

Vergleichende Untersuchung zur Genauigkeit und Auflösung verschiedener Scanner

Wolfgang BÖHLER und Andreas MARBS

Zusammenfassung

Laserscanner liefern 3D-Koordinaten, deren Zustandekommen aufgrund des „Black-Box“-Prinzips der Geräte für den Benutzer nicht nachvollziehbar ist. Dieser Sachverhalt macht es fast unmöglich, festgestellte Abweichungen gegenüber bekannten Geometrien im Messraum auf Gerätefehler zurück zu führen und entsprechende Korrekturen zu bestimmen. Um dem Benutzer jedoch Aussagen zur Genauigkeit und Auflösung der Scanner zur Verfügung zu stellen, erscheint es sinnvoll, typische Messaufgaben und -bedingungen nachzustellen und diese einerseits mit sehr genauen Methoden und andererseits mit den zu untersuchenden Scannern durchzuführen. Das Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik (i3mainz) der Fachhochschule Mainz hat einen derartigen Testparcours aufgebaut und zahlreiche 3D-Laserscanner unter den gleichen Bedingungen untersucht.

1 Einleitung

1.1 Notwendigkeit von Untersuchungen

Während in zahlreichen wissenschaftlichen Publikationen noch mit euphorischen Vokabeln („umfassend, rationell, homogen, flächendeckend, mit sehr hoher Genauigkeit“) über die Ergebnisse von 3D-Scanning berichtet wird, ist bei vielen Anwendern Ernüchterung eingetreten. Herstellerangaben zur Genauigkeit sind wenig verlässlich und vergleichbar. Typische Probleme der Technologie werden selten angesprochen. Qualitätsgarantien für Messergebnisse können nicht gegeben werden. Fehlgeschlagene Projekte belasten den Ruf von Laserscanning. Beim National Institute of Standards and Technology (NIST) der USA wird die Handlungsnotwendigkeit so beschrieben: “Wild, wild west at the moment. Instrument calibration, independent accuracy assessments, operational issues all need guidance from recognized experts to increase acceptance of technology by data end-users“ (NIST 2003).

1.2 Objektgenauigkeit und Gerätegenauigkeit

3D-Scanner liefern dem Anwender als unmittelbares Ergebnis $x/y/z$ -Koordinaten von Punkten auf der Oberfläche von Objekten. Für den Hersteller ist die Genauigkeit eines 3D-Punktes das Endresultat seiner Anstrengungen, ein messtechnisch gutes Gerät zu bauen. Für den Anwender ist die Genauigkeit des 3D-Punktes eine Ausgangsinformation, um daraus die Genauigkeit derjenigen Maße abzuschätzen, die je nach Aufgabenstellung benötigt werden und die erst aus einer Modellierung einer größeren Anzahl von Punkten der Punktwolke gewonnen werden können. Dabei kann die Genauigkeit am Objekt geringer sein als die Genauigkeit der Punkte der Punktwolke, zum Beispiel für die Lage eines interpolierten Punktes auf einer sehr unregelmäßigen Oberfläche, die nur mit einem groben Raster erfasst wurde; sie kann aber auch sehr viel höher sein, etwa für einen Eckpunkt, der aus dem

Schnitt dreier Ebenen erzeugt wurde (was allerdings voraussetzt, dass durch eine weitere Beobachtung sicher gestellt ist, dass die Ebenen tatsächlich eben sind).

Eine nicht unerhebliche Rolle spielt bei der Beurteilung der möglichen Genauigkeit an einem Objekt der Abstand der einzelnen erfassten Punkte sowie die Größe des Laserflecks auf dem Objekt. Aus Messungen eines angenommenen 3D-Scanners, der eine Streckenmessgenauigkeit von 0.1 mm und eine Winkelmessgenauigkeit von 0.1 mgon besitzt, der aber in 60 m Entfernung nur alle 20 cm einen birdeckelgroßen Laserfleck auf ein Objekt wirft, wird es nicht möglich sein, die Geometrie kleiner Objekte auch nur mit Dezimetergenauigkeit zu modellieren. Die Tatsache, dass Messungen zu luftseitigen Kanten dadurch grob verfälscht werden, dass nur ein Teil der reflektierten Strahlung vom Objekt stammt, macht die Objektmodellierung nur noch problematischer.

