

Zeitschrift:	Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural
Herausgeber:	Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)
Band:	74 (1976)
Heft:	3
Artikel:	Schwingungsmessungen an Hochhäusern mit einem Laser-Interferometer
Autor:	Köchle, R.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-228341

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 22.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

ten! Es mag sich um ein extremes Beispiel handeln. *Kann aber jemand mit guten Gründen behaupten, wenn solche Bodengewinne ohne echte Gegenleistung möglich sind, die Mehrwertabschöpfung, wie sie Artikel 37 des Raumplanungsgesetzes vorschreibt, sei ethisch und sozial nicht gerechtfertigt?* Die Mehrwertabschöpfung, für die primär die Kantone zuständig sind, wird sich im einzelnen ohne besondere Schwierigkeiten ausgestalten lassen. Besonders wichtig ist die Tatsache, dass die Mehrwertabschöpfung sachlich unanfechtbar ist.

6. Der Ertrag der Mehrwertabschöpfung ist für Raumplanungszwecke zu verwenden, ein Teil davon für einen gesamtschweizerischen volkswirtschaftlichen Ausgleich zugunsten der Land- und Forstwirtschaft als Abgeltung für die Auflagen und Leistungen im Interesse der Raumplanung (Artikel 37, Absatz 3, und Artikel 45, Absatz 1, RPG). «In gleicher Weise ist ein Ausgleich zugunsten von Gebieten vorzunehmen, die durch Massnahmen der Raumplanung in ihrer Entwicklung eingeschränkt werden und nicht bereits einen genügenden wirtschaftlichen Entwicklungsgrad aufweisen» (Artikel 45, Absatz 2). Die Vorarbeiten für die Regelung der Details sollen weit fortgeschritten sein. Eine Kommission wurde eingesetzt, welche für die noch hängigen Fragen gute Lösungen ausarbeiten soll.

IX. Schlussbemerkungen

Das Raumplanungsgesetz ist ein Verständigungswerk, ein Interessenausgleich auf der Stufe der Gesetzgebung. Warum nun gegen dieses Gesetz, das auf den sozialen Frieden in der baulichen Umwelt und darüber hinaus hinzielt, Sturm geläufen wird, ist nicht leicht verständlich. Wenn das Gesetz verworfen werden sollte, darf man nicht annehmen, der Schaden lasse sich rasch durch ein neues Gesetz beheben. Ein Gesetz, das in den Beratungen des Parlamentes und seiner Kommissionen in einem ungewöhnlichen Mass erdauert wurde, kann nicht von heute auf morgen neu aufgelegt werden. Obwohl der Bundesrat rasch gehandelt hat, verläuft von der Ergänzung der Bundesverfassung am 14. September 1969 bis zur Volksabstimmung eine Zeit von gegen sieben Jahren! *Das Raumplanungsgesetz will den berechtigten Anliegen der Menschen nach Freiheit und nach sozialer Gerechtigkeit Rechnung tragen und bietet zugleich die beste Grundlage für das Überleben unserer Generation und ihrer Nachkommen in einer vielfach bedrohten Umwelt.*

Adresse des Verfassers:

Dr. R. Stüdli, Fürsprecher

Direktor der Schweizerischen Vereinigung für Landesplanung
3013 Bern

Schwingungsmessungen an Hochhäusern mit einem Laser-Interferometer

R. Köchle

Résumé

L'auteur présente les expériences faites lors de la mesure de mouvements latéraux de deux bâtiments à Singapour, hauts de 134 et 162 m, avec un interféromètre à Laser. Les distances des visées inclinées entre l'émetteur Laser au niveau du terrain et le réflecteur monté sur le bâtiment variaient entre 176 et 297 m; les variations à court terme des distances mesurées se mouvaient dans l'ordre de grandeur de 1 à 3 microns, ce qui représente une précision relative de 1:100 millions.

1. Der Zweck der Messungen

Beim Bau von Hochhäusern müssen viele Faktoren berücksichtigt werden, die bei niederen Bauwerken keine Rolle spielen. So kann zum Beispiel die dynamische Windlast ein schlankes Gebäude in Schwingungen von beträchtlicher Amplitude versetzen und damit gefährden oder doch – weniger schlimm – das Wohlbefinden der Bewohner stören. Es ist ein Fall aus den Vereinigten Staaten bekannt, wo in den obersten zehn Stockwerken eines neu erstellten Wolkenkratzers manche Bewohner bei starkem Wind an «Seekrankheit» leiden.

Um solchen und ähnlichen Fällen vorzubeugen, müssen das aerodynamische Verhalten und die Schwingungsfrequenzen eines schlanken Bauobjektes im Projektstadium genau studiert werden. Vor allem gilt es zu vermeiden, dass sich die Ablösefrequenz der Luftwirbel beim angeblasenen Gebäude mit einer seiner Eigenfrequenzen

deckt; es läge dann der unerwünschte Fall der Resonanz vor. Nun lassen sich die kritischen Abmessungen bis zu einem gewissen Grade vorausberechnen oder am Modell untersuchen, die letzte Sicherheit aber kann erst die Messung am ausgeführten Objekt geben.

Mit den Messungen wird vorteilhaft begonnen, bevor das Bauwerk seine volle Höhe erreicht hat. Dies ist aus zwei Gründen erwünscht: Erstens lässt sich aus einer Übereinstimmung zwischen Voraussage und Messung mit grösserer Zuverlässigkeit auf das Verhalten des fertigen Gebäudes schliessen und, sollte sich zweitens eine ungünstige Entwicklung abzeichnen, kann man ihr durch bauliche Massnahmen möglicherweise noch entgegenwirken.

Unter normalen Windverhältnissen und besonders, wenn das Gebäude noch nicht in voller Höhe steht, sind die Schwingungsamplituden meistens sehr klein, zu klein um im Theodolit gesehen oder indirekt mit Beschleunigungsmessern registriert zu werden. Die Messungen des Verfassers zeigen zum Beispiel Ausschläge von einigen wenigen Mikron bis zum zehnfachen. Da man kaum je auf einen das Bauwerk genügend aufschaukelnden Sturm warten kann, hätte man gerne ein Messgerät, das auch derartig feine Bewegungen noch zu messen imstande ist. Ein solches Gerät ist seit ein paar Jahren im Handel erhältlich, es ist das Laser-Interferometer.

2. Das Laser-Interferometer

In der Annahme, dass wenige Leser mit dem Laser-Interferometer vertraut sind, soll das Prinzip kurz beschrieben werden. Der Verfasser stützt sich dabei auf das Modell 5525B der Firma Hewlett-Packard mit dem er die Messungen ausgeführt hat ([1], [2], [3], [4]).

