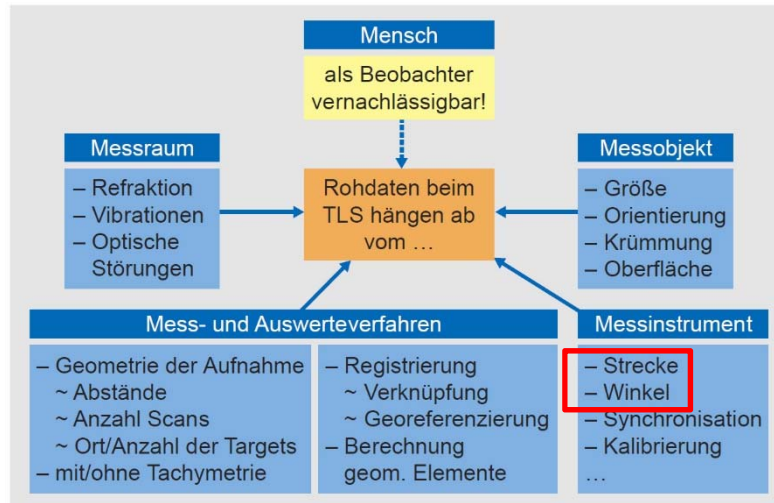


Viele Faktoren beeinflussen die Genauigkeit (Richtigkeit) der Punktkoordinaten eines 3D-Punktes:

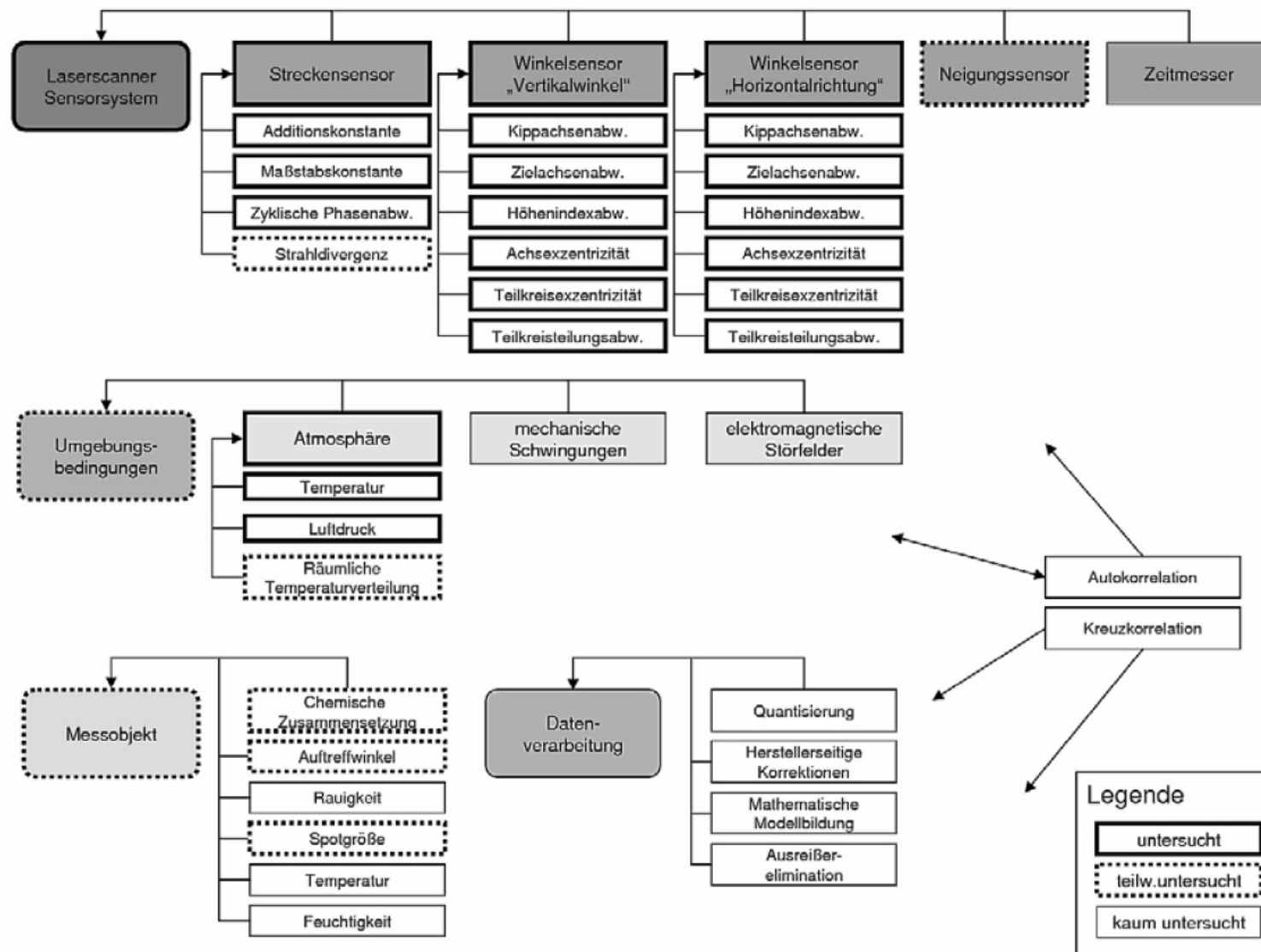


Einflussgrößen und Abhängigkeiten beim TLS
(Quelle: Gottwald et al., 2009)

- Für den Anwender kommen die Koordinaten aus einer **Blackbox**. Er kann heute nur – mithilfe zusätzlicher Messmittel – exemplarische Stichproben auf geometrische Maßhaltigkeit durchführen.
- Der Anwender hat i.A. keine Zugriffsmöglichkeit auf die Kalibrierparameter des Messsystems (Vergleich Tachymeter: Kipp- und Zielachsfehler)
- Es gibt keinen Scanner, der die Möglichkeit bietet, Qualitätsmaße aus den Punktwolken abzuleiten oder Instrumentenfehler durch die Messanordnung zu eliminieren (Vergleich Tachymeter: Zwei-Lagen-Messung).
- Effiziente Prüfverfahren, die eine schnelle Aussage über die spezifikationskonforme Funktionstüchtigkeit der Messausrüstung zulassen, sind noch nicht bzw. nur in Ansätzen (vgl. DVW-Merkblatt). Verfügbar.

➔ Nur eine **Systemkalibrierung** kann verlässliche und reproduzierbare Ergebnisse liefern. Im Wesentlichen besteht die Systemkalibrierung hier aus einem **Soll-Ist-Vergleich** bekannter Objekte, z.B. Zylinder oder Kugeln mit bekannter Geometrie. Die Fehlerursachen und Einflüsse einzelner Komponenten lassen sich dagegen nur exemplarisch und mit viel Aufwand bestimmen.

