

# Vorschlag für eine kennwertorientierte TLS-Prüfung

von  
Prof. Dr.-Ing. Fredie Kern

- 3. Hamburger Anwenderforum Terrestrisches Laserscanning •
  - Hamburg • 16.06.2009 •



# Gliederung

1. TLS-Prüfung nach ISO 17213
2. Messqualität
3. Vorschlag für ein kennwertorientierte TLS-Prüfrichtlinie
4. Schluss

# Standardisierte Prüfverfahren für TLS

## - ISO 17123 -



ISO 17123 Optics and optical instrumentes  
- Field procedures for testing geodetic and surveying instruments

Part 1: Theory (2002)

Part 2: Levels (2001)

Part 3: Theodolites (2001)

Part 4: EDM instruments (2001)

Part 5: Tacheometers (2005)

Part 6: Rotating lasers (2003)

Part 7: Optical plumping inst. (2005)

Part 8: RTK-GNSS (2007)

Part 9: Terrestrial Laser Scanner (2008)

### Philosophie

#### 1. Vereinfachte Feldprüfung (simplified test procedure)

- kein besonderer Prüfmittelbedarf
- keine Spezialkenntnisse nötig
- minimierter Aufwand, möglichst unter 1 Stunde
- Systemprüfung (Hard- + Software) in „Gebrauchslage“
- Betrachtung v. zufälligen und systematischen Fehlern

#### 2. Erweiterte Feldprüfung (full test procedures)

Werden die Grenzwerte bei der vereinfachten Feldprüfung überschritten, erfolgt Instrumentenprüfung frei von Umweltbedingungen (Labor) und damit reproduzierbar incl. Signifikanztests

- Ableitung von Genauigkeitsmaßen incl. Zuverlässigkeit
- Vergleich mit Herstellerangaben
- Bestimmung von weiteren Kenngrößen
- Bestimmung der ursächlichen Instrumentenfehler

# Vorschläge für Vereinfachte Feldprüfverfahren

## simplified test procedures

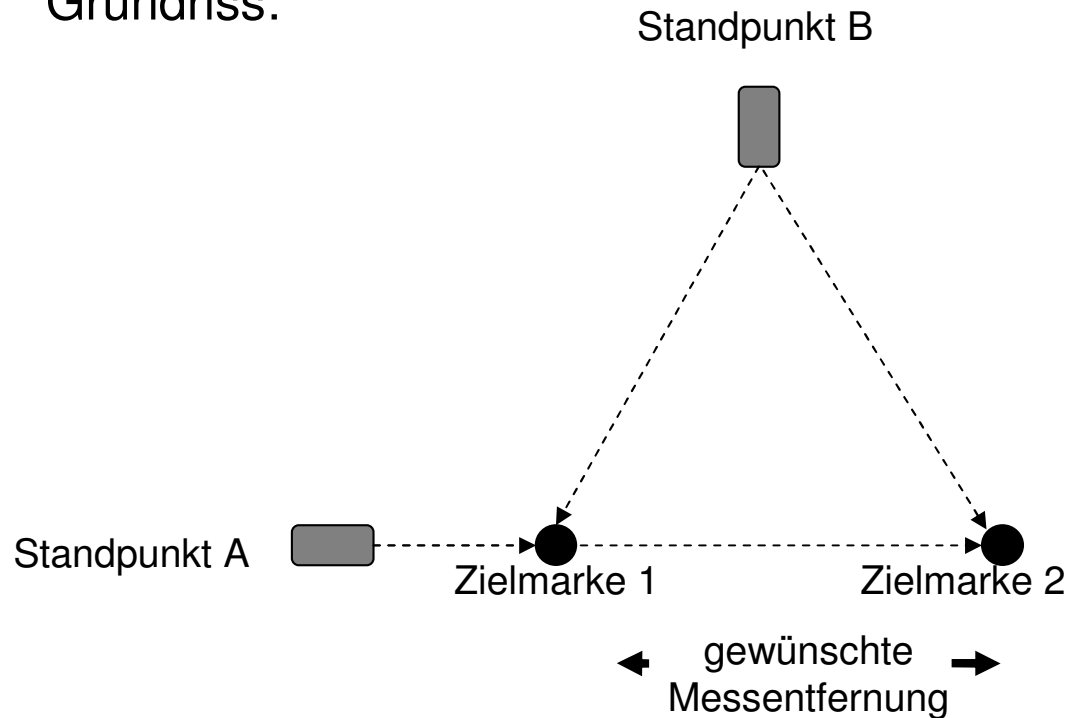
### Rahmenbedingungen aller vereinfachten Feldprüfverfahren gemäß ISO-Philosophie

- unabhängig von dem Funktionsprinzip des TLS  
(Laufzeit~/Phasenvergleich~/Panorama~/Camera View~ etc.)
- sichere Erkennung von vorhandenen Distanz- und Winkelabweichungen
- ausschließliche Verwendung der Standardausrüstung  
d.h.: keine weiteren geodätischen Instrumente  
keine speziellen Zielmarken  
keine spezielle Auswertesoftware
- maximaler Zeitaufwand für Messung und Auswertung  
weniger als 1 Stunde

# Vorschläge für Vereinfachte Feldprüfverfahren

## Single Distance Procedure (SDP)

Grundriss:



1. Durchgang:  
Ziele 1 und 2 möglichst in der Ebene, die senkrecht zur Stehachse des TLS liegt und durch den Gerätestandpunkt läuft
2. Durchgang:  
Ziele 1 und 2 mit signifikantem Abstand zur Ebene senkrecht zur Stehachse des TLS, die durch den Gerätestandpunkt läuft

Auswertung je Durchgang:

Aus Messungen Std. A:  $s_1 = \overline{12} = \sqrt{(x_{1,2} - x_{1,1})^2 + (y_{1,2} - y_{1,1})^2 + (z_{1,2} - z_{1,1})^2}$

Aus Messungen Std. B:  $s_2 = \overline{12} = \sqrt{(x_{2,2} - x_{2,1})^2 + (y_{2,2} - y_{2,1})^2 + (z_{2,2} - z_{2,1})^2}$

Prüfgröße:

$$\Delta = s_1 - s_2$$



**Bezüglich welcher Gerätefehler sind die vereinfachten Prüfverfahren sensitiv ?**

- Additionskonstante, Maßstab
- Ziel- und Kippachsfehler

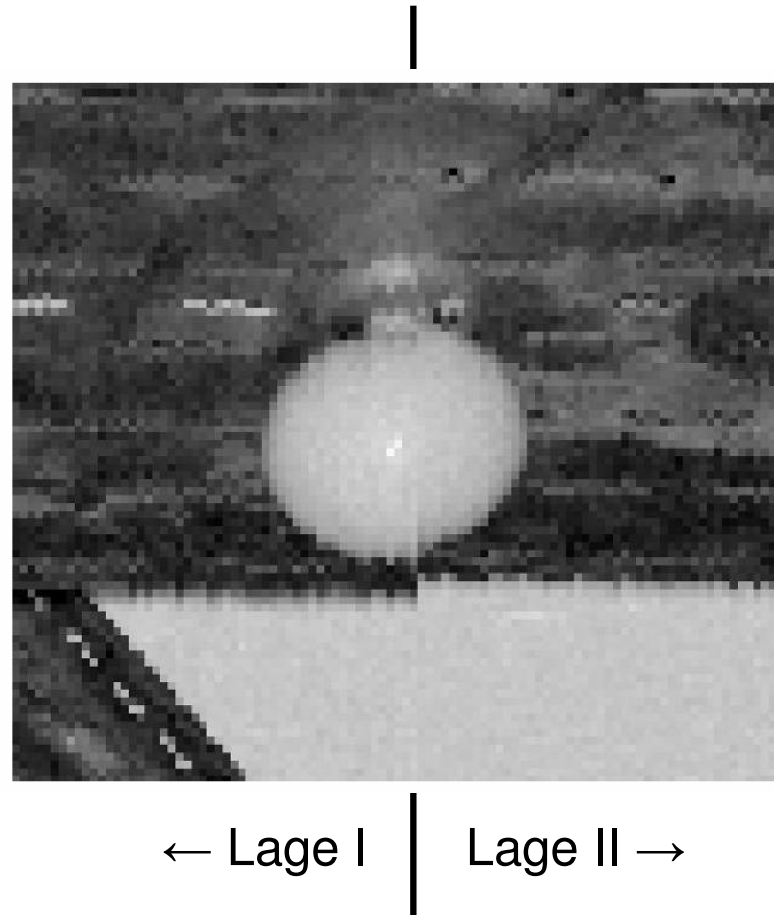
**Wie sind die Grenzwerte festzulegen?**

