

Universität Hannover

Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung

Diplomarbeit

„Untersuchungen zur Zertifizierung photogrammetrischer Messsysteme
nach VDI 2634, Blatt 1 mittels Einsatz von Längennormalen“

vorgelegt von

cand. geod. Ulrich Rautenberg

im November 2000

Inhalt

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | Einführung und Zielsetzung | 6 |
| 1.1 | Definitionen | 7 |
| 1.1.1 | Abnahme..... | 7 |
| 1.1.2 | Überwachung | 7 |
| 1.1.3 | Kalibrierung..... | 7 |
| 1.2 | Anforderungen an ein Prüfverfahren | 8 |
| 1.3 | Abnahme und Überwachung in der Koordinatenmesstechnik..... | 8 |
| 1.3.1 | Richtlinie VDI/VDE 2634 | 10 |
| 1.3.1.1 | Prinzip..... | 10 |
| 1.3.1.2 | Prüfkörper | 11 |
| 1.3.1.3 | KenngroÙe | 12 |
| 1.4 | Zielsetzung..... | 14 |
| 2 | Grundlagen..... | 15 |
| 2.1 | Zentralperspektivische Abbildung..... | 15 |
| 2.2 | Bündelblockausgleichung..... | 17 |
| 2.2.1 | Mathematisches Modell..... | 18 |
| 2.2.1.1 | Funktionales Modell der Ausgleichung | 18 |
| 2.2.1.2 | Stochastisches Modell der Ausgleichung | 20 |
| 2.2.2 | Rechengang der Ausgleichung | 21 |
| 2.2.3 | Modell der Bündelblockausgleichung | 22 |
| 2.3 | Beschreibung eines industriellen Photogrammetriesystems (TRITOP)..... | 23 |
| 2.3.1 | Sensorsystem | 24 |
| 2.3.2 | Aufnahme und Auswertung | 25 |
| 2.3.3 | Genauigkeit..... | 28 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.4 | Fehlereinflüsse..... | 28 |
| 2.4.1 | Abbildungsfehler | 28 |
| 2.4.1.1 | Radial-symmetrische Verzeichnung | 28 |
| 2.4.1.2 | Radial-asymmetrische und tangentiale Verzeichnung | 29 |
| 2.4.1.3 | Affinität und Scherung..... | 29 |
| 2.4.1.4 | Bestimmung der Kameraparameter..... | 29 |
| 2.4.2 | Signalisierung des Objektes..... | 31 |
| 2.4.2.1 | Verwendete Retromarken | 31 |
| 2.4.2.2 | Einfluss retroreflektierender Zielmarken | 32 |
| 2.4.3 | Schnittbedingungen | 34 |
| 3 | Prüfkörper..... | 36 |
| 3.1 | Beschreibung der Maßstäbe | 36 |
| 3.1.1 | Träger | 36 |
| 3.1.2 | Messmarken | 37 |
| 3.2 | Kalibrierverfahren..... | 39 |
| 3.3 | Komponenten..... | 41 |
| 3.3.1 | Interferometer | 41 |
| 3.3.1.1 | Grundprinzip des Zweistrahl-Interferometer nach Michelson..... | 41 |
| 3.3.1.2 | Zwei-Moden-Heterodyn-Verfahren | 42 |
| 3.3.1.3 | Winkelinterferometer | 44 |
| 3.3.2 | CCD-Kamera | 44 |
| 3.3.3 | Koordinatenmessgerät (KMG)..... | 45 |
| 3.4 | Ermittlung der Länge | 45 |
| 4 | Konzept zur Durchführung | 47 |
| 4.1 | Allgemein | 47 |
| 4.2 | Betriebsarten und Betriebsbedingungen | 48 |
| 4.3 | Anordnung der Prüfkörper..... | 48 |
| 4.4 | Verteilung von zusätzlichen Punkten..... | 49 |

| | | |
|---------|--|----|
| 4.5 | Aufnahmekonfigurationen | 50 |
| 4.5.1 | Konfiguration voller Rundumverband | 51 |
| 4.5.2 | Konfiguration halber Rundumverband | 52 |
| 4.5.3 | Darstellung der Orientierungen | 54 |
| 5 | Theoretische Untersuchung der Konfigurationen | 56 |
| 5.1 | Konzept der Simulation | 56 |
| 5.1.1 | Berechnung der Bildkoordinaten | 56 |
| 5.1.2 | Berechnung der Objektkoordinaten | 61 |
| 5.1.3 | Ergebnisse | 62 |
| 5.1.3.1 | Auswertung | 62 |
| 5.1.3.2 | Vollständiger Rundumverband | 64 |
| 5.1.3.3 | Halber Rundumverband | 68 |
| 5.1.3.4 | Gegenüberstellung der Konfigurationen | 70 |
| 5.1.3.5 | Vergleich der Strahlenschnittbedingungen | 72 |
| 5.1.4 | Zusammenfassung | 74 |
| 6 | Praktische Anwendung | 76 |
| 6.1 | Erweiterung des Konzeptes | 76 |
| 6.1.1 | Erweiterung des vollen Rundumverbandes | 76 |
| 6.1.2 | Erweiterung des halben Rundumverbandes | 78 |
| 6.1.3 | Referenzkörper | 80 |
| 6.2 | Durchführung und Auswertung | 80 |
| 6.3 | Ergebnisse | 83 |
| 6.3.1 | Untersuchung der vorgeschlagenen Konfigurationen | 83 |
| 6.3.2 | Messung mit Kombinationen von Kameras und Objektiven | 87 |
| 6.3.2.1 | Darstellung der Ergebnisse | 87 |
| 6.3.2.2 | Wiederholungsmessung | 91 |
| 6.4 | Zusammenfassung | 93 |
| 7 | Vergleichsmessung | 94 |

| | |
|--|-----|
| 7.1 Durchführung | 94 |
| 7.2 Beteiligte Systeme | 95 |
| 7.3 Ergebnisse | 96 |
| 7.3.1 Vergleich Standardverbände – Freie Verbände..... | 97 |
| 7.3.2 Vergleich Vollverbände - Halbverbände | 98 |
| 7.3.3 Gegenüberstellung Kamera – Beobachter..... | 100 |
| 8 Zusammenfassung und Ausblick | 102 |
| 8.1 Zusammenfassung..... | 102 |
| 8.2 Ausblick..... | 103 |
| Literaturverzeichnis..... | 104 |
| Verzeichnis der Anhänge | 107 |
| Anhang..... | 108 |

1 Einführung und Zielsetzung

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, eingesetzt 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.

So ist ein photogrammetrisches Messsystem als die Gesamtheit seiner Komponenten zu sehen, die an der Ermittlung der Objektkoordinate beteiligt sind und umfasst den Sensor (Kamera, Objektiv), die Auswerteeinheit (Komparator, Software, Scanner) und die verwendeten Zielmarken und Messadapter. Eine aufgrund einer Prüfung getroffene Aussage kann also nur auf die Einheit der Systemkomponenten bezogen werden und kann nicht ohne weiteres übertragen werden, wenn eine der Komponenten ausgetauscht wird.

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 optisch antastbare Maßstäbe entwickelt, die mit einer Unsicherheit von 5 µm kalibriert werden können und sowohl zur Überwachung der Messsysteme als auch als Systemmaßstab im Gebrauch dienen sollen.

1.1 Definitionen

In der traditionellen Koordinatenmesstechnik sind Abnahme, Überwachung und Kalibrierung feststehende Begriffe, die Prüfverfahren mit unterschiedlichen Genauigkeitsniveaus beschreiben. Die Koordinatenmesstechnik befasst sich hauptsächlich mit Koordinatenmessgeräten (KMG).

1.1.1 Abnahme

Unter Abnahme wird ein Prüfverfahren verstanden, mit dem sichergestellt wird, ob die herstellerseitig angegebenen Genauigkeiten eines Messgerätes auch tatsächlich eingehalten werden. Sie wird nach der Auslieferung oder nach Instandsetzung des Gerätes durchgeführt. Die zu prüfende Genauigkeit ist hierbei vertraglich zwischen Hersteller und Käufer geregelt. Die Durchführung der Abnahme obliegt grundsätzlich dem Hersteller, da er den Nachweis zu erbringen hat, dass die angegebenen Genauigkeiten auch eingehalten werden. Auf welche Weise die Messungen zur Abnahme durchgeführt werden und wie sie auszuwerten sind ist ebenfalls Bestandteil des Vertrages.

1.1.2 Überwachung

Die Überwachung eines Messgerätes stellt das Prüfverfahren unteren Niveaus dar und richtet sich nach den Anforderungen der Prüfmittelüberwachung gemäß DIN ISO 9000 bis DIN ISO 9004. Sie dient der schnellen und stichprobenhaften Überprüfung der messtechnischen Genauigkeit, im laufenden Betrieb. Die Genauigkeiten, die dabei einzuhalten sind sowie das Überwachungsintervall, legt der Betreiber unter Beachtung der produktionsbedingten Anforderungen selbst fest.

1.1.3 Kalibrierung

Die Kalibrierung ist die oberste Stufe der Prüfverfahren. Hier wird die Abweichung des angezeigten Wertes vom richtigen Wert einer Messgröße im gesamten Messvolumen ermittelt. Der richtige Wert muss dabei bekannt sein. Für universell einsetzbare 3-D-Koordinatenmesssysteme bedeutet dies, dass Kalibrierungen nur bezogen auf konkrete

Messaufgaben möglich sind. Eine vollständige Kalibrierung muss für alle Messaufgaben die Abweichungen für das gesamte Messvolumen des Messsystems liefern [SCHWENKE ET AL. 1997]. Außerdem muss das Messsystem eine ausreichend gute Stabilität aufweisen, damit Messwerte nachfolgender Messungen mit den gewonnenen Werten korrigiert werden können.

1.2 Anforderungen an ein Prüfverfahren

Die grundsätzlichen Forderungen an ein Prüfverfahren sind im folgenden angeführt:

- 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.

1.3 Abnahme und Überwachung in der Koordinatenmesstechnik

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 2647 „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.

Im folgenden soll ein kurzer Überblick über die in diesen Leitfäden beschriebenen Verfahren gegeben werden.

So wird in der DIN ISO 10 360 Teil 2 mit Anlehnung an die Richtlinie VDI/VDE 2617 ein einfaches und effizientes Verfahren zur Kontrolle von KMGs definiert. Dieses Verfahren teilt sich in zwei aufeinander aufbauende Schritte auf. Im ersten Schritt wird das Antastsystem der KMG überprüft wonach bei positivem Ergebnis im 2. Schritt die Längenmessabweichung des Systems ermittelt wird.

Die Überprüfung des Antastsystems erfolgt durch Verwendung von Referenzkugeln, dessen Radien über eine festgelegte Zahl von Antastpunkten ermittelt werden müssen. Die Radien sind das Ergebnis einer Ausgleichung mit den ermittelten Oberflächenpunkten als Beobachtungen. Als Kenngröße wird die *Antastabweichung* definiert, die sich als Abweichungsspanne der resultierenden Kugelradien darstellt. Diese Prüfung gilt als bestanden, wenn die Antastabweichung einen vorgegebenen Grenzwert nicht überschreitet.

Nach erfolgreicher Prüfung der Antastabweichung wird die Längenmessabweichung des Systems überprüft. Zu diesem Zweck werden ebenfalls Referenzkörper gemessen und die ermittelten Längen den bekannten gegenübergestellt. Als Kenngröße wird die Längenmessabweichung als Differenz der beiden Längen dargestellt. Die Verfahrensweise ist dabei fest vorgegeben. Als Referenzkörper eignen sich hier Stufenendmaße, Lehrringe, Kugelmaßstäbe und Kugel- oder Lochplatten. Auch hier muss die Kenngröße unterhalb der vereinbarten Grenzen, die für Abnahme und Überwachung nach den oben genannten Grundsätzen festgelegt werden, bleiben.

Nun unterscheiden sich aber photogrammetrische Industriemesssysteme in wesentlichen Punkten von den herkömmlichen Koordinatenmessmaschinen. Es sind hier Aspekte der Funktionsweise, Einsatzmöglichkeiten und Anwendung der Systeme sowie besondere Anforderungen an Prüfkörper und Prüfverfahren zu nennen.

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, S. 476]. Aus der genannten Funktionsweise ergibt sich außerdem die Möglichkeit der freien Wahl der

Anzahl von Bildern und Messpunkten sowie der Sensoren, Objektiv und Punktsignalisierung.

Aus dem theoretisch frei skalierbarem 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 der Personenkreis der Anwender im industriellen Bereich sich kaum ändert.

1.3.1 Richtlinie VDI/VDE 2634

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. Eine Untersuchung des Verfahrens dieses Blattes ist Gegenstand einer weiteren Arbeit [HEIN, EMPEN 2000]

Der Schwerpunkt dieser Arbeit bezieht sich auf die Empfehlungen des Blattes 1 und beschränkt sich auf optisch antastende Systeme, so wird im folgenden der Inhalt des Blattes 1 der Richtlinie näher betrachtet.

1.3.1.1 Prinzip

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

Längenmessabweichung, da bei punktförmigmessenden 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

1.3.1.2 Prüfkörper

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 auswerten zu können (Bild 1.1). Weicht die mittlere Temperatur der Prüfkörper signifikant von der Bezugstemperatur ab, so sind entsprechende Korrekturen vorzunehmen.

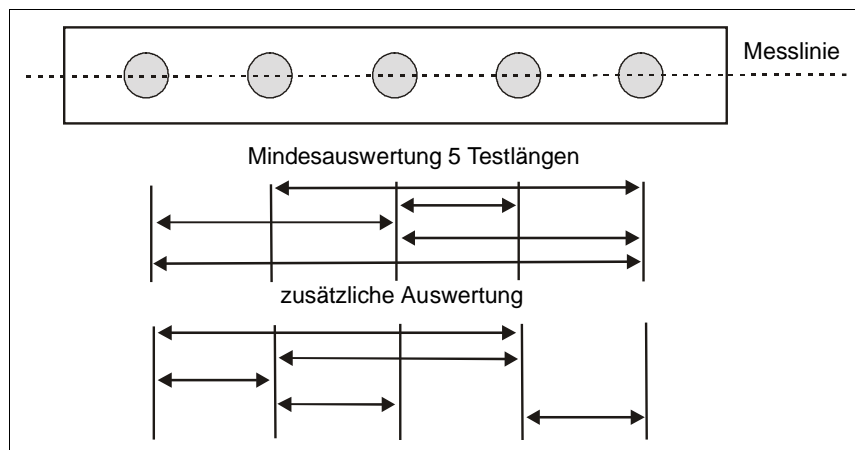


Bild 1.1 Testlängen auf dem Prüfkörper

Als Empfehlung für das Messvolumen wird eine Ausdehnung von $2000 \times 2000 \times 1500 \text{ mm}^3$ gegeben. Die Testlängen können wie in Bild 1.2 gezeigt angeordnet werden. Hier soll als längste Testlänge mindestens die Länge der kürzesten Seitenlänge gewählt werden und die größte Länge sollte mindestens $2/3$ der Raumdiagonalen betragen. In jeder Ecke des Messvolumen soll sich ein Endpunkt der Testlängen befinden

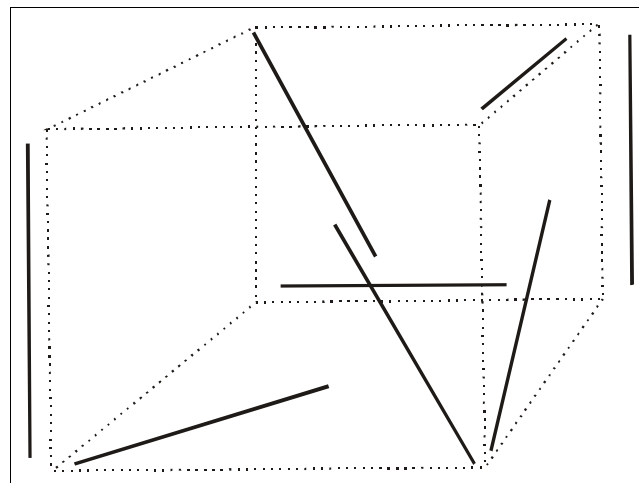


Bild 1.2 Anordnung der Messlinien

1.3.1.3 Kenngröße

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

$$\Delta l = l_m - l_k \quad (1.1)$$

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:

$$E = A + K \cdot L \leq B \quad (1.2)$$

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

Sowohl Überwachung als auch Abnahme gelten als bestanden, wenn keine der ermittelten Längenmessabweichungen den festgelegten Grenzwert überschreiten. Wird dieser in einer Messlinie überschritten, ist es zulässig diese Messlinie noch einmal zu messen.

1.4 Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine praktische Anwendung der VDI/VDE 2634, Blatt 1 durchgeführt und beurteilt werden. Dazu sollen Vorschläge zur Konfiguration und Durchführung entwickelt und untersucht werden. Die Untersuchung beschränkt sich hierbei auf photogrammetrische Systeme mit optischer Antastung, da für taktil antastende Systeme die entwickelten Prüfkörper ungeeignet sind. Im Mittelpunkt steht hier besonders das bei der Volkswagen AG in der Anwendung befindliche System Tritop.

Die Durchführung einer pilothaften Vergleichsmessung unter Beteiligung mehrerer photogrammetrischer Systeme soll im Rahmen einer Kooperation zwischen der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Braunschweig (PTB) und der Volkswagen AG stattfinden.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die nötigen photogrammetrischen Grundlagen beschrieben. Es wird das in der Abteilung für Geometriedaten EZMM der Volkswagen AG in Gebrauch befindliche System vorgestellt und ein Überblick über die die Genauigkeit beeinflussenden Faktoren bei der photogrammetrischen Punktbestimmung behandelt.

2.1 Zentralperspektivische Abbildung

Ein grundlegendes Berechnungsverfahren in der Photogrammetrie stellt das Modell der zentralperspektivischen Abbildung des Raumes dar. Hierdurch wird der Zusammenhang zwischen Bild- und Objektpunkten hergestellt (Bild 2.1). Unter der Annahme, dass Bildpunkt P' und Objektpunkt P auf einer Geraden mit dem Projektionszentrum O' liegen (Kollinearitätsprinzip), und der Kenntnis der inneren und äußeren Orientierung des Messbildes lässt sich die photogrammetrische Abbildung modellieren. Systematische Abweichungen von der Zentralprojektion können durch Korrekturfunktionen berücksichtigt werden.

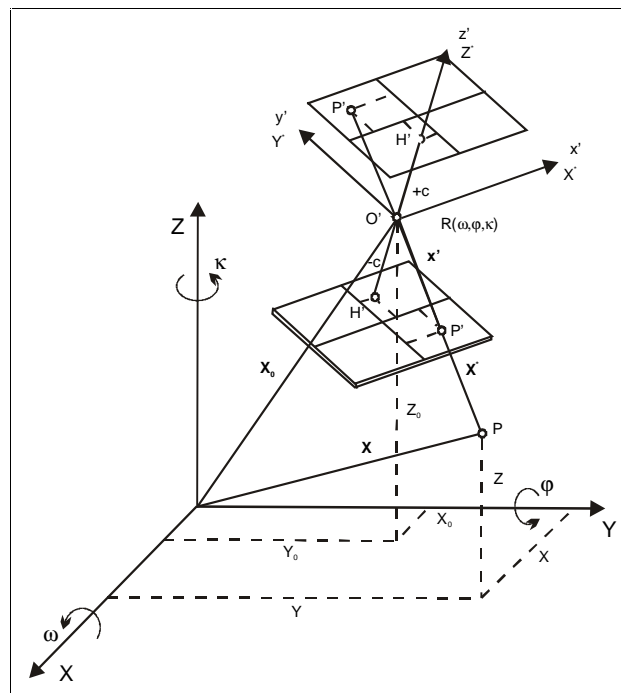


Bild 2.1 Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten

Innere Orientierung

Das Bildkoordinatensystem wird durch ein kamerafestes Bezugssystem festgelegt und ist mit seinem Ursprung im Projektionszentrum gelagert. Beschrieben wird es durch die Parameter Hauptpunktlage (x'_0, y'_0) und Kammerkonstante (c) .

Äußere Orientierung

Sie beschreibt die Lage des Bildkoordinatensystems und dessen räumliche Ausrichtung. Die räumliche Lage des Projektionszentrums O' wird durch den Vektor \underline{X}_0 vom Ursprung des Übergeordneten Koordinatensystems beschrieben. Die räumliche Ausrichtung wird durch die Drehmatrix \underline{R} in Abhängigkeit von den drei Einzeldrehungen ω, φ, κ um die Achsen des übergeordneten Systems definiert.

Somit ist die Lage des Projektionszentrums

$$\underline{X}_0 = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

und die Rotationsmatrix

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Die Abbildung eines Objektpunktes in den Bildraum lautet dann:

$$\underline{x}' - \underline{x}'_0 - d\underline{x}' = \frac{1}{m} \cdot \underline{R}^{-1} \cdot (\underline{X} - \underline{X}_0) \quad (2.3)$$

mit

- \underline{x}' : Bildkoordinaten
- \underline{x}'_0 : Koordinaten des Bildhauptpunktes
- $d\underline{x}'$: Verzeichnungsparameter
- m : Maßstabsfaktor
- \underline{X} : Objektpunktkoordinaten
- \underline{X}_0 : Projektionszentrum

Durch Division der ersten und zweiten Gleichung dieses Gleichungssystems durch jeweils die dritte wird der unbekannte Maßstabsfaktor m eliminiert und es folgen die Kollinearitätsgleichungen:

$$\begin{aligned}
 x' &= x_0' - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + dx' \\
 y' &= y_0' - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + dy'
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

2.2 Bündelblockausgleichung

Bei der Bündelblockausgleichung werden alle Messbilder in einem Aufnahmeverband unter Berücksichtigung photogrammetrisch gemessener Bildpunkte und zusätzlicher Beobachtungen sowie eines übergeordneten Koordinatensystems gemeinsam rechnerisch bestmöglich orientiert (Bild 2.2). Hierbei repräsentieren die Bildmessungen Strahlenbündel, die sich im Objektraum durch homologe Punkte verknüpfen. An diesen Punkten sollen sich alle korrespondierenden Bildstrahlen optimal schneiden.

Es lassen sich so Gleichungen für alle Beobachtungen, Objektpunkte, Orientierungsparameter der Bilder sowie weiteren Modellparameter aufstellen. Das zu lösende Gleichungssystem ist im allgemeinen hoch redundant und lässt sich durch Ausgleichung lösen. Dies ermöglicht eine Berücksichtigung der Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsangaben der eingehenden Größen sowie eine stochastische Beurteilung der Ergebnisse. Da alle beobachteten Größen und alle unbekannt Parameter eines photogrammetrischen Bildverbandes in einem simultanen Berechnungsvorgang berücksichtigt werden, ist die Bündeltriangulation das leistungsfähigste und genaueste Verfahren zur Bildorientierung und Punktbestimmung in der Photogrammetrie [LUHMANN 2000, S. 255].

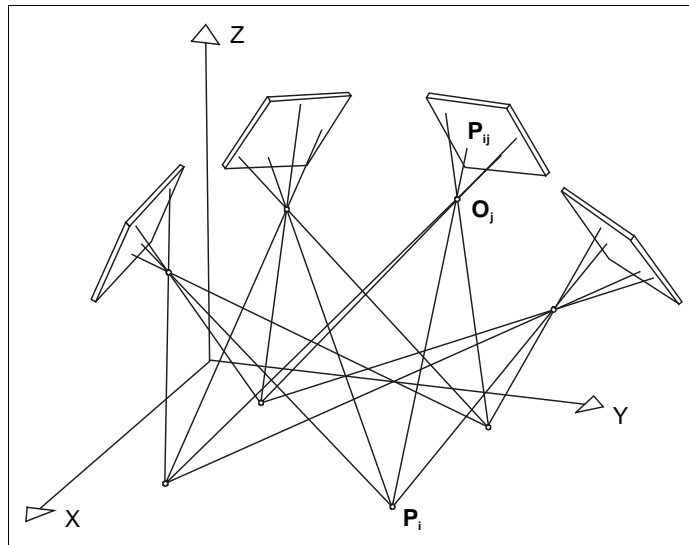


Bild 2.2 Mehrbildtriangulation

2.2.1 Mathematisches Modell

Die Bestimmung der auszugleichenden Größen, die im funktionalen Zusammenhang mit den Beobachtungen stehen, folgt dem Modell von GAUß-MARCOW und liefert die ausgeglichenen Größen mit maximaler Wahrscheinlichkeit. Dieses Modell wird auch mit Methode der kleinsten Quadrate bezeichnet. Durch die Überbestimmung des Gleichungssystems ist eine eindeutige Lösung nicht mehr möglich und es erfolgt eine Schätzung der Parameter im funktionalen und stochastischen Modell. Mit der Annahme einer unendlich großen Stichprobe und Normalverteilung der Abweichungen folgt die Forderung an die gewichteten Verbesserungen:

$$\underline{v}^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{v} \rightarrow \min! \quad (2.5)$$

Für den Fall von n unabhängigen Beobachtungen lautet die Forderung:

$$\sum_{i=1}^n p_i \cdot v_i^2 = [pvv] \rightarrow \min! \quad (2.6)$$

Im folgenden werden funktionales und stochastisches Modell des Ausgleichsalgorithmus beschrieben.

2.2.1.1 Funktionales Modell der Ausgleichung

Die n Beobachtungen werden im Beobachtungsvektor \underline{L} dargestellt:

$$\underline{L} = (L_1, L_2, \dots, L_n)^T \quad (2.7)$$

Der Unbekanntenvektor \underline{X} hat u Elemente und soll ermittelt werden:

$$\underline{X} = (X_1, X_2, \dots, X_u)^T \quad (2.8)$$

Über den Funktionenvektor $\underline{\varphi}$ wird der Zusammenhang zwischen den wahren Werten der Beobachtungen $\underline{\tilde{L}}$ und den wahren Werten der Unbekannten $\underline{\tilde{X}}$ ausgedrückt. Das funktionale Modell ergibt sich zu:

$$\underline{\tilde{L}} = \underline{\varphi}(\underline{\tilde{X}}) = \begin{bmatrix} \varphi_1(\underline{\tilde{X}}) \\ \varphi_2(\underline{\tilde{X}}) \\ \vdots \\ \varphi_n(\underline{\tilde{X}}) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Jedoch sind die wahren Werte nicht bekannt. So wird der Beobachtungsvektor durch den tatsächlichen Beobachtungsvektor \underline{L} und kleine Verbesserungen \underline{v} und der Unbekanntenvektor durch die geschätzten Unbekannten $\underline{\hat{X}}$ ersetzt. Die (nichtlinearen) Verbesserungsgleichungen ergeben sich daraus zu:

$$\underline{\hat{L}} = \underline{L} + \underline{v} = \underline{\varphi}(\underline{\hat{X}}) \quad (2.10)$$

Mit Näherungswerten der Unbekannten kann der Unbekanntenvektor ausgedrückt werden in

$$\underline{\hat{X}} = \underline{X}^0 + \underline{\hat{x}}. \quad (2.11)$$

Näherungswerte für des Beobachtungsvektor lassen sich aus \underline{X}^0 und dem funktionalen Modell bestimmen:

$$\underline{L}^0 = \underline{\varphi}(\underline{X}^0) \quad (2.12)$$

Daraus ergibt sich der gekürzte Beobachtungsvektor \underline{l} :

$$\underline{l} = \underline{L} - \underline{L}^0 \quad (2.13)$$

Die (nichtlinearen) Verbesserungsgleichungen werden durch eine Reihenentwicklung nach TAYLOR an den Näherungswerten \underline{X}^0 ausgedrückt und nach dem ersten Glied abgebrochen:

$$\begin{aligned}\underline{l} + \underline{v} &= \underline{\varphi}(\underline{X}^0) + \left(\frac{\partial \underline{\varphi}(\underline{X})}{\partial \underline{X}} \right)_0 \cdot (\hat{\underline{X}} - \underline{X}^0) \\ &= \underline{l}^0 + \left(\frac{\partial \underline{\varphi}(\underline{X})}{\partial \underline{X}} \right)_0 \cdot \hat{\underline{X}}\end{aligned}\quad (2.14)$$

Die Designmatrix enthält die gesamten Differentialquotienten:

$$\underline{A} = \left(\frac{\partial \underline{\varphi}(\underline{X})}{\partial \underline{X}} \right)_0 = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial \varphi_1(\underline{X})}{\partial X_1} \right)_0 & \left(\frac{\partial \varphi_1(\underline{X})}{\partial X_2} \right)_0 & \cdots & \left(\frac{\partial \varphi_1(\underline{X})}{\partial X_u} \right)_0 \\ \left(\frac{\partial \varphi_2(\underline{X})}{\partial X_1} \right)_0 & \left(\frac{\partial \varphi_2(\underline{X})}{\partial X_2} \right)_0 & \cdots & \left(\frac{\partial \varphi_2(\underline{X})}{\partial X_u} \right)_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial \varphi_n(\underline{X})}{\partial X_1} \right)_0 & \left(\frac{\partial \varphi_n(\underline{X})}{\partial X_2} \right)_0 & \cdots & \left(\frac{\partial \varphi_n(\underline{X})}{\partial X_u} \right)_0 \end{bmatrix}\quad (2.15)$$

Daraus ergeben sich die linearisierten Verbesserungsgleichungen:

$$\hat{\underline{l}} = \underline{l} + \underline{v} = \underline{A} \cdot \hat{\underline{X}}\quad (2.16)$$

2.2.1.2 Stochastisches Modell der Ausgleichung

In der Kovarianzmatrix sind alle Genauigkeitsmaße sowie eventuelle Korrelationen der Beobachtungen eingetragen.

$$\underline{\Sigma}_{//} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \cdots & \rho_{1n}\sigma_1\sigma_n \\ \rho_{21}\sigma_2\sigma_1 & \sigma_2^2 & \cdots & \rho_{2n}\sigma_2\sigma_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1}\sigma_n\sigma_1 & \rho_{n2}\sigma_n\sigma_2 & \cdots & \sigma_n^2 \end{bmatrix}\quad (2.17)$$

mit σ_i : Standardabweichung der Beobachtungen L_i , $i=1,2,\dots,n$
 ρ_{ij} : Korrelationskoeffizient zwischen L_i und L_j , $i \neq j$

Mit der Multiplikationskonstanten σ_0 erhält man die Kofaktormatrix $\underline{Q}_{//}$ der Beobachtungen:

$$\underline{Q}_{//} = \frac{1}{\sigma_0^2} \underline{\Sigma}_{//} = \underline{P}^{-1}\quad (2.18)$$

Die Kofaktormatrix ist positiv definit und damit regulär. Es existiert also ihre Inverse, die Gewichtsmatrix \underline{P} :

$$\underline{P}_{n,n} = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} & & & \\ & \frac{\sigma_0^2}{\sigma_2^2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \frac{\sigma_0^2}{\sigma_n^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 & & & \\ & p_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & p_n \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

In der Praxis ist die wahre Standardabweichung σ meist nicht bekannt und wird deshalb durch die empirische Standardabweichung s ersetzt.

2.2.2 Rechengang der Ausgleichung

Nachdem Näherungswerte, Designmatrix \underline{A} und der Vektor der gekürzten Beobachtungen \underline{l} ermittelt wurden, wird der Unbekanntenvektor $\hat{\underline{x}}$ folgend bestimmt:

Mit der Designmatrix \underline{A} , der Gewichtsmatrix \underline{P} und dem gekürzten Beobachtungsvektor \underline{l} wird das Normalgleichungssystem aufgestellt:

$$\underline{P}_{n,n} = \underline{Q}_{n,n}^{-1} \quad : \text{Gewichtsmatrix}$$

$$\underline{N}_{u,u} \cdot \hat{\underline{x}}_{u,1} - \underline{n}_{u,1} = \underline{0}_{u,1} \quad : \text{Normalgleichungen} \quad (2.20)$$

$$\underline{N}_{u,u} = \underline{A}_{u,n}^T \underline{P}_{n,n} \underline{A}_{n,u} \quad : \text{Normalgleichungsmatrix}$$

$$\underline{n}_{u,1} = \underline{A}_{u,n}^T \underline{P}_{n,n} \underline{l}_{n,1} \quad : \text{Absolutglied}$$

Durch Invertieren der Normalgleichungsmatrix werden die Normalgleichungen aufgelöst:

$$\underline{Q}_{u,u} = \underline{N}_{u,u}^{-1} \quad : \text{Auflösung der Normalgleichungen}$$

$$\hat{\underline{x}}_{u,1} = \underline{Q}_{u,u} \cdot \underline{n}_{u,1} \quad (2.21)$$

$$= (\underline{A}_{u,n}^T \cdot \underline{P}_{n,n} \underline{A}_{n,u})^{-1} \cdot \underline{A}_{u,n}^T \cdot \underline{P}_{n,n} \cdot \underline{l}_{n,1} \quad : \text{mit } \underline{Q}: \text{Kofaktormatrix der Unbekannten}$$

Aus (2.21) ergeben sich die Verbesserungen und man erhält die ausgeglichenen Beobachtungen:

$$\frac{\underline{v}}{n,1} = \frac{\underline{A}}{n,u} \cdot \frac{\hat{\underline{x}}}{u,1} - \frac{\underline{l}}{n,1} : \text{Verbesserungen}$$

$$\frac{\hat{\underline{l}}}{n,1} = \frac{\underline{l}}{n,1} + \frac{\underline{v}}{n,1} : \text{ausgeglichene Beobachtungen} \quad (2.22)$$

$$\frac{\hat{\underline{L}}}{n,1} = \frac{\underline{L}}{n,1} + \frac{\underline{v}}{n,1}$$

Mit den Näherungen der Unbekannten \underline{X}^0 ergibt sich der Unbekanntenvektor:

$$\frac{\hat{\underline{X}}}{u,1} = \frac{\underline{X}^0}{u,1} + \frac{\hat{\underline{x}}}{u,1} : \text{Unbekanntenvektor} \quad (2.23)$$

Als ein stochastisches Qualitätsmaß lässt sich dann die Standardabweichung der Gewichtseinheit a posteriori berechnen:

$$\hat{\underline{s}}_0 = \sqrt{\frac{\underline{v}^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{v}}{n-u}} : \text{Standardabweichung a posteriori} \quad (2.24)$$

Mittels (2.24) gelangt man zur Varianz-Kovarianz-Matrix:

$$\frac{\underline{K}}{u,u} = \hat{\underline{s}}_0^2 \cdot \frac{\underline{Q}}{u,u} \quad (2.25)$$

2.2.3 Modell der Bündelblockausgleichung

Grundlegend für die Bündelblockausgleichung sind die Kollinearitätsgleichungen (2.4). Als Beobachtungen fließen die Koordinaten korrespondierender Bildpunkte oder zusätzliche Beobachtungen im Objektraum in die Ausgleichung.

Die Struktur dieser Gleichungen erlaubt es unmittelbar die primär beobachteten Messgrößen als Funktion sämtlicher an einer photogrammetrischen Abbildung beteiligten Parameter auszudrücken. Die Kollinearitätsgleichungen können so nach Linearisierung an Näherungswerten direkt als Verbesserungsgleichungen im Sinne der Ausgleichung nach den kleinsten Quadraten verwendet werden.

Jeder Bildpunkt liefert dabei zwei linearisierte Verbesserungsgleichungen:

$$\begin{aligned}
 vx'_i &= \left(\frac{\partial x'}{\partial X_0} \right)_0 dX_0 + \left(\frac{\partial x'}{\partial Y_0} \right)_0 dY_0 + \left(\frac{\partial x'}{\partial Z_0} \right)_0 dZ_0 \\
 &+ \left(\frac{\partial x'}{\partial \omega} \right)_0 d\omega + \left(\frac{\partial x'}{\partial \varphi} \right)_0 d\varphi + \left(\frac{\partial x'}{\partial \kappa} \right)_0 d\kappa \\
 &+ \left(\frac{\partial x'}{\partial X} \right)_0 dX + \left(\frac{\partial x'}{\partial Y} \right)_0 dY + \left(\frac{\partial x'}{\partial Y} \right)_0 dY \\
 &+ \left(\frac{\partial x'}{\partial x'_0} \right)_0 dx'_0 + \left(\frac{\partial x'}{\partial c} \right)_0 dc - (x'_i - x_i^0) \\
 & \\
 vy'_i &= \left(\frac{\partial y'}{\partial X_0} \right)_0 dX_0 + \left(\frac{\partial y'}{\partial Y_0} \right)_0 dY_0 + \left(\frac{\partial y'}{\partial Z_0} \right)_0 dZ_0 \\
 &+ \left(\frac{\partial y'}{\partial \omega} \right)_0 d\omega + \left(\frac{\partial y'}{\partial \varphi} \right)_0 d\varphi + \left(\frac{\partial y'}{\partial \kappa} \right)_0 d\kappa \\
 &+ \left(\frac{\partial y'}{\partial X} \right)_0 dX + \left(\frac{\partial y'}{\partial Y} \right)_0 dY + \left(\frac{\partial y'}{\partial Y} \right)_0 dY \\
 &+ \left(\frac{\partial y'}{\partial x'_0} \right)_0 dx'_0 + \left(\frac{\partial y'}{\partial c} \right)_0 dc - (y'_i - y_i^0)
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

Als unbekannte Parameter werden dabei folgende Größen iterativ bestimmt:

- 3 Objektkoordinaten für jeden Neupunkt
- 6 Orientierungsparameter für jedes Bild
- 3 Parameter der inneren Orientierung für jede Kamera (oder entsprechend mehr, wenn zusätzliche Parameter eingeführt werden)

Der Rechengang erfolgt dann wie in 2.2.2 beschrieben.

2.3 Beschreibung eines industriellen Photogrammetriesystems (TRITOP)

Das System Tritop ist ein digitales photogrammetrisches Aufnahmesystem der Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH zur diskreten dreidimensionalen Punktbestimmung. Im industriellen Einsatz wird es zur Erfassung des Istzustandes eines Objektes, Überprüfung von Objektgeometrien bezüglich der Konstruktionsdaten sowie zur Deformationsanalyse angewandt. Im Prozess der dreidimensionalen Flächenmessung durch ein

Streifenprojektionssystem dient es bei der Volkswagen AG zur Messung der Verknüpfungspunkte zur Transformation der einzelnen Punktwolken eines größeren Objektes in ein gemeinsames Koordinatensystem. Tritop zeichnet sich hierbei durch preisgünstige, präzise und flexible Handhabung aus.

Das Messsystem besteht aus einer Spiegelreflexkamera Kodak DCS 460, einem Prozessrechner sowie Systemmaßstäben, Klebmarken und Messadapter.



Bild 2.3 Tritop-Systemkomponenten

2.3.1 Sensorsystem

Die Kodak DCS 460 ist eine digitale Teilmesskamera, die auf der Basis der Nikon F90 aufgebaut ist. Hier wurde das Rückenteil ersetzt durch Komponenten zur digitalen Bildaufnahme und -speicherung. Der Kernteil dieser Komponenten ist der integrierte Bildsensor Kodak KA-6300 (ÆM6“) mit einer Chipgröße von 18,4×27,5 mm und einer Pixelanzahl von 2036×3060 bei einer Pixelgröße von 9µm. Der M6-Sensor arbeitet mit 12 Bit Farbtiefe pro RGB-Farbe, wodurch sich eine Farbtiefe von 36 Bit für die Farbversion der Kamera ergibt. In der folgenden Tabelle sind die Merkmale der DCS 460 zusammengefasst. Für die Anwendung in der Photogrammetrie kommt hier die Schwarzweiß-Version zum Einsatz.

Tabelle 2.1 Technische Daten DCS 460

| | |
|--|---|
| Kamera / Rückteil | Kodak DCS 460c (Farbe)/m (SW) |
| Typ | Mobile Oneshot-Digitalkamera auf Spiegelreflexbasis |
| Kamera-Gehäuse | Nikon F90 |
| CCD-Sensor: Abmessungen | 18,4 x 26,4 mm |
| CCD-Sensor: Pixel | 2036 x 3060 |
| Farberfassung | Oneshot durch RGB-Bedampfung |
| max. Auflösung der Aufn. (h x v) | 2036 x 3060 (6.230.160) |
| max. Dateigröße der Aufnahmen | 8 Bit: 18 MB; 12 Bit: 36 MB |
| Farbtiefe (Bit) | 3 x 12 |
| Wechselspeicher | PCMCIA Typ III |
| Wechselspeicher: Kapazität (Aufn./MB min./max.) | 340 MB = 52 Aufn. |
| Schnittstellen/Bildübertragung | SCSI; PC Card-Laufwerk |
| sonstige Anschlüsse | Blitz etc. |
| Brennweitenverlängerung der verwendeten Objektiv | x 1,3 |
| Objektiv (Entspr. bei KB-Kamera) | Nikon F-mount Objektiv |
| verwendbare Lichtarten | alle |
| Lichtempfindlichkeit ISO | 80 (SW: 200) |
| Belichtungszeiten | 1/8000 - 30 Sek. |

2.3.2 Aufnahme und Auswertung

Das Objekt wird mit retroreflektierenden Messmarken signalisiert. Hierbei ist darauf zu achten, dass in jeder Aufnahme mindestens fünf codierte Marken messbar sind, um eine automatische Orientierung der Bilder durchführen zu können. Die Bilder werden auf der kamerainternen PCMCIA-Karte gespeichert und anschließend auf den Rechner übertragen. Die Bildmessung aller markierten Punkte erfolgt nach der Näherungswertbestimmung der Position der Ellipsen im Bild durch einen Ellipsenoperator.

Für die Näherungswertbestimmung einer ellipsenförmigen Struktur wird eine Schwerpunktsuche durchgeführt. Dazu wird in einem Suchfenster das gewogene Mittel der Bildelemente gebildet. Dabei wird für jedes Bildelement die Grauwertdifferenz zum mittleren Grauwert als Gewicht eingeführt. Nun wird der ursprüngliche Näherungswert solange verbessert, bis die Ellipse im Zentrum des verschobenen Suchfensters liegt (Bild 2.4).

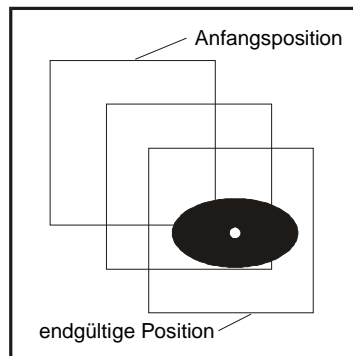


Bild 2.4 Schwerpunktsuche einer schwarzen Ellipse

Zur präzisen Bestimmung des Mittelpunktes wird eine Kantensuche längs von Suchgeraden, die sternförmig vom genäherten Mittelpunkt nach außen den Rand der Struktur durchstoßen, durchgeführt (Bild 2.5). Durch diese Randpunkte wird eine ausgleichende Ellipse durch vermittelnde Ausgleichung gelegt (Bild 2.6). Als Parameter wird der Mittelpunkt geschätzt.

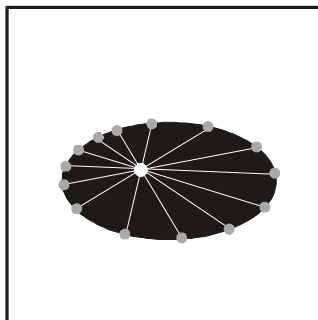


Bild 2.5 Suche der Ellipsenrandpunkte

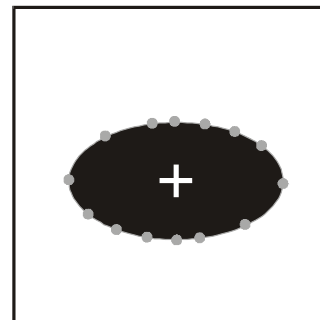


Bild 2.6 Mittelpunkt durch Ausgleichung

Codierte Zielmarken umgibt ein Barcoding, der sich im Messbild abbildet. Durch ihn kann der Punkt eindeutig identifiziert werden und den homologen Punkten in den anderen Bildern zugeordnet werden. Mit den codierten Punkten wird eine Vororientierung der Bilder vorgenommen. Ein automatischer Ablauf der Orientierung und Ausgleichung ist in Bild 2.7 dargestellt.

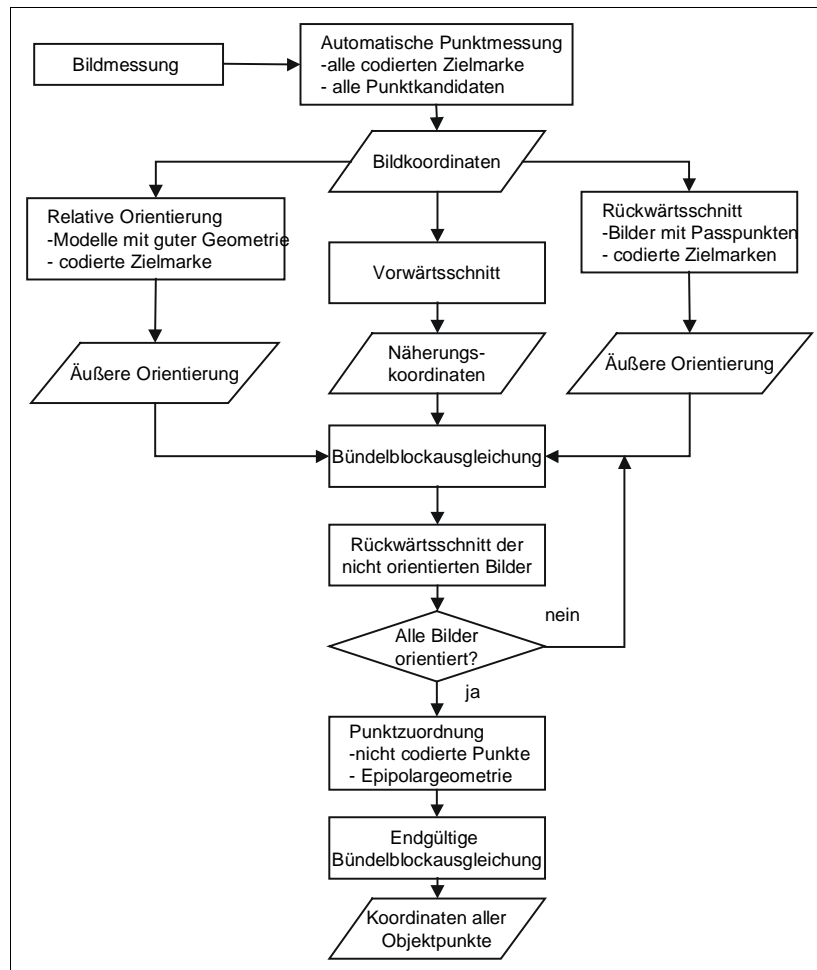


Bild 2.7 Orientierung der Messbilder

Die Bilder, in denen mindestens fünf codierte Marken abgebildet sind, werden modellweise orientiert. Die notwendigen Näherungswerte können automatisch durch kombiniertes Vorwärts- und Rückwärtseinschneiden, sukzessive Modellbildung oder Transformation von unabhängigen Modellen beschafft werden [LUHMANN 2000, S.280]. Dann werden durch Vorwärtsschnitt die Objektkoordinaten der codierten Punkte berechnet und durch Bündelausgleichung zusammen mit den Orientierungsparametern verbessert. Noch nicht orientierte Bilder werden durch Rückwärtsschnitt und Bündelausgleichung dazugefügt, bis alle Bilder Orientiert sind.

Die uncodierten Zielmarken werden abschließend über Suchprozesse in der Kernstrahlenebene identifiziert und durch Blockausgleichung in den Verband integriert.

2.3.3 Genauigkeit

Durch die hohe Flexibilität in der Größe der dreidimensionalen Messvolumen ist auch die vom Hersteller angegebene Spanne der erreichbaren Genauigkeit sehr weit gefasst. Hier variiert die Genauigkeitsangabe von $20\mu\text{m}$ bis $0,4\text{mm}$ bei einer Messvolumenbreite von $100\times 50\times 50\text{mm}^3$ bis $10\times 5\times 5\text{m}^3$. In [LUHMANN 2000, S.180] wird die erreichbare Bildmessgenauigkeit mit $0,2$ bis $0,5\ \mu\text{m}$, was $1/50$ bis $1/20$ Pixel entspricht, angegeben. Dies ist als Angabe zur *inneren Genauigkeit* zu verstehen.

Die *äußere Genauigkeit* einer Auswertung lässt sich nur durch den Vergleich von photogrammetrisch bestimmten Objektpunkten oder Strecken mit übergeordnet genau vorliegenden Referenzen bestimmen und soll im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführt werden. In Tabelle 2.2 sind die Herstellerangabe aufgeführt:

Tabelle 2.2 Genauigkeitsangaben [GOM-Internet, 2000]

| TRITOP | |
|-----------------|---|
| Messvolumen | $100\times 50\times 50\text{mm}^3$ bis $10\times 5\times 5\text{m}^3$ |
| Kameraauflösung | 3072x2048 Pixel (digital) oder 1536x1024 Pixel (digital) |
| Markengröße | 0,5mm - 18mm |
| Messrauschen | 0,02mm - 0,4mm |

2.4 Fehlereinflüsse

2.4.1 Abbildungsfehler

Im Folgenden werden Effekte beschrieben, die durch die Abweichung von der ideale zentralperspektivischen Abbildung herrühren. Diese entstehen bei mehrlinsigen Objektiven dadurch, dass die Lage von Ein- und Austrittspupille nicht mit den Hauptebenen zusammenfällt. Damit tritt ein einfallender Lichtstrahl unter einem anderen Winkel aus als er eintritt. Weiter können eine Dezentrierung und Schiefstellung einzelner Linsen im System zu fehlerhaften Abbildungen führen. Eine weitere Ursache liegt bei digitalen Systemen in einer ungleichförmigen Anordnung der Bildelemente auf den Sensorchip. So werden beim Tritop-System beispielsweise folgende Verbesserungen der Inneren Orientierung vorgenommen:

2.4.1.1 Radial-symmetrische Verzeichnung

Die Radial-symmetrische Verzeichnung besitzt den Hauptfehlereinfluss der dargestellten Fehlerquellen. Sie entsteht durch Brechungsänderungen an den Linsen des Objektivs und wird im allgemeinen durch eine sog. Seidel-Reihe als Funktion des radialen Abstands r

ausgedrückt. Um die numerischen Korrekturen zwischen dem Bildmaßstab und den Koeffizienten A_i zu reduzieren, wird ein linearer Anteil der Verzeichnungsfunktion abgespalten. Die Funktion erhält damit einen zweiten Nulldurchgang. Der Parameter r_0 des Nulldurchgangs wird in der Regel mit $2/3$ des maximalen Bildradius gewählt. Die Korrektur drückt sich dann wie folgt aus:

$$\begin{aligned}\Delta r'_{rad} &= A_1 \cdot r' \cdot (r'^2 - r_0^2) + A_2 \cdot r' \cdot (r'^4 - r_0^4) + A_3 \cdot r' \cdot (r'^6 - r_0^6) \\ \Delta x'_{rad} &= x' \cdot \frac{\Delta r'_{rad}}{r'} \\ \Delta y'_{rad} &= y' \cdot \frac{\Delta r'_{rad}}{r'}\end{aligned}\tag{2.27}$$

2.4.1.2 Radial-asymmetrische und tangentielle Verzeichnung

Die Radial-asymmetrische und tangentielle Verzeichnung rührt vor allem von einem Versatz einer Linse aus der optischen Achse des Objektivs her. Die Auswirkung kann durch folgenden Ansatz erfasst werden:

$$\begin{aligned}\Delta x'_{tan} &= B_1 \cdot (r'^2 + 2x'^2) + 2B_2 \cdot x' \cdot y' \\ \Delta y'_{tan} &= B_2 \cdot (r'^2 + 2y'^2) + 2B_1 \cdot x' \cdot y'\end{aligned}\tag{2.28}$$

Bei der Verwendung einfacher Objektive ist es auf jeden Fall sinnvoll, diese Korrektur vorzunehmen.

2.4.1.3 Affinität und Scherung

Um eine Abweichung des Bildkoordinatensystems von Orthogonalität und Gleichmäßigkeit der Koordinatenachsen zu kompensieren, wird folgender Ansatz für die Affinität und Scherung des Bildkoordinatensystems gewählt:

$$\begin{aligned}\Delta x'_{aff} &= C_1 \cdot x' + C_2 \cdot y' \\ \Delta y'_{aff} &= 0\end{aligned}\tag{2.29}$$

2.4.1.4 Bestimmung der Kameraparameter

Die oben beschriebenen Parameter werden zusammen mit der Kammerkonstanten c und der Lage des Bildhauptpunktes x'_0 , y'_0 als Parameter der inneren Orientierung oder Modellparameter genannt. Zu ihrer Bestimmung existieren verschiedene Strategien, die sich durch den zeitlichen Abstand zur Objektaufnahme unterscheiden in:

- Laborkalibrierung
- Testfeldkalibrierung

- Simultankalibrierung

Bei industriellen Anwendungen mit Teilmesskameras kommen die ersten beiden Verfahren eher selten zum Einsatz. Aus diesem Grunde wird hier nur das Verfahren der Simultankalibrierung kurz umrissen.

Bei der Simultankalibrierung wird das Testfeld durch das eigentliche Objekt ersetzt. Es brauchen keine Objektinformationen vorzuliegen, also keine Passpunkte. Die Parameter der inneren Orientierung werden zusammen mit den Objektkoordinaten durch die Bündelausgleichung bestimmt. Für die Maßstabsinformation reicht eine bekannte Strecke im Objekt aus. So liegt der Vorteil dieser Kalibrierung darin, dass sie sehr einfach durchzuführen ist (durch die Objektaufnahme) und höchsten Genauigkeitsansprüchen genügt, da die innere Orientierung direkt zum Zeitpunkt der Aufnahme bestimmt wird. Es müssen lediglich geeignete Aufnahmen im Verband vorliegen. Geeignete Aufnahmen, die die Simultankalibrierung unterstützen sind gekantete Aufnahmen, Aufnahmen mit genügender räumlicher Tiefe und solche mit guten Strahlenschnittbedingungen.

Grundsätzlich dienen besondere Aufnahmekonfigurationen, wie zum Beispiel Kantungen und eine formatfüllende räumliche Ausdehnung des Testfeldes, dazu, die Korrelationen zwischen den Parametern der inneren und äußeren Orientierung zu minimieren. Als ein Beispiel für häufig verwendete Aufnahmeanordnungen zur Simultankalibrierung sind im folgenden aufgeführt.

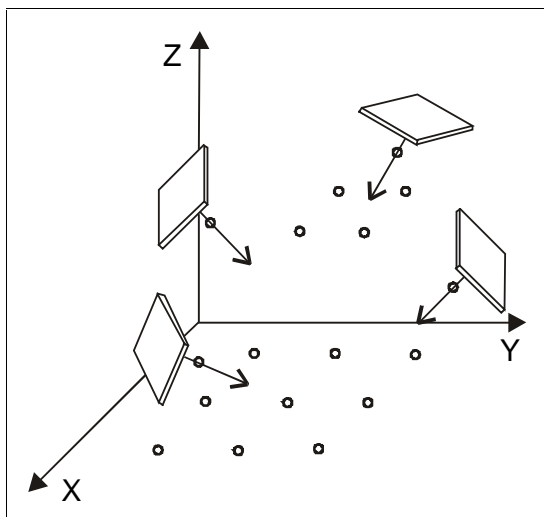


Bild 2.8 4 Kamerastandorte über räumlichem Punktfeld ohne Passpunkte, beliebige Kantungen

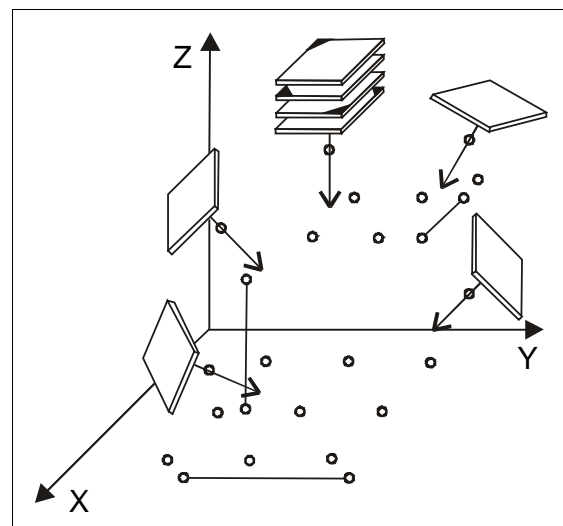


Bild 2.9 8 Kamerastandorte über räumlichem Punktfeld mit 3 Maßstäben ohne Passpunkte

Bild 2.8 zeigt eine Anordnung, bei der auf vorgegebene Kantungen der Aufnahmen verzichtet werden kann, da mindestens vier Schrägaufnahmen eines räumlichen Punktfeldes

vorliegen. Eine Konfiguration, die zwar aufwendiger ist aber dafür die zuverlässigste darstellt, ist in Bild 2.9 gezeigt. Hier finden sich unter den acht Aufnahmen gegenseitig gekantete Aufnahmen und Schrägaufnahmen wieder und es sind im räumlichen Punktfeld drei bekannte Strecken eingeführt.

2.4.2 Signalisierung des Objektes

2.4.2.1 Verwendete Retromarken

Bei gesteigerter Genauigkeitsanforderung an die Objektvermessung verwenden industrielle Industriemesssysteme im allgemeinen Zielmarken, mit denen die Messstellen signalisiert werden. Zur Signalisierung der Objektpunkte werden kreisförmige retroreflektierende Messmarken eingesetzt. Sie bieten bei kameraseitiger Beleuchtungsquelle (z.B. Ringblitz um das Objektiv) aufgrund ihrer guten Rückstrahleigenschaften gut definierte Abbildungen der Messpunkte in den Bildern.

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Signalisierungen sind in Bild 2.10 dargestellt. Im einzelnen werden hier

- 1) Messmarken auf den Maßstäben mit einem Durchmesser von 10mm
- 2) Codierte Messmarken mit einem Durchmesser von 9mm
- 3) Uncodierte Messmarken mit einem Durchmesser von 12mm

verwendet.

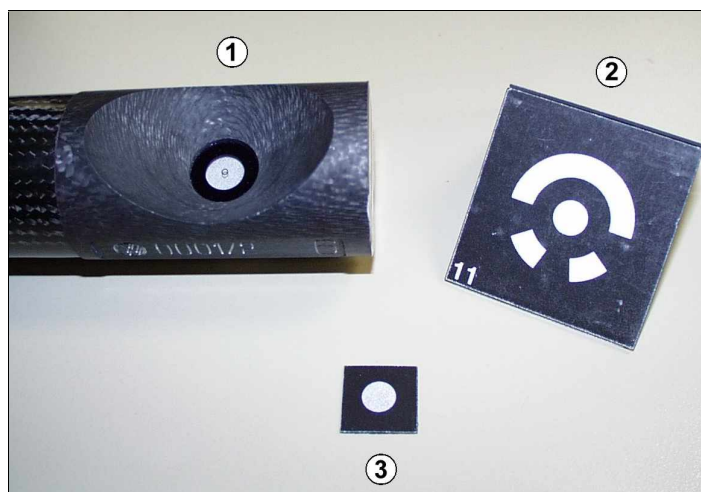


Bild 2.10 Retroreflektierende Messmarken

Retroreflektierende Messmarken werden durch die flächenhafte Verteilung von halbverspiegelten Glaskugeln auf einer selbstklebenden Trägerschicht hergestellt. Der maximale Durchmesser dieser Kugeln kann 80 μm betragen. Die Definition der kreisrunden Marke erfolgt dann durch Maskieren der Folie, indem sie mit einer zweiten Folie abgedeckt wird, die eine runde Aussparung enthält, oder durch direktes Ausstanzen der Kreisform aus der Retrofolie. Die daraus resultierenden Eigenschaften bei der Beobachtung haben jedoch Einfluss auf das Triangulationsergebnis.

2.4.2.2 Einfluss retroreflektierender Zielmarken

Eine ausführliche Darstellung der Einflüsse retroreflektierender Messmarken findet sich in [DOLD 1997]. Betrachtet man die Zielmarke aus der Richtung $\alpha=0$ (Bild 2.11), so wird die gesamte Zielmarkenfläche beleuchtet. Das Zentrum des reflektierten Lichtes, der sogenannte Zielstrahl, repräsentiert den Mittelpunkt der Zielmarke M_0 . Wird hingegen die Zielmarke unter einem Einfallswinkel $\alpha \neq 0$ betrachtet, erfolgt durch die Maskendicke h eine Abschattung der Zielmarkenfläche vom Betrag d , und der reflektierte Zielstrahl repräsentiert den um $d/2$ von M_0 versetzten Zielpunkt M_α .

