

Genauigkeiten bei reflektorlosen Messungen elektronischer Tachymeter

Hans Lang

<http://www.landesarchaeologen.de>

(30.07.2012)

Die sogenannte reflektorlose Vermessung ist ein häufig angewendetes Verfahren zur Aufnahme von archäologischen Befunden und Funden sowie in der Bauaufnahme. Der Vorteil gegenüber der Vermessung auf Prismen liegt in der Möglichkeit, sichtbare aber unzugängliche Punkte berührungslos auf ihrer Oberfläche anzuzielen und zu vermessen. Zur Genauigkeit dieses Verfahrens finden sich aber oft nur sehr allgemeine Angaben. In dieser Arbeit wird daher ein praktischer Versuch vorgestellt, in dem mittels einer Messreihe verschiedene Entfernungen, Auftreffwinkel und die Reflexionseigenschaften verschiedener Oberflächen untersucht und daraus Empfehlung für die Praxis entwickelt werden.

1. Einleitung

Die elektronische Distanzmessung mit Hilfe sogenannter Totalstationen zur digitalen dreidimensionalen Vermessung ist ein Werkzeug, das Handzeichnungen bei der Erfassung archäologischer Befunde, Funde, ganzer Gebäude oder Gebäudeteile ergänzt oder im günstigsten Falle vollständig ersetzt. Anfänglich waren Totalstationen nur mit einer Infrarotmessung ausgestattet, bei der die Entfernungsmessung mittels eines, durch ein Prisma reflektierten Laserstrahles erfolgt. Heutige Totalstationen sind mit einem Messlaser im sichtbaren roten Lichtbereich ausgestattet und werten auch Reflexionen auf natürliche Oberflächen aus.

Im Bereich archäologischer Ausgrabungen dienen Totalstationen der Profilaufnahme und mit Einschränkungen auch der Flächenaufnahme¹, der lage- und höhengerechten Einmessung von Funden und Fundzusammenhängen vor deren Bergung sowie der Aufnahme von Passpunkten für die Entzerrung von digitalen Messfotos.

Die Art der Distanzmessung auf „natürliche“ Oberflächen wird in den Handbüchern als „reflektorlos“² bezeichnet. – „Prismenlos“ wäre ein genauerer Begriff, da jede Oberfläche das Licht mehr oder weniger reflektiert. Gleichwohl wird der Terminus „reflektorlos“ hier der Einfachheit weiter verwendet. Den Bedienungsanleitungen der Messgeräte sind die Messgenauigkeiten und -toleranzen beider Methoden relativ pauschal zu entnehmen³. Diese Toleranzen näher zu

¹ Einschränkungen ergeben sich hier durch schräges Anzielen, was Messfehler verursacht, sowie nicht sichtbare Objekte, die zusätzliche Stationierungen des Instruments erfordern.

² Üblicherweise wird das Messprisma als Reflektor bezeichnet.

³ s. Anhang.

betrachten war der Anlass für diese Untersuchung, in der eine Messreihe mit verschiedenen Oberflächen, Farben, Reflexionswinkeln und Abständen erstellt wurde.

2. Entfernungsmessung mit Laserstrahlen

Es kann nicht die Absicht dieser Arbeit sein, umfassend über die physikalischen und mathematischen Hintergründe, die Wirkungsweise oder die Technologie von Laserstrahlen zu berichten. Um diese zu vertiefen gibt es genügend Fachliteratur. Gleichwohl seien an dieser Stelle einige Grundlagen dargestellt, die für die Verwendung von Laser in der Vermessung wichtig sind.

„Laser“ ist die Abkürzung für engl. „**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation“ („Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung“). Die annähernde Parallelität der künstlich gerichteten Lichtstrahlen erlaubt punktgenaue Messungen mit einer Auflösung von ca. 0,1 mm bei einem Durchmesser des Laserstrahls von ca. 7 x 14 mm bei 20 m Entfernung. Für die Entfernungsmessung können abhängig von der Modulation des Strahles zwei Messverfahren angewendet werden:

- Enges Frequenzspektrum bis feste Wellenlänge: Distanz- und Geschwindigkeitsmessung über die Laufzeit des Laserstrahls (Abb. 1).
- Phasensynchronizität: Distanzmessung über Phasenverschiebung (Abb. 2).

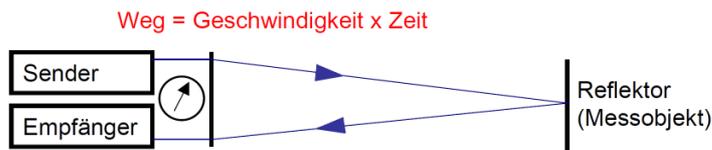


Abb. 1 Schema zur Entfernungsmessung über die Laufzeit (H. Lang).

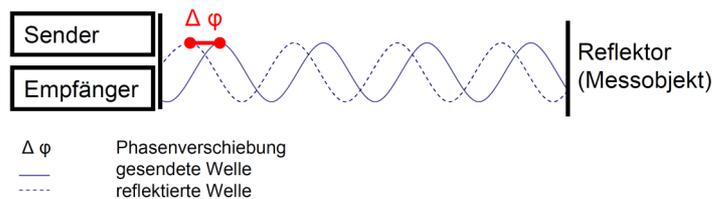


Abb. 2 Schema zur Entfernungsmessung über Phasenverschiebung, (H. Lang).

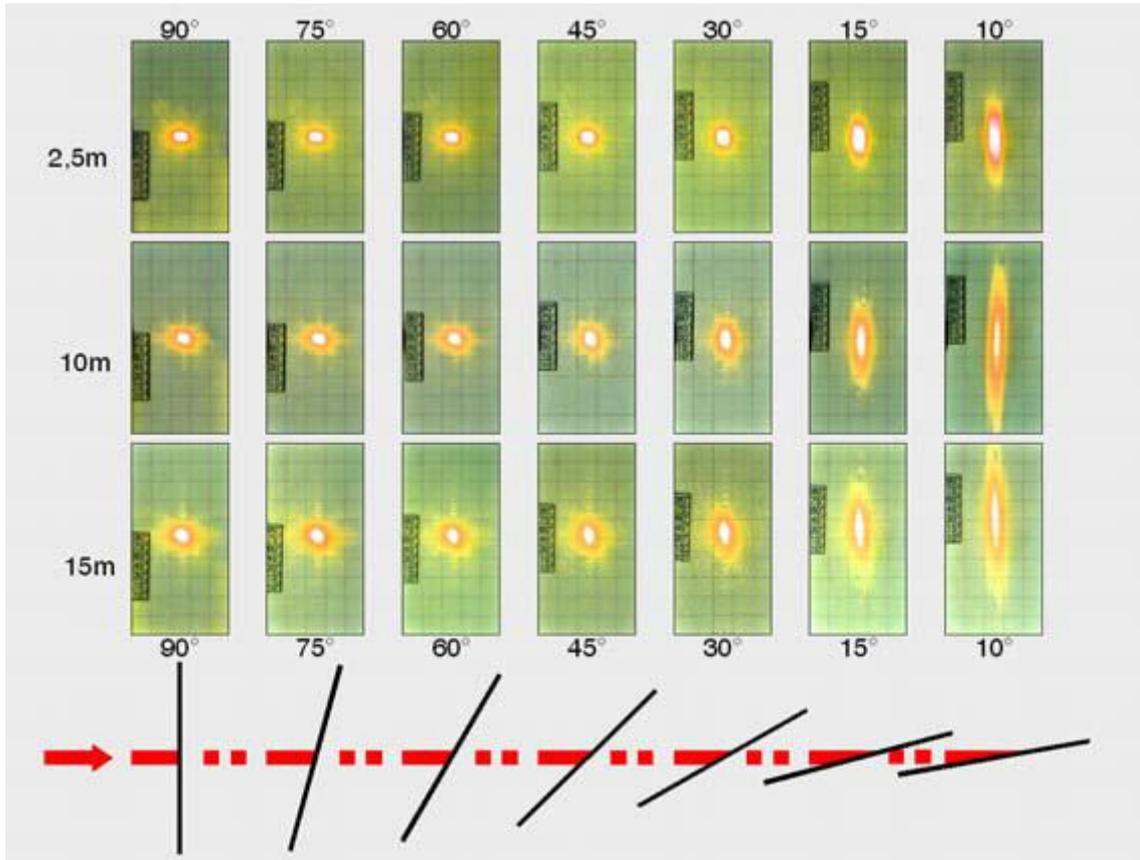


Abb. 3 Entzerrte und bearbeitete Aufnahmen des Laserpunktes auf einer Messplatte. Dargestellt ist die Größe des Laserpunktes in Abhängigkeit von Entfernung und Auftreffwinkel (H. Lang).

