



Wintersemester 2009/2010

1	Präzisionsmessungen im Maschinen- und Anlagenbau	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Bezugs- und Koordinatensysteme.....	5
2	Messunsicherheit.....	6
2.1	GUM	6
2.2	Toleranz und Messunsicherheit	10
3	Optical Tooling.....	11
3.1	Fluchtungsmessung.....	11
3.2	Kollimation	12
3.3	Autokollimation	13
3.4	Längen- und Geradheitsmessung	15
4	Industrielle Messtechnologien	16
4.1	Koordinatenmessgerät	17
4.2	Gelenk-Messarm	17
4.3	Optische geodätische Messverfahren.....	18
4.4	Dreidimensionale Koordinatenbestimmung	20
4.4.1	Theodolitfehler im Nahbereich.....	20
4.4.2	Präzisionsdistanzmessungen im Nahbereich	22
4.5	Industriemesssystem	24
4.5.1	Polarmesssystem.....	24
4.5.2	Theodolitmesssystem.....	24
4.5.3	Konfiguration und Systemgenauigkeit	27
4.5.4	Messung verdeckter Punkte	29
4.6	Lasertracker	31
4.6.1	Systemaufbau	31
4.6.2	Kalibrierung.....	32

Literatur

- GOTTWALD, R. (1996): Industriemesssysteme in der 4. Generation – Leica Axyz. In: Vermessungswesen und Raumordnung 58, Heft 7, S. 356-362.
- KERSTING, N. (1987) Optimale Konfiguration beim Vorwärtseinschneiden mit Industriemesssystemen. AVN 94, Heft 5, S. 169-177.
- LÖFFLER, F. u.a. (2002): Handbuch Ingenieurgeodäsie. Band: Maschinen und Anlagenbau. 2., völlig neu bearb. und erw. Auflage, Wichmann Verlag, Hüthig GmbH, Heidelberg.
- MEYER, R.: Theodolitindustriemesssysteme im Automobilbau. AVN 97 (1990) 5, S. 176-184.
- MÖSER, M., FUNDHELLER, J., JOPE, A. (1997): Erfahrungen mit dem Industrie-Messsystem Axyz im Nahbereich. AVN 104, Heft 10, S. 349-352.
- MÖSER, M. (2001): Dreidimensionale geodätische Qualitätskontrolle im Schienenfahrzeugbau. In: Flächenmanagement und Bodenordnung. Zeitschrift für Liegenschaftswesen, Planung und Vermessung, Heft 1, S.38-43.
- MÖSER, M.; WALLSTAB-FREITAG, ST.; HERRMANN, J. (2007): Der Laser – Tracker LTD 800 – eine neue Generation in der Industriemesstechnik. AVN 114, Heft 5.
- HEISTER, H. (2001): Zur Angabe der Messunsicherheit in der geodätischen Messtechnik. Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik. Schriftenreihe des DVW Heft 42, Verlag Konrad Wittwer
- HENNES, M.; RUNGE, P. (2007): Chancen der Ingenieurgeodäsie im modernen Maschinenbau. AVN 113, Heft 7
- HENNES, M. (2007): Konkurrierende Genauigkeitsmaße - Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders. AVN 114, Heft 4.
- SCHWARZ, W. (Hrsg..) (1995): Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau. Vermessungswesen bei Konrad Wittwer Band 28, Stuttgart.
- SCHWARZ, W. (2002): Geodätische Messverfahren für das Bauwesen. Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen. Schriftenreihe des DVW Heft 43, Verlag Konrad Wittwer.
- SCHWARZ, W. (2004): Genauigkeitsmaße richtig interpretieren. Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen. Schriftenreihe des DVW Heft 46, Wißner-Verlag, Augsburg
- SCHLEMMER, H.; WELSCH, W. (1989): Berührungslose geodätische Messsysteme für die Industrievermessung – ein Überblick. AVN 96, Heft 11-12, Karlsruhe, S. 397-411.
- STAIGER, R. (1988): Theoretische Untersuchungen zum Einsatz von Industriemesssystemen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 340.
- WHITE, D.A. (1999): Coherent Laser Radar: True Noncontact 3-D Measurement has arrived. In: Quality Digest/August 1999.
- WEISE, K.; WÖGER, W. (1993): „A Bayesian theory of measurement uncertainty“, Meas. Sci. Technol. Vol 4, 1993, pp 1-11.
- WERNER, H. (1987): Ist auch der Maschinenbau ein Arbeitsfeld des Vermessungsingenieurs? In: Vermessungstechnik 35, Heft 1, S. 8-9.
- VOLKHOLZ, D. (2000): Genauigkeitsuntersuchungen zum Einsatz des Industriemesssystems Axyz im Nahbereich am Beispiel der Vermessung von Lokomotivbaugruppen. Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, unveröffentlicht.

1 Präzisionsmessungen im Maschinen- und Anlagenbau

1.1 Aufgabenstellung

Als Anfang der 50er Jahre die Ingenieurbauwerke immer größer und höher wurden, wurde der Begriff „Ingenieurvermessung“ geprägt. Ende der 80er Jahre kamen Präzisionsmessungen zur Fertigungs- und Qualitätskontrolle beim Automobil-, Flugzeug- und Schienenfahrzeugbau hinzu. Damit wurde die „**Industrievermessung**“ mit Messaufgaben höchster Präzision im Nahbereich (Submillimeter) als Spezialgebiet der Ingenieurgeodäsie beschrieben. Parallel dazu entwickelte sich die rechnergestützte Koordinatenmessung im Maschinenbau mit „Methoden zur indirekten Bestimmung der gesuchten Maße auf dem Umweg über die aus einzelnen Punkten im Raum mittels analytischer Geometrie zu ermittelnden Formelemente, wie Punkt, Gerade, Ebene, Kreis, Zylinder.“

Die automatisierten Produktionsprozesse im Maschinenbau stellen hohe Anforderungen an die Messtechnik. Dafür werden geodätische Methoden der Triangulation und Interferometrie modifiziert eingesetzt, u.a. bei folgenden Aufgaben

- Geometriebestimmung und Qualitätskontrolle im Automobilbau, Schiffsbau, Flugzeugbau: Lage von Bohrungen, Ecken und signalisierten Punkten an Fahrzeugkarosserien, Fertigungsanlagen im Flugzeugbau, Maschinenanlagen (Pressen, Walzstraßen)
- Einrichtung von Kraftwerksturbinen und Linearbeschleuniger
- Bestimmung der Positioniergenauigkeit und Kalibrierung von Robotern
- Formprüfungen an großen Teilen: Parabolantennen, Kühltürmen, Kugelbehältern,
- Reverse Engineering (vom Objekt zum Modell)

Dabei wird nicht nur die geometrische Darstellung eines Objekts bestimmt, sondern es wird steuernd in den Produktionsprozess als online-Qualitätskontrolle eingegriffen. Daraus ergaben sich für die geodätischen Messverfahren im Maschinenbau folgende Anforderungen:

- Schnelligkeit
- Online-Messdatenverarbeitung
- Echtzeitauswertung
- Zuverlässigkeit der Ergebnisse

Im Planungs- und Fertigungsprozess Informationen werden ständig und überall über die aktuelle Produktgeometrie vorhanden sein müssen. Diesen Prozess nennt man **Simultaneous Engineering**. An einigen Standorten wird die virtuelle Produktentwicklung bereits praktiziert. Dies bedeutet, dass weitgehend auf die Prototypenfertigung verzichtet wird. Die virtuelle Fabrik schließt die vollständig digitale Planung, Entwicklung und Führung der Fabrik einschließlich Infrastruktur und Personal mit ein¹.

Die Bedeutung des (**Ver-**)**Messingenieurs** als System-, Entwicklungs- und ausführender Ingenieur ist daher entscheidend gewachsen. Die Automatisierung verlangt ein genaues Positionieren und Vermessen der Produktionsanlagen. Beim Einsatz von Robotersystemen müssen deren Bewegungszyklen und Positioniergenauigkeiten bestimmt werden.

Die *Qualitätssicherung* fordert rechnergestützte Prüf-, Mess- und Überwachungssysteme, die eine permanente Kontrolle der geometrischen Eigenschaften des Produktes in der industriellen Fertigung ermöglichen.

¹ HENNES, M. (2007): Chancen der Ingenieurgeodäsie im modernen Maschinenbau.

Zur *Qualitätsprüfung* ist die Messtechnik in den Fertigungsablauf zu integrieren. Es gilt Abweichungen am Fertigungsprodukt, so früh wie möglich zu erfassen und die Dokumentation der Produktqualität gegenüber dem Abnehmer zu ermöglichen. Dabei beschränkt sich die fertigungsintegrierte Qualitätssicherung nicht nur auf die Prüfung des Produktes, sondern es geht auch um die fehlervermeidende Qualitätssicherung.

Dabei werden *Fertigungsgenauigkeiten* von 10^{-5} bis 10^{-6} in der Feinwerktechnik und 10^{-6} bis 10^{-7} in der *optischen Fertigung* gefordert. Aufgrund der hohen Genauigkeiten und der hohen Fertigungsgeschwindigkeiten muss die Mess- und Prüftechnik in der Lage sein, schnell und in unmittelbarer Nähe des Fertigungsprozesses Fehler bzw. Toleranzen nachzuweisen.

Die daraus resultierenden Probleme der Messdatenerfassung und Verarbeitung sind mit konventionellen Methoden kaum noch zu lösen. Es ergibt sich die Frage:

Ist auch der Maschinenbau ein Arbeitsfeld des Vermessungsingenieurs?

Die vom Geodäten verwendeten Instrumente, Mess- und Auswerteverfahren lassen sich auch im Maschinenbau und Anlagenbau und in der Baumesstechnik einsetzen.

1 mm + 1 ppm	Distanzmessungen	0,05 bis 0,2 mm
1 mm / 100 m	Neigungsmessung	0,001 mm / 1 m
0,3 mm	Präzisionsnivellement	
0,02 mm	Hydrostatische Höhenmessung	0,02 mm
0,5 mm	Photogrammetrie	0,5 mm
1 mm / 200 m	Alignement	
0,3 mm	Industriemeßsystem	
	Meßuhren	0,01 mm
	Dehnungsmeßstreifen	0,02 % Meßwert
	Meßschieber	0,1 mm

Was für den Messtechniker groß, ist für den Vermessungsingenieur klein !

Kennzeichnend für den Maschinenbau ist die vorwiegend diskontinuierliche Fertigung geometrisch definierter Körper mit großer Vielfalt der auftretenden Formen und Abmessungen. Die Funktionsfähigkeit der Erzeugnisse wird vor allem durch die

Abweichungen von der SOLL-Geometrie

bestimmt. Dabei beschränkt sich der Messbereich auf die Koordinatenmessmaschinen. Der Messraum des Maschinenbauers hat damit die Ausdehnung von mm bis m und die Systeme sind meist stationär. Er will aber $1/10$ bis $1/1000$ mm erfassen. Geodätische Instrumente sind mobil und reichen vom Nahbereich (Meter) bis km. Der Geodät kann $1/10$ mm (Präzisionsdistanzmessung, Längendifferenzen, Neigungsmessung, Nivellement) erreichen und erfasst Strecken besser $1\text{mm} + 1\text{ppm}$. Daraus folgt: Große Längen in der Fertigungstechnik des Maschinenbaus liegen im **Nahbereich** der Geodäsie und Photogrammetrie oder Längen von 1 bis 3 m stellen für beide Ingenieure Extreme mit unterschiedlichem Vorzeichen dar.

Dadurch nutzt der Fertigungsmesstechniker zu Messtechniken der Ingenieurvermessung und Nahbereichsphotogrammetrie. Die Lösung messtechnischer Aufgaben im industriellen Bereich kann nur interdisziplinär zwischen Maschinenbauer und Geodät betrieben werden. Dies bedingt aber, dass die Vertreter aus den verschiedenen Fachbereichen „eine Sprache sprechen“.

1.2 Bezugs- und Koordinatensysteme

Im Maschinenbau muss man unterscheiden zwischen Koordinatensystemen, die sich auf das Objekt beziehen und solchen, die objektunabhängig sind und für die Messungen zugrunde gelegt werden. Verändert das Objekt seine räumliche Lage, so wandert das objektbezogene Koordinatensystem mit. Eine Verbindung zum Bezugssystem "Erde" ist nicht vorhanden.

Um SOLL und IST des Objekts zu vergleichen, ist das Objektkoordinatensystem in das Messkoordinatensystem durch eine Transformation (Ursprung, Orientierung und Maßstab: 3 Verschiebungen, 3 Rotationen, 1 Maßstab) zu überführen. Partielle Eigenschaften des Messobjektes (z.B. Punktabstände, Winkelbeziehungen, Linienformen usw.) lassen sich im Messkoordinatensystem ermitteln.