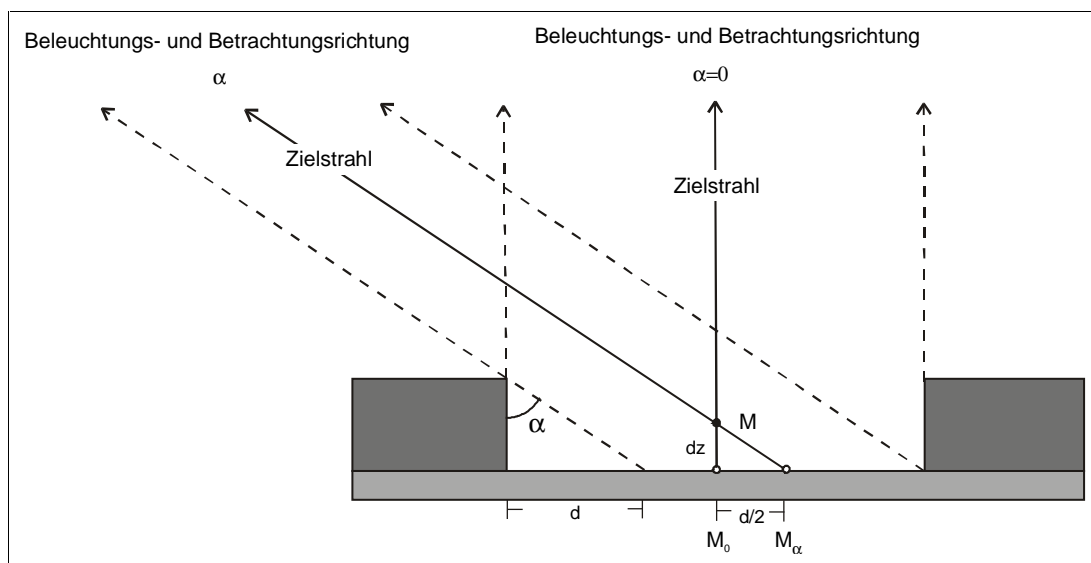


Bild 2.11 Einfluss der Maskendicke

$$\tan(\alpha) = \frac{d}{h} = \frac{d}{2 \cdot dz} \Leftrightarrow dz = \frac{h}{2} \quad (2.30)$$

Betrachtet man zunächst nur die beiden Zielstrahlen, so liegt der triangulierte Messpunkt M exakt senkrecht über dem idealen Zielmarkenmittelpunkt M_0 mit einem Abstand von $dz=h/2$. Aus (2.30) lässt sich erkennen, dass alle Zielstrahlen, unabhängig vom Einfallswinkel, den Zielstrahl für $\alpha=0$ im Messpunkt M , also exakt $h/2$ über dem idealen Mittelpunkt der Zielmarke, schneiden. Der Schnittpunkt M aller möglichen Zielstrahlen liegt demnach $h/2$ über dem idealen Zielmarkenmittelpunkt.

Retroreflektierende Zielmarken, die mit Hilfe einer Maske konstruiert werden, haben die Eigenschaft, dass am Rand des Kreises einzelne Retrokugeln teilweise verdeckt sind. Dadurch kommt es bei einer teilweise verdeckten Kugeloberfläche je nach Belichtungsrichtung zu keiner, einer mittleren oder einer starken Reflexion (Bild 2.12).

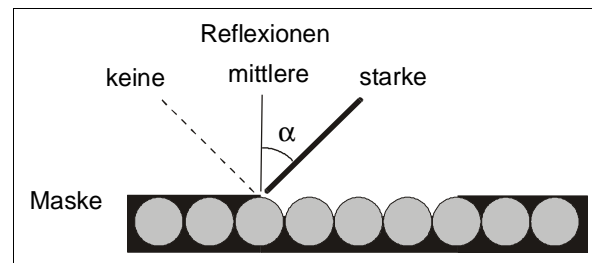


Bild 2.12 Reflexion am Rande der Zielmarke

Betrachtet man die beiden Fälle, bei denen mit identischen Einfallswinkeln α einmal die Beleuchtungs- und Betrachtungsrichtung von links und einmal von rechts gewählt wird und jeweils eine halbverdeckte Kugelreihe dabei nicht reflektiert, so werden je nach Betrachtungsrichtung unterschiedliche virtuelle Zielmarkenmittelpunkte M_L und M_R angezielt. Der virtuelle Zielmarkenmittelpunkt M_L liegt mit einem Abstand von etwa einem Kugeldurchmesser d rechts von M_R (Bild 2.13).

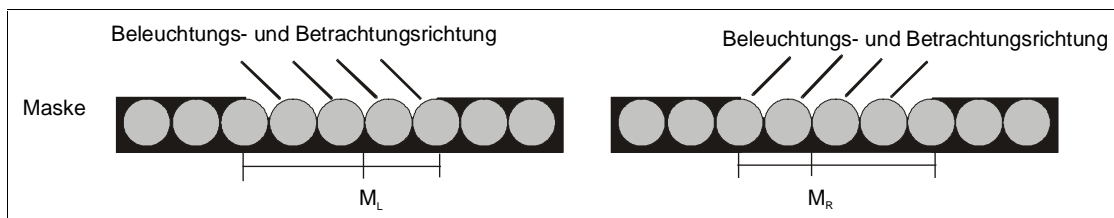


Bild 2.13 Zielmarkenmitte bei maskierten Marken

Die Auswirkung auf das Messergebnis lässt sich für diesen Fall schematisch verdeutlichen (Bild 2.14). Der Einfluss dz wirkt sich in der Weise aus, dass der triangulierte Punkt oberhalb der Zielmarke liegt. Eine hinreichende theoretische Abschätzung dieses Effekts ist aufgrund der „Kügelchenstruktur“ der Folie und der daraus resultierenden nicht exakten Rundheit nicht möglich [DOLD 1997].

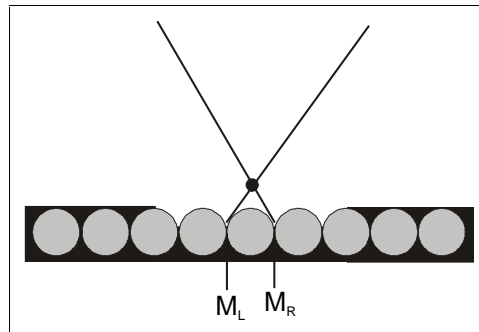


Bild 2.14 Triangulierter Punkt bei maskierter Marke

Bei ausgestanzten Retromarken tritt der umgekehrte Effekt auf. Hier sind die gegenüberliegenden Seiten der Beleuchtungsrichtung abgedeckt, somit verschiebt sich jeweils der virtuelle Mittelpunkt zu der Seite, aus der betrachtet und belichtet wird. Der triangulierte Mittelpunkt liegt demzufolge dann unterhalb des wahren Mittelpunkts.

2.4.3 Schnittbedingungen

Zu den geometrischen Einflussfaktoren auf die Punktbestimmung zählt die Schnittgeometrie an den homologen Punkten. Sie kann als Schnittwinkel der beiden Raumvektoren \underline{r}' und \underline{r}'' am Modellpunkt ermittelt werden:

$$\cos(\alpha) = \frac{\vec{r}'^T \cdot \vec{r}''}{|\vec{r}'| \cdot |\vec{r}''|} \quad (2.31)$$

Der Schnittwinkel beschreibt das Verhältnis von Basis zu Aufnahmeabstand und kann als Qualitätsmaß eines Aufnahmeverbandes, der n Verknüpfungspunkte enthält, im mittleren Schnittwinkel ausgedrückt werden:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{n} \cdot \sum_n \alpha_i \quad (2.32)$$

Er liegt günstigerweise bei 90° und drückt damit homogene und minimale Fehler in der Punktbestimmung in allen Koordinatenrichtungen aus (Bild 2.15).

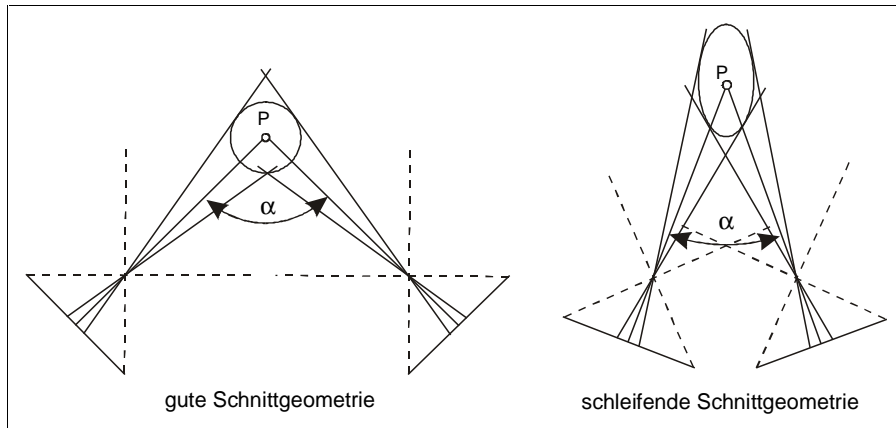


Bild 2.15 Einfluss der Schnittbedingungen auf die Punktbestimmung

3 Prüfkörper

Prüfkörper sind Referenzeinrichtungen, deren Vermessung mit einem photogrammetrischen System den Anschluss der photogrammetrischen Messung an nationale oder internationale Normale gewährleistet. Während die Messmarkenmittelpunkte den Anfangs- und Endpunkt von Abständen definieren, gewährleistet der Träger die Stabilität der Abstände. [DOLD 1997]

Zu diesem Zweck wurden bei der Volkswagen AG optisch antastbare Maßstäbe aus Kohlefaserverbundwerkstoff (CFK) entwickelt. Diese Maßstäbe besitzen sechs Messmarken bei einer Gesamtlänge von 270 cm und sind zur besseren Handhabung in der Mitte teilbar. Die Abstände der Messmarken sind mit einer Unsicherheit besser 5 μm bekannt. Als zentraler Bestandteil der Überprüfung der Längenmessabweichung eines photogrammetrischen Systems ist diese Referenzlängenrealisierung im Gegensatz zu herkömmlichen Maßstäben mit Punktsignalisierung durch austauschbare *Hubbs-Targets* kalibrierfähig. Auch im Hinblick auf die Vorschriften der eingangs erwähnten Richtlinie GUM, die in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird, ist dies eine nötige Voraussetzung zur Ermittlung und zum Nachweis der Messunsicherheit.

Bei der Durchführung dieser Arbeit sind zum bestehenden Prototyp noch 8 weitere Maßstäbe gleiche Ausführung hergestellt und kalibriert worden.

Nach VDI/VDE 2634 müssen für die verwendeten Referenzkörper Kalibrierscheine vorliegen. Dies ist auch in Form eines DKD-Kalibrierscheins (Deutscher Kalibrierdienst) möglich. Zum Zeitpunkt der praktischen Messungen zu dieser Arbeit lagen diese Nachweise noch nicht vor. Das folgend beschriebene Kalibrierverfahren befindet sich noch in der Abnahmephase zur Einbindung in die Kalibrierkette. So sind die Ergebnisse auch als vorläufige Werte anzusehen und nicht als Grundlage zu Abnahme und Überwachung der untersuchten Systeme zu verwenden. Es soll das Verfahren und die Referenzkörper auf Tauglichkeit zur Überprüfung und zum Vergleich photogrammetrischer Systeme untersucht werden.

3.1 Beschreibung der Maßstäbe

3.1.1 Träger

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). Diese Eigenschaften kommen den Werkstoffanforderungen an ein hochpräzises Längenmesswerkzeug nach, welche definiert werden durch:

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

Der Maßstab verkörpert durch sechs Messmarken 15 verschiedene Längen zwischen 2626 mm und 326 mm (Bild 3.1).

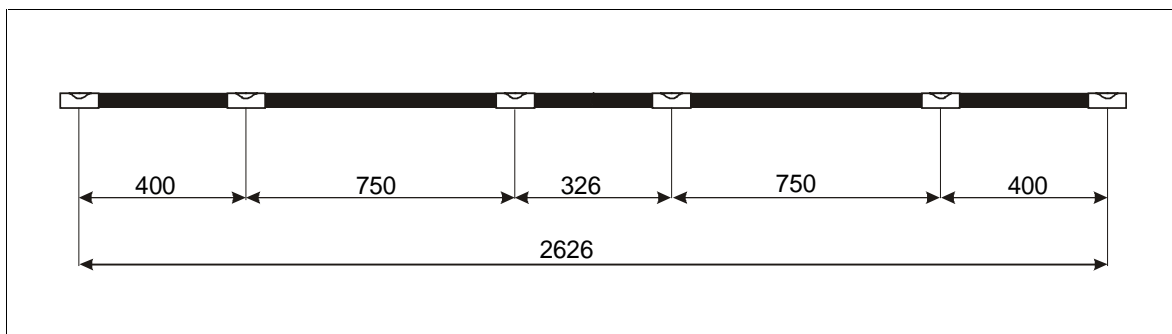


Bild 3.1 Maßstab mit 6 Messmarken

3.1.2 Messmarken

Die Kalibrierung der Maßstäbe soll mit Hilfe eines optisch antastenden Koordinatenmessgerätes erfolgen. Die konventionelle retroreflektierende Messmarke eignet sich jedoch nicht für die Messung mit diesem KMG, da durch die stark vergrößernde Optik der CCD-Kamera die Kanten dieser Messmarken zu grob sind. Aus diesem Grunde ist die Messmarke mehrschichtig aufgebaut und in die neutrale Faser des Maßstabträgers eingebracht (Bild 3.2). Das reflektierende Retromaterial befindet sich in einem Abstand von 1 bis 2 mm auf einem austauschbaren Stempel unter der chrombeschichteten Glasmarke. Auf diese Weise lassen sich verschiedene Hintergründe für die Messmarke einsetzen. 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. Zur Beobachtung der Marke wurde in das Trägermaterial ein Kegel mit 90° Öffnungswinkel gefräst.

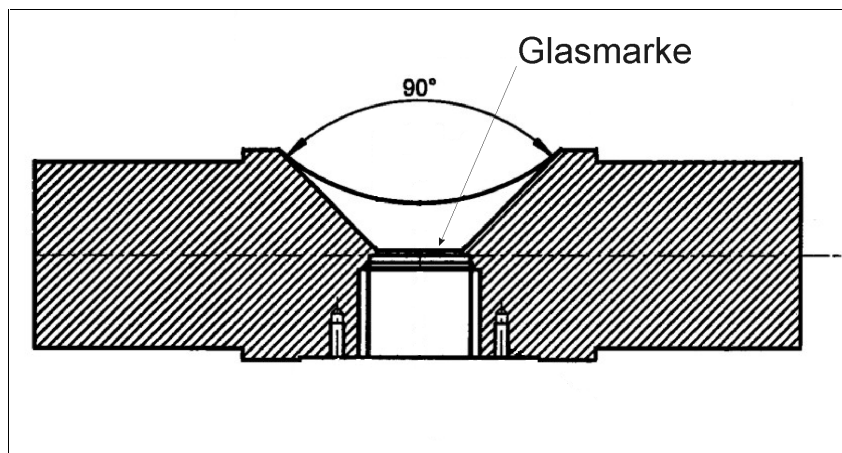


Bild 3.2 Vollmaterialstück mit Messmarke

Die Glasmarke ist kameraseitig teilentspiegelt, um einfallendes Licht möglichst wenig zu reflektieren. Auf dieser Seite ist auf das Glasplättchen eine dünne, lichtundurchlässige Chromschicht (Dicke $< 5 \mu\text{m}$) mit einer kreisförmigen Blende mittels *Diadur IV-Verfahrens* aufgebracht. Die Blende besitzt so eine Abweichung von der Rundheit, die weniger als $1 \mu\text{m}$ beträgt und ein Durchmesser von 10 mm. In der Mitte der Marke ist noch eine weitere kreisrunde Markierung mit 1,75 mm Durchmesser aufgebracht, um ebenfalls eine Anzielung durch Theodolitsysteme zu ermöglichen.

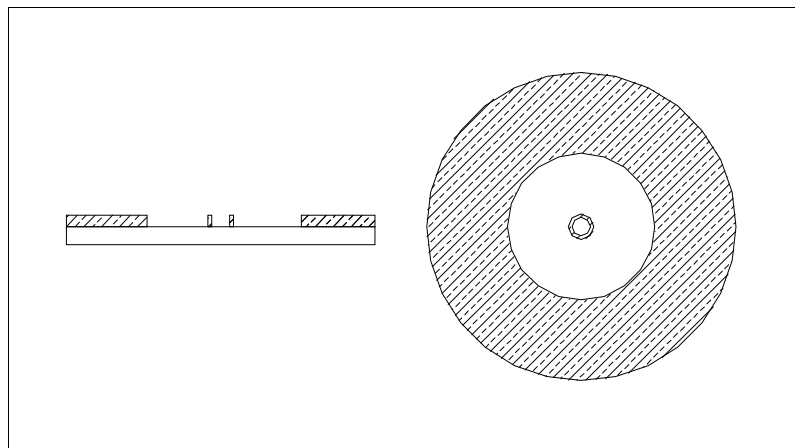


Bild 3.3 Messmarke mit Markierung

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.

3.2 Kalibrierverfahren

Das Verfahren zur Kalibrierung der Referenzstäbe folgt einer bei der Volkswagen AG entwickelten und patentierten Methode. Ein optisch antastender Sensor (Videk Megaplas CCD-Kamera) wird hierbei vom Messarm einer Koordinatenmessmaschine geführt wobei der Fahrweg und die Neigung der Kamera jeweils durch ein Laserinterferometer registriert werden. Die Unsicherheit der somit auf den Maßstäben bestimmten Strecken soll weniger als $5\mu\text{m}$ betragen.

Die folgenden Komponenten umfasst das System:

- 2 Laserinterferometer ML10 Laser der Firma Renishaw
- CCD-Kamera Videk Megaplas
- Koordinatenmessmaschine Zeiss USMC
- Bildverarbeitungsrechner

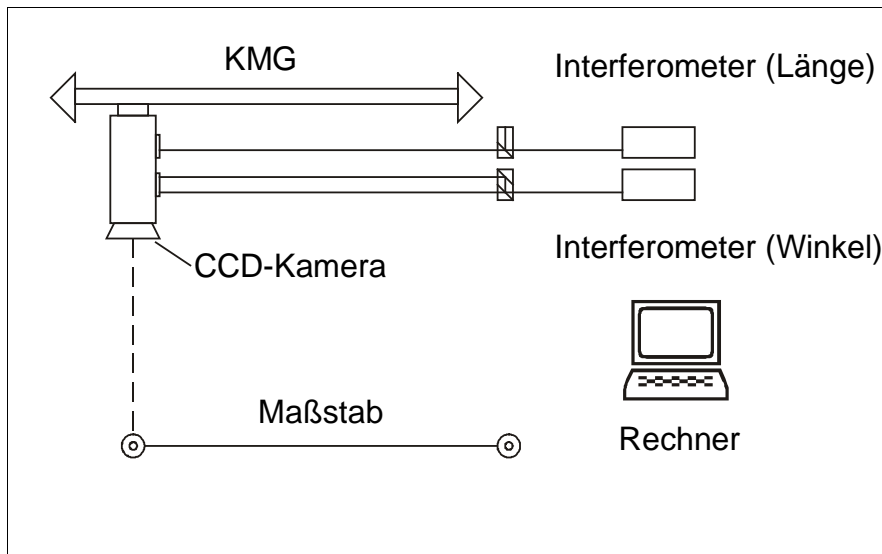


Bild 3.4 Schematische Darstellung der Kalibrierung

Der Ablauf der Kalibrierung ist in Bild 3.4 schematisch dargestellt und beinhaltet folgende Schritte:

Der Bildverarbeitungsrechner übernimmt die Funktion des sonst am KMG verwendeten Tasters und bestimmt über entsprechende Bildverarbeitungsfunktionen die Mittelpunkte der am Maßstab befindlichen Messmarken. Der Maßstab wird entlang einer Verfahrrichtung des KMG ausgerichtet, so dass die CCD-Kamera durch Verfahren des Messarmes der KMG in nur einer Koordinatenrichtung über den Messmarken positioniert werden kann.

Die Längenbestimmung wird zwischen zwei Positionen der CCD-Kamera vorgenommen. Dazu ist ein Interferometer (Länge) in Richtung der gewählten Verfahrrichtung des KMG aufgebaut, das über zwei Tripelspiegel, die am Messarm der KMG montiert sind, deren Position erfasst und als Differenz die Länge bestimmt.

Da beim Verfahren der Kamera mit einer Kippung in Verfahrrichtung zu rechnen ist, die sich auf das Messergebnis auswirkt, wird zusätzlich der Nickwinkel interferometrisch erfasst und bei der Ermittlung der Maßstabslänge berücksichtigt. Dazu wird über dem ersten Interferometer zur Streckenmessung noch ein zweites zur Winkelmessung aufgebaut. Die Kommunikation mit dem KMG wird von Prozessrechner gesteuert und umfasst folgende Aufgaben:

- Verfahren der CCD-Kamera
- Nullen des Interferometers und Registrieren der Länge, des Nickwinkels und der Umgebungsparameter

3.3 Komponenten

3.3.1 Interferometer

Bei der Überlagerung von zwei Lichtwellen beobachtet man beim Verschieben der beiden Wellen Lichtinterferenzen in Form von periodischen Helligkeitsschwankungen. Eine Interferenz ist hier das Intervall zwischen einem Helligkeitsmaximum, bei dem sich beide Maximalamplituden addieren, und einem Helligkeitsminimum, beim Zusammentreffen der geringsten Amplituden. Der Betrag der Verschiebung einer Welle in bezug zur anderen resultiert aus der Anzahl der eintretenden Interferenzen multipliziert mit der Wellenlänge des Lichtes. Die beiden Wellen müssen eine konstante Phasenbeziehung aufweisen und kohärent sein. Mit einer Wellenlänge von Licht unter $1\ \mu\text{m}$ lassen sich so Längenänderungen hochpräzise auflösen. Für die interferometrische Längenmessung eignen sich hier besonders frequenz-stabilisierte Helium-Neon-Laser.

3.3.1.1 Grundprinzip des Zweistrahl-Interferometer nach Michelson

Ein Interferometer nach Michelson ist grundlegend wie in Bild 3.5 angeordnet und besteht aus einem Laser, einem Strahlteiler, einem verschiebbaren Reflektor und einem Photodetektor. Im Strahlteiler wird das Laserlicht aufgeteilt in einen Mess- und einen Referenzstrahl. Der Referenzstrahl durchläuft einen starren Spiegel und wird mit dem Messstrahl, der am beweglichen Reflektor reflektiert wird, zur Interferenz gebracht. Verschiebt sich der bewegliche Reflektor längs der Ausbreitungsrichtung, so zählt der Photodetektor N Interferenzen. Ist die Wellenlänge λ des Lichtes bekannt ergibt sich der Verschiebungsbetrag s zu:

$$s = N \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (3.1)$$

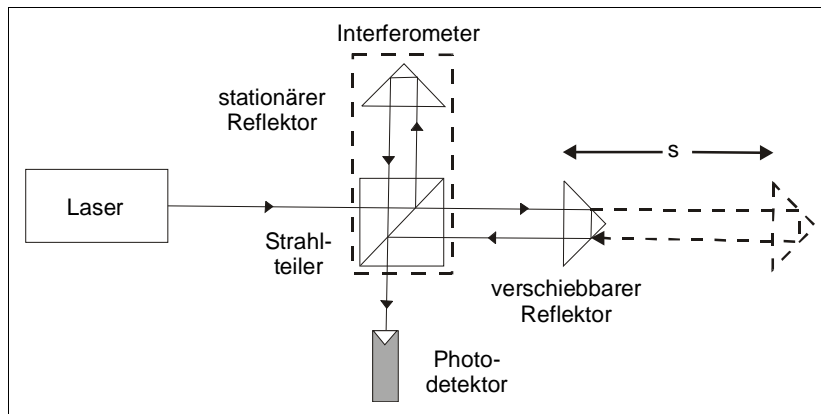


Bild 3.5 Interferometer nach Michelson

Bei diesem Ein-Moden-Verfahren wird Laserlicht einer einzigen Wellenlänge benutzt. Dem Vorteil einer einfachen Auswerteelektronik stehen eine aufwendige Justierung der Komponenten und das Unvermögen, die Verschieberichtung des Reflektors zu detektieren, gegenüber.

Abhilfe schafft hier das im folgenden beschriebene Verfahren.

3.3.1.2 Zwei-Moden-Heterodyn-Verfahren

In einem axialen Magnetfeld wird das Licht eines Einfrequenz-Helium-Neon-Laser durch den Zeeman-Effekt in zwei Frequenzen f_1 und f_2 aufgespalten. Diese sind entgegengesetzt zirkular polarisiert. Durch die $\lambda/4$ -Platte werden die Wellen senkrecht zueinander linear polarisiert und im Strahlteiler in ein Mess- und ein Referenzstrahl geteilt. Im Zähler A wird die Schwebungsfrequenz f_R gemessen, die sich wie folgt berechnet:

$$f_R = f_2 - f_1 \quad (3.2)$$

Im Polarisationsstrahlteiler wird der Messstrahl in die Frequenzen f_1 und f_2 getrennt. Die Frequenzen f_1 und f_2 durchlaufen dann den stationären bzw. den verschieblichen Spiegel und interferieren im Strahlteiler wieder. Die Frequenz, die am mit der Geschwindigkeit v bewegten Reflektor SM zurückgeworfen wird ist dem Dopplereffekt unterworfen und verschiebt sich um

$$\Delta f_D = -2f_1 \cdot \frac{v}{c} \quad (3.3)$$

Die Welle unter Einfluss des Dopplereffektes besitzt die Frequenz

$$f'_1 = f_1 + \Delta f_D \quad (3.4)$$

Am Photodetektor B wird sowohl das Referenzsignal f_2 und das Messsignal f'_1 registriert. Die Schwebungsfrequenz, die an Zähler B gemessen wird, beträgt

$$f_M = f_2 - f'_1 = f_2 - f_1 + 2f_1 \cdot \frac{V}{C} = f_R + 2f_1 \cdot \frac{V}{C} \quad (3.5)$$

Der Differenzzähler C misst eine der Verfahrgeschwindigkeit des Reflektors S_M proportionale Frequenzverschiebung f_V

$$f_V = f_M - f_R = 2f_1 \cdot \frac{V}{C}. \quad (3.6)$$

Die Geschwindigkeit des Reflektors S_M zum Zeitpunkt t ist

$$v(t) = \frac{C}{2f_1} \cdot f_V(t). \quad (3.7)$$

Der Verschiebebetrag s des Reflektors S_M ist somit

$$s = \int_{t_1}^{t_2} v(t) \cdot dt = \frac{C}{2f_1} \int_{t_1}^{t_2} f_V \cdot dt = \frac{\lambda_1}{2} \int_{t_1}^{t_2} f_V(t) \cdot dt \quad (3.8)$$

Hier ist λ_1 die Wellenlänge des Lasers in der Atmosphäre, in der die Messung durchgeführt wird, die der Frequenz f_1 zugeordnet ist. Durch Interpolation kann das Auflösungsvermögen noch gesteigert werden. Ein Interferometer nach dem Zwei-Moden-Heterodyn-Verfahren zeichnet sich durch eine unkritische Justierung seiner Komponenten aus.

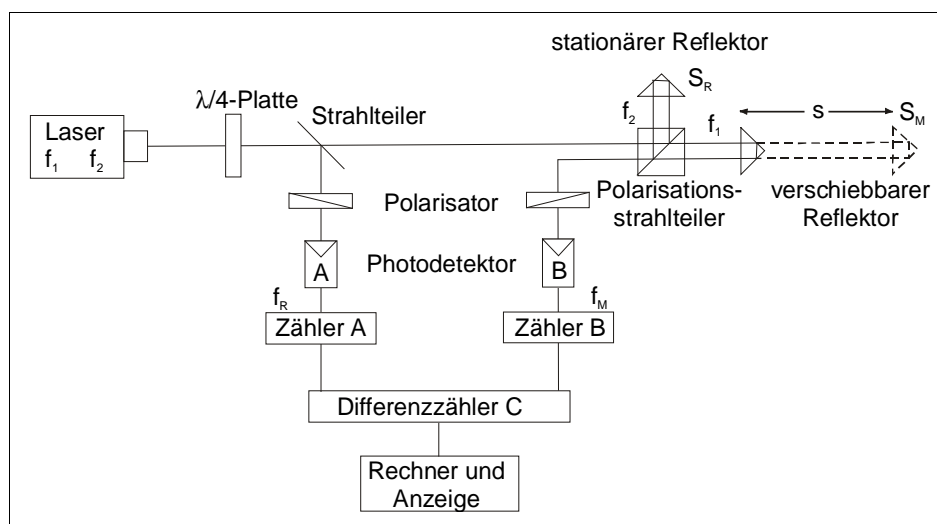


Bild 3.6 Funktionsweise Heterodyn-Laserinterferometer

3.3.1.3 Winkelinterferometer

Ein Interferometer lässt sich ebenfalls zur Messung von Winkeln bis zu 10 Grad einsetzen. Das Winkelinterferometer (Strahlteiler und Umlenkspiegel) teilt den vom Laser kommenden Strahl in die beiden parallelen Strahlen 1 und 2 (Bild 3.7). Diese treffen dann auf einen drehbaren Reflektor, der zwei senkrecht zur Drehachse angeordnete Prismen besitzt.

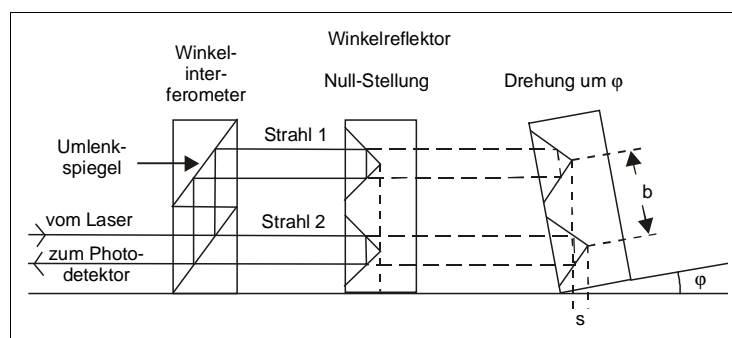


Bild 3.7 Winkelinterferometer

Verschiebt sich der Reflektor, ohne Drehung, so ändern sich beide Strahlängen zu gleichen Beträgen und es werden keine Interferenzänderungen festgestellt. Bei Kippung des Reflektors verkürzt sich jedoch ein Strahl während sich der andere verlängert. Aus der Streckendifferenz s , die direkt durch Zählung der Interferenzstreifen gewonnen wird, und dem Abstand b der beiden Prismen kann der Verdrehwinkel des Reflektors gegenüber der Ausgangslage bestimmt werden. Bei einer Auflösung von 0,01 bis 0,02 μm und einem Abstand b von 30 mm ergibt sich eine Winkelauflösung von 0,03 mgon [SCHWARZ 1995].

3.3.2 CCD-Kamera

Bei der verwendeten Kamera handelt es sich um eine Videk Megaplus der Firma Kodak, eine Messkamera, die die gängigen CCIR-Standards erfüllt, sowie über eine interne 14 MHz Pixel-Clock und die Möglichkeit zum externen Triggern verfügt.

Die drei Hauptfunktionen, mit denen der Kamerabetrieb verwaltet wird, sind die Bildeinzugs-, Shutter- und Belichtungszeitkontrolle, welche in 9 verschiedenen Modi verändert werden können. Der Shutter ist ein mechanisches Bauteil, dass mit hoher Frequenz, ähnlich dem Verschluss an einer handelsüblichen Kamera, ständig öffnet und schließt. Dieser Modus wird für hochgenaue Messungen deaktiviert, da das Bauteil in der Kamera Erschütterungen

auslöst. Im Gegenzug muss die Belichtungszeit durch einen elektronischen Shutter der Kamera minimiert werden. Dies geschieht durch eine Belichtungszeit von 250 μsec , was bedeutet, dass nur noch Beleuchtungsquellen mit hoher Intensität an der Ladungserzeugung im Chip beteiligt sind. Zur Kalibrierung werden daher gepulste LEDs als Hintergrund für die Messmarken benutzt.

3.3.3 Koordinatenmessgerät (KMG)

In der Automobilindustrie werden bei der Überprüfung von Maß-, Form- und Lageabweichungen aufgrund ihrer hohen Flexibilität vor allem Koordinatenmessmaschinen eingesetzt. Sie sind in der Lage, durch ihre hochgenau geführten Achsen mechanisch ein dreidimensionales Koordinatensystem zu definieren und diskrete Punkte optisch oder mechanisch anzutasten. Diese Messmaschinen sind aufgrund unterschiedlicher Genauigkeitsanforderungen in teil- oder vollklimatisierten Räumen untergebracht.

Für den Kalibrieraufbau wird ein Universal-Ständer-Messzentrum (USMC) der Firma Zeiss benutzt, das in seinen waagerechten Achsen einen Fahrweg von 3000 mm erlaubt. Durch die Ausführung dieses Gerätes in Auslegerbauart, wobei der den Messtaster tragende Arm nur an einer Seite der Maschine geführt wird, besteht die Gefahr hoher Fehler aufgrund von Kipp- und Drehercheinungen. Diese Fehler werden im mathematischen Modell des Kalibrierverfahrens berücksichtigt. Vor allem sind dies Einflüsse, die sich auf die Kippung der Kamera auswirken. Eine weitere Fehlerquelle, die mathematisch berücksichtigt wird ist die Durchbiegung der Messplatte aufgrund wechselnder Lasten durch Bewegung des Messarms.

3.4 Ermittlung der Länge

Die Formel zur Berechnung der gesuchten Länge ist eine Funktion aus der vom Interferometer gemessenen Strecke L_{gem} , der Koordinaten der Messmarkenmittelpunkte (Kamerakoordinaten) $dx1; dy1; dx2; dy2$, des Nickwinkels β und der Höhe der Kamera über der Marke h .

In der XY-Ebene stellt sich folgendes Bild dar:

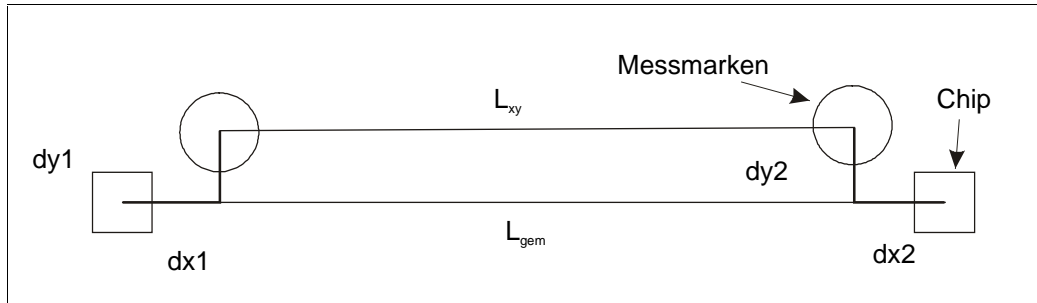


Bild 3.8 Ablage vom Chipmittelpunkt in der XY-Ebene

Zunächst wird die gemessene Strecke L_{gem} wegen Ablage der Messmarkenmittelpunkte vom Chipmittelpunkt in der XY-Ebene korrigiert.

$$L_{xy} = \sqrt{(L_{gem} - dx_1 + dx_2)^2 + (dy_1 - dy_2)^2} \quad (3.9)$$

Darauf erfolgt die Korrektur wegen der Neigung der Kamera.

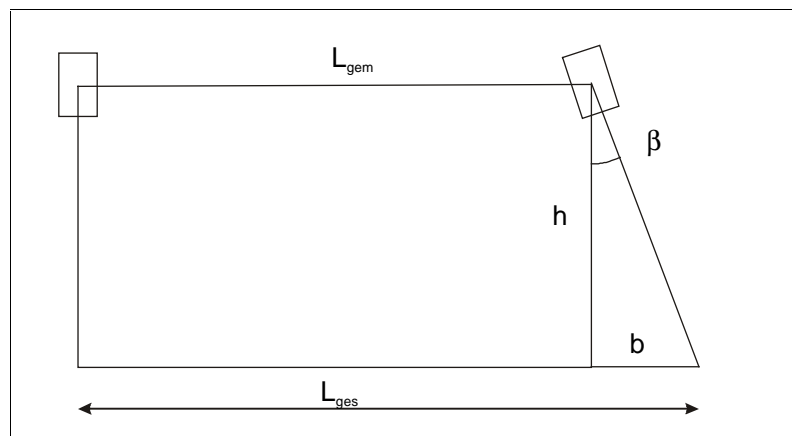


Bild 3.9 Korrektur des Nickwinkels

Die Länge der Strecke ergibt sich aus:

$$L = \sqrt{(L_{gem} - dx_1 + dx_2)^2 + (dy_1 - dy_2)^2} + \tan \beta \cdot h \quad (3.10)$$

Eine ausführliche Beschreibung des Kalibrierverfahrens findet man in [Nack 1999].

4 Konzept zur Durchführung

Im folgenden Abschnitt sollen Entwürfe und Festlegungen beschrieben werden, nach den eine praxisnahe Prüfung gemäß der VDI/VDE-Richtlinie 2634 Blatt 1 durchgeführt werden kann. Da das angestrebte Abnahme- und Überwachungsverfahren eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse ermöglichen soll, ist es notwendig, die Anzahl und Anordnung der Aufnahmen, die Anordnung der auszuwertenden Referenzlängen sowie die in Kapitel 1 beschriebenen Betriebsarten und Bedingungen zu definieren. Es werden Alternativen formuliert, die einer weiteren Untersuchung unterzogen werden.

4.1 Allgemein

Das Messvolumen richtet sich nach der Empfehlung der Richtlinie und wird als räumlicher Quader mit den Seitenlängen von 2000mm x 2000mm x 1500mm (Länge x Tiefe x Höhe) festgelegt.

Zur Aufnahme der Maßstäbe wurde ein Gerüst aus ITEM-Profilen mit diesen Abmessungen konstruiert, an das die Maßstäbe mittels verschraubbaren Böcken montiert werden können (Bild 4.1).

Das Gerüst wurde durch Streben in der unteren Flächendiagonalen und in der Raumdiagonalen stabilisiert. Eine weitere Erhöhung der Steifigkeit bringt die Vergrößerung des Profilquerschnitts im Sockel des Gerüsts von 40 mm x 40 mm auf 80 mm x 40 mm.

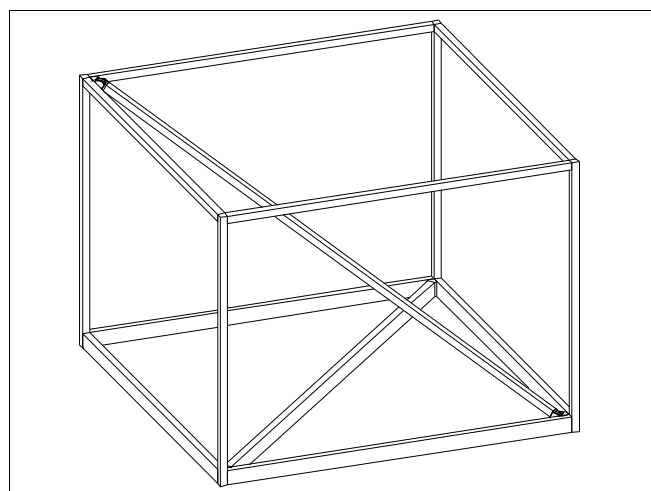


Bild 4.1 ITEM-Gerüst

Die Maßstäbe werden jeweils von zwei Böcken gehalten, die frei drehbar sind. Um eine Übertragung von Temperaturspannungen vom Alu-Gerüst auf die Maßstäbe zu verhindern, wird ein Bock als Festlager und der andere Bock als Gleitlager ausgelegt. Auf diese Weise wird eine gewisse Verschiebung in Längsrichtung der Stäbe ermöglicht.

4.2 Betriebsarten und Betriebsbedingungen

Unter Betriebsarten und –bedingungen sind die in Kapitel 1 erläuterten Faktoren zu verstehen. Im vorliegenden Fall sind einige Festlegungen und Einschränkungen zu treffen, um ein einheitliches und vergleichbares Verfahren zu formulieren.

Zu den Parametern der Betriebsarten zählen u. a. das Messvolumen, die Art und Anzahl der zu analysierenden Merkmale und die Anzahl und Anordnung der verwendeten Messköpfe. Diese Betriebsarten sollen hier festgelegt werden. Die Betriebsbedingungen sollen sich im normalen Betriebsbereich des photogrammetrischen Systems befinden. Dies bedeutet in diesem Fall, dass das Messvolumen eine homogene Temperatur aufweist, der Aufbau über die Zeit der Aufnahme stabil bleibt, keine direkte starke Umgebungsbeleuchtung (Sonnenlicht) und dass die Messmarken soweit sauber sein müssen, dass die Bildmessung nicht beeinflusst wird.

4.3 Anordnung der Prüfkörper

In Anlehnung an die VDI/VDE-Richtlinie 2634 wird eine entsprechende Anordnung der Maßstäbe im Messvolumen gewählt (Bild 4.2). Diese Anordnung trägt der Tatsache Rechnung, dass bei symmetrischen Aufnahmestandpunkten Objektpunkte, die am Rande des Messvolumens liegen auch am Messbildrand abgebildet werden. Hier ist im allgemeinen durch Verzeichnungseinflüsse und ungünstigere Schnittbedingungen auch mit schlechteren Genauigkeiten zu rechnen, als im Zentrum des Objekts [DOLD 1997]. So werden die Längenmessabweichungen an den Kanten des Objekts ermittelt. Zu erwarten ist, dass innerhalb des Messvolumens keine größeren Abweichungen auftreten und man somit die maximalen Werte erfasst. Um eine Aufnahme des Prüfkörpers, wie später erläutert, nicht nur im vollen Rundumverband, sondern auch im halben Rundumverband zu ermöglichen, werden die beiden Maßstäbe, deren Messmarken von der Aufnahmerichtung wegweisen so angeordnet, dass nach Drehung der Maßstäbe alle Marken wieder antastbar sind. Im Bild 4.2 sind dies die Maßstäbe waagrecht und senkrecht an der rechten Seite.

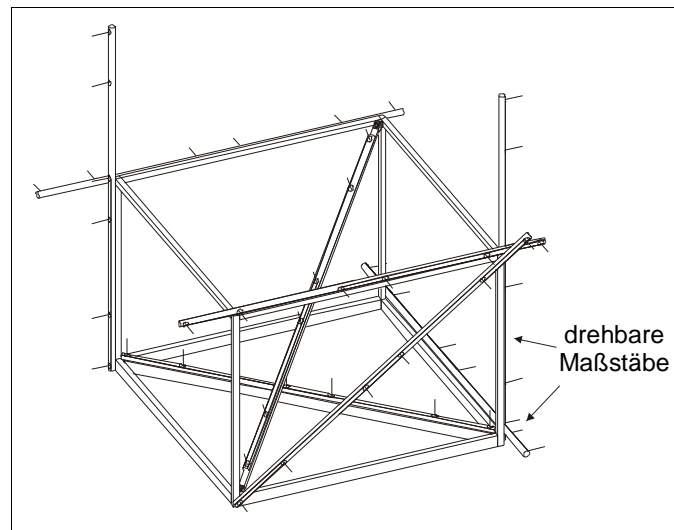


Bild 4.2 Anordnung der Maßstäbe

Zusätzlich wird ein weiterer Maßstab waagrecht an eine der oberen Seiten eingeführt, der als ergänzende Testlänge oder als Systemmaßstab benutzt werden kann.

4.4 Verteilung von zusätzlichen Punkten

Zur Unterstützung der Simultankalibrierung und für die automatisierte Vororientierung der Bilder sind an den Seiten der Profile, an denen sich keine Maßstäbe befinden und auf dem Boden innerhalb des Messvolumens codierte und uncodierte Messmarken angebracht worden. Die Verteilung ist in Bild 4.3 erkennbar.

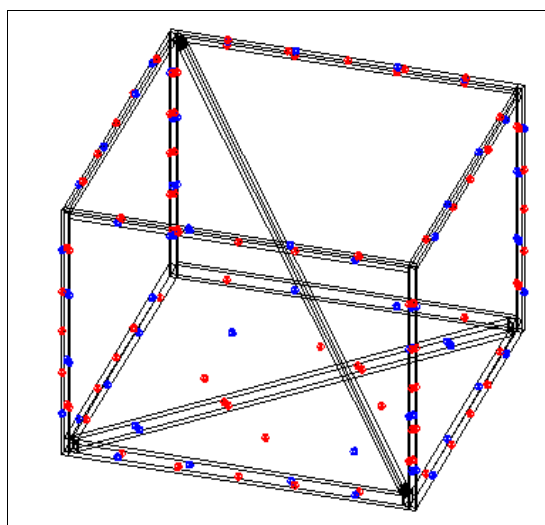


Bild 4.3 Anordnung der Verknüpfungspunkte

Das Grundkonzept bei den zusätzlichen Signalisierungen besteht darin, dass an den nach außen gewandten Seiten jeweils fünf und an den Innenseiten jeweils vier Punkte verteilt sind. Um eine sichere Vororientierung durchführen zu können, sollen in jedem Messbild mindestens fünf codierte Marken sichtbar sein [TRITOP-SYSTEMHANDBUCH]. Dafür wurden jeweils zwei codierte Marken pro Linie eingefügt, die auf Magnetfolie befestigt sind und somit für andere Systeme austauschbar sind. Die Gesamtzahl der Verknüpfungspunkte beträgt in dieser Anordnung 155. Zur Untersuchung des Einflusses der Verknüpfungspunktezahl wurden noch Verteilungen von vier Punkten außen und drei Punkten innen und von drei Punkten außen und zwei Punkten innen berücksichtigt. Die Gesamtzahl beträgt somit 123 bzw. 90 zusätzliche Punkte.

4.5 Aufnahmekonfigurationen

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 Messvolumen und inhomogeneren Genauigkeitsverhältnissen zu rechnen. Dieser Verband stellt eine ungünstigere Aufnahmesituation dar, wie sie in der Praxis durch Sichtbehinderungen und Unbegehbarkeiten 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.

Im folgenden werden die beiden Konfigurationsversionen dargestellt und die unterschiedlichen Variationen der Grundversionen beschrieben.

4.5.1 Konfiguration voller Rundumverband

Als Basisversion des vollen Rundumverbandes dient ein Konzept, dass im Rahmen dieser Arbeit gemeinsam mit Anwendern und Herstellern sowie dem Fachausschuss „Optische 3D-Messtechnik“ der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik abgestimmt wurde. Dies Konzept ist in Bild 4.4 dargestellt. Es soll den optimalen Verband darstellen, ein Messvolumen dieser Art zu erfassen. Dieser Verband sieht 16 Aufnahmen in der unteren Lage, jeweils 8 in der zweiten und dritten Lage und 4 Aufnahmen zur Kalibrierung vor. Er umfasst somit insgesamt 36 Aufnahmen. Bei diesem Verband (V16-8-8-4) sind die höchsten Genauigkeiten zu erwarten bei gleichzeitig auch höchstem Aufwand bei der Aufnahme. Zur Untersuchung des Einflusses der Aufnahmekonfigurationen wurde die Anzahl der Aufnahmen in den jeweiligen Lagen schrittweise reduziert und jede Version zusätzlich noch einmal ohne zusätzliche Aufnahmen zur Kalibrierung dargestellt (Bild 4.5 bis Bild 4.13). Diese weitere Betrachtung wurde gewählt, da eine Simultankalibrierung ohne Bildkantungen schon möglich ist, wenn mindestens vier Schrägaufnahmen eines räumlichen Punktfeldes vorliegen [LUHMANN 2000, S. 498]. Bei der Bezeichnung der einzelnen Versionen steht das führende „V“ für die Konfiguration im Vollverband und das „H“ für den Halbverband. Die nachfolgenden Zahlen beziffern die Anzahl der Aufnahmen in den Lagen eins bis vier.

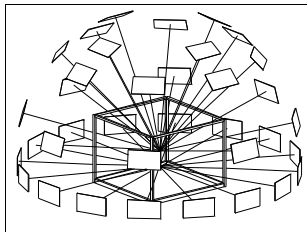


Bild 4.4 V16-8-8-4

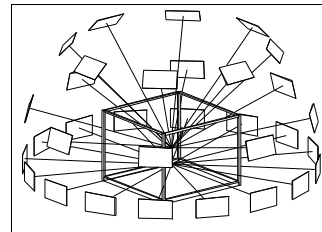


Bild 4.5 V16-8-8-0

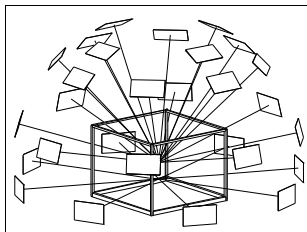


Bild 4.6 V8-8-8-4

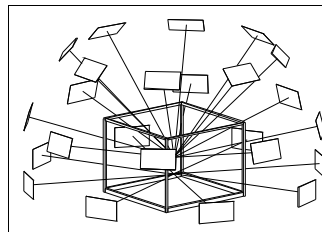


Bild 4.7 V8-8-8-0

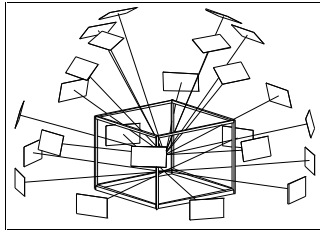


Bild 4.8 V8-8-4-4

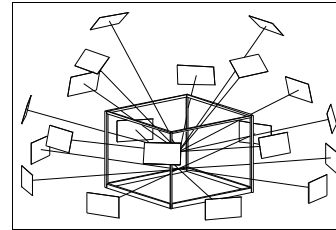


Bild 4.9 V8-8-4-0

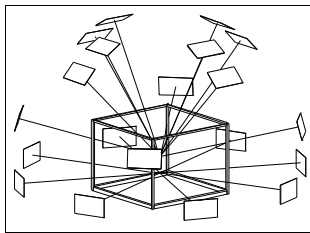


Bild 4.10 V8-4-4-4

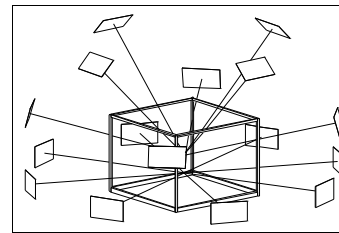


Bild 4.11 V8-4-4-0

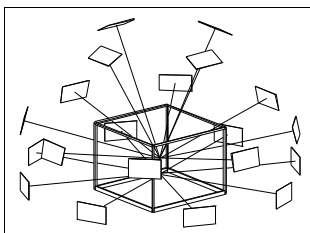


Bild 4.12 V8-8-0-4

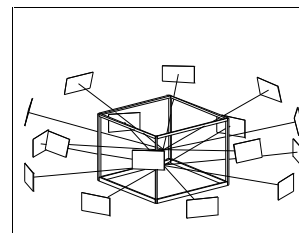


Bild 4.13 V8-8-0-0

4.5.2 Konfiguration halber Rundumverband

Analog zum vollen Rundumverband sind die Variationen des halben Rundumverbandes entwickelt worden. Als Basis steht hier die Grundversion des vollen Rundumverbandes mit den oben beschriebenen Einschränkungen in der Beobachtbarkeit des Objekts. Die Darstellung ist in Bild 4.14 zu sehen. Die Reduzierung der Aufnahmen erfolgte in der selben Art wie beim vollen Rundumverband (Bild 4.15 bis Bild 4.23).

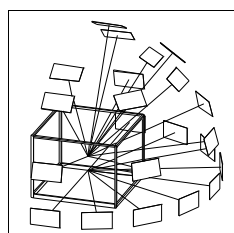


Bild 4.14 H16-8-8-4

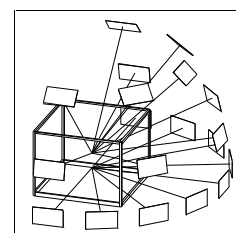


Bild 4.15 H16-8-8-0

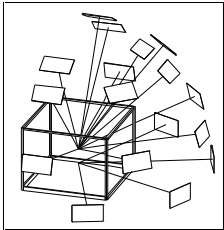


Bild 4.16 H8-8-8-4

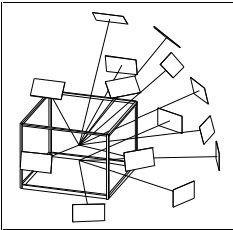


Bild 4.17 H8-8-8-0

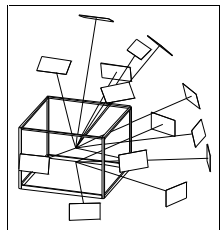


Bild 4.18 H8-8-4-4

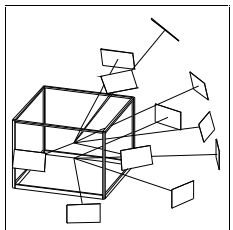


Bild 4.19 H8-8-4-0

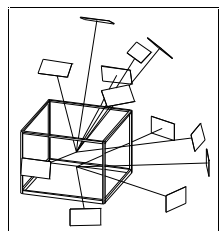


Bild 4.20 H8-4-4-4

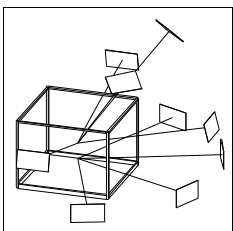


Bild 4.21 H8-4-4-4

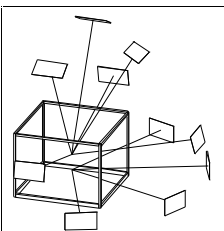


Bild 4.22 H8-8-0-4

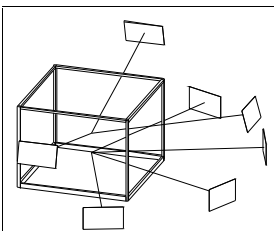


Bild 4.23 H8-8-0-0

4.5.3 Darstellung der Orientierungen

Im Einzelnen sind die Aufnahmezeitpunkte und Orientierungen der Messbilder ausführlich in der Tabelle 4.1 und der Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Tabelle 4.1 Orientierungen des Vollverbandes V16-8-8-4

| Bild Nr. | Aufnahmezentrum [mm] | | | Rotationen [°] | | |
|-------------|----------------------|-------|------|----------------|----------|----------|
| | X0 | Y0 | Z0 | φ | ω | κ |
| 1 | 0 | -3000 | -350 | 0,00 | 8,53 | 0,00 |
| 2 | 1200 | -2800 | -350 | 23,20 | 7,48 | 0,00 |
| 3 | 2200 | -2200 | -350 | 45,00 | 7,14 | 0,00 |
| 4 | 2850 | -1250 | -350 | 66,32 | 7,87 | 0,00 |
| 5 | 3000 | 0 | -350 | 90,00 | 8,53 | 0,00 |
| 6 | 2850 | 1250 | -350 | 113,68 | 7,87 | 0,00 |
| 7 | 2250 | 2250 | -350 | 135,00 | 7,70 | 0,00 |
| 8 | 1200 | 2800 | -350 | 156,80 | 7,30 | 0,00 |
| 9 | 0 | 3000 | -350 | -180,00 | 8,72 | 0,00 |
| 10 | -1200 | 2800 | -350 | -156,80 | 7,30 | 0,00 |
| 11 | -2200 | 2200 | -350 | -135,00 | 6,96 | 0,00 |
| 12 | -2800 | 1200 | -350 | -113,20 | 7,11 | 0,00 |
| 13 | -3000 | 0 | -350 | -90,00 | 8,72 | 0,00 |
| 14 | -2800 | -1200 | -350 | -66,80 | 7,30 | 0,00 |
| 15 | -2200 | -2200 | -350 | -45,00 | 7,14 | 0,00 |
| 16 | -1200 | -2800 | -350 | -23,20 | 7,30 | 0,00 |
| 17 | 0 | -2905 | 750 | 0,00 | -19,00 | 0,00 |
| 18 | 2054 | -2054 | 750 | 45,00 | -19,87 | 0,00 |
| 19 | 2905 | 0 | 750 | 90,00 | -19,87 | 0,00 |
| 20 | 2054 | 2054 | 750 | 135,00 | -19,87 | 0,00 |
| 21 | 0 | 2905 | 750 | -180,00 | -19,87 | 0,00 |
| 22 | -2054 | 2054 | 750 | -135,00 | -19,87 | 0,00 |
| 23 | -2905 | 0 | 750 | -90,00 | -19,87 | 0,00 |
| 24 | -2054 | -2054 | 750 | -45,00 | -19,87 | 0,00 |
| 25 | 0 | -2400 | 2000 | 0,00 | -40,50 | 0,00 |
| 26 | 1600 | -1600 | 2000 | 45,00 | -39,27 | 0,00 |
| 27 | 2236 | 0 | 2000 | 90,00 | -41,09 | 0,00 |
| 28 | 1581 | 1581 | 2000 | 135,00 | -39,14 | 0,00 |
| 29 | 0 | 2236 | 2000 | -180,00 | -41,09 | 0,00 |
| 30 | -1581 | 1581 | 2000 | -135,00 | -39,14 | 0,00 |
| 31 | -2236 | 0 | 2000 | -90,00 | -41,24 | 0,00 |
| 32 | -1581 | -1581 | 2000 | -45,00 | -39,14 | 0,00 |
| 33 | -1 | 0 | 3500 | -90,00 | -89,98 | 0,00 |
| 34 | 0 | 1 | 3500 | -180,00 | -89,98 | 0,00 |
| 35 | 1 | 0 | 3500 | 90,00 | -89,98 | 0,00 |
| 36 | 0 | -1 | 3500 | 0,00 | -89,98 | 0,00 |

Tabelle 4.2 Orientierungen des Halbverbandes H16-8-8-4

| Nr. | Aufnahmezentrum [mm] | | | Rotationen [°] | | |
|-----|----------------------|-------|------|----------------|----------|----------|
| | X0 | Y0 | Z0 | φ | ω | κ |
| 1 | 0 | -3000 | -350 | 0,00 | 8,53 | 0,00 |
| 2 | 1200 | -2800 | -350 | 23,20 | 7,48 | 0,00 |
| 3 | 2200 | -2200 | -350 | 45,00 | 7,14 | 0,00 |
| 4 | 2850 | -1250 | -350 | 66,32 | 7,87 | 0,00 |
| 5 | 3000 | 0 | -350 | 90,00 | 8,53 | 0,00 |
| 6 | -3000 | 0 | -350 | -90,00 | 8,72 | 0,00 |
| 7 | -2800 | -1200 | -350 | -66,80 | 7,30 | 0,00 |
| 8 | -2200 | -2200 | -350 | -45,00 | 7,14 | 0,00 |
| 9 | -1200 | -2800 | -350 | -23,20 | 7,30 | 0,00 |
| 10 | 0 | -2905 | 750 | 0,00 | -19,00 | 0,00 |
| 11 | 2054 | -2054 | 750 | 45,00 | -19,87 | 0,00 |
| 12 | 2905 | 0 | 750 | 90,00 | -19,87 | 0,00 |
| 13 | -2905 | 0 | 750 | -90,00 | -19,87 | 0,00 |
| 14 | -2054 | -2054 | 750 | -45,00 | -19,87 | 0,00 |
| 15 | 0 | -2400 | 2000 | 0,00 | -40,50 | 0,00 |
| 16 | 1600 | -1600 | 2000 | 45,00 | -39,27 | 0,00 |
| 17 | 2236 | 0 | 2000 | 90,00 | -41,09 | 0,00 |
| 18 | -2236 | 0 | 2000 | -90,00 | -41,24 | 0,00 |
| 19 | -1581 | -1581 | 2000 | -45,00 | -39,14 | 0,00 |
| 20 | -1 | 0 | 3500 | -90,00 | -89,98 | 0,00 |
| 21 | 0 | 1 | 3500 | -180,00 | -89,98 | 0,00 |
| 22 | 1 | 0 | 3500 | 90,00 | -89,98 | 0,00 |
| 23 | 0 | -1 | 3500 | 0,00 | -89,98 | 0,00 |

Im Folgenden sollen diese Konfigurationen einer näheren Untersuchung unterzogen werden. Sie soll Aufschluss über einen minimal durchzuführenden Verband und einer Möglichkeit, die Verknüpfungspunkte zu reduzieren geben.

5 Theoretische Untersuchung der Konfigurationen

Um einen Eindruck über Einfluss von veränderten oder reduzierten Aufnahmestandpunkten sowie von der Änderung der Anzahl von Verknüpfungspunkten zu gewinnen, wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit eine Simulationssoftware erstellt. Sie erlaubt es, aus künstlich erzeugten Bildkoordinaten mittels eines Bündelausgleichungsprogramms Objektkoordinaten und die jeweiligen stochastischen Maße zu ermitteln. Bei gleichbleibender Bildmessgenauigkeit (hier mit $0,5 \mu\text{m} \approx 1/20$ Pixel angesetzt) sind Veränderungen in den Standardabweichungen der ausgeglichenen Größen 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.

5.1 Konzept der Simulation

5.1.1 Berechnung der Bildkoordinaten

Die Erzeugung der künstlichen Bildkoordinaten findet in der Umgebung von Microsoft Excel statt. Unter Zuhilfenahme der Tabellenfunktionen und der Programmiersprache VBA (Visual Basic für Applikationen) lassen sich hier schnell und übersichtlich die entsprechenden Algorithmen implementieren und alle Dateioperationen ausführen. Der Umfang der verarbeiteten Daten ließ noch einen Einsatz dieser Software zu, ohne zu viel Zeit in Anspruch zu nehmen. Eine Übersicht über den Ablauf der Erzeugung der Bildkoordinaten und Steuerdateien für die Weiterverarbeitung ist im Bild 5.1 dargestellt.

