

TRIMBLE X7 – Prinzipien der Selbstkalibrierung¹

TRIMBLE X7 – Principles of Self-Calibration

Michael Vogel

Mit der Einführung des 3D-Laserscanners Trimble X7 wird zum ersten Mal, neben einer Vielzahl von Innovationen, ein Verfahren inklusive Vorrichtung zur Bestimmung der Achsenfehler im Instrumentarium angeboten. Der Benutzer wird damit von der Prüfung des Messsystems entlastet, auch entfallen so die regulären Intervalle für Service und Rekalibrierung. Hauptkomponente für die Selbstkalibrierung des Laserscanners von Trimble ist ein im Instrumentenfuß integrierter Autokollimator, welcher fortan Bestandteil eines Vermessungsinstruments ist. Instrumenteninterne Sensoren überwachen Temperaturänderungen und aktivieren automatisch die Selbstkalibrierung. Damit erfährt das Trimble X7 eine aktuelle Kalibrierung und es wird garantiert, dass die Genauigkeit konform der Spezifikation eingehalten wird.

Schlüsselwörter: Laserscanner, Selbstkalibrierung, Achsenfehler, Autokollimation

By the introduction of the 3D laser scanner Trimble X7 the first time a device for in field axis errors self calibration beside many other types of innovations is provided. The user will be discharge from permanently checks of his equipment, regularly service and calibration cycles will be reduced and minimizing downtime. The main component for self calibration of the scanner from Trimble is an auto-collimator integrated in the instrument base part first time at all. Instrument internal sensors are permanently measuring internal temperature changes and drifts and activating the self calibration automatically in case it is required. Therefore, the calibration date of the Trimble X7 will be updated/refreshed to guarantee that accuracy is confirming the specification.

Keywords: Laser scanning, self-calibration, accuracy, axis errors, auto-collimation

1 GRUNDLAGEN

1.1 Einführung

Bekanntlich sind die Achsenfehler, zunehmend Achsenabweichung genannt, einer Totalstation oder auch eines Laserscanners nur endlich justierbar und auch Änderungen unterworfen, deren Ursache sowohl auf die Umgebungstemperatur als auch auf Stoß- bzw. Schockeinwirkung zurückzuführen sind. Bei herkömmlichen Totalstationen hat der Benutzer die Möglichkeit einer Feldkalibrierung, mittels derer die Achsenfehler erster Ordnung bestimmt werden können. Grundlage bietet hierfür die Möglichkeit des Alhidadenaufbaus zur Zweilagennmessung gegen einen oder mehrere Punkte in größerer Entfernung. In der Produktion als auch im Service sind

Kollimatoren in Benutzung, die Ziele im Unendlichen bei beschränktem Bauraum repräsentieren. Für Laserscanner ist das Prinzip der Achsenfehlerbestimmung nur bedingt anwendbar, da u. a. aufgrund der Architektur die klassische Zweilagennmessung hier nicht uneingeschränkt möglich ist und das herkömmliche Achsensystem eines Tachymeters ergänzt werden muss. Aufgeführt werden an dieser Stelle die Erweiterungen der Achsen mit Ablenk-, Motordrehachse, der 45°-Spiegel für die Strahlableitung und die Richtung der EDM-Laserachse.

¹ Überarbeitete Fassung des Beitrags „Vogel, M. (2022): TRIMBLE X7 – Prinzipien der Selbstkalibrierung“. In: Schriftenreihe des DVW, Band 101 (Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren 2022). Wißner, Augsburg.

1.2 Stand der Technik

Streng genommen wollen die reinen Achsenfehler vorzugsweise auf Ziele im Unendlichen oder großer Entfernung kalibriert bzw. bestimmt werden. Nur dann sind diese unbeeinflusst von Exzentrizitäten und ausschließlich auf Richtungen, also Winkel reduziert. Ursache der Exzentrizitäten ergeben sich bei einem Achsensystem eines Tachymeters bestehend aus Ziel-, Kipp- und Stehachse durch keinen gemeinsamen Schnittpunkt der Achsen. Durch mechanisches Design, kleine Fertigungstoleranzen und oder durch Justierungen bewegen sich die Exzentrizitäten im Bereich von wenigen 1/10 mm. Nur für den Fall, dass die Achsenfehlerbestimmung von diesen unbeeinflusst bleibt, ist der Lagefehler einer Messung immer gleich der Größe des Exzentrums selbst. Umgekehrt: Wird eine Achsenfehlerbestimmung auf Ziele im Nahbereich durchgeführt, ist diese mit den Exzentren bzw. deren Einflüssen korreliert. Ein Lagefehler einer anschließenden Messung auf größere Entfernung kann dadurch deutlich fehlerbehaftet sein.

Die Bestimmung der Achsenfehler einer Totalstation erfolgt vorzugsweise durch Zweilagmessungen zu mehreren Zielen unter größerer Entfernung mit unterschiedlicher vertikaler Anordnung.

Die Bestimmung der Achsenfehler eines Scanners erfordert erheblich mehr Aufwand. Benutzt werden hierzu vorzugsweise großräumige (Pass-)Punktfelder – teilweise referenziert – mit übergeordneter Genauigkeit und absoluter Stabilitätsanforderung /Medić et al. 2020/. Ansätze von mathematisch-funktionalen Modellen nähern die mechanischen, physikalischen und optischen Funktionsweisen eines Scanners beschreibend an. Letztendlich erfolgt eine Parameterschätzung auf Basis von Beobachtungen, meist vollständiger Umdrehungen um Hz, von einem oder mehreren Standpunkten des Prüflings. Vorteilhaft erweist sich immer, wenn die Kalibrierung eines Systems nahe dem tatsächlichen Anwendungsfall erfolgt.

