

Trackingsysteme für handgeführte 3D-Scanner – mechanisch, optisch, interferometrisch

MARTIN SCHLÜTER¹

Zusammenfassung: Scannende 3D-Messsysteme bieten einen direkten und schnellen Weg zur Aufzeichnung von 3D-Punktwolken und haben sich bereits in den ersten Jahren ihrer Produkteinführung als wertvolle Erweiterung der instrumentellen Palette des Vermessungsingenieurs bewährt. Hier soll das Potential der aktuell am Markt verfügbaren Nahbereichssysteme für Aufgaben der Industrievermessung erörtert werden. Mobile Gerätesysteme eröffnen sowohl neue Perspektiven für Dienstleistungen wie Flächenrückführung (Reverse Engineering) und Formvergleich gegen CAD-Flächen als auch alternative Strategien für klassische Aufgaben der Positionierung und Ausrichtung in der Fertigungsmesstechnik. Hybride Ansätze erschließen große Messvolumina und schwierige Objektgeometrien in den Genauigkeitsklassen um einen Zehntelmillimeter.

1 Einführung

Mit der Fähigkeit zur schnellen und direkten Aufzeichnung von 3D-Punktwolken haben sich scannende 3D-Messsysteme bereits in den ersten Jahren ihrer Produkteinführung als wertvolle Erweiterung der instrumentellen Palette des Vermessungsingenieurs bewährt. So bietet das i3mainz (Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik, Fachhochschule Mainz) z.Zt. ergänzend zu den „klassischen“ photogrammetrischen Techniken einen 3D Scanservice mit seinen Scannern, einem *Mensi Soisic* (Reichweite 2 bis 25m) und einem *Leica Cyrax 2500* (bis zu 100m), an. Der Einstieg in die scannende Erfassung dreidimensionaler Welten vollzog sich am i3mainz parallel zur hardwaretechnischen Entwicklung: Zu Beginn standen Anwendungen des *Airborne Laserscanning* im Zentrum des Interesses (MÜLLER, 2000), in der Folge kamen vermehrt Anwendungen im Nahbereich hinzu, geprägt durch zahlreiche enge Kooperation mit Archäologen und Historikern (BÖHLER et al., 2001).

Die Anzahl am Markt verfügbarer Scanner nimmt derzeit stark zu, vgl. Tab. 1. Natürlich reichen die aufgeführten Herstellerangaben für eine umfassende Klassifizierung der einzelnen Messsysteme nicht aus. Hierzu sei (I3MAINZ, 2002) empfohlen, die vollständig verlinkte Liste wird seitens i3mainz laufend aktualisiert, verweist ergänzend auf einschlägige Softwareanbieter und nimmt in zunehmenden Maße auch Links auf Systemanwender auf. Wichtige Kriterien für die Systemauswahl sind neben der Reichweite: Scanbereich, Einzelpunktgenauigkeit, Auflösung, Scangeschwindigkeit, Stromverbrauch (Akku-/Batteriebetrieb), Handhabbarkeit (Gewicht!), Softwarefeatures, Systemoffenheit usw.

¹ Prof. Dr.-Ing. Martin Schlüter, Fachhochschule Mainz – FR Geoinformatik und Vermessung, Holzstraße 36, 55116 Mainz, E-mail: schlueter@fh-mainz.de

