



Christian Jentsch (Autor)

**Konzeption und Aufbau eines Experimentes zur
quantenlimitierten Inertialsensorik mit
lasergekühlten Rubidiumatomen**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/2795>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

Einleitung

Inertialsensorik bedeutet, die auf einen Körper einwirkenden Kräfte wie Beschleunigungen oder Rotationen zu messen, um daraus seine Bewegung eindeutig zu bestimmen. Der Einsatz von Inertialsensoren, z.B. zur Navigation in Flugzeugen und Schiffen, zur Bestimmung der Fahrdynamik in Kraftfahrzeugen [1], der Erdplattentektonik in der Geologie [2] oder der Messung grundlegender physikalischer Effekte wie des Lense-Thirring-Effektes [3, 4], ist äußerst vielfältig.

Der Begriff „Inertial-System“ (von lateinisch *inert* = untätig, träge) wurde um 1885 von L. Lange eingeführt [5]. Er beschreibt Bezugssysteme, in denen sich Körper ohne Einwirkung von Kräften gleichförmig gradlinig bewegen. Wirkt nun auf einen Testkörper eine Trägheitskraft, so bewegt er sich gegenüber einem solchen System gemäß $\text{Kraft} = \text{Masse} \cdot \text{Beschleunigung}$ nach dem 2. Newton'schen Gesetz [6].

Um Messgeräte für Trägheitskräfte zu realisieren, sind viele Möglichkeiten zur Messung von Beschleunigungen und Rotationen denkbar.

Anfangen von einfachen Masse-Feder-Systemen bis hin zu hochempfindlichen piezoresistiven Beschleunigungsaufnehmern [7] gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Systemen zum Nachweis von Beschleunigungen, die den jeweiligen Messanforderungen, z.B. in Bandbreite und Empfindlichkeit, angepasst werden können.

Bei Rotationen hingegen hat sich ein optisches und nicht auf mechanischen Komponenten beruhendes Prinzip durchgesetzt: Das Gyroskop oder auch Laserkreisel [8], benannt nach seinem mechanischen Analogon. Das Prinzip beruht auf der Interferenz von Lichtwellen, die auf ihrem Weg eine geometrische Fläche einschließen. Das gemessene Signal, eine Phasendifferenz bei passiven und eine Frequenzdifferenz bei aktiven Laserinterferometern, ist proportional zur Rotationsgeschwindigkeit des Interferometers [9] und wird durch den Sagnac-Effekt [10, 11] beschrieben.

Bei diesem Effekt kommt es zu einer Phasendifferenz zwischen zwei gleichen Wellen beliebiger Natur, die in entgegengesetztem Umlaufsinn eine Fläche einschließen und schließlich an einem Strahlteiler überlagert werden (siehe Abb. 1.1).

Diese Phasenverschiebung ist proportional zur Differenz der Umlaufzeit der beiden Wellen. Rotiert nun das ganze Interferometer mit der Winkelgeschwindigkeit

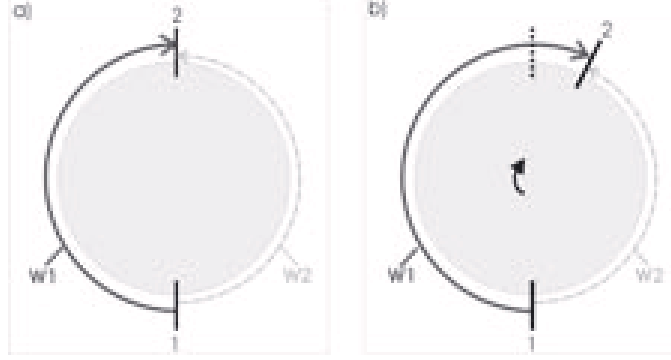


Abbildung 1.1: Prinzip des Sagnac-Effektes: 2 Wellen $W1$ und $W2$ starten bei Strahlteiler 1 und umlaufen in entgegengesetztem Sinn eine eingeschlossene Fläche. Am Treffpunkt Strahlteiler 2, dem Ausgang des Interferometers, tritt dann eine Phasenverschiebung proportional zur Drehgeschwindigkeit $\vec{\Omega}$ auf, falls das Interferometer rotiert (Fall b).

keit $\vec{\Omega}$, so ergibt sich aufgrund der relativistischen Addition von Geschwindigkeiten [12], dass die Phasenverschiebung proportional zur eingeschlossenen Fläche \vec{A} und zu $\vec{\Omega}$ ist. Allgemein folgt für die Phasenverschiebung unter Vernachlässigung höherer relativistischer Korrekturen

$$\varphi_{Sagnac} = \frac{4\pi E}{hc^2} \vec{\Omega} \cdot \vec{A}, \quad (1.1)$$

wobei E die Gesamtenergie der Welle, c die Lichtgeschwindigkeit und h das Planck'sche Wirkungsquantum bezeichnet [13].

Für verschiedene Arten von Wellen kann somit die Energie E bestimmt und damit die zu erwartende Sagnac-Phasenverschiebung berechnet werden. Im Falle von Licht der Wellenlänge λ ergibt sich mit $E = hc/\lambda$

$$\varphi_{Sagnac,Licht} = \frac{4\pi}{c\lambda} \vec{\Omega} \cdot \vec{A}, \quad (1.2)$$

wohingegen die Phase bei Materiewellen von Atomen mit Masse m und somit Energie $E = mc^2$ gegeben ist durch

$$\varphi_{Sagnac,Materie} = \frac{4\pi m}{h} \vec{\Omega} \cdot \vec{A}. \quad (1.3)$$

Das Verhältnis dieser beiden Phasenverschiebungen von Materie und sichtbarem Licht ergibt sich mit der Rückstoßgeschwindigkeit $v_{Rückstoß} = h/(m \cdot \lambda)$ der Atome und unter der Annahme gleicher Flächen zu

$$\frac{\varphi_{Sagnac,Materie}}{\varphi_{Sagnac,Licht}} = \frac{m\lambda c}{h} = \frac{c}{v_{Rückstoß}} \approx 5 \cdot 10^{10} \quad (1.4)$$

und hebt so das große Potential von Materiewellen hervor [14].

Die Vorstellung, Materie als Welle zu beschreiben, wurde bereits im Jahre 1924 von de Broglie eingeführt [15]. Analog zu den aus der Optik bekannten Größen des Impulses $p_{\text{Licht}} = h/\lambda$ für Photonen der Wellenlänge λ [16] ordnete er Teilchen mit Masse m und Geschwindigkeit v , also dem Impuls $p_{\text{Materie}} = mv$, die Wellenlänge $\lambda_{dB} = h/mv$ zu. Damit konnte anschaulich die Bohr-Sommerfeld'sche Quantisierungsbedingung für Elektronenbahnen um einen Atomkern gedeutet werden. Nicht zuletzt war dies Teil der Grundlage für die Entwicklung der Quantenmechanik, in der Teilchen auch Wellencharakter zugewiesen wird, indem ihre Eigenschaften mit sogenannten Wellenfunktionen beschrieben werden [17].

Nachdem einige Jahre später in einer Vielzahl von Experimenten mit Elektronen oder Neutronen Interferenzphänomene von Materie nachgewiesen wurden [18, 19], ist es heute sogar möglich, makroskopische Moleküle wie C_{60} [20] oder C_{70} [21] interferieren zu lassen. Für die Metrologie haben insbesondere Interferometer basierend auf Ensembles mit neutralen, kalten Atomen seit vielen Jahren ihre hohe Leistungsfähigkeit demonstriert [22–24].

Möglich wurde dies durch die rasante Entwicklung von Laserkühlverfahren [25–27] und die damit einhergehende präzise Kontrolle über die inneren, aber auch die äußeren Freiheitsgrade von Atomen. Daraus ist an der Nahtstelle von Atomphysik und Quantenoptik das Gebiet der Atomoptik entstanden, das sich mit der Entwicklung von Elementen zur gezielten Manipulation von Materiewellen in Form von Strahlteilern, Spiegeln oder auch dispersiven Elementen analog zu den entsprechenden Komponenten in der Optik beschäftigt.

Für den Einsatz als Strahlteiler bieten Strukturen aus stehenden oder laufenden elektromagnetischen Wellen den Vorteil, aufgrund der Atom-Licht-Wechselwirkung gezielte und wohldefinierte Impulse und Phasen auf die atomare Wellenfunktion zu übertragen. Zwar können prinzipiell auch mikrostrukturierte Gitter für diese Zwecke eingesetzt werden, jedoch sind intrinsische Nachteile daran die mechanische Empfindlichkeit mit zunehmender Verringerung der Gitterkonstanten sowie die Zerstörung durch Ablagerungen der Atome auf deren Oberfläche.

Besonders die auf stimulierten optischen Raman-Übergängen beruhenden Atominterferometer [28–30] haben sich in den letzten etwa 15 Jahren zu präzisen Messinstrumenten für Beschleunigungen, Rotationen und viele andere Effekte entwickelt. Beeindruckende Auflösungen im Bereich von $2,3 \cdot 10^{-8} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$ bei Gravimetern zur Messung der lokalen Erdbeschleunigung g [24, 31], von $4 \cdot 10^{-9} \text{ g}/\text{m}\sqrt{\text{Hz}}$ bei differentiellen Gravitationsgradiometern [32] sowie von $6 \cdot 10^{-10} \text{ rad}/\text{s}\sqrt{\text{Hz}}$ für Rotationen [33] verdeutlichen die Leistungsfähigkeit von solchen Interferometern als Inertialsensoren.

Neben den genannten Experimenten, die in den USA durchgeführt worden sind, gibt es auch in Europa seit einigen Jahren verstärkte Aktivitäten auf dem Gebiet der Inertialsensorik mit lasergekühlten Atomen zu verzeichnen. Nachdem schon 1991 von Riehle et al. die Messung von Rotationen mithilfe des Sagnac-Effektes an Kalzium-Atomen demonstriert worden ist [34], befinden sich zur Zeit ein Gravimeter am BNM-SYRTE (Systèmes de Référence Temps-

Espaces) in Paris [35] und ein Gravitationsgradiometer zur Messung der Gravitationskonstanten G am LENS (European Laboratory for Non-linear Spectroscopy) in Florenz [36] im Aufbau. Außerdem gibt es ein Experiment zur Sagnac-Interferometrie, also primär zur Messung von Rotationen, am SYRTE (GOM: Gyromètre d'Ondes de Matières) [37], das mit zwei Quellen kalter Cäsiumatome betrieben wird. Die Atome driften dabei entlang einer steilen Parabelbahn ähnlich einer Fontäne durch die Interferometerzone. Hier konnten im Herbst 2003 bereits die ersten atomaren Interferenzen nachgewiesen werden [38].

Seit dem Jahr 2000 befindet sich in Hannover ebenfalls ein Sagnac-Interferometer (CASI: Cold Atom Sagnac Interferometer) im Aufbau. Jedoch beruht das Konzept von CASI darauf, in einem modular und somit flexibel gehaltenen Aufbau verschiedene Strategien zur differentiellen Interferometrie zweier lasergekühlter Ensembles von Rubidiumatomen zu studieren und die physikalischen Grenzen bei der Messung von Materiewelleninterferenzen zu untersuchen. Denkbar sind z.B. gepulste Sequenzen von Teilchensembles mit unterschiedlichen Teilchengeschwindigkeiten als auch kontinuierliche Messungen an einem Atomstrahl. Zudem soll dieses Experiment transportabel aufgebaut sein, um ähnlich wie bei Atomuhren einen Vergleich beispielsweise mit dem französischen Sensor durchzuführen.

