

Vortrag zum 14. Internationalen Kongreß der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie
eingereicht durch die AG V/5 Industrie-Photogrammetrie
(Prof. K. Linkwitz) innerhalb der Kommission V: Nichttopographische Photogrammetrie, 13. - 15.7.1980 Hamburg

Dr.-Ing. W. Dutschke
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb
(Prof. Warnecke) der Universität Stuttgart

Aufgaben und Verfahren der Fertigungsmeßtechnik

Abstrakt

Im Vordergrund steht das Messen geometrischer Größen an eng tolerierten Werkstücken. Konventionelle Meßgeräte für Maß, Form, Lage und Oberflächenrauheit haben einen hohen technischen Stand erreicht. Die Industrie-Photogrammetrie käme zur Prüfung komplizierter aber grob tolerierter dreidimensionaler Werkstücke in Betracht, die derzeit auf Mehrkoordinaten-Meßgeräten gemessen werden. Lichtbilder und Film geben einen Überblick über Aufgaben und heute angewandte Verfahren der Fertigungsmeßtechnik.

1. Aufgaben der Fertigungsmeßtechnik

Fertigungsmeßtechnik ist die Meßtechnik in der Fertigung. Kennzeichnend für die Fertigung ist das Herstellen, Bearbeiten und Zusammenbauen von Werkstücken, von geometrischen Körpern, an die viele verschiedene Anforderungen gestellt werden. Jede physikalische Größe kann eine Eigenschaft eines fertigungstechnischen Produktes sein. Wenn es sich um ein Erzeugnis aus dem Bereich der Optik, Elektronik, oder der Mechanik handelt, stehen optische, elektrische oder mechanische Größen im Vordergrund einer Qualitätsbewertung. Bei Erzeugnissen der mechanischen Fertigung ist die Geometrie besonders wichtig. Etwa 90 % aller Merkmale von Teilen aus der mechanischen Fertigung betreffen geometrische Eigenschaften wie Länge, Form, Lage und Oberflächenrauheit. Hierzu zählen Außen- und Innenmaße, Abstände, Durchmesser, Höhen- und Tiefenmaße, Koordinatenmaße, Form-, Lage- und Winkelmaße, ferner Oberflächenmaße, Kegel-, Gewinde- und

Zahnradmaße. Einige dieser Längenmaße können am Rohmaterial (Draht, Band, Profil, Gußteil, Preßteil) am halbfertigen oder am fertigen Werkstück geprüft werden (Bild 1).

Die Prüfung ist niemals Selbstzweck sondern sie dient der Qualitätssicherung. Es werden insbesondere diejenigen Merkmale geprüft, die für die spätere Funktion des Werkstückes relevant sind. Erst die Maßhaltigkeit aller tolerierten Merkmale bietet die Gewähr für die Erfüllung der Qualitätsanforderungen (Bild 2).

In der mechanischen Fertigung werden sehr häufig Einzelteile zu Baugruppen und diese wieder zu Aggregaten, Vorrichtungen, Maschinen und Fahrzeugen zusammengesetzt, deren Gesamtfunktion von der Beschaffenheit aller Einzelelemente abhängt. Zusammenbau (Montage) und Austauschbau setzen das Messen und Prüfen voraus. Für den montage- und funktionsgerechten Austauschbau haben besonders die Gestaltabweichungen große Bedeutung. Ein an einem Punkt eines geometrischen Werkstückes gemessenes Längenmaß reicht häufig nicht aus, um die Montierbarkeit mit einem Gegenstück sicherzustellen. Form- und Lageabweichungen aber auch Rauheit und Welligkeit der Werkstückoberflächen können selbst dann die Austauschbarkeit unmöglich machen, wenn alle Längenmaße toleranzhaltig sind. Für den Austauschbau ist das Paarungsmaß entscheidend, es ist das Maß des formfehlerfreien Gegenstückes, das mit dem formfehlerbehafteten Werkstück gerade noch gepaart werden kann /1/. Das Paarungsmaß kann nur mit großen meßtechnischen Schwierigkeiten bestimmt werden. Die nichtmaßliche Prüfung mit festen körperlichen Lehren dient wohl zur Beurteilung der Austauschbarkeit und entspricht einem probeweisen Montieren mit einem Gegenstück, es gestattet jedoch nicht das Paarungsmaß zu messen.

