

Prüfrichtlinie zur Abnahme und Überwachung von Terrestrischen Laserscanner-Systemen

- ENTWURF V1.0.0 -

von

Prof. Dr.-Ing. Fredie Kern

Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik

Lucy-Hillebrand-Straße 2

55128 Mainz

fredie.kern@fh-mainz.de

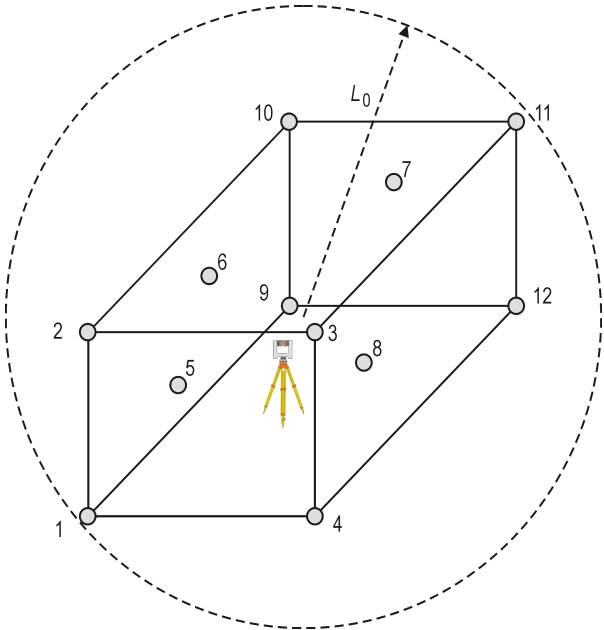
	Richtlinien-Text	Kommentare
1	Vorbemerkung	
2	Terrestrische Laserscanner (TLS) werden als universelle Messgeräte eingesetzt. Jeder Betreiber muss sich darüber vergewissern, dass das eingesetzte TLS-System die geforderte Leistung erbringt. Insbesondere darf die maximal zulässige Messabweichung nicht überschritten werden. Dies kann auf Dauer nur durch vergleichbare Abnahmekriterien und eine regelmäßige Überwachung der TLS-Systeme gewährleistet werden. Die Verantwortung dafür liegt zum einen beim Gerätehersteller und zum anderen beim Betreiber des TLS-Systems.	
3	Die Abnahme und Überwachung von TLS-Systemen unterschiedlicher Funktionsweise, Messbereich und Einsatzzweck muss schnell und einfach mit kostengünstigen Prüfkörpern durchgeführt werden können. Dazu eignen sich Längennormale und Prüfkörper, die wie übliche Messobjekte mit dem TLS-System gemessen werden.	Prüfkörper können auch die vom Gerätehersteller für Referenzierungsaufgaben empfohlenen Ziele sein.
4	Die vorliegende Richtlinie enthält praxisnahe Abnahme- und Überwachungsverfahren zur Beurteilung von terrestrischen Laserscannern (Impulslaufzeitverfahren und Phasenvergleichsverfahren) hinsichtlich ihrer Genauigkeit. Die Kenngrößen Antastabweichung und Abstandsabweichung sind in Anlehnung an ISO 10 360 definiert. Zusätzlich wird die Kenngröße Auflösungsvermögen eingeführt.	
5	1 Geltungsbereich und Zweck	
6	Die vorliegende Richtlinie gilt für terrestrische Laserscanner, die Raumstrecken per Laserlicht entweder nach dem Prinzip der Impulslaufzeit oder dem Phasenvergleichsverfahren sowie nach einer Kombination aus beiden Verfahren arbeiten. Diese können anwendungsspezifisch konfiguriert werden. Das Sensorsystem bestehen aus mehreren Sensoren z.B. aus einem Streckenmesssensor und zwei Winkelsensoren im Abtaster.	
7	Diese Richtlinie gilt für die Vermessung von 3D-Objektoberflächen in einem einzelnen elementaren Messvorgang ("Einzelansicht", „Einzelscan“). Nicht abgedeckt werden Vermessungen, die durch Repositionieren des Sensorsystems und/oder des Objekts mehrere Einzelansichten in ein Objektkoordinatensystem transformiert sind, zum Beispiel durch: a) extern angemessene Referenzmarken b) mathematisches Einpassen der Einzelansicht in die Gesamtpunktwolke („Matching“)	
8	In der vorliegenden Richtlinie werden Verfahren und Prüfkörper zur Abnahme und zur regelmäßigen Überwachung von TLS-Systemen	