- Im Rahmen einer **Prüfung** wird festgestellt, inwieweit ein Prüfobjekt (hier ein Laserscanner bzw. eine erzeugte Punktwolke) eine Forderung erfüllt. Mit dem Prüfen ist immer eine Entscheidung verknüpft (Forderung erfüllt oder nicht erfüllt). Bei der Prüfung eines Messgerätes werden hauptsächlich die Messabweichungen des Instrumentes festgestellt und mit den Herstellerangaben verglichen.
- Kalibrierung** bedeutet, einen Zusammenhang zwischen dem angezeigten und tatsächlichen Messwert herzustellen. Die Kalibrierung dient der Bestimmung von (systematischen) Messabweichungen. Liegen signifikante, reproduzierbare Messabweichungen vor, können diese auch zur Verbesserung der Messgenauigkeit genutzt werden (= Kalibrierparameter)
- Eine **Justierung** ist verbunden mit einem dauerhaften mechanischen oder datentechnischen Eingriff in das Messgerät, indem die festgestellten systematischen Abweichungen im Instrument eingestellt oder abgeglichen werden. Die Justierung erfolgt heute hauptsächlich durch das Abspeichern ermittelter Kalibrierparameter.
(Quelle: Gottwald et al., 2009)



Mögliche Einflussgrößen auf die verschiedenen TLS-Komponenten
(Quelle: Kern et al., 2008)

Die Hersteller kalibrieren ihre terrestrischen Laserscanner in Punktfeldern oder eigenen Kalibrieranlagen.

Leica Geosystems Scanner Manufacturing and Calibration

(Quelle: Walsh, 2015: Leica ScanStation, White Paper)



A set of P40 laser scanners awaiting calibration on the manufacturing floors in Widnau, Switzerland.

Range Calibration

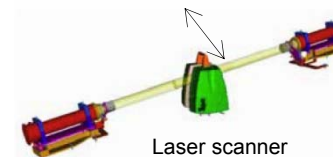
Angular Calibration



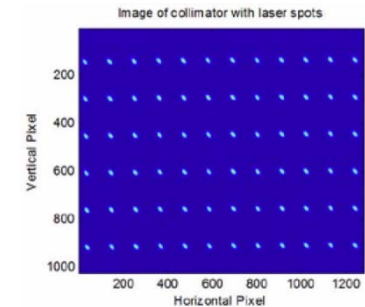
A collection of P40 scanners waiting for their turn on the Antipodal Telescope Environmental Chamber (ATEC) Calibration Rig.



A Leica ScanStation P40 loaded into the ATEC Rig.



Antipodal placement of the ATEC telescopes.



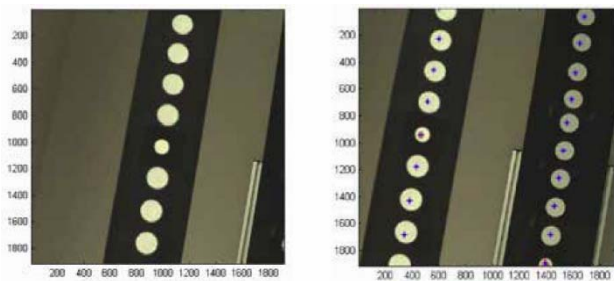
Data from the ATEC telescopes

Tilt Calibration



Camera Calibration

Parameters include mounting of the camera inside the scanner as well as camera parameters.



Targets: White disks on black background

			Methode						
Ord- nung	Kalibrier- parameter	verwendete Passobjektarten Erläuterung	Ebene	Retro	B&W	Kugel	B&W	Graukeil Kugel	
0	τ, ζ	Richtung, Neigung der Stehachse		b)	b)			b)	0. Ordnung: In der Regel notwendig.
0	o	Orientierungsunbekannte		b)	b)			b)	
1	k_0	Additionskonstante	b)	b)	b)			a) b)	1. Ordnung: Primärabweichungen; sinnvoll und steigert die Messqualität.
1	k_m	Maßstabskonstante	b)		b)			a) b)	
2	$k_{a1}, k_{b1} \dots k_{an}, k_{bn}$	Zyklischer Fehler $\lambda_1 \dots \lambda_n$			b)			a) b)	
3	k_{Hz}	Zykl. Fehler in D als Funktion von Hz			c)				
3	k_V	Zykl. Fehler in D als Funktion von V			c)				2. Ordnung: Sekundärabweichungen
1	c	Zielachsfehler	b)	b)	b)	II	II	b)	
1	i	Kippachsfehler	b)	b)	b)	II	II	b)	
1	h	Höhenindexfehler	b)	b)	b)	II	II	b)	
1	e_{SK}	Exzentrizität Stehachse–Kippachse	b)			II		b)	
1	e_{SZ}	Exzentrizität Stehachse–Zielachse	b)			II		b)	
1	e_{KZ}	Exzentrizität Kippachse–Zielachse	b)			II		b)	
2	e_{Hz}, ϵ_{Hz}	Horizontal-Teilkreis-Exzentrizität						b)	
2	e_V, ϵ_V	Vertikal-Teilkreis-Exzentrizität			b)			b)	
2	t_A, t_ϕ	Amplitude, Phase des Taumelfehlers			b)	d)		c)	
2	δm_{Hz}	Skalierung des Hz -Encoders			b)	d)		c)	
2	δm_V	Skalierung des V -Encoders			b)	d)		c)	
3	$k_{Hz\Delta} = f(Hz)$	Horizontalkreis-Teilungsfehler						c)	
3	$k_{V\Delta} = f(V)$	Vertikalkreis-Teilungsfehler						c)	
3	δ_V	Zykl. Fehler in Hz als Funktion von V			c)				

Zusammenstellung möglicher TLS-Kalibrierparameter und Klassifizierung hinsichtlich der zu erwartenden Einflussstärke auf die Messqualität.

Die von den Autoren eingesetzten Bestimmungsmethoden sind a) Referenzstrecke (Interferometerbasis), b) Selbstkalibrierung, c) Residuenanalyse und II) Messungen in zwei Lagen und d) externe Sensorik. (Quelle: Kern et al., 2008)

Terrestrische Laserscanner (TLS) sind flächenhaft messende Instrumente für die Erfassung von dreidimensionalen Objekten. Aus den originären Messgrößen werden die kartesischen Koordinaten X, Y , und Z im Instrumentensystem berechnet, zudem wird die sogenannte Intensität für jeden Punkt angegeben. Diese beschreiben einen Quotienten zwischen ausgesandter und rückgestrahlter Energie des Laserstrahls und dient hauptsächlich zur Visualisierung der erfassten Daten, kann aber auch zur Segmentierung genutzt werden.

Teilweise bieten die auf dem Markt befindlichen TLS-Systeme in ihrer Gerätesoftware inzwischen die Möglichkeit, Instrumentenabweichungen im Rahmen einer **Überprüfungsmessung** zu bestimmen und permanent im Gerät zu speichern. Die hierfür empfohlenen Messkonfigurationen sind den in diesem Merkblatt vorgestellten Messkonfigurationen teilweise sehr ähnlich. Bietet das TLS-System keine eigene Überprüfungsfunktion, empfiehlt sich die Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit nach dem im Folgenden vorgestellten Verfahren. Ziel der Überprüfung ist folglich die Feststellung über die Einhaltung definierter Anforderungen. Werden die Anforderungen nicht eingehalten, ist eine **Kalibrierung** des Gerätes durchzuführen.

