



## Längenmessung auf $1/100 \mu\text{m}$ — keine Utopie mehr



Harald SWATEK, Dipl.-Ing., Jahrgang 1951, geboren in Fürstenfeld. Studium der Elektrotechnik an der TU Graz, anschließend Vertragsassistent am Institut für Elektronik. Seit 1981 Vertragsassistent am Institut für Fertigungstechnik der TU Graz. Im selben Jahr Gründung der eigenen Firma techno-consult, Technisches Büro GesmbH.

**Steigende Anforderungen an die Fertigungsqualität bedingen genauere Werkzeugmaschinen und neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Fertigungs-Meßtechnik. Die moderne CNC-Technik bringt neben dem bekannten Automatisierungseffekt auch eine erhebliche Steigerung der Fertigungsgenauigkeit, wozu die integrierten Positionsmeßsysteme einen wichtigen Beitrag liefern. Die nachfolgend beschriebene Forschungsarbeit am Institut für Fertigungstechnik der TU Graz stellt einen beachtenswerten Schritt in Richtung einer weiteren Genauigkeitssteigerung dar.**

### 1. Die CNC-Maschine im Brennpunkt der Entwicklung

Die moderne CNC-Werkzeugmaschine ist das Kernstück der flexiblen Automation, welche derzeit die Fertigungstechnik revolutioniert. Werkstückgeometrie und Bearbeitungstechnologie sind im Teileprogramm festgelegt und das fertige Werkstück kann als output einer Datenkette gesehen werden, welche im optimalen Fall auf dem Bildschirm des CAD-Arbeitsplatzes ihren Ausgangspunkt hat.

Die zweite markante Entwicklung, welche mit der CNC-Technik einherläuft, ist die stetige Steigerung der Fertigungsgenauigkeit. Der heutige Stand der Technik erlaubt nicht nur die Einhaltung engster Toleranzen bei Einzelwerkstücken, sondern auch deren Beherrschung bei der Serienfertigung. Die an sich schon hohe Positioniergenauigkeit der modernen CNC-Werkzeugmaschine wird noch unterstützt durch Meßeinrichtungen, welche die Werkstücke in-proceß oder post-proceß vermessen und über eine Trenderkennung rechtzeitige Kompensationsmaßnahmen über die CNC-Steuerung erlauben.

In diesem Konnex stellen die Positionsmeßsysteme der CNC-Maschine ein

entscheidendes Glied dar. Sie haben die Aufgabe, die Positionen und Verfahrwege von Schlitten und Supporten mit höchstmöglicher Genauigkeit und Auflösung zu erfassen und als Istwert bzw. Regelgröße der Steuerung zu melden. Waren es am Beginn der NC-Technik mehrere Verfahren und Systeme, welche untereinander in Konkurrenz standen, so hat sich heute eindeutig das digital-inkrementale Meßverfahren als Standardsystem etabliert. Un-

terschiede finden sich nur mehr in der Bewegungsumsetzung, d.h. bei der Entscheidung zwischen direkter Messung mittels eines Linearsystems oder der indirekten Messung über eine Präzisions-Gewindespindel und Drehgeber.

### 2. Das digital-inkrementale Meßverfahren

Beim digital-inkrementalen Meßverfahren (Bild 1) wird ein Strichmaßstab, welcher keine Codierung trägt, abgetastet. Die Abtastung des Maßstabes erfolgt heute vorzugsweise optoelektronisch, wobei im Strahlengang der durch Lichtquellen (Leuchtdioden) und Optosensoren (Fotodioden) gebildeten Lichtschranken eine Blende angeordnet ist, welche auf entsprechend angeordneten Abtastfeldern jeweils