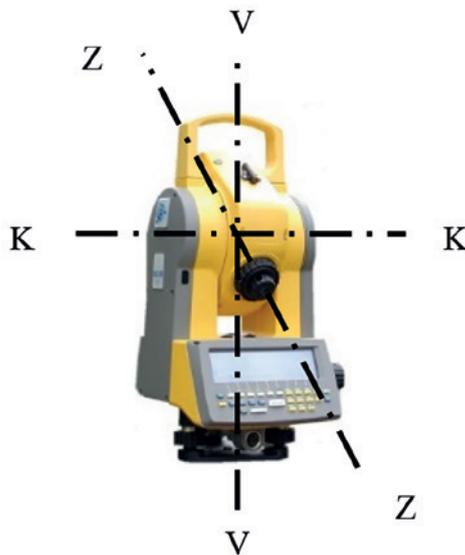


Abb. 1 | Tachymeterachsen eines Trimble 3600

1.3 Die Achsenfehlerkorrektur einer Totalstation

Die Achsenfehler einer herkömmlichen Totalstation beschreiben und erfassen die Abweichung der folgenden Achsenpaare von der strengen Rechtwinkligkeit zueinander /Deumlich & Staiger 2002/:

- Der Zielachsenfehler *c* (horizontaler Kollimationsfehler) tritt auf, wenn die Zielachse ZZ nicht senkrecht zur Kippachse KK liegt.
- Der Kippachsenfehler *k* beschreibt die Abweichung der Orthogonalität von der Kippachse KK zur Stehachse VV eines Instruments.
- Ein Höhenindexfehler *i* (vertikaler Kollimationsfehler) ist ein Offset auf der am Vertikalteilkreis abgelesenen Richtung V_a damit u. a. die Bedingung, dass bei einer Zielung im Horizont eine Ablesung von 100 gon erfüllt wird.

1.4 Korrekturen der Achsenfehler

Die mathematisch exakte Korrektur, d.h. der Einfluss der Achsenfehler auf die Richtungselemente der Polarkoordinaten, liefert /Stahlberg 1997/:

$$\tan(\Delta Hz) = \frac{\cos(k) \cdot \tan(c) + \sin(k) \cdot \cos(Va + i)}{\sin(Va + i)}; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \cos(V) &= \frac{\sin(k) \cdot \tan(c) - \cos(k) \cdot \cos(Va + i)}{\sqrt{1 + \tan(c)^2}} \\ &= \cos(c) \cdot [\sin(k) \cdot \tan(c) - \cos(k) \cdot \cos(Va + i)]. \quad (2) \end{aligned}$$

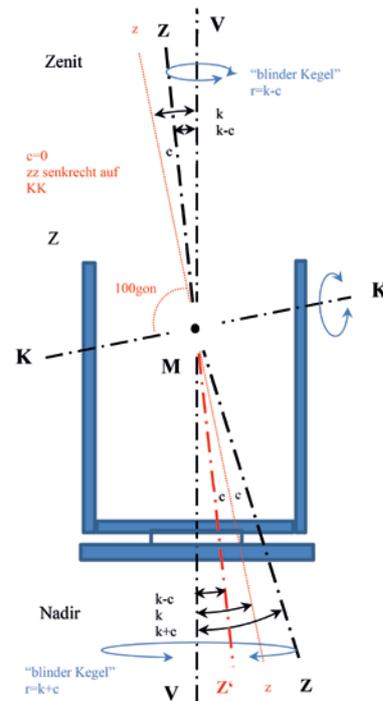


Abb. 2 | Instrumentenachsen im Zenit und Nadir-Seitenansicht

ΔHz wird dabei als Zuschlag auf eine vom Instrument abgelesene horizontale Richtung Hza gewertet. Die um die Achsenfehler korrigierte Horizontalrichtung ergibt sich demzufolge aus:

$$Hz = \Delta Hz + Hza. \quad (3)$$

Zur Interpretation der Gl. (1) und Gl. (2).

- Der Zuschlag ΔHz konvergiert gegen ± 100 gon für Zielungen im Nadir bzw. Zenit.
- Erstmals wird eine vertikale Richtung V korrigierend berechnet wobei $V = k \pm c$ für Zielungen im Nadir bzw. Zenit konvergiert. $V = k + c$ und $V = k - c$ definieren jeweils einen Radius im Zenit und Nadir bei Drehung um die Stehachse. Innerhalb diesem ist die Totalstation nicht in der Lage, eine Zielung zu ermöglichen. Die Achsenfehler in Summe bzw. Differenz sind verantwortlich für „blinde Kegel“ entlang der Stehachse.
- Das Mittel aus einer Zweilagennmessung gilt nur als fehlerfrei für die Horizontalrichtung und ausschließlich nur bei horizontalen Visuren auch für die Vertikalrichtung. Es sei denn, der vertikale Kollimationsfehler i ist bereits bekannt und entsprechend an die Vertikalrichtung angebracht /Stahlberg 1997/.

1.5 Wirkung von Achsenfehlern im Zenit und Nadir

Abb. 2 stellt schematisch eine Alhidade und ihre Drehachsen dar. Der Schnittpunkt aller Achsen wird hier als Mittelpunkt M bezeichnet. Wir betrachten nun zunächst den Fall, dass die Zielachse zz senkrecht auf der Kippachse KK steht, allerdings führen wir einen Kippachsenfehler k ein. Rotiert man in dieser Konstellation die Alhidade um die Stehachse VV , beschreibt die Achse zz sowohl im Zenit als auch im Nadir die Mantelfläche eines Kegels, wobei der Kegel exakt einen Öffnungsradius mit dem Winkel von k besitzt. Innerhalb des Kegels ist keine Visur oder Messung möglich, dieser beschreibt einen „blinden Kegel“ der je „unerreichbar“ bleibt.

Führt man jetzt in einem weiteren Schritt den Kollimationsfehler c ein, so ergibt sich für eine Zielung im Zenit der Kegel mit dem Radius $k - c$ und für Visuren in den Nadir der Kegelradius $k + c$. Unter Annahme, dass es eine Zielachse ZZ' gibt, die sich beidseitig vom Punkt M beliebig verlängern lässt, wäre diese für Beobachtungen in zwei Lagen geeignet – vorder- als auch rückseitig.

