

Das Laser-Interferometer im Dienste der Fertigungsgenauigkeit



Angaben zum Autor

Adolf FRANK, Dipl.-Ing. Dr. techn., o. Univ. Prof., Vorstand des Institutes für Fertigungstechnik der TU Graz

Geburtsjahrgang 1938. Studium des Maschinenbaues an der Techn. Hochschule Graz. Assistent am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TH Graz, Vorstand Prof. Dr. R. Musyl. Promotion zum Dr. techn., Titel der Dissertation: »Ein neues digital-absolutes Positionsmesssystem«. Technischer Leiter der Fa. R.S.F.-Elektronik in 5121 Tarsdorf, digitale Positionsmesssysteme und NC-Steuerungen für Werkzeugmaschinen. Seit dem Studienjahr 1979/80 o. Univ. Prof. und Vorstand des Institutes für Fertigungstechnik der TU Graz.

Die Produktqualität ist für viele Industriebetriebe heute zum entscheidenden Überlebenskriterium im Verdrängungswettbewerb geworden. Wenn die Qualität eines Produktes auch nicht allein durch genau gefertigte Einzelteile bestimmt wird, sondern das Ergebnis eines umfassenden Qualitätsmanagements ist, so bleibt die Fertigungsgenauigkeit doch unbestritten eine der Voraussetzungen für jede Qualitätsstrategie. Die modernen numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen (NC-Maschinen) liefern die Basis hiezu. Wenn es gilt, diese Maschinen zu überprüfen, so kommt ein modernes Meßgerät zum Einsatz, ohne das die heute beherrschten Toleranzen nicht denkbar wären: Das Laser-Interferometer.

Was ist Präzisionsfertigung?

Mit dem Wort Präzisionsfertigung verbindet man im allgemeinen die Begriffe Uhrenbau, Feinmechanik, Meßgerätefertigung. Winzige Zahnräder, die miteinander kämmen, Wellen, die man ohne Pinzette nicht montieren könnte und Geräte, deren Konstruktion im Maßstab 10:1 erfolgt, erwecken den Eindruck höchster Präzision, kleinster Toleranzen und genauester Fertigung.

Gewiß, hier zählt nur das μm , der Tausendstel Millimeter. Und dennoch: Die wirkliche Präzisionsfertigung spielt sich heute in ganz anderen Größenordnungen ab. Nämlich dort, wo es gilt, Bohrungen mit Durchmessern von sechs Meter innerhalb von einigen Hundertstel Millimetern maßgenau auszudrehen oder wo Stichmaße von Bohrungen im Nennmaßbereich von mehreren Metern mit Hundertstel Millimetern toleriert sind. Vielfach findet man Zeichnungen, in

denen metergroße Durchmesser nicht mehr nach dem ISO-Passungssystem toleriert sind, sondern wo die zulässigen Maßabweichungen in Bruchteilen von Millimetern angegeben sind. Wenn man diese Angaben mit dem entsprechenden Nennmaß auf die ISO-Qualitäten umrechnet, kommt man zu der erstaunlichen Tatsache, daß heute im Großmaschinenbau vielfach die ISO-Qualitäten 5 oder 4 oder gar darunter vorgeschrieben werden. Das sind aber Toleranzen, die bisher dem Lehrenbau vorbehalten waren!

Woher kommen nun diese, wie es scheint überspitzten Forderungen und wie ist es möglich, sie zu erfüllen?

Einige der Forderungssteller und deren Beweggründe sind rasch genannt. Die extremsten auf diesem Gebiet sind wohl die Kernkraftwerksbauer und das Streben nach größtmöglicher Sicherheit. Höchste Genauigkeiten werden aber auch dort gefordert, wo nicht die Sicher-

heit im Spiel ist, sondern wo es allgemein um die Verbesserung des Wirkungsgrades von Maschinen geht. Wirkungsgradverbesserungen von ganzen Prozenten gehören heute auf nahezu allen Gebieten des Maschinenbaues der Vergangenheit an. Das heute vorherrschende Ringen um Bruchteile von Prozenten spiegelt sich im Streben nach Beherrschung des μm in der Fertigung wieder. Kleinere Spalte in Strömungsmaschinen verbessern ebenso den Wirkungsgrad wie geringere Reibung von Kolben in Zylindern. Beides bedingt erhöhte Fertigungsgenauigkeit.

NC-Technik, Wundermittel mit Schönheitsfehlern

Und nun zur zweiten Frage: Wie ist es heute möglich diese Forderung zu erfüllen. Auch diese Frage ist leicht zu beantworten: Durch hochgenaue Werkzeugmaschinen und hochauflösende Meßsysteme. Kurz: Durch die moderne NC-Technik.

