

Praktische Erfahrungen bei der TLS-Prüfung

Prof. Dr.-Ing. Fredie Kern

4. Hamburger Anwendungsforum Terrestrisches
Laserscanning
23. Juni 2011 • HafenCity Universität Hamburg



Kenngroßen Auto

1. Preis



Modelle mit Ottomotor	Getriebe	Türen	Leistung kW (PS)	Preis in €
Polo Trendline	5-Gang	2	44 (60)	12.275,-
	5-Gang	2	51 (70)	12.800,-
	BlueMotion Technology	2	51 (70)	13.300,-

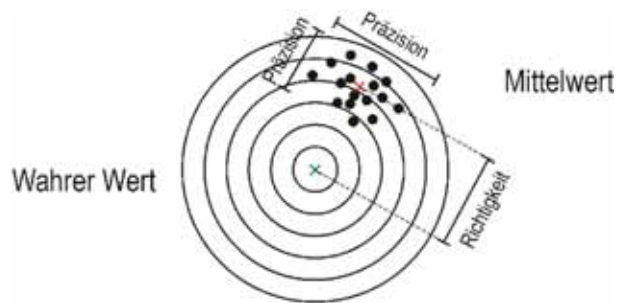
2. Umweltverträglichkeit & Unwirtschaftlichkeit

Kraftstoffverbrauch, l/100 km ⁴⁾	Kraftstoff	Superbenzin o. Normalbenzin schwefelfrei, mind. 91 ROZ nach DIN EN 228 ⁵⁾
	mit Schaltgetriebe: innerorts/außerorts/kombiniert mit Doppelkupplungsgetriebe DSG: innerorts/außerorts/kombiniert	7,3/4,5/5,5 -
CO ₂ -Emission kombiniert, g/km ⁴⁾	mit Schaltgetriebe	128
	mit Doppelkupplungsgetriebe DSG	-

[Verkaufsprospekt Der Polo, www.volkswagen.de 21.06.2011]

Kenngroößen Terrestrischer Laserscanner

1. Genauigkeit & Zuverlässigkeit
2. Materialabhängigkeiten (Objektreflektivität, ...)
3. Reichweite
4. Messgeschwindigkeit
5. Preis



Beispiel Faro Focus 3D

Spezifikationen

Entfernungsmesseinheit

Eindeutigkeitsintervall: 153,49m

Reichweite Focus^{3D} 120ⁱ: 0,6m - 120m in Innenräumen oder im Freien mit normaler Beleuchtung auf 90% reflektierender Oberfläche;

Reichweite Focus^{3D} 20: 0,6m - 20m bei normaler Beleuchtung auf >10% matt reflektierender Oberfläche

Messrate: 122.000 / 244.000 / 488.000 / 976.000 Punkte/Sekunde

Systematischer Distanzfehler²: ±2mm 10m und bei 25m, bei 90% und 10% Reflektivität

Rauschen²:

@10m - ungefiltert: 0,6mm @ 90% refl. | 1,2mm rms @ 10% refl.

@10m - gefiltert⁴: 0,3mm @ 90% refl. | 0,6mm @ 10% refl.

@25m - ungefiltert: 0,95mm @ 90% refl. | 2,2mm @ 10% refl.

@25m - gefiltert⁴: 0,5mm @ 90% refl. | 1,1mm @ 10% refl.

[Datenblatt Faro Focus 3D, www.faro.com, 2010]

Was ist eine gute TLS-Messqualität?

- Natürliche Oberflächen können **formtreu** erfasst werden.
- Länge, Breite und Höhe eines Objektes werden **maßtreu** bestimmt
- Objekte werden **winkeltreu** und maßstäblich wiedergegeben
- Detailstrukturen** größer als die doppelte Abtastfrequenz können abgebildet werden.

Grundsätzlich sollte die Messqualität möglichst **unabhängig** sein von:

- Messentfernung
- räumlichen Anordnung des TLS zum Objekt (Standpunktwahl)
- Umgebungsbedingungen (Tag oder Nacht, heiß oder kalt)

Gliederung

- **Prüfrichtlinie**
- **Prüffeld am i3mainz**
- **Kenngröße Antastabweichung – Kugel**
 - Standpunktweise Auswertung
 - Standpunktübergreifende Auswertung nach Referenzierung über Passmarken (B&W, Weißer Kreis, Kugel)
- **Kenngröße Auflösungsvermögen**
 - Prüfkörper BÖHLER-Stern
 - verschiedene Messentfernungen
- **Kenngröße Antastabweichung - Ebene**
 - Prüfkörper BÖHLER-Stern
 - verschiedene Messentfernungen
- **Einfluss Auftreffwinkel**
 - schwenkbares Ziel (Platte)
- **Zusammenfassung & Fazit**

Gliederung

- **Prüfrichtlinie**
- **Prüffeld am i3mainz**
- **Kenngröße Antastabweichung – Kugel**
 - Standpunktweise Auswertung
 - Standpunktübergreifende Auswertung nach Referenzierung über Passmarken (B&W, Weißer Kreis, Kugel)
- **Kenngröße Auflösungsvermögen**
 - Prüfkörper BÖHLER-Stern
 - verschiedene Messentfernungen
- **Kenngröße Antastabweichung - Ebene**
 - Prüfkörper BÖHLER-Stern
 - verschiedene Messentfernungen
- **Einfluss Auftreffwinkel**
 - schwenkbares Ziel (Platte)
- **Zusammenfassung & Fazit**

Vorschlag für eine TLS-Prüfrichtlinie mit Kenngrößen

Offenes Forum Terrestrisches
Laserscanning
→ www.laserscanning.org

Prüfrichtlinie zur Abnahme und Überwachung von Terrestrischen Laserscanner-Systemen

- ENTWURF V1.0.2 -

von
Prof. Dr.-Ing. Fredie Kern

Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik
Lucy-Hillebrand-Straße 2
55128 Mainz
fredie.kern@fh-mainz.de

TLSRichtlinie_08

03.02.2011

L/IS

Welche Anforderungen sollte eine TLS-Prüfrichtlinie erfüllen?

- kenngrößenorientiert
- praxisbezogen
- einfach, schnell und kostengünstig
- Vergleichbarkeit zw. versch. Prüflingen herstellen
- robust

1. Antastabweichung

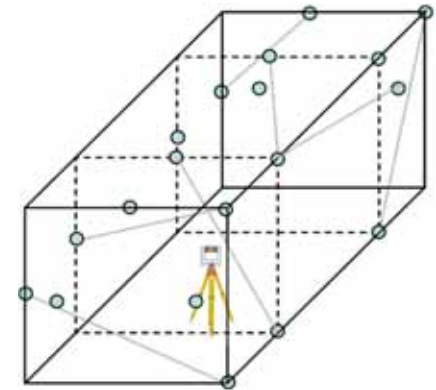
(Mittlere absolute Abweichung der $n = m \cdot k$ Abstände für k Kugeln mit je m Antastpunkten)

$$R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i|}$$

Antast-Messunsicherheit

(Mittelwert d. Std.abw. der geschätzten Radien von k Kugeln)

$$u_R = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_{\text{Radius},i}^2}$$



3D-Prüfkörperfeld

2. Abstandsabweichung ΔL

- Bestimmung der Zielmarken-Mittelpunkte eines 3D-Prüfkörperfelds
- 6-Parameter-Transformation der Mittelpunkte auf die Sollpositionen (fester Maßstab!)
- Helmertscher Punktfehler der Std.abw. d. gemessen Koordinatenwerte = ΔL

$$\Delta L = \sqrt{s_x^2 + s_y^2 + s_z^2}$$

3. Kugelradienabweichung R_K

(Mittelwert der Differenzen v_i zwischen geschätzten und Soll-Radius von k Kugeln)

$$R_K = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k v_i$$

4. Auflösungsvermögen AV

BÖHLER-Stern z.B.:

$$\gamma \geq 5^\circ, r_{\min} = 1\text{mm}, r_{\max} = 180\text{mm}$$

$$AV = \left(r_{\min} + \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \gamma$$

r_{\min} : kleinster Abstand zw. Vorder – und Rückwand
bei dem dieser signifikant ist

Vorschlag für eine TLS-Prüfrichtlinie mit Kenngrößen

Zusammenfassung der Kenngrößen

Antastabweichung

- Beschreibung des lokalen Abweichungsverhaltens der flächenhaften TLS-Messung
 - Beschreibung des üblicherweise zu erwartenden Messrauschens an einer Objektoberfläche, unabhängig vom Auftreffwinkel

Kugelradienabweichung

- spiegelt etwaige systematische Formabweichungen im Lokalen wieder
 - als Mittelwert der Differenzen zwischen geschätztem und Sollradius von Kugeln

Abstandabweichung

- Abschätzung der Maßtreue des TLS im Messvolumen
 - Überprüfung der Fähigkeit zur Rückführbarkeit auf ein Längennormal

Auflösungsvermögen

- beschreibt die Fähigkeit des TLS inwieweit eine dreidimensionale Oberflächenstruktur durch die abgetastete Punktmenge diskretisiert werden kann.