- Messgenauigkeit

# Vorschläge für Vereinfachte Feldprüfverfahren

## Sensitivität

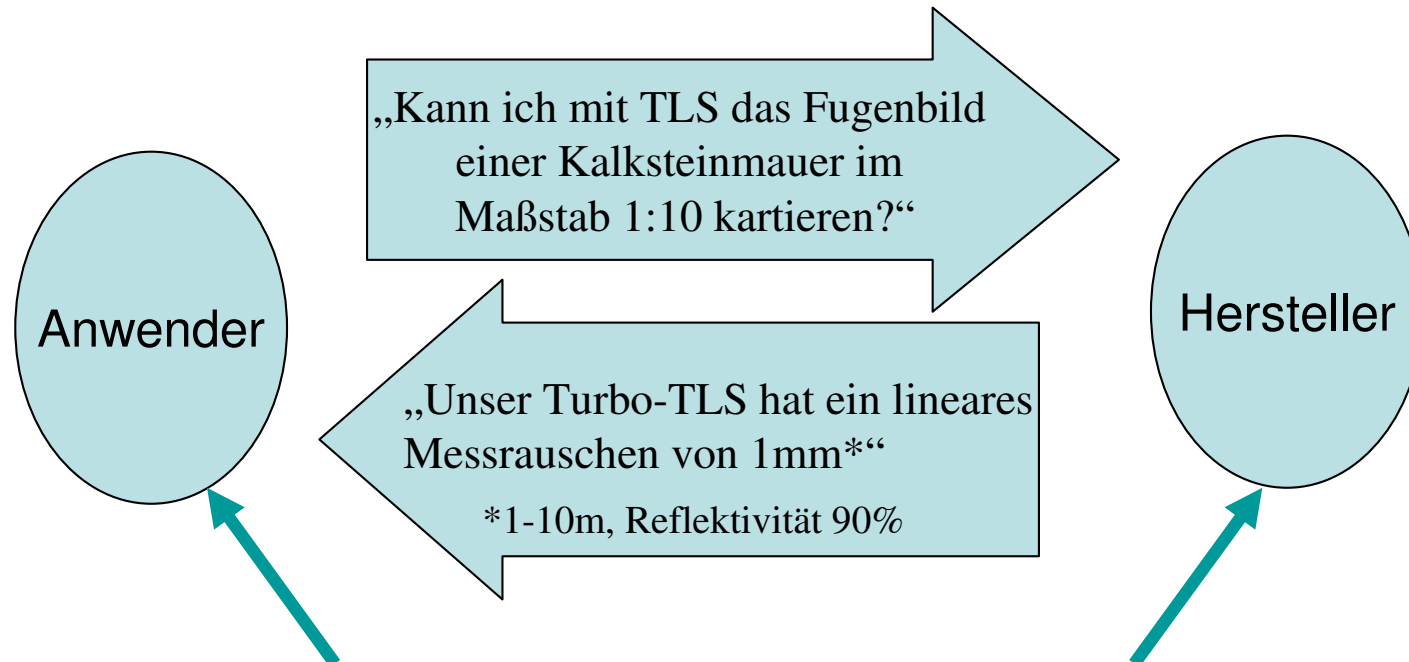
Würde eines der dargelegten  
Feldprüfverfahren vor dieser  
„Dejustierung“ warnen?



Einfluss von Kipp- und Zielachsfehler

Problem: Messung der Teilhemisphären in getrennten Fernrohrlagen

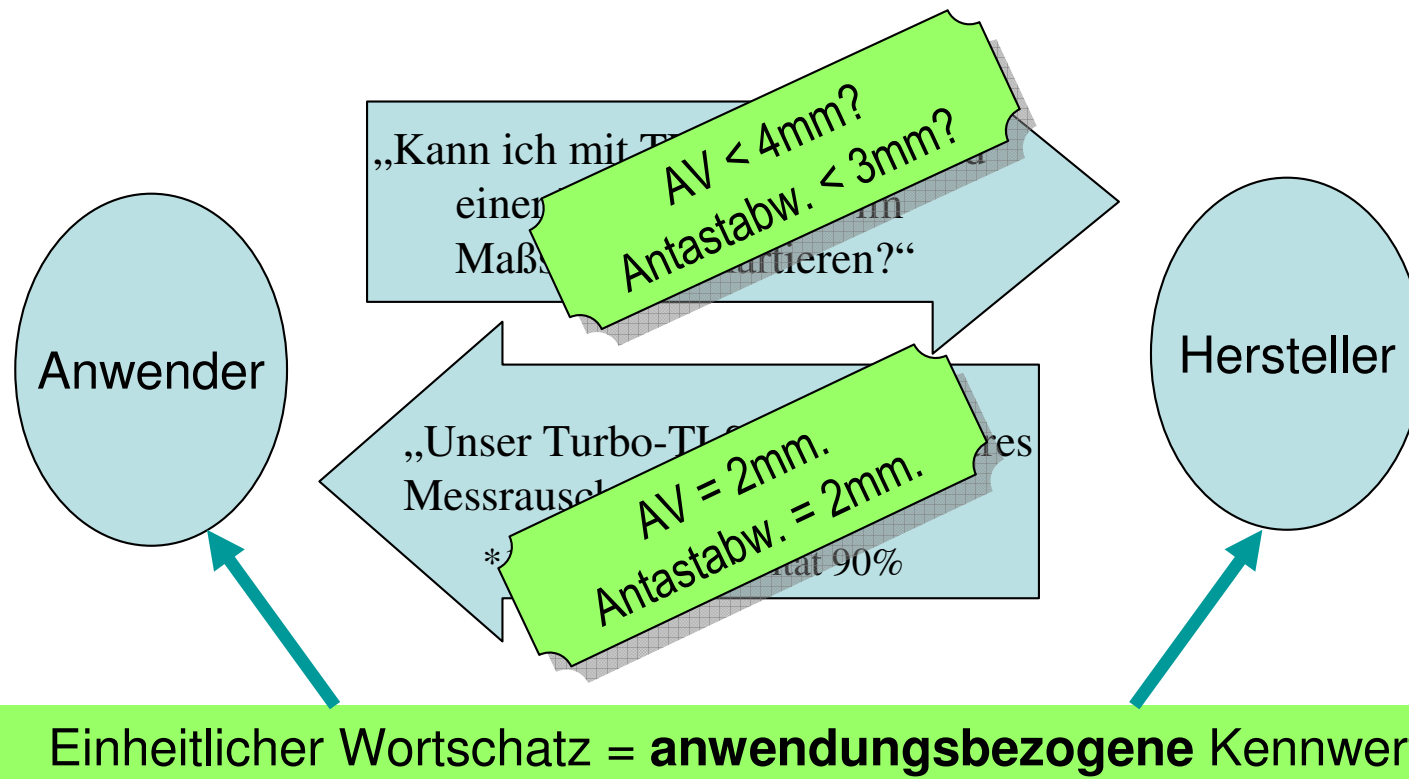
$(0 < \text{Hz} < 180^\circ \times -90^\circ < \text{V} < 90^\circ)$



Einheitlicher Wortschatz = **anwendungsbezogene** Kennwerte













1. Welche Faktoren beeinflussen die Messqualität?
2. Was ist eine gute Messqualität?
3. Wie lässt sich Messqualität quantifizieren und wie bestimmen?





