

ERLÄUTERUNG  
DER KENNGRÖßEN  
DES SENSORDATENBLATTES

---

KENNGRÖßEN & MESSPLÄNE

Version vom 28.09.2016

## Inhaltsverzeichnis

1.	Festlegungen.....	V
2.	Kenngößen.....	1
1.	Gerätebeschreibung.....	1
1.1	Abmessung.....	1
1.2	Gewicht.....	1
1.3	Wellenlänge und Bandbreite.....	2
1.4	Elektrische Leistung.....	2
1.5	Versorgung.....	3
1.6	Art der Versorgung.....	3
1.7	IP-Schutzart (Schutzklasse).....	4
1.8	Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen.....	4
1.9	Sensorpreis (Preispanne).....	5
1.10	Technische Schnittstellen / Protokolle.....	5
1.11	Logische Schnittstellen / Datenformate.....	6
1.12	Komponenten eines Datenpunktes.....	6
1.13	Struktur der Datenpunkte.....	6
2.	Funktionsbeschreibung.....	7
2.1	Dimensionalität des Verfahrens.....	7
2.2	Zusätzlich benötigte Messmittel.....	8
2.3	Zusätzliche Bewegungsachsen.....	8
2.4	Rundumsicht.....	9
2.5	Typische Einsatzfelder.....	9
3.	Messtechnische Kenngößen 3D.....	10
3.1	Messvolumen.....	11
3.2	Abstand zum Messvolumen in z-Richtung.....	12
3.3	Antastabweichung ( $PF/PS$ ).....	12
3.4	Kugelabstandsabweichung ( $SD$ ).....	14
3.5	Längenmessabweichung ( $E$ ).....	16
3.6	Ebenheitsmessabweichung ( $F$ ).....	17
3.7	Lokales Rauschen in z-Richtung ( $\sigma\tau$ ).....	19
3.8	Zeitliches Rauschen in z-Richtung ( $\sigma\chi$ ).....	20
3.9	Max. Datenpunkte je Messung.....	21
3.10	Mittlerer Triangulationswinkel.....	22
3.11	Mittlere Basislänge.....	22

3.12	Max. Neigungswinkel der Oberfläche ( $\varphi_N$ ).....	23
3.13	Mittlerer 3D-Datenpunktabstand .....	24
4.	Kenngrößen zu kleinsten Strukturen.....	25
4.1	Grenzfrequenz der 3D-MTF.....	25
4.2	Grenzradius.....	26
5.	Zeitbezogene Kenngrößen.....	27
5.1	Messzeit pro 3D-Einzelansicht.....	27
5.2	Latenzzeit pro 3D-Einzelansicht .....	28
5.3	Gesamtzeit pro 3D-Einzelansicht.....	28
5.4	3D-Datenpunktrate (maximal) .....	29
5.5	Messrate 3D-Einzelansichten .....	30
5.6	Wiederholrate 3D-Einzelansichten.....	31
6.	Technische Daten eines elementaren Bildgebers .....	32
6.1	Modell-/Typenbezeichnung.....	32
6.2	Dimension (Dim./ Achsen) .....	32
6.3	Auflösung .....	33
6.4	Anzahl elementarer Bildgeber .....	33
7.	Zeitbezogene Kenngrößen eines elementaren Bildgebers.....	34
7.1	Messzeit elementare Einzelaufnahme .....	34
7.2	Rate elementare Einzelaufnahme .....	34
7.3	Pixelrate.....	34
8.	Umgebungseinfluss.....	35
8.1	Fremdlicht .....	35
8.2	Zulässige Betriebstemperatur .....	35
8.3	Zulässige Betriebs-Luftfeuchte .....	36
9.	Materialeinfluss (Messobjekt).....	37
9.1	Textur Farbe/Grauwerte ( $\sigma_z$ ).....	37
9.2	Textur Hell-Dunkel-Übergang.....	38
9.3	Transluzenz.....	39
10.	Sonstiges.....	40
10.1	Erweiterungsmöglichkeiten .....	40
10.2	Serviceintervall.....	40
10.3	Zeit für Inbetriebnahme.....	40
11.	Systemkonfiguration der Kenngrößen-Bestimmung .....	41
11.1	Systemkonfiguration .....	41

3.	Prüfkörperliste – Beispiele.....	42
3.1	Kugelnormal.....	42
3.2	Kugelstab .....	42
3.3	Ebenheitsnormal.....	43
3.4	Kantennormal.....	43
3.5	Color Chart.....	44

# 1. FESTLEGUNGEN

## Koordinatensystem von Sensor und Messung

Lateral bildet die  $x$ -Achse die Länge und die  $y$ -Achse die Höhe ab – unabhängig davon, ob diese jeweils gen Himmel oder gen Boden gerichtet ist. Die Tiefe wird (axial) entlang der gedachten optischen Achse des Sensors angegeben, die parallel zur  $z$ -Achse verläuft.

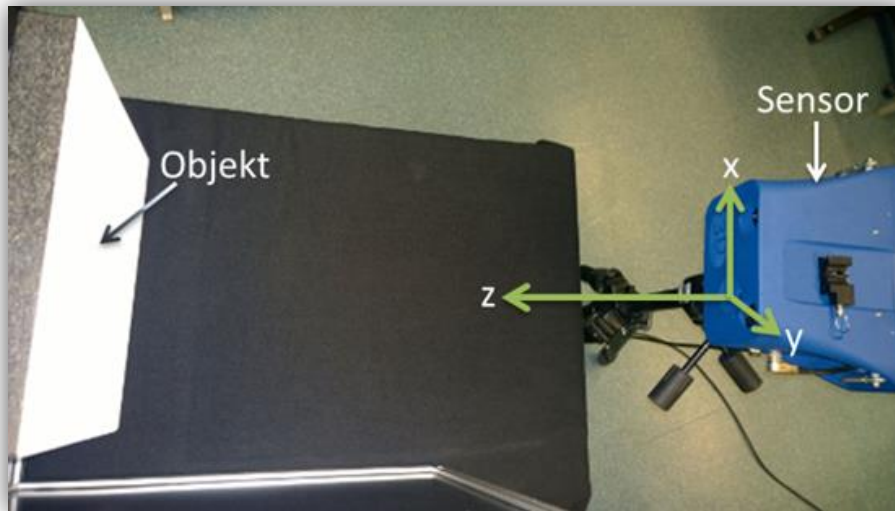


Abbildung 1: Beispielbild für das verwendete Koordinatensystem.  
Die Szene ist eine Draufsicht, bei der ein Sensor (rechts) ein ebenes Objekt (links) aufnimmt.

## Sensor und Signale

Der Teil eines Sensors, der ein Signal aufnimmt (Wellenlänge/ Bandbreite), wird im Folgenden als Bildgeber bezeichnet, z.B. ein CMOS Kamerasensor. Die kleinste Informationseinheit, die der Bildgeber ausgibt, ist als Pixel [px] definiert. Das kann z.B. ein Pixel einer Kamera sein oder aber auch nur ein Teil des Bayer-Patterns oder ein Volumenelement eines Tomographen.

## Kenngößen und Beispiele

Die Kenngrößen untereinander und in Beziehung zum restlichen Datenblatt beinhalten ausdrücklich gewollte Redundanzen. Diese dienen z. T. der schnelleren Orientierung für Betrachter aus unterschiedlichen beruflichen Domänen und auch der erleichterten Einordnung bzw. Bewertung in Beziehung stehender Kenngrößen.

Die Maßeinheiten und Einheitenvorsätzen in denen die Kennwerte der Kenngrößen einzutragen sind, sind **fest vorgegeben und zu beachten!** Hier ist auf die korrekte Umrechnung zu achten. Im Falle *Text-Eintragungen* sind die Maßeinheiten mit anzugeben.

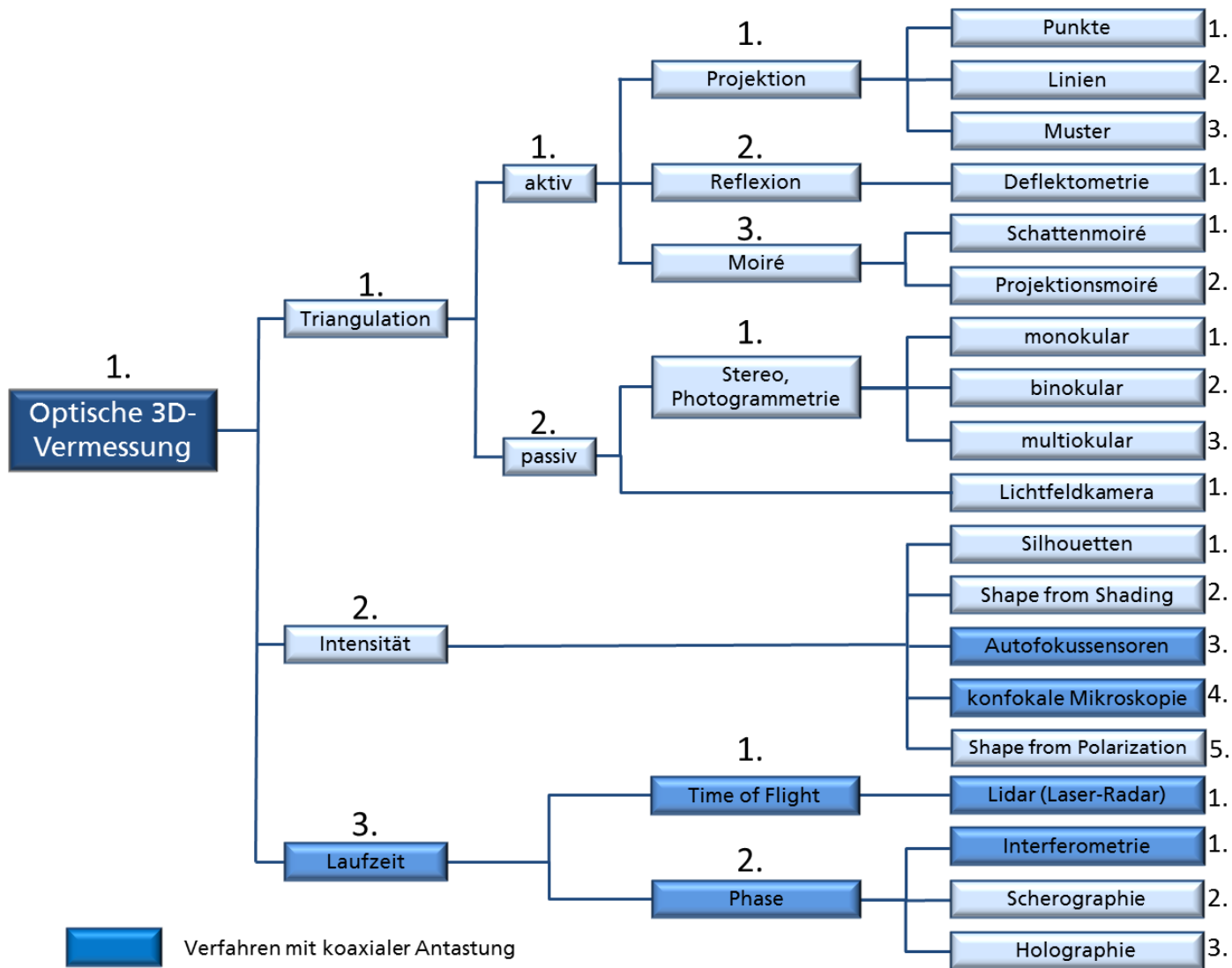


Abbildung 2: Taxonomie der 3D-Sensorprinzipien des Datenblattes.

Tabelle 1: Schwerpunktthemen nach Allianz 3Dsensation Strategiekonzept (Stand 2014, S.23f).  
**Blau** interlegte Schwerpunktthemen wurden von den Fachgruppenmitgliedern priorisiert.  
 Die Tabelle kann zur Klassifikation des Einsatzfeldes eines Sensors nach Kenngröße  
 2.5 „Typische Einsatzfelder“ herangezogen werden. Fett hervorgehobene Abkürzungen **QS**  
 stehen für das jeweilige Schwerpunktthema.

Bedarfsfelder	Schwerpunktthema	
Produktion	<b>QS</b>	Qualitätssicherung in der Produktion
	<b>MI</b>	Sichere Mensch-Maschine-Interaktion Arbeitsplatzsicherung, Montageassistentz
	<b>ZP</b>	3D-Technologien für zuverlässige Prozesse (Feedback, Analysen, Planung)
	<b>LO</b>	3D-Technologien für Logistik
Mobilität	<b>IN</b>	Kfz-Innenraumanwendungen (Fahrerzustand, Assistenz, Interaktion, Gestensteuerung)
	<b>UM</b>	Komplexe urbane Fahrzeugumfeld-Erfassung
	<b>SF</b>	Umfeldererkennung für spezielle Fahrzeugsysteme (in Produktion, Reha, Handicap)
	<b>AN</b>	Unfallanalysen - 3D-Szenenvermessung
Gesundheit	<b>RE</b>	Assistenz Reha, Training: häuslich, betrieblich (inklusive Fitness)
	<b>DI</b>	Nichtinvasive Diagnostik
	<b>AS</b>	Assistenz, Navigation im OP bzw. Diagnostik
	<b>BI</b>	Nutzung 3D-Technologien in Ausbildung
	<b>NV</b>	Psychologie, 3D-Messung des nonverbalen Verhaltens
Sicherheit	<b>ID</b>	Sicherheitstechnik für öffentliche Räume - Grenzen, Personenidentifikation (Gesichter, Finger)
	<b>EV</b>	Eventerkennung, Verhaltenserkennung

## 2. KENNGRÖßEN

### 1. GERÄTEBESCHREIBUNG

Allgemeine Beschreibung der physikalischen, technischen oder informationstechnischen Eigenschaften des Sensorgerätes.

#### 1.1 Abmessung

Gibt die Geräte bzw. Sensorabmessungen an. Die Reihenfolge der Dimensionen ist: Breite, Höhe und als drittes Tiefe.

Typ: (L x H x T) in Millimeter [mm<sup>3</sup>]

Beispielintrag: „100 x 120 x 190“

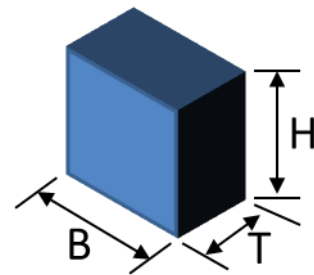


Abbildung 3: Sensor-  
Abmessung.

#### 1.2 Gewicht

Gibt das Netto Gewicht des Sensors ohne eine externe Rechen- oder Ausgabekomponente an. Gehören diese zwingend zum Sensor, so ist der Gesamtwert in Klammern anzugeben.

Typ: Skalar in Gramm [g]

Beispielintrag 1: „1350“

Es ist das reine Sensorgewicht angegeben.

Beispielintrag 2: „1350 (16350)“

Angegeben ist das Gewicht des Gesamtsystems. Dies kann mit oder ohne Kabel u. ä. angegeben sein.

Beispielintrag 3: „(7240)“

Angegeben ist ein Beispielwert für einen mobilen, vollintegrierten Hand-3D-Scanner, d. h. die Recheneinheit und Akkumulatoren sind in diesem Fall einzurechnen.



### 1.3 Wellenlänge und Bandbreite

Für aktive Systeme sind hier Wellenlänge und Bandbreite des aktiven Senders z. B. Projektor anzugeben. Für Passive Systeme sind die vom Hersteller/Entwickler vorgesehene Wellenlänge und die Bandbreite des Bildgebers anzugeben. Das Band liegt symmetrisch um die angegebene Wellenlänge. Sind die Empfindlichkeiten für bestimmte Wellenlängen asymmetrisch verteilt, so kann dies in der Systembeschreibung oder im Anhangsblatt angegeben werden.

