



**T. Müller,
J. Schwendemann**

iGPS – ein vielseitiges Messsystem hoher Genauigkeit

1 Einleitung

Geometrische Messungen im Maschinen-, Fahrzeug- und Flugzeugbau erfordern häufig Genauigkeiten im Millimeter- oder Submillimeterbereich. Traditionelle Messmittel wie Lehren sind in der Praxis weit verbreitet, stoßen aber insbesondere bei großen Messobjekten oft an ihre Grenzen. Seit etlichen Jahren hat sich die Industrievermessung mit Lasertrackern, tachymetrisch arbeitenden Systemen, Nahbereichsphotogrammetrie und anderen optischen Messsystemen in diesem Aufgabenbereich etabliert. Mit iGPS steht nun ein neues Messsystem für viele Problemstellungen zur Verfügung, die bisher vor allem mit Koordinatenmessgeräten oder Lasertrackern bearbeitet wurden. Durch sein Systemkonzept bietet es darüber hinaus erweiterte Anwendungsmöglichkeiten.

Geometrische Messungen höchster Genauigkeit sind mit ortsfesten Koordinatenmessgeräten (KMG) zu erreichen. Sie sind je nach Messvolumen und Bauweise sehr aufwendig und erfordern eine geeignete Messumgebung. Die zu vermessenden Werkstücke müssen zu der Messmaschine gebracht werden, was die Einsatzmöglichkeiten der KMG entsprechend einschränkt.

Lasertracker (LT) sind weitaus flexibler einsetzbar, da sie als portable Messgeräte zum Messobjekt hin gebracht werden können, und im Prinzip ähnliche Genauigkeiten erreichen können. Um ein Objekt komplett zu erfassen, muss ein Lasertracker jedoch in der Regel mehrfach um das Werkstück herum platziert werden, wobei jede Aufnahmeposition mit den vorigen über Passpunkte verknüpft werden muss, was die erreichbare Genauigkeit negativ beeinflusst.

Mit iGPS, einem Produkt von Metris (Belgien), wurde ein vollkommen neuartiges Messkonzept verwirklicht. Dabei weist der Namensteil „GPS“ auf eine äußerliche Verwandtschaft mit dem bekannten Satellitennavigationssystem hin, die sich darin zeigt, dass fest installierte Sender kontinuierlich Daten in den Raum senden, ähnlich den kreisenden Satelliten, und mithilfe unabhängiger Sensoren aus diesen Daten Positionen gewonnen werden können. Doch beruht iGPS nicht auf gemessenen Strecken sondern auf Winkeln (Triangulation) und es wurde nicht für globale sondern für sehr kleinräumige Anwendungen hoher Genauigkeit konstruiert. Stand die Abkürzung „i“ ursprünglich für „indoor“, so steht sie seit Mitte 2006 wegen Verwechslungsgefahr für „infrared“ und weist damit auf den verwendeten Infrarotlaser hin.

iGPS eignet sich vor allem in der Industrievermessung zur Bestimmung größerer Messobjekte, da es wesentlich größere Messvolumen erfassen kann als Koordinatenmessmaschinen oder Lasertracker. So wird es derzeit besonders in der Flugzeugindustrie und beim Schiffsbau erprobt, ist

aber in allen Bereichen einsetzbar, in denen neben Submillimetergenauigkeit auch eine große Reichweite, ein robustes und einfach einsetzbares System und große Flexibilität gefordert werden.

Neben seiner hohen Genauigkeit bietet das iGPS auch Möglichkeiten zur synchronisierten Messung mit mehreren Sensoren. So kann durch zeitgleiche Beobachtung beliebig vieler Sensoren z.B. die Orientierung eines Werkstücks oder die gegenseitige Position verschiedener Bauteile während der Montage überwacht werden. Aufgrund der internen Messrate jedes Senders von ca. 40 Hz können diese Messungen in Echtzeit ausgewertet und auch bewegte Objekte erfasst werden. Solche Aufgaben lassen sich mit Lasertrackern oder Koordinatenmessmaschinen nicht ohne weiteres lösen.

2 Systembeschreibung und Funktionsprinzip

2.1 Konfigurationen und Komponenten des iGPS-Systems

Das iGPS ist ein modular aufgebautes System. Die Minimalconfiguration besteht aus zwei ortsfesten Transmittern und einem Sensor, dessen Position nach dem Prinzip eines dreidimensionalen Vorwärtsschnitts bestimmt wird. Wenn mehr als zwei Transmitter zur Verfügung stehen, können die zusätzlichen Winkelmessungen zur Kontrolle und Genauigkeitssteigerung genutzt werden. Die Koordinatenbestimmung des Sensors ist bei diesen Konfigurationen auch bei Abschattung einzelner Transmitter problemlos möglich, solange noch mindestens zwei Transmitter empfangen werden können. Die Anzahl von gleichzeitig betriebenen Transmittern ist unbegrenzt, in der Regel wird mit 4 oder 8 Transmittern gearbeitet, um bei der Punktbestimmung neben einer guten Kontrollierbarkeit und besseren Genauigkeit auch weniger Einschränkungen aufgrund der Abschattung einzelner Transmitter berücksichtigen zu müssen.

Die Reichweite eines einzelnen Transmitters beträgt 50 m, sie ist jedoch durch die Aufrüstung mit dem sogenannten Long Range Strobe auf bis zu 80 m erweiterbar. Das durch die Anordnung der Transmitter aufgespannte Viereck deckt oftmals einen kompletten Bereich einer Werkshalle ab, in dem sich mehrere überwachte Maschinen oder Messplätze befinden können, die unterschiedliche Anforderungen an die Messung selbst stellen können. Da die Position des Sensors allein aus den von ihm empfangenen Daten berechnet werden kann, ist es möglich, beliebig viele Empfänger gleichzeitig zu betreiben. Als Empfänger werden meist zwei fest miteinander verbundene Sensoren verwendet, mit denen nicht nur die Position, sondern auch die Orientierung der Verbindungslinie

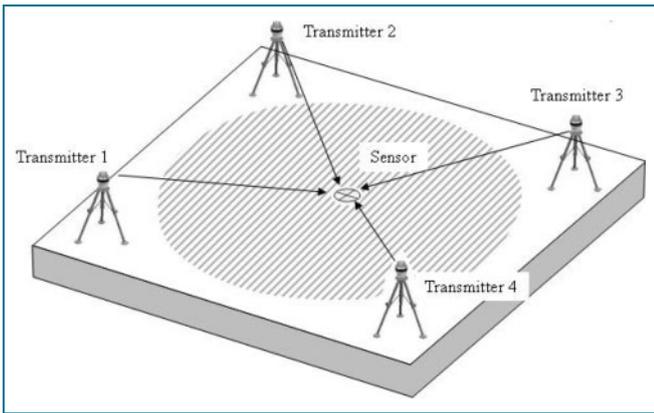


Abb. 1: Standardkonfiguration eines iGPS-Systems mit vier Transmittern

der beiden Sensoren im Raum bestimmt wird. Sie werden als 5-DOF-Sensoren (5 Degrees of Freedom) bezeichnet. Nach dem gleichen Prinzip wurde ein Messtaster entwickelt, dessen Sensoren sich in festem Abstand zueinander und zur Messspitze befinden, und dabei eine Linie bilden. Mithilfe dieses Messtasters, der sogenannten VectorBar, können Anwender vordefinierte Punkte, Kanten und Flächen intuitiv aufnehmen und abfahren. Bohrungen oder verdeckte Punkte lassen sich durch den Einsatz von zusätzlichen Verlängerungen zwischen Sensoren und Messspitze erfassen. Zur kompletten Erfassung der Position und Orientierung (6 Freiheitsgrade) wurde ein weiterer Messtaster entwickelt, der vier Sensoren vereint. Einzelsensoren werden nur zur Selbstkontrolle des Messsystems verwendet, indem sie an stabilen Positionen fest eingebaut werden. Falls Instabilitäten in der Aufstellung der Transmitter auftreten sollten, können sie durch diese Kontrollmessungen aufgedeckt werden und, bei einer ausreichenden Anzahl solcher Kontrollpunkte, können neue Koordinaten und Orientierungen für die Transmitter berechnet werden.

2.2 Aufbau eines iGPS-Transmitters

Ein iGPS-Transmitter besteht aus einem festen Unterbau, in den mehrere Zeilen ringförmig angeordneter Dioden integriert sind, und einem mit gleichmäßiger Geschwindigkeit rotierenden Transmitterkopf, der über zwei schräg

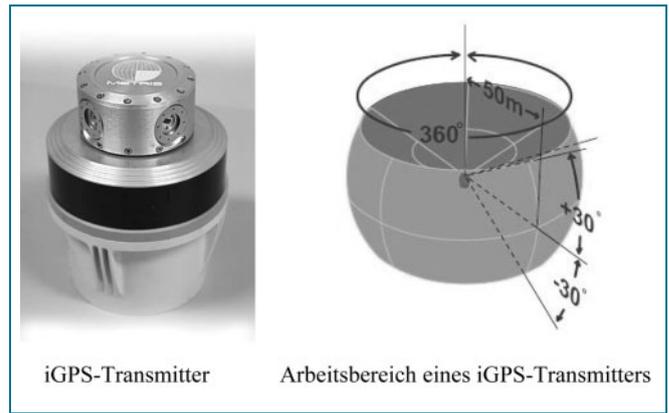


Abb. 3: iGPS-Transmitter und Arbeitsbereich

angebrachte schlitzförmige Öffnungen verfügt, aus denen flächenhaft aufgefächerte Laserstrahlen ausgesendet werden.

