

PHOTOGRAMMETRISCHE DEFORMATIONSMESSUNG  
VON FAHRZEUGKOMPONENTEN

H. Bruhn  
Forschung und Entwicklung  
Volkswagen AG, 3180 Wolfsburg  
Dr. K. Wendt  
Technische Universität Braunschweig  
Institut für Photogrammetrie und Kartographie  
3300 Braunschweig  
Federal Republic of Germany  
Kommissions-Nr. V

## 1. Übersicht

In der Automobilindustrie wird die Photogrammetrie primär im Forschungs- und Entwicklungsbereich eingesetzt. Zwei wesentliche Einsatzgebiete sind die Vermessung von Karosserieformen /1/ und die Vermessung von Crashfahrzeugen /2, 3/. In diesen Bereichen ergänzt bzw. ersetzt die Photogrammetrie die sogenannten konventionellen Mehrkoordinaten-Meßgeräte (Meßmaschinen). Wesentliche Gründe hierfür sind:

- \* Die Größe der Objekte (Fahrzeuge).
- \* Berührungslose Messung (kein Einfluß des Meßverfahrens auf die mechanischen Eigenschaften des Objektes).
- \* Das Objekt muß nur kurze Zeit verfügbar sein, unabhängig von der Anzahl der zu messenden Punkte.
- \* Schnelle, sichere, kompakte Archivierung der Objektdaten auf fotografischem Film.

Neben relativ großen Objekten gibt es im Automobilbau viele kleinere Elemente, die dreidimensional vermessen werden, um zum einen die Kontur oder Form zu kontrollieren, zum anderen aber auch um räumliche Koordinatenänderungen zu erfassen, aus denen dann Deformationen, Dehnungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen u. a. abgeleitet werden.

Ermöglicht wird dies durch die Entwicklung leistungsfähiger und kostengünstiger Rechner sowie deren Integration in neuere photogrammetrische Aufnahme- und Auswertesysteme. Die Folge ist eine allgemeine Genauigkeits- bzw. Leistungssteigerung in der photogrammetrischen Auswertung.

Ziel der Untersuchungen bei VW ist es, Fahrzeugkomponenten photogrammetrisch vollständig zu dokumentieren und durch die Bildmessung Objektpunktkoordinaten und -strecken mit einer Genauigkeit von  $\leq 0,1$  mm zu bestimmen. Ein Abgaskrümmers diente als erstes Untersuchungsobjekt (Bild 1).

## 2. Deformationen am Abgaskrümmers

Das mechanische Grundproblem eines Abgaskrümmers liegt im wesentlichen darin, einen gasdichten Anschluß an den Motor zu erreichen. Undichtigkeiten werden durch verschiedene Formen der Ribbildung, durch Flanschverzüge und durch die bleibende Verkürzung des Abgaskrümmers infolge Schrumpfung verursacht. In

