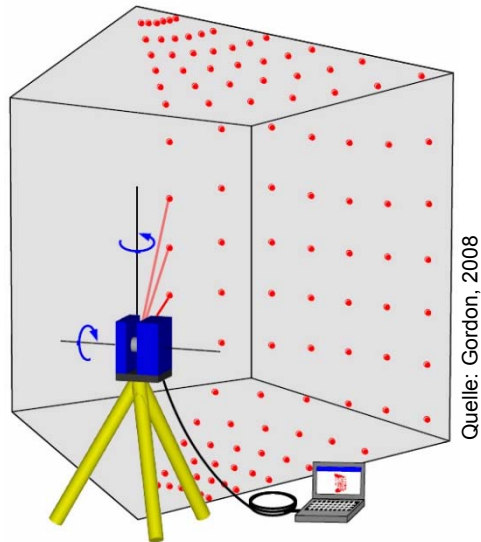


Terrestrische 3D-Laserscanner sind komplexe Messsysteme, die berührungslos Messobjekte abtasten und somit deren Dimension und Gestalt dreidimensional erfassen können.



Das Prinzip des terrestrischen Laserscannings

Die dreidimensionale Abtastung wird möglich, indem ein kollimierter Laserstrahl in zwei zueinander orthogonalen Richtungen in diskreten Winkelintervallen abgelenkt wird. Als Messdaten erhält der Anwender sogenannte **Punktwolken**, die aus 3D-Messpunkten mit ihren x-, y- und z-Koordinaten bestehen. Der Aufbau eines terrestrischen Laserscanners ist dem Aufbau eines motorisierten, reflektorlos messenden Tachymeters sehr ähnlich. Im Wesentlichen besteht er aus folgenden drei Komponenten (Gordon, 2008):

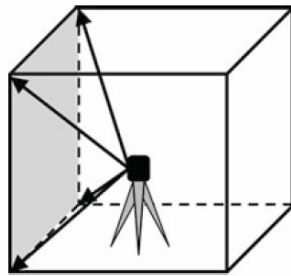
1. Entfernungsmesseinheit
2. Einheit zur Ablenkung des Laserstrahls in zwei zueinander orthogonalen Richtungen (meist horizontal und vertikal)
3. Steuer- und Aufzeichnungseinheit

LiDAR (Light Detection and Ranging)

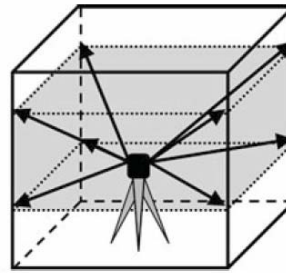
Messgrößen:

- 2 Winkel (Hz, V)
- Schrägdistanz
- Signalintensität bzw. Reflektivität

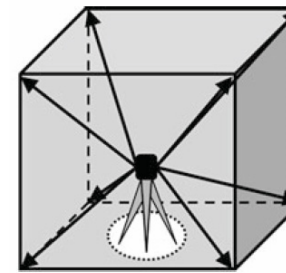
Je nach Instrument bestehen unterschiedliche Anforderungen an das Gesichtsfeld des Laserscanners. Dieses Gesichtsfeld beschreibt den Bereich des den Laserscanner umgebenden Raums, der aufgrund der realisierten Strahlablenkung abgetastet werden kann.



a) Kamerascanner

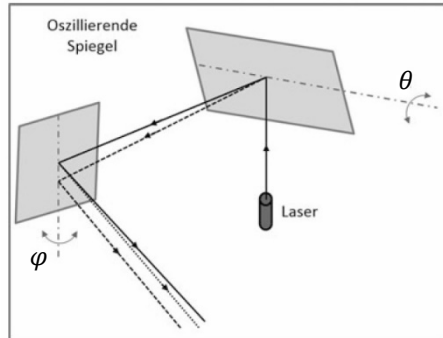


b) Hybridscanner

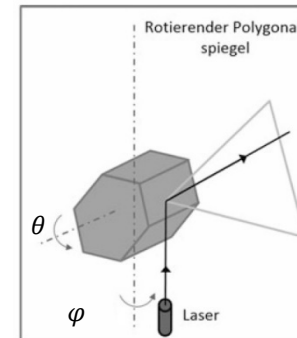


c) Panoramascanner

Abb. 1: Räumlicher Sichtbereich
(Quelle: Kuhlmann & Holst, 2017)

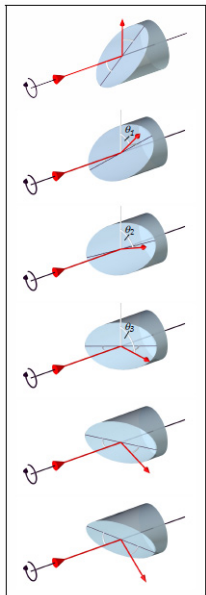


a) Abtastung mit zwei oszillierenden Spiegeln



b) Abtastung mit rotierendem Polygonalspiegel
(auch Bauweise mit oszillierendem Spiegel möglich)

Abb. 2: Skizzierter Aufbau eines Kamerascanners (a) und Hybridscanners (b)
(Quelle: Kuhlmann & Holst, 2017)