Ein wesentliches Element jeder NC-Maschine stellen die Positionsmesssysteme der angesteuerten Bewegungsachsen dar. Die Bewegungen und Positionen von Fräsmaschinentischen, Bohrwerksspindelkästen oder Drehmaschinensupporten werden entweder über opto-elektronisch abgetastete Linearmaßstäbe oder auf dem Umweg über einen hochgenauen Gewindespindel-Mutter-



Antrieb durch rotatorische Meßgeber erfaßt. Diese Technologie gehört heute zum Stand der Technik. Das heißt, die Meßsysteme sind ausgereift, präzise, zuverlässig und in den wichtigsten Abmessungen standardisiert. Die Erfassung von Hundertstel Millimeter auf nahezu unbegrenzte Längen ist Standard, Tausendstel Millimeter keine Zauberei. Von den leuchteten Ziffern der digitalen Positionsanzeige auf Werkzeugmaschinensteuerungen geht eine gewisse Magie aus. Die drei Dezimalstellen hinter dem Komma zeigen vertrauseinflößend Tausendstel Millimeter an. Die Frage ist jedoch, ob sich diese Maßeinheiten auch auf dem Werkstück wiederfinden. Die Zweifel sind berechtigt und sollen stark vereinfacht anhand von Bild 1 erläutert werden. Beim Vergleich zwischen der manuellen Drehbearbeitung links im Bild und der NC-Bearbeitung rechts fällt folgendes auf. Bei der manuellen Bearbeitung nimmt der Dreher nach dem Spananstellen am Werkstück Maß und stellt das Drehwerkzeug um den fehlenden Betrag zu, womit der Enddurchmesser erreicht wird. Das Meßsystem auf der NC-Maschine mißt dagegen nur die Planschlittenposition. Das heißt, alle Einflüsse, welche die Lage der Drehmeißelspitze relativ zum Abtastkopf des Meßsystems verändern, können von der Steuerung nicht erkannt werden und führen zwangsläufig zu Maßfehlern am Werkstück.

Und diese Einflüsse sind in der Tat mannigfaltig und gravierend. Die Werkzeugabnutzung und Verformung des Bettes quer zur Drehachse, hervorgerufen etwa durch die Zerspanungskräfte gehören genauso dazu wie der Verschleiß der Führungen. Ganz besonders störend, weil schwer erfaßbar: Wärmeeinflüsse. Lineare Längenänderungen von Maschinenkomponenten und thermische Biegungen infolge von Temperaturgradienten innerhalb von Betten und Maschinenständen wirken sich in Maß- und Formabweichungen am Werkstück aus. Ein große Rolle spielt hierbei der sogenannte Abbe'sche Komparatorfehler. Da es aus technischen Gründen nicht möglich ist, das Meßsystem der NC-Maschine mit dem Werkzeugangriffspunkt fluchtend anzuordnen, wirken sich Verkippungen von Maschinenkomponenten stets in einem Positionsfehler erster Ordnung aus wie dies in Bild 2 anhand eines horizontalen Bearbeitungszentrums dargestellt ist. Durch den sogenannten Schlingerwinkel β_x entsteht am Werkstück ein Positionsfehler Δx , der von der Steuerung nicht erkannt werden kann, da diese die x-Position des Ständers lediglich von dem am Bett befestigten Meßsystem bezieht. Sicherlich ist im gezeichneten Beispiel der Winkel β_x kraß übertrieben, die Verhältnisse sind aber durchaus realistisch, wenn berücksichtigt wird, daß es sich bei den Maschinendimensionen und somit auch beim Kompara-

torabstand a um die Größenordnung Meter handelt, die Positionsmessung am Maßstab aber auf Tausendstel Millimeter erfolgt. Und wenn weiter bedacht wird, daß sich im allgemeinen Fall den Schlingerbewegungen β_x noch Nickbewegungen γ_x und Rollbewegungen α_x überlagern. Die Ursache dieser Winkelverkippungen sind unter anderem das Spiel in Führungen, die Elastizität des Bettes und thermische Verformungen.

