

# Extraktion und Verarbeitung von 3D-Geometriedaten mittels Bildsensorik für unterschiedliche Meßvolumina

## 1 Einleitung

Die dreidimensionale Vermessung von Werkstücken oder anderen Objekten unserer Umwelt ist eine Aufgabenstellung mit wachsender Bedeutung.

Ein wesentliches Einsatzfeld sind Meßaufgaben zur Gütekontrolle und Produktionsüberwachung, wobei die Palette der Produkte von Schiffsrümpfen über Autokarosserien bis zu mikrotechnischen 3D-Feinstrukturen im Mikrometer- oder Nanometerbereich reichen.

In gleicher Weise erfordert das „Rapid Prototyping“, d. h. die Überführung von frei geformten Modellen in CAD/CAM-Daten, die exakte Ermittlung der dreidimensionalen Geometrien.

Die vorliegende Darstellung beginnt mit einer kurzen Übersicht zu den Aktivitäten des Zentrums für Bild- und Signalverarbeitung auf diesem Themengebiet. Eine Betrachtung der wesentlichen Verarbeitungsstufen von 3D-Punktwolken führt anschließend in den Schwerpunkt des Artikels, die Berechnung von Regelgeometrien. Unterschiedliche mathematischen Ansätze werden dargestellt und bewertet. Abschließend werden Anwendungen wie Vermessung, Klassifikation und Segmentierung von 3D-Punktwolken diskutiert.

## 2 Aktivitäten des Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung auf dem Sektor der 3D-Bildverarbeitung

Das Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung arbeitet seit reichlich zwei Jahren verstärkt auf dem Gebiet Erfassung und Verarbeitung von 3D-Daten im Verbund mit der TU Ilmenau und vorrangig Thüringer Unternehmen (Tabelle 1).

Projekt	Ziele
<b>3D-Vision</b>	Berührungsloses Vermessen von 2D- und 3D-Objekten im Mikrobereich (Mikroelektronik, mikrosystemtechnische Komponenten), Stereoauswertung von REM-Bildern [1]
<b>NMPS</b>	3D-Nano-Meß- und -positioniersysteme, Tastschnitt- und 3D-Meßsysteme mit Auflösungen und Genauigkeiten bis in den unteren Nanometerbereich hinein, Meßwertverarbeitung
<b>IMSy</b>	Entwicklung von 3D-Digitalisierverfahren bei mittleren Meßvolumina, Algorithmenentwicklung zur Verarbeitung von 3D-Punktwolken [2]

Tabelle 1: Überblick zu den aktuellen 3D-Projekten im ZBS

Innerhalb der verschiedenen 3D-Projekte konnten die folgenden Arbeiten abgeschlossen werden:

### Digitalisierverfahren

- Linienprojektion mit Graucodedemodulation
- Phasenshiftverfahren mit Graucodedemodulation
- Stereobildauswertung REM (Einmeßverfahren, 3D-Punktgewinnung)
- Rekonstruktion von 3D-Kurven direkt aus 2D-Videobildern

## Punktwolkenvorverarbeitung

- Interpolation von 3D-Punktwolken
- Glättung von 3D-Punktwolken

## Weiterverarbeitung von Punktwolken

- Implementation einer Oberfläche für ein Tastschnittgerät
- Berechnung von Rauheitsparametern aus Tastschnitten
- Segmentierung von Regelgeometrien durch adaptive Ausgleichsrechnung
- Approximation von Regelgeometrien

## Sonstiges

- 3D-Punktwolken-Visualisierungs- und Experimentiertool
- Konzeption für 3D-Nanomeßsysteme

## 3 Verarbeitung von 3D-Punktwolken

Der Prozeß, von einem 3D-Objekt zu einer Freiform- bzw. regelgeometrischen Beschreibung zu gelangen, erweist sich als äußerst komplex. Anhand der in Abb. 1 dargestellten Verarbeitungskette lassen sich einige wesentliche Aspekte skizzieren [3].