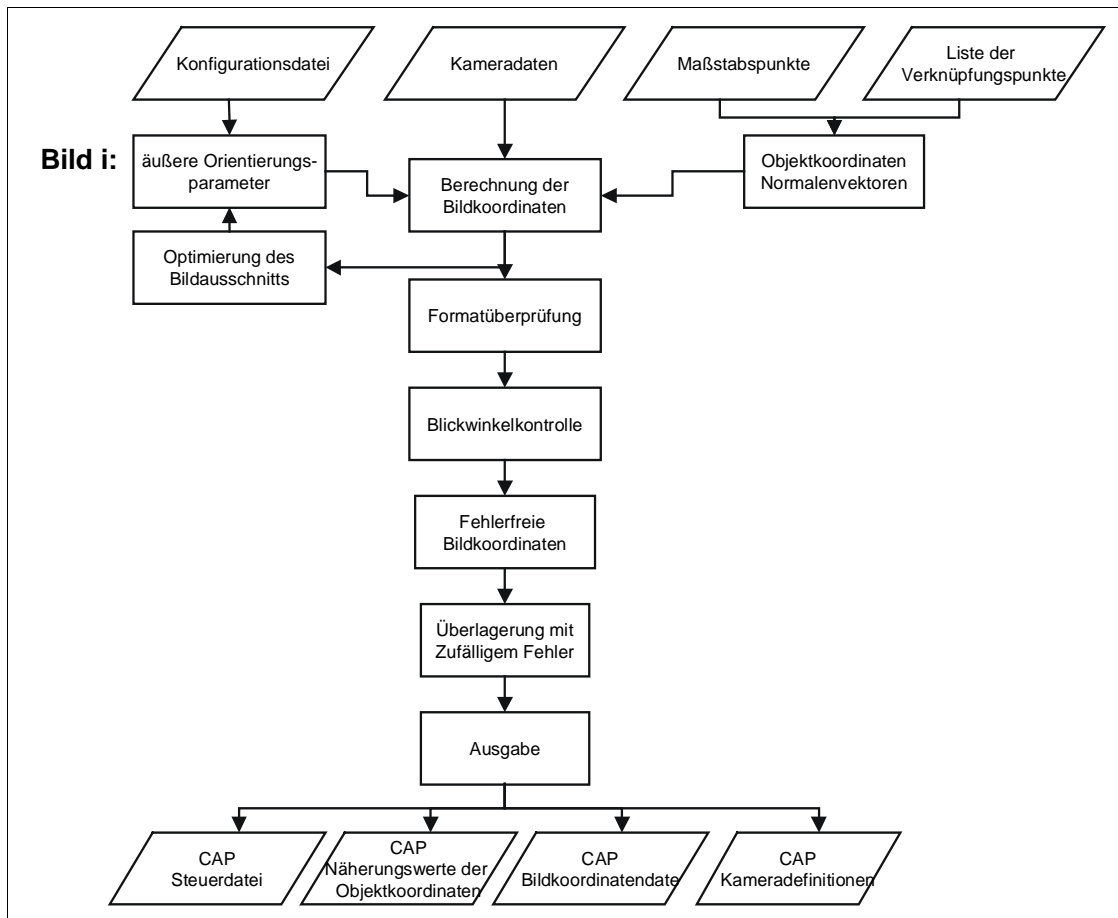


Bild 5.1 Ablaufschema der Bildkoordinatenberechnung

Ausgehend von den Konstruktionsdaten der Maßstäbe und des Gerüsts mit der Verteilungsweise der Verknüpfungspunkte lassen sich die Objektkoordinaten samt Normalenvektor aller im Objekt vorkommender Messmarken ermitteln. Die Koordinaten der Verknüpfungspunkte wurden dabei rechnerisch ermittelt, wobei die Maßstabspunkte aus einem CAD-Modell, in dem die Maßstäbe entsprechend angeordnet wurden, abgeleitet wurden. Die Normalenvektoren lassen sich entsprechend errechnen. Sie stehen senkrecht auf den Messpunkten und verkörpern die Blickrichtung der Messmarken.

Die Aufnahmeentfernung der Bilder hängt vom Bildformat des Sensors und dem verwendeten Objektiv ab. Sie wird immer so berechnet, dass das vollständige Objekt abgebildet wird und bezieht sich auf den Schwerpunkt des Messvolumens. Im Bild 5.2 bezeichnet b die Seitenlänge des Objekts, b' das Format der Kamera, c die Kammerkonstante; e und e' bezeichnen jeweils die Entfernung zum Projektionszentrum O bzw. zum Schwerpunkt S .

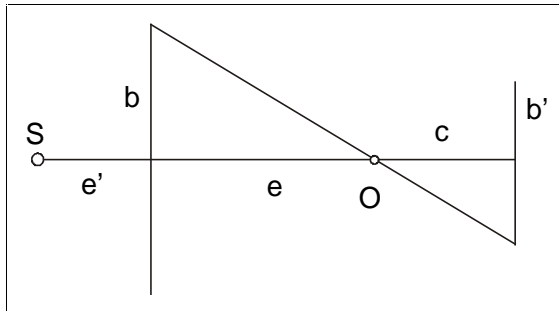


Bild 5.2 Aufnahmeentfernung

Die Aufnahmeentfernung e berechnet sich somit nach:

$$e = \frac{c \cdot b}{b'} \quad (5.1)$$

Die Strecke e' lässt sich sehr einfach ermitteln, da der Schwerpunkt S des Objektes im Nullpunkt des Koordinatensystems gelegt wird und das Objekt ein Quader ist.

Mit den Konfigurationsdaten der einzelnen Aufnahmeversionen, die aus einer Datei geladen werden können, ist es dann möglich für alle beteiligten Bilder die äußeren Orientierungen zu rechnen. Mit der nun bekannten äußeren und inneren Orientierung, die in einer Tabelle definiert sind, lassen sich aufgrund der Kollinearitätsbeziehungen (5.2) die Bildkoordinaten aller beteiligten Objektpunkte für jedes Bild berechnen:

$$\begin{aligned} x' &= x_0' - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} \\ y' &= y_0' - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Auf eine Berücksichtigung von Verzeichnungseinflüssen wird hierbei verzichtet, weil die Abbildungseigenschaften als ideal angenommen werden und nur der Einfluss durch die Konfiguration und Punkteverteilung betrachtet werden soll.

Die Orientierung lässt sich vor der Ausgabe der Daten durch ein Zusatzprogramm manuell optimieren, in dem die Orientierungsdaten jedes Bildes geladen werden können und die Außenkanten des Messvolumens projektiv im Bildausschnitt dargestellt werden (Bild 5.3).

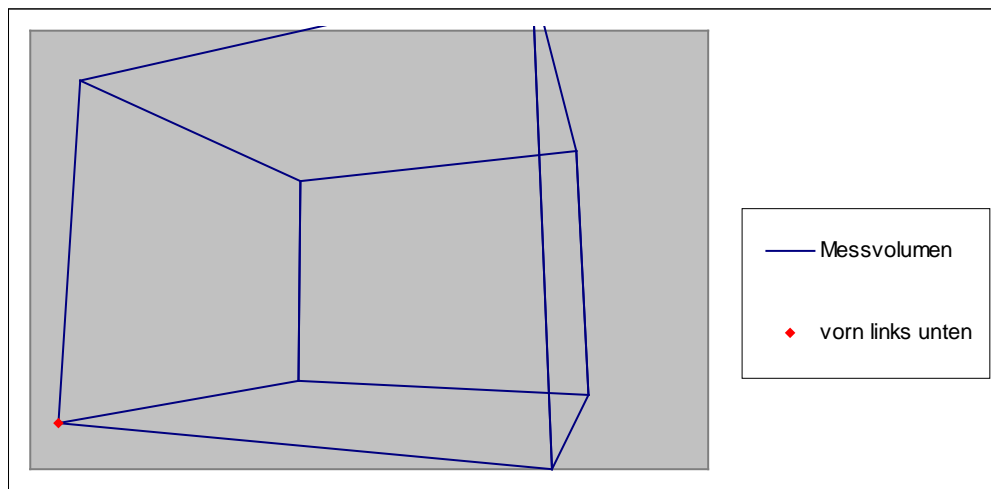


Bild 5.3 Optimierung des Bildausschnitts

Durch Änderung der Orientierungsparameter wie das Projektionszentrum, „Blickpunkt der Aufnahme“ und Kantung κ des Bildes wird der Ausschnitt angepasst und kann visuell kontrolliert werden. Nach der zufriedenstellenden Änderung werden die Orientierungsparameter in die ursprüngliche Tabelle zurückgeladen.

Mit den gewonnenen Bildkoordinaten wird eine Formatprüfung durchgeführt, um alle Bildpunkte, die außerhalb des definierten Bildformats liegen, zu unterdrücken. Anschließend werden die Schnittwinkel der Normalenvektoren mit den Vektoren zwischen Projektionszentrum und Messpunkt berechnet und mit den maximal möglichen Blickwinkeln für den Objektpunkt verglichen. Eine schematische Darstellung findet sich im Bild 5.4. Hier werden darauf alle Bildpunkte unterdrückt, die aufgrund zu großer Blickwinkel nicht zu beobachten sind.

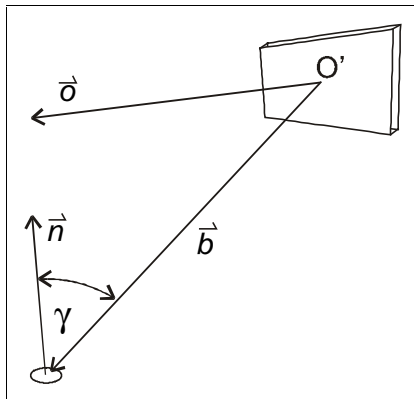


Bild 5.4 Blickwinkel zur Messmarke

Der Winkel, unter dem die Messmarke zu beobachten ist, ermittelt sich aus:

$$\cos(\gamma) = \frac{\vec{n} \cdot \vec{b}}{|\vec{n}| \cdot |\vec{b}|} \quad (5.3)$$

mit n Normalenvektor
 b Vektor zwischen Projektionszentrum und Messmarke
 γ : Beobachtungswinkel

Anschließend werden die fehlerfreien Bildkoordinaten mit einem zufälligen Fehler überlagert, um so unsystematische Bildmessfehler zu simulieren. Zur Kontrolle der am Verband beteiligten Bilder, der Abbildungsgröße der verwendeten Messmarken und des Bereiches der Schärfentiefe wird eine Übersichtsdarstellung erzeugt, in der Orientierung, Maßstabszahl, Abbildungsgröße der Aufnahmen, Gegenstandsweiten und Anzahl der Punkte für jedes Bild zusammengefasst werden (Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1 Übersicht über die Aufnahmen

| Grundkonfiguration: V16-8-8-0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|----------------------|-------|------|----------------|----------|-------------------|------------------|------|--------|---------------|-----|--------|------------------|------|------|--------|
| Sensorsystem | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Kodak DCS 460 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | C: | -24 | [mm] | Pixelgröße | | | | | | | | | | | | |
| | H: | 28 | [mm] | 0,009[mm] | 3111 | Blende | 1 | [mm] | | | | | | | | |
| | V: | 18 | [mm] | 0,009[mm] | 2000 | Zerstreuungskreis | 0,009 | [mm] | | | | | | | | |
| Übersicht der Aufnahmen | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nr. | Aufnahmezentrum [mm] | | | Rotationen [°] | | | Maßstabszahl [1] | | | Pixel im Bild | | | Gegenstandsweite | | | Punkte |
| | X0 | Y0 | Z0 | φ | ω | κ | min | max | mittel | max | min | mittel | g [mm] | gv | gh | |
| 1 | 0 | -3000 | -350 | 0,00 | 8,53 | 0,00 | 79 | 170 | 116 | 18,2 | 8,5 | 12,4 | 3020 | 1422 | 6350 | 52 |
| 2 | 1200 | -2800 | -350 | 23,20 | 7,48 | 0,00 | 71 | 183 | 130 | 20,3 | 7,9 | 11,1 | 3066 | 1432 | 6498 | 55 |
| 3 | 2200 | -2200 | -350 | 45,00 | 7,14 | 0,00 | 68 | 190 | 125 | 21,2 | 7,6 | 11,5 | 3131 | 1446 | 6708 | 75 |
| 4 | 2850 | -1250 | -350 | 66,32 | 7,87 | 0,00 | 72 | 186 | 125 | 20,2 | 7,8 | 11,6 | 3132 | 1446 | 6711 | 67 |
| 5 | 3000 | 0 | -350 | 90,00 | 8,53 | 0,00 | 79 | 168 | 107 | 18,2 | 8,6 | 13,5 | 3020 | 1422 | 6350 | 62 |
| 6 | 2850 | 1250 | -350 | 113,68 | 7,87 | 0,00 | 73 | 186 | 124 | 19,7 | 7,8 | 11,6 | 3132 | 1446 | 6711 | 62 |
| 7 | 2250 | 2250 | -350 | 135,00 | 7,70 | 0,00 | 68 | 193 | 128 | 21,3 | 7,5 | 11,3 | 3201 | 1461 | 6941 | 69 |
| 8 | 1200 | 2800 | -350 | 156,80 | 7,30 | 0,00 | 68 | 183 | 129 | 21,3 | 7,9 | 11,2 | 3066 | 1432 | 6498 | 49 |
| 9 | 0 | 3000 | -350 | -180,00 | 8,72 | 0,00 | 77 | 170 | 116 | 18,7 | 8,5 | 12,5 | 3020 | 1422 | 6350 | 47 |
| 10 | -1200 | 2800 | -350 | -156,80 | 7,30 | 0,00 | 67 | 183 | 129 | 21,5 | 7,9 | 11,2 | 3066 | 1432 | 6498 | 49 |
| 11 | -2200 | 2200 | -350 | -135,00 | 6,96 | 0,00 | 53 | 190 | 125 | 27,4 | 7,6 | 11,6 | 3131 | 1446 | 6708 | 63 |
| 12 | -2800 | 1200 | -350 | -113,20 | 7,11 | 0,00 | 71 | 183 | 127 | 20,3 | 7,9 | 11,4 | 3066 | 1432 | 6498 | 50 |
| 13 | -3000 | 0 | -350 | -90,00 | 8,72 | 0,00 | 80 | 168 | 109 | 18,0 | 8,6 | 13,3 | 3020 | 1422 | 6350 | 48 |
| 14 | -2800 | -1200 | -350 | -66,80 | 7,30 | 0,00 | 71 | 183 | 128 | 20,3 | 7,9 | 11,2 | 3066 | 1432 | 6498 | 50 |
| 15 | -2200 | -2200 | -350 | -45,00 | 7,14 | 0,00 | 68 | 190 | 129 | 21,2 | 7,6 | 11,2 | 3131 | 1446 | 6708 | 68 |
| 16 | -1200 | -2800 | -350 | -23,20 | 7,30 | 0,00 | 79 | 170 | 132 | 18,2 | 8,5 | 11,0 | 3066 | 1432 | 6498 | 50 |
| 17 | 0 | -2905 | 750 | 0,00 | -19,00 | 0,00 | 74 | 172 | 117 | 19,5 | 8,4 | 12,4 | 3000 | 1418 | 6285 | 59 |
| 18 | 2054 | -2054 | 750 | 45,00 | -19,87 | 0,00 | 63 | 185 | 119 | 23,1 | 7,8 | 12,1 | 3000 | 1418 | 6285 | 77 |
| 19 | 2905 | 0 | 750 | 90,00 | -19,87 | 0,00 | 75 | 172 | 109 | 19,3 | 8,4 | 13,3 | 3000 | 1418 | 6285 | 69 |
| 20 | 2054 | 2054 | 750 | 135,00 | -19,87 | 0,00 | 60 | 185 | 119 | 24,2 | 7,8 | 12,1 | 3000 | 1418 | 6285 | 63 |
| 21 | 0 | 2905 | 750 | -180,00 | -19,87 | 0,00 | 72 | 172 | 117 | 20,1 | 8,4 | 12,4 | 3000 | 1418 | 6285 | 55 |
| 22 | -2054 | 2054 | 750 | -135,00 | -19,87 | 0,00 | 63 | 185 | 122 | 23,1 | 7,8 | 11,8 | 3000 | 1418 | 6285 | 62 |
| 23 | -2905 | 0 | 750 | -90,00 | -19,87 | 0,00 | 75 | 172 | 112 | 19,3 | 8,4 | 12,9 | 3000 | 1418 | 6285 | 57 |
| 24 | -2054 | -2054 | 750 | -45,00 | -19,87 | 0,00 | 58 | 185 | 122 | 24,8 | 7,8 | 11,8 | 3000 | 1418 | 6285 | 65 |
| 25 | 0 | -2400 | 2000 | 0,00 | -40,50 | 0,00 | 77 | 180 | 126 | 18,7 | 8,0 | 11,5 | 3124 | 1445 | 6686 | 67 |
| 26 | 1600 | -1600 | 2000 | 45,00 | -39,27 | 0,00 | 68 | 182 | 134 | 21,2 | 7,9 | 10,8 | 3020 | 1422 | 6349 | 65 |
| 27 | 2236 | 0 | 2000 | 90,00 | -41,09 | 0,00 | 73 | 175 | 116 | 19,7 | 8,3 | 12,4 | 3000 | 1418 | 6285 | 78 |
| 28 | 1581 | 1581 | 2000 | 135,00 | -39,14 | 0,00 | 41 | 187 | 132 | 35,5 | 7,7 | 10,9 | 3000 | 1418 | 6285 | 62 |
| 29 | 0 | 2236 | 2000 | -180,00 | -41,09 | 0,00 | 71 | 175 | 121 | 20,4 | 8,3 | 11,9 | 3000 | 1418 | 6285 | 67 |
| 30 | -1581 | 1581 | 2000 | -135,00 | -39,14 | 0,00 | 61 | 181 | 132 | 23,7 | 8,0 | 10,9 | 3000 | 1418 | 6285 | 63 |
| 31 | -2236 | 0 | 2000 | -90,00 | -41,24 | 0,00 | 74 | 175 | 116 | 19,6 | 8,3 | 12,4 | 3000 | 1418 | 6285 | 69 |
| 32 | -1581 | -1581 | 2000 | -45,00 | -39,14 | 0,00 | 39 | 182 | 132 | 36,7 | 7,9 | 11,0 | 3000 | 1418 | 6285 | 61 |

Abschließend werden die Dateien mit den Bildkoordinaten, Steuerparametern für die Weiterverarbeitung, Kameradefinitionen, Bildzuordnungen und den Näherungswerten der Objektkoordinaten ausgegeben und gespeichert.

5.1.2 Berechnung der Objektkoordinaten

Die Auswertung der erzeugten Bildkoordinatenmessung erfolgt mit dem Programm CAP (Combined Adjustment Program), das in der Version 2.27 vorliegt. Mit dem Programm

lassen sich photogrammetrische und geodätische Beobachtungen gemeinsam ausgleichen. Als Eingabe werden die oben genannten Dateien benötigt:

- In der Parameter und Steuerdatei sind alle Informationen zur Steuerung der Ausgleichung enthalten. Hier werden alle Pfade für Ein- und Ausgabedateien sowie Ausgleichungsart und die Standardabweichung a priori festgelegt
- Die Bildkoordinatendatei enthält alle Bildkoordinatenmessungen samt dazugehöriger Standardabweichung.
- In der Objektkoordinatendatei befinden sich die Näherungskordinaten der Objektkoordinaten, mit denen die Bilder mittels Rückwärtsschnitt vororientiert werden
- In den Kameradefinitionen sind alle Parameter der Aufnahmekameras enthalten, wie Format und Näherungswerten für Kammerkonstante und Verzeichnungparameter
- In der Datei der äußeren Orientierungen sind lediglich die Zuordnungen der Messbilder zu der verwendeten Kamera enthalten

Nach der Orientierung aller Messbilder wird eine Ausgleichung als freies Netz berechnet, bei der nur eine gemessene Strecke im Objektraum als zusätzliche Beobachtung eingeführt wird. Von den Parametern der inneren Orientierung wird nur die Kammerkonstante geschätzt, da Verzeichnungseinflüsse nicht berücksichtigt werden sollen. Nach erfolgter Ausgleichung werden die Ergebnisse als ausgeglichene Objektkoordinaten und Orientierungsparameter nebst ihren Genauigkeitsmaßen und Kofaktoren ausgegeben.

5.1.3 Ergebnisse

5.1.3.1 Auswertung

Als Ergebnis liefert CAP neben den ausgeglichenen Objektkoordinaten und den Orientierungen der Messbilder stochastische Angaben über die Ausgleichungsergebnisse.

Zur Beurteilung der Güte der ermittelten Koordinaten liefert das Programm CAP die Standardabweichungen jeder geschätzten Objektkoordinate und fasst diese in für jede Koordinatenrichtung in der mittleren quadratischen Standardabweichung zusammen (Root Mean Square – RMS). Sie berechnet sich nach:

$$RMS_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n S_{x_i}^2}{n}} \quad (5.4)$$

mit S_{x_i} : Standardabweichung der i-ten Koordinate
 n : Anzahl der ausgeglichenen Objektpunkte

Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit der Ausgleichung wird die Gesamtredundanz des Systems herangezogen. Die Zuverlässigkeit einer Ausgleichung beschreibt die Kontrollierbarkeit der beteiligten Beobachtungen. Sie ist von der Zahl der überschüssigen Beobachtungen und der geometrischen Anordnung der Aufnahmen abhängig. Sie stellt ein Maß für die Aufdeckbarkeit grober Fehler in den Messwerten dar.

Die Gesamtredundanz berechnet sich nach:

$$r = n - u = \text{spur}(\underline{Q}_{vv} \cdot \underline{P}) = \sum r_i \quad (5.5)$$

mit n : Anzahl der Beobachtungen
 u : Anzahl der Unbekannten
 \underline{Q}_{vv} : Kofaktormatrix der Verbesserungen
 \underline{P} : Gewichtsmatrix
 r_i : Redundanzanteil einer Beobachtung

Um die Werte der verschiedenen Konfigurationen miteinander zu vergleichen, wird der Redundanzfaktor rf berechnet:

$$rf = \frac{r}{u} \quad (5.6)$$

Folgend sind die Ergebnisse der Simulationsrechnung zusammengestellt

5.1.3.2 Vollständiger Rundumverband

Die Ergebnisse der vollständigen Rundumverbände, die mit einer Bildmessgenauigkeit von 0,5 μm und 5 Verknüpfungspunkte je freier Außenseite simuliert worden sind, sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tabelle 5.2 Voller Rundumverband - 5 Verknüpfungspunkte je Seite

| Konfig. | V16884-05 | V16880-05 | V8884-05 | V8880-05 | V8844-05 | V8840-05 | V8444-05 | V8440-05 | V8804-05 | V8800-05 |
|---------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Punkte | 193 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 174 | 190 |
| Bilder | 36 | 32 | 28 | 24 | 24 | 20 | 20 | 16 | 20 | 16 |
| Unbekannte | 803 | 770 | 746 | 722 | 722 | 698 | 698 | 674 | 650 | 674 |
| Beobachtungen | 4150 | 3910 | 3184 | 2944 | 2686 | 2446 | 2206 | 1966 | 2166 | 2054 |
| Redundanz | 3354 | 3147 | 2445 | 2229 | 1971 | 1755 | 1515 | 1299 | 1523 | 1387 |
| RMS-X | 0,0152 | 0,0154 | 0,0185 | 0,0189 | 0,0198 | 0,0204 | 0,0217 | 0,0228 | 0,0227 | 0,0228 |
| RMS-Y | 0,0151 | 0,0154 | 0,0185 | 0,0188 | 0,0197 | 0,0203 | 0,0220 | 0,0231 | 0,0234 | 0,0235 |
| RMS-Z | 0,0130 | 0,0129 | 0,0160 | 0,0161 | 0,0172 | 0,0172 | 0,0195 | 0,0199 | 0,0179 | 0,0179 |
| RMS ges | 0,0251 | 0,0253 | 0,0307 | 0,0311 | 0,0328 | 0,0335 | 0,0365 | 0,0381 | 0,0372 | 0,0373 |
| RMS-Xmax | 0,0266 | 0,0262 | 0,0340 | 0,0341 | 0,0340 | 0,0338 | 0,0402 | 0,0667 | 0,0556 | 0,0576 |
| RMS-Ymax | 0,0320 | 0,0315 | 0,0352 | 0,0353 | 0,0353 | 0,0350 | 0,0420 | 0,0666 | 0,0627 | 0,0649 |
| RMS-Ymax | 0,0320 | 0,0315 | 0,0352 | 0,0353 | 0,0353 | 0,0350 | 0,0420 | 0,0666 | 0,0627 | 0,0649 |
| RMS ges max | 0,0487 | 0,0479 | 0,0552 | 0,0554 | 0,0609 | 0,0605 | 0,0887 | 0,1222 | 0,0894 | 0,0933 |
| Redundanzfkt | 4,1768 | 4,0870 | 3,2775 | 3,0873 | 2,7299 | 2,5143 | 2,1705 | 1,9273 | 2,3431 | 2,0579 |

In der grafischen Darstellung der mittleren quadratischen Standardabweichungen aufgeteilt nach den Koordinatenrichtungen und dem resultierenden Gesamtfehler ergibt sich das Bild 5.5.

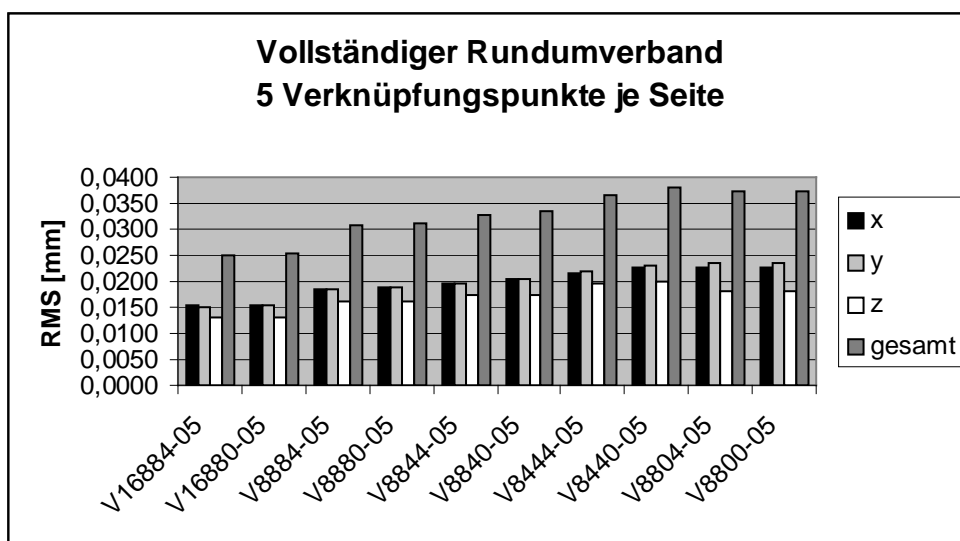


Bild 5.5 RMS Vollverband – 5 Verknüpfungspunkte

Eine Darstellung der Redundanzfaktoren ergibt sich in Bild 5.6.

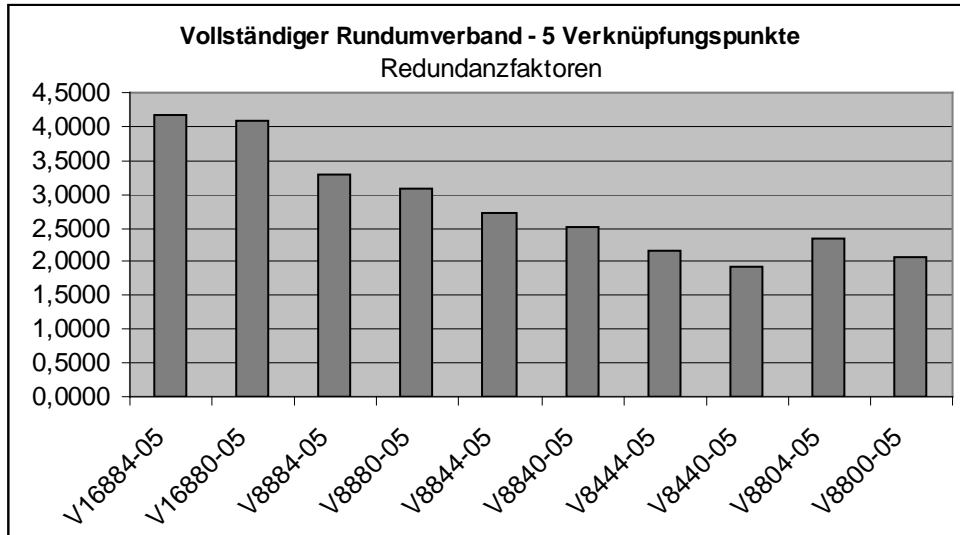


Bild 5.6 Redundanzfaktoren Vollverband – 5 Verknüpfungspunkte

Im Bild 5.5 ist zu erkennen, dass der aufwendigste Verband (V16-8-8-4) erwartungsgemäß auch der mit dem größten Genauigkeitspotential ist. Der Wegfall der Kalibrierungsaufnahmen hat keinen signifikanten Einfluss auf die Standardabweichungen. Jedoch sind in diesem Modell auch keine verzeichnungsbedingten Abweichungen von der Zentralprojektion eingegangen. In Bezug zum ersten Verband sind bei den folgenden Verbänden deutliche Verschlechterung von 22% bis 51% zu erkennen. Ein ähnlicher Sprung ist auch bei der Betrachtung der Redundanzfaktoren zu sehen (Bild 5.6).

Eine Reduktion der Verknüpfungspunkte von 5 Punkten je freier Außenseite auf 4 Punkte je Seite ergibt das in Tabelle 5.3 dargestellte Ergebnis.

Tabelle 5.3 Voller Rundumverband - 4 Verknüpfungspunkte je Seite

| Konfig. | V16884-05 | V16880-05 | V8884-05 | V8880-05 | V8844-05 | V8840-05 | V8444-05 | V8440-05 | V8804-05 | V8800-05 |
|---------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Punkte | 158 | 158 | 158 | 158 | 158 | 158 | 158 | 158 | 129 | 158 |
| Bilder | 36 | 32 | 28 | 24 | 24 | 20 | 20 | 16 | 20 | 16 |
| Unbekannte | 698 | 674 | 650 | 626 | 626 | 602 | 602 | 578 | 515 | 578 |
| Beobachtungen | 3392 | 3176 | 2620 | 2404 | 2214 | 1998 | 1816 | 1600 | 1620 | 1694 |
| Redundanz | 2701 | 2509 | 1977 | 1785 | 1595 | 1403 | 1221 | 1029 | 1112 | 1123 |
| RMS-X | 0,0154 | 0,0161 | 0,0184 | 0,0191 | 0,0198 | 0,0206 | 0,0218 | 0,0232 | 0,0235 | 0,0218 |
| RMS-Y | 0,0154 | 0,0160 | 0,0183 | 0,0190 | 0,0197 | 0,0205 | 0,0221 | 0,0235 | 0,0241 | 0,0223 |
| RMS-Z | 0,0131 | 0,0135 | 0,0158 | 0,0162 | 0,0172 | 0,0173 | 0,0196 | 0,0201 | 0,0188 | 0,0172 |
| RMS ges | 0,0254 | 0,0264 | 0,0304 | 0,0314 | 0,0328 | 0,0338 | 0,0367 | 0,0387 | 0,0386 | 0,0356 |
| RMS-Xmax | 0,0263 | 0,0269 | 0,0331 | 0,0338 | 0,0335 | 0,0335 | 0,0397 | 0,0658 | 0,0561 | 0,0547 |
| RMS-Ymax | 0,0315 | 0,0322 | 0,0343 | 0,0351 | 0,0348 | 0,0348 | 0,0414 | 0,0658 | 0,0633 | 0,0615 |
| RMS-Ymax | 0,0315 | 0,0322 | 0,0343 | 0,0351 | 0,0348 | 0,0348 | 0,0414 | 0,0658 | 0,0633 | 0,0615 |
| RMS ges max | 0,0479 | 0,0490 | 0,0537 | 0,0549 | 0,0599 | 0,0599 | 0,0871 | 0,1206 | 0,0903 | 0,0885 |
| Redundanzfkt | 3,8696 | 3,7226 | 3,0415 | 2,8514 | 2,5479 | 2,3306 | 2,0282 | 1,7803 | 2,1592 | 1,9429 |

Für die RMS ergibt sich die in Bild 5.7 gezeigte Darstellung.

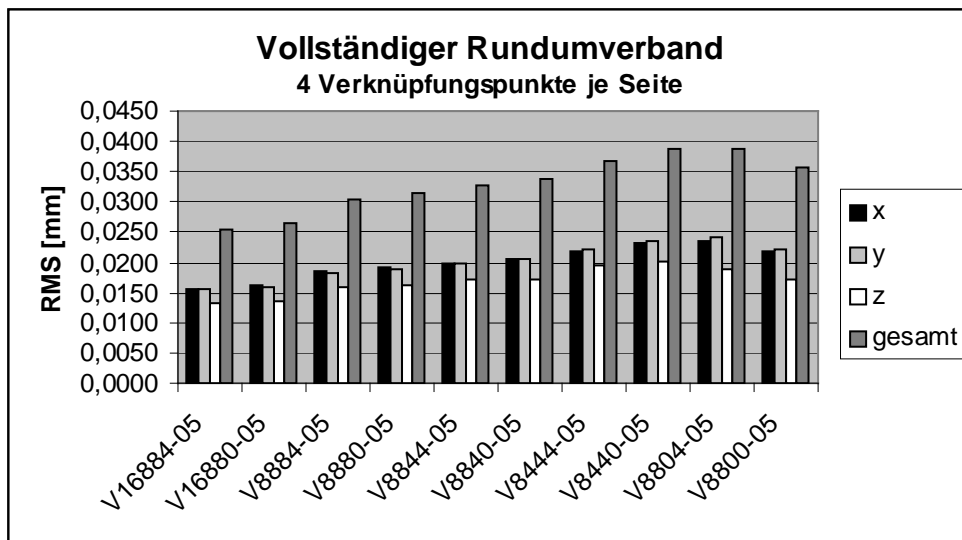


Bild 5.7 RMS Vollverband – 4 Verknüpfungspunkte

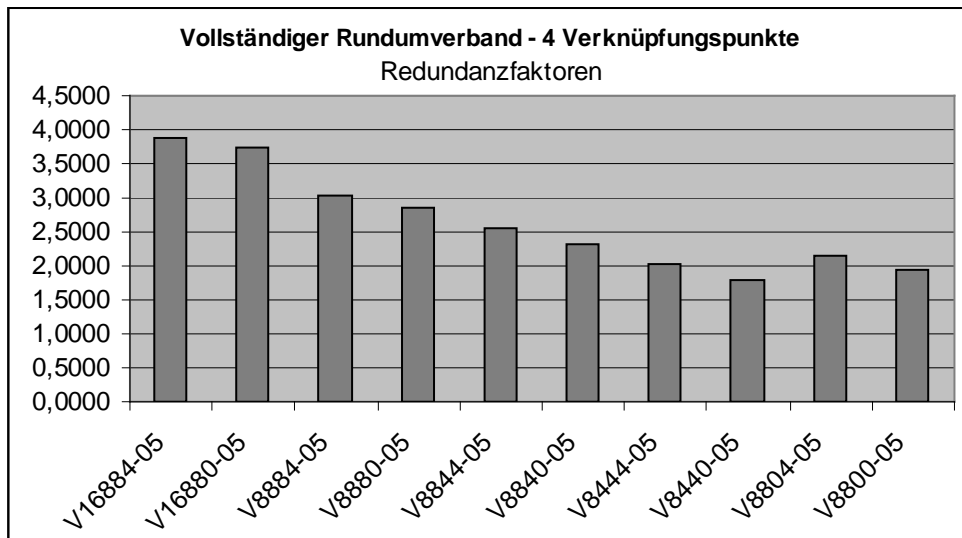


Bild 5.8 Redundanzfaktoren Vollverband – 4 Verknüpfungspunkte

Auf eine weitere Darstellung der Ergebnisse bei reduzierten Verknüpfungspunkten wird im weiteren verzichtet, da dies den Umfang der Ergebnispräsentation hier sehr ausdehnen würde. Eine zusammenfassende Darstellung befindet sich im übernächsten Abschnitt. Für eine ausführliche Angabe der Resultate wird auf Anhang A verwiesen.

5.1.3.3 Halber Rundumverband

Die simulierten halben Rundumverbände hatten mit Verwendung von 5 Verknüpfungspunkten je Seite die in Tabelle 5.4 aufgeführten Ergebnisse.

Tabelle 5.4 Halber Rundumverband - 5 Verknüpfungspunkte je Seite

| Konfig. | H16884-05 | H16880-05 | H8884-05 | H8880-05 | H8844-05 | H8840-05 | H8444-05 | H8440-05 | H8804-05 | H8800-05 |
|---------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Punkte | 176 | 176 | 174 | 174 | 174 | 173 | 177 | 175 | 157 | 151 |
| Bilder | 23 | 19 | 18 | 14 | 16 | 12 | 17 | 13 | 14 | 10 |
| Unbekannte | 674 | 650 | 638 | 614 | 626 | 599 | 641 | 611 | 563 | 521 |
| Beobachtungen | 2866 | 2634 | 2198 | 1966 | 1908 | 1674 | 2036 | 1792 | 1532 | 1382 |
| Redundanz | 2199 | 1991 | 1567 | 1359 | 1289 | 1082 | 1402 | 1188 | 976 | 868 |
| RMS-X | 0,0282 | 0,0291 | 0,0361 | 0,0358 | 0,0368 | 0,0392 | 0,0325 | 0,0348 | 0,0429 | 0,0447 |
| RMS-Y | 0,0208 | 0,0218 | 0,0256 | 0,0256 | 0,0266 | 0,0285 | 0,0236 | 0,0254 | 0,0302 | 0,0315 |
| RMS-Z | 0,0182 | 0,0187 | 0,0257 | 0,0253 | 0,0260 | 0,0272 | 0,0236 | 0,0245 | 0,0234 | 0,0242 |
| RMS ges | 0,0395 | 0,0409 | 0,0512 | 0,0508 | 0,0523 | 0,0556 | 0,0466 | 0,0496 | 0,0574 | 0,0598 |
| RMS-Xmax | 0,1050 | 0,1059 | 0,1809 | 0,1764 | 0,1768 | 0,1838 | 0,1703 | 0,1768 | 0,1755 | 0,1792 |
| RMS-Ymax | 0,0407 | 0,0419 | 0,0537 | 0,0523 | 0,0694 | 0,0722 | 0,0668 | 0,0694 | 0,0550 | 0,0563 |
| RMS-Ymax | 0,0407 | 0,0419 | 0,0537 | 0,0523 | 0,0694 | 0,0722 | 0,0668 | 0,0694 | 0,0550 | 0,0563 |
| RMS ges max | 0,1236 | 0,1249 | 0,2229 | 0,2173 | 0,2226 | 0,2313 | 0,2143 | 0,2225 | 0,1935 | 0,1990 |
| Redundanzfkt | 3,2626 | 3,0631 | 2,4561 | 2,2134 | 2,0591 | 1,8063 | 2,1872 | 1,9444 | 1,7336 | 1,6660 |

Eine grafische Darstellung der RMS des Versuches ist in Bild 5.9 zu sehen.

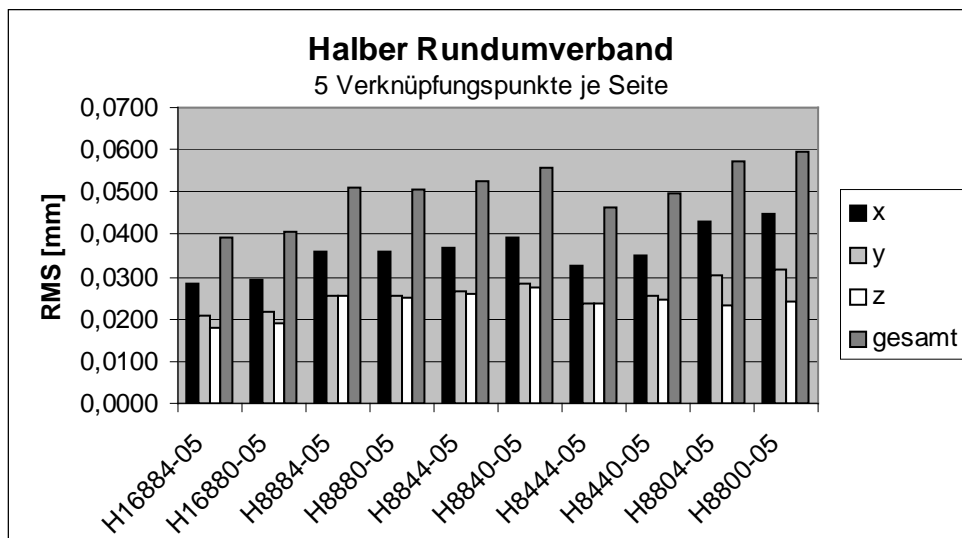


Bild 5.9 RMS Halbverband – 5 Verknüpfungspunkte

Hier ergibt sich tendenziell ein ähnliches Bild wie bei der Simulation der Vollverbände. Zu erkennen ist hierbei zusätzlich die erwartete Inhomogenität der Genauigkeiten in den

einzelnen Koordinatenrichtungen, die daraus resultieren, dass der photogrammetrische Verband nicht geschlossen wurde.

Die Betrachtung der Redundanzfaktoren führt zum Bild 5.10.

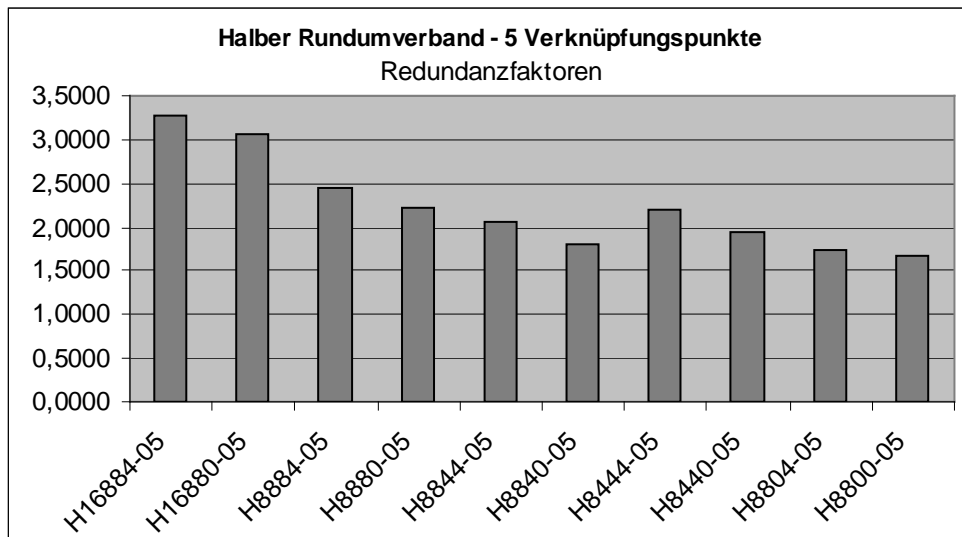


Bild 5.10 Redundanzfaktoren Halbverband – 5 Verknüpfungspunkte

Auch bei der Betrachtung der Redundanzfaktoren, die als ein Maß für die Überbestimmung des Systems zu sehen sind, ergeben sich einzig für die Verbände H16-8-8-4 und H16-8-8-0 Werte über drei und einen erkennbaren Einbruch bei den folgenden reduzierten Verbänden.

Auch hier wird für die Darstellung der reduzierten Verknüpfungspunkte auf den Anhang A verwiesen, da sich die Resultate in der Tendenz sehr ähnlich sind und an dieser Stelle den Umfang sehr erweitern würden.

5.1.3.4 Gegenüberstellung der Konfigurationen

Zur Verdeutlichung des Einflusses der Verknüpfungspunktzahl sind im folgenden jeweils RMS und Redundanzfaktoren der einzelnen Verbände grafisch dargestellt.

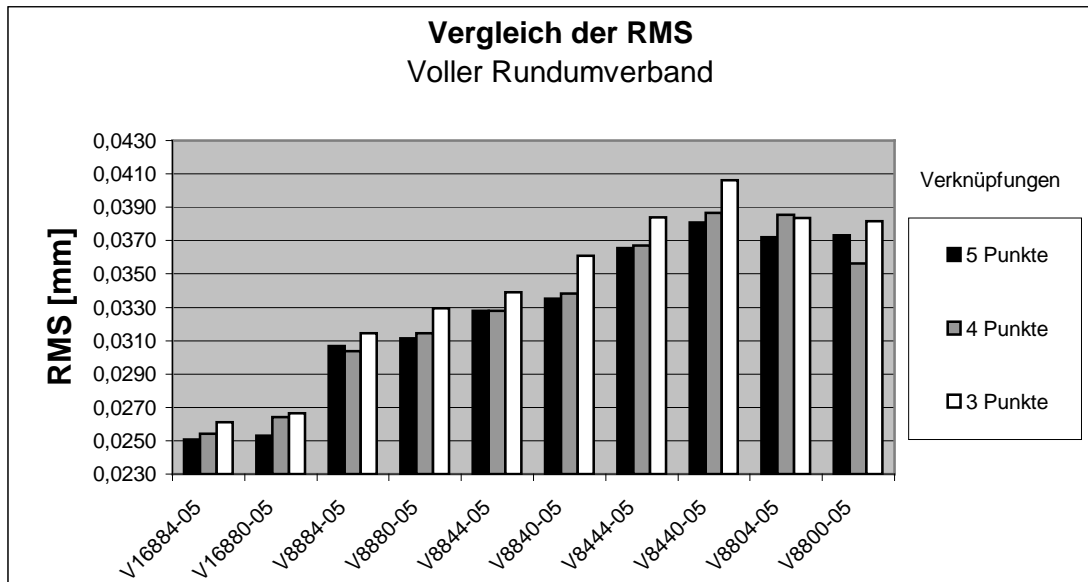


Bild 5.11 Vergleich RMS voller Rundumverband

Aus Bild 5.11 ist ersichtlich, dass im allgemeinen die Verbände, die mit fünf Verknüpfungspunkten je Trägerseite gerechnet wurden besser abschneiden, als die mit reduzierter Punktzahl. Der Widerspruch bei der Version V8-8-0-0 mag von der Modellierung der zufälligen Bildmessfehler herrühren. Auch beim Vergleich der Redundanzfaktoren in Bild 5.12 wird bestätigt, dass in diesem Fall einer Variante mit fünf Verknüpfungspunkten der Vorzug zu geben ist.

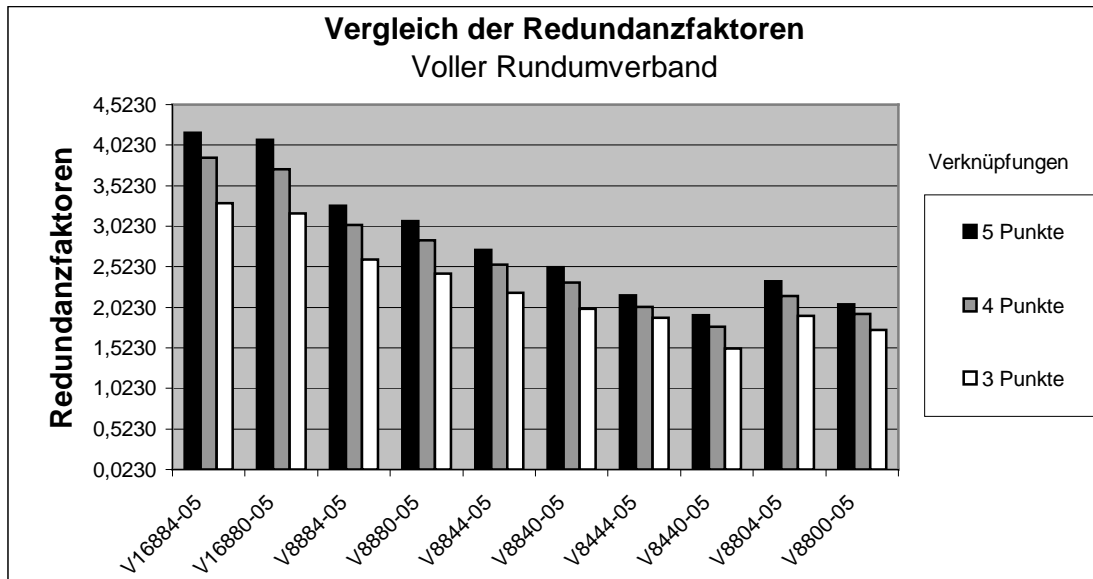


Bild 5.12 Vergleich Redundanzfaktoren voller Rundumverband

Ein etwas anderes Bild ergibt sich bei der Betrachtung der unterschiedlichen Anzahl der Verknüpfungspunkte bei den Halbverbänden (Bild 5.13). In diesem Fall scheinen die geometrisch verschlechterten Konfigurationen empfindlich auf die Erhöhung der Unbekannten in der Ausgleichung zu reagieren.

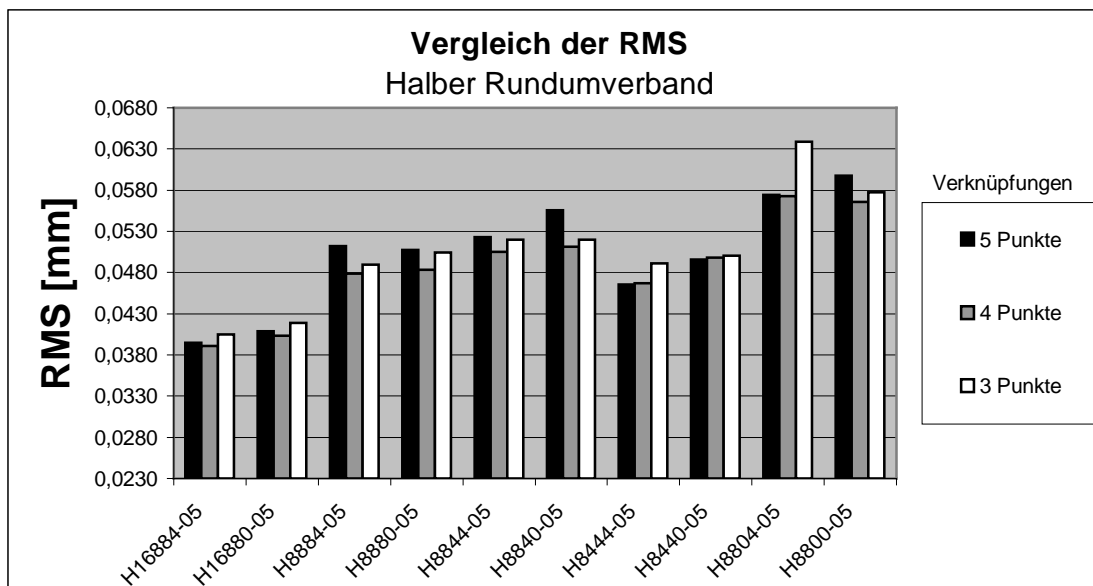


Bild 5.13 Vergleich RMS halber Rundumverband

Jedoch ergibt sich aus Bild 5.14 keine Schwäche an Überbestimmungen bei höherer Anzahl an Verknüpfungspunkten. Hier ist der erwartungsgemäße Verlauf der Redundanzfaktoren zu erkennen.

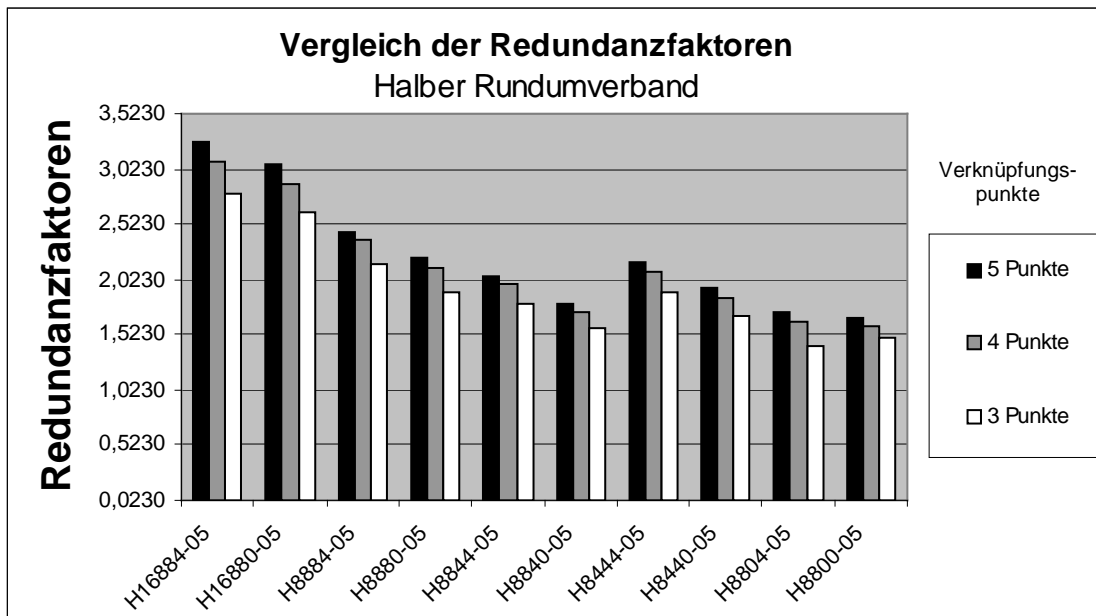


Bild 5.14 Vergleich Redundanzfaktoren halber Rundumverband

5.1.3.5 Vergleich der Strahlenschnittbedingungen

Um einen genaueren Aufschluss über die zu erwartenden Schnittbedingungen, sowohl an den Maßstabspunkten als auch an den Verknüpfungspunkten, zu erhalten, wurden die Strahlenschnitte an den jeweiligen Punkten näher betrachtet. Dabei sollen Schwachstellen aufgedeckt werden, die aufgrund zu geringer Beobachtungen der jeweiligen Punkte herrühren. Bei der Bündelblockausgleichung können durchaus auch Punkte bestimmt werden, die mit nur zwei Beobachtungen in den Verband eingehen, jedoch ist hier keine Sicherheit vor groben Fehlern gegeben. Auch aufgrund der Tatsache, dass das Verfahren als Prüfverfahren zur Messgenauigkeit von photogrammetrischen Systemen angelegt werden soll, sind hier Strahlenschnitte unter drei pro Punkt besonders kritisch zu beurteilen (zumal einige Photogrammetriesysteme von vornherein keine Punktbestimmung vornehmen, wenn eine gewisse Mindestanzahl an Beobachtungen nicht erreicht wird). Des Weiteren ist anzumerken, dass es sich bei diesen Ergebnissen um Resultate einer Simulationsrechnung handelt und die Beobachtbarkeit der Punkte nur durch den Beobachtungswinkel eingeschränkt wird. In der Praxis kann durchaus mit Ausfällen aufgrund von Verdeckungen oder Größe der Messmarken gerechnet werden.

In den folgenden Tabellen werden die Schnittbedingungen und Punktzahlen von Maßstabspunkten (Maß...) und Verknüpfungspunkten (Verk...) gegenübergestellt und jeweils ihre Mittel, Maxima und Minima betrachtet.

Tabelle 5.5 Strahlenschnitte voller Rundumverband

| Konfiguration | V16884 | V16880 | V8884 | V8880 | V8844 | V8840 | V8444 | V8440 | V8804 | V8800 |
|---------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Punkte | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 174 | 174 |
| Bilder | 36 | 32 | 28 | 24 | 24 | 20 | 20 | 16 | 20 | 16 |
| MaßPunkte | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 31 | 31 |
| MaßMittel | 7 | 6 | 6 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| MaßMax | 14 | 10 | 14 | 10 | 11 | 7 | 9 | 5 | 12 | 8 |
| MaßMin | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| VerknPunkte | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 143 | 143 |
| VerknMittel | 12 | 11 | 9 | 8 | 7 | 7 | 6 | 6 | 7 | 6 |
| VerknMax | 20 | 16 | 20 | 16 | 16 | 12 | 12 | 8 | 12 | 8 |
| VerknMin | 7 | 6 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 |

Aus Tabelle 5.5 wird deutlich, dass nur der Verband V16-8-8-4 mehr als drei minimale Strahlenschnitte auf den Maßstabspunkten zulässt. So stellt dieser sich unter den oben genannten Einschränkungen als der von der Zuverlässigkeit einzig akzeptable Verband dar.

Grafisch ergibt sich daraus das Bild 5.15, wobei die oberen und unteren Fehlerkreuze das Maximum bzw. das Minimum der Einzelbeobachtungen darstellt.

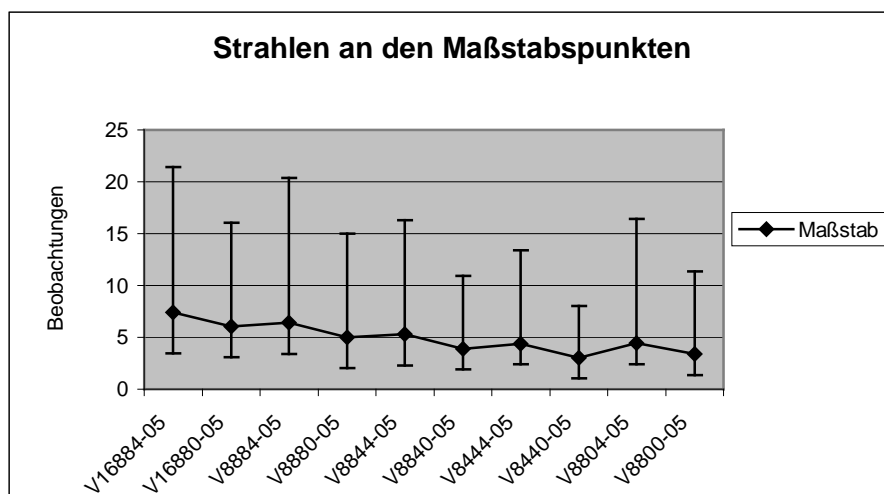


Bild 5.15 Beobachtungen an den Maßstabspunkten im vollen Rundumverband

Ein noch etwas kritischeres Bild ergibt sich bei der Betrachtung der Halbverbände. Hier wird aus Tabelle 5.6 deutlich, dass nur drei der Konfigurationen eine Minimalanzahl an überschüssigen Beobachtungen aufweisen.

Tabelle 5.6 Strahlenschnitte halber Rundumverband

| Konfiguration | H16884 | H16880 | H8884 | H8880 | H8844 | H8840 | H8444 | H8440 | H8804 | H8800 |
|---------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Punkte | 176 | 176 | 174 | 174 | 174 | 173 | 177 | 175 | 157 | 151 |
| Bilder | 23 | 19 | 18 | 14 | 16 | 12 | 17 | 13 | 14 | 10 |
| MaßPunkte | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 34 | 36 | 34 | 32 | 31 |
| MaßMittel | 8 | 7 | 7 | 6 | 6 | 5 | 6 | 5 | 5 | 4 |
| MaßMax | 13 | 13 | 11 | 10 | 10 | 8 | 10 | 8 | 9 | 6 |
| MaßMin | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| VerknPunkte | 141 | 141 | 139 | 139 | 139 | 139 | 141 | 141 | 125 | 119 |
| VerknMittel | 8 | 8 | 6 | 6 | 5 | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 |
| VerknMax | 16 | 16 | 14 | 12 | 12 | 10 | 12 | 10 | 9 | 8 |
| VerknMin | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

5.1.4 Zusammenfassung

Bei einer abschließenden Beurteilung der untersuchten Konfigurationen lässt sich sagen, dass die Erwartungen in dem tendenziellen Verlauf der Genauigkeitsentwicklung zwischen den einzelnen Vorschlägen durchaus erfüllt wurden. So stellt sich hier jeweils der aufwendigste Verband sowohl bei den vollen sowie auch bei den halben Rundumverbänden als derjenige mit dem höchsten Genauigkeitspotential dar (V16-8-8-4 und H16-8-8-4). Auch ist eine größere Verschlechterung der RMS beim Übergang zu den übrigen Konfigurationen zu verzeichnen, als beim gegenseitigen Vergleich der anderen. So lässt sich festhalten, dass durch die selbe Steigerung des Aufwandes bei diesen beiden Konfigurationen eine größere Steigerung des Genauigkeitspotentials erreicht wurde. Dies kann man auch bei der Betrachtung bei unterschiedlicher Anzahl der Verknüpfungspunkte erkennen. Wünschenswert wäre eine Erweiterung der Vorschläge durch noch aufwendigere Verbände gewesen, um zu beurteilen, ob sich die Genauigkeiten durch vertretbare Steigerung des Aufwandes noch signifikant steigern lässt. Jedoch wurde bei der Formulierung der Vorschläge davon abgesehen, da bei der Planung davon ausgegangen wurde, dass die jeweiligen Maximalvorschläge die Anforderungen an die Aufnahme Konfiguration ausreichend gut erfüllen würden. Es wurde sich hier an Aufnahmesituationen orientiert, wie sie häufig in der Praxis vorkommen.

Bei der Beurteilung der günstigsten Anzahl von Verknüpfungspunkten ist bis auf leichte Widersprüchlichkeiten beim halben Rundumverband die Variante mit fünf Punkten auf den Außenseiten und vier Punkten auf den Innenseiten der Träger zu wählen. Die leichte Verschlechterung der Lösung bei den Halbverbänden ist eventuell mit einer Erhöhung der zu

lösenden Unbekannten bei gleichzeitiger Verschlechterung der Konfiguration und der Strahlenschnittbedingungen zu erklären. Da der Prüfkörper jedoch durch leichte Modifikation für jeweils beide Aufnahmesituationen verwendet werden soll, erscheint die Variante mit fünf Punkten je Linie als beste Lösung.

Ein weiterer Grund für die Erweiterung der Konfigurationen resultiert aus der Betrachtung der minimal auftretenden Anzahl an Beobachtungen der Maßstabspunkte. Es wird hier deutlich, dass die favorisierten Konfigurationen Minimallösungen für die zuverlässige Ermittlung der Längenmessabweichung darstellen.