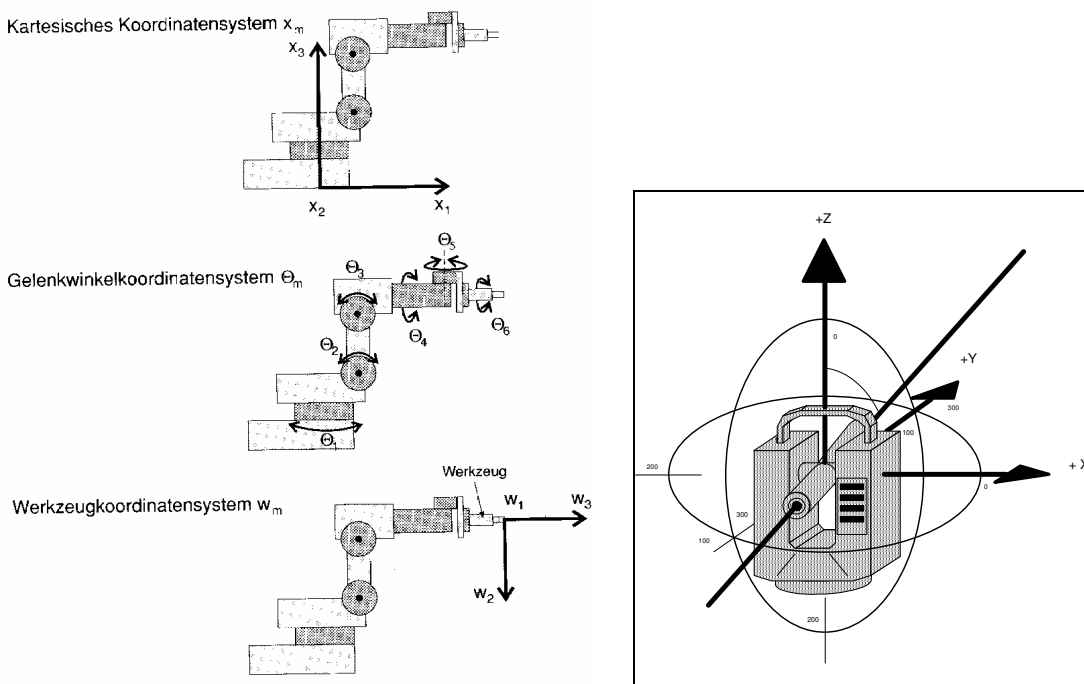


Abb.: Werkzeug- und Theodolitkoordinatensystem

- a) **Werkzeugkoordinatensystem:** Jedes Werkzeug (Schweißzange eines Industrieroboters, Fräskopf einer Fräsmaschine) baut auf einem eigenen, meist kartesischen Koordinatensystem auf, dessen Achsen sich am Werkzeug orientieren.
- b) **Maschinenkoordinatensystem:** Unabhängig konstruierte Komponenten einer Anlage (Blechpresse in einem Presswerk, die Komponenten eines Turbinentisches usw.) verfügen über eigene Maschinenkoordinatensysteme, die für Konstruktion, Aufbau und Instandhaltung der Maschine benötigt werden.
- c) **Anlagenkoordinatensystem:** Ein- und Ausrichten der Maschinen innerhalb einer Anlage
- d) **Übergeordnetes Hallen- oder Fabrikkoordinatensystem:** Rechnergestützte Planung des Maschinen- und Anlagenlayouts innerhalb einer Fabrik Bereitstellung eines übergeordneten Bezugskoordinatensystems
- e) **Produktionskoordinatensysteme:** Das Produkt selbst verfügt über ein oder mehrere Koordinatensysteme, die zu seiner Konstruktion und Fertigung benötigt werden.
- f) **Weltkoordinatensystem:** Geodätisches Koordinatensystem, absoluter Bezug

2 Messunsicherheit

Die Messunsicherheit wird in der Längenmesstechnik häufig in Prozent des Messweges angegeben. Für Abstands- und Längenänderungsmessungen mittels Messuhr, Messschieber, Dehnungsmessstreifen oder Wegaufnehmer gilt z.B. 0,1% für Messwege bis 500 mm.

- DIN 18710 Ingenieurvermessung (Vertrauensbereich)
- DIN 1319 Grundlagen der Messtechnik (Messunsicherheit)

Das Messergebnis ist ein Schätzwert für den Erwartungswert der Messgröße, die mit einer Unsicherheit behaftet ist, die sich aus zufälligen Messabweichungen und unvollkommener Berichtigung des Ergebnisses bezüglich der systematischen Einflussparameter ableitet.

Systematische Abweichungen

Vermeidung systematischer Einflüsse durch Kalibrierung; nicht erfassbare systematische Abweichungen sind abzuschätzen

- Erfassung der atmosphärischen Korrektur bei Laserinterferometern
- Durchbiegung von Endmaßen, Linealen
- Unzureichende Erfassung der Temperatur von Messobjekt und Maß
- Nichtbeachten der Theodolitfehler
- Vernachlässigung von Exzentrizitäten bei der automatischen Kompensation
- Refraktion bei optischen Zielungen → Zielstrahlverschwenkung/Pointing Error

2.1 GUM

Für die Bewertung und Angabe der Messunsicherheit hat sich als internationaler Standard der **GUM** durchgesetzt:

- GUM: **Guide to the expression of Uncertainty in Measurement**“, 1993, corrected and reprinted 1995, International Organization for Standardization (DIN 13005 „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“)

Die Messunsicherheit ist eine notwendige Information zur Qualität der Messung, die dem Messwert beigeordnet ist. In der Vergangenheit war es das Ziel der Messung, den „wahren Wert“ der Messgröße zu bestimmen. Dieser ist, bedingt durch systematische und zufällige Messfehler, prinzipiell nicht zugänglich.

Es geht darum, die unvollkommene Kenntnis des Messprozesses numerisch zu erfassen und dem Messwert der Messgröße eine daraus berechnete Messunsicherheit schlüssig zuzuweisen.

Beispiel: Eine Distanz wurde nur einmal gemessen. Daraus soll eine Aussage über die Messunsicherheit getroffen werden. Sämtliche statistische Betrachtungen versagen von vornherein. Man kann aber a priori vorhandenes Wissen über den Messprozess einbringen und daraus ein Intervall berechnen, in dem das Messergebnis mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegt. Die Halbbreite dieses Intervalls wird als erweiterte Standardunsicherheit bezeichnet oder einfach als Messunsicherheit. Diese Vorgehensweise ist in der folgenden Abbildung dargestellt.²

² WEISE, H. (2001): Messunsicherheit nach GUM. Vortrag zum Seminar Fertigungsmesstechnik, TU Dresden

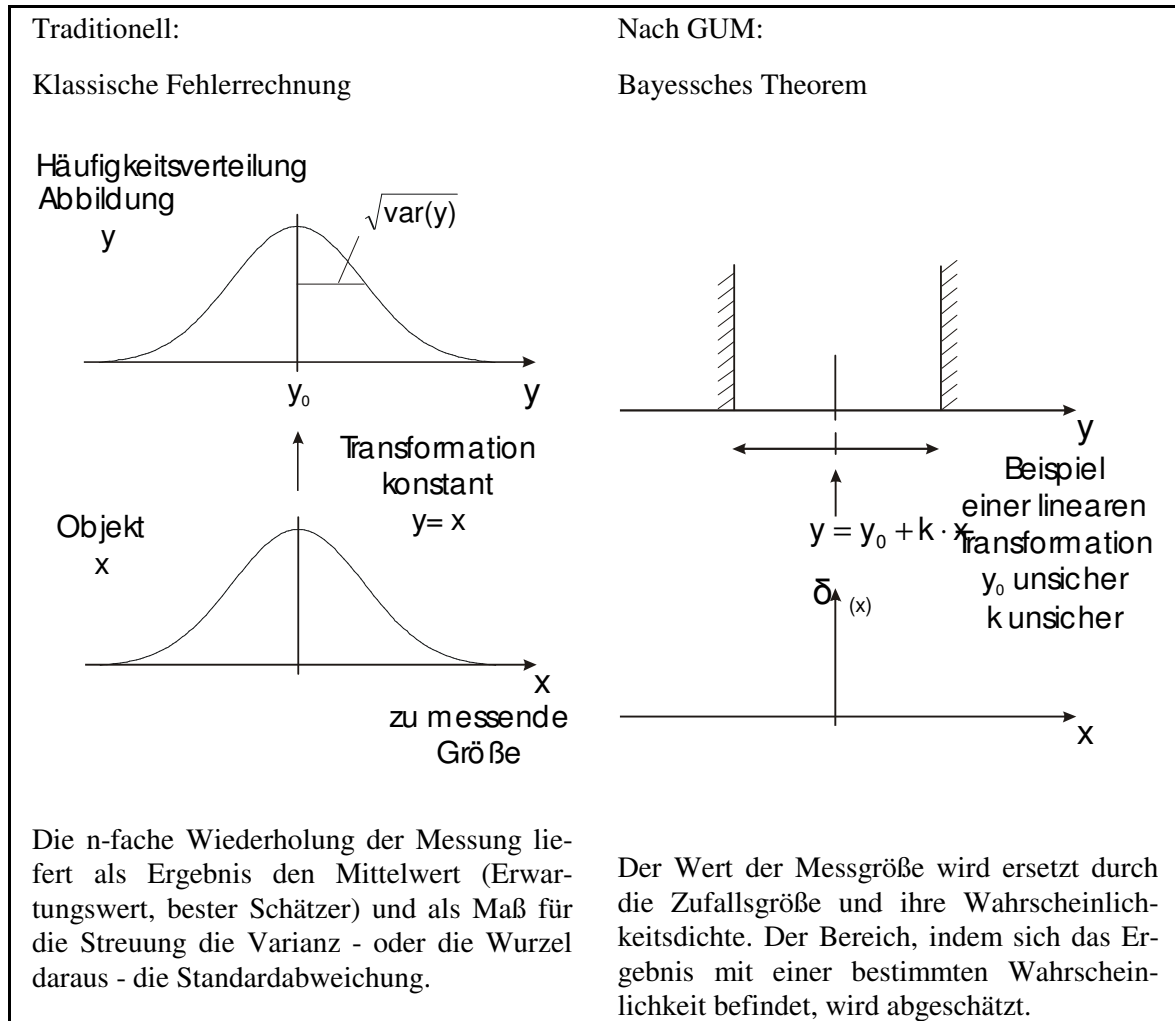


Abb.: Fehleranalyse und Herangehensweise nach GUM bei der Bestimmung der Messunsicherheit

Beide Herangehensweisen nutzen die Wahrscheinlichkeitsrechnung unterschiedlich:

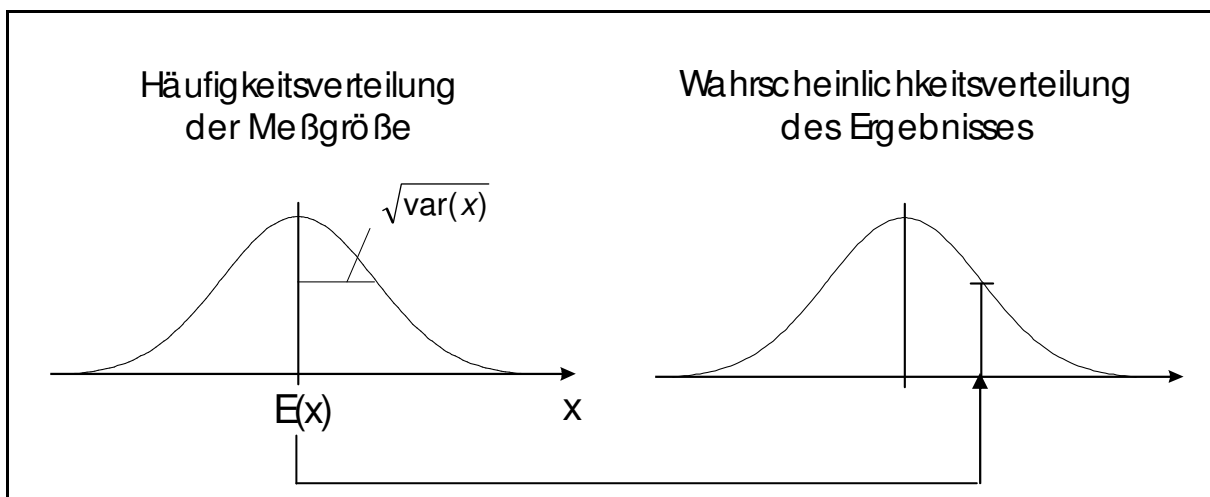


Abb.: Die Häufigkeitsverteilung der Messgröße wird ersetzt durch die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Ergebnisses

Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik bilden die wissenschaftliche Grundlage für Unsicherheitsanalysen. Fehleranalysen waren nicht falsch, aber sie ermöglichen

keinen objektiven einheitlich bewertbaren Nachweis. Die klassische Fehleranalyse beruht auf dem Prinzip der Häufigkeit. Die metrologische Fragestellung nach der Messung lautet aber etwas anders:

Liegt die Messgröße mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit im durch a und b begrenzten Intervall, d.h. der Messunsicherheit

$$P(a < y < b) = 0,95 ?$$

Die Messgröße ist dabei fest, die Messwerte hingegen streuen. Eine einzige Messung liefert keine statistische Aussage, aber man kann a priori Wissen mit einbauen.

Alle Einflüsse werden auf einen einzigen Parameter normiert: die einfache Standardmessunsicherheit. Es kommt das allgemeine Varianzfortpflanzungsgesetz zur Anwendung.

Im **GUM** werden 2 Methoden zur Ermittlung der Messunsicherheit verwendet:

Methode A

Komponenten, die mit statistischen Verfahren berechnet werden, um den besten Schätzwert und die Standardmessunsicherheit zu gewinnen.

$$x_i = E[X_i] \quad \text{und} \quad u(x_i) = \sqrt{\text{var}[X_i]}$$

Die geschätzten Varianzen ergeben sich aus Wiederholungsmessungen oder aus der Ausgleichung redundanter Messungen. Die Standardabweichungen für **normalverteilte**, stochastische Einflussgrößen werden quadratisch zur **Standardunsicherheit** zusammengefasst. Das Messergebnis ist ein Schätzwert für den Erwartungswert der Messgröße, die mit einer Unsicherheit behaftet ist, die sich aus zufälligen Messabweichungen und unvollkommener Berichtigung des Ergebnisses bezüglich der systematischen Einflussparameter ableitet.

Methode B

Im Gauß-Markoff-Modell werden die zu schätzenden Parameter nicht als Zufallsvariable aufgefasst, sondern als Unbekannte die aus den messwerten geschätzt werden. Hierbei ist es nicht möglich Vorabinformationen in die Schätzung einfließen zu lassen.

Die **Bayes-Statistik** ermöglicht die Berücksichtigung von Vorabinformationen mittels subjektiver Wahrscheinlichkeiten.

Anwendung von Verfahren der Wahrscheinlichkeitstheorie, wenn keine statistische Auswertung durchgeführt wird, aber messtechnische oder wissenschaftliche Kenntnisse vorhanden sind, um die Verteilung der Werte einer Eingangsgröße einzuschätzen (**a priori Wissen**).

Über das Einschätzen der Variationsbereiche von nicht bekannten systematischen Abweichungen und des Schätzens ihrer Wahrscheinlichkeitsverteilungen können die Varianzen bzw. Standardabweichungen abgeleitet werden nach

$$\sigma^2 = \int (x - \mu)^2 \cdot f(x) \cdot dx$$

Verteilungsdichtefunktion:

- Wenn man nichts weiter weiß, als dass es eine obere und untere Grenze für den Messwert gibt \Rightarrow Gleichverteilung

- Wenn es sich um eine Summe oder Differenz von 2 Werten nach Punkt 1 mit gleicher Spannweite handelt \Rightarrow Dreieckverteilung; Temperaturabhängigkeit ($\alpha_{\text{Maßstab}} - \alpha_{\text{Werkstück}}$).
- Wenn man den Mittelwert und die Standardabweichung kennt, nicht aber den Verteilungstyp \Rightarrow Gaußverteilung

Damit wird der Versuch unternommen, vornehmlich nicht erfasste systematische Messabweichungen genauigkeitsmäßig zu bewerten oder wenigstens abzuschätzen

Für den Schätzwert x_j können weitere Eingangsgrößen, die systematische Abweichungen verursachen können (z.B. langjährige Erfahrungswerte, Zentrierfehler, Ausdehnungskoeffizient von Messmitteln, Rechenschärfe bei Korrekturformeln), als Standardunsicherheit abgeschätzt werden.

