

Abnahme und Überwachung photogrammetrischer Messsysteme nach VDI 2634, Blatt 1

ULRICH RAUTENBERG, Wolfsburg & MANFRED WIGGENHAGEN, Hannover

Zusammenfassung: Im Zuge der gestiegenen Leistungsfähigkeit und eines hohen Automatisierungsgrades ist auch die Anzahl der industriellen Anwendungen für optische 3D-Messsysteme gestiegen. Unabdingbar für einen praxisgerechten Gebrauch dieser Systeme sind Abnahme- und Überwachungsvorschriften, wie sie mit der VDI-Richtlinie 2634 seit kurzer Zeit bestehen. Bisher waren jedoch noch wenige Erfahrungen bei der Umsetzung veröffentlicht, teilweise auch auf Grund eines Mangels an geeigneten Referenzkörpern. In diesem Beitrag sollen die Vorgehensweise und Erfahrungen bei der Umsetzung des Blattes 1 dieser Richtlinie bei der Volkswagen AG dargestellt werden. Dies erstreckt sich von der Einführung in den Sachverhalt, über die Konzeptentwicklung und deren Prüfung in Simulationsrechnungen bis zur praktischen Anwendung des Prüfkörpers in einem gemeinsamen Projekt mit der PTB in Braunschweig.

Möglich wurde eine Anwendung erst mit dem Abschluss der Entwicklung neuartiger Maßverkörperungen für optische Messsysteme bei Volkswagen, die bei geeigneter Länge ein sehr hohes Genauigkeitspotenzial aufweisen.

Summary: *Acceptance test and verification test for photogrammetric measuring systems based on VDI guideline 2634, page 1.* The increasing efficiency and the high grade of automation lead to the fact that the number of industrial applications based on optical 3D-measuring systems has been increased. Important for the practical use are acceptance and verification instructions which recently exist in the VDI guideline 2634. Partly caused by a lack of qualified reference objects only a few results about the realisation have been published in the past. In this paper the proceedings and experiences after the realisation of guideline 2634, page 1 at the Volkswagen AG are presented. An introduction to the main topic, the development of concepts, the verification with simulation calculations and the practical application of the test object in a common project with the PTB Braunschweig, are described.

The application could be carried out just after the development of new test objects for optical measuring systems at Volkswagen AG, which offer a very high accuracy using suitable lengths of the scale bars.

1 Einleitung

Der Einsatz digitaler photogrammetrischer Messsysteme gewinnt in der industriellen Anwendung zunehmend an Bedeutung. Wesentliche Gründe dieser Entwicklung liegen in der Fähigkeit der berührungslosen Messung und der Möglichkeit, große und komplexe Objekte in relativ kurzer Zeit zu erfassen. Kennzeichnend für einige dieser Systeme ist eine hohe Flexibilität in der Anwendung. Sie werden unter anderem in der Produktion als Prüfmittel für Form und Maß oder zum Digitalisieren von Modellen in der Entwicklung eingesetzt.

So werden optische 3-D-Industriemesssysteme zunehmend auch in Bereichen der Qualitätssicherung eingesetzt, in denen bisher taktile antastende Geräte, wie zum Beispiel Koordinatenmessmaschinen, verwendet wurden. Hier herrscht im Gegensatz zu den taktilen Koordinatenmessgeräten noch ein Mangel an anwendbaren Prüfstandards für Sensoren und Systeme, die optisch im dreidimensionalen Raum messen. Dies ist jedoch für die Akzeptanz und Anwendung der Systeme von großer Bedeutung. Gerade auch mit dem Blick auf die ISO 9000ff und deren Bedeutung für die eingesetzten Prüf-

und Messmittel steigt die Relevanz eines geeigneten Nachweisverfahrens.

Dies sollte ein Verfahren sein, mit dem sowohl Hersteller als auch Anwender auf eine einfache und klare Weise die Messgenauigkeit des jeweiligen Systems überprüfen und nachweisen können. Als Ergebnis soll eine eindeutige Entscheidung stehen, ob die Prüfung bestanden wurde oder nicht. Die Ermittlung der Kenngröße muss einsichtig und reproduzierbar sein.

