
14. KONGRESS DER INTERNATIONALEN GESELLSCHAFT
FÜR PHOTOGRAMMETRIE
HAMBURG 1980

Freiwilliger Fachbeitrag für

KOMMISSION V

ARBEITSGR. 6

von

Dipl.-Ing. H.-J. Hellmeier

Lehrstuhl für Photogrammetrie
und Kartographie
Techn. Universität Braunschweig

Photogrammetrische Bewegungsanalyse mittels
Bandabsorptionstechnik

Kurzfassung :

In Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Arbeitswissenschaft der TU Braunschweig führt der Lehrstuhl für Photogrammetrie und Kartographie Bewegungsanalysen durch. Dabei wird bei den Aufnahmen das neu entwickelte Bandabsorptionsverfahren herangezogen, welches den Einsatz von speziellen Aufnahmematerialien (z.B. Infrarotfilm) überflüssig macht. Die entstehenden Lichtspuren werden durch verschiedene Frequenzen gekennzeichnet. Über numerische Auswertung der Stereoaufnahmen erhält man Raumkoordinaten von entsprechenden Spurpunkten. Anschließend werden die Raumkurven durch Funktionen approximiert.

Auf Grund der bekannten Blinkfrequenz lassen sich neben den geometrischen Daten die physikalischen Größen v (Geschwindigkeit) und b (Beschleunigung) ermitteln. Die graphische Darstellung der Raumkurven (z.B. Aufriß) erfolgt durch einen Plotter.

Dieses Verfahren wird in Braunschweig sowohl in den Bereichen Arbeitswissenschaft/Sicherheitswesen und Sport als auch im Bereich der Deformationsmessung eingesetzt.

Photogrammetrische Bewegungsanalyse mittels
Bandabsorptionstechnik

1. Einleitung

Die Erfassung von räumlichen Bewegungsvorgängen ist in vielen Bereichen der Technik und des Sports von Bedeutung. Wichtig ist dabei allerdings, daß die Bewegungen, bzw. ausgesuchte Spuren davon, in ihrer räumlichen Gesamtheit erfaßt werden. Die erhaltenen Ergebnisse (in digitaler und/oder graphischer Form) dienen z.Bsp. als Grundlage für die Optimierung eines Bewegungsablaufes hinsichtlich der kürzesten Entfernung (Arbeitswissen - schaft) oder zur geometrischen Beschreibung eines Deformationsvorganges (Geologie).

In der Vergangenheit wurden zahlreiche Versuche mit teilweise sehr unterschiedlichen Verfahrenstechniken durchgeführt. Dies gilt sowohl für die Aufnahme als auch für die Auswertung einschließlich der graphischen Darstellung der Ergebnisse. An einer zufriedenstellenden Lösung wird u.a. in der Sportwissenschaft, der Ergonomie und auch der Photogrammetrie gearbeitet [2], [4]. Die beiden erstgenannten Disziplinen beschränken sich jedoch häufig auf die Erfassung zweidimensionaler Koordinaten.

Wesentlich für den 'Erfolg' eines Verfahrens ist der Aufwand und die Praktikabilität während der Aufnahme.

2. Aufnahmeverfahren

Bevor das hier vorzustellende Bandabsorptionsverfahren (BA-Verfahren) beschrieben wird, sei kurz auf die zur Zeit am häufigsten angewendeten Aufnahmemethoden für Bewegungsaufzeichnungen mit Spuren (Motografie) eingegangen :

