

UNIVERSITÄT LEIPZIG

Fakultät für Physik und Geowissenschaften



# Quantitative Untersuchungen zu Fluktuation, Dissipation und Irreversibilität anhand einzelner optisch gefangener Kolloide

**Diplomarbeit**

angefertigt in der Abteilung Molekülphysik am Institut für Experimentelle Physik II der Fakultät für Physik und Geowissenschaften, Universität Leipzig von

**Olaf Ueberschär**

zum Erlangen des akademischen Grades

Diplom-Physiker.

Betreuer und Erstgutachter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Friedrich Kremer

Zweitgutachter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Wolfgang Janke

Betreuer: Dipl.-Phys. Christof Gutsche

eingereicht am: 28. April 2009

## Referat

In der vorliegenden Arbeit werden allgemeingültige Aussagen der stochastischen Thermodynamik mithilfe steuerbarer optischer Fallen, der sog. optischen Pinzetten, experimentell überprüft. Die theoretische und experimentelle Erforschung dieses sehr neuen, seit ca. 2005 unter anderem durch *U. Seifert* formal fundierten Zweiges der Thermodynamik verspricht in vielfältiger Weise dazu beizutragen, Vorgänge auf Mikro- und Nanometerskala in Physik, Biologie, Chemie und Technik zukünftig quantitativ verstehen und nutzen zu können. Anknüpfend an erstmals 2002 von *G. M. Wang et al.* durchgeführte Experimente werden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene sog. Fluktuationstheoreme für Nichtgleichgewichtszustände anhand einzelner, optisch gefangener Kolloiden experimentell bestätigt. Die seit ca. 15 Jahren in den Fokus der theoretischen Forschung gelangten Fluktuationstheoreme beschreiben hierbei quantitativ die Entstehung und Entwicklung makroskopischer Irreversibilität vom mikroskopischen Standpunkt der stochastischen Thermodynamik aus.

Darüber hinaus ist ein Verfahren entwickelt worden, mit dem der Radius und die Temperatur eines einzelnen gefangenen Kolloids unmittelbar aus den thermischen Gleichgewichtsfluktuationen bestimmt werden können. Diese Ergebnisse versprechen eine Optimierung präziser Experimente zu anderen Fragestellungen.

# Gliederung

<b>Symbolverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
Mittelwerte.....	5
Spezielle Symbole.....	5
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>7</b>
allgemeiner Sprachgebrauch.....	7
mathematische Begriffe .....	7
physikalische und technische Begriffe.....	7
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>8</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>9</b>
<b>Kapitel 1. Einleitung .....</b>	<b>10</b>
<b>Kapitel 2. Experimentelle Grundlagen.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. Optische Pinzetten.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2. Kolloidale Suspensionen .....</b>	<b>18</b>
2.2.1. Definition und Überblick.....	18
2.2.2. Herstellung und experimentelle Vorbereitung.....	18
2.2.3. Dynamische Viskosität .....	19
<b>2.3. Die verwendete Experimentieranordnung .....</b>	<b>21</b>
2.3.1. Die optische Pinzette.....	21
2.3.2. Die Messzelle.....	24
2.3.3. Die Immersionsflüssigkeitspumpe.....	25
<b>Kapitel 3. Theoretische Grundlagen.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1. Charakterisierung von thermischem Gleichgewicht und Nichtgleichgewichtszuständen .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2. Eine mathematische Beschreibung der Brown'schen Bewegung.....</b>	<b>29</b>
3.2.1. Einführung .....	30
3.2.2. Die Fokker-Planck-Gleichung der Brown'schen Bewegung .....	30
3.2.3. Die Langevin-Gleichung der Brown'schen Bewegung.....	32
3.2.4. Die Brown'sche Bewegung eines optisch gefangenen Partikels.....	35
<b>3.3. Stochastische Thermodynamik und Fluktuationstheoreme .....</b>	<b>38</b>
3.3.1. Die klassische Thermodynamik des Gleichgewichts als Ausgangspunkt.....	39
3.3.2. Wärme und Arbeit stochastischer Mikrosysteme und der mikroskopische erste Hauptsatz .....	41
3.3.3. Entropie stochastischer Mikrosysteme.....	44
3.3.4. Fluktuationstheoreme.....	46
<b>Kapitel 4. Technische Umsetzung von Positionsdetektion und Kraftkalibration .....</b>	<b>52</b>
<b>4.1. Bestimmung der Kolloidposition mittels optischer Bilderkennung .....</b>	<b>52</b>
4.1.1. Einführung .....	52
4.1.2. Bildaufnahme.....	53
4.1.3. Charakterisierung der Bildanalyse.....	56
4.1.4. Verwendete Algorithmen der Bildanalyse.....	58
4.1.5. Zusammenfassung und Anschluss an die Experimente .....	67
<b>4.2. Kraftkalibration der optischen Falle .....</b>	<b>67</b>
4.2.1. Das Kraftkalibrationsverfahren.....	68
4.2.2. Falldrift .....	73
<b>Kapitel 5. Radius- und Temperaturmessung auf Einzelkolloidebene.....</b>	<b>75</b>
<b>5.1. Das Verfahren.....</b>	<b>75</b>
5.1.1. Einführung .....	76
5.1.2. Wahl der Messparameter .....	77
5.1.3. Bestimmung der Autokorrelationszeitkonstante $\tau_i$ .....	77
5.1.4. Bestimmung des Radius.....	79
5.1.5. Bestimmung der Temperatur .....	80
<b>5.2. Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>82</b>
5.2.1. Vergleich der Radiusbestimmung mit anderen Methoden .....	82
5.2.2. Vergleich der Temperaturmessung mit anderen Methoden .....	87
<b>5.3. Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>88</b>