Hersteller	Scanner	Reichweite [m]	Messprinzip:	
			Triangu- lation	Laufzeit- messung
3D Digital Corporation	<i>Model 100, 200, 300</i>	1	<input checked="" type="checkbox"/>	
3Dmetrics	<i>3DFlash!</i>	0.1	<input checked="" type="checkbox"/>	
3D Scanners, Nvision	<i>ModelMaker</i>	0.2	<input checked="" type="checkbox"/>	
ABW GmbH	<i>Kombi-640</i>	1.5	<input checked="" type="checkbox"/>	
Arius3D	<i>Arius3D</i>	6x2x1,4	<input checked="" type="checkbox"/>	
Breuckmann GmbH	<i>optoTOP-HE</i>	3 x 2	<input checked="" type="checkbox"/>	
Cyber F/X	<i>diverse</i>	ca. 1	<input checked="" type="checkbox"/>	
Cyberware	<i>Diverse</i>	ca. 1	<input checked="" type="checkbox"/>	
Digibotics	<i>Digibot</i>	1.8	<input checked="" type="checkbox"/>	
DLR - German Aerospace Center	<i>Laser Range Scanner</i>	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	
Genex	<i>Rainbow 3D</i>	0.7	<input checked="" type="checkbox"/>	
GOM mbH	<i>ATOS</i>	1.6	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hymarc	<i>Hyscan 45C</i>	0.1	<input checked="" type="checkbox"/>	
INTECU	<i>Cylan</i>	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	
INO	<i>MapScan</i>	0.2	<input checked="" type="checkbox"/>	
Intelligent Automation	<i>4DI</i>	ca. 1	<input checked="" type="checkbox"/>	
Kréon	<i>KLS</i>	0.2	<input checked="" type="checkbox"/>	
Laser Design	<i>diverse</i>	1	<input checked="" type="checkbox"/>	
MEL Mikroelektronik GmbH	<i>M2D</i>	1.2	<input checked="" type="checkbox"/>	
Metris	<i>Metris LC</i>	0,05	<input checked="" type="checkbox"/>	
micromeasure GmbH	<i>diverse</i>	0.8	<input checked="" type="checkbox"/>	
Minolta	<i>VI</i>	1.2	<input checked="" type="checkbox"/>	
Nextec	<i>Hawk</i>	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	
Perceptron	<i>Contour Probe Sensor</i>	0.1	<input checked="" type="checkbox"/>	
Polhemus	<i>FastScan</i>	0.8	<input checked="" type="checkbox"/>	
Roland DGA	<i>Picza</i>	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	
SCAN technology	<i>diverse</i>	0.6	<input checked="" type="checkbox"/>	
Shape Grabber	<i>diverse</i>	0.7	<input checked="" type="checkbox"/>	
Steinbichler Optotechnik	<i>COMET</i>	0.8	<input checked="" type="checkbox"/>	
TC2	<i>Body Scanner</i>	0.8	<input checked="" type="checkbox"/>	
Vitronic	<i>Vitus</i>	ca. 1	<input checked="" type="checkbox"/>	
3rdTech	<i>DeltaSphere</i>	12		<input checked="" type="checkbox"/>
Callidus Precision Systems	<i>Callidus</i>	80		<input checked="" type="checkbox"/>
Cyra Technologies	<i>Cyrax 2500</i>	50-100		<input checked="" type="checkbox"/>
Mensi	<i>GS 100</i>	100		<input checked="" type="checkbox"/>
Mensi	<i>S-Series</i>	25	<input checked="" type="checkbox"/>	
MetricVision	<i>MV 200</i>	60		<input checked="" type="checkbox"/>
Optech	<i>ILRIS-3D</i>	800		<input checked="" type="checkbox"/>
Riegl Laser Measurement Systems	<i>LMS-Z210, LMS-Z420</i>	450		<input checked="" type="checkbox"/>
Zoller+Fröhlich GmbH	<i>Imager 5003</i>	55		<input checked="" type="checkbox"/>

Tab. 1: Übersicht verfügbarer Scanner, gruppiert nach der maximalen Reichweite, (I3MAINZ, 2002).
Oben: Nahbereichsscanner und Scanköpfe mit Reichweiten < 10, unten: Reichweiten ≥ 10m.

