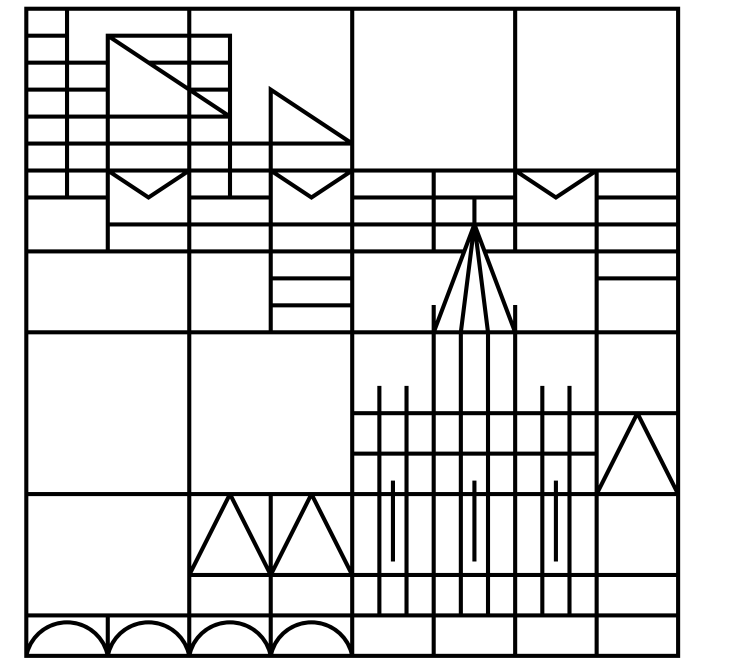


BROWNSCHE MOLEKULARBEWEGUNG PP 2011

Paul Pfeiffer, Philipp Krauspe & Claudio Michaelis

Universität
Konstanz



MOTIVATION

In der Thermodynamik haben wir die Äquivalenz von Wärme und kinetischer Energie von Gasparkeln kennengelernt. Dieses als Brownsche Molekularbewegung bekannte Phänomen wollen wir untersuchen, indem wir den Versuchsaufbau von Eugen Kappler rekonstruieren. Gemessen werden soll die Boltzmann-Konstante. Die Brownsche Bewegung verursacht gleichzeitig eine untere Schranke in der Genauigkeit von Messungen, da man im Bereich dieser Bewegungen zufällige Ergebnisse erhält.

GRUNDLAGEN

Jeder Freiheitsgrad eines Teilchens erhält nach dem Gleichverteilungssatz die gleiche Durchschnittsenergie \bar{E} . In der Kapplerschen Drehwaage wird durch den Faden nur ein Freiheitsgrad zugelassen, die Rotation. Die mittlere potentielle Energie ist damit gleich der thermischen Energie.

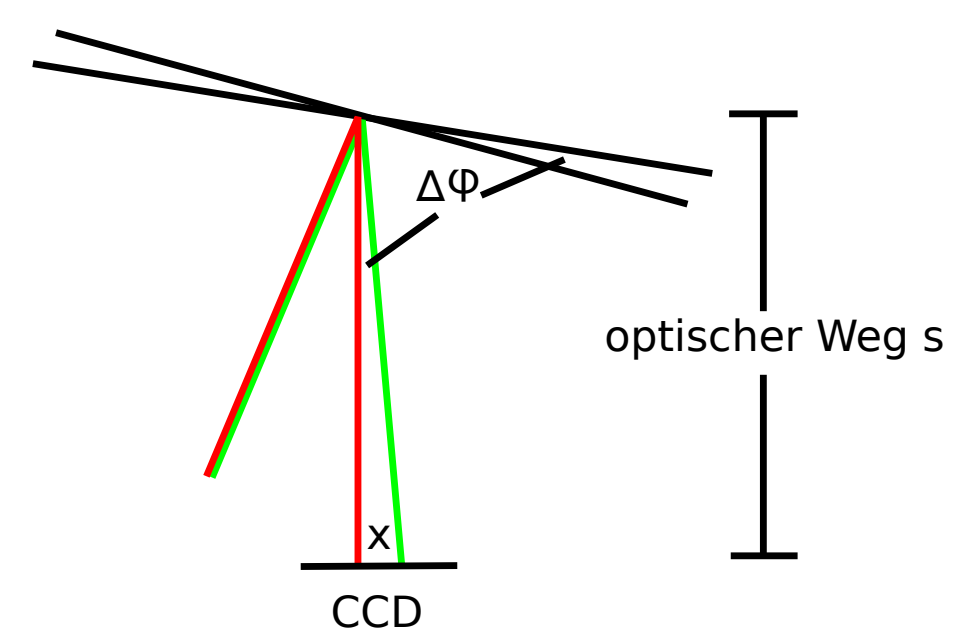
$$\bar{E} = \frac{k_B \cdot T}{2}$$

$$E_{\text{pot}} = \frac{1}{2} D \Delta \varphi^2$$

Da man die potentielle Energie aus dem Direktionsmoment D und dem mittleren Verschiebungsquadrat des Winkels ermitteln kann, folgt eine einfache Formel zur Berechnung der Boltzmannkonstante:

$$k_B = \frac{D \cdot \Delta \varphi^2}{T}$$

GRÖßENORDNUNGSABSCHÄTZUNG

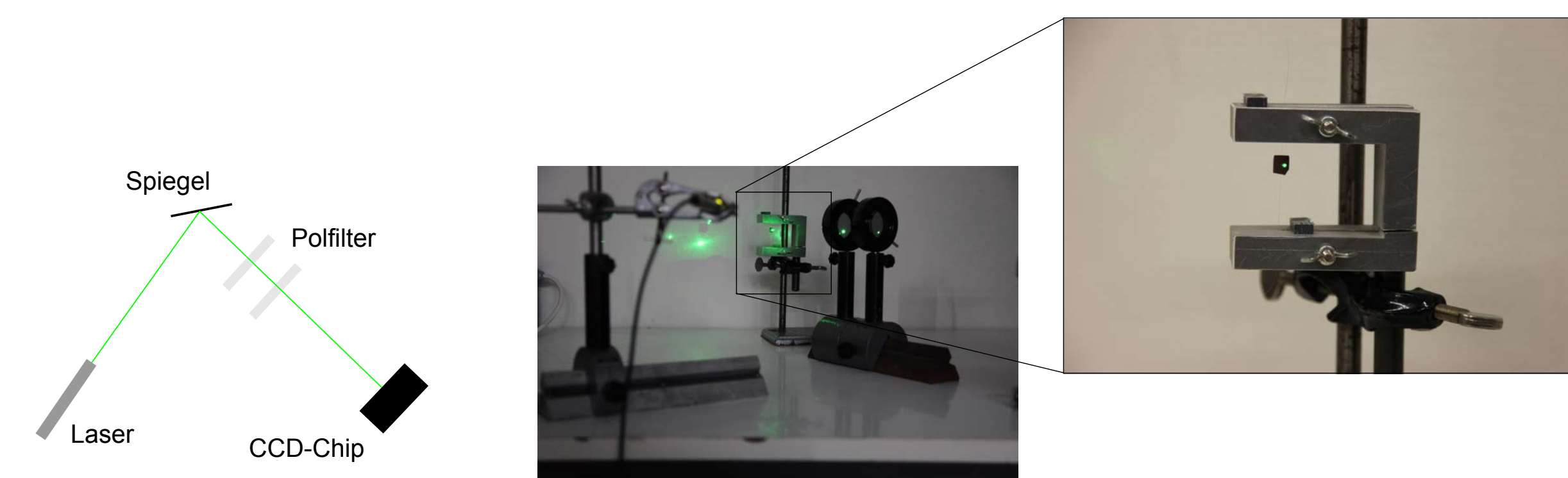


Vorgegeben sind:
 x , Pixelgröße ca. $5 \cdot 10^{-6}$ m $\Rightarrow \Delta \varphi_{\text{min}} = 10^{-6}$ rad
 s , optischer Weg ca. 5 m $\Rightarrow D_{\text{max}} = 10^{-9} \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$
 T , Temperatur ca. 300 K
 k_B , ca. 10^{-23} J/K

VERSUCH

Der Versuchsaufbau nach Kapplers Drehwaage: An einem Torsionsfaden wird ein Spiegel befestigt, an diesem lässt man einen Lichtstrahl reflektieren, welcher im Detektor aufgenommen wird, um dort die Auslenkung aufzuzeichnen.

Als Lichtquelle wird ein grüner Laser genutzt, als Spiegel ein Stück eines Siliziumwafers, Größe ca. 20 mm². Zur Messung des Direktionsmoments, Gaußsche Methode, werden zusätzlich verschiedene Trägheitsmomente angebracht. Durch die Messung der Periodendauer schließt man auf das Trägheitsmoment des Spiegels und auf die Direktionskraft des Torsionsfadens. Um den CCD-Chip zu schützen bringt man Polarisationsfilter ein um die Intensität zu verringern.