2 Verfahren der Fertigungsmeßtechnik

2.1 Meß- und Prüfmittel der Werkstatt

Zur Prüfung von Teilen der mechanischen Fertigung werden in der

Werkstatt nach wie vor Grenzlehren eingesetzt. Rundpassungslehren zum Lehren von Bohrungen (Grenzlehrdorne) und Wellen (Grenzrachenlehren) sind weit verbreitet. Auch Außen- und Innengewinde, Außen- und Innenkegel, Bohrungsabstände, Nuten und Keilwellen werden häufig durch Lehren geprüft. In der modernen Mengenfertigung sind Grenzlehren unverzichtbare Hilfsmittel zur Qualitätsprüfung (Bilder 3 und 4).

Bisher werden daneben in den Werkstätten auch anzeigende Meßgeräte verwendet, mit denen Längenmaße an wenigen Punkten des Werkstückes gemessen werden. Die Meßzeuge der Werkstatt wie Meßschieber, Meßschraube, Meßständer mit Meßuhr oder Feinzeiger sind allgemein bekannt. Große Flexibilität, kurze Prüfzeit und geringe Prüfkosten bei ausreichend kleinen Meßunsicherheiten haben für eine starke Verbreitung dieser Werkstattmeßgeräte gesorgt, die künftig auch mit inkrementalen Meßsystemen und Mikrocomputern ausgerüstet werden (Bilder 5 und 6).

2.2 Meßvorrichtungen zum Prüfen von Maß und Form

In der Mengenfertigung sind neben Meßzeugen Meßvorrichtungen und Meßautomaten anzutreffen. Für Motorenteile wie Kolben, Zylinder-, Kurbelwelle, Pleuel, Kolbenbolzen, Ventil oder Nockenwelle sind Maß-, Form- und Lagetoleranzen von wenigen Mikrometern kennzeichnend. Bild 7 veranschaulicht die Größe $1 \mu\text{m} = 1/1000 \text{ mm}$ im Verhältnis zu Objekten des täglichen Lebens.

Grundlage zur Beurteilung solcher Werkstücke ist ein Antasten der Werkstückoberfläche an verhältnismäßig wenigen Punkten. So lassen sich z.B. durch Verknüpfungen solcher Meßpunkte an einem Pleuel die Durchmesser der Pleuelbohrungen, deren Ovalität, Konizität, Abstand und Parallelität berechnen. Bild 8 deutet die Lage von 16 Meßpunkten an einem Pleuel an, die nahezu gleichzeitig abgefragt und miteinander verknüpft werden können. Meßautomaten mit selbsttätiger Werkstückzu- und -abführung und Protokollierung aller Werte (Bild 9), verursachen wohl hohe Investitionen, ermöglichen aber bei Meßunsicherheiten in der Größenordnung von $1 \mu\text{m}$ Prüfzeiten von wenigen Sekunden. Sie

arbeiten praktisch fehlerfrei. Im Gegensatz zur Prüfung durch den Menschen können mit Prüfautomaten gute und schlechte Teile einwandfrei voneinander unterschieden werden. Durch die Antastung an einzelnen Punkten können allerdings die zwischen den Meßpunkten liegenden Maß- und Formabweichungen nur bedingt beurteilt werden. Eine durch stetiges Abtasten auf einem Formprüfgerät ermittelte vergrößerte Kontur eines Werkstückes sagt über Formabweichungen sicher mehr aus. Bild 10 zeigt das Polarogramm eines rotationssymmetrischen Werkstückes, das auf einem Rundheitsmeßgerät ermittelt wurde.

Der Aufbau eines solchen Meßgerätes geht aus Bild 11 hervor. Diese Geräte besitzen eine Präzisions-Rundführung als Normal für die Kreisform. Die Rundlaufabweichungen von Rundtischen oder umlaufenden Tastsystemen können $\leq 0,1 \mu\text{m}$ sein /2/. Bild 12 zeigt ein Zylinderformprüfgerät, bei dem zusätzlich zum Rundtisch eine Präzisions-Vertikalführung vorhanden ist, mit der das Tastsystem in Achsrichtung des Werkstückes geführt wird. Die Prüfung der Zylinderform auf einem solchen Gerät beruht auf Rundheitsmessungen in bis zu 9 verschiedenen Ebenen (Höhen) und deren Verknüpfungen (Bild 13). Über 500 Meßpunkte charakterisieren die Kreisformabweichungen in einer Ebene. Aus $9 \times 500 = 4500$ Meßpunkten wird nach dem Gaußschen Prinzip ein Referenzzylinder berechnet, auf dessen berechnete Achse alle Meßpunkte koordinatentransformiert werden, damit dann die beiden extremen Meßpunkte gefunden werden, deren Abstände maximal und minimal gegenüber der Referenzzylinderachse sind. Diese Art der Verknüpfung von Meßpunkten ist nur mit digitalen Rechnern möglich. Bisher wurden dafür Prozeßrechner eingesetzt, künftig werden Mikrocomputer die wirtschaftlichere Alternative sein /3/.