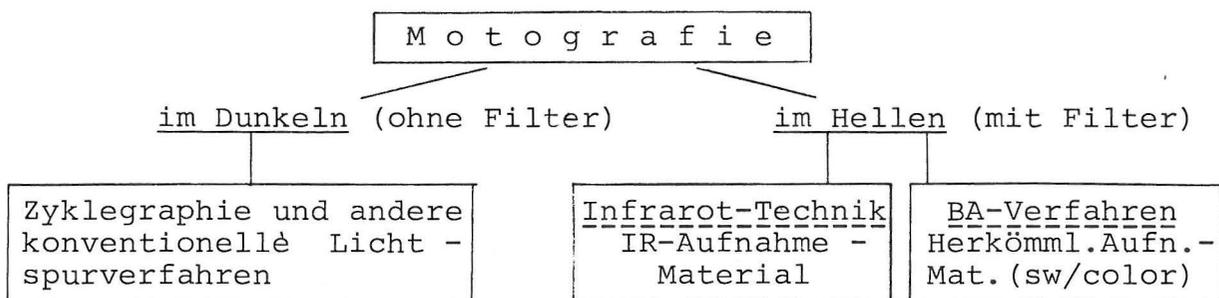


Abb.1 Verfahren für Bewegungsaufzeichnungen mit Spuren

Die im Dunkeln arbeitenden Verfahren scheiden i.a. für arbeits- oder sportwissenschaftliche Untersuchungen aus Gründen der Versuchsdurchführbarkeit aus. Bleibt als Verfahren, welches im Hellen anwendbar ist, die Infrarot-Technik zu erwähnen. Nachteilig ist hierbei aber die schwierige Handhabung des Aufnahmematerials hinsichtlich Haltbarkeit, Lagerung, Bildformate usw. Außerdem lassen sich im Infrarot-Bereich keine Farbaufnahmen im herkömmlichen Sinne herstellen.

Beim BA-Verfahren hingegen fallen diese Nachteile weg. D.h., für

die Aufnahme kann handelsübliches Foto-Material sowohl in sw (schwarz-weiß) als auch in Farbe verwendet werden. Darüberhinaus ist der Einsatz von Sofortbild-Kameras möglich. Grundlage des BA - Verfahrens ist die Verwendung einer speziellen Lichtquelle (zur Umfelderhellung) und eines entsprechend abgestimmten Filters, welches dieses 'Umfeldlicht' für die photographische Abbildung praktisch unwirksam macht. Als Lichtquelle dient eine Natriumdampf - Niederdruck - Lampe (NA - Lampe), wie sie u.a. bei Straßen - und Tunnelbeleuchtungen benutzt wird. Die emittierte Strahlung der NA - Lampe liegt in einem sehr engen Bereich des Spektrums und zwar bei $\lambda \approx 590$ nm. Als Filter empfiehlt B a u m [3] die Typen BG 20 und BG 36 (für Farb- bzw. sw-Film). Diese beiden Filter sperren die Abstrahlung der NA-Lampe sehr stark (vergl. Kennlinien in Abb. 2), während die Strahlung anderer Lichtquellen weitgehend durchgelassen wird. Verwendet man nun kleine Glühlämpchen oder LED's (Leuchtdioden) zur Spurenerzeugung, so wird deren Strahlung das Filter durchdringen und den Film belichten. Glühlampen eignen sich deshalb gut, da sie eine fast allseitige Abstrahlung aufweisen und sie wegen ihrer Nachglimmeigenschaften eine Information über den Richtungssinn der Bewegung liefern. Die Abstrahlung der LED's ist stärker gerichtet, was bei bestimmten Bewegungsvorgängen nachteilig ist.