	Richtlinien-Text	Kommentare
	<p>angegeben. Die Verfahren eignen sich gleichermaßen für</p> <p>a) die Abnahme von TLS-Systemen und</p> <p>b) die Überwachung von TLS-Systemen im Sinne der Prüfmittelüberwachung gemäß DIN ISO 9000 bis DIN ISO 9004.</p>	
9	<p>Die Anforderungen an die zur Abnahme und Überwachung eingesetzten Prüfkörper werden festgelegt und einzelne beispielhaft beschriebene Prüfkörper im Sinne dieser Richtlinie sind räumliche Anordnungen von Antast-Formelementen. Dies sind beispielsweise Ebenen oder Kugeln. Prüfkörper müssen bezüglich ihrer Maße und Form kalibriert und hinsichtlich des Materials spezifiziert sein.</p>	
10	<p>Zur Beurteilung der Genauigkeit der TLS-Systeme werden Kenngrößen festgelegt. Die Grenzwerte dieser Kenngrößen werden für die Abnahme der TLS-Systeme vom Gerätehersteller und für die Überwachung vom Betreiber festgelegt. Alle vier Kenngrößen gemeinsam erlauben eine quantitative Beurteilung des Messsystems, wobei system- oder anwendungsbezogen eine unterschiedliche Gewichtung erfolgen kann.</p>	
11	<p>Die Kenngrößen dienen der Spezifikation der TLS-Systeme sowie dem Vergleich unterschiedlicher Messsysteme. Da diese Werte von der Betriebsart und den Betriebsbedingungen abhängig sind, wird empfohlen, für die Abnahme und Überwachung besondere Betriebsarten und Betriebsbedingungen anzugeben und festzulegen, um die Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse zu sichern. Die Kenngrößen sind nicht ohne weiteres auf jede beliebige Messaufgabe übertragbar.</p>	
12	<p>Werden keine Einschränkungen der Betriebsarten und Betriebsbedingungen vereinbart, so müssen die spezifizierten Grenzwerte der Kenngrößen unter allen möglichen Betriebsarten und -bedingungen eingehalten werden. Bei Nichteinhaltung von gegebenen Einschränkungen ist eine Überschreitung des jeweiligen Grenzwertes der Kenngrößen möglich und zulässig.</p>	
13	<p>Unter Betriebsarten sollen Einstell- und Konfigurationsmöglichkeiten des TLS-Systems verstanden werden wie zum Beispiel:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Messentfernung, • Messvolumen, • Ortsauflösung (Winkelinkremente), • Abtastfrequenz (Messgeschwindigkeit, Rotationsgeschwindigkeit), • Einstellung bezüglich der Signalverarbeitung (Filterung, Waveform-Analyse) 	
14	<p>Unter Betriebsbedingungen werden die äußeren Einflussfaktoren auf das TLS-System verstanden. Dies sind zum Beispiel:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperatur und Temperaturgradient 	

Richtlinien-Text	Kommentare
<ul style="list-style-type: none"> • Feuchte • Schwingungen (mechanisch) • elektromagnetische Störfelder • Umgebungsbeleuchtung (Innen-/Außenbereich) • Staub, Dunst und Nebel 	
<p>15 2 Formelzeichen</p>	
<p>16</p> <p>R Kenngroße Antastabweichung</p> <p>R_{zul} Maximal zulässige Antastabweichung</p> <p>R_K Kenngroße Kugelradienabweichung</p> <p>$R_{K,zul}$ Maximal zulässige Kugelradienabweichung</p> <p>L_0 Radius einer das Messvolumen kleinstmöglich einschreibenden Kugel</p> <p>Δw Ortsauflösung (eingestellter Messpunktstand in Messentfernung)</p> <p>ΔL Kenngroße Abstandsabweichung</p> <p>ΔL_{zul} Maximal zulässige Abstandsabweichung</p> <p>Δl_k Kalibrierte Länge eines hantelförmigen Prüfkörpers</p> <p>Δl_m Gemessene Länge eines hantelförmigen Prüfkörpers</p> <p>D Messentfernung (Abstand zwischen TLS-System und Prüfkörper)</p> <p>$AV(D)$ Kennlinie der Kenngroße Auflösungsvermögens</p> <p>$AV(D)_{zul}$ Maximale zulässige Kennlinie der Kenngroße Auflösungsvermögen</p> <p>α Irrtumswahrscheinlichkeit</p> <p>γ Zentriwinkel der Spalten des Böhler-Sterns</p> <p>φ Kegelöffnungswinkel des Böhler-Sterns</p> <p>b Verhältnis zwischen Spaltenbreite und -tiefe des Böhler-Sterns</p> <p>S_M Zentrum des Böhler-Sterns</p> <p>r Abstand zum Prüfkörper Kugel bzw. Abstand zum Zentrum des Prüfkörpers Böhler-Sterns gemessen auf der Schablone (Vorderseite)</p>	

