

Institut für Photogrammetrie und Kartographie  
der Technischen Universität München  
Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung

# Analyse der zeitlichen Signalform von rückgestreuten Laserpulslen

Boris Jutzi

Dissertation

2007



Institut für Photogrammetrie und Kartographie  
der Technischen Universität München  
Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung

## Analyse der zeitlichen Signalform von rückgestreuten Laserpulslen

Boris Jutzi

Vollständiger Abdruck  
der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen  
der Technischen Universität München  
zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Wunderlich

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Stilla
2. Univ. Prof. Dr. techn. Norbert Pfeifer,  
Technische Universität Wien/Österreich

Die Dissertation wurde am 08.06.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht  
und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 11.09.2007 angenommen.



## Kurzfassung

Bei gepulsten Lasersystemen erfolgt die Bestimmung der Entfernung zu einem angeleuchteten Objekt durch Messung der Laufzeit eines Pulses. Die Zeitmessung wird typischerweise aus einem charakteristischen Wert der empfangenen Signalform des rückgestreuten Pulses bestimmt. Kritische Messsituationen ergeben sich, falls die zeitliche Signalform des rückgestreuten Pulses deformiert ist oder mehr als ein Puls rückgestreut wird. Solche Rückstreuungen ergeben sich sowohl bei natürlichen als auch „*man-made*“ Objekten wie beispielsweise bei Bäumen mit ihren Ästen und Blattwerk, unterschiedlich weit entfernte Gebäudekanten oder geneigte Dachflächen.

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, ob bei den oben genannten problematischen Messsituationen durch die Analyse der zeitlichen Signalform die Grenzleistung von boden- und luftgestützten Lasersystemen verbessert werden kann. Um die Vielfalt der empfangenen Signalform handhaben zu können, wird ein Modell entworfen, das sowohl die Signalform des emittierten Laserpulses, die örtliche Energieverteilung des Laserstrahls, die Reflexionseigenschaft der Oberfläche als auch die Transmission des Laserstrahls durch die Atmosphäre und die Empfängercharakteristik berücksichtigt. Die Modellierung von komplexen Oberflächen erfordert aufwendige Simulationsrechnungen. Es werden Simulationen zu ebenen Oberflächen mit unterschiedlicher Neigung und sphärischen Oberflächen durchgeführt, wobei unterschiedliche örtliche Energieverteilungen des Laserstrahls berücksichtigt wurden. Durch eine Simulation wurde in der Arbeit der Neigungswinkel einer ebenen Fläche für eine radialsymmetrische zylinderförmige örtliche Energieverteilung aus einer einzigen Messung geschätzt.

Es werden sieben Methoden vorgestellt, die neue zusätzliche Möglichkeiten der Objektbeschreibung aufzeigen. Zur Objektbeschreibung werden die Merkmale *Entfernung*, *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke* aus der Signalform bestimmt. Diese Merkmale werden untersucht und die erzielten Resultate diskutiert, bewertet und verglichen.

Für die Durchführung der Experimente wurde ein Experimentalsystem aufgebaut, mit dem sowohl die gesendete als auch die empfangene Signalform über der Zeit mit 20GSamples/s getrennt aufgezeichnet werden können. Dadurch wird es möglich, die Signalform jedes individuellen Pulses detailliert zu vermessen. Es zeigt sich, dass die gesendete Signalform sowohl von den bekannten Modellen (Gauß-, Exponential- oder Rechteckform) erheblich abweicht, als auch in seiner jeweiligen Ausprägung kaum vorhersehbar ist.

Es wurde mit der Wiener-Filter-Methode ein neues Verfahren zur besseren Unterscheidbarkeit von mehreren Bereichen mit geringer unterschiedlicher Entfernung entwickelt. An einem Beispiel wird gezeigt, dass eine Unterscheidbarkeit bei zwei Bereichen mit einem Entfernungsunterschied von 0.15 m für eine typische Pulslänge von 5 ns möglich ist. Durch die Wiener-Filter-Methode kann eine zeitabhängige Oberflächenrepräsentation bestimmt werden, die eine von der gesendeten Signalform unabhängige Beschreibung der Oberfläche ermöglicht. Es konnte in Experimenten gezeigt werden, dass mit dieser Methode eine hohe Genauigkeit für die Bestimmung der *Entfernung* erreicht wird.

## Abstract

Pulsed laser scanning systems determine the range to an illuminated object by a time-of-flight measurement. The time-of-flight is typically derived by the elapsed time between the emitted and backscattered laser pulses. Critical measurement situations can occur if the temporal waveform of the backscattered pulse is strongly deformed or more than one pulse is backscattered. Such kind of backscattered pulses can be expected for natural, as well as for man-made objects, like the canopy and the branches of trees, and different elevated building edges or sloped roof areas.

In this thesis, the above mentioned critical measurement situations are investigated by the analysis of the temporal waveform to improve the capabilities of terrestrial and airborne laser scanning systems. Due to the varying received waveforms, a model is invented, which considers the transmitted waveform of the emitted laser pulse, the spatial energy distribution of the laser beam, the reflectance properties of the surface as well as the atmospheric transmission of the laser beam on the way from the sensor to the surface and the receiver characteristic. The modeling of complex surfaces requires a large effort for the calculations of the simulation. Simulations for plane surfaces with different slopes and spherical surfaces are carried out for various spatial energy distributions of the laser beam. In this work the slope of a plane surface is estimated for a symmetric uniform spatial energy distribution by a single measurement.

In total seven methods are presented to gain additional possibilities for object representations. For object description the features are derived by the waveform, namely *range*, *range variation*, and *reflectivity*. These features are investigated and the achieved results are discussed, evaluated and compared.

To carry out the experiments an experimental setup was built up, for capturing separately the transmitted as well as the received waveform with 20GSamples/s. Therefore the waveform of each individual pulse can be recorded in detail. Experiments have shown that the transmitted waveform differs strongly from well-known models (Gaussian, exponential, or rectangular function), and in addition to this, its current appearance is hardly to predict.

With the Wiener Filtering a new procedure was invented for an improved discrimination of several areas with slightly different elevations. An example is given, that demonstrates a discrimination of two areas, with a range difference of 0.15 m for a typical pulse length of 5 ns, can be distinguished. By the Wiener Filtering a time-dependent surface representation can be obtained by removing the characteristic of the transmitted waveform to enable an independent description of the surface. Experiments have shown that with this method a high accuracy for determining the *range* can be derived.

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Motivation . . . . .   | 1         |
| 1.2      | Zielsetzung . . . . .  | 2         |
| 1.3      | Stand der Forschung . . . . .  | 3         |
| 1.4      | Inhalt der Arbeit . . . . .  | 4         |
| <b>2</b> | <b>Grundlagen der elektrooptischen Lasermesstechnik</b>                    | <b>7</b>  |
| 2.1      | Gegenüberstellung von Stereophotogrammetrie und Laserscanning . . .        | 7         |
| 2.2      | Laserstrahlung . . . . .   | 8         |
| 2.2.1    | Intensitätsverteilung . . . . .  | 8         |
| 2.2.2    | Zeitliche und räumliche Kohärenz . . . . .                                 | 10        |
| 2.2.3    | Beeinflussung von Strahlung durch die Atmosphäre . . . . .                 | 10        |
| 2.3      | Reflexionseigenschaften von Oberflächen . . . . .                          | 11        |
| 2.3.1    | Reflexion an Oberflächen . . . . .   | 11        |
| 2.3.2    | Unterschiedliche Oberflächenformen und die empfangene Signalform . . . . . | 12        |
| 2.3.3    | Mehrfachreflexionen . . . . .  | 14        |
| 2.3.4    | Beschreibung von Oberflächenstrukturen . . . . .                           | 15        |
| 2.3.5    | Rauhigkeit von Oberflächen . . . . .                                       | 16        |
| 2.3.6    | Interferenzeffekte bei Oberflächen . . . . .                               | 17        |
| 2.4      | Charakterisierung von Lasersystemen . . . . .                              | 18        |
| 2.4.1    | Lasertypen . . . . .   | 19        |
| 2.4.2    | Modulationstechnik . . . . .   | 20        |
| 2.4.3    | Messtechnik . . . . .  | 21        |
| 2.4.4    | Detektionstechnik . . . . .  | 23        |
| 2.4.5    | Anordnung der Sende- und Empfangsoptik . . . . .                           | 27        |
| 2.5      | Begriffe und technische Bedeutung . . . . .                                | 29        |
| 2.5.1    | Entfernung . . . . .   | 29        |
| 2.5.2    | Entfernungsauflösung . . . . .   | 30        |
| 2.5.3    | Trennbarkeit . . . . .   | 30        |
| 2.5.4    | Genauigkeit . . . . .  | 31        |
| <b>3</b> | <b>Modellierung der Signalform von Laserpulsen</b>                         | <b>32</b> |
| 3.1      | Modellierung der gesendeten Signalform des emittierten Laserpulses . .     | 32        |
| 3.2      | Modellierung der örtlichen Energieverteilung des Laserstrahls . . . . .    | 33        |
| 3.3      | Modellierung der Oberfläche . . . . .                                      | 34        |
| 3.3.1    | Geometrische Reflexionseigenschaften . . . . .                             | 34        |
| 3.3.2    | Reflexionseigenschaften des Materials . . . . .                            | 35        |
| 3.3.3    | Mehrfachreflexionen von Oberflächen . . . . .                              | 37        |
| 3.4      | Atmosphärische Transmission . . . . .                                      | 37        |
| 3.5      | Empfängereffizienz . . . . .   | 37        |
| 3.6      | Die empfangene Signalform der rückgestreuten Laserpulse . . . . .          | 37        |
| 3.7      | Messung der Signalform . . . . .   | 39        |
| 3.8      | Einführung der Oberflächenantwort . . . . .                                | 39        |

---

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>4</b> | <b>Simulation der empfangenen Signalform rückgestreuter Laserpulse</b>  | <b>40</b> |
| 4.1      | Simulation des Sensorsystems . . . . .  | 40        |
| 4.2      | Simulation der Oberfläche . . . . .   | 42        |
| 4.2.1    | Ebene Oberfläche mit Neigung . . . . .  | 43        |
| 4.2.2    | Sphärische Oberfläche . . . . .   | 45        |
| <b>5</b> | <b>Methoden zur Merkmalsextraktion</b>  | <b>49</b> |
| 5.1      | Detektion der rückgestreuten Pulse . . . . .  | 51        |
| 5.2      | <i>Peak-Detection</i> -Methode . . . . .  | 52        |
| 5.3      | <i>Leading-Edge-Detection</i> -Methode . . . . .  | 53        |
| 5.4      | <i>Centre-of-Gravity-Detection</i> -Methode . . . . .   | 54        |
| 5.5      | <i>Constant-Fraction-Detection</i> -Methode . . . . .   | 56        |
| 5.6      | <i>Gaussian-Decomposition</i> -Methode . . . . .  | 58        |
| 5.7      | Korrelations-Methode . . . . .  | 59        |
| 5.7.1    | <i>SNR</i> für das signalangepasste Filter . . . . .  | 60        |
| 5.7.2    | Signalangepasstes Filter für eine unbekannte Oberfläche . . . . .   | 60        |
| 5.7.3    | Signalangepasstes Filter für eine bekannte Oberfläche . . . . .   | 62        |
| 5.8      | Wiener-Filter-Methode . . . . .   | 64        |
| 5.8.1    | Entfaltung . . . . .  | 64        |
| 5.8.2    | Wiener-Filterung zur Schätzung der Oberflächenfunktion . . . . .  | 65        |
| 5.8.3    | Parameterschätzung der Oberflächenantwort . . . . .   | 68        |
| 5.9      | Gegenüberstellung von Methoden und Merkmalen . . . . .  | 70        |
| <b>6</b> | <b>Erfassung der Szene</b>  | <b>71</b> |
| 6.1      | Operationelle <i>Full-Waveform</i> -Lasersysteme . . . . .  | 71        |
| 6.2      | Aufbau des Experimentalsystems . . . . .  | 72        |
| 6.2.1    | Sendeeinheit . . . . .  | 72        |
| 6.2.2    | Abtasteinheit . . . . .   | 73        |
| 6.2.3    | Empfangseinheit . . . . .   | 73        |
| 6.3      | Charakterisierung der Empfangseinheit . . . . .   | 74        |
| 6.3.1    | Bestimmung der Impulsantwort der Empfangseinheit . . . . .  | 75        |
| 6.3.2    | Länge der Impulsantwort der Empfangseinheit . . . . .   | 76        |
| 6.4      | Speicherung der Szene im Datenquader . . . . .  | 77        |
| <b>7</b> | <b>Experimente</b>  | <b>79</b> |
| 7.1      | Messung der gesendeten Signalform der emittierten Laserpulse . . . . .  | 79        |
| 7.2      | Messung der örtlichen Energieverteilung des Laserstrahls . . . . .  | 80        |
| 7.3      | Impulsantwort der Empfangseinheit . . . . .   | 80        |
| 7.4      | Bestimmung der Oberflächenantwort . . . . .   | 82        |
| 7.4.1    | Einzelne Oberfläche . . . . .   | 83        |
| 7.4.2    | Zwei Oberflächen . . . . .  | 84        |
| 7.5      | Untersuchungen zur Oberflächenantwort . . . . .   | 89        |
| 7.5.1    | Schätzung der Neigung durch die Wiener-Filter-Methode . . . . .   | 89        |
| 7.5.2    | Schätzung der Neigung durch die Korrelations-Methode . . . . .  | 91        |
| 7.5.3    | Vergleich zwischen der zu erwartenden Standardabweichung der Neigungswinkel und der Standardabweichung der geschätzten Neigungswinkel . . . . . | 92        |
| 7.6      | Extraktion von Merkmalen bei bekannter Oberfläche . . . . .   | 93        |

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 7.6.1    | Extraktion der Entfernung . . . . .                                   | 93         |
| 7.6.2    | Extraktion der Entfernungsvariation . . . . .                         | 95         |
| 7.6.3    | Extraktion der Reflexionsstärke . . . . .                             | 96         |
| 7.7      | Extraktion von Merkmalen bei einer gemessenen Szene . . . . .         | 97         |
| <b>8</b> | <b>Diskussion</b>   | <b>102</b> |
| <b>9</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                                   | <b>105</b> |
| 9.1      | Zusammenfassung . . . . .   | 105        |
| 9.2      | Ausblick . . . . .  | 106        |
| <b>A</b> | <b>Anhang</b>   | <b>108</b> |
| A.1      | Strahlungsfluss und spezifische Ausstrahlung . . . . .                | 108        |
| A.1.1    | Allgemeine Grundlagen . . . . .                                       | 108        |
| A.1.2    | Strahlungsfluss am Flächenelement der Empfangseinheit . . . . .       | 109        |
| A.1.3    | Spezifische Ausstrahlung des Flächenelements der Oberfläche . . . . . | 109        |
|          | <b>Literatur</b>  | <b>110</b> |

## Liste der Abkürzungen und Symbole

### Abkürzungen

|              |  |
|--------------|--|
| <i>A/D</i>   | Analog/Digital   |
| <i>AKF</i>   | Autokorrelationsfunktion                                       |
| <i>ALS</i>   | <i>Airborne Laserscanning System</i>                           |
| <i>AM</i>    | Amplitudenmodulation   |
| <i>APD</i>   | <i>Avalanche Photodiode</i>                                    |
| <i>BRDF</i>  | <i>Bidirectional Reflectance Distribution Function</i>         |
| <i>CFD</i>   | <i>Constant-Fraction-Detection</i>                             |
| <i>CW</i>    | <i>Continuous Wave</i>   |
| <i>DSO</i>   | Digital-Speicheroszilloskop                                    |
| <i>FM</i>    | Frequenzmodulation   |
| <i>FWHM</i>  | <i>Full Width at Half Maximum</i>                              |
| <i>GPS</i>   | <i>Global Position System</i>                                  |
| <i>INS</i>   | <i>Inertial Navigation System</i>                              |
| <i>KKF</i>   | Kreuzkorrelationsfunktion                                      |
| <i>LADAR</i> | <i>LASER Detection and Ranging</i>                             |
| <i>LASER</i> | <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> |
| <i>LIDAR</i> | <i>Light Detection and Ranging</i>                             |
| <i>LO</i>    | Lokalszillator   |
| <i>LSM</i>   | <i>Least Squares Matching</i>                                  |
| <i>NEP</i>   | <i>Noise Equivalent Power</i>                                  |
| <i>PIN</i>   | <i>Positive Intrinsic Negative Diode</i>                       |
| <i>PMT</i>   | <i>Photomultiplier Tubes</i>                                   |
| <i>RADAR</i> | <i>Radio Detection and Ranging</i>                             |
| <i>SNR</i>   | <i>Signal to Noise Ratio</i> , Signal-zu-Rausch-Verhältnis     |
| <i>TEM</i>   | transversal-elektromagnetisch                                  |