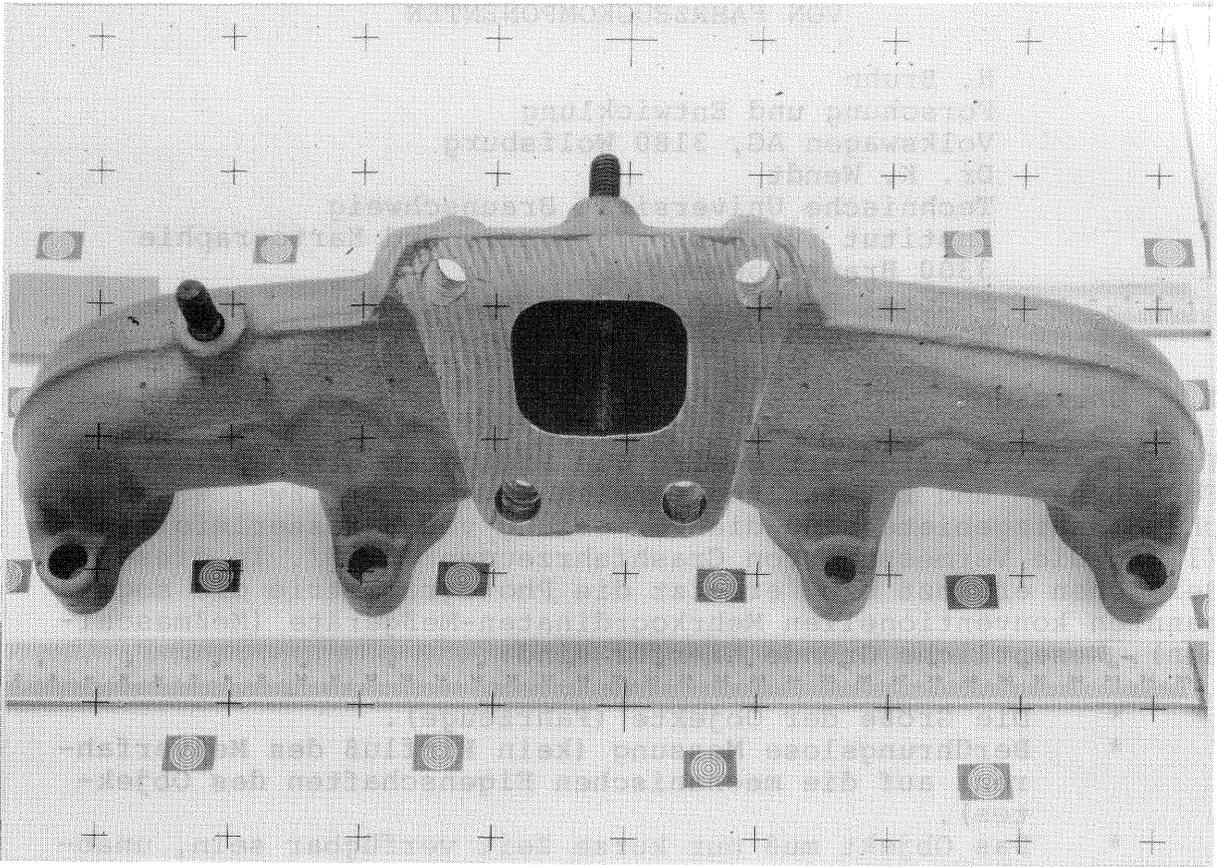


Bild 1: Gußeisener Abgaskrümmers eines 4-Zylinder-Dieselmotors

der Entwicklungsphase werden die kritischen Betriebsbedingungen in Prüfstandsversuchen simuliert (Zeitraffungsfaktor 1 : 10). Hierbei geht es im wesentlichen um die Erfassung der Temperaturverteilung, der Spannungsverteilung und der Verformungen /4/.

Die Ursache für die Deformationen des Abgaskrümmers ist die ungleichmäßige Temperaturverteilung. Grundsätzlich kann zwischen einem zylinderkopfnahen Bereich mit relativ niedrigen Temperaturen (max. 400 °C) und einem zylinderkopffernen Bereich mit relativ hohen Temperaturen (max. 800 °C) unterschieden werden. Idealisiert führt die Temperaturdifferenz zu einer Verformung des Abgaskrümmers, wie sie das Bild 2 zeigt.

Im Extremfall werden Abgastemperaturen von 800 °C gemessen, wodurch die Streckgrenze des Werkstoffes (z. B. hochlegiertes, austenitisches Eisen GGG-NiCr 20.2) an mehreren Stellen überschritten wird. Dies führt zu plastischen Verformungen und zu bleibenden Verzügen durch Abbau von Spannungen im kalten Zustand.

## 2.1 Anforderungen an das Meßverfahren

In der Entwicklungsphase des Abgaskrümmers ist es wichtig, alle Formänderungen, die im Betrieb auftreten, zu erfassen. Aufgrund der komplizierten Struktur, der schlechten Zugänglichkeit und