Wenn nach diesen Feststellungen nun eher Skepsis an der Genauigkeit der NC-Maschine angebracht erscheint, so muß doch unter Hinweis auf Bild 1 folgende Tatsache festgehalten und unterstrichen werden: Während der Werkstückdurchmesser auf der konventionellen Maschine von der Geschicklichkeit, der Sorgfalt, ja letztlich auch von der Tagesverfassung des Arbeiters abhängt, ist dieser nicht spezifizierbare Einfluß bei der NC-Fertigung ausgeschaltet. Auf der anderen Seite ist das Entwicklungsziel, welches zur höchsten Genauigkeit führt, damit klar zu erkennen. Die mechanische Genauigkeit der NC-Maschine muß verbessert werden. Das Betriebsverhalten der Maschine, das heißt die Veränderungen der Maschinengeometrie unter Betriebsbedingungen muß beherrscht werden. Nun gilt jedoch eine grundlegende Regel: Eine Größe, die nicht gemessen werden kann, kann auch nicht gezielt beeinflusst werden. Um das

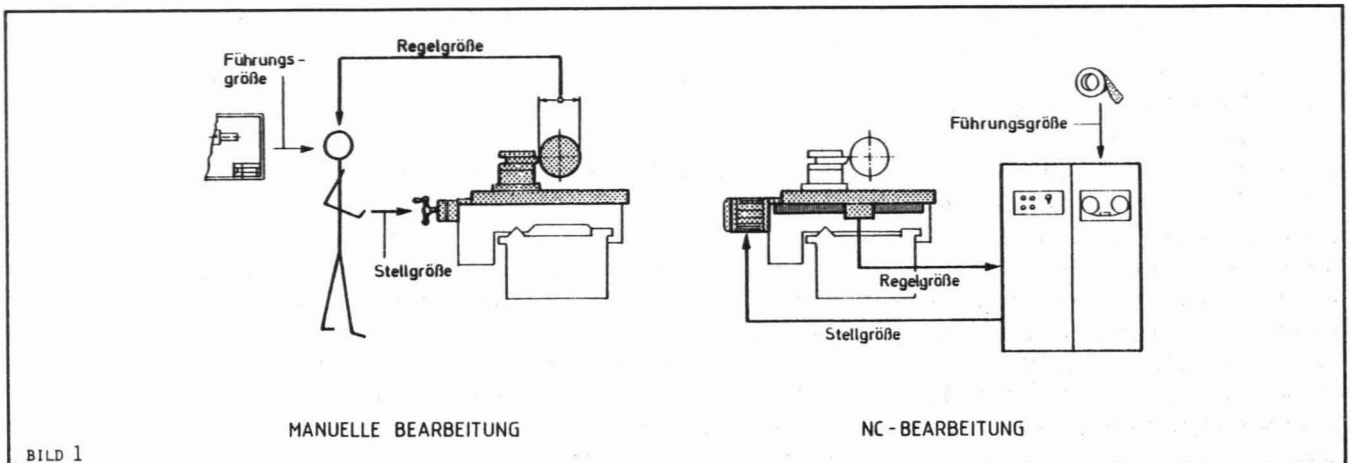
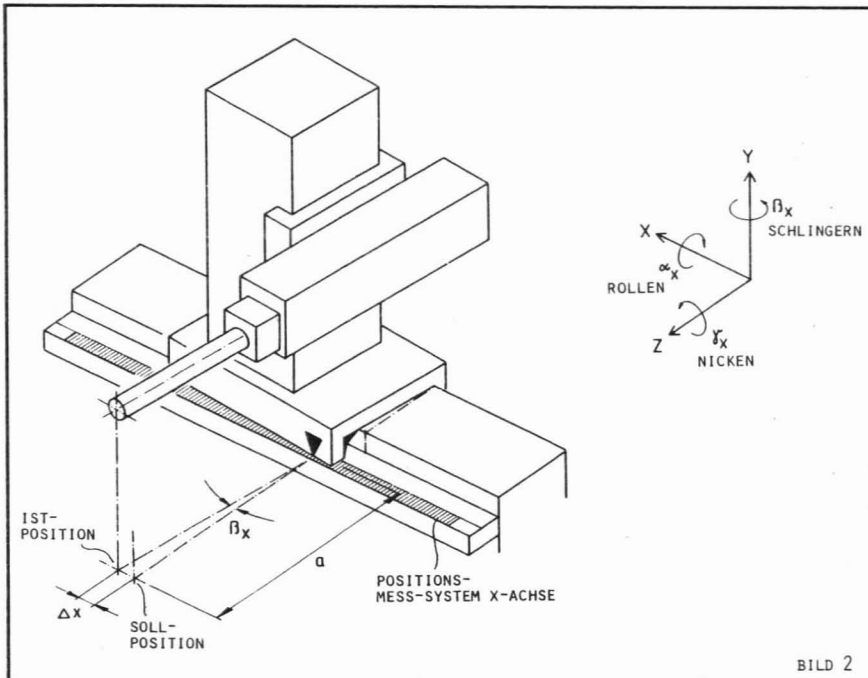


BILD 1

Manuelle Bearbeitung und NC-Technik



Abbé-scher Komparatorfehler: Einfluß des Schlingerwinkels β_x auf die Werkzeugposition in der x-Achse

Betriebsverhalten einer Maschine zu verbessern, müssen die Störursachen eingekreist werden. Dazu sind genaue Messungen und die Analyse der Meßergebnisse notwendig.