Typ: (Wellenlänge  $\pm$  Bandbreite) in Nanometer [nm]

*Beispielintrag 1: „460  $\pm$  20“*

Der Eintrag steht für einen Projektor im Blaulichtbereich (460 nm) mit einer Bandbreite von insgesamt 40 nm.

*Beispielintrag 2: „4000  $\pm$  1000“*

Dieser Eintrag beschreibt einen passiven Sensor mit Bildgeber im mittleren Infrarotbereich.

### 1.4 Elektrische Leistung

Gibt die maximale elektrische Leistungsaufnahme des Sensors an. Auch hier ist eine externe Recheneinheit nicht mit einzubeziehen. Sind externe Komponenten für den Betrieb unbedingt notwendig, z. B. im Fall von Spezialhardware, so kann die Leistungsaufnahme des Gesamtsystems in Klammern angegeben werden.

Typ: Skalare Größe, elektrische Leistung in Watt [W].

*Beispielintrag 1: „40“*

Angegeben ist die Leistungsaufnahme des Sensors ohne Auswerteeinheit.

*Beispielintrag 2: „40 (390)“*

Angegeben ist die Leistungsaufnahme für einen 40-Watt-Sensor mit zugehöriger Auswerteeinheit, z. B. PC mit 350 W. Es ergibt sich eine elektrische Gesamtleistungsaufnahme von 390 W.

*Beispielintrag 3: „(550)“*

Angegeben ist die elektrische Leistungsaufnahme des Gesamtsystems, z. B. für den Fall, dass eine Messung für den Sensor alleine nicht möglich ist. Dies ist i. d. R. auch bei vollintegrierten Sensorsystemen der Fall.

## 1.5 Versorgung

Hier sind die zum Betrieb notwendigen Versorgungsarten für den Sensor bzw. das Sensorsystem durch Kennzahlen und Einheiten anzugeben. I. d. R. sind dies die mittlere maximale Spannung und Stromstärke in  $V$  bzw.  $A$  und deren Zeitabhängigkeit (z. B. Wechselspannung). Exotischere Versorgungsarten wie Druckluftzufuhr sind ebenfalls denkbar.

*Typ:* Textform, Einheiten sind anzugeben

*Beispielintrag 1:* „230 V (AC), 2 A“

Eintrag mit mittlerer Wechselspannung von  $\sim 230\text{ V}$  und maximaler elektrischer Stromstärke von  $2\text{ A}$ .

*Beispielintrag 2:* „12 V, 1,7 A, Luft: 2 bar“

Hier ist die notwendige Versorgung durch eine Gleichspannung von  $12\text{ V}$  bei max.  $1,7\text{ A}$  und einer Druckluftzufuhr mit  $2\text{ bar}$  angegeben.

*Beispielintrag 2:* „360 V (AC), 10 A, Wasser: 240 kPa“

Hier ist die notwendige Versorgung durch eine mehrphasige, mittlere Wechselspannung von  $360\text{ V}$  bei max.  $10\text{ A}$  Stromstärke und einer Wasserdruckzufuhr mit  $240\text{ kPa}$  angegeben.

## 1.6 Art der Versorgung

Gemeint ist eine sehr kurze Benennung der Versorgungsmöglichkeit/-notwendigkeit in Form eines Texteintrages. Sind mehrere Versorgungsarten nötig, kann dies durch ein vorangestelltes Pluszeichen („+“) gekennzeichnet werden. Sind weitere Kombinationen möglich, können diese im Anhangsblatt oder im ausführlichen Beschreibungsteil angegeben werden.

*Typ:* Textform

*Beispielintrag 1:* „Netzstrom (230 V AC)“

Angegeben ist die Versorgung mit „normaler“ 230-Volt-Niederspannung über einen Schutzkontakt.

*Beispielintrag 2:* „PoE (RJ45), Akkumulator, Netzteil“

Angegeben ist die Versorgung mit elektrischem Strom durch Power-Over-Ethernet (RJ45-Steckverbinder), einen Akkumulator oder ein (externes) Netzteil.

*Beispielintrag 3:* „+Netzteil, +Kompressor“

Das vorangestellte Pluszeichen gibt an, dass die jeweilige Versorgungsart für den Betrieb notwendig ist.

## 1.7 IP-Schutzart (Schutzklasse)

Hier ist die elektrische Schutzart des Gerätes anzugeben. Diese gibt u. a. Aufschluss über die Einsatzmöglichkeiten des Gerätes.

*Typ:* International Protection Code (Alphanumerisch)

*Beispielintrag 1:* „IP44“

Die Angabe im Beispiel bedeutet: Geschützt gegen feste Fremdkörper mit Durchmesser ab 1,0 mm, geschützt gegen den Zugang mit einem Draht und Schutz gegen allseitiges Spritzwasser.

*Beispielintrag 2:* „IPX8“

Die Angabe im Beispiel bedeutet: Schutz gegen dauerhaftes Untertauchen.

## 1.8 Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen

Hier sind insbesondere Strahlungsschutzmaßnahmen aufzuführen, die beim Umgang mit dem Sensorgerät beachtet werden müssen. Bei aktiven Sensorsystemen könnte hier die Nennung von Strahlenschutzmaßnahmen für Augen und/oder Haut erforderlich sein.

*Typ:* Text

*Beispielintrag 1:* „keine“

*Beispielintrag 2:* „Laser-Schutzbrille mit >940-1000 DIR LB6 + M LB6Y“

Im Umgang mit dem Sensor ist eine Laserschutzbrille mit entsprechender Kennzeichnung nötig. Dies sollte mit der Kenngröße 1.3 übereinstimmen. In diesem Fall eine CO<sub>2</sub> –Laserlichtquelle als Projektor.

*Beispielintrag 3:* „umfassend Hautschützende Kleidung, UV-A Schutzbrille“

Aufgrund von UV Strahlung ist bei diesem Sensor ein umfassender Haut- und Augenschutz notwendig, z. B. Quecksilberdampfampe.

## 1.9 Sensorpreis (Preispanne)

Insofern hier ein Netto-Preis angegeben wird, sollte dieser einen betriebsfertigen Sensor (ohne zusätzlichen Service) abbilden. D. h. wird zur Verwendung weitere *spezielle* Hardware oder Software benötigt, sollte diese in den Preis einbezogen werden. Verfügt der Sensor über Schnittstellen zu allgemeinen Protokollen, wie z. B. Gen<l>Cam, und ist somit ohne herstellerspezifische Soft- und Hardware verwendbar, muss diese nicht in den Preis einbezogen sein. Der Anhang oder die ausführliche Beschreibung kann hierzu Stellung beziehen.

*Typ:* Skalar oder Bereich mit Einheit [€] oder [\$]

*Beispielintrag 1:* „~5 T€“

Der Sensor kostet in der Größenordnung von 5.000 Euro netto.

*Beispielintrag 2:* „60 T€ ... 80 T€“

Der Sensor kostet zwischen 60.000 Euro und 80.000 Euro netto. Hier kann eine Ausstattungsvariante unterstellt werden. Notwendig ist hierbei, dass die hier angegebene Preisspanne die ermittelten Kenngrößen zulässt. D. h. Geräte in dieser Preisspanne müssen die ermittelten Kenngrößen einhalten!

*Beispielintrag 3:* „US \$140“

Der Sensor kostet 140 US-Dollar netto.

## 1.10 Technische Schnittstellen / Protokolle

Aufzählung der standardmäßig unterstützen technischen Protokolle und Anschlüsse zur Steuerung bzw. Kommunikation mit dem Sensor. Betriebsnotwendige Schnittstellen können mit einem Pluszeichen „(+“ kenntlich gemacht werden. Das ist insbesondere dann von Interesse, wenn z. B. kein Betrieb ohne ein externes Taktsignal möglich ist.

*Typ:* Text (z. B. ISO-Abkürzungen)

*Beispielintrag 1:* „+1000Base-T Ethernet (RJ45), BNC, HDMI-Out 1.3“

Der Sensor hat standardmäßig und notwendigerweise eine Ethernet Netzwerkschnittstelle (z. B. zur Datenkommunikation) sowie einen BNC-Anschluss (evtl. für Takt- oder Triggersignale) und einen HDMI-Ausgang mit Protokollversion v1.3.

*Beispielintrag 2:* „+10GBASE-SR, +CAN, +m. DE-9“

Der Sensor stellt zur Kommunikation die notwendige Schnittstelle 10GBASE Short Range Glasfaser zur Verfügung und kommuniziert mit dem CAN-Bus-Protokoll über einen männlichen 9-poligen D-sub-Stecker.

## 1.11 Logische Schnittstellen / Datenformate

Hier sind die softwareseitigen Schnittstellen (im Vergleich zu den hardwarenahen unter 1.10) und Protokolle zur Steuerung und zum Datenaustausch zu nennen. Dies umfasst u. a. Protokolle und Dateiformate.

*Typ:* Text

*Beispielintrag 1:* „Datei {STL, XYZ, PLY}, Sockets (TCP,UDP)“

Der Sensor bietet standardmäßig (ohne zusätzliche Kosten) die Speicherung der Messdaten in den Dateiformaten STL, ASC, PLY oder aber die Kommunikation/Ausgabe über eine Socket-Verbindung (Netzwerk). Bei der Nennung von Abkürzungen von Dateiformaten ist darauf zu achten, dass diese oft nicht eindeutig sind, wie z. B. ASC.

*Beispielintrag 2:* „GenICam v3“

Der Sensor unterstützt die Schnittstelle GenICam v3 für die Steuerung, Konfiguration und den Datenaustausch von 3D-Messwerten.

## 1.12 Komponenten eines Datenpunktes

Nennung der Daten, welche vom Sensor für einen Datenpunkt (Messwert) via 1.10 und 1.11 standardmäßig ausgegeben werden können.

*Typ:* Text

*Beispielintrag 1:* „X, Y, Z, Intensität“

Der Sensor liefert die X-, Y- und Z-Koordinaten sowie einen Intensitätswert pro Datenpunkt.

*Beispielintrag 2:* „X, Z, Y, R, G, B, Qualitätsfaktor

Der Sensor liefert neben den 3D-Raumkoordinaten noch einen zugehörigen Farbwert und einen Qualitätsfaktor.

## 1.13 Struktur der Datenpunkte

Diese Kenngröße gibt an, ob den Datenpunkten eine Struktur, Ordnung oder ähnliches zugrunde liegt. Die Verteilung der Datenpunkte hängt im Wesentlichen vom Signalgeber, z. B. dem Bildgeber, ab und korreliert i. A. mit der Verteilung der Antastwerte/Messpunkte im Messvolumen (CMOS-Flächensensor vs. frei positionierbarer 1D-Laserstrahl).

*Typ:* Text

*Beispielintrag 1:* „2D-Matrix (Zeile | Spalte)“

*Beispielintrag 2:* „unstrukturierte Punktwolke“

*Beispielintrag 3:* „Datenpunkte entlang von Texturkanten“

*Beispielintrag 4:* „gleichabständig Punkte auf Linie“

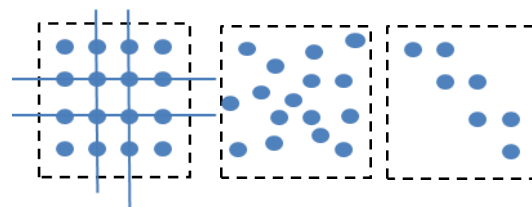


Abbildung 4: Struktur der Datenpunkte.  
links: gleichabständig, Mitte: unstrukturiert,  
rechts: Texturkanten

## 2. FUNKTIONSBESCHREIBUNG

Die Funktionsbeschreibung fasst kurz und prägnant die Eigenschaften des Verfahrens, das dem Sensor zugrunde liegt, zusammen. Sie hilft bei der Interpretation der nachfolgenden messtechnischen Kenngrößen (2D/3D) und bei der Einordnung der angegebenen Kenngrößen. U. a. wenn ein Wert nicht ermittelt werden kann.

### 2.1 Dimensionalität des Verfahrens

Der Begriff der Dimensionalität eines Verfahrens ist der Richtlinie VDI 2617-BI.6.2 §2, Seite 4, Tabelle 1 entlehnt. Es ist die *technische* Frage zu beantworten, wie viele Verfahrachsen ein Sensorsystem benötigt, damit der Signalgeber, z. B. ein Zeilensensor, die Raumposition von Oberflächenpunkten eines zu erfassenden Objektes/Szene ermitteln kann.

Typ: Text

Tabelle 2: Dimensionalität eines Verfahrens

Dimensionalität	Erläuterung & Beispiele
1D (Punktriangulation)	Benötigt mindestens zwei mechanische Achsen, um eine 3D Oberflächenansicht zu rekonstruieren. <i>Z. B. Chromatische Fokusverfahren, Laserfokusverfahren, Video-Fokusverfahren, holographische Konoskopie, Punktriangulation.</i>
2D (Linienchnitt)	Benötigt mindestens eine mechanische Achse, um eine 3D Oberflächenansicht zu rekonstruieren. <i>Z. B. Weißlichtinterferometrie, Konfokalmikroskopie, Linienlaserscanverfahren/Lichtschnittverfahren, strukturiertes Licht mit Zeilenkamera.</i>
3D (Oberflächenansicht)	Benötigt keine mechanische Achse für die Rekonstruktion einer 3D Oberflächenansicht. <i>Z. B. Strukturiertes Licht mit Flächenkamera</i>
3D-Volumen(schnitte)	Benötigt u. U. mehrere Achsen, liefert aber auch mind. Schichtweise Informationen aus dem (Inneren des) Volumen(s) des Messkörpers. <i>Z. B. Röntgen-Tomograph, CT, Terrahertz-Scanner</i>

*Beispielintrag 1: „3D“*

Hierbei könnte es sich um einen passiven multiokularen Stereokamerasensor handeln.

*Beispielintrag 2: „1D“*

Bei diesem Sensorsystem könnte der Signalgeber z. B. ein chromatisch-konfokaler Abstandsmesser sein, der für eine 3D-Oberflächenmessung das zu messende Objekt lateral abrastern muss.

## 2.2 Zusätzlich benötigte Messmittel

Die Kenngröße gibt an, ob standardmäßig Hilfsmittel in das Messvolumen eingebracht oder auf das zu vermessende Objekt aufgebracht werden müssen. *Gegenbeispiel:* Es soll ein Objekt vermessen werden, welches aus einem zum Sensor nicht-kompatiblen Material besteht. Es muss ein Lack oder Muster aufgebracht werden. Dies entspricht nicht der standardmäßigen Verwendung und muss daher nicht angegeben werden. Eine optionale Angabe ist möglich.

Typ: Text

*Beispieleintrag 1: „Passmarken“*

Bei Sensorgeräten zur Nahfeld-Photogrammetrie müssen i. d. R. bei JEDER Messung retro-reflektierende Passmarken aufgebracht werden.

*Beispieleintrag 2: „Maßstab-Referenzobjekt“*

In diesem Beispiel muss ein nicht verdecktes Referenzobjekt mit bekannten Dimensionen bei JEDER Messung in das Messvolumen eingebracht werden, z. B. um korrekte Längenangaben zu erhalten.

## 2.3 Zusätzliche Bewegungsachsen

Hier werden die Bewegungsachsen des Sensors genannt, also etwaige Verfahrachsen des Signalgebers aber auch Drehachsen. Liegt hier eine Diskrepanz zur Kenngröße 2.1 „Dimensionalität des Verfahrens“ vor, bedeutet das für den Anwender, dass er selbst für eine entsprechende Relativbewegung zum Sensor sorgen muss, um eine flächenhafte 3D Oberflächenmessung durchführen zu können. Dies könnte z. B. ein Förderband sein. Wurden entsprechende Achsen für die Auswertung des Datenblattes zur Verfügung gestellt, sind diese in der ausführlichen Beschreibung oder im Anhangsblatt zu beschreiben. Richtangaben sind:

- 1D-Verfahren benötigen mindestens zwei mechanische Achsen
- 2D-Verfahren benötigen mindestens eine mechanische Achse
- 3D-Verfahren benötigen keine zusätzlichen (externen) Achsen

um eine 3-dimensionale, flächenhafte Messung vorzunehmen.