Gliederung

- Prüfrichtlinie
- **Prüffeld am i3mainz**
- **Kenngröße Antastabweichung – Kugel**
 - Standpunktweise Auswertung
 - Standpunktübergreifende Auswertung nach Referenzierung über Passmarken (B&W, Weißer Kreis, Kugel)
- **Kenngröße Auflösungsvermögen**
 - Prüfkörper BÖHLER-Stern
 - verschiedene Messentfernungen
- **Kenngröße Antastabweichung - Ebene**
 - Prüfkörper BÖHLER-Stern
 - verschiedene Messentfernungen
- **Einfluss Auftreffwinkel**
 - schwenkbares Ziel (Platte)
- **Zusammenfassung & Fazit**

Kennwertorientierte TLS-Prüfung am i3mainz

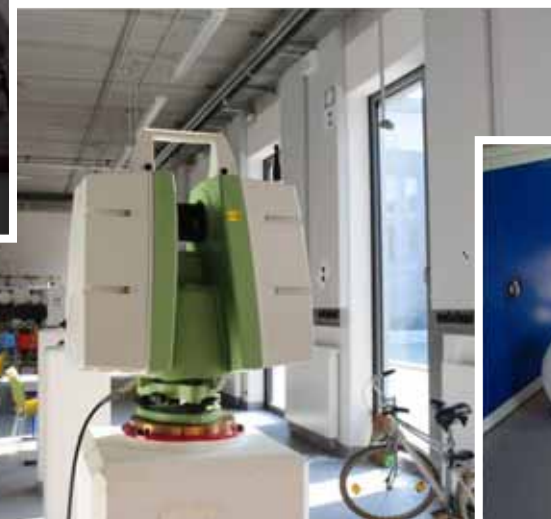
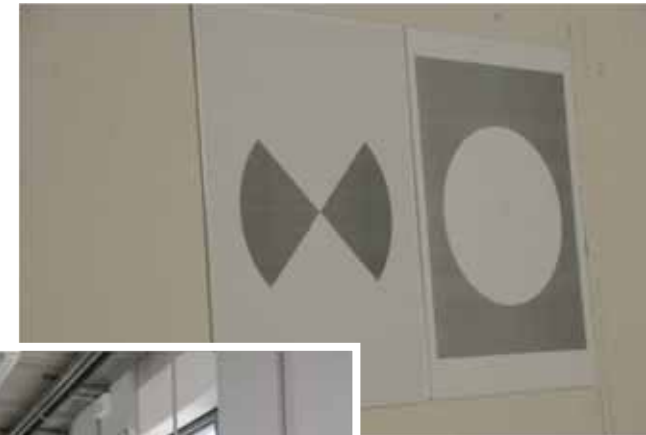
Labor für Instrumentenkunde (Erdgeschoss, Fenster n. Süden)

Prüffeld:

L 21,5m

B 7,0m

H 4,6m



Kenngroßenorientierte TLS-Prüfung am i3mainz

Prüffeld:

- 20 Positionen mit Zielmarken** unterschiedlichen Typs (Unsicherheit: 0,3 mm)
- Messvolumen: **21 m x 7 m x 4,6 m** (größere Messentfernung bis 50m möglich)
- Antastabweichung und Kugelradienabweichung mittels **verschiedener Kugeln**
- Auflösungsvermögen mittels **BÖHLER-Stern**

Messung & Auswertung:

- 4 Standpunkte (davon 2 Messpfeiler)
- Datenkonvertierung in ein gängiges Austauschformat (z.B. PTG)
- Bestimmung Zielmarkenzentren mit Software des Herstellers
- Berechnungen der Kenngroßen mit Eigenentwicklung *i3mainzScene*
- Zeitbudget für richtlinienkonforme Prüfung:

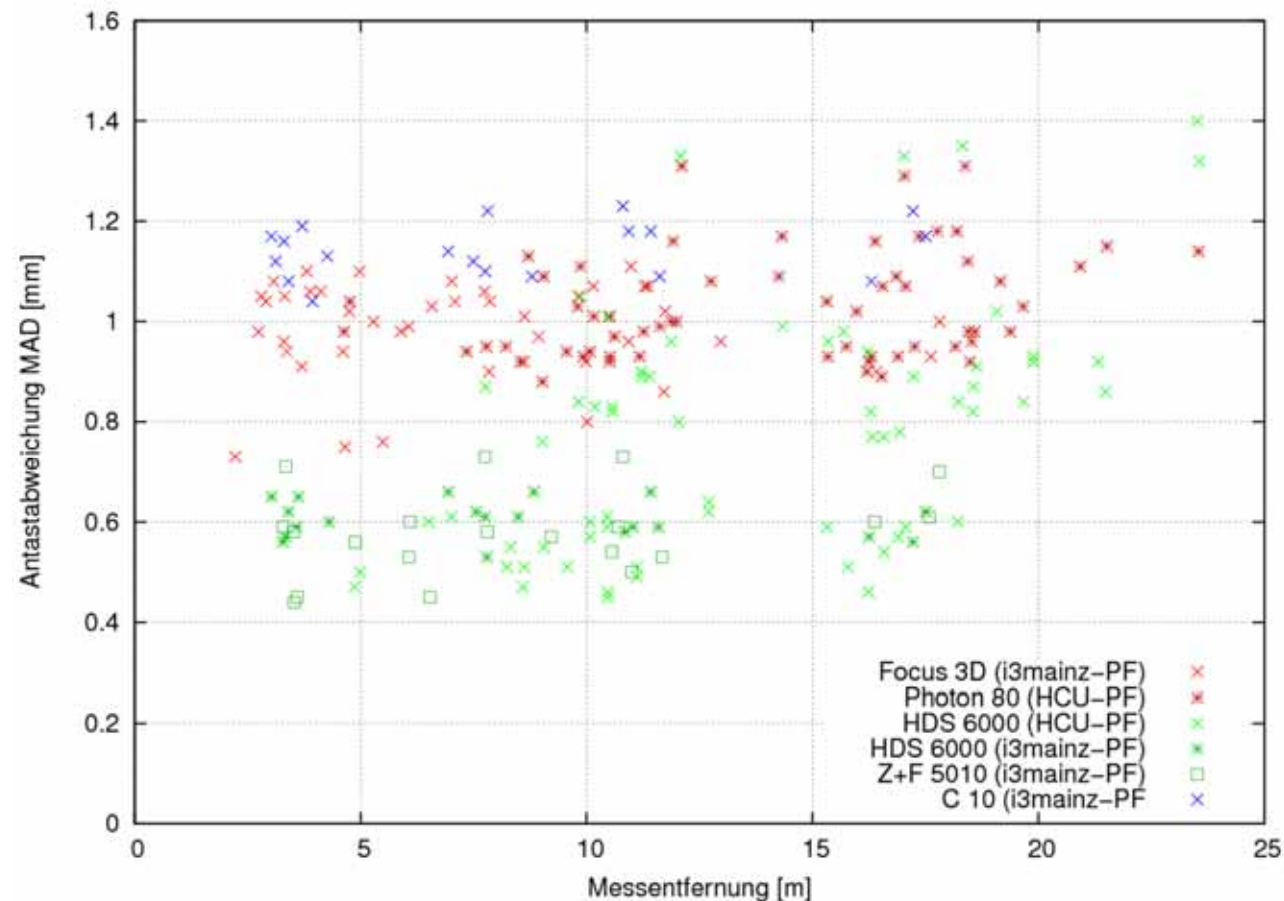
1 Arbeitstag (einschließlich der Ausgabe eines Zertifikates) *Zielvorstellung!!!*

Gliederung

- Prüfrichtlinie
- Prüffeld am i3mainz
- **Kenngröße Antastabweichung – Kugel**
 - Standpunktweise Auswertung
 - Standpunktübergreifende Auswertung nach Referenzierung über Passmarken (B&W, Weißer Kreis, Kugel)
- **Kenngröße Auflösungsvermögen**
 - Prüfkörper BÖHLER-Stern
 - verschiedene Messentfernungen
- **Kenngröße Antastabweichung - Ebene**
 - Prüfkörper BÖHLER-Stern
 - verschiedene Messentfernungen
- **Einfluss Auftreffwinkel**
 - schwenkbares Ziel (Platte)
- **Zusammenfassung & Fazit**

Kenngroße Antastabweichung - Kugel

- Prüffeld i3mainz
 - 5 – 11 Positionen
 - Faro-Kugeln
 - $r=73,06\text{mm}$
- Prüffeld HCU
 - 19 Positionen
 - Eigenproduktion
 - $r=99,5\text{mm}$
- Auswertung
 - Autom. Selektion
 - zufällige Auswahl von 1500 / 3000 Messpunkte
 - robuste Ausgleichung



Problem: noch keine Kalibrierungsdaten für Prüfkörper vorhanden
 ⇒ Kenngroße Kugelradienabweichung nicht bestimmbar

Gliederung

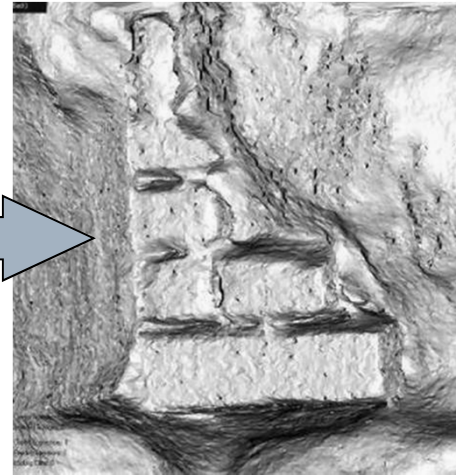
- Prüfrichtlinie
- Prüffeld am i3mainz
- Kenngröße Antastabweichung – Kugel
 - Standpunktweise Auswertung
 - Standpunktübergreifende Auswertung nach Referenzierung über Passmarken (B&W, Weißer Kreis, Kugel)
- **Kenngröße Auflösungsvermögen**
 - Prüfkörper BÖHLER-Stern
 - verschiedene Messentfernungen
- Kenngröße Antastabweichung - Ebene
 - Prüfkörper BÖHLER-Stern
 - verschiedene Messentfernungen
- Einfluss Auftreffwinkel
 - schwenkbares Ziel (Platte)
- Zusammenfassung & Fazit