<b>Kapitel 6. Experimentelle Bestätigung verschiedener Fluktuationstheoreme .....</b>	<b>89</b>
<b>6.1. Das Experiment .....</b>	<b>90</b>
6.1.1. Erzeugung eines Nichtgleichgewichtszustandes .....	90
6.1.2. Bezugssysteme .....	91
6.1.3. Zugehörige Dissipationsfunktionen .....	93
6.1.4. Theoretische Vorhersagen .....	95
6.1.5. Versuchsdurchführung .....	97
6.1.6. Korrekturen für die Piezotisch-Bewegung .....	99
6.1.7. Explizite Berechnungsvorschrift für die Dissipationsfunktionen .....	101
<b>6.2. Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>102</b>
6.2.1. Quantitative zeitliche Entwicklung der Dissipationsfunktion .....	103
6.2.2. Quantitative Erfüllung von ITFT und TFT .....	106
6.2.3. Quantitative Erfüllung des UIFT .....	111
<b>6.3. Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>113</b>
<b>Danksagung .....</b>	<b>115</b>
<b>Quellen und Literaturverzeichnis .....</b>	<b>116</b>
Thermodynamik, stochastische Thermodynamik und Fluktuationstheoreme .....	116
Theorie und experimentelle Praxis optischer Pinzetten .....	117
Kolloide und kolloidale Suspensionen .....	118
Arbeiten der Arbeitsgruppe „Molekülphysik“ an der Universität Leipzig .....	118
Allgemeine Literatur zu Mathematik, Physik, Chemie und Informatik .....	118
Produktreferenzen und Herstelleradressen .....	119
<b>Anhang .....</b>	<b>121</b>
<b>Anhang A.1: Das Kommunikationsprotokoll für das Temperaturmessgerät P 610 .....</b>	<b>121</b>
<b>Anhang A.2: Schaltplan der Immersionsflüssigkeitspumpenelektronik .....</b>	<b>121</b>
<b>Anhang A.3: Beweis der Jarzynski-Relation .....</b>	<b>122</b>
<b>Anhang A.4: Beweise der Dissipationsfunktionen (6.1.14) und (6.1.15) .....</b>	<b>122</b>
<b>Anhang A.5: Expliziter Nachweis der Gültigkeit von TFT und ITFT für <math>\mathcal{Q}^{(D)}(t)</math> .....</b>	<b>125</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung .....</b>	<b>126</b>
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>127</b>

# Symbolverzeichnis

## Mittelwerte

Das *zeitliche Mittel* einer physikalischen Größe wird durch einen Überstrich gekennzeichnet:

$$\overline{x} \equiv \overline{x(t)} := \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t') dt' . \quad (\text{E.1})$$

Das *Scharmittel* einer Observablen hingegen wird durch spitze Klammern bezeichnet:

$$\langle x \rangle \equiv \langle x_i(t) \rangle := \lim_{N \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t) \right) . \quad (\text{E.2})$$