Die nächste Frage dreht sich somit um eine Meßmethode, die es erlaubt, Wege und Positionen über mehrere Meter mit einer bisher bei konventionellen Maschinen nie geforderten Genauigkeit zu messen. Die Antwort heißt: Laser-Interferometer.

Der Laser-Strahl als Maßstab

Das Laser-Interferometer ist aus der modernen Werkzeugmaschinenentwicklung ebenso wenig wegzudenken wie etwa der stufenlos regelbare Gleichstromantrieb oder die digitalen Wegmeßverfahren.

Aufbau und Funktionsweise des Laser-Interferometers sind zu kompliziert als daß sie an dieser Stelle eingehend beschrieben werden könnten. Es möge daher genügen, wenn das Grundprinzip anhand von Bild 3 erläutert wird, wobei das bekannte Michelson-Interferometer als Basis dient.

Der von einer Laser-Quelle ausge-

sandte Laserstrahl wird im halbdurchlässigen Strahlteiler (Remote-Interferometer) in einen durchgehenden und einen um 90° abgelenkten Strahl aufgeteilt. Beide Teilstrahlen werden von je einem Umlenk-Prisma (Reflektor) parallel versetzt zurückgeworfen, sodaß sie sich im Remote-Interferometer wieder zu einem Strahl vereinigen, welcher auf einen Optosensor geleitet wird.

In diesem vereinigten Lichtstrahl sind nun die Interferenzen zu beobachten. Dem Wellencharakter des Lichtes entsprechend tritt hier entweder totale Auslöschung oder verstärkte Helligkeit auf, je nachdem ob infolge der unterschiedlichen Weglängen der beiden Teilstrahlen bei Wiedervereinigung Gegenphasigkeit oder Gleichphasigkeit der Wellenzüge eintritt.

Dieses Prinzip läßt sich zur Wegmessung verwenden, wenn der eine Reflektor fest mit dem Strahlteiler verbunden und der zweite verschiebbar angeordnet wird. Bei einer Verschiebung dieses zweiten Reflektors um jeweils $\frac{\lambda}{2}$ (λ : Lichtwellenlänge des Laserlichtes) treten am Sensor abwechselnd Hell- und Dunkleffekte auf, welche vom Optosensor in elektrische Impulse umgewandelt wer-

den. Die Aufsummierung der Impulse gibt den Verschiebeweg wieder. Die Umrechnung in metrische Einheiten ist schließlich nur mehr eine triviale Aufgabe der Digitalelektronik.

Der Laser-Strahl zwischen dem Remote-Interferometer und dem beweglichen Reflektor stellt somit einen Strichmaßstab höchster Auflösung dar. Die kleinste, am Laserdisplay angezeigte Längeneinheit (Reflektor-Verschiebung) beträgt bei den heutigen Geräten $1/10 \mu\text{m}$! Die Einflüsse von Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck auf die Wellenlänge des Laserlichtes werden über einen Sensor und eine Rechenschaltung automatisch kompensiert. Allerdings ist dies ein Punkt, der bei der Messung beachtet werden muß, da beispielsweise Temperaturgradienten entlang der Meßstrecke das Meßergebnis verfälschen.

Bei der Vermessung von Werkzeugmaschinen fällt ein Vorteil des Laser-Interferometers besonders ins Gewicht: die Flexibilität des Meßgerätes. Wenn, wie es üblicherweise geschieht, der verschiebbare Reflektor an der Stelle des Werkzeuges und das Remote-Interferometer an einem ortsfesten Punkt befestigt werden, so wird tatsächlich die Werkzeug-Position, unbeeinflusst von Komparatorfehlern gemessen (siehe Bild 5). Der Laserstrahl ist damit ja fluchtend zum Werkzeugangriffspunkt in der zu untersuchenden Bewegungsachse angeordnet.

Aber nicht nur die Positionsabweichungen können mit dem Laser-Interferometer erfaßt werden. Wenn die erwähnten optischen Komponenten durch andere ersetzt werden, sind auch Winkelmessungen und Gerademessungen durchführbar. Und es ist klar erkennbar, daß die Analyse der damit vorliegenden Meßergebnisse eine exakte Kenntnis des geometrischen Betriebsverhaltens der Maschine vermittelt.