### Allgemeine Formelzeichen

|                    |  |
|--------------------|--|
| *                  | Faltungsoperator                         |
| $\Theta$           | Strahldivergenz                          |
| $\delta$           | DIRACsche Funktion                       |
| $\eta_a$           | atmosphärische Transmission              |
| $\eta_r$           | Empfängereffizienz                       |
| $\lambda_a$        | atmosphärischer Dämpfungskoeffizient     |
| $\Phi$             | Strahlungsfluss                          |
| $\pi$              | Kreiszahl Pi                             |
| $\rho$             | allgemeine Reflexionsdichtefunktion      |
| $\rho_m$           | Reflektanz des Materials                 |
| $\rho_{diffus}$    | diffuse Reflexionsdichtefunktion         |
| $\rho_{spiegelnd}$ | spiegelnde Reflexionsdichtefunktion      |
| $\sigma$           | allgemeine empirische Standardabweichung |
| $\sigma_a$         | atmosphärischer Extinktionskoeffizient   |
| $\tau$             | Laufzeitverzögerung                      |
| $\Sigma$           | Kovarianzmatrix                          |

---

|                |  |
|----------------|--|
| $a$            | Amplitude  |
| $a_A$          | normierte Amplitude  |
| $c$            | Lichtgeschwindigkeit ( $\approx 3 \cdot 10^8 m/s$ )                |
| $E$            | Amplitude der örtlichen Energieverteilung des Laserstrahls         |
| $f_g$          | Grenzfrequenz  |
| $f_r$          | Pulswiederholrate  |
| $I$            | Strahlstärke   |
| $I_r(\rho, r)$ | räumliche Intensitätsverteilung                                    |
| $J$            | Jacobi-Matrix  |
| $K$            | örtliche Energieverteilung des Laserstrahls                        |
| $M$            | spezifische Ausstrahlung   |
| $P$            | 3D-Objektpunkt   |
| $t$            | Zeit   |
| $\Delta t$     | Abtastintervall  |
| $p(z)$         | Verteilungsdichtefunktion der Rauigkeit von Oberflächen            |
| $\bar{x}$      | allgemeiner empirischer Erwartungswert (arithmetischer Mittelwert) |

## Winkel- und längenabhängige Formelzeichen

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| $\alpha$                      | Azimuthwinkel   |
| $\alpha_A$                    | Winkel in Neigungsrichtung                              |
| $\alpha_S, \beta_S, \gamma_S$ | Sensorausrichtung                                       |
| $\varepsilon$                 | Zenithwinkel  |
| $\lambda$                     | Wellenlänge   |
| $\varphi$                     | Winkel zwischen optischer Achse und der Flächennormalen |
| $\omega_0$                    | kleinster Radius an der Strahltaile                     |
| $\Omega$                      | Raumwinkel  |
| $\Psi$                        | Konvergenzwinkel  |
| $A$                           | ebene Fläche  |
| $A_r$                         | Querschnittsfläche des Laserstrahl                      |
| $d_A$                         | Entfernungsvariation                                    |
| $d_{Ap}$                      | Aperturdurchmesser                                      |
| $d_L$                         | Durchmesser des Laserstrahls                            |
| $d_p$                         | Abstand zwischen der Sende- und Empfangsoptik           |
| $d_s$                         | minimaler Durchmesser einer <i>Speckle</i> -Zelle       |
| $k$                           | Breite der örtlichen Energieverteilung des Laserstrahls |
| $\vec{n}$                     | Oberflächennormale                                      |
| $r$                           | allgemeine Entfernung                                   |
| $r_{0A}$                      | Entfernung zwischen dem Ursprung und der Fläche $A$     |
| $r_K$                         | Kugelradius   |
| $r_L$                         | Radius des Laserstrahls                                 |
| $r_{max}$                     | maximale Entfernung                                     |
| $r_R$                         | Rayleigh-Entfernung                                     |
| $\Delta r$                    | Entfernungsauflösung                                    |
| $w(r)$                        | entfernungsabhängiger Strahlradius                      |
| $w$                           | Pulslänge   |
| $w_A$                         | Pulsverlängerung  |

|                 |   |
|-----------------|---|
| $w_g$           | Länge der Impulsantwort bei halber Amplitudenhöhe ( <i>FWHM</i> ) |
| $x_S, y_S, z_S$ | Sensorposition  |

## Formelzeichen der Signalverarbeitung

|                            |  |
|----------------------------|--|
| $\lambda_m$                | Modulationswellenlänge   |
| $\Phi_s$                   | Phase der gesendeten Signalform  |
| $\Phi_r$                   | Phase der empfangenen Signalform                                       |
| $\Phi_A$                   | Phasenabstand  |
| $\Delta\Phi_A$             | Winkelauflösung des Phasenabstandes                                    |
| $E_S$                      | Signalenergie der Signalform   |
| $E_W$                      | Signalenergie von weißem Rauschen                                      |
| $f_g$                      | Grenzfrequenz der Empfangseinheit ( $-3dB$ )                           |
| $h(t)$                     | Oberflächenantwort   |
| $\underline{H}(f)$         | Spektralfunktion der Oberflächenantwort                                |
| $\hat{h}(t)$               | geschätzte Oberflächenantwort  |
| $\hat{\underline{H}}(f)$   | geschätzte Spektralfunktion der Oberflächenantwort                     |
| $h_n(t)$                   | gemessene Impulsantwort des Lasersystems                               |
| $\underline{H}_n(f)$       | gemessene Übertragungsfunktion des Lasersystems                        |
| $h_s(t)$                   | Impulsantwort der Empfangseinheit für die gesendete Signalform         |
| $\underline{H}_s(f)$       | Übertragungsfunktion der Empfangseinheit für die gesendete Signalform  |
| $h_r(t)$                   | Impulsantwort der Empfangseinheit für die empfangene Signalform        |
| $\underline{H}_r(f)$       | Übertragungsfunktion der Empfangseinheit für die empfangene Signalform |
| $m(t)$                     | multiplikatives Rauschen (Modulation)                                  |
| $n(t)$                     | additives Rauschen   |
| $r(t)$                     | empfangene Signalform des rückgestreuten Laserpulses                   |
| $\underline{R}(f)$         | Spektralfunktion der empfangenen Signalform                            |
| $r_n(t)$                   | gemessene empfangene Signalform des rückgestreuten Laserpulses         |
| $\underline{R}_n(f)$       | gemessene Spektralfunktion der empfangenen Signalform                  |
| $R_{ss}(t)$                | <i>AKF</i> der gesendeten Signalform                                   |
| $R_{sr}(t)$                | <i>KKF</i> zwischen der gesendeten und der empfangenen Signalform      |
| $R_{rr}(t)$                | <i>AKF</i> der empfangenen Signalform                                  |
| $s(t)$                     | gesendete Signalform des emittierten Laserpulses                       |
| $s_m(t)$                   | modulierte gesendete Signalform des emittierten Laserpulses            |
| $\underline{S}_m(f)$       | Spektralfunktion der gesendeten Signalform                             |
| $\hat{s}_m(t)$             | geschätzte gesendete Signalform des emittierten Laserpulses            |
| $\hat{\underline{S}}_m(f)$ | geschätzte Spektralfunktion der gesendeten Signalform                  |
| $s_M(t)$                   | gemessene gesendete Signalform des emittierten Laserpulses             |
| $\underline{S}_M(f)$       | gemessene Spektralfunktion der gesendeten Signalform                   |
| $\underline{W}(f)$         | Wiener-Filter  |

*Der Verstand schöpft seine Gesetze (a priori) nicht aus der Natur,  
sondern schreibt sie dieser vor.*  
aus *Kritik der reinen Vernunft* von Immanuel Kant (1781)



# 1 Einleitung

Die automatische Generierung von dreidimensionalen Modellen zur Beschreibung von „*man-made*“ und natürlichen Objekten, wie beispielsweise Gebäuden oder Vegetation ist in der photogrammetrischen Forschung von großem Interesse [Kraus, 2004; Stilla *et al.*, 2005]. Neben der indirekten Bestimmung der Entfernung über die Aufnahme von Messbildern und stereoskopischer Auswertung bieten aktive Laserscanner eine direkte, präzise und schnelle Erfassung der Entfernung von 3D-Objekten, unabhängig von den Beleuchtungsverhältnissen. Für die topographische Aufnahme der Erdoberfläche durch flugzeuggetragene Systeme werden typischerweise gepulste Laser verwendet. Eine detaillierte Übersicht über flugzeuggetragene Lasersysteme wird von Baltsavias [1999b], Huising & Pereira [1998] und Wehr & Lohr [1999] gegeben. Jelalian [1992] und Kamermann [1993] beschreiben in einer allgemeinen Übersicht die Funktionsweise von Lasersystemen.

## 1.1 Motivation

Zur Ermittlung der Entfernung wird bei gepulsten Systemen die Laufzeit des Laserpulses gemessen, die typischerweise über einen charakteristischen Wert des empfangenen Signals abgeleitet wird. Problematisch ist die Messung von Rückstreuungen bei Objekten, die sich in unterschiedlichen Entfernungen innerhalb eines Strahlkegels befinden und Mehrfachreflexionen erzeugen. Solche Rückstreuungen ergeben sich sowohl bei natürlichen als auch bei „*man-made*“ Objekten, wie beispielsweise bei Bäumen mit ihren Ästen und ihrem Blattwerk oder unterschiedlich weit entfernten Gebäudekanten. Je nach Anwendung wertet man für jeden emittierten Laserpuls die Laufzeit der ersten beziehungsweise der letzten rückgestreuten Reflexion aus. Objektstrukturen, die dazwischenliegende Reflexionen liefern, werden hierbei nicht erfasst. Bei voreingestelltem Schwellwert kann eine Abschwächung des Signals bei der Transmission durch Aerosole, Nebel, Regen, Schnee etc. oder bei der Reflexion durch geringen Rückstreuquerschnitt oder absorbierendem Material zu unerschwelligen Signalwerten führen, bei denen die Wahrnehmung des Objekts verloren geht.

Kritische Messsituationen ergeben sich, wenn die Signalform des rückgestreuten Pulses deformiert oder mehr als ein Puls rückgestreut wird. Folgende problematische Situationen können auftreten:

- **Entfernungsgenauigkeit**

Eine schiefe Oberfläche führt zu einer Deformation (Aufweitung) der empfangenen Signalform des rückgestreuten Laserpulses in Abhängigkeit von der Neigung der Oberfläche und der Größe des Strahldurchmessers auf der Oberfläche. Bei einer analogen Entfernungsdetektion, die beispielsweise durch die führende Flanke des Signalverlaufs erfolgt, ist die mittlere Entfernung der Oberfläche in die Richtung des Sensors verschoben.

- **Objektkanten**

Zwei unterschiedlich weit entfernte Objektbereiche innerhalb des Strahlengangs, wie sie sich beispielsweise durch die teilweise Beleuchtung der Gebäudedachflächen und der dem Gebäude angrenzenden Erdoberfläche ergeben, führt zu zwei

Pulsen mit einer zeitlichen Verschiebung. In diesem Fall bestimmt die analoge Entfernungsdetektion nur zwei unterschiedliche Entfernungswerte, jedoch der Anteil der beleuchteten Fläche innerhalb des Strahlengangs kann nicht bestimmt werden ohne zusätzliche Information.

- **Trennbarkeit**

Zwei Bereiche mit geringer unterschiedlicher Entfernung zueinander innerhalb des Strahlengangs führen zu zwei überlagerten Signalformen. Dies ist bedingt durch die kurz hintereinander folgenden rückgestreuten Pulse der einzelnen Bereiche, wenn die Entfernungsdifferenz der beleuchteten Bereiche kürzer ist als die Länge des Laserpulses. In diesem Fall kann durch eine analoge Entfernungsdetektion oft nur ein einzelner Entfernungswert extrahiert werden.

- **Adaptive Verarbeitung**

Kleine Objekte innerhalb des Strahlengangs mit einer zufälligen Verteilung um einen mittleren Entfernungswert (beispielsweise die mittlere Entfernung von Getreide auf einem Feld) führen zu einer Aufweitung der Signalform des rückgestreuten Pulses in Abhängigkeit von der vorliegenden Verteilung. Die aufgeweitete Signalform hat dann eine kleine Amplitude und ist mit einem fest eingestellten Schwellwert, wie er beispielsweise bei der analogen Entfernungsdetektion verwendet wird, schwierig zu detektieren.

## 1.2 Zielsetzung

Bei der Beleuchtung von Oberflächen mit Laserstrahlung können sich kritische Messsituationen ergeben, die eine Analyse der Oberfläche erschweren. Diese Messsituationen sind dann gegeben, wenn die Signalform des rückgestreuten Pulses deformiert oder mehr als ein Puls rückgestreut wird. Der Gegenstand dieser Arbeit ist es zu klären, inwieweit dennoch eine Rekonstruktion von Oberflächen durch die Analyse der Signalform möglich ist.

Die Bestimmung von Merkmalen wird ausschließlich anhand der Auswertung der Signalform des Laserpuls durchgeführt. Neue Methoden zur Gewinnung von Merkmalen sollen entwickelt werden. Insbesondere die Schätzung der Oberflächenantwort ist hierbei von besonderem Interesse, da diese eine Berechnung der Merkmale ermöglicht, die unabhängig von der Anregung des Laserpulses erfolgt. Da die Merkmale sich oft nur ungenau aus der Oberflächenantwort bestimmen lassen, erfolgt eine Anpassung durch eine als bekannt vorausgesetzte Funktion an die zu erwartende Form der Oberflächenantwort. Dadurch werden geringe Abweichungen kompensiert und eine höhere Genauigkeit bei der Merkmalsextraktion erreicht. Aus der Funktion können die Parameter der Merkmale direkt bestimmt werden. Eine robuste Methode zur Parameterschätzung der Merkmale wird bereitgestellt. Neben der höheren Genauigkeit wird auch eine höhere Auflösung erreicht. Um dies zu gewährleisten, sollen Untersuchungen, die die Systemcharakteristik berücksichtigen, vorgenommen und die Extraktion von Merkmalen bewertet werden.

### 1.3 Stand der Forschung

Im Gegensatz zur Messung charakteristischer Entfernungswerte besteht bei der Aufnahme der kompletten zeitlichen Signalform und entsprechender Auswertung die Möglichkeit, szenenbedingte Mehrdeutigkeiten aufzulösen. Bei der Auswertung kann zusätzlich die Energie der rückgestreuten Pulse berücksichtigt werden. Untersuchungen durch die Analyse der Signalform wurden zur Erforschung von Vegetation hinsichtlich der Biomasse oder Dichte des Bestandes (beispielsweise Bäume, Büsche und Untergrund) vorgenommen. Die NASA entwickelte einen Prototyp zur Aufzeichnung der Signalform mit dem *Laser Vegetation Imaging Sensor* (LVIS), womit ein vertikales Dichteprofil von Wäldern erfasst werden kann [Blair *et al.*, 1999]. Dieses luftgestützte Experimentalsystem wird in einer Höhe von bis zu 10 km eingesetzt und besitzt einen Durchmesser des *Footprints*<sup>1</sup> von bis zu 80 m, der die Untersuchung von verschiedenen Landnutzungsklassen ermöglicht.

Das raumgestützte *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS), welches von dem *Ice, Cloud and Land Elevation Satellite* (ICESat) getragen wird, erfasst Höhenprofile von Wolken und Aerosolen, misst die Höhe von großflächigen Eis- und Landflächen und kann von großen Gebieten die Vegetation vermessen [Brenner *et al.*, 2003; Zwally *et al.*, 2002]. Hierfür wird ein Lasersystem mit großem Durchmesser des *Footprints* (70 m) eingesetzt, welches mit einer Dezimeter-Genauigkeit die Höhenunterschiede auf der Erde erfasst [Hoften *et al.*, 2000].