Um diese Lücke auf dem Feld der optischen 3D-Messsysteme zu füllen, steht seit kurzem die Richtlinie VDI/VDE 2634, Blatt 1 und 2 zur Verfügung. Erfahrungen in der praktischen Anwendung dieser Richtlinie fehlen bisher noch. Ein weiteres Problem besteht darin, dass für die Verkörperung von Messvolumen, wie sie in der industriellen Anwendung (Seitenlängen von 2–3 m) häufig vorkommen, bis vor kurzem keine geeigneten Referenzkörper zur Verfügung standen. Zu diesem Zweck wurden bei der Volkswagen AG Maßstäbe entwickelt, die sowohl zur Überwachung der Messsysteme als auch als Systemmaßstab im Gebrauch dienen sollen.

2 Prüfung optischer Systeme

Als Anforderungen für ein Verfahren zur Abnahme und Überwachung lassen sich folgende Punkte anführen:

- Erfassung möglichst aller gerätespezifischer Fehlereinflüsse
- Ausgabe von möglichst einheitlichen und einfach zu interpretierenden Kennzahlen als Gütekriterien. Im Gegensatz zu statistischen Kenngrößen, wie etwa die Standardabweichung, sind Längenabweichungen bezogen auf Referenzlängen einfach zu interpretieren. Zusätzlich halten Längenabweichungen als Qualitätsparameter zunehmend Einzug in Richtlinien.
- Geringer Aufwand an Zeit, Kosten und Personal
- Das Verfahren soll weitgehend mit vorhandenen Richtlinien und Normen übereinstimmen.
- Rückführbarkeit auf nationale Normale

- Vergleichbarkeit verschiedener Messsysteme. Zu diesem Punkt ist es sinnvoll, Konfiguration von Prüfkörper und Sensoren sowie die Strategie der Messung einheitlich vorzugeben.

Für mechanische Koordinatenmessmaschinen (KMG) existieren schon seit längerem Standards und Prüfverfahren zur Kontrolle und Beurteilung der messtechnischen Leistungsfähigkeit. Hier seien vor allem die VDI/VDE 2617 „Genauigkeit von Koordinatenmessmaschinen“, die DIN ISO 10 360 Teil 2 „Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Koordinatenmessmaschinen“ und ISO „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)“ genannt. Sie stellen allgemein anerkannte Standards, Definitionen sowie Abnahme- und Überwachungsverfahren mit den entsprechenden Berechnungsgrundlagen bereit.

Nun unterscheiden sich aber photogrammetrische Industriemesssysteme in wesentlichen Punkten von den herkömmlichen Koordinatenmessmaschinen.

So sind optische 3-D-Messsysteme in der Lage, mehrere Messpunkte gleichzeitig zu erfassen. KMGs hingegen führen die Aufnahme der Punkte einzeln hintereinander durch. Die Leistungsfähigkeit von Photogrammetriesystemen wird stark von der Konfiguration der Messung beeinflusst, da sie nach dem Triangulationsprinzip arbeiten und somit sehr flexibel in der Anordnung der Aufnahmestandpunkte und des erfassten Messvolumens sind. Denn in einem spezifizierten Messvolumen sind durch maßstabs- und konfigurationsbedingte Faktoren keine homogenen Genauigkeitsverhältnisse zu erwarten (LUHMANN 2000). Aus der genannten Funktionsweise ergibt sich außerdem die Möglichkeit der freien Wahl der Anzahl von Bildern und Messpunkten sowie der Sensoren, Objektive und Punkt-signalisierung.

Aus dem theoretisch frei skalierbaren Messvolumen ergibt sich das Problem der Maßstabsverkörperung, sowohl für die Anwendung als auch zum Zwecke der Prüfung. Auch standen bis vor kurzem kaum geeignete Referenzen zur Verfügung, um größere Messvolumen zu verkörpern.

Aus diesen Gründen erscheint es nicht sinnvoll, die bisherigen Verfahren basierend auf DIN ISO 10 360-2 und VDI/VDE 2617 ohne weiteres auch auf optische Industriemesssysteme zu übertragen. Angemerkt sei hierzu jedoch noch einmal, dass die Beibehaltung von bestehenden Definitionen und Strategien bei Weiterentwicklung der Richtlinien durchaus zur Akzeptanz und Konsistenz der Normenreihe beiträgt, da sich der Personenkreis der Anwender im industriellen Bereich kaum ändert.