Quelle: Gordon, 2008

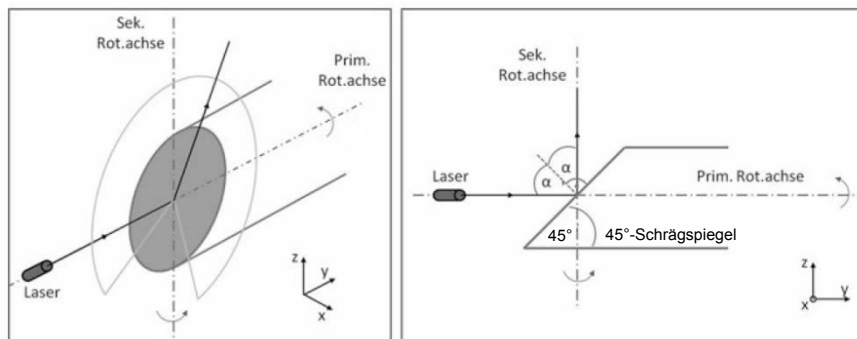


Abb. 3: Skizzierter Aufbau eines Panoramascanners
(Quelle: Kuhlmann & Holst, 2017)

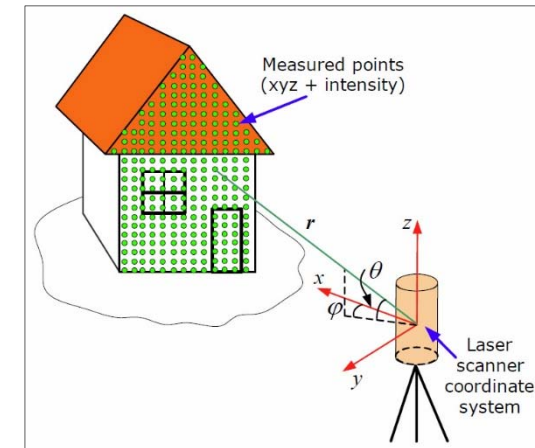
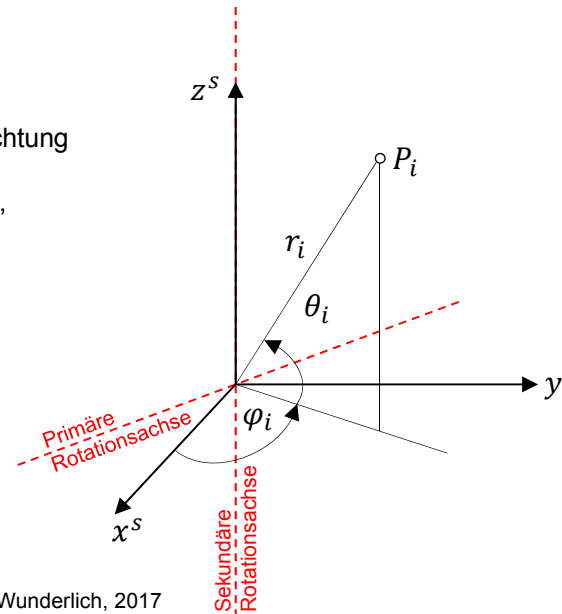
Durch die hochfrequente Vertikalrotation des Spiegels um die Kippachse (primäre Rotationsachse) und die niederfrequente Rotation des gesamten Systems um die Stehachse wird die räumliche Ablenkung erzeugt.



FARO Focus S 350 mit Schrägspiegel

Scanner-eigenes Koordinatensystem (SKS: X^S)

- z^S -Achse = Sekundäre Rotationsachse
- x^S -Achse = orthogonal auf z^S , Ausgangsrichtung für Messung des Winkels φ in $x^S y^S$ -Ebene
- y^S -Achse = Ergänzung auf rechtshändiges, orthogonales KS



The principle of terrestrial laser scanning and laser observables (Quelle: Reshetyuk, 2009)

Rohe Messdaten:

- Distanz: r_i
- Drehwinkel
 - um primäre Rotationsachse: θ_i
 - um sekundäre Rotationsachse: φ_i
- bei horizontiertem Scanner sind das Vertikalwinkel und Richtung

$$\begin{pmatrix} x_i^S \\ y_i^S \\ z_i^S \end{pmatrix} = r_i \cdot \begin{pmatrix} \cos\varphi_i \cos\theta_i \\ \sin\varphi_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i \end{pmatrix}$$

$$\varphi_i = \operatorname{atan}\left(\frac{y_i^S}{x_i^S}\right)$$

$$\theta_i = \operatorname{atan}\left(\frac{z_i^S}{\sqrt{x_i^{S2} + y_i^{S2}}}\right)$$