1. Welche Faktoren beeinflussen die Messqualität?
2. Was ist eine gute Messqualität?
3. Wie lässt sich Messqualität quantifizieren und wie bestimmen?

## Vergleich der TLS-Datenblätter bzgl. Qualitätsmaße

<b>Produkt</b>	<b>CPW 8000</b>	<b>Leica HDS 3000</b>	<b>Leica ScanStation 2</b>	<b>Leica HDS4400</b>	<b>Riegl VZ-400</b>	<b>Trimble GS 200 3D</b>
<b>Impulsscanner</b>						
<b>Hersteller</b> Bild-/Datenquelle Stand	Callidus Precision Systems <a href="http://www.callidus.com">www.callidus.com</a> 01/2009	Leica Geosystems GmbH <a href="http://www.leica-geosystems.com">www.leica-geosystems.com</a> 2004	Leica Geosystems GmbH <a href="http://www.leica-geosystems.com">www.leica-geosystems.com</a> 2007	Leica Geosystems GmbH <a href="http://www.leica-geosystems.com">www.leica-geosystems.com</a> 2009	Riegl <a href="http://www.riegl.com">www.riegl.com</a> 10/2008	Trimble Navigation Limited <a href="http://www.trimble.com">www.trimble.com</a> 2005
<b>Genauigkeit<sup>9</sup></b> Strecke	<b>G:</b> 2mm auf 30m	<b>E:</b> 4mm @ 1-50m	<b>E:</b> 4mm @ 50m	<b>A1:</b> 20mm @ 50m	<b>A2:</b> 5mm @ 100m <b>P:</b> 5mm @ 100m	<b>S:</b> 1,4mm auf 50m (99% albedo) <b>S:</b> 6,5mm auf 200m (99% albedo)
Winkel <sup>7</sup>	<b>G:</b> ca. 2,22mgon	<b>E:</b> ca. 3,8mgon @ 1-50m	<b>E:</b> 3.8mgon	<b>A1:</b> 44,4mgon <b>R1:</b> 10mm @ 50m		
Koordinaten		<b>E:</b> 6mm @ 1-50m	<b>E:</b> 6mm @ 50m			
<b>Produkt</b>	<b>Surphaser 25HSX</b>	<b>Faro LS 880 HE80</b>	<b>Faro Photon 120</b>	<b>Leica HDS6000</b>	<b>Leica HDS6100</b>	<b>Z+F Imager 5006</b>
<b>Phasenscanner</b>						
<b>Hersteller</b> Bild-/Datenquelle Stand	Basic Software Inc., Redmond, USA <a href="http://www.surphaser.com">www.surphaser.com</a> 04/2008	Faro Europe GmbH <a href="http://www.faro.com">www.faro.com</a> 2008	Faro Europe GmbH laser-scanner.faro.com 05/2009	Leica Geosystems GmbH <a href="http://www.leica-geosystems.com">www.leica-geosystems.com</a> 2007	Leica Geosystems GmbH <a href="http://www.leica-geosystems.com">www.leica-geosystems.com</a> 2009	Zoller+Fröhlich GmbH, Wangen im Allgäu <a href="http://www.zf-laser.com">www.zf-laser.com</a> 2007
<b>Genauigkeit<sup>9</sup></b> Strecke	<b>U:</b> < 1mm @ 15m	<b>SE:</b> 3mm @ 25m <b>R2:</b> @ 90% Reflektivität ungefiltert: 2,6mm rms @ 10m 4,2mm rms @ 25m gefiltert: 0,7mm rms @ 10m 1,1mm rms @ 25m	<b>D:</b> 2mm @ 25m <b>R2:</b> @ 90% Reflektivität 0,4mm rms @ 10m 0,5mm rms @ 25m	<b>E:</b> < 5mm @ 25m <b>E:</b> < 6mm @ 50m	<b>E:</b> < 3mm @ 25m <b>E:</b> < 5mm @ 50m	<b>L:</b> <1mm @ <50m <b>Rauschen</b> bei 10%/20%/100% Reflektivität: 1,2 / 0,7 / 0,2mm @ 10m 3,0 / 2,0 / 1,0mm @ 25m 7,5 / 4,0 / 2,5mm @ 50m <b>G:</b> ca. 7,8mgon
Winkel <sup>7</sup>	<b>U:</b> ca. 9,25mgon			<b>E:</b> 7,9mgon <b>E:</b> 6mm @ 25m <b>E:</b> 10mm @ 50m	<b>E:</b> 7,9mgon <b>E:</b> 5mm @ 1-25m <b>E:</b> 9mm @ <50m	
Koordinaten						

## Anmerkungen

...

### 9) Originalbezeichnungen/-bedeutungen/-erläuterungen der Qualitätsmaße

- A1:** Accuracy (under laboratory conditions)
- A2:** Accuracy; is the degree of conformity of a measured quantity to its actual (true) value
- D:** distance error (measured on a non moving orthogonal 90% / 10% reflectivity reference paper in average mode); Linearity error at 25m and 84% reflectivity
- E:** Genauigkeit einer Einzelmessung ( $1 \sigma$ )
- G:** Messgenauigkeit
- L:** Linearitätsfehler
- P:** Precision; is also called reproducibility of repeatability, is the degree to which further measurements show the same result ( $1 \sigma$ )
- U:** Uncertainty (*Messunsicherheit*)
- R1:** Repeatability
- R2:** Repeatability; measured on a non moving orthogonal 90% reflectivity reference paper in average mode
- S:** Standardabweichung für Messungen der Distanzen mit 4 Messungen pro Punkt
- SE:** systematic distance error (*es gilt zusätzlich Kommentar zu R2*)

## Welche Faktoren beeinflussen die Messqualität des TLS?

- Messprinzip (Phasen-/Impulslaufzeit, Ablenkeinheit)
- Achsfehler etc. (Imperfektion, „Kalibrierzustand“)
- Wellenlänge  $\lambda$  des verwendeten Laserlichts
- Strahldivergenz/Fokussierung
- Messentfernung  $D$
- Objektmaterial (Art, Rauigkeit, Reflektionsgrad  $\rho(\lambda)$ )
- Auftreffwinkel  $\alpha$
- Atmosphärische Dämpfung
- Temperatur  $T$
- Quantisierung der Sensormesswerte
- Abtastrate
- Räumliche Anordnung Objekt zu TLS
- ...

$$\text{Qualität} = f(\lambda, D, \rho, \alpha, T, \dots)$$

**Geräteuntersuchungen** und praktische Erfahrungen liefern Hinweise dafür, welches Gewicht welchem Faktor beizumessen ist.

## Was ist eine gute TLS-Messqualität?

Natürliche Oberflächen können formtreu erfasst werden.

→ lokales Oberflächen-Messrauschen

Detailstrukturen oberhalb der Abtastrate können wiedergegeben werden.