Es gibt viele spezielle, kinematisch arbeitende Formprüfgeräte, z.B. Nockenwellen-, Evolventen-, Zahnschräge- und Kegelformprüfgeräte, die in Anbetracht der geforderten Präzision sehr teuer sind und auch hohe Prüfkosten verursachen. Sie werden deshalb ausschließlich zum Prüfen einzelner, hochgenauer Werkstücke, vorzugsweise aber zum Prüfen von Normalien, Maß- und Formverkörperungen, Meisterstücken und Lehren einge-

setzt. Auch bei diesen Geräten erstreckt sich die Formprüfung nur auf einzelne Schnitte, eine lückenlose Erfassung sämtlicher Formelemente ist dabei nicht möglich.

2.3 Form- und Lageprüfung auf Mehrkoordinaten-Meßgeräten

Das in Bild 11 gezeigte Zylinderformprüfgerät stellt bereits ein Mehrkoordinaten-Meßgerät dar, jedoch ein auf die Anwendung ausgelegtes, spezielles. Kennzeichnend für die häufig mit 3 orthogonalen Meßachsen und einer zusätzlichen Drehachse ausgerüsteten Koordinaten-Meßgeräte sind deren Vielseitigkeit. Nahezu alle geometrischen Größen; Maß, Form und Lage können auf Mehrkoordinaten-Meßgeräten geprüft werden. Bild 14 zeigt den Aufbau und Bild 15 die Ansicht eines Mehrkoordinaten-Meßgerätes. Solche Geräte besitzen teilweise sehr genaue Schlittenführungen und eingebaute inkrementale Meßsysteme. Ein schaltender oder ein messender Tastkopf berührt das Werkstück an den Meßpunkten mechanisch. Mehrkoordinaten-Meßgeräte werden heute ausschließlich in Verbindung mit digitalen Rechnern, z.B. mit dem Tischrechner HP 9825 und umfangreichen Meßprogrammen verwendet, mit denen Koordinatentransformationen, Ausgleichsrechnungen und die Berechnung von Formelementen aus vielen Meßpunkten möglich sind. Der Rechner erlaubt auch einen CNC-Betrieb, bei dem nach einem vorgegebenen Programm bestimmte Punkte am Werkstück angefahren und deren Toleranzhaltigkeit berechnet wird. Durch Verknüpfung vieler Meßpunkte im Rechner läßt sich auch das eingangs erwähnte Paarungsmaß berechnen, das in Hinblick auf Montage und Austauschbau besondere Bedeutung hat.

Der Tastkopf signalisiert die Berührung mit dem Werkstück und bietet zugleich einen Schutz gegen Kollision. Dadurch werden bei automatischem Meßablauf im CNC-Betrieb Tastsystem, Meßgerät und Werkstück vor Beschädigung bewahrt. Ein Auszug aus dem Film eines Geräteherstellers deutet Aufgaben und Arbeitsweise von Mehrkoordinaten-Meßgeräten an.

Schwergewicht des Einsatzes liegt bei der Prüfung komplizierter räumlicher Werkstücke, z.B. NC-gefertigter Frästeile, Maschi-

nen- und Vorrichtungs-, Flugzeug- und Motorenteile, Getriebegehäuse, Turbinenschaufeln in kleinerer und mittlerer Stückzahl sowie einzelner Kfz-Karosserien. Mehrkoordinaten-Meßgeräte gibt es für kleine Werkstücke mit einem Meßbereich 500 x 200 x 300 mm und für große Teile mit einem Meßvolumen von 16000 x 6000 x 4000 mm, auf denen ganze Kfz-Karosserien im Original punktweise oder streckenweise geprüft werden können.