Um solche Sensoren basierend auf lasergekühlten Ensembles zu realisieren, ist das präzise Zusammenspiel von mehreren hochspeziellen Komponenten nötig. Zunächst muss in einer Quelleneinheit eine möglichst große Anzahl von kalten Atomen bereitgestellt werden. Danach werden diese Atome durch Verstärken von Laserlicht kontrolliert beschleunigt, so dass sie sich anschließend entlang einer wohldefinierten Trajektorie in Form einer flachen Parabelbahn bewegen. Nach der Präparation in einen geeigneten internen Zustand durchqueren diese Ensembles in mehreren Wechselwirkungszonen die eingestrahelten Lichtfelder eines Raman-Lasersystems, die als atomoptische Strahlteiler und Spiegel fungieren. Schließlich werden die Interferenzsignale zustandsselektiv in einer Detektionszone abgefragt und der Messzyklus kann von neuem beginnen.

Das einer solchen Messung überlagerte Rauschen setzt sich aus einer Reihe von technischen Rauschbeiträgen wie Phasenrauschen der Raman-Laser, Detektorrauschen der Fotodiode usw., sowie prinzipiellen physikalischen Rauschgrenzen zusammen, die insbesondere von der eingesetzten Teilchenanzahl im Interferometer abhängen. Sofern das Rauschen nur durch diese prinzipiellen Grenzen bestimmt wird, also die technischen Rauschquellen vernachlässigbar sind, bezeichnet man einen solchen Sensor auch als limitiert durch das Standard-Quantenlimit.

Bisher gibt es jedoch weltweit nur wenige Sensoren, die dieses fundamentale Limit erreicht haben oder nahezu erreichen, z.B. die Mikrowellen-Atomuhr am BNM-SYRTE [39]. Atomuhren können ebenfalls als Atominterferometer interpretiert werden, die insbesondere sensitiv auf Frequenzabweichungen der strahlteilernden elektromagnetischen Wellen von der atomaren Resonanz sind [40].

Ziel dieser Arbeit war es, am Institut für Quantenoptik ein Konzept für einen hochgenauen Sensor für Inertialkräfte basierend auf lasergekühlten Atomen zu entwickeln und ein solches Experiment aufzubauen. Die Quantenrauschgrenzen

eines solchen Interferometers sollen damit erschlossen und untersucht werden.

In **Kapitel 2** wird zunächst einführend die Wechselwirkung von Atomen mit Licht betrachtet. Dort wird mit einem Formalismus nach Bordé die allgemeine Phasenverschiebung in einem Atominterferometer abgeleitet und auf den Fall dreier räumlich getrennter Wechselwirkungszonen wie bei CASI angewendet.

Zur Bestimmung von Rauschen und Rauschgrenzen wird in **Kapitel 3** die Transferfunktion für charakteristische Zeitkonstanten eines Atominterferometers hergeleitet. Zudem werden das Standardquantenlimit sowie mögliche darüber hinaus gehende Verbesserungen durch Verschränkung oder Quetschen von atomaren Ensembles diskutiert.

Um ein Experiment zur Inertialsensorik aufzubauen, ist es zunächst nötig, ein Konzept zu erarbeiten, das den gestellten Anforderungen gerecht wird. In **Kapitel 4** wird dieses Konzept für CASI vorgestellt und die erforderlichen Komponenten erläutert.

Die Umsetzung dieses Konzeptes im Labor sowie der aktuelle Stand des Experimentes werden in **Kapitel 5** gezeigt. In **Kapitel 6** folgen die Ergebnisse der als Vorarbeiten durchgeführten Charakterisierung der intensiven Rubidium-Atomquellen.

Ein Vorschlag für den Einsatz von Atominterferometrie im Weltraum wird in **Kapitel 7** erläutert. Gerade Satellitenplattformen bieten gegenüber Laboren auf der Erde immense Vorteile, wie z.B. stark reduziertes seismisches Rauschen, und ermöglichen so präzise Messungen, wie sie für die HYPER-Mission vorgeschlagen wurden [3, 4].

Im **Ausblick** werden schließlich der momentane Stand des CASI-Experiments zusammengefasst und weitere Schritte auf dem Weg zur Realisierung eines quantenlimitierten Sensors aufgeführt. Des Weiteren werden Konzepte für mögliche zukünftige Hybrid-Sagnac-Sensoren bestehend aus geschickten Kombinationen von Licht- und Atominterferometern vorgestellt.