Ansatz zur Bestimmung des Auflösungsvermögens

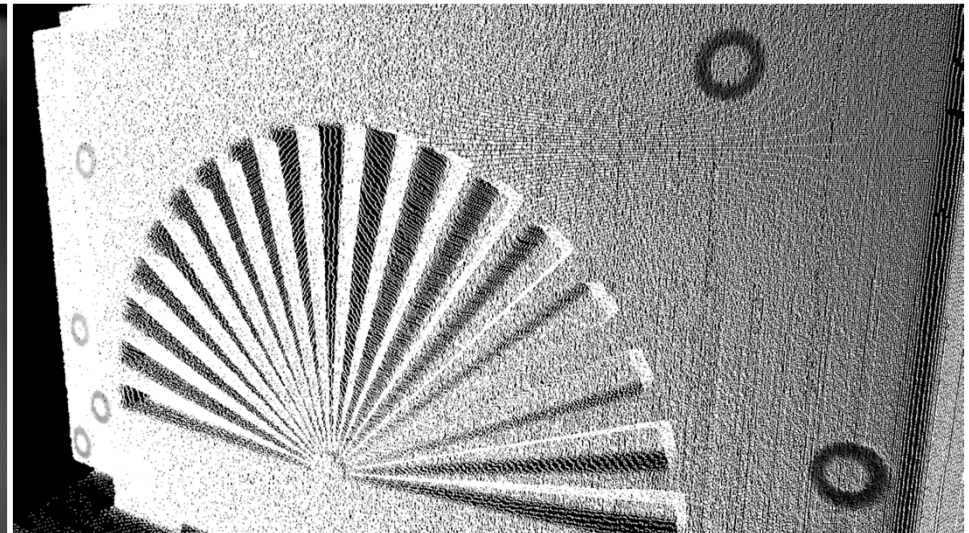
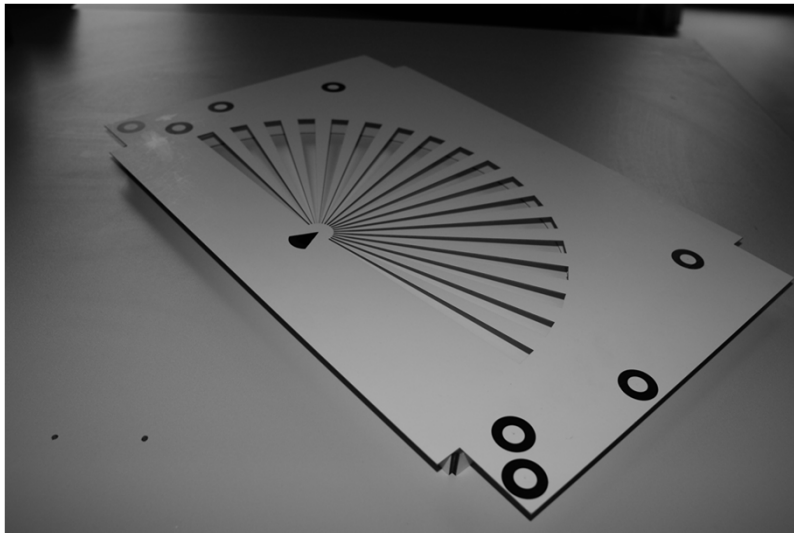
Foto:



Punktwolke:

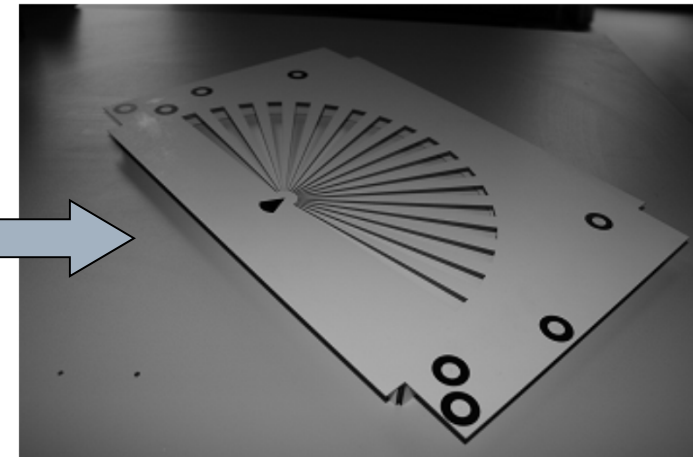
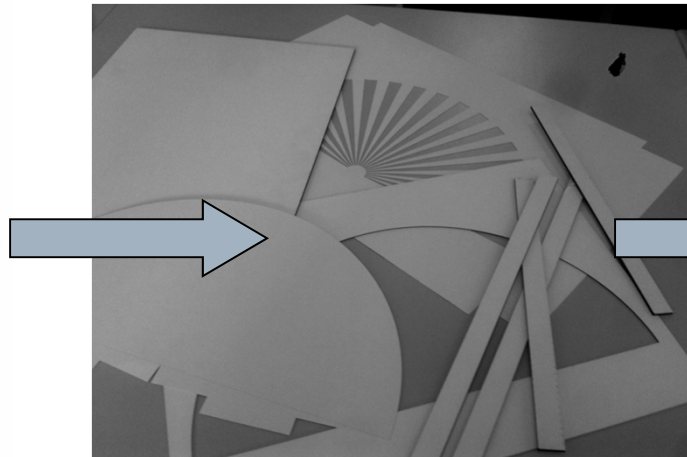


BÖHLER-Stern:



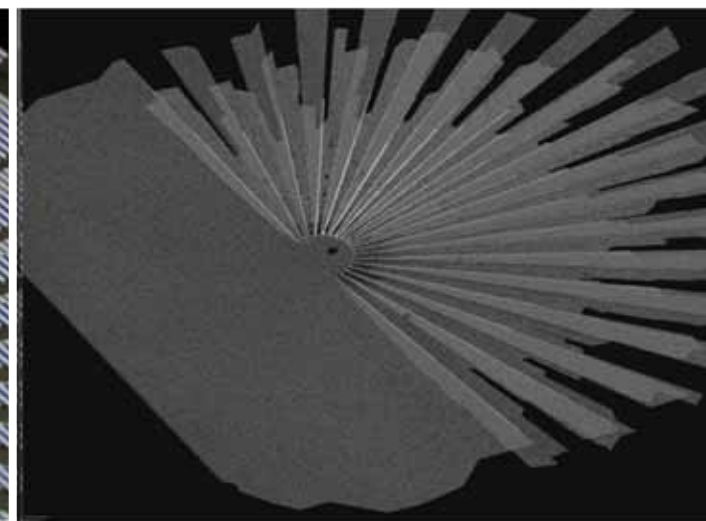
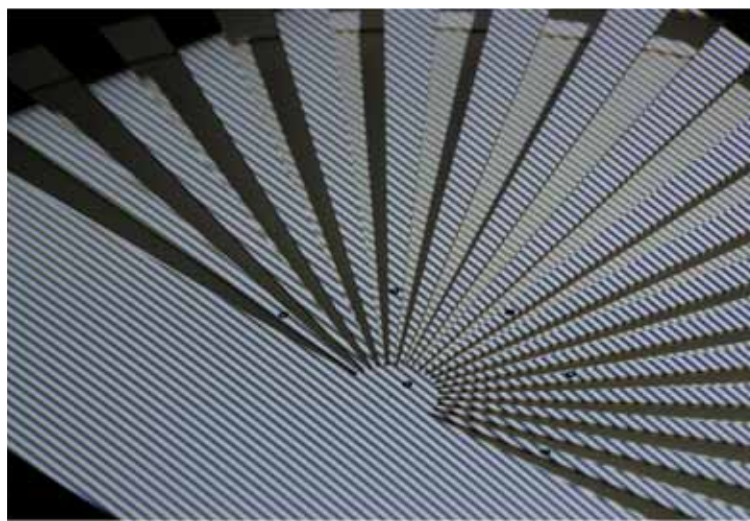
Prüfkörper Böhler-Stern

- Fertigung:
 - Laserschneidegerät (Eurolaser M-800)
 - Vorlage: CAD-Modell
 - Material: Photokarton (Rückwand),
Siebdruckpappe (Vorderfront)



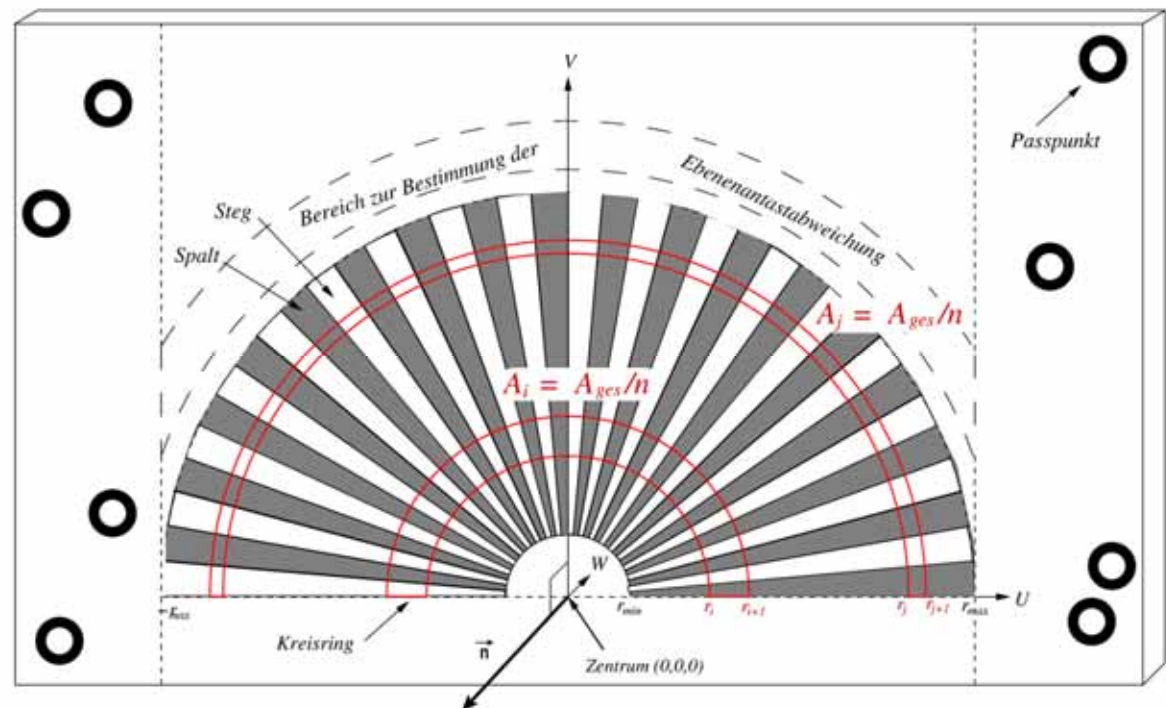
Prüfkörper Böhler-Stern

- Fertigungskontrolle mittels Streifenprojektion (GOM Atos III, 150er Messfeld):
 - Ebene der Schablone: $\pm 0,1$ mm
 - Kegel: $\pm 0,1$ mm
 - Abweichung **Winkel** zw. Schablone (Ebene) und Kegel: $<0,1^\circ$
 - maximale Abweichung der Spalttiefe: 0,3 mm