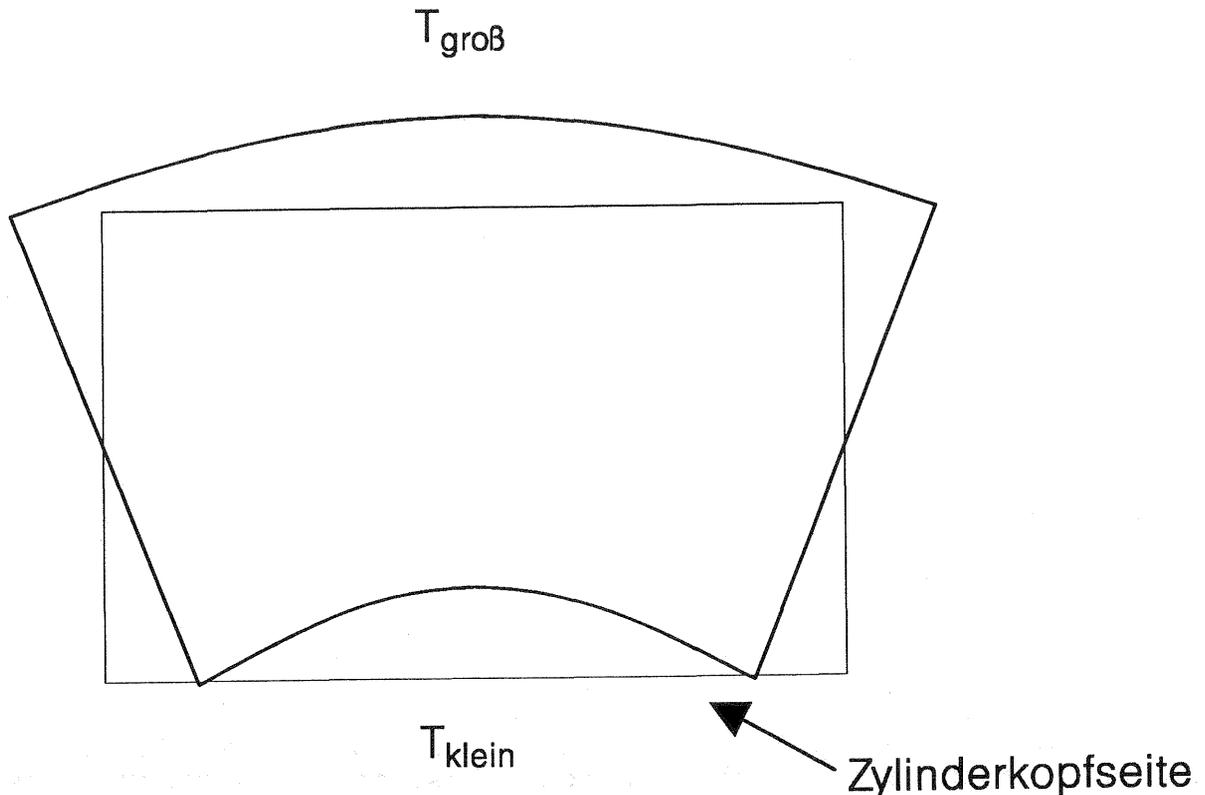


Bild 2: Idealisierte Verformung eines Abgaskrümmers, hervorgerufen durch starke Temperaturdifferenz

der starken thermischen Belastung ist der meßtechnische Aufwand herkömmlicher Techniken sehr groß. Einerseits arbeiten die meisten Meßsysteme nur berührend und ein- bzw. zweidimensional, andererseits erfordert der Genauigkeitsanspruch einen derart komplizierten und aufwendigen Aufbau, daß bisher die Abgaskrümmmer zum Vermessen nur einiger weniger Punkte ausgebaut wurden, um dann im Feinmeßraum vermessen zu werden.

Für die Formermittlung des Abgaskrümmers bietet sich die Photogrammetrie als Meßverfahren aus folgenden Gründen an:

- \* Optisches, dreidimensionales Meßverfahren. Größe, Temperatur, Objektzustand sind von untergeordneter Bedeutung.
- \* Der Meßsensor (Kamera) ist leicht transportabel und kann zum Versuchsort gebracht werden.
- \* Erfassung auch komplexer Oberflächenstrukturen, d. h. die photogrammetrische Aufnahme und Auswertung sind in hohem Maße an die Meßaufgabe anpaßbar (z. B. Kameratyp, Auswertegerät, Genauigkeit).

### 3. Aufnahmeanordnung

Die photogrammetrische Vermessung von Fahrzeugkomponenten setzt eine hohe Flexibilität der Aufnahmekonzeption voraus. Gleichzeitig ist die Aufnahmeanordnung so durchzuführen, daß das Objekt mit bestmöglicher Genauigkeit erfaßt wird. Diese spezielle Aufgabenstellung läßt fast ausschließlich nur Teilmeßkammern als Aufnahmegeräte zu. Ihr Einsatz setzt allerdings spezielle Kenntnisse des photogrammetrischen Auswerteprozesses voraus.

Der Abgaskrümmers wurde mit einer Rollei-6006-Réseau-Teilmeßkammer mit 50-mm-Wechselobjektiv (Distagon von CARL ZEISS) aufgenommen. Als Filmmaterial wurde Agfapan 100 verwendet.

Vor der Aufnahme mußte das Teil besonders präpariert werden, um anhand homologer Punkte zwischen den unterschiedlichen Vergleichszeitpunkten Verformungen nachweisen zu können. Weil der Abgaskrümmers zwischen den Vergleichsepochen hohen Temperaturen ausgesetzt ist, konnten übliche Signalisierungstechniken, wie zum Beispiel das Aufbringen von Markierungen durch Bekleben oder Bemalen, nicht angewendet werden. Die materiellen Vergleichspunkte wurden deshalb mit einem Bohrkörner gesetzt, kleine Löcher von ca. 1 mm Durchmesser und ca. 0,5 mm Tiefe. Sie waren auch nach der thermischen Belastung des Abgaskrümmers noch deutlich zu erkennen, wenngleich die äußere Kontur durch die starke Hitzeeinwirkung ein wenig zerfloß. Insgesamt wurden in dieser Weise über 100 Punkte auf dem Objekt markiert.

Für die punktweise Erfassung des Abgaskrümmers wurde ein Bildverband aus 20 konvergenten Einzelaufnahmen angelegt. Der Bildmaßstab beträgt ca. 1 : 7. Die Aufnahmeanordnung ist in Bild 3 schematisch dargestellt. Um aus den Bildern auch die Größe des Objekts rekonstruieren zu können, waren zwei Präzisionsmaßstäbe in den Objektraum gelegt worden, von denen mindestens einer in jeder Aufnahme sichtbar war. Bei unveränderter Entfernungseinstellung am Objektiv der Teilmeßkammer wurde der Abgaskrümmers möglichst bildfüllend abgebildet. Um das Bildformat noch besser auszunutzen und damit eine stabilere Verknüpfung der Konvergentaufnahmen zu erzielen, waren auf der Fläche, auf die der Abgaskrümmers für die Aufnahmen gestellt wurde, weitere Meßpunkte markiert worden.