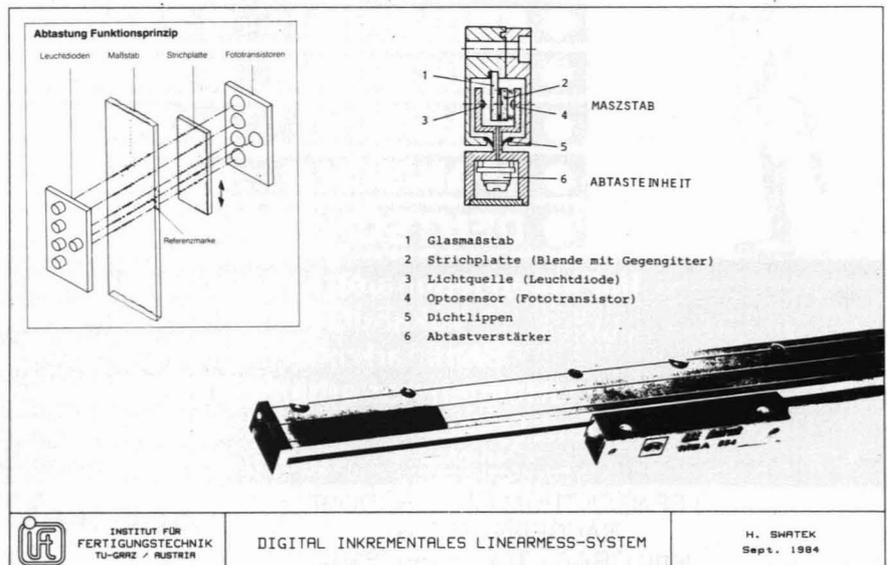


Abb. 1

gleiche Strichgitter wie der Maßstab trägt. Je nach Stellung von Strichplatte und Maßstab zueinander wird der Sensor beleuchtet oder abgedunkelt. Bewegt sich der Meßkopf am Maßstab entlang, so lassen sich am Ausgang der Fotodioden sinusförmige Signale abnehmen, worauf nach entsprechender Umformung in Rechtecksignale deren Flanken einem Zähler zugeführt werden. Der Positionswert entsteht somit durch Zählen von überfahrenen Maßstab-Teilungen.

Eine systemspezifische Eigenschaft des digital - inkrementalen Meßverfahrens ist das Fehlen eines absoluten Bezugspunktes. Ein solcher ist jedoch für den Fertigungstechniker eine unabdingbare Notwendigkeit. Die Lösung besteht in einer Referenzmarke, die ortsfest am Maßstab aufgebracht ist, von einem eigenen Abtastelement abgelesen und zum Nullsetzen des Zählers verwendet wird.

Zur Erkennung der Bewegungsrichtung sind mindestens 2 Abtastelemente (Lichtschranken) erforderlich, welche durch einen Versatz der zugehörigen Strichgitter auf der Blende zwei zueinander um 90° phasenverschobene Signale liefern.

Werden jeweils die Nulldurchgänge der so entstandenen Sinus- und Cosinus-signale zur Erzeugung der oben erwähnten Rechtecksignalfanken verwendet, so ergibt sich eine Auflösung, welche direkt mit der Teilung des Maßstabes zusammenhängt. Ist beispielsweise die Maßstabsteilung 20µm so läßt sich auf unmittelbarem Weg eine Auflösung von 5µm realisieren (Vierfachauswertung).

Eine Steigerung der Auflösung des Meßsystems kann auf zwei Wegen realisiert werden. Die naheliegende Lösung wäre eine Verfeinerung der Maßstabsteilung. Hier werden allerdings sehr bald physikalische Grenzen erreicht, sodaß allgemein der zweite Weg, nämlich die elektronische Interpolation der Abtastsignale beschritten wird.

### 3. Die analoge Interpolation

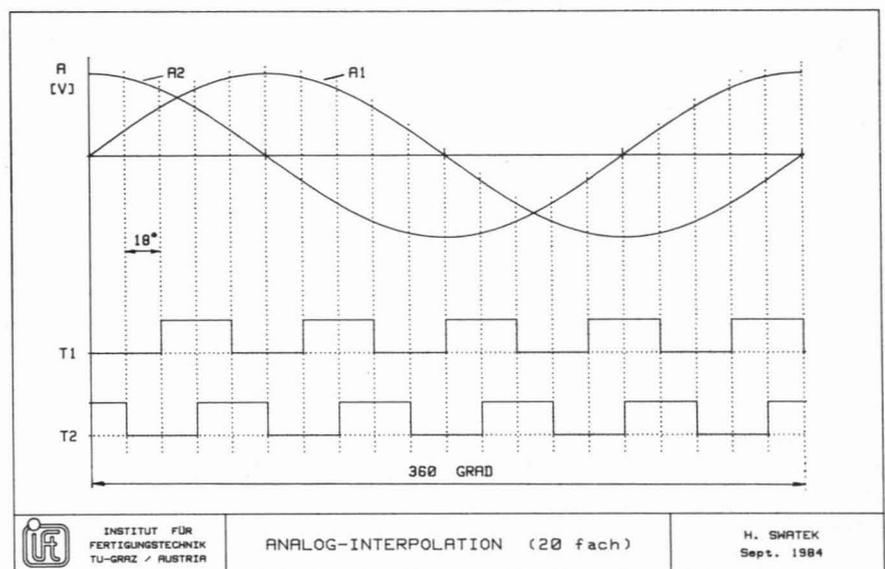
Die als Stand der Technik geltende Interpolation wird über ein Widerstandnetzwerk und Komperatoren erzielt und kann als analoge Interpolation bezeichnet werden. In Bild 2 ist die Wir-