1.6 Übertrag auf Laserscanner

Betrachten wir ausschließlich den Scannvorgang ohne eine Drehung des Instruments um die Stehachse, also die horizontale Rotation des Scanners. Nun ist die Anzahl der Zielachsen bei einem Tachymeter mit koaxialem optischem Setup auf 1 begrenzt. Ein Scanner jedoch spannt eine Scanebene oder einen Scan-

fächer mit einer Vielzahl n von einzelnen Zielachsen auf. Die Mannigfaltigkeit der Achsen wird durch die Strahlablenkung des rotierenden Ablenkspiegels sowie durch die Messfrequenz des Entfernungsmessers bestimmt. Jedem Messpuls des Entfernungsmessers erfolgt idealerweise zeitsynchron eine Messung der vertikalen Richtung Va gelesen am Winkelencoder des rotierenden Spiegels.

Zusammenfassend gilt für $1, \dots, n$, wobei n die Anzahl der Messungen/Zielachsen pro Umdrehung des rotierenden Ablenkspiegels ist:

- V_{an} – unkorrigierte abgelesene Vertikalrichtung,
- c_n, i_n – horizontaler und vertikaler Kollimationsfehler einer Zielachse n ,
- k – als gemeinsamer und einziger Kippachsenfehler gültig für alle Zielachsen n .

Jeder Zielachse n kann ein individuelles Achsenfehlerpaar c_n und i_n zugeordnet und durch Anwendung der Gl. (1) und Gl. (2) entsprechend die Richtungselemente der Polarkoordinaten berechnet bzw. korrigiert werden.

2 DER AUFBAU DES TRIMBLE X7

2.1 Systemarchitektur

Das Grundkonzept der Alhidade gleicht dem einer herkömmlichen Totalstation. Ein X7 beinhaltet beide Achsenbaugruppen neben Antriebs- und Positioniersysteme als auch Winkelencoder mit diametralen Abtastköpfen /Vogel et al. 2020/. Anstelle des klassischen Teleskops wurde jedoch ein Scankopf integriert, welcher alle Komponenten eines Laserscanners enthält. Dazu zählen u.a. der EDM (Entfernungsmesser), der rotierende 45° -Umlenkspiegel mit Motor und Winkelencoder etc. Wichtig an dieser Stelle zu erwähnen ist, dass der komplette Scankopf um dessen eigene Achse mithilfe des vertikalen Alhidadenantriebs um die Kippachse gedreht und positioniert werden kann. Dies wird im weiteren Verlauf eine Schlüsselkomponente für die Selbstkalibrierung darstellen.

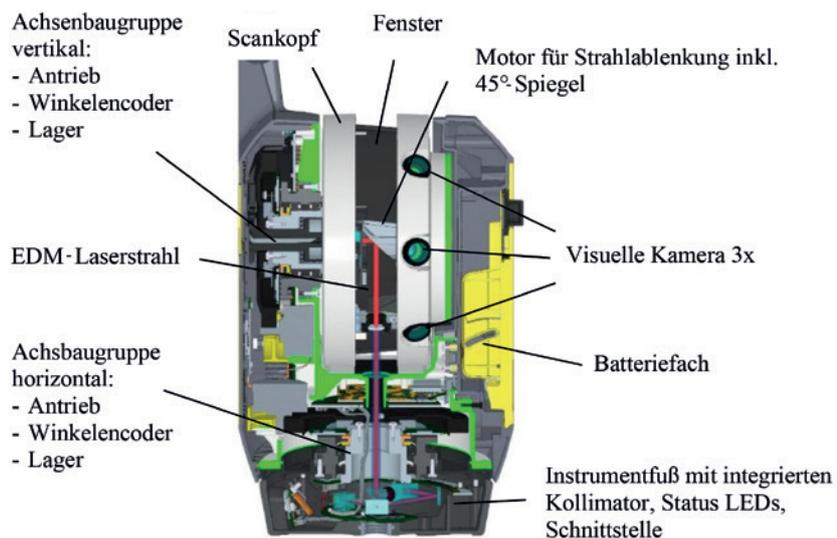


Abb. 3 | Aufbau Trimble X7

2.2 Scankopf im Detail

Folgende Komponenten im Scankopf seien ergänzend kurz vorgestellt und erklärt:

- Drei RGB-Kameras mit jeweils 10,5 MP dienen zur Panoramabildaufnahme, also der Kolorierung der 3D-Punktwolke im weiteren Verlauf. Die Verlängerungen der optischen Achsen schneiden sich gemeinsam im Mittelpunkt des Scankopfs.
- Ein zusätzlicher roter Laserpointer kann für vielfältige Anwendungszwecke genutzt werden, z.B. Einfügen von Markierung und Notizen in der 3D-Punktwolke, Absteckung oder auch Stationierungsaufgaben.
- Ein spezieller Autokollimationspiegel dient für die Selbstkalibrierung. Dieser ist sowohl vorder- als auch rückseitig optisch (an)messbar.
- Ein Neigungssensor dient zur Messung der Geräteineigung. Hierzu kann dieser unter Zuhilfenahme beider Antriebe in den Nullpunkt als auch um die Stehachse gedreht/bewegt werden. Damit kann jederzeit der Sensor sowohl kalibriert als auch Neigungen außerhalb des vom Sensor spezifizierten Arbeitsbereichs gemessen werden.