Wenn das Tastsystem über eine Nachführeinrichtung in dauerndem Kontakt über die Oberfläche gleitet, spricht man von "scanning". Diese Betriebsweise gestattet auch solche Formelemente kontinuierlich abzufahren, deren mathematische Funktion nicht bekannt ist. Die Meßpunkte werden dabei fortlaufend aufgenommen. Bild 16 zeigt das Ergebnis einer Nockenprüfung bei kontinuierlichem Abtasten (scanning) des Nockens in Umfangsrichtung. Beim "scanning" steuert das Tastsystem die Schlittenbewegungen. Die Koordinaten eines Meßpunktes werden aus der Schlittenposition und aus den Auslenkungen des Tastbolzens berechnet. In der Betriebsweise "scanning" eignet sich ein Mehrkoordinaten-Meßgerät auch zum Prüfen von Zahnflanken, Gewinden, Schnecken, Turbinenschaufeln und Kurvenscheiben mit beliebiger Gestalt.

2.4 Formprüfung durch Photogrammetrie

Die Prüfung räumlicher Formen wird bei speziellen Formprüfgeräten gewöhnlich auf ebene Probleme zurückgeführt. Das erwähnte Mehrkoordinaten-Meßgerät und die Photogrammetrie haben den Vorzug einer dreidimensionalen Beurteilung. Das Verfahren, mit dem aus Luftbildern topographische Karten hergestellt werden, wurde für die Formprüfung bisher kaum angewendet, obwohl es gestattet, die Raumkoordinaten eines dreidimensionalen Werkstückes zu bestimmen, das von mindestens zwei unterschiedlichen Standpunkten aus photographiert wurde. Die anzuvisierenden Meßpunkte müssen allerdings auf Außenflächen liegen, die der Kamera zugänglich sind. Sie sollen zudem auf der photographischen Aufnahme gut erkennbar sein und sich mit möglichst geringer Unsicherheit anvisieren lassen. Die an einem Werkstück sichtbaren Konturen und Durchdringungen von Flächen haben für

dessen Funktion häufig keine Relevanz. An den für die Funktion entscheidenden Flächenelementen fehlen hingegen in der Regel Markierungen. Nicht verkörperte Punkte und Linien wie Spitzen, Ecken, Kanten und Achsen sind weder am Werkstück noch an der photographischen Aufnahme sichtbar, sie lassen sich daher auch nicht optisch anvisieren. Auf solchen Formflächen sind daher zusätzliche Marken oder ein Netz von Markierungen anzubringen, wobei die Lage von drei Punkten zueinander bekannt sein muß. Das Anbringen von Marken ist eine Erschwernis für die Praxis. Ein weiteres Hindernis scheint die verhältnismäßig große Meßunsicherheit des Verfahrens zu sein. Aufnahmeentfernung und Brennweite des Objektivs bestimmen Bildmaßstab und Genauigkeit. Nach Ansicht eines Herstellers /4/ beträgt die auf das photographische Bild bezogene Meßunsicherheit 5 µm, bei einem Abbildungsmaßstab 1:10 somit 50 µm am Objekt. Ein Anwender /5/ gibt die Meßunsicherheit mit:

$$2 \times 10^{-4} \times L < u_{95} < 6 \times 10^{-5} \times L$$

für eine Objektgröße L 2000 mm an. Für ein Objekt mit L = 2000 mm liegt die Meßunsicherheit im Bereich von 120...400 µm.

Geht man davon aus, daß die Meßunsicherheit 30 % der Toleranz der Meßgröße nicht überschreiten darf, dann läßt sich die Photogrammetrie nur für Werkstücke mit Qualitäten IT 10... IT 12 anwenden, d.h. zur Messung von Formabweichungen, die nahe bei den Freimaßtoleranzen (IT 13) liegen.

Aus diesen Gründen kommt die Photogrammetrie nur zum Prüfen der Form komplizierter aber grob tolerierter dreidimensionaler Werkstücke in Betracht, die mit Markierungen versehen werden können. Inwieweit Turbinenschaufeln, Propeller und Kfz-Karosserien diese Bedingungen erfüllen, müßte noch untersucht werden. Es wäre wünschenswert, wenn eine Stelle die sowohl die Photogrammetrie beherrscht als auch die Mehrkoordinaten-Meßtechnik anwendet, beide Verfahren miteinander vergleichen und die Ergebnisse veröffentlichen würde.