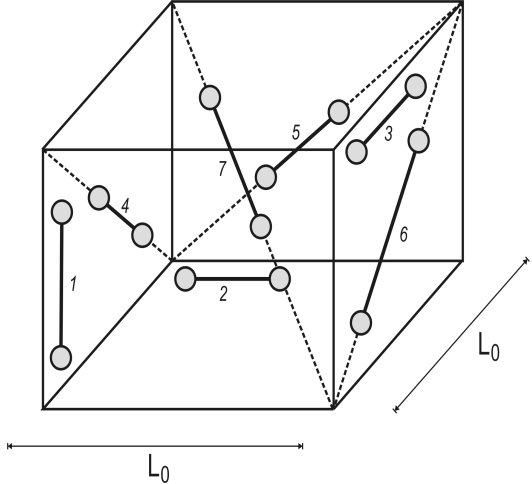
Richtlinien-Text	Kommentare
<p>s Empirische Standardabweichung</p> <p>p Anzahl Positionen</p> <p>n Anzahl Messpunkte am Prüfkörper</p> <p>m Gesamtanzahl Messpunkte</p> <p>u Messunsicherheit</p> <p>v Residuum bei der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bzw. orthogonale Abstände am Böhler-Stern</p> <p>$Q(P)$ Fraktile der Ordnung P</p> <p>P Relative Häufigkeit</p> <p>P Messpunkt, Zentrumsposition</p> <p>i, j, k Zähler, Indize</p>	
17 3 Allgemeines zur Abnahme und Überwachung	
18 3.1 Prinzip der Abnahme und Überwachung	
19 Abnahme und Überwachung von TLS-Systemen erfolgen durch die Messung kalibrierter Prüfkörper. Diese müssen so beschaffen sein, dass ihre Eigenschaften keine nennenswerten Auswirkungen auf die Bestimmung der Kenngrößen haben. Dabei wird überprüft, ob die Messabweichungen innerhalb der vom Hersteller bzw. Betreiber festgelegten Grenzen liegen. Die Abmessungen der jeweils zu verwendenden Prüfkörper sind dabei auf den Radius einer das Messvolumen kleinstmöglich einschreibenden Kugel bezogen oder auf die verwendete Ortsauflösung. Form und Größe des Messvolumens, außerhalb dieser Kugel, sind vom Hersteller anzugeben.	
20 Kenngrößen für die Abnahme und die Überwachung von TLS-Systemen sind die Antastabweichung, die Kugelradienabweichung, die Abstandsabweichung und das Auflösungsvermögen.	
21 3.2. Betriebs- und Umgebungsbedingungen für Abnahme und Überwachung	
22 Vor der Abnahme oder Überwachung ist das TLS-System gemäß der besonderen Betriebsbedingungen für die Abnahme bzw. Überwachung aufzustellen und in Betrieb zu nehmen. Dabei sind eventuell notwendige Einlaufzeiten und Initialisierungsvorgänge zu beachten. Die Umgebungsbedingungen müssen den Betriebsbedingungen für das TLS-System entsprechen. Weiterhin ist zu beachten, dass die Aufstellung und Befestigung der Prüfkörper ausreichend stabil sind. Die Prüfkörper müssen die mittlere Temperatur des Messvolumens angenommen haben.	

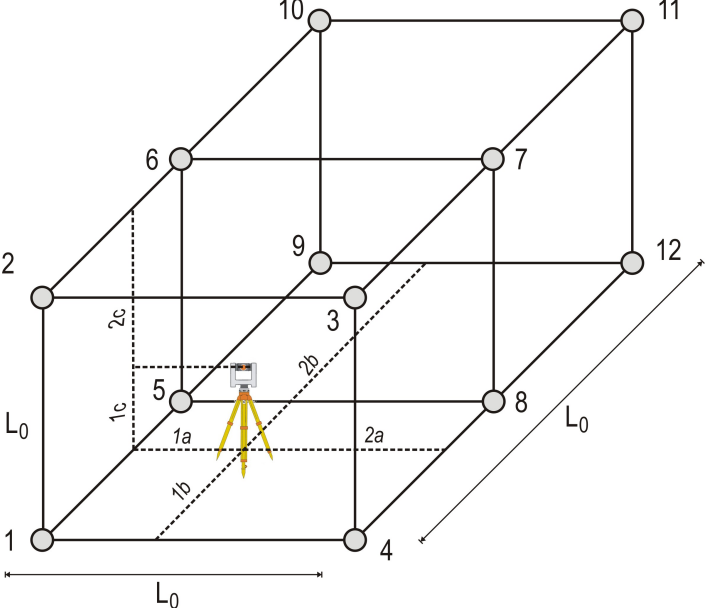
	Richtlinien-Text	Kommentare
	Weicht die mittlere Temperatur der Prüfkörper oder der Systemkomponenten des TLS-Systems von der Bezugstemperatur nach DIN 102 signifikant ab, sind entsprechende Temperaturkorrekturen vorzunehmen, sofern dies im normalen Gebrauch des TLS-Systems ebenfalls geschieht.	
23	Nach Abschluss der Abnahme oder Überwachung ist ein Protokoll zu erstellen, welches das summarische Abnahmeergebnis bzw. Überwachungsergebnisse enthält. Im Abnahmeprotokoll bzw. Übernahmeprotokoll sind alle gemessenen Werte zu dokumentieren.	
24	4 Abnahme	
25	Die Abnahme zum Nachweis der spezifizierten Genauigkeit ist in einem Vertrag zwischen dem Gerätehersteller und dem Betreiber zu vereinbaren. Sie wird beim Hersteller oder nach der Inbetriebnahme beim Anwender durchgeführt.	
26	4.1 Kenngröße Antastabweichung	
27	Durch die Kenngröße Antastabweichung wird das Abweichungsverhalten des TLS-Systems in einem kleinen lokalen Teil des Messvolumens beschrieben (Formtreue). Die Antastabweichung ist von unterschiedlichen Faktoren (Z.B.: Messentfernung, Ortsauflösung, Abtaststrate, Strahldivergenz, Form des Laserspots, Auftreffwinkel, Digitalisierungs- und Quantisierungsfehlern, Filterung) abhängig. Bei der Bestimmung der Kenngröße ist daher die entsprechende Betriebsart anzugeben. Wird die Betriebsart nicht angegeben, so gilt die Kenngröße für alle zulässigen Betriebsarten des TLS-Systems.	
28	4.1.1 Definition der Kenngröße	
29	Die Kenngröße Antastabweichung R ist Mittlere absolute Abweichung oder die Standardabweichung der orthogonalen Abstände der Messpunkte von der Oberfläche des Prüfkörpers. Wird als Prüfkörper eine Kugel benutzt, ist eine Kugel mit freiem Radius nach der Methode des kleinsten Fehlerquadratsumme zu approximieren.	
30	Die Antastabweichung kann auch als Funktion der Messentfernung beschrieben und zwischen Hersteller und Betreiber vereinbart werden (Kennlinie).	
31	4.1.2 Prüfkörper	
32	Zur Ermittlung der Kenngröße Antastabweichung werden Kugeln oder Ebenen aus Keramik, Stahl oder einem anderen geeigneten Material mit diffus streuender Oberfläche (nicht volumenstreuend, vernachlässigbare kleine Eindringtiefe, Reflektion nach dem Lambertschen Gesetz), bezüglich der Laserwellenlänge des TLS-Systems, verwendet. Der	