Als Torsionsfaden wurden Haare und sehr dünne Glasfaserkabel getestet:

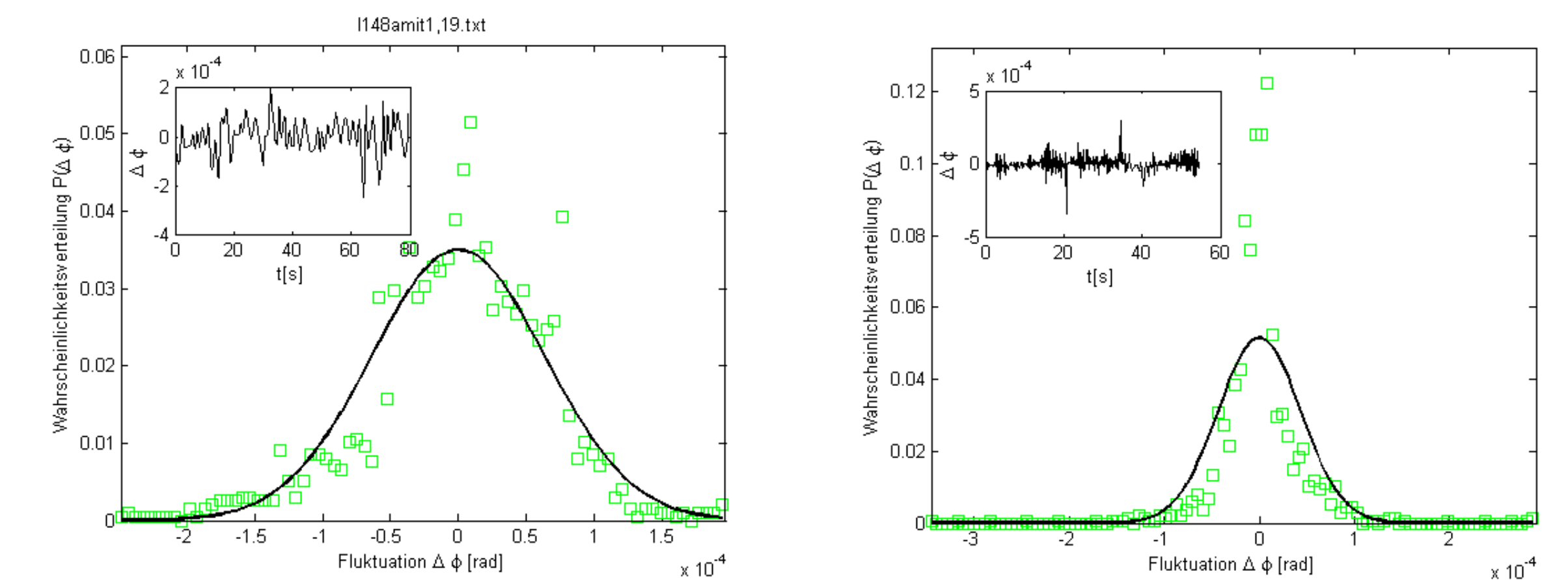
Die Glasfaser hat eine Dicke von 100 Mikrometern, das tausendfache von Kapplers Quarzfaden. Damit ist das Direktionsmoment deutlich zu groß und mit der Bildrate des CCD-Chips nicht zu bestimmen. Die Messung verschiedener Haare unabhängig von Länge und Dicke ergab jeweils ein Direktionsmoment in der Größenordnung 10^{-7} Nm/rad.

Damit ist eine Messung der Boltzmannkonstante mit den vorgegebenen Größen nicht möglich.

Wir erwarten keine thermischen Fluktuationen.

ERGEBNISSE

Die Messungen mit Haaren als Torsionsfaden ergaben entgegen unserer Erwartung deutliche gaußverteilte Schwankungen im Bereich von 10^{-5} bis 10^{-4} rad, was einer mittleren potentiellen Energie von etwa 10^{-16} J entspricht und damit nicht der thermischen Energie, Größenordnung 10^{-21} , zugeordnet werden kann.



Erklärungsansätze:

- Mechanische Einflüsse, wie Gebäudeerschütterungen, Luftströmungen, System ist sogar sensitiv gegenüber Sprechen
- Gaußkurven passen nicht zu einfachem Schwingungsprofil
- Intensitätsfluktuationen des Laserstrahls reichen nicht aus um zu Schwankungen der beobachteten Größenordnung zu erzeugen.

VERBESSERUNGSVORSCHLÄGE

- CCD-Chip mit besserem zeitlichem sowie räumlichem Auflösungsvermögen verwenden und darauf abgestimmte Software
- Um mechanische Einflüsse zu reduzieren, System in abgeschirmten, stoßsicheren Kasten unterbringen
- Torsionsfaden mit geringerem Direktionsmoment, z.B. langgezogene Glasfaser

FAZIT

Wir bewundern Eugen Kappler für seine 1939 veröffentlichten Messungen zur Brownschen Molekularbewegung