3 Richtlinie VDI 2634, Blatt 1

Um dem Mangel an geeigneten Richtlinien zu begegnen, wurde im Fachausschuss „Optische 3D-Messtechnik“ der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) und im Arbeitskreis „Nahbereichsphotogrammetrie“ der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF) die Richtlinie VDI/VDE 2634 „Optische 3D-Messsysteme“ in Blatt 1 und 2 erarbeitet. Sie steht als Entwurf seit Ende 1999 zur Verfügung.

Blatt 1 enthält praxisnahe Abnahme- und Überwachungsverfahren zur Beurteilung von bildgebenden optischen 3D-Messsystemen mit punktförmiger Antastung hinsichtlich ihrer Genauigkeit. Dies sind mobile, flexible optische Systeme mit einem oder mehreren bildgebenden Messköpfen. Die Antastung des Objektes geschieht dabei optisch oder taktil.

In Blatt 2 dieser Richtlinie werden optische Messsysteme mit flächenhafter Antastung behandelt.

Der Schwerpunkt dieses Beitrages bezieht sich auf die Empfehlungen des Blattes 1 und beschränkt sich auf optisch antastende Systeme.

3.1 Prinzip

Eine Abnahme und Überwachung nach VDI/VDE 2634, Blatt 1, wird durch Messung kalibrierter eindimensionaler Prüfkörper, die im Messvolumen angeordnet werden, durchgeführt. Das Verfahren gestaltet sich hier einstufig mit der Ermittlung der Längenmessabweichung, da bei punktmes-

senden Systemen die Antastabweichung bereits in der Kenngröße Längenmessabweichung enthalten ist. Die Prüfkörper sollen dabei so angetastet werden, wie es im normalen Gebrauch des Systems geschieht. Eine Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse soll durch die Festlegung von Betriebsarten und Betriebsbedingungen gewährleistet werden.

Unter den genauer zu spezifizierenden Betriebsarten werden in diesem Zusammenhang folgende Parameter verstanden:

- Beleuchtungsart und -intensität
- Messvolumen
- Art, Anzahl und Anordnung der verwendeten Messköpfe
- Art und Dauer der Bildaufnahme sowie der Auswertung
- Art, Anzahl und Form der zu analysierenden Merkmale

Die Betriebsbedingungen umfassen die äußeren Einflüsse, die auf das Messsystem wirken:

- Temperatur und Feuchtegradient
- Feuchte
- Mechanische Schwingungen
- Elektromagnetische Störeinflüsse
- Umgebungsbeleuchtung
- Staub

3.2 Referenz

Als Prüfkörper sollen eindimensionale kalibrierte Referenzen verwendet werden, deren Genauigkeit mit einer Unsicherheit von weniger als 1/5 der vom Hersteller angegebenen maximalen Längenmessabweichung bekannt sein soll. Sie sollen als Messlinie im Messvolumen die Möglichkeit bieten, mindestens 5 Teillängen auszuwerten zu können. Weicht die mittlere Temperatur der Prüfkörper signifikant von der Bezugstemperatur ab, so sind entsprechende Korrekturen vorzunehmen.

Als Empfehlung für das Messvolumen wird eine Ausdehnung von 2000 mm × 2000 mm × 1500 mm gegeben. Die Testlängen können wie in Abb. 1 gezeigt angeordnet werden. Hier soll als längste Testlänge mindestens die Länge der kürzesten Seitenlänge gewählt werden und die größte Länge sollte

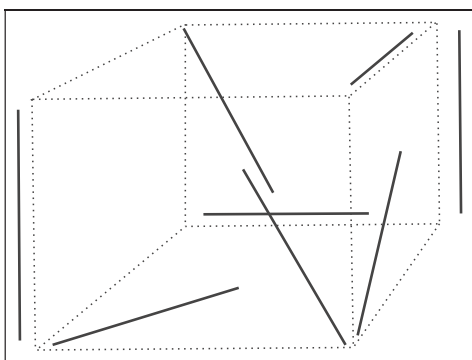


Abb. 1: Anordnung der Messlinien.

mindestens 2/3 der Raumdiagonalen betragen. In jeder Ecke des Messvolumen soll sich ein Endpunkt der längsten Testlängen befinden.