Das Instrumentarium besteht aus drei Teilen (Abb. 1 und 5):

1. dem Laserteil («Laserkopf»), der als Sender und Empfänger arbeitet und auch das Interferometer enthält,
2. dem Anzeigegerät (Abb. 1 und 2), welches das empfangene Signal elektronisch verwertet und numerisch anzeigt und
3. dem Würfelspiegel, der am andern Ende der zu überbrückenden Distanz sitzt und den Laserstrahl zum Empfänger zurücklenkt.

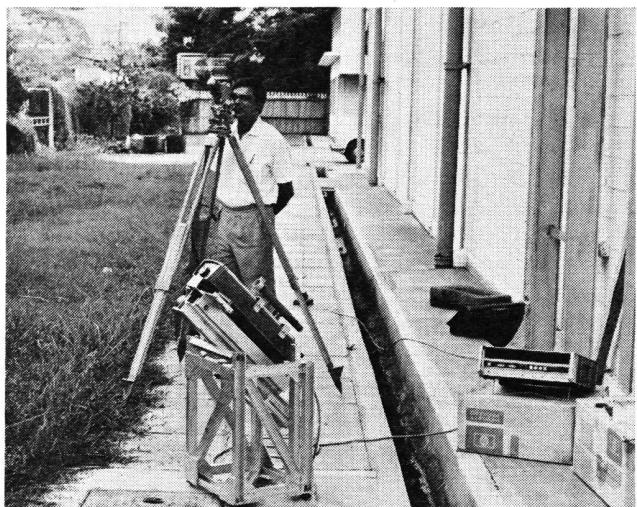


Abb. 1 Das Laser-Interferometer messbereit. Links erkennt man den Laserkopf, rechts das Anzeigegerät. Der Theodolit dient zur Messung der Distanz mit den Distanzfäden.



Abb. 2 Vorderseite des Anzeigegerätes. Die Anzeige steht auf -6785,3560 mm.

Der ausgesandte Laserstrahl wird vom Würfelspiegel genau parallel zurückreflektiert und im Interferometer mit einem innern Bezugsstrahl zur Interferenz gebracht. Es entstehen Schwebungen, deren Frequenz unter anderem von der radialen Bewegung des Würfelspiegels abhängt. Die Anzahl Perioden dieser «äußeren» Schwebungsfrequenz werden von einem bestimmten Zeitpunkt an elektronisch gezählt und mit der Anzahl Perioden einer inneren, festen Bezugsfrequenz verglichen. Die Differenz beider ist ein lineares Mass für die *Verschiebung des Spiegels*. Sie wird im Anzeigegerät in Millimeter umgerechnet und zweihundertmal in der Sekunde neu ange-

zeigt. Durch Verstellen eines Schalters kann die Anzeige wahlweise auch in englischen Zoll oder in Viertelwellenlängen erfolgen (Abb. 2). Im letzteren Fall wechselt die Anzeige sogar zweitausendmal pro Sekunde.

2.1 Genaue Beschreibung

Der Helium-Neon-Laser sendet beidseitig einen Strahl roten Lichtes grosser Reinheit von 6328 \AA Wellenlänge (473 MHz) aus. Das axiale Magnetfeld eines Permanentmagneten, der das Laserrohr umhüllt, spaltet dank dem Zeeman-Effekt die rote Linie in zwei um ungefähr 2 Megahertz voneinander abliegende Frequenzen auf, die in entgegengesetztem Umlaufsinn zirkular polarisiert sind, in Abbildung 3 als F_1 und F_2 bezeichnet. Die unterschiedliche Polarisation wird geschickt ausgenutzt, um unerwünschte Interferenzen zwischen F_1 und F_2 auszuschalten, ferner auch um die Messfrequenz zu stabilisieren. In Abbildung 3 wurden vereinfachend die unwesentlichen Frequenzen weggelassen.

2.2 Das Messsystem

Der nach vorn gerichtete Strahl wird zuerst von einem Galileischen Fernrohr um das siebenfache auf einen Durchmesser von 5 mm erweitert und tritt dann in das *Interferometer*, eine sehr präzis geschliffene, dicke Glasplatte, ein. Dort spaltet sich der Strahl zum ersten Mal an der Rückfläche. Die reflektierte Komponente wird umgelenkt und später verwendet, die durchgehende Komponente spaltet sich ein zweites Mal an der Vorderfläche. Eine erste Komponente F_1 dieser zweiten Spaltung strahlt nach vorne aus. In der andern nach oben gerichteten Komponente werden die beiden Frequenzen zur Überlagerung gebracht und die *Schwebungsfrequenz* $F_2 - F_1$ im Bezugsdetektor empfangen. Ein angeschlossener Zähler zählt die Anzahl Perioden der Schwebungsfrequenz.

Man beachte, dass durch die Überlagerung von F_1 und F_2 die Laserfrequenz von $4,73 \cdot 10^{14}$ auf ungefähr $2 \cdot 10^6$ Hertz herabgesetzt und damit eine direkte Zählung der Perioden technisch überhaupt erst möglich wird. Die Lichtfrequenz selber ist zur Periodenzählung viel zu hoch.

Der äussere Strahl F_1 trifft nach Überbrückung der Messstrecke auf den Würfelspiegel, wird dort um 180° um- und zurück zum Interferometer gelenkt und schliesslich mit F_2 zur Überlagerung gebracht. Ruht der Würfelspiegel bezüglich des Laserkopfes, so hat der rückkehrende Strahl wieder die Frequenz F_1 , und der Dopplerdetektor empfängt die gleiche Frequenz $F_2 - F_1$ wie der Bezugsdetektor. Die beiden Zähler laufen im Gleichtakt, und die Differenz der Zählungen (die Verschiebung des Würfelspiegels) ist null.

Bewegt sich hingegen der Spiegel, so ist die rückkehrende Frequenz um die *Dopplerfrequenz* ΔF gegenüber F_1 verschoben. Der Zähler 2 zählt jetzt die Anzahl Perioden von $F_2 - (F_1 \pm \Delta F)$, das Vorzeichen von ΔF je nach Richtung der Bewegung, plus wenn distanzverkleinernd, minus wenn distanzvergrössernd. Der Unterschied ΔZ zwischen Zählung 1 und 2 multipliziert mit der halben Wellenlänge $\lambda/2$ von F_1 gibt direkt die Verschiebung s.

