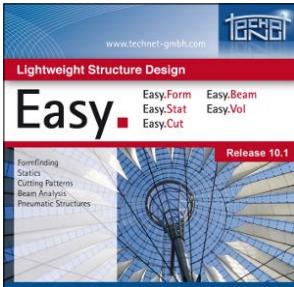


Kalibrierung von Achsabweichungen bei Panoramalaserscannern

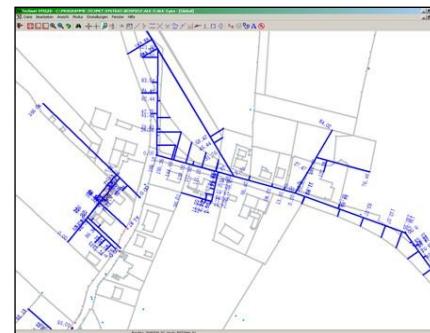
Frank Gielsdorf
technet GmbH



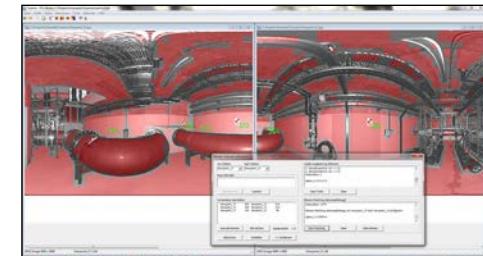
Nationalstadion - Peking



Allianz Arena I - München



Katasteranalyse, Homogenisierung



Scanregistrierung

Geodätische Ausgleichungsrechnung

Registrierung



Puzzle von Hunderten von Scans

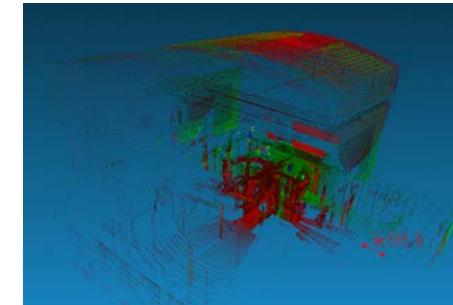
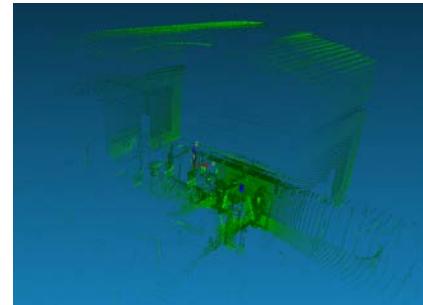
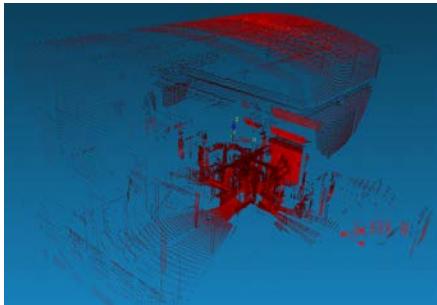
Gesucht: Registrierungsparameter

\mathbf{t} Translationsvektor

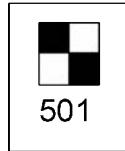
q Rotationsquaternion (\mathbf{R} Rotationsmatrix)

und...

Genauigkeit + Zuverlässigkeit



Registrierung über Targets



501

3...10 Punktformige Targets pro Scan

Funktionales Modell: $\dot{x}_g = \dot{t} + \dot{q} \cdot \dot{x}_l \cdot \dot{q}^{-1}$

Unbekannte: 7

Restriktionen: 1

Freiheitsgrade: 6

Redundanz: 3...24

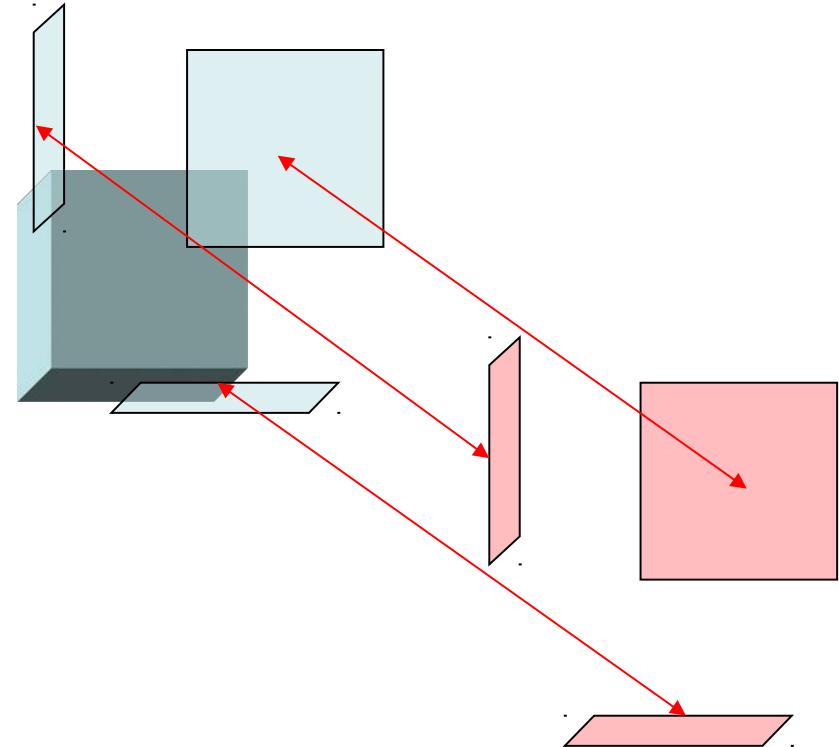
Genauigkeit: $\sigma \approx \pm 3 \dots 5 \text{ mm}$

Registrierung über Ebenen

Scantra Idee:

Drei nicht-komplanare identische Ebenen legen einen Körper im 3D-Raum eindeutig fest.