Grundsätzlich eröffnen scannende Messsysteme den Zugang zu innovativen Tätigkeitsfeldern in der Industriemesstechnik: Neben der Möglichkeit zur flächenhaften 3D-Messwerterfassung im Nahbereich mit der Zielrichtung des Formvergleichs von „Ist“-Daten gegen CAD-Daten, insbesondere für Freiformflächen, ist hier die Flächenrückführung (wie z.B. die Erzeugung von CAD-Modellen aus Design- oder Urmodellen, die Rekonstruktion von manuell vorgenommenen Änderungen am Werkzeug, das Erstellen von CAD-Daten für nicht ausreichend dokumentierte Werkzeuge) im Komplex *Reverse Engineering* zu sehen. Typischerweise kann der Vermessungsingenieur derartige Dienstleistungsbereiche für sich erschließen, wenn seine Kernkompetenzen nachgefragt werden, also der Einsatz präziser und insbesondere *mobiler* Messsysteme. Dies ist i.d.R. dann der Fall, wenn das Messvolumen des Messobjekts die Aufnahme-fähigkeit der verfügbaren (stationären) Koordinatenmessmaschinen übersteigt oder der Transport des Messobjekts zur (stationären) Koordinatenmessmaschine problematisch (z.B. wegen hohem Gewicht) oder unerwünscht (z.B. wegen dem damit verbundenen Zeitverlust) ist. Von den in Tab.1 dargestellten Systemen mit entsprechend großer Reichweite $\geq 10m$ kann lediglich das Ausnahmesystem *MV 200* von *MetricVision* den Anforderungen an Genauigkeit deutlich im Submillimeterbereich sowie an ein adäquates Messvolumen gerecht werden. Systeme wie der *Mensi Soisic* Scanner können zur Dokumentation von Betriebsanlagen mit Genauigkeitsforderungen im Bereich weniger Millimeter herangezogen werden. Darüber hinaus scheinen sich zur Zeit eine Reihe von Hybridlösungen am Markt zu etablieren, welche sich aus einem Nahbereichsscankopf und einem geeignetem Trackingsystem zusammensetzen. Die entsprechenden Lösungsansätze sollen im Folgenden diskutiert werden.

2 Handgeführte Nahbereichsscanner und Online-Positionierung

2.1 Anforderungen an den Scankopf

Der Scankopf sollte eine möglichst sichere Koordinatenerfassung für alle typischen Oberflächenarten in der Industrieumgebung erlauben. Handgeführte 3D-Scanner zeichnen sich in diesem Zusammenhang durch mehrere vorteilhafte Charakteristika aus. Diese sind zum einen gerätetechnischer Natur. So erlaubt die meist punktförmige Laserprojektion (eher selten: die direkte linienförmige Aufweitung des Strahls z.B. durch Zylinderlinsen) direkte automatisierbare Einflussnahme auf Parameter wie Fokussierung, Intensitätsregelung, etc. des Laserstrahls, vgl. auch Abb. 1. Damit lassen sich nach dem Prinzip der Lasertriangulation auch für relativ dunkle Oberflächen sowie für Oberflächen mit einem hohen Anteil an spiegelnder Reflexion flächendeckend 3D-Koordinaten gewinnen. Reichen diese gerätetechnischen Vorkeh-

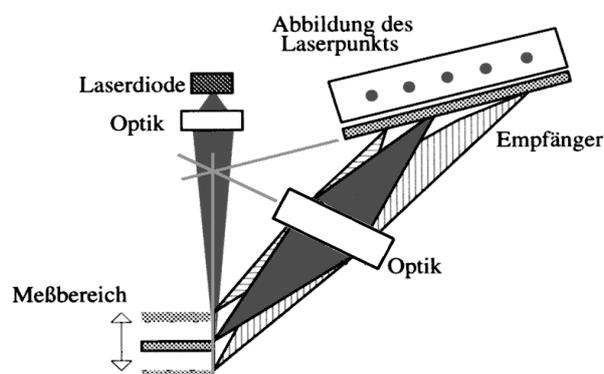


Abb. 1: Prinzip der Lasertriangulation nach SCHLEMMER (1996)

rungen im Einzelfall nicht aus, greift möglicherweise eine systemimmanente Charakteristik: Durch die Handführung beim Scannen in Kombination mit den Möglichkeiten zur Visualisierung der aufgezeichneten 3D-Punktwolken in Echtzeit können Datenlücken nicht nur sofort während der Messung erkannt werden, sondern meist auch sofort durch wiederholtes Scannen mit verbesserter Strahleinfallrichtung bezüglich der Objektoberfläche durch eine interaktiv variierte Ausrichtung des Sensors gefüllt werden.