→ 3D-Auflösungsvermögen

Länge, Breite und Höhe eines Objektes werden maßtreu bestimmt sowie treue Wiedergabe der Gestalt (Winkligkeit, Parallelitäten etc.)

→ lokaler/globaler Maßstab

→ Affinität

→ Rückführbarkeit

Messqualität sollte möglichst

- unabhängig von Messentfernung und räumlicher Anordnung TLS zu Objekt,
- unabhängig von den normalen Umgebungsbedingungen sein.

Was sind typische Messaufgaben und Anwendungsfälle?

# Vorschlag für eine kennwertorientierte TLS-Prüfrichtlinie

## **Ziel und Sinn eines Prüfverfahrens ähnlich VDI/VDE:**

- Leistungsfähigkeit bezüglich der Messqualität unter Praxisbedingungen anhand von Kenngrößen quantifizierbar machen.
- Anhand der Kenngrößen werden verschiedene Geräte miteinander vergleichbar.
- Kenngrößen „bündeln“ möglichst viele Einflussfaktoren (zufällige & systematische Abweichungen)

## Vorschlag für Kenngrößen

Einzelansicht Mehrfach-Ansicht	1. Antastabweichung $R$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prüfkörper: <math>k</math> Kugeln</li> <li>• Kugelapproximation (freier Radius) nach <math>\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} \rightarrow \min</math></li> <li>• <math>\Rightarrow</math> Varianz der radialen Abstände = <math>R</math></li> </ul>	Messrauschen (Formtreue)
	2. Kugelradienabweichung $R_K$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Daten aus 1.</i></li> <li>• <math>\Rightarrow</math> Mittelwert der Differenzen <math>v_i</math> zw. geschätzten und Soll-Radius von <math>k</math> Kugeln</li> </ul>	Lokaler Maßstab (Formtreue)
	3. Abstandsabweichung $\Delta L$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prüfkörper: Feld mit <math>k</math> Zielmarken auf Soll-Positionen oder</li> <li>• 3D-Festpunktfeld mit <math>k</math> Zielmarken</li> <li>• Räumliche 6-P-Transformation der Markenzentren (fester Maßstab)</li> <li>• <math>\Rightarrow</math> Helmertsche Punktfehler = <math>\Delta L</math></li> </ul>	Maßstab Rückführbarkeit (Form- & Maßtreue)
Einzelansicht	4. Auflösungsvermögen $AV$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prüfkörper: BÖHLER-Stern</li> <li>• <math>\Rightarrow</math> Kleinste Spaltbreite, bei der kein bimodales Histogramm festzustellen ist = <math>AV</math></li> </ul>	Auflösungsvermögen (Detailtreue)

Grundsätzlich:

kalibrierte Prüfkörper (3fach bessere Genauigkeit) , diffus streuend, „glatt“ bzgl.  $\lambda$   
 Anordnung der Prüfkörper gleichmäßig im Messvolumen  
 (Kenngrößen für 3 Messentfernungen (nah, typisch, fern) bestimmen)  
 max. 5% der Messungen dürfen als Ausreißer verworfen werden  
 dokumentierte Betriebs- und Umgebungsbedingungen

# Vorsorgeeinflussfaktoren (angelehnt an VDI/VDE 2634 Blatt 2 & 3 u. [Heister 06])

## 1. Antastabweichung $R$

- Prüfkörper:  $k$  Kugeln

• Abtastrate  
 • Auftreffwinkel  
 • Quantisierung

Messrauschen  
 (Formtreue)

## 2. Kugelradienabweichung $R_K$

- Daten aus 1.

• Abtastrate  
 • Auftreffwinkel  
 • Quantisierung

Lokaler Maßstab  
 (Formtreue)

## 3. Abstandsabweichung $\Delta L$

- Prüfkörper: Feld mit  $k$  Zielmarken

Räumliche Anordnung  
 „Achsfehler“

mit  $k$  Ziel  
 Messentfernung

Räumliche 6-P-Transformation (fester Maßstab!)

- => Helmertsche Punktfehler =  $\Delta L$

Maßstab  
 Rückführbarkeit  
 (Form- & Maßtreue)

## 4. Auflösungsvermögen $AV$

- Prüfkörper: BÖHLER-Stern

• Strahldivergenz  
 • Quantisierung

Histogramm festzustellen ist =  
 Abtastrate

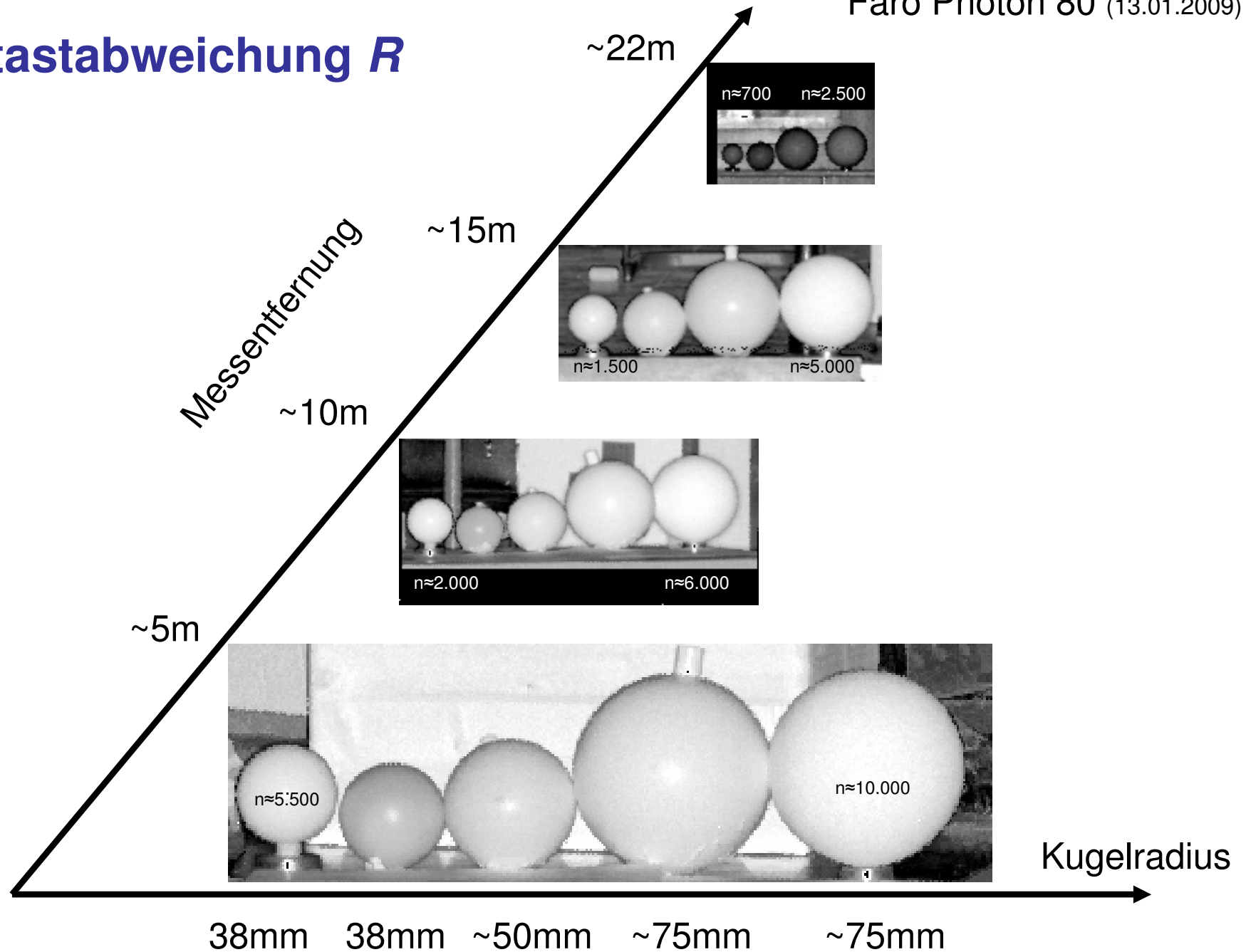
Auflösungsvermögen  
 (Detailtreue)