Redundanz $r = 3$

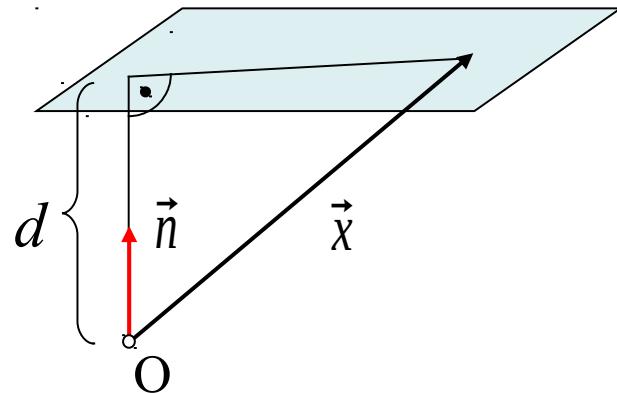


Ebenen-Detektion

500 ... 1000 Ebenen pro Scan



Ebenen-Detektion

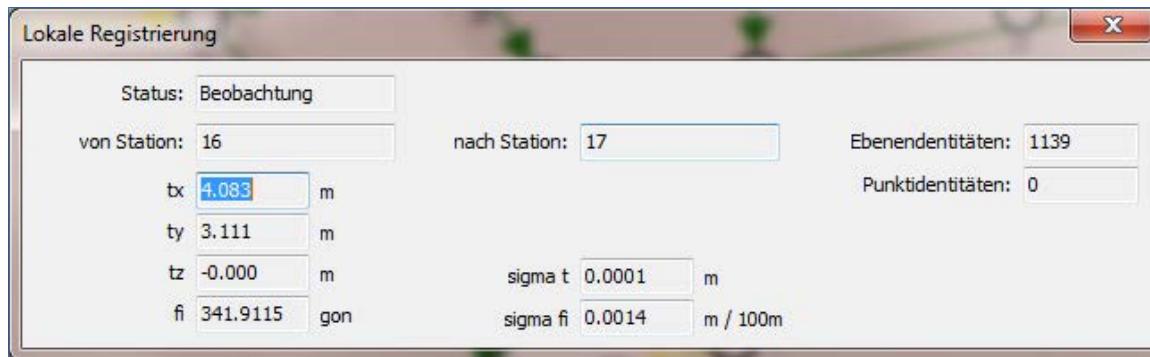
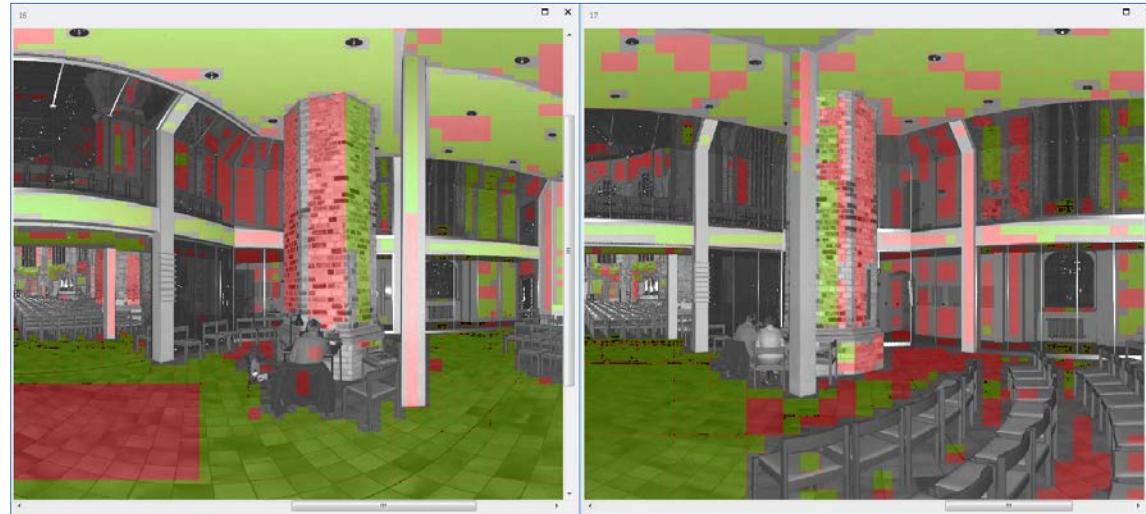


$$\vec{n} \cdot \vec{x} - d = 0$$

- Normalenvektor \mathbf{n}
- Translationsparameter d
- Kovarianzmatrix der Parameter

$$\mathbf{l} = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \\ d \end{pmatrix} \quad \mathbf{C}_{11} = \begin{pmatrix} \sigma_{nxnx}^2 & \cdots & \cdots & \text{cov}(\dots) \\ \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & \sigma_{dd}^2 \end{pmatrix}$$

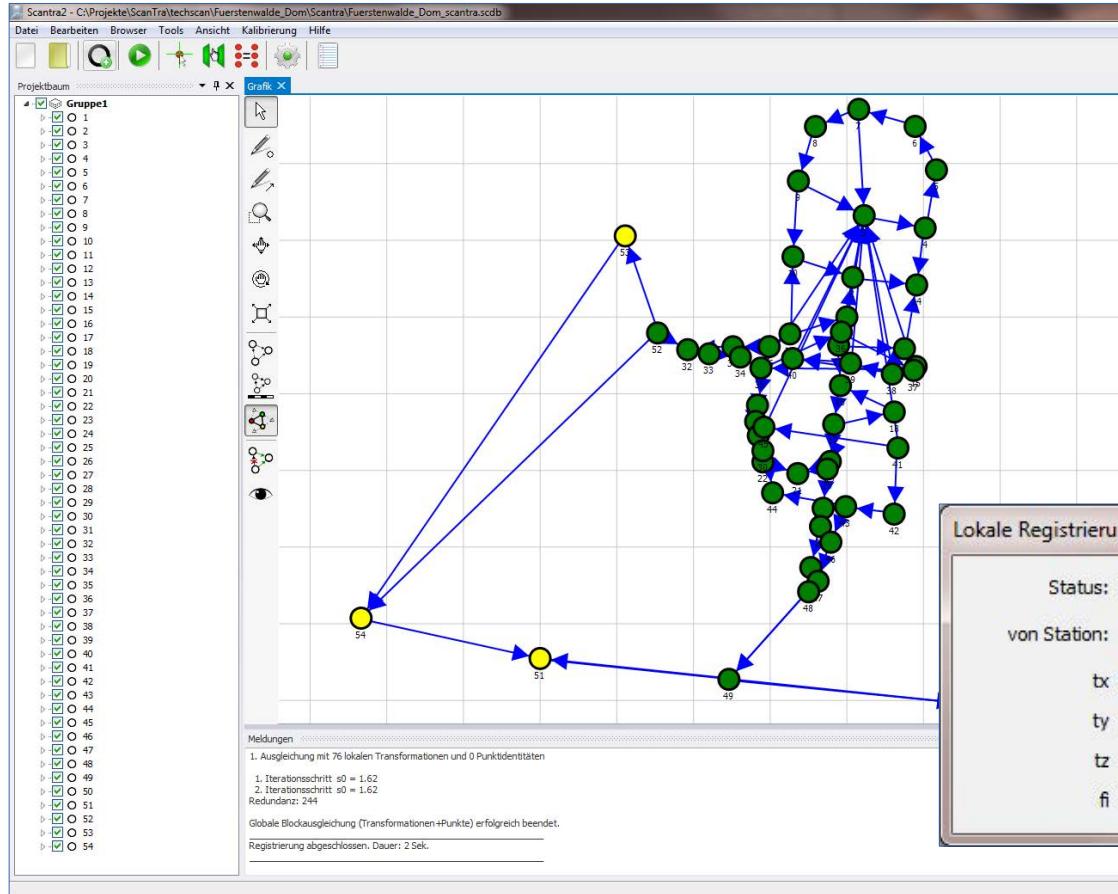
Ebenen-Matching



Ergebnis:

$$\mathbf{l} = \begin{pmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_x \\ \dot{q}_y \\ \dot{q}_z \\ t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \quad \mathbf{C}_{ll} = \begin{pmatrix} \sigma_{\dot{q}_0}^2 & \cdots & \text{cov}(\dots) \\ \ddots & \ddots & \vdots \\ & & \sigma_{t_z}^2 \end{pmatrix}$$