3.3 Kenngröße

Die dreidimensionale Längenmessabweichung Δl wird als Differenz zwischen dem gemessenen Abstand l_m und kalibrierten Abstand l_k zweier Punkte definiert:

$$\Delta l = l_m - l_k \quad (1)$$

Ihr Grenzwert E bezeichnet die maximal zulässige Längenmessabweichung und wird hier als längenabhängige Größe angegeben. Sie stellt hier die Kenngröße in Anlehnung an DIN ISO 10 360-2 dar:

$$E = A + K \cdot L \leq B \quad (2)$$

mit

- E Kenngröße Längenmessabweichung
- A Konstanter Anteil der Kenngröße
- K Konstante
- L Messlänge
- B maximaler Wert der Kenngröße

4 Prüfkörper

Bei der Durchführung der Untersuchung kamen bei der Volkswagen AG entwickelte neuartige Maßstäbe zum Einsatz. Der Träger besteht aus CFK-Rohren mit einem Durchmesser von 43 mm. Zur Aufnahme

der Messmarken sind diese Rohre durch Vollmaterialstäbe unterbrochen. CFK bietet im Vergleich zu Metalllegierungen einen geringeren Ausdehnungskoeffizienten von $0-0,5 (10^{-6}) K^{-1}$ sowie Vorteile bei Gewicht und Durchbiegung (E-Modul). Des Weiteren ist der Maßstab zum Transport oder nach Anforderung in der Mitte teilbar. Diese Eigenschaften kommen den Werkstoffanforderungen an ein hochpräzises Längenmesswerkzeug nach, welche definiert werden durch:

- hohe Maßhaltigkeit auch unter extremen Temperatur- und Feuchteeinwirkungen
- linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_t gleich oder nahe Null über einen weiten Bereich der Einsatztemperatur
- geringes Einsatzgewicht
- hohe Formstabilität
- Korrosionsbeständigkeit
- geringe Auswirkung wechselnder Umgebungsfeuchte

Der Maßstab verkörpert durch sechs Messmarken 15 verschiedene Längen zwischen 2626 mm und 326 mm (Abb. 2).

Die Kalibrierung der Maßstäbe erfolgt mit Hilfe eines optisch antastenden Koordinatenmessgerätes in Verbindung mit zwei Laserinterferometern und erzeugt eine Gesamtunsicherheit von weniger als $5 \mu m$. Die Messmarke ist mehrschichtig aufgebaut und in die neutrale Faser des Maßstabträgers eingebracht (Abb. 3). Das reflektierende Retro material befindet sich in einem Abstand von 1 bis 2 mm auf einem austauschbaren Stempel unter der chrombeschichteten Glasmarke. Die Einbringung in die neutrale Faser bewirkt, dass sich Verbiegungen des Trägers nur noch als Fehler 2. Ordnung auf die Abstände zwischen den Messmarken auswirken.

Die Glasmarke ist kameraseitig teilspeigelt, um einfallendes Licht möglichst wenig zu reflektieren. Auf dieser Seite ist auf das Glasplättchen eine dünne, lichtundurchlässige Chromschicht (Dicke $< 5 \mu m$) mit einer kreisförmigen Blende mittels *Diadur IV-Verfahrens* aufgebracht. Die Blende besitzt so eine Abweichung von der Rundheit, die weniger als $1 \mu m$ beträgt und einen Durchmesser von 10 mm. In der Mitte der

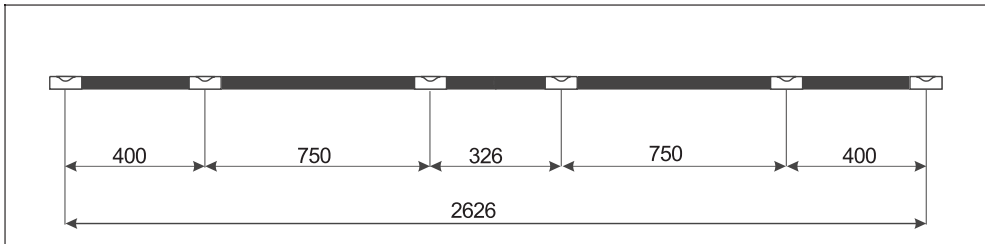


Abb. 2: Maßstab mit 6 Messmarken.