Bei vielen Abschätzungen wird sich eine obere Grenze \mathbf{a}_+ und eine untere Grenze \mathbf{a}_- für die Eingangsgröße x_j festlegen lassen. Wenn es keine speziellen Kenntnisse über die möglichen Werte von x_j gibt, lässt sich nur annehmen, dass im gesamten Bereich die gleiche Wahrscheinlichkeit für die Lage von x_j besteht. Dann gilt

$$x_j = \frac{1}{2}(a_+ + a_-)$$

Für die Standardunsicherheit gilt, dass die nicht statistischen Informationen (obere und untere Grenze) über die Einflussgröße durch eine Rechteckverteilung im Intervall dieser Grenzen beschrieben werden kann:

$$u(x_j) = \frac{1}{\sqrt{12}}(a_+ - a_-)$$

Wenn die Differenz zwischen den Grenzen \mathbf{a}_+ und \mathbf{a}_- mit $2a$ bezeichnet wird ergibt sich

$$u(x_j) = \frac{1}{\sqrt{3}}a \approx 0,58a$$

Beispiel: Bei einer Distanzmessung wird zwischen Stand- und Zielpunkt die Temperatur gemessen $x_t = 18^\circ\text{C}$. Als Schwankungsbreite wird $a = 2^\circ\text{C}$ angegeben. Daraus ergibt sich die Standardunsicherheit³

$$u(x_t) = 0,58 \cdot a = 1,2^\circ\text{C}$$

Es wird als meteorologische Korrektur $t = 18^\circ\text{C}$ berücksichtigt. Damit verbleibt für eine Distanz von $s = 1000\text{m}$ eine Maßstabsunsicherheit von

$$u(x_m) = 1,2 \text{ ppm}$$

Ist die Standardunsicherheit nach Methode A geschätzt worden ($\sigma_s = 2\text{mm} + 2\text{ppm}$)

$$u(x_s) = 4\text{mm}$$

ergibt sich für die kombinierte Standardunsicherheit

$$u_c(s) = \sqrt{u(x_s)^2 + u(x_m)^2} = \sqrt{4\text{mm}^2 + 1,2\text{mm}^2} = 4,2\text{mm}$$

³ HEISTER, H. (2001): Zur Angabe der Messunsicherheit in der Messtechnik

2.2 Toleranz und Messunsicherheit

Bei der Konstruktion eines Werkstückes wird festgelegt, mit welcher Toleranz das Teil zu fertigen ist. Toleranzen sollen die Abweichungen von den Nennmaßen der Größe, Gestalt und der Lage von Werkstücken und Bauteilen (Fertigungs-, Vermessungs- und Montageabmaße) begrenzen.

Die Differenz zwischen dem Höchstmaß und dem Mindestmaß (= Grenzmaße) wird als Maßtoleranz T bezeichnet; das Intervall Toleranzfeld. Um festzustellen, ob die geforderten Toleranzen eines Werkstückes bei der Fertigung eingehalten worden sind, ist das Werkstück auszumessen. Dabei ergeben sich Wechselwirkungen zwischen den Toleranzvorgaben und der Genauigkeit, mit der die Messungen durchzuführen sind.

Im industriellen Bereich und im Zusammenhang mit Toleranzen wird die erweiterte Messunsicherheit U mit dem Intervall $\pm U$ verwendet.

$$U = k \cdot u$$

Für normalverteilte Messungen gilt

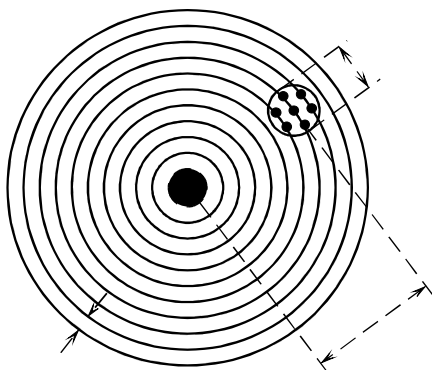
$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$
68,3 %	95,4 %	99,7 %

Beispiel: Für den Abstand zweier Punkte gilt die erweiterte Messunsicherheit nach GUM

$$d = (17,282 \pm 0,002) \text{ m} \quad (k = 2)$$

In der Messtechnik werden die Begriffe *Auflösung*, *Präzision*, *Genauigkeit* und in der Metrologie *Richtigkeit* verwendet⁴. Für die Beurteilung der Genauigkeit einer Messgröße gelten

- Auflösung: kleinste Zählinheit
- Präzision: statistische Maß für die Streuung mit der Standardabweichung σ
- Genauigkeit: Nähe der Übereinstimmung eines Messergebnisses zum wahren Wert (systematische Abweichungen werden berücksichtigt); Begriff „Messgenauigkeit“ sollte vermieden werden
- das metrologische Maß: Richtigkeit, die beeinflusst wird von der systematischen Abweichung mit der das Messergebnis behaftet sein kann.



⁴ SCHWARZ, W. (2004): Genauigkeitsmaße richtig interpretieren.

3 Optical Tooling

Zum „Optical Tooling“ gehören Messungen im Maschinenbau zum „Optischen Ausrichten“ und zur Bestimmung geometrischer Größen: Geradheit, Ebenheit, Rechtwinkligkeit, Lotrechtestellung, Fluchtung, Parallelität, Abstandsgleichheit

3.1 Fluchtungsmessung

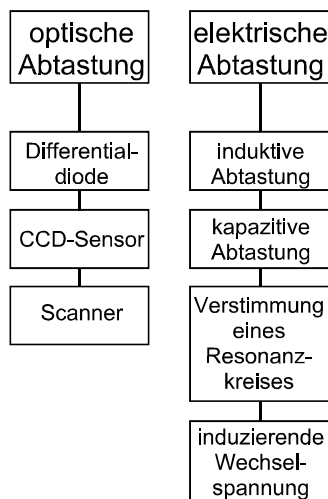
Bei Fluchtungsmessungen – **Alignements** - sind Messpunkte längs einer Geraden auszurichten bzw. die Ablagen der Messpunkte von einer Geraden in horizontaler und/oder vertikaler Richtung zu ermitteln.

- relative Lageveränderungen der Messpunkte
- Entfernungsbereich von einigen Metern bis zu einigen Hundert Metern
- Genauigkeit unter einem Millimeter bis Mikrometer

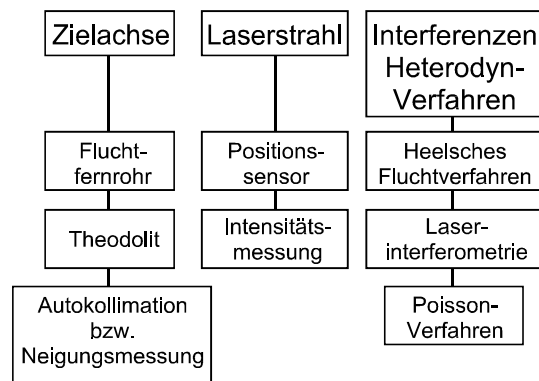
Die Bezugsgerade lässt sich mechanisch durch einen gespannten Draht oder mit Fernrohren optisch realisieren. Bei einer mechanischen Bezugslinie wird die geforderte Genauigkeit nur erreicht, wenn mit einem gespannten Draht berührungslos angetastet wird. Dabei ist zu beachten: Geradlinigkeit eines gespannten Drahtes (z.B. Federstahl); Inhomogenitäten in der Dichte des Drahtmaterials; Biegemomente.

Alignementverfahren

mit mechanischer Bezugslinie



mit optischer Bezugslinie



Optische Aligniersysteme

Die optische Referenzlinie ist ein Laserstrahl oder wird durch ein Fadenkreuz und im Objektivmittelpunkt definierte Ziellinie eines Fernrohres definiert.

Neben dem Auflösungsvermögen der optischen Systeme bzw. der Stabilität der Referenzlinien, wird die Genauigkeit optischer Alignements durch die Refraktionserscheinung des Mediums bestimmt. Eine Reduzierung des Refraktionseinflusses lässt sich entweder über refraktionsfreie Richtungsmessungen oder im Vakuum (ca. $10^{-2} \dots 10^{-3}$ hPa) erzielen.

Alignements mit Fluchtfernrohren im Maschinenbau

Für die Zentrierung des Fluchtfernrohres und der Zielzeichen werden **Taylor-Hobson-Kugeln** verwendet. Das zylinderförmige Fluchtfernrohr wird durch die Kugel geschoben und kann somit in definierter Weise auf einen Messpunkt aufgesetzt werden. Die Ziellinie verläuft direkt durch den Messpunkt.

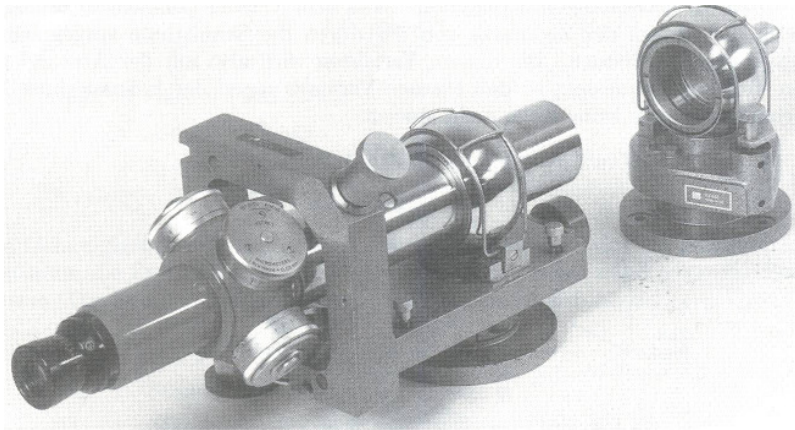


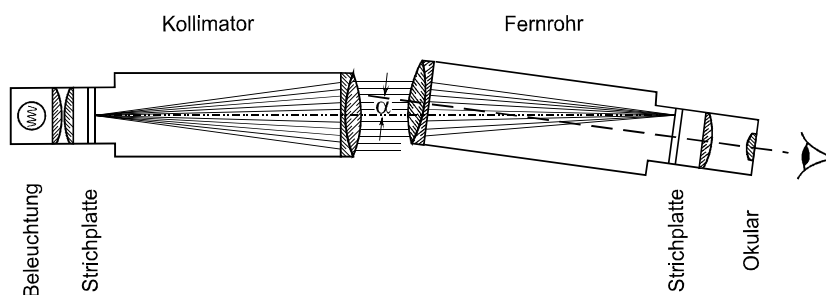
Abb.: Fluchtfernrohr und Taylor-Hobson-Zielkugel

Die Referenzlinie wird durch die Verbindungsgerade der Kugelmittelpunkte der Endpunkte der Alignementsstrecke definiert. In dieser Gerade wird die Ziellinie des Fluchtfernrohres eingerichtet, so dass weitere Zwischenpunkte eingewiesen bzw. die Ablagen dieser Punkte ausgemessen werden können.

Das Fluchtfernrohr hat zwei in senkrecht zueinander stehenden Richtungen wirkende Planplattenmikrometer, die einen Messbereich von $\pm 1,25$ mm abdecken. Genauigkeit: bis 30 können Ablagen unter günstigen Bedingungen auf ca. 0,04 mm bis 0,10 mm genau bestimmt werden.

3.2 Kollimation

Zwei Fernrohre werden mittels Kollimator iterativ ausgerichtet bis die optischen Achsen parallel zueinander sind. Man arbeitet mit auf unendlich fokussierten Fernrohren, bei denen die Strichplatte im dingseitigen Objektraum im Unendlichen abgebildet wird.



Ein Kollimator ist ein Projektor, der eine beleuchtete Strichplatte ins Unendliche abbildet. Die Strichplatte liegt dazu in der Brennebene des Objektivs und wird okularseitig beleuchtet. Aus dem Objektiv tritt demnach ein paralleles Lichtbündel aus. Die Strichplatte des Kollimators bildet sich bei dem ebenfalls auf unendlich eingestellten Fernrohr in seiner Brennebene ab. Die optische Achse des Kollimators und des Fernrohrs sind parallel, wenn das Bild der Strichplatte des Kollimators mit der Strichplatte des Fernrohrs zusammenfällt.

Mit Hilfe einer in der Brennebene des Fernrohres montierten Skale kann auch die Ablage des Strichplattenbildes zur Fernrohrstrichplatte gemessen werden und somit der Richtungsunterschied der beiden optischen Achsen aus der Fernrohrbrennweite berechnet werden.

$$\alpha = \frac{y}{f}$$

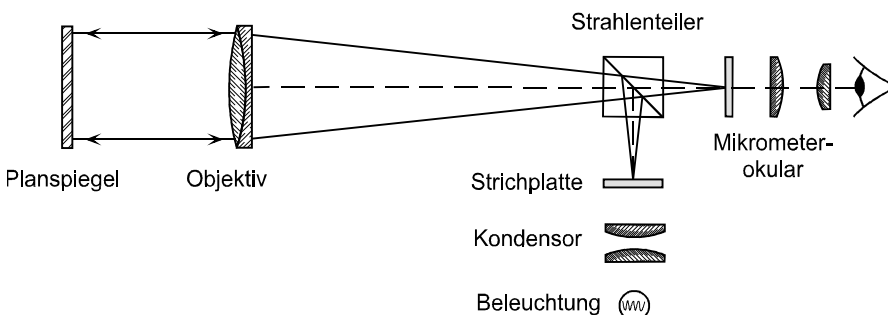
α Richtungsunterschied der optischen Achsen Kollimator/Fernrohr
 y Ablage des Bildes der Kollimatorstrichplatte/Fernrohrstrichplatte
 f Brennweite des Fernrohres

Die Messanordnung zeigt Richtungsabweichungen an. Exzentrizitätsfehler, die sich bei herkömmlichen Richtungsmessungen besonders bei kurzen Zielweiten auswirken, spielen bei diesem Messverfahren keine Rolle.

Beispiel: Ausrichten von Nivellieren beim Seeübergangsnivellement mit Ni2

3.3 Autokollimation

Vereinigt man Kollimator und Fernrohr zu einer Einheit, so entsteht ein Autokollimationsfernrohr. Das über einen Strahlenteiler in den Strahlengang des Fernrohres projizierte Bild einer beleuchteten Strichplatte fällt auf einen planen Oberflächenspiegel, wird danach reflektiert und gelangt abermals in das Fernrohr. In der Brennebene wird es scharf abgebildet.



