



Die Qual der Wahl: „Welcher Sensor passt zu mir?“

Eine Studie zur Bewertung von 3D-Sensoren und 3D-Sensorprinzipien im Kontext der Mensch-Maschine-Interaktion

Daniel Höhne ¹, Peter Kühmstedt ², Gunther Notni ³

¹ Daniel.Hoehne@iof.fraunhofer.de

² Peter.Kuehmstedt@iof.fraunhofer.de

³ Gunther.Notni@tu-ilmenau.de

^{1,2} Fraunhofer Institut für angewandte Optik und Feinmechanik, Jena

³ Technische Universität Ilmenau, Ilmenau

ABSTRACT

Der Artikel stellt eine Studie zur Evaluation von über 30 unterschiedlichen 3D-Sensoren und 3D-Messprinzipien vor. Für die Bewertung der Messgenauigkeit der 3D-Sensoren kam die VDI Richtlinie 2634 zu Einsatz. Um die Sensoren auch hinsichtlich weiterer Einflussgrößen wie Geschwindigkeit, Latenzen, Umgebungseinflüsse usw. bewerten und charakterisieren zu können, wurden zusätzliche Kenngrößen wie Messzeit und Latenz festgelegt und zu einem Sensordatenblatt zusammengefasst. Anhand der so ermittelten Kenngrößen ist es einem Anwender möglich, ein für seine Messaufgabe geeignetes 3D-Messprinzip zu ermitteln und/oder 3D-Sensoren anhand einheitlicher Kriterien zu vergleichen.

Keywords: 3D-Sensor-Studie, Vergleich, Scanning, Evaluation, VDI2634

1 EINLEITUNG

Im Rahmen der Förderinitiative *zwanzig20* des BMBF im Konsortium *Allianz 3Dsensation* wurde in einem Projekt eine branchenübergreifende Studie zur Evaluation von 3D-Sensortechnologien durchgeführt. Ziel der Studie war es, den Stand der Forschung und Technik bei 3D-Sensoren, die in den Bedarfsfeldern Produktion, Mobilität, Gesundheit,

Sicherheit Anwendung finden, zu ermitteln. Anwendungsfelder dort sind beispielsweise die Qualitätssicherung, Montageassistenten, Kfz-Innenraum-Anwendungen, Diagnostik & Reha oder auch der Schutz öffentlicher Räume und Personenidentifikation. Hierzu kann auf ein großes Spektrum spezieller oder universeller 3D-Sensoren zurückgegriffen werden. Die Varianten der Beschreibung der Leistungsfähigkeit der Sensoren sind dabei so vielfältig, wie die Anzahl der Sensoren. Dies kann zum einen auf die Vielfältigkeit der Messprinzipien zurückzuführen sein. Ein weiterer Grund kann die Fokussierung auf eine spezielle Messaufgabe bei der Entwicklung sein. Dieses Problem wurde in der Studie aufgegriffen, indem die in Abschnitt 2 kurz vorgestellte Richtlinie, zur Bewertung optischer 3D-Messtechnik, um weitere Kenngrößen zur Beschreibung der Messeigenschaften eines 3D-Sensors erweitert wurde. Diese sind u. a. Latenz, Messgeschwindigkeit, Materialeigenschaften der Prüfobjekte u. v. a. m, siehe Abschnitt 3. Die Ergebnisse der Studie werden in Abschnitt 4 auszugsweise vorgestellt. Schlussfolgerungen dazu und einen Ausblick, auf den sich daraus ergebenden Forschungsbedarf, werden im letzten Abschnitt 5 gegeben.

1.1 VERWANDTE ARBEITEN

Einen sehr ausführlichen Überblick anhand von 70 Anwendungsbeispielen von 3D-Sensoren und Messprinzipien ist in (Luhmann, 2002) gegeben. Nachteil hierbei ist, dass die Kenngrößen zu den Messsystemen in Art und Umfang stark variieren. Eine Gegenüberstellung oder Zusammenfassung ist auf dieser Basis nicht möglich. In (Luhmann, Bethmann, Herd, & Ohm, 2008) wird zur Sensorbewertung das Prinzip eines Round-Robin-Experiments verfolgt. Dazu wird ein und dieselbe (präparierte) Freiformfläche, durch 8 unterschiedliche Systeme mit vier unterschiedlichen Messprinzipien gemessen. Im Vordergrund steht die Messgenauigkeit. Es bleibt unklar, in wie weit sich die Ergebnisse eignen, um die Systeme in einem allgemeineren Sinn zu beschreiben und deren Anwendung für andere Messaufgaben zu bewerten. Geht man weg von der Bewertung von 3D-Sensoren hin zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von konkreten Algorithmen eröffnet sich ein sehr aktives Forschungsfeld. Hier kommen Benchmark Suiten wie „KITTI“ (Geiger, Lenz, & Urtasun, 2012) oder „Middlebury“ (Scharstein & Szeliski, 2002) zum Einsatz, um nur zwei der bekanntesten zu nennen. Hierbei werden die zu evaluierenden Daten und auch die Ground-Truth-Daten vorgegeben. Auf diese Weise kann die Auswertung automatisiert erfolgen. Aktive 3D-Messverfahren, bei denen die Projektionseinheit mit der Szenerie wechselwirkt, können so jedoch nicht bewertet werden. Dass auch aus Herstellersicht ein Interesse an vergleichender Beschreibung besteht, zeigt auch die Initiative „Faires Datenblatt für optische Oberflächenmessgeräte“, welches sich aber speziell auf Oberflächenmessgeräte nicht auf 3D-Sensoren bezieht.