Grundsätzlich:

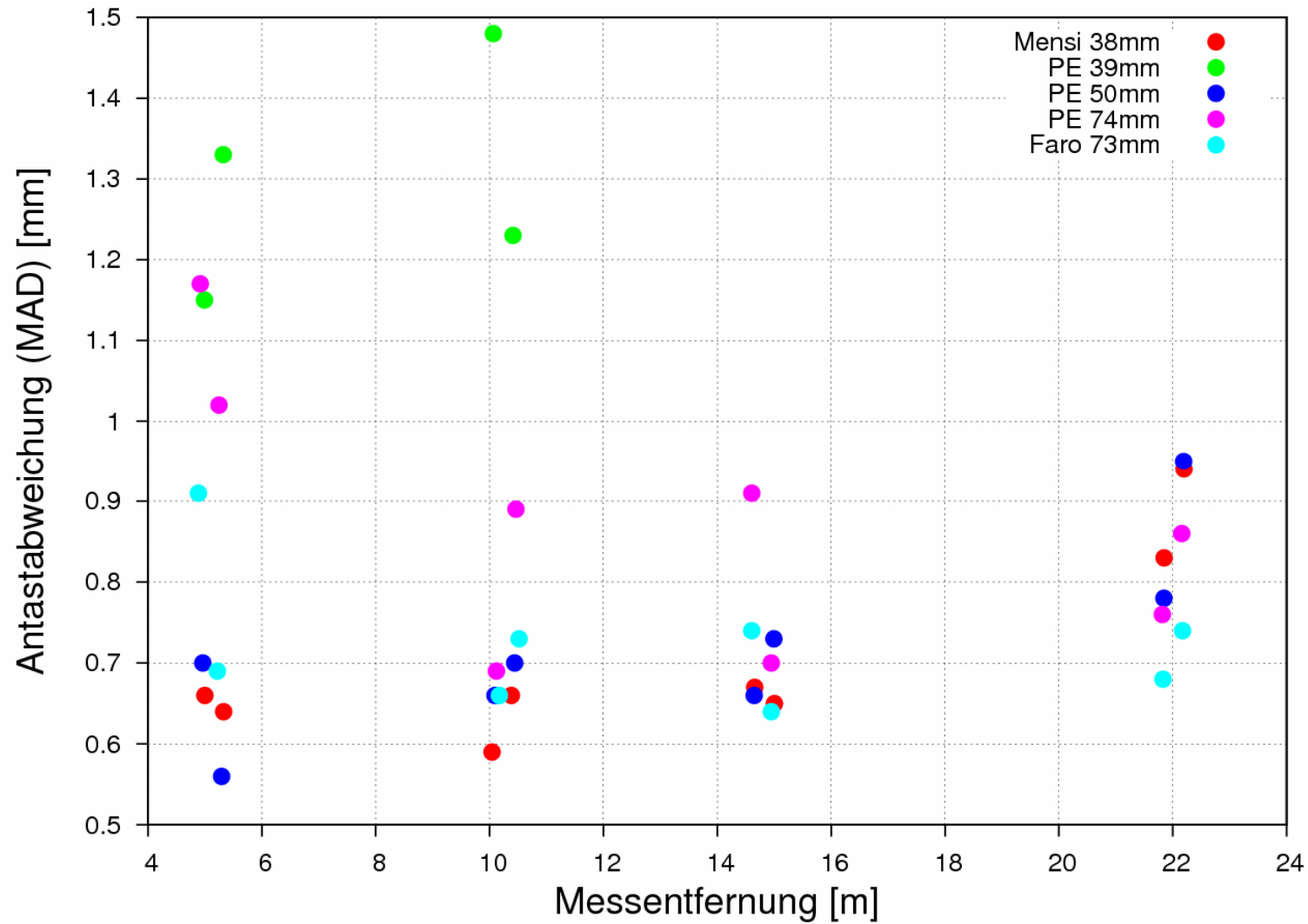
kalibrierte Prüfkörper (3fach bessere Genauigkeit) , diffus streuend, „glatt“  
 Anordnung der Prüfkörper gleichmäßig im Messvolumen  
 Kenngrößen für 3 Messentfernungen (nah, typisch, fern) bestimmen  
 max. 5% der Messungen dürfen verworfen werden  
 dokumentierte Betriebs- und Umgebungsbedingungen

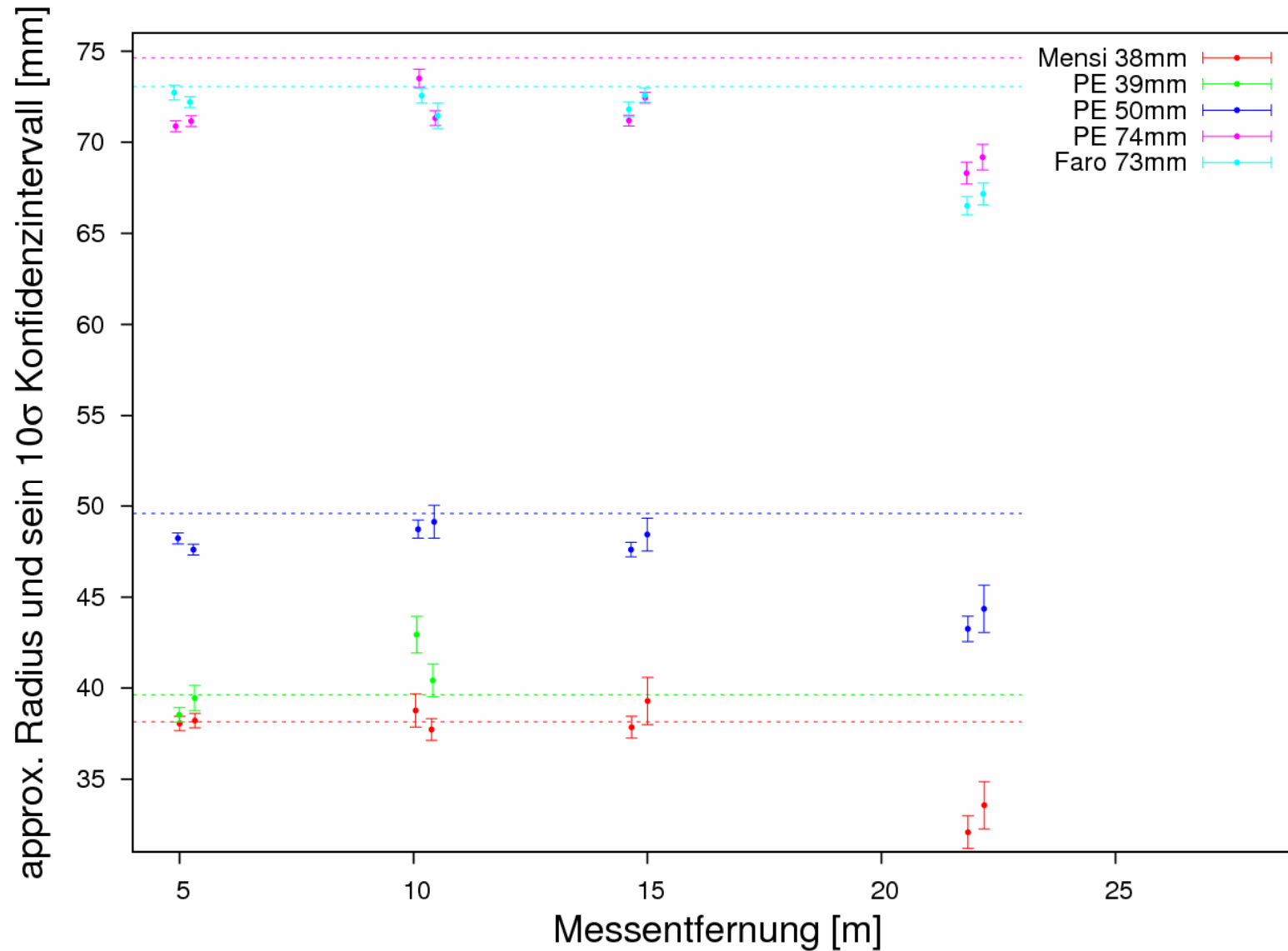


Faro Photon 80 (13.01.2009)