Der Hersteller interessiert sich für die Aufdeckung von Schwachstellen seines Geräts, um gezielt die Qualität seines Produkts zu verbessern. Da die Fehlerquellen jedoch in zahlreichen mechanischen, optischen und elektronischen Komponenten liegen können, scheitert nach Ansicht der Verfasser der Versuch, die Abweichungen in den Punktwolken gezielt auf Abweichungen in den Komponenten zurück zu führen oder gar Kalibrierwerte für die Messungen zu bestimmen. So hängt ein so einfach zu beschreibender Wert wie etwa die Additions-„Konstante“ der Entfernungsbestimmung von derart vielen Faktoren ab (Form der Oberfläche, Reflektivität, Rauigkeit, Temperatur, Umgebungshelligkeit, ...), dass eine verlässliche Angabe, die bei einer beliebigen Messaufgabe verwendet werden könnte, nicht möglich ist.

Der Anwender sucht dagegen eine verlässliche Möglichkeit, die Ergebnisse seiner Messungen zu beurteilen und gegenüber seinem Auftraggeber zu dokumentieren. Hierzu müssen die Besonderheiten der jeweiligen Messaufgabe unbedingt beachtet werden. Es bleibt im Grunde genommen nichts anderes übrig, als eine Messaufgabe einschließlich ihrer typischen Material- und Umgebungsbedingungen nachzustellen und die Messergebnisse des Laserscanners zumindest stichprobenhaft mit Werten zu vergleichen, die mit einem anderen, wesentlich genaueren Messmittel unter ähnlichen Bedingungen gefunden wurden.

2 Untersuchung van Laserscannern am i3mainz

2.1 Einrichtungen

Aus den vorgenannten Gründen ist es nicht möglich, eine Test- und Kalibriereinrichtung zu schaffen, die sämtliche Fehlerursachen von Laserscannern aufdecken kann. Selbst für eine Pilotinstallation, die nur die allernotwendigsten Einrichtungen aufweist („just to get our feet wet“), hielten Fachleute bei einem Workshop des US National Institute of Standards and Technology eine Investition in der Größenordnung von 300.000 bis 500.000 US\$ für erforderlich (NIST 2003). Mit Mitteln, die weniger als 1% dieser Summe ausmachen, wurden an der Fachhochschule Mainz Testeinrichtungen geschaffen, die wenigstens Aufschluss über die wichtigsten Eigenschaften eines Laserscanners unter durchschnittlichen Bedingungen geben können. Neben Testkörpern, welche es ermöglichen, das Verhalten an Kanten und Spalten zu beurteilen, wurden ausschließlich Ebenen und Kugeln als Ziele verwendet, da die hierfür zur Verfügung stehenden Modellierungsalgorithmen einfach sind und keine neuen Fehler in die Auswertung einführen.

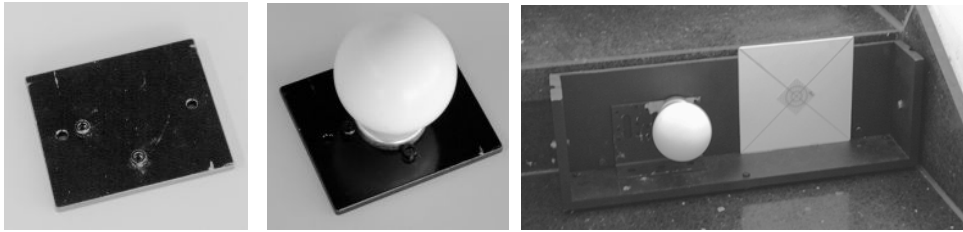


Abb.1: L.: Platte zur definierten Aufnahme von Kugeln. R: Zielvorrichtung an Treppe.