Die in diesem Merkblatt vorgestellten Methoden zur Überprüfung eines TLS legen ihr Hauptaugenmerk auf systematische Instrumentenabweichungen. Leistungsmerkmale, die sich z.B. auf das Rauschverhalten oder die Geometrietreue der erzeugten Laserscans beziehen, sind nicht Gegenstand dieses Merkblattes.

Quelle: Neitzel, F., Gordon, B., Wujanz, D., 2014: DVW-Merkblatt »Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)«, 15.05.2014, 18 Seiten.

- <https://www.dvw.de/merkblatt>
- <https://i3mainz.hs-mainz.de/de/services/dvw-merkblatt-verfahren-zur-standardisierten-%C3%BCberpr%C3%BCfung-von-terrestrischen-laserscannern> (Berechnungsformular)



Was ist Sinn und Zweck der Prüfung?

Es soll fest festgestellt werden, ob der TLS festgelegte Kriterien oder im Datenblatt spezifizierte Angaben erfüllt.
Es werden Messabweichungen festgestellt und mit den Herstellerangaben verglichen.

Wann empfiehlt sich die Durchführung?

- Nach längerer Nutzungspause,
- nach „ungewissem“ Transport, z.B. Flug oder Lieferung (Um unsachgemäßen Transport zu ermitteln, empfehlen sich Belastungsindikatoren, die in der Transportkiste des Scanners angebracht werden können),
- vor umfangreichen Messungen,
- vor Messungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen.

Welche Anforderungen sind an ein Feldprüfverfahren zu stellen?

- Das komplette Prüfverfahren mit Messung und Datenauswertung soll maximal ½ Arbeitstage dauern.
- Das Prüfverfahren soll unabhängig vom Funktionsprinzip des TLS-Systems sein.
- Das Prüfverfahren soll mit der Standardausrüstung und –software durchführbar sein.

Was ist das Ziel des Prüfverfahrens?

- Das Vorliegen systematischer Messabweichungen soll möglichst zuverlässig erkannt werden.
- Das Prüfverfahren liefert eine **Ja/Nein**-Aussage bezüglich der Gebrauchstauglichkeit des TLS.

Was ist zu tun, wenn das Prüfverfahren die Gebrauchsunfähigkeit des TLS anzeigt?

- Es ist eine Kalibrierung und/oder Justierung des Instruments erforderlich.
- Falls das Instrument eine Überprüfungsfunktion in der Gerätesoftware anbietet, empfiehlt es sich, diese instrumenteneigene Überprüfung durchzuführen und ggf. die daraus ermittelten Kalibrierwerte im Gerät zu speichern.
- Kalibrierung und Justierung werden vom jeweiligen Hersteller vorgenommen.

Messaufbau

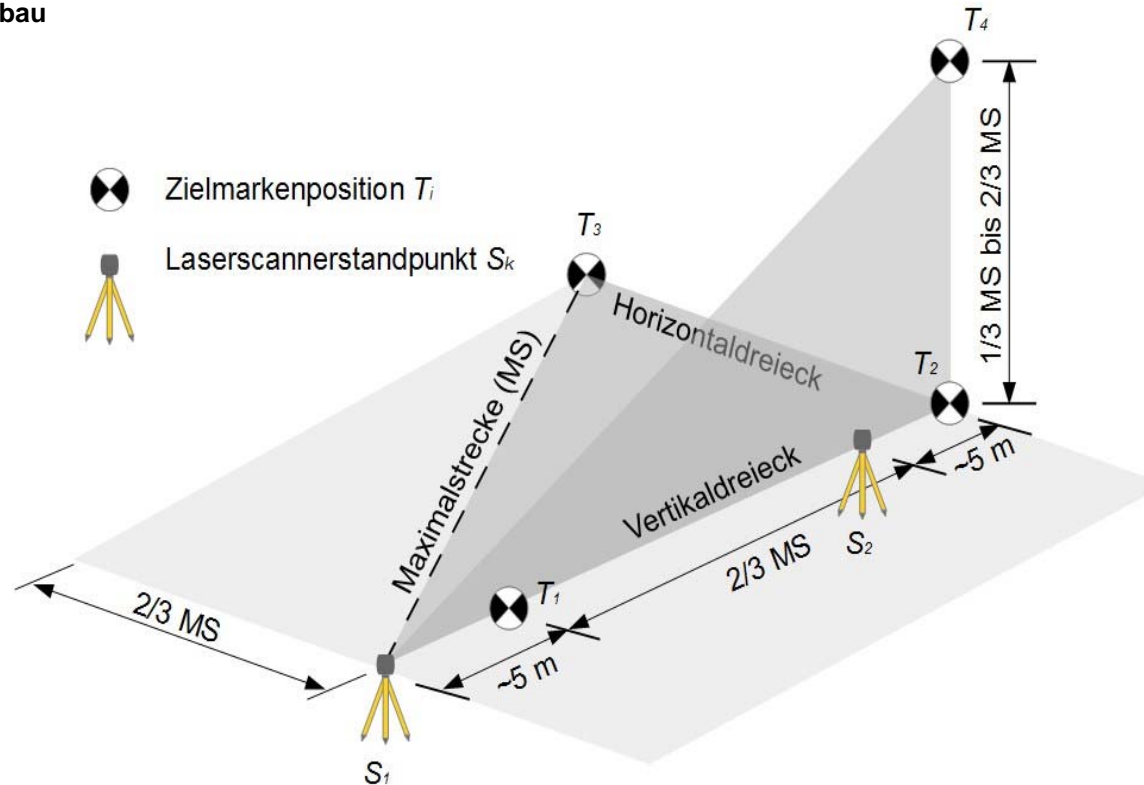


Abb.1: Messaufbau des TLS-Prüfverfahrens (Quelle: DVW-Merkblatt)

Nach der Einrichtung des Testfeldes werden die Zielmarken T_1 bis T_4 mindestens dreimal vom Standpunkt S_1 sowie von Standpunkt S_2 gescannt.

Streckenberechnung

$$\overline{T_i T_j} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}$$

$$\rightarrow \overline{T_1 T_2}, \overline{T_1 T_4}, \overline{T_3 T_4},$$

Streckendifferenzen

$$\Delta_{i,j} = \overline{T_i T_j}(S_1) - \overline{T_i T_j}(S_2)$$

Anhand dieser Differenzen kann auf das Vorhandensein systematischer Messabweichungen geschlossen werden, wenn diese signifikant von null verschieden sind. Für diese Beurteilung ist eine quantitative Abschätzung der Messunsicherheit erforderlich.