Antastabweichung  $R$ 

## Einfluss der Kugelgröße auf die Antastabweichung $R$



Einfluss der Kugelgröße auf die Radienabweichung  $\Delta L$ 

## Aus der Praxis



$\Delta = 8\text{mm}$  (direkte Bestimmung)

Wie lässt sich die Detailgüte, das Auflösungsvermögen modellieren und durch Kennwerte charakterisieren/quantisieren?



## Auflösungsvermögen mittels BÖHLER-Stern

Schablone  
mit regelmäßig angeordneten  
Spalten und Stegen  
(Kreissektoren)

Konstruktionsparameter

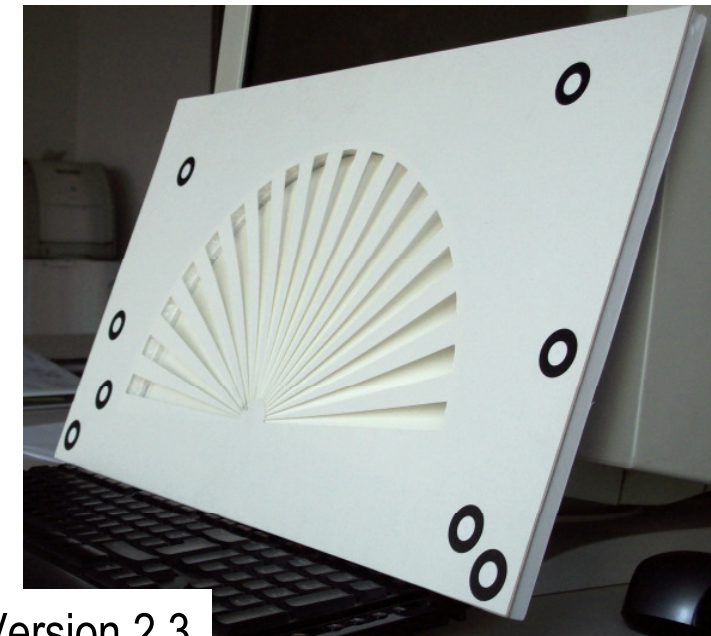
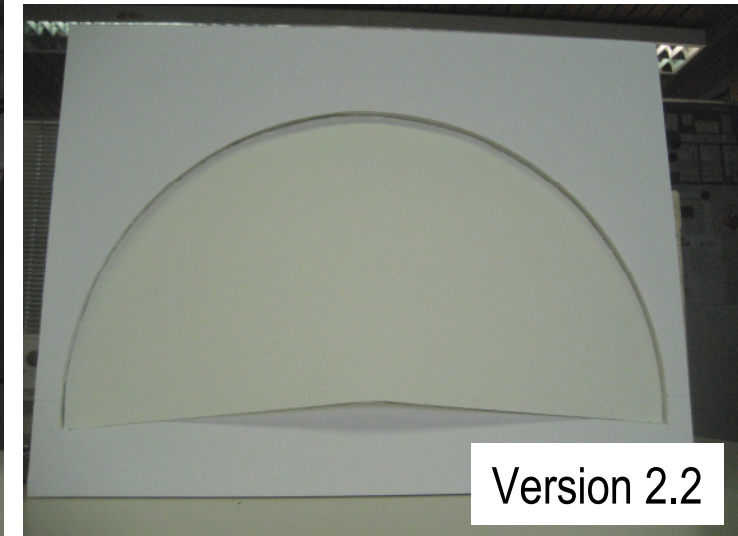
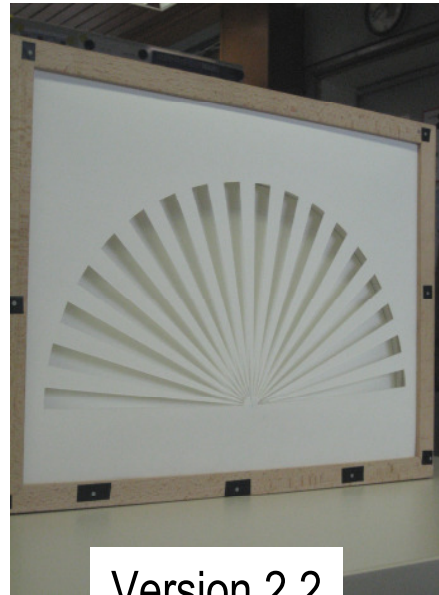
- Zentriwinkel  $\gamma$  eines Sektors
- Abstand  $b$  zw. Vorder- u. Rückfront
- minimaler Radius  $r_{min}$
- maximaler Radius  $r_{max}$

ab Version 2.2

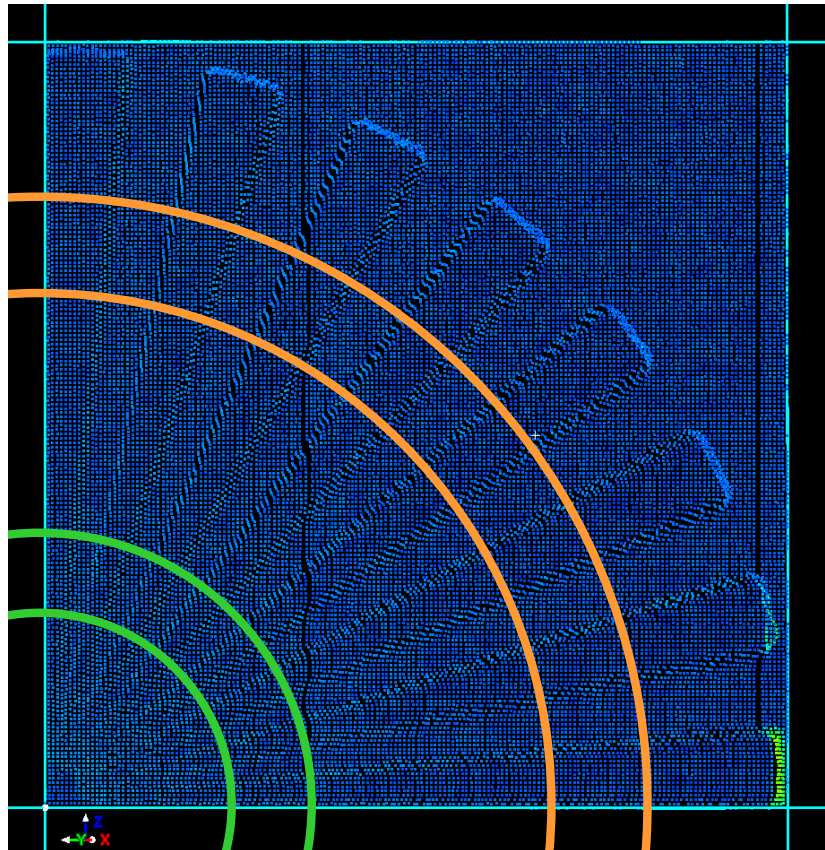
kegelförmige Rückwand  
d.h.: Spaltbreite = Spalttiefe