2.5 Oberflächenprüfung

Die Fertigungsmeßtechnik wäre ohne die Oberflächenprüfung unvollständig dargestellt. Die Oberfläche trägt in ihrer Mikrogeometrie mit ihrer Rauheit und Welligkeit sehr wesentlich zur Erfüllung der Funktion des Werkstückes bei. Das menschliche Auge ist zur Beurteilung der Mikrogeometrie einer Oberfläche wenig geeignet. Auch Mikroskop und Elektronenmikroskop lassen eine quantitative Beurteilung der dreidimensionalen Mikrogeometrie der Oberfläche nicht zu. Die in der Praxis verwendeten Methoden reduzieren die Prüfung auf ein zweidimensionales Problem. Dabei hat sich das Tastschnittverfahren am aussagefähigsten erwiesen. Es gestattet alle der in Schnittebenen definierten Parameter zu messen: R_z , R_{\max} , R_a , R_g , R_p , W_t , P_t und t_c , um nur einige der wichtigsten zu nennen. Bild 17 zeigt den Aufbau und Bild 18 die geometrischen Einschränkungen des Tastschnittverfahrens. Bild 19 enthält Oberflächendiagramme, die beim Messen einer Oberfläche mit verschiedenen Tastsystemen entstanden. Wie bei der Formprüfung geht auch in die Oberflächenprüfung die Entwicklung von der Analog- zur Digitaltechnik, sie führt zum vermehrten Einsatz des Mikrocomputers (Bilder 20 und 21). Die Oberflächenprüfung verursacht verhältnismäßig hohe Prüfkosten. Die Oberflächenrauheit kann daher nur stichprobenartig an einzelnen Werkstücken geprüft werden. Die Prüfung erstreckt sich auch nur auf eine kurze Taststrecke von wenigen mm Länge. Eine 100%ige Prüfung ist auch nicht notwendig, denn die Beschaffenheit der Oberfläche wird weitgehend vom Fertigungsprozeß bestimmt. In einem beherrschten Prozeß sind sprunghafte Veränderungen von Oberflächenmaßen nicht zu erwarten.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Die Überwachung der Qualität von Erzeugnissen der mechanischen Fertigung beruht hauptsächlich auf der Prüfung geometrischer Eigenschaften. Maß, Form, Lage und Oberfläche werden vorzugsweise als Ein- oder Zwei-Koordinaten-Maße und nur zum kleinen Teil dreidimensional beurteilt.

Die Entwicklung der Fertigungsmeßtechnik bietet Beispiele für eine enge Wechselwirkung zwischen Mechanik, Optik und Elektronik. Die Fortschritte auf dem Gebiet Feinmechanik-Optik waren zwischen den Weltkriegen die Voraussetzung für die Herstellung von Komparatoren und Meßmikroskopen. Nach dem Zweiten Weltkrieg brachte die Elektronik und später die Informatik wesentliche Impulse für die Fertigungsmeßtechnik. Die Entwicklung der Mehrkoordinaten-Meßtechnik wäre ohne die Fortschritte der Datenverarbeitung nicht denkbar gewesen. Es wird erwartet, daß mit Hilfe von Fernsehsystemen und durch Bildauswertung mit digitalen Rechnern in naher Zukunft eine Automatisierung der Sichtprüfung möglich sein wird. Auch die Photogrammetrie kann künftig ein Hilfsmittel für die Fertigungsmeßtechnik sein, um komplizierte räumliche Formelemente zu prüfen. Man wird besonders dann auf sie zurückgreifen, wenn eine räumlich gekrümmte Fläche nicht an einzelnen Meßpunkten oder einzelnen kurzen Strecken sondern flächig beurteilt werden soll. Eine Zusammenarbeit zwischen den Fachleuten der Photogrammetrie und der Fertigungsmeßtechnik kann dazu beitragen, die Einschränkungen und Anwendungshindernisse zu überwinden.