Eine Möglichkeit diesen Umständen Rechnung zu tragen, besteht in der Erweiterung des Grundverbandes durch eine vierte Lage und der Verteilung der gekanteten Aufnahmen zur Kalibrierung auf die vorhandenen Standpunkte. Dieses Modell wird im folgenden Kapitel näher beschrieben und in der praktischen Anwendung untersucht.

6 Praktische Anwendung

Im folgenden Kapitel werden Erweiterungen in den Aufnahmekonzepten und die Umsetzung des Verfahrens in einem Vorversuch, der im Fotoatelier der Volkswagen AG statt fand, beschrieben. Die Ergebnisse der Untersuchung der vorgeschlagenen Konzepte werden anhand der Vollverbandskonfigurationen mit den Resultaten der praktischen Durchführung verglichen. Durch Wiederholungsmessungen wird die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse des Prüfverfahrens untersucht.

6.1 Erweiterung des Konzeptes

Aus den Ergebnissen des vorhergehenden Kapitel 5 erschien es nötig, das vorgeschlagene Konzept zu erweitern. Dies bezieht sich sowohl auf die beiden Konfigurationen des vollen und halben Rundumverbandes als auch auf geringfügige Erweiterungen in der Punktverteilung, da dies sich bei der Realisierung des Prüfkörpers als offensichtlich sinnvoll anbot.

6.1.1 Erweiterung des vollen Rundumverbandes

Zur Steigerung der Zuverlässigkeit der Punktbestimmung ist eine zusätzliche Lage mit 4 Aufnahmen eingeführt worden. Die 3 Standpunkte, auf denen die gekanteten Aufnahmen zur Unterstützung der Selbstkalibrierung gemacht werden, sind auf Standpunkte gelegt worden, die teilweise etwas flachere Visuren aufweisen.

Beschreibung der Aufnahmeweise im vollen Rundumverband:

Die Aufnahmen werden in insgesamt 4 unterschiedlich hohe Lagen aufgeteilt und grundsätzlich so durchgeführt, dass das Messvolumen vollständig abgebildet wird. Am Schluss des Verbandes werden auf drei Standpunkten jeweils vier gekantete Aufnahmen zur Kalibrierung des Aufnahmesystems gemacht.

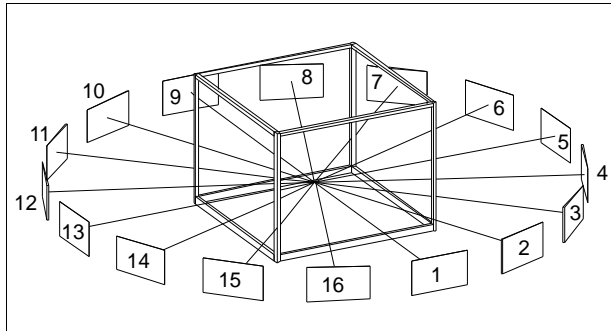


Bild 6.1 Vollverband Lage1

- 16 Aufnahmen
- Aufnahmehöhe: ca. 30cm

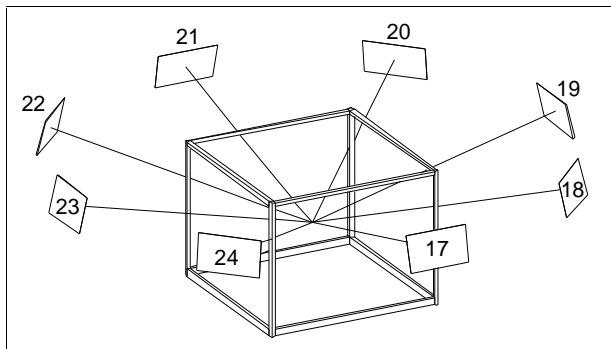


Bild 6.2 Vollverband Lage 2

- 8 Aufnahmen
- Aufnahmehöhe: ca. 1,8m

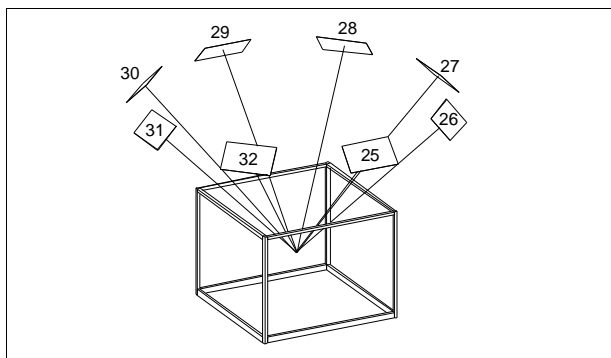


Bild 6.3 Vollverband Lage3

- 8 Aufnahmen
- Aufnahmehöhe: ca. 2,7m

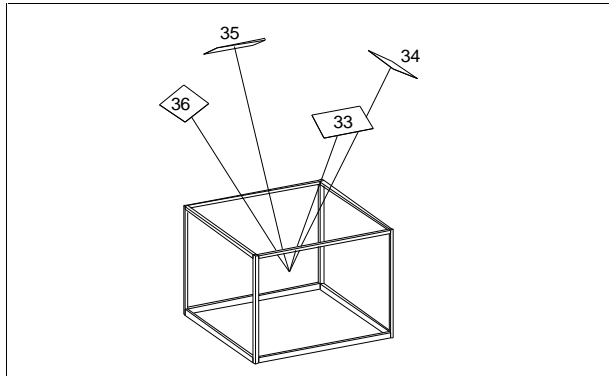


Bild 6.4 Vollverband Lage 4

- 4 Aufnahmen
- Aufnahmehöhe: ca. 3,2m

Kalibrierung des Aufnahmesystems:

Anschließend werden auf den Standpunkten 27, 31 und 33 jeweils vier gekantete Aufnahmen zur Kalibrierung der Kamera durchgeführt. Bei den Kantungen wird die Kamera jeweils um 90° gedreht (0° , 90° , 180° und 270°).

6.1.2 Erweiterung des halben Rundumverbandes

Analog zum vollen Rundumverband ist das Konzept für einen Halbverband erweitert worden. Die Kalibrierstandpunkte sind auf dieselben Aufnahmepunkte gelegt worden.

Beschreibung der Aufnahmeweise im halben Rundumverband:

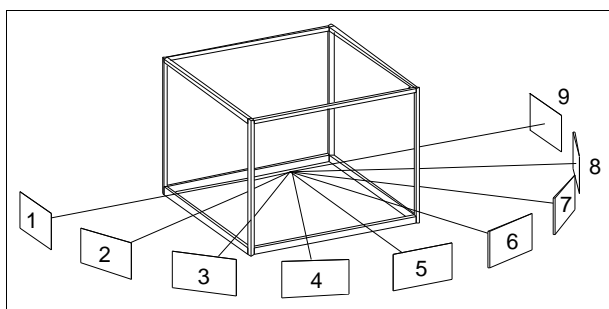


Bild 6.5 Halbverband Lage 1

- 9 Aufnahmen
- Aufnahmehöhe: ca. 30cm

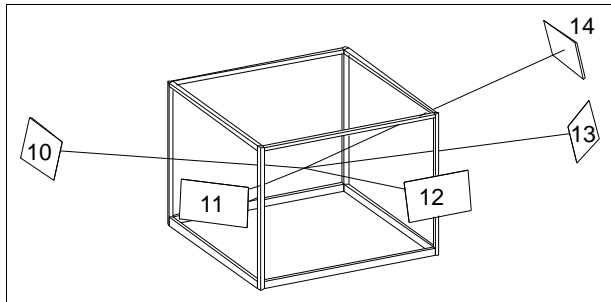


Bild 6.6 Halbverband Lage 2

- 5 Aufnahmen
- Aufnahmehöhe: ca. 1,8m

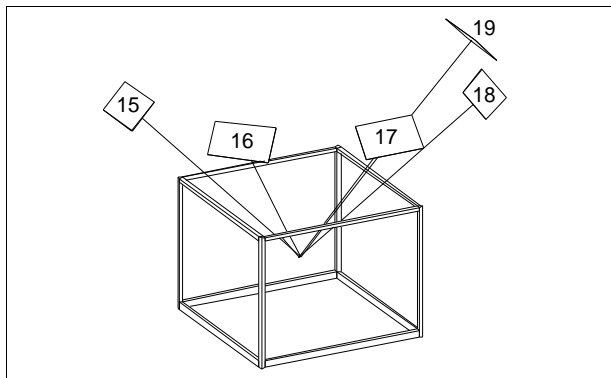


Bild 6.7 Halbverband Lage 3

- 5 Aufnahmen
- Aufnahmehöhe: ca. 2,7m

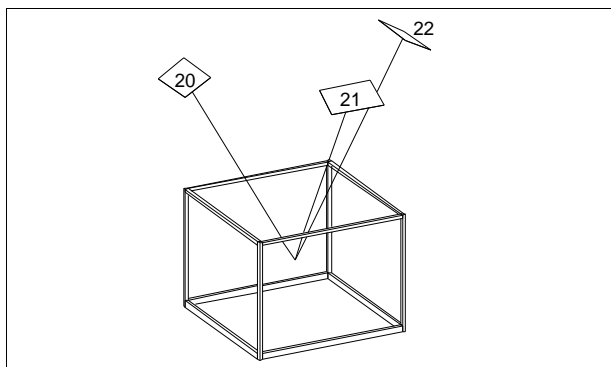


Bild 6.8 Halbverband Lage 4

- 3 Aufnahmen
- Aufnahmehöhe: ca. 3,2m

Kalibrierung des Aufnahmesystems:

Anschließend werden auf den Standpunkten 15, 19 und 21 jeweils vier gekantete Aufnahmen zur Kalibrierung der Kamera durchgeführt. Bei den Kantungen wird die Kamera jeweils um 90° gedreht.

6.1.3 Referenzkörper

Auf den Boden des Messvolumens wurden zusätzlich noch 6 codierte Messmarken gelegt, um eine verbesserte Verknüpfung von stark geneigten Aufnahmen zu erreichen. Ebenso wurden weitere uncodierte Punkte jeweils an der unteren Flächendiagonalen und an der Raumdiagonalen angebracht. Insgesamt befinden sich somit 78 codierte und 108 uncodierte Verknüpfungspunkte im Messvolumen. Die fertige Konstruktion ist in Bild 6.9 dargestellt. Eine Beschreibung von Lage und Punktnummern der Maßstäbe findet man in Anhang D.

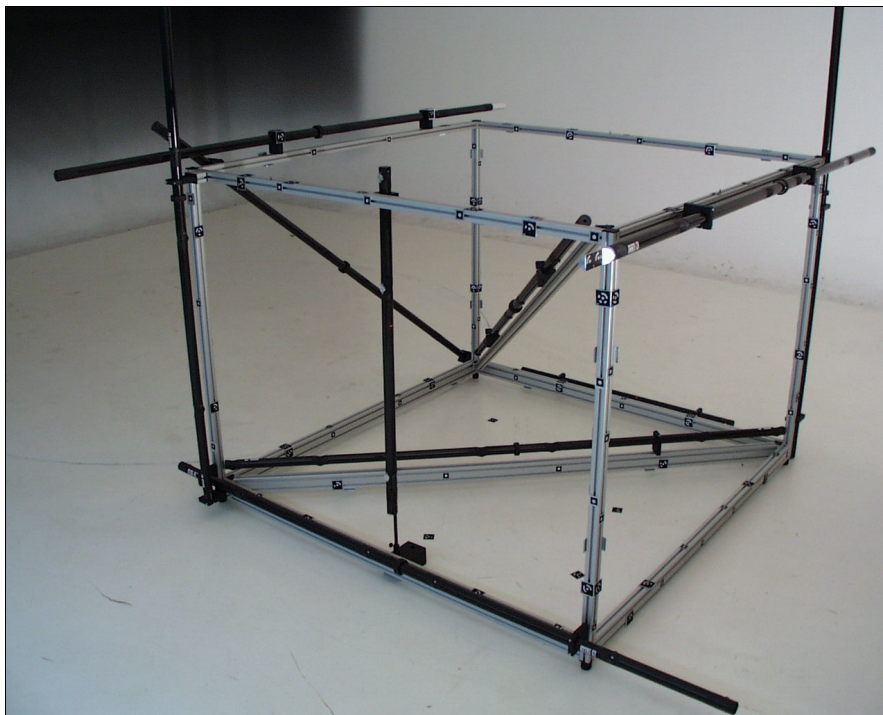


Bild 6.9 Gestell mit Maßstäben

6.2 Durchführung und Auswertung

Für die Auswertung wurde das Tritop-System verwendet, das in der Abteilung für Geometriedaten der Volkswagen AG in Gebrauch ist. Hier standen 2 verschiedene Kodak DCS 460/m nebst einem 20mm- und zwei 24mm-Objektiven zur Verfügung. Als weiterer Sensor wurde eine Kodak DCS 660 auch mit einem 20mm- und 24mm-Objektiv benutzt.

Im Unterschied zur Kodak DCS 460 ist die DCS 660 auf der Basis der Nikon F5 aufgebaut und verfügt über ein stabileres Gehäuse und eine höhere radiometrische Auflösung bei

gleicher Pixelanzahl (3048x2008) mit gleicher Pixelgröße (9x9 μm). Die Größe des Sensors beträgt 18,3x27,7 mm.

Kameras und Objektive wurden, wie in der Tabelle 6.1 dargestellt, kombiniert, um eine Abhängigkeit von der Wahl der Komponenten zu untersuchen. Die Kombination der DCS 460 mit der Seriennummer 5185 mit dem 24mm-Objektiv wurde zur Kontrolle der Reproduzierbarkeit des Verfahrens zweimal gemessen.

Tabelle 6.1 Kombinationen von Kameras und Objektiven

| | Objektiv | 20 mm | 24 mm | 24 mm | 24 mm | 20 mm |
|---------|-----------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Kamera | SerienNr. | 252908 | 207820 | 239664 | k.A. | k.A. |
| DCS 460 | 5114 | X | X | | | |
| | 5185 | X | | X/X | | |
| DCS 660 | k.A. | | | | X | X |

Zur Maßstabsdefinition wurden die in Bild 6.10 markierten Strecken (jeweils die längsten) festgelegt. Im einzelnen sind das 1150 mm bei den Strecken 1 und 2 sowie 2626 mm bei Strecke 3.

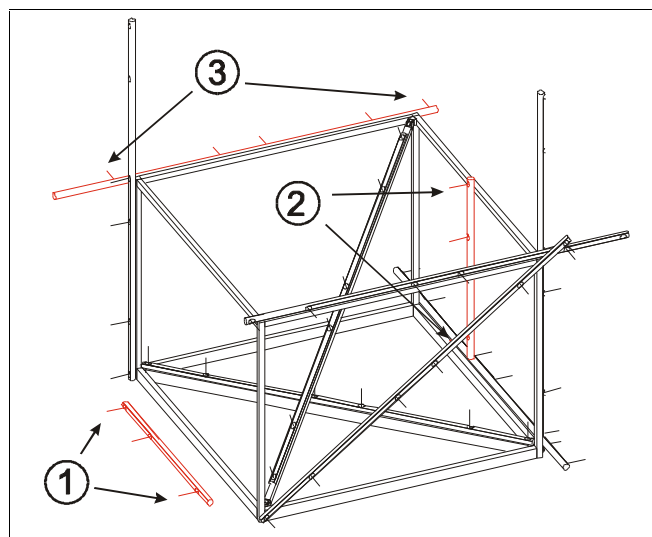


Bild 6.10 Eingeführte Systemmaßstäbe

Die Aufnahmen wurden gemäß der erweiterten Konfiguration im vollen Rundumverband durchgeführt. Bei diesem Versuch konnten aus Zeitgründen keine Halbkonfigurationen aufgenommen werden, da die Nutzungsmöglichkeiten für die Räumlichkeiten sehr begrenzt waren.

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erleichtern, sind neben den Längenmessabweichungen der einzelnen Testlängen noch weitere Angaben über die Messung angegeben. Dies sind unter anderem die Betriebsarten und Betriebsbedingungen sowie statistische Angaben zur Messung und deren Ergebnisse. In Anhang C wird durch die ausführliche Darstellung der Ergebnisse ein Vorschlag zur Dokumentation der Prüfung nach VDI/VDE 2634/1 gemacht. Unter den Betriebsbedingungen ist die Temperatur die Größe, mit dem stärksten Einfluss auf die Messung, da sie direkt über den linearen Ausdehnungskoeffizienten die Längen der Referenz- und Systemmaßstäbe beeinflusst. Bei der Erstellung des Protokolls ist die Möglichkeit gegeben, den Temperatureinfluss rechnerisch an den Referenzlängen zu korrigieren. Unter den Betriebsarten wird hier vor allem die Art des Aufnahmeverbandes verstanden und ist als der vollständige Rundumverband festgelegt.

Außer zur Temperatur werden keine weiteren Angaben zu den Betriebsbedingungen gemacht. Es wurde lediglich darauf Wert gelegt, dass das System unter „normalen“ Bedingungen eingesetzt wird. Diese Faktoren sind jedoch, bleiben sie im Betriebsintervall, relativ unkritisch, da z.B. durch die Beleuchtung mit einem Ringblitz der Einfluss von Fremdlicht sehr gering ist. Natürlich muss darauf geachtet werden, dass die Messmarken nicht durch Staub oder ähnliches verschmutzt sind. Weiter wurde dafür gesorgt, dass der Aufbau über die Zeit der Aufnahme stabil blieb und keinen mechanischen Schwingungen ausgesetzt wurde.

Die Ermittlung der Längenmessabweichung erfolgt nach dem in der Richtlinie vorgeschriebenen Prinzip:

$$\Delta l = l_m - l_k \quad (6.1)$$

| | | |
|-----|--------------|---------------------------------------|
| mit | Δl : | Dreidimensionale Längenmessabweichung |
| | l_m : | Gemessener Wert |
| | l_k : | Kalibrierter Wert |

Neben der Angabe aller Längenmessabweichungen und den Maximalwerten (max.) wird die Spanne (Span.) der Abweichungen angegeben. Sie setzt sich aus der Differenz von Maximal- und Minimalwert zusammen:

$$\text{Spanne} = \Delta l_{\max} - \Delta l_{\min} \quad (6.2)$$

Weiter werden das arithmetische Mittel (mittel) und das Mittel aus den Absolutwerten (mAbs) berechnet. Aus den Verbesserungsquadraten ([VV]) errechnet sich die Streuung der Abweichungen (RMS) nach:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum \Delta l^2}{n}} \quad (6.3)$$

6.3 Ergebnisse

6.3.1 Untersuchung der vorgeschlagenen Konfigurationen

Um die Versionen der Vollverbände zu untersuchen, wurden die Bilder der DCS 460 (5114) in Kombination mit dem 24mm-Objektiv (207820) herangezogen. Dabei wurden keine unabhängigen Verbände benutzt, sondern als Grundlage die Aufnahmen des umfangreichsten Verbandes (V16-8-8-4+4) benutzt. Der Zusatz „+4“ besagt, dass hier jeweils 4 gekantete Aufnahmen auf drei Standpunkten beteiligt sind. Die Anzahl der Bilder wurde dann entsprechend den reduzierten Verbänden verringert und in die Bündelblockausgleichung eingeführt.

In Tabelle 6.2 sind die Ergebnisse der Auswertung aufgeführt und die Anzahl der auswertbaren Punkte, die mittlere, quadratische Gesamtabweichung der Objektpunkte und der ermittelte Maximalwert der Längenmessabweichung gegenübergestellt. In Anhang B sind die ausführlichen Ergebnisse zu finden.

Tabelle 6.2 Gegenüberstellung der Konfigurationen

| Konfiguration | V16-8-8-4+4 | V-16-8-8-4 | V-8-8-8-4+4 | V-8-8-8-4 | V-8-8-4-4+4 | V-8-8-4-4 |
|---------------|-------------|------------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| Punkte | 218 | 216 | 216 | 216 | 216 | 216 |
| RMS [mm] | 0,077 | 0,078 | 0,078 | 0,080 | 0,082 | 0,086 |
| dl [mm] | 0,263 | 0,273 | 0,401 | 0,430 | 0,411 | 0,457 |

| Konfiguration | V-8-4-4-4+4 | V-8-4-4-4 | V-8-8-0-4+4 | V-8-8-0-4 | V-8-8-0-0+4 | V-8-8-0-0 |
|---------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| Punkte | 215 | 215 | 215 | 215 | 212 | 195 |
| RMS [mm] | 0,072 | 0,072 | 0,096 | 0,101 | 0,133 | 0,118 |
| dl [mm] | 0,294 | 0,305 | 0,870 | 1,189 | 1,264 | 1,216 |

Vom tendenziellen Verlauf sind sowohl RMS-Werte als auch die Längenmessabweichung sehr ähnlich. Bei einer Verschlechterung der RMS des Ausgleichungsergebnisses reagiert auch die absolute Längenmessabweichung in ähnlicher Weise. Nur sind die

Größenordnungen sehr unterschiedlich. Dies zeigt eines der Probleme bei der Interpretation der stochastischen Ergebnisse, die als Ausgabe der Bündelblockausgleichung anfallen. So definiert die Standardabweichung das Intervall, in dem mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 64% der wahre Wert enthalten ist, während die Längenmessabweichung als unabhängig ermittelte Größe die absolute äußere Genauigkeit der Objektpunkte widerspiegelt.

In der grafischen Darstellung (Bild 6.11) erkennt man eine sehr rasche Verschlechterung der Längenmessabweichungen, auch schon bei den weniger stark reduzierten Verbänden, was in den RMS-Werten nicht so deutlich wird. Die Verbesserung in den Verbänden V8-4-4-4+4 und V8-4-4-4 ist in dieser Form nur in den Simulationsergebnissen der Halbverbände aufgetreten und hat wahrscheinlich hier eher zufälligen Charakter.

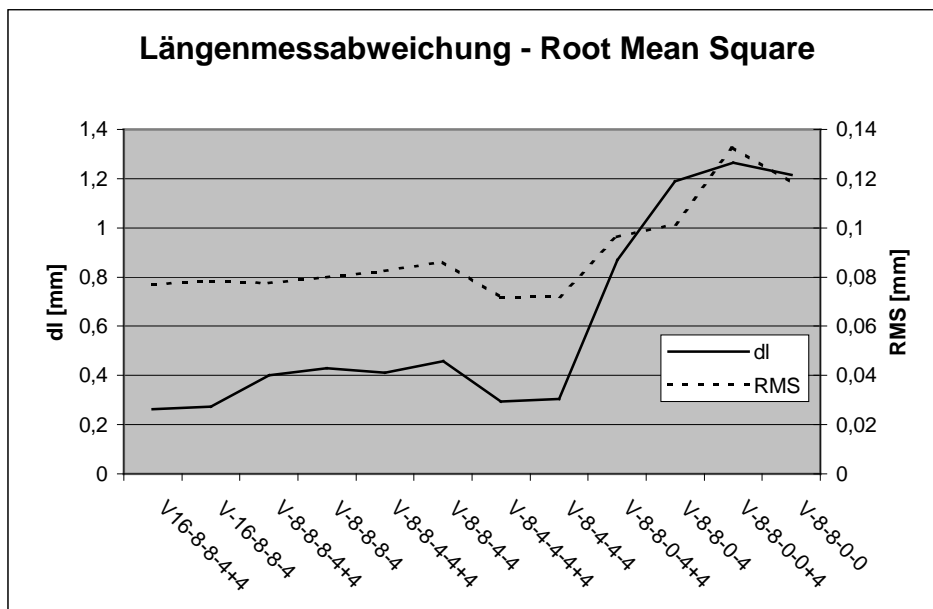


Bild 6.11 Abweichungen und RMS der Vollverbände

Aufgrund der oben aufgeführten Ergebnisse werden die reduzierten Verbände als mögliche Konfigurationen zur Durchführung der Prüfung der Längenmessabweichungen verworfen, da der Einfluss durch die ungünstigere Geometrie und die geringere Redundanz zu starke Wirkung auf die Ergebnisse hat. Messergebnisse aus Aufnahmen mit weit mehr Bildern werden im nächsten Kapitel angeführt. Im weiteren wird der Verband V16-8-8-4+4 näher betrachtet.

Bei der Betrachtung der Schnittbedingungen in Tabelle 6.3 ergibt sich ein günstigeres Bild bei dem erweiterten Verband als bei den Simulationen. Die Schnittwinkel wurden als

räumliche Winkel der Vektoren von Messmarke zu den Projektionszentren an der Marke berechnet.

Tabelle 6.3 Schnittbedingungen an den Maßstäben

| Maßstab | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | gesamt |
|----------------------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|--------|
| mittl. Beobacht. | 15,3 | 4,5 | 21 | 6 | 16,8 | 5,8 | 9,8 | 7,5 | 8 | 10,5 |
| mittl. Schnittw. [°] | 43,8 | 42,8 | 53,4 | 43,3 | 43,4 | 46,4 | 35,1 | 35,4 | 45,1 | 43,2 |
| max.[°] | 96,2 | 96,9 | 115,2 | 91,4 | 103,4 | 96,9 | 84,8 | 99,4 | 93,2 | 115,2 |
| RMSx-Bild [µm] | 2,02 | 2,76 | 1,66 | 1,95 | 1,45 | 0,27 | 3,05 | 0,51 | 0,57 | 1,83 |
| RMSy-Bild [µm] | 2,37 | 1,92 | 4,02 | 0,38 | 2,24 | 0,37 | 0,55 | 0,53 | 0,33 | 1,87 |
| RMS-Objekt[mm] | 0,11 | 0,19 | 0,11 | 0,07 | 0,06 | 0,04 | 0,10 | 0,05 | 0,04 | 0,10 |

Das Ergebnis der Schnittwinkelanalyse, insbesondere bei Betrachtung der problematischen minimalen Anzahl der möglichen Strahlen, ist durch die Erweiterung durchaus befriedigend gelöst. Jedoch fallen bei der Betrachtung der Widersprüche der Bildkoordinaten (RMS_x , RMS_y) eine starke Inhomogenität und große Ausreißer auf. Die insgesamt größeren Widersprüche der Maßstabspunkte werden besonders bei der Gegenüberstellung der Maßstabspunkte mit den codierten und uncodierten Punkten deutlich. In Tabelle 6.4 sind die mittleren Werte der Schnittwinkel, der Anzahl der Beobachtungen an den Punkten und der RMS-Werte zusammengestellt.

Tabelle 6.4 Gegenüberstellung der Schnittbedingungen

| | Codierte Punkte | Uncodierte Punkte | Maßstabspunkte |
|---------------------|-----------------|-------------------|----------------|
| mittl. Beobacht. | 13 | 13 | 11 |
| mittl. Schnittw [°] | 48,0 | 49,7 | 43,2 |
| max.[°] | 157,5 | 128,1 | 115,2 |
| RMSx-Bild [µm] | 1,02 | 0,58 | 1,83 |
| RMSy-Bild [µm] | 0,85 | 0,69 | 1,87 |
| RMS-Objekt[mm] | 0,10 | 0,05 | 0,10 |

Als Ursache dieses Phänomens stellten sich konstruktionsbedingte Eigenschaften der Maßstäbe heraus. So beträgt der maximale Beobachtungswinkel für die Messmarken, die in der neutralen Faser der Maßstäbe liegen, nach Bild 6.12 ca. 58° bevor sie von der Kante der 90°-Fräsung abgedeckt werden. Dies würde einen maximalen Öffnungswinkel von 116° bedeuten und ist in Tabelle 6.4 auch plausibel wiedergegeben. Jedoch wurden zur Berechnung der Schnittwinkel nicht alle beteiligten Strahlen verwendet sondern nur eine möglichst repräsentative Auswahl, da der damit verbundene Aufwand sehr hoch ist. So ist es nicht auszuschließen, dass noch größere Winkel vorkommen.

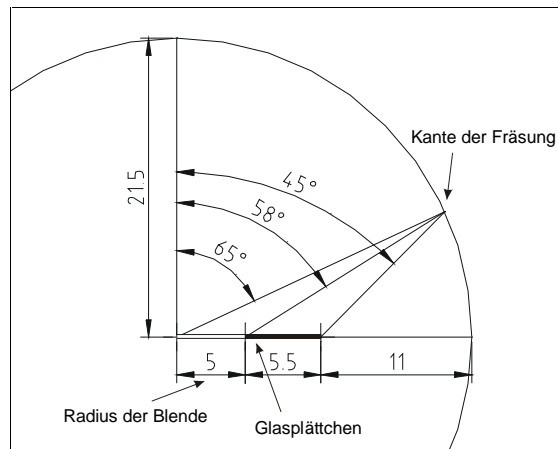


Bild 6.12 Beobachtungsverhältnisse an den Maßstabspunkten

Besonders kritisch sind hierbei die Beobachtungswinkel, die sehr nahe an den maximalen 58° liegen, da es durch die Rundung der Fräskanten zu teilweisen Abdeckungen der Retromarke kommen kann, die die Eigenschaften der abgebildeten Ellipse nicht so stark verändern, dass diese vom Bildmessoperator abgelehnt würde. Zur Verdeutlichung ist in Bild 6.13 eine Maßstabsmarke unter einem Beobachtungswinkel von 45° abgebildet. Im folgenden Bild 6.14 ist diese genau im Grenzbereich von 58° betrachtet.

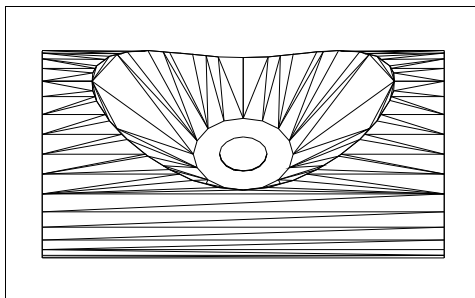


Bild 6.13 Maßstabsmarke unter 45°

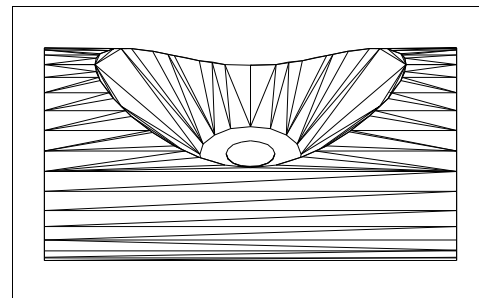


Bild 6.14 Maßstabsmarke unter 58°

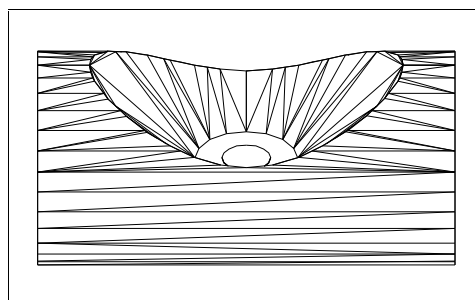


Bild 6.15 Maßstabsmarke unter 60°

In Bild 6.15 sind 60° erreicht und die Marke wird teilweise abgedeckt. Der Bereich, in dem die Retromarke noch genügend Licht reflektiert, liegt bei ungefähr 70° . Wird die Marke jetzt noch vom Bildmessoperator gemessen, so wird ein falscher Mittelpunkt ermittelt, was zu oben genannten Widersprüchen in den Bildkoordinaten führen kann. Denkbar ist, dass dieses Phänomen bei Messoperatoren, die schwerpunktbasiert arbeiten noch kritischer ist als bei Ellipsenoperatoren. Um diesem Umstand zu begegnen, lässt sich der Steuerparameter für die Ellipsenmessung so empfindlich einstellen, dass nur Ellipsen mit sehr geringen Formabweichungen gemessen werden. Jedoch werden dabei auch Punkte unterdrückt, die nicht genügend groß abgebildet werden. So ist dies mit einem Verlust von entfernt liegenden Punkten verbunden, was sich negativ auf die Verknüpfungsbedingungen auswirkt.

Um diesem Misstand Abhilfe zu verschaffen, ist für die Produktion der folgenden Maßstäbe der Öffnungswinkel der Fräsung derart vergrößert worden, dass bevor es zu Verdeckungen kommt die Retromarke aufgrund zu großer Beobachtungswinkel nicht mehr ausreichend stark reflektiert.

6.3.2 Messung mit Kombinationen von Kameras und Objektiven

Die Messungen der verschiedenen Kombinationen von Kameras und Objektiven wurden mit den oben beschriebenen Festlegungen hinsichtlich des aufgenommenen Verbandes und der Maßstabsdefinition durchgeführt.

6.3.2.1 Darstellung der Ergebnisse

Das Ergebnis der Auswertung nach der Längenmessabweichung ist in Tabelle 6.5 zusammengefasst.

Tabelle 6.5 Maximale Längenmessabweichungen der Kombinationen

| | Objektiv | 20 mm | 24 mm | 24 mm | 24 mm | 20 mm |
|---------|-----------|--------|--------|----------------|-------|--------|
| Kamera | SerienNr. | 252908 | 207820 | 239664 | k.A. | k.A. |
| DCS 460 | 5114 | -0,481 | -0,276 | x | x | x |
| DCS 460 | 5185 | -0,643 | x | -0,307 / 0,365 | x | x |
| DCS 660 | k.A. | x | x | x | 0,193 | -0,597 |

Als eine grobe Vorabschätzung der zu erwartenden Abweichung in der Messgenauigkeit lässt sich folgende Faustformel angeben:

$$S = mb \cdot s' \quad (6.4)$$

mit S: Genauigkeit im Objekt
 mb: Bildmaßstabszahl
 s': Bildmessgenauigkeit

Für die Bildmessgenauigkeit s' kann hier ein empirisch ermittelter Wert aus den Messungen eingesetzt werden und wird mit maximal 1,8 μm und im Mittel mit 0,6 μm angenommen. Die Bildmaßstabszahl ermittelt sich aus den Übersichtstabellen der Simulation für den Vollverband und bewegt sich zwischen 39 und 192 ($c=24\text{mm}$) und zwischen 47 und 230 ($c=20\text{mm}$). Dies ergibt folgende Abschätzung:

Tabelle 6.6 Abschätzung der erreichbaren Genauigkeit

| c | 24 mm | 24 mm | 20mm | 20mm |
|----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| s' | 0,6 μm | 1,8 μm | 0,6 μm | 1,8 μm |
| mb | 39 - 192 | 39 - 192 | 47 - 230 | 47 - 230 |
| S | 0,02 - 0,12 mm | 0,07 - 0,35 mm | 0,03 - 0,14 mm | 0,08 - 0,41 mm |

Betrachtet man die Ergebnisse im Vergleich zu der Vorabschätzung, erklären sich die allgemein schlechteren Ergebnisse für die 20mm-Objektive. Auch die Größenordnungen der Längenmessabweichungen liegen in einem plausiblen Wertebereich. Zu beachten ist, dass die ermittelte Längenmessabweichung der maximale Wert ist, der im gesamten Messvolumen (2m x 2m x 1,5m) auftritt. Der deutliche Unterschied zwischen der DCS 460 und der DCS 660 spiegelt hier die stabilere innere Orientierung der DCS 660 wieder.

Zur Darstellung der Auswertung nach VDI/VDE 2634, Blatt 1 werden die Längenmessabweichungen in einem Diagramm nach der Länge der Referenzstrecke aufgetragen. In Bild 6.16 und Bild 6.17 sind diese Abweichungen für die DCS 460 (SerienNr.: 5114) mit dem 20mm und dem 24mm-Objektiv gezeigt.

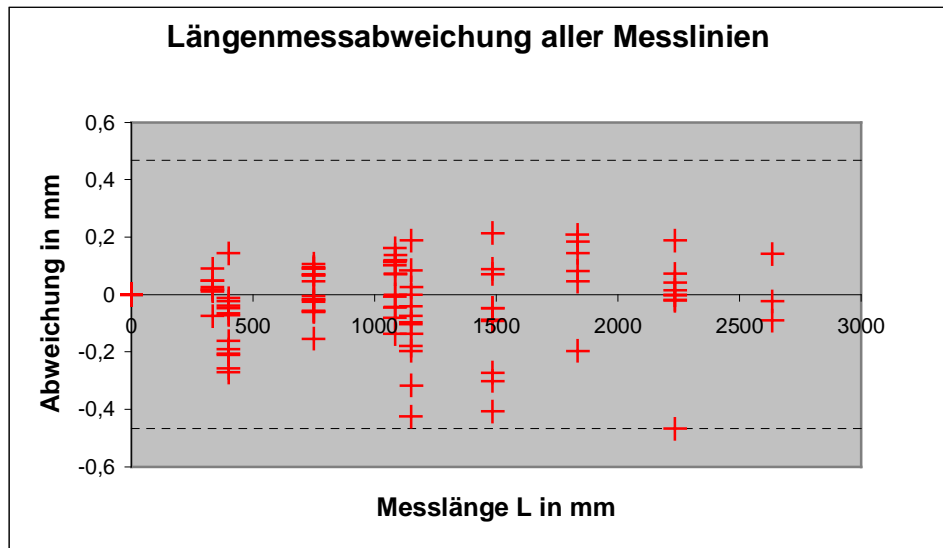


Bild 6.16 Längenmessabweichungen DCS 460 - 20mm

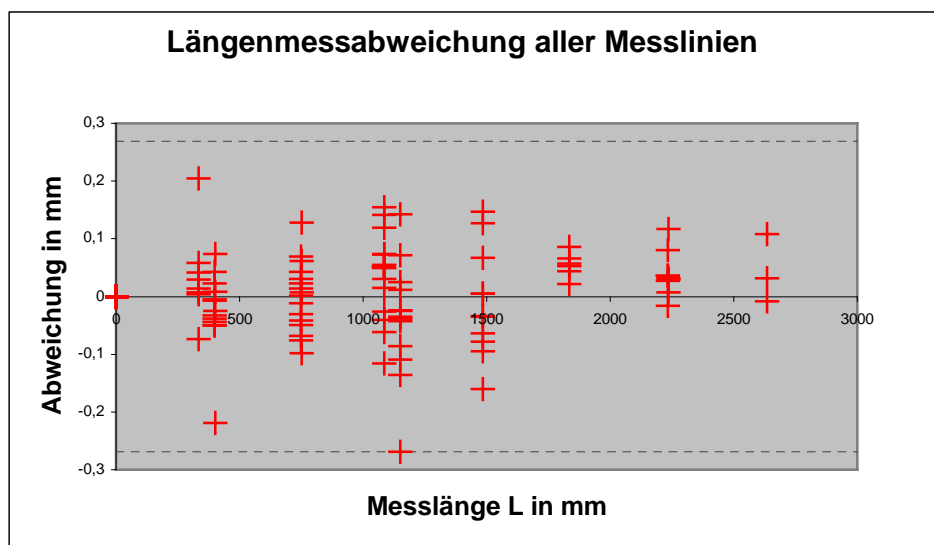


Bild 6.17 Längenmessabweichungen DCS 460 - 24mm

Folgend sind die Ergebnisse der DCS 660 auch jeweils mit dem 20mm und dem 24mm-Objektiv in Bild 6.18 und Bild 6.19 gezeigt.

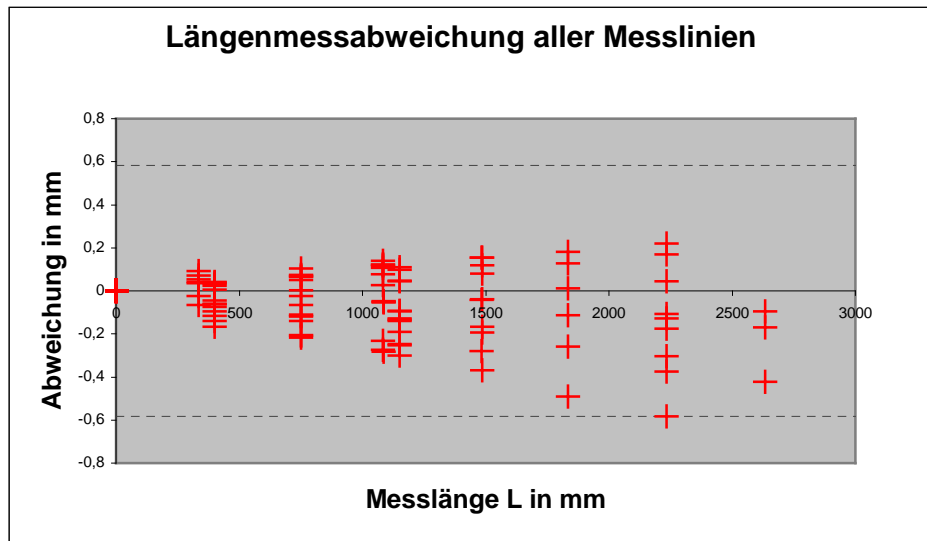


Bild 6.18 Längenmessabweichungen DCS 660 - 20mm

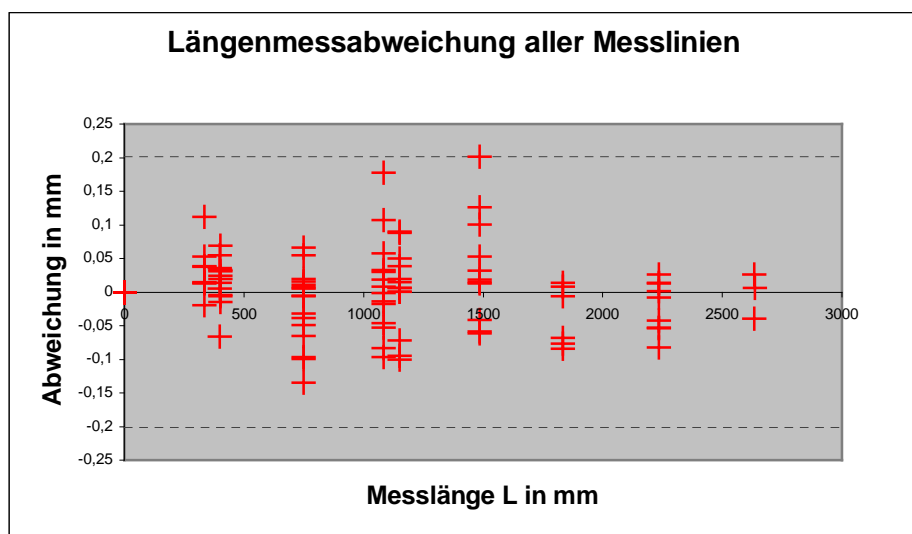


Bild 6.19 Längenmessabweichungen DCS 660 - 24mm

Bei den längeren Brennweiten ist längenabhängiger Anteil in den Abweichungen zu erkennen, was aufgrund des Messprinzips durch Triangulation auch nicht zu erwarten war. Bei den 20mm-Objektiven könnten verzeichnungsbedingte Einflüsse eine Längenabhängigkeit hervorrufen. Dadurch, dass das Objekt immer auf das gesamte Format abgebildet wird, reichen auch diese Referenzstrecken über das Bildformat und somit fallen die beteiligten Maßstabspunkte in die verzeichnungskritischen Außenbereiche des Bildes. Sind zur Simultankalibrierung nun die Bildpunkte nicht über das gesamte Format verteilt, korrigiert die Verzeichnungsfunktion eventuell die Randbereiche des Bildformates nicht richtig.

6.3.2.2 Wiederholungsmessung

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde die Kombination der DCS 460 mit der Seriennummer 5185 mit dem 24mm-Objektiv in zwei unabhängigen Verbänden aufgenommen. In den folgenden Diagrammen sind die maximalen Abweichungen, Spannen und RMS der beiden Messungen jeweils über die einzelnen Maßstäbe aufgetragen. Aus Bild 6.20 und Bild 6.21 geht hervor, dass sowohl maximale Abweichungen als auch die Spannen der Abweichungen im gesamten Messvolumen gleiche Größenordnungen und die gleichen Verläufe an den selben Maßstäben erreicht wurden. Dies lässt entweder auf systematische Fehler in der Kalibrierung der Längen oder auf systematische Fehler, die das photogrammetrische System im gesamten Messvolumen begeht, schließen. Da nicht von Kalibrierfehlern in diesen Größenordnungen ausgegangen wird, ist durch die Wiederholungsmessung die Aufdeckbarkeit von geräte- oder konfigurationsspezifischen Einflüssen als ausreichend anzunehmen.

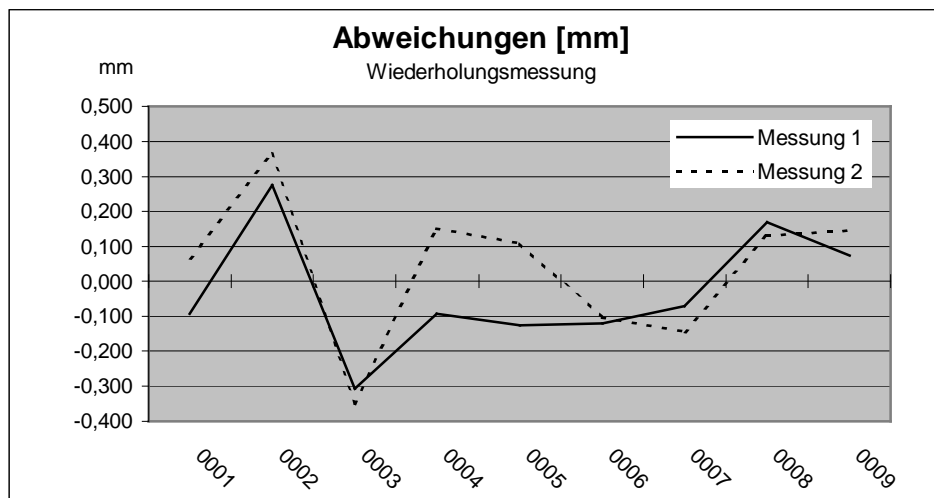


Bild 6.20 Abweichungen der Wiederholungsmessung

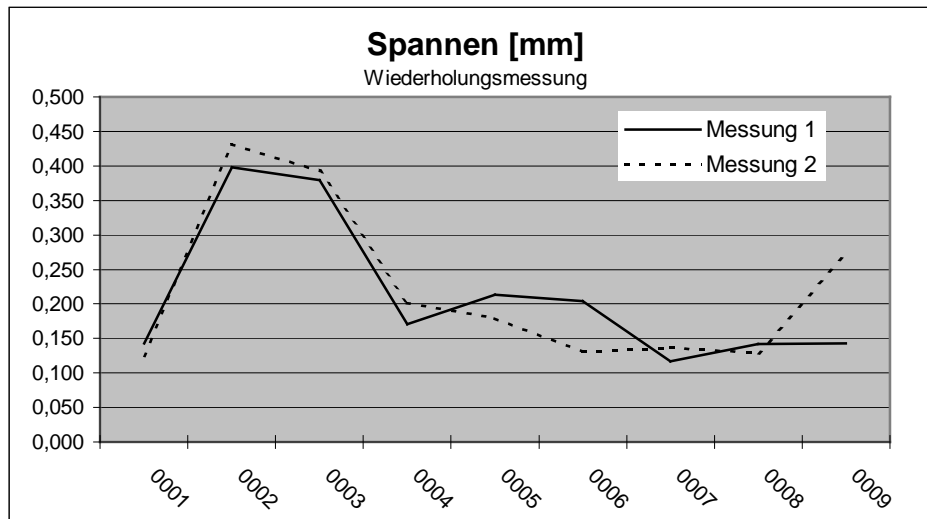


Bild 6.21 Spannen der Wiederholungsmessung

Wie in Bild 6.22 zu sehen ist, sind auch bei der Betrachtung der RMS-Werte der Abweichungen vergleichbare Ergebnisse erreicht worden. Dies lässt darauf schließen, dass die Ermittlung der Längenmessabweichung in beiden Messungen mit der selben Unsicherheit behaftet ist.

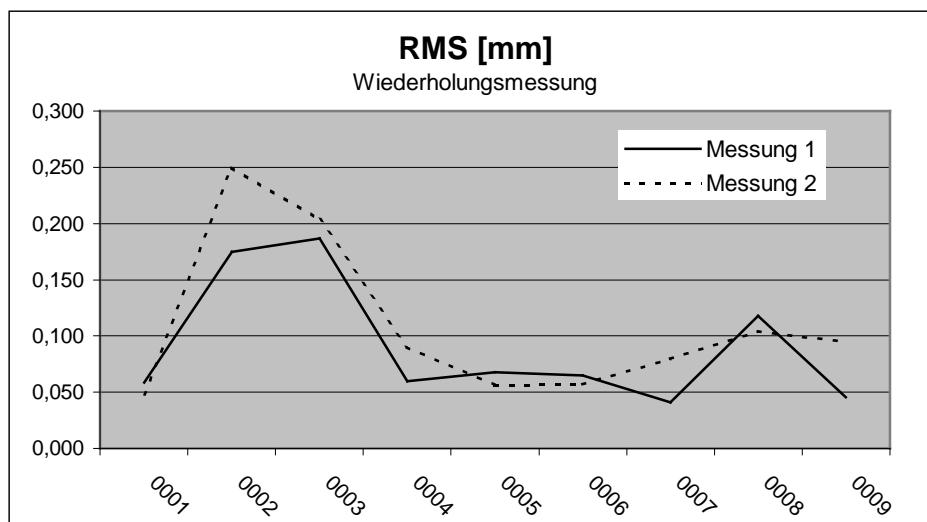


Bild 6.22 RMS der Wiederholungsmessung

6.4 Zusammenfassung

Die Aufnahmekonfigurationen wurden durch eine weitere Lage erweitert, wodurch eine zufriedenstellende Beobachtbarkeit der Maßstabspunkte erreicht wurde, wenn die Aufnahme im umfangreichsten Verband durchgeführt wird. Als eine Fehlerquelle stellten sich konstruktionsbedingte Eigenschaften der Maßstäbe heraus, die jedoch in nachfolgenden Produktionen verhindert werden können. Bei einem Vergleich von Aufnahmesystemen mit unterschiedlich stabil anzunehmenden inneren Orientierungen konnte durch Anwendung dieses Prüfverfahrens auch ein Unterschied in den Genauigkeitspotentialen festgestellt werden. Die Reproduzierbarkeit des Verfahrens wurde anhand von Wiederholungsmessungen verifiziert.

7 Vergleichsmessung

In diesem Kapitel wird die Durchführung einer Vergleichsmessung, an der sich verschiedene Teilnehmer beteiligten, beschrieben und ausgewertet. Die halben Rundumverbände werden den vollen gegenübergestellt und es werden Messungen betrachtet, die weit mehr Aufnahmen aufweisen als im Konzept vorgeschlagen. Für diese Auswertung wird nur eine Auswahl der beteiligten Systeme herangezogen. Es lagen bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht alle Ergebnisse vor. Eine ausführlichere Darstellung wird in einer entsprechenden Veröffentlichung der PTB gegeben. Des Weiteren soll hier mehr die Untersuchung des Verfahrens als der Vergleich der Systeme im Vordergrund stehen.

7.1 Durchführung

Im Rahmen einer Kooperation zwischen der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Braunschweig (PTB) und der Volkswagen AG wurde parallel zu dieser Diplomarbeit eine pilothafte Anwendung der VDI/VDE Richtlinie 2634, Blatt 1 in den Räumlichkeiten der PTB durchgeführt. Zum Einsatz kam dabei der während dieser Arbeit entstandene Prüfkörper. 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 wurden keine Beschränkungen in der Anzahl und Anordnung der Aufnahmen gesetzt. In der Bezeichnung wird dann zwischen „Standard“ und „Frei“ unterschieden. Die Art und Weise der Maßstabsdefinition wurde den Teilnehmern bei jeder Messung frei überlassen. Um die Interessen der Teilnehmer zu wahren, sind diese anonymisiert worden und es werden nur die verwendeten Kameras genannt.

Zur Kontrolle des Temperatureinflusses wurden 11 Temperatursensoren im Messvolumen verteilt. Es wurde darauf geachtet, dass vor Beginn der Messung sich die Temperatur der Luft und der Maßstäbe angeglichen haben.

Zur Untersuchung eines persönlichen Einflusses vom Beobachter und Kamera wurde beim im folgenden Unterpunkt als System D beschriebenen Teilnehmer folgende in der Tabelle 7.1 dargestellten Kombinationen gemessen.

Tabelle 7.1 Kombinationen aus Beobachtern und Kameras

| Verband | Beobachter | Kamera | |
|------------|------------|--------|----|
| | | K1 | K2 |
| V-Standard | B1 | X | |
| | B2 | | X |
| V-Frei | B1 | X | X |
| | B2 | X | |
| H-Standard | B1 | X | |
| | B2 | | |
| H-Frei | B1 | X | |
| | B2 | | |

7.2 Beteiligte Systeme

- A: Kodak DCS 460 (24mm-Objektiv)

Dies ist das in dieser Arbeit eingehend beschriebene System. Eine Beschreibung findet man in Kapitel 2.

- B: Kodak DCS 660 (24mm-Objektiv)

Im vorhergehenden Kapitel 6 wird die Kodak DCS 660 beschrieben.

- C: GSI/Leica INCA 2 Megaplus 6.3 (17mm-Objektiv)

Die INCA 2 ist eine Weiterentwicklung der INCA 1. Sie zeichnet sich durch einen schnelleren Prozessor und erweiterte Kommunikationsschnittstellen aus. Die Chipgröße ist jedoch identisch mit der INCA 1.

- D: GSI/Leica INCA 1 Megaplus 6.3 (17mm-Objektiv)

Eine Beschreibung der INCA 6.3 findet man in [LUHMANN 2000, S.181]. Die INCA 6.3 ist eine speziell für den photogrammetrischen Bereich entwickelte digitale Messkamera. Sie gewährt durch ihren optisch-mechanischen Aufbau eine hohe geometrische Stabilität. Das Objektiv und der CCD-Sensor sind fest mit dem Gehäuse verbunden. Der Sensorchip besitzt eine Auflösung von 3060x2036 Pixeln bei einer Pixelgröße von 9 µm. Durch die Integration eines Prozessors (486DX4, 100Mhz), können Bildpunkte signalisierter Objektpunkte direkt gemessen und ausgegeben werden. Das Genauigkeitspotential der INCA wird mit 1:100 000 (Messunsicherheit von 0,1 mm auf 10 m) angegeben. Im Folgenden wird diese Kamera als INCA 1 bezeichnet.

Die Gemeinsamkeit der genannten Systeme liegt darin, dass sowohl die Chipgröße als auch die Anzahl der Pixel vergleichbar ist. Zu unterscheiden ist die INCA von der DCS 460 und

der DCS 660 durch die hohe mechanische Stabilität der Verbindung von Sensorchip, Gehäuse und Objektiv.

7.3 Ergebnisse

Die Messprotokolle sind im Anhang E zu finden. Eine Zusammenfassung ist in der Tabelle 7.2 dargestellt. Die Längenmessabweichung (dl), RMS-Werte und das Mittel der Absolutwerte (mAbs) sind in Millimeter angegeben. In den letzten beiden Spalten sind die Kombinationen von Kamera und Beobachter, sowie die Anzahl der nicht ausgewerteten Maßstabspunkte wiedergegeben.

Tabelle 7.2 Ergebnisse der Vergleichsmessung

| | Sensor | Verband | dl | Bilder | RMS _(Verband) | mAbs | RMS _{dl} | Komb. | Verluste |
|---|---------|------------|-------|--------|--------------------------|-------|-------------------|-------|----------|
| A | DCS 460 | V-Standard | 0,260 | 48 | 0,042 | 0,067 | 0,092 | | 0 |
| | | V-Frei | 0,250 | 103 | 0,029 | 0,070 | 0,095 | | 0 |
| | | H-Standard | 0,292 | 33 | 0,044 | 0,091 | 0,120 | | 0 |
| | | H-Frei | 0,255 | 91 | 0,033 | 0,075 | 0,097 | | 0 |
| B | DCS 660 | V-Standard | 0,145 | 48 | 0,045 | 0,049 | 0,061 | | 4 |
| | | V-Frei | 0,116 | 105 | 0,044 | 0,034 | 0,042 | | 1 |
| | | H-Standard | 0,152 | 34 | 0,044 | 0,049 | 0,064 | | 3 |
| | | H-Frei | 0,169 | 65 | 0,044 | 0,054 | 0,068 | | 2 |
| C | Inca 2 | V-Standard | 0,151 | 40 | 0,025 | 0,038 | 0,057 | | 5 |
| | | V-Frei | 0,213 | 165 | 0,013 | 0,047 | 0,055 | | 0 |
| | | H-Standard | 0,260 | 30 | 0,032 | 0,070 | 0,083 | | 4 |
| | | H-Frei | 0,219 | 120 | 0,018 | 0,060 | 0,069 | | 0 |
| D | Inca 1 | V-Standard | 0,157 | 46 | 0,040 | 0,048 | 0,058 | B1-K1 | 0 |
| | | V-Standard | 0,249 | 50 | 0,039 | 0,075 | 0,088 | B2-K2 | 0 |
| | | V-Frei | 0,160 | 175 | 0,019 | 0,049 | 0,058 | B1-K2 | 0 |
| | | V-Frei | 0,148 | 146 | 0,031 | 0,045 | 0,054 | B1-K1 | 0 |
| | | V-Frei | 0,138 | 127 | 0,032 | 0,047 | 0,055 | B2-K1 | 0 |
| | | H-Standard | 0,145 | 33 | 0,051 | 0,042 | 0,052 | B1-K1 | 2 |
| | | H-Frei | 0,225 | 98 | 0,043 | 0,049 | 0,058 | B1-K1 | 0 |

Zur Abschätzung der Messgenauigkeit beim Halbverband wird die in (6.4) angegebene Faustformel benutzt. Dies ergibt die in der Tabelle 7.3 dargestellte Abschätzung.

Tabelle 7.3 Abschätzung halber Rundumverband

| c | 24 mm | 24 mm | 17mm | 17mm |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|
| s' | 0,6 µm | 1,8 µm | 0,6 µm | 1,8 µm |
| mb | 47 - 230 | 47 - 230 | 47 - 230 | 47 - 230 |
| S | 0,02 - 0,12 mm | 0,07 - 0,37 mm | 0,03 - 0,17 mm | 0,10 - 0,52 mm |

Demnach liegen die Resultate in dem zu erwartenden Bereich. Auch wird die Tatsache der stabileren inneren Orientierung der INCA und der DCS 660 gegenüber der DCS 460 gut wiedergegeben. Bemerkenswert sind die guten Resultate der DCS 660, die in den Bereich der INCA fallen. Allerdings wurden hier auch, wie in Tabelle 7.2 erkennbar ist, die meisten Punkte aufgrund schlechterer Bildmessgenauigkeiten oder zu geringer Beobachtungen nicht ausgewertet. Die Ausfälle bei einigen der Standardverbände tauchen häufig an den oberen und unteren Punkten der senkrecht stehenden Maßstäbe auf, was noch auf eventuelle Schwächen in den Konfigurationen hindeutet. Jedoch ist es bei sorgfältiger Aufnahme möglich, Verdeckungen und Formatprobleme soweit zu umgehen, dass alle Maßstabspunkte mit mindestens 3 Strahlen beobachtet werden.

7.3.1 Vergleich Standardverbände – Freie Verbände

Eine Verbesserung bei den ausgefallenen Punkten stellt die Aufnahme im freien Verband dar. Tendenziell weisen die freien Verbände auch geringere Längenmessabweichungen und geringere RMS-Werte der Ausgleichung und der Abweichungen auf. Jedoch ist mit der Erhöhung der Anzahl der Bilder nur eine verhältnismäßig geringe Verbesserung der Längenmessabweichung verbunden. Auch wird nicht immer eine Steigerung der Längenmessgenauigkeit erreicht. Als Beispiel für die Unterschiede zwischen den Standard- und freien Verbänden sind in Bild 7.1 die prozentualen Veränderungen der freien Verbände im Vergleich zu den Standardverbänden aus der Messreihe A angegeben. Hier ist trotz einer großen Steigerung des Aufwandes keine signifikante Verbesserung der Längenmessabweichung zu erkennen. Jedoch sinken die resultierenden RMS-Werte der Ausgleichung, was auf eine zuverlässigere Punktbestimmung hinweist.