2 DIE VDI RICHTLINIE 2634-BLATT 1/2/3

Die für die Bewertung von 3D-Sensoren entscheidende Richtlinie im deutschsprachigen Raum ist die VDI/VDE 2634. Erste Vorschläge hierzu wurden in (Luhmann & WENDT, 2000) veröffentlicht. Diese Richtlinie ist unterteilt in Blatt 1, für Verfahren mit „*punktförmigen Antastung*“ (Abbildung 1a) z. B. Photogrammetrie, Blatt 2, für Sensoren mit „*flächenhafter Antastung*“ (auch Einzelansicht, Abbildung 1b) z. B. aktives/passives binokulares Stereo mit 2D-Bildgebern (2D-Kamera), und Blatt 3, das die Prüfung von Verfahren beschreibt, welche mehrere Einzelansichten in einem einheitlichen Objektkoordinatensystem verbinden (Abbildung 1c). Wobei letztere nicht notwendig eine 360° Rundumsicht leisten müssen.

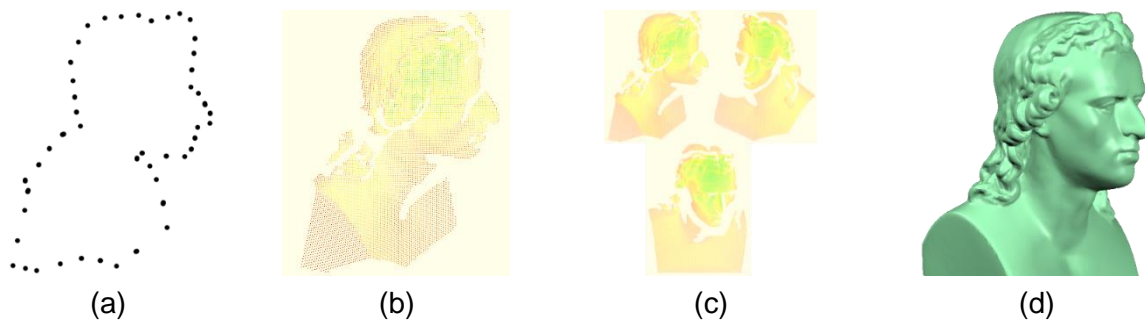


Abbildung 1: Illustration der unterschiedlichen Arten der Antastung in der VDI 2634 (a) punktförmig (b) flächenhaft (c) mehrere flächenhafte (d) „vollständige“ Visualisierung

Quelle eigene Darstellung (2016)

Im Vordergrund dieser Richtlinie steht die Abnahme und Bewertung der *Messeigenschaften* eines Systems. Dazu werden Kenngrößen ermittelt, die die Abweichung in Länge und Form von kalibrierten Prüfkörpern beschreiben, Tabelle 1. Weiterhin macht die Richtlinie Vorgaben zu

- der Berechnung der vier möglichen Kenngrößen (siehe Tabelle 1),
- den geometrischen Eigenschaften der Prüfkörper (Kreis, Fläche, Kugel),
- der Messanordnung: Positionierung des Prüfkörpers innerhalb des Messvolumens,

sowie Vorschläge zur Dimensionierung des Prüfkörpers. Insbesondere soll die „*Formabweichung der Prüfkörper [...] deutlich kleiner als die zu überprüfende[...] Kenngröße sein.*“ (VDI2634-2).





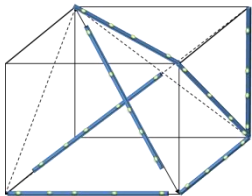
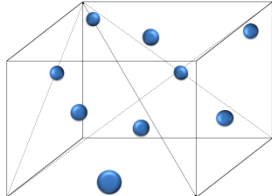
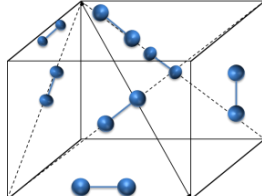
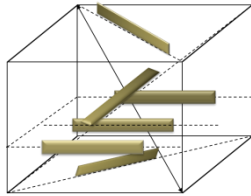
Welche Aussagen gehen mit der so ermittelten Kenngröße einher? Ein nach VDI 2634 ermittelte Kenngröße garantiert, dass der dafür angegebenen Wert (\pm Kennwert), unter Einbeziehung der angegebenen Testunsicherheiten, an keiner Stelle des Messvolumens (betragsmäßig) überschritten wird. Dies gilt für alle Betriebsarten z. B. Einstellungen, Messmodi, Messvolumina etc. des Sensors und Betriebsbedingungen z. B. Temperatur, Luftfeuchte, Umgebungslicht etc.