Das Messprinzip beruht auf insgesamt drei Lichtsignalen des Transmitters, die an jedem Punkt des Arbeitsbereichs empfangen werden. Zum einen senden bei einer bestimmten Stellung des Transmitterkopfes alle Dioden der Diodenzeilen gleichzeitig einen kurzen Lichtimpuls in den gesamten Arbeitsbereich aus. Dieses sogenannte Strobe-Signal markiert einen Bezugszeitpunkt analog zur Nullrichtung eines Teilkreises. Die beiden weiteren Signale sind die mit dem Transmitterkopf rotierenden Laserfächer 1 und 2, die permanent ausgestrahlt werden. Sie sind in der Rotationsebene in einem Winkel von etwa 90° versetzt angeordnet und um $+30^\circ$ bzw. -30° gegen die Drehachse des Transmitters geneigt, bilden also räumlich betrachtet ein „V“.

Die Laserfächer, die durch die Umdrehung – ähnlich einem Leuchtturm – rundum 360° abdecken, werden von jedem Sensor mit Sichtkontakt zum Transmitter ebenso als Lichtimpuls empfangen wie das Strobe-Signal. Aus den Zeitdifferenzen zwischen diesen drei Lichtimpulsen und der Rotationsgeschwindigkeit lassen sich auf die Rotationsebene bezogene Richtungen und Höhenwinkel ableiten: Je größer der auf die Rotationsebene bezogene Höhenwinkel vom Transmitter zum Empfänger ist, umso größer wird die Zeitdifferenz zwischen dem 1. und 2. Fächersignal. Die Richtung wird aus dem Zeitunterschied

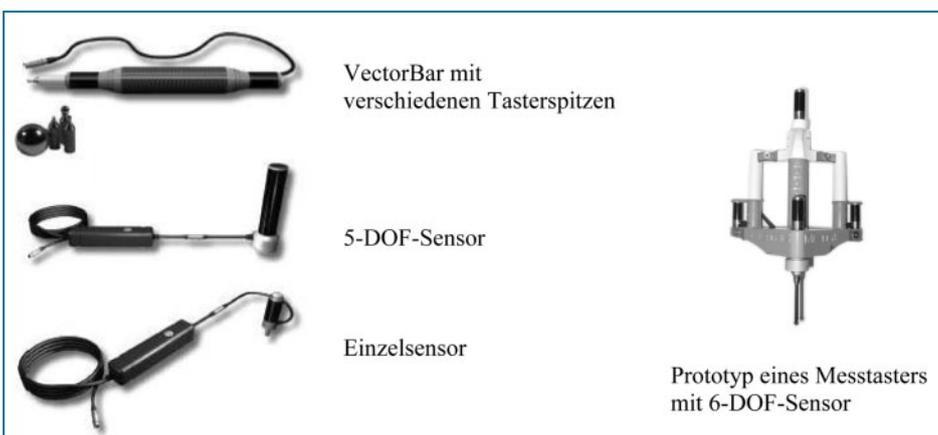


Abb. 2: Verschiedene Messtaster und iGPS-Sensoren

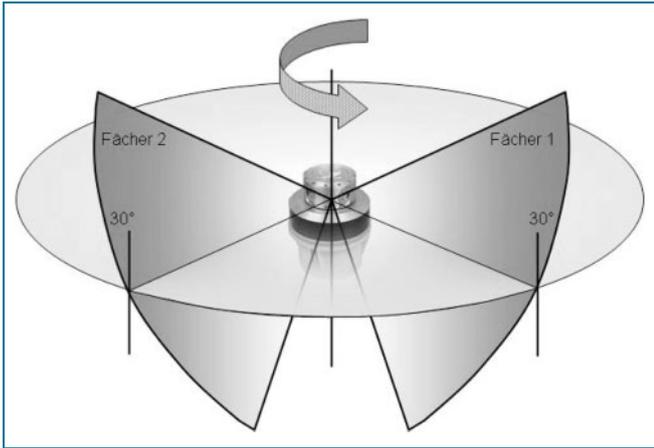


Abb. 4: Anordnung der Laserfächer eines iGPS-Transmitters

zwischen dem Strobe-Signal und dem Mittelwert von erstem und zweitem Signal errechnet.

Alle Transmitter senden die gleichen Lichtsignale aus, unterscheiden sich jedoch durch ihre Rotationsgeschwindigkeit, die als Erkennungsmerkmal für den jeweiligen Transmitter dient. Diese Rotationsgeschwindigkeit wird neben weiteren Merkmalen in entsprechenden Kalibrierungsfiles gespeichert, die im Anschluss an den Fertigungsprozess hochgenau ermittelt werden und vor dem Start des iGPS-Systems in die Auswertesoftware geladen werden müssen.

2.3 Aufbau eines iGPS-Sensors

Der zylindrische Single-Sensor, der Einzelbaustein eines jeden Sensors und Messtasters, besteht aus insgesamt 32 einzelnen lichtempfindlichen Elementen, die in zwei ge-



Abb. 5: Zylindrischer Single-Sensor mit Blick ins Innere und schematischem Aufbau

geneinander verschobenen Reihen à 16 Facetten zylinderförmig angeordnet sind. Um diesen Zylinder aus Photodioden ist ein etwa 2 mm starkes Glas angebracht, das das Innere vor Staub und Schmutz schützt. Zusätzlich filtert das dunkle Glas auch Störlicht heraus, da es nur Signale des infraroten Wellenlängenbereichs hindurch lässt, so dass sowohl Messungen bei normaler Beleuchtung in Innenräumen als auch beschränkt Messungen bei Sonnenlicht im Außenbereich möglich werden.

2.4 Auswerteschritte der iGPS-Messsignale

Die Auswertung der an einem Sensor empfangenen Lichtsignale erfolgt in drei Schritten:

- Die analogen Signale der Sensoren werden verstärkt und digitalisiert.
- Aus den Zeitdifferenzen zwischen den einzelnen Lichtimpulsen werden Winkelwerte berechnet.
- Aus den Winkelwerten wird die Sensorposition errechnet.

In einem direkt mit dem Sensor verbundenen Verstärker werden die ankommenden Signale verstärkt und digitalisiert, können aber dennoch nur über kurze Entfernungen

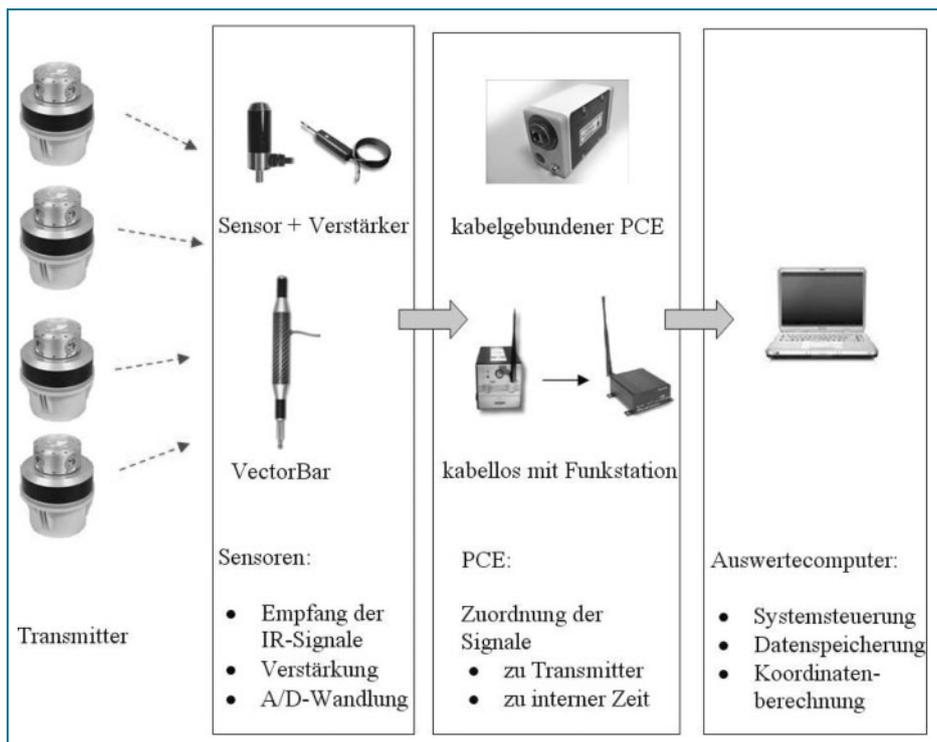


Abb. 6: Signalauswertung in iGPS-Empfängern

transportiert werden. In der VectorBar ist dieser Verstärker direkt im Messtaster zwischen den beiden Einzelsensoren integriert, bei den übrigen Sensoren sind separate Bauteile notwendig.