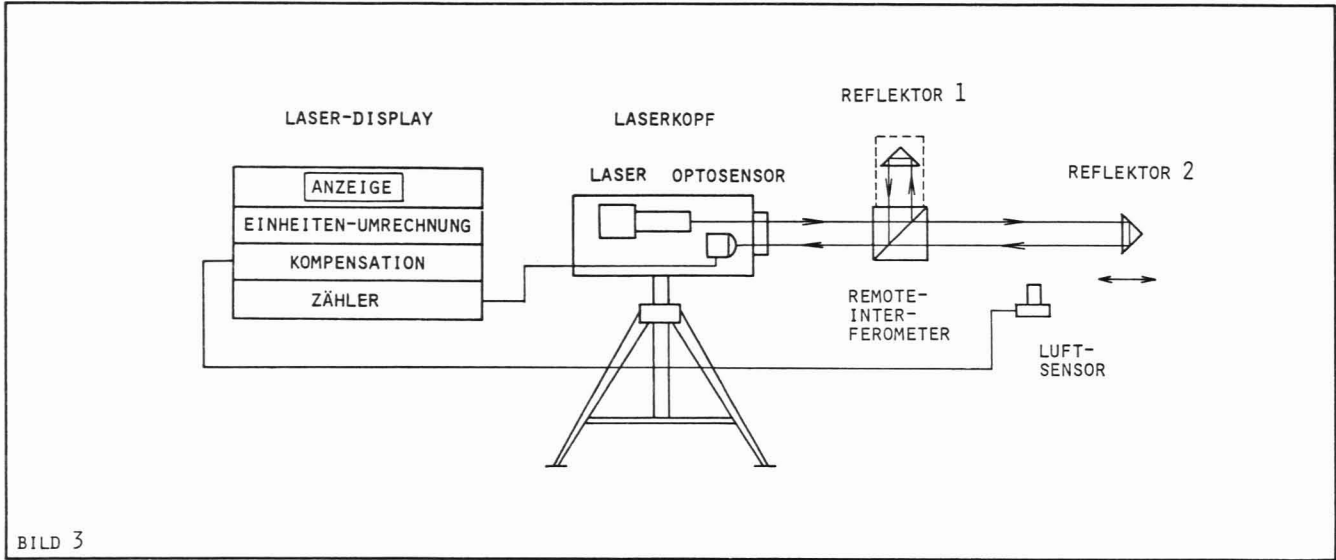


BILD 3

Das Laser-Interferometer, Funktionsprinzip

Das Laser-Interferometer im praktischen Einsatz

Damit lassen sich auch die Einsatzschwerpunkte dieses universellen Meßsystems beschreiben. Zunächst spielt es beim Werkzeugmaschinenhersteller im Zuge der Maschinenentwicklung eine entscheidende Rolle. Man kann ruhig behaupten, daß fast jeder Hersteller von NC-Maschinen heute ein Laser-Interferometer besitzt. Es gehört zur Standardausrüstung und ist vor allem für die Endkontrolle der Maschinen unentbehrlich.

Der nächste Einsatz findet beim Kunden statt. Insbesondere bei großen Werkzeugmaschinen kann die Endjustage der Maschinenmaßstäbe und der mechanischen Baugruppen erst am endgültigen Aufstellungsort erfolgen, weil die Fundamentierung einen großen Einfluß auf das Betriebsverhalten der Maschine ausübt. Nach Beendigung dieser Arbeiten erfolgt abschließend in einer Reihe von Meßzyklen die Abnahmeprüfung der Maschine unter Erstellung des Abnahmeprotokolls. Für alle diese Arbeiten bildet das Laser-Interferometer das hochgenaue Maßnormal.

Mit der Abnahme der Maschine ist jedoch der Aufgabenbereich des Laser-Interferometers noch nicht

erschöpft. Spätestens dann, wenn die Fertigungskontrolle an einem Werkstück Ausschuß feststellt, muß sich die Fertigung Gedanken über die Maschinengenauigkeit machen und diese überprüfen oder überprüfen lassen. Das Studium der seinerzeitigen Abnahmeprotokolle hilft nicht weiter. Das Langzeitverhalten der Maschine geht daraus nicht hervor. Maschinenabnutzung, Fundament-Setzungen und geänderte Umgebungsbedingungen können als Störgrößen auftreten.

Eine routinemäßige, in bestimmten Zeitabständen durchgeführte Maschinenvermessung liefert hier die besten Anhalte und erlaubt auch eine Extrapolation über den momentanen Zeitpunkt hinaus. Die aktuellen Meßprotokolle bilden dann eine klare, deutlich lesbare Dokumentation des Maschinenzustandes auch für den Fall, daß für sensible Produkte bestimmte Qualitätsstandards nachgewiesen werden müssen.