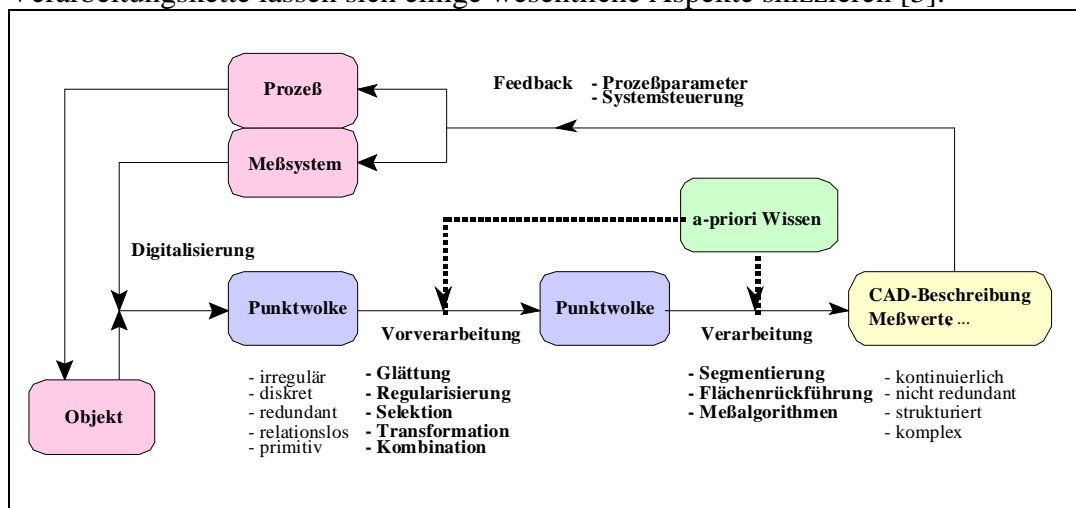


Abb. 1: Verarbeitung von 3D-Punktwolken

In einem ersten Schritt muß das 3D-Objekt digitalisiert werden. Die Digitalisierung kann dabei entweder mechanisch mit einem Tastsystem oder optisch mit Laserscan-, Fotogrammetrie-, Topometrie- oder anderen optischen Verfahren erfolgen. Die entstandene Rohpunktwolke zeichnet sich in Abhängigkeit vom Digitalisiersystem durch eine mehr oder minder hohe Punktzahl und die in Abb. 1 links dargestellten Eigenschaften aus.

Durch die Vorverarbeitung (Low-Level-Verarbeitung) sollen die Bedingungen, die für eine Weiterverarbeitung notwendig sind, geschaffen werden. Das Ergebnis der Vorverarbeitung ist eine im Sinne der eigentlichen Auswertung (High-Level-Verarbeitung) verbesserte Punktwolke.

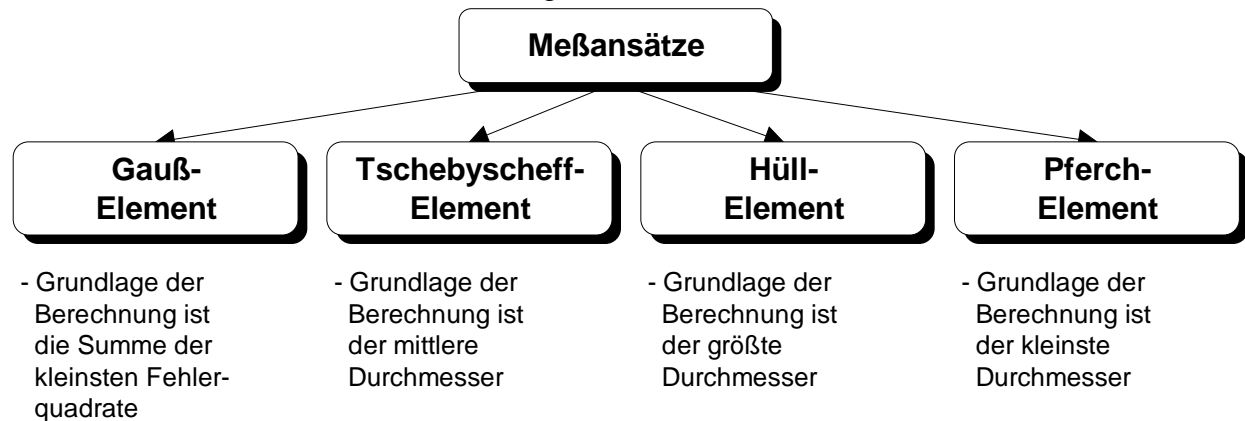
Über eine geeignete Segmentierung werden in der Folge Zielstellungen wie Flächenrückführung, Form- und Lageprüfung nach DIN/ISO 1101, Vermessung und Fräsbahnengenerierung verfolgt.