Diese Signale werden zum Receiver, auch Position Calculation Engine (PCE) genannt, weitergeleitet, in dem sie mit Zeitstempeln versehen, einzelnen Transmittern zugeordnet und in Winkelwerte θ_i umgerechnet werden (Kap. 2.6). Der Receiver dient als Schnittstelle zwischen Auswerterechner und Sensor und verwaltet sowohl die Messanfragen als auch die Ergebnisse. Über einen am Receiver festgelegten Noise-Floor-Wert kann der Nutzer festlegen, ab welcher Intensität ein Lichtimpuls als Messsignal registriert werden soll.

Die Positionsrechnung aus den Winkeldaten wird erst im Auswerterechner durchgeführt. Die Receiver können je nach Ausführung ein, zwei oder vier Sensoren simultan verwalten. Wird eine größere Anzahl von Sensoren an einen Receiver angeschlossen, können deren Messdaten nur sequentiell ausgewertet werden. Während die Datenübertragung zwischen Verstärker und Receiver stets kabelgebunden erfolgen muss, können die Receiver auch kabellos mit dem Auswerterechner kommunizieren.

2.5 Analyse der empfangenen Lichtimpulse

Jeder Sensor empfängt von jedem sichtbaren Transmitter pro Umdrehung drei Signale:

- Das Signal des ersten Laserfächers, zum Zeitpunkt t_1 , in dem dieser über die photoempfindlichen Zellen des Sensors streicht.
- Das Signal des zweiten Laserfächers zum Zeitpunkt t_2 .
- Das Signal des Strobe-Impulses, das in alle Richtungen gleichzeitig ausgesandt wird, zum Zeitpunkt t_{ref} .

Der Receiver versteht alle eintreffenden Signale mit dem Zeitstempel seiner internen Uhr, die eine Auflösung von 20 Nanosekunden gewährleistet. Die Zeitdifferenz zwischen dem eigentlichen Messzeitpunkt, dem Überschreiten des NoiseFloor-Werts, und der Signalspitze wird durch Kalibrierung ermittelt und bei der Auswertung im PC berücksichtigt, sodass der korrigierte Zeitstempel die Signalspitze repräsentiert.

Um ein Signal einem bestimmten Transmitter zuzuordnen, wird das Signal unter Verwendung der spezifischen, bekannten Rotationsgeschwindigkeit der verwendeten Transmitter mit nachfolgenden und vorhergehenden Signalen verglichen.

Transmitter, von denen weniger als drei Signale identifiziert werden können, werden als blockiert gekennzeichnet. Bei diesen Transmittern muss nicht unbedingt die Sichtverbindung zum Sensor unterbrochen sein, auch zu weit entfernte Transmitter, die zu schwache Strahlen senden und deren Signale durch den eingestellten NoiseFloor-Wert herausgefiltert werden, werden nicht registriert.

Die von einem Transmitter ausgesandten Lichtimpulse des Referenzsignals und der Laserfächersignale unterscheiden sich in der Wellenlänge ($\lambda = 890 \text{ nm}$ bzw. $\lambda = 780 \text{ nm}$), der Signalbreite und der Signalstärke. Nach der Digitalisierung ist eine Unterscheidung durch die Wellenlänge nicht

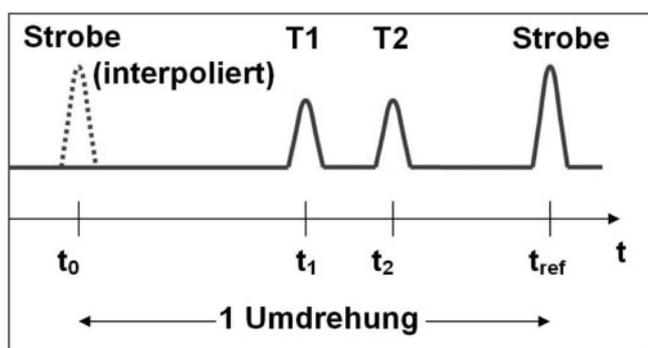


Abb. 7: Bei einem Sensor empfangene Signale eines Transmitters

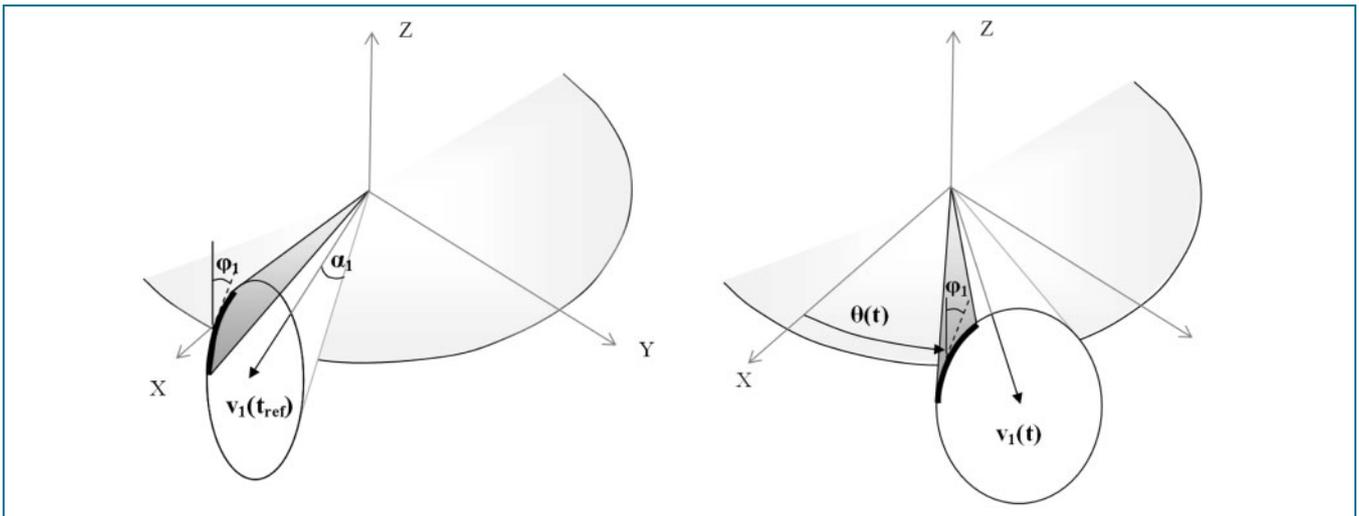


Abb. 8: Kegel des Laserfächers 1 zum Zeitpunkt t_{ref} und t . Kegel mit $\alpha_1 \ll 90^\circ$ zur Verdeutlichung der geometrischen Verhältnisse.

mehr möglich und eine Unterscheidung über die Signalbreite oder -stärke zu ungewiss. Deshalb wird das Referenzsignal nur einmal alle zwei Umdrehungen gesendet, und ist damit eindeutig identifizierbar. Eine Unterscheidung zwischen den beiden Laserfächersignalen ist nicht notwendig, da geometrisch bedingt immer das erste der beiden auch das Signal des ersten Fächers ist.

Diese Zuordnung zu den jeweiligen Transmittern erfolgt kontinuierlich für alle eingehenden Signale, unabhängig davon, ob der Anwender eine Messung anfordert oder nicht. So wird intern eine fortlaufend aktualisierte Liste der Transmitter geführt, die, wenn sie nicht als blockiert gelten, durch die Zeiten und Breiten der drei Signale ergänzt wird. Das alle zwei Umdrehungen interpolierte Referenzsignal ist von dem tatsächlich gemessenen Signal durch seine nicht definierte Signalbreite unterscheidbar. Auch die Berechnung der Intervalle, Winkel und letztlich der Sensorpositionen und Orientierungen erfolgen kontinuierlich. Die fortlaufend aktualisierten Daten können über einen Schalter am Messtaster oder direkt am Auswerterechner an die Messsoftware weitergeleitet und abgespeichert werden.