Blockausgleichung



Meldungen

1. Ausgleichung mit 76 lokalen Transformationen und 0 Punktidentitäten

1. Iterationsschritt $s_0 = 1.62$
 2. Iterationsschritt $s_0 = 1.62$
 Redundanz: 244

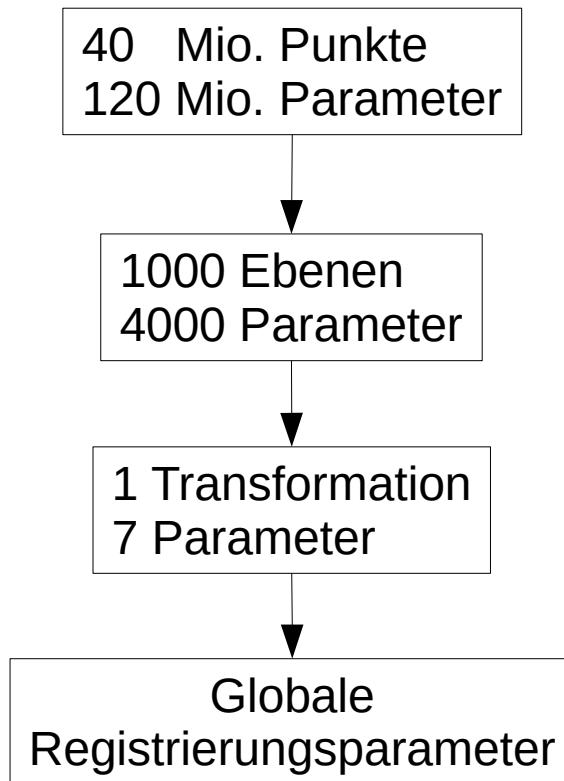
Globale Blockausgleichung (Transformationen+Punkte) erfolgreich beendet.

Registrierung abgeschlossen. Dauer: 2 Sek.

Lokale Registrierung

Status: Beobachtung		Ebenenidentitäten: 1139
von Station:	16	nach Station: 17
tx	4.083	m
ty	3.111	m
tz	-0.000	m
fi	341.9115	gon
sigma t	0.0001	m
sigma fi	0.0014	m / 100m
vt	0.0001	
EV	1.1	
s0	1.8	