Das letztere kann man heuristisch folgendermassen einsehen:

L A S E R K O P F

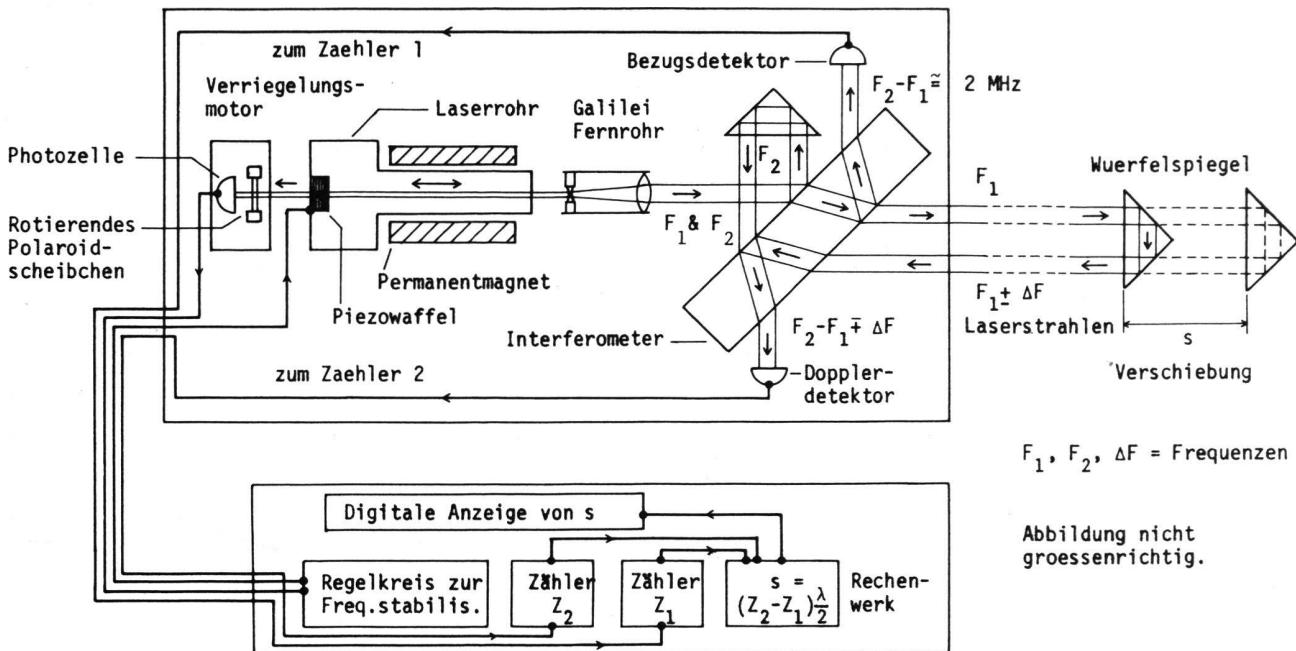


Abb. 3 Funktionsschema des Mess- und Stabilisierungssystems

Über ein gewisses Zeitintervall t zählt der Zähler 1

$$Z_1 = (F_2 - F_1) t$$

Perioden, der Zähler 2

$$Z_2 = [F_2 - (F_1 \pm \Delta F)] t$$

Perioden, die Differenz der Zählung ergibt sich als

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 = \mp \Delta F t$$

Verwendete man (in einem Gedankenexperiment) zur Zählung die ursprüngliche, nicht überlagerte Frequenz F_1 , so wären die entsprechenden Werte

$$Z'_1 = F_1 t,$$

$$Z'_2 = (F_1 \pm \Delta F) t \text{ und } \Delta Z' = \pm \Delta F t.$$

Offenbar ist die Zählungsdifferenz (abgesehen vom Vorzeichen) beidemal die gleiche: $\Delta Z = \Delta Z'$, darum darf man im folgenden von der Frequenztransponierung abssehen.

Angenommen der Spiegel bewege sich in einem unendlich schnellen, uneinsteinischen Ruck um die Strecke s vom Laserkopf weg, dann entstehen Lücken im Wellenzug von der Länge $2s$ oder in Wellenlängen ausgedrückt $2s/\lambda$. Diesem Manko in Wellenlängen entspricht genau ein Manko in der Zählung der Anzahl Perioden im Zähler 2, während der Zähler 1 kontinuierlich weiterläuft. Also $\Delta Z = 2s/\lambda$ oder $s = \Delta Z \cdot (\lambda/2)$.

Im Gerät selber wird allerdings mit $\lambda/4$ multipliziert, weil die Frequenzen auf dem Wege zwischen Detektor und Zähler noch verdoppelt werden.

2.3 Das Stabilisierungssystem

Das 13 cm lange, mit einem verdünnten Helium-Neon-Gemisch gefüllte Laserrohr ist ein zylindrischer Hohlresonator für sichtbares Licht. Seine Endflächen sind zwei in hohem Grade (über 99 %) reflektierende Spiegel.

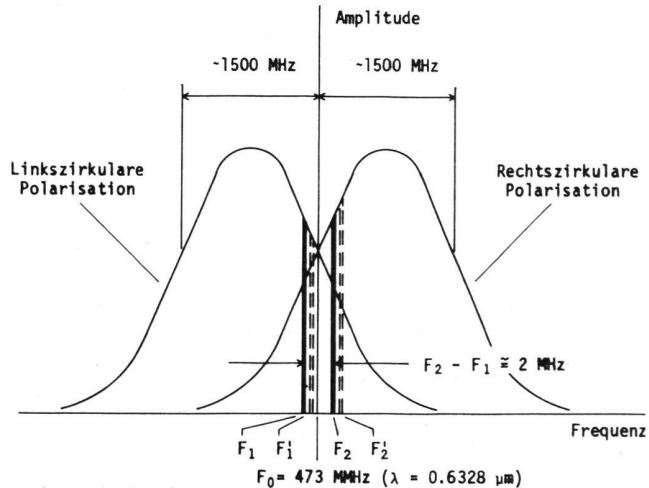


Abb. 4 Stabilisierungsmechanismus

Vielfach stellt man sich den Laser als außerordentlich stabile Frequenzquelle vor. Das ist aber nicht ohne weiteres so, da die ungeordnete Wärmebewegung der Gasatome das sonst scharfe Emissionsband zu einem «Dopplerhügel» verbreitert (Abb. 4). Aus diesem relativ breiten Bereich werden nur die *Resonanzfrequenzen des Laserrohres* als sehr schmale Bänder stimuliert. Je nach den Abmessungen des Rohres können dies eine, mehrere oder viele diskrete Frequenzen sein. Das Laserrohr verhält sich in dieser Beziehung gegenüber Lichtquellen wie eine Orgelpfeife gegenüber Schallwellen, mit dem Unterschied, dass beim Laser sich stehende Wellen hoher Ordnung entwickeln, mit Hunderttausenden oder Millionen Knoten, entsprechend dem Verhältnis Rohrlänge zu Lichtwellenlänge. Die Amplituden der erregten Frequenzen richten sich im wesentlichen nach dem Dopplerhügel als Hüllkurve.

