

Humboldt-Universität zu Berlin
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät I

The effect of wavefront aberrations in light-pulse atom interferometry

**Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science
(M. Sc.) im Fach Physik**

Bastian Leykauf

7. Februar 2014

Gutachter:
Prof. Achim Peters, PhD
Prof. Dr. Kurt Busch

Zusammenfassung

Das ist die Zusammenfassung.

Abstract

This is the abstract.

Contents

1. Introduction	1
2. A theory of everything	3
2.1. Interferometer theory	3
3. Tabellen und Abbildungen	4
3.1. Tabellen	4
4. Mathematik und Physik	5
4.1. Benutung verschiedener Mathematik-Umgebungen	5
4.2. Weitere nützliche Mathe-Pakete	6
4.2.1. Differentialgleichungen	6
4.2.2. Chemische Formeln	6
4.2.3. Bras und Kets	6
4.2.4. Einheiten	6
5. Zitate und Bibliographie	9
A. List of Zernike polynomials	11

List of Figures

List of Tables

3.1. Verwendung von table	4
A.1. Eine mehrseitige Tabelle.	11

1. Introduction

This thesis presents some interesting physics, complete with numbers

$$g = (100 \pm 1) \text{ Gal}, \tag{1.1}$$

chemical formulae like ^{87}Rb and some other nonsense:

2. A theory of everything

This chapter describes a theory of everything.

2.1. Interferometer theory

In this section we will discuss some maths. Here is some:

$$e^{i\pi} - 1 = 0. \tag{2.1}$$

Beautiful, isn't it? And in (2.2) you can see some quantum mechanics.

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} (\Phi) = \hat{H}\Phi \tag{2.2a}$$

$$E\Phi(\mathbf{r}) = \left(\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right) \Phi(\mathbf{r}) \tag{2.2b}$$

3. Tabellen und Abbildungen

3.1. Tabellen

Die beiden wichtigsten Regeln für die Erstellung schöner Tabellen lauten:

1. Nie vertikale Linien benutzen.
2. Nie doppelte Linien benutzen.

Das Paket `booktabs` vereinfacht. Zusätzlich in Tab.3.1 `threeparttable` verwendet. Dieses Paket erlaubt die Benutzung von Fußnoten und Anmerkungen in Tabellen. Außerdem zeigt das Beispiel die Verwendung des von `siunitx` gelieferten Spaltenstils. Mit diesem können Unsicherheiten bequem automatisch formatiert und Werte gerundet werden.

Table 3.1.: Man beachte, dass $E_{\text{tot},1}$ und $E_{\text{tot},2}$ das selbe Ergebnis liefern, obwohl sie im Quelltext unterschiedlich formatiert wurden.

$N_{\text{particles,min}}$	Hier	$E_{\text{tot},1} / \text{GeV}$	$E_{\text{tot},2} / \text{GeV}$	F / N	N'
10.14 ^a	steht	18.3 ± 0.2	18.3 ± 0.2	4018.95(3)	282.3
11.54	nur	18.4 ± 0.3	18.4 ± 0.3	3991.32(4)	246.5
12.34	zentrierter	10.4 ± 0.2	10.4 ± 0.2	3981.19(2)	230.8
13.63 ^{**}	Text.	12.2 ± 0.6	12.2 ± 0.6	3976.35(3)	221.2

^a Hier können irgendwelche Anmerkungen stehen

^{**} Sternchen gehen auch

4. Mathematik und Physik

4.1. Benutzung verschiedener Mathematik-Umgebungen

\LaTeX ist eine Reihe von Dokumentenklassen und Paketen der American Mathematical Society. Hier sollen kurz einige Umgebungen, die `mathtools` zur Verfügung stellt, vorgestellt werden.

Gl. 4.1 ist eine einfache numerierte Gleichung.

$$a = b \tag{4.1}$$

Eine Gleichung mit Umformungen über mehrere Zeilen, aber nur einer Nummer:

$$\begin{aligned} a &= b + c - d \\ &\quad + e - f \\ &= g + h \\ &= i \end{aligned} \tag{4.2}$$

Ein Ausdruck, der sich über mehr als eine Zeile erstreckt:

$$\begin{aligned} a + b + c + d + e + f + a + b + c + d + e + f \\ + g + h + i + j + k + l + m + n + g + h + i + j + k + l + m + n \end{aligned} \tag{4.3}$$

Vier ausgerichtete Gleichungen:

$$a_{11} = b_{11} \qquad a_{12} = b_{12} \tag{4.4}$$

$$a_{21} = b_{21} \qquad a_{22} = b_{22} + c_{22} \tag{4.5}$$

4.2. Weitere nützliche Mathe-Pakete

4.2.1. Differentialgleichungen

Mit propd lassen sich Differentialgleichungen und -operatoren leicht setzen:

$$\frac{dy}{dx} \quad (4.6)$$

$$\frac{d^2u}{dx^2} = -\omega^2 u \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 6u \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (x + y) \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \quad (4.11)$$

4.2.2. Chemische Formeln

Bei chemischen Formeln hilft mhchem, z. B. kann leicht ${}^{235}_{92}\text{U}$ gesetzt werden.