Raumstrecken in Messrichtung und quer dazu wurden durch weiße Kugeln mit einem Durchmesser von 76,2 mm realisiert. Diese sind für Laser verschiedener Wellenlängen gleich tauglich und besitzen eine Größe, die für viele Messaufgaben noch zuverlässig aufgelöst werden sollte. Zur Befestigung der magnetischen Grundplatten der Kugeln wurden in verschiedenen Innenräumen der Fachhochschule, unter anderem im Verlauf eines über 60 m langen Flurs, Vorrichtungen angebracht (Abb. 1), die es erlauben, die Kugeln mit hoher Genauigkeit zu positionieren und mit verschiedenen Methoden (Laserinterferometer, Präzisionsnivelement, geodätische Einschnideverfahren) präzise einzumessen (Standardabweichung der räumlichen Lage < 0.5 mm). Aus diesen Kugelpositionen resultieren jeweils etwa ein Dutzend unabhängiger Strecken in Messrichtung im Nahbereich (< 10 m) und im Fernbereich (10-50m). Ebenso viele unabhängige Strecken gibt es quer zur Messrichtung jeweils in horizontaler und vertikaler Richtung. Eine ausführlichere Beschreibung der Einrichtungen befindet sich im Internet (BÖHLER, BORDAS VICENT & MARBS 2004).

Als ebene Ziele dienten weiß beschichtete Spanplatten (Reflektivität im Bereich des sichtbaren Lichts 90%), auf denen Teilflächen mit unterschiedlichen Materialien lackiert oder beschichtet waren (Abb. 2). So konnte einerseits das Rauschen der Entfernungsmessung bestimmt werden; andererseits konnte untersucht werden, ob zwischen weißen und anderen Materialien systematische Entfernung Unterschiede nachweisbar sind.

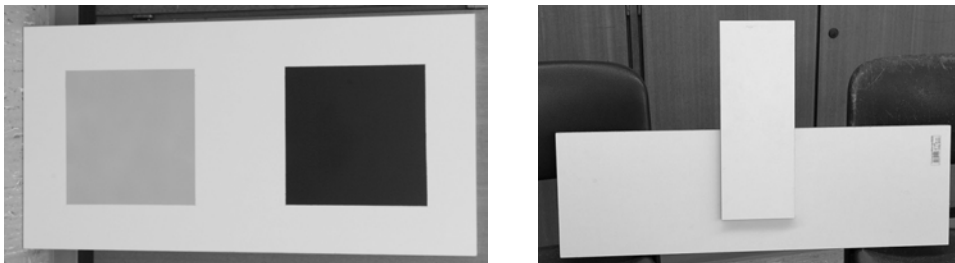


Abb. 2: L.: Ebenes Brett mit verschiedenen Beschichtungen. R.: Objekt für Kantentests.

Zur Untersuchung verschiedener Kanteneffekte diente eine Anordnung aus zwei aufeinander geklebten Spanplatten (Abb. 2), die gegen den Himmel aufgenommen wurde, so dass verschiedenartige Kantenkonfigurationen auftreten. Ein selbst konstruierter Testkörper von etwa 300 mm x 300 mm, der 55 mm vor einer Rückwand Schlitze variabler Breite (bis maximal 30 mm) aufweist, erlaubt darüber hinaus verlässliche und praxisnahe Aussagen zum Auflösungsvermögen am Objekt.

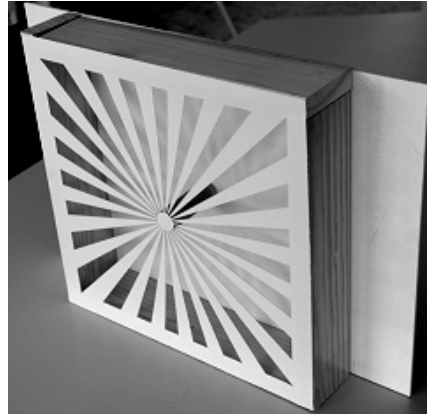


Abb. 3: Testkörper zur Beurteilung des Auflösungsvermögens.

