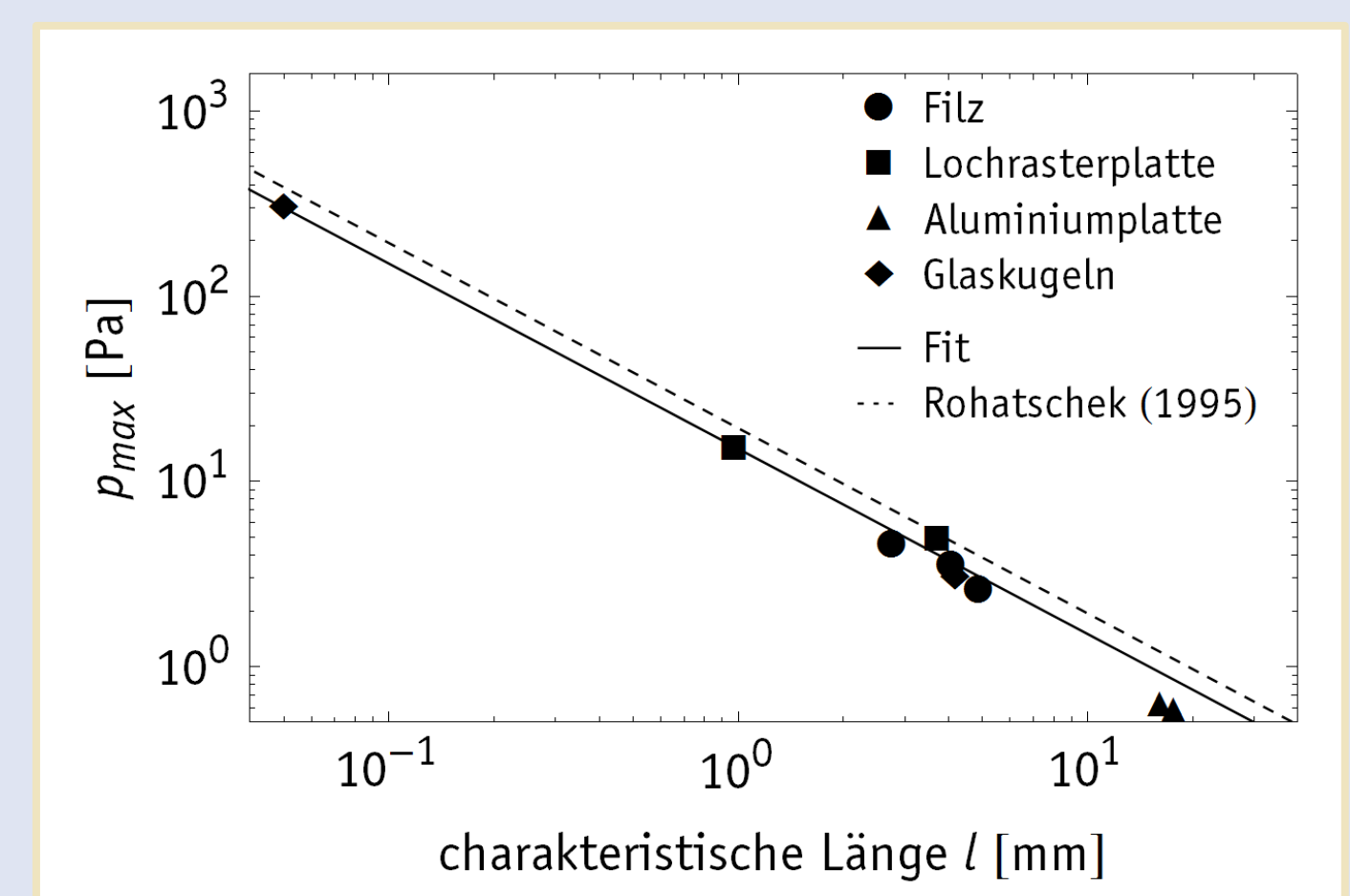


Abb. 9: Abhängigkeit des Optimaldrucks von der charakteristischen Länge. Die Abhängigkeit passt zu verschiedensten Proben und auch dem Beitrag durch die Löcher.