Man beachte, dass bei endlichem Stichprobenumfang die Varianz  $\langle x^2 \rangle$  als zweites Moment erwartungstreu berechnet (geschätzt) wird:

$$\langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle = \lim_{N \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N x_i(t)^2 \right) . \quad (\text{E.3})$$

Unter der Annahme eines ergodischen Systems gilt die sog. *Ergoden-Hypothese* [1]:

$$\overline{x} = \langle x \rangle . \quad (\text{E.4})$$

## Spezielle Symbole

In dieser Arbeit wird gemäß allgemeiner Konvention u. a. von folgenden Symbolen Gebrauch gemacht:

- $\mathbb{1}_3$  ..... Einheitsmatrix im  $\mathbb{R}^3$ ,  $\mathbb{1}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
- $\sim$  ..... größenordnungsmäßig gleich
- $\approx$  ..... ungefähr gleich
- $\forall$  ..... für alle (*Allquantor*)
- b** ..... bit, Symbol der Informationseinheit Bit,  $8 \text{ b} = 1 \text{ B}$
- B, kB, MB, GB** ... Byte, Kilobyte, Megabyte, Gigabyte,  
 $1 \text{ GB} = 1024 \text{ MB} = (1024)^2 \text{ kB} = (1024)^3 \text{ B} = 8 \cdot (1024)^3 \text{ bit}$
- $\beta$  ..... inverse Temperatur,  $\beta \equiv (k_B T)^{-1}$
- $dU, \delta Q$  ..... vollständiges und nicht-vollständiges Differential von innerer Energie und Wärme
- $\partial_x$  ..... partielle Ableitung nach  $x$ ,  $\partial_x f(x, y) \equiv \frac{\partial f(x, y)}{\partial x}$
- $\nabla$  ..... Nabla-Operator, Gradient, für ein skalares Feld in kartesischen Koordinaten gegeben durch  $\text{grad } f(\vec{x}) \equiv \nabla f(\vec{x}) = (\partial_x f, \partial_y f, \partial_z f)$
- $\Delta$  ..... Laplace-Operator, in kartesischen Koordinaten gegeben durch  $\Delta \equiv \partial_x^2 + \partial_y^2 + \partial_z^2$ , nicht zu verwechseln mit einem kleineren, kursiven

griechischen Großbuchstaben  $\Delta$  („Delta“) (s. u.)

$\Delta$  ..... „Delta“, Änderung, z. B. bezeichnet  $\Delta T = -2\text{K}$  eine Temperaturänderung um -2 K.

$\delta^{(3)}(\vec{x})$  ..... Delta-Distribution (Dirac-Delta) in drei Dimensionen,  
 $\delta^{(3)}(\vec{x}) = \delta(x)\delta(y)\delta(z)$

$\mathcal{F}, \mathcal{F}^{-1}$  ..... Fourier-Transformation und inverse Fourier-Transformation

$$\mathcal{F}(f(t))(\omega) := \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} dt e^{-i\omega t} f(t)$$

$$\mathcal{F}^{-1}(\tilde{f}(\omega))(t) := \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} d\omega e^{+i\omega t} \tilde{f}(\omega)$$

$k_B$  ..... Boltzmann-Konstante,  $k_B = 1,3806504(24) \cdot 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$  [83]

$n_{\text{H}_2\text{O}}, n_{\dots}$  ..... Brechungsindex (z. B. von Wasser) bezogen auf Luft bei 20°C, 1013 hPa und  $\lambda = 589,3 \text{ nm}$

$\text{Pr}(\dots)$  ..... Wahrscheinlichkeit (engl.: *probability*) des Zustandes, Pfades u. ä.

$\vec{x}, \vec{r}$  ..... Ortsvektor, in kartesischen Koordinaten mit den Komponenten  
 $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3)^T \equiv (x, y, z)^T$ .