Ein eher optisch reizvoller Effekt des Laserstrahls sind wellenförmige Strahldivergenzen, hervorgerufen durch die Beugung des Lichtes an den Rändern beim Austritt aus dem Laser. Aktiv für die Messung ist der helle innere Punkt des Lasers (Abb. 4 und 7).

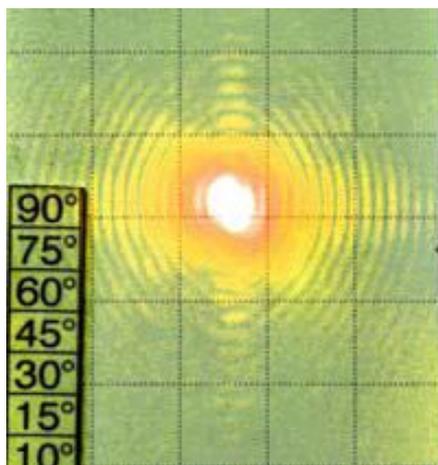


Abb. 4 Wellenförmige Divergenzen durch Beugung. Entfernung: 15 m, Winkel 90°, Messraster: 1 cm. Entzerrte und bearbeitete Aufnahme (H. Lang).

2.1 Reflexionen

Eine Distanzmessung, sei es über die Laufzeit oder Phasenverschiebung, kommt nur zustande, wenn genügend Licht gesendet und vom zu messenden Objekt zurück zum Sensor reflektiert wird. Bei der Messung auf ein Prisma braucht der Laser weniger Leistung (0,33 mW) als im Vergleich zur reflektorlosen Messung (0,47 mW)⁴. Die Verwendung eines Prismas bietet immer gleich bleibende Reflexionen, die nur durch die Entfernung im Medium Luft mit allen atmosphärischen Gegebenheiten beeinflusst werden. Der Hauptanteil von Messungenauigkeiten lässt sich auf Sonneneinstrahlung (Zittern des Laserstrahls) und durch Staub hervorgerufene Luftverschmutzungen (ungewollte Reflexionen) zurückführen.

Bei der Messung auf „natürliche“ Reflektoren ist zusätzlich mit wesentlich mehr Parametern zu rechnen: Farbe, Rauigkeit, Spiegelungen, Auftreffwinkel und Kanten. Das Ergebnis der Distanzmessung mit dem Laser ist ein Durchschnitt aus vielen intern verarbeiteten Messwerten, das auf dem Display angezeigt und gespeichert wird (Abb. 5 u. 6).

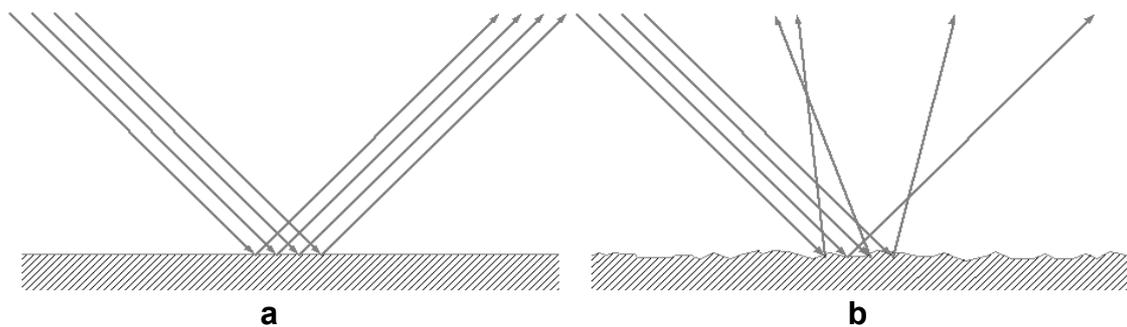


Abb. 5 Einfluss der Oberfläche auf die Reflexion: a) spiegelnde Reflexion, b) rechts: diffuse Reflexion (Fabien2005 / Wikimedia Commons).

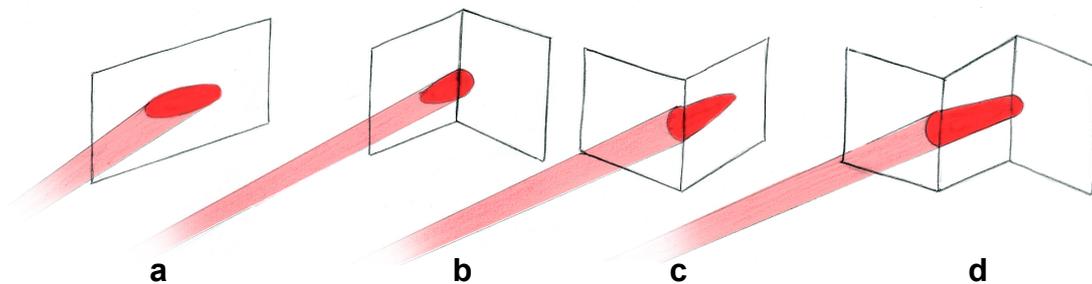


Abb. 6 Einfluss der Geometrie des Messobjektes auf die Reflexionen und Messergebnisse: a) schräge Reflexionsfläche, b) konkave Kante, c) konvexe Kante, d) Stufe (T. Wanke).

Messungen mit Abständen von 0,5 mm bei einer Entfernung von 5 m auf eine in Abb. 6d beschriebene „Stufe“ von 15 mm erbrachte das in Abb. 7 dargestellte Ergebnis, das sich wie folgt interpretieren lässt: Sobald der aktive helle Querschnitt des Laserstrahls die vordere Ebene verlässt und teilweise auch hinten auftrifft, werden Mischergebnisse je nach Anteil produziert, die in der unten beschriebenen Kurve grafisch dargestellt sind (Abb. 7).

⁴ Leica Geosystems AG, Leica TPS400 Series. Gebrauchsanweisung (Heerbrugg 2005), 116, 121.

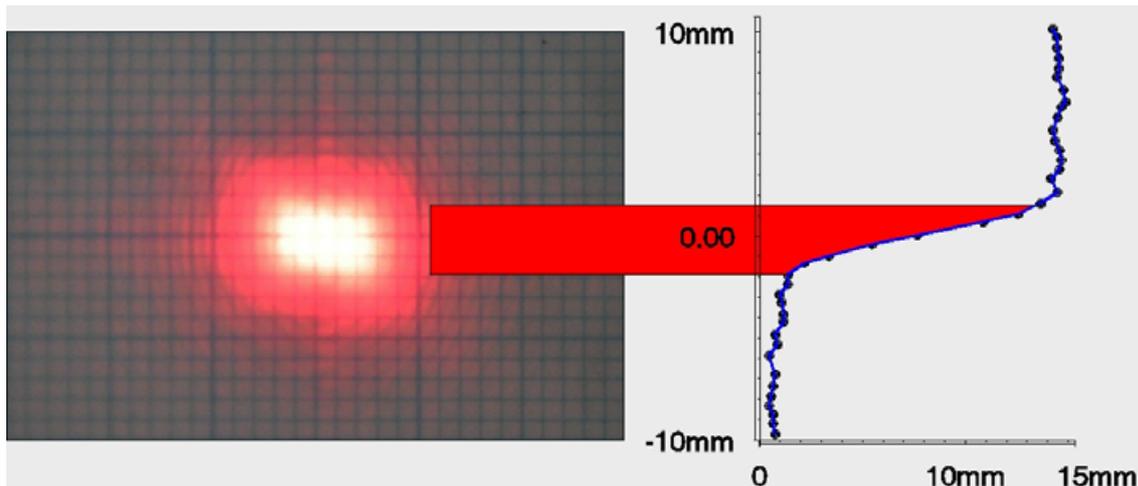


Abb. 7 Messergebnisse des auf einer Stufe auftreffenden Lasers (H. Lang).