2.2 Methoden

Da die Ergebnisse der Tests auch zum Vergleich verschiedener Scanner herangezogen werden, war es notwendig für jede Untersuchung weitgehend die gleichen Bedingungen herzustellen. Die Messungen fanden alle in Innenräumen bei etwa 20°C statt. Für die Messung der Ebenen wurde ein Raster von 5 mm angestrebt, für die Kugeln 4 mm und für die Auflösungstests 1 mm. Sofern diese Werte mit einzelnen Geräte nicht realisiert werden konnten, wurde die am nächsten liegende Auflösungsstufe verwendet. Einige Geräte ermöglichten bei den größeren Entfernung nur sehr viel gröbere Raster. Dies führte naturgemäß bei den Ergebnissen zu entsprechend schlechteren Werten bzw. der Unmöglichkeit, überhaupt noch die notwendigen Modellierungen vornehmen zu können. Wiederholungsmessungen wurden nicht vorgenommen. Dies ist bei der Beurteilung der Ergebnisse zu beachten, da zum Beispiel sehr schnelle Scanner in einer festgelegten Messzeit ein Objekt mehrfach aufnehmen können, woraus meist eine Genauigkeitssteigerung resultiert.

Vor der Modellierung der Ebenen und Kugeln wurden grob falsche Punkte von Hand entfernt. Dies wurde nach den gleichen Gesichtspunkten für alle Auswertungen von derselben Person vorgenommen. Die Ergebnisse der Programme zur Ausgleichung wurden mit anderen Softwareprodukten verglichen, um sicher zu stellen, dass die Modellierung fehlerfrei ist. Detaillierte Angaben zu den Mess- und Auswertemethoden finden sich im Internet (BÖHLER, BORDAS VICENT & MARBS 2004).

3 Ergebnisse

3.1 Vorbemerkungen

Die folgenden Resultate dürfen nicht als ein Ranking der untersuchten Geräte missdeutet werden. Sie geben lediglich Ergebnisse wieder, die für ganz bestimmte Messaufgaben unter ganz bestimmten Bedingungen erzielt wurden. Höhere Genauigkeiten an Objekten können möglicherweise für andere Ziele, unter anderen Bedingungen oder durch Mehrfachmessungen erreicht werden. Andererseits sind für eine erfolgreiche Objektvermessung oft ganz andere Geräteeigenschaften wichtiger als die erzielbaren Genauigkeiten. Hierzu gehören die maximalen Reichweiten und Gesichtsfelder, Messgeschwindigkeit, Robustheit und Transportfreundlichkeit, Laserklasse, Stromversorgung (Batterien!), Temperaturverhalten, u. v. a. Während diese Informationen jedoch unschwer Prospekten entnommen werden können, sind die dort angegebenen Genauigkeitsmaße nicht vergleichbar.

3.2 Rauschen in Messrichtung

Wird für die Punktwolke, die aus der Aufnahme eines ebenen Objekts entstand, eine ausgleichende Ebene bestimmt, so lässt sich die Standardabweichung der Ablage eines Einzelpunktes von dieser ausgleichenden Ebene berechnen. Der Wert gibt keine Auskunft über systematische (Nullpunkt- oder Maßstabs-) Fehler; er beschreibt jedoch gut die erzielbare Nachbarschaftsgenauigkeit, die insbesondere dann von Bedeutung ist, wenn unregelmäßige Oberflächen vermascht werden sollen.