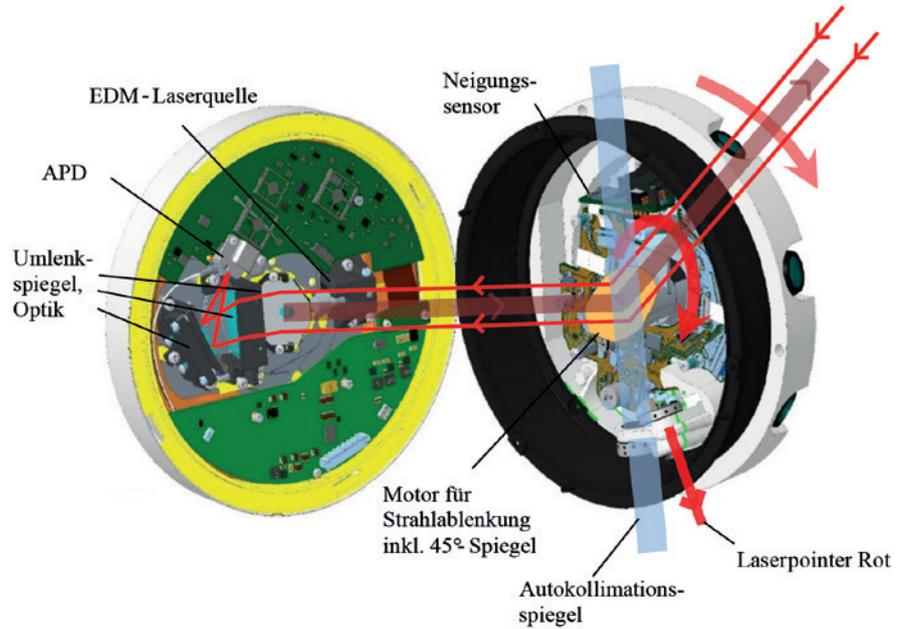


Abb. 4 | Sende- und Empfangsstrahlengang

2.3 Strahlengang im Kollimator – Instrumentenfuß

Im Instrumentenfuß, dem Dreifuß- oder Stativteller als festem Bauteil des Geräts, ist ein spezieller Kollimator integriert. Die optische Achse des Kollimators verläuft entlang der Stehachse in Richtung Zenit. Da die horizontale Drehachse als Hohlachse ausgeführt ist, kann dieser Kollimator ungehindert Strahlung detektieren, die vom Scankopf in Richtung Nadir gesendet wird.

Aufgrund des geringen Bau-raums muss der optische Pfad mehrfach gefal-ten und/oder um-ge-lenkt werden. Der Kollimator ist als Autokollimator ausgeführt, d.h. er kann ohne Umstände optische Spie-gel-flächen an-messen und deren Aus-ri-chtung bzgl. der optischen Achse detektieren. Dazu ist dieser mit einem Teilerwürfel für Sende- und Empfängerstrah-len-gang aus-ges-tat-tet.

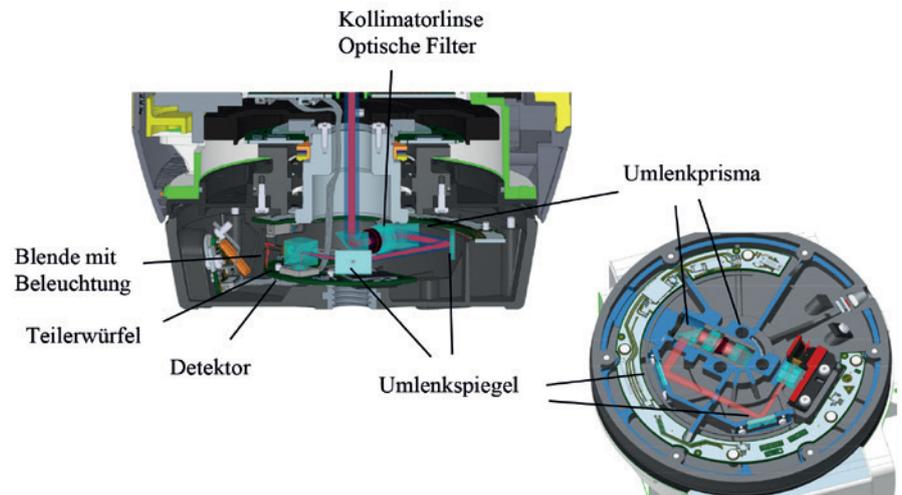


Abb. 5 | Kollimatoraufbau

3 DIE AXSENFEHLER EINES SCANNERS UND DEREN AUSWIRKUNG

Schematisch soll in diesem Abschnitt auf die Achsenfehler eines Scanners und deren Auswirkung eingegangen werden (Vogel et al. 2020). Einschränkung sei erwähnt, dass es sich dabei nicht um die strenge mathematische Modellierung handelt. Zudem wird ausschließlich auf die Fehler erster Ordnung eingegangen. Nehmen wir zunächst an, dass wir einen ideal justierten Scanner haben: Dabei erfüllen sämtliche Achsen die Orthogonalitätsanforderungen usw.

Unter der Voraussetzung, dass keine Rotation um H_z erfolgt, liegen alle gemessenen 3D-Punkte in einer idealen Ebene und in regelmäßiger Verteilung auf dieser.

Fügen wir nun in einem ersten Schritt einen Kippachsenfehler k hinzu, erhalten wir somit eine um k geneigte Scanebene.