Um neben einzelnen, diskreten Punkten auch die Form des Abgaskrümmers photogrammetrisch bestimmen zu können, wurde das Teil in einem zweiten Arbeitsschritt durch paarweise, parallele Stereoaufnahmen erfaßt, um es später im Modell stereoskopisch in Profilen und Formleitlinien ausmessen zu können. Gegenüber dem konvergenten Bildverband wurde die durchschnittliche Aufnahmeentfernung verringert. Mit zwei parallel ausgerichteten Rollei-6006-Réseau-Teilmeßkammern wurde das Teil ausschnittsweise formatfüllend abgebildet. Der Bildmaßstab beträgt ca. 1 : 3.

### 4. Auswertung

Die Bestimmung der Objektkoordinaten erfolgte durch eine Bündelblockausgleichung. Hierzu wurden zunächst die Konvergentaufnahmen am ZEISS Planicomp C 100 ausgemessen und die registrier-

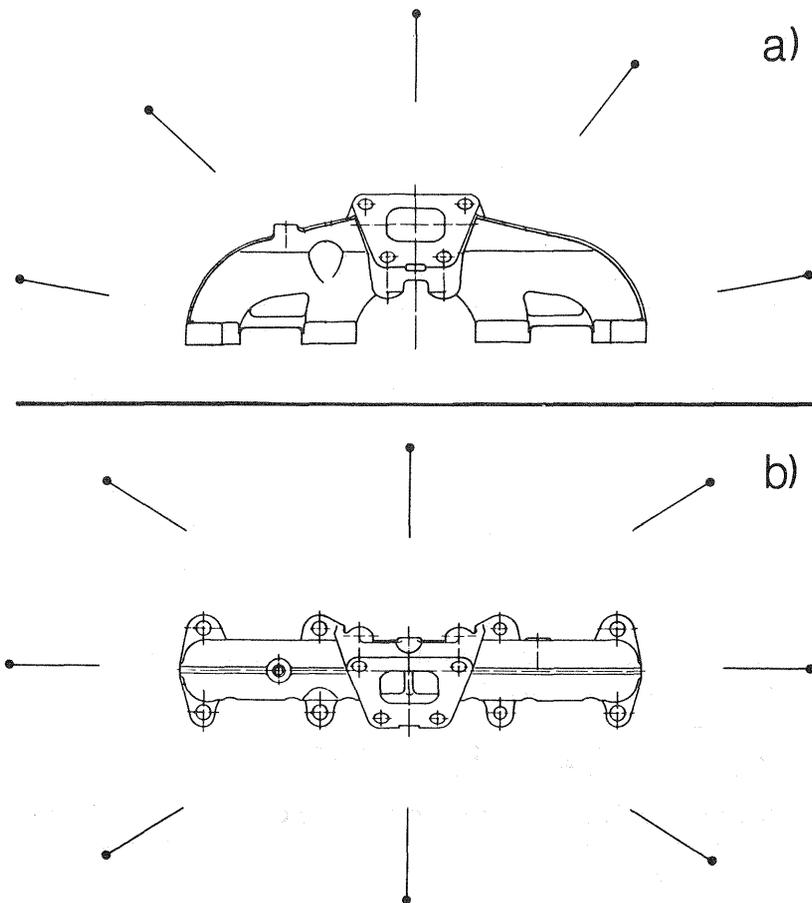


Bild 3: Aufnahmeanordnung zur kompletten Erfassung des Abgaskrümmers in der Seitenansicht (a) und in der Aufsicht (b)

ten Komparatorkoordinaten wegen Filmverzug und Filmunebenheit unter Verwendung einer maschenweisen Interpolation auf das Réseau der Teilmeßkammer transformiert /5/. Für die weitere Verarbeitung der Bildkoordinaten in einem Bündelansatz sind ausreichend bekannte Näherungswerte für die Objektkoordinaten, die räumliche Lage der Aufnahmestrahlenbündel im Objektkoordinatensystem und für die Parameter der inneren Orientierung Voraussetzung. Eine algebraische Parameterisierung der dazu notwendigen Rotationsmatrizen vereinfacht die Beschaffung von Näherungswerten für die Objektkoordinaten und die Orientierung der Strahlenbündel im Vergleich zur konventionellen Parameterisierung mittels trigonometrischer Funktionen /6/. Singuläre Stellen werden vermieden, und das Schätzverfahren besitzt einen relativ großen Konvergenzradius. Die Ausgleichung der gemessenen Bildkoordinaten und die Schätzung der unbekannt Parameter erfolgte alsdann mit dem Programm MOR-S /7, 8, 9/. Nach der Methode der Kleinsten Quadrate werden die Residuen der beobachteten Bildkoordinaten minimiert. Die a posteriori Standardabweichung der Bildkoordinatenmessung betrug  $\pm 0.012$  mm. Die Objektkoordinaten wurden in einem Netz mit sechs freien Datumsparametern (drei Translationen, drei Rotationen) durch Auffelderung auf alle Näherungswerte mit einer durchschnittlichen Standardabweichung von kleiner  $\pm 0.05$  mm für alle drei Koordinatenrichtungen bestimmt. Für die gleichfalls geschätzten Para-