Prüfkörper Böhler-Stern

- Kegel als Rückwand
Kegelspitze im Zentrum der Kreissektoren
- **Dimension:** 40 cm x 20 cm x 1,6 cm
- **Öffnungswinkel eines Spalts bzw. Steges:** 5°
- Gleich viele
Spalten wie Stege
- Spalttiefe entspricht
Spaltbreite
- **photogrammetrische
Marken zur
Ausrichtung**
- **Segmentierung der
Messpunkte in
„Vorder-“ und
„Hintergrund“ je
Kreisring
(konstanter
Stichprobenumfang)**
bstern.exe



Übersicht geprüfter TLS

□ Impulsscanner:

- Leica HDS 3000
- Leica ScanStation C10
- Riegl VZ-400 - *nur Auflösungsvermögen*

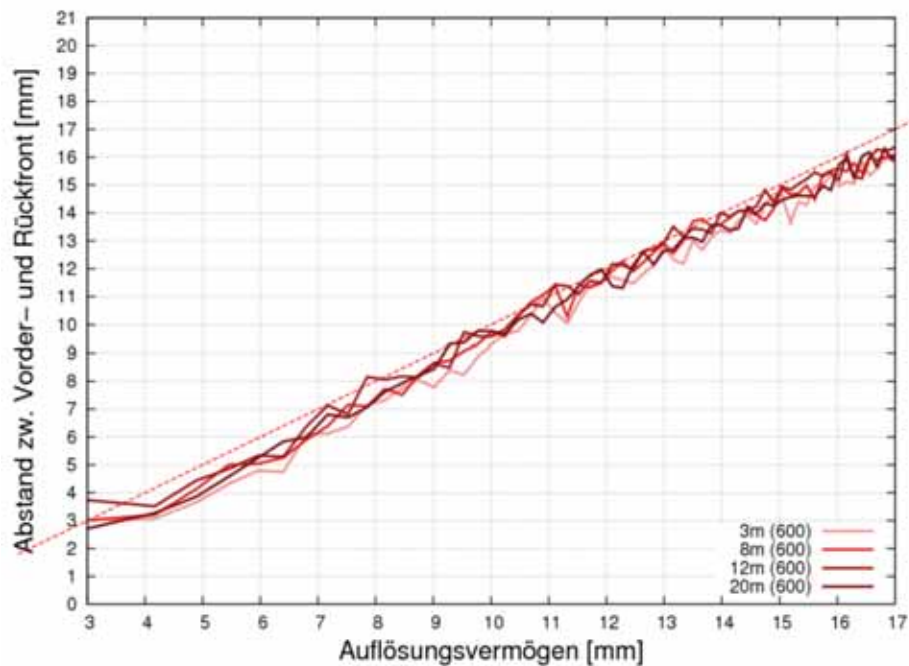
□ Phasenscanner:

- Leica HDS 6000
- Faro Photon 80
- Z+F Imager 5010
- Faro Focus 3D

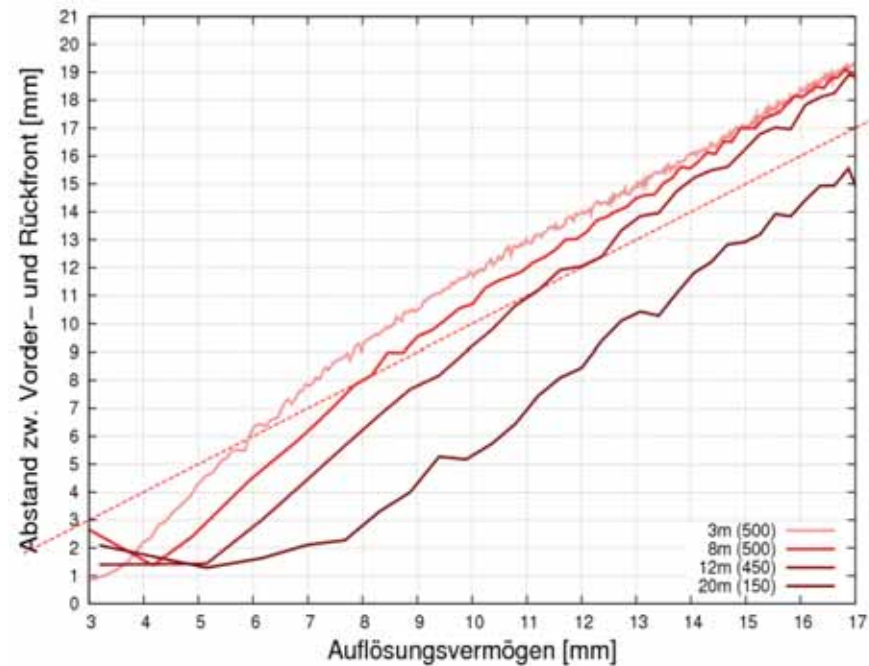
Die geprüften TLS sind als Individuen zu verstehen!

Diskussion der Ergebnisse des AV

- Beispiel der Darstellung der gemessenen Abstände zw. Vorderfront und Kegel
- Messentfernung: 3, 8, 12, 20 m



Impulsscanner

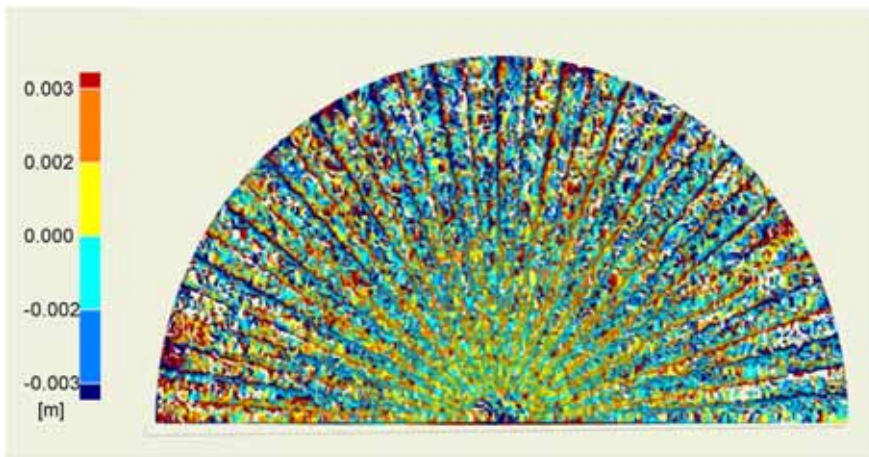


Phasenscanner

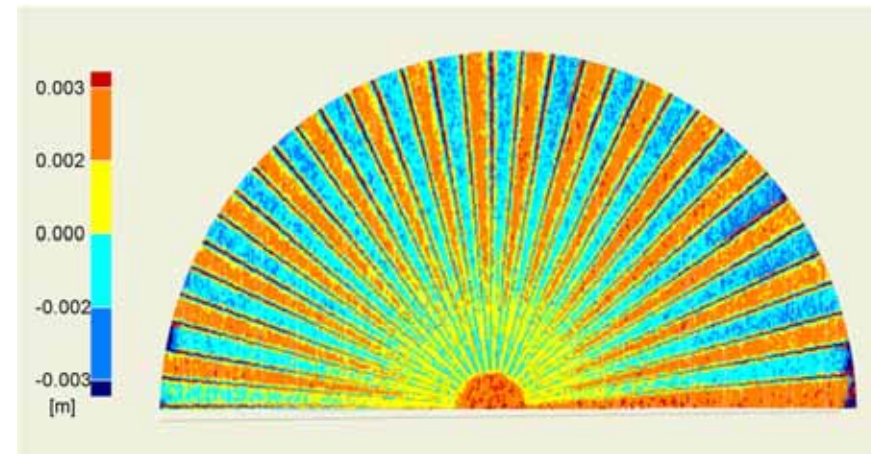
Diskussion der Ergebnisse des AV

□ Verifizierung der Ergebnisse

- Vergleich der TLS-Punktwolken mit der Atos-Referenz (ICP-Referenzierung)
 - Messentfernung: **3 m**
 - → ähnliche Charakteristiken innerhalb der Geräteklassen