# Abkürzungsverzeichnis

## allgemeiner Sprachgebrauch

bzw.	beziehungsweise
d. h.	das heißt
engl.	englisch
ggf.	gegebenenfalls
i. A.	im Allgemeinen
i. F.	im Folgenden
i. W.	im Wesentlichen
s.	siehe
S. (f., ff.)	Seite (folgend, fortfolgend)
sog.	sogenannt/e/es
u. a.	unter anderem
u. ä.	und ähnliches/n/m
usw.	und so weiter
u. U.	unter Umständen
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel

## mathematische Begriffe

g. d. w.	genau dann wenn ( <i>Äquivalenz</i> )
Gl.	Gleichung
o. B. d. A.	ohne Beschränkung der Allgemeinheit
Vor.	Voraussetzung

## physikalische und technische Begriffe

AD-Wandler	Analog-Digital-Wandler
CMOS	complementary metal oxide semiconductor
FT	Fluktuationstheorem, s. Kapitel 3.3.4
GLMT	generalized Lorenz-Mie theory, s. Kapitel 2.1
IDL	Interactive Data Language, <i>eine Skriptsprache</i> , s. [91]
IFT	integriertes Fluktuationstheorem, s. Kapitel 3.3.4
ITFT	integrated transient fluctuation theorem, s. Kapitel 3.3.4
LabView	<i>ein grafisches Programmiersystem von National Instruments</i> , s. [93]
NESS	nonequilibrium steady state, s. Kapitel 3.1
NIR	nahes Infrarot
PID	proportional integrative derivative, s. Kapitel 2.3.1 (Fußnote <sup>23</sup> auf S. 23)
RAM	random access memory, <i>ein Computerspeichertyp</i>
UV	Ultraviolett
TCP/IP	transmission control protocol/internet protocol
TD	Thermodynamik
TEM	transversal-elektromagnetische Mode, s. Kapitel 2.1
TFT	transient fluctuation theorem, s. Kapitel 3.3.4
RS232	<i>eine serielle Schnittstelle vieler PCs, standardisiert durch EIA-232 bzw. ursprünglich RS-232 (letztere namensgebend)</i>
UIFT	universelles integrales Fluktuationstheorem, s. Kapitel 3.3.4

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Zur Erklärung der optischen Fallenkräfte im Mie-Regime.....	17
Abb. 2:	Die dynamische Viskosität reinen Wassers im Temperaturbereich von 0°C bis 90°C.....	21
Abb. 3:	Schematischer Aufbau der verwendeten optischen Pinzette .....	22
Abb. 4:	Die Messzelle .....	25
Abb. 5:	Bestimmung der Diffusionskonstante aus der freien Brown'schen Bewegung .....	35
Abb. 6:	Gemessene Häufigkeitsverteilung des Aufenthaltsortes eines Kolloids in der optischen Falle....	38
Abb. 7:	Beugungsbild eines $R = 1,5 \mu\text{m}$ -Kolloids bei $\zeta = 2,5$ -facher Nachvergrößerung und einer Bildrate von $f = 5,1 \text{ kHz}$ .....	54
Abb. 8:	Bestimmung des relativen Ortsauflösungsvermögens für $\zeta = 1,6$ und $f = 10,1 \text{ kHz}$ mithilfe eines räumlich fixierten Kolloids.....	61
Abb. 9:	Intensitätsregression eines mit der CMOS-Kamera aufgenommenen Beugungsbildes .....	63
Abb. 10:	Vergleich der gemessenen Intensitätsverteilung eines Beugungsbildes mit verschiedenen Modellfunktionen .....	63
Abb. 11:	Zum Verfahren der eindimensionalen Summation: Intensitätsprofile.....	64
Abb. 12:	Zur Methode der eindimensionalen Summation .....	66
Abb. 13:	Die zeitlichen Schwankungen der Direktionskonstanten und der PID-geregelten Laserleistung im Vergleich .....	72
Abb. 14:	Zur Drift der optischen Falle.....	74
Abb. 15:	Die errechnete Ortsautokorrelationsfunktion eines optisch gefangenen Kolloids.....	79
Abb. 16:	Zur Existenz und Eindeutigkeit der Lösung von Gl. (5.2.2) .....	82
Abb. 17:	Bestimmung des Radius eines Kolloids mittels Stokes'scher Reibung .....	86
Abb. 18:	Vergleich von rauschbasierter und strömungswiderstandsbasierter Kolloidradiusmessung.....	86
Abb. 19:	Vergleich der Temperaturmessungen mittels Thermoelement und Rauschmessung auf Einzelkolloidniveau .....	87
Abb. 20:	Zum theoretischen Verlauf der Übergangsphase des Nichtgleichgewichtszustandes.....	92
Abb. 21:	Gemessener Anfahreffekt des verwendeten Piezotisches .....	101
Abb. 22:	Die gemessene Verteilung der Dissipationsfunktion $\Omega_{\text{(corr.)}}^{(D)}(t)$ für unterschiedliche Zeitpunkte kurz nach Einschalten der Störung und im stationären Gleichgewicht.....	104
Abb. 23:	Zeitliche Entwicklung der mittleren Dissipationsfunktion $\langle \Omega_{\text{(corr.)}}^{(D)} \rangle(t)$ .....	105
Abb. 24:	Zeitliche Entwicklung der mittleren Dissipationsfunktionen $\langle \Omega^{(L, \mathcal{E}_1)} \rangle(t)$ und $\langle \Omega^{(L, \mathcal{E}_2)} \rangle(t)$ ....	106
Abb. 25:	Die quantitative Erfüllung des ITFT für die Dissipationsfunktion $\Omega_{\text{(corr.)}}^{(D)}(t)$ .....	107
Abb. 26:	Die quantitative Erfüllung des TFT für die Dissipationsfunktion $\Omega_{\text{(corr.)}}^{(D)}(t)$ .....	108
Abb. 27:	Die quantitative Erfüllung des ITFT und TFT für die Dissipationsfunktion $\Omega_{\text{(corr.)}}^{(L, \mathcal{E}_1)}(t)$ .....	109
Abb. 28:	Die quantitative Erfüllung des ITFT für die Dissipationsfunktion $\Omega^{(L, \mathcal{E}_2)}(t)$ .....	110
Abb. 29:	Die quantitative Erfüllung des UIFT für die Dissipationsfunktionen $\Omega_{\text{(corr.)}}^{(D)}(t)$ und $\Omega_{\text{(corr.)}}^{(L, \mathcal{E}_1)}(t)$ .....	112
Abb. 30:	Schaltplan der Steuerelektronik für die Immersionsflüssigkeitspumpe.....	121