2.6 Berechnung von Richtung und Höhenwinkel aus Zeitsignalen

Um die Form der Laserfächer mit ausreichender Genauigkeit beschreiben zu können, ist es erforderlich, diese jeweils als Ausschnitt aus einem Kegel darzustellen. Der halbe Öffnungswinkel α dieser Kegel liegt bei etwa 90° . Die genauen Werte α_i werden für jeden Laserfächer durch Kalibrierung bestimmt. Die Lage dieser Kegel im Raum wird durch ihre Rotationsachse beschrieben. Dies erfolgt im Koordinatensystem des Transmitters, das durch seine Rotationsachse z und die Richtung, in der der horizontale Strahl des Laserfächers 1 zum Bezugszeitpunkt t_{ref} ausgesendet wird, festgelegt wird. Im Bezugszeitpunkt gilt für den Richtungsvektor der Rotationsachse des ersten Laserfächers die Beziehung

$$\vec{v}_1(t_{ref}) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) \\ \cos(\varphi_1) \cdot \sin(\alpha_1) \\ \sin(\varphi_1) \cdot \sin(\alpha_1) \end{bmatrix}$$

wobei $\varphi_1 \approx 30^\circ$ die Neigung des Laserfächers beim Schnitt mit der Rotationsebene angibt (Abb. 8). Für andere Zeitpunkte t gilt unter Berücksichtigung des Rotationswinkels $\theta(t)$

$$\vec{v}_1(t) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\theta(t)) - \cos(\varphi_1) \cdot \sin(\alpha_1) \cdot \sin(\theta(t)) \\ \cos(\alpha_1) \cdot \sin(\theta(t)) + \cos(\varphi_1) \cdot \sin(\alpha_1) \cdot \cos(\theta(t)) \\ \sin(\varphi_1) \cdot \sin(\alpha_1) \end{bmatrix}$$

Für den zweiten Laserfächer gelten diese Beziehungen analog, wobei jedoch $\varphi_2 \approx 30^\circ$ gilt. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die Richtung des horizontalen Strahls dieses Laserfächers um einen Winkel $\theta_0 \approx -90^\circ$ von derjenigen des Laserfächers 1 abweicht. Da die durch α_1 und α_2 zu beschreibende Form und die durch φ_1 , φ_2 und θ_0 definierte Orientierung der Laserfächer durch eine Werkskalibrierung als bekannt vorausgesetzt werden können, legen θ_1 und θ_2 zwei um etwa 60° gegeneinander geneigte Flächen im Raum fest, deren Schnittlinie die gesuchte Raumrichtung vom Transmitter zum Empfänger ist (Abb. 9).

Zur Berechnung der Raumrichtung vom Transmitter zum Sensor werden zunächst die Zeitmessungen über die Umlaufzeit T des jeweiligen Transmitters in Winkelwerte θ_i umgerechnet.

$$\theta_1 = 2\pi \cdot \left(1 - \frac{t_{ref} - t_1}{T}\right)$$

$$\theta_2 = 2\pi \cdot \left(1 - \frac{t_{ref} - t_2}{T}\right) - \theta_0$$

Der Raumvektor \vec{r} vom Transmitter zum Empfänger, der auf beiden Kegeln liegen muss, erfüllt daher die Bedingungen

$$\begin{aligned} \vec{v}_1 \cdot \vec{r} &= \cos(\alpha_1) \\ \vec{v}_2 \cdot \vec{r} &= \cos(\alpha_2) \end{aligned}$$

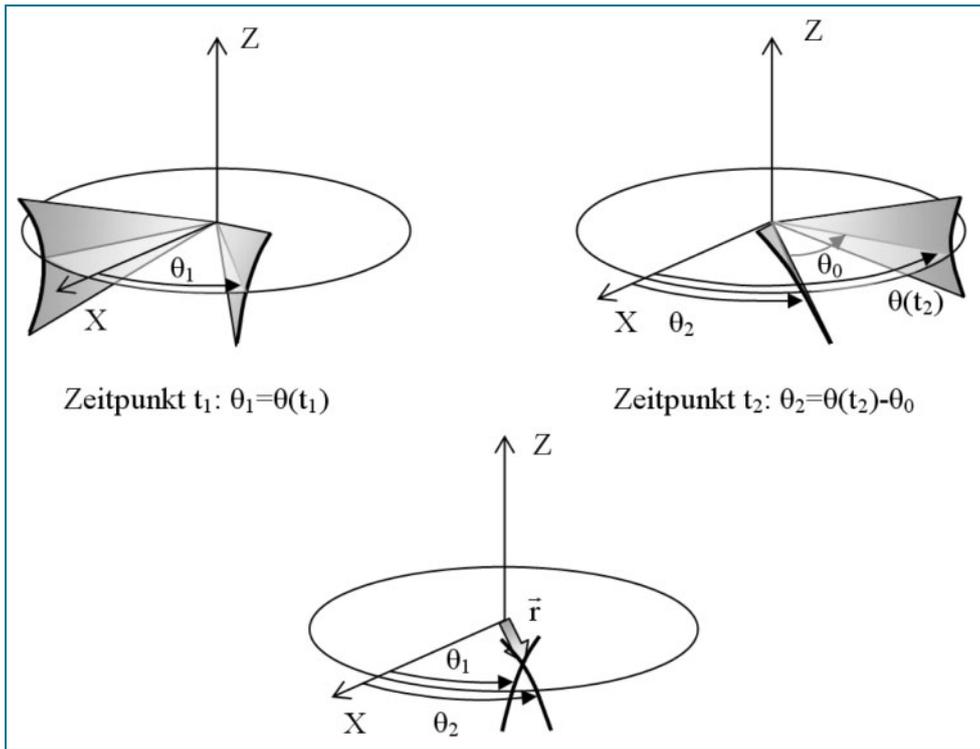


Abb. 9: Bestimmung der Raumrichtung vom Transmitter zum Sensor als Schnittlinie zwischen dem Laserfächer 1 zum Zeitpunkt t_1 und dem Laserfächer 2 zum Zeitpunkt t_2 .

Zu seiner Bestimmung kann zunächst der Hilfsvektor \vec{q}_0 in der Rotationsebene berechnet werden, der folgendes Gleichungssystem erfüllt:

$$\begin{aligned} \vec{v}_1 \cdot \vec{q}_0 &= \cos(\alpha_1) \\ \vec{v}_2 \cdot \vec{q}_0 &= \cos(\alpha_2) \end{aligned} \quad \text{mit } \vec{q}_0 = \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ 0 \end{bmatrix}$$

\vec{r} ergibt sich dann als Einheitsvektor mit geeignetem Faktor k aus

$$\vec{r} = \vec{q}_0 + k(\vec{v}_1 \times \vec{v}_2)$$

Aus diesem Raumvektor können auf die Rotationsebene des Transmitters bezogene Höhenwinkel V_z und Richtungen H_z zum Sensor berechnet werden.

$$H_z = \arctan\left(\frac{r_y}{r_x}\right)$$

$$V_z = \arctan\left(\frac{r_z}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}}\right)$$

Sind Position und Orientierung des Sensors aus einer ersten Berechnung bekannt, so werden die Zeitpunkte t_{ref} , t_1 und t_2 mit weiteren Kalibrierwerten korrigiert, die sich aus der Geometrie des Sensors und systematischen Fehlereinflüssen des Transmittersignals ergeben. Das Endergebnis ergibt sich aus einer erneuten Berechnung mit diesen verbesserten Messwerten. Die Korrekturwerte hängen von der Position, der Entfernung und der Neigung des Sensors relativ zum jeweiligen Transmitter und von dem Transmitter selbst ab. Erst mit diesen auf einer vorausgegangenen Kalibrierung der Transmitter beruhenden Verbesserungen kann die ausgeglichene Punktposition mit den in Kap. 3 diskutierten Genauigkeiten bestimmt werden.

2.7 Räumliche Anordnung von Transmittern und Sensoren

Die Sensorposition kann mittels dreidimensionalen Vorwärtsschnitts oder durch Ausgleichung berechnet werden, wenn die Transmitterpositionen und -orientierungen aus einem vorangegangenen Setup (Kap. 2.9) heraus bekannt sind.

Die Genauigkeit des Punktes ist dabei entscheidend von den Schnittwinkeln zwischen den einzelnen Strahlen abhängig. Wenn lediglich zwei Transmitter zur Verfügung stehen, sinkt die Genauigkeit rapide ab, je näher der Sensor sich an der Verbindungslinie der beiden Transmitter befindet. Die beste Genauigkeit ergibt sich, wenn sich die bestimmenden Strahlen im rechten Winkel schneiden. Bei drei und vier Transmittern, die gleichmäßig um das Messobjekt oder im Messraum verteilt sind, wirkt sich dieser Einfluss der Messgeometrie etwas weniger stark aus, er ist jedoch immer noch der entscheidende Genauigkeitsfaktor. Um möglichst gute und homogene Genauigkeitsverhältnisse zu erzielen, haben sich zwei Standard-

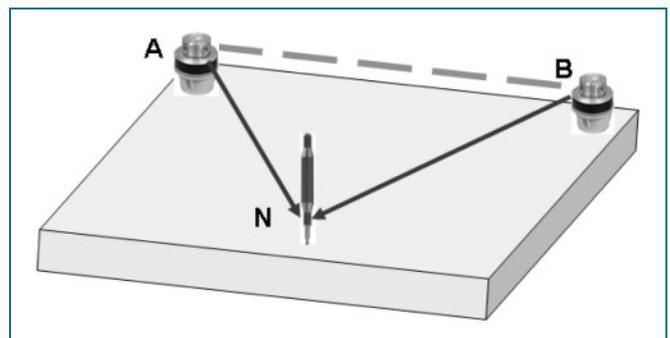


Abb. 10: Koordinatenbestimmung des Neupunkts N mit 2 Transmittern durch Vorwärtsschnitt