Unsicherheitsgröße u_T der Zielmarkenzentren

$$u_T = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

- Typ A: Unsicherheitsgrößen aus statistischer Auswertung
- Typ B: Herstellerangaben bzw. eigene Erfahrungswerte

Unsicherheit U_Δ der Streckendifferenz als Vergleichsgröße

$$u_S = u_T \cdot \sqrt{2}$$

$$u_\Delta = u_S \cdot \sqrt{2} = 2 \cdot u_T$$

$$U_\Delta = k \cdot u_\Delta \text{ (erweiterte Messunsicherheit; häufig wird } k = 2 \text{ gewählt: } \rightarrow \text{ Vertrauensintervall von 95\%)}$$

$$U_\Delta = k \cdot u_\Delta = k \cdot 2 \cdot u_T = 4 \cdot u_T$$

Die Unsicherheit U_Δ wird im Folgenden als Vergleichsgröße zur Beurteilung der Streckendifferenzen verwendet.

Untersuchung der Distanzmessung

$$\Delta_{i,j} = \overline{T_i T_j}(S_1) - \overline{T_i T_j}(S_2) \rightarrow \text{zweifacher Wert einer konstanten Distanzabweichung}$$

Prüfung, ob $|\Delta_{1,2}| > U_\Delta$

- Anmerkung zur Maßstabsproblematik

Untersuchung der Richtungs- und Winkelmessung

$$\Delta_{1,4} = \overline{T_1 T_4}(S_1) - \overline{T_1 T_4}(S_2)$$

$$\Delta_{3,4} = \overline{T_3 T_4}(S_1) - \overline{T_3 T_4}(S_2)$$

Prüfung, ob $|\Delta_{1,4}| > U_\Delta$ oder $|\Delta_{3,4}| > U_\Delta$

- Anmerkung zur Ziel- und Kippachsenabweichung

Falls es das zu prüfende TLS zulässt, wird eine Messung in zwei Lagen empfohlen.
Anhand des direkten 2-Lagen-Vergleichs der Zielmarkenmittelpunkte kann, wie bei der Überprüfung eines Tachymeters, direkt auf Achsabweichungen geschlossen werden.

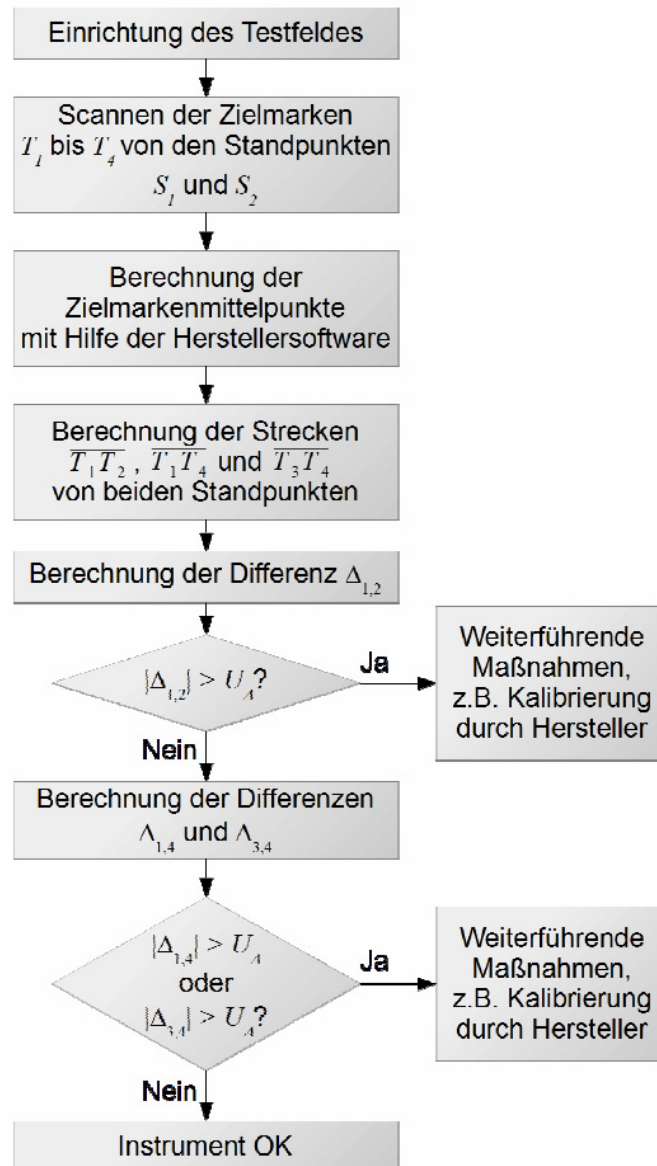


Abb.2: Flussdiagramm des TLS-Prüfverfahrens (Quelle: DVW-Merkblatt)

Most of the user-oriented calibration approaches are considered **self-calibration** approaches, regarding the fact that all the calibration parameters describing measurement errors are determined simultaneously and without the need of a special facility with a dedicated test field. If some reference values for the test field are introduced, then it is no longer self-calibration, but rather **system calibration**.

Component calibration of a laser scanner means that all relevant calibration parameters are determined in a stepwise manner.

Calibration of panoramic laser scanners

(Source: Medić et al., 2017; Medić et al., 2019)

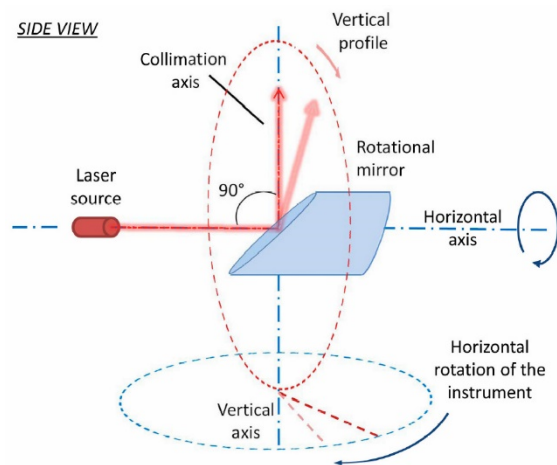


Fig. 1: Perfect panoramic terrestrial laser scanner geometry.

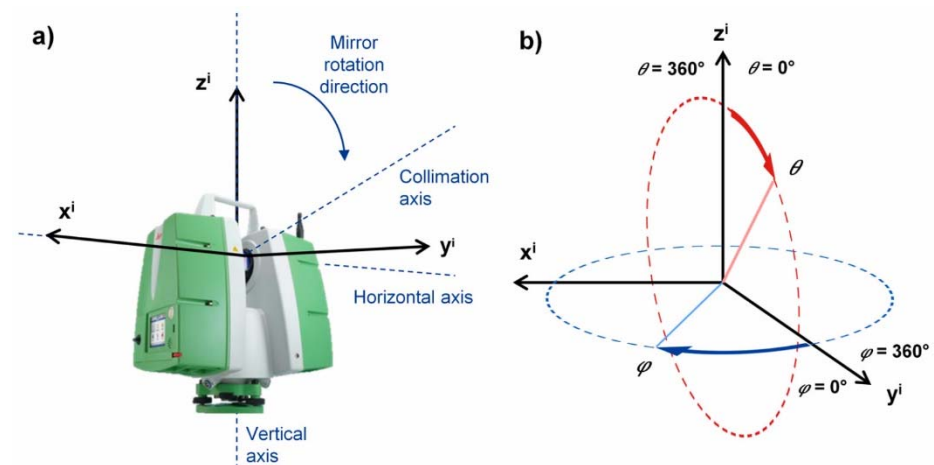


Fig. 2: (a) Local Cartesian coordinate system of the scanner with a respect to the main instrument axes; (b) Local coordinate system of the scanner transformed to the polar coordinates.