In Abbildung 4 ist der uns interessierende Fall darge-

stellt. Wegen der Zeeman-Aufspaltung der Linie sind es jetzt zwei Dopplerhügel. Das Rohr ist so dimensioniert, dass nur die beiden Frequenzen F_1 und F_2 erregt werden. Nehmen wir als Ausgangslage an, dass sie gerade symmetrisch zur Mittelfrequenz F_0 liegen.

Ändert sich nun die Länge des Rohres, zum Beispiel wegen Erwärmung nach dem Einschalten des Instruments oder bei wechselnder Lufttemperatur, so verschieben sich die beiden Frequenzen und damit auch die Wellenlängen, das heisst der Maßstab zur Streckenmessung dehnt oder verkürzt sich. Angenommen die verschobenen Frequenzen liegen in den gestrichelten Lagen F'_1 und F'_2 . Man bemerkt, dass dann die Amplituden verschieden gross werden. Mit diesem Unterschied wird auf einen *Regelkreis* eingewirkt, der den Abstand der beiden reflektierenden Endflächen des Laserrohrs steuert und so die Spektrallinien automatisch auf die Frequenz F_0 zentriert.

Konstruktiv wird der nach hinten austretende Laserstrahl zur Stabilisierung benutzt (Abb. 3). Seine beiden zirkular polarisierten Komponenten werden zuerst mit einem Viertelwellenblatt in zwei normal aufeinanderstehende, linear polarisierte Komponenten umgewandelt. Anschliessend läuft der Strahl durch ein fünfzigmal in der Sekunde umlaufendes Polaroidscheibchen, das hundertmal in der Sekunde abwechselnd die eine und dann die andere Komponente durchlässt, und fällt schliesslich auf eine Photozelle. Im Gleichtakt mit den Maxima der beiden Amplituden wird das elektrische Signal der Photozelle zerhackt und damit effektiv in die beiden Komponenten zerlegt. Ein elektronischer Taktgeber steuert einen bürstenlosen Gleichstrommotor, der das Polaroidscheibchen rotiert und gleichzeitig auch den Takt des Zerhackers.

Vom Regelkreis wird je nach dem Amplitudenunterschied eine Gleichspannung zwischen 0 und 300 Volt erzeugt. Diese Spannung liegt an einer *Piezowaffel* an, die den hintern Laserspiegel trägt. Änderungen in der Spannung ändern die Dicke der Waffel gerade im richtigen Ausmass, um den Abstand zwischen vorderem und hinterem Laserspiegel konstant zu halten.

Diesem Stabilisierungssystem ist es zu verdanken, dass das Interferometer sofort nach dem Einschalten betriebsbereit ist. Die Firma gibt die relative Genauigkeit des Systems zu $5 \cdot 10^{-7}$ an.

3. Messtechnik

Bei den hier beschriebenen Messungen wurde der Laserkopf immer am Erdboden unten aufgestellt und der Würfelspiegel am Gebäude oben befestigt. Wenn zweckmässiger, würde es die Apparatur erlauben, die Anordnung der beiden zu vertauschen. Der Höhenwinkel der Visur sollte ungefähr 45° betragen, doch mögen örtliche Gegebenheiten einen öfters zwingen, von diesem Wert beträchtlich abzuweichen. Das Interferometer misst die schiefe Komponente der Verschiebung. Die horizontale Verschiebung erhält man daraus durch Division mit dem Cosinus des Höhenwinkels.

Zur Lagerung des Laserkopfes wurde aus Aluminiumprofilen ein solider *Ständer* gebaut, der den Laserkopf auf einer zwischen 0° und 57° neigbaren Schiene trägt (Abb. 5). Die Neigung der Schiene kann in Schritten von

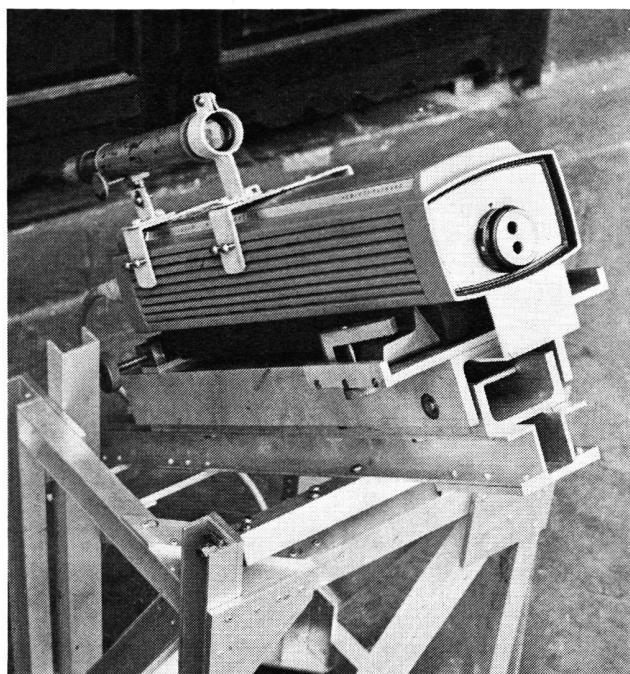


Abb. 5 Aluminiumständer mit neigbarer Schiene, Laserkopf und Zielfernrohr. Die obere Öffnung vorn am Laserkopf ist die Sendeöffnung für den Laserstrahl, die untere die Empfangsöffnung.