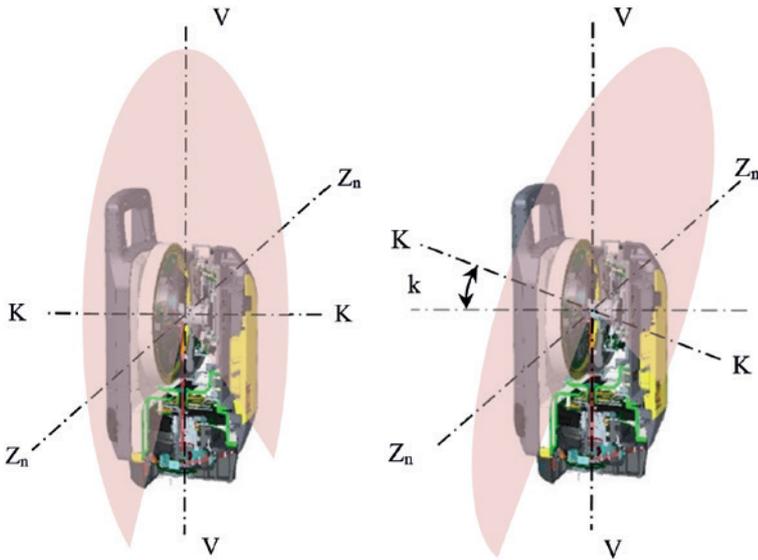


Abb. 6 | ideale Scanebene

Abb. 7 | Geneigte Scanebene

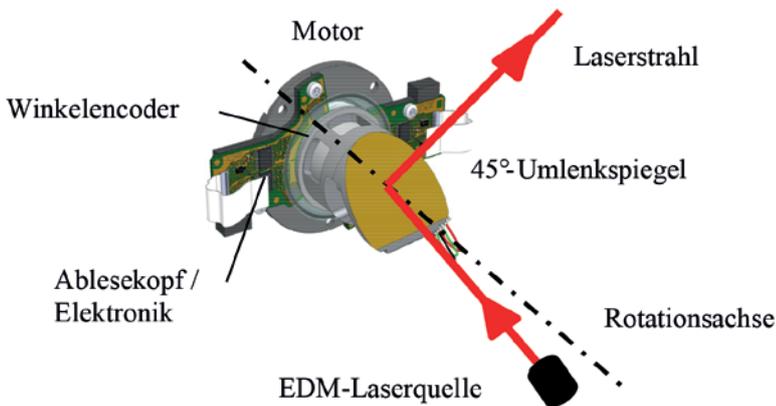


Abb. 8 | Umlenkeinheit

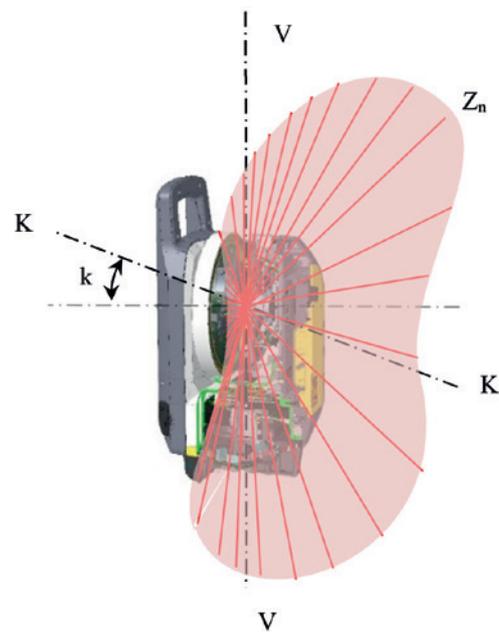


Abb. 9 | Reale Scanfigur

Das Kernelement eines Laserscanners ist der Motor mit 45°-Ab- bzw. -Umlenkspiegel und der EDM mit dessen Laserquelle. Daraus ergeben sich zwangsläufig mehrere zusätzliche Achsen und auch Bedingungen, die näher betrachtet werden müssen, um ihren Einfluss auf die Scanebene zu erschließen. Betrachten wir zunächst wieder den idealen Fall, d.h. der Umlenkspiegel besitzt exakt einen 45°-Winkel in Bezug zur Drehachse des Motors. Zusätzlich liegt parallel zur oder besser auf der Drehachse des Motors ebenfalls die EDM-Laserquelle und -Achse.

Unter der Annahme, dass der Umlenkspiegel einen Fehler hat und nicht exakt 45° beträgt, wird der Laserstrahl nicht exakt um 90° abgelenkt. Damit wird die finale Scanebene zu einem Kegel deformiert, d.h. der Scan pro vollständiger Motorumdrehung beschreibt einen Kegelmantel oder verläuft auf einem Kegelmantel.

Ist nun zudem die Achse der EDM-Laserquelle, die Laserachse, nicht identisch oder parallel mit der Rotationsachse des Motors, so wird auf dem Kegelmantel zusätzlich eine Sinuswelle entstehen.

Die Grafik/Simulation in Abb. 10 veranschaulicht die Charakteristik von horizontalen und vertikalen Kollimationsfehlern c_n und i_n in Abhängigkeit des vertikalen Ablenkswinkels des Laserstrahls. Die horizontalen und vertikalen Kollimationsfehler korrelieren miteinander. Dies lässt sich im Speziellen auf die Baugruppe der Stahlablenkung, den 45°- Umlenkswinkel und die Ausrichtung der Laserachse zurückführen. Die mathematische Analyse der harmonischen Funktionen mittels Phasen, Amplituden und Offsets

bietet Raum für die Modellierung und die Parameterschätzung einzelner Größen. Jedoch sei einschränkend erwähnt, dass nicht zwangsläufig alle Modellparameter aufgelöst werden können, da davon auszugehen ist, dass diverse Glieder in Korrelation vorliegen.

Der Vollständigkeit halber erwähnt seien neben den Effekten von Eigen- und Fremدمperatureinflüssen auch Transport und

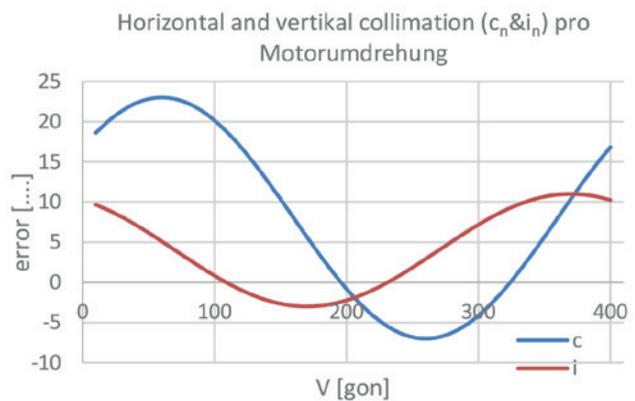


Abb. 10 | Simulation der Achsenfehler

Stoßbelastung als weitere Einflussgrößen, welche Wirkungen auf die Kollimationsfehler, also die Scanebene/Scanfigur, haben können.

- Es ist davon auszugehen, dass sich die räumliche Lage der Motordrehachse mit der Drehgeschwindigkeit ändert, ebenfalls auch der 45°-Winkel des Umlenkspiegels. Speziell die während der Rotation wirkenden Kräfte können eine Änderung des Spiegelwinkels zur Folge haben.
- Die Genauigkeit des Winkelmesssystems des rotierenden Motors.
- Optische Effekte des Scannerfensters können ebenfalls im geringen Umfang für Strahlablenkungen verantwortlich sein.
- Signal- und Laufzeiteffekte innerhalb und entlang der elektronischen Verarbeitung der Messdaten können dazu führen, dass Streckenmessung und Winkelmessung nicht zeitsynchron erfolgen.