Typ: Skalar

*Beispieleintrag 1: „lineare Achse für laterale y-Richtung“*

Dem beschriebenen Sensor liegt z. B. ein starr ausgerichteter Linien-Laser als aktiver Projektor zugrunde. Für die flächenhafte Erfassung muss ein Objekt „durch“ die Projektionslinie bewegt werden.

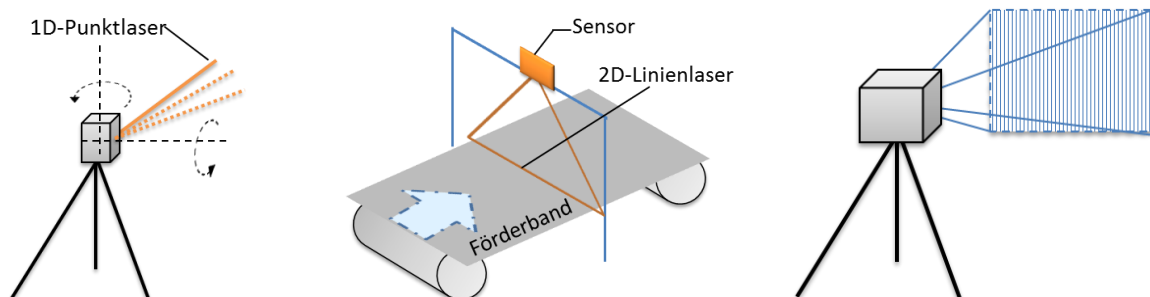


Abbildung 5: Beispiele für zusätzliche Bewegungsachsen.

Links: **zwei** zusätzliche Achsen des Punktlaserscanners, Mitte: **eine** zusätzliche Achse (Förderband) des 2D-Linienlaserscanners, rechts: 3D-Verfahren ohne zusätzliche Achse

## 2.4 Rundumsicht

Die *Rundumsicht* gibt an, ob der Sensor in dieser Ausbaustufe standardmäßig eine 360°-weise 3D-Oberflächenmessung, d. h. eine Rundumsicht, des Messobjektes durchführen kann. I. d. R. ist das die Verknüpfung von mehreren 3D-Oberflächenansichten eines Objektes zu einer 360°-3D-Oberfläche. Diese Angabe ergibt sich nicht alleine aus dem Messvolumen. Dauer, Anzahl und Gleichzeitigkeit der Aufnahmen für die Rundumsicht finden keine Berücksichtigung! Hierauf ist in der ausführlichen Beschreibung oder im Anhangsblatt einzugehen.

Typ: Text {„ja“, „nein“, „optional“}

Beispielintrag 1: „ja“

Das Sensorgerät wird standardmäßig mit z. B. einem Drehteller geliefert oder es beinhaltet mehrere Sensorköpfe. Es bietet eine Rundumsicht.

Beispielintrag 2: „optional“

Es ist möglich, über zusätzliche Ausrüstung, Umrüstung oder eine Variante des Sensors die Rundumsicht der 3D-Oberfläche zu erstellen.

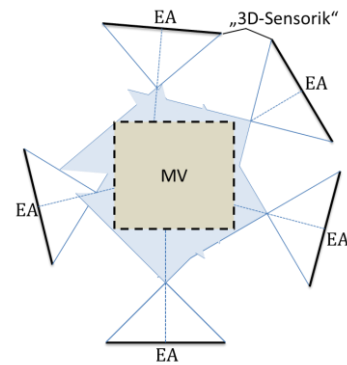


Abbildung 6: Rundumsicht.  
EA= 3D-Einzelansicht  
MV= Messvolumen

## 2.5 Typische Einsatzfelder

Die Kenngröße beschreibt kurz die intendierten oder auch optimalen Einsatzfelder des Sensors und dient somit der Einordnung und Bewertung der Kenngrößen des Sensordatenblattes. Weiterhin soll hier eine Zuordnung zu einem oder mehreren Bedarfsfeldern bzw. Schwerpunktthemen der Allianz 3Dsensation nach Tabelle 1 (Einleitung, oben) erfolgen.

Typ: Text

Beispielintrag 1: „Formvermessung von glänzenden, lackierten Oberflächen z. B. Autotür (QS)“  
Hierbei könnte es sich um einen Sensor handeln, der mittels Deflektometrieverfahren die Prüfung von stark spiegelnden Oberflächen ermöglicht.

Beispielintrag 2: „Bewegte Objekte mit lambertscher Oberfläche z. B. Inline-Messung (QS)“  
Dies könnte die Beschreibung eines Hochgeschwindigkeitssensors sein, der für den Einsatz in Produktionsstraßen konzipiert ist.



### 3. MESSTECHNISCHE KENNGRÖßEN 3D

Die messtechnischen Kenngrößen beschreiben das Messvermögen des Sensors qualitativ und quantitativ in Anlehnung an die Richtlinie **VDI 2634 Blatt 2 „Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung“**. Die Angaben beziehen sich, wenn möglich, auf die Erzeugung einer 3D Einzelansicht, d. h. die Oberflächenrekonstruktion für einen einzelnen Betrachtungsstandort. Insbesondere bedeutet dies, dass Verfahren mit punktwaiser/linienhafter Antastung (Verfahrensdimensionalität 1D & 2D) mechanische Verfahrachsen benötigen, für den Sensor oder das Objekt, und dass höherdimensionale Verfahren (Rundumsicht, Tomographen) eine Reduktion auf eine 3D-Einzelansicht durchführen müssen. Um für diese Verfahren eine bessere Einordnung der gemessenen Werte der nachfolgenden Kenngrößen zu ermöglichen, wurde der Block „Funktionsbeschreibung“ eingeführt.

Kann ein 3D-Sensor in verschiedenen Betriebsarten messen, so ist für die Evaluation des gesamten Datenblattes ein und dieselbe Betriebsart zu verwenden. Andernfalls gilt, dass die angegebenen Kennwerte in jeder Betriebsart eingehalten werden (müssen). Abweichungen hiervon müssen durch Fußnoten, die im Anhang des Datenblattes zu erläutern sind, gekennzeichnet werden.

**Für die Angabe der Kennwerte nachfolgender (aber auch aller anderen) Kenngrößen im Sensordatenblatt gilt: Der für eine Kenngröße angegebene Wert kann an jeder beliebigen Position im Messvolumen eingehalten werden. Den Kennwert einzuhalten bedeutet, dass dieser oder ein im jeweiligen Kontext „besserer Wert“ erreicht wird.**

### 3.1 Messvolumen

Das **Messvolumen (Länge\*Höhe\*Tiefe)** ist ein **Quader** mit ggf. unterschiedlichen Seitenlängen für Länge, Höhe und Tiefe. Die Angabe entspricht der VDI 2634 und ist aus Gründen der Kompatibilität und einfachen Bestimmbarkeit gewählt. **Das Messvolumen wird einmalig vor der Evaluation festgelegt. Alle ermittelten Werte für Kenngrößen im Datenblatt beziehen sich auf dieses Messvolumen und müssen überall im Messvolumen eingehalten werden!**

Typ: Triple in [mm]

Beispielintrag 1: „250 x 250 x 200“

Das Messvolumen beträgt 250 mm auf der X-Achse (L), 250 mm auf der y-Achse (H) und 200 mm entlang der z-Achse (T). Zur Verortung des Messvolumens bezüglich des Sensors muss die nachfolgende Kenngröße 3.2 hinzugezogen werden.

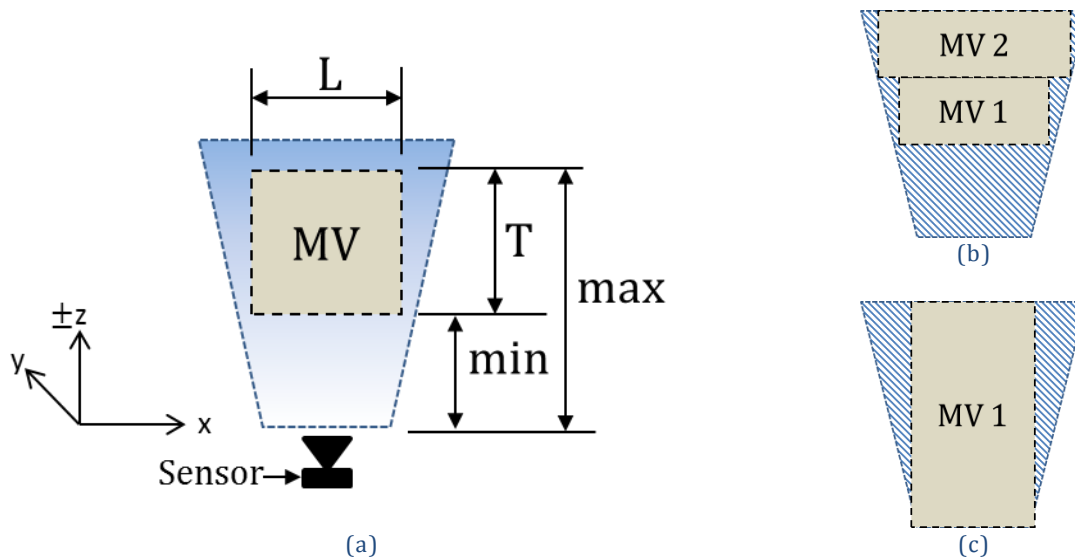


Abbildung 7: Das Messvolumens (MV) und Varianten der Festlegung des Messvolumens.  
 (a) Als Messvolumen wird vereinfacht ein Quader mit ggf. unterschiedlichen Seitenlängen verwendet. Die Höhe des Messvolumens wird entlang der y-Achse gemessen.  
 $T \sim$  Tiefe des Messvolumens,  $L \sim$  Länge (x-Achse)  
 (b) Teilung des Messvolumens, in dieser Variante müssen die Kennwerte für jedes einzelne Messvolumen ermittelt werden ( $\rightarrow$  zwei Datenblätter)  
 (c) Eine weitere Variante der Festlegung, wobei der blau-schraffierte Bereich unberücksichtigt bleibt.

### 3.2 Abstand zum Messvolumen in z-Richtung

Abstand der Front des Messvolumens zum Sensor. I. d. R. bezieht sich die Angabe auf die Sensorfront oder einen anderen, durch den Anwender leicht nachzuvollziehenden Punkt am Sensor. Eine Angabe bezogen auf den Kamerachip kann hier u. U. ungünstig sein, wenn die Lage bezüglich des Gesamtsensor nicht ohne weiteres nachvollziehbar ist. Besser ist hier die Angabe z. B. bezogen auf das Objektiv oder einen anderen Punkt am Gehäuse. Die Angabe entspricht „min“ in Abbildung 7 (a).

Eine Spanne für den Arbeitsabstand ist nicht vorgesehen. Es sollte stattdessen versucht werden, dies durch eine Kombination aus Messvolumentiefe und Arbeitsabstand anzugeben.

Abweichungen hiervon sollten im Anhangsblatt beschrieben werden.

Typ: Skalar in [mm]

Beispielintrag: „450“

Der Abstand des Messvolumens beträgt 450 mm.

### 3.3 Antastabweichung ( $P_F/P_S$ )

Diese Kenngröße orientiert sich an der Kenngröße

*Antastabweichung* der VDI Richtlinie 2634 Blatt 2 Abschnitt 4.2.

Die Antastabweichung beschreibt das Abweichverhalten des 3D-Sensors bei Messung einer als ideal anzunehmenden Kugel, die wesentlich kleiner ist, als das Messvolumen. Für die Messung wird ein Kugelnormals an *mindestens zehn verschiedenen*

*Positionen* innerhalb des Messvolumens gemessen. Die Messpositionen sollen im Messvolumen gleichmäßig verteilt werden,

so dass eine Aussage für das gesamte Messvolumen getroffen werden kann. Zur Bestimmung der Kenngröße wird mittels der Messpunkte eine Ausgleichskugel nach dem Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt. *Der Radius bleibt eine freie Variable*. Es ergibt sich eine Kugel mit Radius  $r_a$  und Durchmesser  $D_a$  (vergleiche Abbildung 8). Entscheidend für die Kenngröße sind die radialen Abstände der Messpunkte von der approximierten Kugeloberfläche und die Abweichung des approx. Kugeldurchmessers  $D_a$  vom tatsächlichen Kugeldurchmesser  $D_r$ .

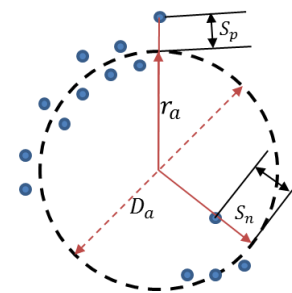


Abbildung 8:  
Antastabweichung

Typ: Paar „ $P_F / P_S$ “ in [mm]

#### Durchführung:

- Messung eines Kugelnormals mit kalibriertem Radius  $D_r$
- Messung an mindestens 10 unterschiedliche Messpositionen im Messvolumen
- gleichmäßige Verteilung der Messpositionen im Messvolumen
- Approximation einer Ausgleichskugel bei freiem Radius durch die Messpunkte  $p_k$  (mit  $k = 1 \dots N$ ):

$$\min_{p_k} \left\| \sqrt{(c_x - x_k)^2 + (c_y - y_k)^2 + (c_z - z_k)^2} - r \right\|_2^2$$

- Möglichkeit der Entfernung von 3‰ der Messpunkte und einmalige Wiederholung der Berechnung der Ausgleichskugel

**Auswertung:**

- $S_p^i$ ,  $S_n^i$  sind die *betragsmäßig* größten positiven ( $S_p^i$ ) bzw. negativen ( $S_n^i$ ) radialen Abstände der 3D-Messpunkte einer Messposition  $i$  zur Kugeloberfläche.
- $P_F^i$  ist die Spanne, also die Summe (der Beträge), aus  $S_p^i$  und  $S_n^i$  für eine Messposition  $i$ :  
 $P_F^i = S_p^i + S_n^i$ .
- $P_S^i$  ist die Differenz des Durchmessers der Ausgleichskugel  $D_a^i$  und des kalibrierten Kugeldurchmessers  $D_r$ :  $P_S^i = D_a^i - D_r$  für eine Messposition  $i$ .
- Für die mithilfe der  $P_F^i$  festzulegende Kenngröße  $P_F$  muss gelten:  
 $|P_F| \geq |P_F^j|$  für jede beliebige Messposition  $j$  im Messvolumen.
- Für die mithilfe der  $P_S^i$  festzulegenden Kenngröße  $P_S$  muss gelten:  
 $|P_S| \geq |P_S^j|$  für jede beliebige Messposition  $j$  im Messvolumen.

**Prüfkörper:**

- Die Abweichung des Prüfkörpers von der entsprechenden idealen Kugel in Form  $P_F$  und Maß  $P_S$  (Rundheit und Radius) sollte um drei Größenordnungen kleiner sein als die Messgenauigkeit des 3D-Sensors.
- Beispielprüfkörper sind in Abschnitt 3 „Prüfkörperliste – Beispiele“ gegeben.
- Kugeldurchmesser des Prüfkörpers sollte nach VDI2634 Blatt 2:  $(0,02 \dots 0,2) \cdot L_0$  betragen, wobei  $L_0$  die Länge der Diagonale des Messvolumens ist.