4.2.3. Bras und Kets

Das Paket braket hilft in der Quantenmechanik:

$$\langle \Phi | \quad (4.12)$$

$$| \Psi \rangle \quad (4.13)$$

$$\langle \psi | \hat{H} | \phi \rangle \quad (4.14)$$

4.2.4. Einheiten

Sehr nützlich ist auch siunitx. Es setzt Einheiten immer aufrecht und mit passendem Abstand zum Wert. Auch Unsicherheiten lassen sich bequem angeben. Hier soll außerdem kurz die korrekten Verwendung von mathematischen Konstanten, wie beispielsweise die imaginäre Einheit oder die Kreiszahl, gezeigt werden. Diese werden nämlich – anders als physikalische Konstanten, deren Wert durch Messungen ermittelt wird und sich deshalb

grundsätzlich ändern kann – aufrecht und nicht kursiv gesetzt.

$$\hbar = 6.626\,069\,57(29) \times 10^{-34} \text{ J s} \quad (4.15)$$

$$g = (9.81 \pm 0.01) \text{ m/s}^2 \quad (4.16)$$

$$\pi \neq \pi \equiv 3 \quad (4.17)$$

$$i \neq \text{i} \quad (4.18)$$

$$e = 1.602\,176\,57 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (4.19)$$

$$\text{e} \approx 2.718\,28 \quad (4.20)$$

$$(4.21)$$

5. Zitate und Bibliographie

Schon in *De Anima* des großen Aristotle steht geschrieben, dass biblatex das Leben leichter macht [5, p. 12].

Weitere Ausführungen finden sich bei Knuth [4]. Gerade eben zitiertes muss nicht wiederholt werden [4]. Vollzitate, wie sie in Arnold Angenendt. “In Honore Salvatoris – Vom Sinn und Unsinn der Patrozinienkunde.” In: *Revue d’Histoire Ecclésiastique* 97 (2002), pp. 431–456, 791–823 zu finden sind, kann man auch in eine Fußnote packen¹. Das wurde auch schon im Jahre 1974 manchmal so gemacht. In der Bibliographie ist auch eine Quelle angegeben, die gar nicht im Text auftaucht.

¹Arnold Angenendt. “In Honore Salvatoris – Vom Sinn und Unsinn der Patrozinienkunde.” In: *Revue d’Histoire Ecclésiastique* 97 (2002), pp. 431–456, 791–823.

A. List of Zernike polynomials

Table A.1.: Eine mehrseitige Tabelle.