meter der inneren Orientierung, die den Bildraum festlegen, wurden beim konvergenten Bildverband Genauigkeiten erzielt, die für die Kammerkonstante bei  $\pm 0.035$  mm und für die Lage des Bildhauptpunktes bei  $\pm 0.010$  mm in beiden Koordinatenrichtungen lagen. Die beiden signifikanten Parameter der radialsymmetrischen Verzeichnung /7/ wurden auf  $\pm 10$  % ihres Wertes bzw. besser bestimmt.

Die separaten und unabhängigen Ausgleichungen der Vergleichs-epochen liefern je einen Satz geschätzter Objektkoordinaten  $x_i$  mit zugehöriger Kofaktorenmatrix  $Q_{x,i}$ . Ausgehend von der Nullhypothese  $H_0$ , daß alle Punkte über den Beobachtungszeitraum stabil geblieben sind, gilt für die Epochen  $i$  und  $i+1$

$$H_0: E(x_{i+1} - x_i) = 0; \quad H_A: E(x_{i+1} - x_i) \neq 0$$

$E$  bezeichnet den Erwartungswert der Differenz  $(x_{i+1} - x_i)$ .  $H_A$  ist die Alternativhypothese. Beim Kongruenztest werden nach dem klassischen Ansatz von Pelzer /10/ die beiden zu vergleichenden Koordinatenvektoren derart aufeinander transformiert, daß die Quadratsumme der Klaffungskomponenten in den homologen Vergleichspunkten minimiert wird.

$$(x_{i+1} - x_i)^T \cdot (x_{i+1} - x_i) = \min$$

Der resultierende Differenzvektor  $d$  ergibt sich mit der Matrix  $I$  aus einer differenziellen Ähnlichkeitstransformation der Differenz  $(x_{i+1} - x_i)$  und ist eine invariante Größe der Netzausgleichung.

$$d = I(x_{i+1} - x_i)$$

Die Kofaktormatrix des Differenzvektors  $d$  folgt aus dem Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$Q_d = I(Q_{x,i+1} + Q_{x,i}) I$$

Wenn keine Punktverschiebungen stattgefunden haben, muß der Erwartungswert des Differenzvektors  $d$  Null sein. Dies wird mit der Testgröße  $T$

$$T = \frac{d^T Q_d^{-1} d}{h \cdot s_0^2}$$

geprüft, wobei  $h = \text{rg}(Q_d)$  und  $s_0^2$  die Varianz der Gewichtseinheit aus beiden Bündelaussätzen ist. Sind die Klaffungen in den Vergleichspunkten nicht signifikant, ist bei  $f$  Freiheitsgraden  $T$  kleiner als das zugehörige Quantil der F-Verteilung.

$$H_0: T \leq F_{h,f,1-\alpha}$$

Zeigt der Test die Existenz von Punktverschiebungen an, können diese in weiteren Schritten lokalisiert werden /11, 12, 13/.

Beim Abgaskrümmen lag die maximale Deformation bei 0,8 mm. Ungefähr 2/3 aller Punkte mußten als signifikant verschoben

angesehen werden. Für den Rest der Punkte gilt bei einer durchschnittlichen räumlichen Vektorlänge von 0,22 mm für die Klaffungen zwischen Epoche 1 und Epoche 2, daß sie mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % nicht verschoben wurden. Über diese Punkte wurden die beiden Zustände des Abgaskrümmers geometrisch verknüpft und in einem einheitlichen Koordinatensystem dargestellt. In diesem erfolgte dann die Formerfassung beider Zustände durch stereoskopische Messung in Profilen, Schnitten und Formleitlinien. Die innere Orientierung der beiden für die Stereoaufnahmen benutzten Teilmeßkammern wurde mittels Bündelausgleichung bestimmt.

## 5. Darstellung der Ergebnisse

Nach Auswertung der Bilder liegen die Raumkoordinaten in numerischer Form auf einer Datenbank vor und werden dann mittels geeigneter CAD-Verfahren weiterverarbeitet. Für die Weiterverarbeitung ist es notwendig, die Daten in einem genormten Format zur Verfügung zu haben. In der Automobilindustrie hat man sich auf das VDA-Format (VDA = Verband der Automobilindustrie) geeinigt.

Neben einer quantitativen Bewertung der Einzelergebnisse ist eine visuelle Beurteilung und grafische Dokumentation erforderlich. Zu diesem Zweck wird eine grafische Workstation der Fa. Control Data eingesetzt. Die Hardware besteht im wesentlichen aus der Cyber 910B-340 Workstation, einem 170 MByte Festplattenlaufwerk und einem 32 Bit-Prozessor 68020.