kungsweise einer 20-fach Unterteilung dargestellt. Aus der der Maßstabsteilung entsprechenden 360°-Periode der Abtastsignale A 1 und A 2 werden durch Auswertung der in 18°-Intervallen anliegenden Signalpegel die Rechtecksignale T 1 und T 2 generiert, deren Flanken sodann als Zählimpulse dem Zähler zugeführt werden.

Es liegt auf der Hand, daß bei diesem Interpolationsverfahren hohe Ansprüche an die Güte der Abtastsignale A 1 und A 2 gestellt werden und daß Fehler derselben unmittelbare Meßfehler innerhalb des Maßstabintervalles bewirken. Die in der Praxis auftretenden und in Bild 3 übertrieben dargestellten Signalabweichungen von A 1 und A 2 sind Amplitudenfehler, Offsetfehler und Phasenfehler. Sie werden durch Verunreinigungen am Maßstab, Alterung von Leuchtdioden und Optosensoren, Führungsfehler der Maschine u.a. hervorgerufen. Es ist daher nicht sinnvoll, die analoge Interpolation beliebig weit zu treiben. Die im Bild 2 gezeigte 1 µm Auflösung aus einem 20 µm-Maßstab kann als Standardlösung angesehen werden.

Fehler erlaubt. Weitere Forderungen waren die volle Kompatibilität zu bestehenden Meßsystemen und weitestgehend uneingeschränkte Verfahrensgeschwindigkeit. Sämtliche Ziele wurden durch das nachfolgend beschriebene Verfahren erreicht.

Aus dem vorhin erwähnten ist klar erkennbar, daß der Weg zu einer höheren Auflösung und kleineren Interpolationsfehlern nur über stabile Abtastsignale führen kann. Bei näherer Betrachtung der Maßstabsabtastung in Bild 1 wird ersichtlich, daß das Abtastfeld jedes Optosensors eine Vielzahl von Rasterteilungen erfäßt und somit eine Integrationswirkung über eine größere Abtastfläche entsteht. Man kann davon ausgehen, daß sich die Parameter der Abtastsignale bei Bewegung des Meßkopfes um einige Rasterteilungen nicht wesentlich verändern. Es ist daher weiters möglich, die Amplituden- und Phasenlagen der jeweils vorangehenden Positionen als Berechnungsgrundlage für Korrekturen der darauffolgenden zu verwenden. Dieser Gedankengang führte zu der in Bild 4 gezeigten Schaltung.



INSTITUT FÜR  
FERTIGUNGSTECHNIK  
TU-GRAZ / AUSTRIA

ANALOG-INTERPOLATION (20-fach)

H. SMATEK  
Sept. 1984

Abb. 2

### 4. Das neue digitale Interpolationsverfahren

Zielsetzung der nunmehr abgeschlossenen Forschungsarbeiten am Institut für Fertigungstechnik der TU Graz war die Entwicklung eines neuartigen Interpolationsverfahrens, welches eine Steigerung der Interpolationsrate bei gleichzeitiger Eliminierung sämtlicher

Gesteuert durch einen Mikroprozessor werden bei Bewegung des Abtastsystems nach jedem ganzen durchlaufenen Maßstabsintervall über Minimum- und Maximum-Detektoren die positiven und negativen Spitzenwerte der Abtastsignale A 1 und A 2 festgehalten, durch einen Analog-Digital-Wandler digitalisiert und abgespeichert. Aus den gespeicherten Minimal-