Stationsausgleichung



Ebenen-Detektion

Ebenen-Matching

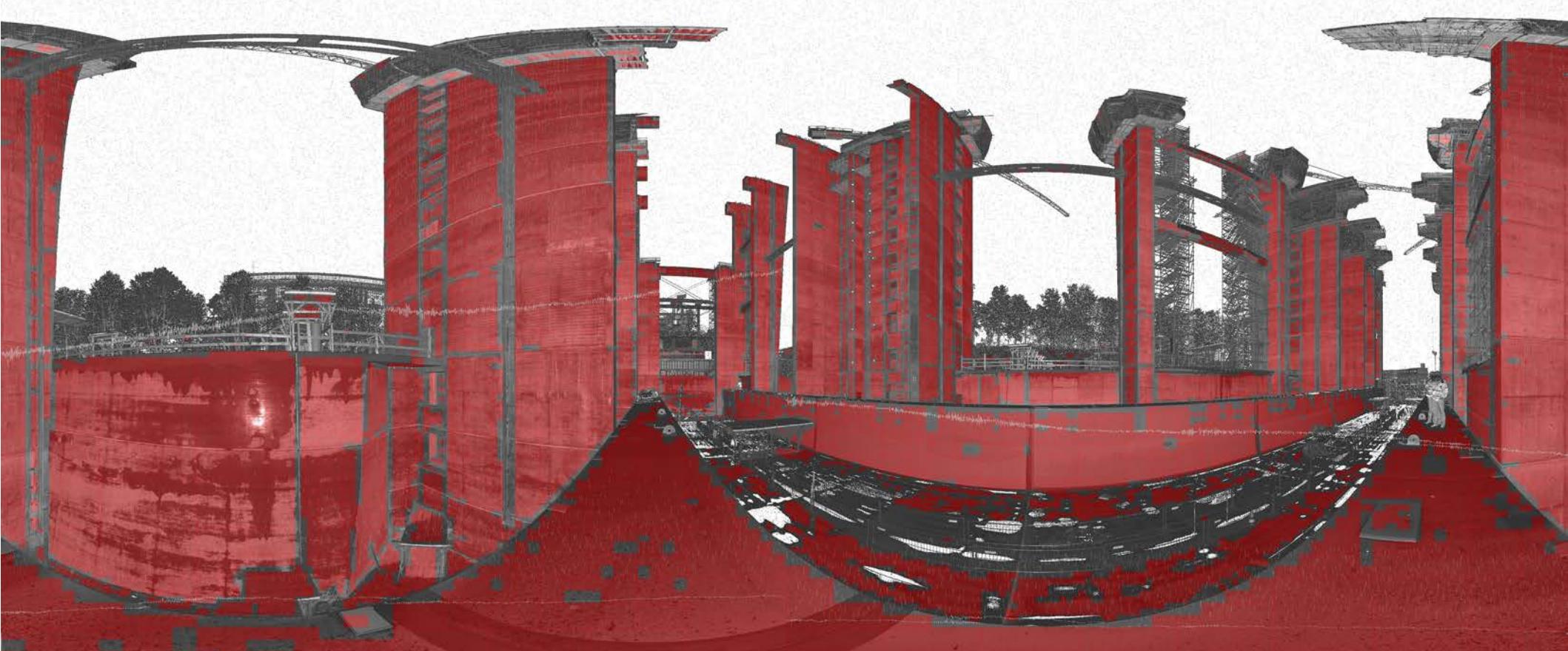
Blockausgleichung

Schiffshebewerk Niederfinow

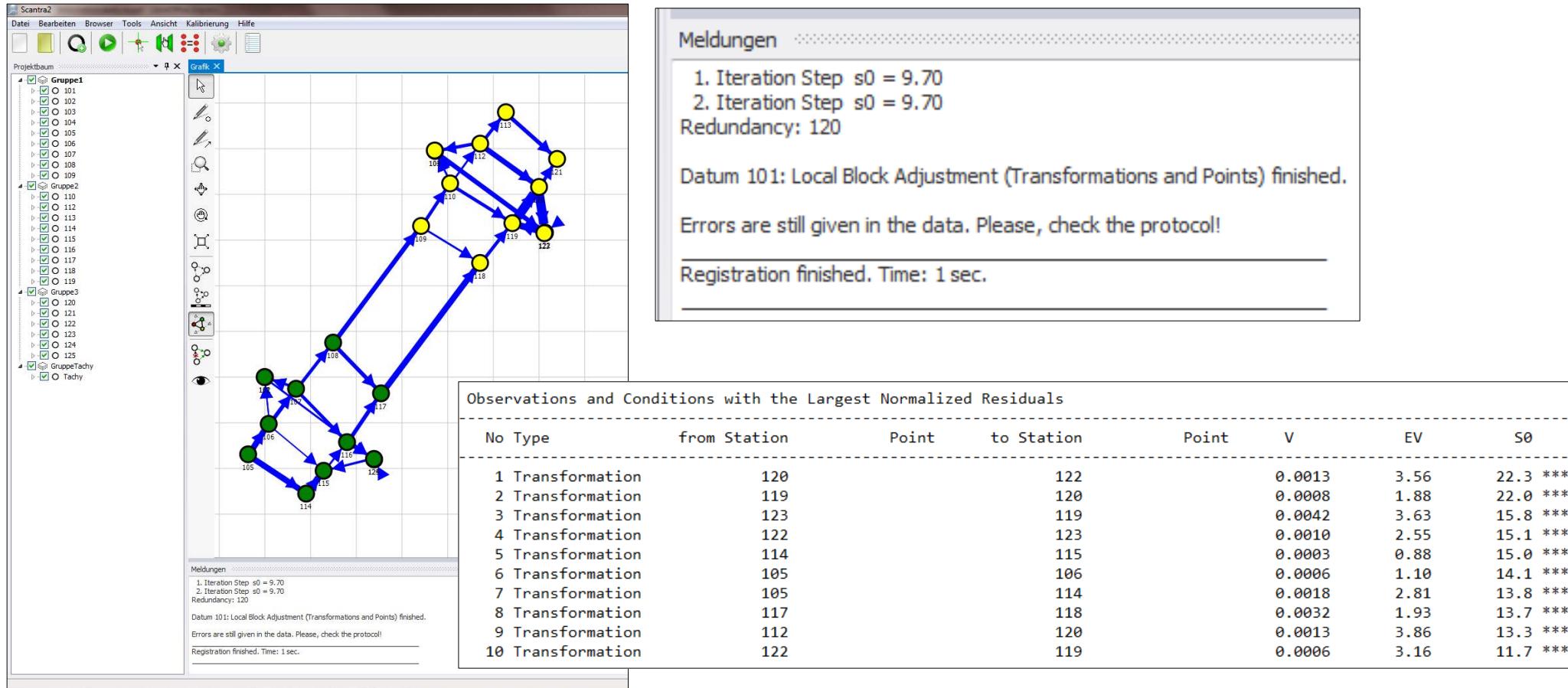


F. Giedsorf: Kalibrierung von Achsabweichungen bei Panoramalaserscannern

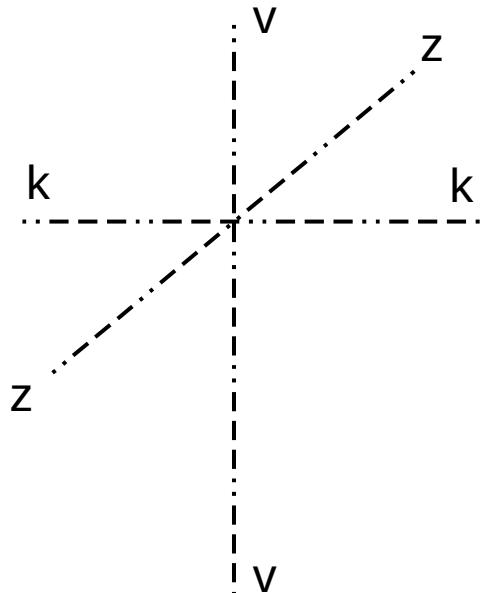
Schiffshebewerk Niederfinow



Doch dann ...



Das Theodolitmodell



vv – Stehachse
kk – Kippachse
zz – Zielachse

3 Bedingungen:

- $vv \perp kk$ > Kippachsfehler
- $kk \perp zz$ > Zielachsfehler
- $zz \perp vv$ bei $\zeta = 90^\circ$ > Höhenindexfehler

Drehung mit Quaternion

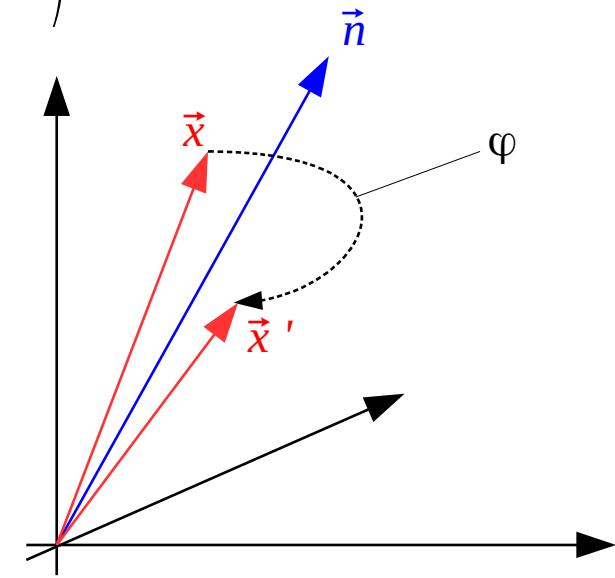
Rotationsquaternion:

$$\dot{q} = (q_0, q_x, q_y, q_z) = \left(\cos\left(\frac{\varphi}{2}\right), \underbrace{\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot n_x, \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot n_y, \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot n_z}_{\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \vec{n}} \right) \text{ mit } |\vec{n}| = 1$$