Neben diesen *Large-Footprint*-Lasersystemen wurden die ersten Aufzeichnungen der Signalform von *Small-Footprint*-Lasersystemen durch den australischen *Laser Airborne Depth Sounder* (LADS) [Penny *et al.*, 1986; Penny *et al.*, 1989] und das amerikanische *Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey System* (SHOALS) [Irish & Lillycrop, 1999; Irish *et al.*, 2000; Lillycrop & Banic, 1993; West & Lillycrop, 1999] für die Beobachtung in Küstenregionen entwickelt. Bei diesen Systemen ist, wegen der starken Streuung im Wasser, die Bodendetektion nur mittels Auswertung der Signalform möglich.

In letzter Zeit folgten weitere Entwicklungen zur Aufzeichnung der Signalform und derzeit sind mehrere kommerzielle luftgestützte Systeme verfügbar: Optech ALTM 3100, TopEye Mark II und TopoSys Harrier 56. Das zuletzt genannte System basiert auf dem Riegl LMS-Q560. Diese Systeme operieren mit einem gesendeten Puls, der die zeitliche Länge von 4 – 10 ns aufweist und die Digitalisierung der aufgezeichneten Signalform erfolgt mit 0.5 – 1GSamples/s.

Zur Interpretation der empfangenen Signalform des rückgestreuten Laserpulses ist das Verständnis für den physikalischen Hintergrund von der Laserstrahlungsausbreitung und die Oberflächeninteraktion relevant [Jutzi *et al.*, 2002; Wagner *et al.*, 2003]. Der Einfluss der beleuchteten Oberfläche auf die gesendete Signalform wurde von Steinvall [2000] anhand von Objekten mit unterschiedlicher Oberflächenform und unter Berücksichtigung von unterschiedlicher Reflexionseigenschaften diskutiert. Gardner [1982] und Bufton [1989] untersuchten die zeitliche Pulsaufweitung durch die Beeinflussung von Oberflächenstrukturen, beispielsweise durch Oberflächenneigung und vertikaler Rauigkeit innerhalb des beleuchteten Gebiets.

---

<sup>1</sup>Der Ausdruck *Footprint* (engl.) wird in diesem Dokument für die projizierte flächenhafte Abbildung des Laserstrahls auf eine Oberfläche verwendet. Mit zunehmender Entfernung zwischen Laserquelle und Oberfläche vergrößert sich durch die Strahldivergenz des Laserstrahls die Größe des *Footprints*.

Die Aufzeichnung der empfangenen Signalform eröffnet die Möglichkeit zur Verwendung verschiedener Methoden für die Entfernungsbestimmung, beispielsweise *Peak-Detection*, *Leading-Edge-Detection*, *Centre-of-Gravity-Detection* und *Constant-Fraction-Detection*. Diese Thematik wurde von verschiedenen Autoren untersucht. Mamon [1978] beschreibt die Problematik, dass bei unterschiedlichen Amplituden durch einen voreingestellten Schwellwert der Triggerzeitpunkt verschoben wird, wodurch der ermittelte Entfernungswert bei gleicher Objektentfernung variiert, was zu Ungenauigkeiten führt. Bei der Simulation von möglichen Fehlern, die sich bei der Entfernungsbestimmung ergeben, ist es daher wichtig, verschiedene Methoden zu berücksichtigen und zu untersuchen [Budge *et al.*, 2006; Der *et al.*, 1997; Steinvall & Carlsson, 2001; Thiel & Wehr, 2004; Wagner *et al.*, 2004]. Nilsson [1996] konnte anhand gemessener Signalformen zeigen, dass durch Verwendung von *Peak-Detection* und *Leading-Edge-Detection* eine höhere Genauigkeit erzielt wird als durch *Trailing Edge Detection*.

Die Entfernungsbestimmung kann zusätzlich verbessert werden durch die Berücksichtigung von der gesendeten und empfangenen Signalform, da die gemessene beziehungsweise *a priori* bekannte Signalform in die Analyse einfließt und die Formen miteinander verglichen werden können. Hierfür eignen sich besonders gut Signalverarbeitungsmethoden, beispielsweise Korrelation und Inversfilterung. Für die Signalverarbeitung sollte das zu analysierende Signal mit einer hohen zeitlichen Abtastung aufgezeichnet werden, um mögliche Änderungen zu erfassen. Die Kreuzkorrelationsfunktion berechnet sich aus der gesendeten und empfangenen Signalform. Aus der Kreuzkorrelationsfunktion wird anhand des lokalisierten Maximums die Entfernung für eine hochgenaue und zuverlässige Entfernungsschätzung berechnet. Die dadurch erreichte Genauigkeit der Entfernungsschätzung ist wesentlich höher als eine Entfernungsschätzung, die nur auf der empfangenen Signalform basiert [Hoftes & Blair, 2002; Jutzi & Stilla, 2005b; Thiel *et al.*, 2005]. Eine zusätzliche Verbesserung der Genauigkeit kann durch die Kleinste-Quadrate-Korrelation (engl. *Least Squares Matching, LSM*) erreicht werden. Durch die Kleinste-Quadrate-Korrelation können Entfernungswerte bestimmt werden, die zwischen dem zeitlichen Abtastraster liegen.

Neben der *Entfernung* können zusätzliche Merkmale mit der Analyse der Signalform untersucht werden: *Reflexionsstärke* und *Entfernungsvariation*. Diese speziellen Merkmale beeinflussen die *Amplitude* und die *Länge* [Brenner *et al.*, 2003; Jutzi *et al.*, 2002; Steinvall *et al.*, 2004; Wagner *et al.*, 2006] der empfangenen Signalform. Um für die empfangene Signalform eine Parameterbeschreibung zu erhalten, wird die *Gaussian-Decomposition-Methode* angewandt [Hoftes *et al.*, 2000; Jutzi & Stilla, 2005b; Persson *et al.*, 2005; Söderman *et al.*, 2005]. Heutzutage wird die Analyse der Signalform zunehmend in der Fernerkundung für Vermessungen in der Forstwirtschaft eingesetzt [Ducic *et al.*, 2006; Duong *et al.*, 2006; Hug *et al.*, 2004; Lim *et al.*, 2003; Nilsson, 1996; Reitberger *et al.*, 2006a; Reitberger *et al.*, 2006b].

## 1.4 Inhalt der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in 9 Kapitel gegliedert.

Im Kapitel 2 werden die Grundlagen, die für eine elektrooptische Lasermesstechnik zur Erfassung der zeitlichen Signalform von Laserpulsen relevant sind, behandelt. Es werden zuerst die allgemeinen Vor- und Nachteile des Laserscannings gegenüber der klassischen Stereophotogrammetrie beschrieben. Für die Verwendung von Laserstrah-

lung zur Vermessung von Oberflächen sind insbesondere die physikalischen Eigenschaften der Laserstrahlung und die Reflexionseigenschaften der Oberflächen zu berücksichtigen. Die für die Messung verwendete gepulste Laserstrahlung ist geprägt durch ihre zeitliche und örtliche Energieverteilung. Wird mit einem Laserpuls eine Oberfläche beleuchtet, so verändert sich die zeitliche Signalform in Abhängigkeit von der geometrischen Form und den Materialeigenschaften der beleuchteten Oberfläche. Von der Veränderung der Signalform kann eingeschränkt auf die Eigenschaft der beleuchteten Oberfläche geschlossen werden.

Im Kapitel 3 werden die einzelnen Komponenten, die eine Veränderung der Signalform bewirken können, modelliert, um allgemein den Einfluss des Messsystems und der Oberfläche voraussagen zu können. Es wird ein Formelwerk bereitgestellt, das verschiedene Parameter des Messsystems und der Oberfläche berücksichtigt. Das Messsystem setzt sich zusammen aus Laserquelle, Abtasteinheit und Empfangseinheit. Für die Beschreibung der Oberfläche wird ein vereinfachtes Oberflächenmodell vorgestellt. Dieses Oberflächenmodell berücksichtigt eine einfache beziehungsweise mehrere einfache Oberflächen innerhalb des Strahlengangs. Die Oberflächen können unterschiedlich geneigt sein. Zudem werden spiegelnde und diffuse Reflexionseigenschaften des Materials berücksichtigt. Rauscheinflüsse auf die Messung der gesendeten und empfangenen Signalform, bedingt durch die Empfänger, werden ebenfalls berücksichtigt.

Im Kapitel 4 werden Simulationen, basierend auf der Modellierung von einfachen Oberflächen, durchgeführt. Dadurch können beispielsweise Problemstellungen für ebene Oberflächen mit Neigung bearbeitet und verifiziert werden.

Im Kapitel 5 werden Methoden zur Extraktion von Merkmalen aus der Signalform vorgestellt. Die zu extrahierenden Merkmale sind Entfernung, Entfernungsvariation und Reflexionsstärke. Die zu den Merkmalen korrespondierenden Eigenschaften der Signalform sind die zeitliche Position, die zeitliche Pulslänge und die Amplitude. Damit ist es möglich, festzustellen, von welchen Oberflächenanordnungen brauchbare Daten zu erwarten sind und ob problematische Bereiche vorliegen. Die Extraktion erfolgt sowohl direkt aus der Signalform als auch aus der Oberflächenantwort. Die Bestimmung der Oberflächenantwort wird vertieft und ist ein Schwerpunkt dieser Arbeit. Der Nutzen der Oberflächenantwort wird durch entsprechende Simulationen demonstriert. Es wird abgeschätzt, inwieweit eine Detektion und Rekonstruktion von Merkmalen aus der Oberflächenantwort möglich ist.

Im Kapitel 6 wird das Experimentalsystem beschrieben, welches für die Datenerfassung aufgebaut wurde. Es handelt sich hierbei um ein gepulstes Lasersystem, bei dem die Empfangseinheit entsprechend modifiziert wurde, um sowohl die gesendete als auch die empfangene Signalform zu erfassen. Die Empfangseinheit wird anhand ihrer Impulsantwort charakterisiert. Das Lasersystem ist notwendig, um die Untersuchungen der Verfahren nicht nur anhand von synthetischen Daten, sondern auch anhand von realen Daten durchzuführen.

Im Kapitel 7 werden unterschiedliche Experimente in Anlehnung an die in Abschnitt 1.1 aufgeführten kritischen Messsituation durchgeführt. Hierfür werden sowohl synthetische als auch reale Daten verwendet. Die erörterten Probleme beinhalten die Bestimmung der Grenzleistung der Trennbarkeit bei Mehrfachreflexion durch teilweise beleuchtete Oberflächen im Strahlengang. Darüber hinaus wird die Genauigkeit bei der Extraktion des Merkmals Entfernung untersucht. Ferner wird gezeigt, dass durch das Merkmal Entfernungsvariation die Neigung einer ebene Fläche bestimmt werden

kann. Mittels eines Vergleichs von unterschiedlichen Methoden wird die Genauigkeit der extrahierten Merkmale Entfernung, Entfernungsvariation und Reflexionsstärke untersucht. Zuletzt werden für eine gemessene Szene die Merkmale durch unterschiedliche Methoden bestimmt und miteinander verglichen.

Die Arbeit schließt mit einer Diskussion der Ergebnisse in Kapitel 8 und einer Zusammenfassung mit dem Ausblick auf zukünftige Forschungsthemen in diesem Zusammenhang in Kapitel 9.

## 2 Grundlagen der elektrooptischen Lasermesstechnik

In der Photogrammetrie und Fernerkundung werden für das Laserscanning unterschiedliche Bezeichnungen verwendet. Im Folgenden soll ein Überblick über die verwendete Terminologie gegeben werden. Grundlegend für das Laserscanning ist die Verwendung von einem *LASER* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), der für die Messung eingesetzt wird. Es sind verschiedene Synonyme für die Messung mit einem Lasersystem gebräuchlich. Dies sind *LADAR* (*LAser radiation Detection And Ranging*), *LIDAR* (*LIght Detection And Ranging*), *LIVAR* (*LAser-Illuminated Viewing And Ranging*) und *LASERRADAR* [Kern, 2003; Kraus, 2004]. Unverkennbar ist bei diesen Begriffen die Anlehnung an das klassische *RADAR* (*RAdiofrequency Detection And Ranging*) gegeben. Zudem ist die Abkürzung *ALS* (*Airborne Laserscanning System*) für flugzeuggetragene Systeme gebräuchlich.

### 2.1 Gegenüberstellung von Stereophotogrammetrie und Laserscanning

In diesem Abschnitt wird die Stereophotogrammetrie dem Laserscanning gegenübergestellt [Kraus, 2004]. Durch diese Messverfahren ist es auf unterschiedliche Weise möglich, eine dreidimensionale Beschreibung einer Objektgeometrie zu bestimmen. Es wird zuerst die notwendige Aufnahmesituation, anhand von luftgestützten Systemen (Abbildung 2.1), beschrieben. Bei der Stereophotogrammetrie wird durch mindestens zwei Aufnahmen mit passiven Sensoren (beispielsweise Luftbildkamera) aus unterschiedlichen Positionen die relative räumliche Position von einem beobachtbaren Objektpunkt  $P$  rekonstruiert. Bei dem Laserscanning wird anhand von mindestens einer Aufnahme mit einem aktiven Sensor (beispielsweise gepulster Laser) die relative räumliche Position von einem beobachtbaren Objektpunkt  $P$  rekonstruiert.

In Abhängigkeit von der zu erfassenden Szene kann es von Vorteil sein, ein bestimmtes Messverfahren einzusetzen.

Für die Verwendung von Laserscanning spricht:

- Bei schlecht einsehbaren Gebieten, die beispielsweise bei Wald und urbanen Gebieten gegeben sind, bewirken erhabene Objekte in Abhängigkeit von der Triangulationsbasis eine Verdeckung bei der Messung. Es ist zu erwarten, dass ein Objektpunkt  $P$  von einem Aufnahmeort mit größerer Wahrscheinlichkeit zu beobachten ist, als von zwei Aufnahmeorten.
- Die Messung mit einem aktiven Sensor kann zu jeder Tages- beziehungsweise Nachtzeit durchgeführt werden. Die gemessene Intensität des rückgestreuten Laserpulses wird bei Sonneneinstrahlung beeinflusst. Ergänzend sei erwähnt, dass die gemessene Intensität des rückgestreuten Laserpulses monochromatisch, meist im nahen Infrarotbereich der elektromagnetischen Strahlung, ist.
- Zur Entfernungsbestimmung wird keine texturierte Oberfläche benötigt. Die Entfernung kann beispielsweise bei homogenen Gletscher- beziehungsweise Eisflächen, vegetationsfreien Sandflächen und homogenen Asphalt- beziehungsweise

Betonflächen bestimmt werden. Es sind jedoch Einschränkungen vorhanden, beispielsweise wird bei schräger Beleuchtung von sehr glatten Oberflächen kein Laserstrahl empfangen.

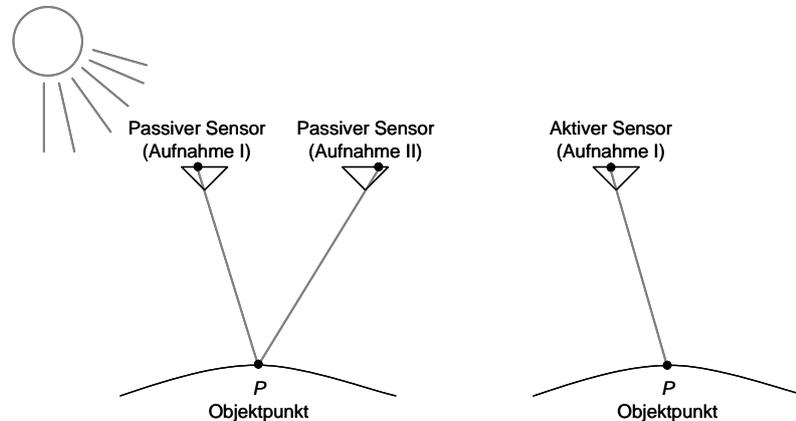


Abbildung 2.1: Gegenüberstellung von Stereophotogrammetrie und Laserscanning [Kraus, 2004].

Für die Verwendung von Stereophotogrammetrie spricht:

- Die Erfassung der multispektralen Information im sichtbaren und nahen Infrarotbereich der elektromagnetischen Strahlung.
- Bei flugzeuggetragenen Systemen ist die laterale Ortsauflösung von Luftbildern derzeit im Dezimeterbereich und ist somit höher als die von kommerziell verfügbaren Lasersystemen. Ergänzend sei erwähnt, dass bei der Aufnahmesituation von derselben Operationshöhe ausgegangen wurde.