$$r_i = \sqrt{x_i^{S2} + y_i^{S2} + z_i^{S2}}$$

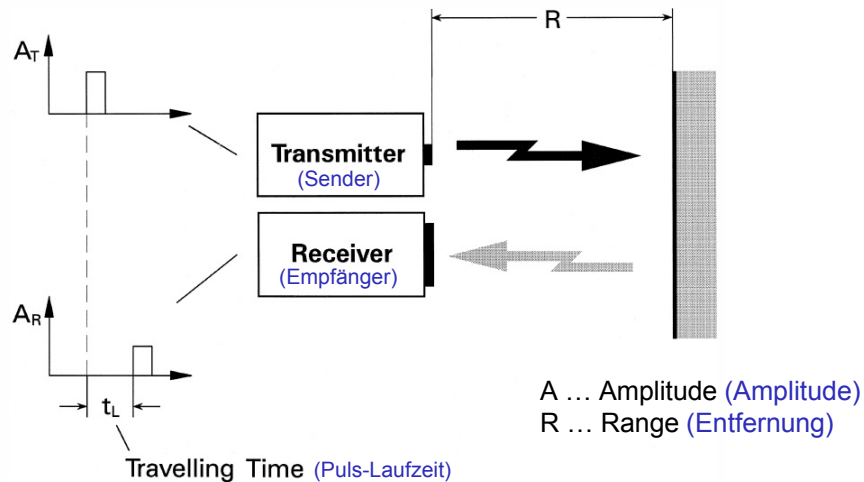
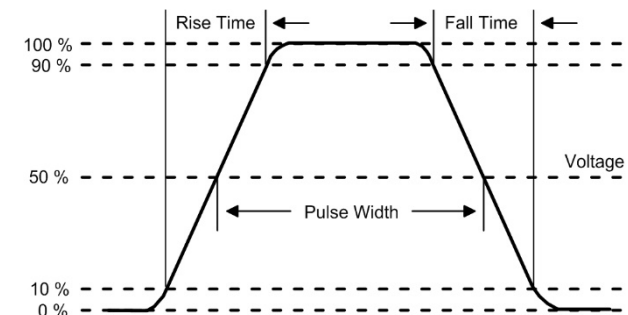


Abb. 1: Time-of-flight ranging (Laufzeitmessung)
(Quelle: Wehr & Lohr, 1999)

Von der Laserdiode (Sender) wird ein Laserpuls erzeugt, dieser wird am Objekt reflektiert und im Empfänger detektiert. Durch die Messung der Puls-Laufzeit kann auf die Strecke geschlossen werden. Diese Strecke hängt damit neben der Zeitmessung nur von der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts c ab, die sich wiederum aus der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum $c_0 = 299.972.458 \text{ m/s}$ und dem Brechungskoeffizienten des Ausbreitungsmediums n ergibt: $n = c_0 / c$. Das Impulsmessverfahren eignet sich insbesondere für große Messentfernungen (Kuhlmann & Holst, 2017).



Pulse:

Range: $R = \frac{1}{2} c \cdot t_L$

Range Resolution: $\Delta R = \frac{1}{2} c \cdot \Delta t_L$

Max. Range: $R_{\max} = \frac{1}{2} c \cdot t_{L_{\max}}$

Range Accuracy: $\sigma_R = \frac{c}{2} t_{\text{rise}} \cdot \frac{1}{\sqrt{S/N}}$

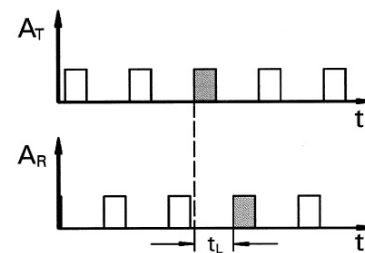


Abb. 2: Measuring principle of pulse-lasers
(Quelle: Wehr & Lohr, 1999)

t_{rise} ... (Puls-Anstiegszeit)
 t_L ... Travelling Time of the Pulse (Pulslaufzeit)
 Δt_L ... Time Resolution (Pulsdauer)
 ΔR ... Range Resolution (Entfernungsaufösung)
 S/N ... Signal-to-Noise Ratio (Signal-Rauschverhältnis)
 σ_R ... Range Accuracy (Entfernungsmessgenauigkeit)

$$S/N = \frac{\text{signal power of the photodiode current}}{\text{thermal noise power of the photodiode and amplifier}}$$

Beim Phasenvergleichsverfahren wird die Strecke über Analyse der abgestrahlten und nach Reflexion am Objekt wieder empfangenen Trägerwelle des Laserstrahls bestimmt. Dafür wird der Trägerwelle ein harmonisches Signal mit der Wellenlänge λ_M aufmoduliert. Die doppelte Strecke setzt sich dabei aus der Anzahl N komplett zurückgelegter Schwingungen sowie dem Wellenreststück $\Delta\lambda_M$ zusammen, sodass für die einfache Strecke R gilt:

$$R = \frac{1}{2}(N \cdot \lambda_M + \Delta\lambda_M) \cdot$$

Während das Wellenreststück und die daraus abgeleitete Phasenverschiebung die eigentliche Messgröße ist, können die Mehrdeutigkeiten N über die Messung mit unterschiedlichen Frequenzen bestimmt werden. Diese Messgröße und die daraus resultierende Strecke hängen von der Dichte der Atmosphäre ab.

Die Genauigkeiten beim Phasenmessverfahren übersteigen die des Impulslaufzeitverfahrens, die Messdistanz ist aber aufgrund des begrenzten Eindeutigkeitsbereichs zur Lösung der Mehrdeutigkeit auf Strecken bis ca. 200 m begrenzt. Die zeitliche Auflösung derzeit am Markt erhältlicher Laserscanner mit dem Phasenvergleichsverfahren beträgt maximal ca. 1 Million Punkte pro Sekunde.