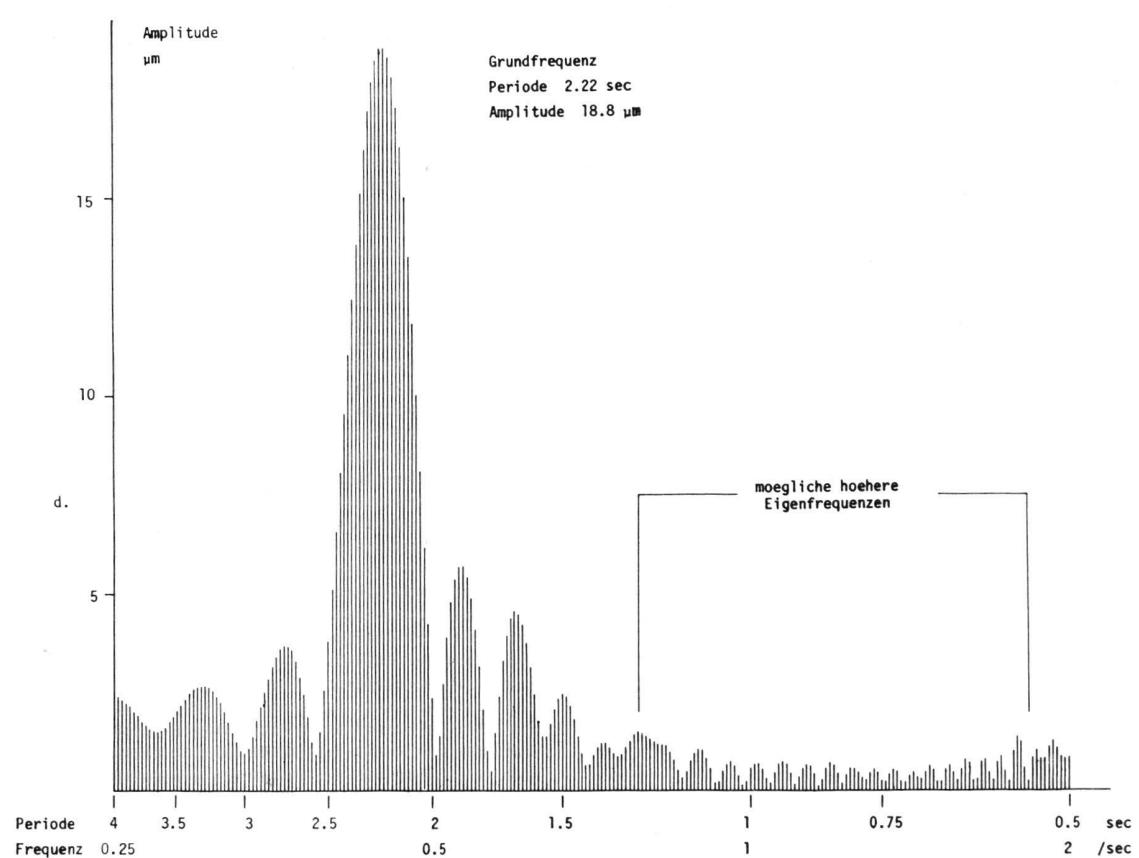
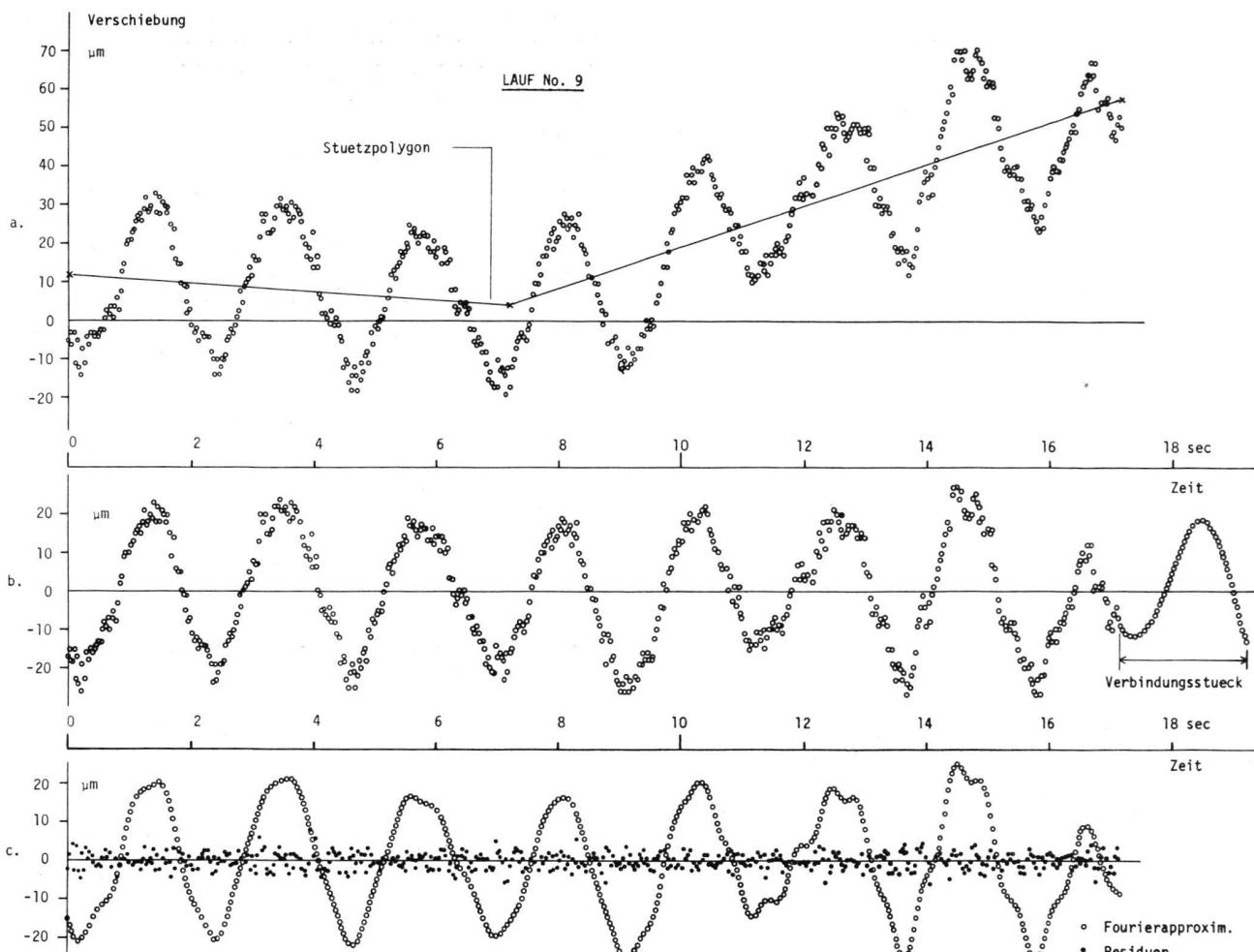
ungefähr 2° verstellt werden. Mittels zweier Schrauben wird die Schiene in einer geeigneten Lage in vorgebohrte Löcher eingerastet und mit dem Ständer fest verschraubt. Der Laserkopf sitzt nicht unmittelbar auf der Schiene auf, sondern auf einem Untersatz aus zwei ineinandergeschachtelten, starken Aluminiumprofilen. Das obere Profil kann mit einer feingewindigen Schraube um $\pm 1\frac{1}{4}^\circ$ geneigt und damit der Höhenwinkel genau eingestellt werden. Zwei seitliche Stellschrauben erlauben es, den Laserkopf auf dem Untersatz auch in die genaue Richtung einzuschwenken.