## 2.2 Laserstrahlung

In diesem Abschnitt wird die Modellierung von Laserstrahlung im Allgemeinen vorgestellt. In diesem Zusammenhang wird auf die Intensitätsverteilung (Abschnitt 2.2.1), die zeitliche und räumliche Kohärenz (Abschnitt 2.2.2) und die Beeinflussung von Laserstrahlung bei der Durchdringung durch die Atmosphäre eingegangen (Abschnitt 2.2.3).

### 2.2.1 Intensitätsverteilung

Die Intensität eines Laserstrahls fällt im Allgemeinen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung ab (Abbildung 2.2). Die Intensitätsverteilung lässt sich näherungsweise durch ein gaußförmiges Profil beschreiben.

Die räumliche Intensitätsverteilung  $I_r$  einer gaußförmigen Strahlung in Abhängigkeit vom radialen Abstand  $\rho$  und der Entfernung  $r$  ist gegeben mit

$$I_r(\rho, r) = E_0 \cdot \left(\frac{\omega_0}{\omega(r)}\right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{2\rho^2}{w^2(r)}\right), \quad (2.1)$$

wobei  $\omega(r)$  dem entfernungsabhängigen Strahlradius entspricht mit

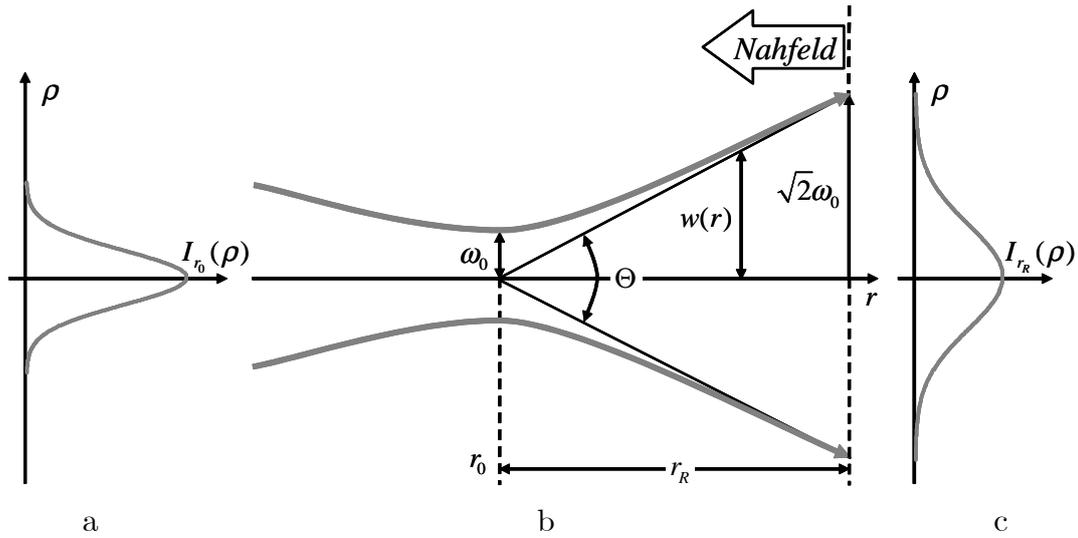


Abbildung 2.2: Ausbreitung von gaußförmiger Laserstrahlung. a) Intensitätsverteilung bei der Entfernung  $r_0$ , b) Strahlausbreitung, c) Intensitätsverteilung bei der Rayleigh-Entfernung  $r_R$ .

$$w(r) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda r}{\pi \omega_0^2}\right)^2}. \quad (2.2)$$

Die Wellenlänge der Strahlung ist  $\lambda$ .

In der Entfernung  $r_0$  hat die gaußförmige Strahlung den kleinsten Radius mit dem Wert  $\omega_0$ . Diese Stelle wird als Strahltaille bezeichnet. Die Strahltaille kann innerhalb oder durch Fokussierung außerhalb des Laserresonators liegen.

Von besonderem Interesse ist die Rayleigh-Entfernung  $r_R$ , die von der Strahltaille ausgehend für die Entfernung  $r$  gegeben ist, wenn sich der Radius des gaußförmigen Strahls um den Faktor  $\sqrt{2}$  vergrößert hat, also wenn  $w(r) = \sqrt{2}\omega_0$  gilt. Die Rayleigh-Entfernung berechnet sich aus Gleichung 2.2 mit

$$r_R = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}. \quad (2.3)$$

Unterhalb der Rayleigh-Entfernung ( $r < r_R$ ) ist der Radius der Strahls nahezu unabhängig von der Entfernung  $r$  und die Ausbreitung der Wellenfronten der Strahlung entspricht nahezu einer ebenen Welle. Dieser Bereich wird als *Nahfeld* bezeichnet.

Im *Fernfeld* ( $r \gg r_R$ ) sind die Wellenfronten näherungsweise Kugelwellen, deren Ursprung auf der Strahlachse bei  $r_0$  liegt. Der Strahlradius nimmt nahezu linear mit der Entfernung  $r$  zur Strahltaille zu. Hieraus folgt für die Strahldivergenz  $\Theta$  [Hecht, 2002] beim vollen Öffnungswinkel

$$\Theta \approx \tan \Theta = \frac{2\omega_0}{r_R} = \frac{2\lambda}{\pi \omega_0}, \quad (2.4)$$

wobei die Strahldivergenz sich proportional zur Wellenlänge verhält.

Die Ursache für die Strahldivergenz ist die Beugung des Strahls beim Austritt aus der Apertur des Lasers. Typische Werte für die Strahldivergenz eines Lasersystems

liegen zwischen 0.3 mrad und 2 mrad. Für räumlich kohärente Strahlung ist die Strahldivergenz bei einem beugungsbegrenzten Laserstrahl, für eine Strahlbreite bei  $e^{-2}$  des gaußförmigen Profils, gegeben mit

$$\Theta \approx 2.44 \frac{\lambda}{d_{Ap}}, \quad (2.5)$$

wobei  $d_{Ap}$  dem Aperturdurchmesser entspricht. Es wurde angenommen, dass der Strahl vollständig die Apertur ausfüllt.

### 2.2.2 Zeitliche und räumliche Kohärenz

Natürliche Lichtquellen sind meist inkohärent. Laserstrahlung erreicht im Gegensatz zu natürlichen Lichtquellen eine extrem hohe Kohärenz. Man unterscheidet zwischen zeitlicher und räumlicher Kohärenz, wobei diese voneinander unabhängig sind. Für die zeitliche Kohärenz gilt, dass eine feste Phasenbeziehung zwischen den Lichtwellen in Richtung der Strahlausbreitung gegeben ist. Zur Messung der zeitlichen Kohärenz wird das Michelson-Interferometer verwendet. Für die räumliche Kohärenz gilt, dass eine feste Phasenbeziehung zwischen den Lichtwellen transversal zur Strahlausbreitung gegeben ist. Die Messung der räumlichen Kohärenz kann durch die Youngsche Doppelspalt-Versuchsordnung erfolgen [Weber & Herziger, 1972]. Die Kohärenz der elektromagnetischen Strahlung ist von Relevanz für die verschiedenen Detektionstechniken (Abschnitt 2.4.4), die bei Lasersystemen eingesetzt werden.

### 2.2.3 Beeinflussung von Strahlung durch die Atmosphäre

Die Ausbreitung von Strahlung wird durch die Dämpfung der Atmosphäre beeinflusst. Die Strahlausbreitung in der Atmosphäre wird ausführlich in Andrews & Phillips [1998] beschrieben. Die Atmosphäre setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen: (i) verschiedene Gase, (ii) Wasser und (iii) Aerosole. Die Anteile der verschiedenen Gase in der trockenen Atmosphäre sind Stickstoff (78%), Sauerstoff (21%), Argon (0.9%), Kohlendioxid (0.04%) und Spuren von Wasserstoff, Ozon, Methan, Kohlenmonoxid, Helium, Neon, Krypton und Xenon. Zudem entspricht der Wasseranteil in der Atmosphäre bis zu 0.001% von den Gesamtwassermassen der Erde. Das Wasser kann hierbei in den Aggregatzuständen fest, flüssig oder gasförmig vorkommen (beispielsweise Schnee, Regen oder Nebel). Außerdem zu berücksichtigen sind Aerosole, die ein Gemisch aus festen oder flüssigen Schwebeteilchen sind, die sich in der Luft befinden (beispielsweise Staub oder Rauch).

In Abhängigkeit von der verwendeten Wellenlänge dämpft die Atmosphäre die Strahlausbreitung mit unterschiedlich hohem Dämpfungsgrad. In Abbildung 2.3 wird die Dämpfung von Strahlung mit der Wellenlänge von  $0.3 \mu\text{m}$  bis 3 cm für unterschiedliche atmosphärische Einflüsse gezeigt. Dieser Bereich beinhaltet Millimeter- und Zentimeterwellen von Radarsystemen und Nanometer- und Mikrometerwellen von optischen Systemen. Es ist ersichtlich, dass insbesondere der Einfluss von Nebel und Regen bei optischen Systemen eine erhöhte Dämpfung verursacht, die nicht zu vernachlässigen ist.

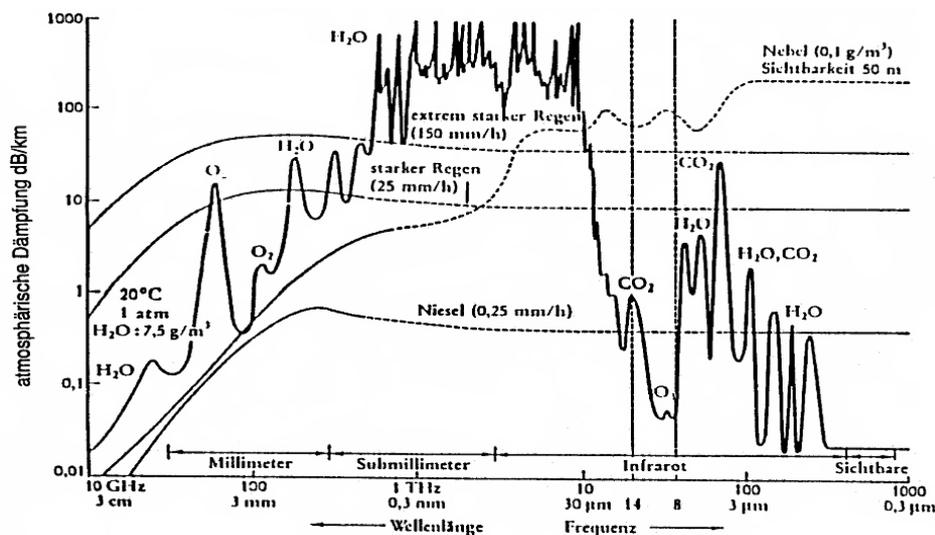


Abbildung 2.3: Atmosphärische Dämpfung [Johansen, 1993].

## 2.3 Reflexionseigenschaften von Oberflächen

In diesem Abschnitt werden die Reflexionseigenschaften von Oberflächen beschrieben. In Abschnitt 2.3.1 werden Reflexionsmodelle für diffuse und spiegelnde Oberflächen vorgestellt. Werden mit einem Lasersystem unterschiedliche Oberflächenformen beleuchtet, hat dies Auswirkungen auf die empfangene Signalform (Abschnitt 2.3.2). Unter bestimmten Gegebenheiten kann dies zu Mehrfachreflexionen führen (Abschnitt 2.3.3). Die Einteilung von Oberflächenstrukturen in unterschiedliche Rauigkeitsstufen (Abschnitt 2.3.4) erfolgt nach der Größe der Oberflächengeometrie. Die Rauigkeit von Oberflächen (Abschnitt 2.3.5) gilt es hierbei zu berücksichtigen. Ist die Größenordnung der Oberflächenrauigkeit im Bereich der Wellenlänge der Laserstrahlung, können unerwünschte Interferenzeffekte auftreten (Abschnitt 2.3.6).

### 2.3.1 Reflexion an Oberflächen

Bei einfachen Reflexionsmodellen nimmt man die Oberfläche als ideal diffus (Abbildung 2.4(a)) oder ideal spiegelnd (Abbildung 2.4(b)) an. Die ideal diffus reflektierende Oberfläche wird auch als Lambert'sche Oberfläche bezeichnet. Bestrahlt man eine ideale diffuse Oberfläche, erscheint diese von verschiedenen Richtungen aus betrachtet gleich hell. Dies wird verursacht durch das Streuvermögen der Oberfläche. Je größer die Wellenlänge der Strahlung, desto kleiner das Streuvermögen der Oberfläche. Daraus kann man schließen, dass mit zunehmender Wellenlänge eine Oberfläche immer mehr spiegelnd wird. Bei der Spiegelung, auch spiegelnde Reflexion genannt, lässt sich die Geometrie des Strahlengangs mit dem Reflexionsgesetz beschreiben. Es gilt, dass der einfallende und der reflektierte Strahl zur Normalen der Oberfläche den gleichen Winkel besitzen und zudem der einfallende Strahl, die Normale der Oberfläche und der reflektierte Strahl auf einer Ebene liegen [Bergmann & Schaefer, 1987]. Reale Oberflächen sind jedoch weder ideal diffus noch ideal spiegelnd, sondern eine Mischung aus diesen beiden Eigenschaften (Abbildung 2.4(c)).

Neben dem beschriebenen einfachen Reflexionsmodell sind weiterführende Modelle für die Beschreibung von Reflexionseigenschaften von Oberflächen aus der Literatur

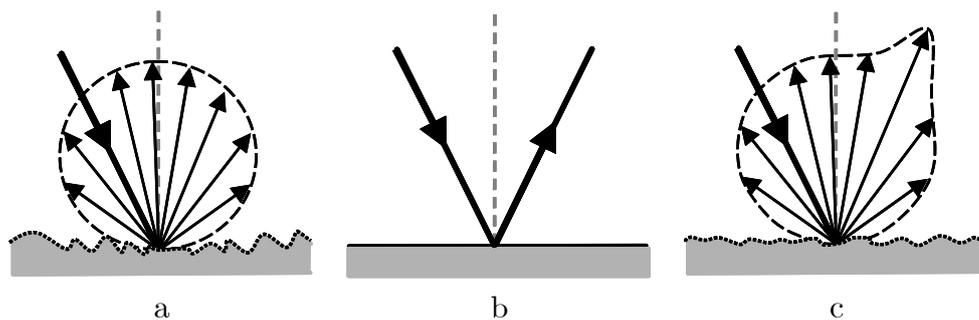


Abbildung 2.4: Unterschiedliche Oberflächenreflexionen. a) Diffuse Reflexion, b) Spiegelnde Reflexion, c) Diffuse Reflexion mit Spiegelung.

bekannt. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden die wesentlichen Modelle kurz beschrieben. Einer der ersten Ansätze wurde von Torrance & Sparrow [1967] vorgestellt. Das Torrance-Sparrow-Modell beschreibt die Strahlstärke (engl. *Radiant Intensity*), die von einer Oberfläche in eine Richtung reflektiert wird und eine gerichtete Verteilungsfunktion besitzt. Nicodemus [1977] führt die sogenannte bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion (engl. *Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF*) ein. Die *BRDF* liefert zu einem Oberflächenelement für jeden Betrachtungswinkel die Quantität des rückgestreuten Lichts, auch für unterschiedlich einfallende Strahlung. Die Berücksichtigung von diffuser Reflexion wurde von Horn & Sjöberg [1979] vorgestellt. Die Erweiterung auf spiegelnde Reflexion erfolgte durch Ginneken *et al.* [1998]. Außer den geometrischen Ansätzen zur Modellierung wurde die physikalische Sichtweise von Nayar *et al.* [1991] behandelt. Einen Überblick über die Rückstreuung von Strahlung an Oberflächen vermittelt Horn & Brooks [1989]. Eine allgemeine Beschreibung über optische Streuung gibt Stover [1990].

### 2.3.2 Unterschiedliche Oberflächenformen und die empfangene Signalform

In Abhängigkeit von der Anwendung sind unterschiedliche Oberflächenformen auszuwerten. In der Stadtplanung können bei urbanen Objekten unterschiedlich weit entfernte Objektbereiche innerhalb des Strahlengangs von Interesse sein, wie sie sich beispielsweise durch die teilweise Beleuchtung von Gebäudedachflächen und die dem Gebäude angrenzende Erdoberfläche ergeben. In der Landwirtschaft sind natürliche Objekte mit einer meist nichtdeterministischen Erscheinung von Interesse, wie sie sich beispielsweise bei kleinen Objekten innerhalb des Strahlengangs mit einer zufälligen Verteilung um einen mittleren Entfernungswert ergeben (beispielsweise mittlere Entfernung von Getreide auf einem Feld).