ab Version 2.3

Passmarken zur rechnerischen  
Feinausrichtung und automatischen  
Auswertung



# Auflösungsvermögen mittels BÖHLER-Stern

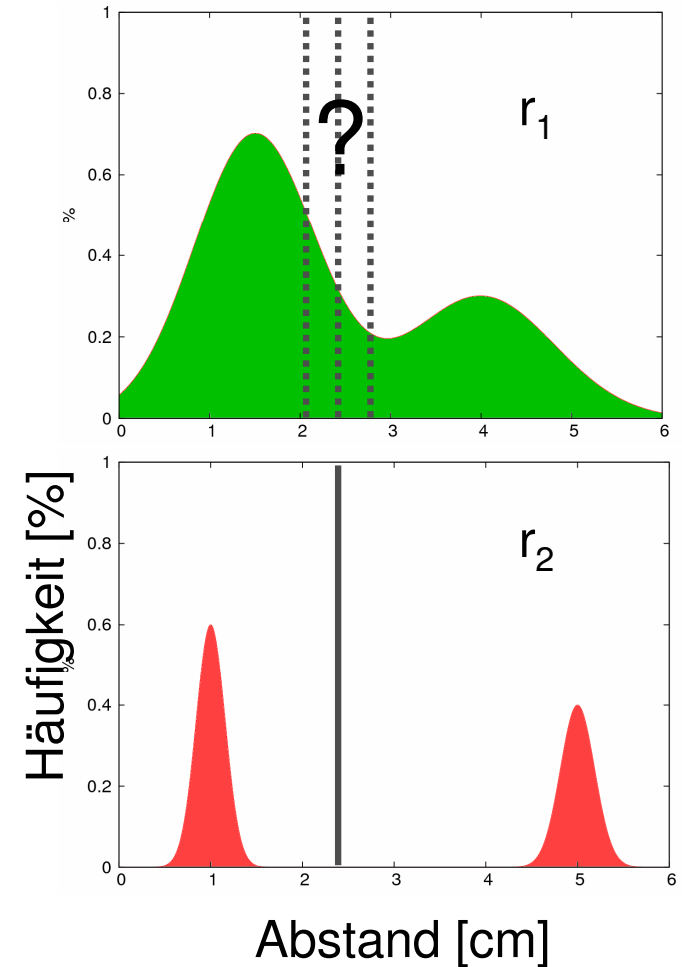


$r_1$   $r_1 + \Delta r$   $r_2$   $r_2 + \Delta r$

## Histogramm-analyse

der Abstände  
zw. Vorder- und  
Rückfront innerhalb  
von Kreisscheiben  
der Breite  $\Delta r$

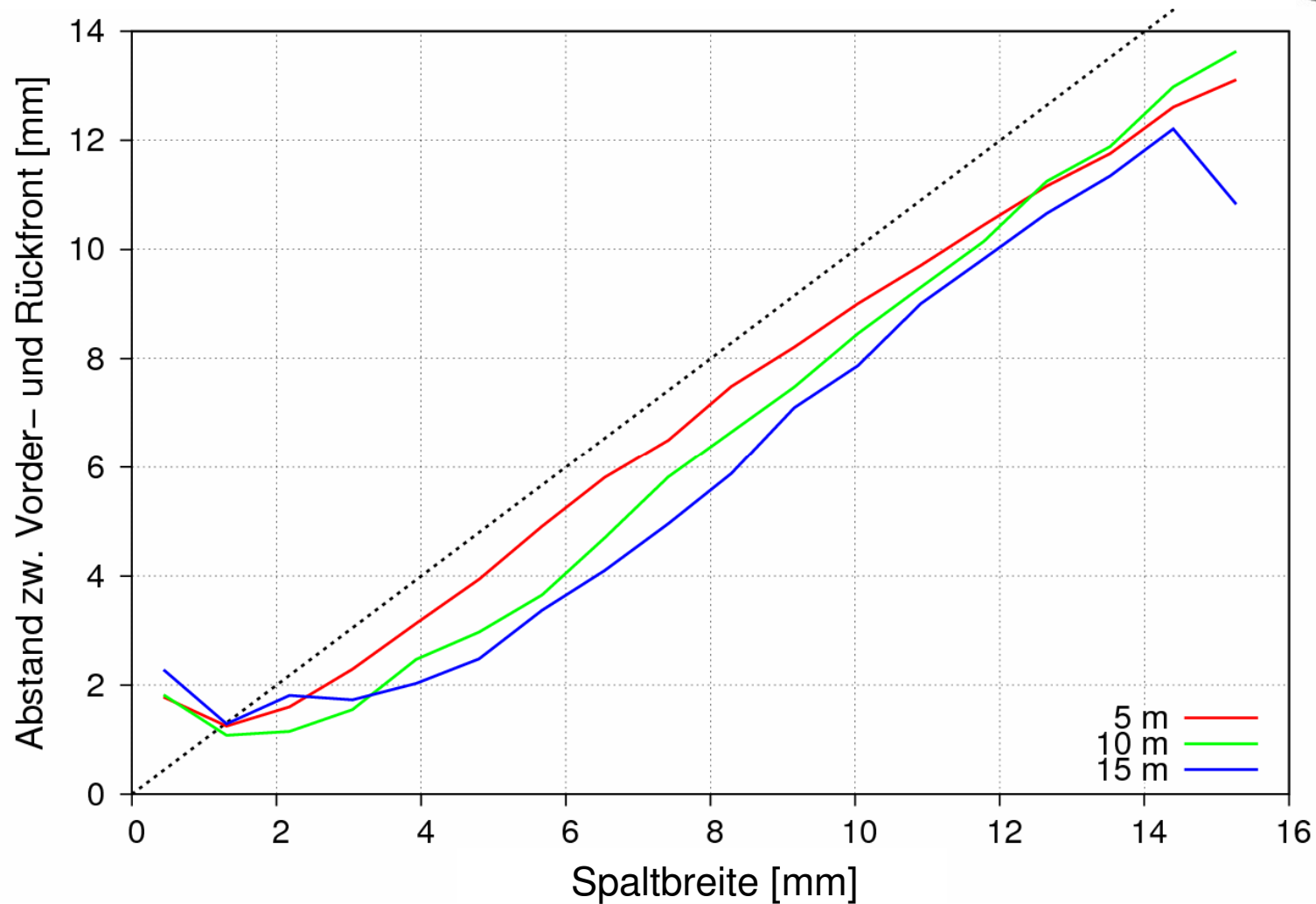
Treffer auf Vorder-  
und Rückfront sind  
gleichhäufig!



Max. Auflösungsvermögen AV liegt bei dem Radius  $r_i$  vor, bei dem die Bimodalität verloren geht.