Richtlinien-Text	Kommentare
<p>Durchmesser der Prüfkörper soll mindestens das 10fache der Ortsauflösung Δw betragen. Die Formabweichung der Prüfkörper selbst soll kleiner als $\Delta w/5$ der zu überprüfenden Kenngröße sein. Für den Prüfkörper muss ein Kalibrierschein vorliegen.</p>	
<p>33 4.1.3 Durchführung</p>	
<p>34 Die Kenngröße Antastabweichung wird stichprobenartig an mindestens zwölf beliebigen Positionen innerhalb des Messvolumens gemessen. Empfohlen wird eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Positionen über das gesamte Messvolumen (Abb. 1).</p>	
<p>35</p>  <p style="text-align: center;">Abbildung 1</p>	
<p>36 4.1.4 Auswertung</p>	
<p>37 Zur Bestimmung der Kenngröße Antastabweichung wird für jede Position p des Prüfkörpers ein Ausgleichselement mit freien (zu schätzenden) Parametern (Kugelradius, Normalenvektor einer Ebene etc.) berechnet. Für jede Position werden die vorzeichenbehafteten orthogonalen Abstände der Messpunkte zum Ausgleichselement bestimmt. Dabei können maximal 10% der Messpunkte pro Position bei der Berechnung verworfen werden, wenn ihr Abstand signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% ist. Aus den verbleibenden Abständen wird die Antastabweichung als mittlere absolute Abweichung über alle Positionen berechnet.</p>	
<p>38 Mittlere absolute Abweichung aus $n = m \cdot p$ Abstände r_i für p</p>	<p>[Heister06]</p>

Richtlinien-Text	Kommentare
Prüfkörper mit je m Messpunkten: $R = 1/n \sum_{i=1}^n r_i $	
39 Alternativ kann die Antastabweichung als mittlere Standardabweichung der Abstände vereinbart und berechnet werden.	
40 Mittlere Standardabweichung der $n = m \cdot p$ Abstände r_i für p Prüfkörper mit je m Messpunkten: $R = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n r_i^2}$	[Kern08]
41 Werden als Prüfkörper Kugeln verwendet, ergibt sich die Antast-Messunsicherheit u_R als Mittelwert der Standardabweichungen $s_{rad,i}$ der geschätzten Kugelradien von p Kugeln. $u_R = \sqrt{1/p \sum_{i=1}^p s_{rad,i}^2}$	
42 4.1.5 Bewertung	
43 Die Kenngröße ist eingehalten, wenn die Antastabweichung den Wert der maximal zulässigen Antastabweichung R_{zul} nicht überschreitet. Tritt eine Überschreitung auf, so sind die Messungen an jeder Position zu wiederholen. Erreicht oder unterschreitet der gemessene Wert bei der Wiederholung den angegebenen Wert, so ist die Abnahme erfolgreich. Andernfalls ist die Abnahme nicht bestanden.	Abnahme erfolgreich, wenn $R \leq R_{zul}$
44 4.2 Kenngröße Kugelradienabweichung	
45 4.2.1 Definition der Kenngröße	
46 Die Kugelradienabweichung R_K spiegelt etwaige systematische Formabweichungen im Lokalen aufgrund der gekrümmten Kugeloberfläche wieder.	
47 4.2.2 Prüfkörper	
48 Als Prüfkörper sind Kugeln gemäß 4.1.2 zu verwenden.	
48 4.2.3 Durchführung	
49 Die Kugelradienabweichung kann aus den Beobachtungen zur Bestimmung der Antast- und/oder Abstandsabweichung berechnet werden, soweit deren Bestimmung mit Prüfkugeln erfolgt. Andernfalls sind Messungen gemäß 4.1.1 auf Kugeln durchzuführen.	
50 4.2.4 Auswertung	
51 Zur Berechnung der Kenngröße Kugelradienabweichung wird für jede Kugelposition p des Prüfkörpers ein Ausgleichselement mit freiem Radius bestimmt. Die Kugelradienabweichung ergibt sich dann als Mittelwert der Differenzen v_j zwischen geschätzten und vorgegebenen	