Die auf dem hochauflösenden Farbmonitor erzeugten Grafiken können auf einem Videoprinter bzw. Farbplotter ausgegeben werden.

Die Software besteht zum einen aus dem Standard-Systempaket ICEM (Integrated Computer Engineering and Manufacturing) und einem photogrammetrischen Systempaket, das zusammen mit der Fa. Control Data entwickelt wird. Mit dem UNIX-Betriebssystem steht ein mittlerweile als Industriestandard bewährtes Programmierungswerkzeug zur Verfügung.

Im einzelnen sind die folgenden Darstellungsarten möglich bzw. geplant:

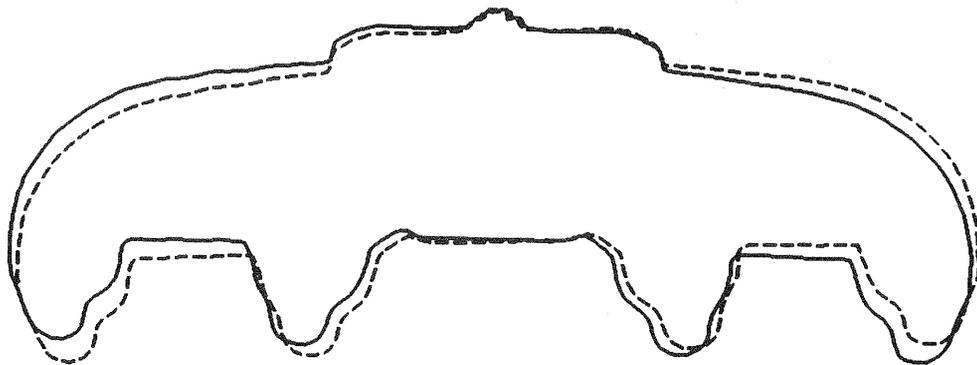
### 5.1 Schnittmodelle

Hier sind standardmäßig 9 Ansichten, z. B. Vorder- und Seitenansicht, Aufsicht etc., vorgesehen. Durch Rotation können über 350 weitere Ansichten erzeugt werden. Zudem können beliebige Schnitte bzw. Konturen durch die vorhandene Flächengeometrie gelegt werden (Bild 4).

### 5.2 Raummodelle

Die Darstellung der Raummodelle erfolgt isometrisch. Sowohl die Gitternetz- (Drahtmodell) als auch die Flächenmodellldarstellung sowie eine Kombination beider Darstellungen sind möglich.

Schnitt- und Raummodelle können farblich unterschiedlich struk-



— 1. Epoche

- - - 2. Epoche

Deformation 10 : 1

Bild 4: Konturverlauf des Abgaskrümmers vor und nach dem Testuriert werden. Durch verschiedene Sättigungsgrade der einzelnen Farbwerte läßt sich eine nahezu unbegrenzte Zahl verschiedener Farben erzeugen, die den Geometrieelementen aufgeprägt werden können. Bild 5 zeigt verschiedene Möglichkeiten der grafischen Darstellung.

Die Aufbereitung von Schnitt- und Raummodellen aus photogrammetrischen Daten ist mit Hilfe der hochentwickelten Computertechnik leicht möglich. Dagegen befinden sich Grafikprogramme zur Darstellung räumlicher Deformationsvorgänge auf der Basis photogrammetrischer Datengewinnung noch in der Entwicklungsphase.

### 5.3 Deformationsanalyse

Im einzelnen sollen hier nur die Entwicklungsziele aufgelistet und anhand der Vektordarstellung erste Ergebnisse von Deformationsuntersuchungen am Abgaskrümmers gezeigt werden:

- \* Vergleich zweier Zustände
  - für gemessene Punkte,
  - für beliebige Punkte,
  - für beliebige Schnitte,
  
- \* Berechnung und Darstellung von Deformationsvektoren
  - in Projektion und dreidimensional,
  - mit frei wählbaren Maßstabsfaktoren,