Trägt das Strichkreuz des Fernrohres eine horizontale und/oder eine vertikale Skala oder besitzt das Fernrohr ein Mikrometerokular, so lässt sich der Bildversatz Δy messen und die Spiegelverdrehung in der jeweiligen Richtung berechnet sich nach

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta y}{2f}$$

$\Delta\alpha$ Verdrehwinkel im Bogenmaß
 Δy Versatz des Bildes der beleuchteten Strichplatte zur Strichplatte des Mikrometerokulars in der Brennebene
 f Brennweite des Fernrohrobjektivs

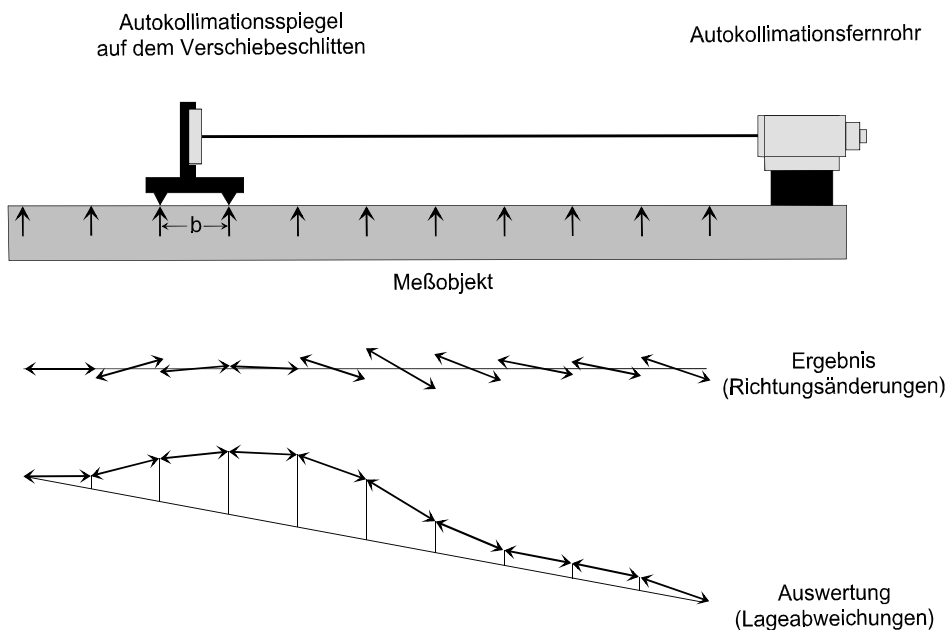
- Größe der Brennweite des Fernrohres
- Messung des Bildversatzes: Bildversatz auf 1 μm genau, Brennweite $f = 500 \text{ mm}$; Auflösung von Richtungsänderungen von 0,2 "
- Messbereich auf ungefähr 50 m begrenzt

Mit elektronischen Autokollimatoren wird die Position des Bildes der beleuchteten Strichplatte mit Hilfe eines Sensors (Positionssensor bzw. CCD-Zeilensensor) bestimmt. Ist ein Autokollimationsokular an einem Theodolitfernrohr angebracht, kann das Bild der beleuchteten Strichplatte mit der in der Brennebene angebrachten Strichplatte durch Verdrehung des Fernrohrs zur Koinzidenz gebracht werden. Bezogen zu einer Nullstellung des Spiegels werden seine Verdrehungen direkt am Horizontal- und Vertikalkreis abgelesen.

Das Autokollimationsverfahren wird eingesetzt

- zur Überprüfung von Geradheiten und zur Planflächenprüfung
- zur Bestimmung des Taumelfehlers einer Welle
- zur Justierung von Maschinenkomponenten

Beim Autokollimationsverfahren wird längs des auszumessenden Objekts (z.B. einer Führungsbahn einer Maschine) ein Autokollimationsspiegel in Intervallen, die dem Abstand seiner Fußpunkte entsprechen, versetzt. In den jeweiligen Positionen wird mit dem Autokollimationsfernrohr die durch die Form der Führungsbahn hervorgerufenen Richtungsänderungen der Normalen des Spiegels gemessen. Die Richtungsänderungen multipliziert mit dem Fußabstand werden summiert; daraus ergibt sich die Geradheit des Objektes. Die Ablagen eines jeden Messpunktes beziehen sich auf die Endpunkte bzw. auf eine vermittelnde Gerade sind berechenbar.

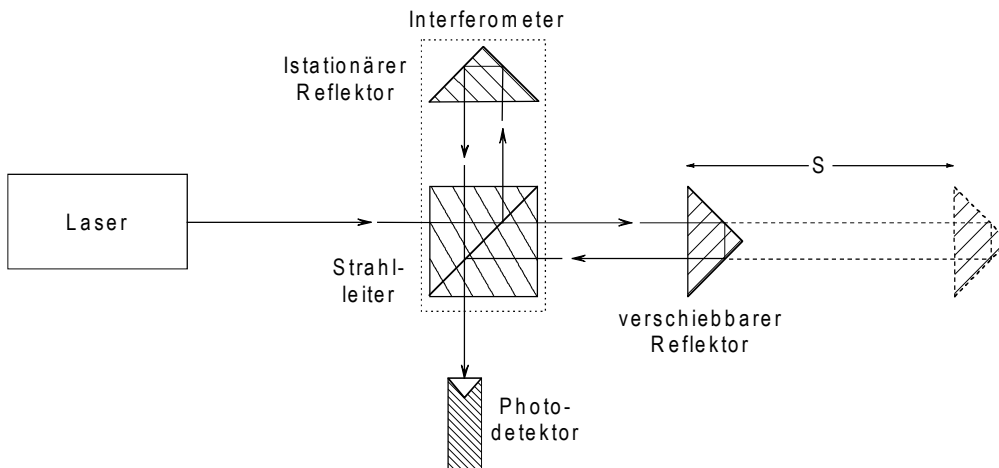


3.4 Längen- und Geradheitsmessung

Interferometrische Messverfahren

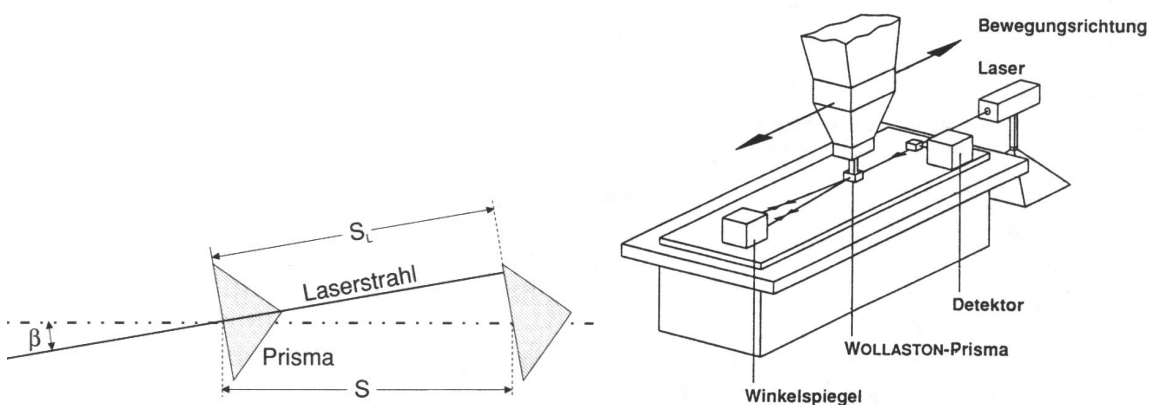
Werden zwei Lichtstrahlen überlagert und die Wellen gegeneinander verschoben entstehen Lichtinterferenzen in Form von periodischen Helligkeitsschwankungen.

Die Anzahl der Interferenzen multipliziert mit der Wellenlänge des Lichts ($< 1\mu\text{m}$) ergibt den Verschiebungsbetrag einer Welle zur anderen. Voraussetzung: konstante Phasenbeziehung = kohärente Wellen. Es ergeben sich hochpräzise Streckenänderungen mit einem He-Ne-Laser $\lambda = 633\text{ nm}$.



$$\text{Wellenlänge: } \lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

- Brechungsindex: $n = 1 + 2,8793 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{p}{1 + 3,671 \cdot 10^{-3} \cdot t} - 4,2 \cdot 10^{-8} \cdot p_w$
- Änderung von 1ppm: $\Delta t = 1,0\text{K}$ $\Delta p = 3,4\text{hPA}$ $\Delta p_w = 17\text{hPA}$
- Frequenzstabilität (10^{-8})
- Justierungenauigkeiten, Kosinusfehler
- Eigenschaften der optischen und elektronischen Bauteile
- Temperatur des Messobjekts
- Genauigkeit: $\sigma_s = 0,2\text{ppm}$ $s_{\text{max}} = 50\text{m}$ $\sigma_s = 0,01\text{mm}$

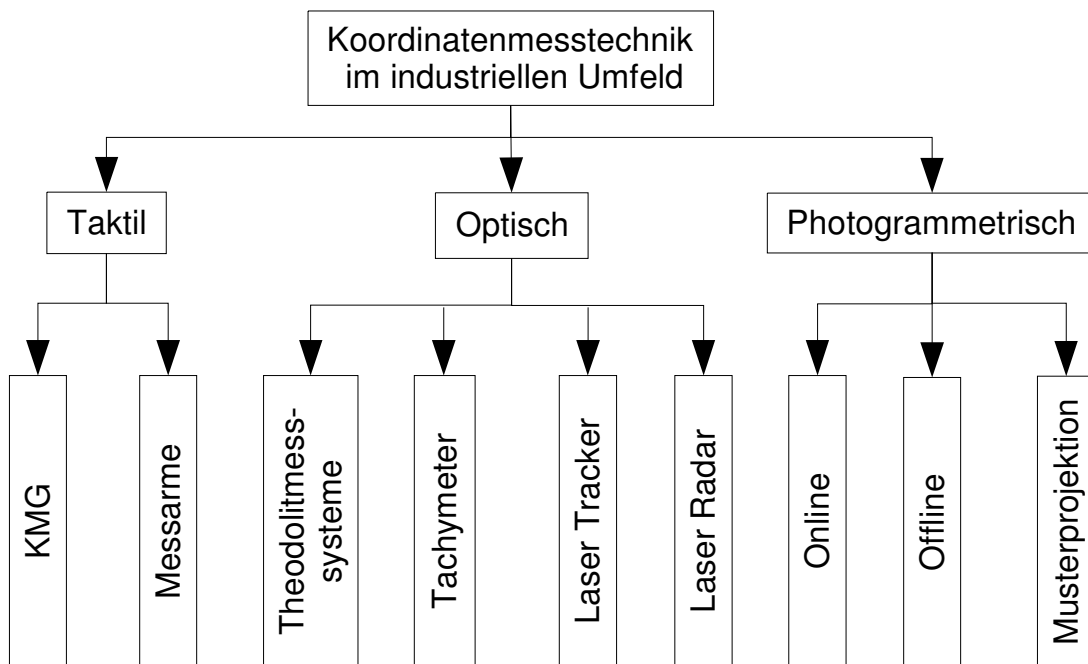


4 Industrielle Messtechnologien

Die ursprüngliche Technologie der Objekterfassung ist die diskrete Punkterfassung. Die Punkterfassung erfolgt bei den Koordinatenmessgeräten (KMG) und Gelenkarmen taktile, d.h. mit Berührung.

Die geodätischen Technologien mit Theodolit, Tachymeter und Laser Tracker sind optische Verfahren, die meist eine Punktsignalisierung (Vermarkung, Reflektoren) erfordern.

Bei den Laser Trackern sind Scanfunktionen integriert. Bei den digitalen online Photogrammetriesystemen sind für hohe Bildmessgenauigkeiten codierte und uncodierte Zielmarken erforderlich.



Tab.: Vergleich Geodätische Messtechnik zu Koordinatenmessgerät

	Industriemesstechnik	Koordinatenmessgerät
Sensoren	mobil	stationär
Anordnung	freie Konfiguration	zwangsweise
Bezugssystem	global	lokal
Messvolumen	Umkreis 40m	12m x 3,5m x 2,4m
Messunsicherheit	10^{-5} bis 10^{-6}	10^{-6} bis 10^{-8}

Die optische Messtechnik gewinnt an Bedeutung: während 1999 noch etwa 75% der Unternehmen rein taktile Messgeräte einsetzten, vertrauten 2003 bereits 41% auf berührungslose und Multisensorsysteme

4.1 Koordinatenmessgerät

Koordinatenmessgeräte (KMG) sind portable Messmaschinen mit einem maximalen Messvolumen von 12 m x 3,5 m x 2,4 m zur dreidimensionalen Bestimmung der Geometrie von Werkstücken.

Messobjekt kommt zum Messmittel

- Verschiebegestell mit drei senkrecht aufeinander stehenden Achsen bilden ein kartesisches Bezugskordinatensystem, in dem ein Tastkopf beweglich angeordnet ist. Damit lassen sich Maß, Form und Lage eines Werkstückes in einem einheitlichen Koordinatensystem bestimmen
- Grundbauarten entsprechend Messbereichen (Ständer, Ausleger, Portal)
- Längenmessunsicherheit $u = (3,5 + L/200) \mu m$ mit L in [mm]

Aus der abgetasteten Ist-Geometrie werden Informationen über die Einhaltung von Maß-, Form- und Lagetoleranzen erhalten. Aus den Koordinaten der Messpunkte werden die gesuchten Kenngrößen berechnet. Die Messwertgewinnung und Messwertauswertung erfolgen mit online gekoppeltem Rechner, der auch für Steuerungszwecke eingesetzt wird (CNC-Koordinatenmessgerät).

Universelle KMG besitzen ein kartesisches Koordinatensystem (x, y, z) und speziell für rotationssymmetrische Teile (Zahnräder) ein Zylinderkoordinatensystem (r, φ, z) . Kombinationen mit einem Drehtisch als vierte Achse sind gebräuchlich.