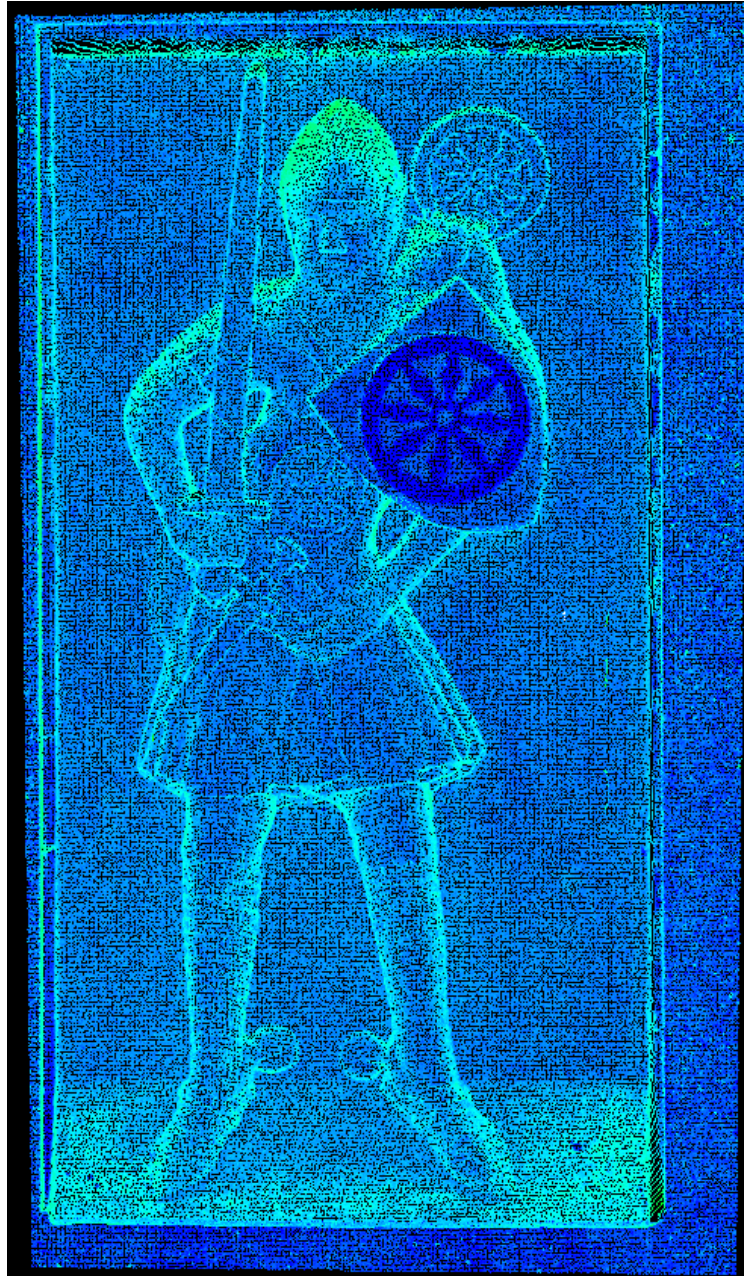
# Auflösungsvermögen

## Exemplarische Prüfung



Böhler-Stern Version 2.3 @5m, 10m, 15m

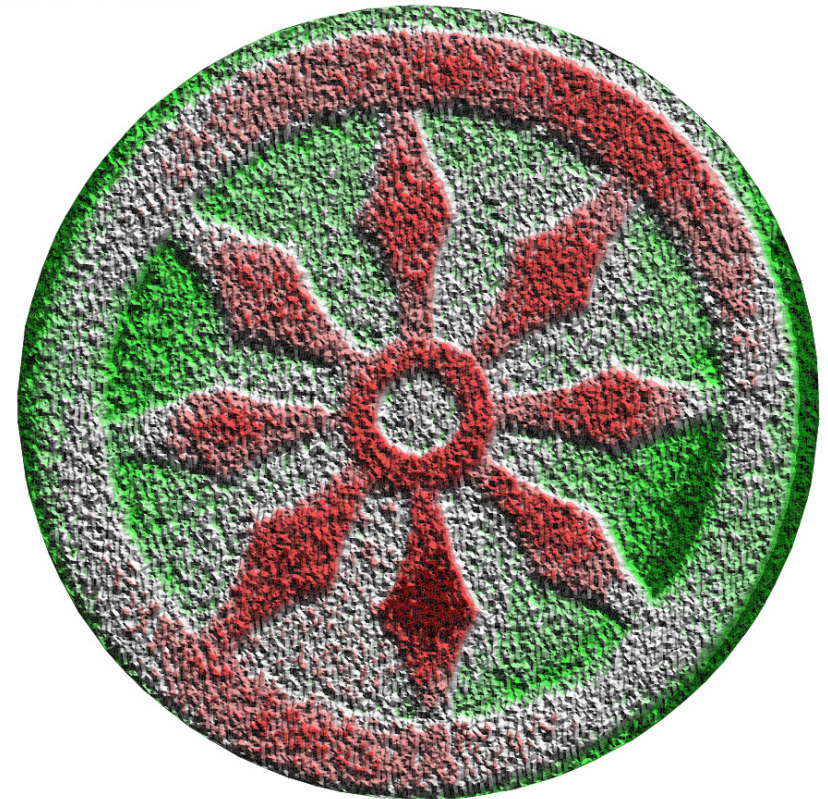
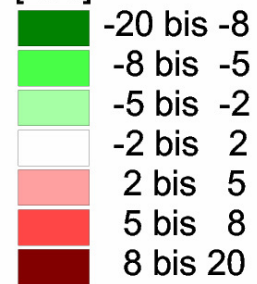




Faro Photon 80 @ 6m

AV(6m): 6mm

Abstand zur mittleren Ebene  
[mm]





## TLS-Prüfrichtlinie (Vorschlag)

Exemplarische Prüfergebnisse für  
 HDS6000 (30m),  
 HDS3000 (60m),  
 Faro LS880 (10m),  
 Faro Photon 80 (5m - 20m)

(nur Einzelansicht)

Kenngröße	HDS		FARO		
	3000	6000	LS880	Photon	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
Antastabweichung $R$ $\sqrt{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p r_i^2}$	1.6	1.5	1.7	1.2	
Antastmessunsicherheit $u_R$ $\sqrt{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p s_{rad,i}^2}$	0.6	0.4	0.2	1.0	
Kugelabstandsabweichung $\Delta L$ $\sqrt{s_x^2 + s_y^2 + s_z^2}$	0.8	1.9	4.8	4.2	
Kugelradiusabweichung $R_K$ $\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p v_i$	+0.49	+2.40	+1.93	+6.36	
Auflösungsvermögen $AV(D)$ $Q(0.75)_i - Q(0.25)_i - b \stackrel{r_i \rightarrow \min}{>} T_\alpha$					
	@6m	6	4	4	6
	@21m	4.5	12	13	8

Herstellerangaben:

	HDS 3000	HDS 6000	FARO LS880	FARO Photon 80
Streckenmessverfahren	Impuls~	Phasen~	Phasen~	Phasen~
Prüfentfernung $d$	60 m	30 m	10m	5-20m
Herstellerangaben				
Genauigkeit – Position ( $1\sigma$ )	6 mm	6 mm		
Modeled Surface precision/noise ( $1\sigma$ )	2 mm	2 mm		
Systematischer Distanzmessfehler			± 3 mm @ 10 m	± 2 mm @ 25 m
Reproduzierbarkeit (RMS, ungefiltert)			4,2 mm @ 10 m (90% Reflekt.)	0,9 mm @ 10 m (90% Reflekt.)

## Fazit

### Eine TLS-Prüfrichtlinie

- muss sich auf Kenngrößen stützen, die der Anwender auf seine praktischen Erfahrungen beziehen kann,
- muss einfache, schnelle und kostengünstige Prüfverfahren definieren
- sollte dem Hersteller Raum bieten auch die Vorzüge seines Produkt darstellen zu können,
- sollte sich an vorhandene Prüf-„Philosophien“ orientieren,
- und sollte nicht den Anspruch erheben, für Fragen eine umfassende Antworten zu liefern.

*Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.*