

Ein neuer gravitationsrichtungsabhängiger Parameter für die innere Orientierung zur Kompensierung von Neigungen am Objektivanschluss

Claudia HAIG, Christian HEIPKE, Manfred WIGGENHAGEN

Zusammenfassung

Die Automobilindustrie verwendet zunehmend Verfahren der Nahbereichsphotogrammetrie für die 3D Punktbestimmung. Insbesondere die Bündelausgleichung ist wegen der Möglichkeit zur Verwendung günstiger Consumer Kameras anstelle von hochgenauen kostenintensiven Messkameras attraktiv. Aufgrund der Eigenschaften der Kameras und deren täglicher Benutzung, kann allerdings nicht davon ausgegangen werden, dass die innere Orientierung während des Aufnahmeprozesses stabil bleibt. In diesem Artikel wird der Effekt der Gravitation auf das Objektiv und dessen Anschluss vorgestellt, ein physikalisches Modell zur Kompensation des Gravitationseinflusses aufgestellt und getestet. Erste Ergebnisse weisen signifikante Verbesserungen der Längenmessabweichungen nach VDI/VDE 2634.1 auf. Untersuchungen zur Bildhauptpunktlage unterstützen die Entwicklung des gravitationsabhängigen Parameters. Zur weiteren Verifizierung muss der Gravitationsparameter auf mögliche Korrelationen mit anderen Parametern der äußeren und inneren Orientierung hin untersucht werden. Um den Parameter auch statistisch zu verifizieren, wird eine Untersuchung nach VDI/VDE 2634.1 mit verschiedenen handelsüblichen Kameras angestrebt.

1 Problemstellung

Techniken der Nahbereichsphotogrammetrie werden für die dreidimensionale Punktbestimmung in der Industrie zunehmend bedeutend. Vor allem die Bündelausgleichung zeichnet sich durch große Flexibilität und ein breites Anwendungsspektrum aus. Mit Hilfe von Methoden der Bildanalyse werden die photogrammetrischen Systeme (Kamera, Maßstäbe, Zielmarken und Software) noch effizienter, da z.B. Merkmalslinien auf Karosserieteilen automatisch erkannt werden können und so dem Versuchsingenieur mehrere Schnitte durch das Bauteil ermöglichen.

Die Bündelausgleichung wird auch als Methode zur Generierung von Referenzpunkten für die Verknüpfung verschiedener Patches der Streifenprojektion genutzt und sollte aus diesem Grund in der Standardabweichung eine halbe bis eine Größenordnung genauer als die Messung mit dem Streifenprojektionssystem sein. In den vergangenen Jahren hat sich das Verfahren der Streifenprojektion stark entwickelt und erreicht inzwischen relative Genauigkeiten von bis zu 0,1mm/m. Voraussetzung für die Einführung von Referenzpunkten ist demnach eine Standardabweichung von 0,01...0,02mm/m für die Bündelausgleichung. Diese Messunsicherheiten werden von handelsüblichen Digitalkameras nicht ohne weiteres erreicht. Hochgenaue Messkameras sind im industriellen Einsatz als Alternative oft zu kostspielig.

Die handelsüblichen Digitalkameras, die bei VOLKSWAGEN verwendet werden, sind keine spezifischen Messkameras und aufgrund täglicher Nutzung können Instabilitäten am Objektivanschluss vorkommen. Daraus resultierende Bewegungen des Objektivs führen zu einer systematischen Verschiebung der Bildpunkte in Richtung der Gravitation – die optische Achse kann nicht mehr rechtwinklig zu der Bildebene angenommen werden. Um diesen Effekt zu kompensieren, wurde ein Modell entwickelt, welches diesen Effekt physikalisch modelliert und lediglich einen zusätzlichen Parameter benötigt - den maximalen Objektivneigungswinkel α_{\max} .

Als Grundlage für die Evaluierungen wird bei allen Versuchen nach der VDI/VDE RICHTLINIE 2634.1 (2002) vorgegangen. Bei VOLKSWAGEN werden dafür hochpräzise Kohlefasermaßstäbe mit weißen Epoxydharzmarken eingesetzt, welche eine Kalibriergenauigkeit von $5\mu\text{m}$ über eine Länge von 2.6m garantieren.