*Beispieleintrag: „1,50 / 0,05“*

Die radiale Spanne zw. der größten positiven und negativen Abweichung von der Oberfläche der Ausgleichskugel überschreitet im gesamten Messvolumen nicht 1,5 mm, wobei der Durchmesser der Ausgleichskugel mit einem Fehler von kleiner 0,05 mm bestimmt wird.

**Bemerkungen:**

- Das Verfahren beschreibt die Größe des Messrauschens, nicht die Verteilung des Messfehlers.
- Es wird eine Spanne angegeben, da sich größte positive und negative Abweichungen vom Radius betragsmäßig addieren.
- Ggf. können die Messdatensätze der Kugelabstandsabweichung (nachfolgende Kenngröße) hier wiederverwendet werden.
- (Zur Konformität mit VDI 2634 Blatt 2 ist die erweiterte Testunsicherheit zu berücksichtigen, die in der Richtlinie definiert ist.)

### 3.4 Kugelabstandsabweichung ( $SD$ )

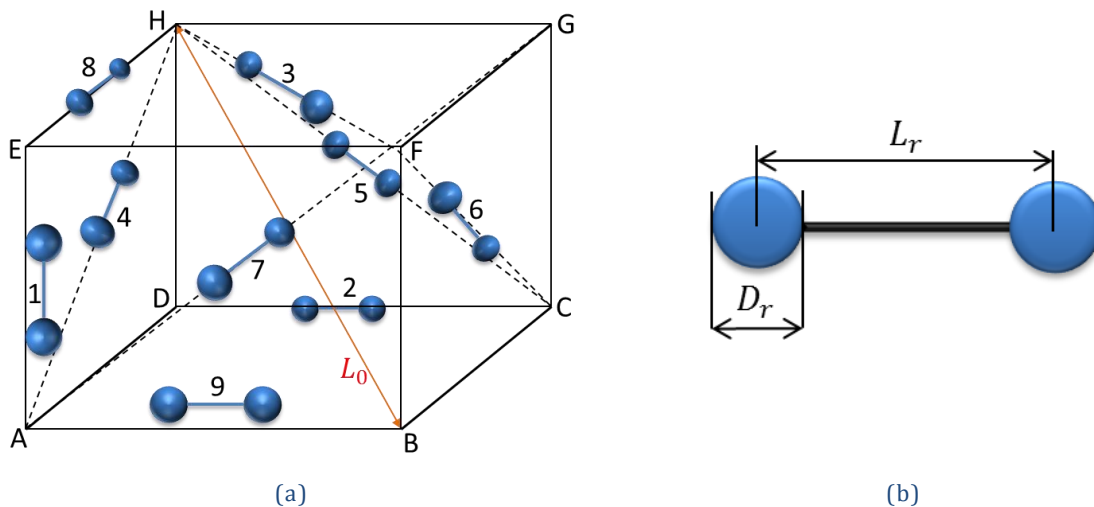


Abbildung 9: Messung der Kugelabstandsabweichung.  
 (a) Vorgeschlagene Positionen 1 bis 7 des Prüfkörpers im Messvolumen, 8 und 9 optional  
 (b) Erläuterung der Bemaßung des Prüfkörpers

Diese Kenngröße orientiert sich an der Kenngröße *Kugelabstandsabweichung* der VDI-Richtlinie 2634 Blatt 2 Abschnitt 4.2.

Die Kenngröße Kugelabstandsabweichung  $SD$  dient der Prüfung und Einschätzung der Messgenauigkeit von Abständen bzw. Längen im Messvolumen. Da Punkte im Raum Positionen aber keine Ausdehnung besitzen, ist es schwierig bzw. unmöglich, Objektpunkte exakt im Messdatensatz zu bestimmen und deren Abstand zu messen. Daher wird zur Bestimmung der Kenngröße der Abstand zweier Kugelmittelpunkte bestimmt und mit dem kalibrierten Abstand verglichen. Die Differenz ist die Kugelabstandsabweichung.

Typ: Skalar „ $SD$ “ in [mm]

#### Durchführung:

- Messung zweier Kugeln mit kalibriertem Abstand und Kugelradien/Durchmessern
- Messung an mindestens 7 unterschiedliche Messpositionen im Messvolumen, z. B. an den in Abbildung 9 (a) vorgeschlagenen Positionen 1 bis 7 (8, 9, optional).
- gleichmäßige Verteilung der Messpositionen im Messvolumen
- Approximation von Paaren von Ausgleichskugeln  $s$  (mit  $s = 1,2$ ), mit kalibrierten Radien  $R_s$  durch die Messpunkte  $p_{s,k}$  (mit  $k = 1 \dots N$ ):

$$\min_{p_k} \left\| \sqrt{(c_x - x_k)^2 + (c_y - y_k)^2 + (c_z - z_k)^2} - R_s \right\|_2^2$$

- Möglichkeit der Entfernung von 3‰ der Messpunkte pro Ausgleichskugel mit einmaliger Wiederholung der Berechnung der jeweiligen Ausgleichskugel für jede Messposition  $i$ .

**Auswertung:**

- $L_a^i$  sind die berechneten Abstände der Kugelmittelpunkte für die Messpositionen  $i$ .
- $L_r$  ist der kalibrierte (zertifizierte) Abstand der Kugelmittelpunkte des Prüfkörpers.
- $SD^i = L_a^i - L_r$  ist die Kugelabstandsabweichungen für eine Messposition  $i$ .
- Für die mithilfe der  $SD^i$  festzuliegende Kenngröße  $SD$  muss gelten:  
 $|SD| \geq |SD^j|$  für jede beliebige Messposition  $j$  im Messvolumen.

**Prüfkörper:**

- Die Abweichung der Kugeln des Prüfkörpers von einer entsprechenden idealen Kugel in Form  $P_F$  und Maß  $P_S$  (Rundheit und Radius) sollte um Größenordnungen kleiner sein, als die Messgenauigkeit des 3D-Sensors.
- Der bei der Kalibrierung des Prüfkörpers bestimmte Abstand sollte mit einer Messunsicherheit bestimmt worden sein, die Größenordnungen unter der des 3D-Sensors liegt.
- Beispielprüfkörper sind in Abschnitt 3 „Prüfkörperliste – Beispiele“ gegeben.
- Der Prüfkörper sollte nach VDI2634 Blatt 2 so gewählt werden, dass der kalibrierte Kugeldurchmesser  $D_r$  und der kalibrierte Abstand  $L_r$  des Prüfkörpers:  $L_r \geq 0,3 \cdot L_0$  und  $D_r \geq (0,02 \dots 0,2) \cdot L_0$  betragen, wobei  $L_0$  die Länge der Diagonale des Messvolumens ist.

*Beispieleintrag: „0,082“*

Der Abstand zweier Kugelmittelpunkte im Messvolumen wird für jede Position mit einer Messgenauigkeit gemessen, die nicht mehr als 82  $\mu\text{m}$  vom kalibrierten Abstand abweicht.

*Bemerkungen:*

- Das Verfahren beschreibt die Größe des Messrauschens, nicht die Verteilung des Messfehlers.
- Zur Konformität mit VDI 2634 Blatt 2 ist die erweiterte Testunsicherheit zu berücksichtigen.

### 3.5 Längenmessabweichung ( $E$ )

Diese Kenngröße orientiert sich an der Kenngröße *Längenmessabweichung* der VDI Richtlinie 2634 **Blatt 1** Abschnitt 4.1.

Die Kenngröße Längenmessabweichung wurde als alternative Kenngröße zur Kenngröße 3.4 „Kugelabstandsabweichung“ aufgenommen. Hintergrund ist, dass für passive Photogrammetrische/Stereo Verfahren nicht ohne weiteres Kugelstäbe bzw. Kugeloberflächen herstellbar sind, deren Oberfläche genügend Textur für die passiven Verfahren liefert. Daher erlaubt diese

Kenngröße die Messung des Abstandes von planaren Targets wie retro-reflektierenden Passmarken, die z. B. auf Maßstäben angebracht sind. Anstelle eines Kugelmittelpunktes wird entsprechend der Mittelpunkt eines Kreises (Ellipse) bestimmt. Die Längenmessabweichung ist dann die Differenz aus dem gemessenen Abstand der Kreismittelpunkte und dem Kalibrierten.

Typ: Skalar „ $E$ “ in [mm]

#### Durchführung und Auswertung:

- Siehe VDI 2634 Blatt 1.
- Die Messung sollte an mindestens sieben unterschiedlichen Positionen durchgeführt werden.
- Die zu prüfende Länge (Abstand) muss mindestens  $\frac{2}{3} \cdot L_0$  betragen, wobei  $L_0$  wiederum die Länge der Diagonale des Messvolumens ist (Abbildung 10).
- Die kleinste zu prüfende Länge darf nicht kleiner als  $\frac{2}{3}$  der kürzesten Seitenlänge des Messvolumens sein.

Beispielintrag: „0,022“

#### Bemerkungen:

- Nach Möglichkeit sollte vermieden werden, diese Kenngröße zu ermitteln. Die Kenngröße Kugelabstandsabweichung ist vorzuziehen.
- Die Kugelabstandsabweichung kann in Anlehnung an VDI2634-3 §4.3 in einen Vergleichswert für die Längenmessabweichung überführt werden.

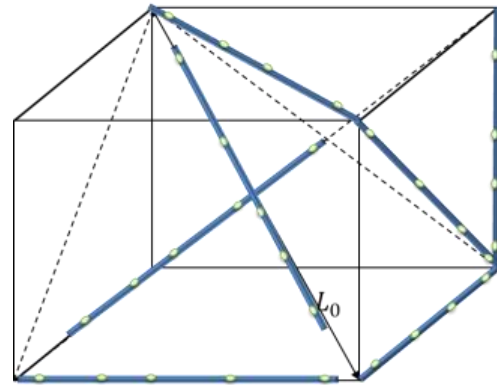


Abbildung 10: Längenmessabweichung. Beispielhafte Prüfpositionen für die Bestimmung einer Längenmessabweichung mit Stufenendmaßen und Passmarken

### 3.6 Ebenheitsmessabweichung ( $F$ )

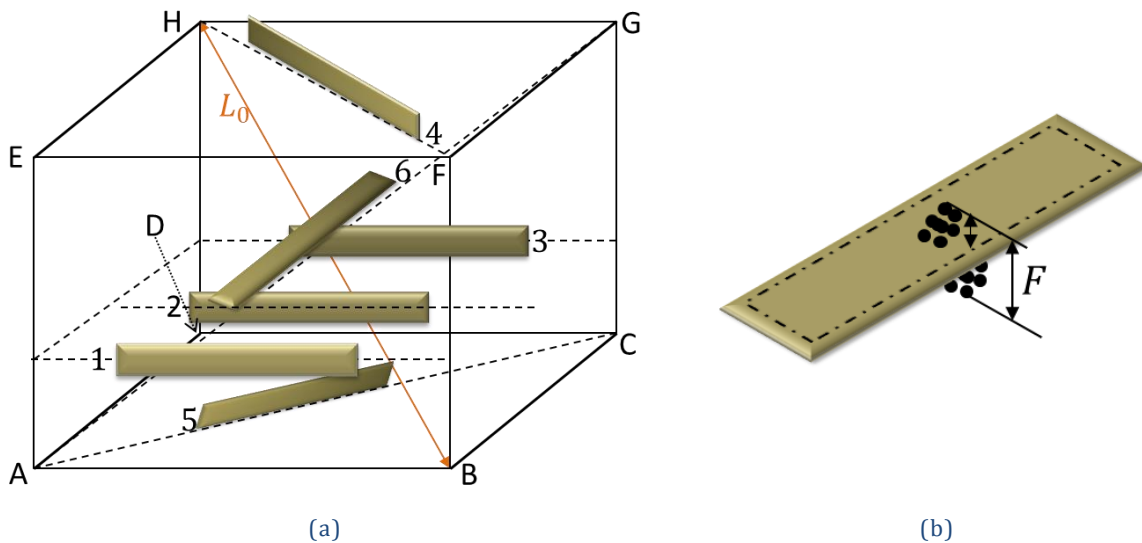


Abbildung 11: Ebenheitsabweichung.  
 (a) Visualisierung der Prüfkörperpositionen im Messvolumen  
 (b) Visualisierung der Kenngröße  $F$  bezogen auf die Ebenenapproximation

Diese Kenngröße orientiert sich an der Kenngröße *Ebenheitsmessabweichung* der VDI Richtlinie 2634 Blatt 2 Abschnitt 4.3.

Die Ebenheitsmessabweichung ermöglicht eine Bewertung der Messgenauigkeit des 3D-Sensors unter Einbeziehung des systematischen Fehlers des 3D-Messsystems. Gemessen wird ein, in Bezug auf die Messgenauigkeit des zu prüfenden Sensors, ideal ebener Körper. Aus den Messpunkten der Oberfläche des Prüfkörpers wird eine Ausgleichsebene errechnet. Die betragsmäßige Summe der größten, vorzeichenbehafteten Messpunktabstände (Spanne) zur Ausgleichsebene ist die Ebenheitsmessabweichung  $F$ .

Typ: Skalar „ $F$ “ in [mm]

#### Durchführung:

- Messung eines kalibrierten Ebenheitsnormals.
- Messung an mindestens 6 unterschiedliche Messpositionen im Messvolumen, wobei die in Abbildung 11 vorgeschlagenen Positionen einzubeziehen sind.
- Approximation einer Ausgleichsebene für jede Messposition  $i$  mittels der Messpunkte  $p_k$  (mit  $k = 1 \dots N$ ):

$$\min_{p_k} \|(c_x - x_k)n_x + (c_y - y_k)n_y + (c_z - z_k)n_z - d\|_2^2.$$

- Möglichkeit der Entfernung von 3‰ der Messpunkte mit einmaliger Wiederholung der Berechnung der Ausgleichsebene für jede Messposition  $i$ .
- Um das Ergebnis nicht durch Messfehler, die an Randbereichen des Prüfkörpers zu erwarten sind, zu stören, kann eine „Randschrumpfung“ erfolgen. Diese Maskierung von Punkten ist zu dokumentieren. Die Vorgaben/Empfehlungen zur Größe (Ausdehnung) des Prüfkörpers (weiter unten im Abschnitt) sind zu beachten.



**Auswertung:**

- $S_p^i = \|E^i - p_k\|^+$  bzw.  $S_n^i = \|E^i - p_k\|^-$  sind die betragsmäßig größten positiven ( $S_p^i$ ) bzw. negativen ( $S_n^i$ ) Abstände der 3D-Messpunkte zur Ausgleichsebene  $E^i$  einer Messposition  $i$ .
- $E^i$  ist die Spanne, also die Summe (der Beträge), aus  $S_p^i$  und  $S_n^i$  für eine Messposition  $i$ :  
 $E^i = S_p^i + S_n^i$ .
- Für die mithilfe der  $E^i$  festzulegende Kenngröße  $E$  muss gelten:  
 $|E| \geq |E^j|$  für jede beliebige Messposition  $j$  im Messvolumen.

**Prüfkörper:**

- Die Ebenheit (und Rauheit der Oberfläche) des Prüfkörpers sollten um Größenordnungen kleiner sein, als die Messgenauigkeit des 3D-Sensors.
- Der bei der Kalibrierung des Prüfkörpers ermittelte Abstand sollte mit einer Messunsicherheit bestimmt worden sein, die einige Größenordnungen unter der des 3D-Sensors liegt.
- Beispielprüfkörper sind in Abschnitt 3 „Prüfkörperliste – Beispiele“ gegeben.
- Der Prüfkörper sollte nach VDI2634 Blatt 2 so gewählt werden, dass er eine Breite von 50 mm und eine Länge  $L \geq 0,5 \cdot L_0$  besitzt, wobei  $L_0$  die Länge der Diagonale des Messvolumens ist.

*Beispieleintrag: „0,412“*

Die 3D-Messpunkte der Messung einer idealen Ebene streuen maximal mit einer Spanne von 412  $\mu\text{m}$  um die zugehörige Ausgleichsebene.