Diese verschiedenen Ergebnisse des „first echo“ und „last echo“ der Messung werden beim Laserscanning aus der Luft (LIDAR= *Light Detection And Ranging*) verwendet, um aus dem digitalen Oberflächenmodell (DOM) das digitale Geländemodell (DTM, DGM) zu entwickeln, welches hoch stehende Vegetation oder Gebäude herausrechnet (Abb. 8)⁵.

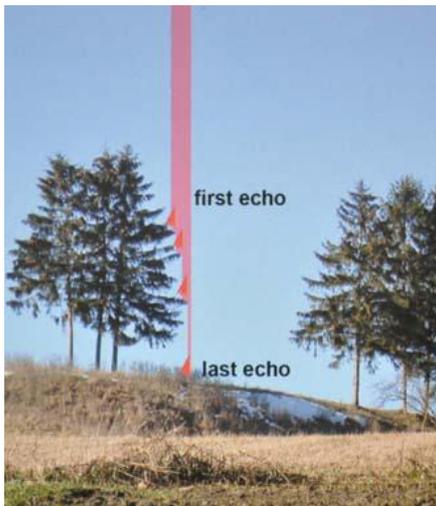


Abb. 8 Schema der Laserabtastung von Geländeoberflächen (J. Bofinger, LfD Baden-Württemberg).

2.2 Prismenkonstante

Genaueste Messergebnisse lassen sich wie schon oben erwähnt erzielen, wenn auf ein Prisma gemessen wird. Beim Prisma wird der Laserstrahl bedingt durch seinen Aufbau immer in die Mitte fokussiert und im gleichen Winkel zum Empfänger reflektiert.

Bei den meisten Prismen liegt der optische Umkehrpunkt des Messstrahls um den Wert K hinter der Stehachse (Stab). Die Distanz wird um diesen Betrag zu lang gemessen. Intern korrigiert das

⁵ Jörg Bofinger, Flugzeug, Laser, Sonde, Spaten. Fernerkundung und archäologische Feldforschung am Beispiel der frühkeltischen Fürstensitze (Stuttgart 2007) 15. <http://www.denkmalpflege-bw.de/fileadmin/media/publikationen_und_service/onlinepublikationen/Flugzeug_Laser_Sonde_Spaten_Bofinger.pdf> (13.06-2012)

Instrument den Messwert mit der eingestellten Prismenkonstante⁶. Alle Konstanten sind im Tachymeter voreingestellt und können auch verändert werden. So sind Messungen auf erhabene Oberflächen, hervorstehende Nägel etc., deren eigentlicher Zielpunkt hinter der Oberfläche liegt (s. Messergebnisse auf den Tischtennisball) mit Hilfe der Prismenkonstante korrigierbar (Abb. 9).

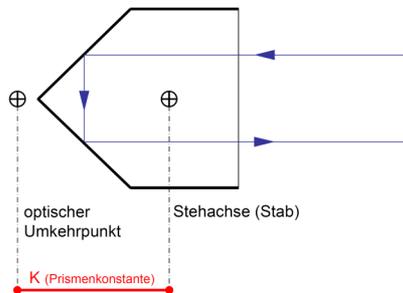


Abb. 9 Prismenkonstante. Verhältnis der Stehachse (Stab) des Prismas zum optischen Umkehrpunkt des Laserstrahls (H. Lang).

3. Messaufbau

3.1 Messgeräte und Hilfsmittel

Zum Einsatz kam eine Leica Totalstation, Serie TCR 407 Power. Ein zweites Stativ diente der Aufnahme des Standardprismas und der schwenkbaren mit Winkelskala versehenen Magnethalterung für die Fixierung verschiedener Reflektoren (Abb. 10a-b).



Abb. 10a-b Totalstation und Prisma auf Stativen und schwenkbarer Magnethalter (H. Lang).

⁶ Die Hersteller Nikon, Pentax, Sokkia, Topcon und Trimble definieren die Prismenkonstante als negative Verbesserung, der bei der Verwendung unterschiedlicher Prismen einzutragen ist. Alleine Leica bezieht sich auf ihr Standardprisma, welche eine Verbesserung von -34,4 mm hätte, mit der Konstante 0.

Folgende Reflektoren wurden für die Messreihe verwendet:

- Standardprisma (Infrarot-Modus). Alle gemessenen Werte wurden in Relation zu dieser Referenzmessung gesetzt.
- Reflektorfolie (Infrarot-Modus)
- Karton, weiß (Grauwert ca. 5%)
- Karton, grau, (Grauwert ca. 19%)
- Karton, schwarz, (Grauwert ca. 90%)
- Signalspray (orange)
- Heraklitnagel (silbrig glänzend)
- Schiefernagel (matt silbrig auf orangefarbenem Grund)
- Schlossschraube (silbrig glänzend, leichte Rundung)
- Tischtennisball, halbiert, $\frac{1}{2}$ =Durchmesser 20mm
- „Erdreflektor“ (Grauwert ca. 60%)



Abb. 11 Reflektoren für die „reflektorlose“ Messung (H. Lang).

3.2 Voreinstellungen Software

Vorab wurde der Tachymeter durch den Service überprüft und justiert, insbesondere wurde die Korrelation des im Fernrohr sichtbaren Fadenkreuzes mit dem Laserpunkt geprüft.

Die Stationierung erfolgte auf die Werte $X = 0$, $Y = 0$, $Z = 0$. Der Horizontalwinkel wurde auf 0 gon und der Vertikalwinkel 100 gon eingestellt.

Die Höhe des Tachymeters (Fernrohrmitte) wurde auf das Reflektorstativ übertragen (± 1 gon Abweichung von der Horizontalebene des Tachymeters).

Übertragungsprogramm des Tachymeters: Leica Survey-Office.

Übertragungsformat: Archaeo_15 als Ausgangsformat für das Erweitern von drei auf fünf Nachkommastellen (s. Beispieldatei Abb. 12 und Anmerkungen zum Format).

CAD-Programm: AutoCad/Applikation ArchäoCad. Beim Einrichten der Zeichnungen sind die Zeichnungseinheiten ebenfalls auf fünf (0.00000) Nachkommastellen erweitert worden.

ArchäoCad wurde konfiguriert für Kodierung der verschiedenen Reflektorkürzel. Beispiel einer Kodierung: 02_WE_W90: 02 = (Entfernungsmessung bei 2m), WE = weißer Reflektor, 90 = 90° (Auftreffwinkel bzw. Kippung des Reflektors).

4. Messvorgang

1. Festlegen der vorgegebenen Abstände durch Kontrollmessung auf Standardprisma und eventuelle Korrektur von Distanz und Höhe.
2. Registrieren der Referenzmessung auf Prisma.
3. Aufschrauben des Reflektorhalters, Anbringen und Anzielen des Reflektors in der Mitte des Schwenkpunktes.
4. Registrieren der Messungen für die verschiedenen Auftreffwinkel.
5. Vorgang für alle anderen Reflektoren wiederholen.

Für alle Reflektoren wurden folgende Messungen durchgeführt:

- Distanzen: 2 m, 5 m, 10 m, 25 m, 50 m
- Winkelungen: 90° (senkrecht auf Reflektor), 75°, 60°, 45°, 30°, 15°, 10°
- Alle Messungen wurden in Fernrohrlage I durchgeführt.

Bei den Messvorgängen wurde die Zeit zwischen Auslösen und Registrierung nicht gemessen. Erwartungsgemäß braucht das Gerät länger mit höherem Grauwert, um genügend Daten zur Auswertung zu bekommen. Auch ist die Geschwindigkeit von der Umgebungshelligkeit abhängig.