Die Zwischen- und Endergebnisse der Verarbeitung sollen zugleich als Feedback für den Meßprozeß dienen. Anhand der Ergebnisse von Verarbeitungsschritten können dann Prozeßparameter mit dem Ziel der Erhöhung der Robustheit des Verfahrens oder der Qualität der Meßergebnisse beeinflusst werden. Durch rückgeführte Meßergebnisse kann der Digitalisierer gesteuert oder die Signalisierung verändert werden. Bereiche, die durch den Auswerteprozess als kritische erkannt worden sind (schlechte Remissionsverhältnisse, starke räumliche Gradienten usw.), können dann „intelligent“ beleuchtet oder feiner digitalisiert werden.

Darüber hinaus ist die Nutzung von a-priori-Wissens, das zum Objekt und/oder zum Meßsystem vorliegen kann, von entscheidender Bedeutung. Die Verarbeitung kann damit einfacher und schneller erfolgen oder sie wird überhaupt erst dadurch ermöglicht.

#### 4 Ansätze zur Berechnung von Regelgeometrien aus 3D-Punktwolken

Ein wesentlicher Aufgabe bei der Verarbeitung von Punktwolken ist die Berechnung der Parameter von Regelgeometrien (Ebene, Kugel, Ellipsoid, Kegel, Zylinder usw.). Die verschiedenen Ansätze lassen sich wie folgt einteilen:



Die Berechnung mittels Tschebyscheff-, Hüll- oder Pferch-Element dient beispielsweise der funktionstechnischen Auswertung der Passung von Bohrung und Welle und ist für das Ermitteln der Regelgeometrieparameter uninteressant. Hierfür werden vorwiegend die Berechnungen nach Gauß verwendet. Wird von der zu minimierenden Zielfunktion ausgegangen, so ist eine Einteilung in lineare und nichtlineare Ausgleichsprobleme möglich.

##### 4.1 Nichtlineare Ausgleichsrechnung

Ausgangspunkt zur Berechnung der Regelgeometrieparameter bildet die Beschreibungsgleichung der gesuchten Geometrie. Für komplexe Regelgeometrien (Kegel, Ellipsoid, ...) ergeben sich nichtlineare Beschreibungsgleichungen. Die optimalen Parameter für die Regelgeometrie können über die Minimierung der Fehlerquadratsumme bestimmt werden.

Zur Lösung nichtlinearer Gleichungen werden iterative numerische Verfahren eingesetzt. Dazu gehören das Newton-Verfahren, das Polytopverfahren, die Evolutionsstrategie und viele andere [4]. Wesentlich bei allen nichtlinearen Lösungsverfahren ist die geeignete Wahl von Startwerten. Bei ungünstiger Wahl der Startwerte können die Verfahren das globale Minimum gar nicht erreichen oder erreichen es erst nach sehr langer Laufzeit.

**Vorteile:**

- liefert sehr genaue Geometrieparameter
- arbeitet unter „Zwang“, d. h. es werden immer die speziellen Formparameter errechnet, die die Zielfunktion für die gesuchte Regelgeometrie minimieren

**Nachteile:**

- geeignete Startwerte erforderlich
- bei großer Anzahl an 3D-Punkten werden die Verfahren sehr langsam (Iteration)
- führt nicht immer zum globalen Minimum (Konvergenzprobleme)

##### 4.2 Lineare Ausgleichsrechnung

###### 4.2.1 Linearer Quadrikenausgleich

Ein linearer Ausgleich wird für die allgemeine Gleichung 2. Grades [5] in  $x$ ,  $y$  und  $z$  möglich. Die Ausgleichsrechnung wird ohne Kenntnis des vorliegenden Flächentyps durchgeführt. Zu bestimmen sind die Koeffizienten einer ausgleichenden „best-fit“-Quadrik (Fläche 2. Ordnung). Sie bestimmen den Typ der Fläche (Ellipsoid, Hyperboloid, Paraboloid, Zylinder, Kegel).