Auch wenn oft von einer Zweilagennmessung eines Scanners gesprochen wird, ist diese nicht mit einer Zweilagennmessung einer Totalstation vergleichbar. Ein Scanner misst vorder- und rückseitig jeweils mit zwei verschiedenen Zielachsen Z_1 und Z_2 ein und denselben Messpunkt. Bei einer Totalstation wird ausschließlich mit ein und derselben Zielachse Z_1 bei der Umschlagsmessung ein und derselbe Messpunkt angemessen. Zwischen Instrumentenlage I und Instrumentenlage II besteht bekanntlich folgender Zusammenhang zwischen den Richtungen:

$$Hz_{II} = Hz_I \pm 200 \text{ gon}, \tag{4}$$

$$V_{II} = 400 \text{ gon} - V_I. \tag{5}$$

Im Fall des Scanners mit dessen Fehlerverteilung für Zielachsen Z_n (Abb. 10) liegen über die vertikale Richtung V keine konstanten

Fehleranteile c_n und i_n vor. Das heißt, bei einer Zweilagennmessung mittels Scanner unter Verwendung von zwei Zielachsen und den Bedingungen von Gl. (4) und Gl. (5) ist das Mittel für einen Messpunkt nicht zwangsläufig als fehlerfrei anzunehmen (siehe Abschnitt 1.4). Es werden unter gewissen Voraussetzungen höchstens konstante Anteile eliminiert, nicht aber beispielsweise die Amplitude der Sinus- oder Kosinus-Funktionen.

4 PRINZIPIEN DER SELBSTKALIBRIERUNG NACH /VOGEL ET AL. 2020/ UND /TRIMBLE JENA GMBH 2019/

4.1 Die Messung des Kippachsenfehlers k

Die Messung des Kippachsenfehler k erfolgt in Autokollimation. Dazu wird eine Zielung der Spiegelnormalen unter Zuhilfenahme des vertikalen Antriebs und Positionierungssystems in Richtung Nadir durchgeführt. Der Autokollimator projiziert dessen Blende ins Unendliche. Diese Strahlung wird vom Spiegel in sich reflektiert und entsprechend rückwärtig auf den Detektor abgebildet. Es entsteht ein Bild der Blende auf dem Detektor, welches von der Spiegelfläche reflektiert wird.

Betrachten wir nun das Detektorbild unter der Abfolge von mehreren Bewegungsabläufen unter Benutzung des horizontalen als auch vertikalen Antrieb- und Positionierungssystems bei gleichzeitiger Bildaufnahme mittels Autokollimator. Vorausgesetzt wird an dieser Stelle, dass die Messung und Bildauswertung von z.B.

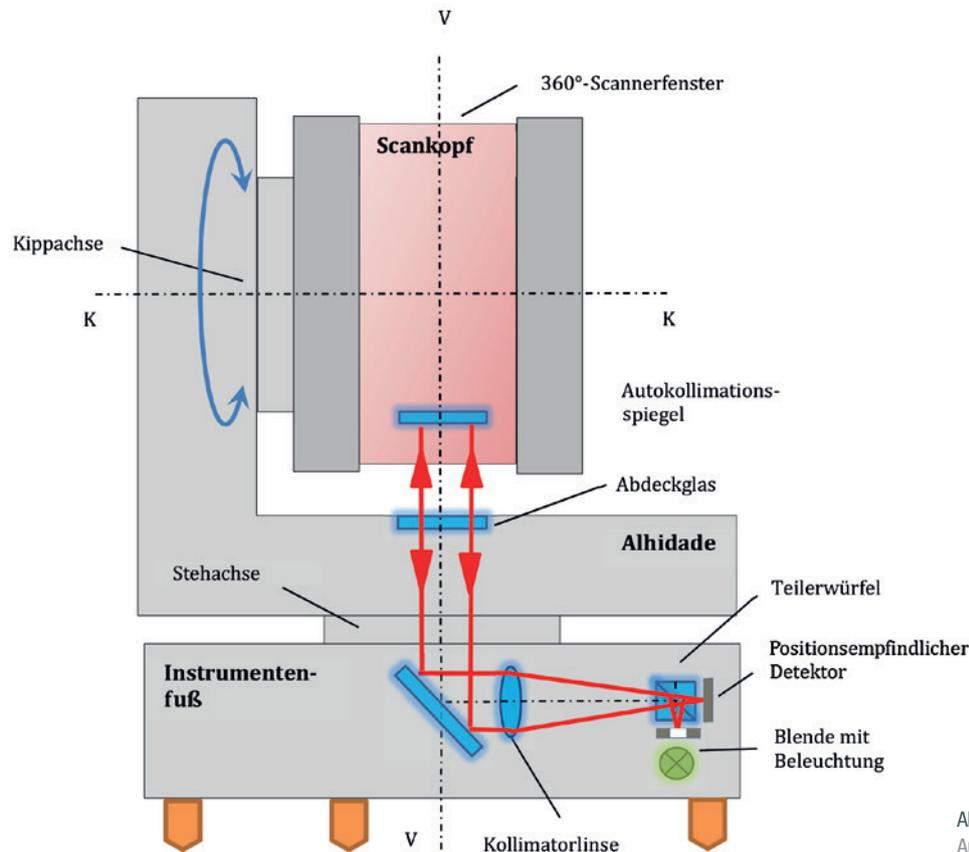


Abb. 11 | Optischer Strahlengang Autokollimation

Schwerpunkten dem Stand der Technik zuzuordnen ist und nicht näher erläutert wird.