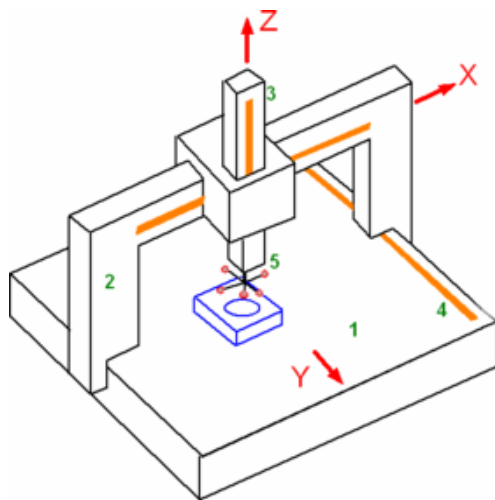


Abb.: Portal KMG (1 Hartsteinplatte; 2 Portal; 3 Pinole; 4 Längensystem; 5 Messkopf)⁵

4.2 Gelenk-Messarm

Gelenkmessarme sind in der Ursprungsidee dem menschlichen Arm nachempfunden, der in seinem Bewegungsraum praktisch jeden Punkt erreichen kann (Abb. 5). Sie werden auch als portable KMG bezeichnet und eignen sich insbesondere für die Inspektion von Bauteilen, die aufgrund ihrer Größe oder ihres Gewichtes nicht mit einem stationären Koordinatenmessgerät geprüft werden können.

⁵ <http://de.wikipedia.org/wiki/Koordinatenmessmaschine>



Abb.: Messarm von Romer (Hexagon Metrology GmbH)⁶

Um einen großen Messbereich abzudecken und verdeckte Punkte messen zu können, wird beispielsweise von der Firma Faro die Kopplung von Messgelenkarm und Laser-Tracker empfohlen. Damit erfolgt die Verknüpfung mehrerer Standpunkte des Armes über identische Punkte. Der Messarm kann frei positioniert werden. Über eine integrierte Wireless LAN Kommunikation ist die Aufstellung unabhängig vom PC-Standort. Für gleichmäßige Messergebnisse sorgen Winkeldrehgeber.

Die Kohlefaserkonstruktion der Messarme trägt dazu bei, sich auf die Messungen wiederholbar verlassen zu können. Mit Kohlefaser wird eine wesentlich höhere Stabilität erreicht und ist mit einem Längenausdehnungskoeffizient von $0,25\mu\text{/}^\circ\text{C/m}$ temperaturunabhängiger als Aluminium oder Stahl. Während eines Messablaufs können die Taster ohne Werkzeug, Neukalibrierung und Messprogrammunterbrechung gewechselt werden.

Die Taster werden automatisch erkannt und entsprechend kompensiert. Als Taster dienen passive oder schaltende Tastköpfe sowie optisch schaltende und scannende Sensoren.

Messdurchmesser:	bis 3600 mm
Messunsicherheit Einzelpunkt mit Kugel:	0,051 mm
Längenmessunsicherheit:	0,075 mm

4.3 Optische geodätische Messverfahren

Die geodätische Industriemesstechnik kann in vier Sensorsysteme eingeteilt werden

- Triangulation mit zwei oder mehreren Theodoliten
- polare Punktbestimmung mit Präzisionstachymeter
- interferometrische Punktbestimmung mit Laser-Tracker
- Nahbereichsphotogrammetrie mit Digitalkameras.

Für Messobjekte, die aufgrund ihrer Abmessungen, ihres Gewichtes oder der räumlichen Verhältnisse nicht mehr bewegt werden können (Flugzeug- und Schiffsbau), war eine Vermessung durch die Umkehrung

⁶ <http://de.romer.com>

Messmittel kommt zum Messobjekt

nur mit Genauigkeitsverlust und zeitaufwendig zu realisieren. Bei der 3D-Messung mit online-Kopplung der Messgeräte am PC bzw. Notebook erfolgt stationär die numerische Steuerung des Messablaufs. Daraus folgt die *rechnergestützte dreidimensionale Koordinatenbestimmung diskreter Punkte* und die Möglichkeit der indirekten Bestimmung der gesuchten Maße mittels analytischer Geometrie.

Vorteile

- Das Messverfahren ist geeignet, sich den örtlichen Gegebenheiten sowie der Größe und Form des Messobjektes anzupassen.
- Berührungslosigkeit: Der signalisierte Zielpunkt wird nicht mechanisch sondern optisch angetastet.
- Messung in Funktionslage: Das Messobjekt wird in der Gebrauchslage gemessen.
- Das Messvolumen ist nur durch die angestrebte Genauigkeit begrenzt.

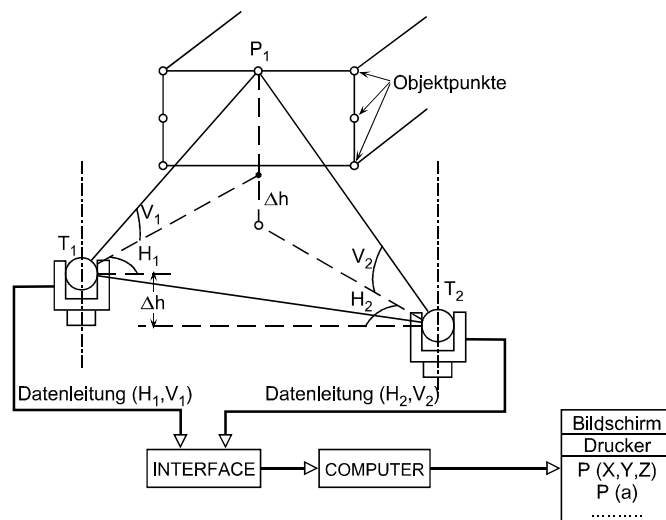


Abb.: Konfiguration für ein Theodolitmesssystem (ca. 1988)



Abb.: T3000 (0,15 mgon) von Leica Geosystems (1992) und Totalstation TDA 5005 (2005)

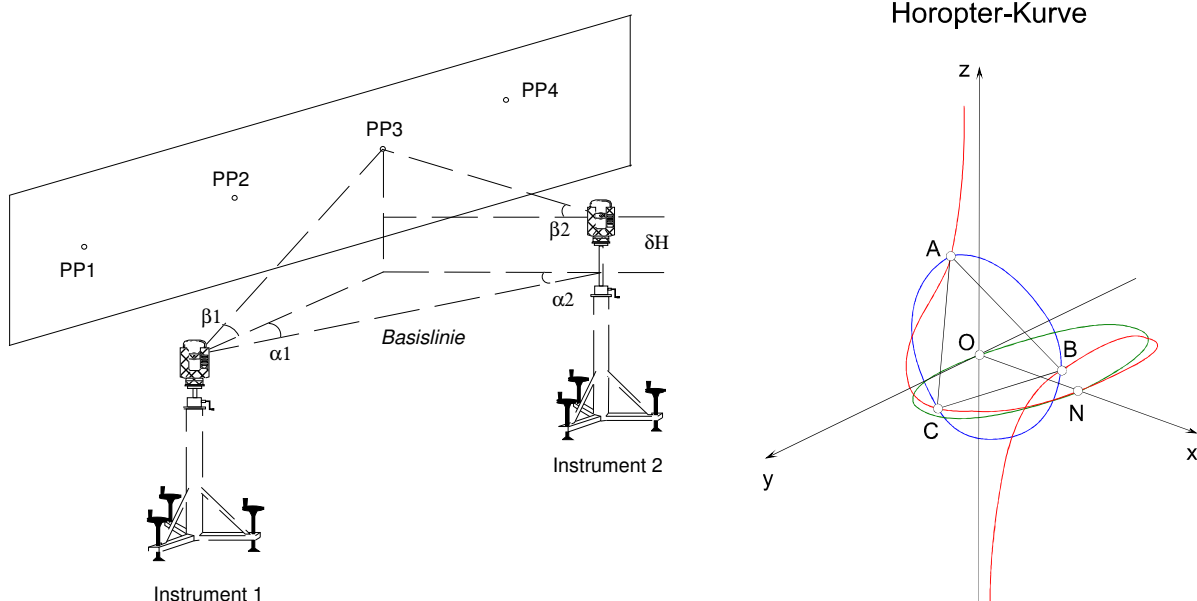
4.4 Dreidimensionale Koordinatenbestimmung

Beim **Vorwärts- und Rückwärtsschnitt** werden mindestens zwei elektronische Theodolite mit einem Rechner gekoppelt, der aus den Rohdaten - Horizontalrichtungen und Zenitwinkel - und mindestens einer bekannten Strecke im Objektraum vor Ort dreidimensionale Koordinaten ableitet. Der Rückwärtsschnitt entspricht prinzipiell der in der Photogrammetrie angewandten Methode zur Bestimmung von Position und Orientierung einer Kamera im Raum.

Mitunter wird in der Auswertesoftware bei Theodolitmesssystemen die Orientierung der Stehachse nicht vorgegeben. Die Parameter, die die richtungsmäßige Orientierung der Stehachse festlegen, werden dabei erst im Rahmen der Auswertung berechnet. Die gemessenen Zenitwinkel stellen allgemeine Raumwinkel dar, die keinen Bezug mehr zur Lotrichtung haben. Bei drei Festpunkten gibt es zwei gefährliche Konstellationen:

- Die drei Punkte liegen auf einer Geraden,
- die drei bekannten Festpunkte liegen gemeinsam mit dem gesuchten Standpunkt auf einer Zylinderoberfläche, die auf der Ebene durch die drei Festpunkte senkrecht steht.

Der gefährliche Ort beim räumlichen Rückwärtsschnitt ist vergleichbar mit dem "gefährlichen Kreis" beim ebenen Rückwärtsschnitt. Es gibt keinen gefährlichen Ort, wenn mindestens vier bekannte Punkte für den Rückwärtsschnitt genutzt werden, die nicht auf einer *Horopter-Kurve* liegen.



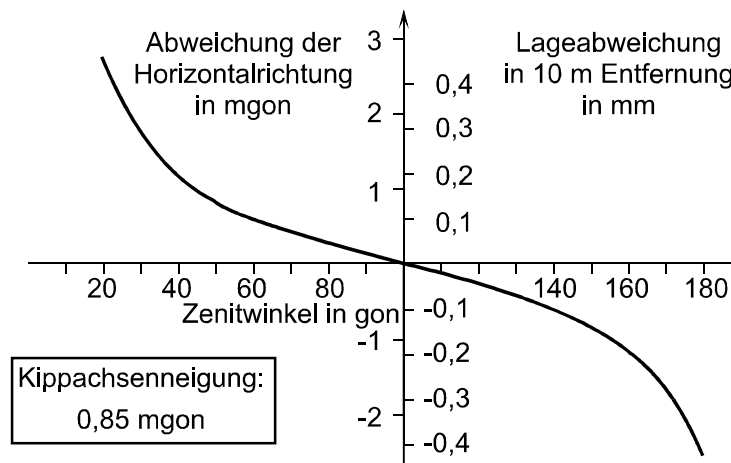
4.4.1 Theodolitfehler im Nahbereich

Die Ziel- und Kippachsenfehler sind vor jeder Messung zu bestimmen und an jede gemessene Richtung als Korrektur anzubringen. Der Justierzustand der Instrumente ist regelmäßig zu prüfen.

Da die Theodolite über Flüssigkeitskompensatoren zur Erfassung und Korrektur der Stehachsneigung verfügen und bestimmte Fertigungsschritte Schwingungen auslösen können, die zwar nicht die Winkelmessung stören, aber ein Einpendeln der Flüssigkeitsoberfläche verhindern, muss in diesen Fällen auf die *Kompensation der Stehachsneigung verzichtet* werden können. Dabei ist auf eine sehr sorgfältige *Horizontierung* des Instrumentes zu achten.

Beachte: Diese Fehler, deren Einfluss auf die gemessene Richtung vom Zenitwinkel abhängt, können *nicht immer als mit der Zeit unveränderbar* angesehen werden. Eine vor Beginn der Messungen vorgenommene Bestimmung dieser Fehlerkomponenten mit der dann anschließenden rechnerischen Korrektur einer nur in einer Lage gemessenen Richtung liefert aufgrund des zeitlichen Verhaltens der Theodolitfehler nicht die gleiche hohe Genauigkeit, die durch Messungen in beiden Fernrohrlagen erreicht wird. Der *Kippachsenfehler*, bzw. zeitliche Veränderungen desselben, werden auch bei elektronischen Theodoliten nicht durch den Stehachsenneigungssensor korrigiert.

Beispiel: Einfluss von Temperaturänderungen auf die Neigung der Kippachse: Träger des Theodolits aus Stahl mit dem Längenausdehnungskoeffizienten $11,5 \text{ mm}/(\text{m K})$, Fernrohrstützen 140 mm , Kippachse 120 mm lang. Ändert sich die Temperatur einer Fernrohrstütze einseitig, (Temperatureinflüsse oder aufgrund der Erwärmung der bei elektronischen Theodoliten in den Fernrohrstützen montierten elektronischen Baugruppen) nur um 1 K , so wird die Neigung der Kippachse um $0,85 \text{ mgon}$ geändert.



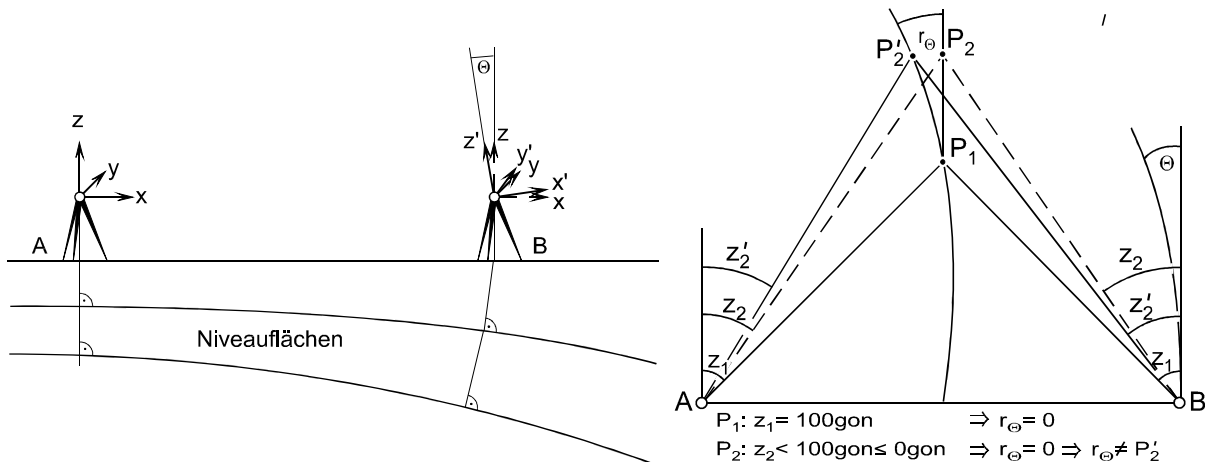
Exzentrizität infolge Restneigung der Stehachse bei elektronischen Theodoliten

Bei elektronischen Theodoliten wird die verbleibende Abweichung der Stehachse von der Lotrechten mit dem Stehachsneigungsmesser erfasst und Horizontalrichtungen und Zenitwinkel werden korrigiert. Bei unexakter Feinhorizontierung ergibt sich für die Horizontalrichtungen eine Exzentrizität zwischen dem Punkt der Winkelmessung (Schnittpunkt Kipp-, Ziel- und Stehachse) und dem Zentrum des Theodolitstandpunktes.