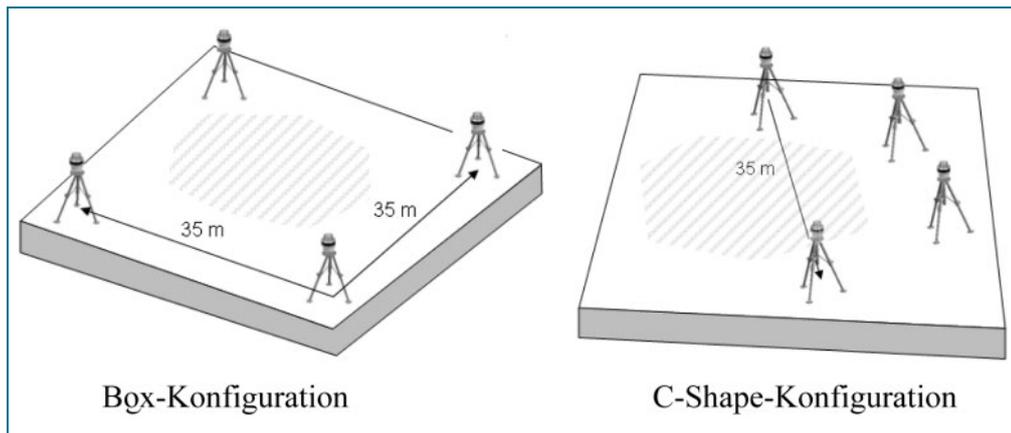


Abb. 11: Standard-Anordnungen für iGPS-Transmitter

Konfigurationen bewährt: die Anordnung in einer rechteckigen Box-Konfiguration und die Anordnung in einer halbkreisförmigen C-Shape-Konfiguration. Ist die Box-Konfiguration für die meisten Anwendungen die ideale Aufstellmöglichkeit, so bietet sich die C-Shape-Konfiguration z.B. dann an, wenn ein sehr hohes Objekt vermessen werden muss, das in einer Box-Konfiguration die Transmitter der gegenüberliegenden Seite blockieren würde.

2.8 Verfahren der Punktbestimmung mit iGPS

Jede Messung kann entweder vom Rechner aus gestartet werden oder über einen Schalter am Messtaster. Dabei kann unterschieden werden, ob kinematisch oder statisch gemessen werden soll.

Statische Messungen sind dann vorzuziehen, wenn man Einzelpunkte mit größtmöglicher Genauigkeit bestimmen will. Dabei wird in einem 1 Hz-Takt eine präzise Position berechnet, resultierend aus den einzelnen Raumvektoren von jedem Transmitter zum Sensor, die mit 35 bis 40 Hz registriert werden.

Ein Messtaster wird als Einheit aus mehreren Einzelsensoren ausgewertet, deren Geometrie vorher definiert werden muss. Dabei kann unterschieden werden, ob in der Ausgleichung die Messtaster-Geometrie als stabil angenommen wird und Messungenauigkeiten auf die Raumvektoren bezogen werden oder ob jeder Einzelsensor innerhalb des Messtasters als unabhängiges Bauteil betrachtet wird. Beide Varianten können in einem dreidimensionalen Übersichtsfenster mit den spezifischen Fehlervektoren angezeigt und gespeichert werden. Raumvektoren, deren Abweichung vom ausgeglichenen Punkt zu groß ist, werden als Ausreißer markiert und von der Punktbestimmung ausgeschlossen. Die Messung zu einem angetasteten Punkt wird insgesamt verworfen, wenn die Koordinatendifferenzen zwischen den zunächst einzeln bestimmten Sensorkoordinaten zu stark von der bekannten Messtaster-Geometrie abweichen (PointFit) oder bei einer gemeinsamen Ausgleichung des Sensorverbands (FrameFit) die Abweichungen der Raumvektoren zu groß werden.

Kinematische Messungen eignen sich vor allem zum Scannen von Flächen und Kanten, deren ursprüngliche Form aus der entstehenden Punktwolke modelliert werden kann. Dabei muss man jedoch Genauigkeitsverluste der

einzelnen gemessenen Punkte gegenüber denen der statischen Messung hinnehmen, da weniger Messungen zur Mittelbildung und Ausgleichung vorliegen. Da jeder Transmitter unabhängig arbeitet, kann eine weitaus größere Messfrequenz als die ursprünglichen 40 Hz der Transmitterrotation erreicht werden. Für jeden neu registrierten Raumvektor wird eine neue Position gebildet, sodass je nach Anzahl aktiver Transmitter im System die Messfrequenz größer als 100 Hz werden kann. Daher erhält ein solch beobachteter Messtaster auch den Zusatz „Rapid Update“.

Zur Verfolgung von bewegten Objekten bietet sich eine Weiterentwicklung des bisher verwirklichten kinematischen Modus an, die auch die Geschwindigkeit und Beschleunigung des Objekts mit Hilfe eines Kalmanfilters mitschätzt. Da dies jedoch noch nicht realisiert wurde, können keine Genauigkeitsaussagen getroffen werden.

2.9 Setup des iGPS-Systems

Da bei der Berechnung einzelner Punktpositionen sowohl Position als auch Orientierung jedes Transmitters bekannt sein müssen, werden diese über eine Bündelblockausgleichung bestimmt, bei der von verschiedenen Positionen im Raum aus Horizontal- und Vertikalwinkel aller Transmitter erfasst werden. Diese Beobachtungspunkte werden im Messvolumen gleichmäßig verteilt, um möglichst gute Ergebnisse bei der Bündelblockausgleichung zu erhalten.

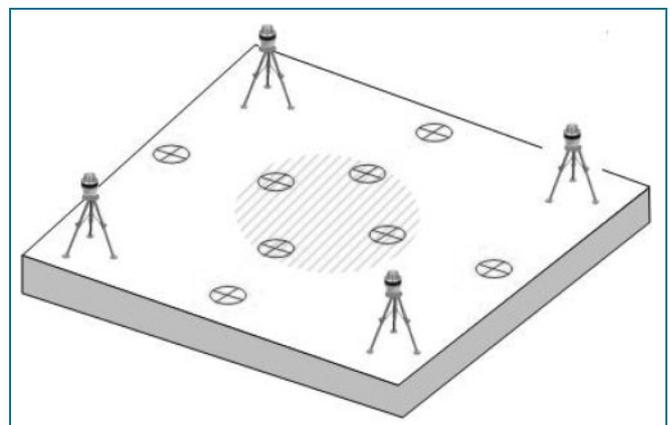


Abb. 12: Gleichmäßige Verteilung der Beobachtungspunkte beim Setup

Je nach Messaufgabe bieten sich zwei Varianten des Setups an: Zum einen kann ein sog. freies Setup (free network) eingerichtet werden, das sich besonders für kurzzeitige Messungen oder eine sehr störungsbelastete Umgebung eignet. Wird das iGPS jedoch für eine langfristige Aufgabe eingesetzt, so bietet sich vor allem das überwachte Setup an (monument network).

In beiden Fällen werden die Beobachtungspunkte gleichmäßig im Messvolumen verteilt, um möglichst gute Ergebnisse bei der Bündelblockausgleichung zu erhalten. Beim überwachten Setup werden diese Punkte jedoch fest installiert und ihre Stabilität muss genauso streng gewahrt werden wie die der Transmitter. Diese Punkte werden verwendet, um vor jeder Punktberechnung zu überprüfen, ob sich die Netzkonfiguration verändert hat und um geringe Positionsänderungen bei den Transmittern auszugleichen. Da bei der Berechnung jeweils die vorangegangene Konstellation als Ausgangswert verwendet werden kann, ist die Bündelblockausgleichung nicht nur zuverlässig lösbar, sondern auch in der geforderten Geschwindigkeit von wenigen Millisekunden durchführbar.

Beim freien Setup findet keine Kontrolle der Netzkonfiguration statt, da die Beobachtungspunkte nicht stationär mit Sensoren besetzt werden, sondern nur zu Beginn der Messung oder in selbst gewählten Intervallen. Jeder Punkt wird mit einem Messtaster händisch erfasst und zur Bündelblockausgleichung hinzugefügt. Die Punkte werden jeweils für 2 bis 3 Sekunden aufgemessen, was bei der durchschnittlichen Messrate der Transmitter etwa 100 Einzelmessungen entspricht. Da die durchgeführten Messungen ausschließlich Winkelmessungen sind, muss zusätzlich ein bekannter Maßstab eingebracht werden, der das System skaliert. Hierzu eignet sich vor allem ein spezielles Abstandsnormal, da dessen Strecke deutlich größer ist als die Sensorentfernungen eines gewöhnlichen Messtasters wie z.B. der VectorBar mit einem Sensorabstand von ca. 200 mm.

Ein erfolgreiches Setup für Messungen im Submillimeterbereich zeichnet sich durch kleine Verbesserungen der einzelnen Raumvektoren bei den jeweiligen Beobachtungspunkten aus. Als Richtwert gilt, dass die Verbesserungen bei kleineren Netzen nicht über 0,1 mm liegen sollten.