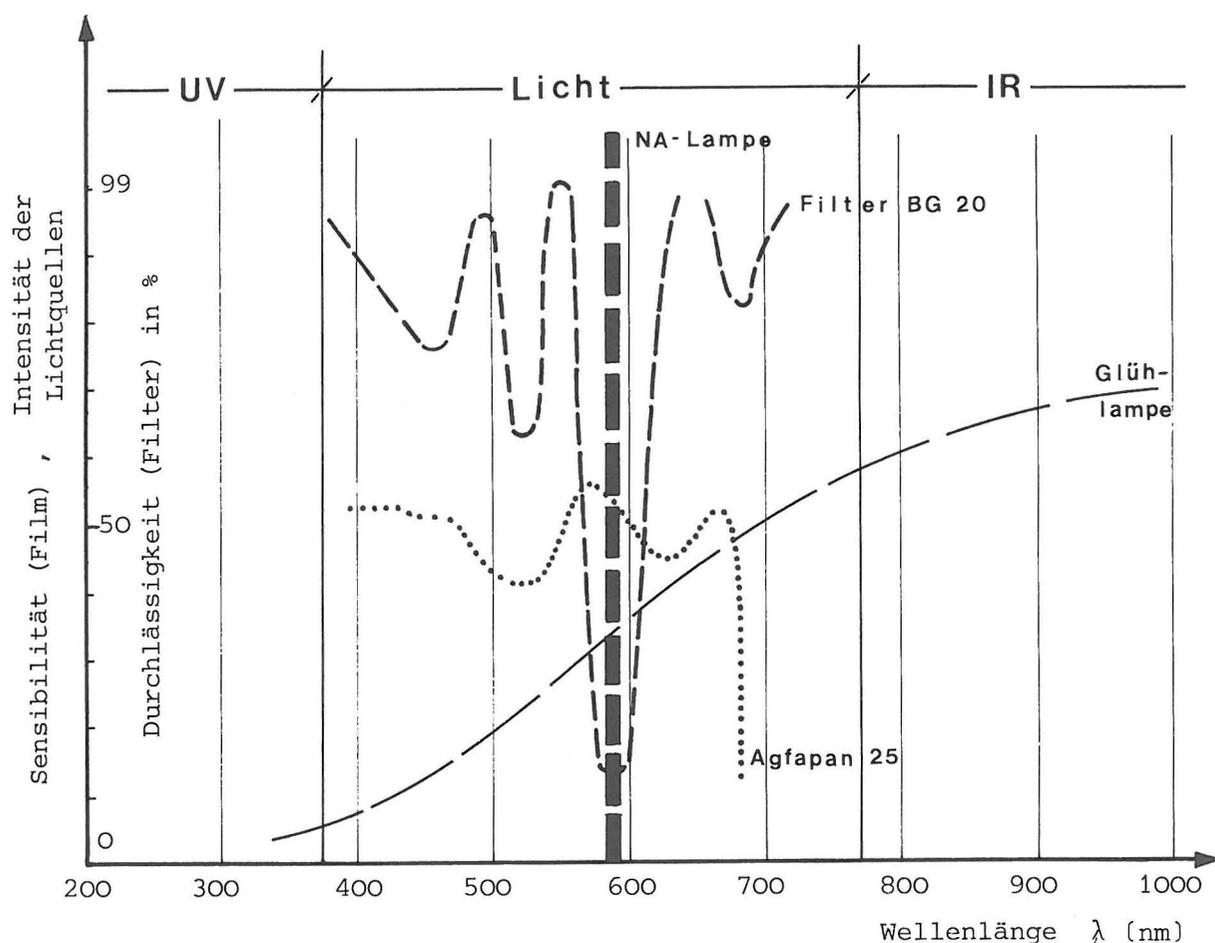


Abb.2 Kennlinien der Lichtquellen (NA-,Glühlampe), des Aufnahmемaterials (Agfapan 25) und des Filters BG 20

Das bei einer Versuchsreihe aufgenommene Meßbild (Abb. 3) wurde mit einer Meßkammer ($c = 46 \text{ mm}$, Bildformat $6 \times 6 \text{ cm}^2$, Objektiv: Biogon 1 : 4,5) aufgenommen. Um die Räumlichkeit zu erfassen, mußten zwei solcher Kammern eingesetzt werden, wobei die Basis $b \approx 0,4 \text{ m}$ und die Aufnahmeentfernung $e \approx 4 \text{ m}$ betrug. Auf eine spezielle Ausrichtung der Kammern (z. Bsp. Normalfall) konnte im Hinblick auf die anschließende numerische Auswertung verzichtet werden.