5. Datenverarbeitung

5.1 Datenübertragung und Konvertierung

Es wurden ca. 350 Datensätze erzeugt. Im Tachymeter werden alle Messwerte registriert, die über Leica-Survey-Office/Data Exchange Manager in die Leica-Formate IDX oder GSI abgespeichert werden können. Dort sind neben den unten genannten Daten auch Horizontal- und Vertikalwinkel, Schrägdistanz, Reflektorhöhe und andere Daten erfasst.

Das „Archäo_15“-Format extrahiert aus diesen Daten „PointID“, „Code“, „East“, „North“ und „Elevation“ und konvertiert sie in ein von ArchäoCad lesbares und in eine CAD-Zeichnung übertragbares Format (Abb. 12).

PointID	Code	East	Wert	North	Wert	Elevation	Wert
001	02_PA_P	X	0.00000	Y	1.99200	Z	-1.64080
002	02_WE_W90	X	0.00300	Y	1.99921	Z	-0.00933
003	02_WE_W75	X	0.00300	Y	1.99941	Z	-0.00935
004	02_WE_W60	X	0.00300	Y	1.99981	Z	-0.00936
005	02_WE_W45	X	0.00300	Y	1.99991	Z	-0.00937
006	02_WE_W30	X	0.00300	Y	2.00001	Z	-0.00937
007	02_WE_W15	X	0.00300	Y	2.00071	Z	-0.00937
008	02_WE_W10	X	0.00300	Y	2.00081	Z	-0.00937

Abb. 12 Beispiel für eine Messdatei im ArchäoCad-Format [*.dat] (H. Lang).

5.2 Darstellung in AutoCAD/ArchäoCad

Über das Prozessierungstool „Plandraw“ von ArchäoCad, wurden nach vorheriger Konfiguration (s. 3.2 Voreinstellungen) die Daten eingelesen und in unten stehender Tabelle zusammengefasst (Abb. 13). Die Referenzmessung auf das Prisma wurde jeweils auf „Null“ bezogen, die Abweichungen der Reflektoren als + (weiter) oder – (näher) verzeichnet.

Für die grafische Darstellung als Kurvenverlauf wurden Verbindungen zwischen den Messwerten eines Reflektors und unterschiedliche Farben für die Auftreffwinkel gewählt.

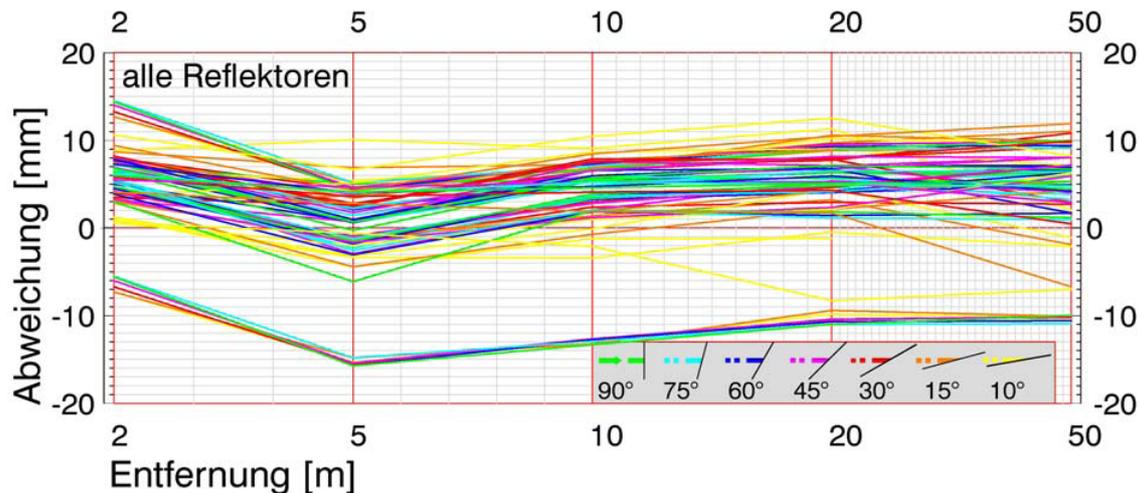


Abb. 13 Diagramm aller Messdaten (H. Lang).

6. Ergebnisse und Analysen

6.1 Alle Reflektoren

In Abb. 13 sind die Ergebnisse aller Messungen dargestellt.

Folgende Abweichungen vom Referenzwert ergaben sich bei einer Distanz von:

- 2 m zwischen 0 und +15 mm (alle Werte +)
- 5 m zwischen -6 und +10 mm (genauester Bereich)
- 10 m zwischen -3 und +11 mm (Tendenz nach +)
- 20 m zwischen -8 und +13 mm (meiste Werte +, starke Abweichungen bei 15-10°)
- 50 m zwischen -7 und +12 mm (meiste Werte +, Auffächerung bei 15-10°)

Der ganz unten liegende Strang beinhaltet die Messungen auf einen halben Tischtennisball mit einem Radius von 20 mm (s. Einzelmessungen).

Die Abhängigkeit der Messung vom Auftreffwinkel lässt sich an der Grafik der Einzelmessungen ablesen.

Tabellenlegende: Dist. = Entfernung [m], Δ_{\min} = kleinste Differenz zur Sollstrecke (Sollstrecke = Messwert bei Referenzmessung mit Prisma) [mm], Δ_{\max} = größte Differenz zur Sollstrecke [mm], DA = vereinfachte durchschnittliche Abweichung zur Sollstrecke (Mittelwert aus Δ_{\min} und Δ_{\max}) [mm], SB = Betrag der Schwankungsbreite ($|\Delta_{\max} - \Delta_{\min}|$) [mm] - alle Werte gerundet auf eine Nachkommastelle.

6.2 Weißer Reflektor

Der weiße Reflektor ist eine matte Pappe mit einem Grauwert von ca. 5%.

Alle Messwerte liegen im Plusbereich, bei 5 m zeigt sich eine Tendenz zum Referenzwert +/-0 aber Auffächerung bei flacherem Auftreffwinkel, bei 50 m zeigt sich unregelmäßiges Verhalten.

Tab. 1 Ergebnisse der Messungen auf den weißen Reflektor (H. Lang).

Dist.	Δ_{min}	Δ_{max}	DS	SB
2	+7,2	+8,8	+8,0	1,6
5	+2,1	+10,1	+6,1	8,0
10	+5,4	+7,3	+6,4	2,2
20	+6,3	+11,3	+8,8	5,0
50	+2,0	+11,0	+6,5	9,0

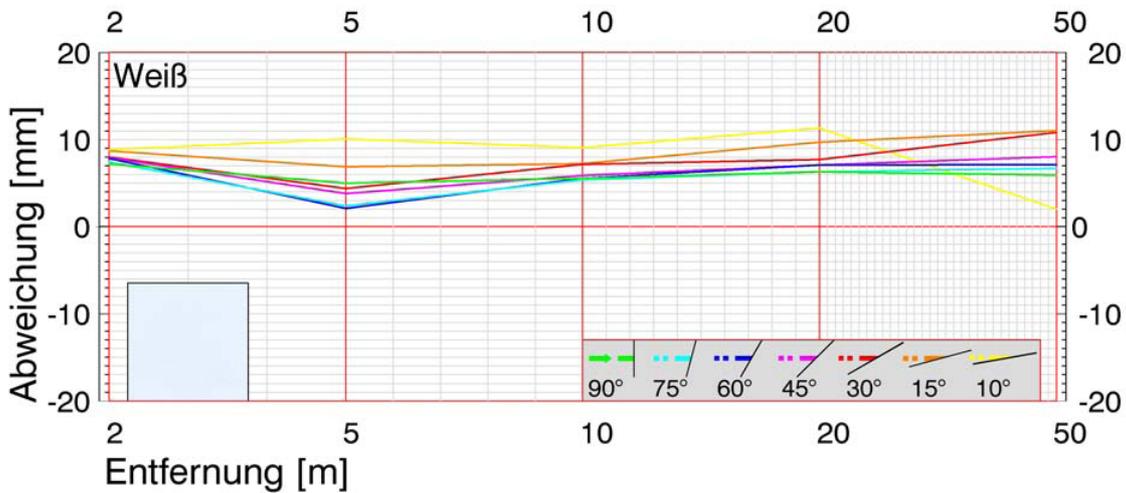


Abb. 14 Diagramm der Messungen auf den weißen Reflektor (H. Lang).