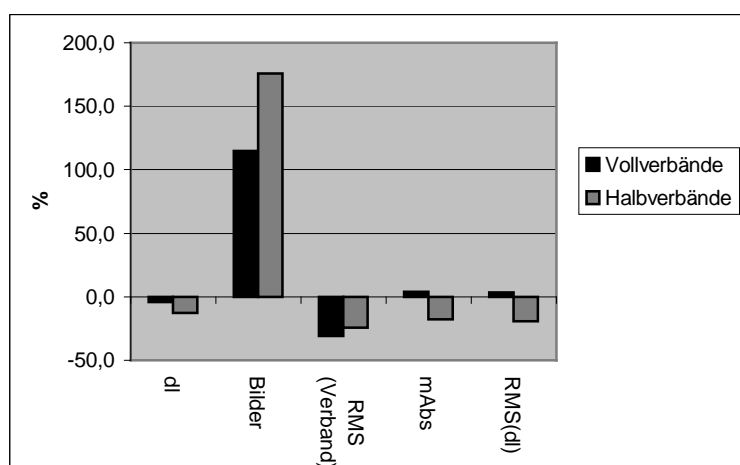
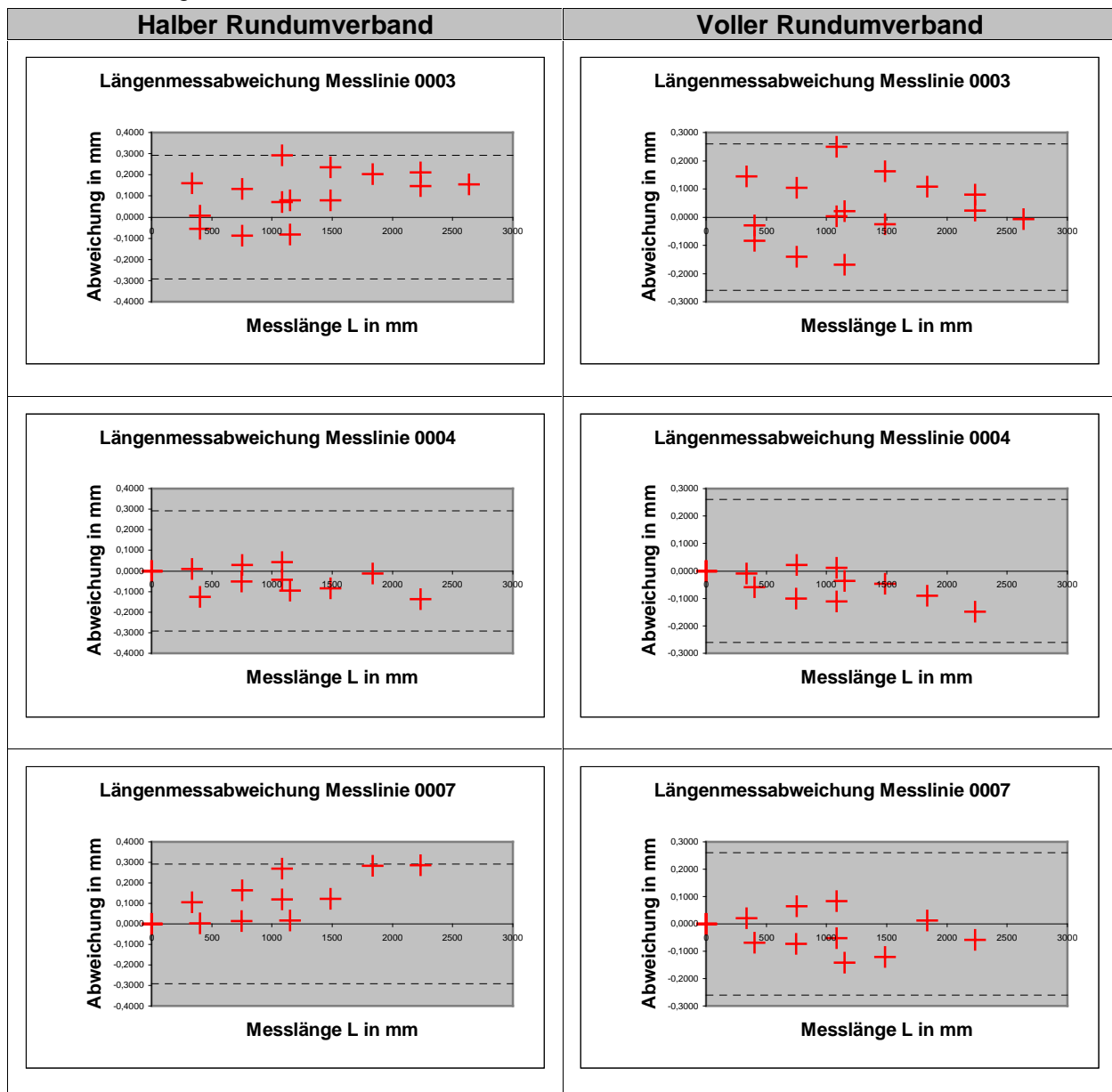


Bild 7.1 Prozentuale Veränderung Standardverband - Freier Verband

7.3.2 Vergleich Vollverbände - Halbverbände

Anhand der Standardverbände in der vollen und halben Aufnahmeweise der Messreihe A werden die Unterschiede an markanten Messlinien im Messvolumen in der Tabelle 7.4 gegenübergestellt. Die maximale Längenmessabweichung des Halbverbandes liegt bei 0,260 mm; die des Vollverbandes bei 0,292 mm.

Tabelle 7.4 Vergleich Halbverband - Vollverband



Die Messlinie 003 liegt als Flächendiagonale auf dem Boden des Messvolumens und weist in beiden Diagrammen eine hohe Streuung mit Maximalwerten nahe den Gesamtmaxima der jeweiligen Messung auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Punkte in beiden

Verbänden meist nur in den oben liegenden und stark geneigten Aufnahmen abgebildet werden, was ungefähr gleiche Maßstabsverhältnisse zur Folge hat. Bei dem Halbverband ist eine systematische Verschiebung in den positiven Bereich zu erkennen. Dies liegt an den ungünstigeren Schnittbedingungen im Halbverband. Diese Messlinie liegt in beiden Verbänden an einer kritischen Stelle.

Eine günstige Messlinie in beiden Verbänden stellt die Linie 004 dar. Sie liegt waagrecht an einer oberen Kante und weist mit ihren Messmarken nach außen. Hier herrschen durch kürzere Aufnahmeentfernungen in beiden Versionen günstigere Maßstabsverhältnisse.

Der Maßstab 007 ist im Halbverband gedreht worden und wird durch die gesamte Tiefe des Messvolumens aufgenommen. Hier wird im Halbverband auch fast der maximale Wert der Längenmessabweichung erreicht.

Dies zeigt, dass durch beide Verfahren auch die kritischen Bereiche des untersuchten Messvolumens erfasst werden und sich dies auch in der Kenngröße der Längenmessabweichung widerspiegelt.

Auch zeigt eine Betrachtung der Entwicklung der Längenmessabweichung über die Variation der Verbände einen qualitativ gleichen Verlauf, was eine vergleichende Einschätzung der Gesamtsysteme zulässt. Um dies zu verdeutlichen, sind im Bild 7.2 die absoluten Mittelwerte der Abweichungen dargestellt. Die Darstellung der Mittelwerte wurde gewählt, um tendenzielle Verläufe aufzuzeigen, was bei der Betrachtung der maximalen Abweichungen durch Ausreißer verfälscht würde.

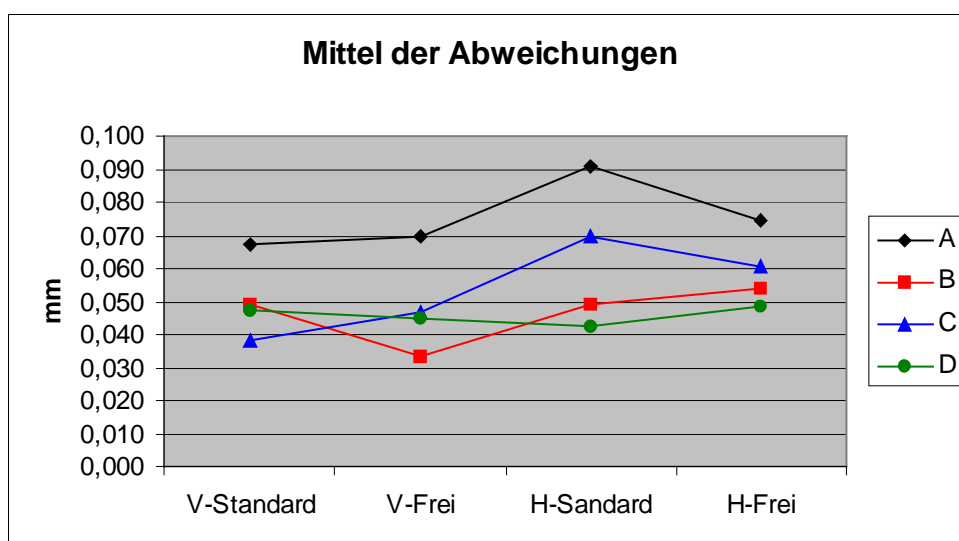


Bild 7.2 Mittelwerte der Messreihen

7.3.3 Gegenüberstellung Kamera – Beobachter

In der Messreihe D wurde versucht, durch verschiedene Kombinationen aus 2 Kameras und 2 Beobachtern individuelle Unterschiede zwischen diesen aufzudecken. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 7.5 zusammengefasst.

Tabelle 7.5 Ergebnisse der Kombinationsmessungen [mm]

| Verband | Beobachter | Kamera | |
|------------|------------|--------|-------|
| | | K1 | K2 |
| V-Standard | B1 | 0,157 | |
| | B2 | | 0,249 |
| V-Frei | B1 | 0,148 | 0,160 |
| | B2 | 0,138 | |
| H-Standard | B1 | 0,145 | |
| | B2 | | |
| H-Frei | B1 | 0,225 | |
| | B2 | | |

Auffällig ist hier das Ergebnis des vollen Standardverbandes mit der Kamera 2, was auf einen Unterschied der beiden Sensoren hinweisen würde. Jedoch liegen, wie in der Tabelle 7.2 zu sehen ist, sowohl der Mittelwert der Abweichungen mit $\sim 0,07$ mm zu $\sim 0,4$ mm als auch die RMS-Werte mit $\sim 0,9$ mm zu $\sim 0,6$ mm höher als in der gesamten Messreihe. Dies lässt eher auf einen groben Fehler in der Einführung des Systemmaßstabes oder einen Ausreißer schließen als auf einen tatsächlichen Unterschied der beiden Kameras.

Ähnlich ist auch das Ergebnis der Messung des freien Halbverbandes zu sehen. Hier sind sehr hohe Abweichungen auf dem Maßstab 008, der im hinteren Bereich des Messvolumens liegt, festgestellt worden. Nur diese Ausreißer verursachen das schlechte Ergebnis. Nach der VDI/VDE Richtlinie 2634 würde die Messung dieses Maßstabes wiederholt werden. Deutlich wird der Ausreißercharakter dieser Abweichungen bei der Gegenüberstellung der beiden Abweichungsdiagramme im Bild 7.3 und Bild 7.4.

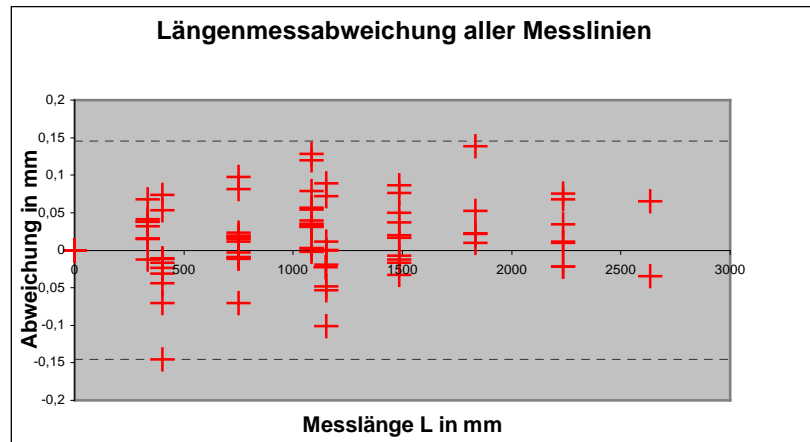


Bild 7.3 Abweichungsdiagramm Standardverband

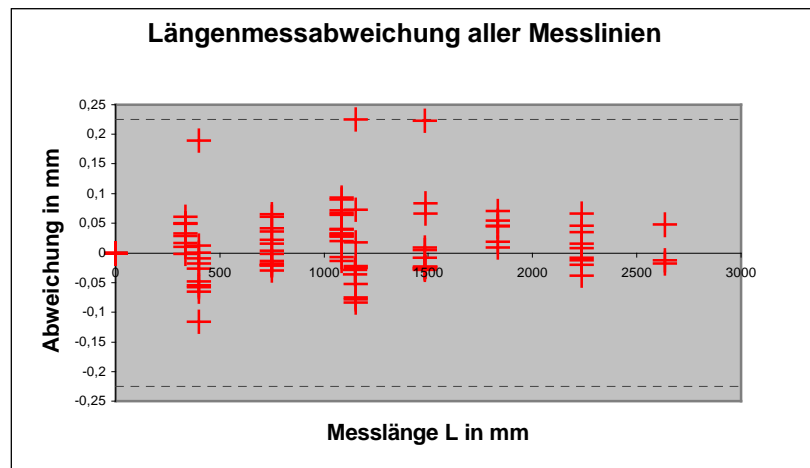


Bild 7.4 Abweichungsdiagramm Freier Verband

Bei Betrachtung der Messprotokolle im Anhang E wird auch deutlich, dass an allen Strecken, die eine Abweichung über 0,15 mm aufweisen, der Punkt 1 auf dem Maßstab 008 beteiligt ist. Das legt die Annahme nahe, dass hier ein größerer Messfehler begangen wurde.

So lässt sich aufgrund zu hoher zufälliger Fehlereinflüsse keine eindeutige Antwort auf die gestellte Frage anhand der Kenngröße *Längenmessabweichung* formulieren. Eine sinnvollere Betrachtung, wenn es um den Vergleich von Systemen geht, stellt eher der Mittelwert der absoluten Abweichungen dar, da dieser weniger stark von Ausreißern beeinflusst wird.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde das Verfahren zur Prüfung und Abnahme optischer Messsysteme nach der Richtlinie VDI/VDE 2634, Blatt 1 behandelt und in einer praktischen Anwendung umgesetzt. Grundlegend dient die Längenmessabweichung als unabhängig ermittelte Kenngröße des Verfahrens. Es wurden verschiedene Konfigurationen theoretisch untersucht, beurteilt und anschließend in einem Praxistest angewandt. Hierzu wurde ein Prüfkörper, der Richtlinie entsprechend, entworfen und hergestellt. Zentrale Bestandteile dieses Prüfkörpers sind neu entwickelte, optisch antastbare Kohlefasermaßstäbe, die mit einer Länge von 2700 mm in der Lage sind, Messvolumina zu verkörpern, wie sie in der industriellen Praxis häufig vorkommen.

Als Ergebnis der theoretischen Untersuchung durch Simulation der Aufnahmekonfigurationen wurden zwei hinsichtlich des Ansatzes verschiedene Konfigurationen jeweils in einem Rundumverband und einem Halbverband als Vorschlag für die einheitliche Prüfung photogrammetrischer Systeme formuliert. Hier stellen Verdeckungen noch das größte Problem bei der praktischen Umsetzung dar, die jedoch durch sorgfältige Aufnahme umgangen werden können. Eine nochmalige Erhöhung der Anzahl der Aufnahmestandpunkte ist nur bedingt sinnvoll, da dadurch keine signifikante Verbesserung des Ergebnisses festgestellt werden konnte. Jedoch steigt die Zuverlässigkeit der Punktbestimmung.

In der weiteren Untersuchung erwiesen sich die Ergebnisse als reproduzierbar und aussagekräftig in Bezug auf den Vergleich unterschiedlicher Systeme.

Es wurde ein verfälschender Einfluss der verwendeten Maßstäbe festgestellt, der konstruktionsbedingt ist und in folgenden Produktionen durch vorgenommene Änderungen vermieden werden kann.

Zur Beurteilung unterschiedlicher Systeme erscheint es sinnvoller weitere Angaben als den Maximalwert der im Messvolumen auftretenden Abweichungen zu Rate zu ziehen, da diese von großen zufälligen Ausreißern beherrscht wird. Eine Angabe, die sich dazu anbietet ist der Mittelwert der Absolutabweichungen, da sich hier bei gleichartigen Messungen auch ein homogenes Bild der Mittelwerte gezeigt hat.

Auf qualitative Aussagen über die betrachteten Systeme und die Angabe von Grenzwerten für die Längenmessabweichung wird in dieser Arbeit verzichtet, da eine Bestätigung der Messungen der Referenzstrecken in Form eines Kalibrierscheins noch nicht zur Verfügung stand.

8.2 Ausblick

Mit der Umsetzung der VDI/VDE Richtlinie 2634,1 ist eine gute Möglichkeit geschaffen worden die Messunsicherheit von photogrammetrischen Systemen durch die Ermittlung einer unabhängigen Kenngröße abzuschätzen, ohne auf die stochastischen Qualitätsangaben der Bündelblockausgleichung zurück zu greifen. Dies trägt zur Akzeptanz von optischen Messmethoden beim Anwender bei, da hier Begriffe und Definitionen angewendet werden die zum maschinenbaulichen Alltag gehören. Als nachteilig ist jedoch die eingeschränkte Mobilität des Testkörpers aufgrund seiner Größe zu werten. Eine weitere Einschränkung liegt in der Verfügbarkeit der notwendigen Anzahl von geeigneten Maßstäben zur Verkörperung der Referenzstrecken.

In Bezug auf die kommende Verpflichtung jedes Nutzers eines Messsystems zum Nachweis der aufgabenspezifischen Messunsicherheit nach GUM bieten die von Volkswagen entwickelten Maßstäbe durch die Eigenschaft der Kalibrierbarkeit und einer geringeren Unsicherheit bei der Kalibrierung von $<5 \mu\text{m}$ den Vorteil, auch einen geringeren Beitrag zur Gesamtunsicherheit zu bewirken. Die Rückführung auf das staatliche Längennormal ermöglicht den optischen Messsystemen nun den Schritt vom Analysemittel zum zertifizierten Messmittel im Sinne der ISO 9000.

Literaturverzeichnis

- Dold, Jürgen: Ein hybrides photogrammetrisches Industriemesssystem höchster Genauigkeit und seine Überprüfung. Dissertation, Heft 54, Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr, München. 1997
- El Hassan, Rahil Abo: Rechnergestützte Optimierung der Photogrammetrischen Aufnahme im Nahbereich. Diss. Der Fakultät für Bau-, Wasser- und Forstwesen des Wissenschaftlichen Rates der Technischen Universität Dresden. 1993
- Hein, S.; Empen, J.: Durchführung der Genauigkeitsbestimmung eines optischen 3D-Messsystems mit flächenhafter Antastung. Diplomarbeit. Fachhochschule Karlsruhe. 2000
- Hinsken, L: CAP Bedienerhandbuch zum Bündelprogramm. 1991
- Keune, Walter: Optimierte Anwendung der Nahbereichsphotogrammetrie: Einsatzmöglichkeiten, Leistungssteigerung, Datenverarbeitung. Köln: Verlag TÜV Rheinland. 1989
- Kraus, Karl: Photogrammetrie, Band 1: Grundlagen und Standardverfahren mit Beiträgen von P. Waldhäusl. Bonn: Dümmler Verlag, 1997
- Luhmann, Thomas: Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Heidelberg: H. Wichmannverlag. 2000
- Nack, Andres: Aufbau und Implementierung einer Prozesskette zur Kalibrierung von Maßstäben für optische Messsysteme. Diplomarbeit. Dresden: Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden. 1999
- Schamscha, Axel: Konzept, Formulierung und Anwendung photogrammetrischer Simulationstechniken. Diplomarbeit. Fachhochschule Braunschweig-Wolfenbüttel. 1993

-
- Schwarz, W. (ed): Vermessungsverfahren im Maschinen und Anlagenbau. Stuttgart: Wittwer Verlag. 1995
- Schwenke, H. et al: Abnahme, Überwachung und Kalibrierung von flexiblen Industriemesssystemen. Braunschweig: Bundesforschungsprojekt. 1997
- GUM: ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), 1993
- ISO 10 360-2: Koordinatenmesstechnik – Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Koordinatenmessgeräten. Berlin: Beuth Verlag
- VDI/VDE 2617: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung. VDI/VDE-Richtlinie, Blatt 1-6. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI/VDV 2634: Optische 3D-Messtechnik VDI/VDE-Richtlinie, Blatt 1-2. Berlin: Beuth Verlag.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen, die am Gelingen dieser Diplomarbeit beteiligt waren aufrichtig danken. Mein besonderer Dank gilt der gesamten Unterabteilung Geometriedaten der Volkswagen AG unter Leitung von Herrn Pakebusch, ohne deren Unterstützung und Hilfsbereitschaft viele Aspekte dieser Arbeit nicht realisiert werden konnten. Hier möchte ich die Gelegenheit nutzen, Herrn Böhm meinen persönlichen Dank auszusprechen, der tatkräftig und beratend maßgeblich bei der praktischen Umsetzung beteiligt war und durch seinen persönlichen Einfluss bei Volkswagen viele Abläufe erleichtert hat.

Verzeichnis der Anhänge

- A - Ergebnisse der Simulationsrechnung
- B - Ergebnisse des Vorversuchs: Vollverband
- C - Ergebnisse des Vorversuchs - Kombinationen
- D - Nummerierung der Maßstabspunkte
- E - Ergebnisse der Vergleichsmessung

Tabellarische Zusammenfassung:

| Vollständiger Rundumverband | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <i>0,5µm Bildmessgenauigkeit</i> | | | | | | | | | | |
| <i>5 Verknüpfungspunkte je Seite</i> | | | | | | | | | | |
| Konfiguration | V16884-05 | V16880-05 | V8884-05 | V8880-05 | V8844-05 | V8840-05 | V8444-05 | V8440-05 | V8804-05 | V8800-05 |
| Punkte | 193 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | 174 | 190 |
| Bilder | 36 | 32 | 28 | 24 | 24 | 20 | 20 | 16 | 20 | 16 |
| Unbekannte | 803 | 770 | 746 | 722 | 722 | 698 | 698 | 674 | 650 | 674 |
| Beobachtungen | 4150 | 3910 | 3184 | 2944 | 2686 | 2446 | 2206 | 1966 | 2166 | 2054 |
| Redundanz | 3354 | 3147 | 2445 | 2229 | 1971 | 1755 | 1515 | 1299 | 1523 | 1387 |
| RMS-X | 0,0152 | 0,0154 | 0,0185 | 0,0189 | 0,0198 | 0,0204 | 0,0217 | 0,0228 | 0,0227 | 0,0228 |
| RMS-Y | 0,0151 | 0,0154 | 0,0185 | 0,0188 | 0,0197 | 0,0203 | 0,0220 | 0,0231 | 0,0234 | 0,0235 |
| RMS-Z | 0,0130 | 0,0129 | 0,0160 | 0,0161 | 0,0172 | 0,0172 | 0,0195 | 0,0199 | 0,0179 | 0,0179 |
| RMS ges | 0,0251 | 0,0253 | 0,0307 | 0,0311 | 0,0328 | 0,0335 | 0,0365 | 0,0381 | 0,0372 | 0,0373 |
| RMS-Xmax | 0,0266 | 0,0262 | 0,0340 | 0,0341 | 0,0340 | 0,0338 | 0,0402 | 0,0667 | 0,0556 | 0,0576 |
| RMS-Ymax | 0,0320 | 0,0315 | 0,0352 | 0,0353 | 0,0353 | 0,0350 | 0,0420 | 0,0666 | 0,0627 | 0,0649 |
| RMS-Ymax | 0,0320 | 0,0315 | 0,0352 | 0,0353 | 0,0353 | 0,0350 | 0,0420 | 0,0666 | 0,0627 | 0,0649 |
| RMS ges max | 0,0487 | 0,0479 | 0,0552 | 0,0554 | 0,0609 | 0,0605 | 0,0887 | 0,1222 | 0,0894 | 0,0933 |
| Redundanzfakt | 4,1768 | 4,0870 | 3,2775 | 3,0873 | 2,7299 | 2,5143 | 2,1705 | 1,9273 | 2,3431 | 2,0579 |

| Vollständiger Rundumverband | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <i>0,5µm Bildmessgenauigkeit</i> | | | | | | | | | | |
| <i>4 Verknüpfungspunkte je Seite</i> | | | | | | | | | | |
| Konfiguration | V16884-05 | V16880-05 | V8884-05 | V8880-05 | V8844-05 | V8840-05 | V8444-05 | V8440-05 | V8804-05 | V8800-05 |
| Punkte | 158 | 158 | 158 | 158 | 158 | 158 | 158 | 158 | 129 | 158 |
| Bilder | 36 | 32 | 28 | 24 | 24 | 20 | 20 | 16 | 20 | 16 |
| Unbekannte | 698 | 674 | 650 | 626 | 626 | 602 | 602 | 578 | 515 | 578 |
| Beobachtungen | 3392 | 3176 | 2620 | 2404 | 2214 | 1998 | 1816 | 1600 | 1620 | 1694 |
| Redundanz | 2701 | 2509 | 1977 | 1785 | 1595 | 1403 | 1221 | 1029 | 1112 | 1123 |
| RMS-X | 0,0154 | 0,0161 | 0,0184 | 0,0191 | 0,0198 | 0,0206 | 0,0218 | 0,0232 | 0,0235 | 0,0218 |
| RMS-Y | 0,0154 | 0,0160 | 0,0183 | 0,0190 | 0,0197 | 0,0205 | 0,0221 | 0,0235 | 0,0241 | 0,0223 |
| RMS-Z | 0,0131 | 0,0135 | 0,0158 | 0,0162 | 0,0172 | 0,0173 | 0,0196 | 0,0201 | 0,0188 | 0,0172 |
| RMS ges | 0,0254 | 0,0264 | 0,0304 | 0,0314 | 0,0328 | 0,0338 | 0,0367 | 0,0387 | 0,0386 | 0,0356 |
| RMS-Xmax | 0,0263 | 0,0269 | 0,0331 | 0,0338 | 0,0335 | 0,0335 | 0,0397 | 0,0658 | 0,0561 | 0,0547 |
| RMS-Ymax | 0,0315 | 0,0322 | 0,0343 | 0,0351 | 0,0348 | 0,0348 | 0,0414 | 0,0658 | 0,0633 | 0,0615 |
| RMS-Ymax | 0,0315 | 0,0322 | 0,0343 | 0,0351 | 0,0348 | 0,0348 | 0,0414 | 0,0658 | 0,0633 | 0,0615 |
| RMS ges max | 0,0479 | 0,0490 | 0,0537 | 0,0549 | 0,0599 | 0,0599 | 0,0871 | 0,1206 | 0,0903 | 0,0885 |
| Redundanzfakt | 3,8696 | 3,7226 | 3,0415 | 2,8514 | 2,5479 | 2,3306 | 2,0282 | 1,7803 | 2,1592 | 1,9429 |

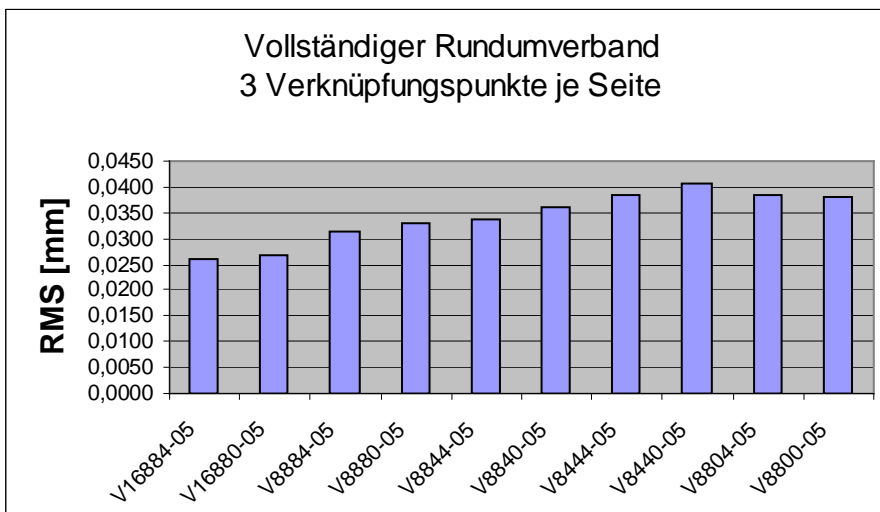
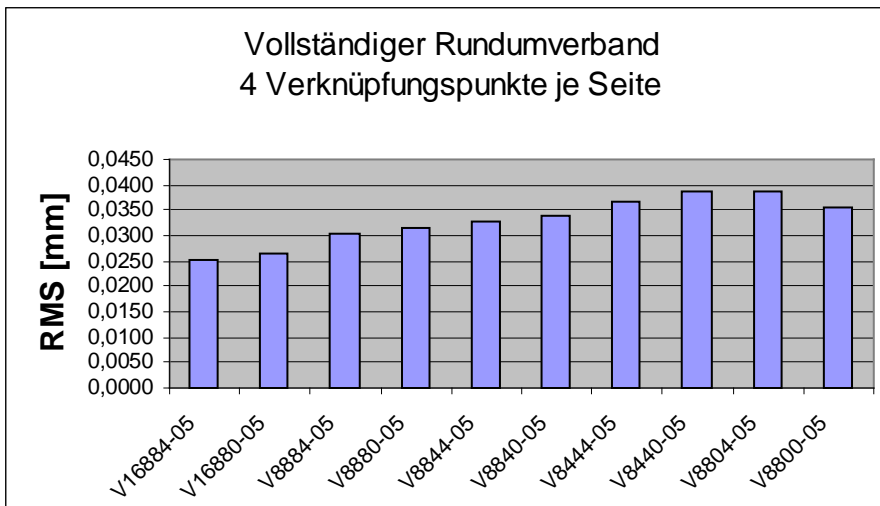
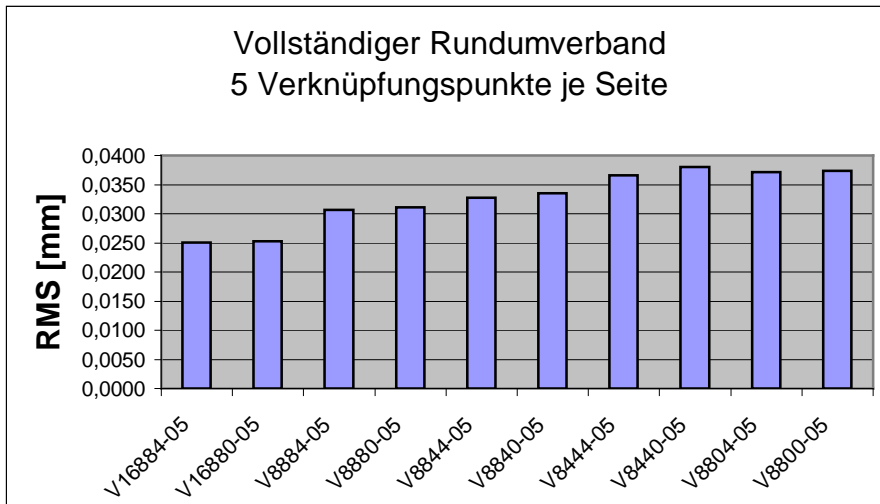
| Vollständiger Rundumverband | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,5 μ m Bildmessgenauigkeit | | | | | | | | | | |
| 3 Verknüpfungspunkte je Seite | | | | | | | | | | |
| Konfiguration | V16884-05 | V16880-05 | V8884-05 | V8880-05 | V8844-05 | V8840-05 | V8444-05 | V8440-05 | V8804-05 | V8800-05 |
| Punkte | 125 | 125 | 125 | 125 | 125 | 125 | 125 | 125 | 110 | 125 |
| Bilder | 36 | 32 | 28 | 24 | 24 | 20 | 20 | 16 | 20 | 16 |
| Unbekannte | 599 | 575 | 551 | 527 | 527 | 503 | 503 | 479 | 458 | 479 |
| Beobachtungen | 2572 | 2396 | 1982 | 1806 | 1682 | 1506 | 1448 | 1196 | 1328 | 1308 |
| Redundanz | 1980 | 1828 | 1438 | 1286 | 1162 | 1010 | 952 | 724 | 877 | 836 |
| RMS-X | 0,0158 | 0,0162 | 0,0190 | 0,0200 | 0,0204 | 0,0219 | 0,0227 | 0,0244 | 0,0235 | 0,0234 |
| RMS-Y | 0,0158 | 0,0162 | 0,0190 | 0,0200 | 0,0204 | 0,0219 | 0,0231 | 0,0247 | 0,0238 | 0,0237 |
| RMS-Z | 0,0135 | 0,0136 | 0,0163 | 0,0169 | 0,0178 | 0,0185 | 0,0206 | 0,0211 | 0,0188 | 0,0186 |
| RMS ges | 0,0261 | 0,0266 | 0,0314 | 0,0329 | 0,0339 | 0,0361 | 0,0384 | 0,0406 | 0,0384 | 0,0381 |
| RMS-Xmax | 0,0266 | 0,0265 | 0,0336 | 0,0348 | 0,0340 | 0,0352 | 0,0408 | 0,0665 | 0,0567 | 0,0581 |
| RMS-Ymax | 0,0319 | 0,0319 | 0,0349 | 0,0361 | 0,0354 | 0,0366 | 0,0532 | 0,0664 | 0,0643 | 0,0655 |
| RMS-Ymax | 0,0319 | 0,0319 | 0,0349 | 0,0361 | 0,0354 | 0,0366 | 0,0532 | 0,0664 | 0,0643 | 0,0655 |
| RMS ges max | 0,0485 | 0,0484 | 0,0545 | 0,0564 | 0,0606 | 0,0627 | 0,0946 | 0,1217 | 0,0916 | 0,0941 |
| Redundanzfakt | 3,3055 | 3,1791 | 2,6098 | 2,4402 | 2,2049 | 2,0080 | 1,8926 | 1,5115 | 1,9148 | 1,7453 |

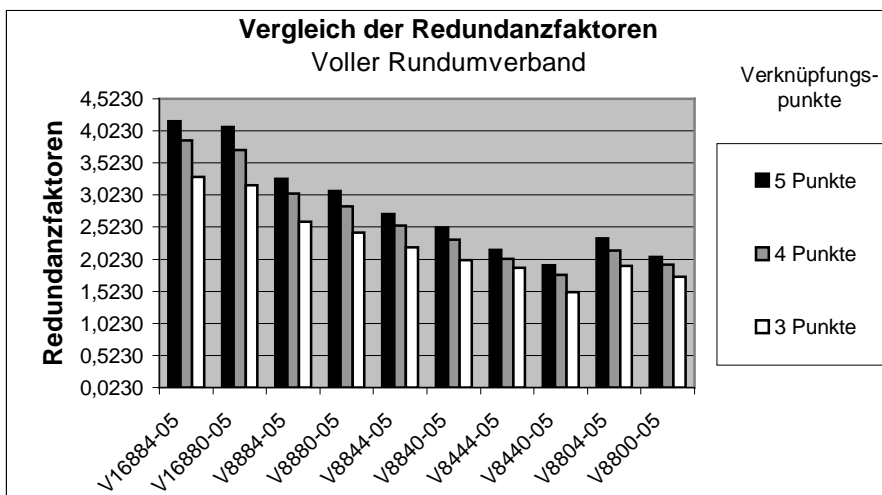
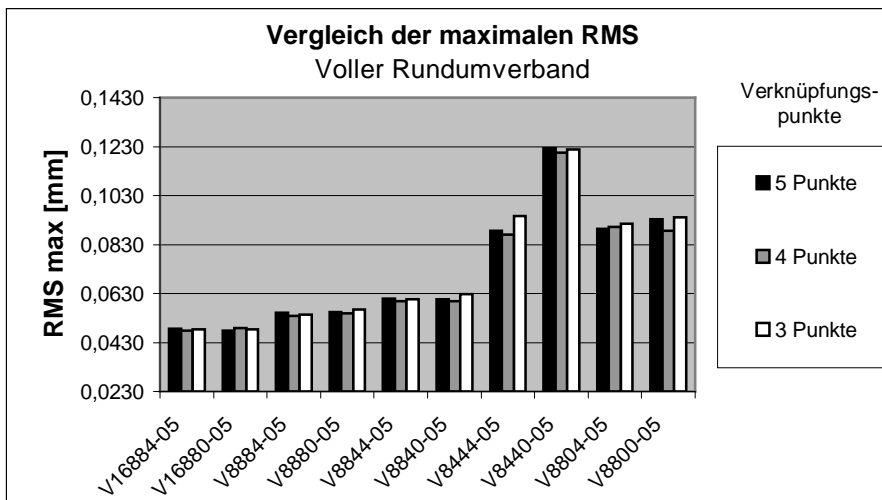
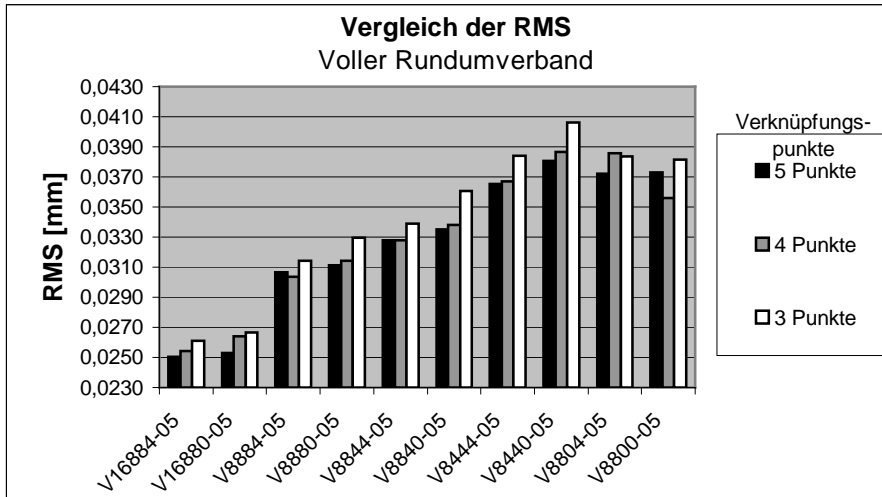
| Halber Rundumverband | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,5 μ m Bildmessgenauigkeit | | | | | | | | | | |
| 5 Verknüpfungspunkte je Seite | | | | | | | | | | |
| Konfiguration | H16884-05 | H16880-05 | H8884-05 | H8880-05 | H8844-05 | H8840-05 | H8444-05 | H8440-05 | H8804-05 | H8800-05 |
| Punkte | 176 | 176 | 174 | 174 | 174 | 173 | 177 | 175 | 157 | 151 |
| Bilder | 23 | 19 | 18 | 14 | 16 | 12 | 17 | 13 | 14 | 10 |
| Unbekannte | 674 | 650 | 638 | 614 | 626 | 599 | 641 | 611 | 563 | 521 |
| Beobachtungen | 2866 | 2634 | 2198 | 1966 | 1908 | 1674 | 2036 | 1792 | 1532 | 1382 |
| Redundanz | 2199 | 1991 | 1567 | 1359 | 1289 | 1082 | 1402 | 1188 | 976 | 868 |
| RMS-X | 0,0282 | 0,0291 | 0,0361 | 0,0358 | 0,0368 | 0,0392 | 0,0325 | 0,0348 | 0,0429 | 0,0447 |
| RMS-Y | 0,0208 | 0,0218 | 0,0256 | 0,0256 | 0,0266 | 0,0285 | 0,0236 | 0,0254 | 0,0302 | 0,0315 |
| RMS-Z | 0,0182 | 0,0187 | 0,0257 | 0,0253 | 0,0260 | 0,0272 | 0,0236 | 0,0245 | 0,0234 | 0,0242 |
| RMS ges | 0,0395 | 0,0409 | 0,0512 | 0,0508 | 0,0523 | 0,0556 | 0,0466 | 0,0496 | 0,0574 | 0,0598 |
| RMS-Xmax | 0,1050 | 0,1059 | 0,1809 | 0,1764 | 0,1768 | 0,1838 | 0,1703 | 0,1768 | 0,1755 | 0,1792 |
| RMS-Ymax | 0,0407 | 0,0419 | 0,0537 | 0,0523 | 0,0694 | 0,0722 | 0,0668 | 0,0694 | 0,0550 | 0,0563 |
| RMS-Ymax | 0,0407 | 0,0419 | 0,0537 | 0,0523 | 0,0694 | 0,0722 | 0,0668 | 0,0694 | 0,0550 | 0,0563 |
| RMS ges max | 0,1236 | 0,1249 | 0,2229 | 0,2173 | 0,2226 | 0,2313 | 0,2143 | 0,2225 | 0,1935 | 0,1990 |
| Redundanzfakt. | 3,2626 | 3,0631 | 2,4561 | 2,2134 | 2,0591 | 1,8063 | 2,1872 | 1,9444 | 1,7336 | 1,6660 |

| Halber Rundumverband | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,5µm Bildmessgenauigkeit | | | | | | | | | | |
| 4 Verknüpfungspunkte je Seite | | | | | | | | | | |
| Konfiguration | H16884-05 | H16880-05 | H8884-05 | H8880-05 | H8844-05 | H8840-05 | H8444-05 | H8440-05 | H8804-05 | H8800-05 |
| Punkte | 147 | 147 | 145 | 145 | 145 | 144 | 147 | 146 | 101 | 131 |
| Bilder | 23 | 19 | 18 | 14 | 16 | 12 | 17 | 13 | 14 | 10 |
| Unbekannte | 587 | 563 | 551 | 527 | 539 | 512 | 551 | 524 | 395 | 461 |
| Beobachtungen | 2394 | 2186 | 1852 | 1644 | 1604 | 1394 | 1700 | 1490 | 1036 | 1188 |
| Redundanz | 1814 | 1630 | 1308 | 1124 | 1072 | 889 | 1156 | 973 | 648 | 734 |
| RMS-X | 0,0276 | 0,0284 | 0,0333 | 0,0336 | 0,0350 | 0,0356 | 0,0321 | 0,0344 | 0,0420 | 0,0416 |
| RMS-Y | 0,0209 | 0,0218 | 0,0247 | 0,0252 | 0,0265 | 0,0271 | 0,0246 | 0,0265 | 0,0303 | 0,0304 |
| RMS-Z | 0,0181 | 0,0186 | 0,0239 | 0,0240 | 0,0250 | 0,0248 | 0,0234 | 0,0244 | 0,0244 | 0,0234 |
| RMS ges | 0,0391 | 0,0403 | 0,0479 | 0,0484 | 0,0505 | 0,0512 | 0,0467 | 0,0498 | 0,0572 | 0,0566 |
| RMS-Xmax | 0,0951 | 0,0956 | 0,1594 | 0,1581 | 0,1600 | 0,1584 | 0,1585 | 0,1649 | 0,1614 | 0,1570 |
| RMS-Ymax | 0,0403 | 0,0417 | 0,0475 | 0,0472 | 0,0695 | 0,0688 | 0,0688 | 0,0716 | 0,0570 | 0,0543 |
| RMS-Ymax | 0,0403 | 0,0417 | 0,0475 | 0,0472 | 0,0695 | 0,0688 | 0,0688 | 0,0716 | 0,0570 | 0,0543 |
| RMS ges max | 0,1139 | 0,1149 | 0,1996 | 0,1980 | 0,2066 | 0,2045 | 0,2047 | 0,2129 | 0,1810 | 0,1777 |
| Redundanzfakt | 3,0903 | 2,8952 | 2,3739 | 2,1328 | 1,9889 | 1,7363 | 2,0980 | 1,8569 | 1,6405 | 1,5922 |

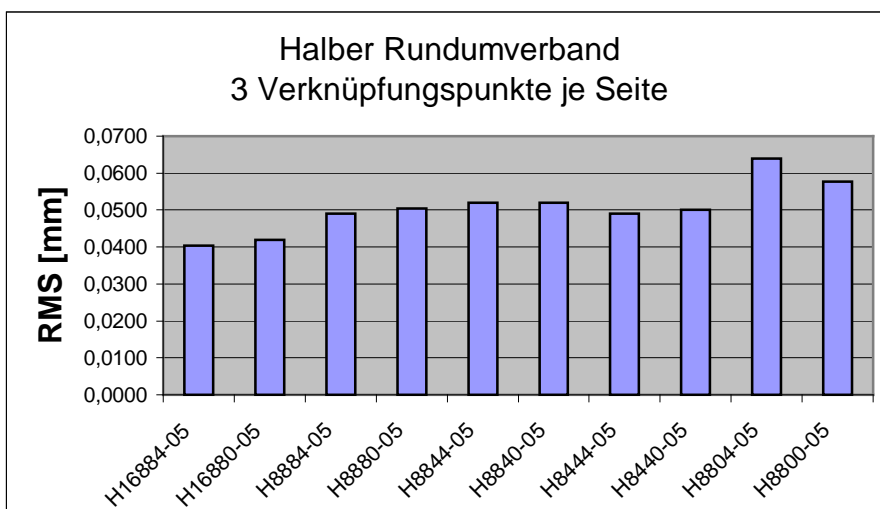
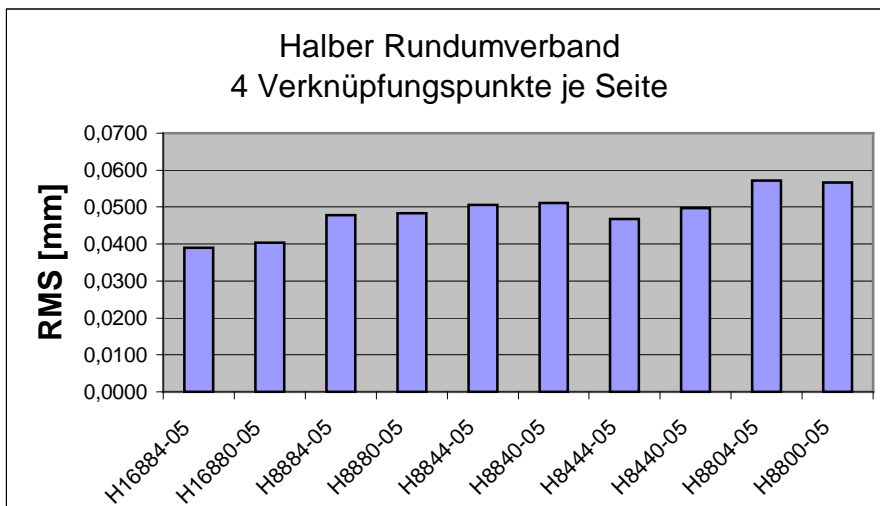
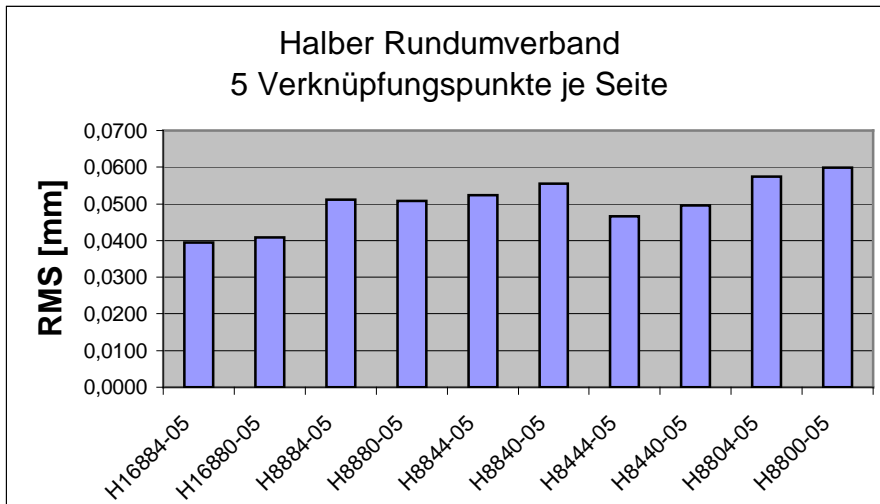
| Halber Rundumverband | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,5µm Bildmessgenauigkeit | | | | | | | | | | |
| 3 Verknüpfungspunkte je Seite | | | | | | | | | | |
| Konfiguration | H16884-05 | H16880-05 | H8884-05 | H8880-05 | H8844-05 | H8840-05 | H8444-05 | H8440-05 | H8804-05 | H8800-05 |
| Punkte | 117 | 117 | 115 | 114 | 114 | 113 | 117 | 116 | 102 | 105 |
| Bilder | 23 | 19 | 18 | 14 | 16 | 12 | 17 | 13 | 14 | 10 |
| Unbekannte | 497 | 473 | 461 | 434 | 446 | 419 | 461 | 434 | 398 | 383 |
| Beobachtungen | 1876 | 1708 | 1448 | 1258 | 1240 | 1078 | 1330 | 1160 | 954 | 944 |
| Redundanz | 1386 | 1242 | 994 | 831 | 801 | 666 | 876 | 733 | 563 | 568 |
| RMS-X | 0,0285 | 0,0294 | 0,0341 | 0,0350 | 0,0359 | 0,0360 | 0,0336 | 0,0345 | 0,0493 | 0,0418 |
| RMS-Y | 0,0217 | 0,0227 | 0,0252 | 0,0262 | 0,0273 | 0,0276 | 0,0259 | 0,0266 | 0,0333 | 0,0316 |
| RMS-Z | 0,0188 | 0,0193 | 0,0245 | 0,0251 | 0,0258 | 0,0254 | 0,0247 | 0,0246 | 0,0232 | 0,0243 |
| RMS ges | 0,0405 | 0,0419 | 0,0490 | 0,0504 | 0,0520 | 0,0520 | 0,0491 | 0,0500 | 0,0639 | 0,0578 |
| RMS-Xmax | 0,0975 | 0,0980 | 0,1624 | 0,1629 | 0,1635 | 0,1620 | 0,1635 | 0,1628 | 0,2192 | 0,1624 |
| RMS-Ymax | 0,0414 | 0,0430 | 0,0487 | 0,0496 | 0,0713 | 0,0701 | 0,0710 | 0,0706 | 0,0961 | 0,0561 |
| RMS-Ymax | 0,0414 | 0,0430 | 0,0487 | 0,0496 | 0,0713 | 0,0701 | 0,0710 | 0,0706 | 0,0961 | 0,0561 |
| RMS ges max | 0,1170 | 0,1181 | 0,2035 | 0,2043 | 0,2113 | 0,2092 | 0,2112 | 0,2102 | 0,2477 | 0,1836 |
| Redundanzfakt | 2,7887 | 2,6258 | 2,1562 | 1,9147 | 1,7960 | 1,5895 | 1,9002 | 1,6889 | 1,4146 | 1,4830 |

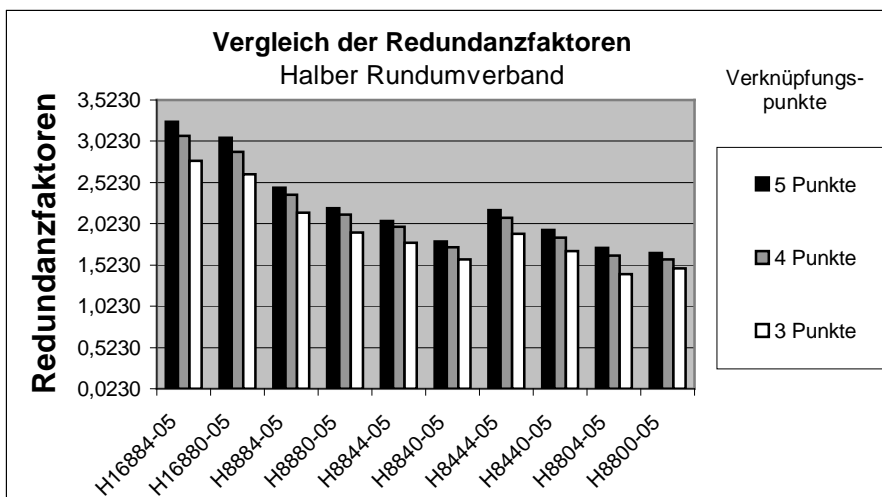
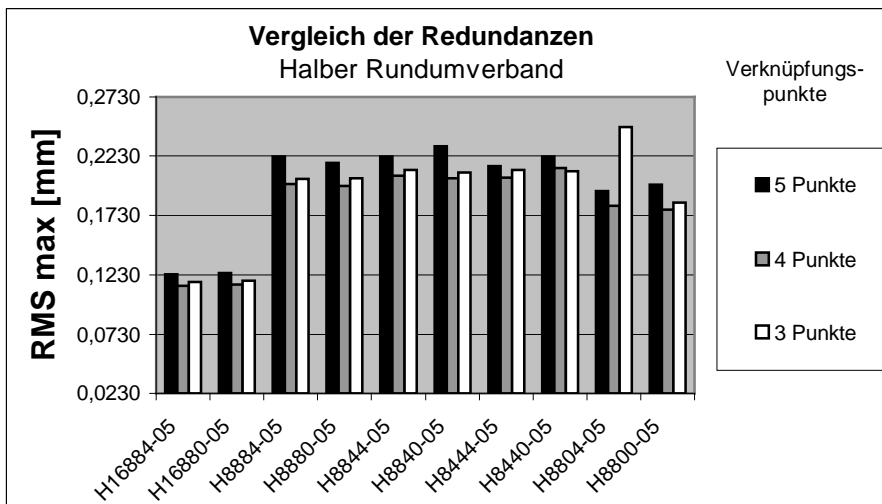
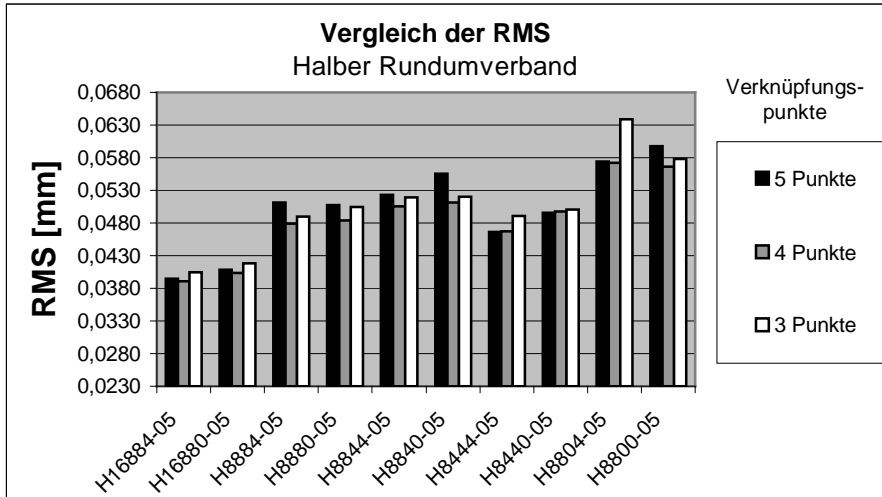
Grafische Zusammenfassung vollständiger Rundumverband:





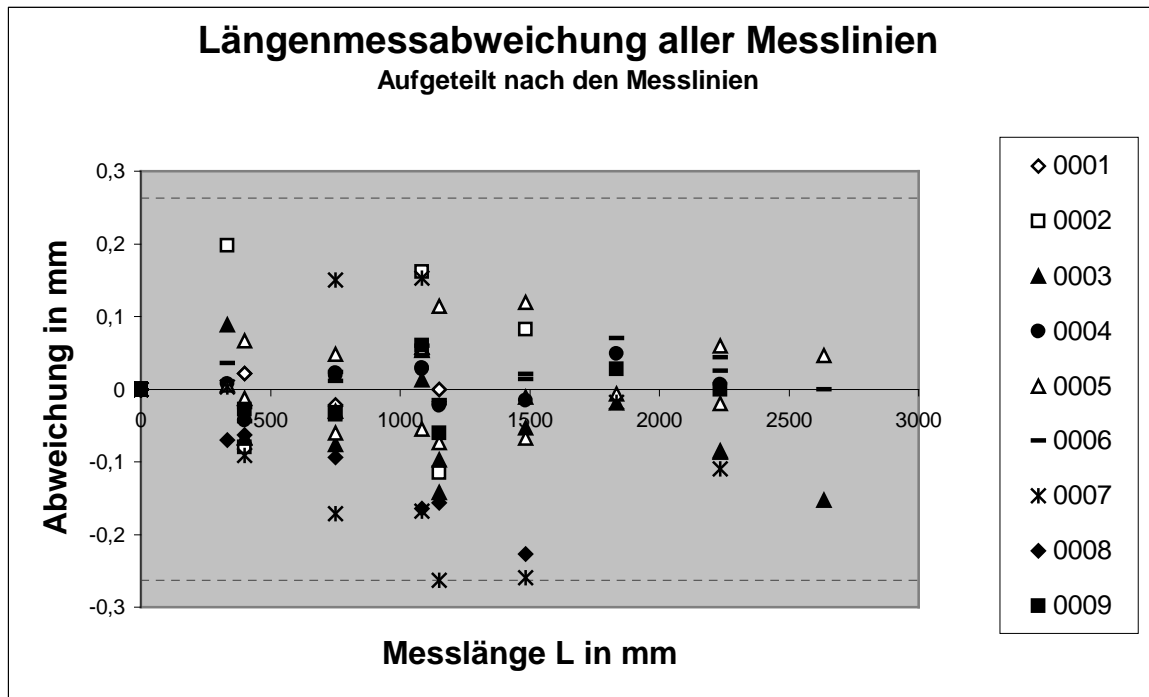
Grafische Zusammenfassung halber Rundumverband:





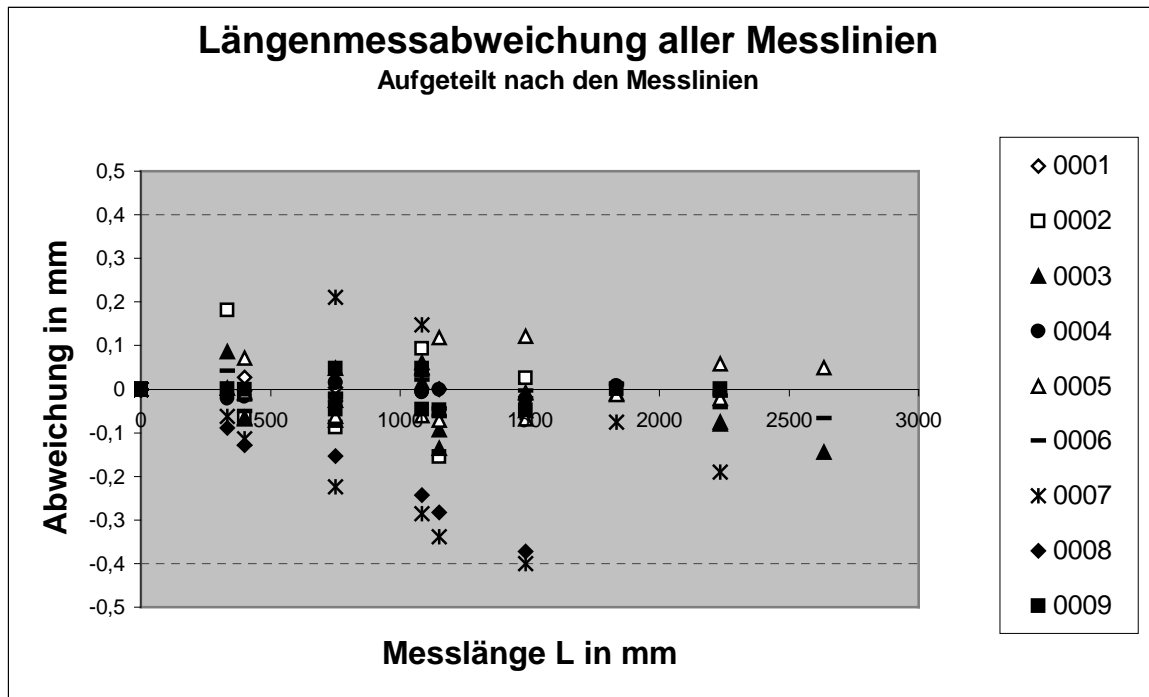
Konfiguration: V16-8-8-4+4

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 1...2 | 0,022 | -0,079 | -0,067 | -0,043 | 0,067 | -0,044 | -0,091 | -0,063 | -0,028 | |
| 1...3 | -0,001 | -0,115 | -0,097 | -0,022 | 0,114 | -0,020 | -0,263 | -0,157 | -0,061 | |
| 1...4 | | 0,083 | -0,011 | -0,015 | 0,120 | 0,014 | -0,259 | -0,227 | | |
| 1...5 | | | -0,087 | 0,007 | 0,059 | 0,025 | -0,110 | | 0,000 | |
| 1...6 | | | -0,153 | | 0,046 | -0,001 | | | | |
| 2...3 | -0,023 | -0,035 | -0,031 | 0,019 | 0,048 | 0,024 | -0,171 | -0,094 | -0,032 | |
| 2...4 | | 0,162 | 0,057 | 0,027 | 0,054 | 0,059 | -0,168 | -0,164 | | |
| 2...5 | | | -0,019 | 0,049 | -0,007 | 0,070 | -0,018 | | 0,028 | |
| 2...6 | | | -0,085 | | -0,020 | 0,044 | | | | |
| 3...4 | | 0,198 | 0,088 | 0,007 | 0,005 | 0,035 | 0,003 | -0,070 | | |
| 3...5 | | | 0,012 | 0,029 | -0,055 | 0,046 | 0,153 | | 0,060 | |
| 3...6 | | | -0,053 | | -0,068 | 0,021 | | | | |
| 4...5 | -0,022 | | -0,076 | 0,022 | -0,061 | 0,011 | 0,150 | | | |
| 4...6 | 0,000 | | -0,142 | | -0,073 | -0,015 | | | | |
| 5...6 | 0,022 | | -0,066 | | -0,012 | -0,025 | | | | |
| | | | | | | | | | | gesamt |
| max. | -0,023 | 0,198 | -0,153 | 0,049 | 0,120 | 0,070 | -0,263 | -0,227 | -0,061 | -0,263 |
| Span. | 0,045 | 0,312 | 0,242 | 0,092 | 0,193 | 0,115 | 0,415 | 0,164 | 0,121 | 0,461 |
| min. | 0,000 | -0,035 | -0,011 | 0,007 | 0,005 | -0,001 | 0,003 | -0,063 | 0,000 | 0,000 |
| [VV] | 0,002 | 0,093 | 0,098 | 0,008 | 0,060 | 0,019 | 0,260 | 0,120 | 0,010 | |
| s _x | 0,020 | 0,136 | 0,084 | 0,029 | 0,065 | 0,037 | 0,170 | 0,155 | 0,045 | 0,087 |