Sinusoidal CW-Modulation:

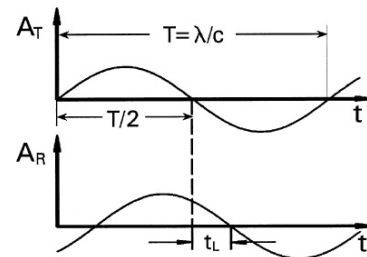
$$\left. \begin{array}{l} \text{Travelling Time by} \\ \text{Phase Difference:} \end{array} \right\} \begin{array}{l} T \triangleq \frac{2\pi}{\Phi} \\ t_L \triangleq \Phi \end{array} \Rightarrow t_L = \frac{\Phi}{2\pi} \cdot T$$

$$\text{Range:} \quad R = \frac{1}{2} c \cdot \frac{\Phi}{2\pi} \cdot T = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Phi$$

$$\text{Max. Unamb. Range: } R_{\max} = \frac{\lambda_{\text{long}}}{2}$$

$$\text{Range Resolution:} \quad \Delta R = \frac{\lambda_{\text{short}}}{4\pi} \cdot \Delta\Phi$$

$$\text{Range Accuracy:} \quad \sigma_R = \frac{\lambda_{\text{short}}}{4\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{S/N}}$$



CW ... Continuous Wave

$\lambda = \lambda_M$... Wavelength (modulated sinusoidal signal)

t_L ... Travelling Time of the Signal (Signallaufzeit)

Φ ... phase difference (Phasendifferenz)

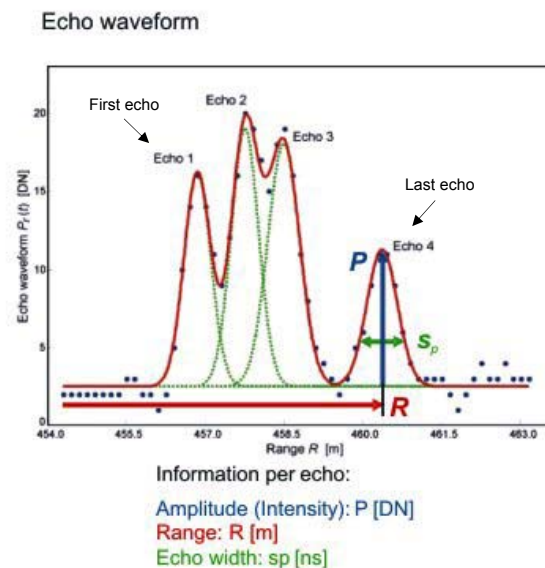
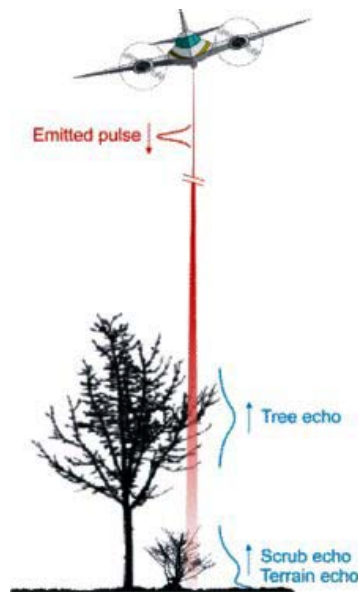
S/N ... Signal-to-Noise Ratio (Signal-Rauschverhältnis)

σ_R ... Range Accuracy (Entfernungsmessgenauigkeit)

Abb. 3: Measuring principle of CW-lasers
(Quelle: Wehr & Lohr, 1999)

Full Waveform (FW) LiDAR

- Signaldigitalisierung mit z.B. 1 GHz (= 1 ns auf der Zeitachse) und anschließende Signalanalyse (z.B. Gaussian Decomposition)
- Ursprünglich entwickelt für Airborne Laser Scanning (ALS); siehe unten
- Inzwischen auch für TLS erhältlich
(Vergleiche dazu auch das Wave Form Digitising (WFD) von Leica Geosystems für die MultiStation MS50/60:
https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/nova_ms50/white-tech-paper/Leica_Nova_MS50_WFD-Wave_Form_Digitizer_Technology_TPA_en.pdf)



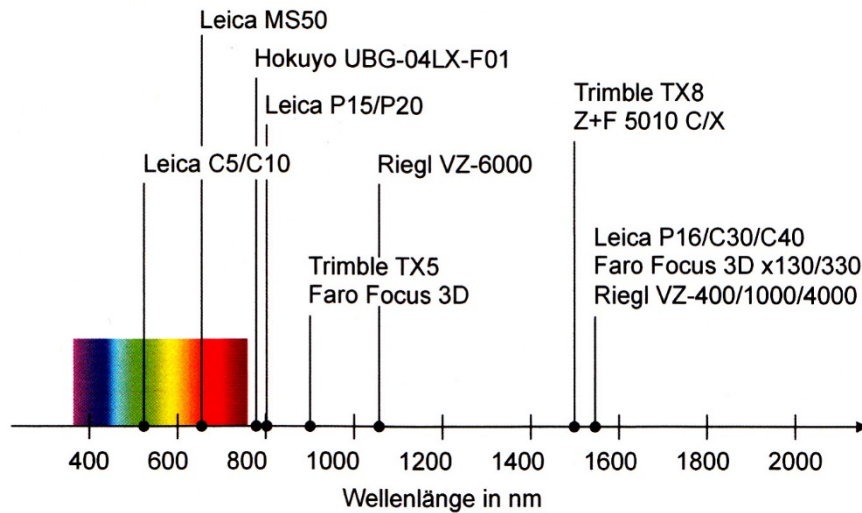
Full-Waveform-Laserscanning erlaubt es, sowohl geometrische wie auch radiometrische Information von Oberflächen in der gleichen räumlichen Auflösung zu erhalten, die noch dazu zeitgleich und vom selben Standpunkt erfasst wurden. Echoparameter, welche meist durch eine **Gauß'sche Zerlegung (Gaussian decomposition)** der Echowellenform bestimmt werden, sowie Oberflächeneigenschaften, die (geo-)physikalische Größen darstellen und daher unabhängig von den Parametern der Datenerfassung sind, werden zu den Zusatzattributen einer Laserscanning-3DPunkt wolke gezählt (Roncat, 2016).