Als Filter diente der oben erwähnte Typ BG 20 und als Aufnahme-material verwendeten wir Planfilm Agfapan 25 mit 15 DIN. Für die Erzeugung der Lichtspur stand eine vom Fachgebiet Arbeitswissenschaft entwickelte Strahleranlage zur Verfügung, deren Frequenz und Spannung variabel sind. Die Anlage kann mehrere Lämpchen mit verschiedenen Frequenzen versorgen und erlaubt außerdem durch Einschaltung eines Zählimpulses eine einfache Zuordnung bei der stereophotogrammetrischen Auswertung; dies macht auch ein synchrones Auslösen der beiden Kammern überflüssig. Im gezeigten Beispiel betrug die Frequenz $f = 30 \text{ Hz}$, die Spannung $U = 14 \text{ V}$. Die Konstanz der angegebenen Größen ist sehr gut, so daß Schwankungen - vor allem der Frequenz - für die Ableitung von Geschwindigkeit und Beschleunigung nicht berücksichtigt werden müssen.

Um einen Gesamtüberblick der Aufnahme-Situation zu bekommen, wurden 2 Elektronenblitze synchron zu einem beliebigen Zeitpunkt ausgelöst (Abstrahlung der E-Blitze ähnlich der der Glühlämpchen im gesamten sichtbaren Spektralbereich).

3. Auswertung

3.1 Ermittlung der Raumkoordinaten

Die Ausmessung der Bilder erfolgte am Stereokomparator 1818 von Jenoptik. Zu bemerken ist hier, daß ein häufig auftretendes Problem bei der Ausmessung von Spuren, nämlich die räumliche Identifikation einzelner Spurteile, bei den vorliegenden Aufnahmen durch die schon angesprochene Kennung mittels Zählimpulse nicht auftrat.

Die auf Grund der Komparatormessung erhaltenen Bildkoordinaten x'_i, y'_i, x''_i, y''_i dienten als Ausgangsdaten für die Berechnung der räumlichen Koordinaten der Spurpunkte. Das Rechenverfahren wurde in zwei Schritte unterteilt:

- Relative Orientierung und Berechnung von Modellkoordinaten mit Hilfe des Programmes RELO
Grundlage dieses Programmes ist die Koplanaritätsbedingung, wonach die Bildpunkte P'_i, P''_i und die Projektionszentren O', O'' jeweils in einer Ebene (Kernebene) liegen müssen (nach Schut). Diese Ebenen-Bedingung läßt sich durch die Determinante D

$$D = \begin{vmatrix} bX & bY & bZ \\ x'_i & y'_i & z'_i \\ x''_i & y''_i & z''_i \end{vmatrix} = 0$$

ausdrücken (bX, \dots Basiskomponenten, X'_i, \dots Modellkoordinate im linken Bildkoordinatensystem). D muß für