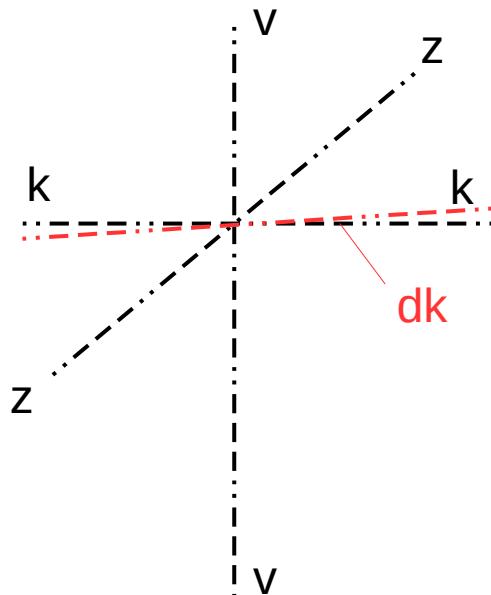
Vektor als Quaternion: $\vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \Rightarrow \dot{x} = (0, x, y, z)$

Rotation:

$$\dot{x}' = \dot{q} \cdot \dot{x} \cdot \dot{q}^{-1}$$



Beispiel Kippachsfehler



Fehlerfreies orientiertes Instrumentensystem

$$\dot{vv} = (0,0,0,1)$$

$$\dot{kk} = (0,0,1,0)$$

$$\dot{zz} = (0,1,0,0)$$

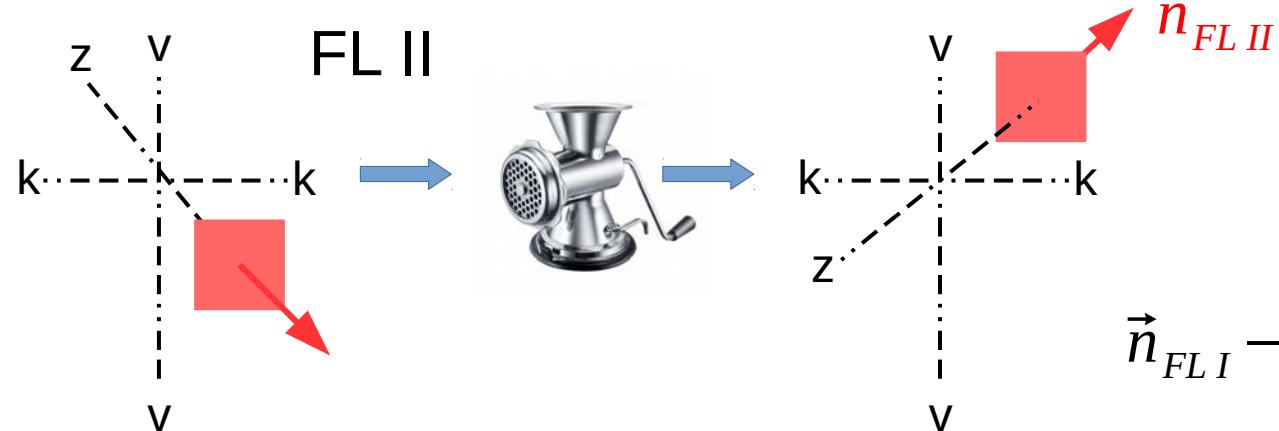
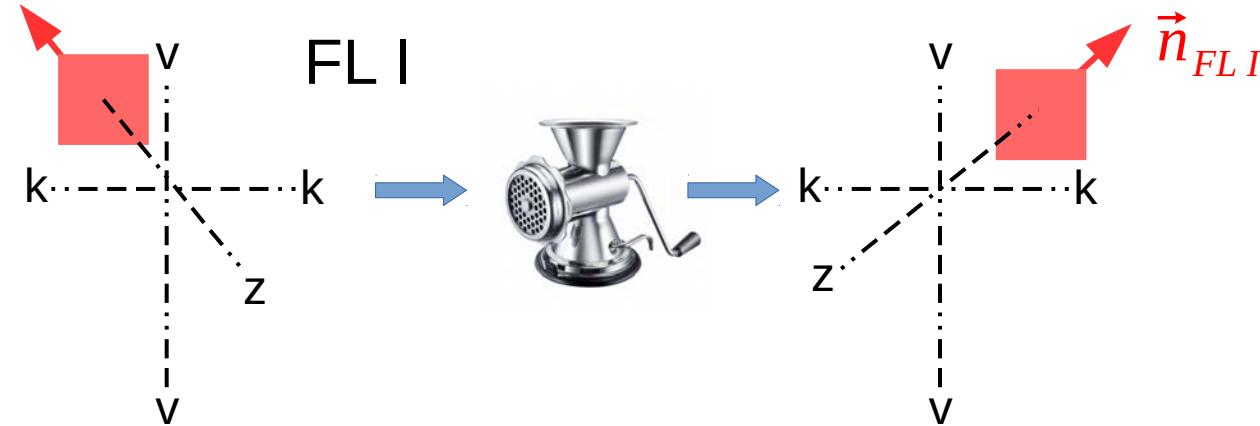
Quaternion des Kippachsfehlers

$$\dot{dk} = \left(\cos\left(\frac{dk}{2}\right), \sin\left(\frac{dk}{2}\right), 0, 0 \right)$$

Gedrehte Kippachse

$$\dot{kk}' = \dot{dk} \cdot \dot{kk} \cdot \dot{dk}^{-1}$$

Funktionaler Zusammenhang

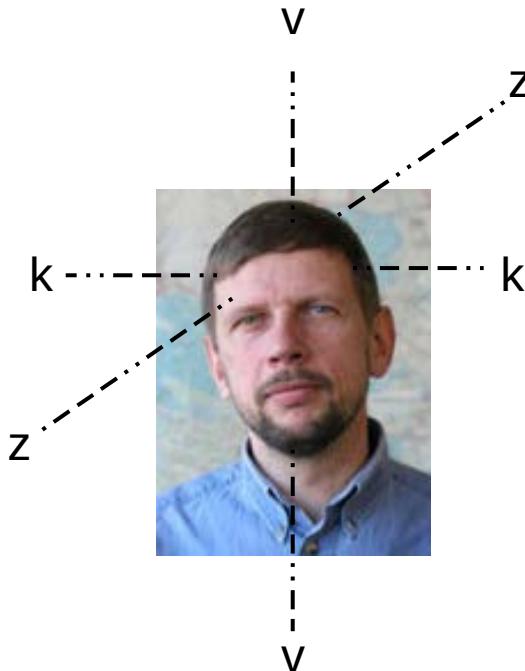


Bedingung:

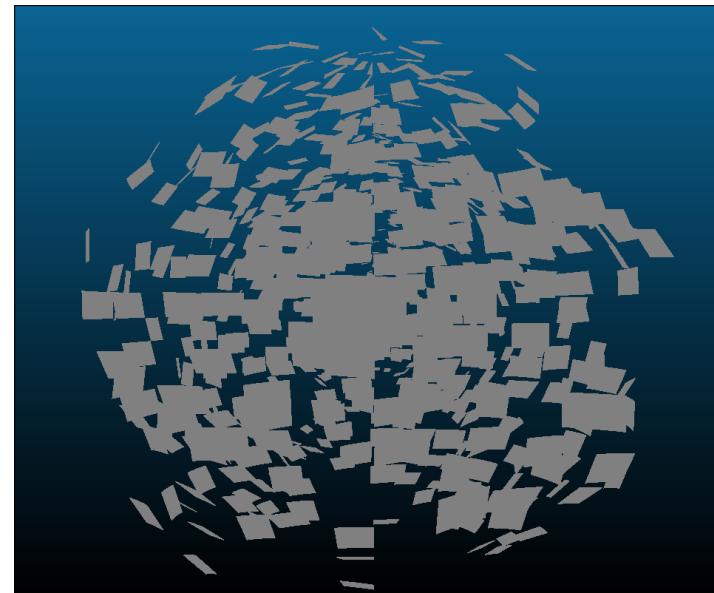
$$\vec{n}_{FL I} - \vec{n}_{FL II} = f(dk, dz, dh) = 0$$

Test Virtuell

Virtueller Scanner



Virtueller Kalibrierraum



Definierbare
Achsfehler

Überprüfbarkeit
des
Ausgleichungs-
modells

Erster Versuch



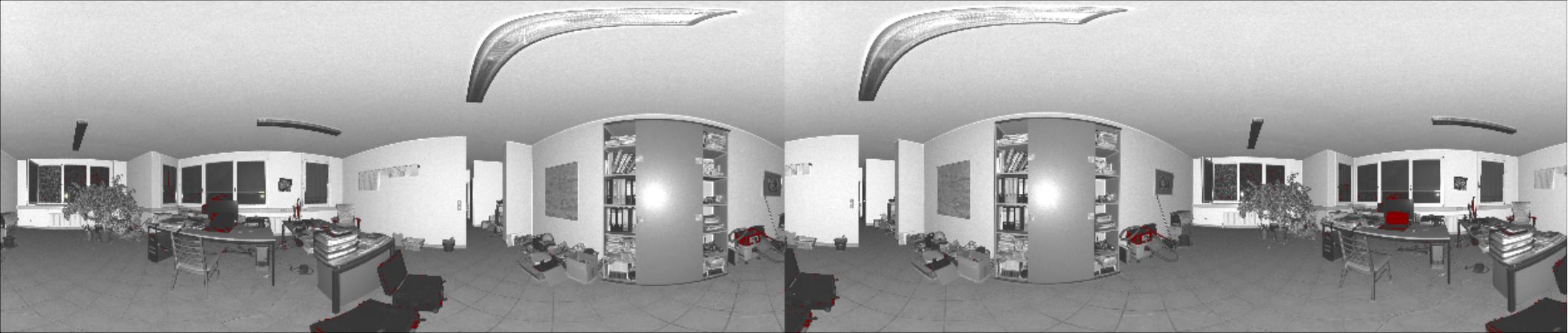
Ungeeignete
Anordnung

Zu wenig
vertikale
Ebenen

Keine Decke

Zweiter Versuch

Geeignete Anordnung



Viele Ebenen

Gut verteilt

Zweiter Versuch

Das perfekte Kalibrierfeld: Das eigene Büro!



Ergebnis für 1 Scan 2x360°

Calibration Parameters

	Index Error [°]	Index Error [rad]	Collimation Error [rad]	Horizontal Axis Error [rad]
calculated parameters	0.00336000	0.00005864	0.00001439	0.00023685
standard deviation	0.00028608	0.00000499	0.00000501	0.00001856
significance level	11.7	11.7	2.9	12.8

Standardabweichung: $\approx 1\text{e-}5 \text{ rad}$ $\rightarrow 0,1\text{mm} / 10\text{m}$

2 Scans 2x180°

Scannen
2x180°



→
Scanner
auf dem
Stativteller
um ca. 180°
drehen

Scannen
2x180°



→ Kalibrieren

Ergebnis für 2 Scans 2x180°

qx : 2.548464e-03 +- 3.324790e-05
qy : -4.669526e-04 +- 2.390849e-05
qz : 9.999995e-01 +- 1.409303e-07

fi : 177.9704°

tx : 0.0003 +- 0.0000
ty : -0.0007 +- 0.0000
tz : -0.0002 +- 0.0001

Calibration Parameters

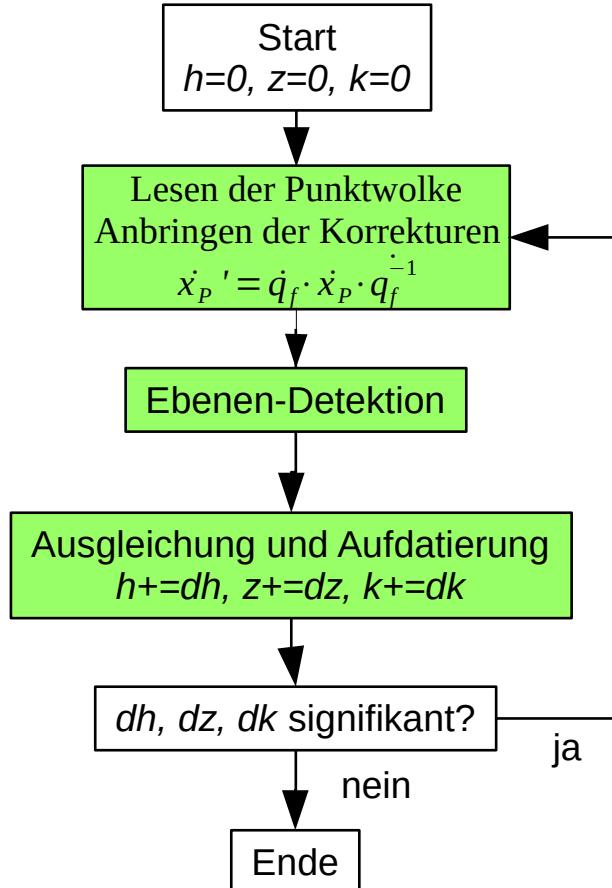
	Index Error [rad]	Collimation Error [rad]	Horizontal Axis Error [rad]
calculated parameters	0.00006255	0.00006788	0.00017993
standard deviation	0.00002732	0.00000625	0.00003663
significance level	2.3	10.9	4.9