Schematische Abbildung Full-waveform ALS

(Quelle: <https://www.geo.tuwien.ac.at/opais/html/ModuleFullwave.html> bzw. Roncat, 2016)

Je nach Instrument

- Laserlicht im nahen Infrarot oder im sichtbaren Bereich
- Laserklasse 1 (ungefährlich) bis 3B (Sicherheitsmaßnahmen!)



Quelle: Wieser & Wunderlich, 2017

RIEGL LMS-Z620



according to IEC60825-1:1993+A1:1997+A2:2001
The following clause applies for instruments delivered into the United States:
Complies with 21 CFR 1040.10 and 1040.11 except for deviations pursuant
to Laser Notice No. 50, dated July 26, 2001.

Klasse 1: Sicher durch niedrige Bestrahlungsstärke oder sichere Einhausung.

FARO Laser Scanner Photon 20 / 120



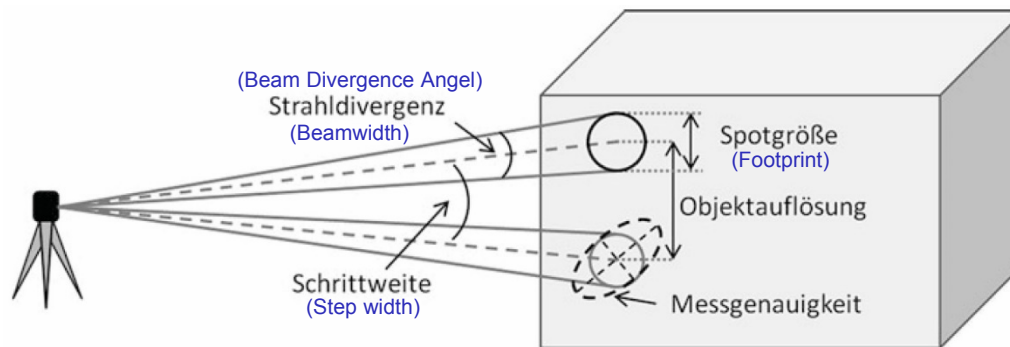
Der größte Augensicherheitsabstand beträgt 19 m.



Laserschutzbrille

Klasse 3R: Potentiell gefährlich für die Augen, reduzierte Schutzmaßnahmen erforderlich.

Die Strahldivergenz bestimmt maßgeblich die tatsächliche räumliche Auflösung am Messobjekt (Abb. 1). Die Strahldivergenz beschreibt, dass sich das Licht beim Austritt aus dem Laser beugt und den Gesetzen der Wellentheorie folgend an den Rändern nach außen abgelenkt wird. Diese Gesetzmäßigkeit fußt auf der Ausbreitung eines **Gaußstrahls**. Aus dieser Gegebenheit folgt, dass der Laser am Objekt nicht punktförmig, sondern mit einer gewissen Spotgröße reflektiert wird. Diese Spotgröße lässt sich streng auf Basis der Wellenlänge des Lasers, der Strecke und des Radius der Strahltaile (beam waist) berechnen. In dieser Betrachtung ist enthalten, dass der Laserspot sein Minimum aufgrund der Kollimation des Lichts erst wenige Meter nach seiner Erzeugung annimmt (Abb. 2).



Für beim Laserscanning übliche Strecken s von mindestens mehreren Metern ist aber auch eine Faustformel für die Berechnung des Spotdurchmessers basierend auf der Divergenz γ und dem Spotdurchmesser bei Laseraustritt D_0 zulässig (Kuhlmann & Holst, 2017):

$$D(s) = D_0 + 2 \cdot s \cdot \tan \frac{\gamma}{2} \approx D_0 + s \cdot \gamma$$

Abb. 1: Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning: Zusammenhang zwischen Strahldivergenz, Schrittweite, Spotgröße, Objektauflösung und Messgenauigkeit (Quelle: Kuhlmann & Holst, 2017)

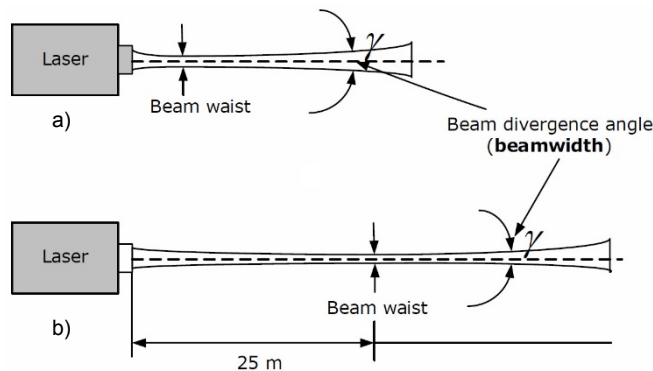


Abb. 2: a) Definition of the beam waist of a laser beam and beam divergence;
b) location of the beam waist in the scanners Leica HDS 2500 and Leica HDS 3000 (Quelle: Reshetyuk, 2009).