Die Quadrik wird durch

$$a_1x^2 + a_2y^2 + a_3z^2 + 2a_4xy + 2a_5xz + 2a_6yz + 2a_7x + 2a_8y + 2a_9z + a_{10} = 0 \quad (1)$$

oder kompakter unter Verwendung des Matrizenkalküls durch

$$\mathbf{X}^T \mathbf{B} \mathbf{X} + 2\mathbf{b}^T \mathbf{X} + b_0 = 0, \text{ mit } \mathbf{X} \in \mathbf{R}^3 \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} a_1 & a_4 & a_5 \\ a_4 & a_2 & a_6 \\ a_5 & a_6 & a_3 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} a_7 \\ a_8 \\ a_9 \end{pmatrix}, \quad b_0 = a_{10}$$

beschrieben. Zur Berechnung der Parameter  $\mathbf{a}$  wird die in [6] erläuterte homogene Ausgleichsrechnung verwendet. Die entstandene Quadrik muß mit diesem Ziel durch eine Hauptachsentransformation auf die Normalform

$$\lambda_1x^2 + \lambda_2y^2 + \lambda_3z^2 + d = 0 \quad (3) \quad \text{bzglw.} \quad \lambda_1x^2 + \lambda_2y^2 + 2mz = 0 \quad (4)$$

gebracht werden [7]. Ist der Rang der Matrix  $\mathbf{B}$  gleich drei, so handelt es sich um eine Mittelpunktsquadrik. Für diesen Fall wird die Normalform (3) angewendet. In allen anderen Fällen ist die Normalform (4) zu verwenden. Die errechneten Eigenvektoren geben die Orientierung des neuen Koordinatensystems an.

Name der Fläche	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\mathbf{d}$	$\mathbf{m}$	Gleichung
Ellipsoid	>0	>0	>0	<0	---	$x^2/a^2 + y^2/b^2 + z^2/c^2 = 1$
zweisch. Hyperboloid	>0	>0	<0	>0	---	$x^2/a^2 + y^2/b^2 - z^2/c^2 = -1$
einsch. Hyperboloid	>0	>0	<0	<0	---	$x^2/a^2 + y^2/b^2 - z^2/c^2 = 1$
Kegel	>0	>0	<0	=0	---	$x^2/a^2 + y^2/b^2 - z^2/c^2 = 0$
ellipt. Zylinder	>0	>0	=0	<0	---	$x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$

**Tabelle 2:** ausgewählte Typen der 3D-Quadrik

Eine Auswahl der wichtigsten Flächen ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Koeffizienten  $\lambda_i$ ,  $m$  bzw.  $d$  bestimmen die Art der 3D-Quadrik.

- Vorteile:**
- keine Startwerte erforderlich
  - Lösung ohne Iteration (kurze Laufzeiten)
  - Klassifikation der Punktwolke möglich

- Nachteile:**
- arbeitet nicht unter „Zwang“, d. h. es werden allgemeine Parameter errechnet, damit die Zielfunktion für die Quadrik (nicht für die gesuchte Regelgeometrie) minimal wird  $\Rightarrow$  die Berechnung der Parameter einer speziellen Geometrie macht nur Sinn, wenn die gegebenen 3D-Punkte diese Geometrie auch repräsentieren
  - zu wenig repräsentative Punkte können wegen den vielen Freiheitsgraden zu ungenauen Ergebnissen führen [8]

#### 4.2.2 Spezielle lineare Ausgleichsrechnung

Nach Betrachtung des allgemeinen Falles der Fläche 2. Ordnung soll an dieser Stelle auf spezielle lineare Ausgleichsprobleme eingegangen werden. Einfache Regelgeometrien (Gerade, Ebene, Kugel) lassen sich auch direkt über den linearen Ansatz lösen. Dies soll kurz am Beispiel der Kugel demonstriert werden.