Index j	Zernike polynomial $Z_j(\theta, \rho)$	optical aberration
0	1	piston
1	$\rho \cos \theta$	x tilt
2	$\rho \sin \theta$	y tilt
3	$2\rho^2 - 1$	defocus
4	$\rho^2 \cos 2\theta$	astigmatism in 0°
5	$\rho^2 \sin 2\theta$	astigmatism in 45°
6	$(3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta$	coma in 0°
7	$(3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta$	coma in 90°
8	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	spherical aberration
9	$\rho^3 \cos 3\theta$	trefoil in 0°
10	$\rho^3 \sin 3\theta$	trefoil in 30°
11	$(4\rho^4 - 3\rho^2) \cos 2\theta$	astigmatism (5) in 0°
12	$(4\rho^4 - 3\rho^2) \sin 2\theta$	astigmatism (5) in 45°
13	$(10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho) \cos \theta$	coma (5) in 0°
14	$(10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho) \sin \theta$	coma (5) in 45°
15	$20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1$	spherical aberration (5)
16	$\rho^4 \cos 4\theta$	trefoil (7) in 0°
17	$\rho^4 \sin 4\theta$	trefoil (7) in 22.5°
18	$(5\rho^5 - 4\rho^3) \cos 3\theta$	trefoil (7) in 30°
19	$(5\rho^5 - 4\rho^3) \sin 3\theta$	trefoil (7) in 52.5°
20	$(15\rho^6 - 20\rho^4 + 6\rho^2) \cos 2\theta$	astigmatism (7) in 0°
21	$(15\rho^6 - 20\rho^4 + 6\rho^2) \sin 2\theta$	astigmatism (7) in 45°
22	$(35\rho^7 - 60\rho^5 + 30\rho^3 - 4\rho) \cos \theta$	coma (7) in 0°
23	$(35\rho^7 - 60\rho^5 + 30\rho^3 - 4\rho) \sin \theta$	coma (7) in 90°
24	$70\rho^8 - 140\rho^6 + 90\rho^4 - 20\rho^2 + 1$	spherical aberration (7)
25	$\rho^5 \cos 5\theta$	quintuple trefoil (9) in 0°
26	$\rho^5 \sin 5\theta$	quintuple trefoil (9) in 18°
27	$(6\rho^6 - 5\rho^4) \cos 4\theta$	quadruple trefoil (9) in 0°
28	$(6\rho^6 - 5\rho^4) \sin 4\theta$	quadruple trefoil (9) in 22.5°
29	$(21\rho^7 - 30\rho^5 + 10\rho^3) \cos 3\theta$	quadruple trefoil (9) in 0°
30	$(21\rho^7 - 30\rho^5 + 10\rho^3) \sin 3\theta$	quadruple trefoil (9) in 30°
31	$(56\rho^8 - 105\rho^6 + 60\rho^4 - 10\rho^2)$	astigmatism (9) in 0°
32	$(56\rho^8 - 105\rho^6 + 60\rho^4 - 10\rho^2)$	astigmatism (9) in 45°

Table A.1.: (continued)

Index j	Zernike polynomial $Z_j(\theta, \rho)$	optical aberration
33	$(126\rho^9 - 280\rho^7 + 210\rho^5 - 60\rho^3 + 5\rho) \cos \theta$	coma (9) in 0°
34	$(126\rho^9 - 280\rho^7 + 210\rho^5 - 60\rho^3 + 5\rho) \sin \theta$	coma (9) in 90°
35	$252\rho^{10} - 630\rho^8 + 560\rho^6 - 210\rho^4 + 30\rho^2 - 1$	spherical aberration (9)

Publications

Print

- [1] Arnold Angenendt. "In Honore Salvatoris – Vom Sinn und Unsinn der Patrozinienkunde." In: *Revue d'Histoire Ecclésiastique* 97 (2002), pp. 431–456, 791–823.

Oral and Poster Presentations

Only those presentations are listed where thesis author is first author and presenter.

- [1] Terrence Doody. "Hemingway's Style and Jake's Narration." In: *The Journal of Narrative Technique* 4.3 (1974), pp. 212–225. Excerpt in Roger Matuz, ed. *Contemporary Literary Criticism*. Vol. 61. Detroit: Gale, 1990, pp. 204–208.

Bibliography

- [1] Arnold Angenendt. "In Honore Salvatoris – Vom Sinn und Unsinn der Patrozinienkunde." In: *Revue d'Histoire Ecclésiastique* 97 (2002), pp. 431–456, 791–823.
- [2] Aristotle. *De Anima*. Ed. by Robert Drew Hicks. Cambridge: Cambridge University Press, 1907.
- [3] Terrence Doody. "Hemingway's Style and Jake's Narration." In: *The Journal of Narrative Technique* 4.3 (1974), pp. 212–225. Excerpt in Roger Matuz, ed. *Contemporary Literary Criticism*. Vol. 61. Detroit: Gale, 1990, pp. 204–208.
- [4] Donald E. Knuth. *Computers & Typesetting*. 5 vols. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1984–1986.
- [5] Paul Moraux. "Le *De Anima* dans la tradition grèque. Quelques aspects de l'interprétation du traité, de Theophraste à Themistius." In: *Aristotle on Mind and the Senses*. Proceedings of the Seventh Symposium Aristotelicum. (1975). Ed. by G. E. R. Lloyd and G. E. L. Owen. Cambridge: Cambridge University Press, 1979, pp. 281–324.
- [6] Gary Westfahl. "The True Frontier. Confronting and Avoiding the Realities of Space in American Science Fiction Films." In: *Space and Beyond. The Frontier Theme in Science Fiction*. Ed. by Gary Westfahl. Westport, Conn. and London: Greenwood, 2000, pp. 55–65.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meiner Mutti danken.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe.

Berlin, 7. Februar 2014

Bastian Leykauf