Da jeder Transmitter lediglich einen Stromanschluss benötigt und permanent in Betrieb sein kann, ist es möglich, ihn auch an schwerer zugänglichen Stellen zu installieren, wie beispielsweise an Stützen der Halle in einer Höhe, von der man den gesamten Messbereich überblicken kann. Verwendet man ein überwacht Setup oder kann man beim freien Setup die langfristige Stabilität der Transmitter gewährleisten, so hat dies zwei Vorteile: Zum einen benötigt man im Gegensatz zu anderen Messsystemen keine Initialisierung und ist sofort messbereit. Zum anderen befindet man sich immer im gleichen lokalen Koordinatensystem und kann damit auch zurückliegende ältere Messungen oder Werte eines benachbarten Messplatzes mit den aktuellen vergleichen, ohne Verknüpfungspunkte zur Transformation der verschiedenen lokalen Koordinatensysteme zu benötigen.

3 Einige Untersuchungen zur Messgenauigkeit und zum Einfluss von Störfaktoren auf iGPS

3.1 Genauigkeit des iGPS unter Idealbedingungen

Im Rahmen des Forschungsprojekts USOFI wurden an der Hochschule Karlsruhe sowohl die Genauigkeit des iGPS unter optimalen Bedingungen als auch die unter realen Bedingungen auftretenden Fehlereinflüsse untersucht, die sich besonders stark auf die Genauigkeit oder die Zuverlässigkeit auswirken. Diese Genauigkeitsuntersuchung wurde jedoch auf ein freies Setup begrenzt ohne eine Systemüberwachung mit Hilfe von Stabilpunkten, da diese Möglichkeit erst seit kurzem realisiert wurde.

Ideale Messbedingungen mit gleichmäßig temperierter Umgebung, stabiler, erschütterungsfreier Aufstellung und geringem Umgebungslicht, wie sie im Messlabor weitgehend vorliegen, lassen optimale Messgenauigkeiten erwar-

ten. Um die dabei zu erzielenden Genauigkeiten zu verifizieren, wurde ein rasterförmiges Referenzpunktfeld erstellt. Als Referenz für die Betrachtungen dienten Sollkoordinaten, die mit einem Lasertracker bestimmt wurden und im Mittel über alle Punkte einen dreidimensionalen mittleren Punktfehler von $\bar{\sigma}_P = 0,02$ mm bei einem maximalen mittleren Punktfehler von $\sigma_P = 0,03$ mm aufwiesen. Im Vergleich zu den durch iGPS zu erzielenden Messgenauigkeiten sind diese Koordinaten als wahre Werte anzusehen.

Dieses Punktfeld wurde mit iGPS mehrfach aufgenommen, mit jeweils zuvor neu bestimmtem freien Setup und Transformation auf das Referenzfeld. Vergleicht man die entstandenen Differenzen so fällt auf, dass die aufgrund der Schnittbedingungen der Strahlen am Messpunkt zu erwartenden Fehlereinflüsse stets die größte Fehlerkomponente war. Doch auch eine ungleiche Verteilung der Setup-Beobachtungspunkte beeinflusst das System negativ, wenn Transmitter in eine bestimmte Richtung systematisch schlechter bestimmt sind.

Bei optimalen Bedingungen (Box-Konfiguration) betrug der dreidimensionale mittlere Punktfehler aller Punkte über 13 Setups mit je 4 Messzyklen $\bar{\sigma}_P = 0,15$ mm, wobei die Standardabweichung in der Höhe mit 0,05 mm für Z deutlich geringer ausfiel als in der Lage mit 0,09 mm in X bzw. Y. Dies resultiert einerseits aus den für die Höhe besseren Schnittwinkeln als auch andererseits aus den Systemeigenschaften, da zur Bestimmung des Höhenwinkels nur die beiden Laserfächer beitragen, während zur

Bestimmung der Richtung auch das Referenzsignal herangezogen werden muss.

In der C-Shape-Aufstellung ergibt sich eine hufeisenförmige Genauigkeitsverteilung aus den Schnittbedingungen. Der Genauigkeitsabfall gegenüber der optimal verteilten Box-Aufstellung kann dabei bis zu 40 % betragen. In dem in Abb. 13 dargestellten Fall wird der Genauigkeitsabfall zusätzlich durch den geringen Abstand der Transmitter zu den äußeren Punkten verstärkt. Positioniert man sein Messobjekt jedoch im optimalen Bereich, so erreicht man mit einem mittleren Punktfehler von etwa 0,1 mm die gleiche Genauigkeit wie in der Mitte der Box-Aufstellung.

3.2 Auswirkungen von Störeinflüssen auf iGPS-Messungen

Bei der Anwendung des Messsystems in der industriellen Fertigung muss mit unterschiedlichen Störungen und Fehlereinflüssen gerechnet werden, so dass die unter optimalen Bedingungen erzielbare Genauigkeit nicht immer erreicht werden kann.

Durch die Filtereigenschaften des Sensorglases gelangt nur sehr wenig Störlicht zum Sensor. Punktuelle Lichtquellen, beispielsweise durch Schweißarbeiten, senden meist nicht in dem begrenzten infraroten Wellenlängenbereich, den das Filterglas passieren lässt. Dennoch registrierte Störlichtimpulse lassen sich von den Messsignalen dadurch unterscheiden, dass keine Wiederholung in den

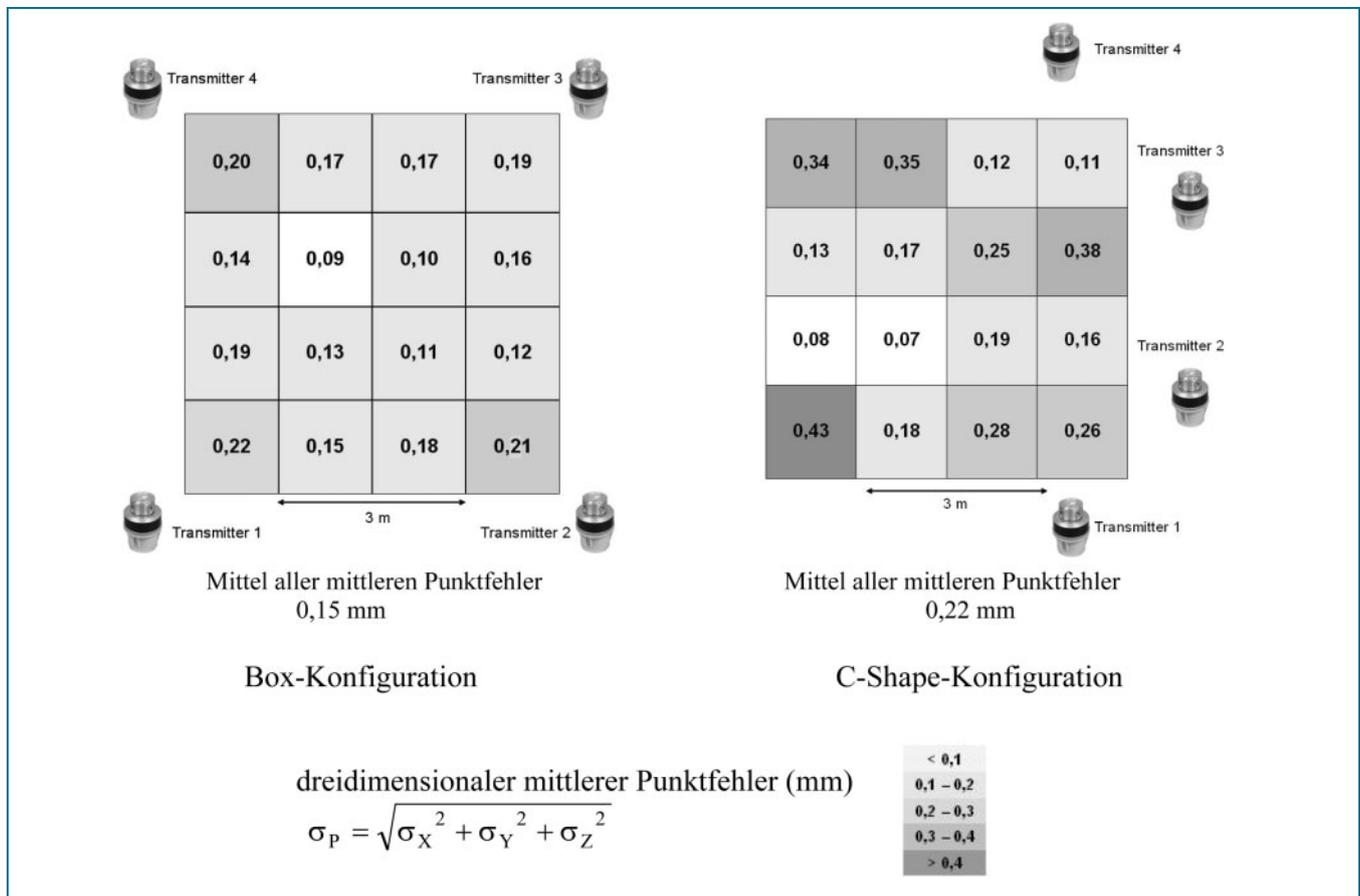


Abb. 13: Verteilung der Genauigkeiten im 5 x 5 m Testfeld (Box-Konfiguration)