	Richtlinien-Text	Kommentare
	Radius laut Kalibrierschein von p Bestimmungen.	
52	4.2.5 Bewertung	
53	Die Kenngröße ist eingehalten, wenn die Kugelradienabweichung den Wert der maximal zulässigen Kugelradienabweichung $R_{K,zul}$ nicht überschreitet. Tritt eine Überschreitung auf, so sind die Messungen an jeder Position zu wiederholen. Erreicht oder unterschreitet der gemessene Wert bei der Wiederholung den angegebenen Wert, so ist die Abnahme erfolgreich. Anderenfalls ist die Abnahme nicht bestanden.	Abnahme erfolgreich, wenn $R_K \leq R_{K,zul}$
54	4.3 Kenngröße Abstandsabweichung	
55	Die Kenngröße Abstandsabweichung dient dazu, die Fähigkeit des Messsystems zur Längenmessung zu überprüfen und die Rückführbarkeit zu gewährleisten (vgl. dazu Längenmessabweichung in VDI/VDE 2617).	
56	4.3.1 Definition der Kenngrößen	
57	Die Abstandsabweichung ΔL ergibt sich durch Vergleich von gemessenen und kalibrierten Werten von Abständen oder Koordinatenabweichungen zweier oder mehrerer Zielmarkenmittelpunkten.	
58	Die gemessenen Werte werden aus Messwerten einer flächenhaften Abtastung abgeleitet.	
59	Die Kenngröße Abstandsabweichung wird als längenunabhängige Größe bestimmt und muss im gesamten spezifizierten Messvolumen eingehalten werden. Die Angabe von Kenngrößen für eingeschränkte Messvolumina ist zulässig.	
60	4.3.2 Prüfkörper	
61	Im Falle der Bestimmung der Abstandsabweichung aus Abständen zwischen zwei Zielmarkenmittelpunkten werden Prüfkörper mit hantelförmig angeordneten Antastelementen (hantelförmiger Prüfkörper) eingesetzt.	
62	Im Falle der Bestimmung der Abstandsabweichung aus Koordinatenabweichungen zwischen mehreren Zielmarkenmittelpunkten wird ein 3D-Prüfkörperfeld mit gleichmäßig im Messvolumen verteilten Antastelementen eingesetzt.	
63	Als Antastelemente können Kugeln oder andere zwischen Hersteller und Betreiber vereinbarte Zielmarken eingesetzt werden.	
64	Die Formabweichung der Antastelemente und die Radien der Kugeln sollen mit einer Unsicherheit kleiner als 1/5 der zu prüfenden Kenngröße bekannt sein.	

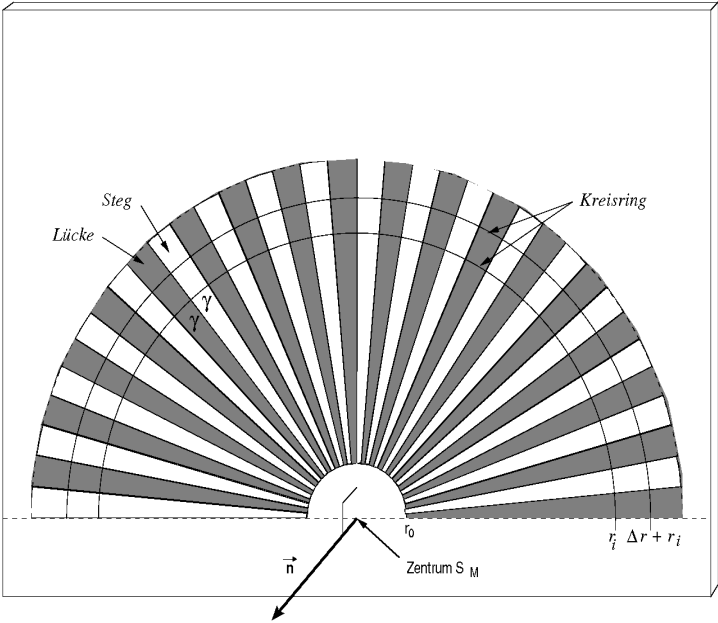
Richtlinien-Text	Kommentare
<p>65 Die Abmessungen des hantelförmigen Prüfkörpers soll mindestens ein 1/10 des Radius einer das Messvolumen kleinstmöglich einschreibenden Kugel betragen. Die kalibrierte Länge (Abstand zwischen den Antastelementen) des hantelförmigen Prüfkörpers müssen mit einer Unsicherheit kleiner als 1/3 der zu prüfenden Kenngröße bekannt sein. Für den hantelförmigen Prüfkörper muss ein Kalibrierschein vorliegen.</p>	
<p>66 Das 3D-Prüfkörperfeld muss das Volumen der das Messvolumen kleinstmöglich einschreibenden Kugel abdecken. Die dreidimensionalen Positionen der Mittelpunkte der Antastelemente im 3D-Prüfkörperfeld müssen mit einer Unsicherheit kleiner als 1/3 der zu prüfenden Kenngröße bekannt sein. Die Bestimmung der Mittelpunktpositionen muss mit einem Messsystem durchgeführt werden, für das ein Kalibrierschein vorliegt.</p>	
<p>67 4.3.3 Durchführung</p>	
<p>68 4.3.3.1 Hantelförmiger Prüfkörper</p>	
<p>69 Die vom Hersteller angegebene Kenngröße Abstandsabweichung muss im gesamten Messvolumen für jede beliebige Anordnung der hantelförmigen Prüfkörper eingehalten werden. Ihre Bestimmung erfolgt stichprobenartig anhand sieben unterschiedlichen Positionen. Es wird empfohlen, den hantelförmigen Prüfkörper in den folgenden Orientierungen aufzustellen und zu messen (Abb. 2):</p> <ul style="list-style-type: none"> • parallel zu Kanten des Messvolumens (Pos. 1 , 2 und 3) • in einer Flächendiagonalen der vorderen (Pos. 4), der hinteren (Pos. 5) und einer seitlichen Begrenzungsebene (Pos. 6) des Messvolumens • in einer Raumdiagonalen des Messvolumens (Pos. 7) 	
<p>70</p>  <p style="text-align: center;">Abbildung 2</p>	