Beispiel: Bei einer Kippachsenhöhe von 200 mm und einem Arbeitsbereich des Stehachsneigungsmessers von 50 mgon entsteht eine Exzentrizität bis $0,16 \text{ mm}$. Diese wirkt sich besonders bei kurzen Zielweiten, systematisch auf die gemessenen Horizontalrichtungen aus. Bei einer Zielweite von 5 m würde die Richtungsabweichung $2,0 \text{ mgon}$ betragen. Bei kurzen Zielweiten sollte auf die Feinhorizontierung auch der mit Stehachsneigungsmessern ausgestatteten Theodolite nicht verzichtet werden.

Konvergenz der Lotlinien und Wirkung der Lotabweichung bei kurzen Distanzen

Theodolitmessungen beziehen sich auf die örtliche Lotrichtung. Da die Lotlinien untereinander konvergieren sind die Messungen für weitere Auswertungen in ein streng dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem zu reduzieren. Unterbleibt diese Reduktion, so treten die Reduktionsbeträge als systematische Messabweichungen in Erscheinung.



Beispiel: Stehen zwei Theodolite 30 m entfernt, so hat der eine Theodolit gegenüber dem anderen aufgrund der Konvergenz der Lotlinien eine Stehachsneigung von 0,3 mgon.

Lageveränderungen der Fokussierlinse

Die Verschiebung der Fokussierlinse in der Strichkreuzebene („Scharfstellung“) erfolgt nicht exakt längs der optischen Achse des Fernrohrsystems, sondern wird von zufälligen und systematischen Abweichungen überlagert; z.B. einseitige Temperaturänderungen des Fernrohrgehäuses mit der Zeit verändert die Lage der Zielachse.

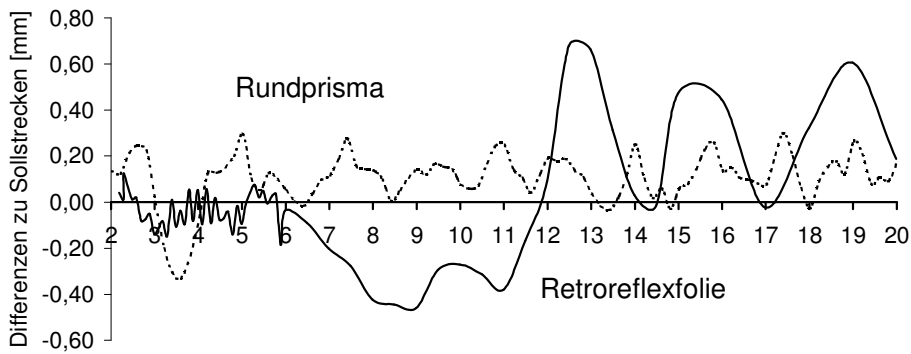
Diese Abweichungen führen im Nahbereich jeweils zu einer anderen Lage der optischen Achse, (Zielachsenfehler hängt von der momentanen Position der Fokussierlinse ab) und wirkt sich auf die Richtungsmessung aus. Dieser Effekt wirkt sich auf die Messungsergebnisse in zwei Fernrohrlagen nicht aus, wenn die Lage der Fokussierlinse beim Durchschlagen unverändert bleibt.

Beachte: Bei der satzweisen Richtungsmessung mit kurzen Zielweiten sind die einzelnen Ziele direkt nacheinander in der ersten und dann sofort in der zweiten Fernrohrlage - ohne die Fokussierlinse dabei zu verstellen - anzumessen.

4.4.2 Präzisionsdistanzmessungen im Nahbereich

Für die Distanzmessung wird eine absolute Messgenauigkeit von $\sigma_s = 1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ und im Nahbereich von $\sigma_s = 0,5 \text{ mm}$ auf 120 m angegeben. Als Zielpunktmarkierung werden Retroreflexfolien (20 x 20, 40 x 40, 60 x 60 mm), Hohlspiegelreflektoren und Prismareflektoren signalisiert.

Die Reichweite der Distanzmessung zu den Reflexfolien beträgt 2 m bis etwa 180 m. Bei Distanzen bis 20 m wird eine Vorsatzlinse auf das Objektiv gesetzt. Sie hat die Form einer Spaltblende und ist innen und außen verspiegelt. Damit wird die Send- und Empfangsoptik gegen Störsignale abgeschirmt. Die Messgenauigkeit für eine Distanz im Nahbereich bis 90 m liegt bei 0,7 mm. Bei Objekten mit einer Ausdehnung von 50 x 50 m entspricht die Genauigkeit der Distanzmessung damit der Winkelmessung.

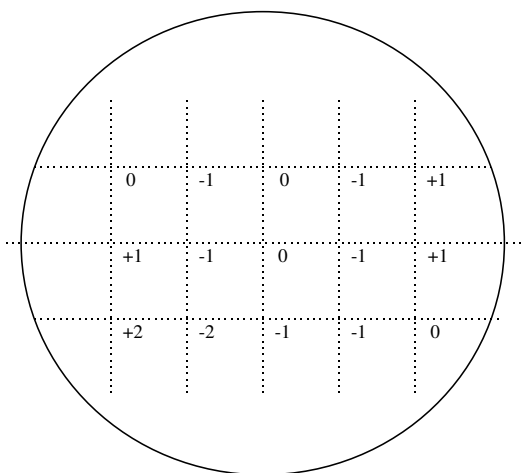


Im Nahbereich wird die Genauigkeit einer Punktbestimmung durch die Distanzmessung beeinflusst. Die Bestimmung der Additionskorrektur für Reflexfolie und Prisma erfolgt durch direkten Soll-Ist-Distanzvergleich mit einem Laser-Interferometer oder auf einer Prüfstrecke mit vier Teilstrecken, die Vielfachen des EDM-Feinmaßstabes von 3 m. Im Messbereich bis 15 m treten bei Messungen auf 20 x 20 mm Reflexfolien systematische Abweichungen von $\pm 0,6$ mm auf. Im Messbereich bis 90 m unterscheiden sich die Genauigkeiten bei Messung auf unterschiedliche Reflektortypen nicht mehr.

Prüfstrecke	Reflektortyp	Bereich [m]	Additionskorrektur c [mm] mit $s_c = 0,2$ mm
Lokal	Prisma	100	1,6
Lokal	Reflexfolie	100	33,8
Messkeller	Prisma	20	1,6
Messkeller	Reflexfolie	20	34,0

Um auf Retroreflexfolien messen zu können, deren Ebene mit der Ebene des Zielstrahles einen spitzen Winkel einschließt, müssen die optischen Strahlengänge im Instrument zentrisch angeordnet sein. Ist dies nicht der Fall, beziehen sich Reflexions- und Zielpunkt nicht auf einen identischen Punkt; es erfolgt eine abweichende Distanzmessung. Der Grenzeinfallswinkel der Verdrehung beträgt bei den Reflexfolien 15° . Bei diesen Einfallswinkeln übersteigen die Distanzdifferenzen nicht den Wert von 1 mm.

Untersuchungen ergaben Differenzen in der Distanzmessung auf Retroreflexfolien zwischen der ersten und zweiten Fernrohrlage von 1,5 mm bei einer Verschwenkung der Zielmarken zum Zielstrahl über 20° . **Beachte:** Distanzmessungen im Nahbereich in **zwei Fernrohrlagen**.



Durch fehlerhaft arbeitende Sendedioden werden Strahlen mit inhomogener Phasenlage erzeugt. Das bedeutet, dass Punkte der gleichen Phase zum selben Zeitpunkt unterschiedliche Distanzen zurückgelegt haben. Vor allem die Distanzmessung im Nahbereich sollte daher immer am gleichen Zielpunkt am Reflektor erfolgen. Theoretisch muss dieser Zielpunkt aus dem Ergebnis einer Maximumpeilung entstehen.

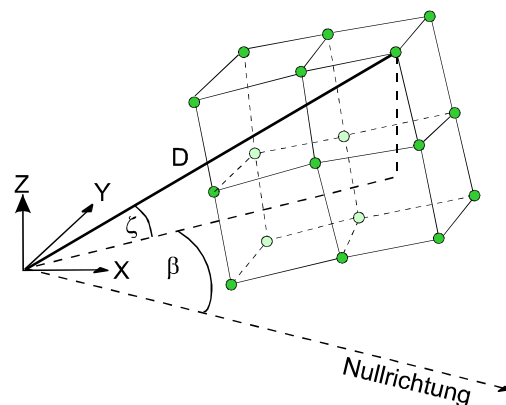
4.5 Industriemesssystem

Ein Industriemesssystem wird zur Bestimmung dreidimensionaler kartesischer Koordinaten eingesetzt. Es wird zwischen Theodolitmesssystem und Polarmesssystem mit Industrietachymeter unterschieden.

4.5.1 Polarmesssystem

Beim Polarmesssystem erfolgt mit einer Totalstation (z.B. TC 2002) oder einem Industrietachymeter (z.B. TDM 5005) die dreidimensionale Punktbestimmung die Horizontalrichtung β , die Zenitrichtung ζ und die Raumdistanz D nach folgender Gleichung

$$\begin{pmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{pmatrix} = D \cdot \begin{pmatrix} \sin \zeta \sin \beta \\ \sin \zeta \cos \beta \\ \cos \beta \end{pmatrix}$$



Da nur ein Standpunkt benötigt wird, ist die Polarmessung nicht nur flexibler, sondern auch wirtschaftlicher einsetzbar. Die Genauigkeit bei der Koordinatenbestimmung ist, bedingt durch den Einfluss der Streckenmessgenauigkeit im Nahbereich, geringer als im Vergleich zur reinen Winkelmessung mit dem TMS⁷.

Da bei Theodolitmesssystemen jeder Messpunkt von mindestens zwei Theodolitstandpunkten einsehbar sein muss, benötigt der Einsatz dieses Messverfahrens einen verhältnismäßig großen Freiraum vor dem Messobjekt.

Bei dem polaren Messsystem wird im Gegensatz zu den TMS (2 Standpunkte) bereits mit einer Zielung der Messpunkt eindeutig bestimmt. Bei unübersichtlichen Platzverhältnissen sind polare Messverfahren vorteilhafter einzusetzen als Theodolitmesssysteme.

4.5.2 Theodolitmesssystem

Bei Theodolitmesssystemen werden unabhängig vom Messobjekt, die Theodolitstandpunkte und -teilkreisorientierungen zunächst relativ zueinander in einem kartesischen Koordinatensystem bestimmt. Der Ursprung liegt im Schnittpunkt der Drehachsen eines beliebig gewählten Theodolits; z-Achse in Richtung Zenit; x-Achse weist zum zweiten Theodolit.

⁷ GOTTWALD R. (1996): Industriemesssysteme in der 4. Generation – Leica Axyz.

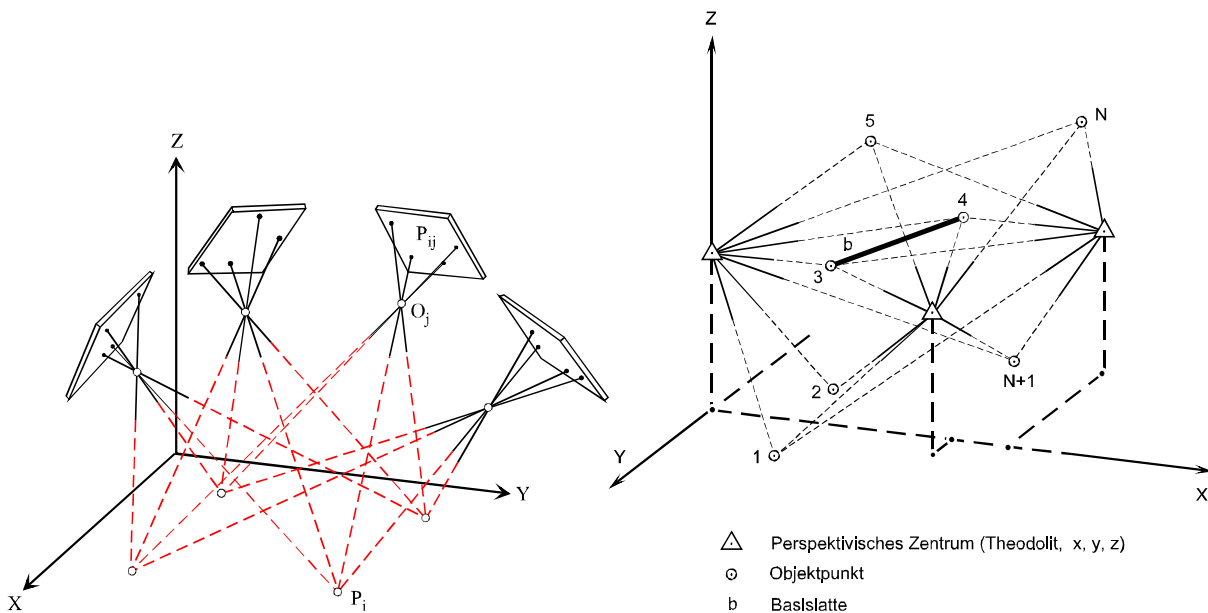


Abb.: Mehr-Bild-Triangulation und Theodolitmesssystem

Um den Maßstab des Systems zu bestimmen, ist es notwendig, mindestens zwei Punkte mit bekanntem Abstand anzuzielen: Basislatte oder einen anderen Maßstab als Referenzlänge so in dem Objektraum platzieren, dass die Endpunkte mit beiden Theodoliten angezielt werden können. Bei dieser Orientierungs-, Positions-, und Maßstabsbestimmung (**Orientierung**) gibt es zwei Methoden:

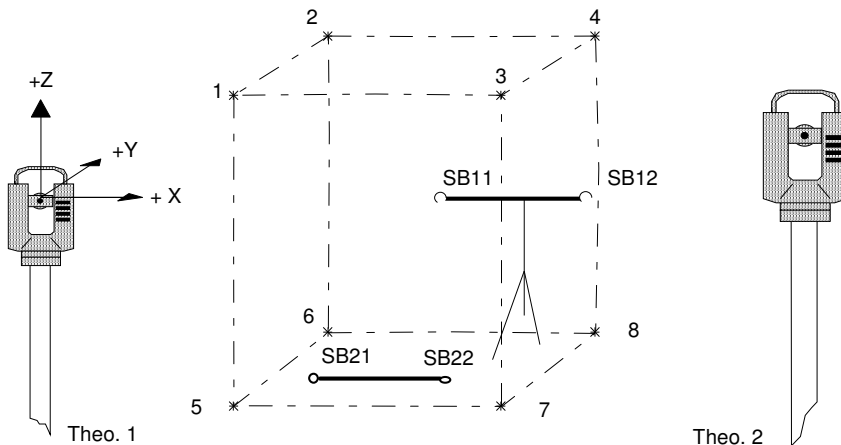
- Verfahren der "Gegenseitigen Anzielung"
- Bündelausgleichung