2 Mathematisches Modell zur Kompensierung von Objektivneigungen am Objektivanschluss

2.1 Idee

Bei Objektivinstabilitäten neigt sich die optische Achse in Richtung der Gravitation und verursacht damit Bildpunktverschiebungen. Je nach Ausrichtung der Kamera variieren der Bildhauptpunkt und die Kamerakonstante pro Bild, was prinzipiell auch die radiale und tangentiale Verzeichnung beeinflusst.

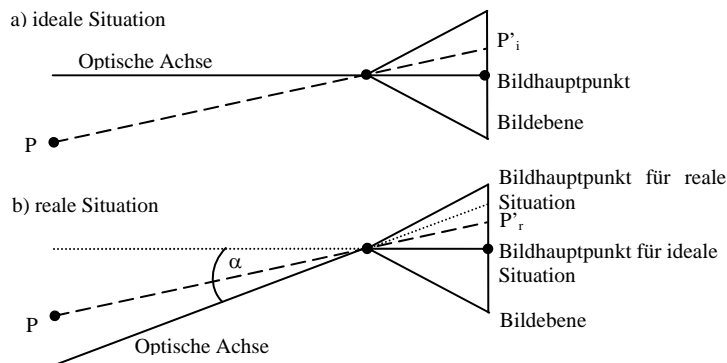


Abb. 1: Beziehung zwischen optischer Achse und Bildebene

Zur Kompensation dieses Effekts wird in dem mathematischen Modell zur Vereinfachung angenommen, dass der Punkt der Verkippung mit dem Projektionszentrum zusammen fällt und sich die optische Achse in Richtung Gravitation neigt (siehe Abb. 1). In der idealen Situation (Abb. 1a) wird der Objektpunkt P auf den Bildpunkt P'_i abgebildet. Tatsächlich ist das Objektiv jedoch um den Winkel α geneigt, die (ebenfalls geneigte) optische Achse schneidet die Bildebene im Bildhauptpunkt der realen Situation (Abb. 1b). P wird zwar im

Sensor an derselben Position abgebildet, hier mit P'_r bezeichnet, die Bildkoordinaten von P'_r unterscheiden sich jedoch zu demjenigen von P'_i .

Der maximale Objektivneigungswinkel α_{\max} tritt bei horizontaler Ausrichtung der optischen Achse auf. Alle anderen Objektivneigungswinkel α werden für jedes Bild mit Hilfe des Winkels ν – dem Winkel zwischen dem Gravitationsvektor und dem Vektor der optischen Achse – berechnet (siehe Abschnitt 2.2).

Ziel dieses Modells ist es, die Bildkoordinaten um einen Term, der die Gravitationswirkung auf das Objektiv kompensiert, zu korrigieren. Dabei soll das grundsätzliche Verfahren der Bündelausgleichung nicht beeinflusst, sondern lediglich eine zusätzliche Unbekannte, der maximale Objektivneigungswinkel α_{\max} , bestimmt werden. Für Anwendungen im industriellen Einsatz würde damit bei der Berechnung kein zusätzlicher Aufwand entstehen.

2.2 Mathematisches Modell

Das mathematische Modell wird in zwei Schritte unterteilt, wobei der erste Schritt in einem definierten globalen Koordinatensystem, und der zweite Schritt in einem erweiterten Bildkoordinatensystem beschrieben wird.

Schritt 1:

Wie schon in Abschnitt 2.1. angesprochen, besitzt jedes Bild einen individuellen Objektivneigungswinkel α , der von der Richtung der optischen Achse abhängt. Berechnen lässt sich α aus α_{\max} und dem Winkel ν (siehe Abb. 2), der zwischen der optischen Achse und dem Gravitationsvektor aufgespannt wird und sich aus den Winkeln der äußeren Orientierung berechnen lässt.