Richtlinien-Text	Kommentare
<p>71 4.3.3.2 3D-Prüfkörperfeld</p> <p>72 Die vom Hersteller angegebene Kenngröße Abstandsabweichung muss im gesamten Messvolumen für jede beliebige Anordnung der Antastelemente eingehalten werden. Ihre Bestimmung erfolgt stichprobenartig anhand von zwölf unterschiedlichen Positionen. Für die Anordnung wird folgendes Schema empfohlen (Abb. 3). In einem das Messvolumen repräsentierenden Quader werden Antastelemente</p> <ul style="list-style-type: none"> • in den 8 Ecken des Quaders • und an den 4 Punkten, die sich durch Schnitt mit der Vertikalebene ergeben, die den Quader halbiert, <p>positioniert. Die Messposition des TLS-System ist so zu wählen, dass sich Messabstände zu den Quaderseiten ergeben, die die Abständen zwischen parallel gegenüberliegenden Quaderseiten im Verhältnis 1:2 teilen.</p>	
<p>73</p>  <p style="text-align: center;">Abbildung 3</p>	

	Richtlinien-Text	Kommentare
74	4.3.4 Auswertung	
75	4.3.4.1 Hantelförmiger Prüfkörper	
76	Werden als Antastelemente Kugeln verwendet, so ist zur Bestimmung der Kenngröße Abstandsabweichung ΔL an die gemessenen Flächensegmente der Kugeln des hantelförmigen Prüfkörpers eine Kugelgeometrie nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bei vorgegebenen Kugelradien anzupassen. Der Kugelradius ist dem Kalibrierschein des hantelförmigen Prüfkörpers zu entnehmen.	
77	Bei Verwendung anderer Antastelemente sind die Mittelpunkte der Zielmarken mit dem vom Hersteller hierfür vorgesehen Rechenverfahren zu bestimmen.	
78	Generell können maximal 10% der Messpunkte pro Antastelement bei der Berechnung verworfen werden, wenn ihr Abstand signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% ist.	
79	Aus den Mittelpunktskoordinaten der Antastelemente wird die gemessene Länge $\Delta l_{m,i}$ des hantelförmigen Prüfkörpers je Position i berechnet. Aus der Differenz der gemessenen Länge mit der kalibrierten Länge $\Delta l_{k,i}$ des hantelförmigen Prüfkörpers ergibt sich die Abstandsabweichung ΔL_i für die Position i : $\Delta L_i = \Delta l_{k,i} - \Delta l_{m,i}$	
80	Aus p verschiedenen Positionen des hantelförmigen Prüfkörpers ergibt sich dann als Mittel der absoluten Differenzen aus allen p Einzelbestimmung die Abstandsabweichung des TLS-Systems zu: $\Delta L = 1/p \sum_{i=1}^p \Delta L_i $	
81	Die Abstands-Messunsicherheit u_L ergibt sich wie folgt als Standardabweichung aus wahren Abweichungen . $u_L = \sqrt{1/p \sum_{i=1}^p \Delta L_i^2}$	
82	4.3.4.2 3D-Prüfkörperfeld	
83	Werden als Antastelemente Kugeln verwendet, so ist an die gemessenen Flächensegmente der Kugeln eine Kugelgeometrie nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bei vorgegebenen Kugelradien anzupassen. Der Kugelradius ist dem Kalibrierschein zu entnehmen.	
84	Bei Verwendung anderer Antastelemente sind die Mittelpunkte der Zielmarken mit dem vom Hersteller hierfür vorgesehen Rechenverfahren zu bestimmen.	
85	Generell können maximal 10% der Messpunkte pro Antastelement bei der Berechnung verworfen werden, wenn ihr Abstand signifikant mit einer	

	Richtlinien-Text	Kommentare
	Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% ist.	
86	Zur Berechnung der Kenngröße Abstandsabweichung sind die p gemessenen Mittelpunkte der Antastelemente $P_i(x_{m,i}, y_{m,i}, z_{m,i})$ auf die kalibrierten Mittelpunktpositionen $P_i(x_{k,i}, y_{k,i}, z_{k,i})$ zu transformieren. Die Koordinatentransformation ist mit sechs Freiheitsgraden und vorgegebenen Maßstabsfaktor gleich Eins sowie mit fehlerfreien kalibrierten Mittelpunktpositionen nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate mit einheitlichen Gewichten auszuführen. Maximal eine gemessene Mittelpunktposition darf bei der Berechnung verworfen werden.	
87	Aus den nach der Koordinatentransformation verbleibenden Residuen v_x, v_y, v_z für die einzelnen Koordinaten der gemessenen Mittelpunktpositionen berechnet sich die Abstandsabweichung ΔL als Helmertscher Punktfehler zu: $\Delta L = \sqrt{1/p (\sum_i^p v_{x,i}^2 + v_{y,i}^2 + v_{z,i}^2)}$	
88	Die Abstands-Messunsicherheit u_L ergibt sich wie folgt ???	
89	4.3.5 Bewertung	
90	Die Kenngröße Abstandsabweichung ist eingehalten, wenn sie den Grenzwert der maximal zulässigen Abstandsabweichung ΔL_{zul} betragsmäßig nicht überschreitet. Tritt maximal bei einer Position eine Überschreitung auf, muss die Messung an dieser einen Position wiederholt werden. Hierbei darf keine weitere Überschreitung auftreten. Anderenfalls ist die Abnahme nicht bestanden.	Abnahme erfolgreich, wenn $\Delta L \leq \Delta L_{zul}$
91	4.4 Kenngröße Auflösungsvermögen	
92	Die Kenngröße Auflösungsvermögen soll die Fähigkeit des TLS-System quantitativ beschreiben, inwieweit eine lokale, dreidimensionale Oberflächenstruktur lateral und longitudinal zur Messrichtung durch die abgetastete Punktmenge signifikant diskretisiert werden kann.	
93	Das Auflösungsvermögen wird u.a. beeinflusst durch die Ortsauflösung (Winkelinkremente), die Strahldivergenz, dem Auftreffwinkel und der Fähigkeit der Signalverarbeitung, Echos in Mischsignalen voneinander zu trennen. Diese Einflussgrößen verändern sich mit der Messentfernung, so dass das Auflösungsvermögen als Kennlinie in abhängig von der Messentfernung zu beschreiben ist. Zudem kann eine Abhängigkeit von der Orientierung der Oberflächenstruktur zur Abtastrichtung nicht ausgeschlossen werden.	
94	Zur Bestimmung des Auflösungsvermögens werden Messungen auf einen Böhler-Stern vorgenommen.	

	Richtlinien-Text	Kommentare
95	4.4.1 Definition der Kenngröße	
96	Das Auflösungsvermögen $AV(D)$ ist durch diejenige minimale Spaltenbreite $r_{min} \gamma$ am Testkörper Böhler-Stern gegeben, bei dem die Punktwolkenmenge im Abstand r_i vom Zentrum S_M in die zur Vorderfront gehörige und die zur Rückseite gehörige Punktwolkenteilmengen mit der Irrtumswahrscheinlichkeit α getrennt werden kann.	
97	4.4.2 Prüfkörper	
98	Der Prüfkörpers Böhler-Stern weist ein konstantes Verhältnis zwischen lateraler und longitudinaler Feinstruktur auf, die in möglichst vieler Orientierungen realisiert sind. Das Verhältnis sollte eins betragen, um möglichst anwendungsrelevante Verhältnisse widerzuspiegeln.	
99	Die Feinstruktur des Prüfkörpers Böhler-Stern ergibt sich durch eine halbkreisförmige Schablone mit sich verjüngenden Spalten (Lücken) auf der Vorderseite (Abb. 4). Die Rückwand besteht aus einem Teil einer Kegelmantelfläche mit einem Kegelöffnungswinkel von $\varphi = b \gamma$, sodass an jeder Stelle des Böhler-Sterns das Verhältnis b von Spaltenbreite zu Spaltentiefe gewährleistet ist. Die Krümmung der Kegelmantelfläche wird dabei vernachlässigt aufgrund des geringen Einflusses auf die Bestimmung des Auflösungsvermögens. Die Kegelspitze und der Punkt der Schablone in dem die Spalten aufeinander zu laufen bilden das Zentrum S_M des Böhler-Sterns.	
100	Größe, Form und Gestalt des Prüfkörpers Böhler-Stern sind mit einer Unsicherheit kleiner als 1/3 der zu prüfenden Kenngröße zu kalibrieren.	
101	4.4.3 Durchführung	
102	Die Bestimmung der Kennlinie für die Kenngröße Auflösungsvermögen erfolgt an mindestens $p=3$ Positionen für den Prüfkörper Böhler-Stern, sodass der zwischen Hersteller und Betreiber vereinbarte Messentfernungsbereich gleichmäßig abgedeckt wird.	
103	Der Prüfkörper Böhler-Stern ist auf jeder Position mit einer Unsicherheit besser als 1gon auf das TLS-System auszurichten. Die Messentfernung D ist mit Unsicherheit kleiner als 1/3 der zu prüfenden Kenngröße zu bestimmen.	
104	Der Prüfkörper Böhler-Stern ist auf jeder Position mit der vereinbarten Ortsauflösung vollständig abzutasten.	
105	4.4.4 Auswertung	
106	Die Messpunkte je Position, die sich innerhalb des Halbkreises der	