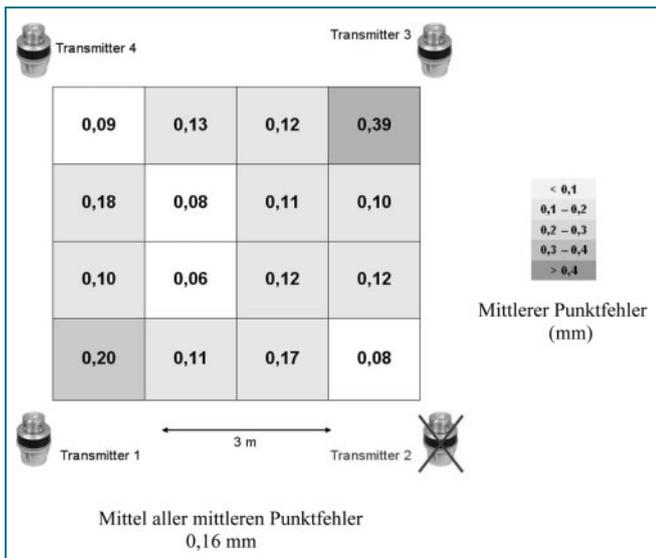


Abb. 14: Mittlerer Punktfehler beim Blockieren eines Transmitters

aufgrund der verwendeten Transmitter zu erwartenden Frequenzen auftritt. Eine Anhebung der gesamten Helligkeit durch nahe Leuchtstoffröhren oder insbesondere durch Sonnenlicht verringert jedoch die Reichweite des Systems deutlich, da sich Signale weit entfernter Transmitter in ihrer Signalstärke nur schwer vom Grundrauschen trennen lassen. Auch die Messgenauigkeit nimmt bei großer Umgebungshelligkeit ab, insbesondere wenn Messungen bei Sonnenschein im Außenbereich durchgeführt werden (LANDGRAF, 2007).

3.2.1 Einfluss von Sichthindernisse zu einem oder mehreren Transmittern

Eine häufige Störung bei praktischen Messungen entsteht durch Sichthindernisse zwischen einem oder mehreren

der Transmitter und dem Sensor. Dabei muss zwischen zwei verschiedenen Effekten unterschieden werden:

- Zum einen bewirkt das Blockieren von Transmittern einen Genauigkeitsabfall über das gesamte Messvolumen, der aus der geringeren Redundanz und den veränderten Schnittbedingungen der verbliebenen Strahlen resultiert.
- Bei Testmessungen wurden darüber hinaus systematisch wirkende Fehlereinflüsse beim Blockieren eines Transmitters festgestellt.

Der Vergleich der erzielbaren Genauigkeit bei einer Box-Aufstellung unter idealen Bedingungen (Abb. 13) mit der Situation bei Blockierung eines Transmitters (Abb. 14) zeigt, dass durch die Blockierung im größten Teil des Messvolumens ein Genauigkeitsabfall von etwa 10 % hervorgerufen wird.

Die systematischen Fehlereinflüsse wirken sich insbesondere dann aus, wenn es auf dem Messobjekt Bereiche gibt, in denen die Sicht zu unterschiedlichen Transmittern blockiert ist. Die bei den Testmessungen festgestellten Systematiken lassen sich auf Ungenauigkeiten der aus dem Setup bestimmten Standpunktskoordinaten und Orientierungen der einzelnen Transmitter zurückführen sowie auf systematische, abstandsabhängige Fehler bei der Detektion der Transmittersignale. Nach Herstellerangaben sollen letztere inzwischen durch ein neues Kalibrierungsverfahren der Transmitter weitgehend eliminiert worden sein. Bei den im Testfeld durchgeführten Testmessungen ergaben sich systematische Abweichungen von etwa 0,1 mm, wenn einer der Transmitter blockiert war.

Wenn bei den Testmessungen zwei der vier Transmitter blockiert wurden, zeigte sich, dass die veränderten Schnittbedingungen den entscheidenden Faktor für den Genauigkeitsverlust darstellten. Da die Punkte nahe der Verbindungslinie der verbliebenen Transmitter besonders schleifend schneidende Signalstrahlen aufweisen, sind die Ergebnisse einer Blockierung der gegenüberliegenden

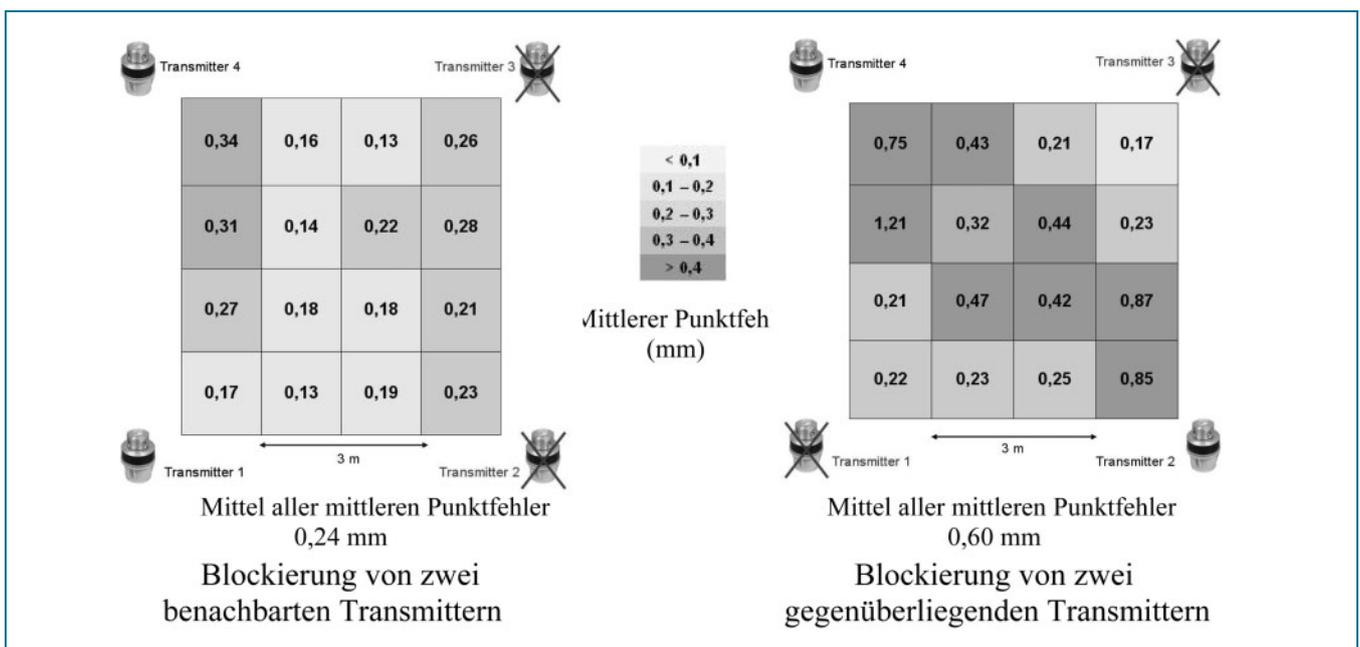


Abb. 15: Mittlere Punktfehler bei Blockierung der Sicht zu Transmittern

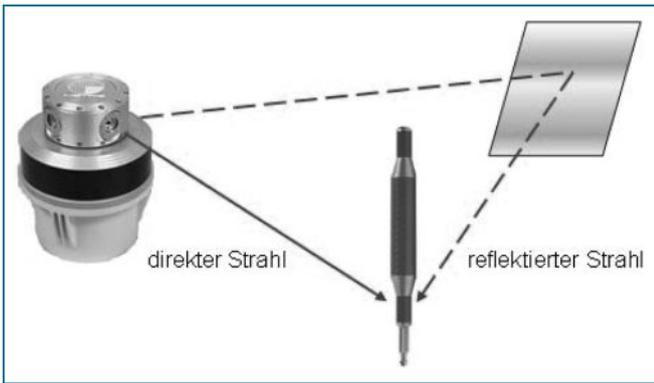


Abb. 16: Reflexion an spiegelnder Oberfläche führt zu Mehrweg-Effekten (MultiPath)

Transmitter besonders ungünstig und mit Unsicherheiten bis über einen Millimeter behaftet.

3.2.2 Mehrwegeffekte bei iGPS

Mehrwegeffekte durch Reflexionen des Messsignals zwischen Sender und Empfänger treten bei vielen Messsystemen auf, die mit elektromagnetischen Wellen arbeiten. Im Einsatzbereich von Industriemesssystemen treten häufig in der Umgebung und auch am Messobjekt selbst lackierte, glänzende oder spiegelnde Oberflächen auf, die das Messsignal stark reflektieren. Durch die Reflexion der Signale der iGPS-Transmitter an unterschiedlichen Stellen können diese auf unterschiedlichen Wegen zum Sensor gelangen. Dadurch können aus einem Sendesignal mehrere Empfangssignale generiert werden, die von der Software oder durch spezielle Gegenmaßnahmen in Original-Signal und Störsignal getrennt werden müssen.