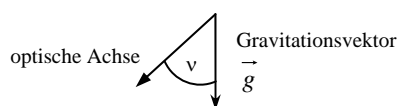


Abb. 2: Definition des Winkel ν

$$r_{33} = \cos \omega \cdot \cos \kappa = \cos \nu \quad (1)$$

$$\nu = \arccos(r_{33})$$

$$\alpha = \alpha_{\max} \cdot \sin \nu \quad (2)$$

- mit:
- ω, κ = Winkel der äußeren Orientierung
 - ν = Neigungswinkel bei Drehreihenfolge (α, ν, κ)
 - r_{33} = Element der Rotationsmatrix
 - α_{\max} = Maximaler Objektivneigungswinkel

Wird das Koordinatensystem des Objektraumes so definiert, dass die Z-Achse parallel zu dem Gravitationsvektor liegt, lässt sich der Neigungswinkel ν aus dem Rotationselement r_{33}

berechnen (siehe Gleichung 1, SCHWIDEFSKY, ACKERMANN, 1976). Durch die trigonometrischen Beziehungen kann nun der Objektivneigungswinkel α in Abhängigkeit von α_{\max} berechnet werden (siehe Gleichung 2).

Schritt 2:

Die Bildebene E_i und deren zugehörige optische Achse repräsentieren die ideale Konfiguration, wobei die optische Achse senkrecht auf der Bildebene steht. Der Koordinatenursprung des Bildkoordinatensystems liegt hier im Projektionszentrum. Die Z - Achse verläuft identisch zur idealen optischen Achse, die X- Achse verläuft parallel zur Bildkoordinatenachse x der Ebene E_i . Y vervollständigt das rechtsdrehende Koordinatensystem.

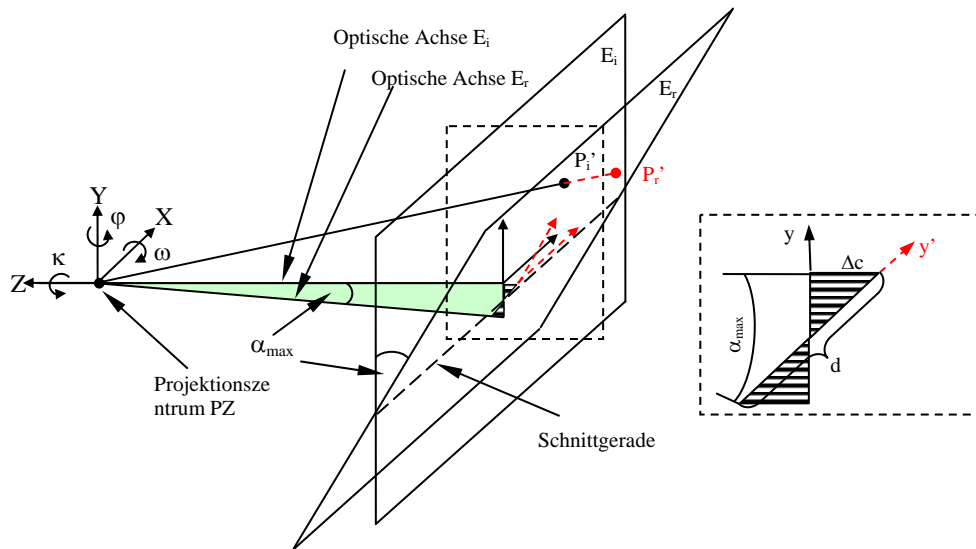


Abb. 3: mathematisches Modell der Objektivneigung; mit E_i idealer Bildebene und E_r geneigter realer Bildebene – bei einer horizontalen Ausrichtung und einem maximalen Objektivneigungswinkel α_{\max}

Alle Objektpunkte werden nach dem Prinzip der Zentralperspektive auf die Bildebene abgebildet. Bei einer Bewegung des Objektivs in Richtung Gravitation relativ zur Bildebene neigt sich die optische Achse. Wird diese optische Achse auf der Seite des Objektraumes mit der idealen optischen Achse zur Deckung gebracht, entsteht dabei im Bildraum die in Bezug zu Ebene E_i verkippte Ebene E_r . Bei einer horizontalen Orientierung der idealen optischen Achse, bei der der Objektivneigungswinkel α maximal wird, und zusätzlich die x- Achse im Bildkoordinatensystem horizontal verläuft, verschiebt sich der Bildhauptpunkt in Richtung $-y$ des Bildkoordinatensystems um den Abstand d (Abb. 3). Δc zeigt die sich ergebene Verlängerung der Kamerakonstante an.

Durch die Neigung der optischen Achse wird Punkt P nicht auf der idealen Ebene E_i in P_i' abgebildet, sondern auf E_r an die Stelle P_r' projiziert. Der nächste Berechnungsschritt besteht demnach in der Projektion der Bildkoordinaten auf die Ebene E_i .