6.3 Grauer Reflektor

Der graue Reflektor ist eine matte Pappe mit einem Grauwert von ca. 19%.

Alle Messwerte befinden sich im Plusbereich, bei 5 m zeigt sich eine Tendenz zum Referenzwert hin aber Auffächerung bei kleiner werdendem Auftreffwinkel.

Tab. 2 Ergebnisse der Messungen auf den grauen Reflektor (H. Lang).

Dist.	Δ_{min}	Δ_{max}	DS	SB
2	+6,5	+8,1	+7,3	1,6
5	+0,6	+5,4	+3,0	4,8
10	+5,3	+6,9	+6,1	1,6
20	+5,3	+9,0	+7,2	3,7
50	+6,2	+9,2	+7,7	3,0

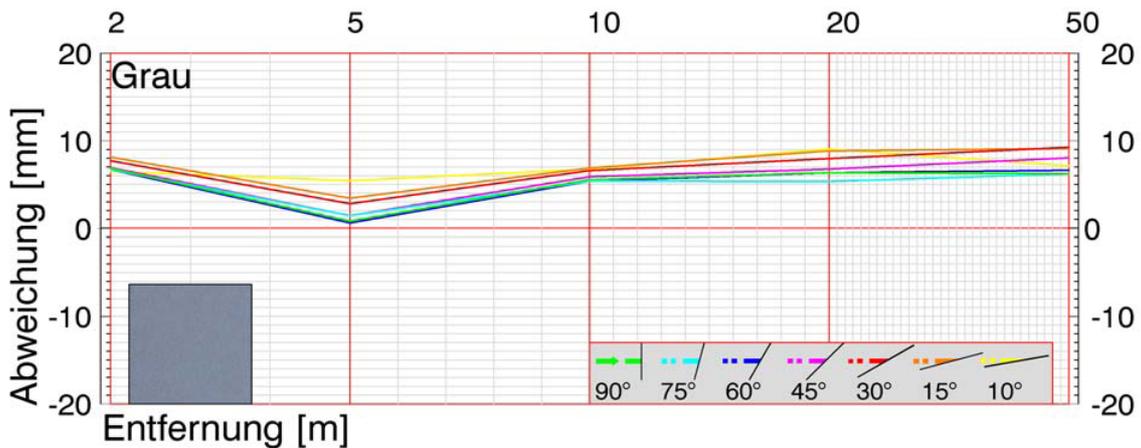


Abb. 15 Diagramm der Messungen auf den grauen Reflektor (H. Lang).

6.4 Schwarzer Reflektor

Der schwarze Reflektor ist eine matte Pappe mit einem Grauwert von ca. 90%. Alle Messwerte sind überwiegend im Plusbereich, bei 5 m Tendenz zur Annäherung zum Referenzwert, bei 50 m/15° und 10° keine Messung möglich.

Tab. 3 Ergebnisse der Messungen auf den schwarzen Reflektor (H. Lang).

Dist.	Δ_{min}	Δ_{max}	DS	SB
2	+3,2	+6,4	+4,8	3,2
5	+0,2	+5,1	+2,7	4,9
10	+5,4	+8,6	+7,0	3,2
20	+5,4	+9,0	+7,2	3,6
50	+1,7	+4,9	+3,3	3,2

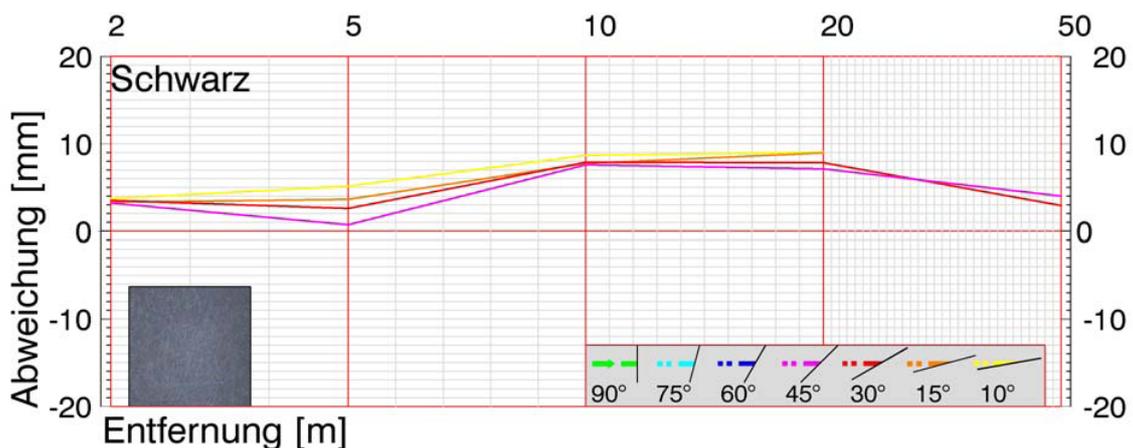


Abb. 16 Diagramm der Messungen auf den schwarzen Reflektor (H. Lang).

6.5 Orangefarbener Reflektor

Der orangefarbene Reflektor ist eine matte Signalfarbe. Alle Messwerte sind im Plusbereich, bei 5 m Tendenz zur Annäherung zum Referenzwert aber Auffächerung bei Auftreffwinkel, gleich bleibend bis 20 m.

Tab. 4 Ergebnisse der Messungen auf den orangefarbenen Reflektor (H. Lang).

Dist.	Δ_{min}	Δ_{max}	DS	SB
2	+7,3	+10,6	+9,0	3,3
5	+0,7	+6,7	+3,7	6,0
10	+4,9	+10,5	+7,7	5,6
20	+6,5	+12,5	+9,5	6,0
50	+6,4	+11,9	+9,2	5,5

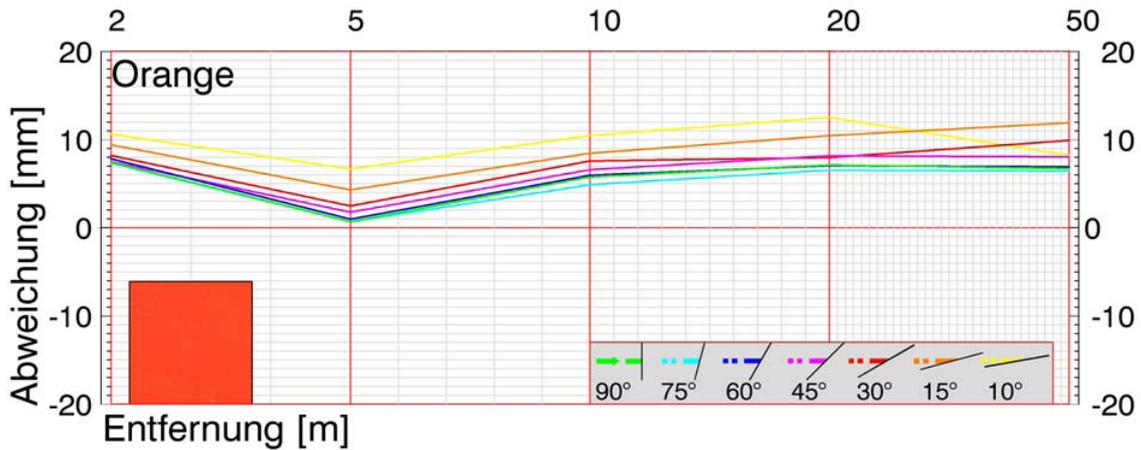


Abb. 17 Diagramm der Messungen auf den orangefarbenen Reflektor (H. Lang).