- Energiedichte im Strahl nimmt mit steigender Entfernung orthogonal zur Ausbreitungsrichtung ab.

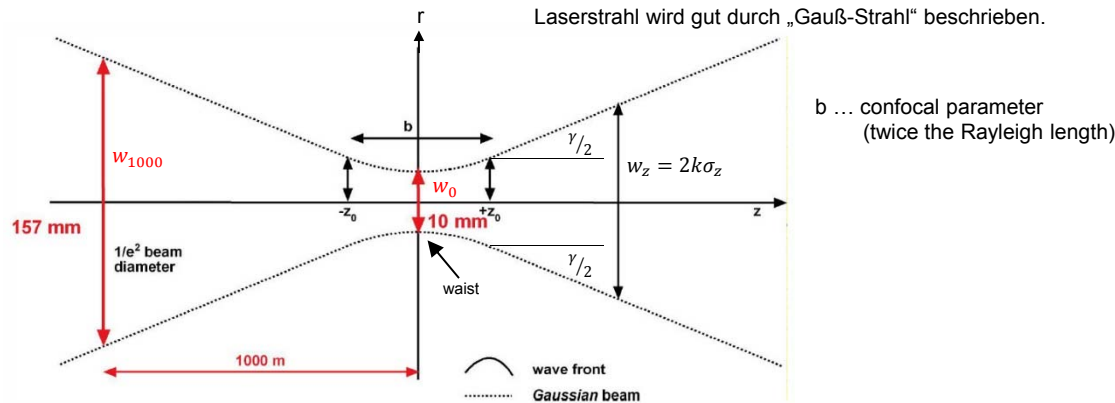
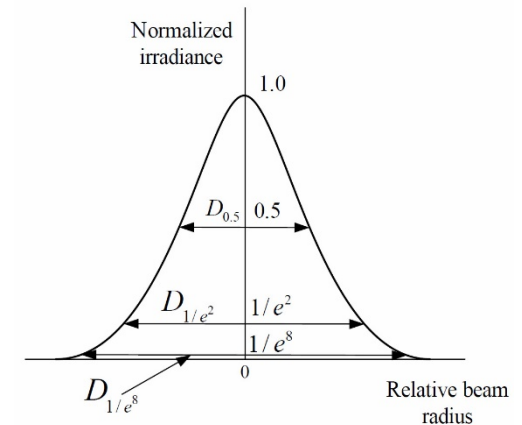


Abb. 3: Size of the footprint (beam diameter) as a function of the axial distance z using instrument LMS-Z620 (Source: Avian, 2015)



(Quelle: Reshetyuk, 2009)

- Strahlungsdichte:

$$E(r, z) = E(0, z) \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

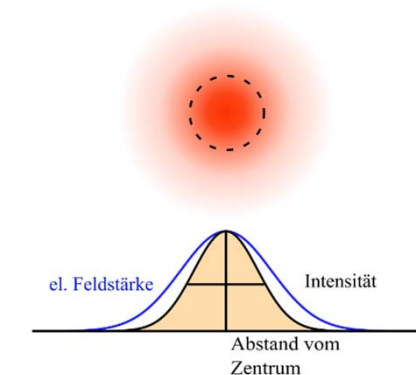
$$\sigma_z = \sigma_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{4\pi\sigma_0^2}\right)^2}$$

λ ... Wellenlänge [m]
 z ... Entfernung von Strahlmitte entlang Strahlmitte [m]
 r ... radialer Abstand von Strahlmitte [m]
 σ_0 ... Formparameter [m]
 $E(0, z)$... maximale Strahlungsdichte in Entfernung z [W/m²]

- Strahldivergenz proportional zur Wellenlänge und umgekehrt proportional zur Taille
- Spezifikation von Strahldurchmesser w_z in Entfernung z , und damit Footprint, erfordert Bezug zu prozentueller Strahlungsleistung:

- Half-Power-Beamwidth (HPBW)**
 Taille $w_0 = 2.36\sigma_0$; $k = 1.18$; (50% innerhalb, 50% außerhalb)
- 1/e² – Durchmesser**
 Taille $w_0 = 4\sigma_0$; $k = 2$; (86% innerhalb, 14% außerhalb)

- Energieverteilung in realem Strahl weicht u.U. deutlich von Gauß-Strahl ab.



Feldstärke und Intensität eines Laserstrahls
<https://de.wikipedia.org/wiki/Laser>

(Quelle: Wieser & Wunderlich, 2017)

Die Spotgröße (**Footprint**) ergibt sich aus dem Strahlendurchmesser in der Strahlentaille, der Strahlendivergenz und der Entfernung zum Messobjekt und ist eine linear wachsende Größe. Durch die Strahlendivergenz wird der aufkommende Laserpunkt mit zunehmender Messentfernung größer, dadurch wirkt sie sich direkt auf die Kantenerkennung aus. Je kleiner die Strahlendivergenz ist, desto präziser kann ein Objekt bzw. Kante durch einen Punkt erfasst werden.

