

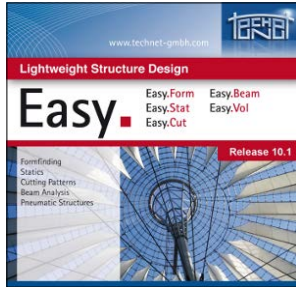


# Kalibrierung von Achsabweichungen bei Panoramalaserscannern

Frank Gielsdorf  
technet GmbH



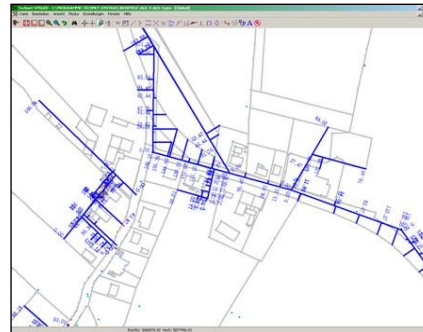
# technet GmbH



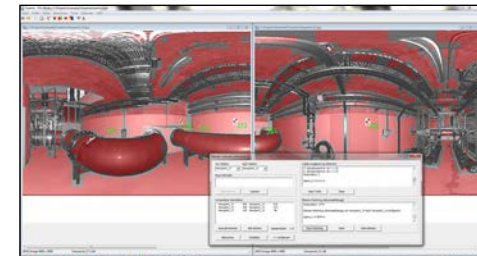
Nationalstadion - Peking



Allianz Arena I - München



Katasteranalyse, Homogenisierung



Scanregistrierung

## Geodätische Ausgleichungsrechnung

# Registrierung



Puzzle von Hunderten von Scans

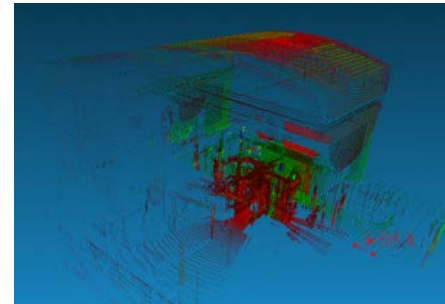
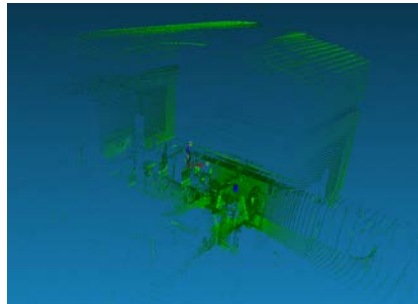
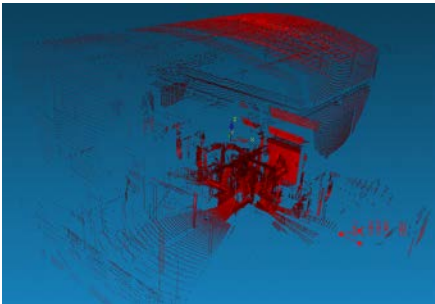
Gesucht: Registrierungsparameter

$\mathbf{t}$  Translationsvektor

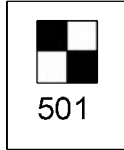
$q$  Rotationsquaternion ( $\mathbf{R}$  Rotationsmatrix)

und...

Genauigkeit + Zuverlässigkeit



# Registrierung über Targets



3...10 Punktförmige 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

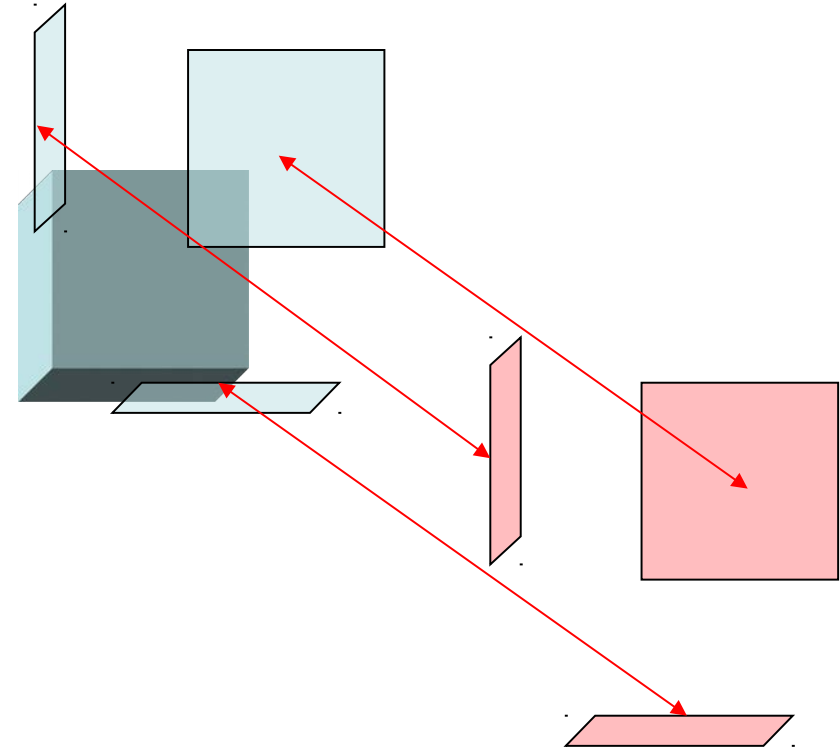
Genauigkeit:  $\sigma \approx \pm 3 \dots 5 \text{ mm}$