Die Schnittgerade der beiden Ebenen bildet die einzige Linie in der Bildebene, auf der die Bildkoordinatenlage im Vergleich zur idealen Bildebene nicht verzerrt, sondern nur um d (den Betrag der Bildhauptpunktverschiebung) verschoben ist.

Zur Berechnung der korrigierten Bildkoordinaten werden die Ebenen E_i und E_r mathematisch durch Ebenengleichungen beschrieben, anschließend wird für jeden Bildpunkt der Durchstoßpunkt P_i' der Geraden $\overline{PZP_r'}$ auf der Ebene E_i berechnet. Die korrigierten Bildkoordinaten ergeben sich demnach aus einer Funktion der realen Bildkoordinaten, der Kamerakonstante, und dem individuellen Objektivneigungswinkel α (siehe Gleichung 3).

$$x_i = f(x_r, x_0, y_0, c, \alpha_{\max}, \text{äussere Orientierung}) \quad (3)$$

$$y_i = f(y_r, x_0, y_0, c, \alpha_{\max}, \text{äussere Orientierung})$$

Die genauen Formeln für die Berechnung der neuen Bildkoordinaten können HAIG et al. (2006) entnommen werden.

3 Evaluierung

3.1 Offline Berechnungen

Zur Bewertung des neuen Ansatzes wurden verschiedene Projekte auf Grundlage der VDI/VDE RICHTLINIE 2634.1 (2002) durchgeführt. Bei der Berechnung der Bündelausgleichung wurde jeweils eine Selbstkalibrierung mit den herkömmlichen zehn Brown'schen Parametern (BROWN (1971)) durchgeführt, danach wurden die entsprechenden Längenmessabweichungen bestimmt.

Die Kamera (Fuji S2 Pro) war mit einem Aufsteckblitz ausgestattet, um eventuelle zusätzliche Einflüsse durch einen auf das Objektiv aufgesetzten Ringblitz zu minimieren. Im ersten Projekt wurden 200 Bilder mit besonders viel um die optische Achse gekanteten Aufnahmen aufgezeichnet, um den möglichen Effekt der Objektivneigung deutlich herausarbeiten zu können. Projekt 2 und 3 besaßen jeweils 100 - 120 Bilder und Projekt 3 wurde hauptsächlich in horizontaler Lage aufgenommen. Bei der horizontalen Aufnahmekonfiguration sollte untersucht werden, ob sich der Effekt auch hier aufdecken lässt, oder ob er mit anderen Unbekannten korreliert ist.

Die Korrekturwerte der Bildkoordinaten für den Einfluss der Gravitation wurden im Anschluss an die Bündelausgleichung offline berechnet. Danach wurde die Bündelausgleichung mit den verbesserten Bildkoordinaten erneut durchgeführt und die Längenmessabweichungen bestimmt (siehe Abb. 4). Sobald der neue Parameter in die Bündelausgleichung implementiert ist, sollen die Korrekturparameter für die Bildkoordinaten direkt über den Objektivneigungswinkel α bestimmt werden.

max. Längenmessabweichungen vor und nach der Korrektur der Objektivneigung pro m

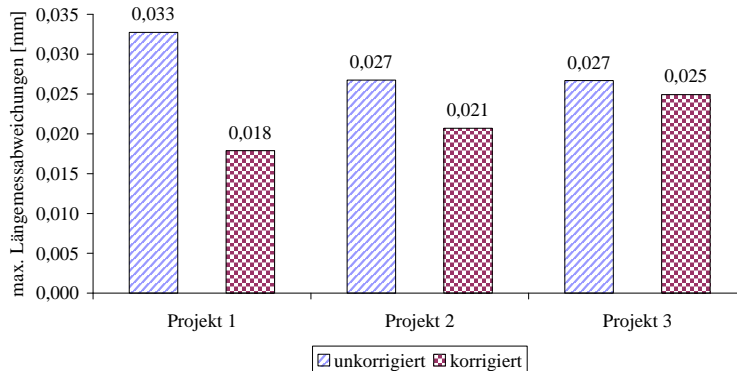


Abb. 4: maximale Längenmessabweichungen pro m für unkorrigierte und korrigierte Objektivneigungen