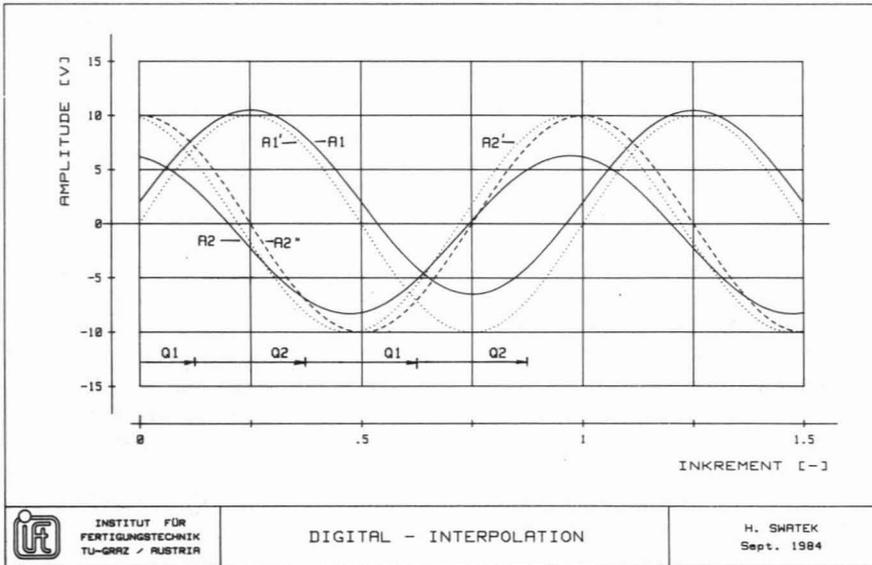


Abb. 3

und Maximalwerten von A 1 und A 2 werden Korrekturfaktoren berechnet, mit deren Hilfe die über schnelle sample- und hold-Stufen simultan erfaßten Augenblickswerte von A 1 und A 2 normiert werden, sodaß sie von Amplituden- und DC-offset-Fehlern befreit sind. (A 1', A 2' im Bild 3). Da die gerechneten Signale A 1' und A 2' nun eine konstante Amplitude besitzen, ist es möglich, sie auch hinsichtlich ihrer Phasenlage zu vergleichen und zu korrigieren (A 2'' in Bild 3). Auf diesen idealisierten Signalen wird nun die Amplitudeninterpolation durchgeführt, d.h. jedem Spannungswert wird eine bestimmte Position im Intervall zugeordnet. Dies geschieht durch Vergleich mit einer in einem PROM abgespeicherten Tabelle und zwar derart, daß im Bereich Q 1 auf dem Sinussignal interpoliert wird und im Bereich Q 2 auf dem Cosinussignal. Die der Tabelle entnommenen Werte werden mit den durch einen Vorzähler gemessenen halben durchlaufenen Intervallen gekoppelt und ergeben so den Positionswert. Die Interpolationsrate und damit die Auflösung des Meßsystems ist also allein durch die Tabelle festgelegt. Durch Austausch des PROM kann sie rasch an die Erfordernisse der Kunden angepaßt werden. Da die Phototransistoren und Abtastverstärker einen nicht idealen Frequenzgang besitzen, kommt es bei höheren Verfahrensgeschwindigkeiten zu Amplituden- und Phasenverzerrungen der Signale, welche zu fehlerhaften

Korrekturen führen würden. Um diesen Effekt auszuschalten wird die hohe Interpolation nur bei niedrigen Verfahrensgeschwindigkeiten aktiviert, während oberhalb einer einstellbaren Grenzgeschwindigkeit nur die Signal-Nulldurchgänge zur Meßwertbildung herangezogen werden. Diese Funktionsweise entspricht voll und ganz dem Einfahr- und Steuerverhalten der CNC-Maschine.

Die getrennte Erfassung der Halbperioden durch den Vorzähler ergibt nebenbei eine erhebliche Steigerung der Betriebssicherheit. Auch bei unzulässig großen Abweichungen der Abtastsignale kommt es zu keinem Totalausfall des Systems. Die Positionsmessung erfolgt in diesem Falle immer noch auf der Basis von halben durchlaufenen Inkrementen und der Anwender wird durch Meldeanzeigen gewarnt. In der Folge ist es dem Servicetechniker möglich, die Position, an der der Fehler aufgetreten ist, relativ zum Referenzpunkt abzurufen. Diese Möglichkeit kann besonders bei sehr großen Meßlängen von Vorteil sein. Die Methode der getrennten Messung von halben durchlaufenen Intervallen und der Interpolation innerhalb dieser bietet auch eine erhöhte Störsicherheit gegenüber höherfrequenten Einstreuungen. Die Erhöhung der Auflösung ergibt zwangsläufig proportional dazu höhere Eingangsfrequenzen bei gleicher Verfahrensgeschwindigkeit. Nimmt man als Beispiel eine Auflösung von  $1/10 \mu\text{m}$  an, so würde sich bei der analogen Interpolationsmethode nach Punkt 3 bei einer Verfahrensgeschwindigkeit von 1 m/sek. eine Frequenz der Rechtecksignale T 1 und T 2 von 2,5 MHz ergeben. Im Gegensatz dazu