## **Tabellenverzeichnis**

<b>Tab. 1: Die Ortsauflösung der verwendeten Positionsdetektion in Abhängigkeit von Algorithmus, Bildrate und optischer Nachvergrößerung.....</b>	<b>60</b>
<b>Tab. 2: Vergleich der Ergebnisse einer rauschbasierten Radiusbestimmung mit den Herstellerangaben.....</b>	<b>83</b>
<b>Tab. 3: Explizite Berechnungsvorschrift für die Dissipationsfunktionen.....</b>	<b>102</b>

# Kapitel 1. Einleitung

Die *Brown'sche Molekularbewegung* wurde im Jahr 1827 erstmals vom Botaniker *R. Brown* an in Wasser gelöstem Blütenstaub<sup>1</sup> beobachtet und beschrieben [8, 14]. Zunächst als rein biologisches Phänomen fehlinterpretiert, kam ihr in den folgenden 100 Jahren eine zentrale Rolle in der Entwicklung der physikalischen Grundlagen der Thermodynamik und der dynamischen Interpretation der statistischen Physik zu. Darüber hinaus haben die theoretischen Arbeiten zur Brown'schen Bewegung der Forschung in vielen angrenzenden Teilgebieten der Physik und auch Mathematik entscheidende Impulse gegeben und zu vielen fundamentalen neuen Erkenntnissen geführt [14].

Ein Wegbereiter dieser Entwicklung war *A. Einstein*, der 1905 eine entscheidende Arbeit zur mathematischen Beschreibung der Brown'schen Bewegung lieferte [9, 14]. In ihr konnte Einstein u. a. eine einfache mathematische Verknüpfung von Diffusionskoeffizient und molekularer Reibung, die sog. *Einstein-Relation* ableiten (s. Kapitel 3.2). Ausgehend von diesem zentralen Ergebnis und Bezug nehmend auf die Arbeiten von *H. T. Nyquist* und *J. B. Johnson* aus dem Jahr 1928 zu dem analogen Rauschphänomen der Elektrodynamik konnten *H. B. Callen* und *Th. A. Welton* 1951 die Einstein-Relation verallgemeinern und auf diese Weise eine allgemeingültige Verbindung zwischen einer sog. *Antwortfunktion* auf eine äußere Störung (engl. *response function*) und den Gleichgewichtsfluktuationen eines Systems aufstellen [18, 14]. Mit dieser fundamentalen Arbeit hatten sie das allgemeingültige (**Quanten-**) **Fluktuations-Dissipations-Theorem** entdeckt. *L. Onsager*, *M. S. Green* und *R. Kubo* leisteten weitere entscheidende Beiträge, die allesamt um 1960 schließlich zu der „**linear response**“-**Theorie** und den sog. **Green-Kubo-Relationen** führten [11, 12, 13, 14].