Bei der Analyse der Auswirkung der Mehrwegeffekte muss das Referenzsignal getrennt von den beiden Flächen-signalen betrachtet werden. Das Referenzsignal wird zu Beginn jeder zweiten Umdrehung kurz in alle Richtungen des Messraums gesandt. Die Lichtimpulse des Referenzsignals erreichen den Sensor nahezu zur gleichen Zeit, auch wenn sie an beliebig vielen Oberflächen reflektiert werden, da der durch die Reflexion längere Weg aufgrund der Lichtgeschwindigkeit nur zu Verzögerungen führt, die in der Regel die Auflösung der Zeitmessung nicht überschreiten. Im Vergleich zur Situation ohne Reflexion besitzen diese Signale also lediglich eine etwas erhöhte Amplitude und verfälschen den Empfangszeitpunkt nicht.

Erhebliche Auswirkungen können jedoch Reflexionen der Laserfächer haben. Durch die Rotation des Transmitterkopfes erfolgt die Reflexion an einem Objekt, das einige Meter von der Verbindungslinie vom Transmitter zum Sensor entfernt stehen kann, zeitlich deutlich vor oder nach der Erfassung des direkten Messstrahls im Sensor. Der Zeitunterschied ergibt sich aus dem Unterschied von Richtung und Höhenwinkel zum Sensor bzw. zum reflektierenden Objekt. Die reflektierten Laserflächensignale wiederholen sich mit gleicher Frequenz wie die direkten Signale und werden daher dem gleichen Transmitter zugeordnet. Sie sind zwar aufgrund der Reflexion schwächer als das direkte Signal, doch die Amplitude der jeweiligen Impulse wird im System nicht erfasst und kann daher nicht direkt zur Unterscheidung herangezogen werden.

Ein Mehrwegeffekt wird im System dann erkannt, wenn für einen Transmitter mehr als drei Signale gleicher Frequenz empfangen werden. Die jeweilige Messung dieses Transmitters wird fortan mit der Eigenschaft „MultiPath“ gekennzeichnet, sodass der Anwender Gegenmaßnahmen ergreifen kann. Neben einer mechanischen Abdeckung der Reflexionsstelle kann dies dadurch geschehen, dass der Anwender den NoiseFloor-Wert verändert, den Schwellwert beim Signalabgriff, um die etwas schwächeren reflektierten Strahlen herauszufiltern. Da der NoiseFloor-Wert jedoch in gleicher Weise für alle Signale von allen Transmittern verwendet wird, reduziert sich damit auch die Messreichweite. Insbesondere bei Messpunkten, an denen der reflektierte Transmitter sehr nah ist, kann das reflektierte Signal vom nahen Transmitter eine größere Signalstärke aufweisen als die direkten Signale weiter entfernter Transmitter, sodass bei einer Anpassung des NoiseFloor nicht nur das reflektierte Signal herausgefiltert wird, sondern auch alle unverfälschten schwächeren Signale anderer Transmitter. In der Auswertesoftware wird MultiPath nicht speziell behandelt, jedoch weisen einzelne reflektierte Strahlen normalerweise große Fehlervektoren zu der ausgeglichenen Punktposition auf und werden daraufhin aus der Punktberechnung indirekt als Ausreißer ausgeschlossen. Kritisch ist jedoch eine Reflexion wenn sie sehr nah am Sensor stattfindet und sich damit Original- und reflektierter Strahl kaum unterscheiden, z.B. wenn das Signal direkt an der gemessenen Fläche gespiegelt wird.

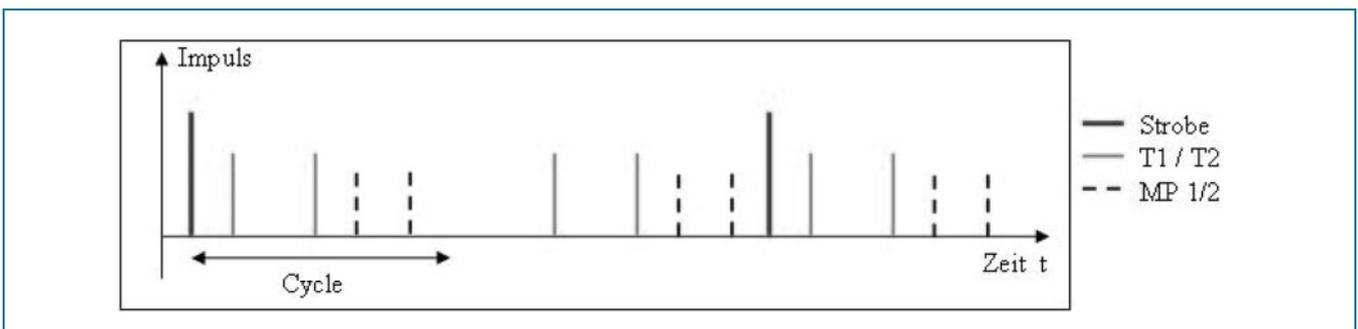


Abb. 17: Vereinfachtes Signalbild eines Transmitters am Sensor mit Strobe-Signal, den beiden Laserfächern T1 und T2 und den durch MultiPath daraus erzeugten Signalen MP1 und MP2

4 Zusammenfassung

Durch die mit iGPS realisierte Messtechnologie können Präzisionsvermessungen in relativ einfacher Weise in Messvolumen durchgeführt werden, die ganze Industriehallen umfassen können. Unter optimalen Bedingungen lassen sich für kleinere Messbereiche mittlere Punktfehler von etwa 0,1 bis 0,2 mm erreichen, aber auch bei größeren Messvolumen und schlechteren Voraussetzungen können meist Genauigkeiten im Submillimeterbereich erzielt werden.

Die Nutzung des Messsystems gestaltet sich besonders komfortabel, wenn die Transmitter fest installiert und für vordefinierte Messaufgaben verwendet werden. Die Auswertesoftware kann dann auf die anfallenden Messaufgaben angepasst und nach Nutzerwünschen ausgestaltet werden. Es ist jedoch auch ein flexibler Einsatz des Messsystems mit Aufbau an unterschiedlichen Orten für verschiedenste Zwecke möglich. Dann kann mit Standardeinstellungen gearbeitet werden und es ist vor Beginn jeder Messung ein Setup durchzuführen. Das System ist mit Einschränkungen im Außenbereich einsetzbar, hat seine Stärken jedoch vor allem bei Indoor-Anwendungen. Besonders in Anwendungen, die zugleich eine größere Reichweite und Submillimetergenauigkeit für mehrere gleichzeitig erfasste Positionen fordern, z.B. zur Koordination bei der Montage größerer Anbauteile, hat dieses neu entwickelte System großes Potential.

5 Ausblick

Die Hard- und Softwareentwicklung des iGPS kann keineswegs als abgeschlossen gelten. Durch die hohe Frequenz von über 40 Hz, mit der die Messsignale erfasst werden, bieten sich kinematische Anwendungen von iGPS an. Die Weiterentwicklung der hierzu erforderlichen Auswerte- und Filteralgorithmen kann weitere Einsatzfelder erschließen. Eine andere Anwendung von iGPS ist es, die Position und Orientierung anderer, nicht ortsfester Messsensoren, wie z.B. eines Messarms oder eines Scanners, zu bestimmen und damit deren Messungen in Bezug zu einem übergeordneten Koordinatensystem zu bringen. Die Integration von iGPS mit anderen Messsystemen wird daher vorangetrieben. Durch seine Vielseitigkeit steht iGPS künftig bei vielen Messaufgaben als Alternative oder Ergänzung zu den bisherigen Messverfahren bereit und ermöglicht auch neue Lösungsansätze.

Literaturverzeichnis

- [1] HEDGES, T. u.a. (2003): Position Measurement System and Method using Cone Math Calibration. US Patent No. US 6,535,282 B2
- [2] HEDGES, T. u.a. (2002): Constellation 3di: Error Budget and Specifications, Whitepaper, ArcSecond, Dulles, Virginia
- [3] KELM, A. (2006): Indoor GPS: Systemuntersuchung anhand von statischen und dynamischen Messungen. Diplomarbeit an der Hafen City Universität Hamburg
- [4] KRAUTSCHNEIDER, R. (2006): Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des Messsystems IndoorGPS. Diplomarbeit im Studiengang Vermessung und Geomatik, Hochschule Karlsruhe
- [5] KRAUTSCHNEIDER, R.; KELM, A. (2007): Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des Messsystems iGPS. VDVmagazin 3/07, S. 186–192
- [6] LANDGRAF, C. (2007): Genauigkeitsuntersuchungen zur X-Station. Diplomarbeit am Geodätischen Institut TU Dresden
- [7] iGPS Data Sheet V1.1 (2007), Metris, Leuven
- [8] iGPS User's Guide (2006), Metris, Leuven

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. TILMAN MÜLLER und Dipl.-Ing. (FH) JULIA SCHWENDEMANN
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
Fakultät Geomatik
Moltkestraße 30
D-76133 Karlsruhe
E-Mail: tilman.mueller@hs-karlsruhe.de
julia.schwendemann@hs-karlsruhe.de