Die Meßprotokolle leisten dem Maschinenbenützer aber noch weitere gute Dienste und können zu erheblichen Einsparungen auf dem Investitionssektor beitragen. So können beispielsweise Bereiche innerhalb des Gesamtarbeitsvolumens der Maschinen festgestellt werden, in denen auch eine alte Maschine noch genau arbeitet. Systematische Fehler können außerdem stets kom-

pensiert werden. Die Meßprotokolle liefern die beste Unterlage zur Erstellung einer Fehlermatrix, welche in Form von Kompensationswerten in die Steuerung eingegeben werden kann.

Die Arbeiten an der TU Graz

Das Institut für Fertigungstechnik der TU Graz verfügt seit dem Jahre 1981 über ein Laser-Interferometer mit sämtlichen optischen Komponenten zur Messung von Positionsabweichungen, Kippwinkeln, Geradheitsabweichungen und Rechtwinkelfehlern. Zur kompletten Meßausrüstung gehören weiterhin ein Rechner hp 9845 mit 4-Farben-Plotter sowie zwei digitale Neigungswaagen.

Dieses leistungsfähige Meßsystem bildet einerseits die Grundausrüstung für eigene Entwicklungsarbeiten und Untersuchungen, andererseits wird die Maschinenvermessung mit diesen Geräten der heimischen Industrie als Dienstleistung angeboten.

Nach der Inbetriebnahme des Laser-Interferometers galt es zunächst Erfahrungen zu sammeln. Wenn durch die Leistungsfähigkeit des Meßsystems der Eindruck erweckt wird, daß die gewünschten Meßgrößen nahezu selbstverständlich anfallen, so trägt der Schein. Vor jeder

Messung sind sorgfältige Überlegungen bezüglich des Meßaufbaues und der damit zusammenhängenden Meßunsicherheiten anzustellen. Wie bereits erwähnt, spielen die Umgebungseinflüsse wie Lufttemperaturunterschiede, Fundamentnachgiebigkeiten und Schwingungen eine große Rolle.

Ein Beispiel aus der Praxis möge dies illustrieren. Bei einer vom Institut für Fertigungstechnik in einem heimischen Industriebetrieb durchgeführten Abnahmemessung eines großen Horizontal-Bohrwerkes wurde bei der Messung der Positionsabweichungen in der x-Achse eine über das Fundament hervorgerufene Verkipfung des Laser-Stativs registriert. Auch wenn es sich hierbei nur um 30 $\mu\text{m}/\text{m}$ gehandelt hat, wäre dieser Wert als Fehler 1. Ordnung in das Positions-Meßergebnis eingegangen. Durch Erfassung der Interferometer-Kippung mittels einer digitalen Neigungswaage und durch direkte Auswertung der Neigungswerte im

Rechner konnte dieser Fehlereinfluß ausgeschaltet werden.

Der Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten am Institut für Fertigungstechnik lag bisher auf der Erstellung einer leistungsfähigen Meß-software. Insbesondere wenn neben der reinen Abnahmeprüfung die Fehleranalyse an Werkzeugmaschinen als Ziel angepeilt wird, kommt nur die on-line Verarbeitung der Meßwerte im Rechner in Frage. Die Steuerung des Meßablaufes, die Aufbereitung der Meßwerte und die Ausgabe anschaulicher und aussagekräftiger Diagramme, kurz die Leistungsfähigkeit des gesamten Systems steht und fällt mit der software. Diese Programme sind nun fertiggestellt und beinhalten außer den genannten Punkten auch noch eine komfortable Bedienung in Menu-Technik. Als Beispiel für ein Meßdiagramm möge Bild 4 dienen, in welchem die Positionsabweichungen in der x-Achse einer kleinen Konsolfräsmaschine

ausgeplottet und nach VDI 3441 statistisch ausgewertet sind. Die Fehlerkurven für Vor- und Rücklauf geben die Mittelwerte von jeweils 5 Meßzyklen wieder, die äußeren, strichlierten Linien stellen den $\pm 3 \sigma$ -Bereich dar.

Der nächste Entwicklungsschritt wurde mit der so getauften »Simultanmessung« getan. Damit ist die gleichzeitige Messung von Positionsabweichungen und Winkelverkippungen gemeint. Wie in Bild 5 dargestellt ist, werden dabei zwei elektronische Neigungswaagen zur Erfassung des Nickwinkels γ_x und des Rollwinkels α_x verwendet. Die Neigungswaagen werden ebenfalls durch den zentralen Rechner abgefragt und die Meßwerte on-line ausgewertet.