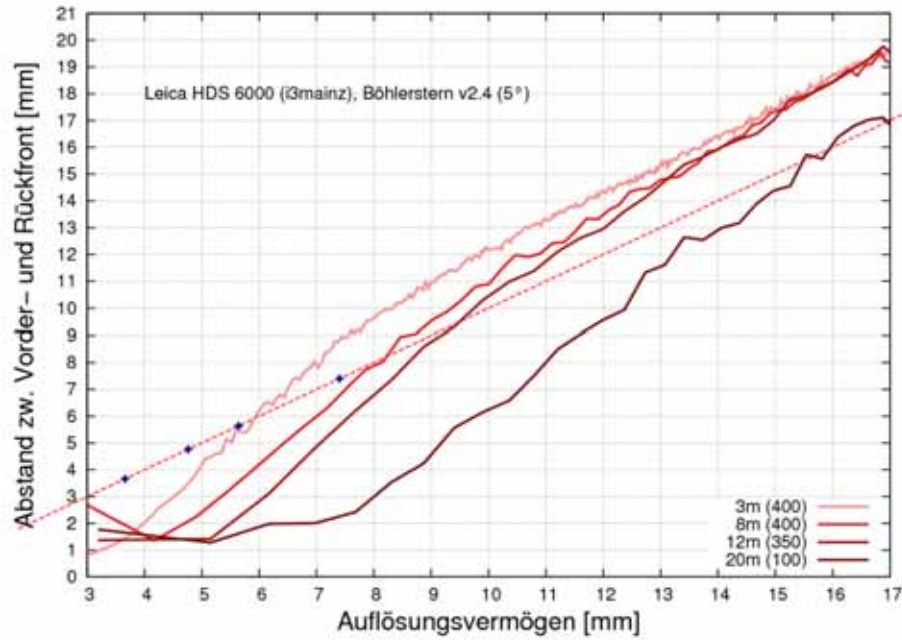


Impulsscanner

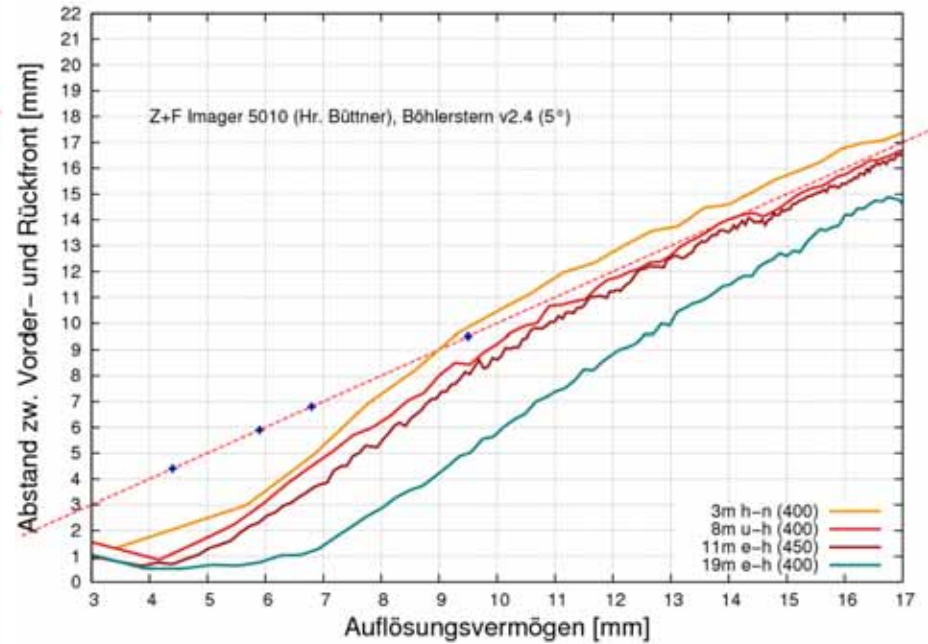


Phasenscanner

Vergleiche



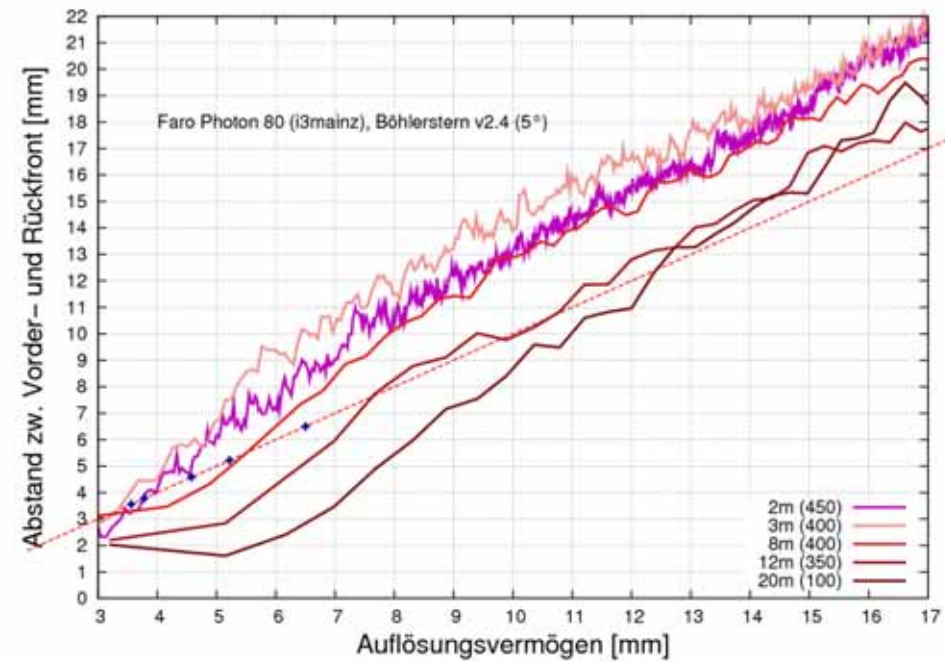
Leica HDS 6000



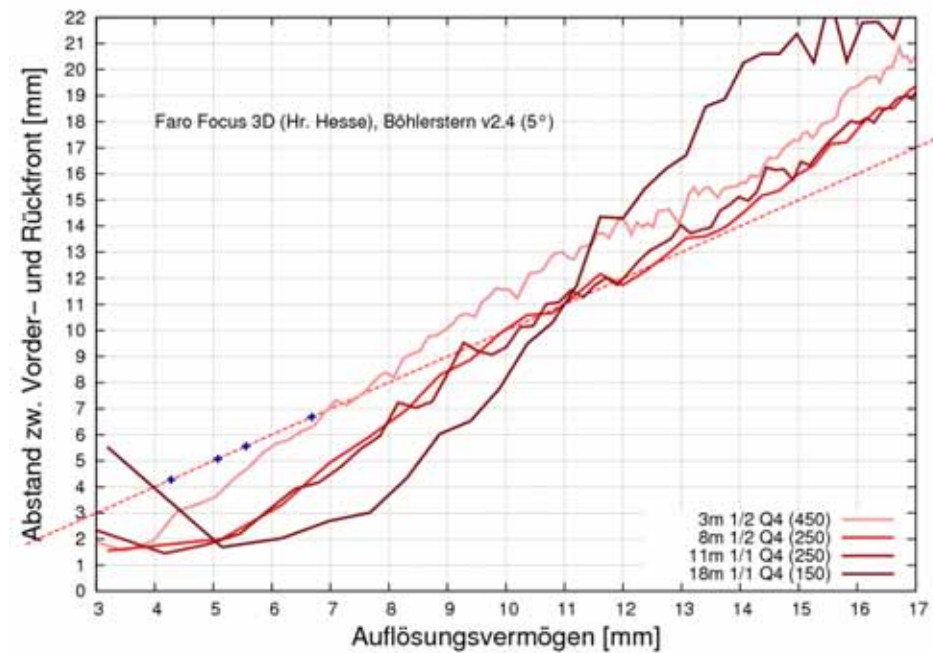
Z+F Imager 5010

Leica HDS 7000

Vergleiche

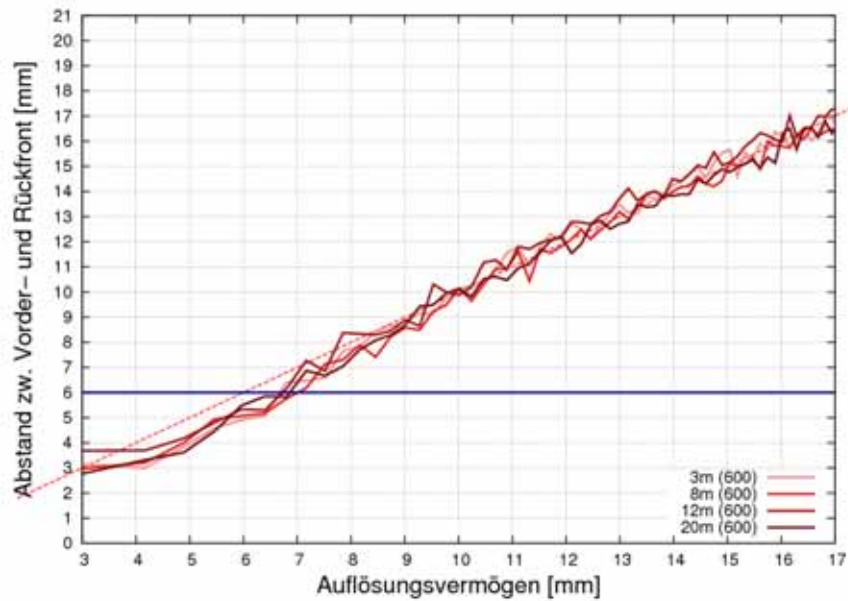


Faro Photon 80

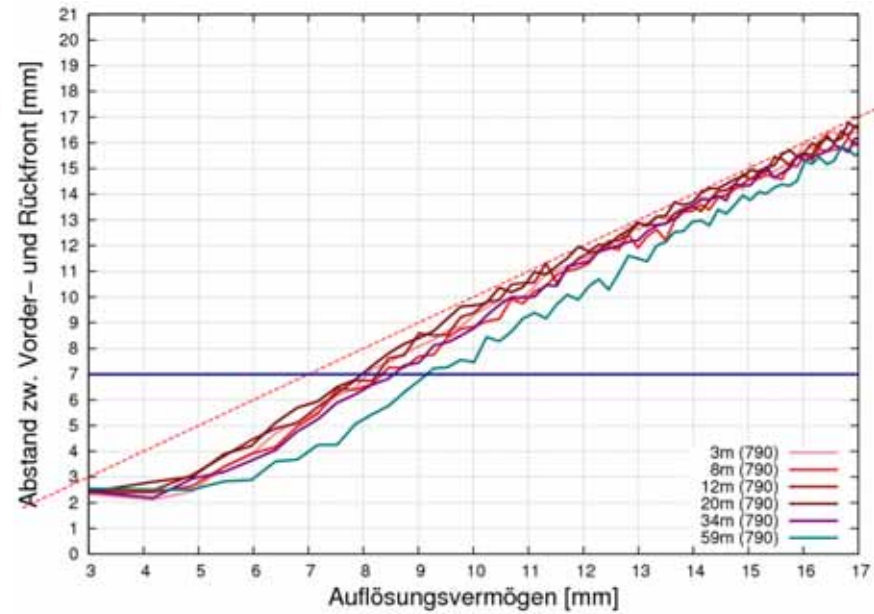


Faro Focus 3D

Vergleiche

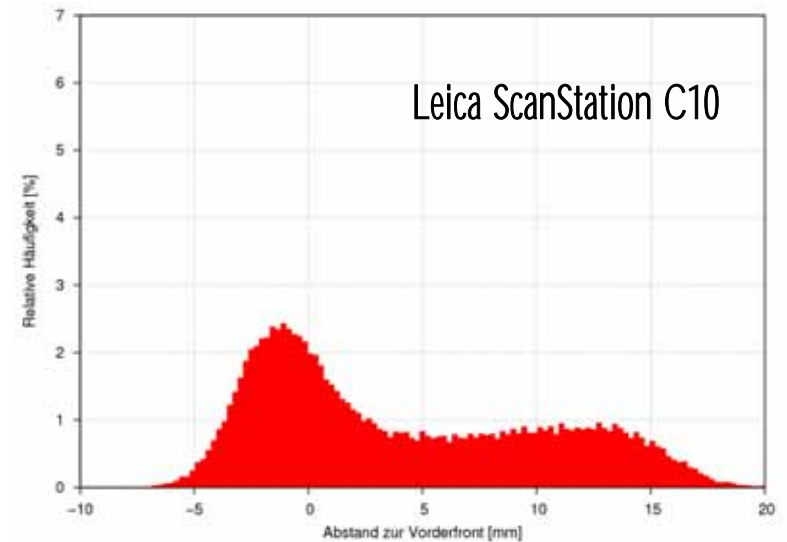
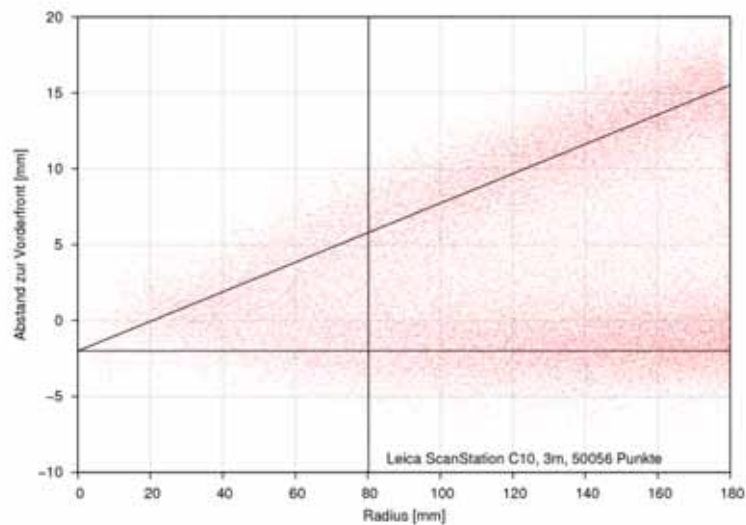
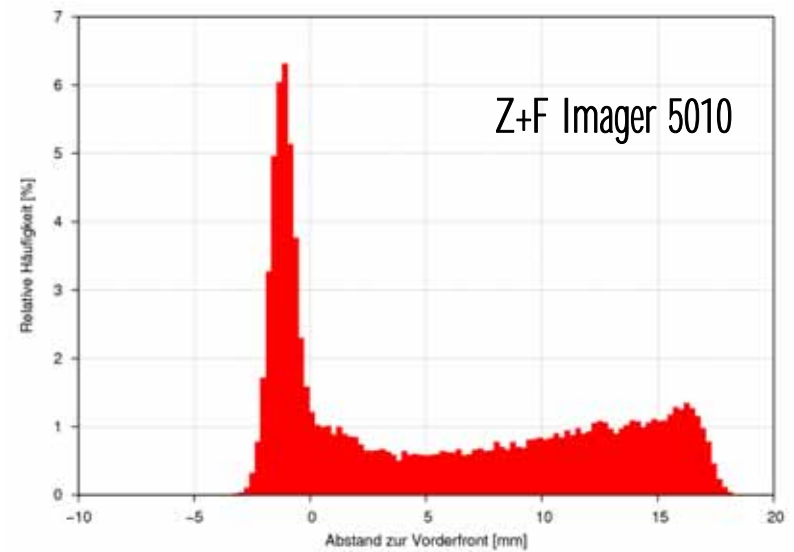
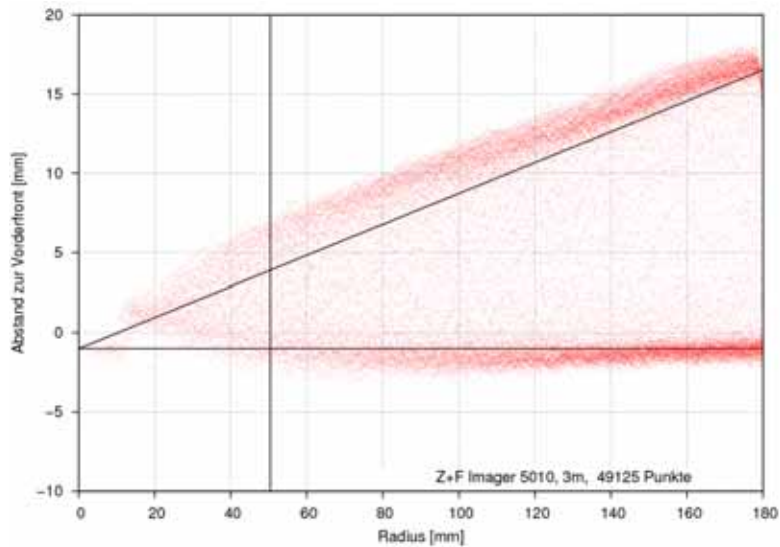


Leica HDS 3000



Leica ScanStation C10

Vergleiche



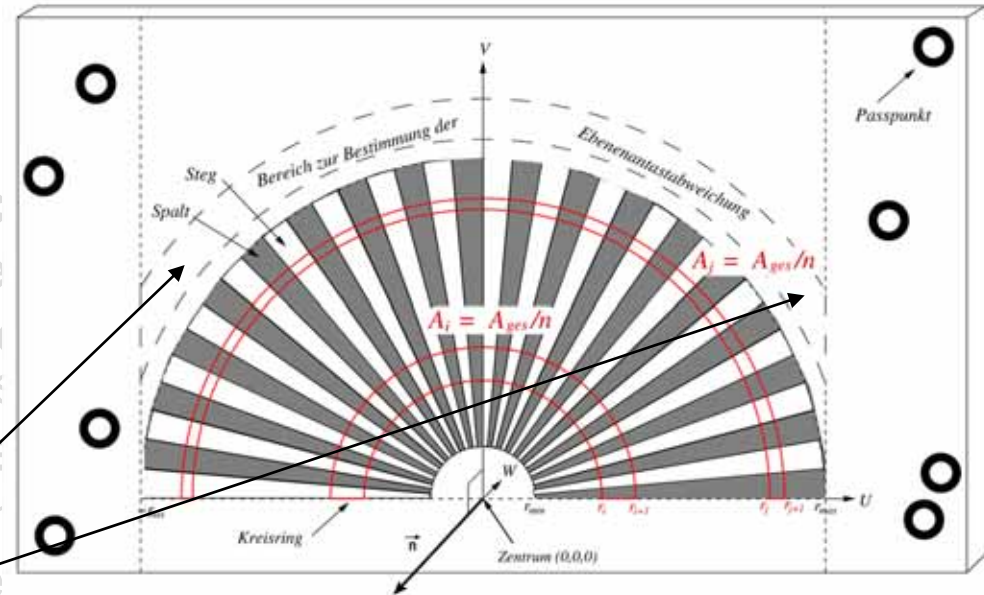
BÖHLER-Stern Version 2.4 $\gamma=5^\circ$

- Impulsscanner:
 - entfernungsunabhängige Ergebnisse
 - HDS 3000:
 - keine signifikanten Streckenabhängigkeiten