Eine Kugel im Raum wird durch ihren Mittelpunkt  $\mathbf{m}$  und den Radius  $r$  charakterisiert. Die Gleichung der Kugel

$$(x - m_x)^2 + (y - m_y)^2 + (z - m_z)^2 = r^2 \quad (5)$$

führt durch Ausmultiplizieren auf die Form:

$$-2xm_x - 2ym_y - 2zm_z + m_x^2 + m_y^2 + m_z^2 - r^2 = -(x^2 + y^2 + z^2) \quad (6)$$

Die Kugelparameter werden mittels inhomogener Ausgleichsrechnung gemäß [6] ermittelt.

- Vorteile:**
- keine Startwerte erforderlich
  - Lösung ohne Iteration (kurze Laufzeiten)
  - arbeitet unter „Zwang“, d. h. es werden immer die speziellen Formparameter errechnet, damit die Zielfunktion für die gesuchte Regelgeometrie minimal wird

- Nachteile:**
- nur für einfache Regelgeometrien zu verwenden, da komplexere Regelgeometrien (Kegel, Zylinder) durch Umformung in die lineare Form zur Quadrikgleichung führen und damit ein Ausgleich für diese Regelgeometrie nicht mehr erzwungen werden kann.

## 5 Anwendungsmöglichkeiten

### 5.1 Vermessen von Punktwolken

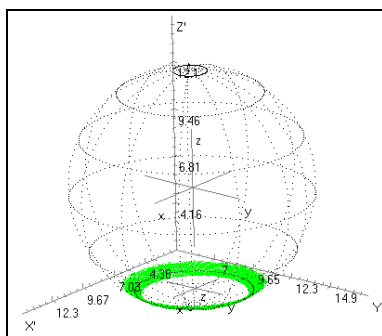


Abb. 2: Kugelausgleich

Das wesentliche Einsatzfeld der vorgestellten Algorithmen ist das Vermessen (Bestimmen der Regelgeometrieparameter) von 3D-Punktwolken. In Abb. 2 sind die 3D-Punkte eines Kugelsegmentes (dichte Punktwolke) gegeben. Gesucht sind die Parameter der approximierenden Kugel. Mittels spezieller linearer Ausgleichsrechnung können die Geometrieparameter berechnet werden. Die berechnete Geometrie wurde in der Abbildung als Gitternetzmodell eingezeichnet.

### 5.2 Klassifikation von Punktwolken

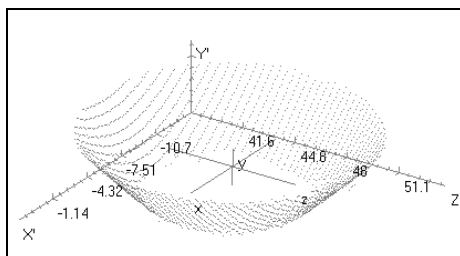


Abb. 3: Segment eines Hyperboloid

Die Punkte als Teil eines einschaligen Hyperboloids klassifiziert werden.

Der vorgestellte lineare Quadrikenansatz ist nicht nur zur Bestimmung der Geometrieparameter geeignet, sondern gibt auch Auskunft über die Art der Regelgeometrie, welche die 3D-Punkte am besten charakterisiert (Tab. 2). Die Abb. 3 zeigt eine zu klassifizierende 3D-Punktwolke. Vom visuellen Eindruck her läßt sich nicht mit Bestimmtheit sagen, ob es sich bei den 3D-Punkten um einen Teil eines Ellipsoids, eines Kegels oder eines Hyperboloids handelt. Mittels Quadrikenausgleich konnten

### 5.3 Segmentierung von Punktwolken

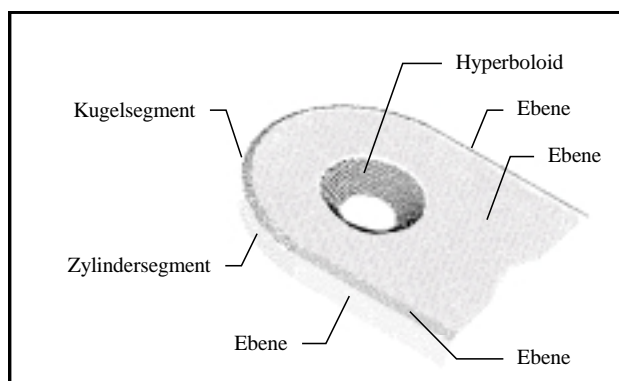


Abb. 4: segmentiertes Werkstück

Bei der bisherigen Herangehensweise wurde davon ausgegangen, daß alle gegebenen Punkte zur gesuchten Regelgeometrie gehören. Weichen einige Punkte von der Regelgeometrie ab, so werden die Parameter der Geometrie verfälscht.