Für den Fall, dass der V-Winkel konstant gehalten wird und wir ausschließlich z.B. vier Hz-Position (0, 100, 200 und 300 gon) nacheinander anfahren, entsteht aus den vier adäquaten Messpunkten des Detektors ein Kreis. Bei diesem Kreis ist nicht der Radius, sondern vielmehr der Mittelpunkt entscheidend. Der Mittelpunkt repräsentiert den Durchstoßpunkt der Stehachse mit/auf dem Detektor.

Für den Fall, dass der Hz-Winkel konstant gehalten wird und wir ausschließlich verschiedene V-Positionen (mindestens zwei) nacheinander anfahren, wird auf dem Detektor eine Gerade entstehen bzw. entlang einer abgetastet werden.

Fällt man das Lot vom Kreismittelpunkt auf die Gerade, wird es einen Lotfußpunkt erzeugen. So wissen wir, dass die Länge des Lots die Summe aus dem Kippachsenfehler k und dem horizontalen Kollimationsfehler c ist. An dieser Stelle sprechen wir ausschließlich vom c des Spiegels, der letztendlich ein Abfallprodukt ist und keine weitere Verwendung finden soll. Aus dem Lotfußpunkt kann des

Weiteren eine Kalibriergröße abgeleitet werden. Es handelt sich dabei um den vertikalen Kollimationsfehler i . In dieser Stelle tangiert die Gerade bei verändertem V-Winkel den „blinden Kegel“. Das heißt im Umkehrschluss, dass im Lotfußpunkt eine Zielung exakt im Nadir erfolgt, oder auch, dass der abgelesene V-Winkel im Lotfußpunkt 200 gon entsprechen muss.

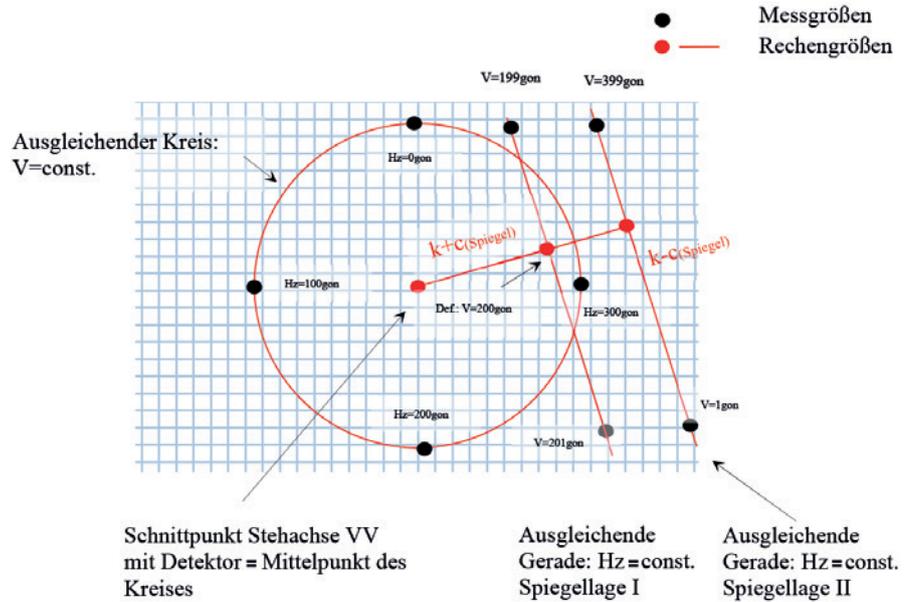


Abb. 12 | Analyse der Kollimatoraufnahmen

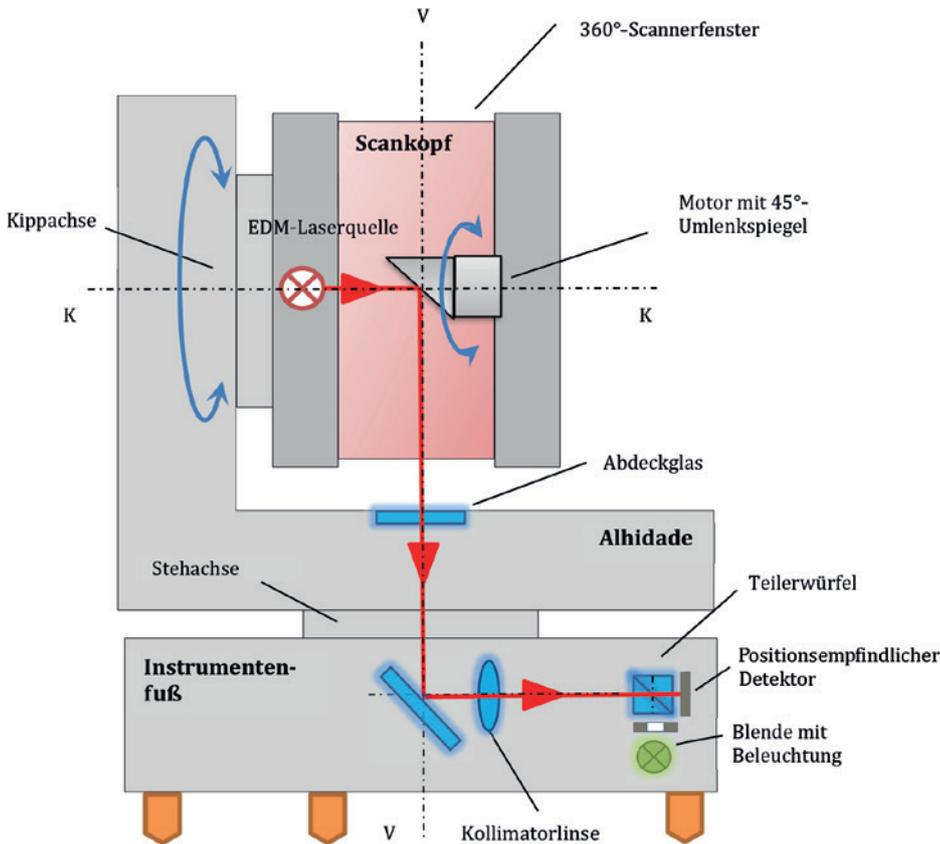


Abb. 13 | Optischer Strahlengang Kollimation

Wiederholt man nun die Messung speziell bei konstantem Hz-Winkel in Spiegellage II, d. h. der Scankopf wird in V-Richtung um 200 gon gedreht, so entsteht eine zweite parallele Gerade. Der Kippachsenfehler k ergibt sich aus dem Mittel der Länge der Lote zu den Geraden in Spiegellage I und Spiegellage II und ist dadurch eliminiert vom Kollimationsfehler c des Spiegels.