Konsequenterweise werden wir im Folgenden wichtige nicht-handgeführte Scannersysteme (wie z.B. die Streifen- und Texturprojektionssysteme) mit typischen Reichweiten $> 0,3m$ nicht in die Betrachtung miteinbeziehen. Hier sei auf den Beitrag von ANDRÄ & PEIPE (2002) in diesem Arbeitskreis verwiesen.

2.2 Messarmgeführte Systeme

Für das Arbeiten in geometrisch komplexen Umgebungen erscheint ein kleiner und flexibel ausrichtbarer Scankopf attraktiv, um interaktiv der Problematik der verdeckten Objektbereiche begegnen zu können. Während herkömmliche vermessungstechnische Gerätesysteme (Präzisionstachymeter, Theodolitmesssystem, Lasertracker, 3D-Scanner) weitgehend die direkte Sichtbarkeit aller relevanten Oberflächen von relativ wenigen Standpunkten aus voraussetzen, erlaubt der 3D-Messarm (als Träger eines Lasertriangulations-scanners) innerhalb seines Messradius auch die Erfassung geometrisch schwer zugänglicher Objektbereiche, vgl. Abb. 2. Damit ist er auch als Ergänzung eines 3D-Scanners für Detailscans prädestiniert. Am Markt sind zur Zeit 5- bis 7-achsige Messarme verfügbar, vgl. Tab. 2. Für eine mittlere gestreckte Armlänge von $1,2m$ (= spärlicher Durchmesser des Messbereichs von $2,4m$) werden seitens der Messarmhersteller Genauigkeiten bis etwa $\pm 0,05mm$ (2σ) für den gesamten Messbereich angegeben. Für das Gesamtsystem aus Messarm und Scankopf kann dann eine Genauigkeit von etwa $\pm 0,1mm$ resultieren.

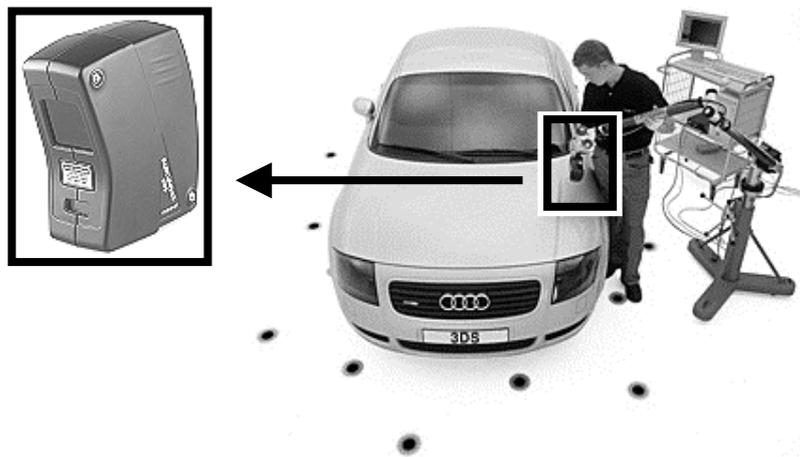


Abb. 2: Messkopf *3dScanners Modelmaker X* auf FARO Messarm. © NVision, Inc.

Dem angenehm flexiblen Messprozedere steht die berechtigte Skepsis des Messingenieurs bezüglich des Messprinzips des offenen Polygonzugs beim Messarm gegenüber. Während z.B. bei einem photogrammetrischen Aufnahmesystem die Beziehung zwischen Bild- und Objektraum als Gerade (und damit relativ einfach und eindeutig) modelliert werden kann, können beim Messarm äußerst unterschiedliche Armstellungen (= unterschiedliche Kombi-

nationen an Winkelencoderablesungen) zur selben Position im Objektraum führen, vgl. auch (NEUHAUS, 2000). Eine Kalibrierung des Messarms ist damit erheblich aufwendiger als bei alternativen Messsystemen, da der komplette Bereich sämtlicher möglicher Armstellungen berücksichtigt werden sollte. Eine wirklich durchgreifende Selbstkalibrierung vor Ort ist also in der Regel ausgeschlossen, vielmehr wird man es bei einer Systemüberprüfung belassen.