6.6 Heraklitnagel

Stahlnagel 20 x 20 mm, Stärke 1 mm, Kopf Dm. 5 mm, Stärke 2,5 mm.

Die meisten Werte sind im Plusbereich. Die Minuswerte im Bereich um 5 m sind bedingt durch die Materialstärke von 2,5 mm. Bei 50 m/10° keine Messung mehr wegen zu großer Spiegelung.

Tab. 5 Ergebnisse der Messungen auf den Heraklitnagel (H. Lang).

Dist.	Δ_{min}	Δ_{max}	DS	SB
2	+1,2	+5,6	+3,4	4,4
5	-4,4	-1,1	-2,8	3,3
10	-1,2	+3,5	+2,4	4,7
20	-1,2	+5,3	+2,1	6,5
50	-1,9	+4,9	+1,5	6,8

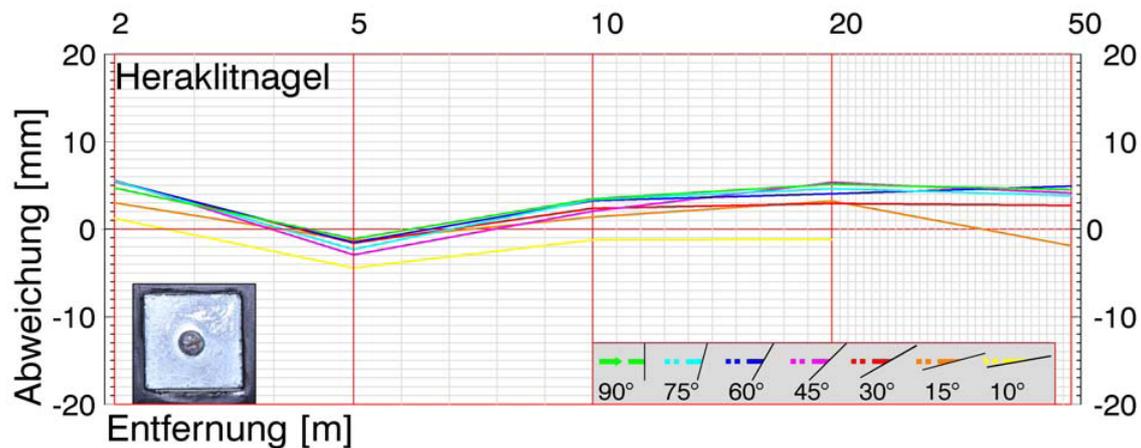


Abb. 18 Diagramm der Messungen auf den Heraklitnagel (H. Lang).

6.7 Schiefer-/Dachpappstift

Dachpappstift Dm. ca. 10 mm, Stärke 1,5 mm auf orangefarbenem Quadrat 20 x 20 mm.
Die meisten Werte im Plusbereich. Minuswerte im Bereich um 5 m sind bedingt durch die Materialstärke.

Tab. 6 Ergebnisse der Messungen auf den Schiefernagel (H. Lang).

Dist.	Δ_{min}	Δ_{max}	DS	SB
2	+1,2	+5,5	+3,4	4,3
5	-3,1	-0,9	-2,0	2,2
10	-0,1	+3,9	+1,8	4,0
20	+4,1	+4,8	+4,5	0,7
50	-1,1	+7,2	+4,2	8,3

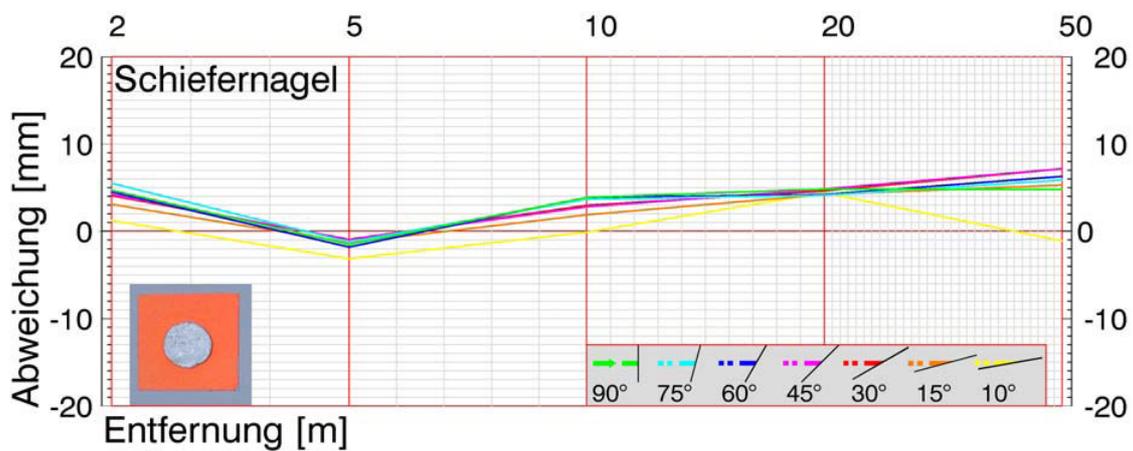


Abb. 19 Diagramm der Messungen auf den Schiefernagel (H. Lang).

6.8 Schlossschraube

Kopf einer verzinkten Schlossschraube, Dm. 15,5 mm, Stärke 4 mm.
Die meisten Werte im Plusbereich. Minuswerte bedingt durch die Materialstärke. Auffächerung der Werte bei 50 m. Möglicherweise unregelmäßiger Kurvenverlauf durch Spiegelungen bedingt.

Tab. 7 Ergebnisse der Messungen auf die Schlossschraube (H. Lang).

Dist.	Δ_{min}	Δ_{max}	DS	SB
2	+0,6	+5,2	+2,9	4,6
5	-6,1	-1,6	-3,9	4,5
10	-3,4	+2,1	-0,7	5,5
20	-0,5	+2,3	+1,5	2,8
50	-2,1	+6,3	+2,1	8,4

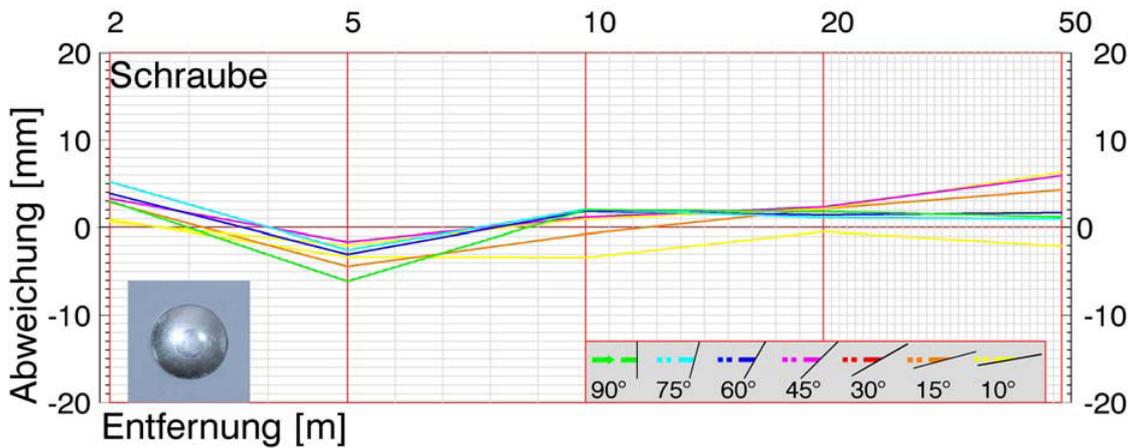


Abb. 20 Diagramm der Messungen auf die Schlossschraube (H. Lang).

6.9 Verfüllung

Simulierter Reflektor aus Erde vermisch mit Holzkohle, Grauwert ca. 60%, Materialstärke ca. 2 mm. Relativ gleichmäßige Messwerte von 90-30° sind im Plusbereich. Ab 15-10° im Minusbereich.

Tab. 8 Ergebnisse der Messungen auf die „Verfüllung“ (H. Lang).