Der Einfluss von unterschiedlichen Oberflächenformen auf die empfangene Signalform wird exemplarisch anhand von unterschiedlichen Standardgegebenheiten in Abbildung 2.5 veranschaulicht. Die atmosphärischen Einflüsse und die Materialeigenschaften der Oberfläche werden hierbei vernachlässigt. Unterschiedlich weit entfernte Objektbereiche innerhalb des Strahlengangs bewirken in Abhängigkeit von den beleuchteten Objektbereichen unterschiedliche Entfernungswerte. Gleich entfernte Objektbereiche innerhalb des Strahlengangs, die teilweise beleuchtet werden, bewirken eine Überlagerung der Entfernungswerte. Eine einfache Situation sei gegeben mit einer horizontalen ebenen Oberfläche, die von oben durch den Laserstrahl beleuchtet wird (Abbildung 2.5(b)).

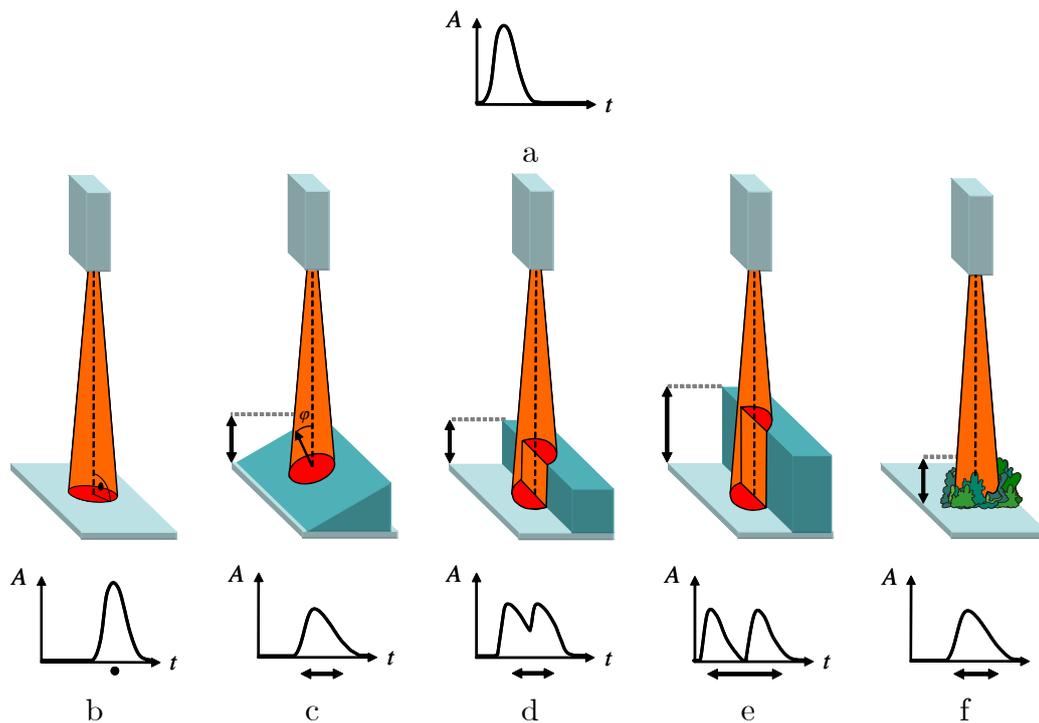


Abbildung 2.5: Unterschiedliche Oberflächenformen und der Einfluss auf die Signalform. a) Gesendete Signalform, b) Ebene Oberfläche ohne Neigung, c) Ebene Oberfläche mit Neigung, d) Zwei Bereiche mit leicht unterschiedlicher Höhe, e) Zwei Bereiche mit deutlich unterschiedlicher Höhe, f) Zufällig angeordnete kleine Objekte.

In diesem Fall ist die empfangene Signalform des rückgestreuten Laserpulses identisch mit der gesendeten Signalform des emittierten Laserpulses (Abbildung 2.5(a)). Eine ebene Oberfläche mit einer Neigung relativ zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls verfügt über unterschiedliche Entfernungen innerhalb des Strahlengangs. Diese unterschiedlichen Entfernungen befinden sich innerhalb eines bestimmten Entfernungintervalls, welches von der Größe des Strahldurchmessers auf der Oberfläche und der Orientierung der Oberfläche abhängig ist. Dies führt zu einer Aufweitung der Signalform (Abbildung 2.5(c)). Eine Deformation der empfangenen Signalform kann ebenfalls beobachtet werden bei der Beleuchtung von zwei Bereichen mit geringer unterschiedlicher Entfernung. Ist die Entfernungsdifferenz der beleuchteten Bereiche vergleichsweise kurz zur Länge der gesendeten Signalform des Laserpulses, ergibt sich eine Überlagerung bei der empfangenen Signalform (Abbildung 2.5(d)). Die zeitliche Länge der empfangenen Signalform ist dann größer als die Länge der gesendeten Signalform. Ist die Entfernungsdifferenz hingegen größer als die Länge der gesendeten Signalform des Laserpulses, so ergeben sich daraus zwei deutlich voneinander getrennte Signalformen (Abbildung 2.5(e)). Mehrere Oberflächen in unterschiedlicher Entfernung innerhalb des Strahlengangs führen zu Mehrfachreflexionen (Abschnitt 2.3.3). In unterschiedlicher Entfernung zufällig angeordnete kleine Objekte (beispielsweise Vegetation) innerhalb des Strahlengangs resultieren in unterschiedliche Entfernungswerte [Pfeifer *et al.*, 2004], die ebenfalls zu einer Aufweitung der Signalform führen (Abbildung 2.5(f)). Diese Beispiele zeigen für einfache Situationen den Einfluss unterschiedlicher Oberflächenformen auf die Signalform.

### 2.3.3 Mehrfachreflexionen

Befinden sich mehrere Objekte, die kleiner als der Strahldurchmesser innerhalb des Strahlengangs des Lasers in unterschiedlichen Entfernungen und werden diese beleuchtet, führt dies zu Mehrfachreflexionen. Dies tritt durch die Beleuchtung von Vegetation (beispielsweise Blätter, Zweige, Äste, Stamm in Abbildung 2.6) beziehungsweise von urbanen Objekten (beispielsweise Gebäudekanten, Hochspannungsleitungen) auf.

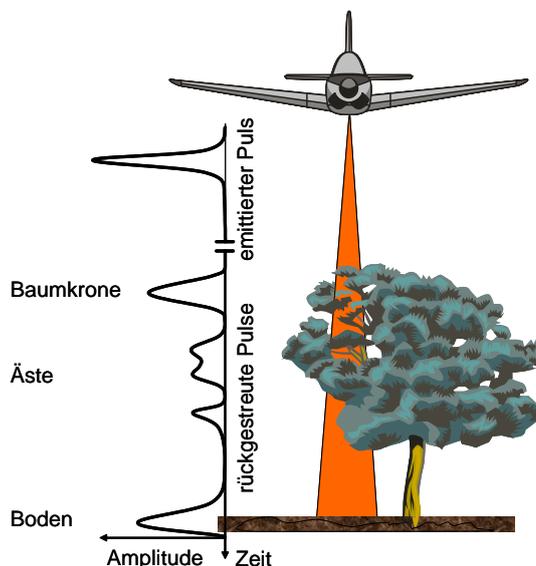


Abbildung 2.6: Mehrfachreflexionen durch die Beleuchtung von Vegetation.

Es wird für die einfache Auswertung von Vegetation die erste Reflexion und von urbanen Objekten die letzte Reflexion berücksichtigt. Dazwischen liegende Reflexionen können jedoch sowohl zur Interpretation von natürlichen als auch „man-made“ Objekten wichtige Informationen liefern. Die Aufzeichnung des kompletten Signalverlaufs erlaubt die Analyse von Mehrfachreflexionen.

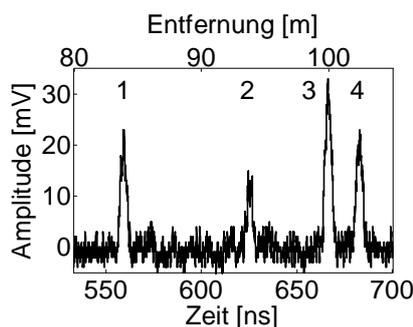


Abbildung 2.7: Gemessener Signalverlauf mit Mehrfachreflexionen.

Ein Beispiel für einen Signalverlauf mit Mehrfachreflexionen ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Der Signalverlauf zeigt vier ausgeprägte Reflexionen, wobei die 1. und 2. Reflexion von einem Baum und die 3. und 4. Reflexion von einem Gebäude stammen. Eine Zuordnung zu unterschiedlichen Objekten ist jedoch aufgrund der alleinigen Analyse des Signalverlaufs ohne Berücksichtigung der räumlichen Nachbarschaft nicht möglich.

### 2.3.4 Beschreibung von Oberflächenstrukturen

Mit einem Lasersystem können unterschiedliche Merkmale erfasst werden. Verschiedene Methoden, die eine Extraktion der Merkmale *Entfernung*, *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke* ermöglichen, werden in Abschnitt 5 beschrieben. Jedes Merkmal kann idealerweise einer speziellen Oberflächenstruktur zugeordnet werden. Um Oberflächenstrukturen unterscheiden zu können, ist eine Einteilung in unterschiedliche *Rauhigkeitsstufen* sinnvoll [Henderson & Lewis, 1998]. Hierbei kann die Größe der angeleuchteten Oberflächengeometrie, bezogen auf den Durchmesser  $d_L$  und die Wellenlänge  $\lambda$  des Laserstrahls, als sinnvolles Unterscheidungsmaß eingesetzt werden, um die unterschiedlichen Oberflächenstrukturen in MACRO-, MESO- und MICRO-Strukturen einzuteilen.

**MACRO-Strukturen:** Mit MACRO-Strukturen werden Strukturen bezeichnet, deren Ausmaße die Größe des Strahldurchmessers  $d_L$  um ein Vielfaches übersteigt. Bei Lasersystemen ist die Strahldivergenz und die räumliche Abtastung aufeinander abgestimmt. Im Allgemeinen ist hierbei der Strahldurchmesser kleiner oder idealerweise gleich dem Abstand zwischen den Stützstellen. Die Entfernungswerte, die durch die räumliche Abtastung mit einem Lasersystem gemessen werden, ermöglichen die Rekonstruktion von großen Objektstrukturen wie unterschiedlichen Dachformen (beispielsweise Pult-, Sattel-, Walmdach, usw.).

Bei der Analyse von MACRO-Strukturen, die bei ausgedehnten Objekten mit einfacher Oberflächengeometrie auftreten, wird vorausgesetzt, dass eine einzelne Reflexion auftritt. Diskontinuitäten innerhalb der beleuchteten Oberflächengeometrie werden vernachlässigt. MACRO-Strukturen werden in dieser Arbeit durch das Merkmal *Entfernung* repräsentiert.

**MESO-Strukturen:** Mit MESO-Strukturen werden Strukturen bezeichnet, deren Ausmaße zwischen der Größe des Strahldurchmessers  $d_L$  und der Wellenlänge  $\lambda$  liegen. Unterschiedlich weit entfernte Objektbereiche innerhalb des Strahlengangs bewirken unterschiedliche Entfernungswerte innerhalb einer Messung. Dies kann verursacht werden durch die Beleuchtung von zwei, mehreren oder kontinuierlichen Bereichen mit geringer unterschiedlicher Entfernung (beispielsweise Schornstein, Gaube, Dachschräge, Dachgiebel, Äste, Blätter, usw.).

Bei der Analyse von MESO-Strukturen können sowohl deterministische Diskontinuitäten durch „*man-made*“ Objekte als auch zufällige Diskontinuitäten durch natürliche Objekte für die beleuchtete Oberflächengeometrie angesetzt werden. MESO-Strukturen bewirken eine Deformation der gesendeten Signalform des rückgestreuten Laserpulses und die zeitliche Pulslänge der empfangenen Signalform wird vergrößert. Diese Variation in der Entfernung durch unterschiedliche Entfernungswerte wird in dieser Arbeit als Merkmal *Entfernungsvariation* bezeichnet.

**MICRO-Strukturen:** Mit MICRO-Strukturen werden Strukturen bezeichnet, deren Ausmaße kleiner beziehungsweise gleich der Größenordnung der Wellenlänge  $\lambda$  sind. In Abhängigkeit von der Wellenlänge wird das Reflexionsvermögen der Oberfläche durch das Oberflächenmaterial beeinflusst. Das Reflexionsvermögen der Oberfläche kann als Reflexionsstärke durch ein Lasersystem bestimmt werden. Die Reflexionsstär-

ke wird aus der Amplitude oder der Energie der empfangenen Signalform gemessen. Somit kann durch die Amplitude (Energie) auf das Material der Oberfläche geschlossen werden.

Bei der Analyse von MICRO-Strukturen ist das Reflexionsvermögen der beleuchteten Oberflächen relevant, um beispielsweise verschiedene Materialien zu unterscheiden. MICRO-Strukturen verändern die Amplitude der empfangenen Signalform des rückgestreuten Laserpulses, der Verlauf wird hierbei nicht verändert. Die Amplitude kann als Maß für das Merkmal *Reflexionsstärke* gesehen werden.

### 2.3.5 Rauigkeit von Oberflächen

Unter Rauigkeit wird die feine regelmäßige beziehungsweise unregelmäßige Variation der Geometrie von Oberflächen verstanden. Diese feinen geometrischen Eigenschaften sind bei „*man-made*“ Objekten durch das Material oder durch den Fertigungsprozess bestimmt. Natürliche Objekte sind meist unregelmäßig und liegen in willkürlicher Form vor. Es ist naheliegend, dass für die mathematische Beschreibung von Rauigkeit eine Verteilungsdichtefunktion in Abhängigkeit von den geometrischen Eigenschaften verwendet wird. Die Verteilungsdichtefunktion der Oberfläche wird in Richtung zur Flächennormalen bestimmt durch die Funktion  $p(z)$ , die von der Höhe  $z$  abhängig ist.

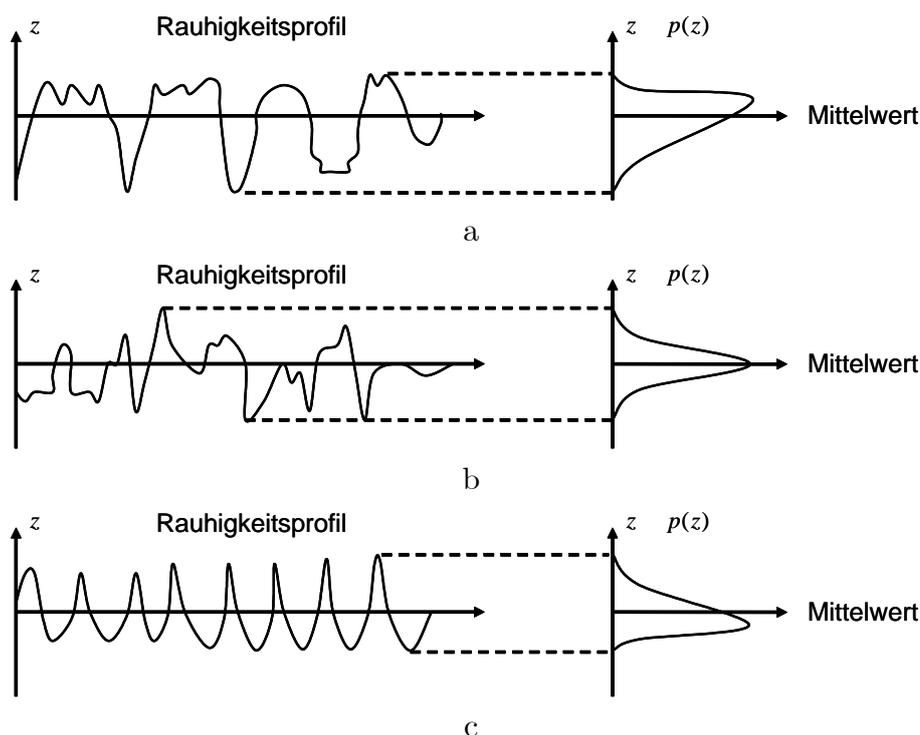


Abbildung 2.8: Rauigkeitsprofile und die dazugehörige Verteilungsdichtefunktion mit unterschiedlicher Symmetrie [ASME, 2002]. a) Asymmetrische Verteilungsdichtefunktion (Mittelwert < Maximum), b) Symmetrische Verteilungsdichtefunktion (Mittelwert = Maximum), c) Asymmetrische Verteilungsdichtefunktion (Mittelwert > Maximum).