Alle drei Projekte weisen eine Verbesserung der maximalen Längenmessabweichung auf. In Projekt 1 wurde eine Reduzierung der Längenmessabweichung von 45% erzielt, in Projekt 2 23% und in Projekt 3 7%. Damit konnten relative Genauigkeiten von bis zu 1:55.300 (Längenmessabweichung 0,018 mm pro m) erreicht werden.

verschiedene max. Neigungswinkel zur Berechnung der max. Längenmessabweichung

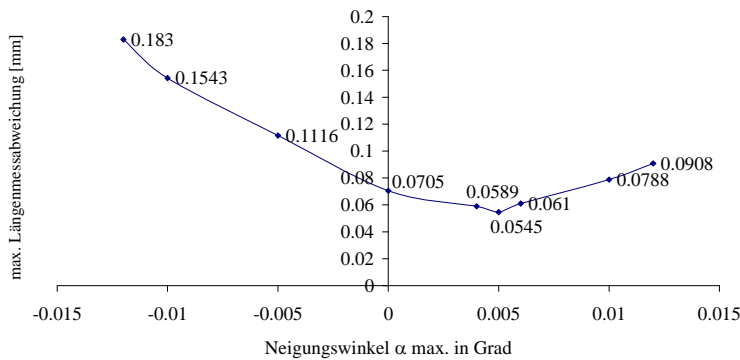


Abb. 5: maximale Längenmessabweichungen pro 2,6m für unterschiedliche maximale Objektivneigungswinkel

Die große Verbesserung bei Projekt 1 lässt sich durch die vielen gekanteten Aufnahmen erklären, da in diesem Fall der gravitationsabhängige Einfluss sehr groß ist. Im Vergleich

dazu ist die Verbesserung von Projekt 3, wie vermutet, nur marginal, da mehr als 90% der Aufnahmen in horizontaler Kameralage aufgenommen wurden und der Effekt der Objektivneigung unter Umständen in der äußeren Orientierung kompensiert wurde. Beweisen lässt sich diese Vermutung allerdings erst, wenn die Implementierung des Objektivneigungswinkels abgeschlossen ist und die Signifikanz des Parameters untersucht wurde.

Bei der Berechnung des maximalen Objektivneigungswinkels α_{\max} als Ausgangspunkt für alle weiteren Berechnungen wurde die Iteration, um die minimale maximale Längenmessabweichung zu bestimmen, offline durchgeführt. In Abbildung 5 kann man einen parabelförmigen Graph erkennen, der die maximalen Längenmessabweichungen zugeordnet zu den jeweiligen α_{\max} darstellt. Die Form des Graphen lässt die Vermutung zu, dass dieses Modell tatsächlich dem physikalischen Einfluss entspricht und ihn hinreichend genau beschreibt.

3.2 Bildhauptpunktuntersuchungen

Vor der Implementierung des Parameters in die Bündelausgleichung wurde bei einer weiteren Untersuchung verglichen, wie sich die Hauptpunktlage im Vergleich zu den herkömmlichen Auswerteverfahren auf die Längenmessabweichung auswirkt. Exemplarisch wurde zur Validierung des Parameters ein Projekt mit realen Daten auf unterschiedliche Art und Weise ausgewertet und die Längenmessabweichungen wurden berechnet.

- Fall a) Bündelausgleichung mit 10 Brown'schen Parametern
- Fall b) Bündelausgleichung mit 10 Brown'schen Parametern + unbekanntem Hauptpunkt pro Bild (zwei zusätzliche Unbekannte pro Bild)
- Fall c) Bündelausgleichung mit 10 Brown'schen Parametern + festgelegtem Hauptpunkt pro Bild, berechnet nach dem math. Modell zur Korrektur des Gravitationseinflusses

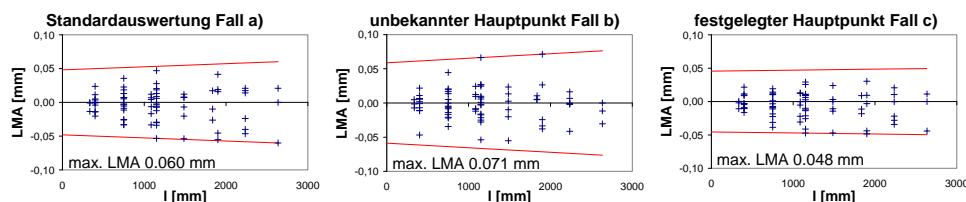


Abb. 5: Vergleich der min. und max. Längenmessabweichungen pro 2,6m bei unterschiedlicher Auswertung eines Projektes