*Bemerkungen:*

- Das Verfahren beschreibt die Größe des Messrauschens, nicht die Verteilung des Messfehlers.
- Der systematische Fehler fließt in die Kenngröße ein, d. h. der Fehler, der bei jeder Messung unveränderlich dem System innewohnt, z. B. die Verzeichnung von Optiken.
- Es ist bei größeren Messvolumina bzw. großen  $L_0 \geq 2000$  mm fast unmöglich handhabbare Ebenheitsnormale mit hoher Ebenheit zu verwenden, da die dafür notwendigen Objekte zu schwer (bspw. Granittafeln) sind.
- Zur Konformität mit VDI 2634 Blatt 2 ist die erweiterte Testunsicherheit zu berücksichtigen.

### 3.7 Lokales Rauschen in z-Richtung ( $\sigma_\tau$ )

Die Kenngröße *lokales Rauschen* ist der Kenngröße „Ebenheitsmessabweichung ( $F$ )“ entlehnt. Im Unterschied zu dieser, soll es aber vermieden werden, den systematischen Fehler in die Auswertung einzubeziehen, ohne diesen kennen zu müssen.

Dazu wird die Ebenheitsmessung nur für eine im Vergleich zum Messvolumen, sehr kleine Umgebung  $\Omega_m$  um den Mittelpunkt  $m$  des Messvolumens durchgeführt (vergleiche Abbildung 12). Durch die Beschränkung auf eine kleine Umgebung/kleines Flächenstück wird erwartet, den systematischen Fehler ebenfalls sehr klein zu halten.

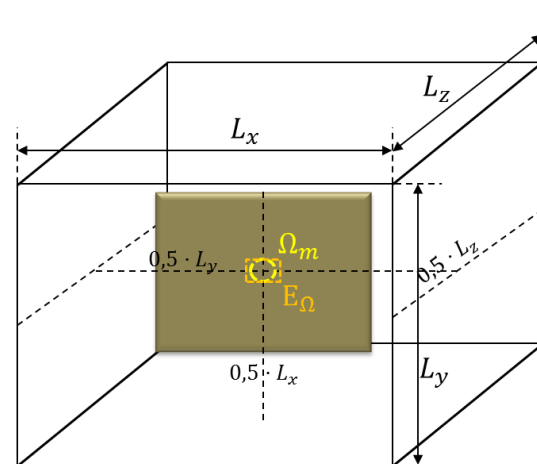


Abbildung 12: Testanordnung für lokales Rauschen axialer Richtung.

Typ: Skalar „ $\sigma_\tau$ “ in [mm]

#### Durchführung:

- Messung an einer ebenen Oberfläche, in der Mitte des Messvolumens, parallel zur Frontebene des Messvolumens
- Betrachtung einer lokal begrenzten Umgebung  $\Omega_m$  des Mittelpunktes  $m$  des Messvolumens
- Der Durchmesser des ausgewerteten Bereiches sollte ca.  $0,01 \dots 0,02 \cdot L_0$  (1% bis 2% der Länge der Diagonale des Messvolumens) betragen und „ausreichend“ Messpunkte für die Berechnung der Ausgleichsebene beinhalten.
- Es dürfen 3‰ der Messpunkte mit dem betragsmäßig größten Abstand zur Ausgleichsebene mit einmaliger Wiederholung der Berechnung der Ausgleichsebene aussortiert werden (Entfernung des Rauschanteils des Signals).

#### Auswertung:

- Bestimmung einer Ausgleichsebene  $E_\Omega$  für alle Punkte  $p \in \Omega_m$ .
- Ermittlung der Standardabweichung  $\sigma_\tau$  aus den Abständen der 3D-Messpunkte  $p \in \Omega_m \perp E_\Omega$
- Die Kenngröße ist die Standardabweichung  $\sigma_\tau$ .

#### Prüfkörper:

- Siehe Abs. Prüfkörper der Kenngröße 3.6 „Ebenheitsmessabweichung ( $F$ )“
- Die Größe des Prüfkörpers kann entsprechend kleiner ausfallen

Beispieleintrag: „0,0291“

Die lokale Standardabweichung/Messfehler des 3D-Sensors beträgt ca. 29,1  $\mu\text{m}$ .

*Bemerkungen:*

- Das Verfahren setzt eine Normalverteilung des Messfehlers (abzgl. des systematischen Fehlers) voraus. Andernfalls kann der Messfehler nicht durch die Standardabweichung alleine beschrieben werden.

**3.8 Zeitliches Rauschen in z-Richtung ( $\sigma_\chi$ )**

Die Kenngröße *zeitliches Rauschen* ist analog zur Kenngröße 3.7 „Lokales Rauschen in z-Richtung ( $\sigma_\tau$ )“ definiert. Jedoch wird die Messung mindestens 20-mal durchgeführt, um etwaige Änderungen über die Zeit zu erfassen / zu bestimmen.

Typ: Skalar „ $\sigma_\chi$ “ in [mm]

**Durchführung:**

- Messung an einer planen Oberfläche i) in der Mitte des Messvolumens ii) parallel zur Frontebene des Messvolumens
- Betrachtung einer lokal begrenzten Umgebung  $\Omega_m$  des Mittelpunktes des Messvolumens, die über die Messreihe hinweg gleich bleibt
- Der Durchmesser des ausgewerteten Bereiches sollte ca.  $0,01 \dots 0,02 \cdot L_0$  (1% bis 2% der Länge der Diagonale des Messvolumens) betragen und ausreichend Messpunkte für die Berechnung der Ausgleichsebene beinhalten.
- Es dürfen 3‰ der Messpunkte mit dem betragsmäßig größten Abstand zur Ausgleichsebene mit einmaliger Wiederholung der Berechnung der Ausgleichsebene aussortiert werden (Entfernung des Rauschanteils des Signals).
- Wiederholung von  $i \geq 20$  Messungen für  $\Omega_m$ .

**Auswertung:**

- Bestimmung einer Ausgleichsebenen  $E_\Omega^i$  für alle Punkte  $p^i \in \Omega_m$
- Ermittlung der Standardabweichung  $\sigma_\chi^i$  aus den Abständen der 3D-Messpunkte  $p^i \in \Omega_m \perp E_\Omega^i$
- Die Kenngröße  $\sigma_\chi$  ist die Standardabweichung der Standardabweichungen  $\sigma_\chi^i$ .

**Prüfkörper:**

- Siehe Abs. Kenngröße 3.7 „Lokales Rauschen in z-Richtung ( $\sigma_\tau$ )“.

*Beispielintrag: „0,007“*

Die zeitliche Schwankung des lokalen Rauschens (Messfehlers) besitzt eine Standardabweichung von ca. 7  $\mu\text{m}$ .

*Bemerkungen:*

- Das Verfahren setzt eine Normalverteilung des Messfehlers (abzgl. des systematischen Fehlers) voraus. Andernfalls kann der Messfehler nicht durch die Standardabweichung alleine beschrieben werden.

### 3.9 Max. Datenpunkte je Messung

Die Kenngröße gibt an, wie viele 3D-Messpunkte (Datenpunkte) als Ergebnis der Messung einer 3D-Einzelansicht maximal entstehen können. Sie ist eine wichtige Grundlage für die unter „Zeitbezogene Kenngrößen“ (5.1-6) gelisteten Kenngrößen. Die Bestimmung der Kenngröße kann praktisch erfolgen aber auch simuliert werden. Z. B. indem die Datenübertragungslatenzen extrapoliert werden und die Berechnung der Messwerte mit synthetischen Signalen durchgeführt wird.

*Typ:* Skalar in [pt]

#### Durchführung:

- Messung an einer planen Oberfläche, z. B. der Mitte des Messvolumens, parallel zur Frontalebene des Messvolumens (vgl. Abbildung 12).
- Die Ebene oder der Prüfkörper sollte das ganze Messvolumen abdecken.
- 3D-Messung durchführen
- Vermerkt werden die Anzahl der Datenpunkte und die einzelnen Zeiten für die Kenngrößen unter 5.x.
- Die Messung kann mehrfach wiederholt werden, um die jeweiligen Peak-Wert zu ermitteln.

#### Auswertung:

- Der größte ermittelte Wert „Anzahl 3D-Messpunkte“ bestimmt die Kenngröße „Max. Datenpunkte je Messung“.

*Beispielintrag:* „3100632“

$3 \cdot 10^6$  pt könnte die Größenordnung 3D-Messpunkte für einen 3D-Sensor sein, der mit 4-Mpx-Bildgebern arbeitet.

#### Bemerkungen:

- Die praktische Durchführung ist für 3D-Sensoren mit sehr großen Messvolumen mangels geeigneter Prüfkörper schwierig durchführbar. Hier kann z. B. auf eine (weiße) Wand zurückgegriffen werden. Eine Alternative ist die schon angesprochene Simulation.

### 3.10 Mittlerer Triangulationswinkel

Die Kenngröße ist nur für die wichtige Klasse der Verfahren interessant, die auf dem Prinzip der Triangulation beruhen. Für photogrammetrische Verfahren ist der (mittlere) Triangulationswinkel ein wichtiger Qualitätsparameter für die 3D-Messpunkte. Denn: Jeder 3D-Messpunkt wird mittels einer Triangulation berechnet. Die Messunsicherheit für einen Punkt sinkt mit steigendem Triangulationswinkel (und der Anzahl Beobachtungspositionen). Werden demnach viele 3D-Messpunkte unter großem Triangulationswinkel gemessen (der mittlere Triangulationswinkel ist demnach auch groß) ist mit einer hohen Messgenauigkeit (und minimierten Messunsicherheit) zu rechnen. Die Kenngröße sollte während der Berechnung der 3D-Messpunkte ermittelt werden. Kann aber auch als Designparameter aus der Konstruktion oder Kalibrierung des 3D-Sensors bestimmt werden.

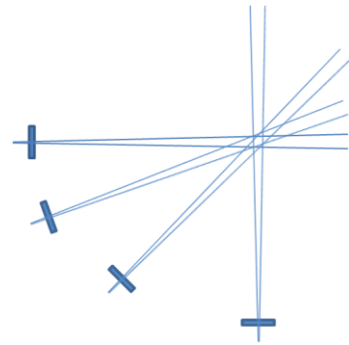


Abbildung 13: Interpretation des Triangulationswinkels.

Typ: Triple {min/max/mean} in [°]

Beispielintrag: „0 / 0 / 30“

Im vorliegenden Zahlenbeispiel ergibt sich der mittlere Triangulationswinkel als Designparameter aus der Anordnung der zwei Kameras/Bildgeber des binokularen Stereoaufbaus.

### 3.11 Mittlere Basislänge

Die Kenngröße ist nur für die wichtige Klasse der Verfahren interessant, die auf dem Prinzip der Triangulation beruhen. Aus der Basislänge kann z. B. die theoretische Messgenauigkeit/Messunsicherheit eines n-okularen 3D-Sensors bestimmt werden. Die Kenngröße gibt also Auskunft über die maximal zu erwartende axiale Messgenauigkeit. Der Parameter kann als Designparameter aus der Konstruktion oder der Kalibrierung heraus bestimmt werden.

Typ: Skalar in [mm]

Beispielintrag: „200“

Für einen 3D-Sensor mit flächenhaften Bildgebern (Flächenkamera) liegen die optischen Zentren der Bildsensoren 200 mm auseinander.

### 3.12 Max. Neigungswinkel der Oberfläche ( $\varphi_N$ )

Die Kenngröße gibt an, bis zu welchem Winkel eine Ebene im Zentrum des Messvolumens gegen den Sensor geneigt/verkippt sein kann, ohne dass es zum Messausfall kommt. Da eine Ebene immer auch eine Ausdehnung besitzt und somit über „das notwendige Maß“ zur Verschattung beiträgt, kann die Kenngröße anhand einer Kugeloberfläche bestimmt werden. Die Größe gibt dann den maximalen Polarwinkel (Breitengrad) an, bis zu dem Messwerte ermittelt werden können, vgl. Abbildung 14.

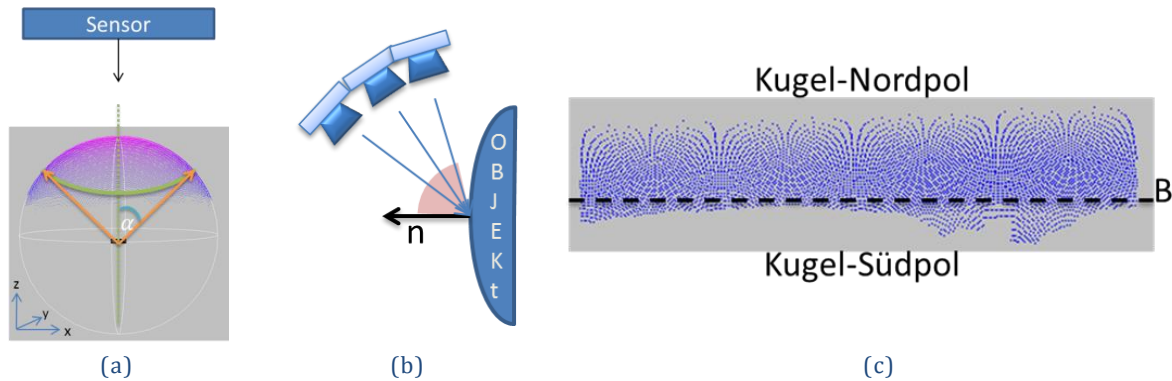


Abbildung 14: Visualisierung der Kenngröße „Max. Neigungswinkel der Oberfläche ( $\varphi_N$ )“.  
 (a) Visualisierung der 3D-Messpunkte auf einer Kugeloberfläche und des Polarwinkels (max. Neigungswinkel)  
 (b) Neigungswinkel der beim Schrägstellen des Sensors gegenüber der Oberfläche des Messobjektes auftritt.  
 (c) Darstellung der 3D-Messpunkte aus (a) in einem Kugelkoordinatensystem. **B** bestimmt den max. Neigungswinkel.

Typ: Skalar in [°]

#### Durchführung:

- Messung eines Kugelnormalen im Zentrum des Messvolumens.
- Approximation einer Ausgleichskugel entsprechend Kenngröße 3.3 „Antastabweichung“ an die 3D-Messpunkte.
- Transformation der 3D-Messpunkte in das Kugelkoordinatensystem der Ausgleichskugel (Polarkoordinaten).

#### Auswertung:

- Bestimmung der Geraden **B** aus Abbildung 14 (c) bzw. des zugehörigen maximalen Neigungswinkels  $\varphi_N$ .

Beispieleintrag: „57“

Der sichere (maximale) Neigungswinkel für den Sensor / die Messung aus Abbildung 14 wurde zu 57° bestimmt.

Bemerkungen:

- Derzeit konnte noch kein einfaches Kriterium zur automatischen Bestimmung des max. Neigungswinkels festgelegt werden.

### 3.13 Mittlerer 3D-Datenpunkt Abstand

Die Kenngröße soll dem Anwender einen Hinweis auf die zu erwartende laterale Auflösung geben. Abbildung 15 verdeutlicht dies für unterschiedlich strukturierte Messdatensätze.