Richtlinien-Text	Kommentare
Schablone, bei frontaler Betrachtung des Prüfkörpers, befinden sind von den anderen Messpunkten zu segmentieren.	
107 Das Verwerfen von Messpunkten aus der so segmentierten Menge an Messpunkten ist unzulässig.	
108 Die Ausrichtung des Prüfkörpers zum TLS-System wird durch eine Auswahl von Messpunkten der Schablone berechnet. Für die Auswahl sind nur Messpunkte zu wählen, die zweifelsfrei auf den Stegen der Schablone liegen. Anhand dieser Messpunktauswahl wird ein Ebene approximiert, deren Normalenvektor die Ausrichtung des Prüfkörpers beschreibt und als Ist-Modell für die Schablone dient.	
109 Für die segmentierten Messpunkte sind die orthogonalen Abstände v_i zum Ist-Modell der Schablone zu berechnen und j Kreisringen der Dicke Δr zuzuordnen: $r_j \leq v_i < r_j + \Delta r$	
110 Die Dicke der Kreisringe sollte maximal ein Zehntel des maximalen Radius des Böhler-Sterns betragen.	
111 Das Verwerfen von Messpunkten aus der den Kreisringen zugeordneten Menge an Messpunkten ist unzulässig.	
112  Abbildung 4	

	Richtlinien-Text	Kommentare
113	<p>Für die orthogonalen Abstände eines Kreisringes $v_{j,i}$ sind die Fraktile (bzw. Quantile) $Q(0,25)_j$ und $Q(0,75)_j$ zu bestimmen und daraus der gemessene Abstand</p> $\Delta l_{j,m} = Q(0,75)_j - Q(0,25)_j$ <p>zwischen Schablonenvorderseite und Rückwand zu berechnen.</p>	
114	<p>Die Kenngröße Auflösungsvermögen ergibt sich an der jeweiligen Position, bzw. für die jeweilige Messentfernung D, durch Vergleich der gemessenen Abstände $\Delta l_{j,m}$ mit den kalibrierten Abstände am Böhler-Stern $\Delta l_{j,k}$ über alle Kreisringe einer Position hinweg betrachten.</p>	
115	<p>Für den Kreisring j mit dem kleinsten Radius r_{min} bei dem die betragsmäßige Differenz $\Delta l_{j,k} - \Delta l_{j,m}$ mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von α signifikant von Null abweicht ergibt sich das Auflösungsvermögen zu:</p> $AV(D) \geq r_{min} \gamma$	
116	4.4.5 Bewertung	
117	<p>Die Kennlinie für die Kenngröße Auflösungsvermögen ist eingehalten, wenn die Grenzwerte des maximal zulässigen Auflösungsvermögens $AV(D)_{zul}$ nicht überschreiten. Tritt maximal bei einer Position eine Überschreitung auf, muss die Messung an dieser einen Position wiederholt werden. Hierbei darf keine weitere Überschreitung auftreten. Anderenfalls ist die Abnahme nicht bestanden.</p>	
118	4.5. Abnahmeergebnis	
119	<p>Im Falle keiner Überschreitung der Kenngrößen, erfüllt das TLS-System die Anforderungen gemäß dieser Richtlinie und darf entsprechend gekennzeichnet werden. Andernfalls gilt das TLS-System als nicht konform zu dieser Richtlinie.</p>	
120	5 Überwachung	
121	<p>Die Überwachung von TLS-Systemen dient der langfristigen Einhaltung der vom Betreiber festgelegten Kenngrößen Antastabweichung, Kugelradienabweichung, Abstandsabweichung und Auflösungsvermögen. Der Vergleich der Ergebnisse aufeinander folgender Überwachungen gestattet eine Trendanalyse hinsichtlich der Veränderungen der Systemeigenschaften. Hieraus können sowohl Rückschlüsse auf vorsorgliche Wartungsarbeiten an TLS-Systemen als auch auf das Überwachungsintervall abgeleitet werden. Für Trendanalysen müssen die Betriebsarten und die Betriebsbedingungen vergleichbar sein.</p>	
122	5.1 Durchführung	
123	<p>Es wird empfohlen, die Überwachung von TLS-Systemen in analoger Weise wie die Abnahme durchzuführen (siehe Abschnitt 4). Die</p>	

	Richtlinien-Text	Kommentare
	<p>Kenngößen Antastabweichung, Abstandsabweichung, Kugelradienabweichung und Auflösungsvermögen können jedoch vom Betreiber entsprechend seinen Anforderungen festgelegt werden. Der Betreiber kann die Anzahl der Messungen reduzieren. Bei Überschreitungen dürfen Wiederholungsmessungen unter gleichen Bedingungen wie bei der Abnahme vorgenommen werden.</p>	
124	5.2 Auswertung	
125	Die Auswertung zur Bestimmung der Kenngöße erfolgt in analoger Weise wie bei der Abnahme.	
126	Im Falle einer Überschreitung einer der Kenngößen ist das System als nur bedingt einsatzfähig zu kennzeichnen. Es sind geeignete Maßnahmen zur Fehlerbeseitigung zu ergreifen.	
127	5.3 Überwachungsintervall	
128	Das Überwachungsintervall muss vom Betreiber eines TLS-Systems individuell festgelegt werden. Es wird bestimmt durch die Art und die Anzahl der Systemkomponenten, die geforderte Messunsicherheit und die Umgebungsbedingungen an den wechselnden Aufstellungsorten des TLS-Systems.	
129	Die Überwachung eines TLS-System ist nach einem festzulegenden Prüfplan abhängig von der Stabilität der Systemkomponenten durchzuführen und schließt auch Sichtprüfungen (Prüfung auf Beschädigung) und schnelle Feldprüfverfahren mit ein.	