Der eindimensionale Verlauf der geometrischen Eigenschaften von Oberflächen wird als Rauigkeitsprofil bezeichnet. Die Verteilungsdichtefunktion von Rauigkeitsprofilen

kann nach deren Symmetrie charakterisiert werden [ASME, 2002]. Die Schiefe (engl. *Skewness*) ist dann ein Maß für die Asymmetrie der Verteilungsdichtefunktion. In Abbildung 2.8 sind Beispiele für verschiedene Rauigkeitsprofile und die dazugehörige Verteilungsdichtefunktion mit unterschiedlicher Symmetrie gezeigt.

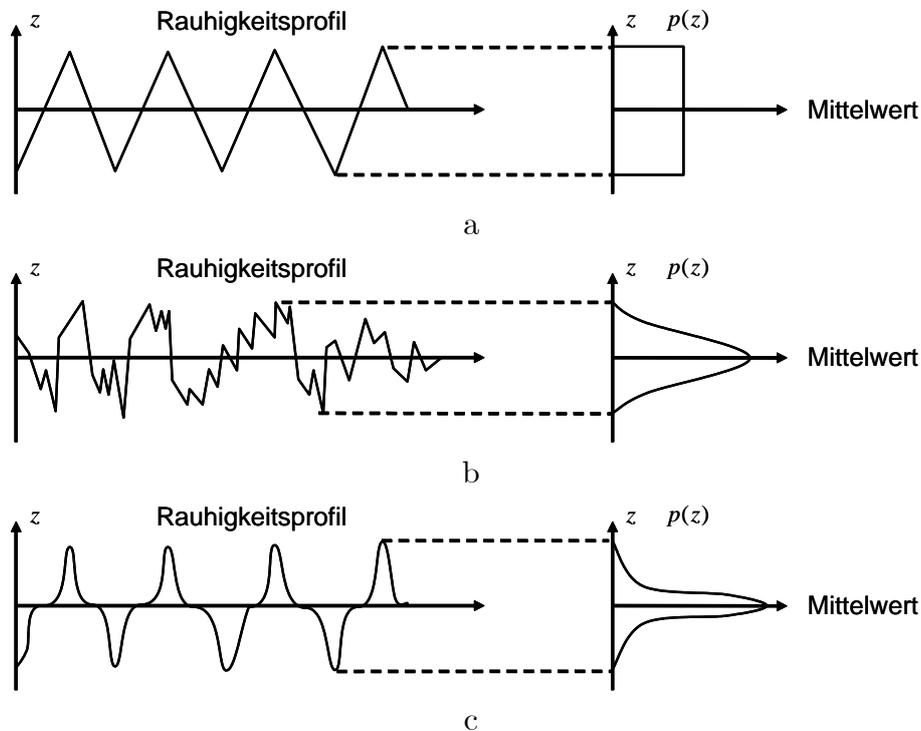


Abbildung 2.9: Rauigkeitsprofile und die dazugehörige Verteilungsdichtefunktion mit unterschiedlicher Steilheit [ASME, 2002]. a) Platykurtische Verteilungsdichtefunktion (Steilheit  $< 0$ ), b) Mesokurtische Verteilungsdichtefunktion (Steilheit  $= 0$ ), c) Leptokurtische Verteilungsdichtefunktion (Steilheit  $> 0$ ).

Die Verteilungsdichtefunktion von Rauigkeitsprofilen kann einen spitz zulaufenden oder flachen Verlauf der Verteilung aufweisen. Die Steilheit (engl. *Kurtosis*) ist dann ein Maß für die Steigung der Verteilungsdichtefunktion. Die Steilheit beschreibt die Abweichung des Verlaufs der Verteilungsdichtefunktion zum Verlauf einer Normalverteilung. Bei einer Normalverteilung (mesokurtisch) beträgt die Steilheit null. Ein flacher Verlauf der Verteilungsdichtefunktion (platykurtisch) besitzt eine negative Steilheit und einen spitz zulaufenden Verlauf der Verteilungsdichtefunktion (leptokurtisch) besitzt eine positive Steilheit. In Abbildung 2.9 werden Beispiele für verschiedene Rauigkeitsprofile und die dazugehörige Verteilungsdichtefunktion mit unterschiedlicher Steilheit gezeigt.

### 2.3.6 Interferenzeffekte bei Oberflächen

Oberflächenstrukturen, deren Ausmaße in der Größenordnung der Wellenlänge der Laserstrahlung liegen, verändern die Kohärenz der Lichtwellen und es kommt zu meist unerwünschten Interferenzeffekten, die als *Speckle* (engl.) bezeichnet werden. Die Interferenz ergibt sich aus einer konstruktiven und destruktiven Überlagerung von Lichtwellen. Ist die Oberfläche unsystematisch strukturiert, entsteht ein örtliches Intensitätsmuster, welches sich aus einer zufälligen Anordnung von Intensitätsflecken (lokale In-

tensitätsminima und -maxima) zusammensetzt. Ein einzelner Intensitätsfleck innerhalb dieses Musters wird als *Speckle* bezeichnet. Der minimale Durchmesser einer einzelnen *Speckle*-Zelle berechnet sich mit

$$d_s \approx \frac{\lambda r}{d_L}, \quad (2.6)$$

wobei  $r$  die Entfernung zur Oberfläche,  $\lambda$  die Wellenlänge der Laserstrahlung und  $d_L$  dem Strahldurchmesser des Laserstrahls auf der Oberfläche entspricht [Osche, 2002].

Ist die Empfangsaperatur hinreichend groß im Vergleich zur Größe der Intensitätsflecken werden die unterschiedlichen Werte des Intensitätsmusters im Mittel ausgeglichen. Dies wird als Aperturmittelung (engl. *Aperture Averaging*) bezeichnet.

## 2.4 Charakterisierung von Lasersystemen

In Abhängigkeit von der Anwendung werden unterschiedliche Typen von Lasersystemen eingesetzt [Kamermann, 1993]. Die Charakterisierung der Lasersysteme kann nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen und dementsprechend eingruppiert werden. Eine Übersicht zur Charakterisierung von Lasersystemen ist in Abbildung 2.10 dargestellt. In dieser Arbeit werden zur Unterscheidung von unterschiedlichen Typen von Lasersystemen die folgenden technischen Kriterien näher beschrieben: Lasertypen (Abschnitt 2.4.1), Modulationstechnik (Abschnitt 2.4.2), Messtechnik (Abschnitt 2.4.3), Detektionstechnik (Abschnitt 2.4.4) und Anordnung der Sende- und Empfangsoptik (Abschnitt 2.4.5). Entsprechend der Übersicht in Abbildung 2.10 sind folgende Abschnitte organisiert.

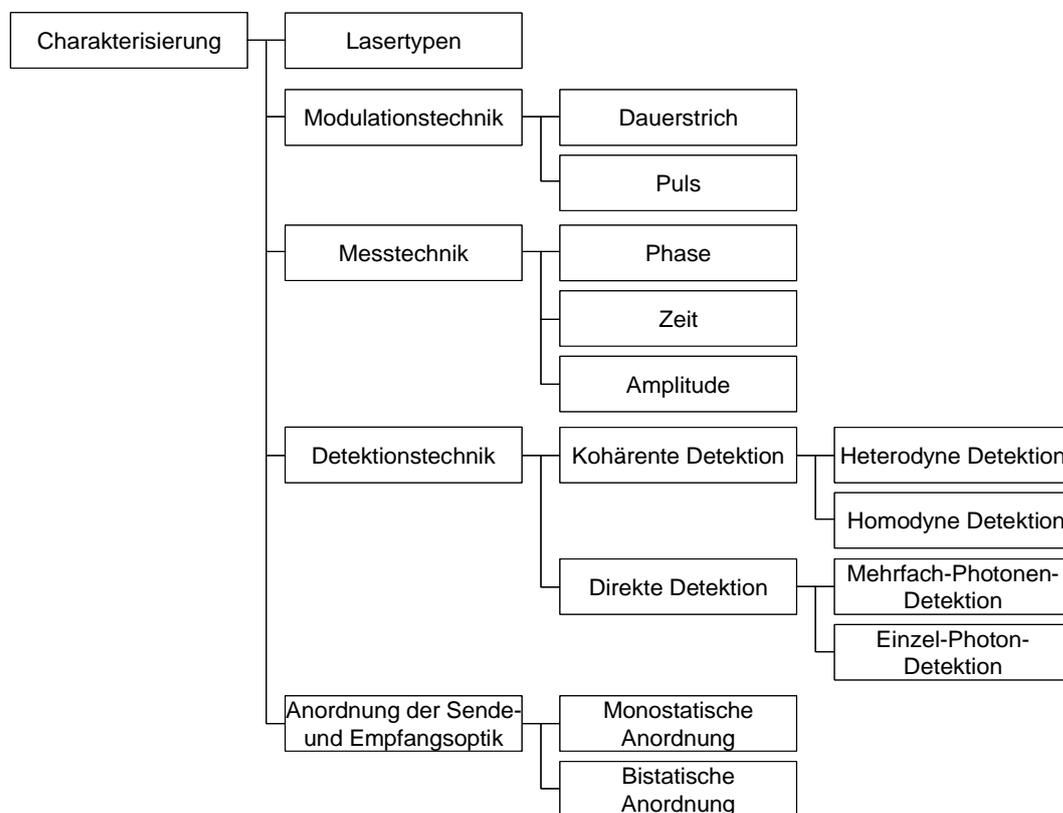


Abbildung 2.10: Charakterisierung von Lasersystemen nach technischen Kriterien.

### 2.4.1 Lasertypen

Die Entwicklung von Lasern hat zu einer Vielfalt unterschiedlicher Lasertypen geführt [Hecht, 1992; Kneubühl & Sigrist, 1988; Siegman, 1986]. Der Laser wirkt als Oszillator und Verstärker für monochromatische Strahlung (Infrarot, sichtbares Licht, Ultraviolett). Der operative Wellenlängenbereich, in dem Laser derzeit verfügbar sind, liegt etwa zwischen  $0.1\ \mu\text{m}$  und  $3\ \text{mm}$ . Zum Vergleich sei erwähnt, dass sichtbares Licht etwa die Wellenlänge von  $0.37$  bis  $0.75\ \mu\text{m}$  umfasst. Für die Messung mit Lasersystemen werden Laser eingesetzt, die Laserstrahlung mit möglichst hoher Energie emittieren. Zudem wird gefordert, dass die Augensicherheit gewährleistet ist, damit keine Gesundheitsgefährdung für den Menschen erfolgt. Die Gefährdung ist besonders hoch, wenn die Wellenlänge des Lasers im Spektralbereich des sichtbaren Lichtes liegt, weil dann der Strahl auf die Netzhaut fokussiert wird und diese beschädigen kann. Aus diesem Grund steht die Augensicherheit im Widerspruch zu der geforderten hohen Ausgangsenergie. Deswegen ist man bestrebt, Lasersysteme zu entwerfen, deren Wellenlängen außerhalb des sichtbaren Spektralbereichs liegen. In diesem Fall kann die emittierte Energie um ein Vielfaches (bis zu  $10^6$ ) höher sein, ohne dass die Gefahr einer Schädigung des Auges besteht. Im augensicheren Wellenlängenbereich sind folgende Lasertypen besonders attraktiv für die Messung mit Lasersystemen:

**Erbium-Faser-Laser:** Der Erbium-Faser-Laser ist ein Halbleiterlaser, der sich durch seine kompakte Bauweise auszeichnet und zudem leistungsstark ist. Generell muss die Energie, die notwendig ist, um die Atome oder Moleküle in die angeregten Zustände zu versetzen, dem System von außen zugeführt werden. Dieser Prozess wird als *Pumpen* bezeichnet. Zum optischen Pumpen wird beim Erbium-Faser-Laser eine Laserdiode eingesetzt. Es besteht die Möglichkeit, die Modulation der Laserstrahlung direkt über den Injektionsstrom an der Laserdiode zu beeinflussen. Zur Verstärkung der Strahlung wird eine Glasfaser als aktives Material verwendet. Die Wellenlänge liegt bei  $1.54\ \mu\text{m}$ .

**CO<sub>2</sub>-Laser:** Der CO<sub>2</sub>-Laser ist ein Gaslaser, der sich mit geringem technischen Aufwand realisieren lässt und besonders leistungsstark ist. Der Nachteil ist die große und schwere Bauweise. Als aktives Material wird Kohlendioxid verwendet. Die Wellenlänge liegt bei  $10.6\ \mu\text{m}$ . Durch die Wellenlängen müssen entsprechend große Optiken verwendet werden und der Detektor für den Empfang muss zudem gekühlt werden.

**Nd:YAG-Laser:** Der Nd:YAG-Laser ist ein Festkörperlaser, der auch als Neodym-Laser bezeichnet wird. Zum optischen Pumpen können unterschiedliche Quellen verwendet werden: Beispielsweise Halbleiter Laser oder Blitzlampen. Dies beeinflusst die Charakteristik des Lasers und der emittierten Laserstrahlung. Durch die Ramanverschiebung kann die Wellenlänge von  $1.064\ \mu\text{m}$  auf bis zu  $1.598\ \mu\text{m}$  (Stokes-Verschiebung) verlängert werden.

In Tabelle 2.1 wird ein Auszug mit verschiedenen Lasern gezeigt. Es werden deren operative Wellenlänge und der Leistungsbereich angegeben. Zudem ist die mögliche Modulationstechnik aufgeführt.

Neben den genannten Kriterien werden Laser anhand ihrer Betriebsart eingeteilt. Hierbei erfolgt eine Unterscheidung zwischen kontinuierlich betriebenen Lasern (engl.

| Lasertyp                                     | Wellenlänge                | Leistung  | Modulationstechnik              |
|--|----------------------------|-----------|---------------------------------|
| ArF <sup>a</sup> <i>Excimer</i> <sup>b</sup> | 0.192 $\mu\text{m}$        | einige W  | gepulste Laser                  |
| Ar <sup>+</sup> <sup>c</sup>                 | 0.33 – 0.36 $\mu\text{m}$  | einige W  | Dauerstrich-Laser               |
| HeNe <sup>d</sup>                            | 0.635 – 0.66 $\mu\text{m}$ | um 50 mW  | Dauerstrich-Laser               |
| Rubin  | 0.694 $\mu\text{m}$        | wenige W  | gepulste Laser                  |
| Nd <sup>e</sup> :YAG <sup>f</sup>            | 1.064 $\mu\text{m}$        | bis zu kW | Dauerstrich- und gepulste Laser |
| Erbium-Faser                                 | 1.54 $\mu\text{m}$         | mW        | Dauerstrich-Laser               |
| Erbium:YAG <sup>f</sup>                      | 2.94 $\mu\text{m}$         | einige W  | gepulste Laser                  |
| DF <sup>g</sup>                              | 3.6 – 4 $\mu\text{m}$      | einige kW | Dauerstrich- und gepulste Laser |
| CO <sup>h</sup>                              | 5 – 6 $\mu\text{m}$        | einige W  | Dauerstrich-Laser               |
| CO <sub>2</sub> <sup>i</sup>                 | 9 – 11 $\mu\text{m}$       | einige kW | Dauerstrich-Laser               |

Tabelle 2.1: Kommerzielle Lasertypen, geordnet nach der Wellenlänge [Hecht, 1992].  
<sup>a</sup> ArF: Argon Fluor (Gaslaser), <sup>b</sup> *Excimer: Exited Dimmer*, <sup>c</sup> Argonionen (Gaslaser), <sup>d</sup> HeNe: Helium Neon (Gaslaser), <sup>e</sup> Nd: Neodym, <sup>f</sup> YAG: Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (Yttrium-Aluminium-Granat), <sup>g</sup> DF: Deuterium Fluor (chemischer Laser), <sup>h</sup> CO: Kohlenmonoxid, <sup>i</sup> CO<sub>2</sub>: Kohlendioxid.

*Continuous Wave, CW*), die auch als Dauerstrich-Laser bezeichnet werden und gepulsten Lasern. Dies wird im folgenden Abschnitt 2.4.2 noch vertieft.

### 2.4.2 Modulationstechnik

Der Laser des Lasersystems emittiert elektromagnetische Strahlung. Die Strahlung muss für die verwendete Messtechnik (Abschnitt 2.4.3) unterschiedlich moduliert werden. Eine Einteilung der Lasersysteme nach der Modulationstechnik [Koskinen *et al.*, 1991; Wehr & Lohr, 1999] wird in den beiden folgenden Abschnitten für Dauerstrich- und gepulste Laser vorgenommen.