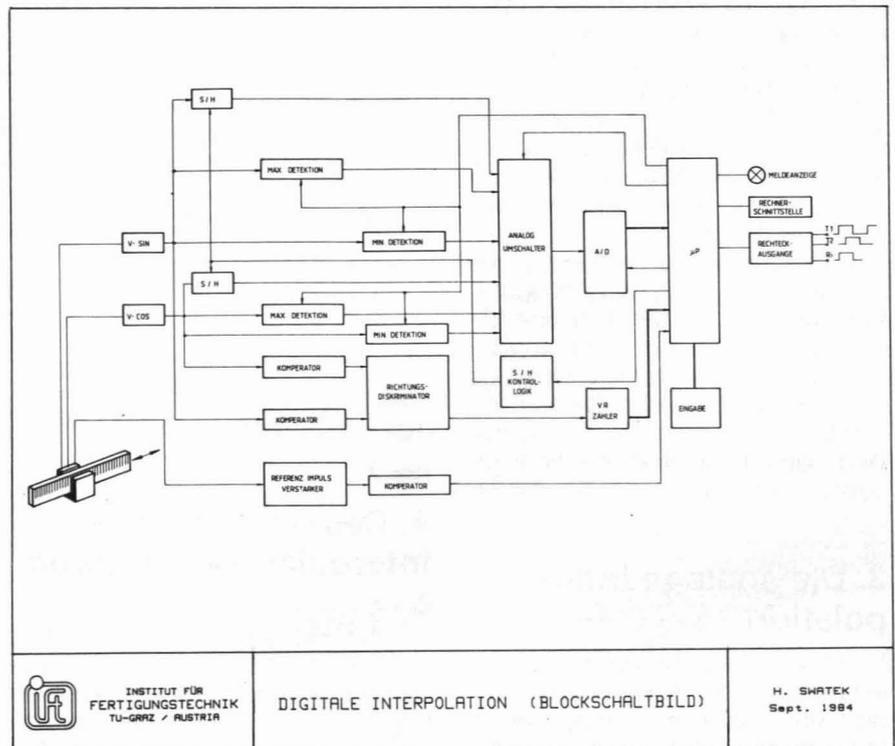


Abb. 4



muß bei gleichen Verhältnissen der Vorzähler des digitalen Interpolations-systems nur 50 kHz bearbeiten, d.h. es ist möglich, höher frequente Störungen durch eine Limitierung des Frequenzganges, etwa durch Zuschaltung von RC-Gliedern auszublenden. Da es eine grundlegende Forderung war, die Elektronik nicht nur kompatibel zu den derzeitigen Abtastsystemen auszulegen, sondern die Ausgangssignale auch an den Standard derzeitiger Steuerungen anzupassen, müssen bereits vollaufbereitete Zahlenwerte im Mikroprozessor wieder in Rechtecksignale zurückgewandelt werden. Dazu wurde eine spezielle Ausgabeelektronik entwickelt, die es auch gestattet, den Referenzimpuls richtig auf der Ausgabe zu generieren. Die Umwandlung in Rechtecksignale bringt allerdings gewisse Einschränkungen mit sich. Ist die Grenze der maximal zulässigen Verfahrensgeschwindigkeit beim neuen Interpolationsverfahren eher in der Mechanik des Abtastsystems zu suchen, so kommt es durch die erzwungene Rückumwandlung in Rechtecksignale bei hohen Auflösungen von etwa  $1/100 \mu\text{m}$  zu einem Nachlaufen des Zählers. Dies ist durch die zur Zeit auf etwa 1 MHz limitierten Takt-signale zurückzuführen. Es wäre in Zukunft daher wünschenswert, wenn potente Steuerungshersteller auf die Entwicklung reagieren würden, um durch Anpassung ihrer Signaleingänge wirklich alle Vorteile des digitalen Interpolationsverfahrens ausnützen zu können.