Standardabweichung: $\approx 4\text{e-}5 \text{ rad} \rightarrow 0,4\text{mm} / 10\text{m}$

Korrelationen bei 2x180°

q_θ	q_x	q_y	q_z	t_x	t_y	t_z	dh	dz	dk	
$1.0e+00$	$-5.2e-02$	$-4.7e-02$	$-8.0e-01$	$-4.7e-01$	$2.2e-03$	$3.9e-03$	$-2.6e-02$	$6.4e-02$	$-3.5e-02$	q_θ
$-5.2e-02$	$1.0e+00$	$-5.6e-02$	$-5.5e-01$	$-2.0e-02$	$-1.4e-02$	$-6.5e-02$	$-2.2e-02$	$2.0e-01$	$7.5e-01$	q_x
$-4.7e-02$	$-5.6e-02$	$1.0e+00$	$1.5e-01$	$-1.2e-02$	$-3.5e-02$	$-6.7e-02$	$2.5e-01$	$5.4e-02$	$-6.2e-02$	q_y
$-8.0e-01$	$-5.5e-01$	$1.5e-01$	$1.0e+00$	$4.0e-01$	$3.7e-03$	$3.0e-02$	$5.4e-02$	$-1.6e-01$	$-4.2e-01$	q_z
$-4.7e-01$	$-2.0e-02$	$-1.2e-02$	$4.0e-01$	$1.0e+00$	$2.2e-02$	$4.9e-03$	$-1.5e-01$	$-9.8e-02$	$-1.6e-02$	t_x
$2.2e-03$	$-1.4e-02$	$-3.5e-02$	$3.7e-03$	$2.2e-02$	$1.0e+00$	$-9.5e-03$	$-1.0e-01$	$-3.6e-01$	$3.4e-02$	t_y
$3.9e-03$	$-6.5e-02$	$-6.7e-02$	$3.0e-02$	$4.9e-03$	$-9.5e-03$	$1.0e+00$	$-3.5e-02$	$-1.8e-02$	$-1.2e-01$	t_z
$-2.6e-02$	$-2.2e-02$	$2.5e-01$	$5.4e-02$	$-1.5e-01$	$-1.0e-01$	$-3.5e-02$	$1.0e+00$	$1.1e-01$	$-9.1e-03$	dh
$6.4e-02$	$2.0e-01$	$5.4e-02$	$-1.6e-01$	$-9.8e-02$	$-3.6e-01$	$-1.8e-02$	$1.1e-01$	$1.0e+00$	$1.2e-01$	dz
$-3.5e-02$	$7.5e-01$	$-6.2e-02$	$-4.2e-01$	$-1.6e-02$	$3.4e-02$	$-1.2e-01$	$-9.1e-03$	$1.2e-01$	$1.0e+00$	dk

Berechnungsprozess



Meldungen

```

Start Calibration...

1. Outer Iteration...
Reading Points Position 1...
10674137 points read.
Plane Detection Position 1...
Plane detection position 1 finished.
Reading Points Position 2...
21388582 points read.
Plane Detection Position 2...
Plane detection position 2 finished.
241 plane identities found.
Start Adjustment...
1. iteration: 0.21
2. iteration: 0.21
Adjustment finished.

2. Outer Iteration...
Reading Points Position 1...
10674137 points read.
Plane Detection Position 1...
Plane detection position 1 finished.
Reading Points Position 2...
21388582 points read.
Plane Detection Position 2...
Plane detection position 2 finished.
242 plane identities found.
Start Adjustment...
1. iteration: 0.20
2. iteration: 0.20
Adjustment finished.

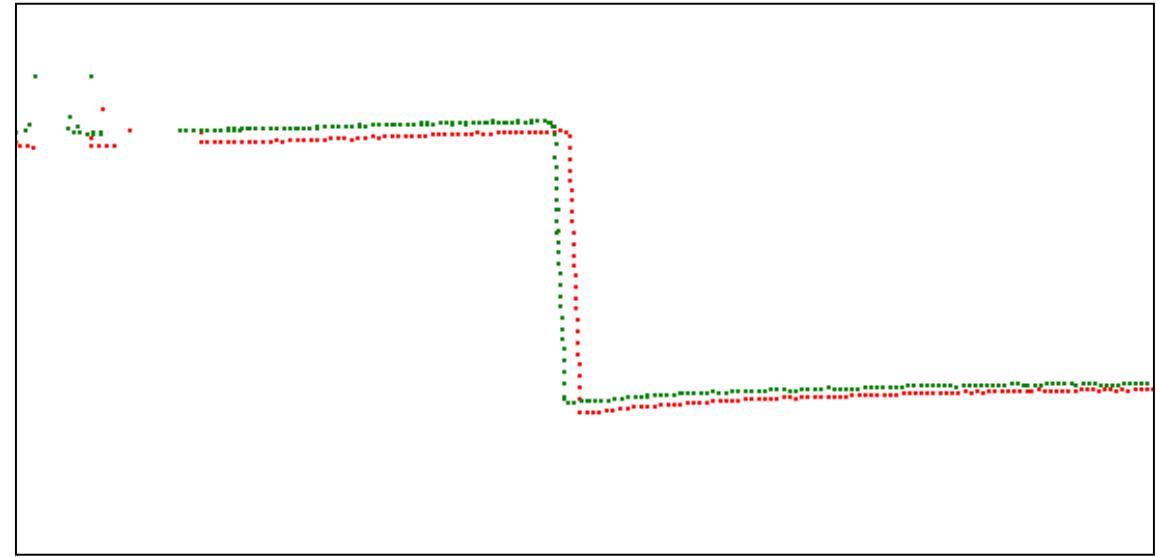
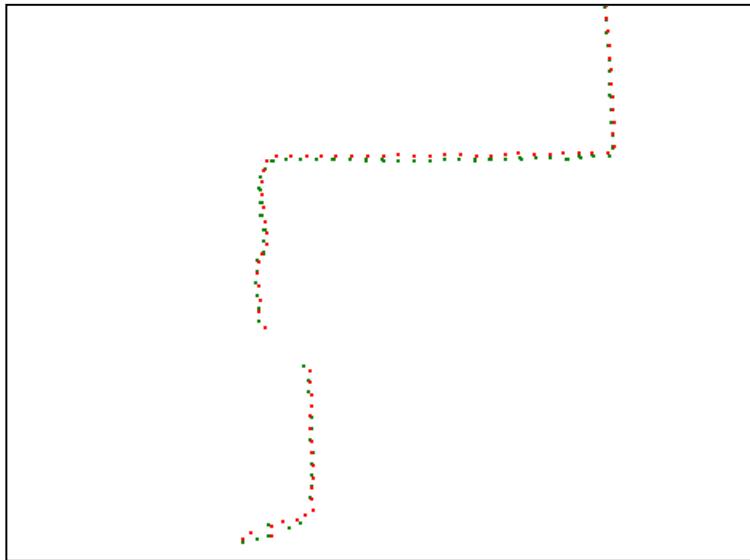
3. Outer Iteration...
Reading Points Position 1...
10674137 points read.
Plane Detection Position 1...
Plane detection position 1 finished.
Reading Points Position 2...
21388582 points read.
Plane Detection Position 2...
Plane detection position 2 finished.
242 plane identities found.
Start Adjustment...
1. iteration: 0.20
2. iteration: 0.20
Adjustment finished.

4. Outer Iteration...
Reading Points Position 1...
10674137 points read.
Plane Detection Position 1...
Plane detection position 1 finished.
Reading Points Position 2...
21388582 points read.
Plane Detection Position 2...
Plane detection position 2 finished.
241 plane identities found.
Start Adjustment...
1. iteration: 0.20
2. iteration: 0.20
Adjustment finished.

Calibration finished.
  