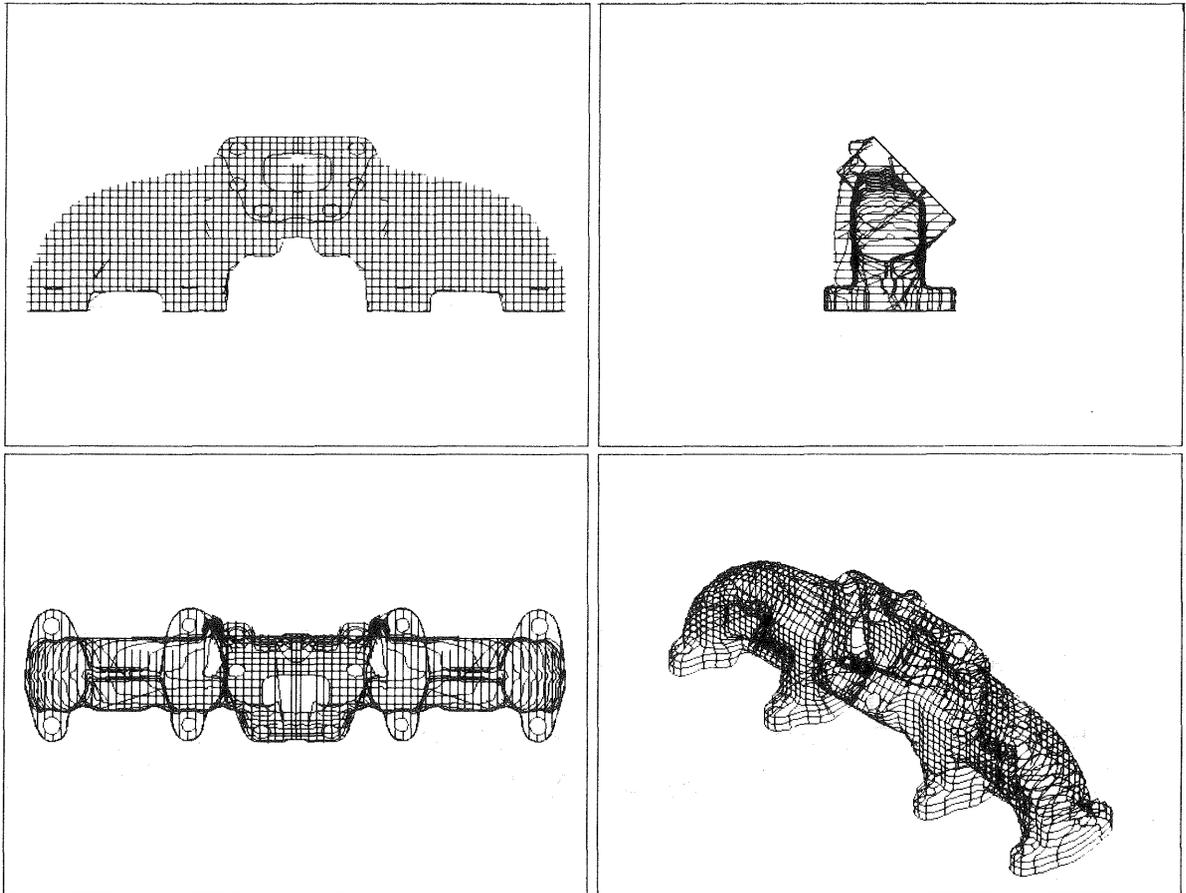


Bild 5: Verschiedene Computerdarstellungen des Abgaskrümmers

- mit numerischer Anzeige in den Grafiken,
- mit interaktiver Eingriffsmöglichkeit.

Bild 6 zeigt am Beispiel des Abgaskrümmers die zweidimensionalen Deformationsvektoren in der Vorderansicht und in der Aufsicht.

## 6. Zusammenfassung/Ausblick

Es hat sich gezeigt, daß die Photogrammetrie zur Beschreibung von Formen und auch zur Deformationsanalyse geeignet ist. Auch so ein komplexes Element wie der Abgaskrümmers konnte mit Hilfe moderner Aufnahmekameras und numerischer Methoden wie Bündeltriangulation und simultaner Kalibrierung in drei Dimensionen vermessen werden.

Alle bisher erzielten Ergebnisse wurden unter Laborbedingungen erreicht. Der nächste Schritt ist die Umsetzung dieser Methode zum Standardmeßverfahren für das Versuchsfeld.

Weiterhin ist der Einsatz von CCD-Kameras zur digitalen Bildaufzeichnung vor Ort zur On-Line-Messung vorgesehen.