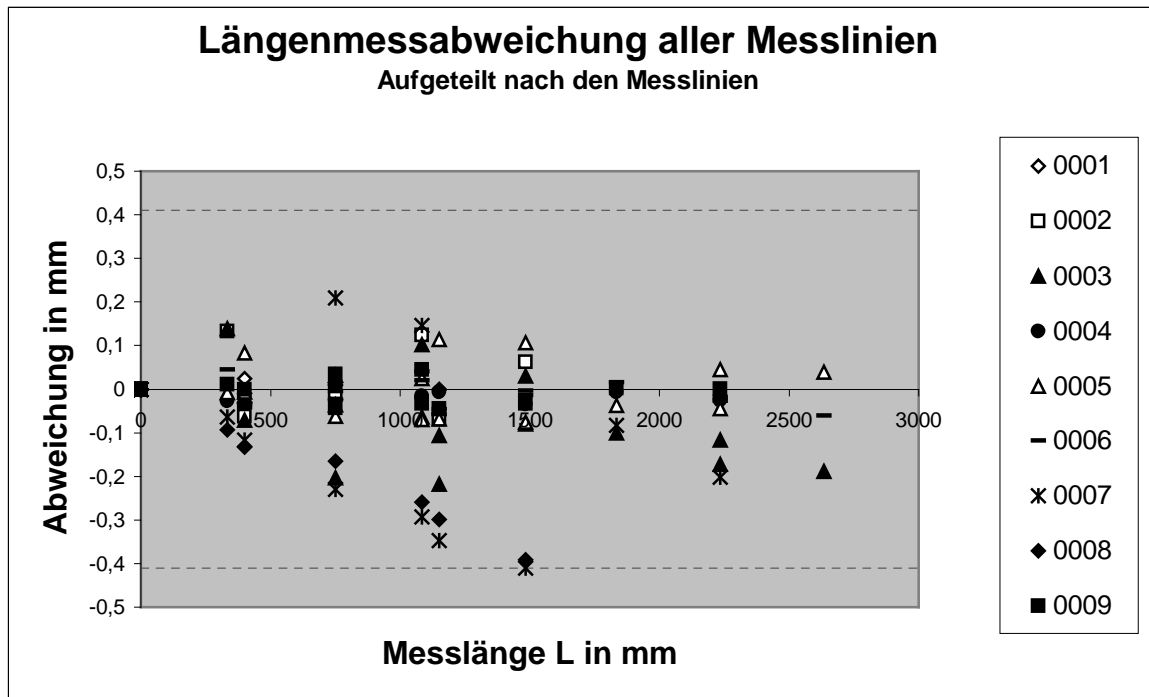
Konfiguration: V8-8-8-4+4

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 1...2 | 0,027 | -0,067 | -0,069 | -0,017 | 0,072 | -0,051 | -0,114 | -0,129 | -0,001 | |
| 1...3 | 0,000 | -0,155 | -0,093 | -0,001 | 0,118 | -0,062 | -0,339 | -0,283 | -0,048 | |
| 1...4 | | 0,026 | -0,009 | -0,023 | 0,120 | -0,022 | -0,401 | -0,372 | -0,047 | |
| 1...5 | | | -0,080 | -0,008 | 0,058 | -0,042 | -0,190 | | 0,000 | |
| 1...6 | | | -0,145 | | 0,050 | -0,066 | | | | |
| 2...3 | -0,027 | -0,087 | -0,025 | 0,014 | 0,047 | -0,011 | -0,224 | -0,154 | -0,046 | |
| 2...4 | | 0,093 | 0,061 | -0,006 | 0,050 | 0,031 | -0,286 | -0,243 | -0,046 | |
| 2...5 | | | -0,010 | 0,008 | -0,013 | 0,011 | -0,076 | | 0,001 | |
| 2...6 | | | -0,075 | | -0,022 | -0,015 | | | | |
| 3...4 | | 0,181 | 0,086 | -0,021 | 0,002 | 0,042 | -0,062 | -0,088 | 0,000 | |
| 3...5 | | | 0,016 | -0,007 | -0,061 | 0,022 | 0,148 | | 0,048 | |
| 3...6 | | | -0,049 | | -0,069 | -0,003 | | | | |
| 4...5 | 0,003 | | -0,071 | 0,015 | -0,063 | -0,020 | 0,211 | | 0,048 | |
| 4...6 | 0,000 | | -0,136 | | -0,071 | -0,046 | | | | |
| 5...6 | -0,003 | | -0,065 | | -0,008 | -0,025 | | | | |
| | | | | | | | | | | gesamt |
| max. | -0,027 | 0,181 | -0,145 | -0,023 | 0,120 | -0,066 | -0,401 | -0,372 | 0,048 | -0,401 |
| Span. | 0,054 | 0,336 | 0,232 | 0,038 | 0,192 | 0,108 | 0,611 | 0,284 | 0,095 | 0,611 |
| min. | 0,000 | 0,026 | -0,009 | -0,001 | 0,002 | -0,003 | -0,062 | -0,088 | 0,000 | 0,000 |
| [VV] | 0,001 | 0,078 | 0,089 | 0,002 | 0,062 | 0,020 | 0,532 | 0,326 | 0,013 | |
| s _x | 0,017 | 0,125 | 0,080 | 0,015 | 0,067 | 0,038 | 0,243 | 0,255 | 0,038 | 0,111 |



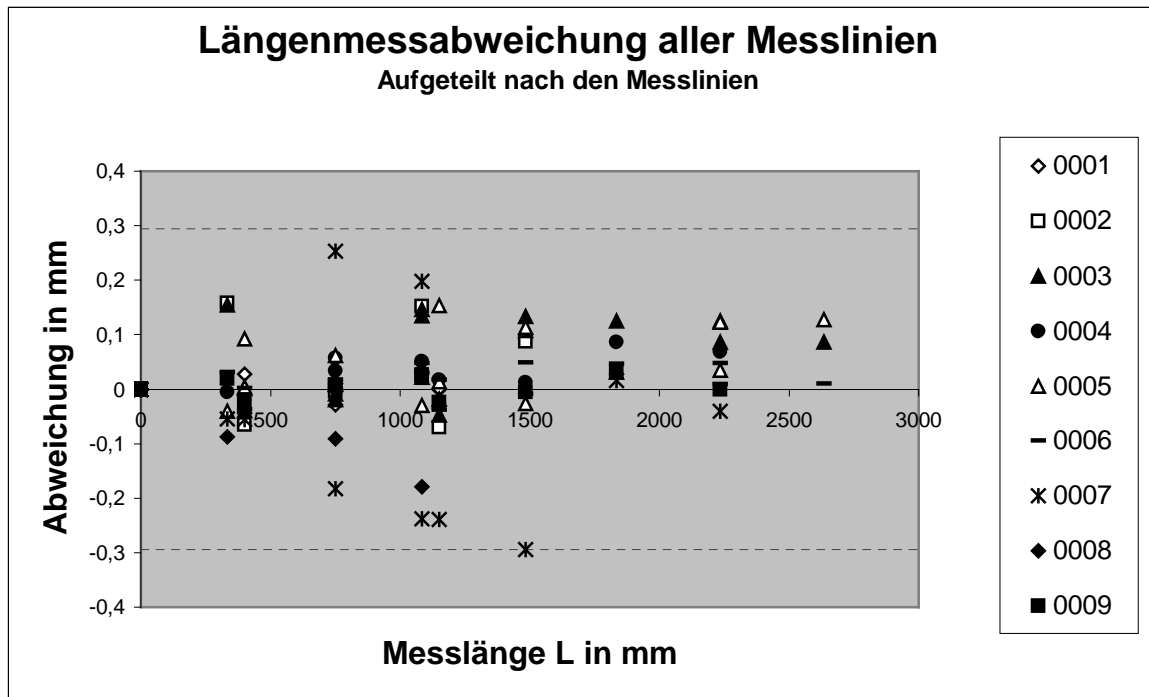
Konfiguration: V8-8-4-4+4

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 1...2 | 0,024 | -0,062 | -0,071 | -0,019 | 0,083 | -0,041 | -0,117 | -0,132 | -0,001 | |
| 1...3 | 0,000 | -0,070 | -0,106 | -0,006 | 0,114 | -0,046 | -0,348 | -0,298 | -0,045 | |
| 1...4 | | 0,063 | 0,030 | -0,034 | 0,106 | -0,003 | -0,411 | -0,392 | -0,034 | |
| 1...5 | | | -0,173 | -0,026 | 0,045 | -0,027 | -0,201 | | 0,001 | |
| 1...6 | | | -0,189 | | 0,038 | -0,061 | | | | |
| 2...3 | -0,025 | -0,007 | -0,036 | 0,012 | 0,031 | -0,005 | -0,229 | -0,166 | -0,043 | |
| 2...4 | | 0,125 | 0,102 | -0,015 | 0,024 | 0,040 | -0,293 | -0,260 | -0,032 | |
| 2...5 | | | -0,101 | -0,007 | -0,038 | 0,016 | -0,084 | | 0,002 | |
| 2...6 | | | -0,117 | | -0,044 | -0,019 | | | | |
| 3...4 | | 0,133 | 0,138 | -0,028 | -0,008 | 0,044 | -0,064 | -0,093 | 0,011 | |
| 3...5 | | | -0,065 | -0,019 | -0,069 | 0,020 | 0,145 | | 0,045 | |
| 3...6 | | | -0,080 | | -0,076 | -0,014 | | | | |
| 4...5 | 0,009 | | -0,203 | 0,009 | -0,062 | -0,024 | 0,210 | | 0,035 | |
| 4...6 | 0,000 | | -0,218 | | -0,068 | -0,058 | | | | |
| 5...6 | -0,009 | | -0,016 | | -0,006 | -0,034 | | | | |
| | | | | | | | | | | gesamt |
| max. | -0,025 | 0,133 | -0,218 | -0,034 | 0,114 | -0,061 | -0,411 | -0,392 | 0,045 | -0,411 |
| Span. | 0,048 | 0,203 | 0,357 | 0,046 | 0,189 | 0,105 | 0,621 | 0,299 | 0,090 | 0,621 |
| min. | 0,000 | -0,007 | -0,016 | -0,006 | -0,006 | -0,003 | -0,064 | -0,093 | 0,001 | 0,000 |
| [VV] | 0,001 | 0,046 | 0,237 | 0,004 | 0,059 | 0,018 | 0,559 | 0,364 | 0,009 | |
| s _x | 0,016 | 0,096 | 0,130 | 0,021 | 0,065 | 0,036 | 0,249 | 0,270 | 0,032 | 0,119 |



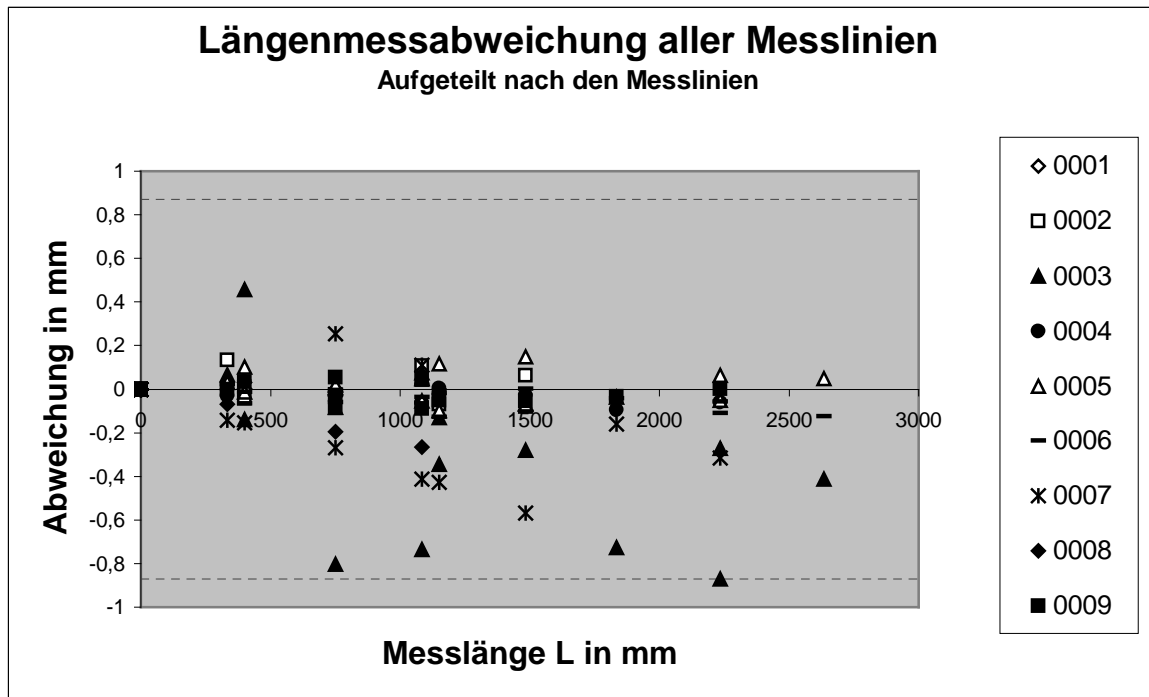
Konfiguration: V8-4-4-4+4

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 1...2 | 0,028 | -0,065 | 0,000 | -0,018 | 0,092 | -0,037 | -0,056 | | -0,032 | |
| 1...3 | -0,001 | -0,070 | -0,019 | 0,017 | 0,153 | -0,038 | -0,239 | | -0,024 | |
| 1...4 | | 0,087 | 0,134 | 0,013 | 0,113 | -0,008 | -0,294 | | -0,005 | |
| 1...5 | | | 0,125 | 0,069 | 0,123 | 0,009 | -0,041 | | 0,000 | |
| 1...6 | | | 0,086 | | 0,127 | 0,010 | | | | |
| 2...3 | -0,029 | -0,005 | -0,020 | 0,034 | 0,062 | -0,002 | -0,182 | -0,091 | 0,008 | |
| 2...4 | | 0,152 | 0,135 | 0,030 | 0,022 | 0,030 | -0,237 | -0,179 | 0,027 | |
| 2...5 | | | 0,126 | 0,086 | 0,031 | 0,047 | 0,016 | | 0,031 | |
| 2...6 | | | 0,087 | | 0,035 | 0,047 | | | | |
| 3...4 | | 0,158 | 0,155 | -0,005 | -0,040 | 0,031 | -0,055 | -0,087 | 0,019 | |
| 3...5 | | | 0,146 | 0,052 | -0,030 | 0,048 | 0,198 | | 0,024 | |
| 3...6 | | | 0,107 | | -0,026 | 0,049 | | | | |
| 4...5 | 0,010 | | -0,009 | 0,057 | 0,009 | 0,017 | 0,253 | | 0,005 | |
| 4...6 | 0,001 | | -0,048 | | 0,013 | 0,018 | | | | |
| 5...6 | -0,009 | | -0,039 | | 0,005 | 0,002 | | | | |
| | | | | | | | | | | gesamt |
| max. | -0,029 | 0,158 | 0,155 | 0,086 | 0,153 | 0,049 | -0,294 | -0,179 | -0,032 | -0,294 |
| Span. | 0,057 | 0,227 | 0,202 | 0,104 | 0,193 | 0,087 | 0,547 | 0,092 | 0,063 | 0,547 |
| min. | 0,001 | -0,005 | 0,000 | -0,005 | 0,005 | 0,002 | 0,016 | -0,087 | 0,000 | 0,000 |
| [VV] | 0,002 | 0,065 | 0,144 | 0,021 | 0,086 | 0,015 | 0,345 | 0,048 | 0,004 | |
| s _x | 0,019 | 0,114 | 0,101 | 0,048 | 0,078 | 0,032 | 0,196 | 0,155 | 0,022 | 0,090 |



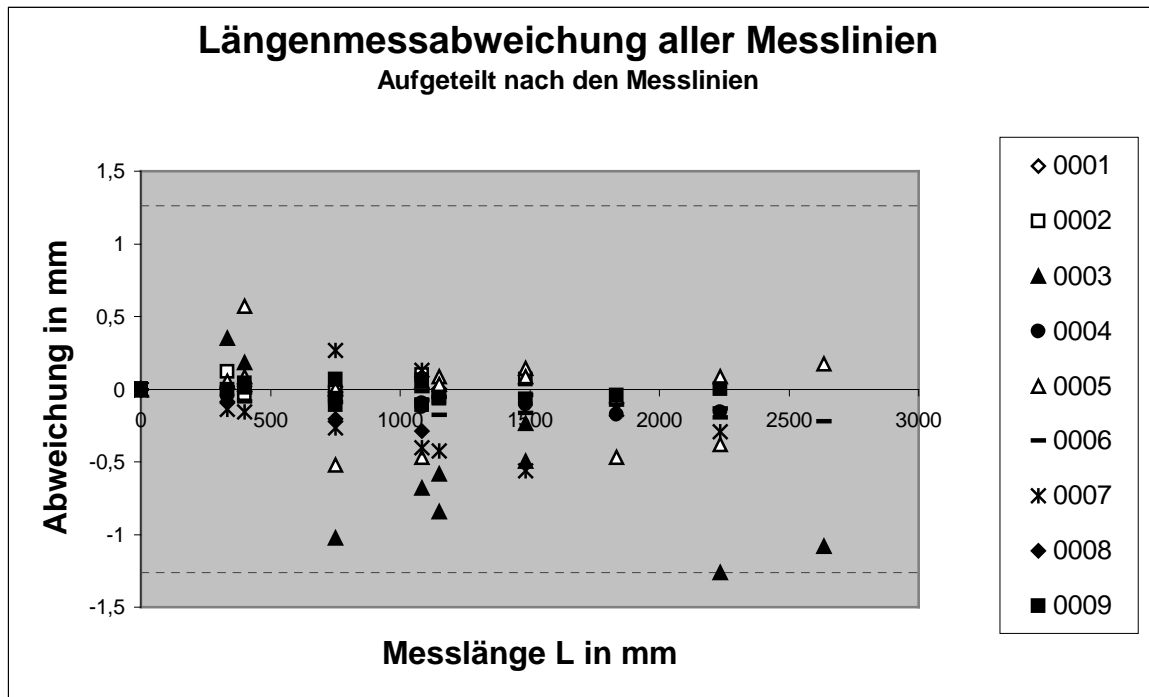
Konfiguration: V8-8-0-4+4

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 1...2 | 0,030 | -0,044 | -0,140 | 0,034 | 0,100 | -0,014 | -0,156 | | 0,034 | |
| 1...3 | 0,000 | -0,068 | -0,131 | 0,004 | 0,117 | -0,019 | -0,426 | | -0,053 | |
| 1...4 | | 0,064 | -0,067 | -0,028 | 0,147 | 0,002 | -0,568 | | -0,055 | |
| 1...5 | | | -0,870 | -0,060 | 0,063 | -0,057 | -0,315 | | 0,000 | |
| 1...6 | | | -0,414 | | 0,049 | -0,123 | | | | |
| 2...3 | -0,031 | -0,024 | 0,008 | -0,031 | 0,018 | -0,006 | -0,270 | -0,194 | -0,087 | |
| 2...4 | | 0,108 | 0,074 | -0,062 | 0,048 | 0,018 | -0,412 | -0,264 | -0,089 | |
| 2...5 | | | -0,728 | -0,094 | -0,037 | -0,042 | -0,159 | | -0,034 | |
| 2...6 | | | -0,272 | | -0,051 | -0,109 | | | | |
| 3...4 | | 0,133 | 0,066 | -0,032 | 0,030 | 0,023 | -0,143 | -0,069 | -0,002 | |
| 3...5 | | | -0,736 | -0,063 | -0,055 | -0,037 | 0,110 | | 0,053 | |
| 3...6 | | | -0,280 | | -0,069 | -0,103 | | | | |
| 4...5 | -0,001 | | -0,802 | -0,031 | -0,085 | -0,060 | 0,254 | | 0,055 | |
| 4...6 | 0,000 | | -0,346 | | -0,098 | -0,127 | | | | |
| 5...6 | 0,001 | | 0,458 | | -0,013 | -0,066 | | | | |
| | | | | | | | | | | gesamt |
| max. | -0,031 | 0,133 | -0,870 | -0,094 | 0,147 | -0,127 | -0,568 | -0,264 | -0,089 | -0,870 |
| Span. | 0,061 | 0,201 | 1,328 | 0,128 | 0,245 | 0,150 | 0,822 | 0,195 | 0,144 | 1,328 |
| min. | 0,000 | -0,024 | 0,008 | 0,004 | -0,013 | 0,002 | 0,110 | -0,069 | 0,000 | 0,000 |
| [VV] | 0,002 | 0,040 | 3,177 | 0,025 | 0,084 | 0,070 | 0,993 | 0,112 | 0,029 | |
| s _x | 0,019 | 0,090 | 0,476 | 0,053 | 0,077 | 0,071 | 0,332 | 0,237 | 0,057 | 0,226 |



Konfiguration: V8-8-0-0+4

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 1...2 | 0,019 | -0,034 | | 0,017 | 0,088 | -0,025 | -0,157 | | 0,044 | |
| 1...3 | 0,000 | -0,055 | -0,582 | -0,058 | 0,088 | -0,054 | -0,426 | | -0,064 | |
| 1...4 | | 0,067 | -0,237 | -0,104 | 0,142 | -0,044 | -0,563 | | -0,066 | |
| 1...5 | | | -1,264 | -0,155 | -0,381 | -0,134 | -0,295 | | 0,000 | |
| 1...6 | | | -1,080 | | 0,175 | -0,220 | | | | |
| 2...3 | -0,020 | -0,021 | | -0,076 | 0,000 | -0,030 | -0,268 | -0,203 | -0,107 | |
| 2...4 | | 0,100 | | -0,121 | 0,055 | -0,017 | -0,405 | -0,288 | -0,110 | |
| 2...5 | | | | -0,172 | -0,468 | -0,108 | -0,138 | | -0,044 | |
| 2...6 | | | | | 0,087 | -0,195 | | | | |
| 3...4 | | 0,122 | 0,350 | -0,046 | 0,055 | 0,012 | -0,137 | -0,084 | -0,003 | |
| 3...5 | | | -0,680 | -0,097 | -0,467 | -0,079 | 0,130 | | 0,064 | |
| 3...6 | | | -0,495 | | 0,087 | -0,165 | | | | |
| 4...5 | 0,014 | | -1,026 | -0,050 | -0,523 | -0,091 | 0,268 | | 0,067 | |
| 4...6 | 0,001 | | -0,842 | | 0,033 | -0,178 | | | | |
| 5...6 | -0,013 | | 0,185 | | 0,571 | -0,086 | | | | |
| | | | | | | | | | | gesamt |
| max. | -0,020 | 0,122 | -1,264 | -0,172 | 0,571 | -0,220 | -0,563 | -0,288 | -0,110 | -1,264 |
| Span. | 0,039 | 0,178 | 1,613 | 0,189 | 1,094 | 0,232 | 0,831 | 0,204 | 0,177 | 1,835 |
| min. | 0,000 | -0,021 | 0,185 | 0,017 | 0,000 | 0,012 | 0,130 | -0,084 | 0,000 | 0,000 |
| [VV] | 0,001 | 0,034 | 5,783 | 0,102 | 1,271 | 0,204 | 0,973 | 0,132 | 0,044 | |
| s _x | 0,015 | 0,083 | 0,802 | 0,107 | 0,301 | 0,121 | 0,329 | 0,256 | 0,070 | 0,319 |



Messprotokoll: DCS 460 (Nr.5114) 24mm (Nr.207820)

Protokoll der Längenmessabweichung

| | |
|-------------------|--------------|
| Verband: | V-16-8-8-4-4 |
| Kaliberaufnahmen: | 3-4 |

| | |
|-------------|----------|
| Datum: | 28.07.00 |
| Beobachter: | Böhm |

| | |
|-----------|--------------|
| Kamera: | DCS460_K5114 |
| Objektiv: | 24mm207820 |
| Software: | TriTop |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|---------|---------|
| Punkt 1 | Punkt 2 | Gewicht |
| 101 | 103 | unified |
| 104 | 106 | unified |
| 901 | 905 | unified |

Ergebnisse der Ausgleichung

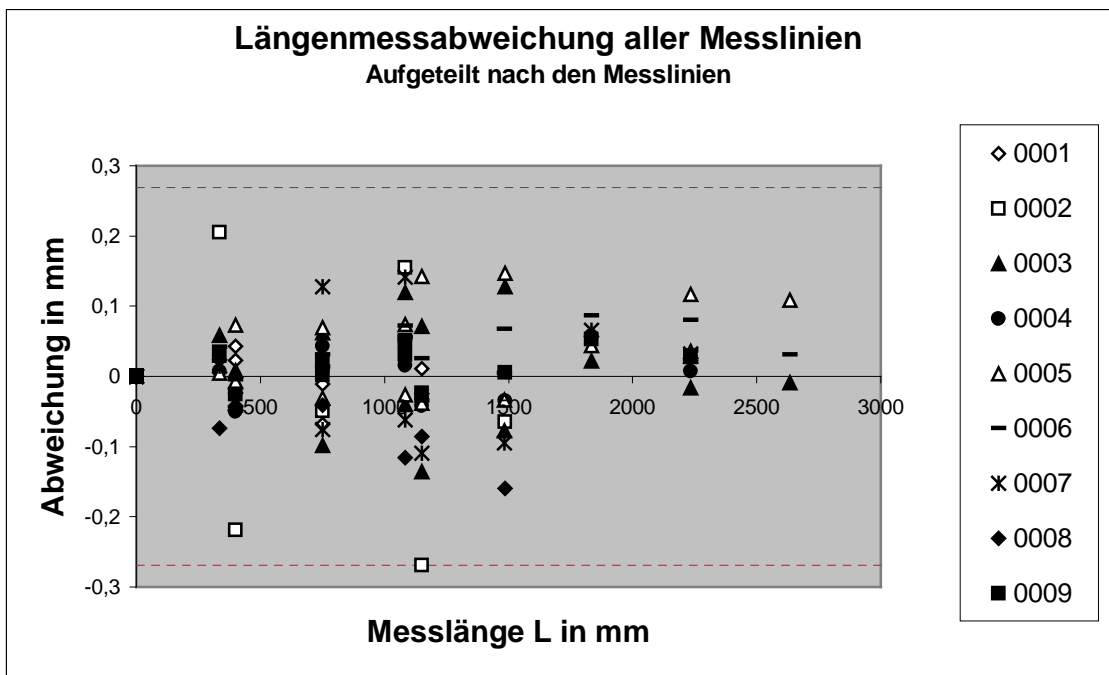
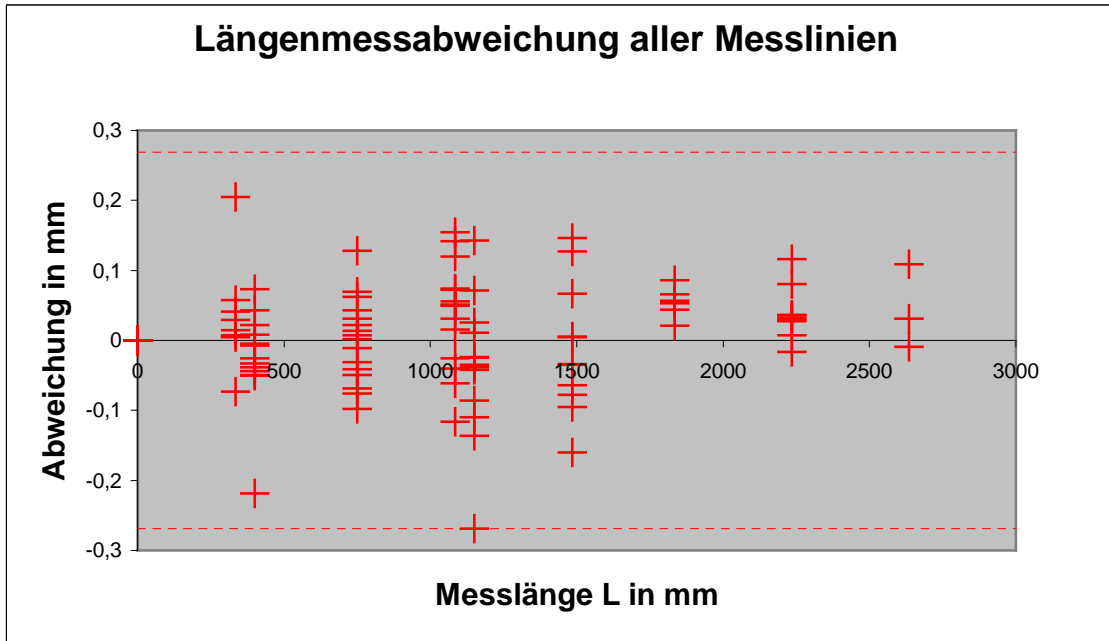
| | |
|---------------------|------|
| Bilder: | 56 |
| Objektpunkte: | 223 |
| Beobachtungen: | 5750 |
| Unbekannte: | 1015 |
| zus. Beobachtungen: | 9 |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|--------|----|
| X: | 0,0391 | mm |
| Y: | 0,0376 | mm |
| Z: | 0,0368 | mm |
| S: | 0,0669 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 1,136 | mm |
| Y: | 0,873 | mm |
| Z: | 0,868 | mm |
| S: | 1,675 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 1...2 | 0,043 | -0,219 | 0,009 | -0,050 | 0,073 | -0,049 | -0,033 | -0,044 | -0,025 | |
| 1...3 | -0,025 | -0,269 | 0,071 | -0,042 | 0,142 | -0,035 | -0,110 | -0,086 | -0,024 | |
| 1...4 | | -0,064 | 0,127 | -0,035 | 0,147 | 0,005 | -0,095 | -0,160 | 0,006 | |
| 1...5 | | | 0,029 | 0,007 | 0,117 | 0,036 | 0,032 | | 0,027 | |
| 1...6 | | | -0,009 | | 0,109 | 0,031 | | | | |
| 2...3 | -0,069 | -0,049 | 0,062 | 0,007 | 0,070 | 0,014 | -0,076 | -0,041 | 0,002 | |
| 2...4 | | 0,155 | 0,120 | 0,015 | 0,074 | 0,055 | -0,062 | -0,116 | 0,031 | |
| 2...5 | | | 0,021 | 0,057 | 0,044 | 0,086 | 0,066 | | 0,053 | |
| 2...6 | | | -0,016 | | 0,036 | 0,081 | | | | |
| 3...4 | | 0,205 | 0,058 | 0,007 | 0,004 | 0,042 | 0,014 | -0,074 | 0,029 | |
| 3...5 | | | -0,040 | 0,050 | -0,026 | 0,072 | 0,141 | | 0,051 | |
| 3...6 | | | -0,078 | | -0,034 | 0,067 | | | | |
| 4...5 | -0,011 | | -0,098 | 0,043 | -0,031 | 0,031 | 0,128 | | 0,022 | |
| 4...6 | 0,011 | | -0,136 | | -0,038 | 0,025 | | | | |
| 5...6 | 0,022 | | -0,038 | | -0,007 | -0,005 | | | | |
| | | | | | | | | | | gesamt |
| max. | -0,069 | -0,269 | -0,136 | 0,057 | 0,147 | 0,086 | 0,141 | -0,160 | 0,053 | -0,269 |
| Span. | 0,112 | 0,473 | 0,263 | 0,107 | 0,185 | 0,135 | 0,251 | 0,119 | 0,078 | 0,473 |
| mittel | -0,005 | -0,040 | 0,006 | 0,006 | 0,045 | 0,030 | 0,001 | -0,087 | 0,017 | -0,003 |
| mAbs | 0,030 | 0,160 | 0,061 | 0,031 | 0,063 | 0,042 | 0,076 | 0,087 | 0,027 | 0,064 |
| [VV] | 0,008 | 0,193 | 0,082 | 0,013 | 0,090 | 0,036 | 0,074 | 0,055 | 0,010 | |
| RMS | 0,000 | 0,179 | 0,074 | 0,037 | 0,078 | 0,049 | 0,086 | 0,096 | 0,031 | 0,078 |



Messprotokoll: DCS 460 (Nr.5114) 20mm (Nr. 252908)

Protokoll der Längenmessabweichung

| | |
|-----------------|--------------|
| Verband: | V-16-8-8-4-4 |
| Kalibrierungen: | 3-4 |

| | |
|-------------|----------|
| Datum: | 28.07.00 |
| Beobachter: | Ringel |

| | |
|-----------|--------------|
| Kamera: | DCS460_K5114 |
| Objektiv: | 20mm252908 |
| Software: | TriTop |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|---------|---------|
| Punkt 1 | Punkt 2 | Gewicht |
| 101 | 103 | unified |
| 104 | 106 | unified |
| 901 | 905 | unified |

Ergebnisse der Ausgleichung

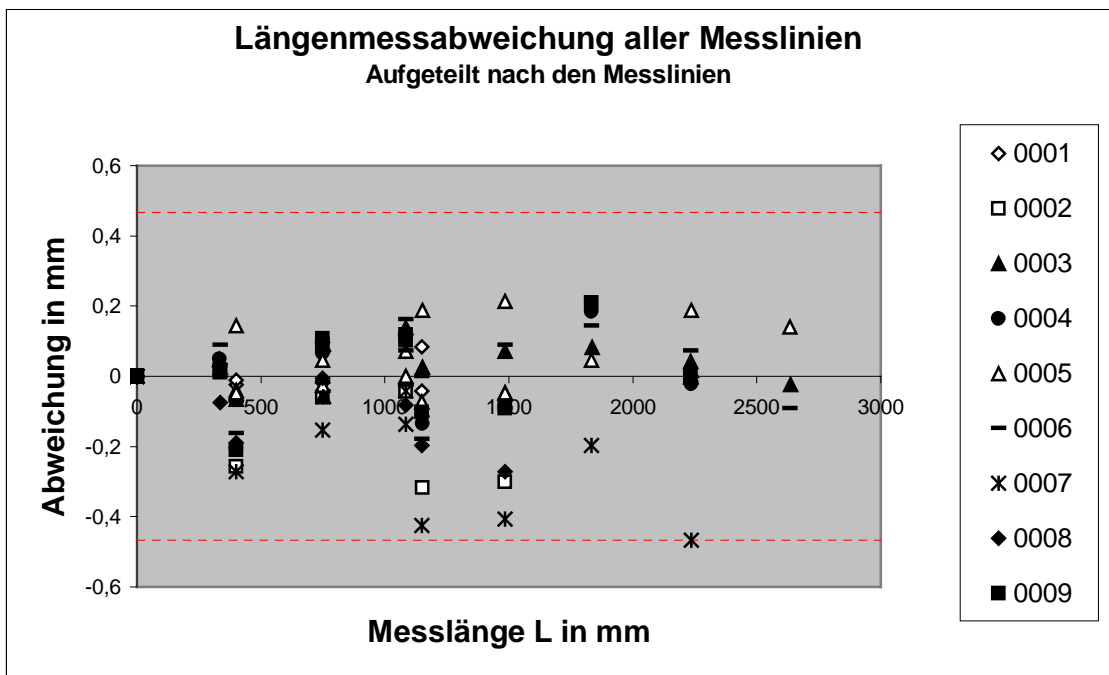
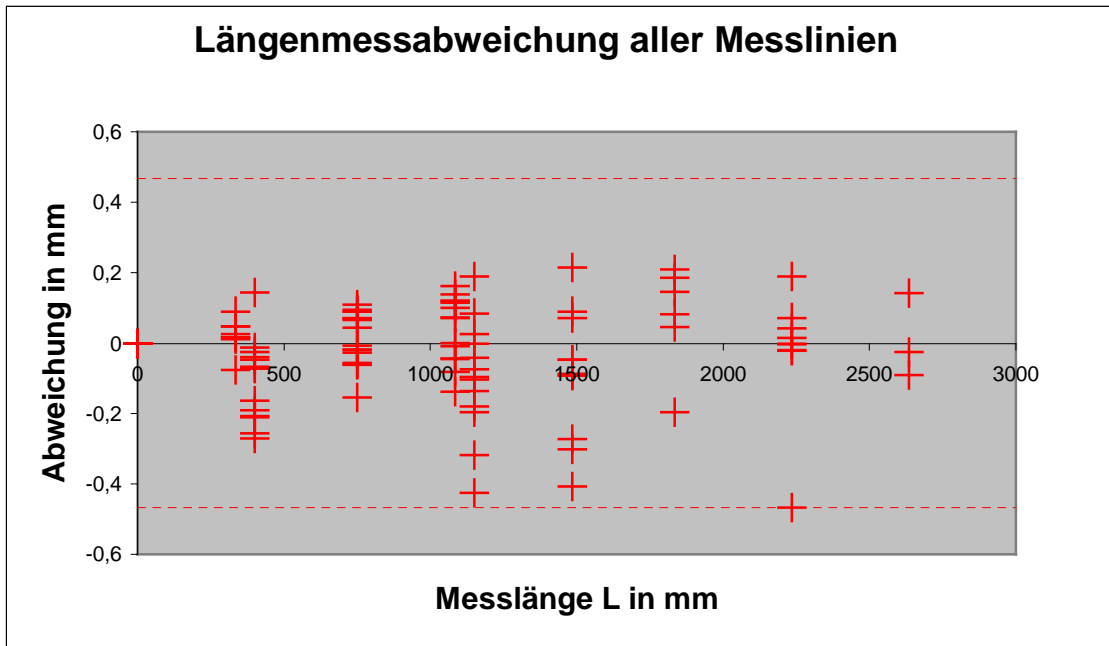
| | |
|---------------------|------|
| Bilder: | 54 |
| Objektpunkte: | 224 |
| Beobachtungen: | 5532 |
| Unbekannte: | 1006 |
| zus. Beobachtungen: | 9 |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,042 | mm |
| Y: | 0,040 | mm |
| Z: | 0,040 | mm |
| S: | 0,073 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,361 | mm |
| Y: | 0,301 | mm |
| Z: | 0,346 | mm |
| S: | 0,472 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 1...2 | -0,024 | -0,257 | -0,066 | -0,206 | 0,144 | -0,162 | -0,271 | -0,190 | -0,210 | |
| 1...3 | -0,042 | -0,317 | 0,026 | -0,136 | 0,188 | -0,179 | -0,425 | -0,196 | -0,103 | |
| 1...4 | | -0,301 | 0,072 | -0,087 | 0,214 | -0,091 | -0,407 | -0,272 | -0,091 | |
| 1...5 | | | 0,016 | -0,021 | 0,189 | -0,018 | -0,467 | | -0,001 | |
| 1...6 | | | -0,024 | | 0,141 | -0,090 | | | | |
| 2...3 | -0,019 | -0,060 | 0,090 | 0,070 | 0,045 | -0,017 | -0,154 | -0,005 | 0,108 | |
| 2...4 | | -0,045 | 0,138 | 0,119 | 0,071 | 0,073 | -0,137 | -0,082 | 0,118 | |
| 2...5 | | | 0,082 | 0,184 | 0,046 | 0,145 | -0,196 | | 0,209 | |
| 2...6 | | | 0,043 | | -0,002 | 0,072 | | | | |
| 3...4 | | 0,018 | 0,048 | 0,048 | 0,026 | 0,090 | 0,017 | -0,075 | 0,011 | |
| 3...5 | | | -0,008 | 0,114 | 0,000 | 0,162 | -0,043 | | 0,102 | |
| 3...6 | | | -0,047 | | -0,047 | 0,090 | | | | |
| 4...5 | 0,096 | | -0,056 | 0,066 | -0,026 | 0,072 | -0,059 | | 0,091 | |
| 4...6 | 0,084 | | -0,095 | | -0,073 | -0,001 | | | | |
| 5...6 | -0,012 | | -0,040 | | -0,047 | -0,072 | | | | |
| | | | | | | | | | | gesamt |
| max. | 0,096 | -0,317 | 0,138 | -0,206 | 0,214 | -0,179 | -0,467 | -0,272 | -0,210 | -0,467 |
| Span. | 0,138 | 0,334 | 0,234 | 0,390 | 0,287 | 0,341 | 0,484 | 0,267 | 0,419 | 0,681 |
| mittel | 0,014 | -0,160 | 0,012 | 0,015 | 0,058 | 0,005 | -0,214 | -0,137 | 0,023 | -0,043 |
| mAbs | 0,046 | 0,166 | 0,057 | 0,105 | 0,084 | 0,089 | 0,218 | 0,137 | 0,104 | 0,112 |
| [VV] | 0,019 | 0,263 | 0,065 | 0,142 | 0,178 | 0,159 | 0,725 | 0,161 | 0,151 | |
| RMS | 0,000 | 0,209 | 0,066 | 0,119 | 0,109 | 0,103 | 0,269 | 0,164 | 0,123 | 0,142 |



Messprotokoll: DCS 460 (Nr.5185) 24mm (Nr. 239664)

Protokoll der Längenmessabweichung

| | |
|---------------------|--------------|
| Verband: | V-16-8-8-4-4 |
| Kalibrieraufnahmen: | 3-4 |

| | |
|-------------|----------|
| Datum: | 28.07.00 |
| Beobachter: | Böhm |

| | |
|-----------|--------------|
| Kamera: | DCS460_K5185 |
| Objektiv: | 24mm239664 |
| Software: | TriTop |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|---------|---------|
| Punkt 1 | Punkt 2 | Gewicht |
| 101 | 103 | unified |
| 104 | 106 | unified |
| 901 | 905 | unified |

Ergebnisse der Ausgleichung

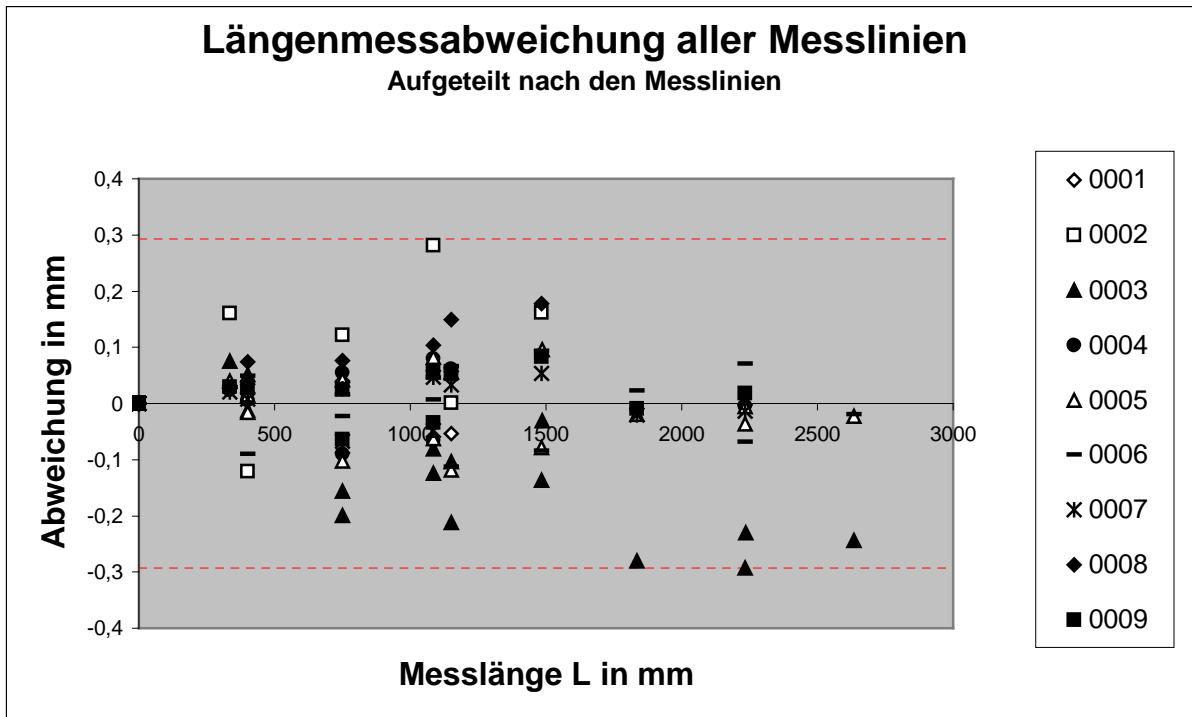
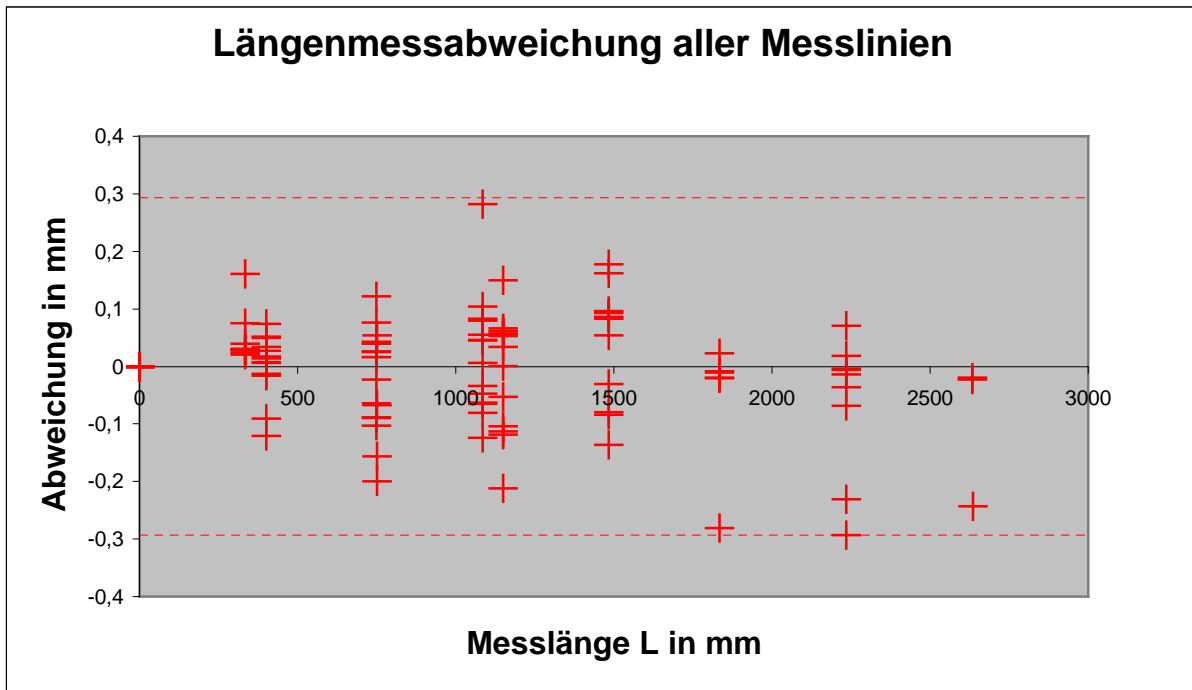
| | |
|---------------------|------|
| Bilder: | 55 |
| Objektpunkte: | 304 |
| Beobachtungen: | 7054 |
| Unbekannte: | 1252 |
| zus. Beobachtungen: | 9 |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|--------|----|
| X: | 0,026 | mm |
| Y: | 0,0247 | mm |
| Z: | 0,0254 | mm |
| S: | 0,0452 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,188 | mm |
| Y: | 0,128 | mm |
| Z: | 0,153 | mm |
| S: | 0,231 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|---------------|
| 1...2 | 0,034 | -0,120 | 0,051 | 0,006 | 0,014 | 0,049 | 0,008 | 0,074 | 0,027 | |
| 1...3 | -0,053 | 0,001 | -0,104 | 0,061 | 0,056 | 0,066 | 0,033 | 0,150 | 0,053 | |
| 1...4 | | 0,161 | -0,031 | 0,086 | 0,096 | 0,093 | 0,054 | 0,178 | 0,083 | |
| 1...5 | | | -0,231 | -0,004 | -0,006 | 0,071 | -0,014 | | 0,019 | |
| 1...6 | | | -0,243 | | -0,023 | -0,019 | | | | |
| 2...3 | -0,088 | 0,121 | -0,156 | 0,054 | 0,043 | 0,016 | 0,026 | 0,076 | 0,025 | |
| 2...4 | | 0,282 | -0,081 | 0,080 | 0,083 | 0,045 | 0,047 | 0,104 | 0,056 | |
| 2...5 | | | -0,281 | -0,011 | -0,020 | 0,023 | -0,021 | | -0,009 | |
| 2...6 | | | -0,293 | | -0,036 | -0,068 | | | | |
| 3...4 | | 0,161 | 0,075 | 0,024 | 0,040 | 0,029 | 0,020 | 0,029 | 0,030 | |
| 3...5 | | | -0,125 | -0,066 | -0,063 | 0,006 | -0,048 | | -0,034 | |
| 3...6 | | | -0,137 | | -0,079 | -0,084 | | | | |
| 4...5 | 0,040 | | -0,200 | -0,090 | -0,103 | -0,022 | -0,067 | | -0,064 | |
| 4...6 | 0,057 | | -0,212 | | -0,119 | -0,113 | | | | |
| 5...6 | 0,017 | | -0,012 | | -0,016 | -0,090 | | | | |
| | | | | | | | | | | gesamt |
| max. | -0,088 | 0,282 | -0,293 | -0,090 | -0,119 | -0,113 | -0,067 | 0,178 | 0,083 | -0,293 |
| Span. | 0,145 | 0,402 | 0,368 | 0,176 | 0,215 | 0,206 | 0,121 | 0,149 | 0,147 | 0,575 |
| mittel | 0,001 | 0,101 | -0,132 | 0,014 | -0,009 | 0,000 | 0,004 | 0,102 | 0,019 | 0,011 |
| mAbs | 0,048 | 0,141 | 0,149 | 0,048 | 0,053 | 0,053 | 0,034 | 0,102 | 0,040 | 0,074 |
| [VV] | 0,017 | 0,161 | 0,447 | 0,034 | 0,060 | 0,058 | 0,015 | 0,077 | 0,021 | |
| RMS | 0,000 | 0,164 | 0,173 | 0,058 | 0,063 | 0,062 | 0,039 | 0,113 | 0,046 | 0,098 |



Messprotokoll: DCS 460 (Nr.5185) 20mm (Nr. 252908)

Protokoll der Längenmessabweichung

| | |
|---------------------|--------------|
| Verband: | V-16-8-8-4-4 |
| Kalibrieraufnahmen: | 3-4 |

| | |
|-------------|------------|
| Datum: | 28.07.00 |
| Beobachter: | Rautenberg |

| | |
|-----------|--------------|
| Kamera: | DCS460_K5185 |
| Objektiv: | 20mm252908 |
| Software: | TriTop |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|---------|---------|
| Punkt 1 | Punkt 2 | Gewicht |
| 101 | 103 | unified |
| 104 | 106 | unified |
| 901 | 905 | unified |

Ergebnisse der Ausgleichung

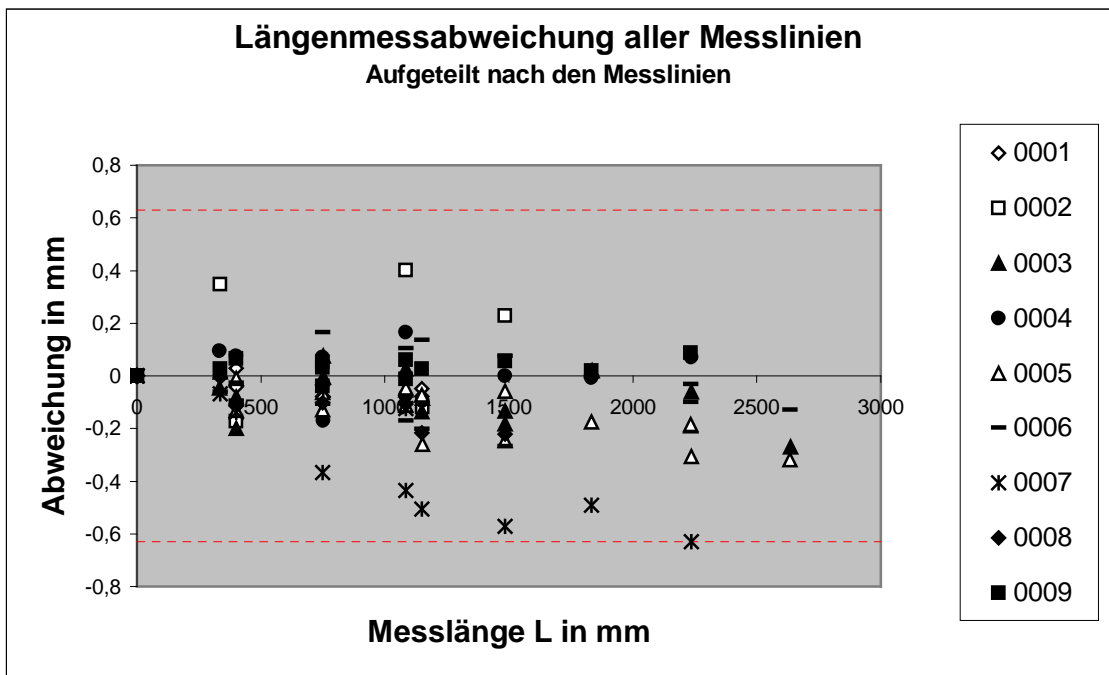
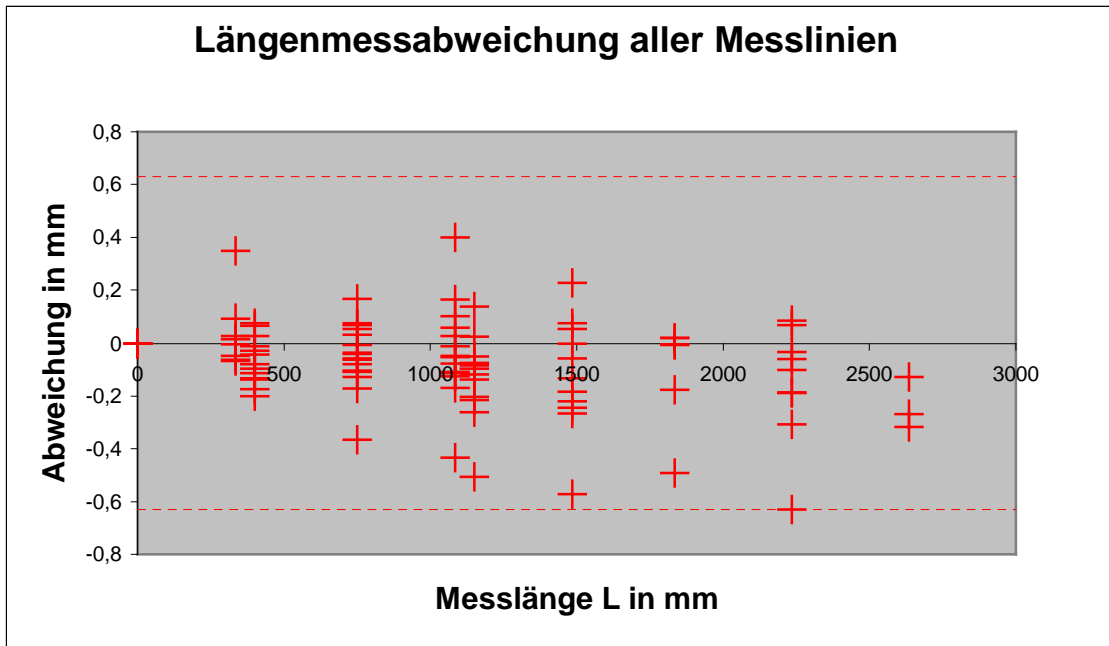
| | |
|---------------------|------|
| Bilder: | 49 |
| Objektpunkte: | 235 |
| Beobachtungen: | 5438 |
| Unbekannte: | 1009 |
| zus. Beobachtungen: | 9 |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|--------|----|
| X: | 0,0611 | mm |
| Y: | 0,0625 | mm |
| Z: | 0,0647 | mm |
| S: | 0,111 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,229 | mm |
| Y: | 0,301 | mm |
| Z: | 0,325 | mm |
| S: | 0,408 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 1...2 | 0,029 | -0,173 | -0,079 | 0,076 | -0,132 | -0,096 | -0,138 | -0,113 | 0,066 | |
| 1...3 | -0,049 | -0,119 | -0,084 | -0,095 | -0,261 | -0,203 | -0,505 | -0,215 | 0,027 | |
| 1...4 | | 0,228 | -0,133 | 0,000 | -0,245 | -0,266 | -0,573 | -0,221 | 0,055 | |
| 1...5 | | | -0,060 | 0,069 | -0,307 | -0,100 | -0,629 | | 0,086 | |
| 1...6 | | | -0,269 | | -0,318 | -0,128 | | | | |
| 2...3 | -0,078 | 0,054 | -0,006 | -0,171 | -0,128 | -0,107 | -0,367 | -0,102 | -0,039 | |
| 2...4 | | 0,400 | -0,053 | -0,076 | -0,112 | -0,169 | -0,434 | -0,108 | -0,011 | |
| 2...5 | | | 0,020 | -0,007 | -0,175 | -0,003 | -0,491 | | 0,020 | |
| 2...6 | | | -0,189 | | -0,186 | -0,032 | | | | |
| 3...4 | | 0,347 | -0,047 | 0,094 | 0,016 | -0,062 | -0,068 | -0,005 | 0,028 | |
| 3...5 | | | 0,027 | 0,164 | -0,047 | 0,104 | -0,125 | | 0,060 | |
| 3...6 | | | -0,183 | | -0,057 | 0,076 | | | | |
| 4...5 | -0,035 | | 0,075 | 0,070 | -0,063 | 0,166 | -0,056 | | 0,032 | |
| 4...6 | -0,077 | | -0,136 | | -0,073 | 0,137 | | | | |
| 5...6 | -0,042 | | -0,200 | | -0,010 | -0,028 | | | | |
| max. | -0,078 | 0,400 | -0,269 | -0,171 | -0,318 | -0,266 | -0,629 | -0,221 | 0,086 | -0,629 |
| Span. | 0,107 | 0,573 | 0,345 | 0,335 | 0,333 | 0,432 | 0,573 | 0,216 | 0,126 | 1,030 |
| mittel | -0,042 | 0,123 | -0,088 | 0,012 | -0,140 | -0,047 | -0,339 | -0,127 | 0,032 | -0,068 |
| mAbs | 0,052 | 0,220 | 0,104 | 0,082 | 0,142 | 0,112 | 0,339 | 0,127 | 0,042 | 0,136 |
| [VV] | 0,018 | 0,380 | 0,247 | 0,095 | 0,450 | 0,256 | 1,586 | 0,130 | 0,023 | |
| RMS | 0,000 | 0,252 | 0,128 | 0,098 | 0,173 | 0,131 | 0,398 | 0,147 | 0,048 | 0,185 |



Messprotokoll: DCS 660 24mm

Protokoll der Längenmessabweichung

| | |
|---------------------|--------------|
| Verband: | V-16-8-8-4-4 |
| Kalibrieraufnahmen: | 3-4 |

| | |
|-------------|----------|
| Datum: | 28.07.00 |
| Beobachter: | Winter |

| | |
|-----------|--------|
| Kamera: | DCS660 |
| Objektiv: | 24mm |
| Software: | TriTop |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|---------|---------|
| Punkt 1 | Punkt 2 | Gewicht |
| 101 | 103 | unified |
| 104 | 106 | unified |
| 901 | 905 | unified |