 - keine systematischen Ablagen zur Sollgeometrie
 - ScanStation C10:
 - Spaltentiefe wird systematisch zu kurz gemessen
 - geringe Offsets zur Solltiefe (Größenordnung ≤ 2 mm)

- Phasenscanner:
 - deutliche Entfernungsabhängigkeit
 - deutliche Offsets zur Solltiefe (Größenordnung ≤ 4 mm)
 - Abstand zw. Vorder- und Rückseite wird nicht korrekt bestimmt

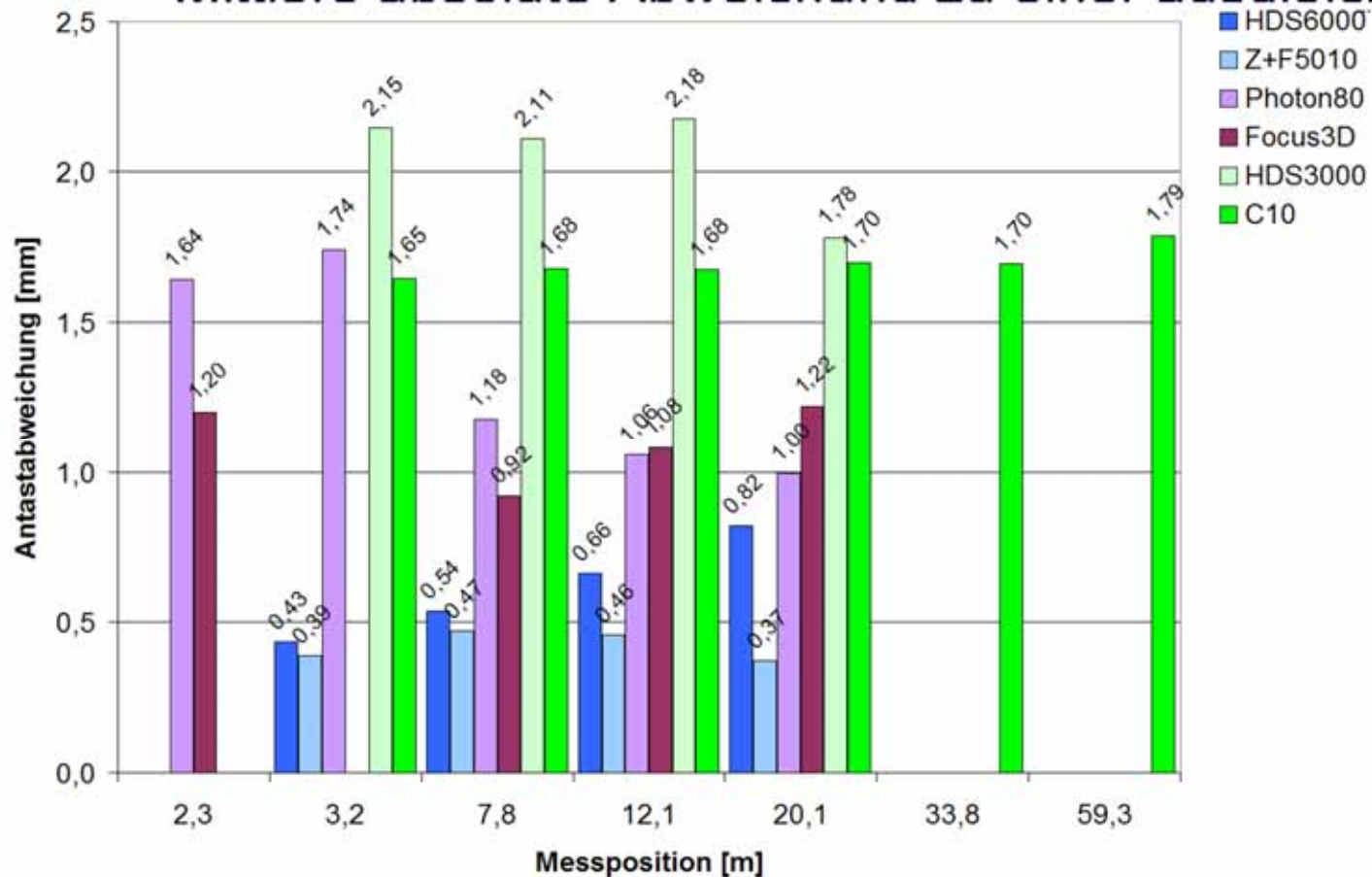
Gliederung

- Prüfrichtlinie
- Prüffeld am i3mainz
- Kenngröße Antastabweichung
 - Standpunktweise Auswertung
 - Standpunktübergreifende Referenzierung über Passpunkt
- Kenngröße Auflösungsvermögen
 - Prüfkörper BÖHLER-Stern
 - verschiedene Messentfernungen
- Kenngröße Antastabweichung - Ebene**
 - Prüfkörper BÖHLER-Stern
 - verschiedene Messentfernungen
- Einfluss Auftreffwinkel
 - schwenkbares Ziel (Platte)
- Zusammenfassung & Fazit