Die Längenmessabweichungen der drei verschiedenen Untersuchungen sind in den Diagrammen der Abbildung 6 für alle Strecken dargestellt. Das erste Diagramm repräsentiert dabei eine Standardauswertung (Fall a), wie sie in der Nahbereichsphotogrammetrie momentan üblich ist (BROWN, 1971; VDI/VDE RICHTLINIE 2634.1, 2001). Bei dem Vergleich des ersten und zweiten Diagramms sieht man, dass der

Grenzwert E der zulässigen dreidimensionalen Längenmessabweichung (siehe VDI/VDE RICHTLINIE 2634.1 (2002)), welcher die Begrenzungslinie der Längenmessabweichungen definiert, in Fall b) größer ist als in Fall a). Das liegt mit großer Wahrscheinlichkeit an der Überparametrisierung der Bündelausgleichung in Fall b), welche die Summe der Verbesserungen zwar insgesamt auf ca. 1/3 im Vergleich zu Fall a) reduziert, jedoch die Szene nicht physikalisch korrekt abbildet und damit größere Ausreißer in den Längenmessabweichungen hervorruft. Vergleicht man Diagramm 3 mit Diagramm 1, reduzieren sich der Grenzwert E und die maximale Längenmessabweichung deutlich. Aus diesem Ergebnis lässt sich schließen, dass die gravitationskompensierte Hauptpunktlage die physikalischen Gegebenheiten besser modelliert als die Standardauswertung.

3.3 Folgerungen und Ausblick

Dieser Artikel befasst sich mit dem Einfluss der Gravitation auf den Objektivanschluss. Dabei wird angenommen, dass der Bajonettanschluss der verwendeten Kamera das Objektiv nicht fest genug an den Kamerakörper bindet. Diese Instabilität verursacht je nach Orientierung der Kamera einen systematischen Fehler in den Bildkoordinaten und wird anhand des entwickelten mathematischen Modells kompensiert. Bei der Entwicklung wurde besonders darauf geachtet, nur einen neuen Parameter für die innere Orientierung zu entwickeln, um Überparametrisierungen zu vermeiden. Dieser Parameter kann als Objektivneigungswinkel α_{\max} bezeichnet werden und ist für die gesamte Aufnahmeconfiguration gleich groß. Ein individueller Objektivneigungswinkel, pro Bild in Abhängigkeit von der Kameraausrichtung ergibt sich daraus.

Für eine weitergehende umfassende Analyse des neuen Parameters muss dieser in die Bündelausgleichung implementiert werden, um Korrelationen zwischen den bereits vorhandenen Parametern genauer untersuchen zu können. Zu vermuten ist, dass der Parameter bei gleicher Orientierung der Kamera (z.B. horizontal) nicht signifikant bestimmt werden kann, was zu einer möglichen Änderung der üblichen Aufnahmeconfiguration führen könnte. Zu empfehlen wäre für diesen Fall eine Aufnahmeconfiguration mit möglichst vielen Aufnahmen, die um die optische Achse gekantet werden.

Des Weiteren sollen verschiedene handelsübliche Kameras auf Instabilitäten am Objektiv hin untersucht werden, um den hier genannten Ansatz weiter zu untermauern.

4 Literatur

Brown, D.C. (1971): *Close-Range Camera Calibration*. Photogrammetric Engineering, 37(8), pp. 855-866.

Haig, C.; Heipke, C.; Wiggenhagen, M. (2006): *Lens inclination due to instable fixings detected and verified with VDI/VDE 2634 Part I*. IntArchPhRS. Band XXXVI/5. Dresden, 2006, 6 S., CD

Schwiedefsky, K.; Ackermann, F. (1976): *Photogrammetrie Grundlagen, Verfahren, Anwendungen*. B.G. Teubner Stuttgart, 7. Auflage, S. 27

Ein neuer gravitationsrichtungsabhängiger Parameter für die innere Orientierung zur Kompensierung von Neigungen am Objektivanschluss

VDI/VDE Richtlinie 2634 Teil 1 (2002): *Optische 3D- Meßsysteme – Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung.* VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik.