

Automatisierung eines Low-Cost-360°-Reflektors für die genaue Positionierung einer 3D-Trajektorie

Low-cost 360° Reflector Automation for High Accuracy 3D Trajectory Measurement

Friedrich Keller, Steffen Kagerah, Harald Sternberg

Einfache Mikrocontroller wie die Arduino-Boards stellen seit einigen Jahren eine kostengünstige und einfache Plattform zur Programmierung von individuellen Anwendungen dar. So können mit wenig Aufwand ganz neue Applikationen geschaffen werden. Es wird dadurch möglich, Low-Cost-Sensorik wie MEMS-Inertialsensoren einfach in eigenen Applikationen zu nutzen. In diesem Beitrag soll ein aktiver drehbarer Reflektor auf dieser Basis vorgestellt werden. Besonderes Augenmerk liegt auf dem Schaltungsentwurf und der Programmierung, die bewusst so detailliert gehalten sind, dass ein Einstieg in die Anwendung von Arduino für vermessungstechnische Fragestellungen leicht möglich ist. Der zweite Teil des Beitrags beschäftigt sich mit der Untersuchung der Leistungsfähigkeit des drehbaren Reflektors. Dabei wird er mit handelsüblichen 360°-Reflektoren in verschiedenen Szenarien verglichen.

Schlüsselwörter: Inertialsensorik, Low-Cost, Arduino, 360°-Reflektor, Kinematik

Since several years Arduinos, as well as other microcontrollers, provide an inexpensive and simple platform for micro-processor programming in various applications. With little effort it is possible to create entirely new applications. Thus, these low-cost sensors as MEMS inertial sensors can be used easily for different scenarios. In this article an active kinematic reflector utilizing Arduino and MEMS sensors is presented. Particular attention is given to the circuit design and programming to give an introduction of using Arduino for surveying tasks. The second part of the article deals with a performance study of the kinematic reflector, which is evaluated against conventional 360° reflectors during standstill and in motion.

Keywords: Inertial sensors, low-cost, Arduino, 360° reflector, kinematic

1 EINLEITUNG

Die Positionsbestimmung von Objekten, Fahrzeugen oder Personen gehört zum Aufgabengebiet der Ingenieurgeodäsie, da die Positionierung seit jeher eine grundlegende Aufgabe im Rahmen der Absteckung und Aufnahme darstellt. Im Fall von Fahrzeugen ist es meistens erforderlich, von kinematischer Positionierung oder Positionsbestimmung zu sprechen. Zum Beispiel bei einer Baumaschine kann nicht nur die Frage nach dem Wo, sondern auch das Wann von entscheidender Bedeutung sein, vor allem im Zusammenspiel von mehreren Sensoren bei Echtzeitanwendungen. Um den heutigen Anforderungen auf Baustellen gerecht zu werden, ist es das

Ziel, immer mehr Prozesse durch Regelkreise auf Baumaschinen zu automatisieren und effizienter zu machen. Somit entwickeln sich die Steuersysteme von Baumaschinen zu Multisensorsystemen, exemplarisch seien hier Motorgrader, Bagger oder Asphaltfertiger genannt (vgl. /Stempfhuber & Ingensand 2008/, /Schwieger & Sternberg 2014/.

Diese Multisensorsysteme oder -steuerungen bedienen sich dabei auch häufig geodätischer Sensoren (z. B. GNSS oder Totalstationen) zur Bestimmung der Position und der weiteren Freiheitsgrade in einem übergeordneten Koordinatensystem. Gerade beim Ein-

satz von Totalstationen spielt die Wahl des Ziels eine entscheidende Rolle, so können häufig normale Rundprismen nicht eingesetzt werden, da diese durch die Bewegung des Fahrzeugs verdeckt oder weggedreht werden können. Aus diesem Grund bieten die Hersteller von Totalstationen sogenannte 360°-Reflektoren an; im Falle des Leica Systems z. B. das GRZ 4. Die 3D-Anzielgenauigkeit wird mit 5 mm angegeben /Leica 2014a/. Die Genauigkeit dieser Reflektoren lässt sich steigern, indem immer eine markierte Seite angezielt wird (2 mm), die Untersuchungen von /Favre & Hennes 2000/ zeigen, dass diese Anzielgenauigkeit in Lage und Höhe sich deutlich unterscheidet. Die Lage kann besser erfasst werden als die Höhe. Leica hat zur besseren Handhabung einen weiteren Reflektor mit höherer Genauigkeit im Programm, das GRZ 122. Dieser wird mit 2 mm 3D-Anzielgenauigkeit für jede Seite spezifiziert /Leica 2014b/. Auch die Reflektoren Mt1000 und S2002 von Trimble sind vom Genauigkeitsniveau im Bereich des GRZ 122 anzusiedeln. Wissenschaftliche Untersuchungen zum Verhalten wurden z. B. von /Stempfhuber & Kirschner 2008/ durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Abweichung vor allem in der Höhenkomponente bis zu 3 mm (GRZ 4) betragen können (Abb. 6). Sollen Objekte hochgenau kinematisch erfasst werden, muss dieser Unsicherheit Rechnung getragen werden.

Hier wird die Möglichkeit gezeigt, wie es mit der Low-Cost-Hardware-Entwicklungsumgebung Arduino möglich ist, auch Präzisionsreflektoren, wie den Leica GPH1P oder einen Corner-Cube-Reflektor (CCR) (Leica Red-Ring Reflector), zur Positionierung einzusetzen und dabei kostengünstiger zu sein als ein guter 360°-Reflektor. Der Arduino bildet dabei die zentrale Steuereinheit des Systems. An ihn werden eine Low-Cost-Inertialmesseinheit zur Winkelbestimmung, ein Schrittmotortreiber und eine RS232-Schnittstelle angeschlossen. Der Arduino hat die Aufgabe, aus den gewonnenen Messdaten (Inertialsensorik) und ggf. über zusätzlich aus anderen Sensoren über die RS232-Schnittstelle erhaltene Winkelmessungen die aktuelle Orientierung zu errechnen. Mit dieser Information regelt er den Schrittmotor und den darauf befindlichen Reflektor, sodass die Anfangsausrichtung gehalten wird.

Ziel dieses Beitrags ist es, den Bekanntheitsgrad der Arduino-Technologie im Vermessungswesen zu steigern und die Einsatzmöglichkeiten in der Geodäsie aufzuzeigen /Keller & Willemsen 2014/; weitere Beispiele für diese Technologie finden sich in /Depping 2013/, /Stempfhuber 2014/. Dazu wird detailliert auf die Hard- und Software des Arduino eingegangen. Daran anschließend werden verschiedene Testszenarien aufgezeigt, in denen sich der Reflektor beweisen musste.

2 VORARBEITEN UND IDEE

Die Grundidee entstand auf der Tagung „3rd International Conference on Machine Control & Guidance“ in Stuttgart (27.–29. März 2012). Dort stellten /Horst & von Gösseln 2012/ die Möglichkeit vor, Reflektoren in geodätischen Netzen automatisiert auf das Tachymeter auszurichten. Dabei wird der klassische 360°-Reflektor durch einen normalen Reflektor ersetzt. Dieser Reflektor ist auf einem Schrittmotor befestigt und kann somit gedreht werden. Der Schrittmotor ist wiederum mit einem Arduino verbunden, der

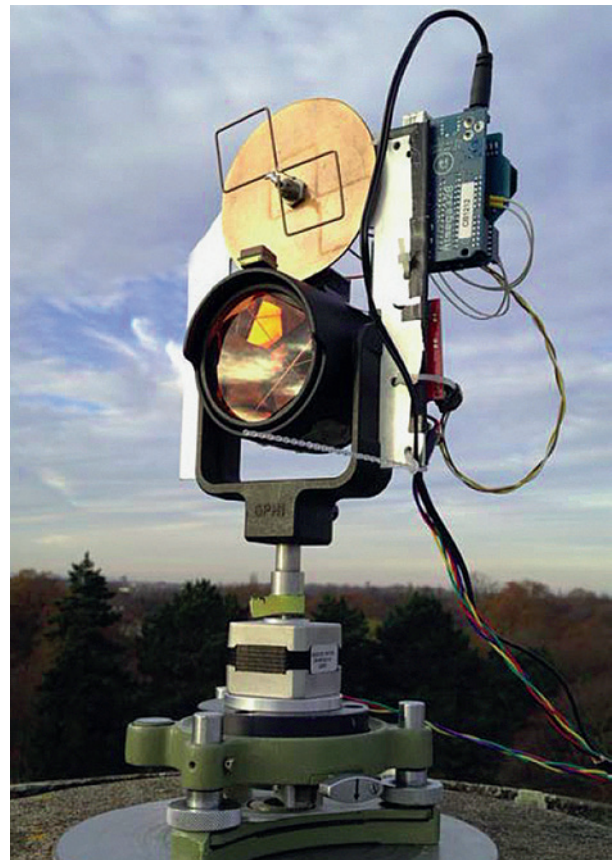


Abb. 1 | Aufbau des selbstdrehenden Reflektors der LU Hannover /Horst & von Gösseln 2012/

die Steuerung des Motors übernimmt. Zusätzlich ist der Arduino mit einem Funkübertragungsmodul X-Bee ausgestattet. Dieses erlaubt die Ansteuerung des Arduino auch aus größerer Distanz. Die eigentliche Ausrichtung des Reflektors kann auch durch einen Magnetkompass erfolgen.

In dem vorgestellten Projekt konnten durch den Einsatz eines einzigen selbst gebauten Reflektors 5 % Zeit und 3,5 % der Kosten eingespart werden. Durch eine angeregte Diskussion entstand die Idee, diese Applikation auch für kinematische Applikationen verfügbar zu machen.

Die HCU-Hamburg entwickelt seit 2010 ein Multi-Sensor-System für Applikationen im In- und Outdoorbereich /Keller et al. 2014/, /Sternberg et al. 2013/. Zur Kontrolle von Sensoren und Filtern ist es immer wieder nötig, hochpräzise Messsysteme wie Lasertracker einzusetzen. Diese Systeme haben mit dem beschränkten Öffnungswinkel des Ziels (CCR) zu kämpfen. In /Beetz 2012/ wird ein Messaufbau gezeigt, der für einen Lasertracker diese Problematik umgeht, indem der Lasertracker von oben auf das Objekt schaut. Die Totalstation zielt seitlich auf den 360°-Reflektor. Somit können die Messungen im Rahmen der Genauigkeit des Ziels und der Geräte direkt verglichen werden. Auch /Beetz 2012/ spricht die Problematik der Genauigkeit des 360°-Reflektors an und kalibriert diesen durch die bekannte Ausrichtung im Messaufbau (Abb. 2). Die Problemstellung der Beobachtung einer präzisen Referenztrajektorie durch ein polares Messsystem führte dazu, einen kinematischen 360°-Reflektor für das HCU-System zu entwickeln.

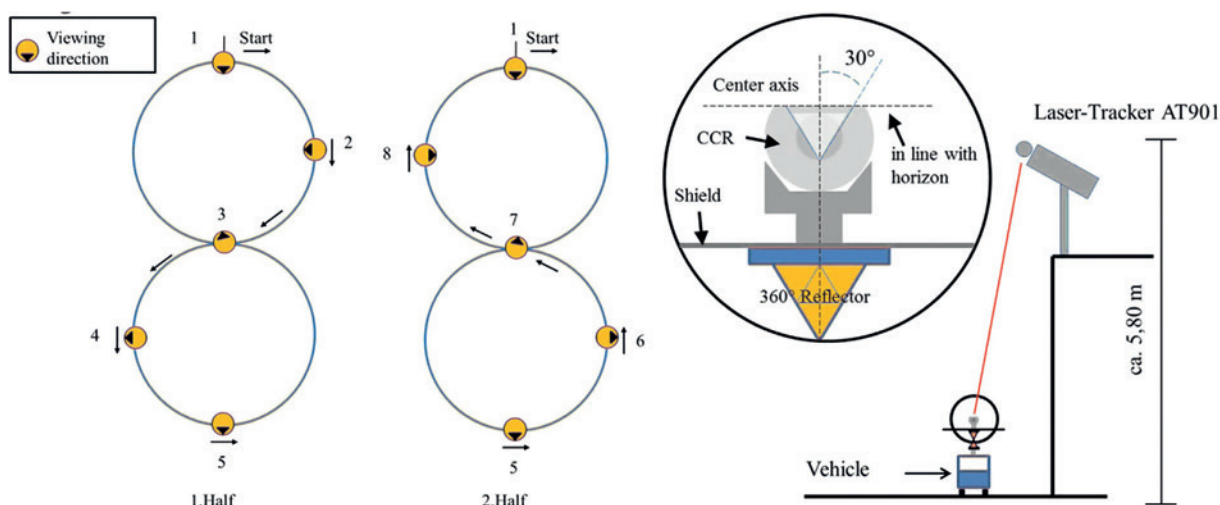


Abb. 2 | Ausrichtung des 360°-Reflektors während einer Fahrt und der Messaufbau zur Kontrolle mittels Lasertracker /Beetz 2012/

3 GRUNDLAGEN

Der drehbare Reflektor kombiniert verschiedene Low-Cost-Technologien: als Mikroprozessor einen Arduino Uno, als Messsensor ein Inertialmesssystem und als Aktor einen Schrittmotor. Die wichtigsten Grundlagen dieser Technologien sollen im Folgenden erläutert werden.

3.1 Arduino

Die Arduino-Plattform ist eine Physical-Computing-Plattform, bestehend aus einer Kombination von Soft- und Hardwarekomponenten. Die gesamte Plattform steht als Open Source zur Verfügung, somit könnte die Hardware, sofern die Möglichkeit besteht, auch selbst produziert werden. Seit den ersten Entwicklungen im Jahr 2005 hält die Arduino-Plattform immer größeren Einzug in verschiedenste Einsatzbereiche. Grund dafür ist vor allem die leichte und programmunabhängige Entwicklungssprache „Processing“. Heute gibt es eine Vielzahl verschiedener Arduino-Boards, welche – abgestimmt auf ihren Einsatzzweck – mit verschiedenen Prozessoren, Speichern und Anschlüssen ausgestattet sind. Bei dem eingesetzten Arduino handelt es sich um einen Arduino Uno R3 mit 14 digitalen und sechs analogen Ein-/Ausgängen. Es besitzt einen 32-kByte-Flash-Speicher und einen 16-MHz-Prozessor (Abb. 3).

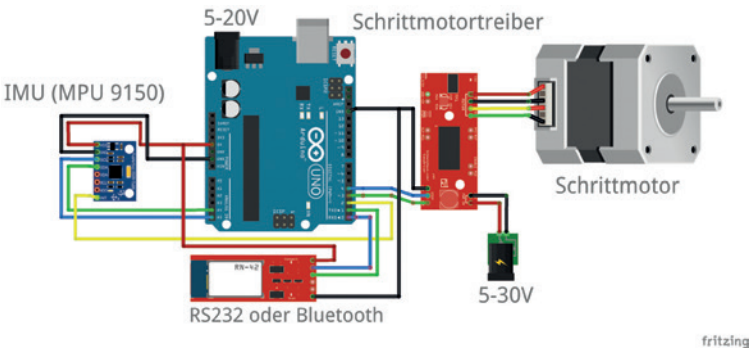


Abb. 3 | Aufbau der Schaltung, Anschlusschema für die Breakoutboards (BOB) werden z.B. bei Sparkfun (<http://www.sparkfun.com>) kostenlos bereitgestellt

3.2 Sensorik

Um die Drehrichtung zum Messgerät bestimmen zu können, wurde ein sogenannter 9-Achsen-MEMS-Sensor verwendet. Diese neun Achsen sind beim eingesetzten MPU-9150-Sensor jeweils die drei Achsen der Drehraten-, der Beschleunigungs- und der Magnetfeldsensoren. Die Achsen stehen dabei orthogonal zueinander und ermöglichen so eine Richtungsbestimmung unabhängig von der Einbaulage auf dem System. Des Weiteren verfügt der Sensor über einen eigenen Prozessor, den „Digital Motion Processor (DMP)“, welcher die Drehraten- und Beschleunigungsdaten bereits vorverarbeitet. Als Werte können somit bereits fusionierte und horizontalisierte Messdaten an den Arduino gegeben werden /Invensense 2014/. Die Fusion bezeichnet dabei die Zusammenführung der abgeleiteten Winkelmessungen des Beschleunigungsmessers und der Winkelgeschwindigkeiten des Gyroskops. Diese Daten beziehen sich dann auf ein Koordinatensystem, das anhand der Erdbeschleunigung ausgerichtet und somit horizontalisiert ist.

3.3 Schrittmotoren

Im Gegensatz zu handelsüblichen Elektromotoren sind Schrittmotoren dazu in der Lage, anstatt kontinuierlich, nur einen bestimmten Winkel zu drehen. Diese Schritte können vielfach hintereinander in die gleiche Richtung gefahren werden, sodass beliebige Positionen erreicht werden können. Diese Winkelstellung kann der Schrittmotor sogar unter einer bestimmten Last halten. Bei dem eingesetzten Mercury-Schrittmotor handelt es sich um einen bipolaren Motor mit 200 Schritten pro Umdrehung. Damit kann ein minimaler Winkel von 2 gon beschrieben werden. Das maximale Drehmoment von 0,23 Nm ist für die axiale Drehung eines Reflektors ausreichend. Bei einem normalen Elektromotor kann die Drehzahl meist durch einfache Strom- oder Spannungsregelung gesteuert werden. Dies ist bei Schrittmotoren nicht möglich.

toren nicht mehr der Fall, für die Steuerung werden sogenannte Treiber/Treiberkarten, komplexe Schaltungen, eingesetzt, die die Strom- und Spannungsregelung für die Spulen im Motor regeln. Ebenso nimmt der Treiber die Informationen über Richtung und Schrittzahl auf /Roboternetz 2014/.

4 Hardwareaufbau

Als Hardwarekomponenten werden, neben Adaptern, vor allem die in Tab. 1 aufgeführten Komponenten verwendet. Zentraler Punkt ist der Arduino. An ihn sind sowohl der Schrittmotortreiber als auch der Inertialsensor MPU 9150, nach dem in Abb. 3 gezeigten Schema, angeschlossen. Der Schaltungsaufbau ist detailliert dargestellt, um die Einfachheit der Idee hinter dem Arduino aufzuzeigen.

Die MPU 9150 kann sowohl als einzelner Chip oder auf einem Breakoutboard (BOB) erworben werden. Dabei ist die BOB-Version zu bevorzugen, da hier alle nötigen Anschlüsse schon vorkonfiguriert worden sind. Zudem sind solche SMD-Bauteile nahezu unmöglich selbst zu löten, sofern keine Kenntnisse über das Reflow-Löten vorliegen. Das BOB ist über fünf Leitungen mit dem Mikroprozessor verbunden, zwei zur 5-Volt-Stromversorgung (rot, schwarz), zwei zur Datenübertragung (blau, grün) und eine Leitung zur Startinitialisierung des Sensors (gelb). Der Sensor arbeitet dabei über den I²C-Bus, dieser ist am Arduino auf den Analogleitungen A4 (SDA Data line) und A5 (SCL Clock line) zu finden. Zur Initialisierung wird die Digitalleitung D2 genutzt, da hier lediglich HIGH oder LOW übertragen werden muss.

Der Schrittmotortreiber wird über drei Leitungen mit dem Arduino und über zwei Leitungen direkt mit der Stromquelle verbunden. Die Leitungen zum Arduino dienen der Steuerung des Motors, dabei wird über eine Leitung (D3) die Schrittzahl und über die andere (D4) die Richtung des Motors gesteuert, die dritte dient als Masse. Dabei wird die Richtung durch HIGH und LOW des Pins gesteuert.

Bauteil	Preis	Bezugsquelle
Arduino Uno	10 € bis 20 €	http://www.arduino.cc
IMU Invensense MPU 9150	10 €	http://www.sparkfun.com
Schrittmotor-Treiber	12 €	http://www.sparkfun.com
Schrittmotor	11 €	http://www.sparkfun.com
Kleinteile	20 €	–
Akku	15 €	http://www.conrad.de
opt. Bluetooth-Modul (10 m)	(28 €)	http://www.sparkfun.com
Summe	78 € bis 88 €	

Tab. 1 | Hardwarebauteile und Kosten

Ein Flankenwechsel zwischen HIGH und LOW auf der Steuerleitung wird vom Motortreiber als Schritt gewertet.

An den Arduino wird zusätzlich noch ein Sub-D9-Stecker für eine RS232-Schnittstelle angeschlossen. Dabei werden einfach die Pins D0 und D1, die schon mit einer seriellen Schnittstelle vorbelegt sind, verwendet. Als Option hat sich in den Untersuchungen gezeigt, dass es in einigen Applikationen sinnvoll ist, die RS232-Schnittstelle zusätzlich als Bluetooth-Verbindung auszuführen. Dazu wird ein handelsüblicher Bluetooth-Chip an die serielle Schnittstelle angeschlossen; bei Verwendung eines Sparkfun-Blue-Silver-Moduls kann eine Strecke von 10 m überbrückt werden, bei Sparkfun-Blue-Gold-Modulen bis zu 100 m. Dies eröffnet noch ganz andere Einsatzmöglichkeiten, da wiederum die Daten der Totalstation an den Arduino übermittelt werden können. Allerdings sind diese Module auch eine der teuersten Komponenten mit 30 \$ (Silver) bis 40 \$ (Gold).

Ein weiterer wichtiger Punkt ist neben der Verkabelung die Stromversorgung. Sowohl der Schrittmotortreiber (5 V–30 V) als auch der Arduino (5 V–20 V) selbst verfügen über einen internen Spannungswandler, sodass es möglich ist, beide mit einer Spannung zwischen 5 V und 20 V zu betreiben. Dies ist in verschiedenen Anwendungsszenarien interessant, da einfache Akkupacks oder auch die Bordspannung von Fahrzeugen verwendet werden kann. Bei Bordspannungssystemen von 24 V muss ein entsprechender Lastwiderstand in Reihe geschaltet werden. Dies führt dazu, dass eines der Hauptargumente, die nötige Stromversorgung, die gegen den Einsatz von „Aktiven Zielen“ sprechen, etwas abgemildert werden kann. Wenn der Einsatz auf Baumaschinen und anderen Plattformen im Vordergrund steht, ist dieser Punkt sogar zu vernachlässigen, da davon auszugehen ist, dass eine Spannungsquelle immer zur Verfügung steht, da auch alle anderen Systeme mit Spannung versorgt werden müssen.

Als Low-Cost-Reflektor-System müssen auch die Kosten im Auge behalten werden. Tab. 2 stellt die Kosten einzelner Reflektoren gegenüber. Die Preise sind dabei alle auf die Kosten eines normalen universalen Rundreflektors bezogen, um die Relation zwischen den unterschiedlichen Reflektoren zu zeigen. Das LUH-System hatte als Zielgröße, dass die zusätzlichen Komponenten zusammen unter einem Betrag von 400 € liegen. Dieser Betrag entspricht ungefähr einem Standardrundprisma. Bei dem hier gezeigten System liegt der Preis für die Systemkomponenten bei rund 100 €. Es gibt allerdings auch keine weitreichende Funkkommunikation zwischen Totalstation und Arduino, für zwei X-Bee-Module und Arduino-Shield wären nochmals mindestens 100 € anzusetzen. Die ungefähren Preise, die sich zum Teil aus dem Wechselkurs Euro/Dollar ergeben, sind in Tab. 1 angegeben.

Reflektor	GPR 121	GPH 1P	GRZ 4	GRZ 122	LUH-Aktiv-Reflektor	HCU-Kinematik-Reflektor
						
Zentrierfehler	1 mm	0,3 mm	5 mm	2 mm	1 mm	1 mm
Preiskategorie	1	3	3	5	2	1,2

Tab. 2 | Preise und Genauigkeiten der Reflektoren /Horst & von Gösseln 2012 (erweitert)/

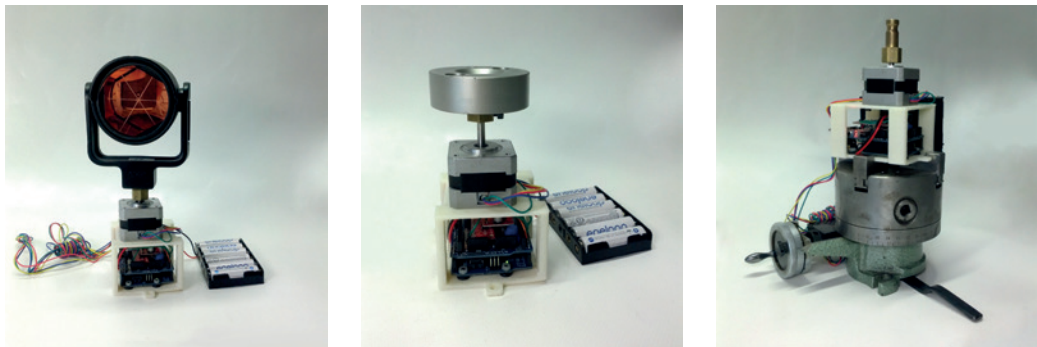


Abb. 4 | Der drehbare Reflektor der HCU in verschiedenen Variationen. Links: Standardreflektor, Mitte: mit Nest für CCR, rechts: Sensorik in einem Teilapparat für die Untersuchungen zur Genauigkeit

Der kinematische Reflektor ist in zwei Ausführungen gefertigt, ein Adapter kann die normalen Reflektoren aufnehmen. Für hochpräzise Anwendungen ist ein Adapter für Corner-Cube-Reflektoren (CCR) gefertigt worden; dieser soll auch Lasertrackermessungen auf bewegte Objekte, die ihre Ausrichtung ändern, ermöglichen (Abb. 4).

5 SOFTWARE

Die Arduino-Plattform bietet dem Nutzer eine eigene Programmieroberfläche. Die verwendete Sprache basiert dabei auf „Processing“ und ist von der Syntax her stark verwandt mit der C-Familie (C, C++, C#) oder Java. Auf Headerdateien und ähnliches wird dabei weitgehend verzichtet. Das in der Entwicklungsumgebung geschriebene Programm wird kompiliert und mittels eines Bootloaders auf den Mikroprozessor des Arduino-Boards übertragen. Dazu genügt ein einziger Knopfdruck. Die gesamte Oberfläche (Abb. 5) ist bewusst einfach gehalten, um auch Einsteigern und Laien die Möglichkeit zu geben, das System zu nutzen. Vor allem die Programmieroberfläche, die an eine Hochsprache angelehnt ist, macht diesen Einstieg leicht, da kein Assembler o. Ä. zur Programmierung des Mikroprozessors erlernt werden muss.

Alle Arduino-Programme folgen dabei einem streng logischen und einfachen Konzept. Es gibt zwei Schleifen, `setup()` und `loop()`. `Setup` enthält alle Befehle, Ausgaben und Variablen, die der Arduino beim Starten ausführen soll. Sobald diese abgearbeitet sind, wird `loop()` ausgeführt; dies ist eine Endlosschleife, die das eigentliche Programm enthält. Ein einfaches Beispiel für eine Schrittmotorsteuerung ist in Abb. 5 dargestellt. Zunächst werden die Steuerleitungen als Variable deklariert. Dann wird die `Setup`-Routine ausgeführt, die die angeschlossenen Pins belegt und die serielle Schnittstelle deklariert. Anschließend wird die Endlosschleife `loop` aufgerufen, die auf der Schnittstelle nach den Buchstaben f und b sucht. Wird einer dieser Buchstaben übertragen, wird der Schrittmotor angesteuert und dreht in die entsprechende Richtung. Dieses Programm wäre auch auf der in Abb. 3 gezeigten Schaltung lauffähig, sofern die Pinbelegung angepasst wird. Den Quelltext zur Steuerung des eigentlichen Reflektors inkl. der Erfassung und Verarbeitung der Sensordaten würde den Umfang dieses Beitrags überschreiten. Im Internet findet sich allerdings eine große Anzahl von Projekt- und Tutorialseiten wie <http://playground.arduino.cc/Projects/Ideas> oder <https://www.youtube.com/user/MaxTechTV1>.

Das Programm zur Steuerung des Reflektors baut auf dieser einfachen Struktur auf. Dazu wird noch der Inertialsensor in das

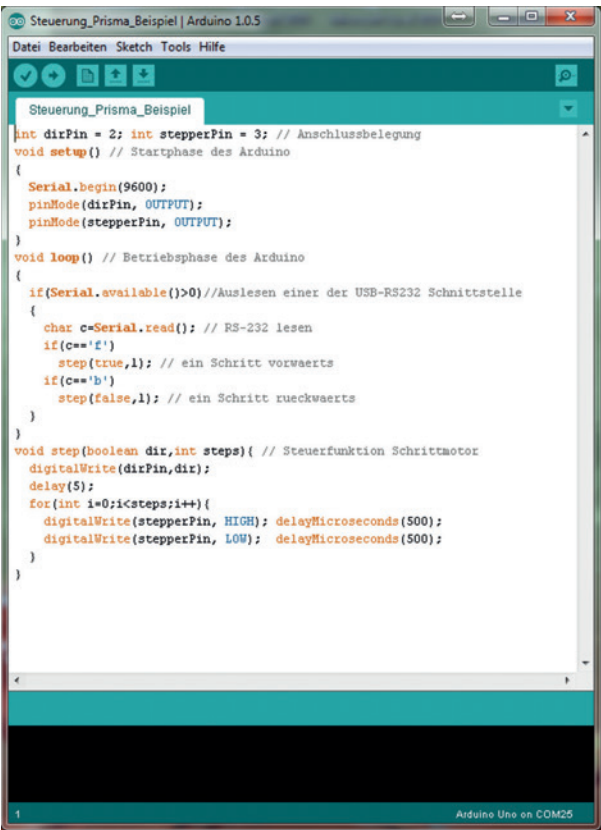


Abb. 5 | Entwicklungsumgebung des Arduino mit einem Beispiel zur Schrittmotorsteuerung

Programm eingebunden. Die `Setup`-Routine setzt die Anfangsausrichtung entweder aus Informationen, die über die serielle Schnittstelle geliefert werden, oder aus den Daten eines Sensors, z.B. Magnetometers, zusammen. In der `loop`-Schleife erfolgt dann die Regelung zur Ausrichtung; sofern Anfangsausrichtung und aktuelle Ausrichtung zu stark voneinander abweichen, wird ein Schritt initiiert, sodass der Reflektor sich auf die Anfangsausrichtung zurück dreht. Derzeit ist dies als open loop realisiert, es muss also davon ausgegangen werden, dass der Schrittmotor den Schritt auch vollzogen hat. Für einen closed-loop wäre noch ein Feedback der Drehung erforderlich, dazu müsste ein anderer Motor oder ein anderer Sensor, der die Informationen liefert, eingesetzt werden. Dies ist in der nächsten Ausbaustufe vorgesehen.

Zur Regelung selbst wird der Digitale Motion Processor (Abschnitt 6.2) eingesetzt. Die Informationen aus der seriellen

Schnittstelle werden mit diesen Winkelinformationen über ein gewichtetes Mittel berechnet. Dabei beträgt die Rechenzeit wenige Millisekunden, sodass Aktualisierungen bis zu Frequenzen von 100 Hz möglich wären. Die Software beschränkt hier die Update-rate künstlich auf 25 Hz. Als spätere Erweiterung ist ein Kalman-Filter angedacht, der in einem Regelkreis arbeitet und so ggf. weitere Sensoren und Informationen zusammenführen kann.

6 ERGEBNISSE

Um die mögliche Performance des Reflektors darstellen, einordnen und bewerten zu können, wurden alle an der HCU verfügbaren 360°-Reflektortypen zunächst in einem statischen Messaufbau untersucht. Dazu wurden in rund 10 m Entfernung zu einem Leica TM30 ein Teilapparat aus dem Maschinenbau mit einer Rundlaufgenauigkeit unter 0,01 mm und einer Winkelgenauigkeit von 0,1° aufgebaut. Die vier Reflektoren, GRZ 4, GRZ 122, Trimble 2002 und der Trimble-Aktivreflektor MT1000, wurden nacheinander in den Teilapparat eingespannt und in 5°-Schritten beobachtet (Abb. 6).

Das Ergebnis dieses Vergleichs ist, dass das Leica GRZ 122 die beste Performance auf einer Leica-Totalstation liefert; die Abweichungen betragen dabei $\pm 1,6$ mm als Helmertscher Punktfehler (2σ). Ob die Trimble-Reflektoren eine gleich gute oder bessere Performance mit einer Trimble-Totalstation liefern, wurde an dieser Stelle nicht untersucht. Für die weiteren Tests wird der GRZ 122 als Referenzreflektor betrachtet.

6.1 Kalibrierung der Regelung

Zur Kalibrierung des kinematischen Reflektors wird ein Teilapparat (Abb. 4 rechts) genutzt. Die Schrittweite des Motors kann bis zu 5 % von der Sollschriftweite (1,8°) abweichen. Ebenso hat das Gewicht des Reflektors eine Auswirkung auf die Motorcharakteris-

tika. Mit dem Teilapparat wird die exakte Verdrehung des Reflektors möglich. Der Sollwinkel wird mit dem gedrehten Winkel des Motors verglichen und anschließend als Maßstabsfaktor auf die Schrittweite angebracht.

6.2 Stabilität der Sensorik

Das Gyroskop im eingesetzten MPU 9150 hat laut Datenblatt /Invensense 2014/ einen „total RMS“ von 0,06°/s (216°/h). Invensense hat einen Digitalen Motion Processor (DMP) auf dem Sensor integriert, dieser bietet zum Beispiel beim Einbau in Smartphones die Möglichkeit, den eigentlichen Prozessor zu entlasten, da alle Fusions- und Filteralgorithmen auf diesem DMP berechnet werden können. Mit der Arduino-Library von /Rowberg 2014/ kann auf diesen Prozessor zugegriffen werden. Dieser wendet dann speziell auf den Sensor zugeschnittene Filter an, um die Daten von Magnetometer, Accelerometer und Gyroskop zu vereinen. Untersucht wurde, wie sich ein Stillstand auf das Verhalten des Gyroskops alleine und wie er sich auf das Verhalten des DMP auswirkt. Der Stillstand ist, bezogen auf Inertialsensoren, auf der Erde natürlich relativ zu sehen. Der Sensor vermag zwar die Erdbeschleunigung gut aufzulösen, ist aber nicht in der Lage, die Erddrehrate zu erfassen. Mit Stillstand ist das einfache Fixieren an einer stabilen Plattform gemeint. Die ungestützte Gyroskop-Messung führt nach 30 Minuten zu einem um 60° weggedrifteten Winkel. Dies verdeutlicht, dass es sich bei solchen Chips um Produkte des Consumermarkts handelt. Wesentlich interessanter sind da die Ergebnisse, die der DMP liefert, Abb. 7. Durch die Fusion von Beschleunigung und Gyroskop können Roll und Pitch erwartungsgemäß stabil gehalten werden. Der durch das Magnetometer unterstützte Azimut (Yaw) driftet allerdings weiter. Die Schrittweite des Motors ist mit rund 1,8° (2 gon) angegeben, der Sensor driftet nach acht Minuten um rund 1,8° weg, sodass eine Drehung des Motors durchgeführt würde. Nach rund 30 Minuten wäre ein perfekt ausgerichteter

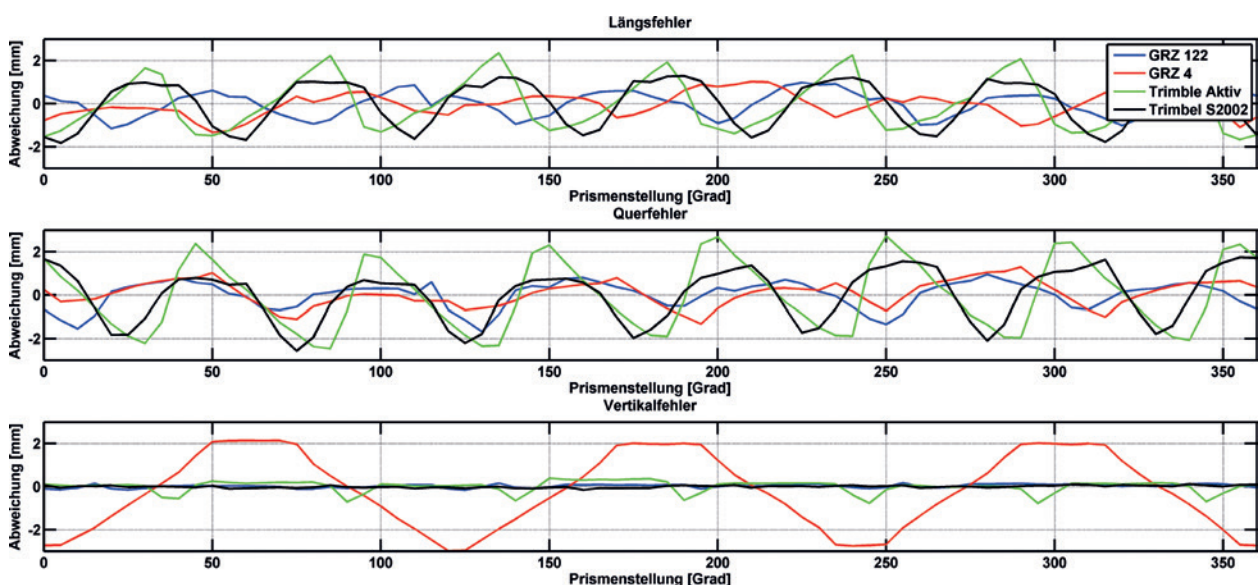


Abb. 6 | Abweichungen bei rotierenden 360°-Reflektoren in horizontaler Lage

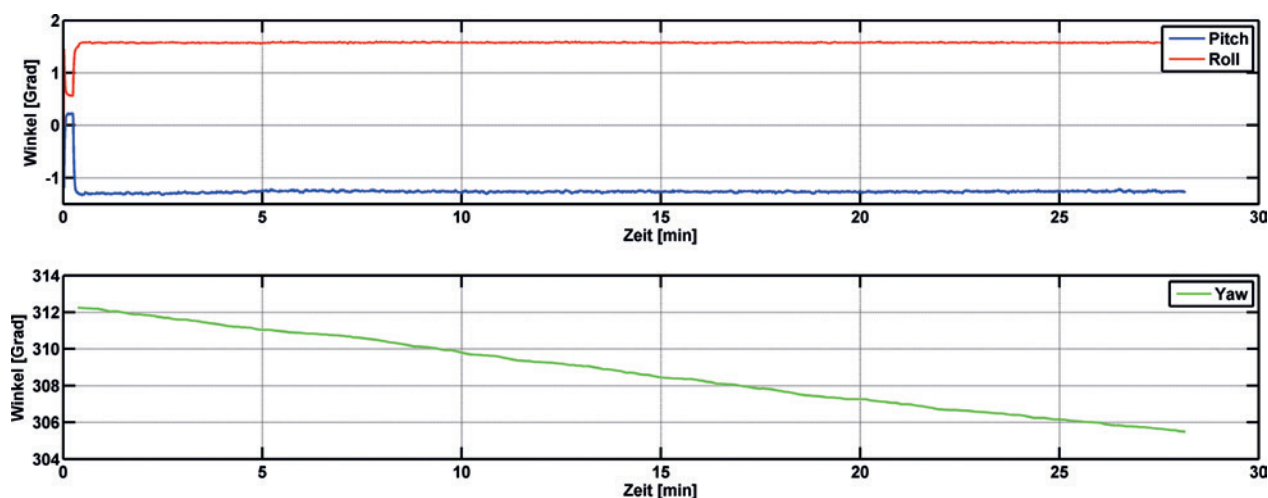


Abb. 7 | Stabilität des Sensors im Stillstand. Oben: Roll und Pitch, unten: Yaw; oben: Einlaufphase des Sensors ca. 20 Sek; unten: Drift des Sensors in der Stehachse (keine Stützung durch Beschleunigungsmesser möglich)

Reflektor um 7,2° verdreht. Dies führt bei einem normalen GPR 121 zu einem nicht signifikanten Punktfehler, nichtsdestotrotz bleibt dies ein Punkt, den es bei Messungen zu bedenken gilt, sofern die Ausrichtung des Reflektors nicht durch weitere Informationen gestützt wird.

In Abb. 7 ist außerdem die Initialisierung des Sensors zu erkennen; dieser ist nach rund 20 Sekunden bereit.

Einer der Gründe für die doch vergleichsweise hohe Stabilität des Systems ist im DMP zu finden, dieser verfügt u. a. über Algorithmen zur Zustandserkennung /Patent US20120323520, Google 2012/ die dann Hoch- und Tiefpassfilter zur Signalaufbereitung regeln. Das Verhalten des DMP legt nahe, dass bei einem erkannten Stillstand eine Rauschunterdrückung durchgeführt wird. Die kinematischen Untersuchungen werden dazu weitere Aussagen liefern.

6.3 Untersuchungen eines statischen Objekts

Der Versuchsaufbau für die Untersuchung des drehbaren Reflektors im unbewegten Betrieb ist derselbe, mit dem auch alle anderen Reflektoren untersucht wurden. Dazu wurde der Motor im Teilapparat fixiert und dann in 5°-Schritten rotiert. Die Regelung steuert den Reflektor entsprechend nach. Die Schrittweite des Motors war dabei 1,8°, sodass der Reflektor neben der Unsicherheit der Anfangsausrichtung maximal um 1,8° gegen die Richtung der Totalstation verdreht ist. Mit einem GPR 122 konnte ein Helmertscher Punktfehler von 0,4 mm (2σ) erreicht werden (Abb. 8). Dieses Ergebnis liegt im Bereich der Erwartung. In /Horst & von Gösseln 2012/ konnte gezeigt werden, dass die Achs-Genauigkeit der Motoren bei unter 0,1 mm liegt. Der kinematische Reflektor ist auch in der Lage, den Fehler in der Vertikalabweichung, eines der

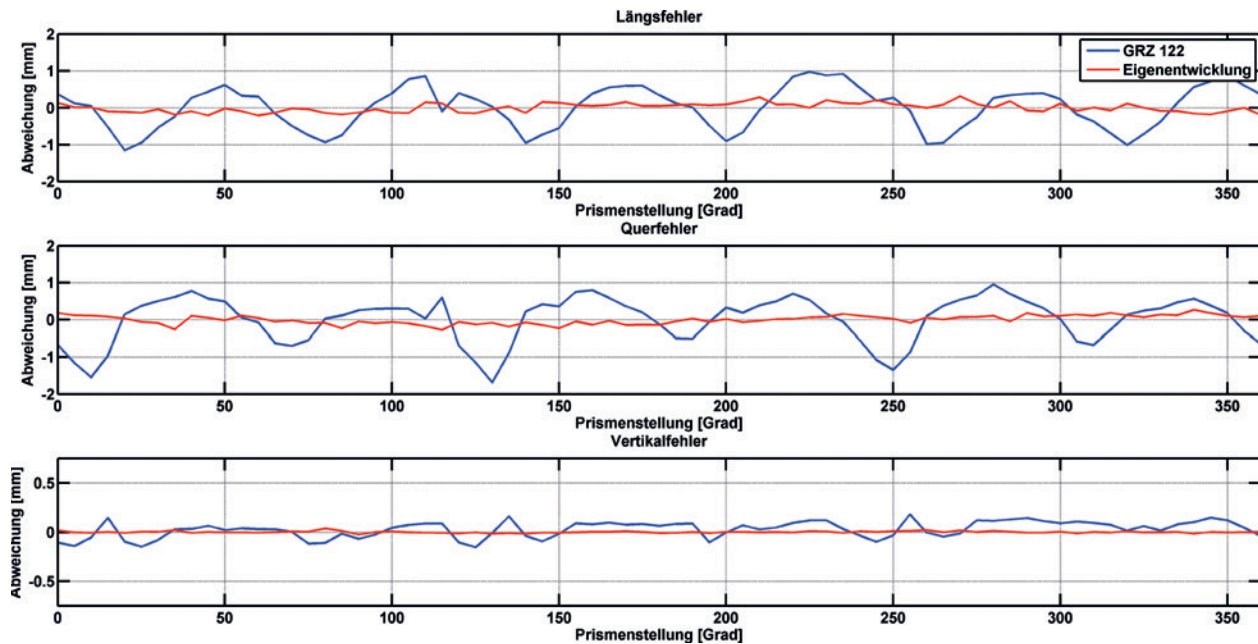


Abb. 8 | Statischer Vergleich GRZ 122 vs. drehbarer Reflektor

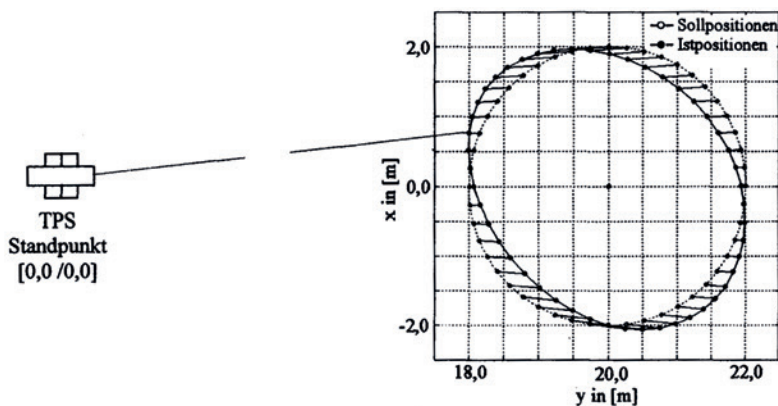


Abb. 9 | Messaufbau zur Überprüfung der Synchronisation von Winkel- und Streckenmessung /Stempfhuber et al. 2000/

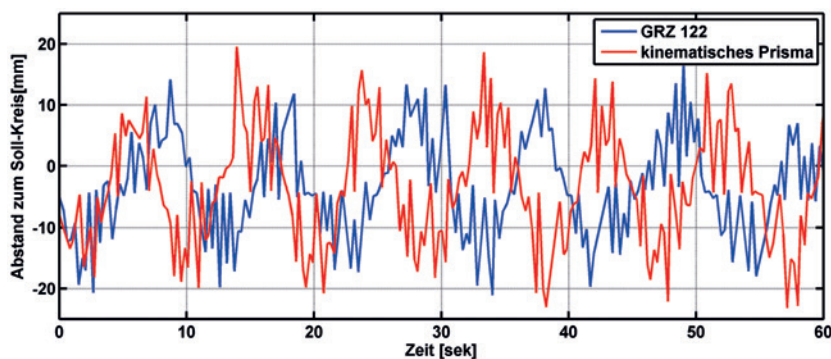


Abb. 10 | Vergleich zwischen GRZ 122 und drehbarem Reflektor

größeren Probleme von 360°-Reflektoren, zu verbessern. So ist es möglich, das GRZ 4 und den deutlich besseren GRZ 122 noch einmal zu unterbieten.

6.4 Untersuchungen eines kinematischen Objekts

Wird eine Totalstation im kinematischen Bereich eingesetzt, ist die Synchronisation der Messelemente Winkel und Strecke ein typisches Problem. Sowohl /Stempfhuber & Kirschner 2008/ als auch /Depenthal 2008/ und /Hennes et al. 2014/ haben Totalstationen auf solche Fehler hin untersucht. Ein typischer Messaufbau zur Überprüfung der Synchronisation ist die Beobachtung eines Reflektors auf einer Kreisbahn.

Sind Winkel- und Streckenmessung nicht synchron, bildet sich aus den gemessenen Koordinaten eine Ellipse anstatt eines Kreises, bei modernen Tachymetern kann dies z.B. durch den EDM-Messmodus Syncrotracking (Leica Geosystems) gelöst werden. In diesem Messaufbau wird normalerweise ein 360°-Reflektor eingesetzt, dessen Effekte bei der Synchronisation berücksichtigt werden müssen.

Dieser Testaufbau wird genutzt, um den kinematischen Reflektor zu testen. Die in den Labortests maximal erreichbare Winkelgeschwindigkeit des Reflektors ist bei einem Kreisradius von 1 m und einem Abstand von 7 m etwa 20°/s.

Abb. 9 zeigt die gewählte Versuchsanordnung. In Abb. 10 sind die Ergebnisse als Abstand vom Sollkreis exemplarisch für eine Minute der Messung mit einem TPS 1201+ dargestellt. Der Versuch zeigt für beide Reflektoren die gleiche Performance, wobei das Oszillieren des Abstands aus der fehlerhaften Synchronisation der Totalstation rührt und nicht aus den Reflektoren. Der Unterschied der Reflektoren verschwindet im Messrauschen. Interessanter als die Messwerte an sich ist das Verhalten des kinematischen Reflektors in der Bewegung. Dabei zeigte sich zum Beispiel, dass es aufgrund der Massenverteilung (schwerer Reflektor oben, leichte Sensorik unten) zu ruckartigem Nachstellen des Reflektors kommen kann. Dies kann zu unerwünschten Vibrationen führen. Ursache hierfür ist der noch nicht vollends optimierte Regelkreis zur Nachführung.

In der Bewegung wird dann auch deutlich, dass es sich immer noch um Low-Cost-Inertialsensorik handelt. Trotz des DMP verdreht sich der Reflektor derzeit nach rund fünf Minuten so weit, dass die Messungen als kritisch bzw. nicht mehr verwertbar angesehen werden müssen.

Dies resultiert aus der noch nicht optimierten Regelung und der verwendeten Sensorik. Beim Einsatz im Multi-Sensor-System der HCU kann als externer Sensor ein Laserkreis IMAR-RQH-1003 (0,003 deg/h) genutzt werden, der die Performance des MPU 9150 natürlich weit übertrifft und somit die Richtungsstabilität und Genauigkeit des Reflektors deutlich erhöht. Für den hier gezeigten Aufbau wäre aber ein so hochwertiges Inertialsystem deutlich zu schwer. An anderen Lösungen zur Richtungsstabilisierung wird derzeit gearbeitet.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es ist möglich, mit der Arduino-Technologie die Mikroprozessoren für jedermann günstig zugänglich zu machen, was auch im Themenfeld der Ingenieurgeodäsie neue Aspekte ergibt.

Insgesamt kann der drehbare Reflektor durch seine Performance überzeugen. Es sind damit präzise Messungen, auch bei kinematischen Anwendungen, möglich. Natürlich müssen auch die Schwachpunkte des kinematischen Reflektors angesprochen werden: Immer wenn ein aktives Ziel zum Einsatz kommt, muss dieses auch mit Strom versorgt werden. Er ist nicht so einfach zu handhaben wie ein normaler 360°-Reflektor. In den Anwendungsbereichen der HCU ist diese Stromversorgung allerdings ohnehin für andere Sensoren vorhanden. Ein interessanter Aspekt ist, dass der drehbare Reflektor mit weiterer Sensorik z.B. für Wetterdaten ausgerüstet werden kann und somit den Aufwand der Stromversorgung ggf. rechtfertigt.

Ein weiterer Punkt ist die Stabilität der Richtung, die durch den Inertialsensor gewährleistet werden muss. Es ist nicht immer gegeben, dass hochwertige Sensorik die Stützung des Systems übernehmen kann. Dies ist ein Punkt, der weiterer Untersuchungen bedarf. Lösungsmöglichkeiten für diese Problematik sollen hier schon aufgezeigt werden. Möglicherweise ist die relative Betrachtung des Winkels interessant. Bei einer Drift nach acht Minuten könnte angenommen werden, dass, wenn nach vier Minuten kein Schritt erfolgt ist, die Veränderung des Winkels driftbedingt ist, dieser könnte dann zurückgestellt werden.

Da ein Motor auch ein rotierendes System ist, soll erprobt werden, ob anstelle von Schrittmotoren normale Gleichstrommotoren eingesetzt werden können. Unter optimalen Bedingungen können diese einfach mit der entgegengesetzten Winkelgeschwindigkeit rotieren. Somit entfällt der Schritt der Integration. Allerdings sind bei beiden Möglichkeiten sehr langsame Bewegungen ein Problem, da sie im zu kompensierenden Sensorrauschen verschwinden könnten.

Eine weitere Möglichkeit ist, die von der LUH eingesetzte Kommunikation zwischen Totalstation und Reflektor auch für den kinematischen Reflektor zu realisieren. Dies könnte im Nahbereich (20 m) über die Bluetooth-Verbindung realisiert werden.

Wenn der Bereich der Low-Cost-Sensorik betrachtet wird, ergeben sich vielleicht noch ganz andere Lösungen. Eine wäre unter anderem, einen Sensor einzusetzen, der auf die Wellenlänge des Lichts, das die Totalstation zur Messung aussendet, sensitiv reagiert. Somit könnte eine Maximumpeilung vom Reflektor aus vorgenommen werden.

Im Hinblick auf die kinematischen Versuche werden als nächstes Untersuchungen mit einem Lasertracker vorgenommen. Zudem soll der Regelkreis zur Nachführung des Winkels so weit verbessert werden, dass eine gleichmäßige weiche Drehung des Reflektors erfolgen kann. Dies beinhaltet ebenfalls den Test anderer Motoren.

DANK

Dank gilt vor allem Sebastian Horst für die anregenden Gespräche zum Thema: Einsatz von Arduinos in der Geodäsie.

LITERATUR

Beetz, A. (2012): Separation of Control Quality and Measurement Accuracy for Guiding Control Tasks of an Indoor Construction Machine Simulator. In: Proceedings of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2012), 13.–15. November, Sydney, Australia.

Depenthal, C. (2008): Entwicklung eines zeitreferenzierten 4-D-Kalibrier- und Prüfsystems für kinematische optische Messsysteme. Dissertation, TH Karlsruhe.

Depping, M. (2013): Entwicklung eines RTK-Low-Cost-GNSS-Systems. Bachelorarbeit, Beuth Hochschule für Technik Berlin (unveröffentlicht).

Favre, C.; Hennes, M. (2000): Zum Einfluss der geometrischen Ausrichtung von 360°-Reflektoren bei Messungen mit automatischer Zielerfassung. In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik (VPK), (2000)2, 72–78.

F. Keller, S. Kagerah, H. Sternberg – Automatisierung eines Low-Cost-360°-Reflektors für die genaue Positionierung einer 3D-Trajektorie

RIEGL RiCOPTER

Vollintegriertes, kompaktes UAV Laserscanning System

- 25 kg MTOW (Maximum Take-Off Weight)
- 16 kg Traglast (Batterien & Sensor)
- 30 Minuten Flugdauer
- stabiles Flugverhalten
- zusammenklappbar für Transport und Lagerung



Der RIEGL RiCOPTER: Das schlüsselfertige LiDAR UAV-System!

Der RiCOPTER – mit dem integrierten RIEGL VUX-1UAV LiDAR Sensor – präsentiert sich als anwendungsoptimierte Gesamtlösung für anspruchsvolles, UAV-gestütztes Airborne Laserscanning.

Die robuste und vielseitige UAV-Plattform trägt den Laserscanner, die IMU/GNSS Einheit samt Antenne, eine Steuer- und Kontrolleinheit sowie optionale Kameras. Das Gesamtsystem überzeugt mit bemerkenswerten Leistungsdaten: Sichtfeld 230°, 350.000 Messungen/Sek., mehrere hundert Meter Messreichweite, 10 mm Genauigkeit und Mehrzielfähigkeit.

Damit eignet sich der RiCOPTER für zahlreiche herausfordernde Anwendungen, z.B. im Tagebau, in der Land- und Forstwirtschaft, in Archäologie und Denkmalschutz oder auch für die Vermessung von Stromleitungs- und Bahntrassen.

Der RiCOPTER – das erste UAV-Komplettsystem aus einer Hand für LiDAR-Vermessungsanwendungen!

www.ricopter.com



Google (2012): Motion determination. <http://www.google.com/patents/US20120323520> (29.10.2014).

Hennes, M.; Urban, S.; Wursthorn, S. (2014): Zur Synchronisierung von Multi-Sensor-Systemen – Grundlagen und Realisierungen. In: DVW e. V. (Hrsg.): Multi-Sensor-Systeme – Bewegte Zukunftsfelder. DVW-Schriftenreihe, 75. Wißner, Augsburg.

Horst, S.; von Gösseln, I. (2012): Active prism for total station measurements. In: Schwiager, V.; Böttinger, S.; Zheng, B. (Hrsg.): Proceedings 3rd International Conference on Machine Control & Guidance. Machine Control & Guidance, 27.–29. März 2012, Stuttgart.

Invensense (2014): MPU-9150 Product Specification Revision 4.3. http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/PS-MPU-9150A-00v4_3.pdf (29.10.2014).

Keller, F.; Willemsen, T.; Sternberg, H. (2014): Modulares Mobile-Mapping-System für Forschungsanwendungen im In- und Outdoorbereich. In: Wieser, A. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 14. Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Zürich, 2014. Wichmann, Berlin/Offenbach, 171 – 183.

Keller, F.; Willemsen, T. (2014): Praktischer Aufbau einer Sensorplattform, Teil 1: Arduino in der Geodäsie? Teil 2: Praxisbeispiel: Arduino zur Neigungsbestimmung. Vortrag im Rahmen des Seminars „Geodäsie quo vadis – Möglichkeiten und Grenzen kostengünstiger Messverfahrens-Lösungen“. Bildungswerk VDV, 10.–11. April 2014, Fulda.

Leica (2014a): Standardreflektoren. http://www.leica-geosystems.de/de/Standardreflektoren_84830.htm (29.10.2014).

Leica (2014b): Spezialreflektoren. http://www.leica-geosystems.de/de/Spezialreflektoren_84832.htm (29.10.2014).

Schwiager, V.; Sternberg, H. (2014): Multi-Sensor-Systeme in der Ingenieurgeodäsie – Grundlagen und Überblick. In: DVW e. V. (Hrsg.): Multi-Sensor-Systeme – Bewegte Zukunftsfelder. DVW-Schriftenreihe, 75. Wißner, Augsburg.

Stempfhuber, W.; Ingensand, H. (2008): Baumaschinenführung und -steuerung – Von der statischen zur kinematischen Absteckung. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv), 133(2008)1, 36–44.

Stempfhuber, W.; Kirschner, H. (2008): Kinematische Leistungsfähigkeit von zielverfolgenden Tachymetern. Ein Beitrag zum Stand der Technik am Beispiel des Leica TPS1200+. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 115(2008)6, 216–224.

Stempfhuber, W.; Schnädelbach, K.; Maurer, W. (2000): Genaue Positionierung von bewegten Objekten mit zielverfolgenden Tachymetern. In: Schnädelbach, K.; Schilcher, M. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2000. Beiträge zum 13. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, München. Wittwer, Stuttgart, 144–154.

Stempfhuber, W. (2014): RTK-GNSS-Messungen mit Einfrequenz-Empfängern. In: Wieser, A. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 14. Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Zürich, 2014. Wichmann, Berlin/Offenbach, 125–136.

Sternberg, H.; Keller, F.; Willemsen, T. (2013): Precise indoor mapping as a basis for coarse indoor navigation. In: Journal of Applied Geodesy, 7(2013)4, 231 – 246.

Roboternetz (2014): Schrittmotoren, Grundlagen. <http://m-wissen.de/wiki/index.php/Schrittmotoren> (29.10.2014).

Rowberg, J. (2014): The I²C Device Library. https://github.com/jrowberg/i2cdevlib/blob/master/Arduino/MPU6050/Examples/MPU6050_raw/MPU6050_raw.ino (29.10.2014).

M. Sc. Friedrich Keller

HAFENCITY-UNIVERSITÄT HAMBURG
INGENIEURGEODÄSIE UND MESSTECHNIK

Überseeallee 16 | 20457 Hamburg
friedrich.keller@hcu-hamburg.de



B. Sc. Steffen Kagerah

HAFENCITY-UNIVERSITÄT HAMBURG
INGENIEURGEODÄSIE UND MESSTECHNIK

Überseeallee 16 | 20457 Hamburg
steffen.kagerah@hcu-hamburg.de



Prof. Dr.-Ing. Harald Sternberg

HAFENCITY-UNIVERSITÄT HAMBURG
INGENIEURGEODÄSIE UND MESSTECHNIK

Überseeallee 16 | 20457 Hamburg
harald.sternberg@hcu-hamburg.de