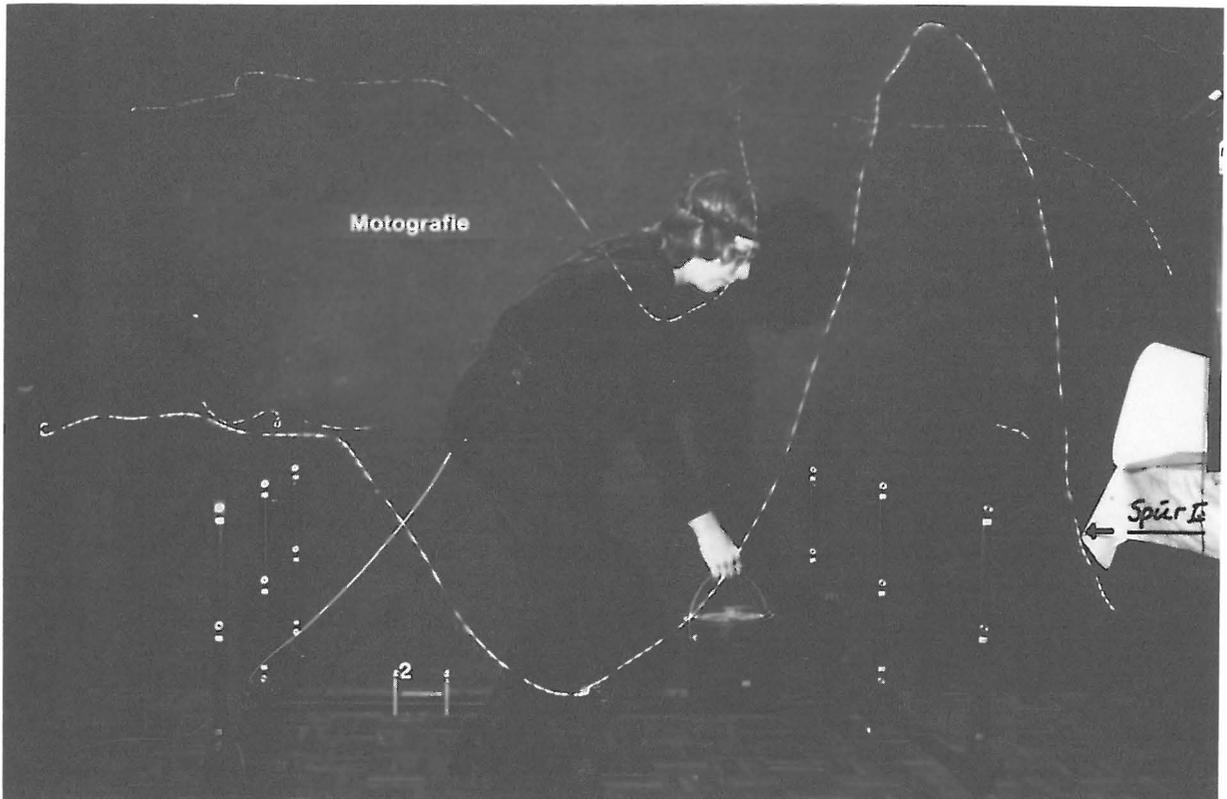


Abb.3 Meßbild-Ausschnitt (Vergrößerung), Originalmaßstab ca 1:80

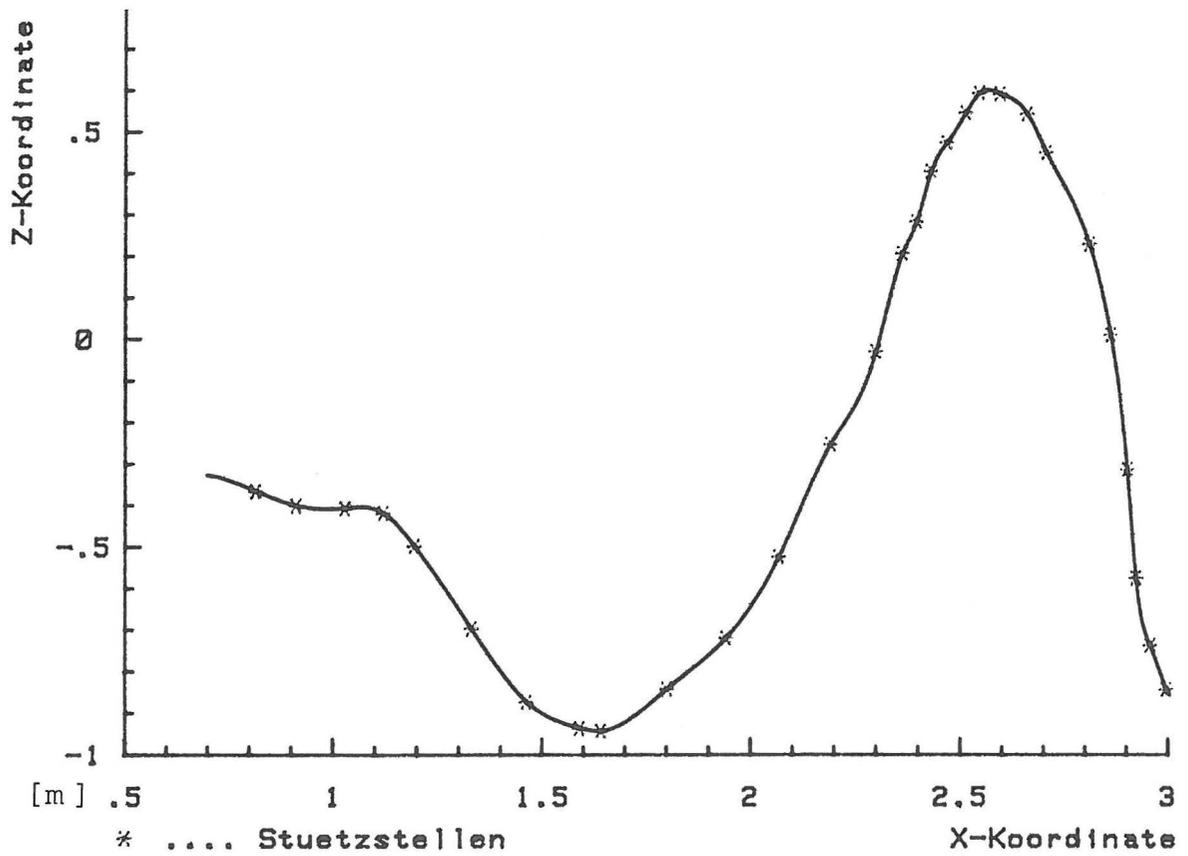


Abb.4 Aufriß-Darstellung von Spur I (Interpolation durch kubische Splines)

mindestens 5 Paare homologer Bildpunkte erfüllt sein. Das Programm RELO sieht Überbestimmung vor (Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen). Anschließend werden die Modellkoordinaten X_i, Y_i, Z_i berechnet.

- Absolute Orientierung (Programm ABSO)

Die im ersten Schritt berechneten Modellkoordinaten werden mittels Paßpunkte durch räumliche Ähnlichkeitstransformation (mit Überbestimmung) in ein örtliches Koordinaten-System U_i, V_i, W_i wie folgt transformiert:

$$\begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} U_0 \\ V_0 \\ W_0 \end{pmatrix} + \lambda \cdot R \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_i$$