Wo findet die VDI 2634 Anwendung? Überall dort, wo harte Grenzwerte eingehalten werden müssen und gleichzeitig Betriebsart und Betriebsbedingungen gewährleistet werden können.

I. d. R. wird dies bedeuten, dass ein Anwender seine Einsatzbedingungen, Messgrößen und Toleranzen genau spezifiziert und der Sensorhersteller den Sensor ggf. individuell auslegt. Oder aber die vom Hersteller vorgegeben, möglicherweise stark eingeschränkten, Randbedingungen müssen realisiert sein. Daher ist es häufig der Fall, dass der Sensorhersteller darauf verzichtet, allgemeine Aussagen über Werte für Kenngrößen der VDI 2634 zu veröffentlichen und stattdessen weniger streng definierte Kenngrößen wie „Auflösung“, „Tiefenauflösung“, „Messauflösung“ oder „Messgenauigkeit“ verwendet. Dieses Vorgehen wirkt der Vergleichbarkeit von Sensoren entgegen.

Tabelle 1: Die wichtigsten Kennwerte der VDI 2634 Blatt 2.
 Von oben nach unten: Kenngröße, repräsentatives Prüfmittel und Messanordnung

Quelle: (BaSe, 2015)

Längenmess- abweichung	Antastabweichung	Kugelabstands- abweichung	Ebenheits- messabweichung
 Maßstab	 Kugelnorm	 Kugelhantel	 Steinbalken
			

3 BRANCHENÜBERGREIFENDE 3D-SENSOR-STUDIE

Implizit setzt die Anwendung der VDI 2634 voraus, dass die Messgenauigkeit das entscheidende Prüfkriterium für die Verwendung eines 3D-Sensors ist. Insbesondere im Kontext der Mensch-Maschine-Interaktion lassen sich viele Anwendungsfälle finden, in denen die Fähigkeit eines 3D-Sensors zu *Messen* von der Fähigkeit des *Erkennens* abgelöst wird. Wichtiger als die Genauigkeit ist dann u. U. die Messgeschwindigkeit, Latenzen, Umwelteinflüsse, Grenzen der Beschaffenheit bzw. Material der Messobjekte aber auch Arbeitsschutzmaßnahmen z. B. im Falle von Laserprojektion etc. Diese *weicheren* Kriterien können entscheidenden Einfluss auf die Wahl eines Sensors haben.

Hier knüpft die im Nachfolgenden vorgestellte branchenübergreifende Studie zu 3D-Sensoren an. Die damit verfolgten Ziele waren insbesondere Folgende. Es sollte der State-of-the-Art unterschiedlicher 3D-Sensoren mit unterschiedlichen 3D-Messprinzipien (daher branchenübergreifend) ermittelt werden. Im Ergebnis soll ein Anwender mit konkreter Messaufgabe in die Lage versetzt werden, sich über die Verfügbarkeit eines geeigneten Sensors zu informieren oder aber mindestens das für seine Aufgabenstellung geeignete 3D-Messprinzip zu finden. Für die Wissenschaft, Forschung und Entwicklung sollte der

Forschungsbedarf für Messprinzipien und Sensortechnologie aufgezeigt werden, der sich aus den Parametern/Beschränkungen der evaluierten Sensoren ergibt.

Um diese Ziele zu erreichen, wurde ein Datenblatt erarbeitet, welches die etablierten Kenngrößen VDI 2634 zur Messgenauigkeit um weitere einflussreiche Kenngrößen erweitert, die weitere Stärken und Schwächen von 3D-Messprinzipien erkennbar machen. Dieses Datenblatt wird in Auszügen in Abschnitt 3.1 vorgestellt. Evaluiert wurden kommerzielle 3D-Sensoren genauso wie vorerst theoretisch entwickelte Prinzipien. Hierzu wurden sowohl Sensorentwickler, Forschungseinrichtungen als auch Anwender in die Studie einbezogen, siehe Abschnitt 3.2. Eben dort werden auch Anmerkungen zur Durchführung und den dafür notwendigen Prüfmitteln gemacht. Die Ergebnisse und Übersichten über Kennwerte unterschiedlicher Sensoren werden in einem eigenen Abschnitt 4 vorgestellt.