In order to extract the polar coordinates describing the actual position of the instrument in the moment of measuring, the following relations are used:

$$r_j^i = \sqrt{x_j^{i2} + y_j^{i2} + z_j^{i2}}$$

$$\varphi_j^i = \operatorname{atan}\left(\frac{x_j^i}{y_j^i}\right) + 0 \text{ or } \pi$$

$$\theta_j^i = \operatorname{atan}\left(\frac{z_j^i}{\sqrt{x_j^{i2} + y_j^{i2}}}\right)$$

$$r_j^i = \sqrt{x_j^{i2} + y_j^{i2} + z_j^{i2}}$$

$$\varphi_j^i = \operatorname{atan}\left(\frac{x_j^i}{y_j^i}\right) + \pi \text{ or } 2\pi$$

$$\theta_j^i = -\operatorname{atan}\left(\frac{z_j^i}{\sqrt{x_j^{i2} + y_j^{i2}}}\right) + 2\pi$$

where

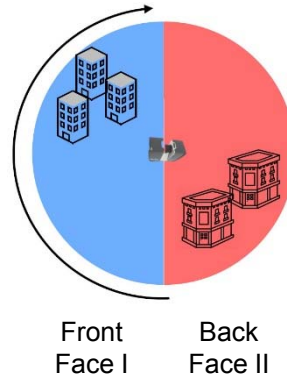
$i = 1, 2, \dots, s;$

$j = 1, 2, \dots, p;$

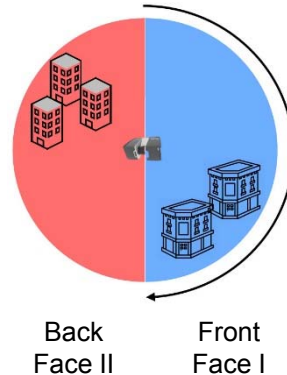
s and p are total numbers of scanner stations and targets used in the experiment,

$r_j^i, \varphi_j^i, \theta_j^i$ are the measured ranges, horizontal and vertical angles and

x_j^i, y_j^i, z_j^i are the Cartesian coordinates of the measured points stored in the scanner.



First cycle



Second cycle

Calibration parameters

Panoramic terrestrial laser scanners are similar to a total station to a certain extent.

Parameter	Description	Equivalent in the Total Station Model
x_{1n}	Horizontal beam offset	Horizontal eccentricity of collimation axis *
x_{1z}	Vertical beam offset	None
x_2	Horizontal axis offset	Laser axis vertical offset *
x_3	Mirror offset	None
x_4	Vertical index offset	Identical
x_{5n}	Horizontal beam tilt	Vertical circle eccentricity error *
x_{5z}	Vertical beam tilt	Horizontal axis & vertical circle eccentricity error
x_6	Mirror tilt	Collimation axis error
x_7	Horizontal axis error (tilt)	Identical
x_{8x}	Horizontal angle encoder eccentricity	Identical
x_{8y}	Horizontal angle encoder eccentricity	Identical
x_{9n}	Vertical angle encoder eccentricity	Identical
x_{9z}	Vertical angle encoder eccentricity	Identical
x_{10}	Rangefinder offset	Identical
x_{11a}	Second order scale error in the horizontal angle encoder	Identical
x_{11b}	Second order scale error in the horizontal angle encoder	Identical
x_{12a}	Second order scale error in the vertical angle encoder	Identical
x_{12b}	Second order scale error in the vertical angle encoder	Identical

* Only partially modeled with the total station model.

Table 1: Comprehensive list of the mechanical calibration parameters and their comparison with the parameters based on the total station models.

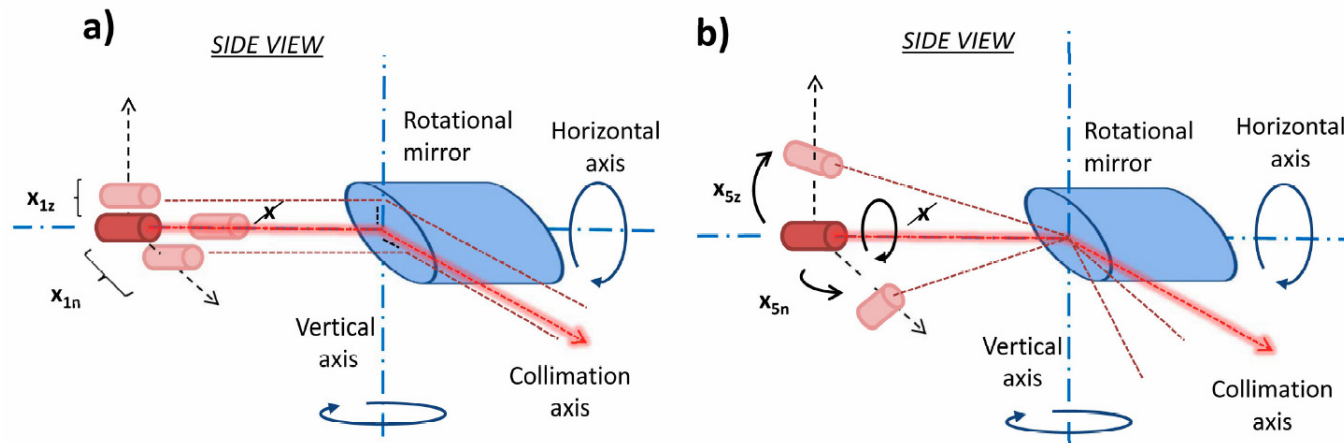


Fig. 3: **Laser source** related mechanical misalignments: (a) laser source offset; (b) laser source tilt.

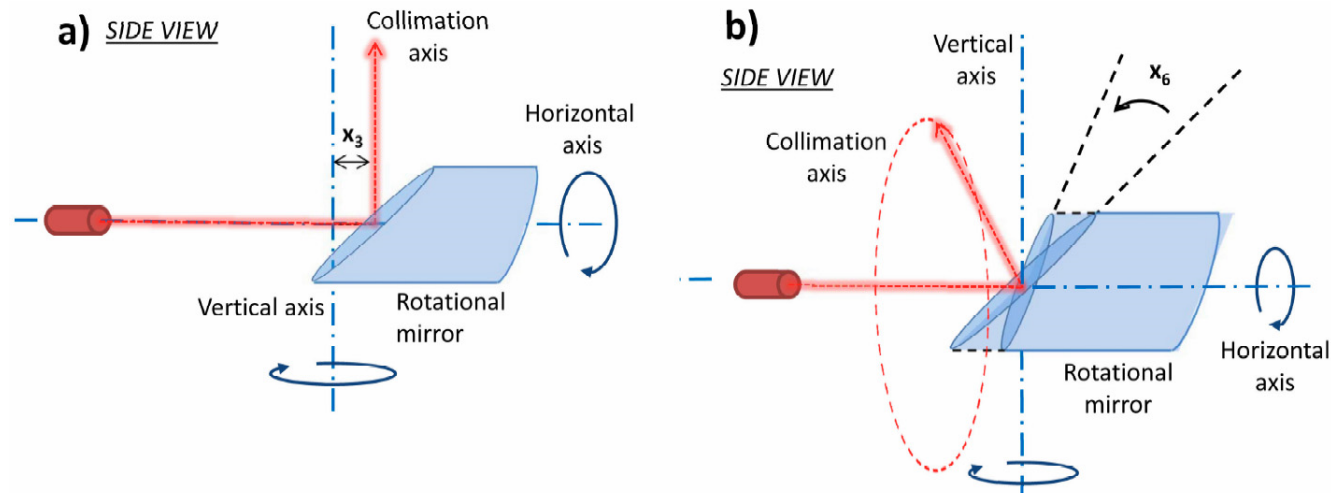


Fig. 4: **Rotational mirror** related mechanical misalignments: (a) mirror offset; (b) mirror source tilt.