(U_0, \dots Translation, $\lambda \dots$ Maßstabsfaktor, $R \dots$ Rotation, Drehmatrix). Für den durchgeführten Versuch stand dafür ein aufklappbares Paßpunktgestell zur Verfügung, welches die geodätische Bestimmung von Paßpunkten überflüssig machte. Die Genauigkeit der verwendeten Paßpunkte liegt bei $m_{pp} = \pm 1-2$ [mm].

Im Rahmen dieser ersten Versuche ergab sich für die Spurpunkte ein mittlerer Punktfehler von $m = \pm 4$ [mm]. Diese Genauigkeit kann jedoch durch verschiedene Maßnahmen wie

- a) Verfeinerung der Spuraufzeichnung,
- b) Berücksichtigung der Objektivverzeichnung einschließlich des Filtereinflusses als planparallele Platte (beträgt bei Filter BG 20 im Randbereich ca. $5 \mu\text{m}$ und ist damit hinsichtlich der Steko 1818-Auswertung zu vernachlässigen) und
- c) Einsatz des ab Juli 1980 an der TU Braunschweig zur Verfügung stehenden analytischen Auswertesystems Planicomp C 100

erheblich gesteigert werden. Andererseits reicht das erzielte Ergebnis für einen großen Teil der in der Arbeitswissenschaft anfallenden Probleme aus.