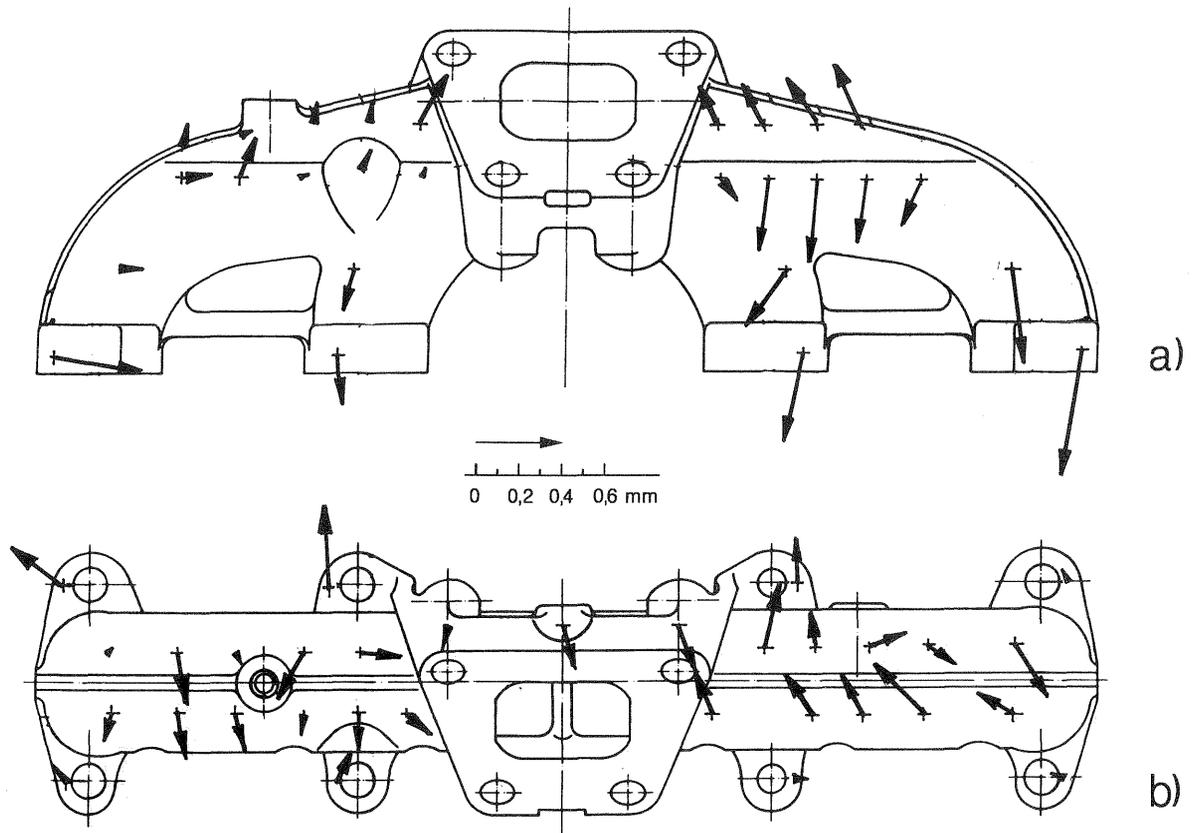


Bild 6: Deformationsvektoren in der Vorderansicht (a) und in der Aufsicht (b) des Abgaskrümmers nach thermischer Belastung

## 7. Literatur

- /1/ Schewe, H.: Automatische photogrammetrische Karosserie-Vermessung. Photogrammetrie und Fernerkundung, BuL 56, Heft 1, 16 - 24, 1988.
- /2/ Wester-Ebbinghaus, W.; Wezel, U.: Photogrammetric Deformation Measurement of Crash Vehicles. SAE-Paper 860 207, 183 - 190, 1986.
- /3/ Bruhn, H.; Höchtl, W.: Berührungslose Vermessung von Crash-Fahrzeugen mittels Photogrammetrie. VDI-Berichte Nr. 632, 347 - 363, 1987.
- /4/ Becker, C.J.: Ermittlung von Oberflächentemperaturen und Ermittlung des bleibenden Verzuges an einem Abgaskrümmers. Diplomarbeit, Fachhochschule Lippe, 1987, nicht veröffentlicht.
- /5/ Kotowski, R.: Zur Réseaukorrektur von systematischen Bildfehlern. Bildmessung und Luftbildwesen, 52, 96 - 101, 1984.

- /6/ Hinsken, L.: Algorithmen zur Beschaffung von Näherungswerten für die Orientierung von beliebig im Raum angeordneten Strahlenbündeln.  
Deut. Geod. Kommission, Reihe C, Heft 333, 1987.
- /7/ Wester-Ebbinghaus, W.: Zur Verfahrensentwicklung in der Nahbereichsphotogrammetrie.  
Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1981.
- /8/ Wester-Ebbinghaus, W.: Bündeltriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen.  
Zeitschr. für Vermessungswesen, 110, 101 - 111, 1985.
- /9/ Hinsken, L.: MOR-S: Ein Anwendungsbeispiel für die Sparse-Technik in einem photogrammetrisch-geodätischen Netzausgleichungsprogramm.  
Zeitschr. f. Vermessungswesen, 110, 416 - 424, 1985.
- /10/ Pelzer, H.: Zur Analyse geodätischer Deformationsmessungen.  
Deut. Geod. Kommission, Reihe C, Nr. 164, 1971.
- /11/ Pelzer, H.: Neuere Ergebnisse der statistischen Analyse von Deformationsmessungen.  
Arch. Int. Congr. Surv., 14th, 1974.
- /12/ van Mierlo, J.: A testing procedure for analysing geodetic deformation measurements in: L. Hallermann (Hrsg.), Beiträge zum II. Internationalen Symposium über Deformationsmessungen mit geodätischen Methoden: Bonn 1978, Wittwer, Stuttgart, 321 - 353, 1981.
- /13/ Koch, K. R.: Durch Hypothesentests aufzudeckende Deformationen.  
Allgem. Vermessungs-Nachrichten, 91, 269 - 276, 1984.