Aus Stabilitätsüberlegungen wurde der Ständer auf vier und nicht auf drei Fußschrauben abgestellt. Auf die Stabilität und Spielfreiheit der Aufstellung muss man bei der Messung von Mikron überhaupt besonders achten. Als *Würfelspiegel* hat sich der beliebig schwenk- und neigbare GDR10 des Wild-Distomats DI10 als praktisch erwiesen, nicht zuletzt auch wegen seiner grossen Spiegelfläche. Der Laserstrahl weitet sich nämlich über 300 m auf einen Durchmesser von ungefähr 6 cm aus, und der von Hewlett-Packard gelieferte Originalspiegel würde mit seinen 28 mm Durchmesser nur einen klei-

Legenden zu den nebenstehenden Abbildungen:

Abb. 6 Beispiel einer Schwingungsanalyse. Die Zieldistanz hier war 297 m. Lauf Nr. 9.

- Aufgetragene Messwerte mit Bezugspolygon
- Auf das Stützpolygon reduzierte und zur Fourieranalyse ergänzte Werte
- Fourierapproximation bis zu Gliedern 40. Ordnung und Residuen
- Spektralanalyse



nen Teil des Lichtes zurückwerfen. Der Untersatz des GDR10 wurde mit einer Klammer fest an eine Brüstung angeklemmt oder, wo das nicht möglich war, mit Fünfminuten-Klebstoff direkt auf die Mauer aufgeklebt. Möglicherweise noch vorhandenes Spiel im Schwenklager des Spiegels wurde mit einem zähen Schmierfett unschädlich gemacht.

Zur Erleichterung der Feinzielung wurde ein achtfach vergrößerndes Zielfernrohr parallel zum Laserstrahl auf den Laserkopf montiert. Sobald das Licht den Spiegel streift, sieht man diesen im Fernrohr rot aufleuchten. Die letzte Feineinstellung erfolgt, indem man das «Beam Alignment»-Meter (B. A.-meter, Abb. 2) auf maximale Ablesung bringt. Der Zeiger des B. A.-meters sollte bei 150 m Zieldistanz mindestens auf 6, bei 300 m mindestens auf 7 stehen, bevor man auf kontinuierliche Registrierung während einer halben Minute oder länger hoffen kann.

Wenn einmal der Laserstrahl genau eingerichtet ist, bringt man die *Distanzanzeige* durch Pressen des «Reset»-Knopfes zum Laufen. Der Wechsel der Messwerte erfolgt bei Schwingungsmessungen dieser Art zu rasch, als dass man ihm mit blossem Auge folgen könnte. Bestenfalls kann man durch Abstoppen des regelmässigen Wechsels zwischen Plus- und Minuszeichen mit einer Stoppuhr und aus dem Erhaschen der sich langsamer ändernden vordersten Dezimalstelle ungefähre Auskunft über Frequenz und Amplitude erhalten. Zur genauen Erfassung der Einzelheiten wäre ein elektronisches Registrier- und Speichergerät ideal; weil keines zur Verfügung stand, entschloss sich der Verfasser, die flackernde Ablesung auf Kinofilm festzubannen. Es wurde mit einer handelsüblichen «Canon Zoom 8» mit Bildfolgen von 16, 32 und 64 Bildern pro Sekunde gearbeitet. Bei einer Blendenöffnung von f:2.8 und maximaler Bildfolgenzahl 64 zeichnen sich die roten Ziffern der Nixie-Röhren noch deutlich auf Kodachrome-II-Farbfilm (15 DIN) ab und sind unter einem binokularen, zwanzigfach vergrößernden Mikroskop bequem ablesbar. Eine laufende Stoppuhr wurde als Zeitnormal mitgefilmt. Leider erlaubte das Uhrwerk der Filmkamera nur Läufe bis zu 40 Sekunden Länge bei Bildfolgenzahl 16, oder bis zu 10 Sekunden Länge bei Bildfolgenzahl 64. Am meisten Schwierigkeiten – oder Spannung und Abwechslung, je nachdem, wie man es ansieht – bereitete bei den Messungen die *Luftunruhe*. Luftturbulenz drückt sich sichtbar als Schwankungen des B. A.-meters aus. Dieses Instrument misst direkt die Stärke des empfangenen Dopplersignals. Fällt das Signal auch nur kurzfristig unter einen gewissen Schwellenwert, sei es wegen Strahlunterbrechung durch in der Luft kreu zende Käfer und Libellen, sei es wegen refraktiver Strahlablenkung oder Zusammenbruch der Phasenbeziehung durch Luftflimmern, so wird der Messvorgang automatisch unterbrochen und das Distanzzählwerk auf null gestellt. Meistens blieb bei solchen Unterbrüchen der Zeiger des B. A.-meters noch weit im erlaubten, grünen Bereich stehen; offenbar kann dann die träge mechanische Anzeige den viel schnelleren, elektronischen Vorgängen nicht mehr folgen.

Die Herstellerfirma gibt die maximale Messdistanz als 60 m oder darüber an. Bei bodennahen Visuren bereiten

sich 100 m lange Messstrecken Schwierigkeiten. Dem Umstand, dass in den beschriebenen Experimenten die Visuren *schief* durch bodenfernere, ruhigere Luftmassen verliefen, ist es zu verdanken, wenn Messungen über bis 300 m lange Strecken gelangen. Allerdings musste bei der 300 m langen Strecke bis kurz vor Sonnenuntergang gewartet werden, bevor genügend lange, kontinuierliche Läufe möglich wurden. Dazu muss mildernd erwähnt werden, dass der Tag heiss und sonnig war, und die Visur im untern Teil nahe über einem sichtbar Hitze abstrahlenden Blechdach verlief. Wie bei andern genauen Messungen im Freien ist auch hier ein bedeckter Himmel ausgesprochen von Vorteil.