4.2 Die Messungen von horizontalen und vertikalen Kollimationsfehlern c_n und i_n entlang der Scanebene

Die Bestimmung von c_n und i_n erfolgt nach den gleichen Schemata. Lediglich der Kollimator wird im Kollimationsmodus betrieben. Ein vom EDM ausgesendeter Laserpuls wird über den rotierenden Spiegel in Richtung Nadir abgelenkt und vom Detektor erfasst. Wenn die Messung abgeschlossen ist, wird ein nächster Punkt gemessen, indem der Scankopf schrittweise um die Kippachse mittels V-Antrieb rotiert wird.

Die Analyse der Messungen erfolgt nach den gleichen Prinzipien. Die Länge des Lots kann jedoch nach den horizontalen Kollimationsfehlern c_n aufgelöst werden, da bereits der Kippachsenfehler k bekannt ist. Der vertikale Kollimationsfehler ergibt sich aus der Abweichung des V-Winkels im Lotfußpunkt von 200 gon.

Je nach Situation kann die Kalibrierung des Systems in seinem Umfang variiert werden. Zum Beispiel ist davon auszugehen, dass im Produktionsprozess oder auch im Service eine umfangreiche Kalibrierung zur Analyse angestoßen wird. Im Feldeinsatz werden jedoch die Kalibrierungen auf ein Minimum reduziert. Der automatische Kalibrierungsprozess wird u. a. durch ein permanentes und zeitliches Überwachen der internen und externen Temperaturänderungen gesteuert.

5 ERGÄNZENDE DISKUSSION DES VORGESTELLTEN KALIBRIERVERFAHRENS

Das Verfahren basiert auf keinerlei Grundlage einer absoluten Maßverkörperung oder Stabilitätsanforderung. Die einzigen Anforderungen sind die Qualität der Rotationsachsen der Alhidade, d. h. von Steh- und Kippachse, u. a. an die Taumelfehler und deren Positionierungs- und Winkelmeßsysteme zu stellen. So sind zum Beispiel durch diametrale Abtastköpfe Teilkreisexzentrizitäten eliminiert etc. Unter der positiven Annahme, dass diese bereits seit Jahrzehnten in Totalstationen eingesetzt werden und der Entwicklungsstand in einer im Vergleich zum Scanner übergeordneten Genauigkeitsklasse liegt, können diese als Referenz verwendet werden.

Selbst absolute Anforderungen an den internen Kollimator sind nicht erforderlich. Durch die Messverfahren sind alle für die Kalibrierung relevanten Größen, wie Durchstoßpunkt der Stehachse auf den Detektor usw., jeweils erneut bestimmbar. Auch der Pixel-/Winkelmaßstab im Kollimator kann jederzeit auf die Alhidaden-Winkelmeßsysteme der Achsen zurückgeführt werden.

Von Vorteil erweist sich die Messung des Kippachsenfehlers k mit doppelter Genauigkeit durch das Autokollimationsprinzip, da ein

Fehler von k sich in Fortpflanzung im Verhältnis eins auf die gemessenen Kollimationsfehler c auswirken würde.

Die Kalibrierung selbst erfolgt in einem statischen Zustand, d. h. an einer fixen Hz-Position. Im späteren Anwendungsfall wird jedoch auch eine, im Verhältnis zur Umlenkeinheit, langsame Rotation um die Stehachse benötigt. Gesetzt den Fall, dass hierdurch Fehlerursachen aufgrund von Signalverarbeitung und Laufzeiteffekten vorliegen, würde sich dieses Verhalten in einem horizontalen Offset, also einer Orientierungsunbekannten wiederfinden.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Die Selbstkalibrierungsfunktion erleichtert dem Benutzer den Umgang im täglichen Einsatz. Aufwendige Routinen zur Prüfung des Equipments können reduziert werden und ersparen wertvolle Zeit. Das Gerät kann sich automatisch an sich ändernde Umgebungsbedingungen anpassen und gewährleistet somit die Genauigkeiten gemäß Spezifikation. Die Funktion unterstützt den effektiven Einsatz im Feld auf hohem Genauigkeitsniveau und erleichtert die Eigen diagnose.

Nichtsdestotrotz sollten für alle und besonders für die höchsten Genauigkeitsansprüche in sich kontrollierende Messanordnungen und Methoden nicht abgewählt werden. Ein sorgsamer Umgang mit dem Instrument sowie dem zusätzlichen Equipment bleibt weiterhin relevant und ist immer empfehlenswert.

LITERATUR

Deumlich, F.; Staiger, R. (2002): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. 9. Auflage. Wichmann, Heidelberg.

Medić, T.; Holst, C.; Kuhlmann, H. (2020): Optimizing the Target-based Calibration Procedure of Terrestrial Laser Scanners. In: allgemeine vermessungsnachrichten 127(2020)1, 18–26.

Stahlberg, C. (1997): Eine vektorielle Darstellung des Einflusses von Ziel- und Kippachsenfehler auf die Winkelmessung. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv) 122(1997)5, 225–235.

Trimble Jena GmbH (2020): Vermessungsinstrument und Verfahren zur Kalibrierung eines Vermessungsinstruments. Erfinder: Michael Vogel, Anmeldung: 15.02.2019, Patentschrift: EP 3 696 498 A1.

Vogel, M.; Jackson, G.; Lezennec, A.; Lepere, G. (2020): White paper: Inside the Trimble X7 – Deep Dive into Trimble X-Drive Technology. Trimble.

Dr.-Ing. Michael Vogel

TRIMBLE JENA GMBH

Carl-Zeiss-Promenade 10 | 07745 Jena
michael_vogel@trimble.com