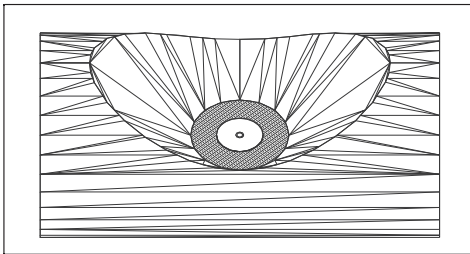


Abb. 3: Vollmaterialstück mit Messmarke.

Marke ist noch eine weitere kreisrunde Markierung mit 1,75 mm Durchmesser aufgebracht, um ebenfalls eine Anzielung durch Theodolitsysteme zu ermöglichen.

Dieser Messmarkentyp hat folgende Vorteile:

- hohe Kantenschärfe der aufgetragenen Markierung
- hohe Durchmesser Genauigkeit ($< 1 \mu\text{m}$)
- hohe Zentrität der beiden aufgetragenen Kreise

Durch die Austauschbarkeit der Markenhintergründe lassen sich verschiedene aktive oder passive Kulissen wie Retrofolie, Papier oder LED-Beleuchtung realisieren.

5 Vorgeschlagene Konzeptionen und Simulation

5.1 Anordnung des Messaufbaus

In Anlehnung an die VDI/VDE-Richtlinie 2634 wird eine entsprechende Anordnung der Maßstäbe im Messvolumen gewählt. Diese Anordnung trägt der Tatsache Rechnung, dass bei symmetrischen Aufnahme-standpunkten Objektpunkte, die am Rande des Messvolumens liegen, auch am Mess-

bildrand abgebildet werden. Hier ist im Allgemeinen durch Verzeichnungseinflüsse und ungünstigere Schnittbedingungen auch mit schlechteren Genauigkeiten zu rechnen, als im Zentrum des Objekts (DOLD 1997). Um eine größere Flexibilität in der Anwendung zu ermöglichen, werden zwei Maßstäbe drehbar angeordnet. Im Abb. 4 sind dies die Maßstäbe waagrecht und senkrecht an der rechten Seite.

Zusätzlich wird ein weiterer Maßstab waagrecht an einer der oberen Seiten eingeführt, der als ergänzende Testlänge oder als Systemmaßstab benutzt werden kann. Zur Unterstützung der Verknüpfung der einzelnen Aufnahmen wurden an den Streben des Gestells zusätzliche Verknüpfungspunkte sowie Halterungen für verschiedenartige kodierte Messmarken angebracht, so dass insgesamt 155 zusätzliche Punkte definiert wurden. Versuchsweise wurde ihre Anzahl auf 123 und 90 reduziert.

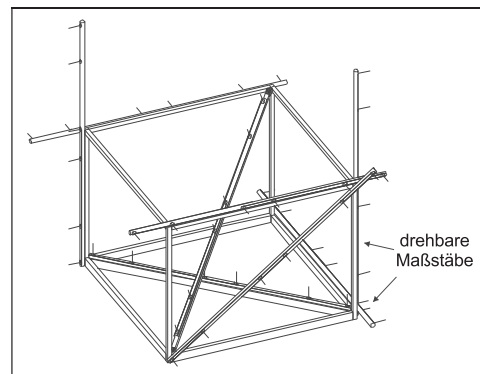


Abb. 4: Anordnung der Maßstäbe.

5.2 Aufnahmekonfiguration

Es wurden zwei grundsätzlich verschiedene Arten der Anordnung der Aufnahmen gewählt. Der volle Rundumverband stellt als ideale Konfiguration die Methode dar, so wie sie unter günstigen Bedingungen auch bei industriellen Messungen oder im sonstigen Gebrauch des Systems Anwendung fände. Hier wird ein geschlossener Verband halbkugelförmig um den gesamten Prüfkörper aufgenommen. Er bietet in jedem Punkt des Volumens günstige Strahlenschnittbedingungen, homogene Genauigkeitsverhältnisse in allen Koordinatenrichtungen und in Abhängigkeit der Anzahl der Bilder eine hohe Redundanz.