Die im Zusammenhang mit der mathematischen Modellierung der Brown'schen Bewegung entwickelten Methoden begründeten überdies schließlich auch einen völlig neuen Zweig der modernen Mathematik, der sich mit sog. **stochastischen Differentialgleichungen** beschäftigt [14].

In Kapitel 5 dieser Arbeit wird eine aus theoretischer Sicht einfache, jedoch technisch anspruchsvolle Anwendung der klassischen mathematischen Beschreibung der Brown'schen Bewegung präsentiert. So ist es mithilfe eines im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Messverfahrens für eine optische Pinzette möglich, sowohl den Radius eines gefangenen, nur wenige Mikrometer großen Polystyren-Kügelchens auf  $\pm 20$  nm genau zu bestimmen, als auch eine zeitaufgelöste Temperaturbestimmung des Systems mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  K

---

<sup>1</sup> D. h. einer kolloidalen Suspension in moderner Terminologie.

# Stichwortverzeichnis

## A

Abbildungsverzeichnis .....	8
Abkürzungsverzeichnis .....	7
Airy-Scheibchen .....	54
Andrade-Modell der Viskosität .....	20
Äquipartitionstheorem .....	28, 29, 34, 70, 79, 80, 81, 86, 95
Kalibration mit .....	70
Auflösungsvermögen .....	57
Auftriebskraft .....	19, 35
Autokorrelation .....	36, 78, 92, 102
Definition .....	36
experimentelle Bestimmung der Abklingkonstanten .....	77
Formel für optisch gefangenes Kolloid .....	36
Wert der Abklingkonstanten .....	37, 69

## B

Bezugssystem .....	90, 91, 92, 93, 94, 105, 106, 122, 123
Bildanalyse .....	13, 53, 54, 56, 57, 58, 60, 64
Algorithmen .....	58
Charakterisierung .....	56
Bildrate .....	53
Binning .....	<i>Siehe</i> Blocking
Blocking .....	72, 76
Boltzmann-Konstante .....	6
Brechungsgesetz .....	16
Brechungsindex .....	6, 15, 81
Brown'sche Bewegung .....	19
eines optisch gefangenen Kolloids .....	35
mathematische Beschreibung .....	29

## C

colloid .....	18
colloidal suspension .....	18
corner frequency .....	69

## D

Danksagung .....	115
detailed balance .....	27, 47
Differential .....	
vollständiges .....	40
Differenzenquotient .....	100
Diffusionskoeffizient .....	10, 30
Dipolnäherung .....	16
Direktionskonstante .....	35, 36, 68, 70, 72, 80, 83
disperse Phase .....	18
Dispersionsmedium .....	18
Dissipationsfunktion I .....	11, 47, 48, 50, 89, 90, 91, 93, 94, 95, 96, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 122, 123, 125
Definition .....	47
dritter Hauptsatz .....	41
dynamische Viskosität .....	<i>Siehe</i> Viskosität

## E

eindimensionalen Summation .....	59, 64
Einstein-Relation .....	10, 30
Energie .....	
freie .....	28
innere .....	28
Ensemble .....	
kanonisches .....	27
mikrokanonisches .....	41
Entartungsfaktor .....	41
Entropie .....	11, 28, 39, 40, 41, 44, 45, 46, 89
Definition für stochastischer Mikrosysteme .....	44
des Mediums .....	45
Gesamt- .....	45
Gibbs'sche .....	40
Partikel- .....	45

System- .....	45
erf(x) .....	96
Ergoden-Hypothese .....	5
erster Hauptsatz .....	
klassischer .....	40
mikroskopischer .....	43
Erwartungstreue .....	5
Ethanol .....	81