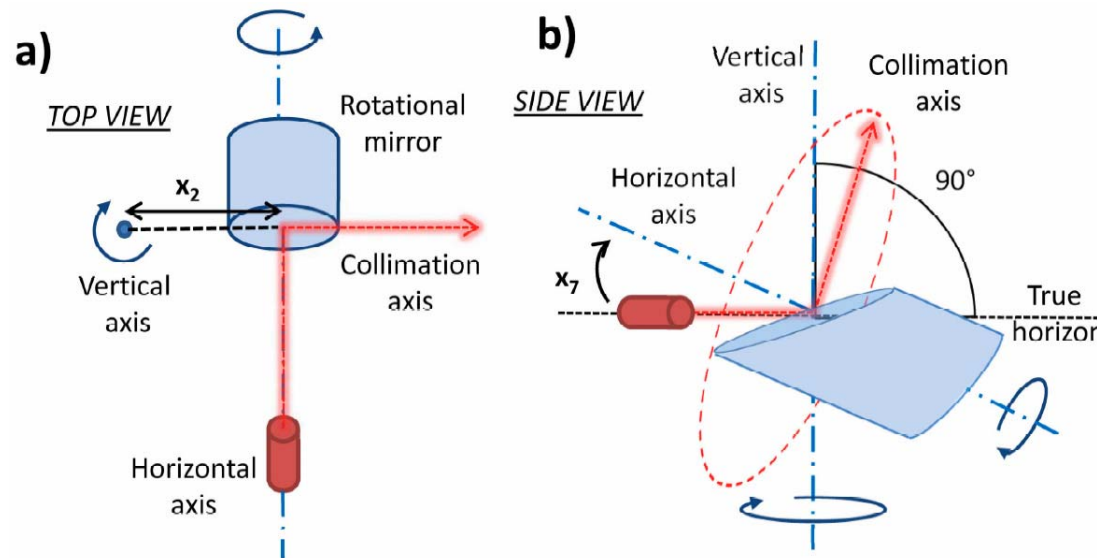
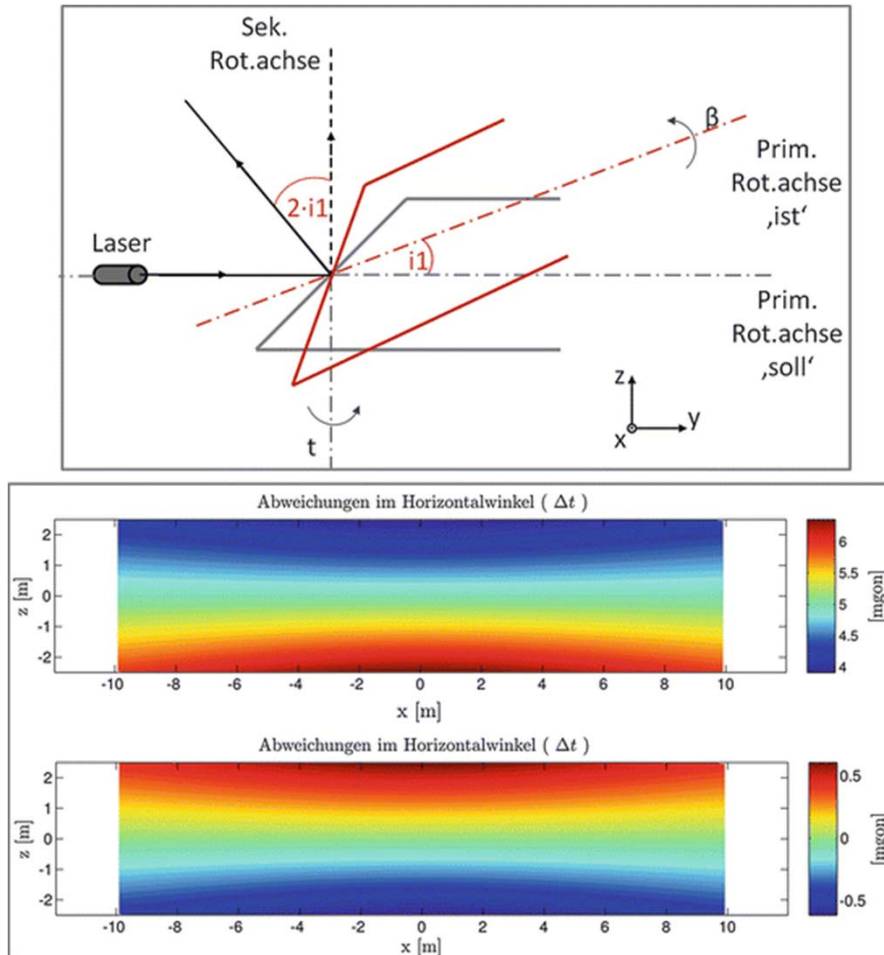


Fig. 5: **Horizontal axis** related mechanical misalignments: (a) axis offset; (b) axis tilt.

Zur Abbildung 5b:

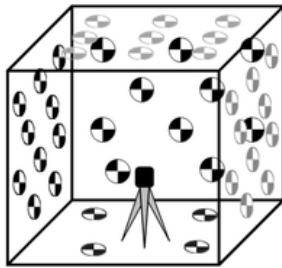


Vorwärtsmodellierung

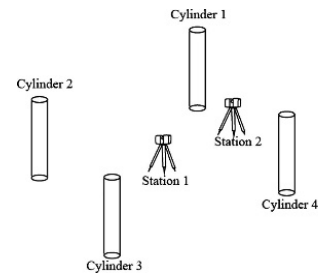
Abb. 6: Vertikale Inorthogonalität [2.5 mgon] der primären Rotationsachse (oben) und resultierende systematische Abweichungen in der Horizontalrichtung bei der simulierten Abtastung einer Oberfläche in 10 m Entfernung: Abweichung beim Laserscanning (mitte) und Abweichungen in der Tachymetrie (unten) (Kuhlmann & Holst, 2017).