Kenngroße Ebenenantastabweichung

- **Ermittlung der Ebenenantastabweichung (Anlehnung an Prüfrichtlinie)**
 - Berechnung mittels Punkten im Randbereich des Böhler-Sterns
 - Mittlere absolute Abweichung zu einer ausgleichenden

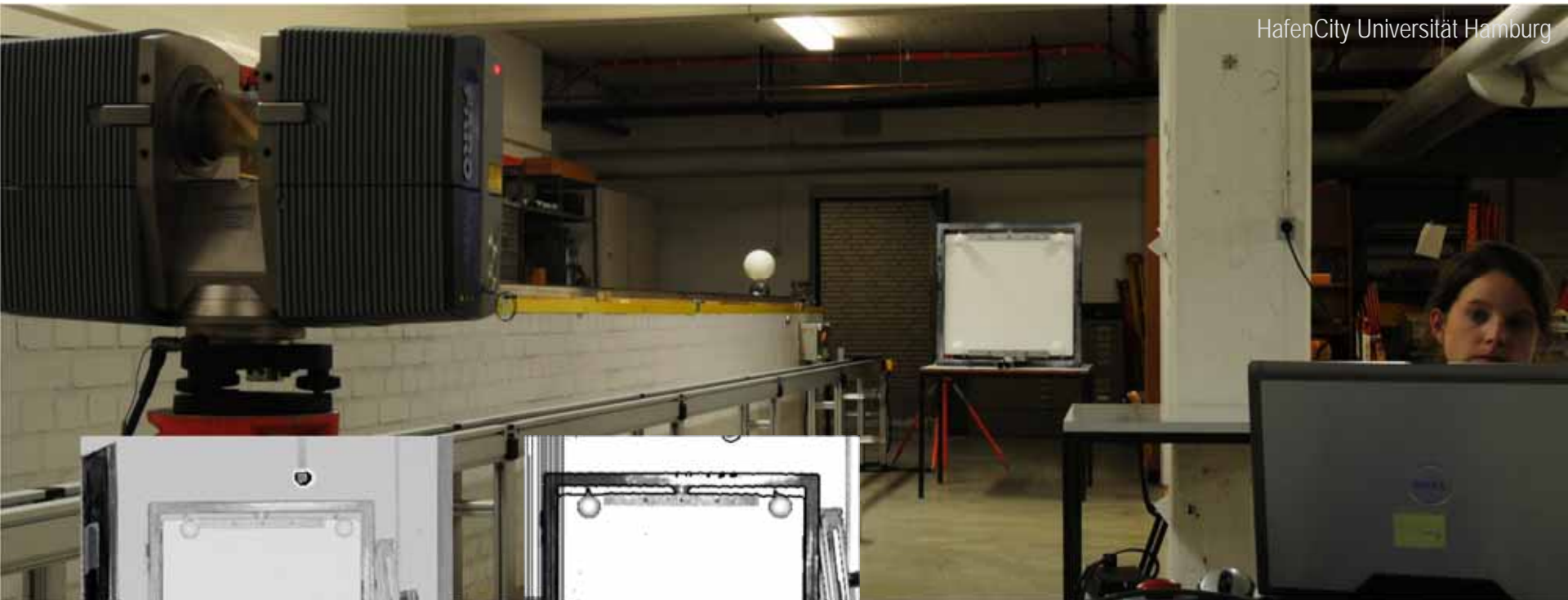


Gliederung

- Prüfrichtlinie
- Prüffeld am i3mainz
- **Kenngröße Antastabweichung – Kugel**
 - Standpunktweise Auswertung
 - Standpunktübergreifende Auswertung nach Referenzierung über Passmarken (B&W, Weißer Kreis, Kugel)
- **Kenngröße Auflösungsvermögen**
 - Prüfkörper BÖHLER-Stern
 - verschiedene Messentfernungen
- **Kenngröße Antastabweichung - Ebene**
 - Prüfkörper BÖHLER-Stern
 - verschiedene Messentfernungen
- **Einfluss Auftreffwinkel**
 - schwenkbares Ziel (Platte)
- Zusammenfassung & Fazit

Abweichung aufgrund Auftreffwinkel

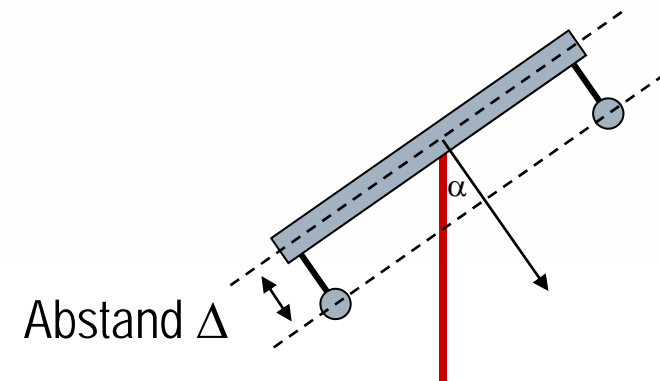
HafenCity Universität Hamburg



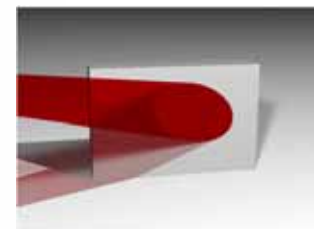
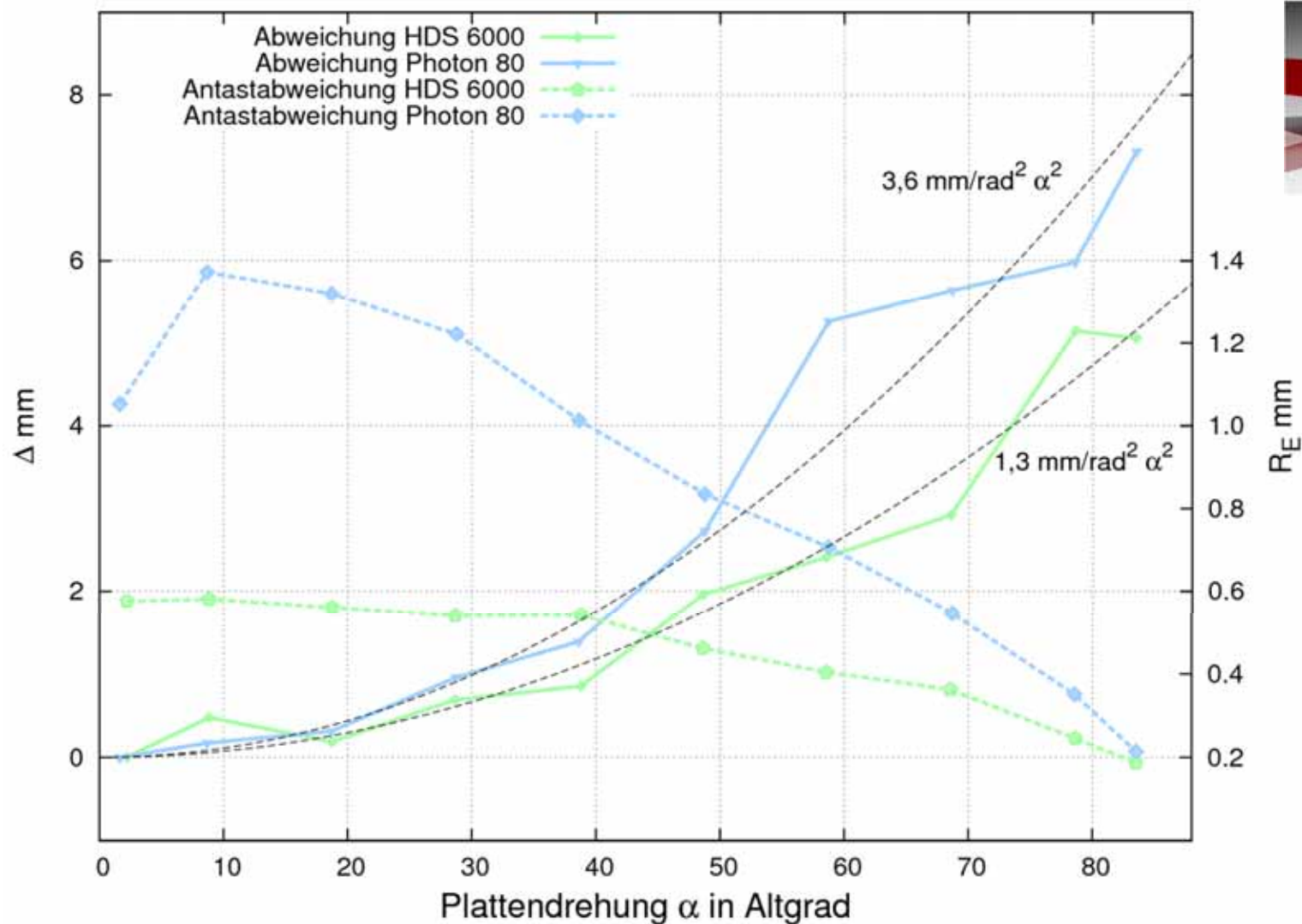
Faro Photon 80 (i3mainz)