Als zweite Variante ist ein halber Rundumverband gewählt, der das Messvolumen nur von einer zugänglichen Seite aus aufnimmt. Hier ist im Gegensatz zum Vollverband mit schlechteren Schnittbedingungen im hinteren Teil des Messvolumens und inhomogeneren Genauigkeitsverhältnissen zu rechnen. Dieser Verband stellt eine ungünstigere Aufnahmesituation dar, wie sie in der Praxis durch Sichtbehinderungen und Unbegehrlichkeiten vorkommen kann.

Allgemein sind die untersuchten Verbände in vier einzelne Lagen in unterschiedlicher Höhe unterteilt. So befindet sich die

erste Lage ungefähr in einer Höhe von 30 cm über dem Boden, die zweite ca. 180 cm und die dritte 280 cm. Die vierte dient zur Kalibrierung des Aufnahmesystems und enthält jeweils die vier Kantungen der Kamera. Die Aufnahmeentfernungen sind so gestaltet, dass das Objekt ganz im Bildformat abgebildet wird. Die Konfigurationen wurden systematisch reduziert, wobei in der Bezeichnung jeweils die Anzahl der Bilder in der jeweiligen Lage verwendet wird.

In der folgenden Abb. 5 werden die beiden Konfigurationsversionen dargestellt, die jeweils in Simulationsrechnungen bezüglich ihres Genauigkeitspotenzials untersucht wurden.

6 Simulationen

Um einen Eindruck über den Einfluss von veränderten oder reduzierten Aufnahme-standpunkten sowie von der Änderung der Anzahl von Verknüpfungspunkten zu gewinnen, wurde eine Simulationssoftware erstellt. Sie erlaubt es, aus künstlich erzeugten Bildkoordinaten mittels eines Bündelausgleichungsprogramms Objektkoordinaten und die jeweiligen stochastischen Maße zu ermitteln. Bei gleichbleibender Bildmessgenauigkeit sind Veränderungen in den Standardabweichungen der ausgeglichenen Ko-

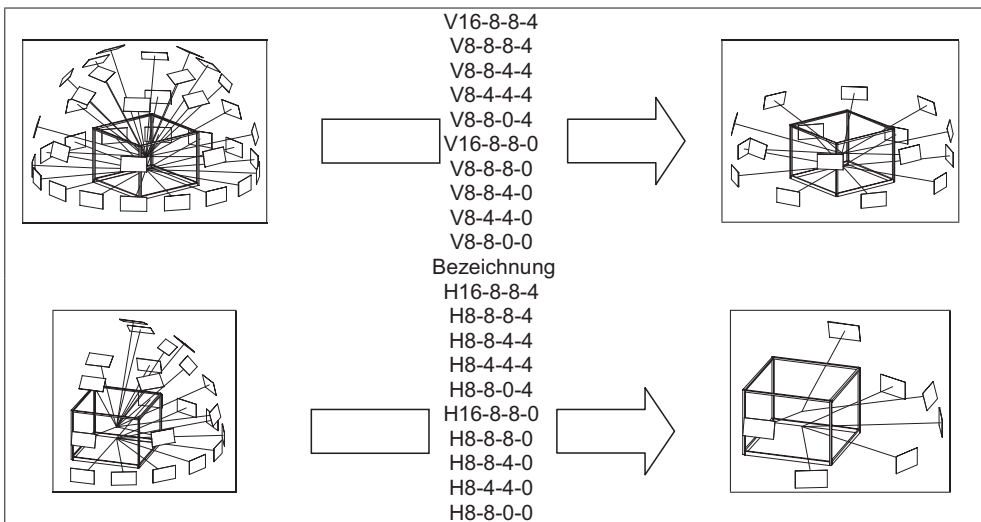


Abb. 5: Reduzierung der Aufnahmeverbände.

ordinaten auf Verbesserungen oder Verschlechterungen von konfigurationsbedingten Parametern wie Stabilität des photogrammetrischen Netzes, Schnittbedingungen an den Objektpunkten oder Überbestimmung des Gleichungssystems zurückzuführen. Es sollen so in Bezug auf Komplexität und Aufwand des Prüfverfahrens Aussagen über den minimalen oder maximalen Verband getroffen werden.