Verfahren der Gegenseitigen Anzielung

- Gegenseitiges Anzielen der Theodolite
- am Gegeninstrument befindliche Zielmarke wird zweimal angezielt, wobei das angezielte Instrument zwischen beiden Anzielungen um 180° zu drehen ist, um die Exzentrizität der Zielmarke in Bezug zum Schnittpunkt der Theodolitachsen zu eliminieren
- Instrumentenfehler bestimmen und als Korrekturen anbringen
- Maßstabsbestimmung: Anzielung der Endpunkte kalibrierter Referenzlängen

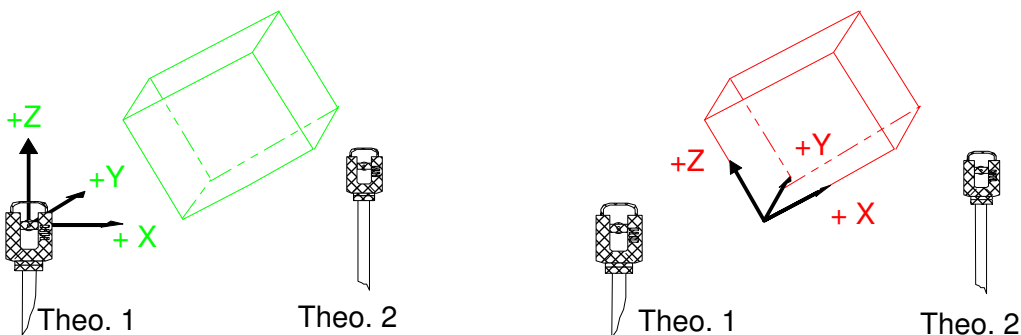
Orientierung ohne gegenseitige Anzielung

- Orientierungsparameter aus der Anzielung von Objektmesspunkten und/oder von ausschließlich für die Orientierung verwendeten Messpunkten und die Endpunkte der Referenzlängen, mindestens fünf Punkte (10 bis 15 Zielpunkte)
- Referenzlänge in unterschiedlicher Ausrichtung an drei bis vier Positionen im Messvolumen aufstellen und bereits einzelne Punkte am Messobjekt anzielen



Die mit den Theodoliten gemessenen Horizontalrichtungen und Vertikalwinkel lassen sich als Strahlenbündel auffassen. In der Bündelausgleichung werden diese Strahlenbündel so gedreht und verschoben, dass sich die jeweils zu einem Zielpunkt verlaufenden Strahlen bestmöglich in einem Punkt treffen, unter der Bedingung, dass die Referenzlängen die kalibrierten Maße einhalten. Als Ergebnis erhält man die gegenseitige Orientierung der Theodolite und 3D-Koordinaten der Punkte allerdings noch nicht im Objektkoordinatensystem.

Nach der Orientierung können mittels Vorwärtsschnitt Punkte am Messobjekt bestimmt werden. Die berechneten Punktkoordinaten beziehen sich zunächst noch auf das Koordinatensystem der Orientierungsmessung. Sind innerhalb dieses Systems jedoch ausreichend Punkte gemessen, für die Koordinaten im Objektkoordinatensystem vorgegeben sind, lassen sich die Parameter einer räumlichen Koordinatentransformation berechnen. Mit diesen Parametern wird dann jeder weitere gemessene Punkt sofort ins Objektkoordinatensystem umgerechnet.



Lokal

=> Transformation =>

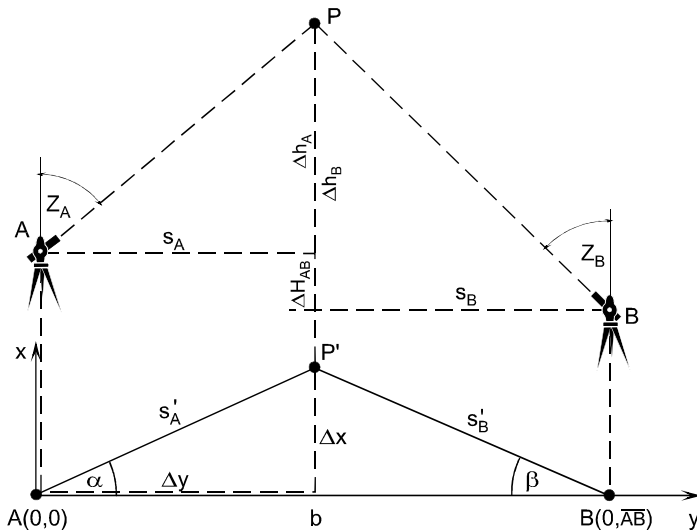
Object

Ein lokales Koordinatensystem hat seinen Ursprung im Achsenschnittpunkt des Theodolit 1. Ein Objektkoordinatensystem bezieht sich über Referenzpunkte direkt auf bestehende Objektkoordinaten. Ein lokales System kann in ein Objektkoordinatensystem transformiert werden.

Von den 7 Freiheitsgraden der 3D-Transformation (Maßstab, 3 Verschiebungen und 3 Drehungen) werden meist nur sechs oder vier in Anspruch genommen, denn

- der Maßstab ist durch die Referenzlänge(n) festgelegt
- bei vielen Aufgabenstellungen soll eine Koordinatenachse lotrecht stehen.

Verknüpft man die für die Orientierungsmessung durchgeführten Beobachtungen mit den Beobachtungen zu den Neupunkten, können alle gesuchten Raumpunkte mit einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen gemeinsam bestimmt werden.



Bei Kenntnis der Orientierungsparameter berechnet das System die Objektpunktkoordinaten bezogen auf den Theodolit A als Nullpunkt eines räumlichen Koordinatensystems aus

$$y = b \cdot \frac{\sin \beta \cdot \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \quad x = b \cdot \frac{\sin \beta \cdot \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}$$

$$h = \frac{1}{2} \left(b \cdot \frac{\sin \beta \cot z_A + \sin \alpha \cot z_B}{\sin(\alpha + \beta)} + \Delta H_{AB} \right)$$

Die Koordinatenbestimmung der Objektpunkte sollte von der Auswertung der Orientierungsmessung nicht getrennt werden. Mit jedem neuen Messwert wird eine Neuausgleichung aller Messungen einschließlich der Orientierungsmessungen durchgeführt.

- Berechnung von Ersatzelementen (z.B. Gerade, Kreis, Ebene, Zylinder, Kugel)
- Berechnung datumsunabhängiger Genauigkeitsmaße: Standardabweichungen von Winkeln und Strecken, von senkrechten Abständen zu einer ausgleichenden Geraden.

4.5.3 Konfiguration und Systemgenauigkeit

Die Messunsicherheit ergibt sich aus: $\sigma_r = 0,2$ bis $0,4$ mgon, $s = 10$ m, $q = 0,03$ bis $0,06$ mm,

$\sigma_p = 0,05$ bis $0,1$ mm für signalisierte Objektpunkte ist abhängig von:

- der Richtungsmessgenauigkeit und der Entfernung
- der Genauigkeit der Referenzlänge (Kalibrierung)
- Anzielung der signalisierten Punkte
- Schnittwinkel der Zielstrahlen
- Stabilität der Instrumentenaufstellung
- Refraktion und Umfeld (laufende Maschinen?)
- Instrumentelle Einschränkungen (Winkelauflösung, $1''$) + Anzielunsicherheit des Beobachters = Genauigkeit einer Beobachtung (1σ)

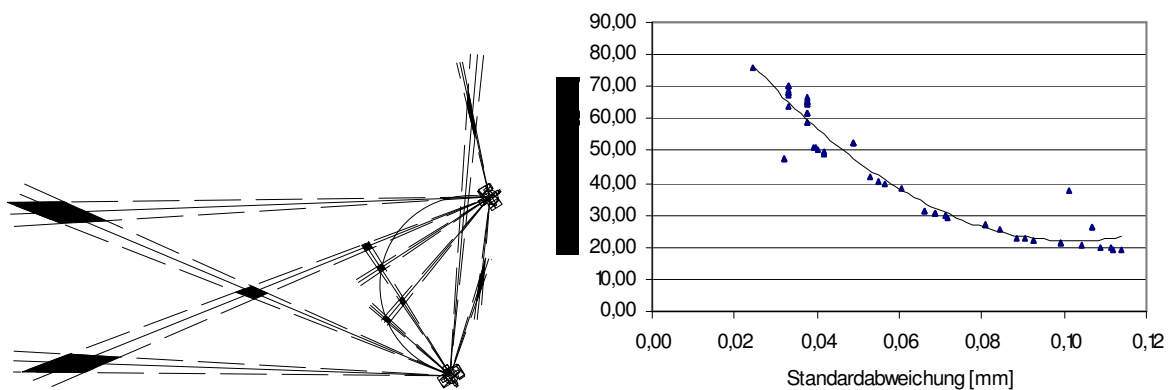
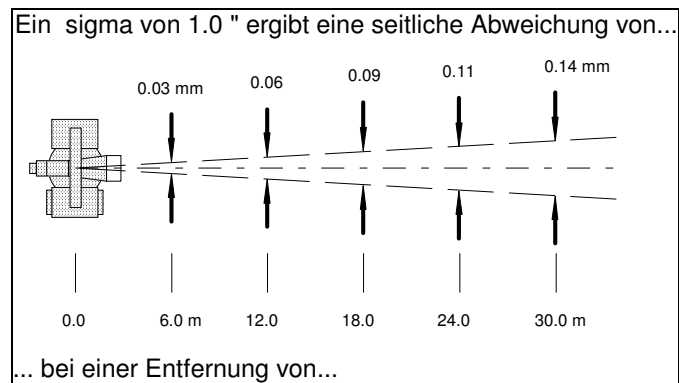


Abb.: Netzgeometrie und Schnittwinkelkonfiguration

Wenn ein Punkt nach der Berechnung zu schlecht ist...

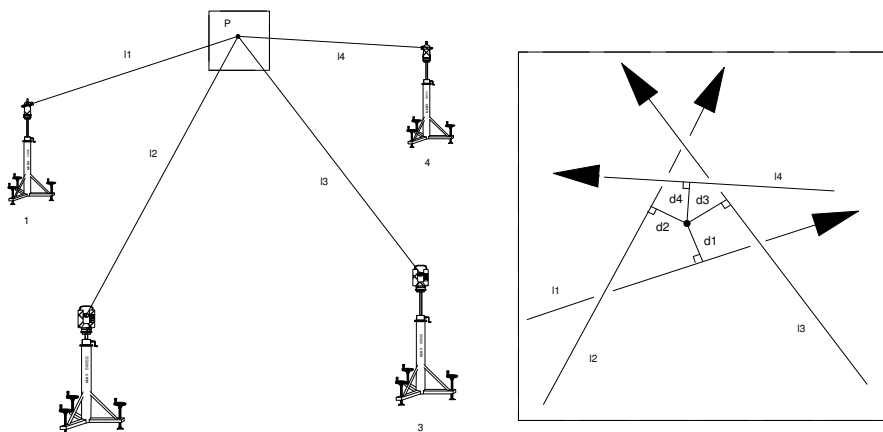


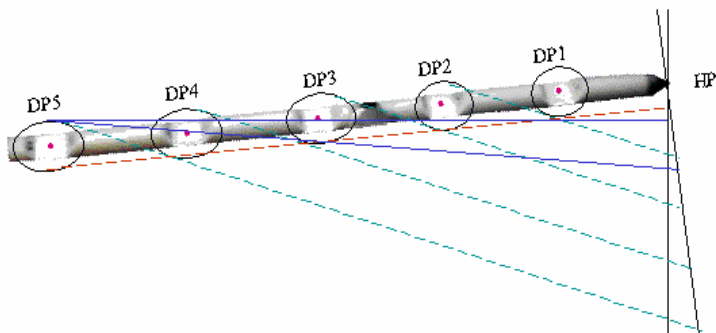
Abb.: Ziellinienschnitt- bzw. schwerpunkt

Die zwei oder mehr Zielstrahlen verlaufen im Allgemeinen windschief im Raum. Sie werden sich aufgrund der Messunsicherheit nicht in einem Punkt schneiden. Als gedachter "Schnittpunkt" wird jener Punkt berechnet, dessen Abstände zu den Zielstrahlen in der Summe am kleinsten sind. Bei der Beschränkung auf 2 Theodolitstandpunkte kann als wahrscheinlichster Schnittpunkt derjenige angenommen werden, welcher den kürzesten Abstand zwischen den Geraden halbiert.

4.5.4 Messung verdeckter Punkte

Der „**Hidden point Stab**“ ist ein Exzenterstab und dient der Bestimmung von verborgenen Punkten (engl.: Hidden points). Auf dem Stab sind fünf Zielpunktmarkierungen (engl.: Device points) mit bekanntem Abstand (100 mm) zur Spitze angebracht. Mit Hilfe dieser exzentrischen Signalisierung können die Koordinaten der verdeckten Objektpunkte indirekt gemessen und berechnet werden. Die Koordinatenberechnung für die Stabspitze ergibt sich aus der Messung zu zwei Device points:

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{DP_{i+1}} - \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{DP_i}$$



Die Koordinaten der Stabspitze können durch die Geradengleichung zweier Punkte bestimmt werden. Dabei wird der Richtungsvektor entweder aus der Horizontalrichtung t und dem Vertikalwinkel ζ oder aus den Koordinatendifferenzen der beiden verwendeten Punkte gebildet. Die Koordinaten des verdeckten Punktes (HP) ergeben sich unter Beachtung des Device point Abstands von 100 mm

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{HP} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{DP_i} + 100 \text{ mm} \begin{pmatrix} \cos \zeta \cdot \cos t \\ \sin \zeta \cdot \cos t \\ \sin \zeta \end{pmatrix}$$

Die Genauigkeit wird beeinflusst von

- den Teilungsfehlern des Stabes,
- der Exzentrizität der DP gegenüber der Mittellinie,
- den Aufsetzfehlern der Stabspitze und
- der Ausrichtung des Stabes gegenüber den Ebenen.