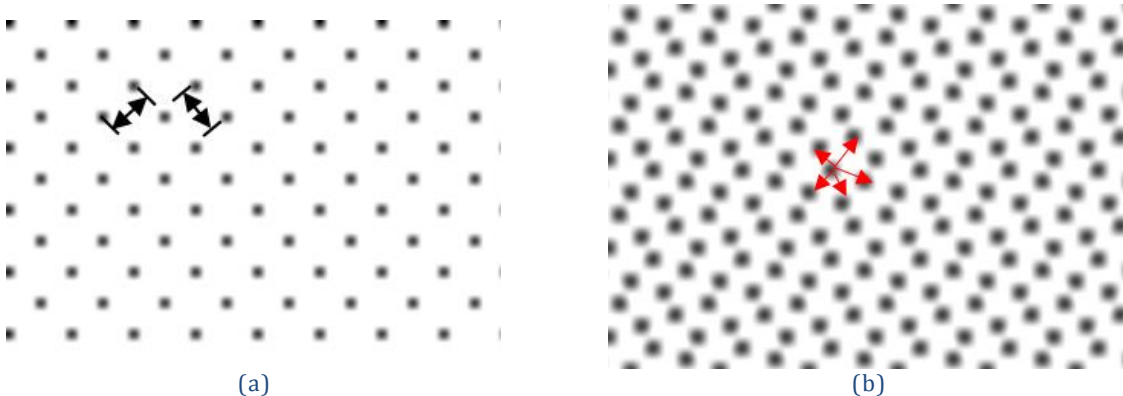


Abbildung 15: Darstellung des 3D-Messpunkt Abstandes.  
 (a) gleichabständige 3D-Messdatenpunkte  
 (b) unstrukturierte Wolke aus 3D-Messpunkten

Typ: Paar (x / y) in [mm]

#### Durchführung:

- Gemessen wird ein ebener Prüfkörper (Ebenheitsnormal)
  - i) an der Frontseite und
  - ii) an der hinteren Seite des Messvolumens aus Blickrichtung des Sensors.
- Nimmt der Prüfkörper nicht das ganze Messvolumen ein, so kann die Messung an unterschiedlichen Positionen (an den Messvolumenrändern) erfolgen.

#### Auswertung:

- Die Kenngröße ergibt sich aus der Mittelung über alle Punktabstände (ggf. getrennt nach X- und Y-Richtung bezogen auf das Messvolumen).

Beispielintrag 1: „0,20 / 0,20“

Der mittlere 3D-Messpunkt Abstand für diesen 3D-Sensor beträgt symmetrisch 200  $\mu\text{m}$ .

Beispielintrag 2: „0,30“

Der mittlere 3D-Messpunkt Abstand für diesen 3D-Sensor beträgt 300  $\mu\text{m}$ . Die Punktabstände sind wahrscheinlich unstrukturiert, daher nur ein Wert.

#### 4. KENNGRÖßEN ZU KLEINSTEN STRUKTUREN

Diese Kenngrößen sollen in einem gewissen Rahmen vergleichbare Werte zur Rekonstruktionsmöglichkeit von „kleinen“ Strukturen liefern. Hierbei ist auch wichtig, dass die dazu notwendigen Tests/Prüfkörper einfach und günstig herstellbar sind. Die größte Herausforderung liegt darin, laterale und axiale Auflösung voneinander zu entkoppeln.

Die beiden Kenngrößen zugrunde liegende Idee ist die Messung der „Verrundung/Glättung“ einer ideal Spitzen Kante durch die Auflösungsbeschränkung des 3D-Sensors. Das Grundprinzip ist in Abbildung 16 dargestellt.

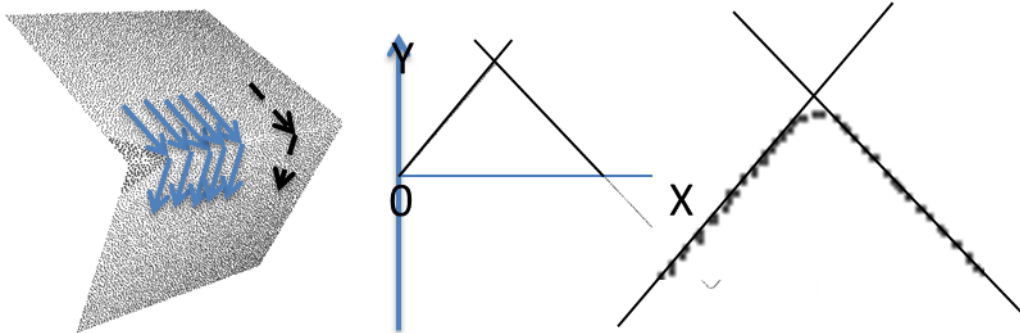


Abbildung 16: Darstellung des Grundprinzips zur Kenngrößenkategorie 4..

##### 4.1 Grenzfrequenz der 3D-MTF

Die experimentelle Kenngröße „Grenzfrequenz der 3D-Modulations-Ttransfer-Funktion“ folgt der Veröffentlichung:

„Characterization of the 3D resolution of topometric sensors based on fringe and speckle pattern projection by a 3D transfer function“ von Berssenbrügge, P., Dekiff, M., Kemper, B., Denz, C., Dirksen, D., erschienen in Optics and Lasers in Engineering 50(3), 465–472 (2012).

Berechnet werden Quotienten aus der FFT der idealen Kante und der FFT gemessenen/rekonstruierten Kante. Angegeben wird eine Frequenz, für die das Verhältnis / Quotient einen (nicht eindeutig definierten) Grenzwert überschreitet.

**Bei Einführung der Kenngröße stand die Erhebung von Messdaten für den Vergleich von 3D-Transfer-Funktionen unterschiedlicher Sensoren im Vordergrund.**

Typ:  $(x / y)$  in  $[\text{mm}^{-1}]$  (Grenzfrequenz)

##### Durchführung & Auswertung:

- Gemessen wird ein Kantennormal im Zentrum des Messvolumens, in horizontaler und vertikaler Lage.
- Die Auswertung entspricht dem Vorgehen in oben genannter Veröffentlichung.

Beispieleintrag: „0,78 / 0,76“

##### Bemerkungen:

- Eine universelle Interpretation des erhaltenen Wertes und eine Korrelation zur Dimensionierung kleiner Strukturen ist ausstehend.



## 4.2 Grenzradius

Die experimentelle Kenngröße Grenzradius gibt den Radius der „Verrundung/Glättung“ an, den der 3D-Sensor bei Messung der ideal spitzen Kante durch Auflösungsbegrenzung erzeugt.

Typ: (x / y) in [mm]

### Durchführung:

- Gemessen wird ein Kantennormal im Zentrum des Messvolumens (in horizontaler und vertikaler Lage)

### Auswertung:

- Ein Zylinderfit mit den Punkten der „Verrundung“ wird vorgenommen, der Radius des Zylinders entspricht dem gesuchten Wert der Kenngröße.

Alternativ:

- Es werden zwei Ausgleichsebenen für die Kantenseiten bestimmt.
- Die Schnittgerade der Ausgleichsebenen wird bestimmt.
- Ausgleichsebenen und Messpunkte werden entlang der Schnittgeraden in eine Ebene projiziert, vgl. Abbildung 16 (rechts).
- Die Winkelhalbierende der beiden Kantenseiten durch den Schnittpunkt wird bestimmt.
- Der Schwerpunkt der Messpunkte, die der Winkelhalbierenden und dem Schnittpunkt der Kanten (jetzt Ausgleichsgeraden) am nächsten liegen, wird bestimmt.
- Es wird ein Kreis, beginnend in diesem Punkt, entlang der Winkelhalbierenden und in Richtung der divergierenden Kantenseiten „aufgeblasen“
- Berührt der Kreis die Kantenseiten, ist der Kreis mit dem Radius der Kantenverrundung ermittelt, der Radius ist der gesuchte Kennwert für die entsprechende Richtung (x, y).

*Beispielintrag: „0,091 / 0,091“*

Die Kante, die vom Sensor gemessen wird, besitzt einen Radius von 0,091 mm in den Messdaten.

*Bemerkungen:*

- Obwohl der Wert anschaulicher ist, als die 3D-MTF, ist auch hier die Korrelation zur Dimensionierung kleinster Strukturen unklar.

## 5. ZEITBEZOGENE KENNGRÖßEN

Diese Kenngrößen geben Auskunft über die Aufnahme- (Mess-) und Verarbeitungsgeschwindigkeit des 3D-Sensors und der „Software“ zur Erzeugung der Datenpunkte. Die Redundanz der Angaben dient z. T. der schnelleren Orientierung für Betrachter aus unterschiedlichen beruflichen Domänen aber auch der erleichterten Einordnung/Bewertung in Beziehung stehender Kenngrößen.

### 5.1 Messzeit pro 3D-Einzelansicht

Die Kenngröße gibt die akkumulierten Zeiten für die elementaren Messungen an, die zur Erzeugung eines 3D-Datenpunktes notwendig sind. Sie ist daher im Zusammenhang mit der Kenngröße 7.1 „Messzeit elementare Einzelaufnahme“ zu sehen. Gemeint ist hier der physikalische Messvorgang, also z. B. die Belichtungszeit bei einer Kamera. Der Wert der Kenngröße schließt explizit alle weiteren Zeiten der Verarbeitung des Messwertes aus. Zur Verdeutlichung des Unterschieds zwischen den Kenngrößen: „Messzeit pro 3D-Einzelansicht“, „Latenzzeit pro 3D-Einzelansicht“ und „Gesamtzeit pro 3D-Einzelansicht“, sei auf die nachfolgende Abbildung 17 und zugehörige Erläuterung verwiesen.

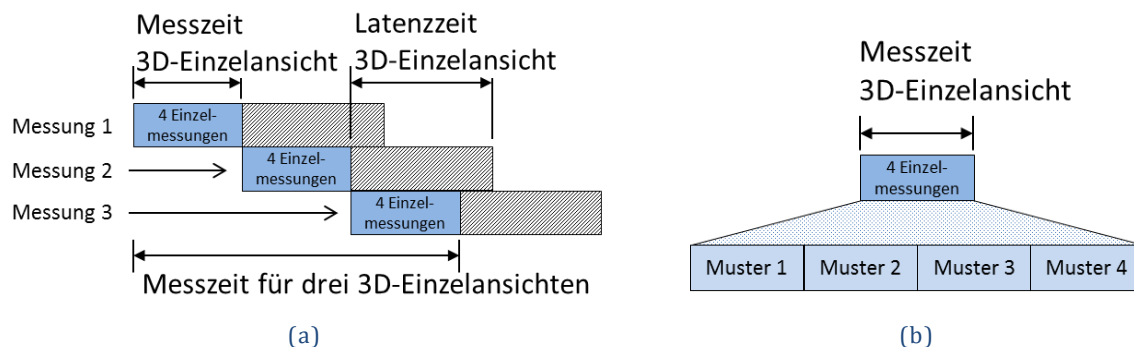


Abbildung 17: Visualisierung der „**Messzeit pro 3D-Einzelansicht**“ in Abgrenzung zur Latenz.  
 (a) Während die physikalischen Messung, n z. B. für mehrere Bilder einer Flächenkamera, i. d. R. nicht parallel ablaufen können, können die Messwerte (parallel zur Messung und anderen Auswertungen) weiter zu 3D-Messpunkten verarbeitet werden. Die Zeit nach der Messung bis zum Vorliegen der 3D-Messpunkte ist die Latenz.  
 (b) Die Messzeit für eine 3D-Einzelansicht kann sich aus mehreren Messzeiten für elementare Einzelaufnahmen zusammensetzen.

Typ: Skalar in [ms]

Beispielintrag: „3,33“

In diesem Beispiel beträgt die physikalische Messzeit aller für eine 3D-Einzelansicht (3D-Auswertung) notwendigen elementaren Messungen 3,33 ms. Ist z. B. bekannt, dass es sich um einen aktiven Stereosensor handelt, der für eine 3D-Messung 10 Einzelaufnahmen (kontinuierlich) benötigt, so kann man ableiten, dass jede elementare Messung  $\frac{3,33 \text{ ms}}{10} = 0,333 \text{ ms}$  benötigt. Dieser Wert steht dann in Übereinstimmung mit der Kenngröße 7.1 „Messzeit elementare Einzelaufnahme“ (vergleiche den Beispielintrag ebenda).

Bemerkung:

- Zur Ermittlung des Wertes genügt eine einfache Zeitmessung.
- Sind mehrere elementare Einzelmessungen für eine 3D-Einzelansicht notwendig, die nicht kontinuierlich hintereinander (also mit „Pausen“) durchgeführt werden, so werden diese über die Latenz erfasst.

## 5.2 Latenzzeit pro 3D-Einzelansicht

Die Kenngröße gibt die Zeitspanne an, die zwischen dem Ende der letzten physikalischen Messung und dem Vorliegen der 3D-Messpunkte für eine 3D-Einzelansicht vergeht, vergleiche Abbildung 20 (a). Da sich der Wert auf eine gesamte 3D-Einzelansicht bezieht, muss bei der Ermittlung auch Kenngröße 3.9 „Max. Datenpunkte je Messung“ angesetzt werden.

*Typ:* Skalar in [ms]

### Durchführung:

- Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung entsprechen Kenngröße 3.9.

### Auswertung:

- Die Kenngröße ergibt sich aus der gemessenen Zeit vom Beginn der Messung bis zum Vorliegen der 3D-Messpunkte der 3D-Einzelansicht abzüglich der Zeit der Kenngröße 3.9.

*Beispieleintrag:* „60,0“

Die Zeit zur Berechnung der 3D-Messpunkte nach der physikalischen Erfassung, also abzüglich der „Messzeit pro 3D-Einzelansicht“, beträgt 60 ms. Dies umfasst sowohl die Übertragungszeit als auch die Berechnungszeit.

## 5.3 Gesamtzeit pro 3D-Einzelansicht

Die Kenngröße ist die Summe aus den Kenngrößen „Messzeit pro 3D-Einzelansicht“ und „Latenzzeit pro 3D-Einzelansicht“. Abbildung 18 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

*Typ:* Skalar in [ms]

*Beispiel 1:* „63,33“ [ms]

Das Beispiel ist die Zusammenfassung der Beispiele aus den beiden vorangegangenen Kenngrößen:  $3,33 \text{ ms} + 60 \text{ ms} = 63,33 \text{ ms}$ .

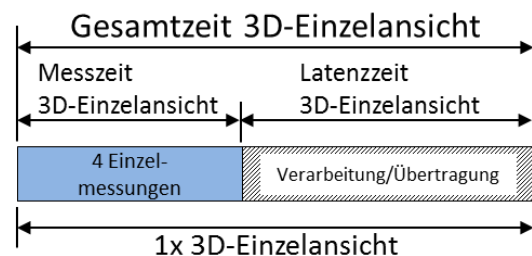


Abbildung 18: Gesamtzeit pro 3D-Einzelansicht.

## 5.4 3D-Datenpunktrate (maximal)

Die Kenngröße gibt an, wie viele 3D-Messpunkte für die normalisiert Messzeit von einer Sekunde erzeugt werden können.

Typ: Skalar in [pt/s]

### Auswertung:

- Für „Offline“-Messsysteme, welche zuerst alle Messungen durchführen und anschließend auswerten ergibt sich der Wert der Kenngröße aus „Messzeit pro 3D-Einzelansicht“ ( $=t_E$ ) und „Max. Datenpunkte je Messung“ ( $=P_{max}$ ):

$$\text{3D-Datenpunktrate} := 10^3 / t_E \cdot P_{max}$$

- Für „Online“-Messsysteme, welche direkt nach und während der Messung auswerten (und so einen *interaktiven* Einsatz zulassen), ergibt sich der Wert der Kenngröße aus „Gesamtzeit pro 3D-Einzelansicht“ ( $=t_G$ ) und „Max. Datenpunkte je Messung“ ( $=P_{max}$ ):

$$\text{3D-Datenpunktrate} := 10^3 / t_G \cdot P_{max}$$

- Für gemischte oder kombinierte Sensoren, kann der größere der beiden Werte angegeben werden.

Beispielintrag: „63191153“

Bezugnehmend auf die Werte der Beispiele, der vorangegangenen Kenngrößen, ergibt sich hier

der Beispielwert zu:  $\frac{10^3}{t_G=63,6 \text{ ms}} \cdot (P_{max} = 4\text{Mpt}) = 63,2 \cdot 10^6 \text{pt/s}$ .