```

Vor der Kalibrierung

$\Delta \approx 1 \dots 2 \text{cm}$



Ergebnis der Kalibrierung

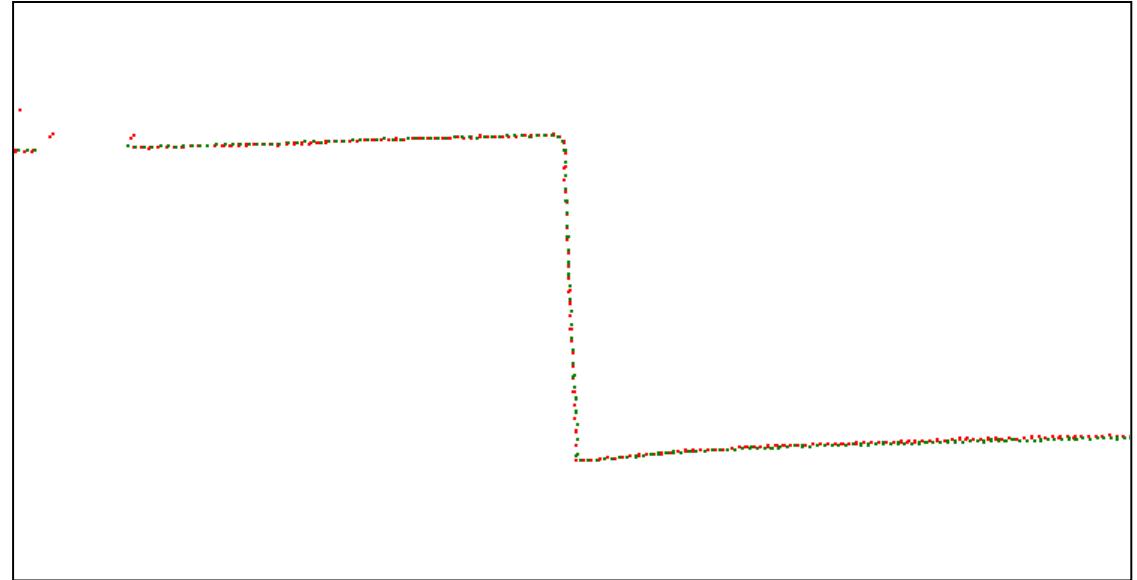
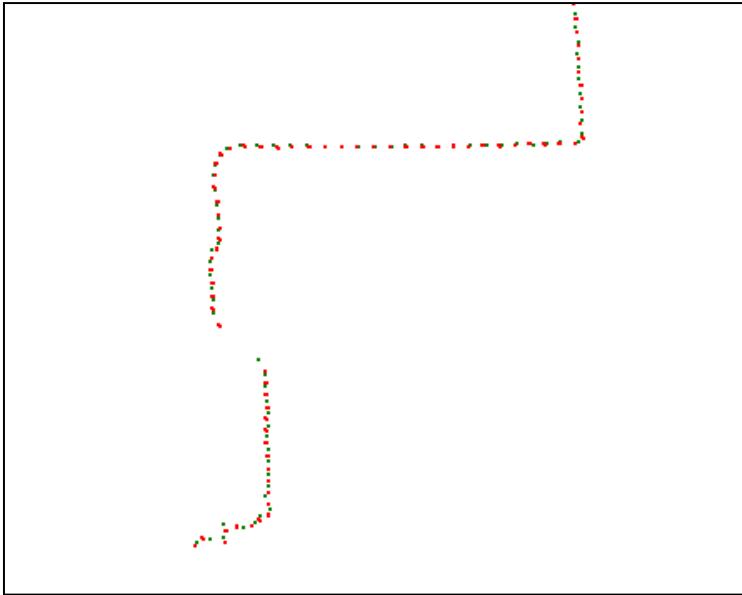
q0 : 2.044195e-02 +- 1.049554e-05
qx : -1.948611e-04 +- 1.253080e-05
qy : -1.810876e-03 +- 2.341455e-05
qz : 9.999994e-01 +- 2.164083e-07

tx : 2.615455e-05 +- 6.501545e-05
ty : -8.475944e-04 +- 5.366922e-05
tz : -3.775997e-04 +- 4.571237e-05

Calibration Parameters

	Index Error [rad]	Collimation Error [rad]	Horizontal Axis Error [rad]
calculated parameters	-0.00053286	0.00136625	-0.00071713
standard deviation	0.00001691	0.00001268	0.00004512
significance level of difference	31.5	107.8	15.9

Nach der Kalibrierung



Nach der Kalibrierung beim Hersteller

q0 : -2.265872e-02 +- 1.127182e-05
qx : 6.942938e-05 +- 1.304779e-05
qy : -9.514435e-04 +- 2.550702e-05
qz : 1.000003e+00 +- 2.573586e-07

fi : 182.5967°

tx : 0.0002 +- 0.0001
ty : -0.0011 +- 0.0001
tz : -0.0005 +- 0.0000

Calibration Parameters

	Index Error [rad]	Collimation Error [rad]	Horizontal Axis Error [rad]
calculated parameters	0.00020119	-0.00050943	0.00028050
standard deviation	0.00001902	0.00001516	0.00004401
significance level of difference	10.6	33.6	6.4

Fazit

- Achsfehler von Panoramascannern können mit einer Standardabweichung in der Größenordnung $1e-5$ rad im Feld (Büro) bestimmt werden.
- Die mit Scantra bestimmten Kalibrierparameter können beim Einlesen der Punktfolge angebracht werden.
- Entzerrte Punktfolgen können exportiert werden.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

frank.gielsdorf@technet-gmbh.com