Die nun erhaltene digitale Darstellung einer Raumkurve ist im allgemeinen für die Diskussion bzw. Interpretation der entsprechenden Bewegung ungeeignet. Sie dient jedoch als Grundlage für die graphische Darstellung in ausgezeichneten Ebenen wie Grund-, Auf- und Seitenriß.

3.2 Graphische Darstellung

In den meisten Fällen von Bewegungsaufzeichnungen handelt es sich um glatte Spuren, so wie das auch im vorgestellten Beispiel der Fall ist. Hier bietet es sich an, die erhaltenen, diskreten Spurpunkte auch durch eine glatte Kurve zu verbinden. Auf Grund dieser Gegebenheit werden wegen ihrer guten Approximationseigenschaften Polynom-Splines dritten Grades verwendet, die sich in der Regel der Sollkurve besser anpassen als Interpolationspolynome n -ten Grades (Problem der Welligkeit bei $n > 4$), [5]. Es ist natürlich durchaus möglich und auch erforderlich, andere Bewegungen durch andere Ansätze zu approximieren. D.h., der zu wählende Ansatz ist von der Art des Vorganges abhängig. Im ein-

fachsten Fall sind Spurpunkte durch Geraden zu verbinden (Polygon).

Bei der Interpolation mittels Splines wird nicht das zu den $n+1$ Interpolationsstellen gehörige Interpolationspolynom n -ten Grades, sondern je ein kubisches Polynom pro Teilintervall bestimmt. Da nach Voraussetzung die Kurve glatt bzw. stetig sein muß (Differenzierbarkeit), wird durch gleiche Krümmungen in den Knoten ein glatter Anschluß der Polynome P_i und P_{i-1} erreicht. Der Ansatz der kubischen Splinefunktion lautet:

$$f(x_i) = a_i + b_i(x-x_i) + c_i(x-x_i)^2 + d_i(x-x_i)^3$$
$$\text{für } x \in [X_i, X_{i+1}]$$
$$i = 0 \text{ (1) } n-2$$

Die auf Grund der Stützstellen ermittelten Koeffizienten $a_i \dots d_i$ dienen zur Berechnung weiterer Kurvenpunkte, durch die anschließend mit Hilfe eines Plotters die Kurve gezeichnet werden soll. Die Schrittweite S ist vom Maßstab der Zeichnung abhängig, d. h. es sollten keine "Sprünge" erkennbar sein. In diesem Beispiel ist $S = 0,2$ mm. Als Ergebnis wird in Abb. 4 sehr deutlich, wie die ursprünglich, durch diskrete Punkte erfaßte Kurve mit Hilfe der Spline-Funktionen als kontinuierliche Spur dargestellt werden kann (Spline- und Graphik-Programm: HP 9845A/9872A, Institut für Vermessungskunde der TU Braunschweig).

3.3 Geschwindigkeit v

Für die Bestimmung von v ist der in einer bestimmten Zeit t zurückgelegte Weg s zu bestimmen. In welche Intervalle nun eine Bewegung einzuteilen ist, hängt wiederum von der Art dieser Bewegung ab. Hier wurde als Intervall der Zählimpuls zu Grunde gelegt. Die Zeit t beträgt demnach bei einer Frequenz $f = 30$ Hz pro Intervall $t = 1/5$ sec. Die Weglänge s konnte aus den Raumkoordinaten der entsprechenden Punkte berechnet werden.

Auf eine Darstellung der Ergebnisse sowie die Bestimmung der zweiten Ableitungen des Weges nach der Zeit $b = d^2s/dt^2$ (Beschleunigung) wird an dieser Stelle verzichtet.