3.1 SENSORDATENBLATT

Grundlage der Studie war ein für alle zu evaluierenden Sensoren und Messprinzipien einheitliches Sensordatenblatt. Das Datenblatt umfasst die Beschreibung des Sensors/Messprinzips in Textform (zwei Seiten), eine ca. zweiseitige Kenngrößentabelle, sowie einen Anhang, der die Hinweise und Limitierungen zum Auswertevorgang aufnehmen kann. Die bei der Auswahl der Kenngrößen beteiligten Partner waren: *Fraunhofer IOF, Fraunhofer IIS, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, INB Vision GmbH, VIALUX GmbH und Siemens AG*. Aufgrund der Bedeutung der VDI 2634 wurden die dort eingeführten Messgrößen in das Datenblatt integriert (siehe Tabelle 2). Die vollständige Vorlage für das Datenblatt zum Zeitpunkt der Evaluation, die aktualisierten Versionen sowie die Erläuterung der Kenngrößen (Messpläne) können auf (BaSe, 2015) abgerufen werden. Die Auswahl der Kenngrößen greift auch Ansätze der jüngeren Forschung auf, um diese an einer großen Auswahl von Sensoren zu evaluieren. Beispielsweise eine „3D-MTF“ nach (Berssenbrügge, Dekiff, Kemper, Denz, & Dirksen, 2012)

Tabelle 2: Aufzählung der evaluierten Kenngrößen in der 3D-Sensor-Studie.
Quelle: (BaSe, 2015)

<p>Gerätebeschreibung</p> <p>1.1 Abmessungen (BxHxT) [mm³]</p> <p>1.2 Gewicht [g]</p> <p>1.3 Wellenlänge und Bandbreite [nm]</p> <p>1.4 elektrische Leistung [W]</p> <p>1.5 Versorgung [V, A, bar]</p> <p>1.6 Art der Versorgung [text]</p> <p>1.7 IP Schutzklasse [text]</p> <p>1.8 Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen [text]</p> <p>1.9 Sensorpreis (Preisspanne) [€]</p> <p>1.10 Technische Schnittstellen/Protokolle [text]</p> <p>1.11 Logische Schnittstellen/Datenformate [text]</p> <p>1.12 Komponenten eines Datenpunktes [text]</p> <p>1.13 Struktur der Datenpunkte [text]</p> <p>Funktionsbeschreibung</p>	<p>Kenngrößen zu kleinsten Strukturen</p> <p>4.1 Grenzfrequenz der 3D-MTF (x y) [mm⁻¹]</p> <p>Zeitbezogene Kenngrößen 3D</p> <p>5.1 Messzeit pro 3D Einzelansicht [ms]</p> <p>5.2 Latenzzeit pro 3D Einzelansicht [ms]</p> <p>5.3 Gesamtzeit pro 3D Einzelansicht [ms]</p> <p>5.4 Max. 3D Datenpunktrate [px/s]</p> <p>5.5 Messrate 3D-Einzelansichten <kontinuierlich> [fps]</p> <p>5.6 Wiederholrate 3D-Einzelansichten [fps]</p> <p>Technische Daten eines elementaren Bildgebers</p> <p>6.1 Modell-/Typenbezeichnung [text]</p> <p>6.2 Dimension (Dim. / Achsen) [text]</p> <p>6.3 Auflösung (laut Hersteller) [px]</p> <p>6.4 Anzahl elementarer Bildgeber [-]</p> <p>Zeitbezogene Kenngrößen eines elementaren Bildgebers</p>
---	--

2.1 Dimensionalität des Verfahrens (VDI 2617-6.2) [text] 2.2 zusätzlich benötigte Messmittel [text] 2.3 zusätzliche Bewegungsachsen [-] 2.4 Rundumsicht {ja, nein} 2.5 typische Einsatzfelder [text] Messtechnische Kenngrößen 3D 3.1 3D Messvolumen (Einzelansicht) (LxHxT) [mm ³] 3.2 Abstand zum Messvolumen in z-Richtung [mm] 3.3 Antastabweichung (P_F, P_S) [mm] 3.4 Kugelabstandsabweichung (SD) [mm] 3.5 Längenmessabweichung (E) VDI2634 6.1 [mm] 3.6 Ebenheitsmessabweichung (F) [mm] 3.7 Lokales Rauschen in z-Richtung (räumlich) [mm] 3.8 Lokales Rauschen in z-Richtung (zeitlich) [mm] 3.9 Max. Datenpunkte je Messung [px] 3.10 Mittlerer Triangulationswinkel (min,max,mean) [°Grad] 3.11 Mittlere Basislänge (min,max,mean) [mm] 3.12 Max. Neigungswinkel der Oberfläche [°Grad] 3.13 Mittlerer 3D Datenpunkt Abstand (x / y) [mm]	7.1 Messzeit elementare Einzelaufnahme [μ s] 7.2 Rate elementare Einzelaufnahme [fps] 7.3 Pixelrate [px/s] Umgebungseinfluss 8.1 Fremdlicht (max. dc) [lx] 8.2 Zulässige Betriebstemperatur [°C] 8.3 Zulässige max. Betriebs-Luftfeuchte [%] Materialeinfluss (Messobjekt) 9.1 Textur Farbe-/Grauwerte (σ_z , Rauschen) [mm] 9.2 Textur Hell-Dunkel Übergang (σ_z) [mm] 9.3 Transluzenz [text] Sonstiges 10.1 Erweiterungsmöglichkeiten [text] 10.2 Besonderheiten des Sensors [text] 10.3 Serviceintervall und MTBF [text] 10.4 Zeit für Inbetriebnahme [h] Systemkonfiguration der Kenngrößen-Bestimmung [text]
--	--