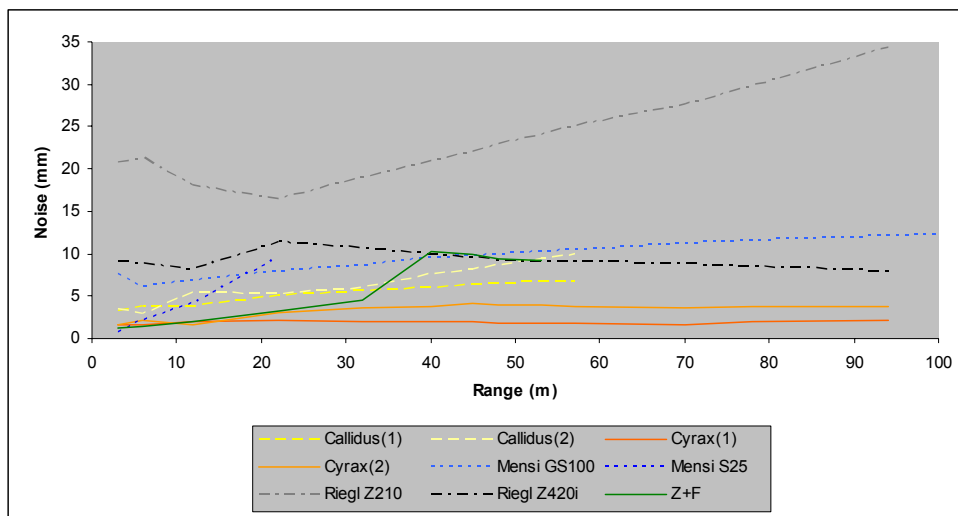


Abb. 4: Rauschen in Messrichtung (Standardabweichung eines Einzelpunktes) auf grauer Oberfläche (40% Reflektivität).

Cyrax (Cyrax 2500) ist baugleich mit Leica HDS2500, Mensi S25 mit Mensi Soisic LD, Z+F (Zoller+Fröhlich imager 5003) mit Leica HDS4500.

3.3 Entfernungen in Messrichtung

Da nur wenige Instrumente definiert zwangszentriert werden können, wurden ausschließlich Entfernungsunterschiede zwischen jeweils zwei Kugelzielen gemessen. Damit werden im Wesentlichen Fehler erfasst, die durch die Entfernungsmessung zustande kommen. Nullpunktsfehler, die für Panoramascanner auch bestimmt wurden, hängen stark von der Beschaffenheit des Ziels ab (s. Abschnitt 1.2); sie werden deshalb hier nicht veröffentlicht.

Tabelle 1: Unterschiede zwischen bekannten und gemessenen Strecken in Messrichtung. Standardabweichungen in mm berechnet aus den wahren Abweichungen von wenigstens 12 unabhängigen kurzen Strecken zwischen zwei Kugeln im Nahbereich und 14 unabhängigen kurzen Strecken im Fernbereich.

Hersteller	Typ	Nah <10m	Fern 10-50m	Max. Diff.
Callidus Precision Syst.	Callidus (1)	1.5	- ^a	2.6
Callidus Precision Syst.	Callidus (2)	2.8	- ^a	5.9
Cyra Technologies	Cyrax2500 (1)	0.6	1.1	2.3
Cyra Technologies	Cyrax2500 (2)	0.4	0.5	0.9
Mensi	S25	1.4 ^b	4.6 ^c	7.7 ^c
Mensi	GS 100	2.6	2.0	8.2
Riegl	LMS-Z210	19.7	- ^a	40.4
Riegl	LMS-Z420i	2.6	2.7 ^d	5.9
Zoller+Fröhlich	Imager 5003	1.6	0.7 ^e	12.3

^a Raster zu grob für Modellierung. ^b Aber 0.2 mm in 4 m und 0.5 mm in 6 m Entfernung.

^c In 22 m Entfernung. ^d Nur 4 Messungen im Fernbereich. ^e Nur 2 Messungen.

3.4 Entfernungen quer zur Messrichtung

Die Strecken quer zur Messrichtung lassen auf die Winkelmessgenauigkeit schließen.

Tabelle 2: Standardabweichungen in mm für wenigstens 12 unabhängige vertikale und 12 unabhängige horizontale Strecken (senkrecht zur Messrichtung).