**Dauerstrich-Laser:** Bei dem Dauerstrich-Laser wird stetig elektromagnetische Strahlung emittiert. Die elektromagnetische Strahlung kann direkt (beispielsweise bei Halbleiterlasern über den Injektionsstrom [Kern, 2003]) oder indirekt mit einem resonatorinternen elektrooptischen Modulator (beispielsweise Pockelszelle) beziehungsweise resonatorexternen akustisch-optischen Modulator (engl. *Chopper*) moduliert werden. Durch die Modulation (beispielsweise Amplitudenmodulation und Frequenzmodulation) wird die Energie der emittierten elektromagnetischen Strahlung verändert. Dadurch ist es möglich, bestimmte Signalformen zu senden, die für die eingesetzte Messtechnik am Empfänger erforderlich sind.

**Gepulste Laser:** Bei gepulsten Lasern wird kurzzeitig ein hoher Anteil der elektromagnetischen Strahlung emittiert. Kurze Laserpulse können durch unterschiedliche Techniken generiert werden: Verstärkungsschaltung (engl. *Gain Switching*), Güteschaltung (engl. *Q-Switching*), Auskoppelmodulation (engl. *Cavity Dumping*), Güteschaltung mit Auskoppelmodulation (engl. *Gain Switching with Cavity Dumping*) und Modenkopplung (engl. *Mode Locking*) [Kammermann, 1993]. Für die Messung ist es wünschenswert, einen möglichst kurzen Laserpuls mit hoher Pulsenergie einzusetzen. Dies ist ein physikalischer Gegensatz, weswegen ein Kompromiss zwischen Pulslänge und

Pulsenergie erfolgen sollte. Die Pulslänge ist typischerweise zwischen 2 – 10 ns, wobei die Länge des emittierten Pulses bei halber Amplitudenhöhe (engl. *Full Width at Half Maximum, FWHM*) spezifiziert wird.

### 2.4.3 Messtechnik

Messverfahren, die bei Lasersystemen eingesetzt werden, basieren auf Phasen-, Zeitbeziehungswise Amplituden-Messung [Baltsavias, 1999a; Koskinen *et al.*, 1991; Wehr & Lohr, 1999] oder eine Kombination der verschiedenen Messungen. Hierbei werden Dauerstrich- beziehungsweise gepulste Laser als emittierende Quellen eingesetzt. Aus dem Signal des modulierten Lasers wird die Laufzeit beziehungsweise die Amplitude bestimmt.

**Phasen-Messung:** Bei einem amplitudenmodulierten (AM) Dauerstrich-Lasersystem wird anhand der Phase die Laufzeit bestimmt (Abbildung 2.11). Sei  $\Phi_s$  die Phase der sinusförmig modulierten gesendeten Signalform und  $\Phi_r$  die Phase der empfangenen Signalform, dann berechnet sich aus deren Differenz der Phasenabstand  $\Phi_A$ . Mit dem Phasenabstand  $\Phi_A$  kann die Laufzeit und die dazu korrespondierende *Entfernung* berechnet werden mit

$$r = \frac{\lambda_m \cdot \Phi_A}{4\pi}, \quad (2.7)$$

wobei  $\lambda_m$  der Modulationswellenlänge entspricht.

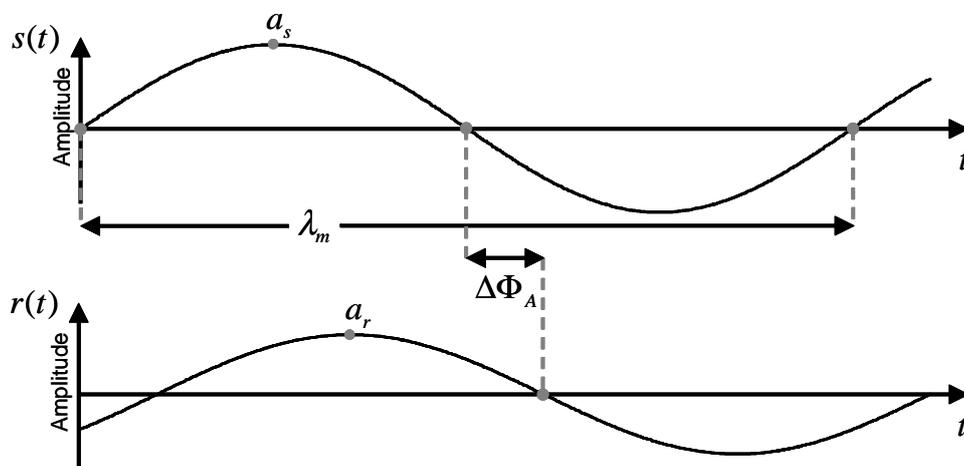


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung von der gesendeten Signalform  $s(t)$  (oben) und der empfangenen Signalform  $r(t)$  (unten) bei der Phasen-Messung.

Die *Entfernungsauflösung*  $\Delta r$  berechnet sich dann unter Berücksichtigung der Winkelauflösung des Phasenabstandes  $\Delta\Phi_A$  mit

$$\Delta r = \frac{\lambda_m \cdot \Delta\Phi_A}{4\pi}. \quad (2.8)$$

Um die Entfernungsauflösung bei fest vorgegebener Winkelauflösung  $\Delta\Phi_A$  zu erhöhen, kann nur die Modulationswellenlänge  $\lambda_m$  verringert werden. Dies hat jedoch zur Folge, dass der *Eindeutigkeitsbereich* der Entfernungsermittlung reduziert wird.

Denn es gilt bei der Verwendung von nur einer Modulationsfrequenz (engl. *Single-Tone Sinusoidal Modulation*), dass die Entfernung nur unterhalb der maximalen Entfernung  $r_{max}$  eindeutig ist. Es gilt dann

$$r_{max} = \frac{\lambda_m}{2}. \quad (2.9)$$

Das Mehrdeutigkeitsproblem kann durch mehrere nacheinander oder zeitgleich aufeinander abgestimmte Modulationsfrequenzen (engl. *Multiple-Tone Sinusoidal Modulation*) aufgehoben werden. In diesem Fall wird mit der längsten Modulationswellenlänge der Eindeutigkeitsbereich und mit der kürzesten Modulationswellenlänge die Entfernungsauflösung bestimmt.

Zudem bewirken teilweise beleuchtete Oberflächen mit unterschiedlicher Entfernung im Strahlengang ein überlagertes Signal in Abhängigkeit von der Entfernung und Reflektanz der Oberflächen. Da nur ein Phasenwert am Empfänger ermittelt wird, kann die durch die teilweise beleuchteten Oberflächen bedingte Mehrdeutigkeit nicht mehr aufgelöst werden [Thiel & Wehr, 2004]. Es wird fälschlicherweise ein Zwischenwert gemessen, der innerhalb des Entfernungsintervalls der teilweise beleuchteten Oberflächen liegt.

**Zeit-Messung:** Bei einem gepulsten Lasersystem wird über die Laufzeit (engl. *Time of Flight*) des Laserpulses vom Sensor zur Objektfläche hin (Hinweg) und von der Oberfläche zum Empfänger zurück (Rückweg) die *Entfernung* berechnet (Abbildung 2.12). Mit der Laufzeit  $t$  berechnet sich die *Entfernung*  $r$  (Abschnitt 2.5.1)

$$r = \frac{t \cdot c}{2}, \quad (2.10)$$

wobei  $c$  der Lichtgeschwindigkeit entspricht.

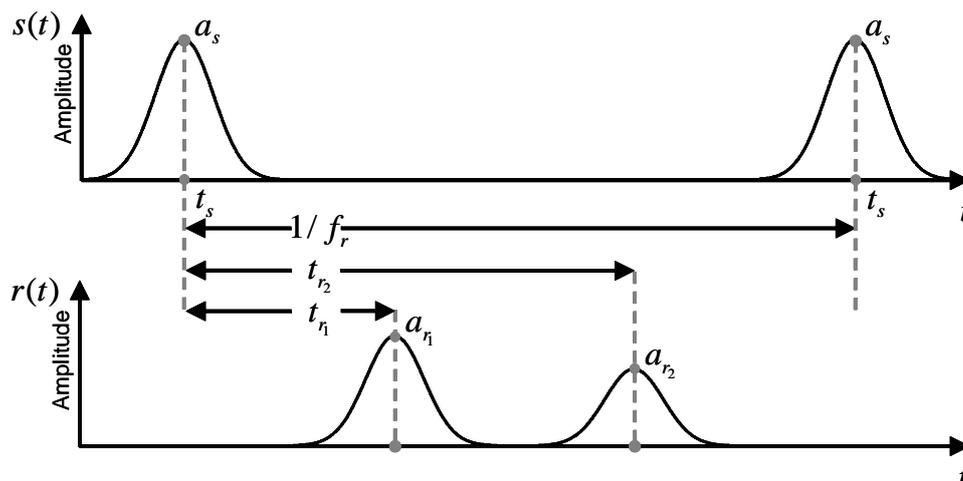


Abbildung 2.12: Schematische Darstellung von der gesendeten Signalform  $s(t)$  (oben) und der empfangenen Signalform  $r(t)$  (unten) bei der Zeit-Messung.

Sei die zeitliche Auflösung  $\Delta t$ , berechnet sich daraus die *Entfernungsauflösung*  $\Delta r$  (Abschnitt 2.5.2) mit

$$\Delta r = \frac{\Delta t \cdot c}{2}. \quad (2.11)$$

Der *Eindeutigkeitsbereich*, in dem der rückgestreute Laserpuls dem zuletzt emittierten Laserpuls eindeutig zugeordnet werden kann, liegt unterhalb der maximalen Entfernung

$$r_{max} = \frac{c}{2f_r}, \quad (2.12)$$

wobei  $f_r$  die Pulswiederholrate ist. Diese gibt die Anzahl der emittierten Laserpulse pro Zeiteinheit wieder. Es empfiehlt sich, die Pulswiederholrate auf den operativen Entfernungsbereich abzustimmen. Kommerzielle flugzeuggetragene Lasersysteme haben typischerweise eine Pulswiederholrate von 50 – 100 kHz (Tabelle 6.2), womit ein Entfernungsbereich von 1500 – 3000 m mit einem emittierten Puls eindeutig erfasst werden kann.

Teilweise beleuchtete Oberflächen mit unterschiedlicher Entfernung im Strahlengang können dann einzeln aufgelöst werden, wenn eine Trennung der empfangenen Signalformen möglich ist [Katzenbeisser, 2003]. In diesem Fall können mehrere Entfernungswerte für die teilweise beleuchteten Oberflächen mit einem emittierten Laserpuls ermittelt werden. In dem Beispiel in Abbildung 2.12 sind zwei empfangene Signalformen mit unterschiedlichen Laufzeiten  $t_{r_1}$  und  $t_{r_2}$  gezeigt.

**Amplituden-Messung:** Die Amplituden-Messung kann sowohl bei Dauerstrich-Lasern als auch bei gepulsten Lasern erfolgen. Die *Amplitude*  $a_r$  wird beeinflusst von der Hintergrundstrahlung, der Entfernung des Objekts zum Lasersystem, der beleuchteten Oberflächengröße und von der Reflektanz, Neigung und Rauigkeit der beleuchteten Oberfläche.

Bei Dauerstrich- beziehungsweise gepulstem Laser entspricht die Amplitude dem maximalen Wert des konstant sinusförmigen beziehungsweise des pulsförmigen Signals. Erfahrungsgemäß ist die gemessene Amplitude bei gepulstem Laser mehr rauschbehaftet als beim Dauerstrich-Laser. Dies ist darin begründet, dass die Messdauer für die Amplitude bei gepulstem Laser wesentlich kürzer ist als beim Dauerstrich-Laser und sich deswegen Signalstörungen stärker auf den Messwert auswirken.

#### 2.4.4 Detektionstechnik

Die optischen Detektionstechniken bei Lasersystemen lassen sich einteilen in Kohärente Detektion (engl. *Coherent Detection*) und Direkte Detektion (engl. *Direct Detection*) [Jelalian, 1992; Kamermann, 1993; Osche, 2002]. Der wesentliche Unterschied dieser Detektionstechniken besteht darin, dass bei der Kohärenten Detektion die Kohärenz der elektromagnetischen Strahlung für die Detektion berücksichtigt wird und bei der Direkten Detektion die Kohärenz unberücksichtigt bleibt.

**Kohärente Detektion:** Für die Kohärente Detektion wird zeitliche und räumliche Kohärenz der elektromagnetischen Lichtwellen vorausgesetzt. Die zeitliche Kohärenz ist erfüllt, wenn ein fortlaufender Wellenzug mit konstanter Phase gegeben ist. Bei der räumlichen Kohärenz sind die Lichtwellen räumlich gleichgerichtet. Beide Bedingungen werden von der Laserstrahlung erfüllt. Für kohärente Strahlung gilt, dass sie immer

monochromatisch und interferenzfähig ist. Ergänzend sei erwähnt, dass monochromatische Strahlung nur bedingt interferenzfähig ist [Ertl, 1978]. Durch Interferometrie kann anhand der Phase des Mischsignals, welches durch Überlagerung der rückgestreuten Strahlung mit der Strahlung des Lokaloszillators (*LO*) bestimmt wird, die Entfernung ermittelt werden.

Prinzipiell werden somit bei der Kohärenten Detektion die gleichen Überlegungen angestellt wie bei der Phasen-Messung (Abschnitt 2.4.3). Der Unterschied jedoch ist, dass hier die Wellenlänge des Trägersignals etwa um den Faktor  $10^6$  kleiner ist als bei üblicherweise verwendeten Modulationsfrequenzen. Die beiden kohärenten Detektionsmethoden sind Heterodyne Detektion (engl. *Heterodyne Detection*) und Homodyne Detektion (engl. *Homodyne Detection*).

**Heterodyne Detektion:** Bei der Heterodynen Detektion werden immer zwei getrennte Signalquellen eingesetzt (Abbildung 2.13(a)). Die eine Signalquelle ist ein Laser, der die zu emittierende Strahlung generiert und die andere Signalquelle ist ebenfalls ein Laser, der die Aufgabe des Lokaloszillators (*LO*) übernimmt. Die Frequenzen des gesendeten Signals und des Lokaloszillators sind unterschiedlich und unkorreliert. Die rückgestreute Strahlung wird mittels eines Strahlteilers mit der Strahlung des Lokaloszillators gemischt und auf dem Detektor abgebildet. Ist sowohl das empfangene Signal als auch der Lokaloszillator zeitlich und räumlich kohärent, zudem gut aufeinander ausgerichtet und mit identischer Polarisationsrichtung, dann erhält man ein gemischtes Signal mit Interferenzeigenschaften. Die Interferenzfrequenz des Signals ist gleich der Differenz der Frequenz des empfangenen Signals und der Frequenz des Lokaloszillators. Erfährt beispielsweise das empfangene Signal eine Frequenzverschiebung bedingt durch die Beleuchtung eines relativ zum Lasersystem bewegten Objekts, kann anhand der Interferenzfrequenz auf die Geschwindigkeit des Objekts geschlossen werden.

**Homodyne Detektion:** Bei der Homodynen Detektion wird nur eine Signalquelle eingesetzt (Abbildung 2.13(b)). Die Signalquelle ist ein Laser, der sowohl die zu emittierende Strahlung generiert als auch die Aufgabe des Lokaloszillators (*LO*) übernimmt. Die Frequenzen des gesendeten Signals und des Lokaloszillators sind gleich und korreliert. Wie bei der Heterodynen Detektion wird die rückgestreute Strahlung mittels eines Strahlteilers mit der Strahlung des Lokaloszillators gemischt und auf dem Detektor abgebildet. Die Strahlung für den Lokaloszillator wird bei der Homodynen Detektion von der emittierten Strahlung über einen zusätzlichen Strahlteiler im Strahlengang teilweise entnommen. Entsprechend der Beschreibung bei der Heterodynen Detektion ergibt sich ein gemischtes Signal mit Interferenzeigenschaften. Die Homodyne Detektion kann zur Geschwindigkeitsmessung eingesetzt werden. Durch zusätzliche Veränderungen des Messaufbaus ist auch eine Entfernungsmessung möglich.