4. Schlußbetrachtung und geplante Entwicklungen

Das aufgeführte Beispiel verdeutlicht, wie die BA-Aufnahmetechnik in Verbindung mit der Stereophotogrammetrie zu einem sehr praktikablen Verfahren werden kann. Im Augenblick sind allerdings die instrumentellen Gegebenheiten am hiesigen Lehrstuhl noch nicht optimal, was zu einer etwas "zerrissenen" Auswertung (Komparator, ICL-Rechenanlage, HP-Rechner) führt. Dies wird sich jedoch mit dem schon erwähnten Erhalt eines analytischen Auswertesystems (incl. Rechner und Zeichentisch) ändern. Eine durchzuführende Bewegungsanalyse soll dann wie in Abb. 5 dargestellt, ablaufen.

Die Effizienz wird durch die Geschlossenheit der Auswertung erheblich erhöht. Abb. 5 zeigt auch, daß sich durch den Einsatz von Nicht-Meßkammern der finanzielle Aufwand bei der Aufnahme reduzieren läßt. Dies ist vor allem gegenüber teuren elektronischen Aufzeichnungsverfahren, wie z. B. dem Selcom-System [7] ein erheblicher Vorteil.

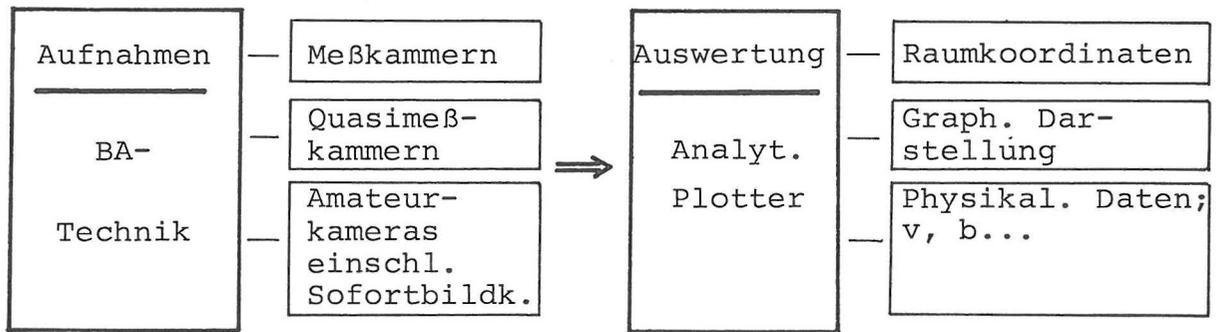


Abb. 5 Verfahrensablauf

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Geologie der TU Braunschweig werden gegenwärtig Deformationen von Tonzylindern nach beschriebenem Verfahren im Nahbereich mit Nicht-Meßkammern bestimmt. Die Spuren ausgesuchter Punkte werden durch Lichtleitfasern dargestellt. Die angestrebte Genauigkeit beträgt $\pm 0,2$ [mm].

5. Literatur

- [1] *Albertz/Kreiling*
Photogrammetrisches Taschenbuch, H. Wichmann Verlag, Karlsruhe 1975
- [2] *Baum, Eckart*
Motografie - Bewegungsaufzeichnung mit Spuren (Band I), 1979
Vorabkopie, Forschungsbericht Nr. 451 Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung
- [3] *Baum, Eckart*
Filter für die Motographie, Schott Information; in Vorbereitung
- [4] *Gukwort, W.*
Die digitale Erfassung kinematischer Parameter der menschlichen Bewegung Biomechanics I, 1 st. Int. Seminar Zürich 1967
- [5] *Jordan-Engeln/Reuter*
Formelsammlung zur Numerischen Mathematik, B.I.-Hochschultaschenbuch, Band 106 (1976)
- [6] *Fa. Osram GmbH Berlin/München*
Licht für innen und außen, Ausgabe April 1979/866/2
- [7] *Fa. Selcom Meßsysteme GmbH Göttingen*
Selcom System