In Bild 5 wird eine Vergleichsmessung mit dem Laser-Interferometer gezeigt, die mit einem Glasmaßstab mit  $20 \mu\text{m}$ -Teilung und einer Auflösung von  $1/100 \mu\text{m}$  vorgenommen wurde. Es ist klar, daß eine Steigerung der Auflösung durch Erhöhung der Interpolationsrate keinen Fortschritt hinsichtlich der absoluten Genauigkeit des Meßsystems bringen kann, wenn nicht gleichzeitig die Genauigkeit der verwendeten Glasmaßstäbe in die gleiche Größenordnung verlagert wird. Dies ist jedoch nur mit erheblichen Kosten zu realisieren. Der günstigere Weg ist daher sicherlich die Erfassung einer »Elektronischen Fehlertabelle« über eine Vergleichsmessung etwa mittels Laser-Interferometer und die automatische Korrektur der Positionsmeßwerte anhand dieser Tabelle. Analoges betrifft die Längenänderung von Maßstab und Maschine in Folge von Temperaturänderungen. In zukünftige Positionsmesssysteme, für welche der Terminus a.t. für »advanced technology« vorgeschlagen wird, müssen daher zwangsläufig Temperatursensoren integriert sein.

## 5. Auflösung $1/100 \mu\text{m}$ — eine zukunftsorientierte Entwicklung

Nach der Darstellung des technischen Fortschritts erhebt sich zwangsläufig die Frage nach dem Wert und der Sinnhaftigkeit der Entwicklung. Ist die Län-

genmessung im Zehntel- und Hundertstel-Mikrometerbereich denn überhaupt aktuell und für wen ist sie interessant?

Die Aktualität der hier vorgestellten Forschungsarbeiten läßt sich am besten am regen Interesse der in- und ausländischen Fachleute messen, das bereits vor der ersten offiziellen Präsentation des neuen Meßsystems festzustellen ist. Man kann behaupten, daß die Jagd nach dem  $1/10 \mu\text{m}$  und dem  $1/100 \mu\text{m}$  weltweit die Fertigungs-Meßtechnik beschäftigt. Wobei gleichzeitig auch die Kostenseite nicht außer acht gelassen werden darf. An diesem sensiblen Punkt kommt ein weiterer entscheidender Vorteil des Grazer Systems zum Tragen: Der Maßstab kann im Prinzip der gleiche bleiben wie bisher. Und der erhöhte elektronische Aufwand der digitalen Interpolation ist unabhängig von der Meßlänge.

Soll die Fertigung Toleranzen im  $\mu\text{m}$ -Bereich beherrschen, so muß die Messung eine Größenordnung genauer sein. Nun ist man aber heute auch bereits in der Fertigung im Begriff Toleranzen in der Größenordnung von  $\mu\text{m}$  weiter einzuengen. Diesel-Einspritzpumpen, Spezialwälzlagerungen und Präzisionsteile in Video- und EDV-Peripheriegeräten sind die Vorreiter einer Entwicklung, die schon rasch auch andere Bereiche erfassen wird. Das beherrschte  $\mu\text{m}$  ist Stand der Technik, die Zukunft verlangt nach feineren Einheiten. Und nach wie vor gilt der Grundsatz: Eine Größe, die nicht gemessen werden kann, kann auch nicht gezielt beeinflusst werden.

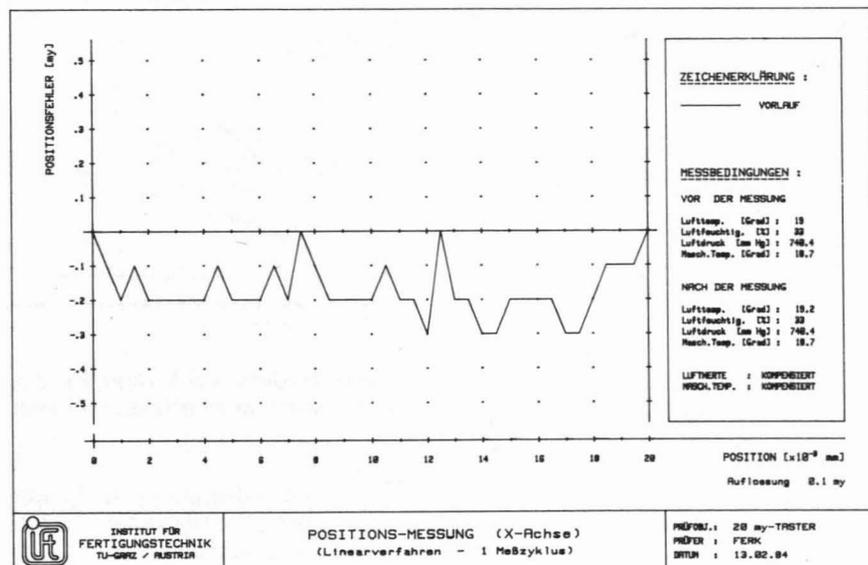


Abb. 5