Dist.	Δ_{min}	Δ_{max}	DS	SB
2	+0,6	+7,3	+4,0	6,7
5	-0,6	+4,7	+2,7	5,3
10	-2,1	+5,2	+3,7	7,3
20	-8,3	+5,9	-1,2	14,2
50	-7,0	+5,3	-0,8	12,3

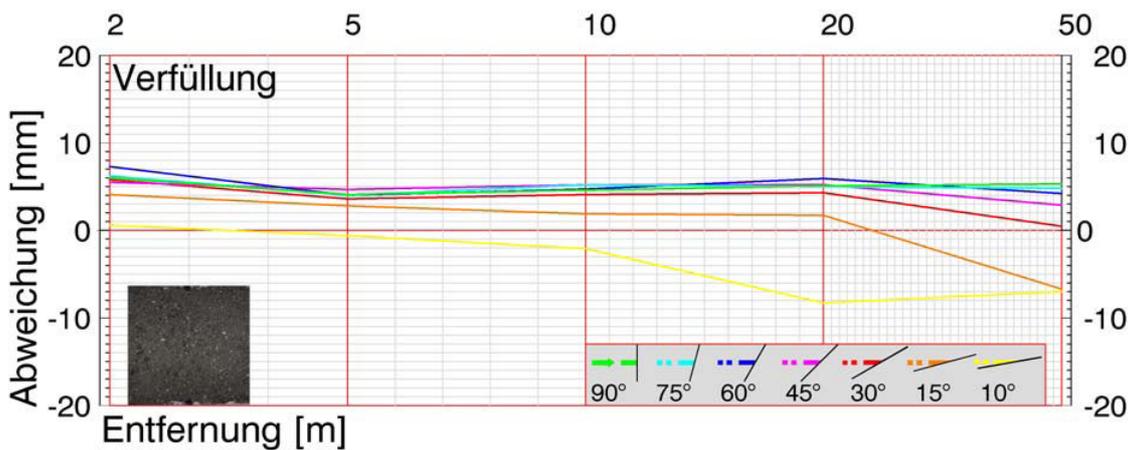


Abb. 21 Diagramm der Messungen auf die „Verfüllung“ (H. Lang).

6.10 Reflektorfolie

Handelsübliche Reflektorfolie 50 x 60 mm, gemessen im Infrarotmodus.

Sonderfall: Es sollten die Eigenschaften der Folie im Vergleich zu „natürlichen“ Reflektoren geprüft werden. Messungen sind möglich zwischen 90-60° Auftreffwinkel, bei Winkeln kleiner als 60° war kein Signal mehr zu empfangen. Eng beieinander liegende Messungen. Bester Bereich bei 5 m.

Tab. 9 Ergebnisse der Messungen auf die Reflektorfolie (H. Lang).

Dist.	Δ_{min}	Δ_{max}	DS	SB
2	+6,0	+6,8	+6,4	0,8
5	+0,1	+0,1	+0,1	0,0
10	+0,4	+0,5	+0,5	0,1
20	+0,5	+0,6	+0,6	0,1
50	+0,5	+0,6	+0,6	0,1

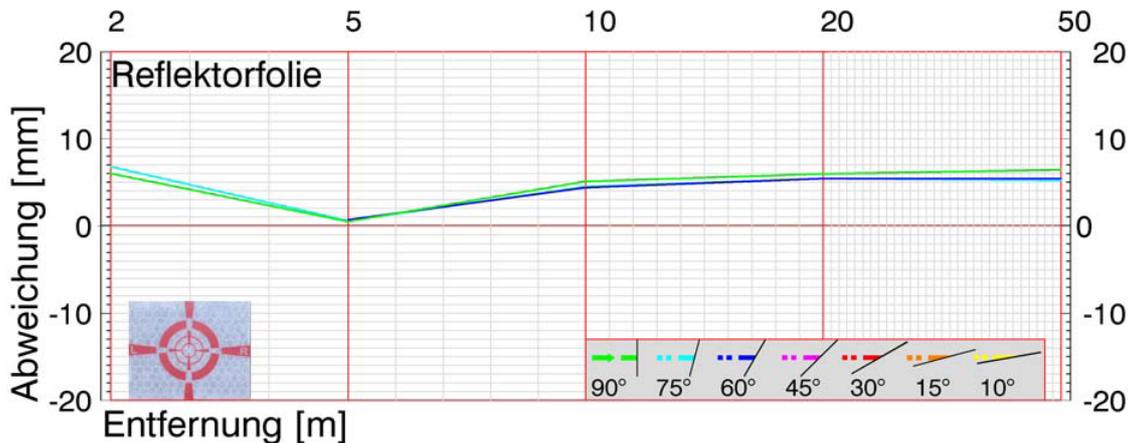


Abb. 22 Diagramm der Messungen auf die Reflektorfolie (H. Lang).

6.11 Tischtennisball

Halbierter Tischtennisball, weiß, Grauwert ca. 5%, Radius: 20 mm.

Sonderfall: Durch die Kugelgestalt zielt der Laserstrahl immer senkrecht auf die Oberfläche und wird durch die Krümmung nur leicht verzerrt. Die Messwerte sind um den Betrag 20 mm korrigiert worden. Tischtennisbälle sind bereits erfolgreich als Referenzpunkte bei Laserscans verwendet worden⁷.

Die Ergebnisse liegen sämtlich im Plusbereich und durch o.g. senkrechtetes Auftreffen eng beieinander. Genauester Bereich liegt bei 5 m.

Tab. 10 Ergebnisse der Messungen auf den halbierten Tischtennisball (H. Lang).

Dist.	Δ_{min}	Δ_{max}	DS	SB
2	+12,7	+14,5	+13,6	1,8
5	+4,3	+5,2	+4,8	0,9
10	+6,7	+7,4	+7,1	0,7
20	+8,9	+10,6	+9,8	1,7
50	+9,1	+10	+9,6	0,9

⁷ Björn-Ulf Raichl, Dreidimensionale Erfassung der Dachkonstruktion des Theaterneubaus in Potsdam (Diplomarbeit TFH Berlin, 2005).

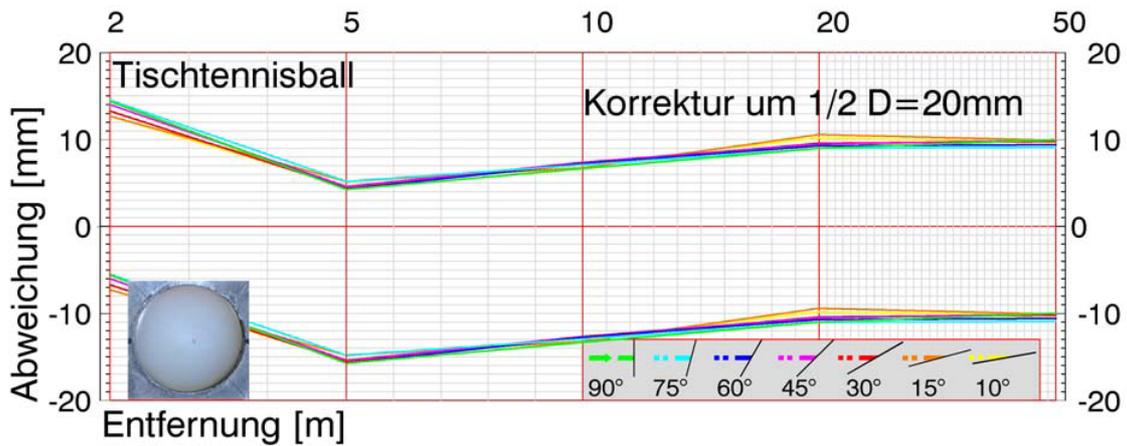


Abb. 23 Diagramm der Messungen auf den halbierten Tischtennisball (H. Lang).