Im Kantenbereich wird nur ein Teil des Laserspots von der Oberfläche reflektiert. Der andere Teil wird entweder von einem im Hintergrund liegenden Objekt oder gar nicht reflektiert. Dadurch kommt es zu Mischsignalen, die zu Abrundungseffekten und Kometenschweif-Effekten (Abb. 1) führen.

Auch das Zusammenspiel (Abb. 2) zwischen Spotgröße und Schrittweite wirkt sich auf die Kantenerkennung aus. Bei einer zu geringen Schrittweite entstehen Korrelationen zwischen benachbarten Messungen und führen dazu, dass Details verschwommen sind (Knaack et al., 2019).

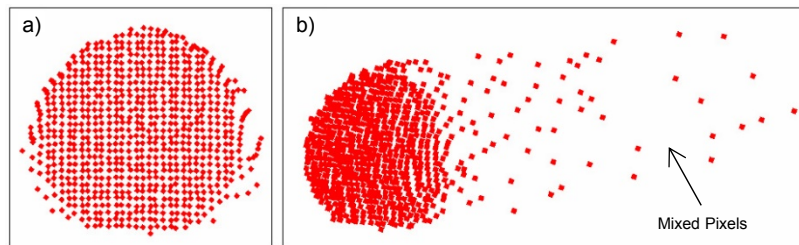


Abb. 1: Der „Kometenschweif“-Effekt am Beispiel einer gescannten Kugel:
a) Frontalansicht; b) Schrägansicht mit „Kometenschweif“ (Quelle: Gordon, 2008)

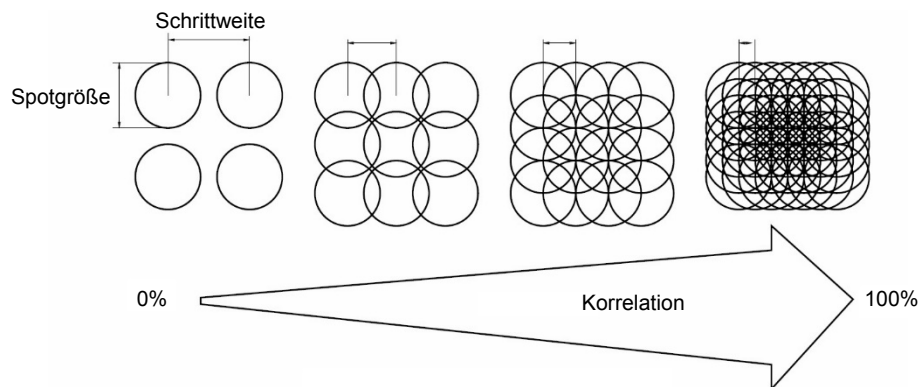
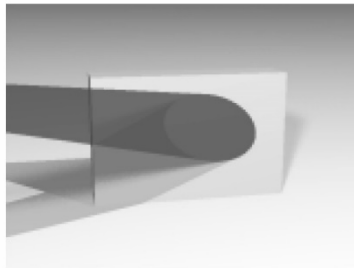
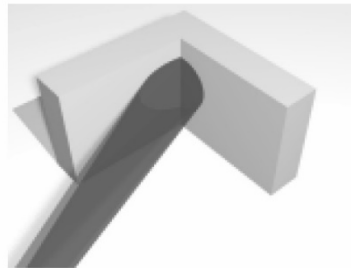


Abb.2: Das Zusammenspiel von Schrittweite und Spotgröße (Quelle: Kern, 2002)

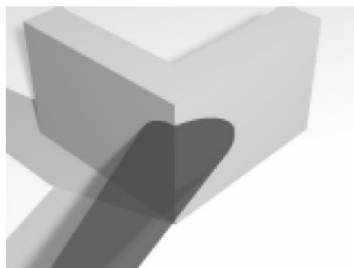
Der Auftreffwinkel beschreibt den Winkel zwischen Laserscanner-Standpunkt, dem Punkt auf dem Zielobjekt und der Oberflächennormalen im Objektpunkt. Durch den flachen Auftreffwinkel wird zum einen die Intensität des reflektierten Strahls geschwächt und zum anderen trifft der Laserstrahl als Ellipse auf das Objekt. Beide Effekte verfälschen die Streckenmessung. Die elliptische Form muss auch bei der Kantenerkennung berücksichtigt werden, da dadurch Streueffekte im Kantenbereich früher auftreten als bei einem kreisrunden Spot. Die Streupunkte führen zu Kometenschweif-Effekten (Abb. 1) (Knaack et al., 2019).



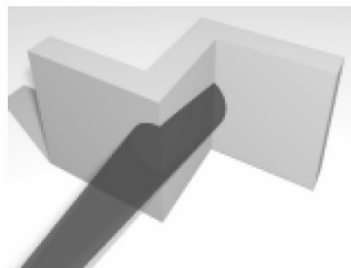
a) Schräge Reflexionsfläche



b) Konkave Kante (Kehle)



c) Konvexe Kante (Grat)



d) „Stufe“ bzw. „Streiflicht“

Abb. 3: Ausprägungen der Reflexionsfläche im Zusammenhang mit der Strahldivergenz
(Quelle: Kern, 2002)