Während am Markt schon länger etablierte Sensoren (wie z.B. von der Firma *Kréon*) inzwischen von unterschiedlichen Messarmanbietern zu Komplettsystemen ausgebaut wurden, ist bei neuen innovativen Laserscannern eine deutliche zeitliche Verzögerung zu beobachten: Aktuelle Sensoren wie beispielsweise von *Hymarc* oder *Metris* sind natürlich längst in stationäre Koordinatenmessmaschinen integriert (und können also auch getestet werden), ihre Integration an einen Messarm ist aber zur Zeit (Mitte 2002) noch nicht abgeschlossen.

Hersteller	Messbereich Spär. Durchmesser [m]	Systemaufbau:		Internet
		6 Achsen	7 Achsen	
Faro	1,2 bis 3,6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	www.faro.com
Garda S.r.l.	1,5 bis 3,2	<input checked="" type="checkbox"/>		www.garda-misure.com
Romer (France)	bis 3,0*	<input checked="" type="checkbox"/>		www.romer.fr
Romer Cimcore	1,2 bis 3,6*	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	www.romer.com
Zett Mess	1,2 bis 3,6	<input checked="" type="checkbox"/>		www.zettmess.com

Tab. 2: Übersicht zu Anbietern von 3D-Messarmen.
*Sonderlösungen mit zusätzlicher Verfahrsschiene.

2.3 Optisch getrackte Systeme

Die bei den Messarmen angesprochene Schwäche in puncto Kalibrierbarkeit vor Ort entfällt bei optisch getrackten handgeführten Laserscannern. Ein interessantes Beispiel für ein derartiges Messsystem ist der Laserscanner *Comet T-Scan* der Firma *Steinbichler Optotechnik*, Abb.3. Der Scankopf bietet eine automatische Punkt-zu-Punkt-Intensitätsregelung, erlaubt damit hohe Messgenauigkeit auf variierenden Oberflächen sowie ferner das automatische Erfassen sowohl von Kontur- als auch von Kontrastlinien. Das Trackingsystem bestimmt die



Abb. 3: Optisches Trackingsystem *Optotrak 3020* (links, © Northern Digital Inc.) und Gesamtsystem *Steinbichler Comet T-Scan* (rechts, © Steinbichler Optotechnik)

Position und Ausrichtung des Sensors in allen sechs Freiheitsgraden nach dem Prinzip des räumlichen Rückwärtseinschnitts. Dieses Prinzip liegt auch dem mobilen Koordinatenmesssystem *Metronor* (Bartelmess et al., 1997) zugrunde und mag dem Leser bereits vertraut sein.

Auch hier kann eine resultierende Objektgenauigkeit von etwa $\pm 0,1\text{mm}$ erzielt werden. Anders als beim Messarm ist das Messvolumen pro Instrumentenaufstellung hier nicht fix begrenzt, wobei aber mit wachsendem Abstand $> 3\text{m}$ vom Standpunkt des Trackingsystems die Gesamtgenauigkeit deutlich (quadratisch als Funktion des Abstands vom Sensor zur Basis) abfällt. Die Verhältnisse insgesamt sind daher wieder ähnlich wie bei den Messarmsystemen. Trotzdem drängt sich die Frage auf, ob sich das Messvolumen durch ein ergänzendes polares Tracking nicht entscheidend vergrößern ließe. Diesem Gedanken soll gegen Ende des nächsten Abschnitts in Form eines Ausblicks kurz nachgegangen werden.

