

Atominterferometrische Trägheitssensoren

Trägheitssensoren (Inertialsensoren) dienen der Messung von Beschleunigungen und Drehungen zur Bestimmung der Bewegung mobiler Plattformen. Als Komponenten von Navigationssystemen ermöglichen sie – zu einem gewissen Grad – eine Unabhängigkeit von Satellitennavigationssystemen, deren Signale nicht überall empfangbar sind bzw. auch absichtlich gestört werden können. Äußerst genaue und langzeitstabile Trägheitsnavigationssysteme sind im Prinzip auf der Grundlage der Atominterferometrie realisierbar. Allerdings ist noch beträchtliche Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten, bis sich derartige auf quantenphysikalischen Phänomenen basierende Systeme in der Praxis einsetzen lassen.

Aus heutiger Sicht werden langfristig atominterferometrische Trägheitsnavigationssysteme für möglich gehalten, die im Vergleich zu den besten heute verfügbaren Trägheitsnavigationssystemen etwa hundertfach geringere Positionsdriften (mit der Zeit anwachsende Ungenauigkeiten der Positionsbestimmung) aufweisen. Zusätzlich haben sie das Potenzial, in Zukunft bei gleicher oder sogar höherer Genauigkeit deutlich kostengünstiger herstellbar zu sein als heutige Trägheitssensoren für höchste militärische Ansprüche – Schätzungen bewegen sich im Bereich von zehn- bis hundertfach niedrigeren Kosten.

Atominterferometrische Trägheitssensoren beruhen zum Teil auf dem gleichen Effekt wie optische Interferometer, die heute üblicherweise in Form von optischen Gyroskopen, wie z. B. Laser- oder Faserkreisel, als Drehratensensoren eingesetzt werden. Das Grundprinzip eines optischen Interferometers kann wie folgt beschrieben werden: Ein Lichtstrahl wird in zwei Teilstrahlen aufgespalten, die man mit einer entsprechenden Optik unterschiedliche Wege zurücklegen lässt, bevor sie wieder zur Überlagerung (Interferenz) gebracht werden. Drehungen des Interferometers verändern dabei die Längen der tatsächlich zurückgelegten Wege und lassen sich aus dem daraus resultierenden

Interferenzsignal ableiten – dies ist auch bekannt als Sagnac-Effekt.

Unter bestimmten Bedingungen können sich bewegende Materieteilchen, wie Atome oder Elektronen, wie Wellen verhalten und als Materiewellen beschrieben werden. Auf diese Weise kann der Sagnac-Effekt auch mit Atomstrahlen zur Messung von Drehraten genutzt werden. Entsprechende Atominterferometer können deutlich empfindlicher als optische Interferometer sein, da Materiewellen, vereinfacht betrachtet, eine deutlich geringere Wellenlänge als Lichtwellen besitzen. Die höhere Empfindlichkeit ist auch verknüpft mit der Tatsache, dass Atome eine Masse besitzen, während Lichtteilchen (Photonen) masselos sind. Dieser Unterschied ist außerdem dafür verantwortlich, dass mit Atominterferometern nicht nur Drehraten, sondern auch Beschleunigungs- und Gravitationskräfte gemessen werden können, weil diese Kräfte die Bewegung der Atome direkt beeinflussen.

Heute sind atominterferometrische Trägheitssensoren bereits als Laborsysteme realisiert. Die hier üblichste technische Umsetzung stellen die sogenannten Raman-Interferometer dar. Als Atomquelle dient dabei in der Regel eine Art Ofen, in dem ein geeignetes reines Metall verdampft wird. Atome aus diesem Dampf werden dann in der Regel in einer sogenannten magneto-optischen Falle mithilfe von Magnetfeldern und Laserstrahlen zwischengespeichert und auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt (-273,15 °C) abgekühlt. Daraus wird dann ein Atomstrahl ausgeleitet, der mit präzise definierten Laserpulsen in Teilstrahlen aufgespalten, innerhalb des Interferometers gelenkt und wieder zusammengeführt wird. Raman-Interferometer mit zwei gegenläufigen Atomstrahlen können zur Messung von Beschleunigungen entlang aller drei Raumrichtungen und Drehungen um alle drei Raumachsen verwendet werden.

Entsprechende Trägheitsnavigationssysteme könnten aufgrund ihrer geringen Positionsdrift auch über längere Zeiträume und ohne Positionskorrektur durch

ein Satellitennavigationssystem zuverlässig funktionieren. Anwendungsbeispiele sind die Navigation von Fußgängern oder Fahrzeugen im Inneren von Gebäuden (Indoor-Navigation), die Navigation in engen Straßenschluchten oder von Unterwasserfahrzeugen. Im militärischen Bereich würden atominterferometrische Trägheitsnavigationssysteme einen regelrechten Game Changer für die Navigation von U-Booten während langandauernder Tauchfahrten darstellen. Ausreichend kompakte atominterferometrische Trägheitsnavigationssysteme könnten in Zukunft aber auch zur Navigation von bemannten Flugzeugen sowie von Drohnen, Langstreckenraketen oder Marschflugkörpern eingesetzt werden, um bei technischem Ausfall oder mutwilliger Störung des GPS-Empfangs eine zuverlässige Positionsbestimmung zu gewährleisten. Die wesentlichste Herausforderung bei der Entwicklung atominterferometrischer Trägheitssensoren besteht heute darin, das Volumen und das Gewicht der Systeme deutlich zu verringern – ausgehend von den heutigen Laborsystemen, die inklusive aller Komponenten (wie Laserquellen, Atomquellen, Elektronik, optischen Aufbauten und Vakuumkomponenten) in der Regel mehrere Kubikmeter umfassen. Die dabei zu entwickelnden kompakten Systeme müssen darüber hinaus robust genug sein, um auf mobilen Plattformen unter unterschiedlichsten realistischen Einsatzbedingungen zu funktionieren – im Gegensatz zu heute typischen Atominterferometern, die unter kontrollierten Laborbedingungen betrieben werden müssen. Bis einsatzreife atominterferometrische Trägheitssensoren produziert werden können, bedarf es daher noch Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in beträchtlichem Umfang. Man geht jedoch davon aus, dass sich die technischen Hürden für die Einsatztauglichkeit atominterferometrischer Trägheitssensoren lösen ließen, wenn die dazu notwendigen finanziellen Mittel zur Verfügung stünden. Nach Meinung von Fachleuten könnten erste Systeme in fünf bis zehn Jahren zum Einsatz kommen.

Dr. David Offenber