Hersteller	Type	Vert. Entf.	Horiz. Entf.	Max. Diff.
Callidus Precision Syst.	Callidus (1)	5.6 ^a	4.3 ^a	12.2 ^a
Callidus Precision Syst.	Callidus (2)	9.9 ^a	2.5 ^a	18.3 ^a
Cyra Technologies	Cyrax2500 (1)	0.8	0.8	1.6
Cyra Technologies	Cyrax2500 (2)	0.5	0.5	1.1
Mensi	S25	3.8 ^b	3.4 ^b	9.2 ^b
Mensi	GS100	1.9	2.3	3.3
Riegl	LMS-Z210	10.2 ^a	16.8 ^a	27.1 ^a
Riegl	LMS-Z420i	1.7	2.1	4.1
Zoller+Fröhlich	Imager 5003	2.9	7.5	11.1

^a Gilt wegen groben Rasters nur im Nahbereich. ^b Hohe Abweichungen aufgrund des Triangulationsprinzips. Besser im Nahbereich (z.B. 0.8 mm vert. and 0.2 mm horiz. in 4 m).

3.5 Auflösung

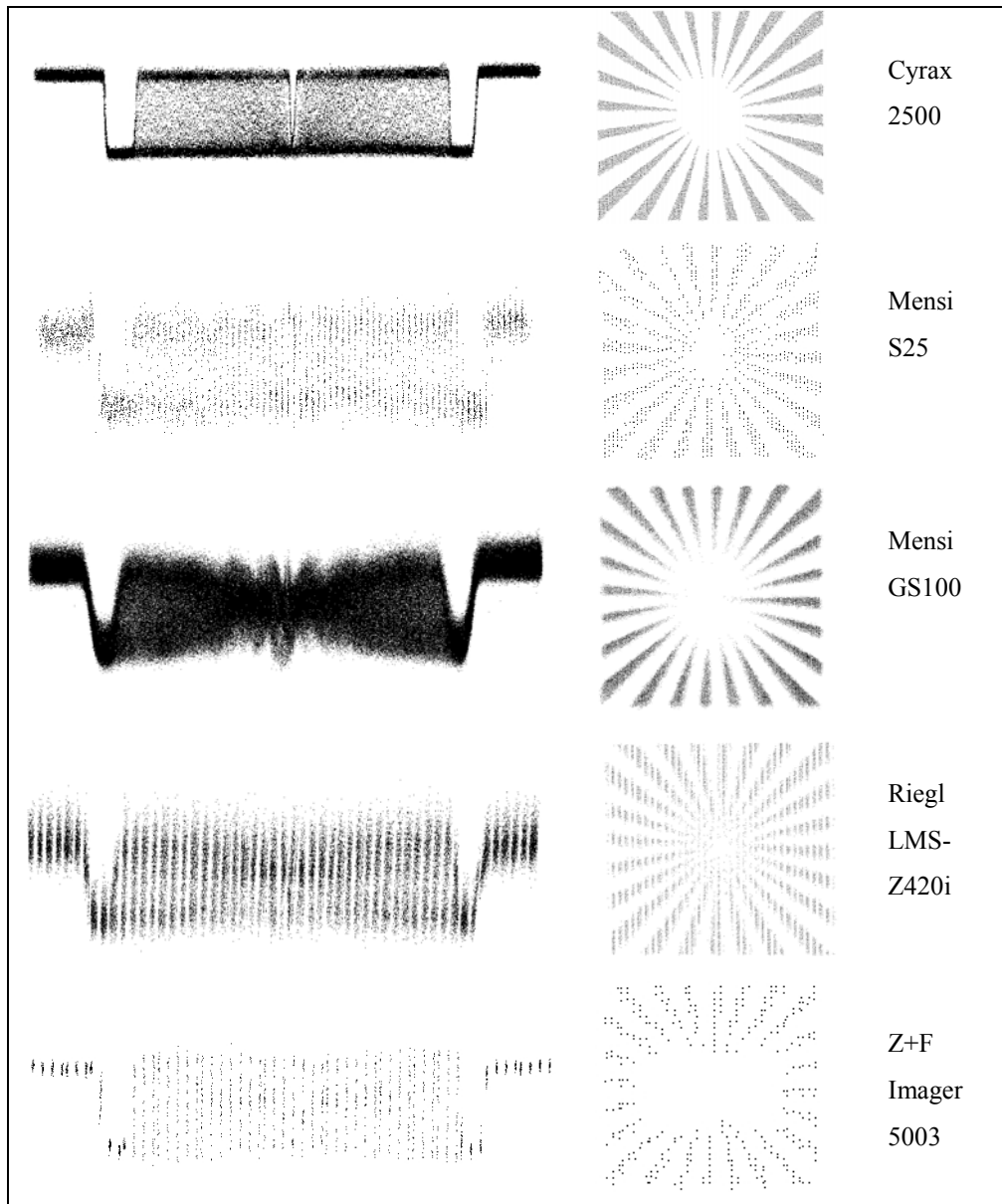


Abb. 5: Auflösungstests mit dem Testkörper (siehe Abbildung 3) aus 22 m Entfernung. Links: Schnitt durch die Punktwolke. Rechts: Erfasste Punkte auf der Rückwand.

Der Callidus und der Riegl LMS-Z210 haben ein zu grobes Punktraster, um den Testkörper aufzulösen.

Die Auflösungs-tests geben einen sehr deutlichen Eindruck von der Performance der einzelnen Geräte. Eine weitere Serie mit den Ergebnissen von entsprechenden Scans aus 6 m Entfernung wird im Internet präsentiert (BÖHLER, BORDAS VICENT & MARBS 2004).

3.6 Einfluss der Reflektivität

Die Ergebnisse der Tests mit verschiedenen reflektierenden Oberflächen (vgl. Abb. 2) zeigen, dass unter normalen Bedingungen wenig Abweichungen zu erwarten sind; allerdings muss man bei besonderen Materialien immer auch mit extrem hohen Fehlern rechnen (Tabelle 3).