# Registrierung über Ebenen

## Scantra Idee:

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

Redundanz  $r = 3$



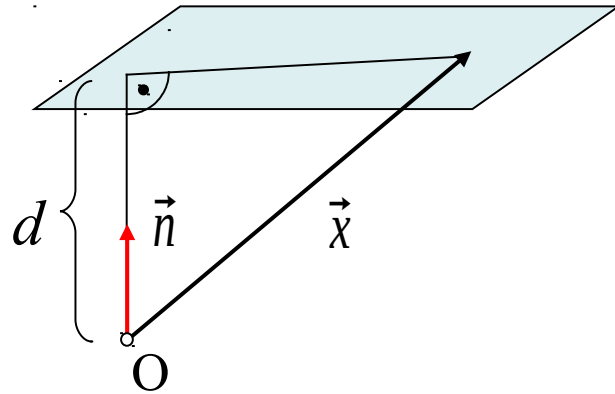


# Ebenen-Detektion

500 ... 1000 Ebenen pro Scan



# Ebenen-Detektion



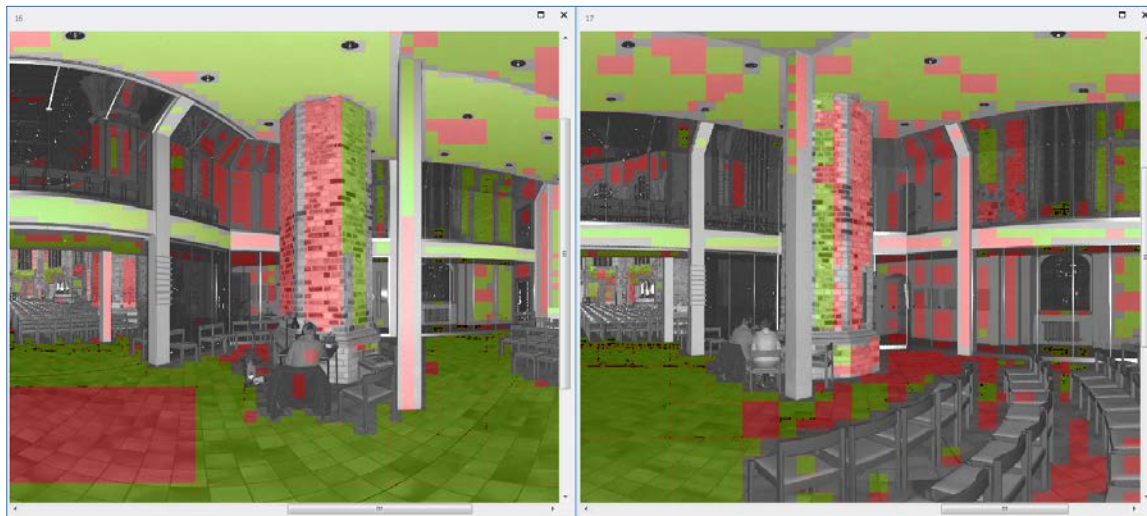
$$\vec{n} \cdot \vec{x} - d = 0$$

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

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



# Ebenen-Matching



**Lokale Registrierung**

Status: Beobachtung

von Station: 16      nach Station: 17      Ebenenidentitäten: 1139

Punktidentitäten: 0

tx: 4.083 m      sigma t: 0.0001 m

ty: 3.111 m      sigma fi: 0.0014 m / 100m

tz: -0.000 m

fi: 341.9115 gon

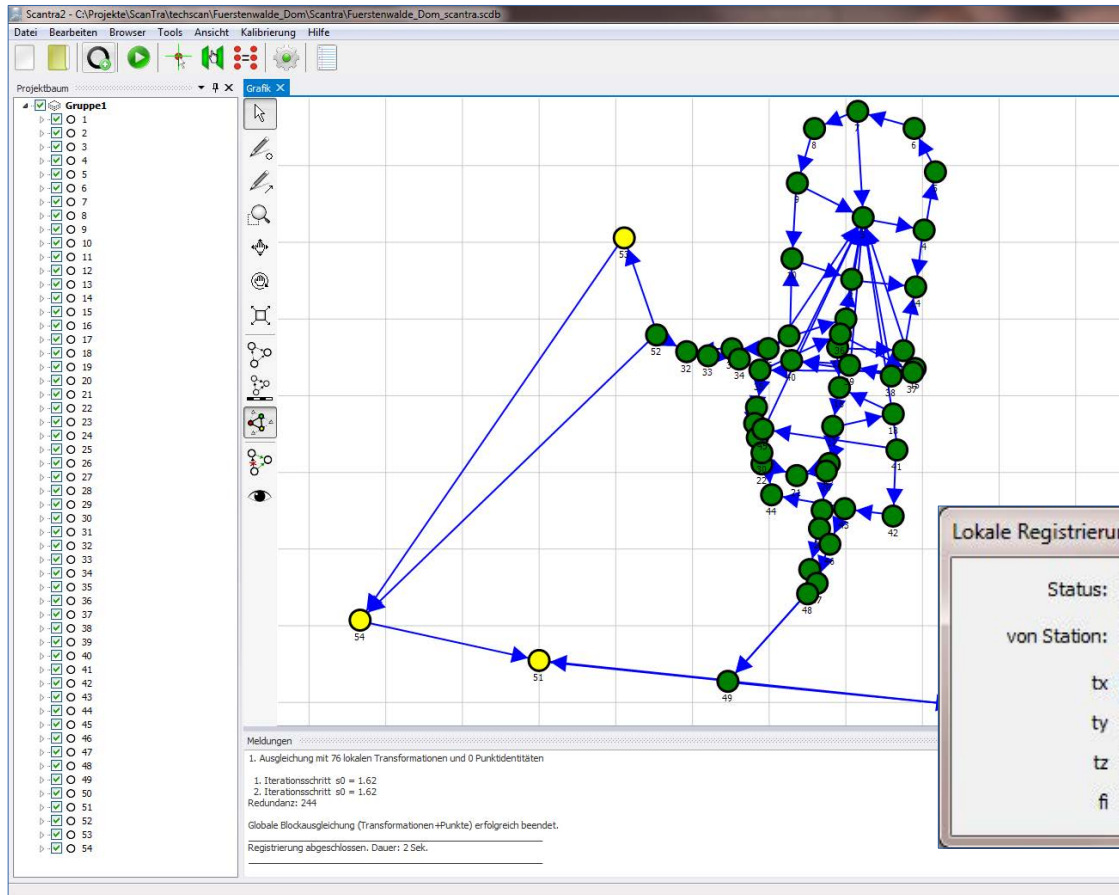
Ergebnis:

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





# 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

von Station: 16

nach Station: 17

Ebenenentitäten: 1139

Punktentitäten: 0

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

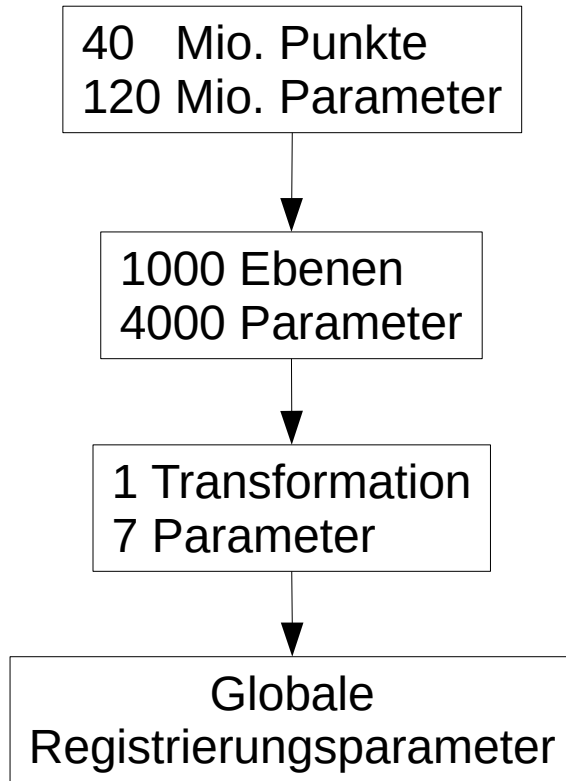
vt 0.0001

EV 1.1

s0 1.8



# Stationsausgleichung



Ebenen-Detektion

Ebenen-Matching

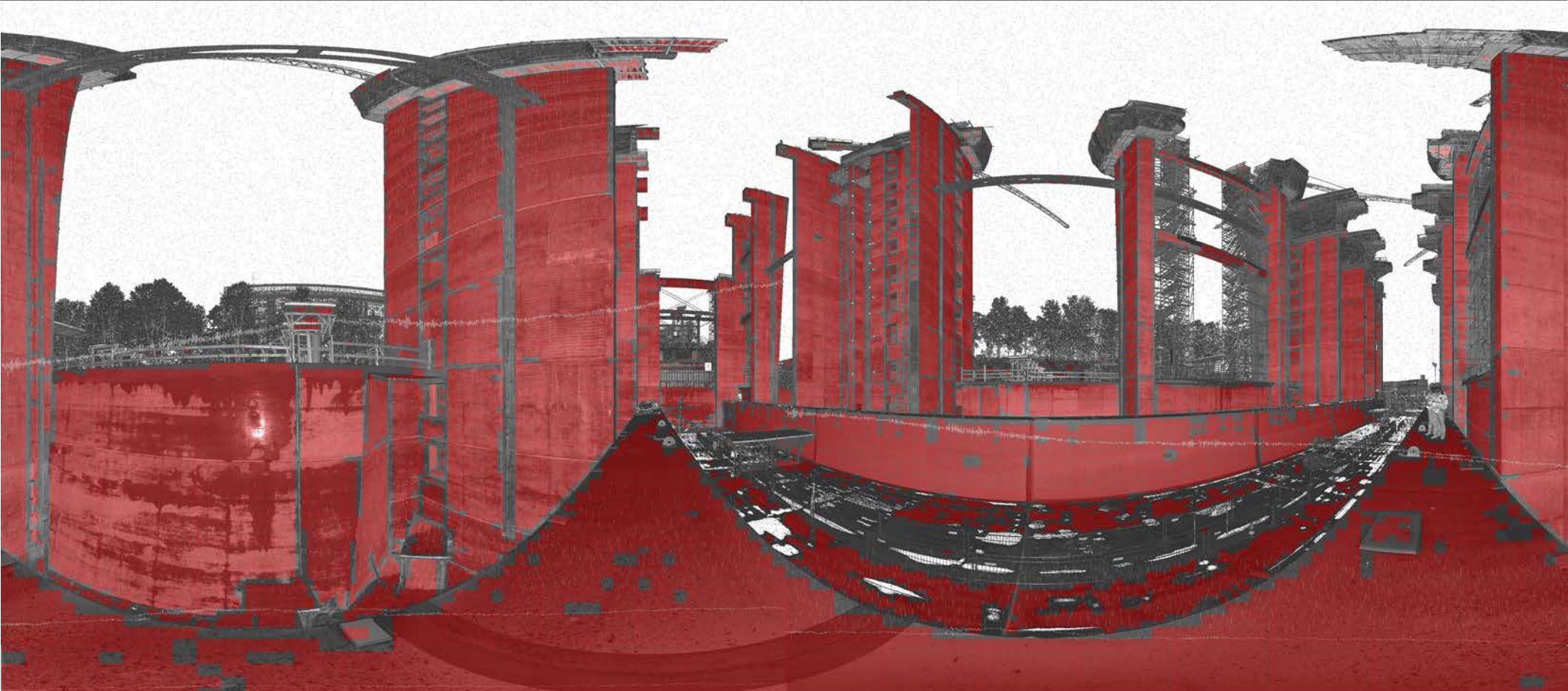
Blockausgleichung

# Schiffshebewerk Niederfinow



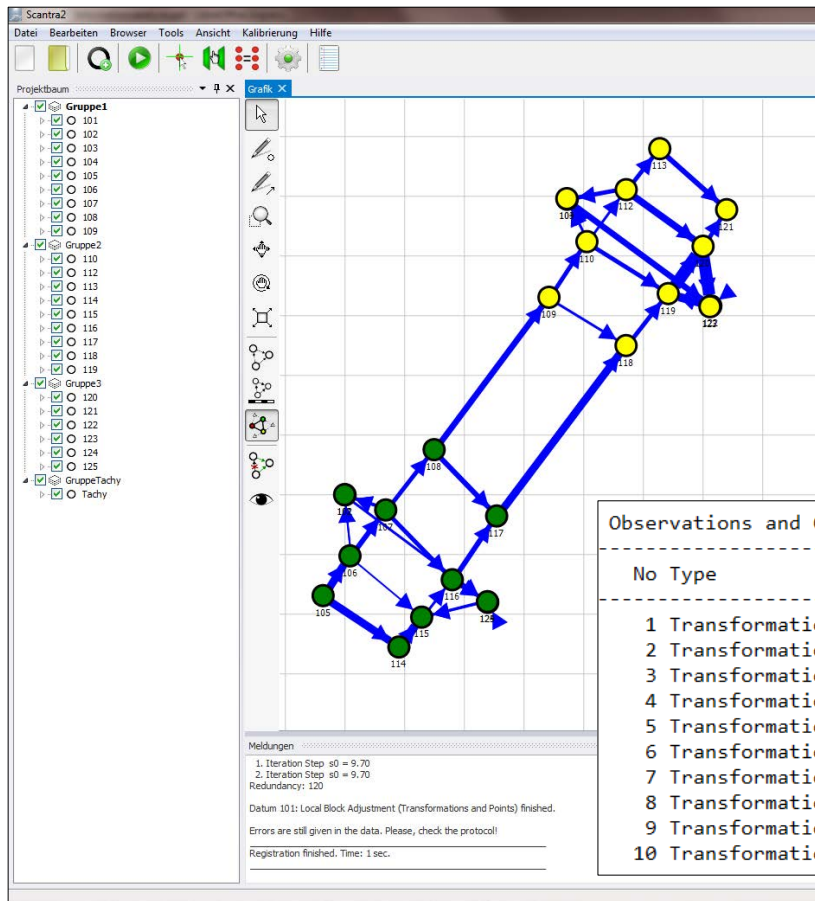


# Schiffshebewerk Niederfinow





# Doch dann ...

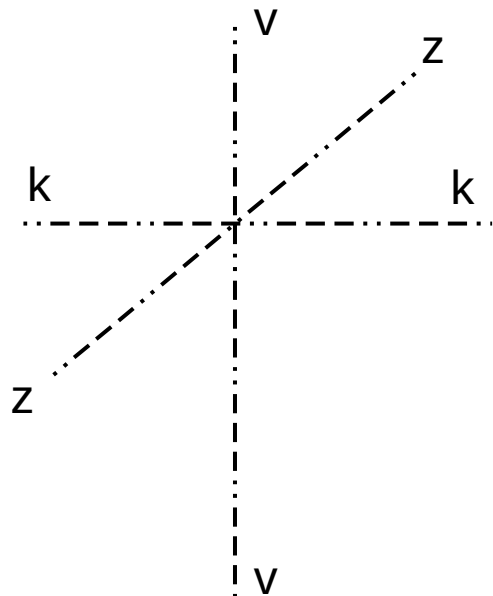


Observations and Conditions with the Largest Normalized Residuals

No	Type	from Station	Point	to Station	Point	V	EV	S0
1	Transformation	120		122		0.0013	3.56	22.3 ***
2	Transformation	119		120		0.0008	1.88	22.0 ***
3	Transformation	123		119		0.0042	3.63	15.8 ***
4	Transformation	122		123		0.0010	2.55	15.1 ***
5	Transformation	114		115		0.0003	0.88	15.0 ***
6	Transformation	105		106		0.0006	1.10	14.1 ***
7	Transformation	105		114		0.0018	2.81	13.8 ***
8	Transformation	117		118		0.0032	1.93	13.7 ***
9	Transformation	112		120		0.0013	3.86	13.3 ***
10	Transformation	122		119		0.0006	3.16	11.7 ***