2.4 Lasertracking und Scannen im Nahbereich

Die Frage nach dem Einsatz eines Laserscanners stellt sich bei scannenden Anwendungen in der industriellen Messtechnik zunächst für die Offline-Positionierung, also als zusätzliches Hilfsmittel beim Scannen von ausgedehnten Messobjekten mit mehreren Instrumentenaufstellungen. Grundsätzlich lassen sich die Punktwolken aus benachbarten Instrumentenaufstellungen über identische Teilflächen miteinander in ein globales Koordinatensystem überführen. Dieser Weg wird auch zunehmend verbessert in die einschlägigen Auswertesoftwarepakete integriert. Einfacher und zur Zeit weiter verbreitet ist jedoch der Weg über geometrische Targets: Aus 3D-Koordinaten auf einer kugelförmigen Oberfläche wird jeweils das Kugelzentrum bestimmt, die Koordinaten mehrerer Kugelzentren dienen als identische Punkte zur Berechnung der Transformationsparameter zwischen den Punktwolken insgesamt. Mit zunehmender Anzahl und zunehmendem Abstand der Instrumentenaufstellungen wird eine externe Bestimmung der Kugelmittelpunkte mit übergeordneter Genauigkeit immer dringlicher („vom Großen ins Kleine“ ...). Eine elegante Lösung dieser Aufgabe besteht in der Verwendung von Signaltargets, deren Durchmesser mit der Größe des kugelförmigen Reflektors eines Laserscanners übereinstimmt. Abb. 4 zeigt einen Ausschnitt aus einem Versuchsaufbau, die Kugelmittelpunkte wurden alternativ mit einem Präzisionstachymeter *Leica TDA 5005* und einem Lasertracker *Leica Smart 310* bestimmt (vgl. auch PORTEN 2001).

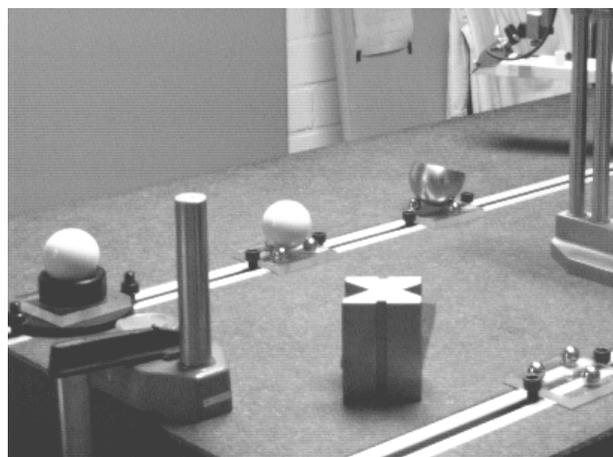


Abb. 4: Ausschnitt aus einem Versuchsaufbau im Labor für Sondervermessung der FH Mainz mit unterschiedlichen kugelförmigen Targets und Targethalterungen

Die messtechnische Industrie hat für derlei mobile Anwendungen das Potential der interferometrischen Lasertracker erkannt und aufgegriffen. Im Januar 2002 hat *Faro Inc.* die Übernahme des Trackerherstellers *SpatialMetrix Corporation (SMX)* abgeschlossen und inzwischen einen Lasertracker im Design der eigenen Produktlinie vorgestellt. Der Messarmhersteller *Romer (France)* hat es bei einer strategischen Partnerschaft mit *Automated Precision Inc. (API)* belassen und favorisiert mit dem *Orbital Tracker System* eine etwas andere Messstrategie als oben skizziert: Hier wird mit dem *API*-Lasertracker die Position und Ausrichtung des Messarminstrumentenfußes bestimmt: Nach dem Prinzip der Zwangszentrierung kann der Messarm zwischenzeitlich durch ein mit drei magnetischen Reflektorhaltern ausgestattetes geometrisches Referenzbauteil ausgetauscht werden.