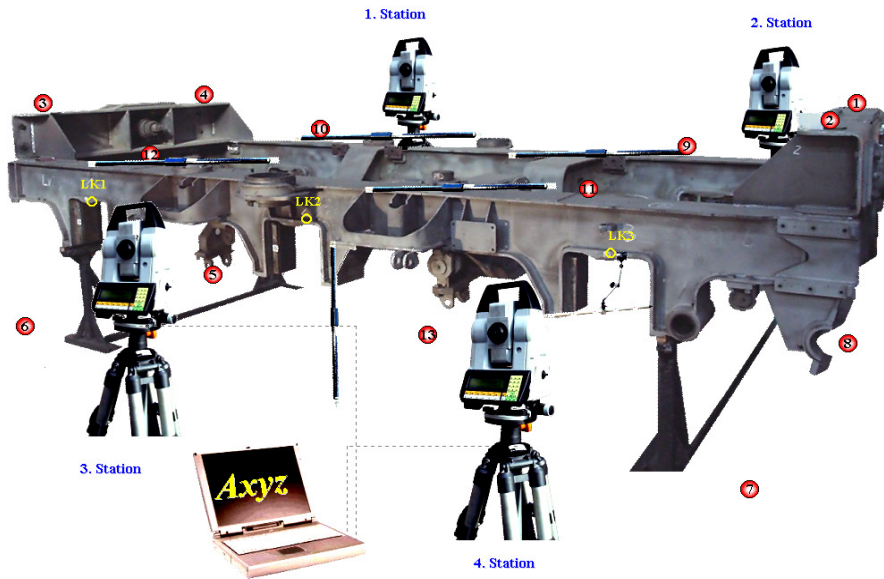
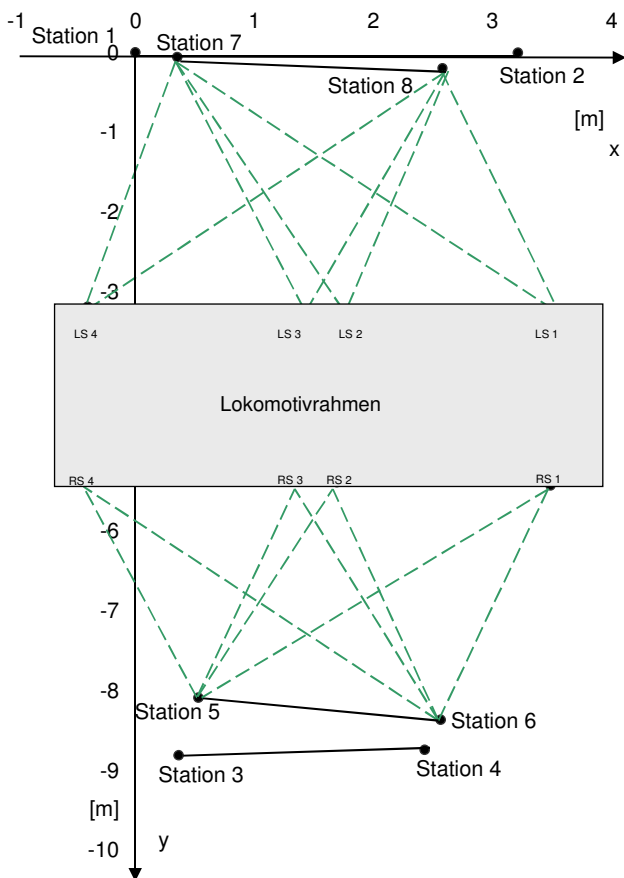


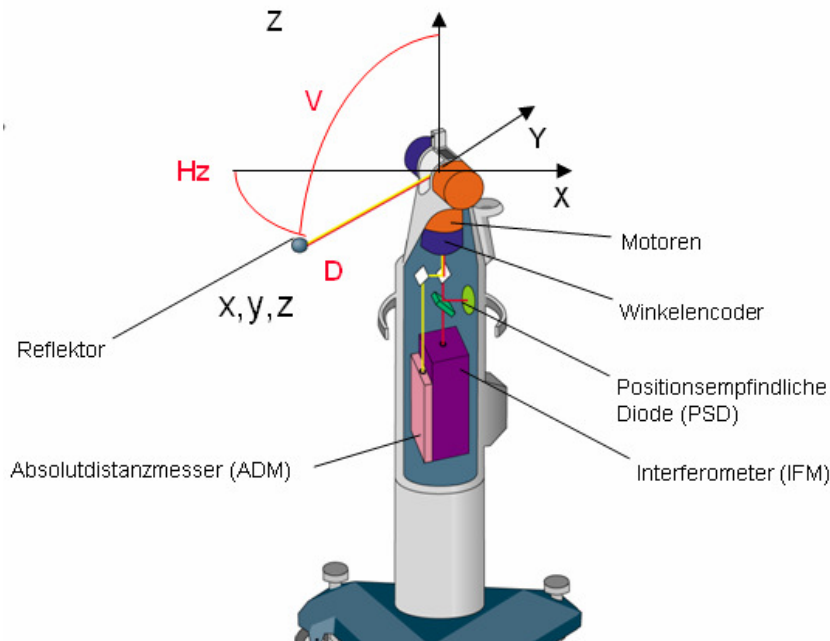
Abb. Schienenfahrzeugbau (Diplomarbeit VOLKHOLZ, 2000)



Punkt	S_x [mm]	S_y [mm]	S_z [mm]	S_p [mm]
LS1	0,06	0,05	0,03	0,08
LS2	0,05	0,04	0,03	0,07
LS3	0,05	0,03	0,03	0,07
LS4	0,07	0,05	0,04	0,09
RS1	0,09	0,05	0,04	0,11
RS2	0,08	0,05	0,02	0,10
RS3	0,08	0,05	0,02	0,10
RS4	0,05	0,05	0,04	0,08

4.6 Lasertracker

Mit dem Laser Tracking System kann die dreidimensionale Erfassung von Koordinaten sowohl während der Bewegung als auch auf statische Zielpunkte bis zu einer Entfernung von ca. 35 m erfolgen. Bei der 3D- *interferometrischen Entfernungsmessung* wird der Laserstrahl einem automatisch ausrichtbaren Reflektor nachgeführt, der verschwenkbare Laserstrahl verfolgt den Reflektor.



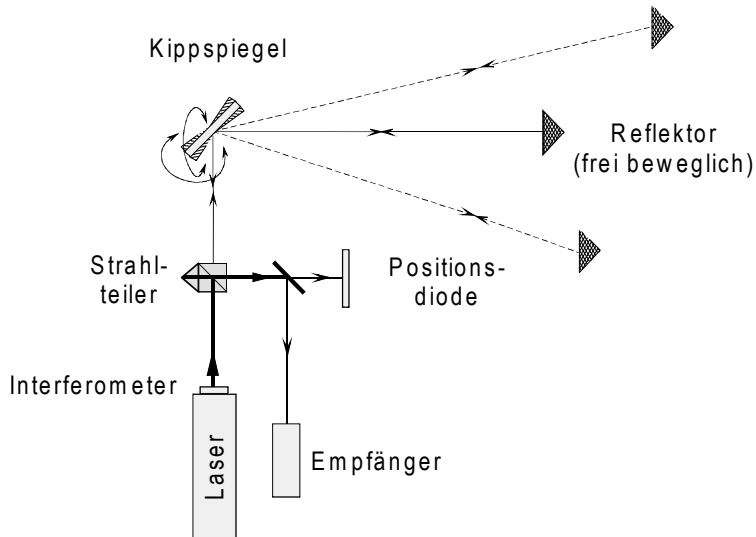
4.6.1 Systemaufbau

Ein Lasertracker System besteht aus:

- Der Messkopf mit den Sensoren zur Messwernerfassung sendet die entsprechenden Sensorwerte und Signale an die Controlleinheit.
- Im Controller erfolgen die Signalauswertungen und die Prozessoreinheit erzeugt aus den Signalen die notwendigen Steuerungsgrößen des Regelkreises zur Reflektorverfolgung und gibt die Messwerte an den Applikationsrechner weiter.

Der Messkopf eines Lasertrackers sendet das Laserlicht des Interferometers über den Polarisationsstrahlteiler und den drehbar gelagerten Kippspiegel zum Reflektor und gelangt über den gleichen optischen Weg wieder zurück. Der Strahlteiler koppelt einen gewissen Anteil des reflektierten Lichtstrahles auf den Positionsdetektor aus. Den verbleibenden Strahlanteil nutzt die Elektronik im Interferometer zur Messung der relativen Entfernung, während am Positionsdetektor die seitliche Auslenkung des Strahles bestimmt wird.

Die Werte der Strahlauslenkung werden anschließend im Controller mit den Winkelwerten der beiden Encoder (horizontal und vertikal) verrechnet, um die Strahlrichtung auf das Zentrum des Reflektors zu reduzieren. Über Steuersignale für die beiden Motoren wird die Nachführung und kontinuierliche Ausrichtung des Messstrahls auf den Reflektor sichergestellt (3000/Sekunde). Die Weitergabe der Messwerte erfolgt mit einer Übertragungsrate von bis zu 1000 Messungen/sek.



Der Messvorgang beginnt durch die Anzielung eines Reflektors, der im Reflektorhalter (Home Point) positioniert ist. Die Distanz zum Mittelpunkt des Reflektors im Reflektorhalter ist ein aus der Kalibrierung bekannter geometrischer Systemparameter.

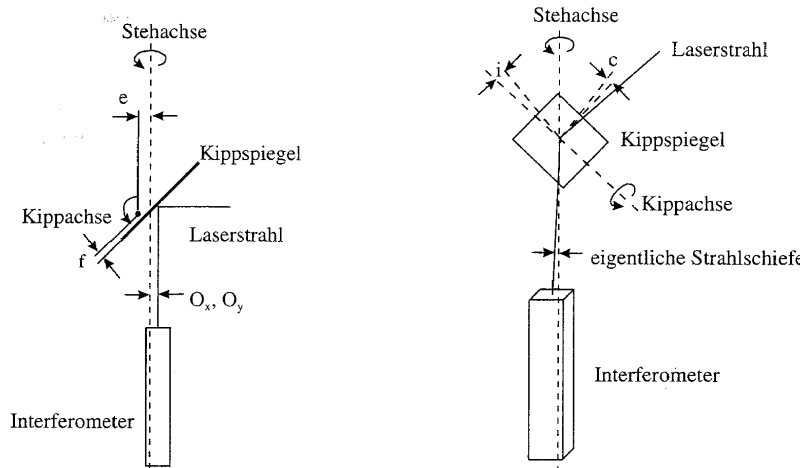
Der Lasertracker liefert die gemessenen dreidimensionalen Koordinatenwerte. Zusätzlich ermöglicht der absolute Distanzmesser den Neustart der Messung mit dem Lasertracker von einem beliebigen Punkt aus. Der Messstrahl des Distanzmessers wird in den ursprünglichen Strahlengang eingekoppelt und dem Strahl des Laserinterferometers überlagert. Die Separierung der beiden reflektierten Messstrahlen bereitet aufgrund der unterschiedlichen Wellenlängen des Laserlichts (632.8 nm bei Interferometer und 780 nm beim Distanzmesser) keine Schwierigkeiten.

Bei einer Unterbrechung des Strahles wird auch die kontinuierliche Reflektorverfolgung gestoppt. Zum Neustart des Messablaufs kann der Benutzer nun den Messstrahl manuell oder über die Tastatur des Rechners in die Nähe des Reflektors positionieren und hat mit Hilfe der Funktion „Find Reflector“ die Möglichkeit, den Regelkreis wieder zu aktivieren.

	Laser Tracker	T-Probe mit 110 mm Taster
	Messunsicherheit (2σ) für Raumlängen bis 6 m	
3D-Punkte	$U_{ADM} = 8\mu\text{m} + 14\mu\text{m} / \text{m}$	$U = 70\mu\text{m} + 10\mu\text{m} / \text{m}$
Raumlängen	$U_{IFM} = \pm 4\mu\text{m} + 14\mu\text{m} / \text{m}$ $U_{ADM} = \pm 10\mu\text{m} + 14\mu\text{m} / \text{m}$	$U \pm 55\mu\text{m} + 10\mu\text{m} / \text{m}$

4.6.2 Kalibrierung

Das gesamte Lasertracker System erfordert eine sehr gewissenhafte Montage und Justierung der Einzelkomponenten. Ein Teil dieser Parameter wird durch spezielle Messabläufe einmalig vor der Auslieferung der Lasertracker Systeme beim Hersteller bestimmt (Maßstabswerte des Positionsdetektors). Für eine zweite Gruppe von Parametern, die größtenteils auf geometrischen Einflüssen beruhen, existiert ein spezieller Kalibrierungsablauf (3-4mal/Jahr).



Reflektoren



Die gängigsten Reflektortypen (Genauigkeitsanforderungen im μm -Bereich) sind aufgrund der Zentrier- und Anzielbedingungen in Kugeln montiert. Die Messwerte und die angegebenen Additionskonstanten der Reflektoren beziehen sich jeweils auf den Kugelmittelpunkt: Reflektoren mit Durchmesser (75 mm, 1,5“ und 0,5“).

Der ungewöhnlichste Reflektor ist das so genannte „Cat Eye“, das aus verschiedenen großen Glaskugeln bzw. Kugelschalen mit speziell berechneten Brechungseigenschaften besteht. Dieser Reflektortyp ist nur in einer 75 mm Kugel erhältlich. Die Ausrichtung zum Messstrahl kann bis zu einem Winkel von $\pm 60^\circ$ von der Normalenrichtung abweichen ohne Distanz- oder Richtungsfehler.

Der zweite Reflektortyp besteht aus drei senkrecht aneinander gekitteten Planspiegeln, einem „Air Pass Corner Cube“. Die Ausrichtung dieses Reflektors zum Messstrahl muss besser als $\pm 25^\circ$. Die kontinuierliche Positionierung des Regelkreises zielt folglich in die erwartete Richtung und verursacht Messfehler, die von der Größe und Ausrichtung des Reflektors abhängen. Aus diesem Grund werden 0,5“ (12,7 mm) große (Tooling Ball) Reflektoren angeboten, da die normale Ausrichtung ($< \pm 20^\circ$) des Reflektors nur bei derartig kleinen Glaskörpern keine Messfehler verursacht.

Neben der von jedem Reflektortyp bekannten Additionskonstante ist die Distanz zum Reflektorhalter (Home Point) eine genauigkeitsrelevante Messgröße.

Die klassische Messaufgabe mit dem Lasertracker ist die Aufnahme von Bahnen im Raum, zum Beispiel zur Messung des Positionier- und Einschwingverhaltens von Robotern.