3.2 TEILNEHMER

Neben den in Abschnitt 3.1 genannten Autoren des Sensordatenblattes nahmen die nachfolgend genannten Einrichtungen und Firmen an der Studie teil: *CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH, Fraunhofer HHI, Friedrich-Schiller Universität Jena, Gesellschaft für Bild- und Signalverarbeitung mbH, LSA GmbH, Otto Vision GmbH, Steinbeis Qualitätssicherung und Bildverarbeitung GmbH, Technische Universität Chemnitz, Technische Universität Ilmenau, Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e. V.* Bei den Teilnehmern handelt es sich sowohl um Hersteller, Forscher und Entwickler als auch Anwender, die eigene und auch von dritten stammende 3D-Sensoren bzw. 3D-Sensortechnologien evaluierten.

3.3 DURCHFÜHRUNG, MESSPROBEN

Wie in Abschnitt 2 erläutert und in Tabelle 1 auszugsweise zu sehen, wurden für die Evaluation der Studie verschiedene Prüfkörper benötigt. Die Wahl der Prüfkörper ist dabei von verschiedenen Eigenschaften der 3D-Sensoren abhängig. So hängt beispielsweise die Dimensionierung der Prüfkörper von der Größe des Messvolumens ab. Die Oberflächenbeschaffenheit der Prüfkörper sollte *kooperative* sein, um ideale Bedingungen für das 3D-Sensorprinzip zu bieten. Die evaluierten 3D-Sensorprinzipien unterschieden sich bezüglich dieser Eigenschaften stark, was es unmöglich machte, der Studie ein strenges Round-Robin-Verfahren wie in (Duparré & Ristau, 2014) zugrunde zu legen. Aus diesem Grund wurden unterschiedliche Sätze von Prüfkörpern beschafft und teilweise auch neu entwickelt.

4 ERGEBNISSE

Im Beitrag können aus Platzgründen nur ausgewählte Ergebnisse der Studie vorgestellt werden. Überdies sind die Daten anonymisiert. Für die Zusammenfassung der Daten wurden diese insoweit berichtigt, dass erste Plausibilitäts-Checks durchgeführt und dort, wo der Vorgabe nicht entsprochen wurde, auf die korrekten SI-Präfixe und Maßeinheiten konvertiert wurde. Die Daten geben somit einen ersten Überblick, müssen aber zukünftig weiter aufgearbeitet und ausführlicher analysiert werden. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse wird auf (BaSe, 2015) veröffentlicht. Da ein Möglichst breites Spektrum an 3D-Sensoren in die Studie einbezogen werden sollte, sind die Vorgaben zur Kontrolle der Betriebsbedingungen zum Zeitpunkt der Evaluation, weniger scharf als in der VDI Richtlinie. Denn es ist fast unmöglich einen Sensor für Außenaufnahmen kontrolliert zu testen. Für die Bewertung der Studie muss davon ausgegangen werden, dass der Auswerter optimale Bedingungen für seinen Sensor geschaffen und auf dem Datenblatt vermerkt hat.

4.1 DIAGRAMME DER KENNGRÖßEN

Aufgrund Ihrer exponierten Rolle werden nachfolgend zunächst die Ergebnisse der drei Kenngrößen Antastabweichung, Kugelabstandsabweichung und Ebenheitsabweichung der VDI 2634 Blatt-2 in den Diagrammen der Abbildung 2 und Abbildung 3 angegeben.