Bemerkungen:

- Die Kenngröße kann auch unter zu Hilfenahme der nachfolgenden Kenngrößen 5.5 bzw. 5.6 definiert werden.

## 5.5 Messrate 3D-Einzelansichten

Die Kenngröße gibt an, wie viele kontinuierliche Messungen für 3D-Einzelansichten normalisiert auf eine Sekunde vom 3D-Sensor erzeugt werden können - vgl. Abbildung 19 (a). Der Wert ist insbesondere für „Offline“ 3D-Sensoren entscheidend. Denn diese führen i. d. R. die physikalische Messung mit höchsten Geschwindigkeiten durch, nehmen aber erst im Anschluss an den gesamten Aufnahmeprozess die Auswertung vor. (Für „online“ 3D-Sensoren ist die nachfolgende Kenngröße **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** charakteristischer.

Typ: Skalar in [fps] / [Hz] (gemeint sind 3D-fps)

### Auswertung:

- Die Kenngröße wird mithilfe der Kenngröße „Messzeit pro 3D-Einzelansicht“ ( $=t_E$ ) definiert:

$$\text{Messrate 3D-Einzelansichten} := 10^3 / t_E$$

Beispieleintrag: „12000“

Der hier beschriebene Sensor kann aus den Aufnahmen 12000 fps bzw. 12000 3D-Einzelansichten für die Zeitspanne von einer Sekunde erzeugen. (Die Berechnung ist hier explizit nicht enthalten.)

### Bemerkungen:

- Diese Kenngröße blendet die Latenzen aus.
- Große Werte hier sind i. d. R. mit kleinen Werten der Kenngröße **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** verknüpft.

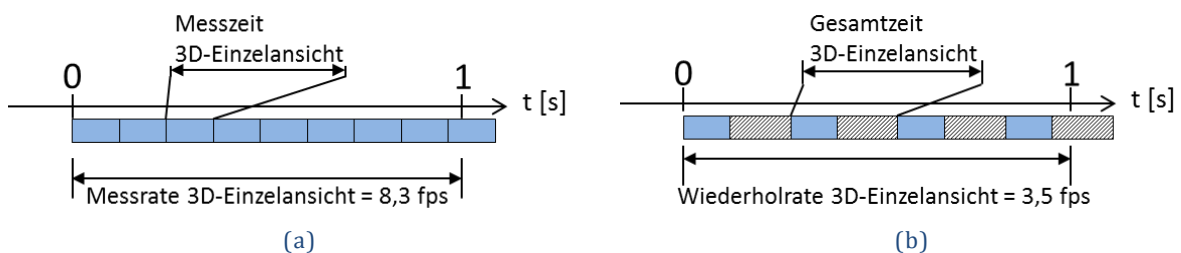


Abbildung 19: Messrate- und Wiederholrate 3D-Einzelansicht

(a) Visualisierung der Kenngröße „Messrate 3D-Einzelansichten“

(b) Visualisierung der Kenngröße „Wiederholrate 3D-Einzelansichten“

## 5.6 Wiederholrate 3D-Einzelansichten

Die Kenngröße gibt an, wie viele 3D-Einzelansichten (in Form von 3D-Messpunkten) normalisiert auf eine Sekunde vom 3D-Sensor erzeugt werden können, vgl. Abbildung 19 (b). Für die Berechnung kann die Kenngröße 5.3 „Gesamtzeit pro 3D-Einzelansicht“ verwendet werden, ohne dass der Sensor einen solchen „kontinuierlichen“ Messmodus direkt unterstützen muss. Die Kenngröße ist eine Richtgröße für das Potential des 3D-Sensors, interaktiv 3D-Messpunktdaten zu liefern.

*Typ:* Skalar in [fps] (oder [Hz] oder 3D-fps)

### Auswertung:

- Die Kenngröße ist für „Online“- und „Offline“-Messsysteme/3D-Sensoren mithilfe der Kenngröße 5.3 „Gesamtzeit pro 3D-Einzelansicht“ ( $=t_G$ ) definiert:

$$\text{Wiederholrate 3D-Einzelansichten} := 10^3/t_G$$

*Beispielintrag:* „15,8“

Ausgehend von einer Gesamtzeit von 63,3 ms (aus dem Beispielintrag von Kenngröße 5.3)

ergibt sich eine Wiederholrate 3D-Einzelansichten von:  $\frac{10^3}{t_G=63,3 \text{ ms}} = 15,797 \text{ Hz}$ .

## 6. TECHNISCHE DATEN EINES ELEMENTAREN BILDGEBERS

Informationen zu den technischen Daten eines einzelnen im System verwendeten Bildgebers, z. B. Zeilenkamera oder Flächenkamera. Sind mehrere Bildgeber im System verbaut, wird von gleichartigen Bildgebern ausgegangen; es ist der mutmaßlich „maßgebende“ Bildgeber zu verwenden. Ergänzungen können im Anhangsblatt des Sensordatenblattes oder bei der ausführlichen Beschreibung vorgenommen werden.

*Beispiele:*

- a) Ein Kameraarray besteht aus einzelnen Flächen-Kameras, dann ist der elementare Bildgeber eine Flächenkamera.
- b) Für ein Array aus Linienkameras gilt: elementarer Bildgeber ist eine Linienkamera.

### 6.1 Modell-/Typenbezeichnung

Die Kenngröße benennt das Modell des elementaren Bildgebers (optional den Hersteller).

*Typ:* Textform

*Beispielintrag:* „Basler acA2040-180km“

Hersteller und Modellbezeichnung der Flächenkamera.

*Beispielintrag:* „Basler raL12288-8gm“

Hersteller und Kameramodell der Zeilenkamera.

*Bemerkungen:*

- Bei mehreren, unterschiedlichen Bildgebern, werden diese und die nachfolgenden Kenngrößen nur für einen (den maßgeblichen) Bildgeber angegeben.
- Weitere Angaben können z. B. in der ausführlichen Beschreibung oder im Anhang des Sensordatenblattes vorgenommen werden.

### 6.2 Dimension (Dim./ Achsen)

Die Kenngröße gibt die Dimensionalität bzw. Ausdehnung des elementaren Bildgebers an. Dies kann i. d. R. nicht alleine aus der Modellbezeichnung abgelesen werden.

*Typ:* a) Skalar, dimensionslos  
b) Textform

*Beispiele:*

- „0“ oder „Punkt“ für Punkt Laser-Scanner
- „1“ oder „1D Linie (x-Achse)“ für Zeilenkamera
- „2“ oder „2D Matrix“ für Flächenkamera
- „2“ oder „2D Matrix (y, z)“ für Computer-Tomograph (mit Angabe der Schnittebene)

*Bemerkung:*

- Die Kenngröße ist nicht zu verwechseln mit der Dimensionalität des 3D-Sensors.

### 6.3 Auflösung

Die Kenngröße gibt die Auflösung des in 6.1 genannten elementaren Bildgebers laut Hersteller an. Die tatsächlich verwendete Auflösung kann darunter liegen.

*Typ:* Textform in [px]

*Beispiel 1:* „2048 x 2048“

Der Eintrag beschreibt einen flächenhaften Bildgeber mit einer 4Mpx Auflösung.

*Beispiel 2:* „1 x 12288“

Der Eintrag beschreibt einen linienhafter (Zeilenkamera) Bildgeber mit einer 12-Mpx-Auflösung.

*Beispiel 3:* „1 x 1“

Der Eintrag beschreibt einen punkthaften Bildgeber.

### 6.4 Anzahl elementarer Bildgeber

Die Kenngröße gibt die Anzahl der im 3D-Sensor eingesetzten und zur 3D-Messpunkt-Erzeugung verwendeten elementaren Bildgeber (nach 6.1) an.

*Typ:* Skalar, dimensionslos

*Beispieleintrag 1:* „2“

Es werden zwei elementare Bildgeber eingesetzt, z. B. für binokulares Stereo.

*Beispieleintrag 2:* „16“

Es werden 16 (gleichartige) elementare Bildgeber eingesetzt, z. B. für ein Kameraarray.



## 7. ZEITBEZOGENE KENNGRÖßEN EINES ELEMENTAREN BILDGEBERS

In Verbindung mit den Kenngrößen für eine 3D Einzelansicht können hiermit Rückschlüsse auf die maximale Relativgeschwindigkeit zw. Messobjekt und Sensor gewonnen werden.

### 7.1 Messzeit elementare Einzelaufnahme

Die Kenngröße gibt die Messzeit für eine elementare Einzelaufnahme eines Bildgebers bei der Erzeugung eines Messwertes an. Elementar bedeutet hier: die *kleinste Einheit*. Das heißt, auch wenn mehrere Aufnahmen für einen 3D-Messpunkt notwendig sind, ist hier die Messzeit der kürzesten Einzelaufnahme/Messung gemeint.

*Typ:* Skalar in [ms]

*Beispielintrag:* „0,333“

Hier kann z. B. die Belichtungszeit einer flächenhaften Kamera mit 300  $\mu$ s angegeben sein. Die Angabe im Sensordatenblatt erfolgt aber in [ms].

*Bemerkungen:*

- Eine geringe Messzeit des Bildgebers ist notwendig, um sehr schnelle Prozesse zu erfassen.
- Die Messzeit der elementaren Einzelaufnahme ist kleiner bzw. gleich der Kenngröße 5.1 „Messzeit pro 3D-Einzelansicht“, welche eine oder mehrere elementare Einzelaufnahmen zusammenfasst/benötigt.

### 7.2 Rate elementare Einzelaufnahme

Die Kenngröße gibt die Anzahl der elementaren Einzelaufnahmen normalisiert auf eine Sekunde an. Sie beantwortet die Frage: „*Wie viele Einzelaufnahmen können pro Sekunde durchgeführt (nicht verarbeitet) werden?*“

*Typ:* Skalar in [ $s^{-1}$ ] (oder [Hz])

*Beispielintrag:* „3003“

Hier könnte die Aufnahme rate einer flächenhaften Kamera benannt sein, welche häufig auch als „fps“ oder „Bilder pro Sekunde“ bezeichnet wird. In diesem Beispiel also 3003 fps.

### 7.3 Pixelrate

Die Kenngröße gibt die nominelle Anzahl an Pixeln (Messpunkten) pro Sekunde für **einen** elementaren Bildgeber an.

*Typ:* Skalar in [px/s]

*Beispielintrag:* „ $12,6 \cdot 10^9$ “

Die Pixelrate ergibt sich hier beispielhaft aus den Angaben der Beispiele vorangegangener Kenngrößen: „2048x2048x3003 px/s“. In diesem Fall also eine Hochgeschwindigkeitskamera mit mittlerer Auflösung.

## 8. UMGEBUNGSEINFLUSS

Diese Kenngrößen zum Umgebungseinfluss, insofern quantifizierbar, sind ein minimaler Ansatz die Messumgebung für die Ermittlung der Kenngrößen zu beschreiben. Oft genügen hier schon Angaben, um die Größenordnung des Einflusses feststellen zu können.

### 8.1 Fremdlicht

Die Kenngröße gibt das maximal zulässige Fremdlicht an, welches in das Messvolumen während einer Messung einwirken kann, ohne das Messergebnis zu beeinträchtigen. Da eine genaue Bestimmung hier i. d. R. sehr aufwendig ist, werden hier als Angabe Größenordnungen erwartet, mit deren Hilfe man auf die Eignung für einen Einsatzzweck schließen kann.

Typ: Skalar in [lx]

Tabelle 3: Auszug einer Tabelle mit typischen Beleuchtungsstärken.

Quelle: Auszug aus der Tabelle „Beispiele typischer Beleuchtungsstärken“  
wikipedia.de, „Lux (Einheit)“, Abschnitt 3

Heller Sonnentag	100.000 lx
Bedeckter Sommertag	20.000 lx
Im Schatten im Sommer	10.000 lx
Bedeckter Wintertag	3.500 lx
Elite-Fußballstadion	1.400 lx
Beleuchtung TV-Studio	1.000 lx
Büro-/Zimmerbeleuchtung	500 lx
Flurbeleuchtung	100 lx
Wohnzimmer	50 lx
Straßenbeleuchtung	10 lx
Kerze ca. 1 Meter entfernt	1 lx

### 8.2 Zulässige Betriebstemperatur

Die Kenngröße gibt die zulässige Betriebstemperatur für den Messbetrieb an. Hier spielen mindestens zwei Faktoren eine Rolle: i) Wird die Temperatur überschritten, kann die Funktionsweise beeinträchtigt werden oder die Hardware Schaden nehmen. ii) Die Kalibrierung des 3D-Sensors ist nur für einen bestimmten Temperaturbereich zulässig/gültig.

Typ: Spanne in [°C]

Beispielintrag 1: „-10°C ... +42°C“

Der Messbetrieb ist bezogen auf die Komponenten in diesem Bereich gewährleistet.

Beispielintrag 2: „25°C ... 35°C (kalibriert)“

Der Messbetrieb ist nur im angegebenen Bereich gültig. Andernfalls muss das Gerät z. B. neu kalibriert werden.

### 8.3 Zulässige Betriebs-Luftfeuchte

Die Kenngröße gibt die zulässige Luftfeuchte für den Messbetrieb des 3D-Sensors an. Sie kann ggf. aus den Angaben der Einzelkomponenten ermittelt werden.

*Typ:* Skalar in [%]

*Beispielintrag:* „< 80 %“

Die zulässige Luftfeuchte von 80 % darf im Messbetrieb nicht überschritten werden.

## 9. MATERIALEINFLUSS (MESSOBJEKT)

Diese Kenngrößen beschreiben den Einfluss der Materialbeschaffenheit des Messobjektes bzw. in welchen Wertebereichen dieser Kenngrößen eine Messung noch möglich ist. Ähnlich zu den Umwelteinflüssen bestehen hier Probleme durch fehlende Standards und reproduzierbare Messverfahren/Kenngrößen.

### 9.1 Textur Farbe/Grauwerte ( $\sigma_z$ )

Die (*experimentelle*) Kenngröße charakterisiert den Einfluss der Texturfarbe einer zu messenden Objektoberfläche auf das Messergebnis. Sie gibt an, wie sich die Kenngröße 3.7 „Lokales Rauschen in z-Richtung ( $\sigma_z$ )“ für unterschiedliche Farb- bzw. Grauwerte verhält.

Typ: Matrix aus

- der Kenngröße ( $\sigma_z$ ) für jede Farbe oder
- dem Verhältnis  $\frac{\sigma_z^{Weiß}}{\sigma_z^{Farbe}}$ ,

die sich an der Anordnung des Prüfkörpers orientiert.

#### Durchführung:

- Einmalige Bestimmung der Kenngröße 3.7 „Lokales Rauschen in z-Richtung ( $\sigma_z$ )“ für die Felder eines Farbnormals oder Grauwertnormals (siehe weiter unten).

#### Auswertung:

- Angegeben wird entweder direkt die Kenngröße  $\sigma_z^{Farbe}$  oder der Quotient aus dem Rauschwert von ideal Weiß  $\sigma_z^{Weiß}$  und der Farbe  $\sigma_z^{Farbe}$

#### Prüfkörper:

- Als Prüfkörper kommen ebene Objekte mit kalibriertem Farbauftrag in Frage.
- Im Falle des Prüfkörpers „ColorChecker Classic“ aus Abschnitt 3.5 „Color Chart“ ergibt sich eine Matrix aus 6 x 4 Einträgen.

Beispielintrag: „ColorChecker Classic (6x4),  $\sigma_z^{Farbe}$  ...