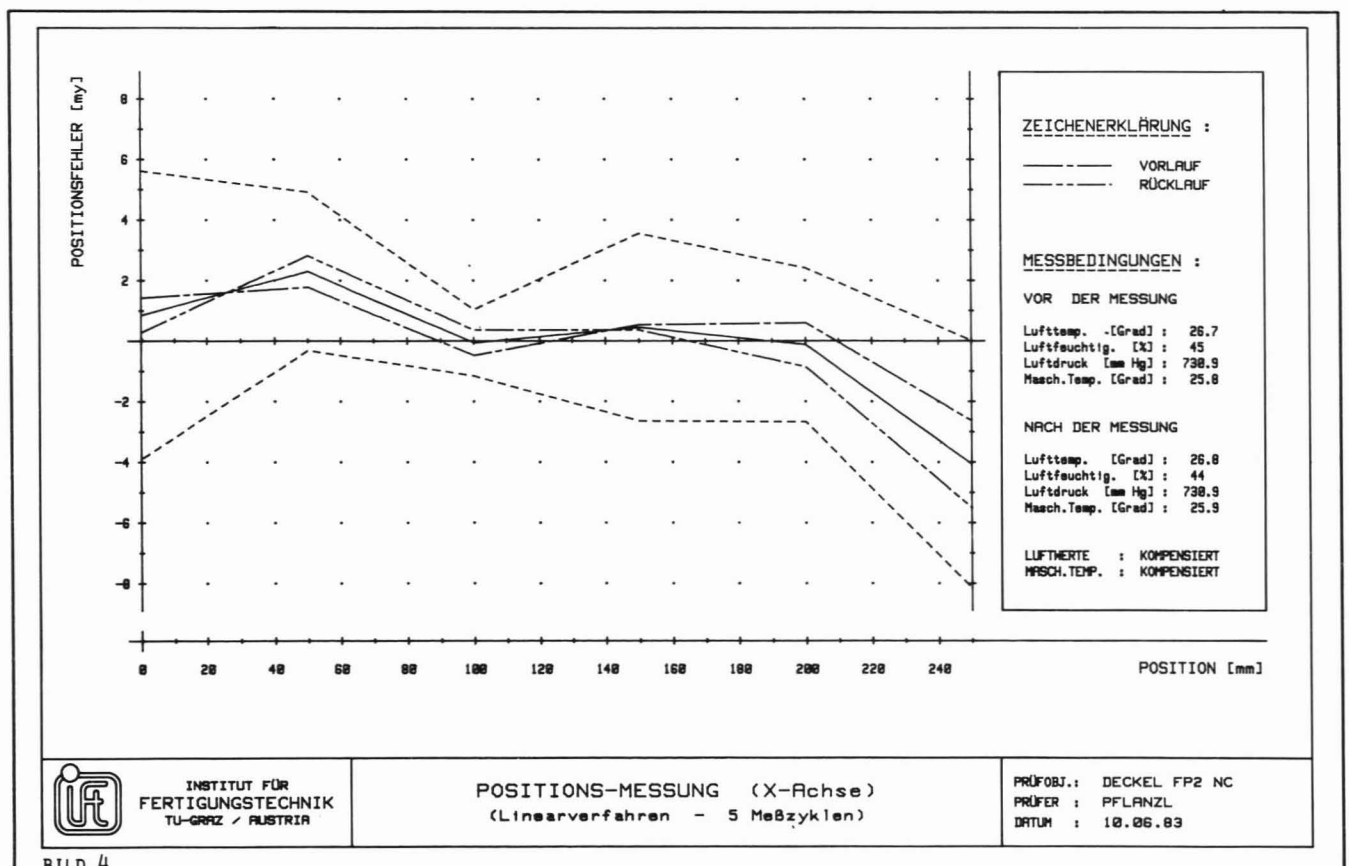


BILD 4

Meß-Diagramm

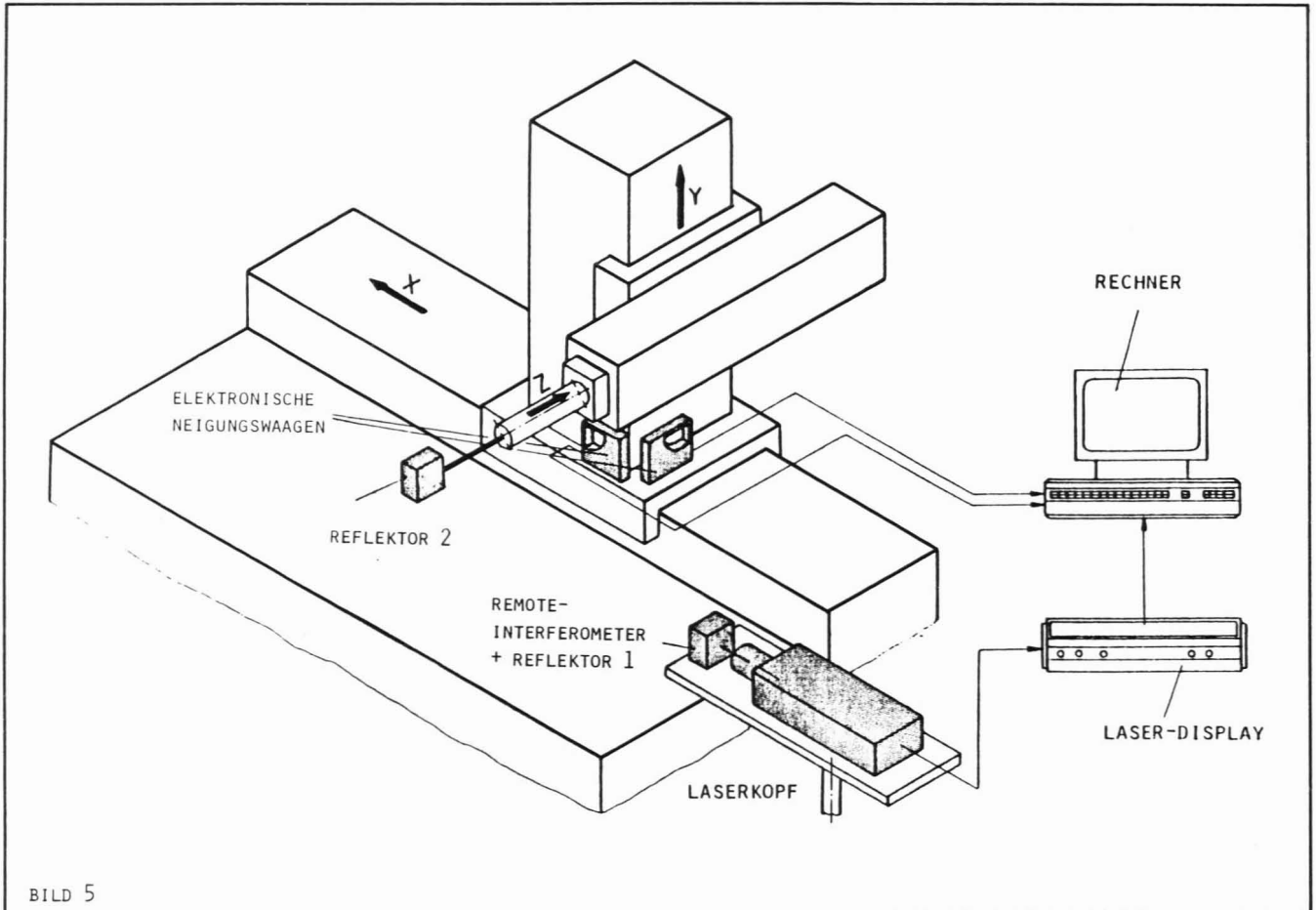


BILD 5

Simultan-Messung

Leider ist es mit Hilfe von Neigungswaagen nicht möglich, alle drei auftretenden Winkelbewegungen zu messen. Der Schlingerwinkel β_x ist eine Drehbewegung um die Richtung der Schwerkraft und daher mit einem Meßgerät, welches auf deren Wirkung basiert nicht meßbar.

An diesem Mangel setzt nun das vorläufig letzte Forschungsprojekt des Institutes im Rahmen des Gesamtprojektes »Werkzeugmaschinenvermessung« an. Nach einem bereits erarbeiteten Konzept ist die Entwicklung eines neuen Meßverfahrens geplant, welches simultan zur Positionsmessung mit dem Laser-Interferometer die Messung sämtlicher Winkelfehler und Geradheitsabweichungen ermöglichen soll. Damit wäre ein Traumziel der Fertigungstechniker erreicht: die rechnergestützte Erstellung der kompletten Fehlermatrix einer mehrachsigen Werkzeug-

maschine unter minimalem Zeitaufwand, d.h. mit der geringstmöglichen Anzahl von Meßzyklen.

Die zu diesem Forschungsvorhaben erforderlichen Geldmittel müssen allerdings erst aufgetrieben werden. Sie sollten aber, so meinen die am Projekt beteiligten, gut angelegt sein.

Adolf Frank