# Das Theodolitmodell



$vv$  – Stehachse

$kk$  – Kippachse

$zz$  – Zielachse

3 Bedingungen:

$$vv \perp kk$$

> Kippachsfehler

$$kk \perp zz$$

> Zielachsfehler

$$zz \perp vv \text{ bei } \zeta = 90^\circ$$

> Höhenindexfehler

# Drehung mit Quaternion

Rotationsquaternion:

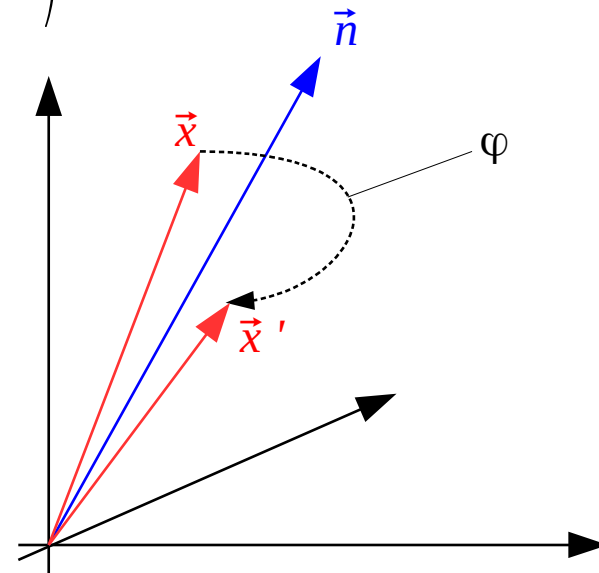
$$\dot{q} = (q_0, q_x, q_y, q_z) = \left( \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right), \underbrace{\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot n_x, \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot n_y, \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot n_z}_{\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \vec{n}} \right) \quad \text{mit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

Vektor als Quaternion:

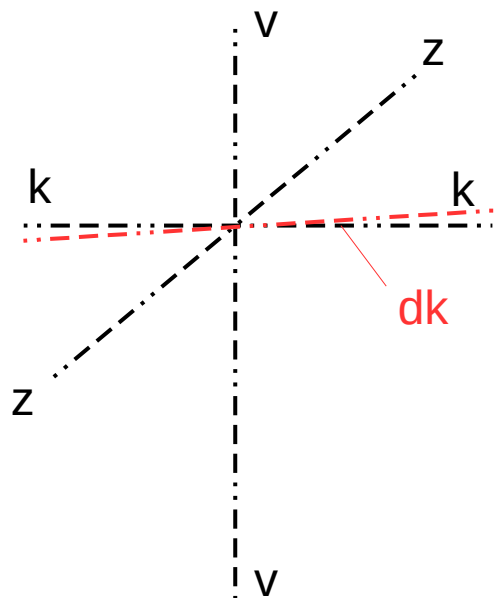
$$\vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \Rightarrow \dot{x} = (0, x, y, z)$$

Rotation:

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



# Beispiel Kippachsfehler



Fehlerfreies orientiertes Instrumentensystem

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

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

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

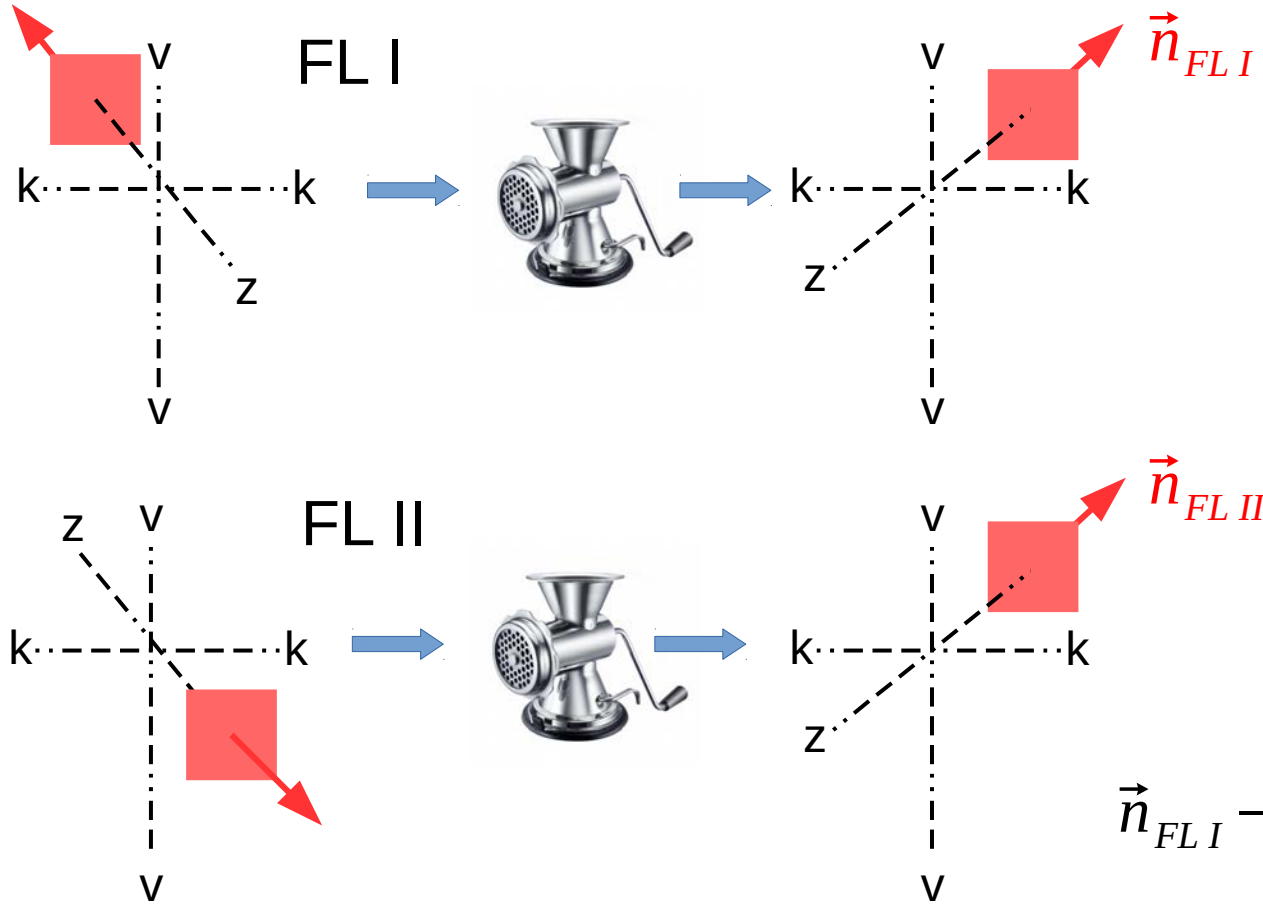
Quaternion des Kippachsfehlers

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

Gedrehte Kippachse

$$\dot{k}k' = \dot{d}k \cdot \dot{k}k \cdot \dot{d}k^{-1}$$

# Funktionaler Zusammenhang

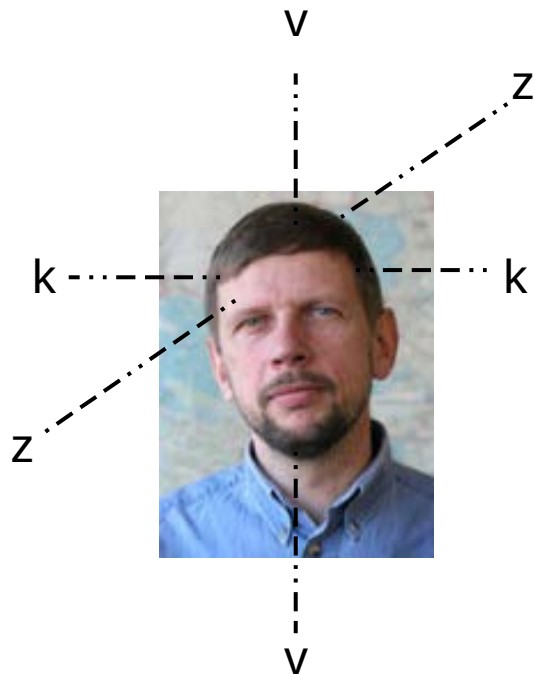


Bedingung:

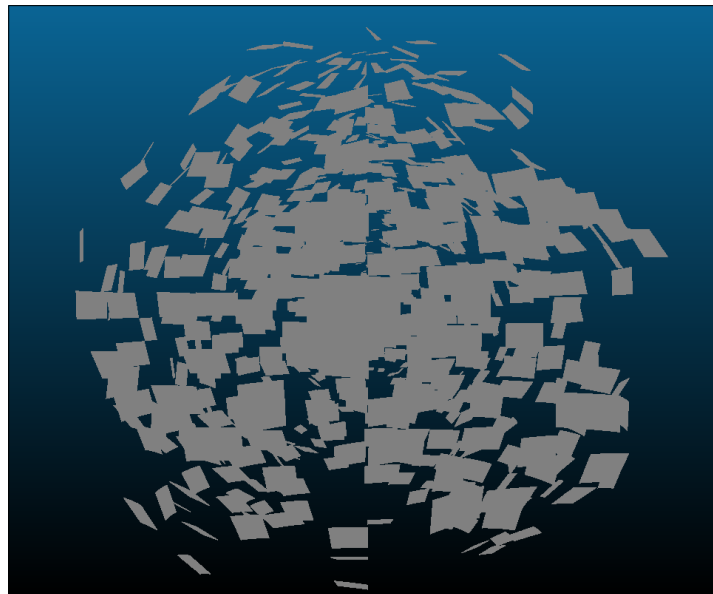
$$\vec{n}_{FL I} - \vec{n}_{FL II} = f(dk, dz, dh) = 0$$