Als Beispiel seien hier die Ergebnisse der vollständigen und halben Rundumverbände mit jeweils maximalen Verknüpfungspunkten dargestellt, die zu der Entscheidung führten, jeweils die Maximalkonfigurationen in einem Praxistest zu verwenden. In Abb. 6 sind die Ergebnisse des vollständigen Rundumverbandes, in Abb. 7 die des halben Rundumverbandes dargestellt.

Zur Verifizierung der Simulationsergebnisse wurden die einzelnen Verbände am realen Prüfkörper gemessen und die ermittelten Längenmessabweichungen den RMS gegenüber gestellt (Abb. 8). Es lässt sich eine starke Korrelation beider Genauigkeitsmaße feststellen.

7 Anwendung in der Praxis

Die praktische Anwendung wurde in Zusammenarbeit mit der PTP in Braunschweig durchgeführt. In diesem Projekt wurden insgesamt vier verschiedene photogrammetri-

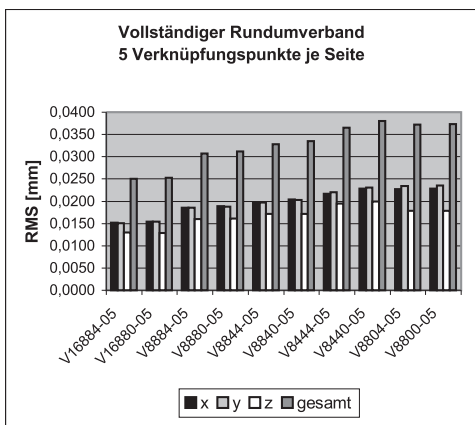


Abb. 6: Simulationsergebnisse Vollverband.

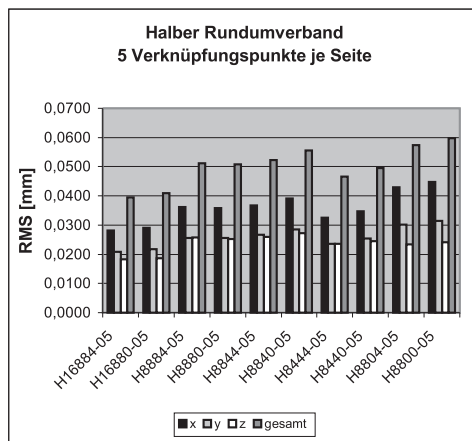


Abb. 7: Simulationsergebnisse Halbverband.

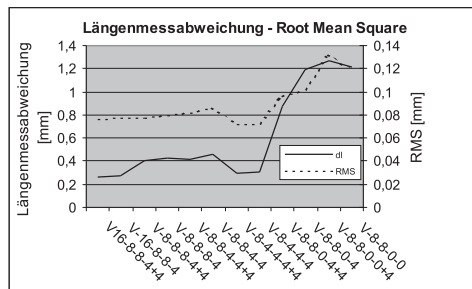


Abb. 8: Abweichungen und RMS der Vollverbände.

sche Messsysteme eingesetzt. Die Gemeinsamkeit der teilnehmenden Systeme liegt darin, dass sowohl die Chipgröße als auch die Anzahl der Pixel (2000 × 3000) vergleichbar sind. Zu unterscheiden sind die Systeme, die im Folgenden mit A, B, C, D bezeichnet werden, durch unterschiedliche mechanische Stabilität der Verbindung von Sensorchip, Gehäuse und Objektiv. Verwendet wurden 24 und 17 mm Objektive.

Die Durchführung fand nach dem vorgeschlagenen Konzept statt. Um zu überprüfen, ob die Konzepte hinsichtlich ihres Genauigkeitspotentials ausreichend sind, wurde den Teilnehmern zusätzlich zu den standardisierten vollen und halben Rundumverbänden die Möglichkeit gegeben, die Messaufgabe nach ihren eigenen Vorstellungen zu lösen. Bei diesen freien Verbänden wur-

den keine Beschränkungen in der Anzahl und Anordnung der Aufnahmen gesetzt. In der Bezeichnung wird dann zwischen „Standard“ und „Frei“ unterschieden. Die Ergebnisse der Vergleichsmessung sind in Tab. 1 dargestellt.