Um trotz der schlechten Voraussetzungen zu guten Ergebnissen zu gelangen, dürfen nur die für die Regelgeometrie relevanten Punkte zur Berechnung der Geometrieparameter verwendet werden. Eine solche Segmentierung

der Punkte kann mittels adaptiver Gewichtsberechnung [9] erfolgen. Die Abb. 4 zeigt die Ergebnisse einer solchen Segmentierung.

## 6 Zusammenfassung

Die Möglichkeiten der Weiterverarbeitung von 3D-Punktwolken wurde beschrieben. Speziell wurde auf die Berechnung von Regelgeometrieparametern aus den 3D-Punkten eingegangen. Dabei wurde zwischen linearen und nichtlinearen Ansätzen unterschieden. Abschließend konnten die Anwendungsgebiete der Verfahren erläutert werden.

In der Zukunft muß versucht werden, eine automatische Segmentierung von Regelgeometrie-punkten innerhalb einer komplexen 3D-Punktwolke zu entwickeln.

Die Arbeiten wurden in Rahmen der Thematik „Electronic Eye“ vom BMBF gefördert.

### Literaturverzeichnis

- [1] Franke, K.-H., Gaßmann, F., Graf, A., Kollhoff, D., Machleidt, T.: Algorithmenentwicklung für 2D- und 3D-Meßsysteme zur Untersuchung von Mini- und Mikrostrukturen, 1. und 2. Zwischenbericht, Zeitraum Okt. 1995 – April 1997, Förderkennzeichen 16SV141/7, Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V. Ilmenau
- [2] Franke, K.-H., Gaßmann, F., Machleidt, T.: Entwicklung von flexiblen 3D-Industriemeßsystemen mit CCD-Kameras, Teilvorhaben 3D-Sehen, 1. und 2. Zwischenbericht, Zeitraum Okt. 1994 bis Dez. 1996, Förderkennzeichen 01M3020C9, Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V. Ilmenau
- [3] Kollhoff, D., Gaßmann, F., Machleidt, T., Franke, K.-H.: „Verfahren zur Bearbeitung von 3D-Daten“, Beitrag zum Anwendersymposium "Aktuelle Entwicklungen und industrieller Einsatz der Bildverarbeitung", MIT GmbH, Aachen, 5./6. Sept. 1996
- [4] Richter, C.: „Optimierungsverfahren und Pascal-Programme“, Akademie-Verlag-Berlin
- [5] Bronstein, S.: „Taschenbuch der Mathematik“, Teubner Verlag, 1989
- [6] Leditzky, T.: „Entwicklung und Implementierung numerischer Algorithmen zur Extraktion von 3D-Formelementen aus 3D-Meßsätzen von industriellen Objekten“, Diplomarbeit, Universität Jena, Technikwissenschaftliches Institut, 1994
- [7] Drixler, E.: „Analyse der Form und Lage von Objekten im Raum“, Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission München 1993
- [8] Scharm, H.: „Ausgleichsquadranten und Streifenprojektionsverfahren“, Diplomarbeit, TU Dresden, 1995
- [9] Voss, K., Süße, H.: „Adaptive Ausgleichsrechnung und Ausreißerproblematik für die digitale Bildverarbeitung“, Mustererkennung 1993, 15. DAGM-Symposium in Lübeck

### Autoren:

Privatdoz. Dr.-Ing. habil. Karl-Heinz Franke  
Technische Universität Ilmenau  
Fak. Für Informatik und Automatisierung  
FG Graphische Datenverarbeitung  
Tel.: +49-3677-691205, Fax:+49-3677-691208  
email: Karl-Heinz.Franke@Prakinf.TU-Ilmenau.DE

Dipl.-Ing. Frank Gaßmann  
Dipl.-Ing. Dietmar Kollhoff  
Dipl.-Ing. Torsten Machleidt  
Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V.  
Ehrenbergstraße 11, D-98693 Ilmenau  
Tel.: +49-3677-668-485...489, Fax: +49-3677-668-464