Ergebnisse der Ausgleichung

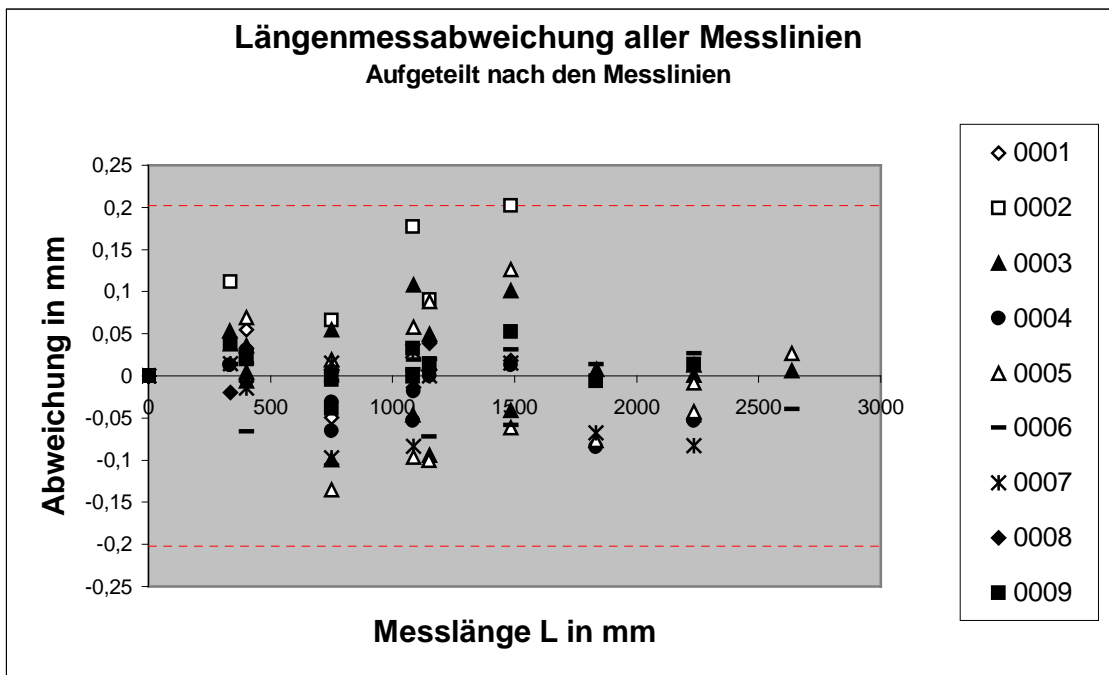
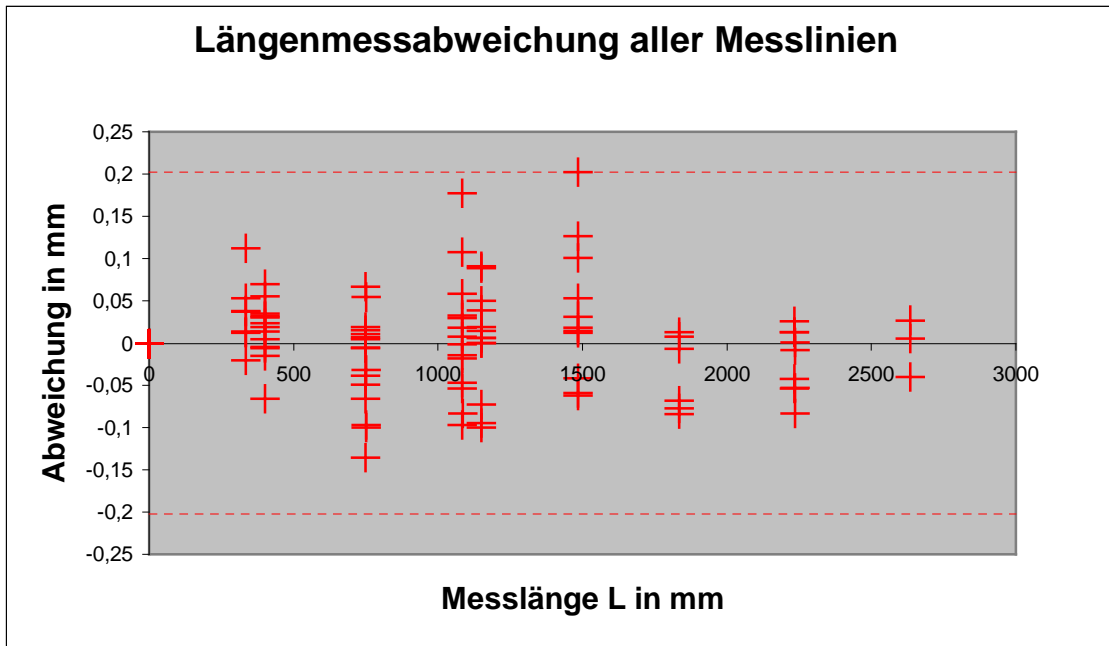
| | |
|---------------------|------|
| Bilder: | 48 |
| Objektpunkte: | 274 |
| Beobachtungen: | 4830 |
| Unbekannte: | 1120 |
| zus. Beobachtungen: | 9 |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|--------|----|
| X: | 0,0213 | mm |
| Y: | 0,0192 | mm |
| Z: | 0,0211 | mm |
| S: | 0,0369 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,089 | mm |
| Y: | 0,092 | mm |
| Z: | 0,11 | mm |
| S: | 0,157 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| 1...2 | 0,055 | 0,024 | -0,006 | 0,031 | 0,069 | 0,014 | -0,015 | 0,032 | 0,020 | |
| 1...3 | 0,006 | 0,090 | 0,050 | 0,000 | 0,088 | 0,020 | 0,000 | 0,039 | 0,014 | |
| 1...4 | | 0,202 | 0,101 | 0,013 | 0,126 | 0,031 | 0,015 | 0,018 | 0,053 | |
| 1...5 | | | 0,001 | -0,053 | -0,008 | 0,026 | -0,083 | | 0,013 | |
| 1...6 | | | 0,006 | | 0,027 | -0,040 | | | | |
| 2...3 | -0,049 | 0,066 | 0,055 | -0,031 | 0,019 | 0,005 | 0,015 | 0,007 | -0,005 | |
| 2...4 | | 0,177 | 0,108 | -0,018 | 0,058 | 0,019 | 0,030 | -0,014 | 0,033 | |
| 2...5 | | | 0,008 | -0,084 | -0,077 | 0,013 | -0,068 | | -0,006 | |
| 2...6 | | | 0,013 | | -0,042 | -0,053 | | | | |
| 3...4 | | 0,112 | 0,053 | 0,013 | 0,038 | 0,013 | 0,014 | -0,020 | 0,038 | |
| 3...5 | | | -0,046 | -0,053 | -0,097 | 0,008 | -0,083 | | -0,001 | |
| 3...6 | | | -0,041 | | -0,062 | -0,058 | | | | |
| 4...5 | 0,011 | | -0,100 | -0,065 | -0,135 | -0,006 | -0,097 | | -0,039 | |
| 4...6 | 0,007 | | -0,095 | | -0,100 | -0,072 | | | | |
| 5...6 | -0,005 | | 0,005 | | 0,035 | -0,066 | | | | gesamt |
| max. | 0,055 | 0,202 | 0,108 | -0,084 | -0,135 | -0,072 | -0,097 | 0,039 | 0,053 | 0,202 |
| Span. | 0,104 | 0,178 | 0,207 | 0,115 | 0,262 | 0,104 | 0,127 | 0,059 | 0,091 | 0,337 |
| mittel | 0,004 | 0,112 | 0,007 | -0,025 | -0,004 | -0,010 | -0,027 | 0,010 | 0,012 | 0,009 |
| mAbs | 0,022 | 0,112 | 0,046 | 0,036 | 0,066 | 0,030 | 0,042 | 0,022 | 0,022 | 0,044 |
| [VV] | 0,006 | 0,098 | 0,053 | 0,020 | 0,085 | 0,020 | 0,030 | 0,004 | 0,008 | |
| RMS | 0,000 | 0,128 | 0,059 | 0,044 | 0,075 | 0,037 | 0,054 | 0,024 | 0,028 | 0,059 |



Messprotokoll: DCS 660 20mm

Protokoll der Längenmessabweichung

| | |
|------------------------|--------------|
| Verband: | V-16-8-8-4-4 |
| Kalibrierungen: | 3-4 |

| | |
|--------------------|----------|
| Datum: | 28.07.00 |
| Beobachter: | Winter |

| | |
|------------------|--------|
| Kamera: | DCS660 |
| Objektiv: | 20mm |
| Software: | TriTop |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|---------|---------|
| Punkt 1 | Punkt 2 | Gewicht |
| 101 | 103 | unified |
| 104 | 106 | unified |
| 901 | 905 | unified |

Ergebnisse der Ausgleichung

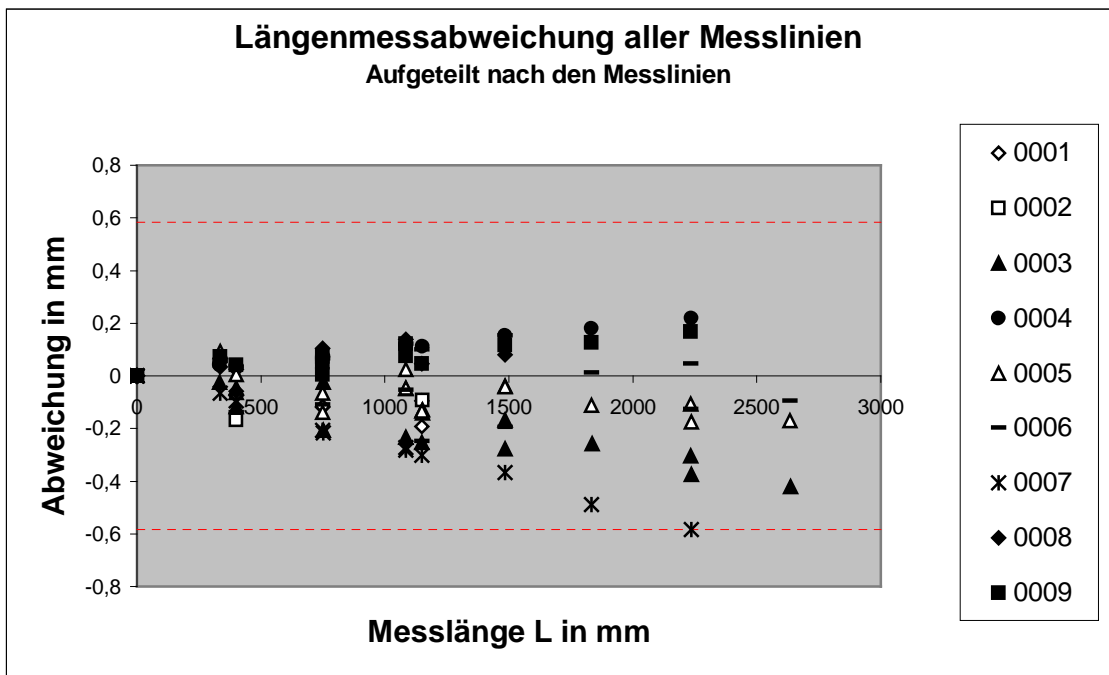
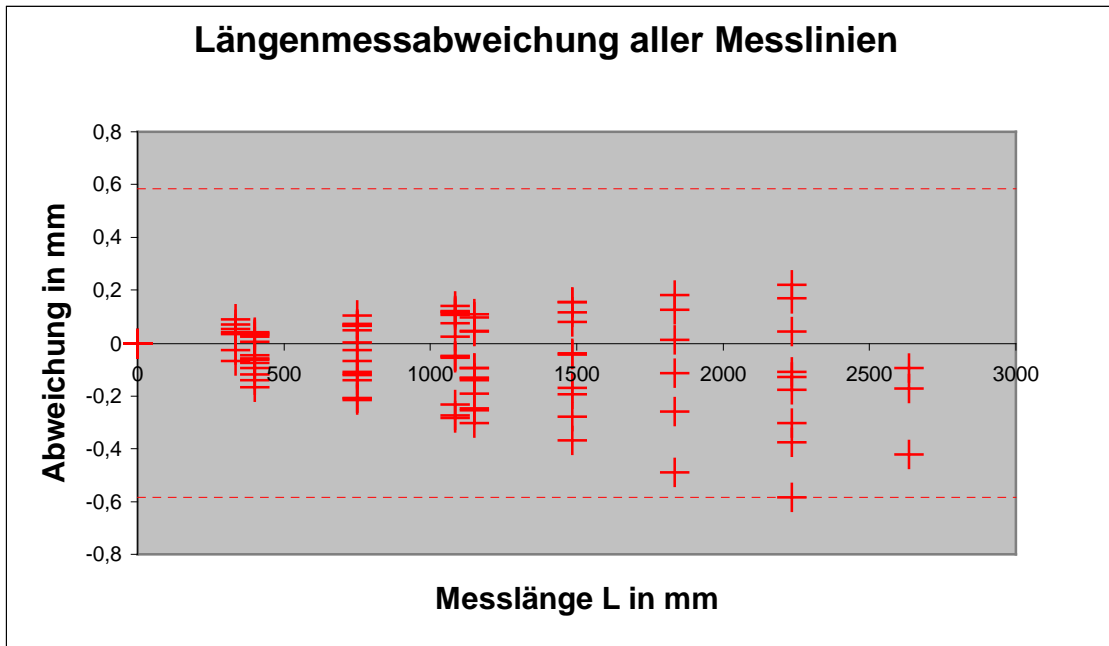
| | |
|----------------------------|------|
| Bilder: | 47 |
| Objektpunkte: | 267 |
| Beobachtungen: | 4440 |
| Unbekannte: | 1093 |
| zus. Beobachtungen: | 9 |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,262 | mm |
| Y: | 0,18 | mm |
| Z: | 0,28 | mm |
| S: | 0,308 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|--------|----|
| X: | 0,0372 | mm |
| Y: | 0,0351 | mm |
| Z: | 0,0393 | mm |
| S: | 0,0665 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|---------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|---------------|
| 1...2 | 0,024 | -0,167 | -0,117 | 0,038 | -0,062 | -0,139 | -0,095 | -0,058 | 0,042 | |
| 1...3 | -0,094 | -0,094 | -0,141 | 0,111 | -0,129 | -0,247 | -0,301 | 0,047 | 0,045 | |
| 1...4 | | | -0,168 | 0,153 | -0,038 | -0,194 | -0,368 | 0,081 | 0,118 | |
| 1...5 | | | -0,375 | 0,219 | -0,176 | -0,127 | -0,584 | | 0,168 | |
| 1...6 | | | -0,421 | | -0,171 | -0,094 | | | | |
| 2...3 | -0,119 | 0,074 | -0,024 | 0,072 | -0,066 | -0,109 | -0,206 | 0,105 | 0,004 | |
| 2...4 | | | -0,050 | 0,115 | 0,025 | -0,054 | -0,273 | 0,139 | 0,076 | |
| 2...5 | | | -0,257 | 0,180 | -0,113 | 0,013 | -0,489 | | 0,127 | |
| 2...6 | | | -0,303 | | -0,108 | 0,045 | | | | |
| 3...4 | | | -0,025 | 0,042 | 0,091 | 0,055 | -0,066 | 0,035 | 0,072 | |
| 3...5 | | | -0,233 | 0,108 | -0,047 | 0,121 | -0,283 | | 0,123 | |
| 3...6 | | | -0,278 | | -0,041 | 0,154 | | | | |
| 4...5 | -0,116 | | -0,208 | 0,066 | -0,139 | 0,066 | -0,216 | | 0,051 | |
| 4...6 | -0,191 | | -0,253 | | -0,133 | 0,099 | | | | |
| 5...6 | -0,075 | | -0,046 | | 0,006 | 0,034 | | | | |
| | | | | | | | | | | gesamt |
| max. | -0,191 | -0,167 | -0,421 | 0,219 | -0,176 | -0,247 | -0,584 | 0,139 | 0,168 | -0,584 |
| Span. | 0,216 | 0,241 | 0,397 | 0,181 | 0,267 | 0,401 | 0,518 | 0,197 | 0,164 | 0,803 |
| mittel | -0,095 | -0,062 | -0,193 | 0,111 | -0,073 | -0,025 | -0,288 | 0,058 | 0,082 | -0,054 |
| mAbs | 0,103 | 0,111 | 0,193 | 0,111 | 0,090 | 0,103 | 0,288 | 0,078 | 0,082 | 0,129 |
| [VV] | 0,079 | 0,042 | 0,782 | 0,154 | 0,161 | 0,216 | 1,064 | 0,044 | 0,090 | |
| RMS | 0,000 | 0,118 | 0,228 | 0,124 | 0,104 | 0,120 | 0,326 | 0,085 | 0,095 | 0,171 |



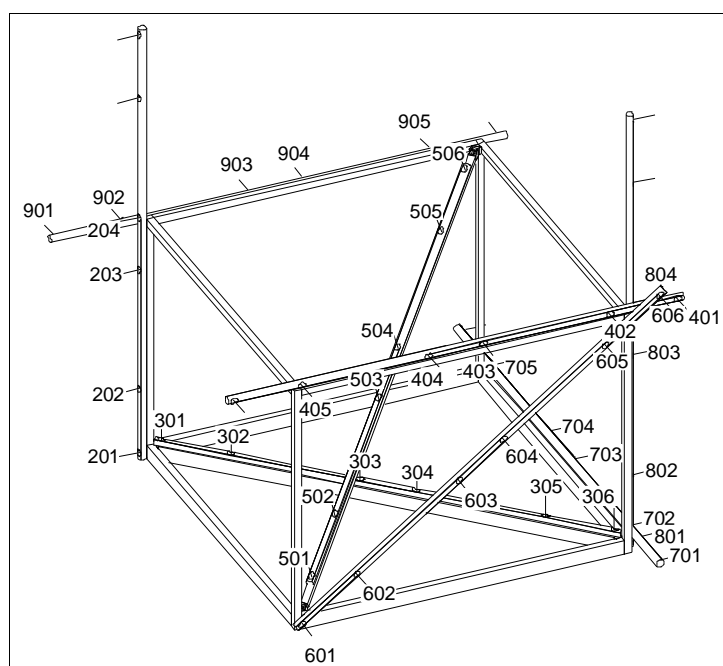
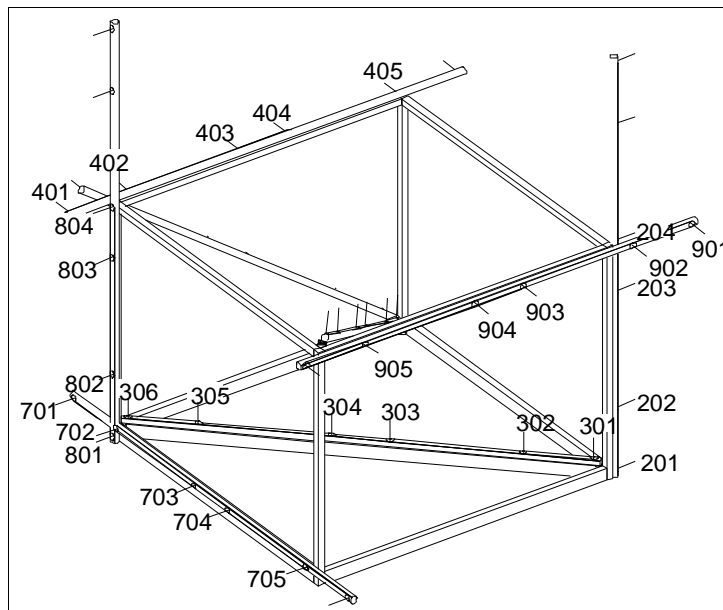
Nummerierungskonventionen

Verwendete Punktnummern:

| Maßstabsnummer | Beschreibung im Messvolumen | Vergebene Punktnummer |
|----------------|---|--|
| 0001 | VW-Systemmaßstab | 101 102 103 104 105 106 |
| 0002 | Vorne links Senkrecht | 201 202 203 204 |
| 0003 | Boden Diagonal liegend | 301 302 303 304 305 306 |
| 0004 | Seite rechts oben Liegend | 401 402 403 404 405 |
| 0005 | Raumdiagonale Vorne rechts unten → Hinten links oben | 501 502 503 504 505 506 |
| 0006 | Seite rechts Seitendiagonale Vorne rechts unten → Hinten rechts oben | 601 602 603 604 605 606 |
| 0007 | Hinten unten Liegend | 701 702 703 704 705 |
| 0008 | Hinten rechts Stehend | 801 802 803 804 |
| 0009 | Zusätzlicher Maßstab Seite links oben Liegend | 901 902 903 904 905 |

Überblick über die Lage der Messlinien

(Nicht nummerierte Punkte werden nicht benutzt und sind bei der Messung abgedeckt und bei Durchführung des halben Rundumverbandes werden Maßstäbe 0009 und 0007 in der Halterung gedreht, so dass die Normalenvektoren der Zielmarken nach „vorn“ schauen)



System A: Vollverband Standard

Protokoll der Längenmessabweichung

| | |
|-------------------|------------|
| Verband: | V-16-8-8-4 |
| Kaliberaufnahmen: | 3-4 |

| | |
|-------------|------------|
| Datum: | 19.09.00 |
| Beobachter: | Rautenberg |
| Temperatur: | 20 |

| | |
|-----------|--------------|
| Kamera: | DCS460-K5114 |
| Objektiv: | 24mm |
| Software: | Tritop |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|---------|---------|
| Punkt 1 | Punkt 2 | Gewicht |
| 101 | 103 | unified |
| 104 | 106 | unified |
| 901 | 905 | unified |

Ergebnisse der Ausgleichung

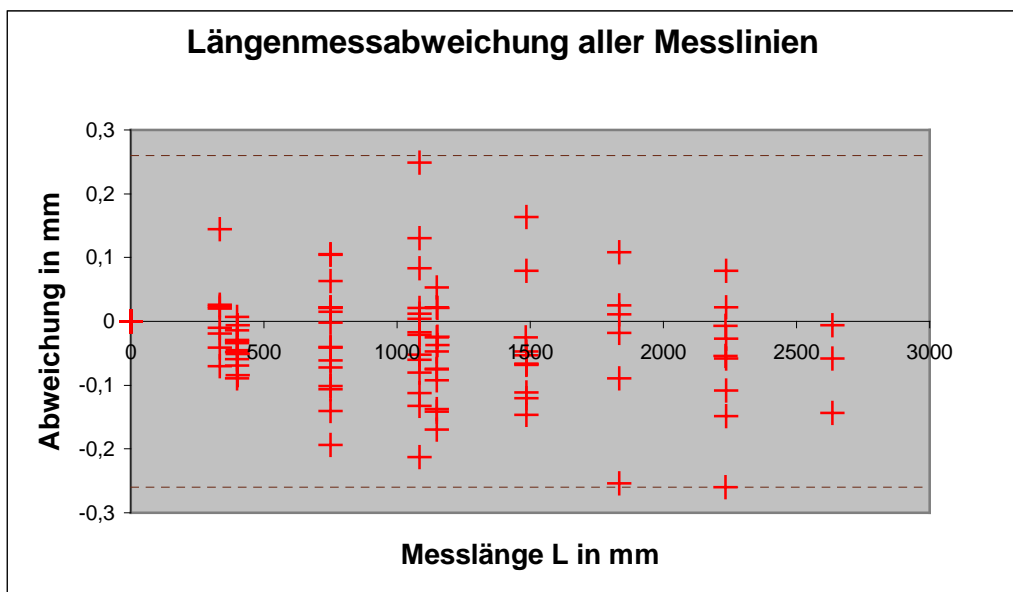
| | |
|---------------------|------|
| Bilder: | 48 |
| Objektpunkte: | 227 |
| Beobachtungen: | 4250 |
| Unbekannte: | 979 |
| zus. Beobachtungen: | 9 |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|--------|----|
| X: | 0,0222 | mm |
| Y: | 0,0242 | mm |
| Z: | 0,0251 | mm |
| S: | 0,0424 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,12 | mm |
| Y: | 0,113 | mm |
| Z: | 0,103 | mm |
| S: | 0,164 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1...2 | -0,048 | -0,045 | -0,085 | -0,060 | -0,051 | -0,034 | -0,069 | -0,014 | -0,006 | |
| 1...3 | -0,025 | -0,024 | 0,021 | -0,037 | 0,053 | -0,074 | -0,141 | -0,076 | -0,047 | |
| 1...4 | | -0,066 | 0,164 | -0,047 | 0,079 | -0,053 | -0,121 | -0,147 | -0,067 | |
| 1...5 | | | 0,023 | -0,149 | -0,027 | -0,054 | -0,058 | | -0,260 | |
| 1...6 | | | -0,006 | | -0,058 | -0,144 | | | | |
| 2...3 | 0,022 | 0,021 | 0,105 | 0,022 | 0,105 | -0,041 | -0,072 | -0,061 | -0,041 | |
| 2...4 | | -0,022 | 0,249 | 0,012 | 0,131 | -0,017 | -0,052 | -0,132 | -0,061 | |
| 2...5 | | | 0,108 | -0,090 | 0,025 | -0,018 | 0,011 | | -0,254 | |
| 2...6 | | | 0,080 | | -0,007 | -0,109 | | | | |
| 3...4 | | -0,042 | 0,144 | -0,010 | 0,026 | 0,023 | 0,020 | -0,070 | -0,020 | |
| 3...5 | | | 0,004 | -0,112 | -0,080 | 0,021 | 0,083 | | -0,213 | |
| 3...6 | | | -0,025 | | -0,112 | -0,068 | | | | |
| 4...5 | 0,015 | | -0,141 | -0,101 | -0,106 | -0,002 | 0,064 | | -0,194 | |
| 4...6 | 0,022 | | -0,169 | | -0,138 | -0,092 | | | | |
| 5...6 | 0,007 | | -0,029 | | -0,031 | -0,089 | | | | |
| gesamt | | | | | | | | | | |
| max. | -0,048 | -0,066 | 0,249 | -0,149 | -0,138 | -0,144 | -0,141 | -0,147 | -0,260 | -0,260 |
| Span. | 0,071 | 0,087 | 0,419 | 0,171 | 0,268 | 0,167 | 0,224 | 0,132 | 0,254 | 0,510 |
| mittel | -0,001 | -0,029 | 0,030 | -0,057 | -0,013 | -0,050 | -0,033 | -0,083 | -0,116 | -0,039 |
| mAbs | 0,023 | 0,036 | 0,090 | 0,064 | 0,069 | 0,056 | 0,069 | 0,083 | 0,116 | 0,067 |



System A: Vollverband Frei

| | |
|----------------------------|--------|
| Verband: | V-Frei |
| Kalibrieraufnahmen: | |

| | |
|--------------------|------------|
| Datum: | 2000-09-18 |
| Beobachter: | Böhm |
| Temperatur: | 20 |

| | |
|------------------|--------------|
| Kamera: | DCS460-K5114 |
| Objektiv: | 24mm |
| Software: | Tritop |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|---------|---------|
| Punkt 1 | Punkt 2 | Gewicht |
| 101 | 103 | unified |
| 104 | 106 | unified |
| 901 | 905 | unified |

Ergebnisse der Ausgleichung

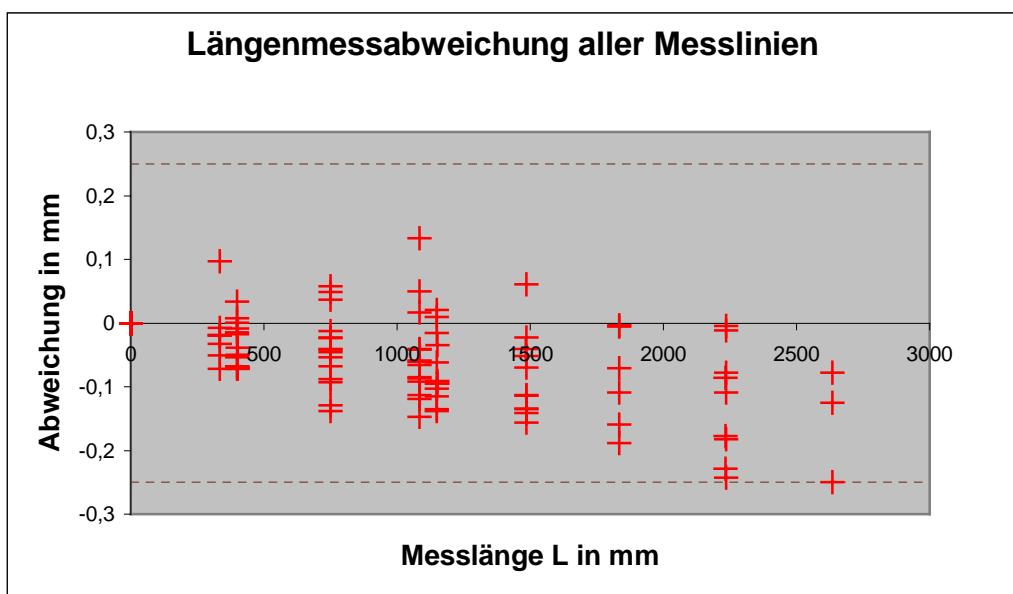
| | |
|----------------------------|------|
| Bilder: | 103 |
| Objektpunkte: | 233 |
| Beobachtungen: | 8148 |
| Unbekannte: | 1327 |
| zus. Beobachtungen: | 9 |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|--------|----|
| X: | 0,0155 | mm |
| Y: | 0,0171 | mm |
| Z: | 0,0168 | mm |
| S: | 0,0293 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,065 | mm |
| Y: | 0,047 | mm |
| Z: | 0,082 | mm |
| S: | 0,101 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 1...2 | -0,017 | -0,050 | -0,072 | -0,054 | -0,038 | -0,068 | -0,008 | 0,033 | -0,069 | |
| 1...3 | | -0,090 | -0,035 | -0,095 | 0,010 | -0,135 | -0,062 | 0,021 | -0,116 | |
| 1...4 | | -0,142 | 0,061 | -0,113 | -0,023 | -0,156 | -0,069 | -0,052 | -0,135 | |
| 1...5 | | | -0,078 | -0,242 | -0,109 | -0,178 | -0,012 | | -0,228 | |
| 1...6 | | | -0,078 | | -0,125 | -0,250 | | | | |
| 2...3 | | -0,041 | 0,036 | -0,041 | 0,048 | -0,068 | -0,053 | -0,012 | -0,046 | |
| 2...4 | | -0,092 | 0,134 | -0,059 | 0,016 | -0,087 | -0,061 | -0,085 | -0,066 | |
| 2...5 | | | -0,005 | -0,189 | -0,071 | -0,109 | -0,003 | | -0,159 | |
| 2...6 | | | -0,005 | | -0,086 | -0,182 | | | | |
| 3...4 | | -0,051 | 0,097 | -0,018 | -0,032 | -0,019 | -0,008 | -0,072 | -0,020 | |
| 3...5 | | | -0,041 | -0,148 | -0,119 | -0,042 | 0,050 | | -0,113 | |
| 3...6 | | | -0,041 | | -0,135 | -0,114 | | | | |
| 4...5 | -0,023 | | -0,139 | -0,129 | -0,087 | -0,022 | 0,058 | | -0,093 | |
| 4...6 | -0,015 | | -0,138 | | -0,103 | -0,095 | | | | |
| 5...6 | 0,008 | | 0,000 | | -0,015 | -0,072 | | | | |
| max. | -0,023 | -0,142 | -0,139 | -0,242 | -0,135 | -0,250 | -0,069 | -0,085 | -0,228 | gesamt |
| Span. | 0,031 | 0,101 | 0,272 | 0,224 | 0,183 | 0,231 | 0,128 | 0,119 | 0,209 | -0,250 |
| mittel | -0,012 | -0,078 | -0,020 | -0,109 | -0,058 | -0,106 | -0,017 | -0,028 | -0,105 | 0,384 |
| mAbs | 0,016 | 0,078 | 0,064 | 0,109 | 0,068 | 0,106 | 0,039 | 0,046 | 0,105 | -0,059 |
| [VV] | 0,001 | 0,043 | 0,093 | 0,163 | 0,096 | 0,228 | 0,021 | 0,017 | 0,142 | 0,070 |
| RMS | 0,000 | 0,085 | 0,079 | 0,128 | 0,080 | 0,123 | 0,046 | 0,053 | 0,119 | 0,094 |



System A: Halbverband Standard

| | |
|----------------------------|------------|
| Verband: | H-16-8-8-4 |
| Kalibrieraufnahmen: | 3-4 |

| | |
|--------------------|------------|
| Datum: | 18.09.00 |
| Beobachter: | Rautenberg |
| Temperatur: | 20 |

| | |
|------------------|--------------|
| Kamera: | DCS460-K5114 |
| Objektiv: | 24mm |
| Software: | Tritop |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|---------|---------|
| Punkt 1 | Punkt 2 | Gewicht |
| 101 | 103 | unified |
| 104 | 106 | unified |
| 901 | 905 | unified |

Ergebnisse der Ausgleichung

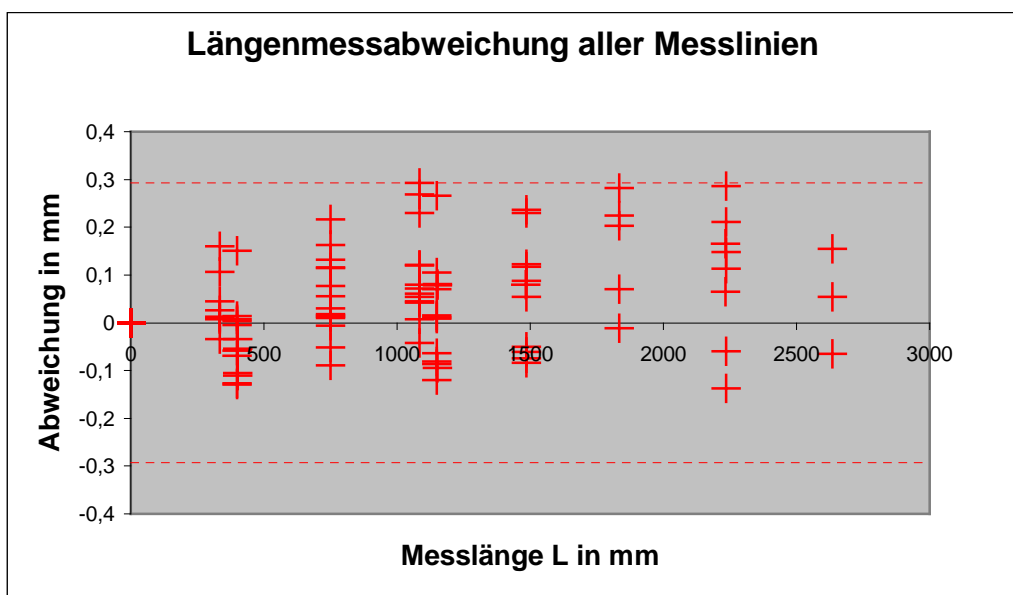
| | |
|----------------------------|------|
| Bilder: | 33 |
| Objektpunkte: | 193 |
| Beobachtungen: | 3754 |
| Unbekannte: | 787 |
| zus. Beobachtungen: | 9 |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|--------|----|
| X: | 0,0218 | mm |
| Y: | 0,0267 | mm |
| Z: | 0,0233 | mm |
| S: | 0,0435 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,097 | mm |
| Y: | 0,197 | mm |
| Z: | 0,132 | mm |
| S: | 0,209 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------------|
| 1...2 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 1...3 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 1...4 | -0,069 | -0,034 | -0,054 | -0,126 | -0,111 | -0,005 | 0,003 | 0,151 | -0,105 | |
| 1...5 | 0,009 | 0,081 | 0,079 | -0,095 | 0,105 | 0,011 | 0,016 | 0,266 | -0,087 | |
| 1...6 | | 0,088 | 0,237 | -0,084 | 0,118 | 0,055 | 0,123 | 0,230 | -0,061 | |
| 2...3 | | | 0,148 | -0,137 | 0,113 | 0,065 | 0,286 | | | |
| 2...4 | | | 0,155 | | 0,054 | -0,064 | | | | |
| 2...5 | 0,078 | 0,115 | 0,132 | 0,030 | 0,217 | 0,015 | 0,013 | 0,115 | 0,018 | |
| 2...6 | | 0,122 | 0,292 | 0,042 | 0,230 | 0,061 | 0,120 | 0,079 | 0,044 | |
| 3...4 | | | 0,203 | -0,011 | 0,224 | 0,070 | 0,283 | | | |
| 3...5 | | | 0,211 | | 0,166 | -0,059 | | | | |
| 3...6 | | 0,007 | 0,160 | 0,011 | 0,013 | 0,045 | 0,107 | -0,035 | 0,026 | |
| 4...5 | | | 0,072 | -0,042 | 0,008 | 0,055 | 0,269 | | | |
| 4...6 | | | 0,079 | | -0,051 | -0,074 | | | | |
| 5...6 | 0,056 | | -0,089 | -0,052 | -0,005 | 0,010 | 0,163 | | | |
| gesamt | | | | | | | | | | 0,292 |
| max. | 0,078 | 0,122 | 0,292 | -0,137 | 0,230 | -0,129 | 0,286 | 0,266 | -0,105 | 0,429 |
| Span. | 0,147 | 0,156 | 0,381 | 0,179 | 0,341 | 0,199 | 0,282 | 0,300 | 0,149 | 0,050 |
| mittel | 0,026 | 0,063 | 0,103 | -0,047 | 0,064 | -0,004 | 0,138 | 0,134 | -0,027 | 0,091 |
| mAbs | 0,049 | 0,075 | 0,133 | 0,063 | 0,102 | 0,056 | 0,138 | 0,146 | 0,057 | 0,120 |
| [VV] | 0,019 | 0,044 | 0,351 | 0,058 | 0,241 | 0,065 | 0,302 | 0,167 | 0,025 | |
| RMS | 0,000 | 0,085 | 0,153 | 0,076 | 0,127 | 0,066 | 0,174 | 0,167 | 0,065 | |



System A: Halbverband Frei

| | |
|----------------------------|--------|
| Verband: | H-Frei |
| Kalibrieraufnahmen: | |

| | |
|--------------------|----------|
| Datum: | 18.09.00 |
| Beobachter: | Böhm |
| Temperatur: | 20 |

| | |
|------------------|--------------|
| Kamera: | DCS460-K5114 |
| Objektiv: | 24mm |
| Software: | Tritop |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|---------|---------|
| Punkt 1 | Punkt 2 | Gewicht |
| 101 | 103 | fixed |
| 104 | 106 | fixed |
| 901 | 905 | fixed |

Ergebnisse der Ausgleichung

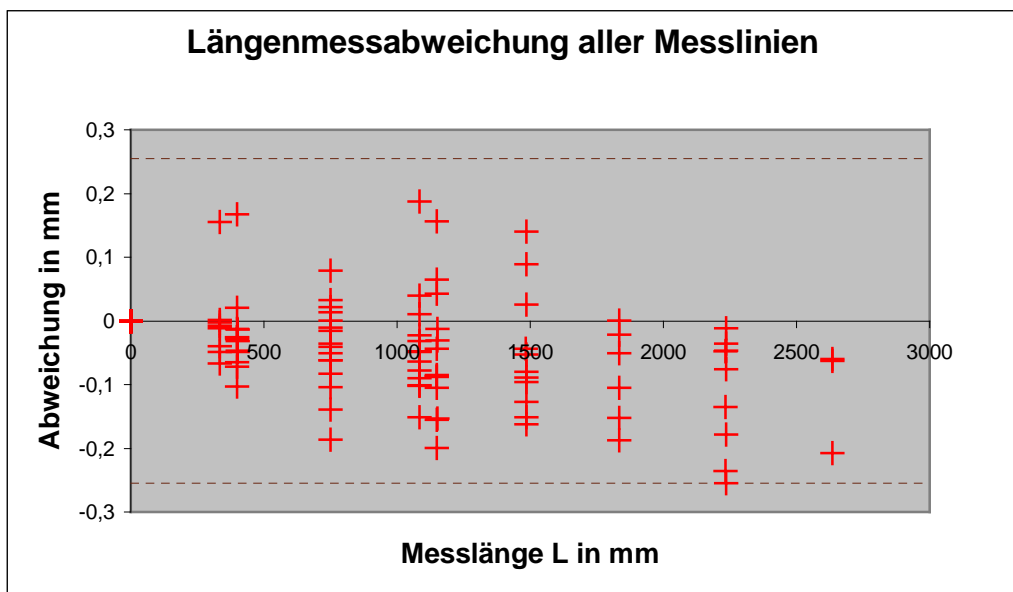
| | |
|----------------------------|------|
| Bilder: | 91 |
| Objektpunkte: | 209 |
| Beobachtungen: | 8380 |
| Unbekannte: | 1183 |
| zus. Beobachtungen: | 9 |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|--------|----|
| X: | 0,0158 | mm |
| Y: | 0,0207 | mm |
| Z: | 0,0177 | mm |
| S: | 0,0329 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,107 | mm |
| Y: | 0,11 | mm |
| Z: | 0,123 | mm |
| S: | 0,168 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 1...2 | -0,064 | -0,032 | -0,047 | -0,103 | -0,014 | -0,029 | -0,025 | 0,167 | -0,049 | |
| 1...3 | -0,105 | -0,031 | -0,013 | -0,153 | 0,065 | -0,044 | -0,087 | 0,156 | -0,085 | |
| 1...4 | | -0,080 | 0,140 | -0,151 | 0,026 | -0,053 | -0,089 | 0,089 | -0,096 | |
| 1...5 | | | -0,047 | -0,255 | -0,036 | -0,135 | -0,076 | | -0,236 | |
| 1...6 | | | -0,060 | | -0,062 | -0,208 | | | | |
| 2...3 | -0,041 | 0,001 | 0,033 | -0,050 | 0,079 | -0,016 | -0,062 | -0,010 | -0,036 | |
| 2...4 | | -0,049 | 0,188 | -0,048 | 0,040 | -0,023 | -0,064 | -0,078 | -0,048 | |
| 2...5 | | | 0,001 | -0,152 | -0,022 | -0,105 | -0,050 | | -0,187 | |
| 2...6 | | | -0,012 | | -0,048 | -0,179 | | | | |
| 3...4 | | -0,049 | 0,155 | 0,002 | -0,039 | -0,007 | -0,002 | -0,067 | -0,012 | |
| 3...5 | | | -0,031 | -0,102 | -0,101 | -0,090 | 0,011 | | -0,151 | |
| 3...6 | | | -0,044 | | -0,127 | -0,163 | | | | |
| 4...5 | 0,022 | | -0,187 | -0,104 | -0,062 | -0,083 | 0,014 | | -0,139 | |
| 4...6 | 0,043 | | -0,199 | | -0,088 | -0,156 | | | | |
| 5...6 | 0,021 | | -0,013 | | -0,026 | -0,072 | | | | |
| max. | -0,105 | -0,080 | -0,199 | -0,255 | -0,127 | -0,208 | -0,089 | 0,167 | -0,236 | gesamt |
| Span. | 0,147 | 0,081 | 0,387 | 0,257 | 0,207 | 0,200 | 0,103 | 0,245 | 0,224 | -0,255 |
| mittel | -0,021 | -0,040 | -0,009 | -0,112 | -0,028 | -0,091 | -0,043 | 0,043 | -0,104 | 0,443 |
| mAbs | 0,049 | 0,040 | 0,078 | 0,112 | 0,056 | 0,091 | 0,048 | 0,094 | 0,104 | -0,045 |
| [VV] | 0,020 | 0,013 | 0,166 | 0,171 | 0,061 | 0,181 | 0,033 | 0,071 | 0,156 | 0,075 |
| RMS | 0,000 | 0,047 | 0,105 | 0,131 | 0,064 | 0,110 | 0,057 | 0,109 | 0,125 | 0,097 |



System B: Vollverband Standard

| | |
|---------------------|--------------|
| Verband: | V-16-8-8-4-4 |
| Kalibrieraufnahmen: | 3-4 |

| | |
|-------------|----------|
| Datum: | 28.07.00 |
| Beobachter: | |
| Temperatur: | 20 |

| | |
|-----------|--------|
| Kamera: | DCS660 |
| Objektiv: | 24mm |
| Software: | Tritop |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|---------|---------|
| Punkt 1 | Punkt 2 | Gewicht |
| xx1 | | |
| xx2 | | |

Ergebnisse der Ausgleichung

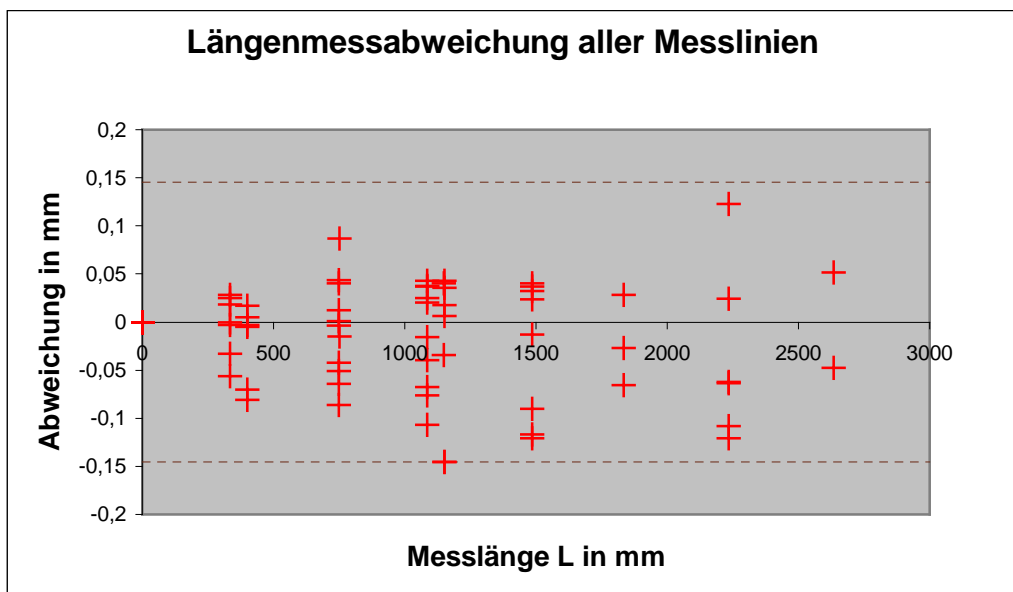
| | |
|---------------------|--|
| Bilder: | |
| Objektpunkte: | |
| Beobachtungen: | |
| Unbekannte: | |
| zus. Beobachtungen: | |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|--|----|
| X: | | mm |
| Y: | | mm |
| Z: | | mm |
| S: | | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|--|----|
| X: | | mm |
| Y: | | mm |
| Z: | | mm |
| S: | | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 1...2 | | -0,005 | -0,070 | | | 0,005 | -0,003 | | | -0,081 |
| 1...3 | | 0,035 | 0,018 | -0,145 | 0,043 | 0,007 | 0,040 | | | -0,145 |
| 1...4 | | 0,032 | | -0,117 | -0,013 | 0,023 | 0,040 | | | -0,121 |
| 1...5 | | | | -0,121 | -0,064 | -0,062 | 0,025 | | | -0,108 |
| 1...6 | | | 0,052 | | -0,047 | | | | | |
| 2...3 | | 0,041 | 0,087 | | | 0,001 | 0,044 | -0,042 | | -0,064 |
| 2...4 | | 0,037 | | | | 0,020 | 0,043 | -0,076 | | -0,040 |
| 2...5 | | | | | | -0,066 | 0,028 | | | -0,027 |
| 2...6 | | | 0,123 | | | | | | | |
| 3...4 | | -0,003 | | 0,028 | -0,056 | 0,019 | -0,001 | -0,033 | | 0,025 |
| 3...5 | | | | 0,025 | -0,107 | -0,068 | -0,016 | | | 0,037 |
| 3...6 | | | 0,037 | | -0,090 | | | | | |
| 4...5 | | | | -0,003 | -0,051 | -0,086 | -0,015 | | | 0,013 |
| 4...6 | | | | | -0,034 | | | | | |
| 5...6 | | | | | 0,017 | | | | | |
| gesamt | | | | | | | | | | |
| max. | 0,000 | 0,041 | 0,123 | -0,145 | -0,107 | -0,086 | 0,044 | -0,076 | -0,145 | -0,145 |
| Span. | 0,000 | 0,045 | 0,193 | 0,174 | 0,150 | 0,110 | 0,060 | 0,043 | 0,183 | 0,268 |
| mittel | | 0,023 | 0,041 | -0,056 | -0,040 | -0,021 | 0,019 | -0,050 | -0,051 | -0,017 |
| mAbs | | 0,025 | 0,064 | 0,073 | 0,052 | 0,036 | 0,025 | 0,050 | 0,066 | 0,049 |
| [VV] | 0,000 | 0,005 | 0,032 | 0,051 | 0,035 | 0,022 | 0,009 | 0,009 | 0,062 | |
| RMS | 0,000 | 0,030 | 0,073 | 0,092 | 0,059 | 0,046 | 0,030 | 0,054 | 0,079 | 0,061 |



System B: Vollverband Frei

| | |
|---------------------|--------|
| Verband: | V-Frei |
| Kalibrieraufnahmen: | |

| | |
|-------------|------------|
| Datum: | 2000-07-28 |
| Beobachter: | |
| Temperatur: | 20 |

| | |
|-----------|--------|
| Kamera: | DCS660 |
| Objektiv: | 24mm |
| Software: | Tritop |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|---------|---------|
| Punkt 1 | Punkt 2 | Gewicht |
| | | |

Ergebnisse der Ausgleichung

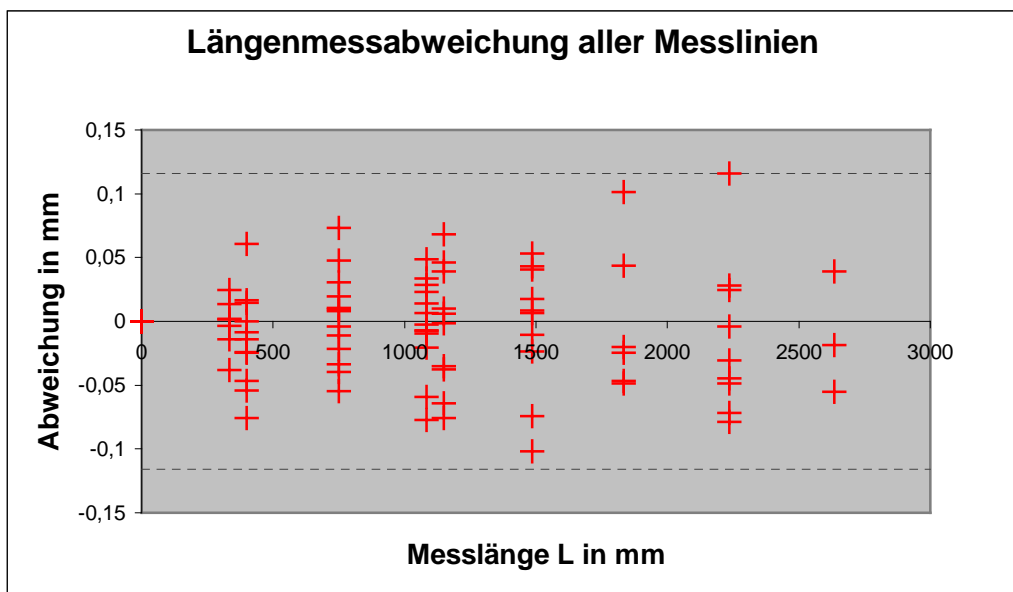
| | |
|---------------------|--|
| Bilder: | |
| Objektpunkte: | |
| Beobachtungen: | |
| Unbekannte: | |
| zus. Beobachtungen: | |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|--|----|
| X: | | mm |
| Y: | | mm |
| Z: | | mm |
| S: | | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|--|----|
| X: | | mm |
| Y: | | mm |
| Z: | | mm |
| S: | | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| 1...2 | | -0,008 | -0,076 | -0,025 | 0,017 | -0,014 | 0,000 | 0,061 | -0,054 | |
| 1...3 | | 0,039 | -0,001 | -0,035 | 0,046 | 0,006 | 0,010 | 0,068 | -0,076 | |
| 1...4 | | 0,041 | | -0,011 | 0,008 | 0,018 | 0,007 | 0,053 | -0,074 | |
| 1...5 | | | 0,025 | -0,045 | -0,031 | 0,028 | -0,049 | | -0,079 | |
| 1...6 | | | 0,039 | | -0,055 | -0,019 | | | | |
| 2...3 | | 0,048 | 0,073 | -0,011 | 0,030 | 0,020 | 0,010 | 0,008 | -0,021 | |
| 2...4 | | 0,049 | | 0,014 | -0,007 | 0,033 | 0,007 | -0,007 | -0,020 | |
| 2...5 | | | 0,101 | -0,020 | -0,047 | 0,043 | -0,049 | | -0,024 | |
| 2...6 | | | 0,116 | | -0,071 | -0,004 | | | | |
| 3...4 | | 0,002 | | 0,024 | -0,038 | 0,014 | -0,004 | -0,014 | 0,001 | |
| 3...5 | | | 0,028 | -0,009 | -0,077 | 0,023 | -0,059 | | -0,003 | |
| 3...6 | | | 0,043 | | -0,102 | -0,024 | | | | |
| 4...5 | | | | -0,033 | -0,040 | 0,010 | -0,055 | | -0,004 | |
| 4...6 | | | | | -0,064 | -0,037 | | | | |
| 5...6 | | | 0,014 | | -0,024 | -0,046 | | | | |
| gesamt | | | | | | | | | | |
| max. | 0,000 | 0,049 | 0,116 | -0,045 | -0,102 | -0,046 | -0,059 | 0,068 | -0,079 | 0,116 |
| Span. | 0,000 | 0,057 | 0,192 | 0,069 | 0,148 | 0,090 | 0,070 | 0,082 | 0,080 | 0,218 |
| mittel | | 0,028 | 0,036 | -0,015 | -0,030 | 0,003 | -0,018 | 0,028 | -0,035 | 0,000 |
| mAbs | | 0,031 | 0,052 | 0,023 | 0,044 | 0,023 | 0,025 | 0,035 | 0,036 | 0,034 |
| [VV] | 0,000 | 0,008 | 0,040 | 0,006 | 0,039 | 0,010 | 0,012 | 0,012 | 0,022 | |
| RMS | 0,000 | 0,036 | 0,063 | 0,025 | 0,051 | 0,026 | 0,034 | 0,044 | 0,047 | 0,042 |



System B: Halbverband Standard

| | |
|----------------------------|--------------|
| Verband: | H-16-8-8-4-4 |
| Kalibrieraufnahmen: | 3-4 |

| | |
|--------------------|----------|
| Datum: | 28.07.00 |
| Beobachter: | |
| Temperatur: | 20 |

| | |
|------------------|--------|
| Kamera: | DCS660 |
| Objektiv: | 24mm |
| Software: | Tritop |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|---------|---------|
| Punkt 1 | Punkt 2 | Gewicht |
| xx1 | | unified |
| xx2 | | unified |

Ergebnisse der Ausgleichung

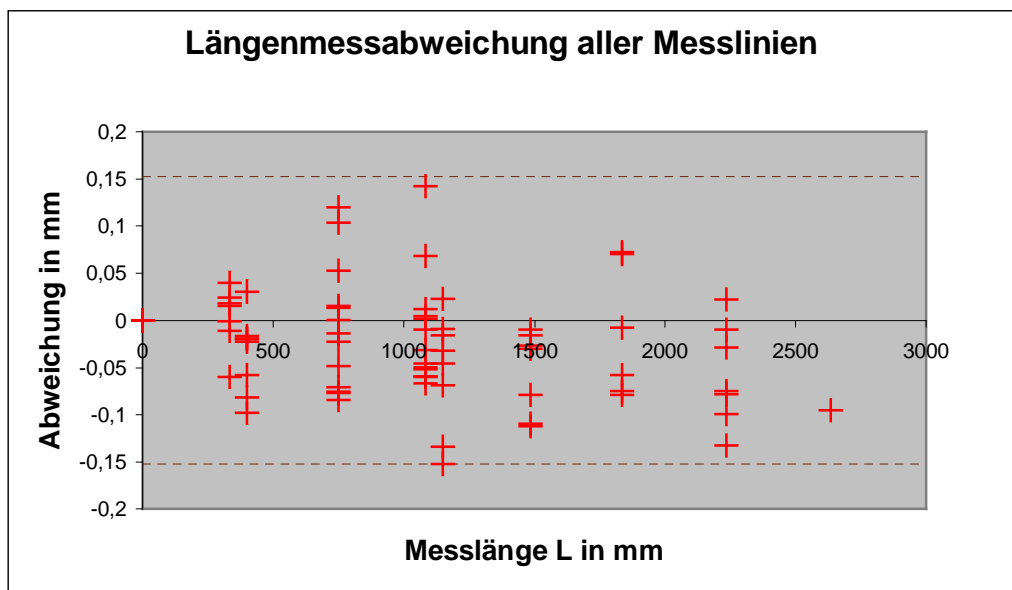
| | |
|----------------------------|--|
| Bilder: | |
| Objektpunkte: | |
| Beobachtungen: | |
| Unbekannte: | |
| zus. Beobachtungen: | |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|--|----|
| X: | | mm |
| Y: | | mm |
| Z: | | mm |
| S: | | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|--|----|
| X: | | mm |
| Y: | | mm |
| Z: | | mm |
| S: | | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|---------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------|
| 1...2 | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
| 1...3 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | |
| 1...4 | 0,000 | 400,326 | 400,268 | 400,208 | 400,359 | 400,032 | 400,239 | 0,000 | 400,264 | |
| 1...5 | 0,000 | 1150,293 | 1150,374 | 1150,301 | 1150,202 | 1150,011 | 1149,994 | 0,000 | 1150,103 | |
| 1...6 | 0,000 | 1484,673 | 0,000 | 1484,628 | 1484,768 | 1484,522 | 1484,478 | 0,000 | 1484,603 | |
| 2...3 | 0,000 | 0,000 | 2234,712 | 2234,537 | 2234,649 | 2234,341 | 2234,578 | 0,000 | 2234,269 | |
| 2...4 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 2634,595 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | |
| 2...5 | 0,000 | 749,966 | 750,107 | 750,094 | 749,843 | 749,979 | 749,755 | 749,827 | 749,839 | |
| 2...6 | 0,000 | 1084,347 | 0,000 | 1084,420 | 1084,408 | 1084,489 | 1084,239 | 1084,382 | 1084,339 | |
| 3...4 | 0,000 | 0,000 | 1834,443 | 1834,330 | 1834,290 | 1834,308 | 1834,339 | 0,000 | 1834,005 | |
| 3...5 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 2234,235 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | |
| 3...6 | 0,000 | 334,380 | 0,000 | 334,327 | 334,566 | 334,510 | 334,484 | 334,554 | 334,500 | |
| 4...5 | 0,000 | 0,000 | 1084,335 | 1084,236 | 1084,447 | 1084,330 | 1084,584 | 0,000 | 1084,165 | |
| 4...6 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1484,393 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | |
| 5...6 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 749,909 | 749,882 | 749,820 | 750,100 | 0,000 | 749,666 | gesamt |
| max. | 0,000 | -0,022 | 0,120 | -0,134 | -0,095 | -0,100 | -0,152 | -0,060 | -0,075 | -0,152 |
| Span. | 0,000 | 0,036 | 0,218 | 0,159 | 0,096 | 0,118 | 0,294 | 0,076 | 0,143 | 0,294 |
| mittel | | -0,003 | 0,006 | -0,063 | -0,044 | -0,039 | -0,010 | -0,030 | -0,003 | -0,023 |
| mAbs | | 0,011 | 0,065 | 0,069 | 0,044 | 0,043 | 0,081 | 0,040 | 0,041 | 0,049 |
| [VV] | 0,000 | 0,001 | 0,033 | 0,066 | 0,043 | 0,030 | 0,086 | 0,006 | 0,021 | |
| RMS | 0,000 | 0,013 | 0,074 | 0,081 | 0,053 | 0,055 | 0,093 | 0,044 | 0,046 | 0,064 |



System B: Halbverband Frei

| | |
|------------------------|--------|
| Verband: | H-Frei |
| Kalibrierungen: | 3-4 |

| | |
|--------------------|----------|
| Datum: | 28.07.00 |
| Beobachter: | |
| Temperatur: | 20 |

| | |
|------------------|--------|
| Kamera: | DCS660 |
| Objektiv: | 24mm |
| Software: | Tritop |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|---------|---------|
| Punkt 1 | Punkt 2 | Gewicht |
| xx1 | | unified |
| xx2 | | unified |

2000mm +/- 20µm
Hubs-Target

Ergebnisse der Ausgleichung

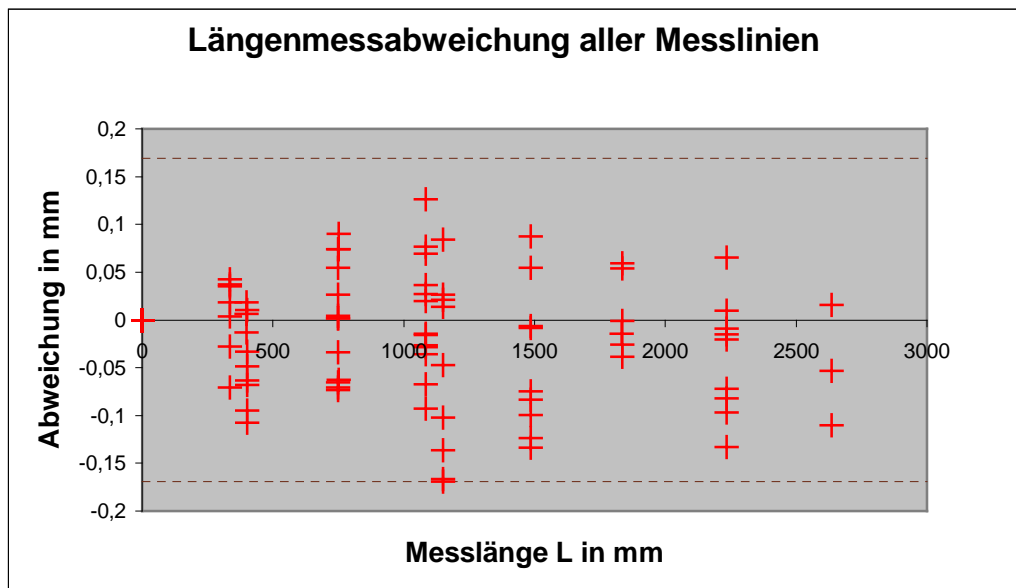
| | |
|----------------------------|--|
| Bilder: | |
| Objektpunkte: | |
| Beobachtungen: | |
| Unbekannte: | |
| zus. Beobachtungen: | |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|--|----|
| X: | | mm |
| Y: | | mm |
| Z: | | mm |
| S: | | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|--|----|
| X: | | mm |
| Y: | | mm |
| Z: | | mm |
| S: | | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|---------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 1...2 | | 0,011 | -0,048 | -0,108 | -0,033 | -0,013 | -0,063 | | | -0,068 |
| 1...3 | | 0,084 | 0,027 | -0,169 | 0,021 | 0,014 | -0,137 | | | -0,102 |
| 1...4 | | 0,088 | | -0,134 | -0,007 | 0,055 | -0,099 | | | -0,084 |
| 1...5 | | | 0,010 | -0,133 | -0,072 | -0,015 | -0,009 | | | -0,082 |
| 1...6 | | | 0,016 | | -0,054 | -0,110 | | | | |
| 2...3 | | 0,074 | 0,074 | -0,062 | 0,054 | 0,027 | -0,073 | 0,004 | | -0,034 |
| 2...4 | | 0,077 | | -0,026 | 0,027 | 0,070 | -0,036 | -0,067 | | -0,016 |
| 2...5 | | | 0,059 | -0,025 | -0,038 | -0,001 | 0,054 | | | -0,014 |
| 2...6 | | | 0,066 | | -0,020 | -0,097 | | | | |
| 3...4 | | 0,004 | | 0,035 | -0,028 | 0,043 | 0,037 | -0,071 | | 0,019 |
| 3...5 | | | -0,015 | 0,037 | -0,093 | -0,028 | 0,127 | | | 0,020 |
| 3...6 | | | -0,008 | | -0,075 | -0,123 | | | | |
| 4...5 | | | | 0,002 | -0,066 | -0,071 | 0,090 | | | 0,002 |
| 4...6 | | | | | -0,047 | -0,166 | | | | |
| 5...6 | | | 0,006 | | 0,019 | -0,095 | | | | |
| gesamt | | | | | | | | | | -0,169 |
| max. | 0,000 | 0,088 | 0,074 | -0,169 | -0,093 | -0,166 | -0,137 | -0,071 | -0,102 | 0,296 |
| Span. | 0,000 | 0,084 | 0,123 | 0,206 | 0,147 | 0,236 | 0,263 | 0,075 | 0,122 | -0,017 |
| mittel | | 0,056 | 0,019 | -0,058 | -0,027 | -0,034 | -0,011 | -0,045 | -0,036 | 0,054 |
| mAbs | | 0,056 | 0,033 | 0,073 | 0,044 | 0,062 | 0,072 | 0,047 | 0,044 | |
| [VV] | 0,000 | 0,026 | 0,017 | 0,084 | 0,037 | 0,090 | 0,068 | 0,010 | 0,031 | |
| RMS | 0,000 | 0,066 | 0,041 | 0,091 | 0,050 | 0,078 | 0,082 | 0,056 | 0,056 | 0,068 |