0,028	0,027	0,027	0,029	0,027	0,026
0,027	0,029	0,027	0,026	0,025	0,024
0,013	0,015	0,013	0,017	0,014	0,019
0,078	0,063	0,062	0,053	0,020	0,023

...“ (Ende des Eintrags)

Im Beispiel ist der verwendete Prüfkörper (Modell/Layout) angegeben. Dadurch sind die Farbwerte bekannt und können interpretiert werden. Die Kennwerte der Matrix sind Standardabweichungen, die das lokale Rauschen bezogen auf einen Farbwert angeben.

## 9.2 Textur Hell-Dunkel-Übergang

Die (*experimentelle*) Kenngröße gibt Aufschluss darüber, ob es an Kontrastkanten zu erhöhtem Messrauschen kommt. Dazu wird die Kenngröße 3.7 „Lokales Rauschen in z-Richtung ( $\sigma_z$ )“ auf den Bereich einer Kontrastkante angewendet und mit dem für den 3D-Sensor optimalen Wert der Kenngröße 3.7 verglichen. Die erwarteten Phänomene sind in Abbildung 20 beschrieben.

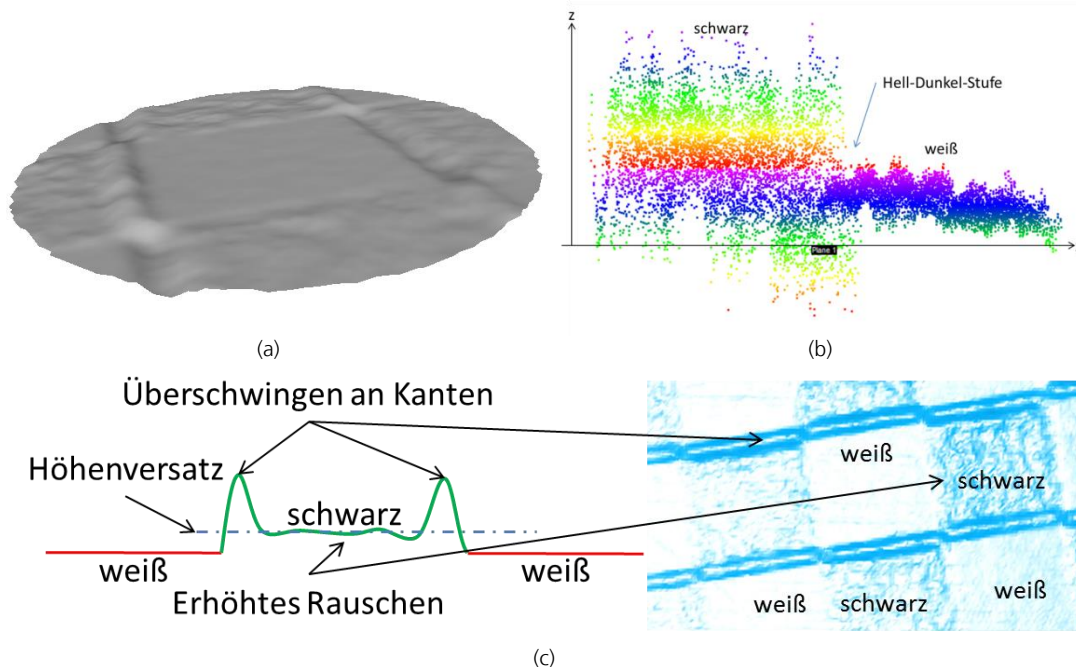


Abbildung 20: Textur Hell-Dunkel-Übergang am Beispiel ColorChecker.  
 (a) 3D-Darstellung der Messpunktdaten für den Übergang einer Farbe zum schwarzen Umrandung und zu einer weiteren Farbe.  
 (b) Profilschnitt für den Übergang Farbe (Weiß) zu schwarzer Umrandung. Die Werte in (b) wurden entlang der z-Achse mit einem Skalierungsfaktor multipliziert, um den erwarteten „Effekt“ zu verdeutlichen.  
 (c) Verdeutlicht ein weiteres Phänomen, bei dem bestimmte Farbwerte vom 3D-Sensor in eine andere, falsche Tiefenebene verortet werden (Höhenversatz).

Typ: Skalar oder Matrix mit Werte in [mm] entsprechend den Kontrastübergängen.

### Durchführung:

- (Einmalige) Bestimmung der Kenngröße 3.7 „Lokales Rauschen in z-Richtung ( $\sigma_z$ )“ an Kontrastübergängen.

### Auswertung:

- Angegeben werden entweder die Kennwerte  $\sigma_z^{A \rightarrow B}$  der zugehörigen Kontrastübergänge von Farbe **A** nach Farbe **B** oder das Verhältnis zur Kenngröße 3.7
- Die Kontrastübergänge sollten entweder im Anhang angegeben werden oder sich auf die Nummerierung der Farbmatrix des ColorChecker Classic beziehen.

Beispielintrag: „ $\sigma_z^{19 \rightarrow 24} = 0,094$ “

Der hier angegebene Wert für den Übergang von Weiß (19) nach Schwarz (24) muss in Relation zum Kennwert aus Kenngröße 3.7 „Lokales Rauschen in z-Richtung ( $\sigma_z$ )“ betrachtet werden.

*Bemerkungen:*

- Die Herstellung von Kontrastübergängen mit kalibrierten/definierten Farben kann sich schwierig gestalten.
- Der Standard ColorChecker besitzt zur Separierung der Farben einen schwarzen Rahmen, welcher einen direkten Übergang zwischen den unterschiedlichen Farben verhindert und nur für den Übergang zu schwarz geeignet ist.
- Die bei nicht professionell erzeugten Farbübergängen unterschiedlichen Schichtdicken, mangelnde Farbtreue usw. verfälschen/erschweren die Messungen.

### 9.3 Transluzenz

Gibt an, ob mit dem 3D-Sensor transluzente (bis transparente) Materialien vermessen werden können. Wird eine Angabe gemacht, sollte auch ein Beispielmateriale wie z. B. Wachs, Jade, Haut etc. genannt werden. Die Angabe ist sinnvoll, wenn aufgrund des Verfahrens eine besondere Eignung bei der Vermessung solcher, als „schwierig“ geltender Materialien gegeben ist.

*Typ:* Textform (max. 2 Zeilen)

*Beispielintrag 1:* „nein“

*Beispielintrag 2:* „ja (menschliche Haut)“



Abbildung 21: Beispielabbildung transluzenter Materialien.

©Quelle: "Fabricating Translucent Materials Using Continuous Pigment Mixtures" July 22, 2013" ACM SIGGRAPH 2013.

## 10. SONSTIGES

### 10.1 Erweiterungsmöglichkeiten

Hier können Erweiterungsmöglichkeiten und Zubehör des Sensors angegeben werden.

*Typ:* Textform (max. 4 Zeilen)

*Beispielintrag 1:* „Farbkamera, wasserdichtes Gehäuse“

*Beispielintrag 2:* „Marker und Drehteller für Rundumsicht/360°-Scans“

### 10.2 Serviceintervall

Das Serviceintervall gibt an, innerhalb welcher Zeitspannen ein Service durch den Entwickler /Hersteller/Vertrieb oder Nutzer etc. notwendig ist. Wenn diese bekannt ist, kann hier z. B. die MTBF oder MTTF angegeben werden. Weitere Angaben sind zum Beispiel der Wechsel des Leuchtmittels, Notwendigkeit der Kalibrierung usw. Es muss hier auch angegeben werden, durch wen der Service zu erfolgen hat.

*Typ:* Textform (max. 4 Zeilen)

*Beispielintrag 1:* „Kalibrierung alle 1000 Betriebsstunden oder mind. 1x jährlich durch den Anwender“

*Beispielintrag 2:* „Lampenwechsel alle 500 Betriebsstunden durch den Hersteller/Service-Techniker.“

Ein Wechsel des Leuchtmittels ist alle 500 Betriebsstunden durch einen Fachmann notwendig. Z. B. um die versprochene/notwendige Beleuchtungsstärke zu gewährleisten.

### 10.3 Zeit für Inbetriebnahme

Die Zeit für die Inbetriebnahme des 3D-Sensors bis zur ersten Messung: Auspacken, Anschließen, System hochfahren, evtl. notwendige Kalibrierung bis zum Beginn einer möglichen Messung. Die Angabe ist als Richtwert bzw. zur Feststellung der Größenordnung gedacht.

*Typ:* Skalar in [h]

*Beispielintrag 1:* „1“

Die Zeit für die Inbetriebnahme beträgt ca. 1 Stunde.

*Beispielintrag 2:* „<0,25“

Die Zeit für die Inbetriebnahme bis zur Durchführung der Messung ist kleiner als 15 min.

## 11. SYSTEMKONFIGURATION DER KENNGRÖßEN-BESTIMMUNG

### 11.1 Systemkonfiguration

Die Systemkonfiguration beschreibt die Verarbeitungs-/Auswertehardware, mit der die Berechnungen erfolgt sind. Dies sind i. d. R. PC-Konfigurationen, können aber auch Spezialprozessoren etc. sein, wenn dies für die Auswertung von Relevanz ist. Diese Angaben helfen zum einen, den ggf. zusätzlichen Hardwarebedarf zum eigentlichen 3D-Sensor einzuordnen, aber auch bei Vergleich und Bewertung von Latenzen, die ggf. durch die Verarbeitung entstehen. Weiterhin können und sollten hier für die Funktionalität als 3D-Sensor notwendige Software(-pakete) angegeben werden.

*Typ:* Textform

*Beispielintrag 1:* „AMD FX-9589, 4,7GHz, 32 GBRAM, Sahphire FirePro W5100 4GB, 2TB HDD, 4x 10GigE, 2x USB 3.1, Matrox Radiant eV-CXP (4CXP), HALCON v11.1“

Der hier angegebene Beispielintrag listet nochmals Hardware und Schnittstellen auf, die für einen Betrieb des Sensors wichtig sind, so z. B. den CoaXPress-Framegrabber mit 4 Links. Die CPU- und GPU-Angaben können für die Verarbeitung entscheidend sein.



### 3. PRÜFKÖRPERLISTE – BEISPIELE

Nachfolgend sind Beispiele für Prüfkörper aufgelistete, wie sie für die Bestimmung der zuvor genannten Kenngrößen verwendet werden können.

Die zur Charakterisierung eines 3D-Sensors tatsächlich eingesetzten bzw. notwendigen Prüfkörper sind vom 3D-Sensor: Messfeld, Messprinzip etc. abhängig und müssen dementsprechend gewählt werden.

#### 3.1 KUGELNORMAL

Kenngrößen: 3.3, 3.12



Abbildung 22: Kugelnormal.  
Edelstahl, matt weiß lackiert,  $\phi = 100 \text{ mm}$ ,  $U = 1,6 \text{ }\mu\text{m}$

#### 3.2 KUGELSTAB

Kenngrößen: 3.4,  
(u. U.. 3.3)



Abbildung 23: Kugelstab.  
CFK-Kugelstab mit weiß lackierten und geläpften Kugeltargets,  $L = 300 \text{ mm}$ ,  $D = 30 \text{ mm}$

### 3.3 EBENHEITSNORMAL

Kenngößen: 3.6, 3.7, 3.8,  
3.9, 3.13



Abbildung 24: Keramik-Messbalken.  
*Messbalken  $300 \times 50 \times 40 \text{ mm}^3$ ,  $U = 1,0 \mu\text{m}$   
optisch kooperative Keramik*

### 3.4 KANTENNORMAL

Kenngößen: 4.1, 0

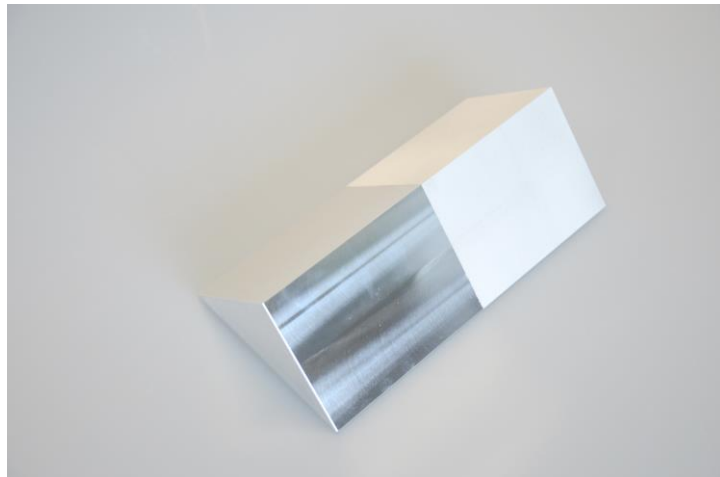


Abbildung 25: AlMg-Prüfkante.  
 *$200 \times 101 \times 53 \text{ mm}^3$ , halb weiß lackiert,  
„abgeschlagene“ Kante (via CNC)*

### 3.5 COLOR CHART

Kenngrößen: 9.1



Abbildung 26: X-Rite ColorChecker Classic.

Quelle: <http://xritephoto.com/colorchecker-classic>  
Copyright 2009, X-Rite Incorporated,  
21,59 cm x 27,94 cm

Tabelle 4: X-Rite ColorChecker Classic - Farbtabelle.

Quelle: <http://xritephoto.com/colorchecker-classic>  
Copyright 2009, X-Rite Incorporated

No.	Number	sRGB			CIE L*a*b*			Munsell Notation	
		R	G	B	L*	a*	b*	Hue Value / Chroma	
1.	dark skin	115	82	68	37.986	13.555	14.059	3 YR	3.7 / 3.2
2.	light skin	194	150	130	65.711	18.13	17.81	2.2 YR	6.47 / 4.1
3.	blue sky	98	122	157	49.927	-4.88	-21.925	4.3 PB	4.95 / 5.5
4.	foliage	87	108	67	43.139	-13.095	21.905	6.7 GY	4.2 / 4.1
5.	blue flower	133	128	177	55.112	8.844	-25.399	9.7 PB	5.47 / 6.7
6.	bluish green	103	189	170	70.719	-33.397	-0.199	2.5 BG	7 / 6
7.	orange	214	126	44	62.661	36.067	57.096	5 YR	6 / 11
8.	purplish blue	80	91	166	40.02	10.41	-45.964	7.5 PB	4 / 10.7
9.	moderate red	193	90	99	51.124	48.239	16.248	2.5 R	5 / 10
10.	purple	94	60	108	30.325	22.976	-21.587	5 P	3 / 7
11.	yellow green	157	188	64	72.532	-23.709	57.255	5 GY	7.1 / 9.1
12.	orange yellow	224	163	46	71.941	19.363	67.857	10 YR	7 / 10.5
13.	blue	56	61	150	28.778	14.179	-50.297	7.5 PB	2.9 / 12.7
14.	green	70	148	73	55.261	-38.342	31.37	0.25 G	5.4 / 8.65
15.	red	175	54	60	42.101	53.378	28.19	5 R	4 / 12
16.	yellow	231	199	31	81.733	4.039	79.819	5 Y	8 / 11.1
17.	magenta	187	86	149	51.935	49.986	-14.574	2.5 RP	5 / 12
18.	cyan	8	133	161	51.038	-28.631	-28.638	5 B	5 / 8
19.	white (.05*)	243	243	242	96.539	-0.425	1.186	N	9.5 /
20.	neutral 8 (.23*)	200	200	200	81.257	-0.638	-0.335	N	8 /
21.	neutral 6.5 (.44*)	160	160	160	66.766	-0.734	-0.504	N	6.5 /
22.	neutral 5 (.70*)	122	122	121	50.867	-0.153	-0.27	N	5 /
23.	neutral 3.5 (.1.05*)	85	85	85	35.656	-0.421	-1.231	N	3.5 /
24.	black (1.50*)	52	52	52	20.461	-0.079	-0.973	N	2 /

Cie L\*a\*b\* values use Illuminant D50 2 degree observer sRGB values for Illuminate D65.