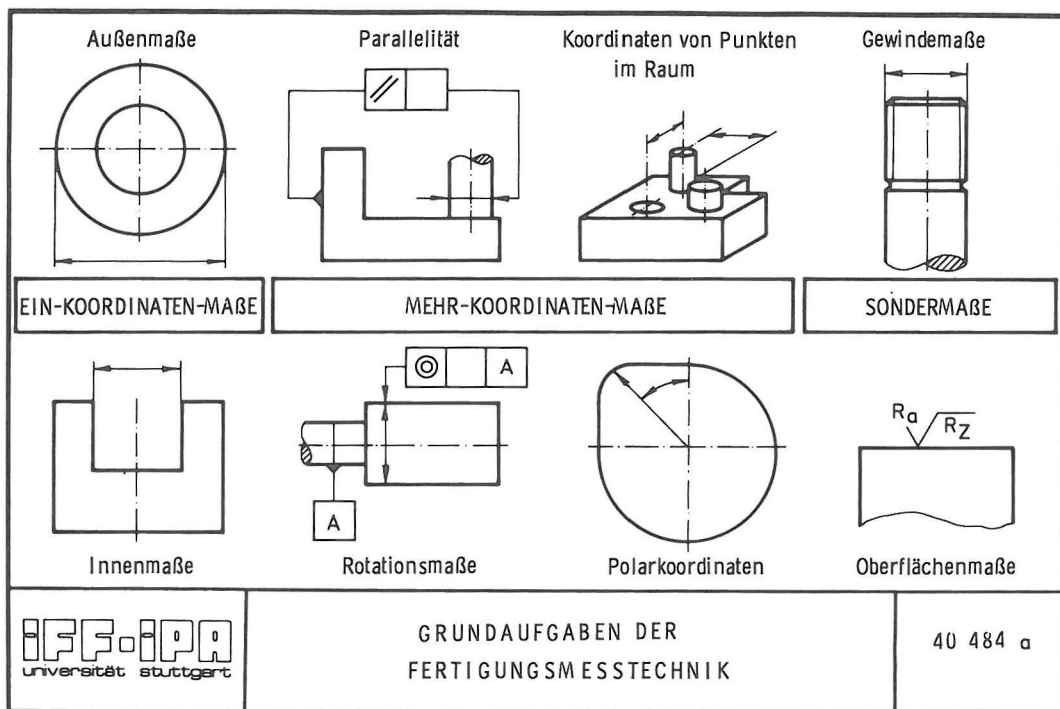


Bild 2 Fertigungsmeßtechnik

Schrifttum

- /1/ Trumpold, H.: Zur Tolerierung und Messung der Gestaltabweichungen.
Feingerätetechnik 29 (1980), H. 2, S. 64...65.
- /2/ Dutschke, W. u. A. Zimmermann: Abnahmemessungen an einem Zylinderform-Prüfgerät.
wt-Z.ind.Fertig. 69 (1979) S. 403...407.
- /3/ Dutschke, W.: Werkstücke während der Bearbeitung messen.
VDI-Nachrichten 6 (8.2.80), S. 19.
- /4/ Persönliche Mitteilung von Herrn Lüder, Abt. Bildmeß in Fa. Carl Zeiss, Oberkochen/Württ.
- /5/ Regensburger, K.: Industriephotogrammetrie in der DDR - Einsatzbereiche, Probleme, Entwicklungstendenzen. Vorgelegt zum Symposium Fertigungsmeßtechnik 3.-7.3.80 in Dresden.

Bildunterschriften

- 1 Längenmaße
- 2 Fertigungsmeßtechnik
- 3 Lehrenarten
- 4 Photos von Grenzlehren
- 5 Meßschieber mit digitaler Anzeige
- 6 Höhenmeßgerät mit Mikrocomputer
- 7 Mikrometer
- 8 Meßvorrichtung für Kfz-Pleuel
- 9 Prüfautomat für Kfz-Pleuel
- 10 Polardiagramm zur Darstellung von Kreisformabweichungen
- 11 Aufbau Rundheitsmeßgeräte
- 12 Zylinderformprüfgerät
- 13 Zylinderformprüfung
- 14 Aufbau von Mehrkoordinaten-Meßgeräten
- 15 Mehrkoordinaten-Meßgerät
- 16 Polardiagramm eines Nockens, Messen durch "scanning"
- ~17 Tastschnittverfahren

- 18 Geometrische Einschränkungen Tastschnittverfahren
- 19 Oberflächendiagramme
- 20 Aufbau Oberflächemeßgerät
- 21 Photo von Oberflächemeßgerät