Tabelle 3: Entfernungskorrektur aufgrund verschiedener Oberflächenmaterialien. Positives Vorzeichen bedeutet eine im Vergleich zur weißen Oberfläche zu kurz gemessene Entfernung. ^a Es wurden überhaupt keine Punkte registriert.

Typ	weiß 90%	weiß 80%	grau 40%	schwz. 8%	Metal- liclack	Alu- folie	Cyrax- Zielmk.	oranger Kegel
Callidus(1)	0	0	0	0	0	0..-100	+7	-10
Callidus(2)	0	0	+4	+3	0..-10	0..-15	+5	-20
Cyrax (1)	0	0	0	0	0	0..+10	+22	-40
Cyrax (2)	0	0	0	0	0	0	+17	-70
S25	0	0	0	0	0	0	0	0
GS 100	0	0	0	+8	0	0	n.a. ^a	0
Riegl Z210	0	0	+13	+3	0..-100	0..-250	0	-100
Riegl Z420	0	0	0	0	0	0	0	-20
Z+F	0	0	0	0	0	0..+30	-18m	-20

4 Ergänzende Bemerkungen

Diese Arbeiten wurden im Rahmen des BMBF-Programms zur Förderung der anwendungsorientierten Forschung an Fachhochschulen gefördert (FKZ 1702602). Die Testeinrichtungen stehen zur Untersuchung weiterer Instrumente auch künftig zur Verfügung. Ausführliche und aktualisierte Projektbeschreibungen und -ergebnisse befinden sich im Internet (BÖHLER, BORDAS VICENT & MARBS 2004).

5 Literatur

- Böhler, W., Bordas Vicent, M. & Marbs, A. (2004): *Investigating Laser Scanner Accuracy*.
<http://scanning.fh-mainz.de/scannertest/results111103.pdf>
- NIST (2003): *Proceedings of the LADAR Calibration Facility Workshop, June 12-13, 2003*.
 National Institute of Standards and Technology, NISTIR Publication 7054,
 Gaithersburg, USA.
http://www.bfirl.nist.gov/861/CMAG/publications/NISTIR_7054.pdf