## F

Fallendrift .....	56, 73
Faraday-Isolator .....	23
Faxén-Gesetz .....	26, 32
Faxén-Korrektur .....	19
Fluktuations-Dissipations-Theorem .....	10, 30
Fluktuationstheorem .....	7, 11, 12, 44, 46, 48, 49, 50, 51, 89, 104, 111, 113
allgemeines integrales .....	48
allgemeines integrales für die Entropie .....	48
detailliertes .....	12, 49
integriertes .....	12, 50
universelles integrales .....	12
Fokker-Planck-Gleichung .....	30, 31, 32, 34, 35, 37, 45, 47, 48, 51, 91, 94
eines optisch gefangenen Kolloids .....	37
für allgemeines Potential .....	31
Lösung für ein optisch gefangenes Kolloid .....	37
Lösung für freies Teilchen .....	31
Fotostrom .....	23
<i>frame rate</i> .....	53
Fraunhofer-Beugung .....	61
Fresnel-Beugung .....	61
FT .....	<i>Siehe</i> Fluktuationstheorem

## G

gereinigtes Wasser .....	18
Gibbs-Entropie .....	44
Gleichgewicht .....	
detailliertes .....	27, 90
thermisches .....	27
Gleichverteilungssatz .....	28
Gradientenkraft .....	15, 16
Gravitationskraft .....	19
Green-Kubo-Relationen .....	10
Grenzkreisfrequenz .....	69, 76, 81

## H

Hamilton-Funktion .....	28
Hauptsatz .....	11, 40, 41, 48
Hauptsätze .....	
der klassischen Thermodynamik .....	40
Helmholtz'sche freie Energie .....	<i>Siehe</i> Energie
hot pixels .....	64
Huygens'schen Prinzip .....	61

## I

Immersion .....	25
integrated transient fluctuation theorem .....	<i>Siehe</i> ITFT
Intensitätsregression .....	58, 61
Irreversibilität .....	2, 11, 38, 39, 40, 46, 47, 50
ITFT .....	7, 50, 89, 90, 91, 94, 95, 96, 98, 99, 100, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 113, 125

## J

Jarzynski-Relation .....	28, 49, 122
Jensen-Ungleichung .....	47

## K

Kalibration .....	67
Kamerafrequenz .....	53
Köhler'sche Beleuchtung .....	21, 53, 61, 84
Kolbenströmung .....	69, 83, 86, 97
Kolloid .. 12, 18, 19, 25, 26, 32, 33, 34, 35, 36, 53, 57, 61, 62, 64, 67, 68, 69, 72, 79, 80, 82, 83, 84, 85, 90, 92, 97, 98, 101, 102, 103, 104, 105, 106	
kolloidale Suspension .....	18
kolloidale Systeme .....	18
Kometenschweif .....	15
konjugierte Trajektorie .....	46
Konstantan .....	24
Konvergenz	
des universellen integralen FT .....	111
Konvexität	
einer Funktion .....	48
Kreuzkorrelation .....	64, 66

## L

laminarer Strömung .....	20
Längenmaßstab	
Pixelgröße .....	57
Langevin-Gleichung .....	31, 32, 33, 34, 35, 36, 42, 45, 91, 94
eines optisch gefangenen Kolloids .....	36
Motivation .....	32
Trägheitslosigkeit .....	34
Laser	
Leistung .....	23
Wellenlänge .....	16, 22
Leistungsdichtespektrum .....	69
Levenberg-Marquardt-Algorithmus .....	62
Lichtdruck .....	15
linear response-Theorie .....	10

## M

Messzelle .... 19, 21, 22, 23, 24, 25, 57, 71, 73, 82, 84, 85, 90, 91, 92, 94	
Innenvolumen .....	25
Mie-Regime .....	15, 16, 17
Mikroskop .....	23, 53, 71
Mikrozustände .....	41
millipore water .....	18
Mittel	
Schar- .....	5
zeitliches .....	5

## N

Nachvergrößerung	
optische .....	53
Nanotechnologie .....	39
Nernst'sches Theorem .....	41
NESS .....	7, 29, 46, 49, 50, 51, 90, 91, 94, 98, 99, 102, 103, 104, 105, 106
Newton'sche Flüssigkeit .....	20
Nichtgleichgewicht .....	29
nonequilibrium steady state .....	29
nullter Hauptsatz .....	40
numerische Apertur .....	14