7 Fazit und Empfehlungen

Die Messungen auf den Tischtennisball zeigen im Vergleich zu den flachen Reflektoren, dass es Abhängigkeiten vom Auftreffwinkel gibt. Der Laserstrahl wird bei Winkeln zwischen 30° und 10° in die doppelte bis dreifache Länge gezogen (s. Abb. 2), das Ergebnis ist also in hohem Maße abhängig vom exakten Auftreffen auf den Mittelpunkt des Reflektors.

Bei den Entfernungen liegt der genaueste Bereich bei 5 m und zwischen 2 und 20 m, wenn man die Ergebnisse der Auftreffwinkel berücksichtigt, deren bester Bereich zwischen 90° und 30° liegt. Da alle Messungen im Plusbereich liegen, könnte eine Korrektur der Reflektorkonstante um ca. -4 mm die Genauigkeit in den Bereich +/-4 mm im Vergleich zur Referenzmessung Verbesserung bringen.

Als beste Reflektoren erwiesen sich helle bis dunkle matte Oberflächen, wobei sich bei den dunkleren Oberflächen die Registrierzeiten verlängern.

Reflektoren mittlerer Güte sind die kombinierten Nägel und die Schraube, letztere könnte bessere Ergebnisse bringen, wenn die Oberfläche rauer, weniger spiegelnd wäre.

Zwar noch messbar, aber in Bezug auf den Reflexionswinkel nicht empfehlenswert sind schwarze Reflektoren oder die Reflektorfolie (Abb. 24 und 25).

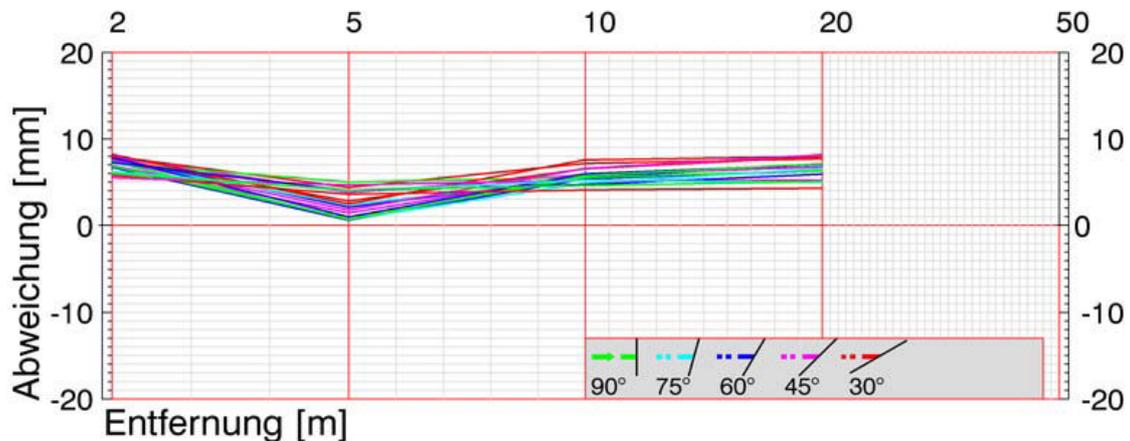


Abb. 24 Reduktion der Messungen auf den genauesten Bereich zwischen 2 m und 20 m und 90° bis 30° (H. Lang).

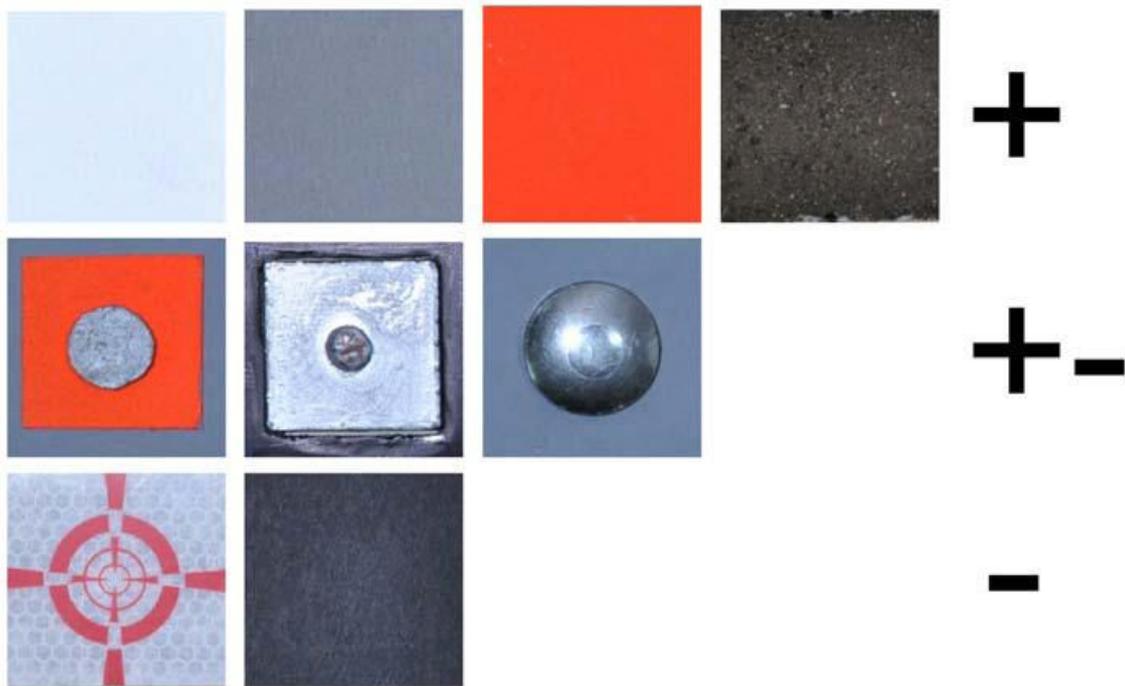


Abb. 25 Positiv- und Negativbewertungen der Reflektoren (H. Lang).

Anschrift des Verfassers:

Hans Lang
Regierungspräsidium Stuttgart
Landesamt für Denkmalpflege
Referat 85
Neue Straße 34
89073 Ulm

Technische Daten: Leica TCR 407 power

Aus dem Bedienungshandbuch⁸ sind die Standardabweichungen und Messzeiten in Abhängigkeit von der gewählten Messmethode zu entnehmen:

Tab. 11 Herstellerangaben zu Messgenauigkeit und –zeit des TCR 407 (nach Leica Gebrauchsanweisung).

Messprogramm	Genauigkeit (Standardabweichung)	Messzeit
Infrarotmodus fein	2 mm + 2 ppm	1,0 Sek.
Infrarotmodus rasch	5 mm + 2 ppm	0,5 Sek.
Infrarotmodus track	10 mm + 2 ppm	< 0,15 Sek.
Infrarotmodus Folie	5 mm + 2 ppm	1,0 Sek.
reflektorloser Modus kurz	3 mm + 2 ppm	3,0 Sek. (+1,0 Sek./10 m > 30m)
reflektorloser Modus track	5 mm + 2 ppm	1,0 Sek. (+0,3 Sek./10 m)
reflektorloser Modus Prisma	5 mm + 2 ppm	Typ. 2,5 Sek., max. 8 Sek.

Software

Datenübertragung: Leica Survey Office/ Data Exchange Manager

Format-Editor: Leica Survey Office/ Format Manager

Prozessierung der Daten: AutoCad 2008 (Autodesk), ArchäoCad 7.1(Arctron)

Fotoentzerrung: PhoToPlan 4.1.01 (kubit)

Abbildungsnachweis

Abb. 1-4, 7, 9-25: Hans Lang

Abb. 5: Fabien2005, auf Wikimedia Commons (gemeinfrei):

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reflexion_speculaire_fr.png und

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reflexion_diffuse_fr.png (13.06.2012)

Abb. 6: Tilman Wanke

Abb. 8: Jörg Bofinger, Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg

Tab. 1-10: Hans Lang

Tab. 11: Angaben nach: Leica Geosystems AG, Leica TPS400 Series. Gebrauchsanweisung (Heerbrugg 2005), 82-83.

⁸ Leica Gebrauchsanweisung (Anm. 4), 82-83.