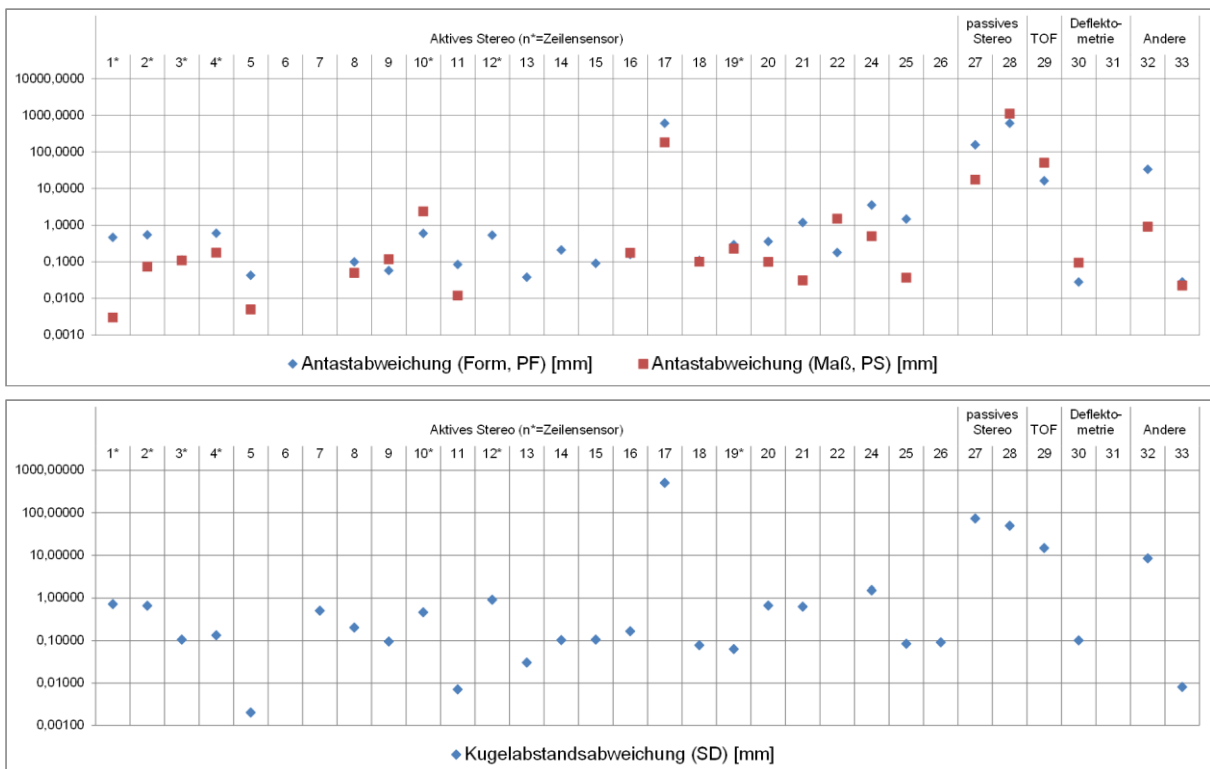


Abbildung 2: Antastabweichung, Sensor 6, 7, 26 und 31 ohne Werte (oben) und Kugelabstandsabweichung, Sensor 6 und 31 ohne Werte (unten).

Quelle: eigene Darstellung (2016)

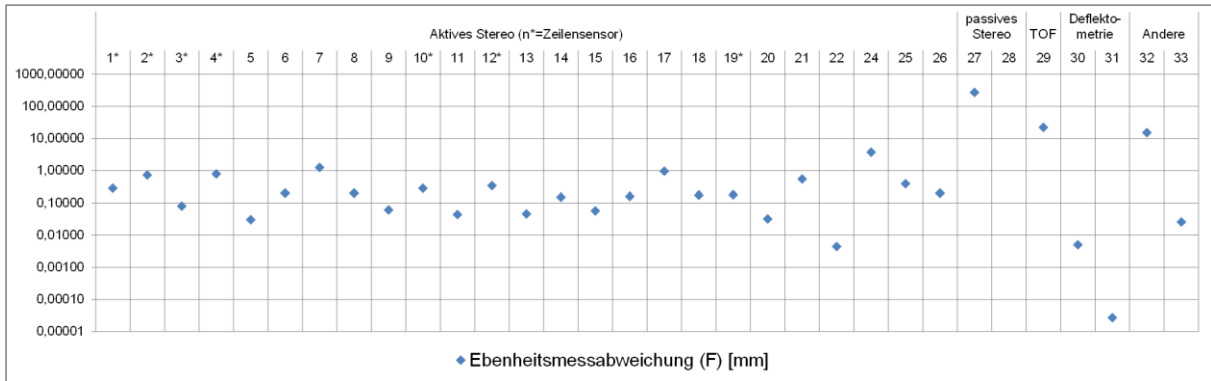


Abbildung 3: Ebenheitsmessabweichung für die Sensoren 1 bis 33, Sensor 28 ohne Wert.
 Quelle: eigene Darstellung (2016)

Als Ergänzung zu den Kenngrößen der VDI 2634 sollen hier noch die ausgewählten zeitlichen Kenngrößen Messzeit, Latenz und Gesamtzeit, siehe Abbildung 5, und die Maße des Messvolumens, Abbildung 6, angegeben werden. Erstere sind insbesondere interessant für interaktive Anwendungen, letztere helfen die übrigen Kenngrößen in Relation zu setzen. Die Definition und Interpretation der Kenngrößen kann Abbildung 4 entnommen werden.