## O

optische Nachvergrößerung .....	53
optische Pinzette .....	10, 12, 14, 21, 38, 67, 76, 91, 97, 114
Grundlagen .....	14
technische Spezifikationen .....	21
optisches Potential	
Harmonizität .....	17, 38

## P

Photonen	
Streuung .....	14

PID-Regelkreis .....	23, 71
Piezoaktuator .....	22
Piezotisch .. 22, 56, 66, 67, 69, 71, 84, 86, 90, 91, 97, 98, 99, 100, 101, 104, 105, 107, 110, 111	
Anfahreffekte .....	99
Korrektur .....	99
Polarisierbarkeit .....	16
Polystyren .....	10, 15, 18, 34, 35, 61, 85
Dichte .....	34
Positionsbestimmung	
eines Kolloids .....	52
power spectrum .....	69, 76
Protokoll .....	42, 47, 49, 50, 51, 90, 93
Definition .....	42
Zeitumkehr .....	46
Prozessparameter .....	<i>Siehe</i> Protokoll
Pumpe	
für Immersionsflüssigkeit .....	25

## Q

Quanten-Fluktuations-Dissipations-Theorem .....	10
---	----

## R

Radius	
Messung durch Rauschanalyse .....	79
Messung durch Strömungswiderstand .....	83
random walk .....	30
Rasterkraftmikroskop .....	85
Rayleigh-Regime .....	15, 16
Referat .....	2
Reibung .....	<i>Siehe</i> Stokes'sche Reibung
Reibungskoeffizient .....	30
Reynolds-Zahl .....	20

## S

sampling rate .....	53
Samplingrate .....	53
Schärmittel .....	5
Schätzer	
der Autokorrelationsfunktion .....	77
des statistischen Fehlers .....	80
für Wahrscheinlichkeit .....	98
Sebeck-Effekt .....	24
Selbstständigkeitserklärung .....	126
seltene Realisierungen .....	111
statistischer Operator .....	41
statistisches Gewicht .....	45
Staubsauger-Effekt .....	19
stochastische Differentialgleichung .....	10, 32, 34
stochastische Kraft .....	33
stochastische Thermodynamik .....	<i>Siehe</i> Thermodynamik
Stokes'sche Reibung .....	83, 86, 88
Formel .....	32
Strahlenoptik .....	15, 16
Näherung .....	16
Strahlungsdruck .....	15
Streukraft .....	15
Symbole .....	5
Symbolverzeichnis .....	5

## T

Tabellenverzeichnis .....	9
TEM-Lasermode .....	14, 23
Temperatur	
Messung durch Rauschanalyse .....	80
Messung mit Thermoelement .....	24
TFT7, 46, 49, 50, 89, 90, 91, 94, 95, 99, 100, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 113, 125	
Thermodynamik	
des Nichtgleichgewichts .....	39
klassische .....	39
stochastische .....	12, 38
thermodynamischer Limes .....	39
Thermoelement .....	24, 87

Thermopaar Typ T .....	24
Thermospannung .....	24
Thermostatik .....	39
Trägheitslosigkeit	
der Langevin-Gleichung .....	34
transient fluctuation theorem .....	<i>Siehe</i> TFT

## U

UIFT .....	7, 46, 48, 89, 90, 91, 99, 100, 104, 111, 112, 113
------------	--

## V

Varianz .....	5, 70, 80
Schätzer .....	70
verallgemeinerte Lorenz-Mie-Theorie .....	16
Vierquadrantenfotodiode .....	53
Viskosität .....	19, 20, 21, 32, 34, 36, 68, 70, 75, 79, 81, 83
dynamische .....	19
Formel für Wasser .....	20
Vorzeichen	
von Wärme und Arbeit .....	40

## W

Wahrscheinlichkeit .....	45
thermodynamische .....	41
Wasser .....	6, 10, 14, 15, 18, 20, 26, 32, 34, 35, 81
weißes Rauschen .....	33, 42

## X

x-y-Tisch .....	22
-----------------	----

## Z

zeitliches Mittel .....	5
Zeitpfeil .....	11, 93
Zeitumkehrung .....	46, 93
Zufallsweg .....	30
Zustandsgröße .....	11
zweiter Hauptsatz .....	11
klassischer .....	41
Verallgemeinerung auf beliebige Systeme .....	49