Self-calibration

- a) (planar) Target-based (circular, line-patterned [checkerboard, sectored])
- b) Cylinder-based
- c) Sphere-based
- d) Plane-based
- e) Model-based (best-fit surface vs. laser scan)



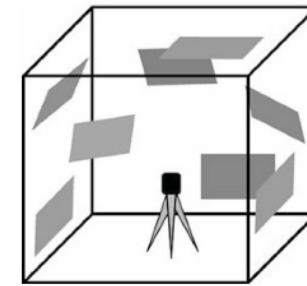
a)



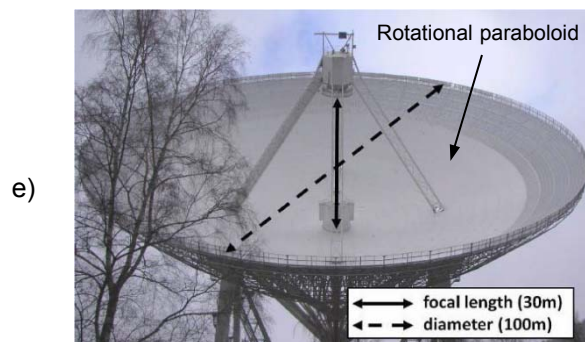
b)



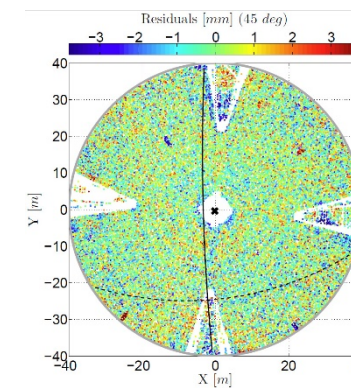
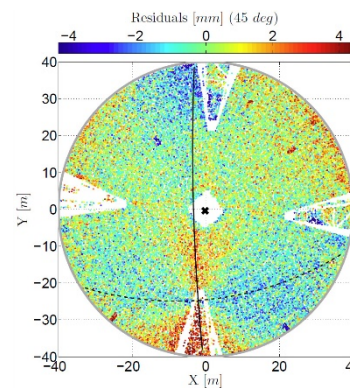
c)



d)



Effelsberg radio telescope.



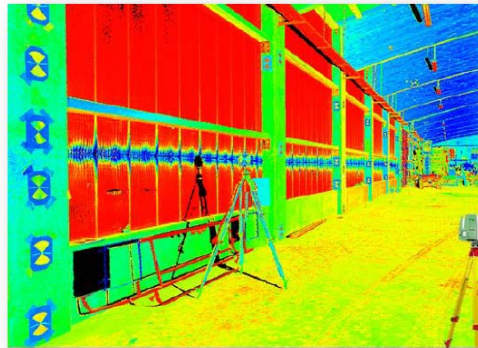
(Quelle: Holst & Kuhlmann, 2014)

Post-fit residuals after approximation at an elevation angle of 45 deg shown in object coordinate system $[X, Y, Z]$; transformation of TLS x -axis (lined), y -axis (dashed) and station (cross) in object coordinate system; left: before calibration; right: after calibration.

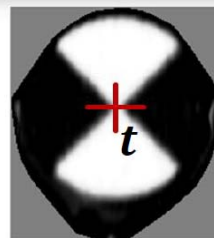
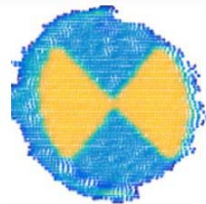
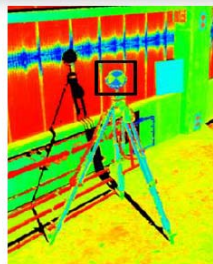
Target-based self-calibration

(Source: Medić et al., 2017; Medić et al., 2019)

Reflectance map



Calibration hall

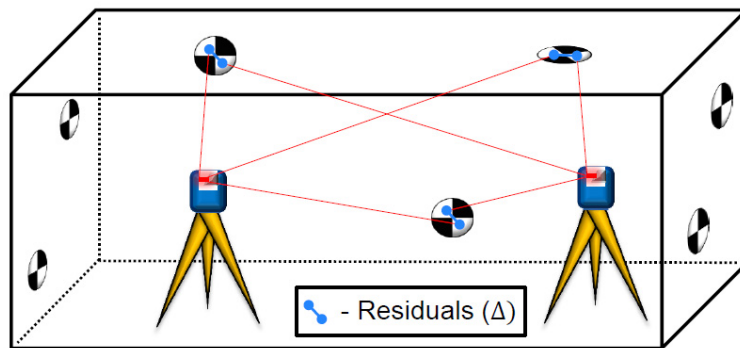


black & white planar target

$$t(x, y, z) \Rightarrow t(r, \varphi, \theta) \Rightarrow \text{measurements}$$

Target-based self-calibration

(Source: Medić et al., 2017; Medić et al., 2019)



Bundle
adjustment
or
Scanner
registration

$$\mathbf{v}^t \Sigma^{-1} \mathbf{v} \Rightarrow \min.$$

$$f(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{t}}) = (\mathbf{R} \cdot \mathbf{t} + \mathbf{T}) - \mathbf{t}_{ref} = 0 \dots \Sigma$$

Estimated parameters

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{r} \sin(\bar{\theta}) \sin(\bar{\varphi}) \\ \bar{r} \sin(\bar{\theta}) \cos(\bar{\varphi}) \\ \bar{r} \cos(\bar{\theta}) \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{aligned} \bar{r} &= r_m + \Delta r \\ \bar{\varphi} &= \varphi_m + \Delta \varphi \\ \bar{\theta} &= \theta_m + \Delta \theta \end{aligned}$$

TLS misalignments (\mathbf{x})
 +
 Measurement noise (\mathbf{v})

The scanner self-calibration is derived from the [bundle adjustment](#), which is often used for calibrating digital cameras. The root of the approach is a [rigid-body transformation](#). The transformation is used for the simultaneous registration of several local coordinate systems to a single reference system. It relies on the redundant distinct point features derived from the 3D point cloud of the observed scene, which are mutual to each local coordinate system. Points are derived from the point cloud using specialized intensity based TLS targets. Local coordinate systems are realized by the instrument on each scanner station. The only addition to this [simultaneous registration](#) is a presumption that the disagreements in the registration, the measurement residuals, are not solely random, but rather a combination of random and systematic influences.