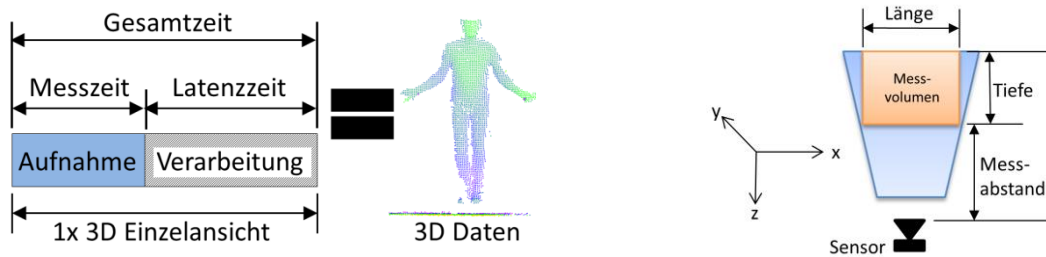


Abbildung 4: Gesamtzeit, Messzeit und Latenz (links), Messvolumenmaße (rechts)
 Quelle: (BaSe, 2015)

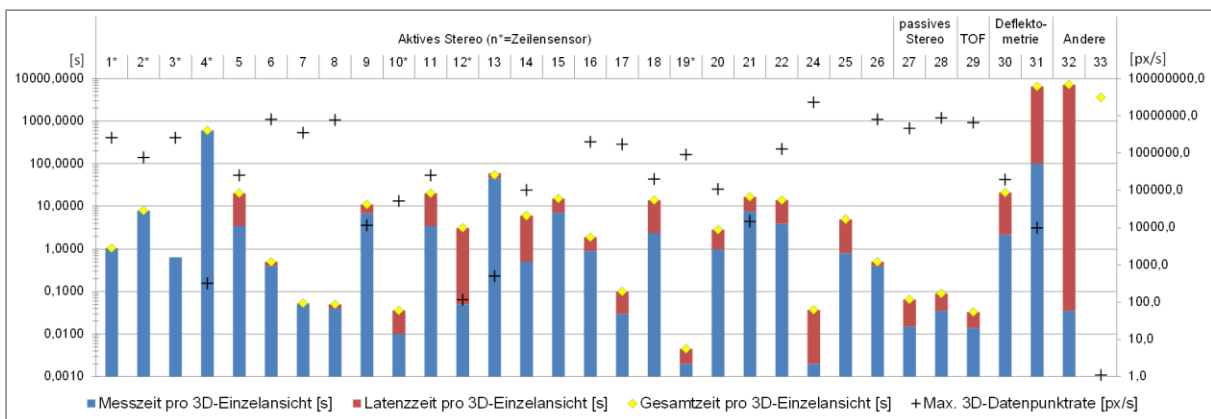


Abbildung 5: Kenngrößen Messzeit, Latenz, Gesamtzeit und Datenpunktrate (Sensoren 1-33).
 Sensoren 3, 4 und 33 ohne Latenzwerte, Sensor 33 auch ohne Messzeit
 Sensoren 15, 25, 32 ohne Max. 3D-Datenpunkte pro Sekunde

Quelle: eigene Darstellung (2016)

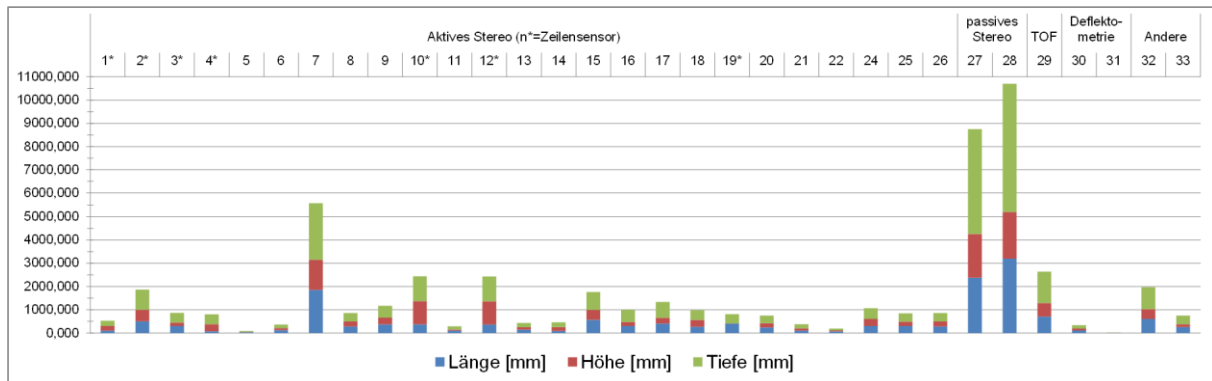


Abbildung 6: Diagramm mit den Messvolumenmaßen der Sensoren 1 bis 33.