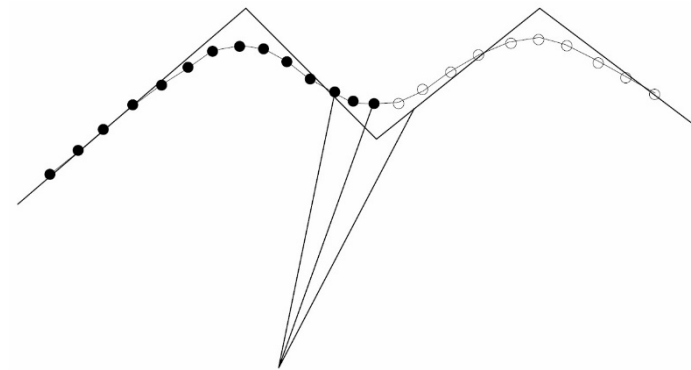
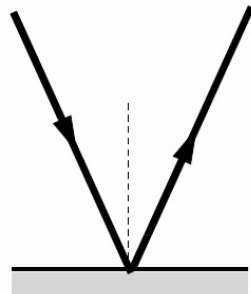
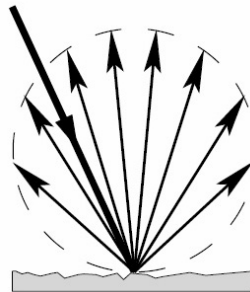


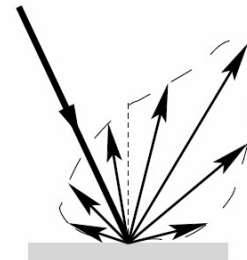
Abb. 4: Abrundungseffekt bei der reflektorlosen Streckenmessung
(Quelle: Kern, 2002)



a) spiegelnde Reflexion



b) diffuse Reflexion

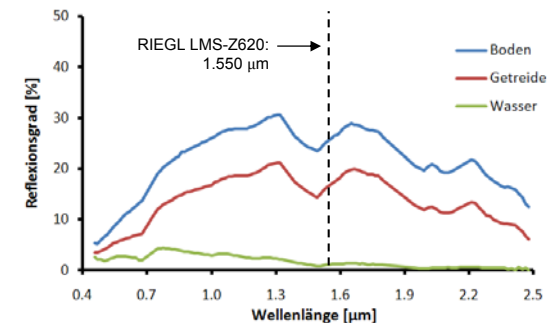
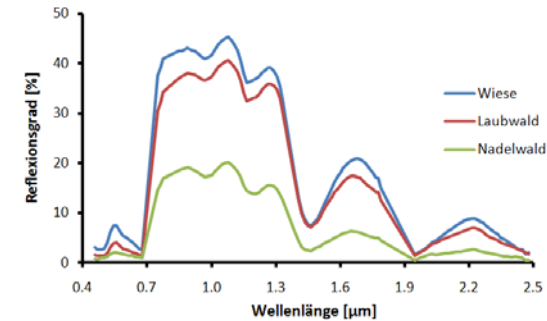


c) diffuse Reflexion mit Spiegelung

Die Art der Reflexion hängt von der Oberflächenrauigkeit ab.
Die Rauigkeit selbst ist wiederum von der Wellenlänge λ des auftreffenden Lichtes abhängig.
Die Art der Reflexion an sich hat nur insoweit eine Auswirkung auf die Streckenmessung als sie fehlschlägt, falls nicht genügend Energie zurückgeworfen wird (Kern, 2003).

Material	Reflectivity (%)
Dimension lumber (pine, clean, dry)	94
Snow	80–90
White masonry	85
Limestone, clay	Up to 75
Deciduous trees	Typ. 60
Coniferous trees	Typ. 30
Carbonate sand (dry)	57
Carbonate sand (wet)	41
Beach sands, bare areas in desert	Typ. 50
Rough wood pallet (clean)	25
Concrete, smooth	24
Asphalt with pebbles	17
Lava	8
Black neoprene (synthetic rubber)	5

Typical reflectivity of various diffuse reflecting materials for 900 nm wavelength (modified from WEB pages of the company Riegli), Quelle: Wehr & Lohr, 1999



https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Reflexionsgrad_6spektrn.png

Reflexionsgrad ρ (CC-by-sa 3.0/de)

Auswahl:

- Avian, M., 2015: Application of terrestrial laserscanning in the assessment of geomorphological processes in the Hohe Tauern Range, Austria. Dissertation, URBI-Fakultät, Karl-Franzens-Universität Graz, 160 S.
- Gordon, B., 2008: Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner. Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie, Technische Universität Darmstadt, D17, 194 S.
- Kern, F., 2003: Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten. Dissertation, Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, 19, 164 S.
- Kuhlmann, H., Holst, C., 2017: Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning. Messtechnik, flächenhafte Modellierung und aktuelle Entwicklungen im Bereich des terrestrischen Laserscannings. In: Schwarz, W. (Hrsg.), Ingenieurgeodäsie, Springer Spektrum, 167-212.
- Reshetyuk, Y., 2009: Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Doctoral thesis in Infrastructure, Geodesy, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, TRITA-TEC-PHD 09-001, 162 p.
- Roncat, A., 2016: Full-Waveform-Laserscanning: Moment(e), da geht noch mehr! Vermessung & Geoinformation, 4, 167-177.
- Wieser, A., Wunderlich, T., 2017: Tutorial „Monitoring mit Terrestrischem Laserscanning (TLS)“, Ingenieurvermessungskurs '17, 25.4.2017, TU Graz, schriftliche Unterlagen.
- Wehr, A., Lohr, U., 1999: Airborne laser scanning – an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54, 68-82.