# Test Virtuell

## Virtueller Scanner



## Virtueller Kalibrierraum



Definierbare  
Achsfelder

Überprüfbarkeit  
des  
Ausgleichungs-  
modells



# Erster Versuch



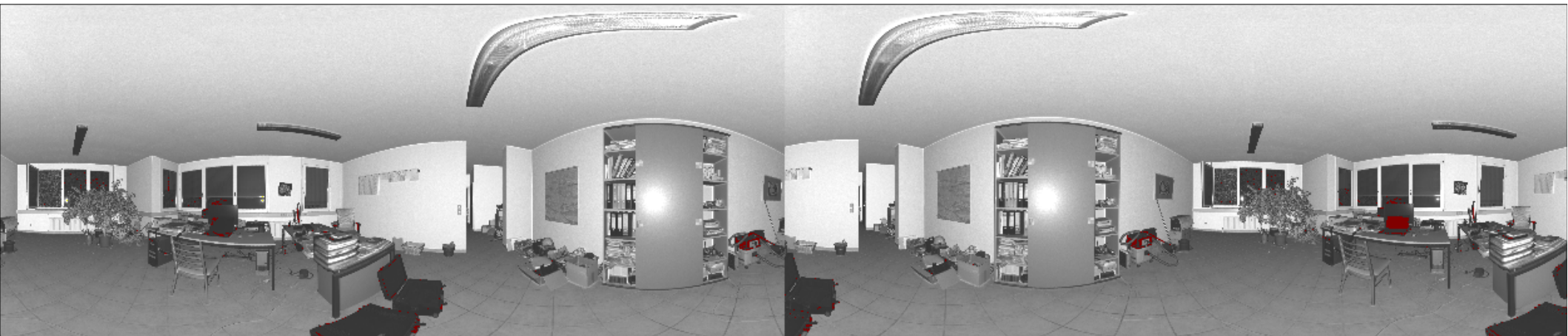
Ungeeignete  
Anordnung

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

# 2 Scans $2 \times 180^\circ$

Scannen  
 $2 \times 180^\circ$



Scanner  
auf dem  
Stativteller  
um ca.  $180^\circ$   
drehen



Scannen  
 $2 \times 180^\circ$



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

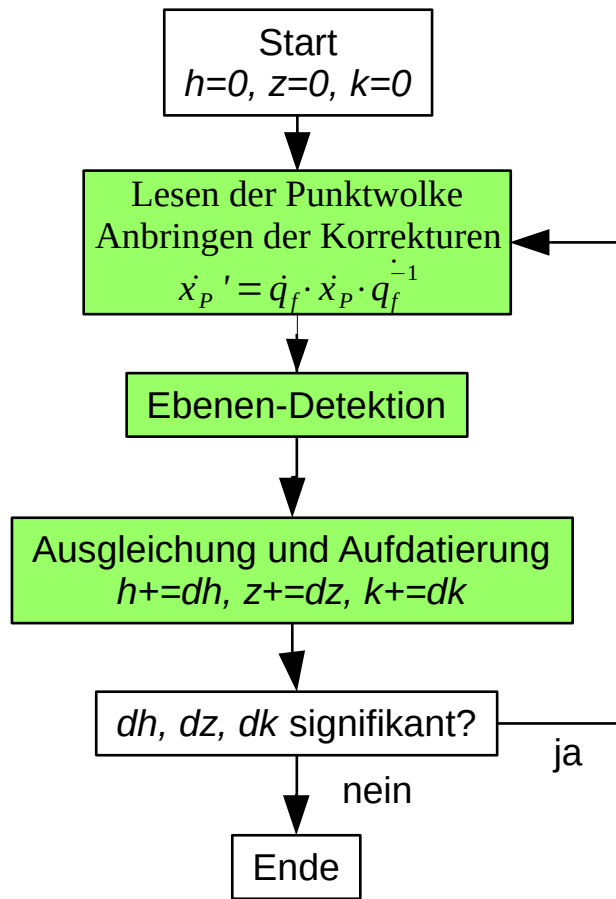


# Korrelationen bei $2 \times 180^\circ$

$q_\theta$	$q_x$	$q_y$	$q_z$	$t_x$	$t_y$	$t_z$	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	$q_\theta$
-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.

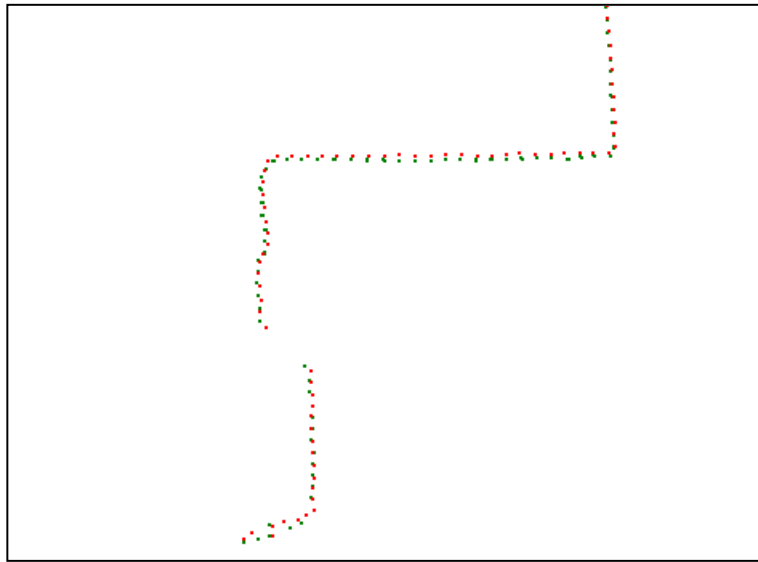
3. Outer Iteration...  
Reading Points Position 1...  
10674137 points read.  
Plane Detection Position 1...  
Plane detection position 1 finished.  
Reading Points Position 2...  
21388582 points read.  
Plane Detection Position 2...  
Plane detection position 2 finished.  
242 plane identities found.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