Quelle: eigene Darstellung (2016)

4.2 INTERPRETATION UND ANWENDUNG DER KENNWERTE

Um den für eine Aufgabestellung geeigneten Sensor oder das geeignete Messprinzip zu ermitteln, ist es entsprechend der Kenngrößen zu zerlegen. Dabei sind alle Kenngrößen immer in Relation zu den *Messvolumenmaßen* zu sehen. I. d. R. kann davon ausgegangen werden, dass die Messgenauigkeit mit der Größe des Messvolumens abnimmt. Am deutlichsten wird dies bei Vergleich der Sensoren 27 und 28 mit den Sensoren 5, 22, und 31. Sind genaue Positionsbestimmungen notwendig, sollte ein möglichst kleiner Wert in der *Kugelabstandsabweichung* angestrebt werden. Hohe Werte in der *Antastabweichung*, lassen ein hohes Rauschen in den Messwerten oder zu wenige Abtastwerte auf den Prüfkörpern vermuten. Beides spricht gegen die zuverlässige Erkennung sehr kleiner Objekte, im Vergleich zum Messvolumen, kann aber auch darauf zurückzuführen sein, dass das Sensorsystem einzelne Messwerte clustert und aus Geschwindigkeitsgründe nur Cluster „belegt“ oder „nicht belegt“ meldet. Erfordert ein Problem interaktive Datenraten bei der Bereitstellung der 3D-Messpunkte/Oberflächen, muss eine geringe *Gesamtzeit* angestrebt werden, Sensoren 7, 8, 10, 19, 24, 27-29. Soll dagegen ein besonders schneller Prozess erfasst werden, muss mit hoher Geschwindigkeit gemessen werden. Eine kurze *Messzeit* wird benötigt, z. B. Sensor 19 und 24. Die Kenngröße *Max. 3D-Datenpunkte/s* gibt Aufschluss darüber, wie viele 3D-Punkte nach einer Sekunde maximal vom Sensor geliefert werden.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN, AUSBLICK

Die VDI Richtlinie 2634 ist das etablierte Verfahren, um 3D-Sensoren auf ihre Messgenauigkeit zu prüfen. Die neu vorgestellten (zeitlichen) Kenngrößen (Tabelle 2) sind ein erster Ansatz, um die Eignung von 3D-Sensoren für Anwendung mit anderen Schwerpunkten z. B. die Roboter-Mensch-Interaktion zu charakterisieren. Mit dieser Studie und dem dafür entwickelten Datenblatt wurde ein Überblick über aktuelle 3D-Sensortechnik

und deren Parameter, Möglichkeiten und Limitierungen gegeben. Es bleibt die Frage nach der Akzeptanz neuer Kenngrößen und der Überwindung von Problemen bei der Erfassung dieser. Eine Herausforderung bei letzterem bleibt die Bereitstellung geeignet texturierter Prüfkörper für passive Messprinzipien. Auch konnte für die Studie keine konsensfähige Kenngröße entwickelt werden, welche explizit die Messeignung des Sensors für sich bewegende Objekte bzw. Prüfkörper charakterisiert.

Wir bedanken uns bei den Partnern des Projektes (BaSe, 2015) für die Projektarbeit und den Mitgliedern der Allianz 3Dsensation, die 3D-Sensoren untersucht und Datenmaterial zur Verfügung gestellt haben.

Das der Veröffentlichung zugrunde liegende Projekt (BaSe, 2015) (FKZ: 03ZZ0402A) wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Förderprogramms „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“ gefördert.

LITERATURVERZEICHNIS

- BaSe (2015), „Basisvorhaben 3D-Sensorprinzipien“ URL=<http://www.3d-sensation.de>, „Startseite > Projekte 3Dsensation > Basisvorhaben 3D-Sensorprinzipien“
- Berssenbrügge, P., Dekiff, M., Kemper, B., Denz, C., & Dirksen, D. (2012). Characterization of the 3D resolution of topometric sensors based on fringe and speckle pattern projection by a 3D transfer function. *Optics and Lasers in Engineering*, 50(3), 465–472.
- Duparré, A., & Ristau, D. (2014). Optical interference coatings measurement problem 2013. *Appl. Opt.*, 53(4), A281–A286.
- Geiger, A., Lenz, P., & Urtasun, R. (2012). Are we ready for Autonomous Driving? The KITTI Vision Benchmark Suite. In *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*
- Luhmann, T. (2002). *Nahbereichsphotogrammetrie in der Praxis: Beispiele und Problemlösungen*. Heidelberg: Herbert Wichmann.
- Luhmann, T., Bethmann, F., Herd, B., & Ohm, J. (2008). Comparison and verification of optical 3-d surface measurement systems. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 37, 51–56.
- Luhmann, T., & WENDT, K. (2000). Recommendations for an acceptance and verification test of optical 3-D measurement systems. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(B5/2; PART 5), 493–500.
- Scharstein, D., & Szeliski, R. (2002). A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *International journal of computer vision*, 47(1–3), 7–42.