Zu erläutern ist hierbei, dass mit der teilweise erheblichen Erhöhung der Bilderanzahl eine nur geringe Steigerung der Genauigkeit einhergeht. Jedoch steigt die Zuverlässigkeit der Punktbestimmung und damit auch die der Bündelblockausgleichung. Exemplarisch ist in Abb. 9 das Abweichungsdiagramm von System B im freien Vollverband dargestellt.

8 Fazit

Mit der VDI 2634, 1 steht den Herstellern und Anwendern nun ein einheitliches und vergleichbares Prüfverfahren für photogrammetrische Messsysteme zur Verfügung. Ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens liegt in der unabhängigen Ermittlung der Kenngröße, ohne auf systeminterne Genauigkeitsangaben zurück zu greifen. Zur Vergleichbarkeit der Zuverlässigkeit der Punktbestimmung ist es sinnvoll, ebenfalls die Konfiguration der Aufnahmen einheitlich zu halten. Hierzu sind zwei von der Aufnah-

Tab. 1: Ergebnisse der Vergleichsmessung.

	Verband	dI [mm]	Bilder	RMS [mm] (Verband)
A	V-Standard	0,260	48	0,042
	V-Frei	0,250	103	0,029
	H-Standard	0,292	33	0,044
	H-Frei	0,255	91	0,033
B	V-Standard	0,145	48	0,045
	V-Frei	0,116	105	0,044
	H-Standard	0,152	34	0,044
	H-Frei	0,169	65	0,044
C	V-Standard	0,151	40	0,025
	V-Frei	0,213	165	0,013
	H-Standard	0,260	30	0,032
	H-Frei	0,219	120	0,018
D	V-Standard	0,157	46	0,040
	V-Frei	0,138	127	0,032
	H-Standard	0,145	33	0,051
	H-Frei	0,225	98	0,043

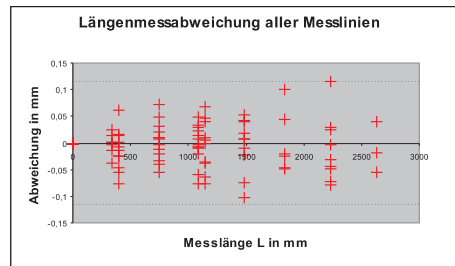


Abb. 9: Längenmessabweichungen.

megeometrie ausreichende Konfigurationen entwickelt worden. Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen lagen bei einer Messlänge von 2,7 m zwischen 0,1 und 0,3 mm.

8 Literaturverzeichnis

- DOLD, J., 1997: Ein hybrides photogrammetrisches Industriemesssystem höchster Genauigkeit und seine Überprüfung. – Dissertation, Heft 54, Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr, München.
- LUHMANN, TH., 2000: Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen. – H. Wichmann., Heidelberg.
- NACK, A., 1999: Aufbau und Implementierung einer Prozesskette zur Kalibrierung von Maßstäben für optische Messsysteme. – Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft, Dresden.
- RAUTENBERG, U., 2000: Untersuchungen zur Zertifizierung photogrammetrischer Messsysteme nach VDI 2634, Blatt 1 mittels Einsatz von Längennormalen. – Diplomarbeit, Universität Hannover.
- SCHWENKE, H. et al., 1997: Abnahme, Überwachung und Kalibrierung von flexiblen Industriemesssystemen. – Bundesforschungsprojekt, Braunschweig

Anschrift der Autoren:

Dipl.-Ing. ULRICH RAUTENBERG, Volkswagen AG, Brieffach 1440/0, D-38436 Wolfsburg, e-mail: ulrich2.rautenberg@volkswagen.de

Dr.-Ing. MANFRED WIGGENHAGEN, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Universität Hannover, Nienburger Str.1, D-30167 Hannover, e-mail: wigge@ipi.uni-hannover.de

Manuskript eingereicht: Oktober 2001
Angenommen: November 2001