→ Adjustment based on [Gauss-Helmert model](#) ($\mathbf{B}\mathbf{v} + \mathbf{A}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{w} = \mathbf{0}$)

Target-based self-calibration

(Source: Medić et al., 2017; Medić et al., 2019)

Functional model of calibration parameters

a) Simple total station model (Abbas et al., 2014)

$$\Delta r = a_0 \text{ (constant rangefinder offset error)}$$

$$\Delta \varphi = b_0 \sec(\theta) + b_1 \tan(\theta) \text{ (collimation axis error + trunnion axis error)}$$

$$\Delta \theta = c_0 \text{ (vertical circle index error)}$$

b) Comprehensive total station model (Chow et al., 2013)

$$\Delta \rho = A_0 + A_1 \rho_{ij} + A_2 \sin(\alpha_{ij}) + A_3 \sin\left(\frac{4\pi}{U} \rho_{ij}\right) + A_4 \cos\left(\frac{4\pi}{U} \rho_{ij}\right) + ET_\rho$$

$$\Delta \theta = B_1 \theta + B_2 \sin(\theta) + B_3 \cos(\theta) + B_4 \sin(2\theta) + B_5 \cos(2\theta) + B_6 \sec(\alpha)^* + B_7 \tan(\alpha) + B_8 \rho^{-1} + B_9 \sin(\alpha) + B_{10} \cos(\alpha) + ET_\theta$$

$$\Delta \alpha = C_0 + C_1 \alpha + C_2 \sin(\alpha) + C_3 \cos(\alpha) + C_4 \sin(2\alpha) + C_5 \cos(2\alpha) + C_6 \rho^{-1} + C_7 \sin(\theta) + C_8 \cos(\theta) + ET_\alpha$$

d) Mechanically explainable calibration parameters (tilts & offsets + angular encoder errors = 18 parameters)

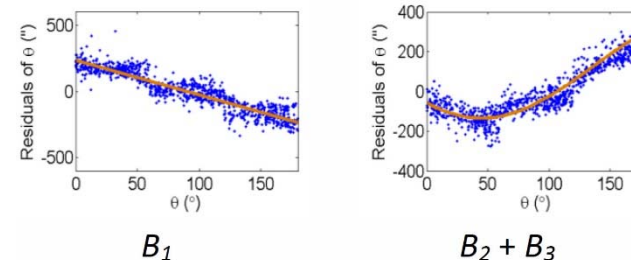
e) Mechanical parameters (10 parameters only) (Medić et al., 2017)

$$\Delta r = x_2 \sin(\theta) + x_{10}$$

$$\Delta \varphi = \frac{x_{1z}}{r \tan(\theta)} + \frac{x_3}{r \sin(\theta)} + \frac{(x_{5z} - x_7)}{\tan(\theta)} + \frac{2x_6}{\sin(\theta)} + \frac{x_{1n}}{r}$$

$$\Delta \theta = \frac{(x_{1n} + x_2) \cos(\theta)}{r} + x_4 + x_{5n} \cos(\theta) - \frac{x_{1z} \sin(\theta)}{r} - x_{5z} \sin(\theta)$$

Empirically derived parameters (Chow et al., 2013)



c) Panoramic camera model (Parian & Grün, 2010)

$$d\theta = d\theta_{dp_x} + d\theta_{dp_y} + d\theta_{lx} + d\theta_{ly} + d\theta_\xi + d\theta_\eta + d\theta_{ex} + d\theta_{ey}$$

$$dy = dy_{dp_x} + dy_{dp_y} + dy_{lx} + dy_{ly} + dy_\xi + dy_\eta + dy_{ex} + dy_{ey}$$

- Some parameters cannot be estimated separately:

$$x_{5z} - x_7 \rightarrow x_{5z-7}$$

$$x_{1n} + x_2 \rightarrow x_{1n+2}$$

- Parameters x_{10}, x_{1n}, x_{5z} cannot be estimated from 1 station (no sensitivity to two-face measurements!)

Auswahl:

- Abbas, M., Lichti, D., Chong, A., Setan, H., Majid, Z., 2014: An on-site approach for the self-calibration of terrestrial laser scanner. *Measurement*, 52, 111-123.
- Al-Manasir, Lichti, D.D., 2015: Self-calibration of a Leica HDS7000 Scanner. *FIG Working Week 2015, Sofia, Bulgaria*, 12 pages.
- Chan, T.O., Lichti, D.D., Belton, D., 2015: A rigorous cylinder-based self-calibration approach for terrestrial laser scanners. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote Sensing*, 99, 84-99.
- Chow, J., Lichti, D.D., Glennie, C., 2011: Point-based versus plane-based self-calibration of static terrestrial laser scanners. *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-5/W12, 121-126.
- Chow, J., Lichti, D.D., Glennie, C., Hartzell, P., 2013: Improvements to and Comparison of Static Terrestrial LiDAR Self-Calibration Methods. *Sensors*, 13(6), 7224-7249.
- Gottwald, R., Heister, H., Staiger, R., 2009: Zur Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern – eine Standortbestimmung. *Zeitschrift für Vermessung (zfv)*, 2, 88-96.
- Holst, C., Kuhlmann, H., 2014: Aiming at self-calibration of terrestrial laser scanners using only one single object and one single scan. *Journal of Applied Geodesy*, 8(4), 295-310.
- Holst et al., 2018: Empirische Ergebnisse von TLS-Prüffeldern: Gibt es Auffälligkeiten? In: DVW e.V. (Hrsg.), *Terrestrisches Laserscanning 2018 (TLS 2018)*, Schriftenreihe des DVW, 93, Wißner-Verlag, 9-40.
- Jaafar, H.A., Meng, X., Sowter, A., 2017: Terrestrial laser scanner error quantification for the purpose of monitoring. *Survey Review*, Vol. 50, No. 360, 232-248.
- Kern, F., Huxhagen, U., 2008: Ansätze zur systematischen Kalibrierung und Prüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). In: Niemeier, W., Schäfer, M. (Red.): *Terrestrisches Laserscanning (TLS 2008)*, Schriftenreihe des DVW, Band 54, 111-124.
- Lichti, D.D., 2007: Error modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 61, 307-324.
- Lichti, D.D., 2010: Terrestrial laser scanner self-calibration: Correlation sources and their mitigation. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 65, 93-102.
- Kuhlmann, H., Holst, C., 2017: Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning. *Messtechnik, flächenhafte Modellierung und aktuelle Entwicklungen im Bereich des terrestrischen Laserscannings*. In: Schwarz, W. (Hrsg.), *Ingenieurgeodäsie*, Springer Spektrum, 167-212.
- Medić, T., Holst, C., Kuhlmann, H., 2017: Towards System Calibration of Panoramic laser Scanners from a Single Station. *Sensors*, 17, 1145.
- Medić, T., Holst, C., Kuhlmann, H., 2019: Improving the results of terrestrial laser scanner calibration by an optimized calibration process. *18. Oldenburger 3D-Tage 2019, Vortragsfolien*, 40 Seiten.
- Neitzel, F., Gordon, B., Wujanz, D., 2014: DVW-Merkblatt »Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)«, 15.05.2014, 18 Seiten. <https://www.dvw.de/merkblatt>
- Parian, J.A., Grün, A., 2010: Sensor modeling, self-calibration and accuracy testing of panoramic cameras and laser scanners. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65, 60-76.



Prüfung und Kalibrierung

Literaturquellen (2/2)



- Reshetyuk, Y., 2009: Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Doctoral thesis in Infrastructure, Geodesy, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, TRITA-TEC-PHD 09-001, 162 p.
- Walsh, G., 2015: Leica ScanStation P-Series – Details that matter. Leica ScanStation, White Paper, Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland, 20 pages.

https://abtech.cc/wp-content/uploads/2017/04/Leica_ScanStation_P-Series_details_that_matter_wp_en.pdf