Abschließend stellt sich die Frage, ob die Kombination von Lasertracker und Scansystem sich auch in Zukunft auf die Offline-Kooperation beschränken kann oder ob es einen Markt für online kooperierende Systeme gibt. Ein technischer Lösungsansatz könnte z.B. vom Grundgedanken des optisch getrackten Scanners ausgehen und die Positionsbestimmung durch eine (auf interferometrischer Distanzmessung aufbauender) Polarmessung maßgeblich stützen. Grundsätzlich gestatten die heute verfügbaren Lasertracker, Koordinatenmessungen mit einer den technischen Spezifikationen des *Optotrak 3020* Sensors vergleichbaren Frequenz auszulesen.

Ein interessanter Indikator für derartige zukünftige Entwicklungen könnte der Markterfolg des sogenannten Laserradars *MV200* von *MetricVision Inc.* sein, welches ein polares Scannen für Distanzen bis etwa $60m$ mit Punktgenauigkeiten im Zehntelmillimeterbereich zulässt. Das System wird zur Zeit durch *Leica* vertrieben, der Gesamtpreis beträgt rund $500T€$. Damit liegt dieses System preislich deutlich über der Gesamtsumme, welche für einen Lasertracker mittlerer Preisklasse und eines der in diesem Beitrag diskutierten Scansysteme zu veranschlagen wäre. Liegt hier der Spielraum für entsprechende technische Weiterentwicklungen?

4 Resümee

Die aktuellen gerätetechnischen Industrieentwicklungen bezüglich handgeführter 3D-Scanner für Industrievermessungen mit Genauigkeitsanforderungen im Zehntelmillimeterbereich werden dargelegt und diskutiert. Der Schwerpunkt liegt auf der Darstellung der unterschiedlichen System- und Messstrategien, hier der Kombinationen von Laserscanköpfen mit 3D-Messarmen oder mit optischen Trackingsystemen. Weiterhin wird die Online- und Offlineintegration von Lasertrackern in derartige 3D-Scansysteme betrachtet. Insgesamt gesehen ein kurzer Blick auf wesentliche Themen des Wachstumsmarkts Industrievermessung.

5 Dank

Ich danke Dipl.-Ing. Andreas Marbs vom i3mainz und Dipl.-Ing. Guido Heinz vom RGZ ganz herzlich für die angenehme Zusammenarbeit und die pragmatischen Tipps zum Scannen und Auswerten mit den Systemen *Mensi Soisic* und *Leica Cyrax 2500*.

6 Literaturverzeichnis

ANDRÄ, P., PEIPE, J. 2002: Zur Erfassung von Freiformflächen mit Streifenprojektionssystem und digitaler Nahbereichsphotogrammetrie. 22. Wissenschaftlich Technische Jahrestagung der DGPF, Publikationen der DGPF Bd.11. In print.

BARTELMESS, R., BÖHLER, W., KÜTHE, K., SCHERER, Y., 1997: 3D-Koordinatenmessung mit dem METRONOR MNS, AVN 6/97, 204-210.

BÖHLER, W., HEINZ, G. und MARBS, A., 2001: The Potential of Non-contact Close Range Scanners for Cultural Heritage Recording. CIPA International Symposium, Potsdam. In print.

I3MAINZ 2002: <http://scanning.fh-mainz.de/>

MÜLLER, H. 2000: 3D-Stadtmodelle – Technik und Anwendungen. 20. Wissenschaftlich Technische Jahrestagung der DGPF, Publikationen der DGPF Bd. 9, 2001, 113-120.

NEUHAUS, S. 2000: Kalibrierungsmodell für den Faro-Arm, Fachhochschule Mainz, Diplomarbeit, unveröffentlicht.

PORTEN, S. 2001: Einsatz des Lasertrackers Leica Smart 310 unter der Software Axyz 1.4, Fachhochschule Mainz, Diplomarbeit, unveröffentlicht.

SCHLEMMER, H. 1996: Grundlagen der Sensorik, Wichmann, Heidelberg.

Bei den im Text genannten Firmen- und Produktbezeichnungen handelt es sich um geschützte Begriffe.