System C: Vollverband Standard

| | |
|------------------------|--------------|
| Verband: | V-16-8-8-4-4 |
| Kalibrierungen: | |

| | |
|--------------------|----|
| Datum: | |
| Beobachter: | |
| Temperatur: | 21 |

| | |
|------------------|--------------|
| Kamera: | Leica Inca 2 |
| Objektiv: | 17mm |
| Software: | V-Stars |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|-------|--|
| 1000mm | CFK | |
| 1250mm | INVAR | |
| 1250mm | INVAR | |

Ergebnisse der Ausgleichung

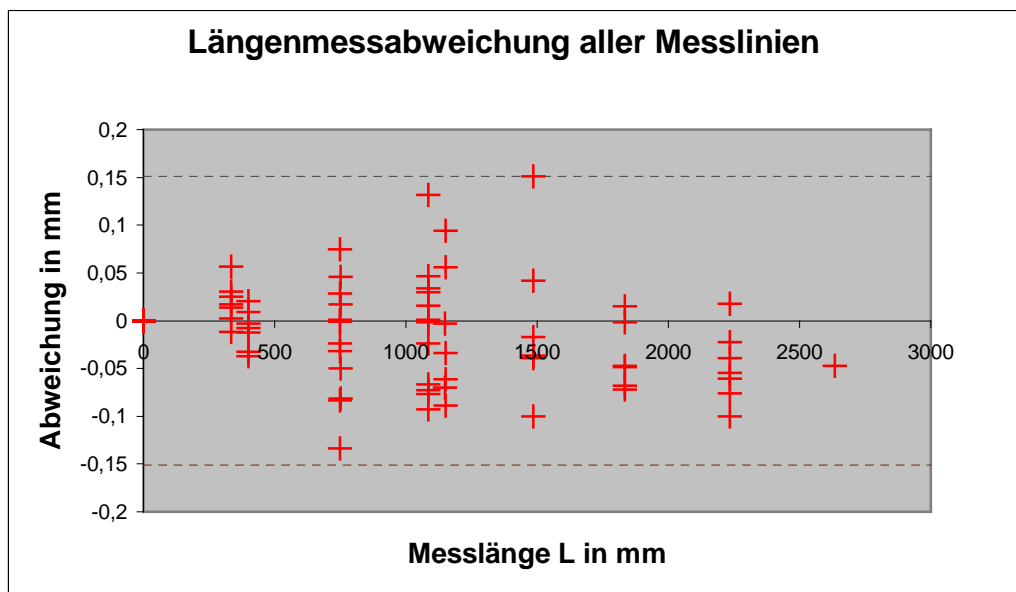
| | |
|----------------------------|-----|
| Bilder: | 40 |
| Objektpunkte: | 228 |
| Beobachtungen: | |
| Unbekannte: | |
| zus. Beobachtungen: | |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,013 | mm |
| Y: | 0,015 | mm |
| Z: | 0,015 | mm |
| S: | 0,025 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,024 | mm |
| Y: | 0,033 | mm |
| Z: | 0,028 | mm |
| S: | 0,049 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|---------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|---------------|
| 1...2 | | | 0,009 | -0,013 | 0,020 | | -0,037 | | | -0,032 |
| 1...3 | | | 0,056 | -0,062 | 0,094 | | -0,070 | | | -0,034 |
| 1...4 | | | 0,042 | -0,036 | 0,151 | | -0,039 | | | -0,017 |
| 1...5 | | | -0,039 | -0,061 | 0,018 | | -0,023 | | | -0,100 |
| 1...6 | | | -0,047 | | | | | | | |
| 2...3 | | | 0,046 | -0,050 | 0,075 | | -0,032 | 0,029 | | -0,001 |
| 2...4 | | | 0,034 | -0,024 | 0,131 | -0,073 | -0,001 | 0,030 | | 0,015 |
| 2...5 | | | -0,047 | -0,048 | -0,002 | -0,072 | 0,015 | | | -0,068 |
| 2...6 | | | -0,055 | | | -0,076 | | | | |
| 3...4 | | 0,013 | -0,012 | 0,025 | 0,056 | | 0,030 | 0,002 | | 0,017 |
| 3...5 | | | -0,093 | 0,001 | -0,077 | | 0,047 | | | -0,066 |
| 3...6 | | | -0,100 | | | | | | | |
| 4...5 | | | -0,081 | -0,024 | -0,133 | 0,001 | 0,017 | | | -0,083 |
| 4...6 | | | -0,089 | | | -0,003 | | | | |
| 5...6 | | | -0,008 | | | -0,003 | | | | |
| | | | | | | | | | | gesamt |
| max. | 0,000 | 0,013 | -0,100 | -0,062 | 0,151 | -0,076 | -0,070 | 0,030 | -0,100 | 0,151 |
| Span. | 0,000 | 0,000 | 0,156 | 0,087 | 0,284 | 0,077 | 0,116 | 0,028 | 0,117 | 0,284 |
| mittel | | 0,013 | -0,026 | -0,029 | 0,033 | -0,038 | -0,009 | 0,020 | -0,037 | -0,009 |
| mAbs | | 0,013 | 0,051 | 0,034 | 0,076 | 0,038 | 0,031 | 0,020 | 0,043 | 0,038 |
| [VV] | 0,000 | 0,000 | 0,051 | 0,016 | 0,082 | 0,016 | 0,013 | 0,002 | 0,029 | |
| RMS | 0,000 | 0,013 | 0,058 | 0,039 | 0,091 | 0,052 | 0,036 | 0,024 | 0,054 | 0,057 |



System C: Vollverband Frei

| | |
|----------------------------|-----------|
| Verband: | Voll-frei |
| Kalibrieraufnahmen: | |

| | |
|--------------------|----|
| Datum: | |
| Beobachter: | |
| Temperatur: | 21 |

| | |
|------------------|--------------|
| Kamera: | Leica Inca 2 |
| Objektiv: | 17mm |
| Software: | V-Stars |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|-------|---------|
| 1000mm | CFK | Gewicht |
| 1250mm | INVAR | |
| 1250mm | INVAR | |

Ergebnisse der Ausgleichung

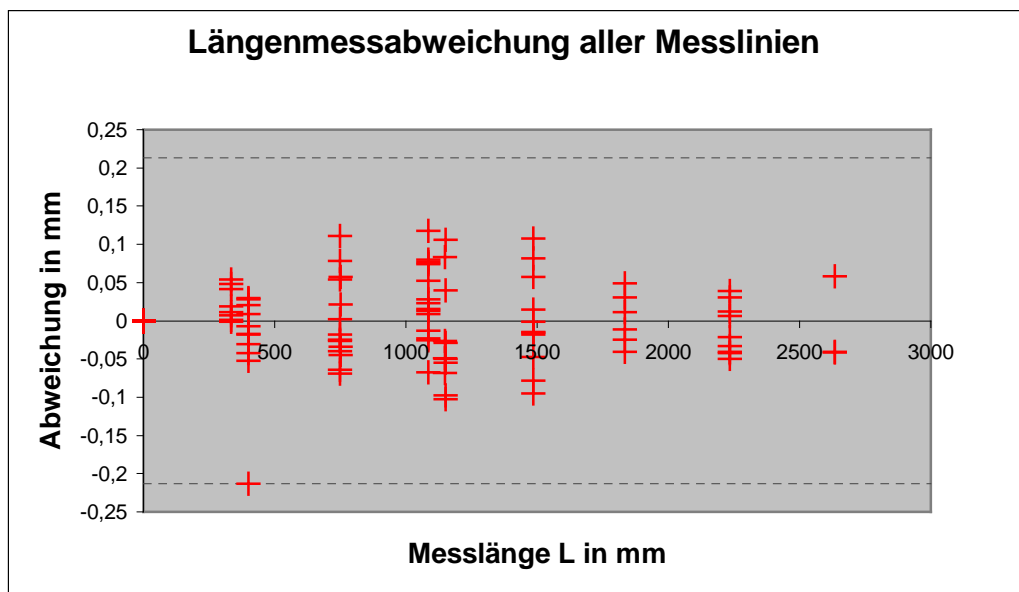
| | |
|----------------------------|-----|
| Bilder: | 165 |
| Objektpunkte: | 230 |
| Beobachtungen: | |
| Unbekannte: | |
| zus. Beobachtungen: | |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,007 | mm |
| Y: | 0,008 | mm |
| Z: | 0,008 | mm |
| S: | 0,013 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,019 | mm |
| Y: | 0,024 | mm |
| Z: | 0,024 | mm |
| S: | 0,039 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|---------------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------|
| 1...2 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | |
| 1...3 | 0,000 | 400,327 | 400,268 | 400,208 | 400,359 | 400,032 | 400,239 | 400,153 | 400,264 | |
| 1...4 | 0,000 | 1150,293 | 1150,374 | 1150,301 | 1150,203 | 1150,011 | 1149,995 | 1149,980 | 1150,104 | |
| 1...5 | 0,000 | 1484,674 | 1484,698 | 1484,628 | 1484,768 | 1484,523 | 1484,478 | 1484,535 | 1484,603 | |
| 1...6 | 0,000 | 0,000 | 2234,712 | 2234,538 | 2234,650 | 2234,342 | 2234,578 | 0,000 | 2234,269 | |
| 2...3 | 0,000 | 0,000 | 2634,721 | 0,000 | 2634,596 | 2634,425 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | |
| 2...4 | 0,000 | 749,966 | 750,108 | 750,094 | 749,843 | 749,979 | 749,755 | 749,827 | 749,839 | |
| 2...5 | 0,000 | 1084,347 | 1084,430 | 1084,421 | 1084,409 | 1084,489 | 1084,239 | 1084,382 | 1084,339 | |
| 2...6 | 0,000 | 0,000 | 1834,444 | 1834,330 | 1834,290 | 1834,308 | 1834,339 | 0,000 | 1834,005 | |
| 3...4 | 0,000 | 0,000 | 2234,452 | 0,000 | 2234,236 | 2234,392 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | |
| 3...5 | 0,000 | 334,380 | 334,322 | 334,327 | 334,566 | 334,510 | 334,484 | 334,554 | 334,500 | |
| 3...6 | 0,000 | 0,000 | 1084,336 | 1084,236 | 1084,448 | 1084,330 | 1084,585 | 0,000 | 1084,166 | |
| 4...5 | 0,000 | 0,000 | 1484,344 | 0,000 | 1484,393 | 1484,413 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | |
| 4...6 | 0,000 | 0,000 | 750,014 | 749,909 | 749,882 | 749,820 | 750,100 | 0,000 | 749,666 | |
| 5...6 | 0,000 | 0,000 | 1150,022 | 0,000 | 1149,827 | 1149,903 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | gesamt |
| max. | 0,000 | 1484,674 | 2634,721 | 2234,538 | 2634,596 | 2634,425 | 2234,578 | 1484,535 | 2234,269 | 2634,721 |
| Span. | 0,000 | 1484,674 | 2634,721 | 2234,538 | 2634,596 | 2634,425 | 2234,578 | 1484,535 | 2234,269 | 2634,721 |
| mittel | 0,000 | 346,932 | 1240,750 | 740,466 | 1240,698 | 1240,632 | 740,453 | 346,895 | 740,384 | 737,468 |
| mAbs | 5...6 | | | 0,053 | | 0,020 | 0,007 | | | 0,027 |
| [VV] | 5...6 | | | 0,003 | | 0,000 | 0,000 | | | |
| RMS | #WERT! | #WERT! | #WERT! | 0,014 | #WERT! | 0,005 | 0,002 | #WERT! | #WERT! | 0,005 |



System C: Halbverband Standard

| | |
|------------------------|--------------|
| Verband: | H-16-8-8-4-4 |
| Kalibrierungen: | |

| | |
|--------------------|----------|
| Datum: | 12.09.00 |
| Beobachter: | |
| Temperatur: | 21 |

| | |
|------------------|--------------|
| Kamera: | Leica Inca 2 |
| Objektiv: | 17mm |
| Software: | V-Stars |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|-------|---------|
| 1000mm | CFK | Gewicht |
| 1250mm | INVAR | |
| 1250mm | INVAR | |

Ergebnisse der Ausgleichung

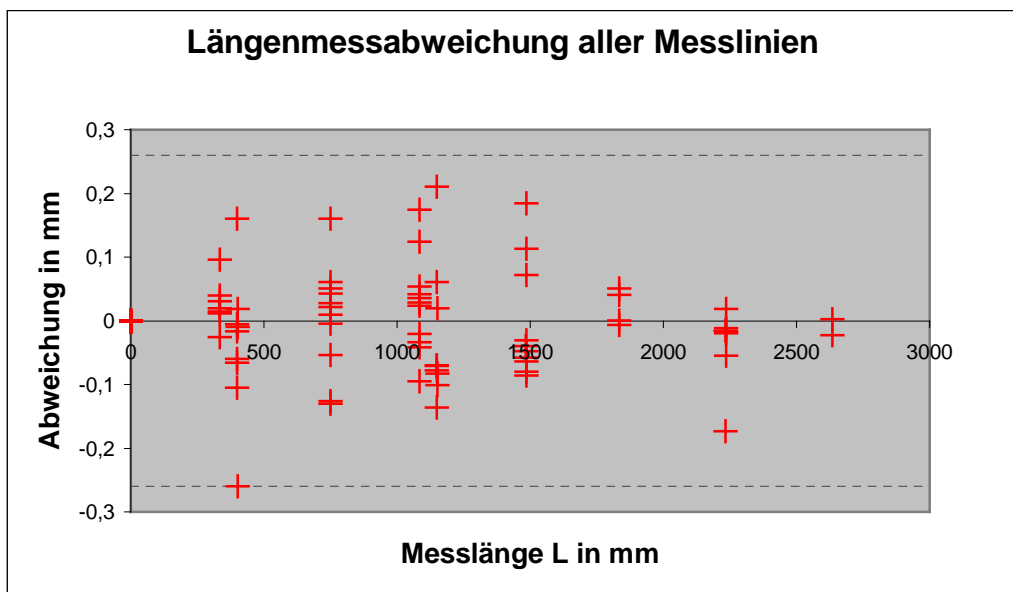
| | |
|----------------------------|-----|
| Bilder: | 30 |
| Objektpunkte: | 211 |
| Beobachtungen: | |
| Unbekannte: | |
| zus. Beobachtungen: | |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,017 | mm |
| Y: | 0,02 | mm |
| Z: | 0,018 | mm |
| S: | 0,032 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | | mm |
| Y: | | mm |
| Z: | | mm |
| S: | 0,000 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|---------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 1...2 | | -0,260 | -0,010 | -0,105 | 0,019 | | -0,060 | 0,161 | | |
| 1...3 | | -0,101 | 0,019 | -0,083 | 0,060 | | | 0,211 | -0,078 | |
| 1...4 | | -0,086 | 0,113 | -0,063 | 0,072 | | -0,080 | 0,184 | -0,047 | |
| 1...5 | | | -0,017 | -0,054 | 0,019 | | -0,019 | | -0,173 | |
| 1...6 | | | -0,023 | | 0,002 | | | | | |
| 2...3 | | 0,160 | 0,028 | 0,022 | 0,042 | | | 0,050 | | |
| 2...4 | | 0,174 | 0,124 | 0,042 | 0,054 | | -0,020 | 0,024 | | |
| 2...5 | | | -0,007 | 0,051 | 0,001 | | 0,041 | | | |
| 2...6 | | | -0,012 | | -0,016 | | | | | |
| 3...4 | | 0,015 | 0,096 | 0,019 | 0,011 | 0,040 | | -0,026 | 0,031 | |
| 3...5 | | | -0,034 | 0,028 | -0,042 | 0,035 | | | -0,095 | |
| 3...6 | | | -0,039 | | -0,058 | -0,031 | | | | |
| 4...5 | | | -0,130 | 0,010 | -0,053 | -0,004 | 0,061 | | -0,126 | |
| 4...6 | | | -0,136 | | -0,070 | -0,071 | | | | |
| 5...6 | | | -0,005 | | -0,016 | -0,066 | | | | |
| max. | 0,000 | -0,260 | -0,136 | -0,105 | 0,072 | -0,071 | -0,080 | 0,211 | -0,173 | -0,260 |
| Span. | 0,000 | 0,434 | 0,260 | 0,156 | 0,142 | 0,111 | 0,141 | 0,237 | 0,204 | 0,471 |
| mittel | | -0,016 | -0,002 | -0,013 | 0,002 | -0,016 | -0,013 | 0,101 | -0,081 | -0,005 |
| mAbs | | 0,133 | 0,053 | 0,048 | 0,036 | 0,041 | 0,047 | 0,109 | 0,092 | 0,070 |
| [VV] | 0,000 | 0,141 | 0,078 | 0,031 | 0,028 | 0,013 | 0,016 | 0,108 | 0,064 | |
| RMS | 0,000 | 0,153 | 0,072 | 0,056 | 0,043 | 0,047 | 0,052 | 0,134 | 0,103 | 0,083 |



System C: Halbverband Frei

| | |
|----------------------------|-----------|
| Verband: | frei Halb |
| Kalibrieraufnahmen: | |

| | |
|--------------------|----|
| Datum: | |
| Beobachter: | |
| Temperatur: | 20 |

| | |
|------------------|--------------|
| Kamera: | Leica Inca 2 |
| Objektiv: | 17mm |
| Software: | V-Stars |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|-------|---------|
| 1000mm | CFK | Gewicht |
| 1250mm | INVAR | |
| 1250mm | INVAR | |

Ergebnisse der Ausgleichung

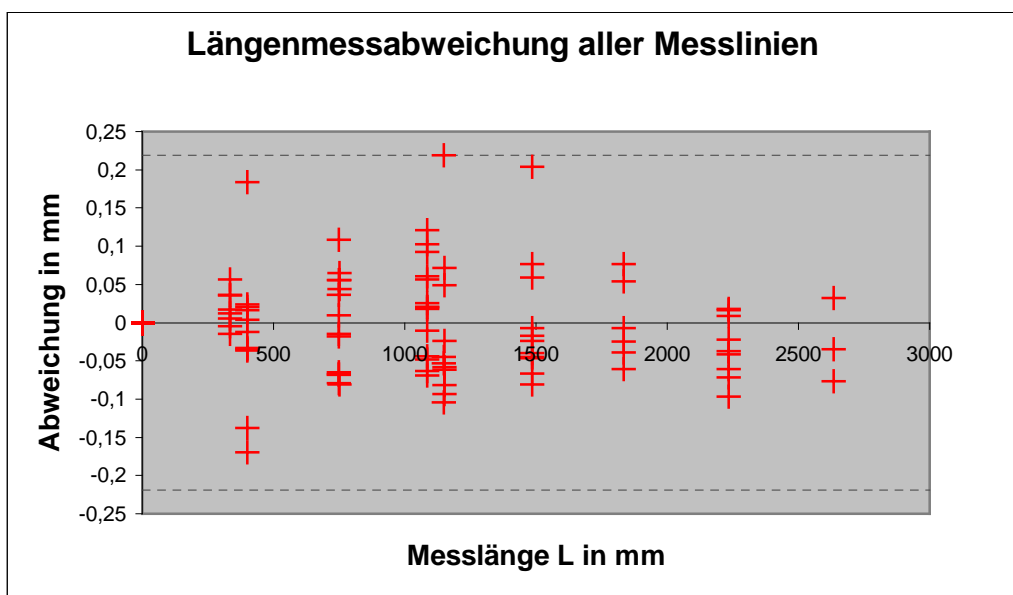
| | |
|----------------------------|-----|
| Bilder: | 120 |
| Objektpunkte: | 211 |
| Beobachtungen: | |
| Unbekannte: | |
| zus. Beobachtungen: | |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,009 | mm |
| Y: | 0,011 | mm |
| Z: | 0,011 | mm |
| S: | 0,018 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|--|----|
| X: | | mm |
| Y: | | mm |
| Z: | | mm |
| S: | | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|---------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| 1...2 | | -0,170 | 0,003 | -0,138 | 0,016 | 0,021 | -0,036 | 0,183 | -0,033 | |
| 1...3 | | -0,062 | 0,049 | -0,081 | 0,071 | -0,058 | -0,104 | 0,219 | -0,024 | |
| 1...4 | | -0,067 | 0,059 | -0,045 | 0,077 | -0,024 | -0,047 | 0,204 | -0,007 | |
| 1...5 | | | -0,022 | -0,060 | 0,009 | -0,041 | 0,018 | | -0,072 | |
| 1...6 | | | -0,035 | | 0,032 | -0,077 | | | | |
| 2...3 | | 0,108 | 0,044 | 0,056 | 0,056 | -0,079 | -0,068 | 0,036 | 0,009 | |
| 2...4 | | 0,103 | 0,056 | 0,093 | 0,061 | -0,044 | -0,011 | 0,021 | 0,026 | |
| 2...5 | | | -0,025 | 0,077 | -0,007 | -0,061 | 0,054 | | -0,039 | |
| 2...6 | | | -0,037 | | 0,016 | -0,097 | | | | |
| 3...4 | | -0,005 | 0,012 | 0,036 | 0,005 | 0,035 | 0,057 | -0,014 | 0,017 | |
| 3...5 | | | -0,069 | 0,021 | -0,063 | 0,018 | 0,121 | | -0,048 | |
| 3...6 | | | -0,081 | | -0,040 | -0,017 | | | | |
| 4...5 | | | -0,081 | -0,015 | -0,068 | -0,018 | 0,065 | | -0,065 | |
| 4...6 | | | -0,093 | | -0,045 | -0,053 | | | | |
| 5...6 | | | -0,012 | | 0,024 | -0,035 | | | | |
| gesamt | | | | | | | | | | 0,219 |
| max. | 0,000 | -0,170 | -0,093 | -0,138 | 0,077 | -0,097 | 0,121 | 0,219 | -0,072 | 0,389 |
| Span. | 0,000 | 0,278 | 0,152 | 0,231 | 0,145 | 0,132 | 0,225 | 0,234 | 0,098 | 0,003 |
| mittel | | -0,015 | -0,015 | -0,006 | 0,010 | -0,035 | 0,005 | 0,108 | -0,023 | 0,060 |
| mAbs | | 0,086 | 0,045 | 0,062 | 0,039 | 0,045 | 0,058 | 0,113 | 0,034 | |
| [VV] | 0,000 | 0,059 | 0,041 | 0,051 | 0,032 | 0,040 | 0,044 | 0,125 | 0,016 | |
| RMS | 0,000 | 0,100 | 0,053 | 0,071 | 0,046 | 0,051 | 0,067 | 0,145 | 0,040 | 0,069 |



System D: Vollverband Standard (Beobachter1-Kamera1)

| | |
|----------------------------|--------------|
| Verband: | V-16-8-8-4-4 |
| Kalibrieraufnahmen: | 3-4 |

| | |
|--------------------|----------|
| Datum: | 07.09.00 |
| Beobachter: | B1 |
| Temperatur: | 20 |

| | |
|------------------|-----------------|
| Kamera: | INKA 1 (Nr. 86) |
| Objektiv: | |
| Software: | |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|-------|--|
| 1000mm | CFK | |
| 640mm | Stahl | |
| 840mm | Stahl | |
| 1040mm | Stahl | |

Ergebnisse der Ausgleichung

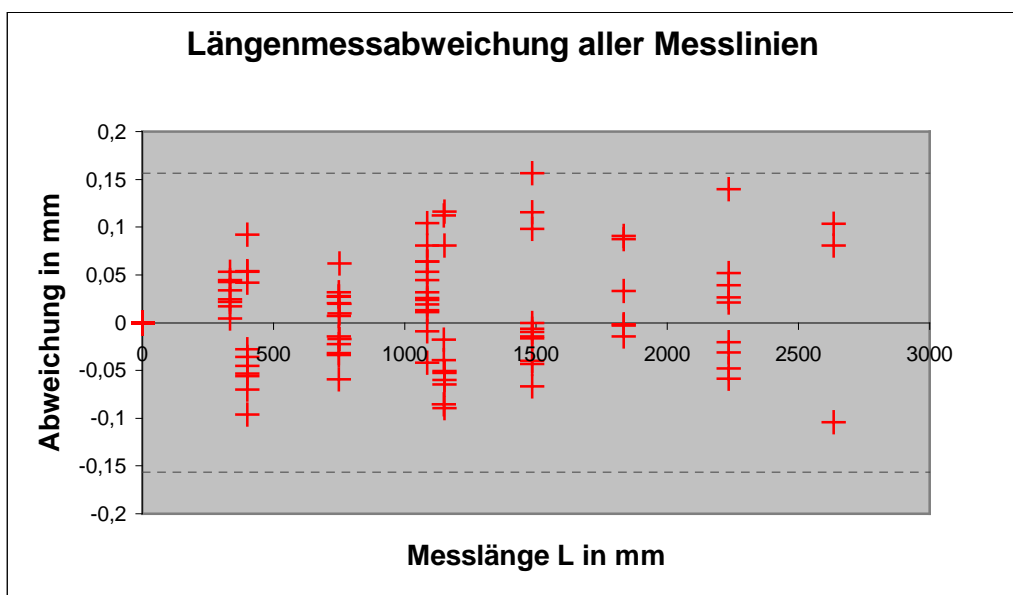
| | |
|----------------------------|-----|
| Bilder: | 46 |
| Objektpunkte: | 238 |
| Beobachtungen: | |
| Unbekannte: | |
| zus. Beobachtungen: | |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,024 | mm |
| Y: | 0,024 | mm |
| Z: | 0,021 | mm |
| S: | 0,040 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,077 | mm |
| Y: | 0,076 | mm |
| Z: | 0,056 | mm |
| S: | 0,122 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|---------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------------|
| 1...2 | | -0,096 | 0,053 | -0,070 | 0,054 | -0,056 | -0,053 | 0,092 | -0,028 | |
| 1...3 | | -0,064 | 0,116 | -0,060 | 0,081 | -0,089 | -0,085 | 0,112 | -0,051 | |
| 1...4 | | -0,043 | 0,157 | -0,006 | 0,098 | -0,067 | -0,040 | 0,116 | -0,017 | |
| 1...5 | | | 0,140 | 0,021 | 0,039 | -0,059 | -0,020 | | -0,031 | |
| 1...6 | | | 0,104 | | 0,081 | -0,104 | | | | |
| 2...3 | | 0,032 | 0,062 | 0,010 | 0,027 | -0,034 | -0,032 | 0,020 | -0,022 | |
| 2...4 | | 0,053 | 0,104 | 0,064 | 0,045 | -0,009 | 0,013 | 0,024 | 0,011 | |
| 2...5 | | | 0,087 | 0,091 | -0,015 | -0,001 | 0,033 | | -0,003 | |
| 2...6 | | | 0,052 | | 0,027 | -0,048 | | | | |
| 3...4 | | 0,022 | 0,043 | 0,053 | 0,017 | 0,024 | 0,045 | 0,004 | 0,034 | |
| 3...5 | | | 0,026 | 0,081 | -0,042 | 0,032 | 0,064 | | 0,019 | |
| 3...6 | | | -0,010 | | -0,001 | -0,014 | | | | |
| 4...5 | | | -0,017 | 0,027 | -0,060 | 0,007 | 0,020 | | -0,014 | |
| 4...6 | | | -0,053 | | -0,018 | -0,039 | | | | |
| 5...6 | | | -0,036 | | 0,042 | -0,045 | | | | |
| gesamt | | | | | | | | | | 0,157 |
| max. | 0,000 | -0,096 | 0,157 | 0,091 | 0,098 | -0,104 | -0,085 | 0,116 | -0,051 | 0,261 |
| Span. | 0,000 | 0,149 | 0,209 | 0,161 | 0,158 | 0,136 | 0,149 | 0,112 | 0,084 | 0,012 |
| mittel | | -0,016 | 0,055 | 0,021 | 0,025 | -0,033 | -0,005 | 0,061 | -0,010 | 0,048 |
| mAbs | | 0,052 | 0,070 | 0,048 | 0,043 | 0,042 | 0,041 | 0,061 | 0,023 | |
| [VV] | 0,000 | 0,020 | 0,103 | 0,031 | 0,039 | 0,039 | 0,021 | 0,036 | 0,007 | |
| RMS | 0,000 | 0,057 | 0,083 | 0,056 | 0,051 | 0,051 | 0,046 | 0,077 | 0,026 | 0,058 |



System D: Vollverband Standard (Beobachter2-Kamera2)

| | |
|----------------------------|--------------|
| Verband: | V-16-8-8-4-4 |
| Kalibrieraufnahmen: | 3-4 |

| | |
|--------------------|----------|
| Datum: | 07.09.00 |
| Beobachter: | B2 |
| Temperatur: | 20 |

| | |
|------------------|-----------------|
| Kamera: | INKA 1 (Nr. 85) |
| Objektiv: | |
| Software: | |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|-------|--|
| 1000mm | CFK | |
| 640mm | Stahl | |
| 840mm | Stahl | |
| 1040mm | Stahl | |

Ergebnisse der Ausgleichung

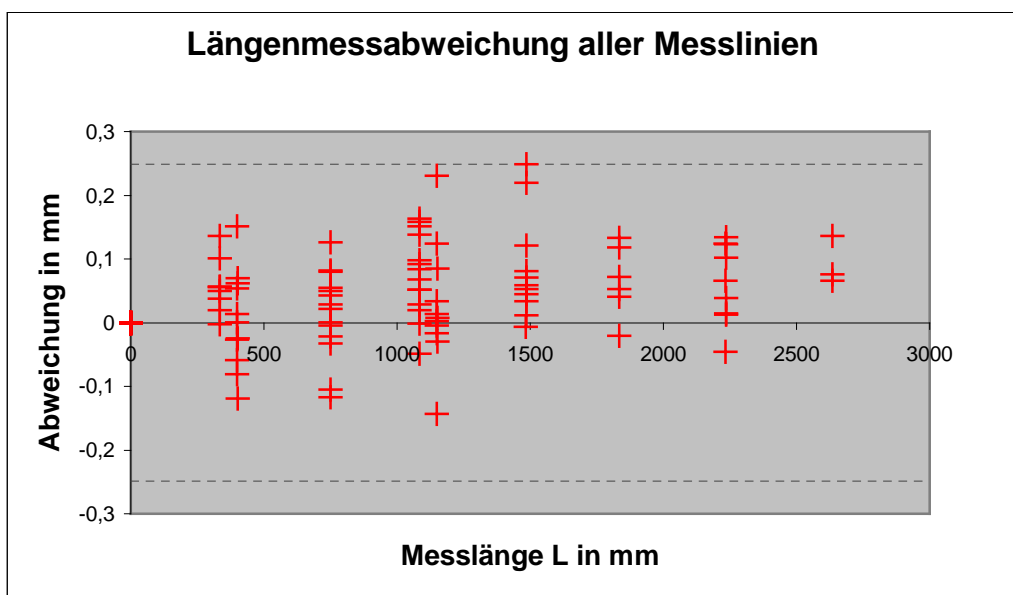
| | |
|----------------------------|-----|
| Bilder: | 50 |
| Objektpunkte: | 236 |
| Beobachtungen: | |
| Unbekannte: | |
| zus. Beobachtungen: | |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,024 | mm |
| Y: | 0,022 | mm |
| Z: | 0,021 | mm |
| S: | 0,039 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,072 | mm |
| Y: | 0,077 | mm |
| Z: | 0,059 | mm |
| S: | 0,121 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|---------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------------|
| 1...2 | | -0,119 | 0,062 | -0,081 | 0,070 | 0,054 | 0,001 | 0,151 | -0,025 | |
| 1...3 | | 0,007 | 0,085 | -0,030 | 0,124 | 0,033 | -0,004 | 0,230 | 0,003 | |
| 1...4 | | 0,045 | 0,219 | 0,071 | 0,122 | 0,081 | 0,053 | 0,249 | 0,059 | |
| 1...5 | | | 0,102 | 0,038 | 0,123 | 0,125 | 0,134 | | -0,046 | |
| 1...6 | | | 0,075 | | 0,136 | 0,066 | | | | |
| 2...3 | | 0,126 | 0,022 | 0,050 | 0,055 | -0,021 | -0,005 | 0,079 | 0,028 | |
| 2...4 | | 0,163 | 0,158 | 0,152 | 0,052 | 0,029 | 0,052 | 0,098 | 0,084 | |
| 2...5 | | | 0,040 | 0,119 | 0,053 | 0,072 | 0,134 | | -0,021 | |
| 2...6 | | | 0,014 | | 0,066 | 0,012 | | | | |
| 3...4 | | 0,038 | 0,137 | 0,101 | -0,003 | 0,050 | 0,056 | 0,019 | 0,056 | |
| 3...5 | | | 0,019 | 0,068 | -0,002 | 0,092 | 0,138 | | -0,049 | |
| 3...6 | | | -0,007 | | 0,011 | 0,033 | | | | |
| 4...5 | | | -0,117 | -0,032 | 0,001 | 0,043 | 0,082 | | -0,105 | |
| 4...6 | | | -0,143 | | 0,014 | -0,017 | | | | |
| 5...6 | | | -0,026 | | 0,014 | -0,058 | | | | |
| | | | | | | | | | | gesamt |
| max. | 0,000 | 0,163 | 0,219 | 0,152 | 0,136 | 0,125 | 0,138 | 0,249 | -0,105 | 0,249 |
| Span. | 0,000 | 0,282 | 0,362 | 0,232 | 0,139 | 0,183 | 0,142 | 0,229 | 0,189 | 0,391 |
| mittel | | 0,043 | 0,043 | 0,046 | 0,056 | 0,040 | 0,064 | 0,138 | -0,002 | 0,053 |
| mAbs | | 0,083 | 0,082 | 0,074 | 0,056 | 0,052 | 0,066 | 0,138 | 0,048 | 0,075 |
| [VV] | 0,000 | 0,060 | 0,156 | 0,069 | 0,082 | 0,055 | 0,070 | 0,154 | 0,031 | |
| RMS | 0,000 | 0,100 | 0,102 | 0,083 | 0,074 | 0,060 | 0,084 | 0,160 | 0,056 | 0,088 |



System D: Vollverband Frei (Beobachter1-Kamera2)

| | |
|----------------------------|-------------|
| Verband: | frei Rundum |
| Kalibrieraufnahmen: | |

| | |
|--------------------|----------|
| Datum: | 07.09.00 |
| Beobachter: | B1 |
| Temperatur: | 20 |

| | |
|------------------|-----------------|
| Kamera: | INKA 1 (Nr. 85) |
| Objektiv: | |
| Software: | |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|-------|--|
| 1000mm | CFK | |
| 640mm | Stahl | |
| 840mm | Stahl | |
| 1040mm | Stahl | |

Ergebnisse der Ausgleichung

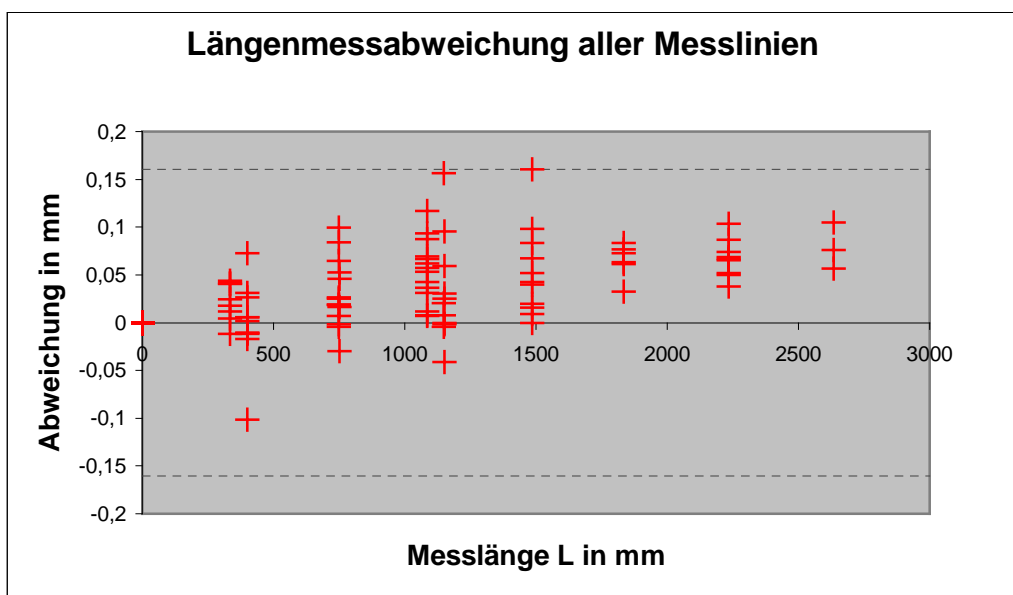
| | |
|----------------------------|-----|
| Bilder: | 175 |
| Objektpunkte: | 239 |
| Beobachtungen: | |
| Unbekannte: | |
| zus. Beobachtungen: | |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,012 | mm |
| Y: | 0,011 | mm |
| Z: | 0,01 | mm |
| S: | 0,019 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,028 | mm |
| Y: | 0,03 | mm |
| Z: | 0,019 | mm |
| S: | 0,045 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|---------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------------|
| 1...2 | | -0,101 | 0,006 | -0,017 | 0,031 | 0,026 | -0,011 | 0,073 | 0,006 | |
| 1...3 | | -0,002 | 0,059 | 0,000 | 0,095 | 0,025 | -0,004 | 0,156 | 0,031 | |
| 1...4 | | 0,016 | 0,098 | 0,040 | 0,084 | 0,067 | 0,020 | 0,160 | 0,042 | |
| 1...5 | | | 0,068 | 0,067 | 0,103 | 0,087 | 0,065 | | 0,038 | |
| 1...6 | | | 0,056 | | 0,105 | 0,076 | | | | |
| 2...3 | | 0,100 | 0,052 | 0,016 | 0,065 | -0,001 | 0,007 | 0,084 | 0,025 | |
| 2...4 | | 0,117 | 0,093 | 0,058 | 0,053 | 0,042 | 0,031 | 0,088 | 0,036 | |
| 2...5 | | | 0,063 | 0,084 | 0,073 | 0,061 | 0,077 | | 0,032 | |
| 2...6 | | | 0,052 | | 0,074 | 0,050 | | | | |
| 3...4 | | 0,018 | 0,041 | 0,040 | -0,012 | 0,044 | 0,024 | 0,005 | 0,012 | |
| 3...5 | | | 0,012 | 0,067 | 0,008 | 0,062 | 0,069 | | 0,007 | |
| 3...6 | | | 0,000 | | 0,009 | 0,052 | | | | |
| 4...5 | | | -0,030 | 0,027 | 0,019 | 0,019 | 0,046 | | -0,004 | |
| 4...6 | | | -0,041 | | 0,021 | 0,008 | | | | |
| 5...6 | | | -0,012 | | 0,002 | -0,010 | | | | |
| gesamt | | | | | | | | | | 0,160 |
| max. | 0,000 | 0,117 | 0,098 | 0,084 | 0,105 | 0,087 | 0,077 | 0,160 | 0,042 | 0,262 |
| Span. | 0,000 | 0,218 | 0,140 | 0,101 | 0,116 | 0,097 | 0,088 | 0,156 | 0,047 | 0,442 |
| mittel | | 0,024 | 0,035 | 0,038 | 0,049 | 0,041 | 0,032 | 0,094 | 0,023 | 0,049 |
| mAbs | | 0,059 | 0,046 | 0,042 | 0,050 | 0,042 | 0,036 | 0,094 | 0,023 | 0,058 |
| [VV] | 0,000 | 0,034 | 0,044 | 0,024 | 0,057 | 0,036 | 0,019 | 0,070 | 0,007 | |
| RMS | 0,000 | 0,076 | 0,054 | 0,049 | 0,062 | 0,049 | 0,044 | 0,108 | 0,027 | 0,058 |



System D: Vollverband Frei (Beobachter1-Kamera1)

| | |
|----------------------------|-------------|
| Verband: | Frei Rundum |
| Kalibrieraufnahmen: | |

| | |
|--------------------|----------|
| Datum: | 07.09.00 |
| Beobachter: | B1 |
| Temperatur: | 20 |

| | |
|------------------|-----------------|
| Kamera: | INKA 1 (Nr. 86) |
| Objektiv: | |
| Software: | |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|-------|--|
| 1000mm | CFK | |
| 640mm | Stahl | |
| 840mm | Stahl | |
| 1040mm | Stahl | |

Ergebnisse der Ausgleichung

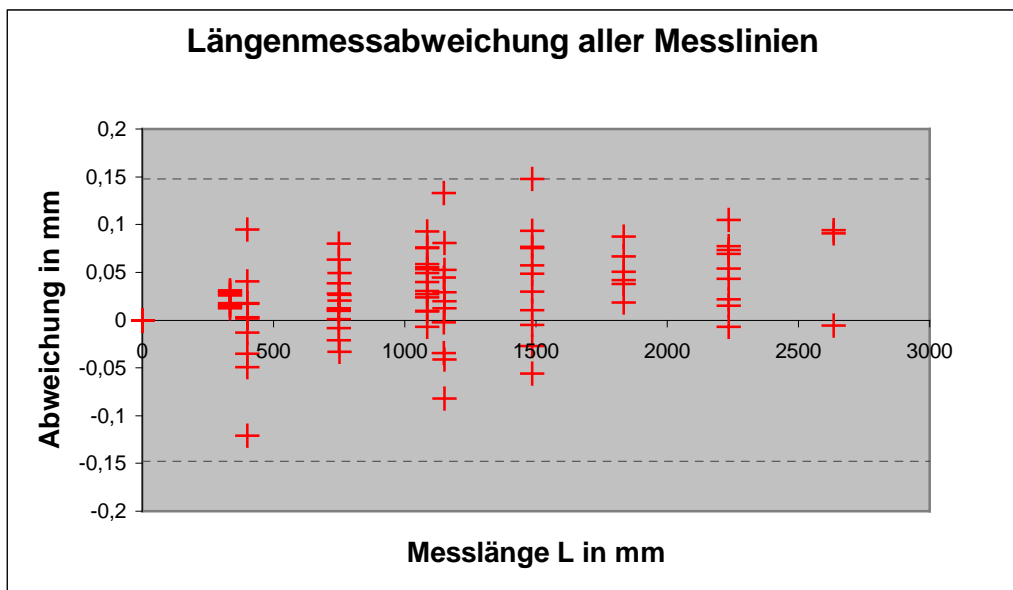
| | |
|----------------------------|-----|
| Bilder: | 146 |
| Objektpunkte: | 240 |
| Beobachtungen: | |
| Unbekannte: | |
| zus. Beobachtungen: | |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,02 | mm |
| Y: | 0,019 | mm |
| Z: | 0,015 | mm |
| S: | 0,031 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,029 | mm |
| Y: | 0,077 | mm |
| Z: | 0,031 | mm |
| S: | 0,088 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|---------------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------------|
| 1...2 | | -0,121 | 0,002 | 0,002 | 0,018 | 0,041 | -0,035 | 0,095 | 0,003 | |
| 1...3 | | -0,041 | 0,052 | 0,029 | 0,081 | 0,020 | -0,035 | 0,133 | 0,012 | |
| 1...4 | | -0,027 | 0,076 | 0,057 | 0,093 | 0,049 | -0,005 | 0,148 | 0,030 | |
| 1...5 | | | 0,043 | 0,069 | 0,105 | 0,078 | 0,015 | | 0,022 | |
| 1...6 | | | -0,006 | | 0,091 | 0,094 | | | | |
| 2...3 | | 0,080 | 0,049 | 0,026 | 0,063 | -0,021 | 0,001 | 0,038 | 0,010 | |
| 2...4 | | 0,093 | 0,075 | 0,055 | 0,076 | 0,010 | 0,031 | 0,053 | 0,027 | |
| 2...5 | | | 0,042 | 0,067 | 0,087 | 0,038 | 0,051 | | 0,019 | |
| 2...6 | | | -0,007 | | 0,073 | 0,054 | | | | |
| 3...4 | | 0,014 | 0,026 | 0,028 | 0,013 | 0,031 | 0,030 | 0,016 | 0,017 | |
| 3...5 | | | -0,007 | 0,040 | 0,024 | 0,059 | 0,049 | | 0,009 | |
| 3...6 | | | -0,056 | | 0,010 | 0,075 | | | | |
| 4...5 | | | -0,033 | 0,013 | 0,011 | 0,028 | 0,020 | | -0,008 | |
| 4...6 | | | -0,082 | | -0,003 | 0,044 | | | | |
| 5...6 | | | -0,049 | | -0,013 | 0,017 | | | | |
| gesamt | | | | | | | | | | 0,148 |
| max. | 0,000 | -0,121 | -0,082 | 0,069 | 0,105 | 0,094 | 0,051 | 0,148 | 0,030 | 0,269 |
| Span. | 0,000 | 0,214 | 0,159 | 0,067 | 0,118 | 0,116 | 0,086 | 0,132 | 0,038 | 0,030 |
| mittel | | 0,000 | 0,008 | 0,039 | 0,049 | 0,041 | 0,012 | 0,081 | 0,014 | 0,045 |
| mAbs | | 0,063 | 0,040 | 0,039 | 0,051 | 0,044 | 0,027 | 0,081 | 0,016 | 0,053 |
| [VV] | 0,000 | 0,032 | 0,034 | 0,020 | 0,059 | 0,037 | 0,010 | 0,053 | 0,003 | |
| RMS | 0,000 | 0,073 | 0,048 | 0,044 | 0,063 | 0,050 | 0,032 | 0,094 | 0,018 | 0,053 |



System D: Vollverband Frei (Beobachter2-Kamera1)

| | |
|----------------------------|-----------|
| Verband: | frei Halb |
| Kalibrieraufnahmen: | |

| | |
|--------------------|----------|
| Datum: | 07.09.00 |
| Beobachter: | B2 |
| Temperatur: | 20 |

| | |
|------------------|-----------------|
| Kamera: | INKA 1 (Nr. 86) |
| Objektiv: | |
| Software: | |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|-------|--|
| 1000mm | CFK | |
| 640mm | Stahl | |
| 840mm | Stahl | |
| 1040mm | Stahl | |

Ergebnisse der Ausgleichung

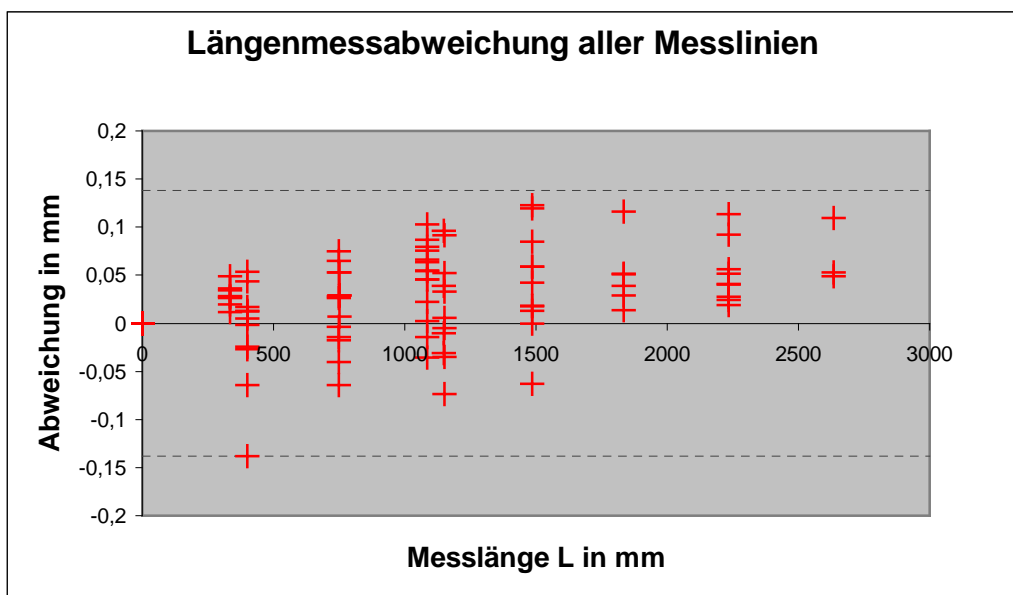
| | |
|----------------------------|-----|
| Bilder: | 127 |
| Objektpunkte: | 240 |
| Beobachtungen: | |
| Unbekannte: | |
| zus. Beobachtungen: | |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,018 | mm |
| Y: | 0,021 | mm |
| Z: | 0,016 | mm |
| S: | 0,032 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,045 | mm |
| Y: | 0,042 | mm |
| Z: | 0,071 | mm |
| S: | 0,094 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|---------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|---------------|
| 1...2 | | -0,138 | -0,002 | -0,024 | 0,017 | 0,012 | -0,027 | 0,043 | 0,005 | |
| 1...3 | | -0,074 | 0,052 | 0,005 | 0,091 | -0,005 | -0,031 | 0,096 | 0,033 | |
| 1...4 | | -0,063 | 0,085 | 0,042 | 0,119 | 0,013 | 0,018 | 0,122 | 0,059 | |
| 1...5 | | | 0,113 | 0,027 | 0,056 | 0,040 | 0,024 | | 0,019 | |
| 1...6 | | | 0,049 | | 0,109 | 0,053 | | | | |
| 2...3 | | 0,065 | 0,053 | 0,029 | 0,075 | -0,017 | -0,003 | 0,053 | 0,028 | |
| 2...4 | | 0,076 | 0,087 | 0,066 | 0,103 | 0,002 | 0,045 | 0,079 | 0,054 | |
| 2...5 | | | 0,116 | 0,051 | 0,039 | 0,029 | 0,052 | | 0,014 | |
| 2...6 | | | 0,052 | | 0,092 | 0,041 | | | | |
| 3...4 | | 0,011 | 0,034 | 0,036 | 0,028 | 0,019 | 0,049 | 0,027 | 0,026 | |
| 3...5 | | | 0,063 | 0,022 | -0,036 | 0,046 | 0,055 | | -0,014 | |
| 3...6 | | | -0,001 | | 0,018 | 0,059 | | | | |
| 4...5 | | | 0,029 | -0,014 | -0,064 | 0,026 | 0,007 | | -0,040 | |
| 4...6 | | | -0,035 | | -0,010 | 0,039 | | | | |
| 5...6 | | | -0,064 | | 0,054 | 0,013 | | | | |
| | | | | | | | | | | gesamt |
| max. | 0,000 | -0,138 | 0,116 | 0,066 | 0,119 | 0,059 | 0,055 | 0,122 | 0,059 | -0,138 |
| Span. | 0,000 | 0,214 | 0,180 | 0,090 | 0,183 | 0,076 | 0,086 | 0,095 | 0,099 | 0,261 |
| mittel | | -0,020 | 0,042 | 0,024 | 0,046 | 0,025 | 0,019 | 0,070 | 0,018 | 0,028 |
| mAbs | | 0,071 | 0,056 | 0,032 | 0,061 | 0,028 | 0,031 | 0,070 | 0,029 | 0,047 |
| [VV] | 0,000 | 0,039 | 0,063 | 0,013 | 0,074 | 0,016 | 0,013 | 0,036 | 0,011 | |
| RMS | 0,000 | 0,080 | 0,065 | 0,036 | 0,070 | 0,033 | 0,036 | 0,077 | 0,034 | 0,055 |



System D: Halbverband Standard (Beobachter1 Kamera1)

| | |
|----------------------------|-------------|
| Verband: | H16-8-8-4-4 |
| Kalibrieraufnahmen: | 3.4 |

| | |
|--------------------|----------|
| Datum: | 07.09.00 |
| Beobachter: | B1 |
| Temperatur: | 20 |

| | |
|------------------|-----------------|
| Kamera: | INKA 1 (Nr. 86) |
| Objektiv: | |
| Software: | |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|-------|--|
| 1000mm | CFK | |
| 640mm | Stahl | |
| 840mm | Stahl | |
| 1040mm | Stahl | |

Ergebnisse der Ausgleichung

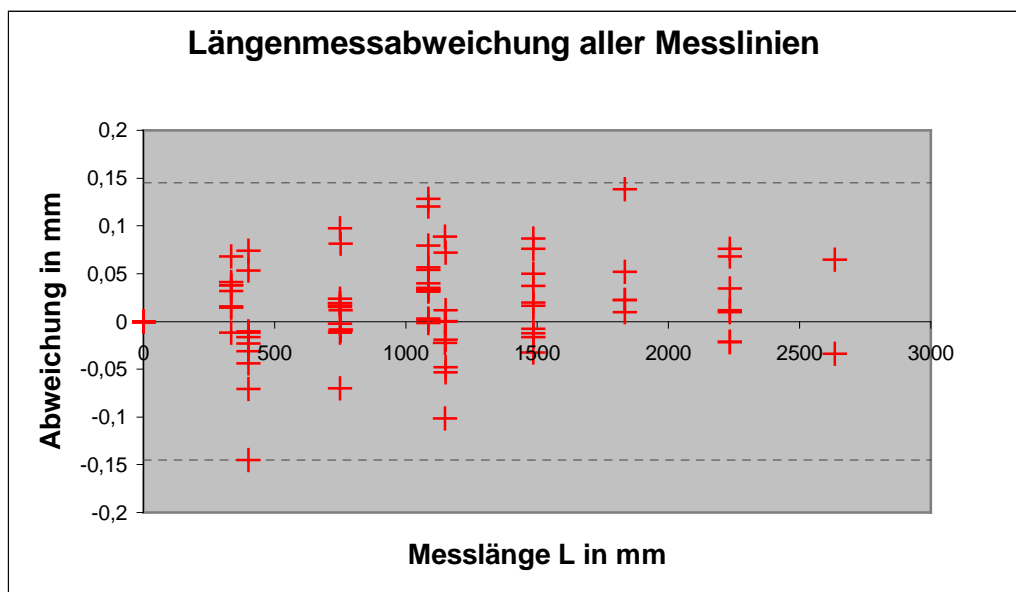
| | |
|----------------------------|-----|
| Bilder: | 33 |
| Objektpunkte: | 204 |
| Beobachtungen: | |
| Unbekannte: | |
| zus. Beobachtungen: | |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,024 | mm |
| Y: | 0,034 | mm |
| Z: | 0,03 | mm |
| S: | 0,051 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,064 | mm |
| Y: | 0,179 | mm |
| Z: | 0,145 | mm |
| S: | 0,239 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|---------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 1...2 | | -0,145 | -0,012 | -0,071 | 0,054 | | -0,031 | 0,074 | -0,023 | |
| 1...3 | | -0,048 | -0,019 | 0,012 | 0,072 | | -0,101 | 0,089 | 0,000 | |
| 1...4 | | -0,017 | 0,020 | 0,050 | 0,087 | | -0,033 | 0,076 | 0,016 | |
| 1...5 | | | 0,010 | 0,068 | 0,076 | | -0,022 | | | |
| 1...6 | | | -0,034 | | 0,065 | | | | | |
| 2...3 | | 0,097 | -0,009 | 0,081 | 0,019 | -0,003 | -0,070 | 0,015 | 0,024 | |
| 2...4 | | 0,128 | 0,032 | 0,120 | 0,034 | 0,035 | -0,002 | 0,002 | 0,040 | |
| 2...5 | | | 0,022 | 0,138 | 0,023 | 0,052 | 0,010 | | | |
| 2...6 | | | -0,021 | | 0,012 | 0,035 | | | | |
| 3...4 | | 0,032 | 0,041 | 0,038 | 0,015 | 0,038 | 0,068 | -0,012 | 0,016 | |
| 3...5 | | | 0,031 | 0,057 | 0,003 | 0,054 | 0,079 | | | |
| 3...6 | | | -0,012 | | -0,008 | 0,037 | | | | |
| 4...5 | | | -0,010 | 0,019 | -0,012 | 0,017 | 0,012 | | | |
| 4...6 | | | -0,054 | | -0,022 | -0,001 | | | | |
| 5...6 | | | -0,044 | | -0,010 | -0,016 | | | | |
| | | | | | | | | | | gesamt |
| max. | 0,000 | -0,145 | -0,054 | 0,138 | 0,087 | 0,054 | -0,101 | 0,089 | 0,040 | -0,145 |
| Span. | 0,000 | 0,273 | 0,095 | 0,209 | 0,109 | 0,070 | 0,181 | 0,101 | 0,063 | 0,284 |
| mittel | | 0,008 | -0,004 | 0,051 | 0,027 | 0,025 | -0,009 | 0,041 | 0,012 | 0,019 |
| mAbs | | 0,078 | 0,025 | 0,065 | 0,034 | 0,029 | 0,043 | 0,045 | 0,020 | 0,042 |
| [VV] | 0,000 | 0,051 | 0,012 | 0,057 | 0,029 | 0,011 | 0,029 | 0,020 | 0,003 | |
| RMS | 0,000 | 0,092 | 0,028 | 0,076 | 0,044 | 0,034 | 0,054 | 0,057 | 0,023 | 0,052 |



System D: Halbverband Frei (Beobachter1 Kamera1)

| | |
|----------------------------|-----------|
| Verband: | Frei Halb |
| Kalibrieraufnahmen: | 3-4 |

| | |
|--------------------|----------|
| Datum: | 07.09.00 |
| Beobachter: | B1 |
| Temperatur: | 20 |

| | |
|------------------|-----------------|
| Kamera: | INKA 1 (Nr. 86) |
| Objektiv: | |
| Software: | |
| Version: | |

| eingeführte Maßstäbe | | |
|----------------------|-------|--|
| 1000mm | CFK | |
| 640mm | Stahl | |
| 840mm | Stahl | |
| 1040mm | Stahl | |

Ergebnisse der Ausgleichung

| | |
|----------------------------|-----|
| Bilder: | 98 |
| Objektpunkte: | 214 |
| Beobachtungen: | |
| Unbekannte: | |
| zus. Beobachtungen: | |

| Mittlere Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,02 | mm |
| Y: | 0,03 | mm |
| Z: | 0,023 | mm |
| S: | 0,043 | mm |

| Maximale Standardabweichungen: | | |
|--------------------------------|-------|----|
| X: | 0,039 | mm |
| Y: | 0,097 | mm |
| Z: | 0,047 | mm |
| S: | 0,115 | mm |

Längenmessabweichung

| | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | |
|---------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| 1...2 | | -0,116 | 0,001 | -0,065 | 0,013 | -0,009 | -0,054 | 0,189 | -0,047 | |
| 1...3 | | -0,052 | 0,018 | -0,083 | 0,073 | -0,022 | -0,074 | 0,225 | -0,025 | |
| 1...4 | | -0,023 | 0,066 | -0,023 | 0,084 | 0,010 | -0,026 | 0,223 | -0,008 | |
| 1...5 | | | 0,045 | -0,019 | 0,066 | 0,009 | 0,016 | | -0,037 | |
| 1...6 | | | -0,012 | | 0,048 | | | | | |
| 2...3 | | 0,065 | 0,017 | -0,020 | 0,060 | -0,013 | -0,020 | 0,036 | 0,023 | |
| 2...4 | | 0,093 | 0,067 | 0,041 | 0,071 | 0,020 | 0,028 | 0,034 | 0,040 | |
| 2...5 | | | 0,046 | 0,045 | 0,054 | 0,019 | 0,070 | | 0,010 | |
| 2...6 | | | -0,012 | | 0,035 | -0,008 | | | | |
| 3...4 | | 0,029 | 0,050 | 0,060 | 0,010 | 0,033 | 0,048 | -0,001 | 0,017 | |
| 3...5 | | | 0,029 | 0,064 | -0,007 | 0,032 | 0,090 | | -0,013 | |
| 3...6 | | | -0,028 | | -0,025 | 0,006 | | | | |
| 4...5 | | | -0,021 | 0,004 | -0,018 | -0,001 | 0,042 | | -0,030 | |
| 4...6 | | | -0,078 | | -0,036 | -0,028 | | | | |
| 5...6 | | | -0,057 | | -0,018 | -0,026 | | | | |
| | | | | | | | | | | gesamt |
| max. | 0,000 | -0,116 | -0,078 | -0,083 | 0,084 | 0,033 | 0,090 | 0,225 | -0,047 | 0,225 |
| Span. | 0,000 | 0,209 | 0,145 | 0,148 | 0,119 | 0,062 | 0,164 | 0,227 | 0,087 | 0,342 |
| mittel | | -0,001 | 0,009 | 0,000 | 0,027 | 0,000 | 0,012 | 0,118 | -0,007 | 0,020 |
| mAbs | | 0,063 | 0,036 | 0,042 | 0,041 | 0,017 | 0,047 | 0,118 | 0,025 | 0,049 |
| [VV] | 0,000 | 0,030 | 0,028 | 0,024 | 0,035 | 0,006 | 0,028 | 0,139 | 0,008 | |
| RMS | 0,000 | 0,071 | 0,043 | 0,049 | 0,048 | 0,020 | 0,053 | 0,152 | 0,028 | 0,058 |