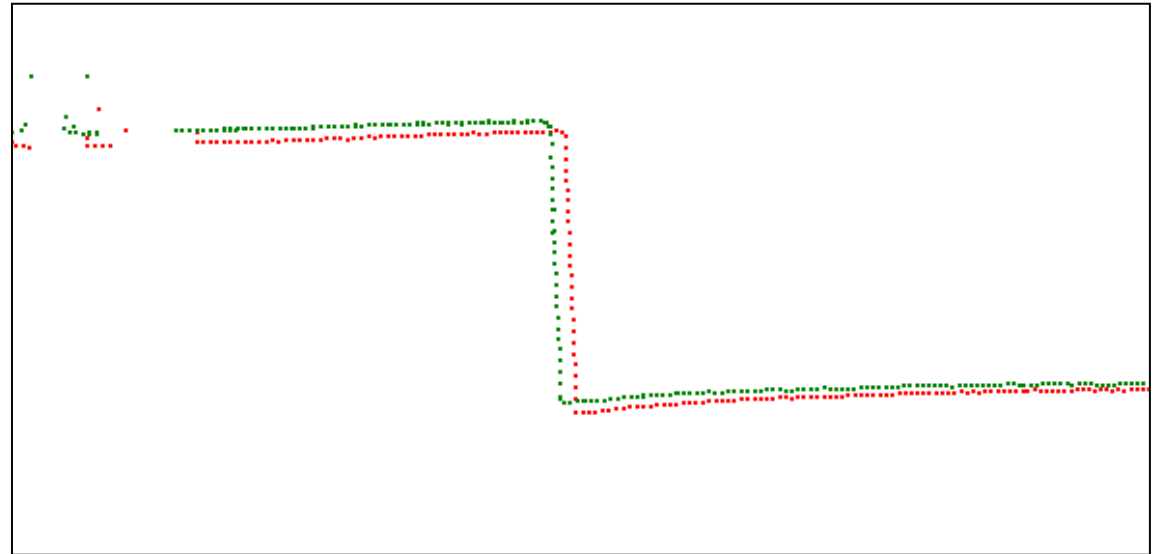
Calibration finished.



# Vor der Kalibrierung



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





# 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

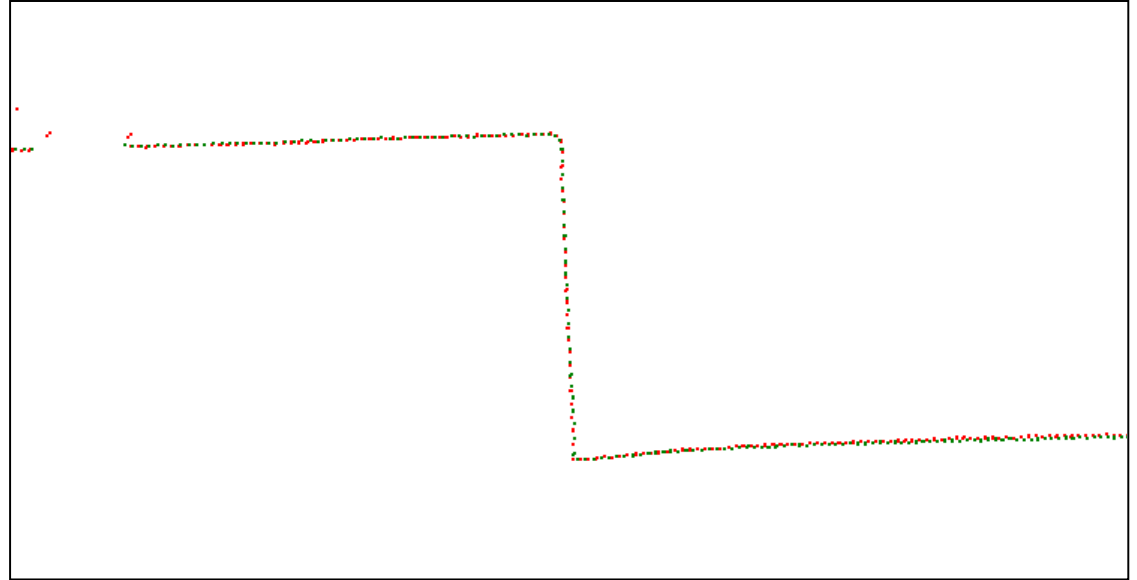
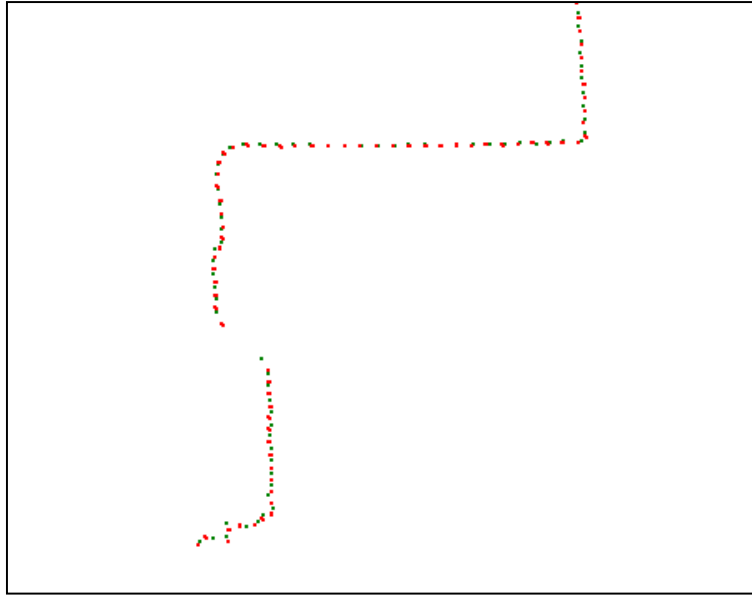
## Calibration Parameters

	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 Punktwolke angebracht werden.
- Entzerrte Punktwolken können exportiert werden.



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

[frank.gielsdorf@technet-gmbh.com](mailto:frank.gielsdorf@technet-gmbh.com)