Leica HDS 6000 (i3mainz)



Abweichung aufgrund Auftreffwinkel



Im Rahmen des HCU- Workshop 14. bis 17. Juni 2011 wurde folgende i3mainz-eigene TLS geprüft:

- Faro Photon 80 (i3mainz)
- Leica HDS 6000



Gliederung

- Prüfrichtlinie
- Prüffeld am i3mainz
- **Kenngröße Antastabweichung – Kugel**
 - Standpunktweise Auswertung
 - Standpunktübergreifende Auswertung nach Referenzierung über Passmarken (B&W, Weißer Kreis, Kugel)
- **Kenngröße Auflösungsvermögen**
 - Prüfkörper BÖHLER-Stern
 - verschiedene Messentfernungen
- **Kenngröße Antastabweichung - Ebene**
 - Prüfkörper BÖHLER-Stern
 - verschiedene Messentfernungen
- **Einfluss Auftreffwinkel**
 - schwenkbares Ziel (Platte)
- **Zusammenfassung & Fazit**

Prüfergebnisse im Überblick

	Photon 80 LLS000800394 i3mainz	Focus 3D LLS061000702 Hr. Hesse	Z+F 5010 3001 Hr. Büttner	HDS6000 756 465 498 i3mainz	HDS6000 756 465 498 i3mainz	C10 1260083 Hr. Rasel
Besitzer	HCU / 15.6.11	i3mainz / 7.6.11	i3mainz / 26.2.11	i3mainz / 21.2.11	HCU / 15.6.11	i3mainz / 22.2.11
Prüflabor / Prüfdatum						
Geräteeinstellungen ca. 1-2mm Punktabstand, Scandauer < 1/2h / Standpkt.	1/2 , Q4	1/2 Q3	A high, Q normal	highest	highest	$\Delta = 2\text{mm}$
Messentfernungen	4,5m – 23,5m	2,2m – 17,6m	3,2m – 17,8m	3,0m-17,0m	4,8m - 21,3m	3,1m – 17,2m
Anzahl Aufstellungen	5	4	4	4	5	4+1
Messdauer	4h	2h	2h	4h	4h	4h
Abstandsabweichung	2,5/0,5	3,7/1,0	1,1/0,2	1,3/0,1	1,9/0,4	1,8/0,3
Prüfkörper	Kugel (i3mainzScene)	WKreis (i3mainzScene)	B&W (Z+FLaserControl)	B&W (Cyclone)	Kugeln (i3mainzScene)	B&W (Cyclone)
Antastabweichung						
Prüfkörper	19 Kugeln	11 Kugeln	5 Kugeln	5 Kugeln	19 Kugeln	5 Kugeln
lokal	0,900/0,162	0,981/0,077	0,580/0,173	0,606/0,33	0,777/0,072	1,151/0,243
global	1,030/0,060	0,979/0,053	0,568/0,173	0,606/0,05	0,794/0,056	1,131/0,280
(Referenzierung)	Passkugeln	WKreis	B&W	B&W	Kugeln	B&W
Antastabweichung	nein	2,6m 1,20	3,2m 0,36	3,2m 0,43	nein	3,2m 1,64
Ebene		7,4m 0,92	7,7m 0,47	7,8m 0,54		7,8m 1,68
		10,5m 1,08	10,7m 0,45	12,1m 0,66		10,9m 1,68
		17,7m 1,22	17,8m 0,37	20,1m 0,82		19,9m 1,70
						33,9m 1,70
						59,3m 1,80
Auflösungsvermögen	nein	ja	ja	ja	nein	ja
Auftreffwinkel	ja	nein	nein	nein	ja	nein
Kugelradienabweichung	nein	nein	nein	nein	nein	nein

Einheit soweit nicht angeben: mm

Angaben nach dem Muster: Kennwert/Unsicherheit

Zusammenfassung

- Prüfverfahren ist leicht und schnell durchzuführen
- Auswertung ist mit Standardsoftware möglich
- Kenngrößen **Abstandsabweichung, Antastabweichung** und **Ebenenantastabweichung**
 - charakterisieren die versch. TLS recht gut
 - und sind robust bestimmbar (versch. Prüffelder liefern ähnliche Ergebnisse)
- Prüfergebnisse zum **Auflösungsvermögen** zeigen:
 - grundsätzliche Eignung des Prüfkörpers für Impulsscanner
 - Einschränkungen für Phasenscanner → unerwartete Offsets
 - eventuell Redesign des Prüfkörpers (größere Spalttiefen?)
- Prüfergebnisse zur **Ebenenantastabweichung** liefern:
 - gute Vergleichbarkeit der untersuchten Geräteklassen
 - Aufnahme in die Prüfrichtlinie
- Einfluss des Auftreffwinkels zeigt systematische Abweichungen**
 - Bedarf der Verifikation bei **realen Punktwolken**
 - Aufnahme in die Prüfrichtlinie?

Entwicklung der Performance

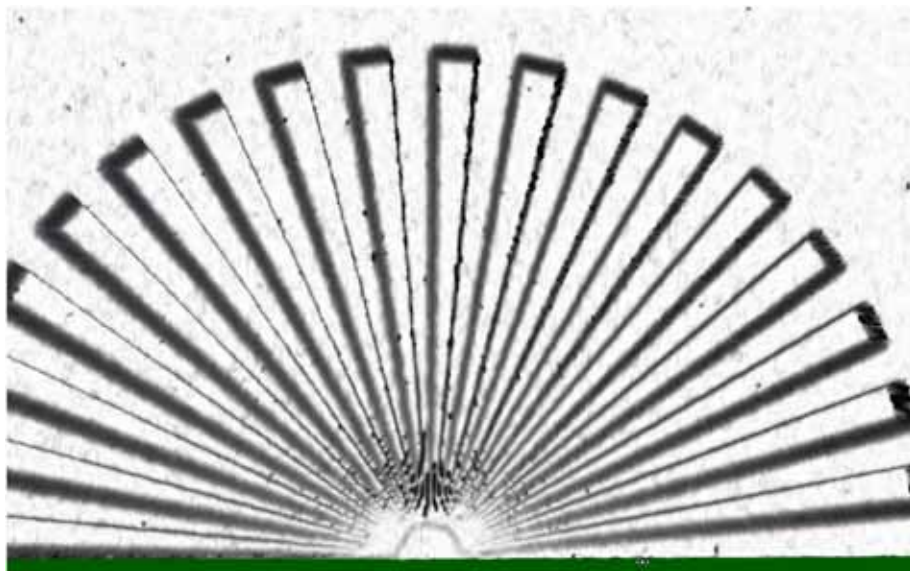
Instrument	„Messrauschen“	Messgeschwindigkeit	Eindeutigkeitsbereich	Laserwellenlänge	Spotgröße bei Austritt	Strahldivergenz
	mm	Punkte/s	m	nm	mm	mrad
Leica						
HDS 6000	≤ 4 @ 90% @ 25m 1σ	500.000	79	650-690	3	0,22 (Gauß)
HDS 6100	≤ 2 @ 90% @ 25m 1σ	508.000	79	658 ?	3	0,22 (Gauß)
HDS 6200	≤ 2 @ 90% @ 25m 1σ	1.016.000	79	658 ?	3	0,22 (Gauß)
HDS 7000	0,5 @ 80% @ 25m 1σ	1.016.000	187	1500	3,5	0,3 (Gauß)
Faro						
LS 840/880	1,1 (f)/4,2 (r) @ 90% @ 25m rms	120.000	76	785	3	0,25 (?)
Photon 80/20	0,60 (f)/1,2 (r) @ 90% @ 25m rms	120.000	76	785	3,3	0,16 (?)
Photon 120/20	0,50 (f)/1,0 (r) @ 90% @ 25m rms	976.000	153,49	785	3,3	0,16 (?)
Focus 3D 120/20	0,50 (f)/1,1 (r) @ 90% @ 25m 1σ	976.000	153,49	905	3,8	0,16 (?)
	(f) : filtered , (r): raw data					

Angaben ohne Gewähr

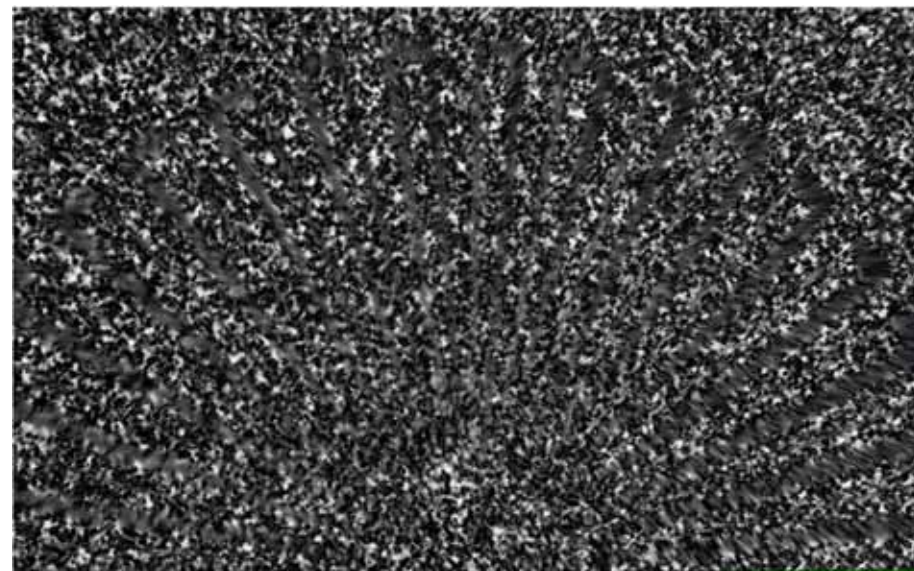
- immer besseres Messrauschen
- immer schnellere Scanraten
- immer größere Reichweite
- aber
- immer größere Spotgröße/Strahldivergenz

Schluss

Welches TLS liefert die bessere Messqualität?



Z+F Imager 5010



Leica ScanStation C10

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