Gleichzeitig mit den Interferometermessungen unten wurde oben auf dem Gebäude mit einem Windmesser «Abbirko-Flomaster» die momentane *Windstärke* gemessen, mit der Absicht, später die Messergebnisse auf mögliche Beziehung zwischen Windstärke und Schwingungsamplitude der erregten Frequenzen hin zu analysieren.

4. Auswertung der Messergebnisse, Genauigkeit

Als Rohmaterial stehen die unter dem Mikroskop vom Film abgelesenen Zahlenwerte zur Verfügung. Wo mehrere Zahlen auf dem Bild überlagert waren, wurde im Kopf das Mittel gebildet.

Die Messungen wurden, zur Weiterverarbeitung im Rechenautomaten, auf Karten abgelocht. Ein erstes, anschauliches Bild über den Verlauf der Schwingung vermittelte eine vom Zeilendrucker herausgedruckte, über die Zeitachse aufgetragene Kurve (Abb. 6a). Zur genauen Extraktion der im Gemisch enthaltenen Frequenzen und Amplituden wurde das Kurvenstück einer *Spektralanalyse* unterworfen, das heisst bei gleitender oder, besser gesagt, in kleinen Schritten fortschreitender Frequenz wird jedesmal eine Fouriertransformation ausgeführt nach den Formeln

$$a_j = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i \cos(\omega_j t_i) \quad b_j = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i \sin(\omega_j t_i)$$

$$c_j = \sqrt{a_j^2 + b_j^2} \quad \varphi_j = \arctg \frac{b_j}{a_j} \quad (1)$$

Darin bedeuten

ω_j	$2\pi f_j$
f_j	Prüffrequenz (gleitende Frequenz)
y_i	Auslenkung (Messwert) zur Zeit t_i
n	Anzahl der Messwerte
a_j, b_j	zu f_j gehörige Koeffizienten des cos-, sin-Gliedes
c_j, φ_j	zu f_j gehörige Amplitude und Phase

Damit ergeben sich Frequenz-Amplitudenbilder der Art von Abbildung 6d mit einem oder mehreren Resonanzgipfeln. Bei der Interpretation ist Vorsicht geboten. Manche in Abbildung 6d sichtbaren Nebenmaxima sind zum Beispiel kein Ausdruck physikalischer Eigenfrequenzen, sondern theoretisch voraussagbar, eine Folge der begrenzten Länge des Wellenzuges.

Ohne näher auf die Schwingungsanalyse einzugehen, sei nur erwähnt, dass die Schwingungsbilder öfters regel-

mässig aussehen, hin und wieder aber nicht einheitlich sind. Ihr Charakter kann sich über kurze Zeitspannen ändern, Frequenzen können an- und abklingen, Phasen springen, kurz, man hat es in solchen Fällen eher mit Transienten zu tun als mit stationären Schwingungen. Gleichwohl zeigt das Frequenzdiagramm die Eigenfrequenzen, wenn auch als etwas flachere Gipfel, auf. Für den Bauingenieur lassen sich aus den Ergebnissen höchst interessante und bedeutungsvolle Folgerungen ziehen.

In seinem Rechenprogramm hat der Verfasser das Resultat über einen Umweg angestrebt. Als erstes ist es nötig, die Kurve von einer oft gegenwärtigen Abtrift zu befreien, wie sie zum Beispiel in Abbildung 6a deutlich sichtbar ist*. Dies wird durch Bezug auf ein Stützpolygon erreicht, das die Mittellage der Schwingungen annähert (Abb. 6a und 6b). Vernachlässigung dieser Reduktion führt zu systematischen Fehlern im Frequenzdiagramm.

In einem weiteren Schritt wird die so reduzierte Kurve durch eine Fourierfolge angenähert. Damit kann man die Schwingung glätten, indem man sie bei richtiger Wahl der Anzahl mitgeführter Glieder von den raschen, unregelmässigen Schwankungen befreit, die höchstwahr-

scheinlich von der Luftunruhe herrühren. Als Nebengewinn fällt dabei die nach Art des mittleren Fehlers berechnete *mittlere Schwankung* an. Eine solcherart geglättete Kurve und die übrigbleibenden Schwankungen sind in Abbildung 6c gezeigt. Als Erfahrungsregel fand der Verfasser, dass es meist genügte, Fourierglieder bis zum etwa vier- bis fünffachen der niederen Eigenfrequenz des Gebäudes mitzunehmen. Das ergab je nach der Länge des Wellenzuges etwa 20 bis 100 Fourierglieder. Um die Approximation an den Rändern zu verbessern (Gibbsches Phänomen), wurde zum Zweck der Fourieranalyse der Wellenzug durch ein Stück einer Sinuskurve mit linear ändernder Amplitude ergänzt. Dieses Verbindungsstück knüpft das Ende des Zuges, im Funktionswert und in der Ableitung stetig, an den (verschobenen) Anfang an (Abb. 6b).

Ein zweiter Vorteil der Darstellung der Funktion als Fourierfolge ist eine merkbare Verkürzung der Rechenzeit bei langen Wellenzügen, wenn man die Fourierintegrale für a_j und b_j (in (1) als Summen geschrieben) durch die nachstehenden Formeln ersetzt, die sich bei der Auswertung der erwähnten Integrale über die einzelnen Fourierglieder ergeben.

$$s_{jk} = \frac{\sin [(\omega_k + \omega_j) T]}{\omega_k + \omega_j}, \quad \bar{s}_{jk} = \frac{\sin [(\omega_k - \omega_j) T]}{\omega_k - \omega_j}$$

$$c_{jk} = \frac{2 \sin^2 \left[\frac{\omega_k + \omega_j}{2} T \right]}{\omega_k + \omega_j}, \quad \bar{c}_{jk} = \frac{2 \sin^2 \left[\frac{\omega_k - \omega_j}{2} T \right]}{\omega_k - \omega_j}$$

für $\omega_k = \omega_j, \quad \bar{s}_{jk} = T, \quad \bar{c}_{jk} = 0.$ (2)

Lauf Nr.	Bildfolge Bilder/sec	Anzahl Messpunkte		Mittlere Schwankung μm	Schiefe Distanz m	Bemerkungen
		total	überschüssig			
1	64	599	548	1.60	176	{ 27.10.73, 17.00–18.00
2	32	596	472	1.80	176	bedeckt
3	64	595	544	1.03	176	{ 28.10.73, 13.00–14.00
4	16	28	17	1.17	176	bedeckt
5	16	241	158	0.86	176	{ 28.10.73, 16.30–18.00
6	32	74	59	1.10	188	bedeckt
7	32	570	447	0.73	188	{ 29.10.73, 18.00–18.30
8	64	554	511	2.38	297	Abendsonne
9	32	549	465	2.26	297	{ 21.2.74, 13.45–14.00
10	16	41	26	1.63	297	heiter; wechselnd bewölkt;
11	16	81	54	2.78	297	betonieren und vibrieren
12	32	417	252	0.75	189	{ 21.2.74, 17.20–18.00
13	16	249	126	1.16	189	Abendsonne;
14	16	191	139	1.65	189	während der Messung
15	16	590	386	1.24	189	wurde am Gebäude
16	64	436	353	1.40	189	betoniert und vibriert
17	16	592	466	1.73	189	
18	32	590	485	2.02	189	
19	64	591	468	1.44	189	
20	16	241	38	1.36	189	

Tabelle 1 *Mittlere Turbulenzschwankungen.* Mit der Fourierapproximation wurde so weit gegangen, bis die Residuen keine regelmässige Welligkeit mehr zeigten.

$$a_j' = \frac{1}{T} \sum_{k=0}^m \left\{ A_k (s_{jk} + \bar{s}_{jk}) + B_k (c_{jk} + \bar{c}_{jk}) \right\}$$

$$b_j' = \frac{1}{T} \sum_{k=0}^m \left\{ A_k (c_{jk} - \bar{c}_{jk}) + B_k (-s_{jk} + \bar{s}_{jk}) \right\}$$

$$c_j' = \sqrt{a_j'^2 + b_j'^2}, \quad \varphi_j' = \arctg \frac{b_j'}{a_j'}$$

mit

$$\omega_k = 2\pi f_k, \quad \omega_j = 2\pi f_j$$

Es bedeuten

- f_k Frequenzen der Fourierfolge mit Amplituden A_k , B_k der cos-, sin-Glieder
- f_j Prüffrequenzen
- m Ordnung des Schlussgliedes der Fourierfolge
- T Länge der Grundperiode; sie ist gleich der Zeitspanne, über die sich die Messungen eines Laufes erstrecken
- $a_j', b_j', c_j', \varphi_j'$ haben die gleiche Bedeutung wie die ungestrichenen Größen in (1)

In Tabelle 1 sind die mittleren Schwankungen von 20 Messungen zusammengestellt. Als grobe Regel lässt sich angeben:

Mittlere Turbulenzschwankung in Mikron gleich einem Hundertstel der Zielweite in Metern

Da die Turbulenzschwankungen die kleinsten noch messbaren, reellen Ausschläge bestimmen, kann man also Auslenkungen von der Größenordnung bis zu 10^{-8} der Zielweite messen. Das sind in praktischen Fällen 1 bis 3 Mikron.

5. Schlussbemerkung

Mit dem Laser-Interferometer ist dem Vermessungsfachmann ein Werkzeug in die Hand gegeben, das im Felde kurzfristig Genauigkeiten liefert, an die man sonst nur in Verbindung mit Eichlaboratorien denkt. Sicher lassen sich neben der beschriebenen noch viele andere Anwendungen finden, bei denen das Gerät seine Leistungsfähigkeit unter Beweis stellen kann.

Als letztes, nicht aber zuletzt, möchte der Verfasser Herrn G. Rahulan, M. Eng. Sc., vom Ingenieurbüro Se-pakat Setia Perunding, Kuala Lumpur, verbindlich danken für sein allzeit reges Interesse am Projekt, ohne das die Messungen kaum zustande gekommen wären.

Literatur

- [1] Hewlett-Packard Data Sheet: Laser-Interferometer 5525A, Juni 1970.
- [2] Hewlett-Packard Journal, August 1970, Palo Alto, Calif. Enthält das Laser-Interferometer beschreibende Artikel von Dukes and Gordon, Rudé und Wayne, Burgwald und Kruger.
- [3] R. R. Baldwin, G. B. Gordon, A. F. Rudé: Remote Laser Interferometry. Hewlett-Packard Journal, December 1971, Palo Alto, Calif.
- [4] Hewlett-Packard Manual: Laser-Interferometer System 5525A/5525B. Februar 1972, Santa Clara, Calif.

Adresse des Verfassers:

Richard Köchle, Faculty of Engineering University of Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia

Veranstaltungen

Informationstagung Triangulation

19./20. März 1976, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

Letzter Anmeldetermin 3. März 1976. Es wird auf die ausführliche Ankündigung und das Programm in Heft 2-76, Seite 46, verwiesen.

Berichte

Die 6. Gesamtösterreichische Tagung der Ingenieurkonsulenten für Vermessungswesen vom 15. bis 17. Januar 1976 in Bad Aussee (Steirisches Salzkammergut)

Eine mehrköpfige Delegation des SVVK und der GF hatte Gelegenheit diese Tagung der österreichischen freierwerbenden Geometer zu besuchen. Es geschah dies um Erfahrungen und Informationen auszutauschen und Berufsprobleme zu diskutieren, aber auch in Erwiderung des Besuches unserer österreichischen Fachkollegen an den Hauptversammlungen in Locarno vom vergangenen Jahr.

Die Bundesingenieurkammer ist von Gesetzes wegen die österreichische Dachorganisation der freiberufllich tätigen Ingenieure und Architekten, dem die Fachgruppe der Ingenieurkonsulenten für Vermessungswesen als eine der aktivsten Berufsgruppen angehören. Für die freie Berufsausübung ist die Mitgliedschaft obligatorisch.

«Die Berufsgruppe als solche ist nicht nur dazu berufen, Standesinteressen ihrer Mitglieder zu vertreten im Rahmen jener Aufgaben, die der Bundesgesetzgeber der Bundes-Ingenieurkammer übertragen hat, sondern es soll die Fachgruppe auch um die ständige fachliche Neuorientierung und Weiterbildung besorgt und bemüht sein.»

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne Département de génie rural et géomètres

M. le Prof. Jaromir Nemeć, Chef du Département de l'Hydrologie et des Ressources en eau de l'Organisation Mondiale de l'Hydrologie parlera de

L'Hydrologie en Chine

le mercredi 5 mai 1976 à 17 h 30 à l'Ecole Polytechnique Fédérale, auditoire B 107, 33, avenue de Cour, Lausanne.

Cette conférence, en français, publique et gratuite avec projection de clichés s'adresse à tous ceux, spécialistes ou non, qui s'intéressent aux problèmes de l'eau.