**Direkte Detektion:** Bei der Direkten Detektion wird die Energie der Laserstrahlung, die auf den Detektor einwirkt, direkt erfasst, d.h. die Kohärenz der elektromagnetischen Strahlung geht hierbei verloren. Durch den Detektor wird die empfangene optische Energie direkt in ein elektrisches Signal (Spannung oder Strom) gewandelt. Zwei unterschiedliche Detektionstechniken ermöglichen die zeitliche Signalform von Laserpulsen zu erfassen: Mehrfach-Photonen-Detektion (engl. *Multi Photon Detection*) und Einzel-Photon-Detektion (engl. *Single Photon Detection*).

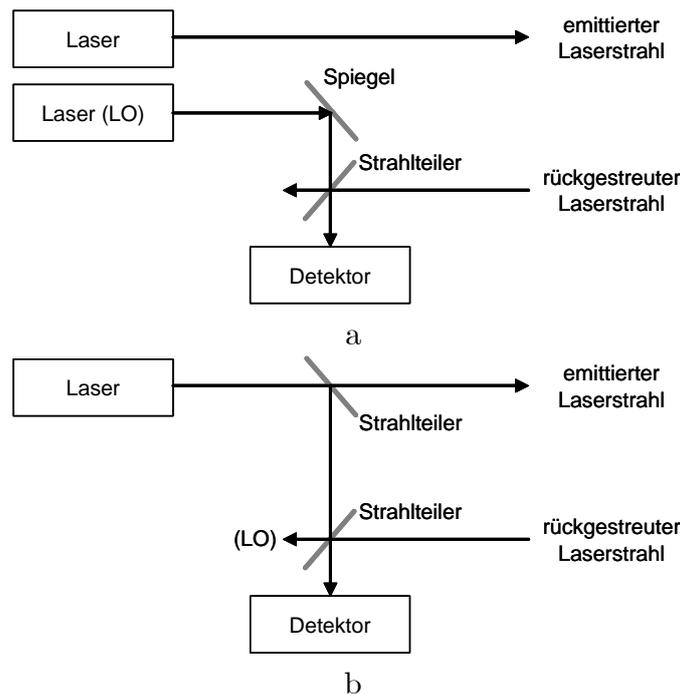


Abbildung 2.13: Schematische Darstellung der Kohärenten Detektion. a) Heterodyne Detektion, b) Homodyne Detektion.

**Mehrfach-Photonen-Detektion:** Bei der Messung durch Mehrfach-Photonen-Detektion werden als Detektor sowohl *PIN* (engl. *Positive Intrinsic Negative Diode*), als auch die empfindlicheren *APD* (engl. *Avalanche Photodiode*) verwendet. Durch die Photodiode wird ein analoges elektrisches Signal (Spannung oder Strom) bereitgestellt, welches idealerweise direkt proportional zu der optischen Leistung der elektromagnetischen Strahlung (Photonenanzahl) ist. Um eine detaillierte Analyse der Signalforn vornehmen zu können, wird mittels A/D-Wandlung ein digitales Signal erzeugt (Abbildung 2.14(a)). Zur Analyse der Signalforn von rückgestreuten kurzen Laserpulsen wird eine Empfangseinheit benötigt, die eine hohe Grenzfrequenz besitzt und mit einer entsprechend angepassten Abtastrate die Signalforn erfasst.

**Einzel-Photon-Detektion:** Die Integration der auf den Detektor einfallenden elektromagnetischen Strahlung durch Mehrfach-Photonen-Detektion kann bei der Einzel-Photon-Detektion mit einer Verteilung von Photonen über einen begrenzten Beobachtungszeitraum verglichen werden. Als Detektor bei der Einzel-Photon-Detektion werden sowohl Photovervielfacherröhren (engl. *Photomultiplier Tubes, PMT*) und Mikrokanalplatten (engl. *Microchannel Plate, MCP*), als auch *APD* (engl. *Avalanche Photodiode*) verwendet. Setzen wir voraus, dass die beleuchtete Szene und das Lasersystem stationär sind. In diesem Fall ist die statistische Eigenschaft der gemessenen Laserstrahlung zeitinvariant und die über die Zeit gemittelte Quantität der Laserstrahlung ist gleich der Quantität über das Ensemble. Man spricht dann von einem stationären und ergodischen Prozess [Papoulis, 1984; Troup, 1972].

Im Folgenden wird der Ablauf der Einzel-Photon-Detektion beschrieben (Abbildung 2.14(b)). Ein einzelner Puls wird von der Laserquelle emittiert und durch eine Messung am Empfänger wird von dem rückgestreuten Puls ein *einzelnes Photon* de-

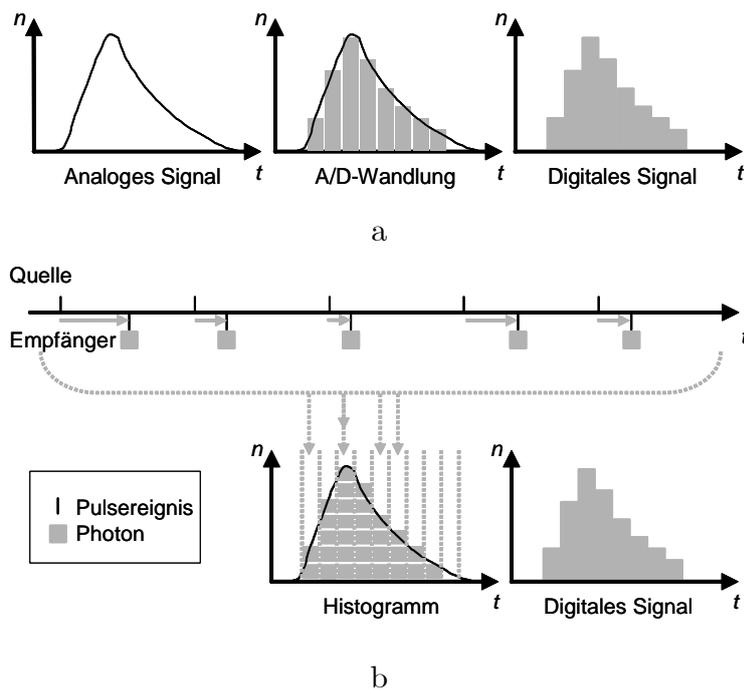


Abbildung 2.14: Schematische Darstellung der Direkten Detektion. a) Mehrfach-Photonen-Detektion, b) Einzel-Photon-Detektion.

tektiert. Die Laufzeit von diesem einzelnen Pulsereignis wird in das Zeitfenster (engl. *Bin*) eines Histogramms eingetragen. Es werden dann mehrere Messungen vorgenommen und die Laufzeiten der einzelnen Pulsereignisse im Zeitfenster des Histogramms eingetragen. Dadurch ergibt sich eine Verteilung, die nahezu identisch mit der Integration von *mehreren Photonen* über der Zeit ist, wie es bei einer Messung eines einzelnen Laserpulses durch Mehrfach-Photonen-Detektion geschieht [Alexander, 1997; Gagliardi & Karp, 1976; Loudon, 1973]. Die Qualität der Signalforn ist abhängig von der Anzahl der erfassten Pulsereignisse.

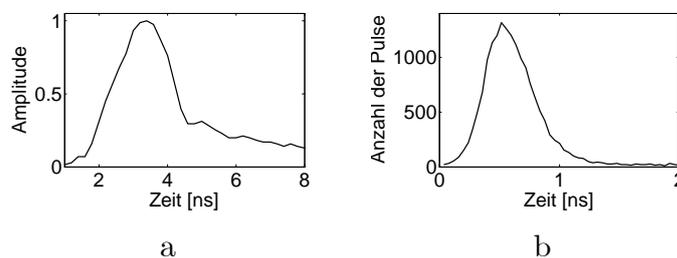


Abbildung 2.15: Messung der Signalforn mit Direkter Detektion. a) Mehrfach-Photonen-Detektion (Laserquelle ist ein gepulster Nd:YAG-Laser), b) Einzel-Photon-Detektion (Laserquelle ist ein gepulster Dioden-Laser).

Ein Beispiel für ein Histogramm zeigt die Abbildung 2.15(b). Hierfür wurde die Laufzeit der einzelnen Pulsereignisse durch 16252 Photonen bestimmt und über 50 Zeitfenster im Histogramm verteilt, wobei die Länge eines Zeitfensters 40 ps beträgt. Die zeitliche Pulslänge der Signalforn bei halber Amplitudenhöhe (engl. *Full Width*

at Half Maximum, FWHM) in Abbildung 2.15(a) hat ungefähr die fünffache Länge des Pulses in Abbildung 2.15(b). Die Einzel-Photon-Detektion kann wegen der kurzen Pulsdauer sehr gut für grundlegende Untersuchungen eingesetzt werden. Neben der detaillierten Erfassung der Signalform sind auch Ansätze in der Literatur bekannt, bei denen durch die Messung von einer geringen Anzahl von Photonen über die Laufzeit auf die Entfernung geschlossen wird [Ho *et al.*, 1999; Friedhorsky *et al.*, 1996].

#### 2.4.5 Anordnung der Sende- und Empfangsoptik

Durch die Anordnung der Sende- und Empfangsoptik erfolgt eine Unterscheidung zwischen monostatischen und bistatischen Lasersystemen. Der technische Aufwand eines monostatischen Lasersystems ist größer als der bei einem bistatischen Lasersystem.

**Monostatische Lasersysteme:** Bei monostatischen Lasersystemen ist die Sende- und Empfangsoptik auf derselben optischen Achse und am gleichen Ort. Der Nachteil dieses Aufbaus ist, dass für die Realisierung mehr optische Komponenten benötigt werden als für ein bistatisches Lasersystem. Die größere Anzahl von optischen Komponenten erschwert die optimale Justierung des Lasersystems. Der Vorteil dieses Aufbaus ist ein Messsystem, welches winkeltreu und entfernungsstreu mit absoluter Deckungsgleichheit die durch den Laser beleuchtete Oberfläche und das durch den Empfänger beobachtete Gesichtsfeld erfasst.

Anhand eines realisierten Experimentalaufbaus werden im Folgenden exemplarisch die relevanten Komponenten von einem monostatischen Lasersystem beschrieben (Abbildung 2.16(a)). Die Beschreibungsreihenfolge entspricht hierbei dem zeitlichen Ablauf einer Messung.

Von der Sendeeinheit (Laser) wird ein kurzer Laserpuls mit linear polarisierter Strahlung ausgesendet, die horizontal ausgerichtet ist. Ein Linsensystem fokussiert die Laserstrahlung auf die gewünschte Strahldivergenz. Der darauf folgende Strahlteiler dient zur Separierung der gesendeten Laserstrahlung von der empfangenen Laserstrahlung. Bei linear polarisierter Strahlung, die horizontal ausgerichtet ist, erfolgt eine vollständige Transmission durch den Strahlteiler A. Die  $\lambda/4$ -Platte bewirkt, dass aus der linear polarisierten Strahlung zirkular polarisierte Strahlung wird. Bei der Rückstreuung am Objekt wird die Richtung der zirkularen Polarisation umgekehrt. Aus dieser zirkular polarisierten Strahlung wird, bedingt durch die  $\lambda/4$ -Platte, eine linear polarisierte Strahlung mit vertikaler Ausrichtung. Bei linear polarisierter Strahlung, die vertikal ausgerichtet ist, erfolgt eine vollständige Reflexion an der diagonalen Schnittfläche des Strahlteilers. Der Strahl wird von dem Strahlteiler A umgelenkt. Der Strahlteiler B besitzt nur die Funktion, den Strahl in die Richtung der Empfangseinheit zu lenken. Durch eine Linse wird der Laserstrahl auf den Detektor der Photodiode von der Empfangseinheit fokussiert. Das optische Signal wird durch die Empfangseinheit in ein elektrisches Signal gewandelt, digitalisiert und durch die Datenerfassung gespeichert.

**Bistatische Lasersysteme:** Bei bistatischen Lasersystemen sind Sende- und Empfangseinheit räumlich getrennt positioniert. Im Allgemeinen sind dabei Sende- und Empfangseinheit möglichst nah beieinander und nahezu in die gleiche Richtung ausgerichtet. Durch eine Linse (Sendeoptik) wird das Objekt direkt beleuchtet und die von dem Objekt rückgestreute Strahlung über eine weitere Linse (Empfangsoptik) ein-

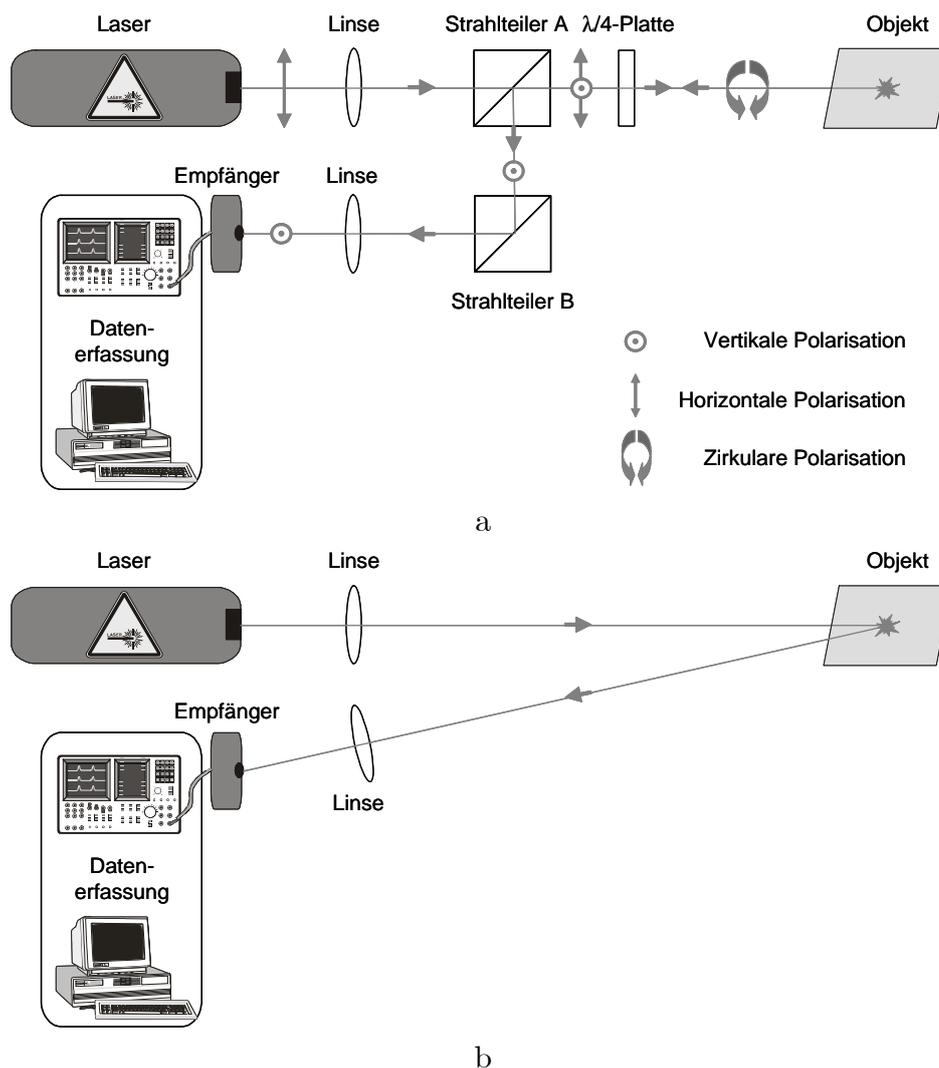


Abbildung 2.16: Schematische Darstellung für die Anordnung der Sende- und Empfangsoptik. a) Monostatisches Lasersystem, b) Bistatisches Lasersystem.

gekoppelt (Abbildung 2.16(b)). Entsprechend der Beschreibung im vorangegangenen Abschnitt wird das optische Signal durch die Empfangseinheit in ein elektrisches Signal gewandelt, digitalisiert und durch die Datenerfassung gespeichert. Der Vorteil dieses Aufbaus ist ein Messsystem, welches technisch einfach zu realisieren ist. Ein Nachteil dieses Aufbaus ist, dass in Abhängigkeit von der Entfernung zur beleuchteten Oberfläche sich der Winkel zwischen Sende- und Empfangseinheit geringfügig ändert. Zudem erfolgt in Abhängigkeit von der Entfernung in bestimmten Bereichen nur eine partielle Deckungsgleichheit zwischen beleuchteter Oberfläche und beobachtetem Gesichtsfeld. Diese systemtypische Eigenschaft, die sich auf die Messung auswirkt, wird im folgenden Absatz vertieft.

Der bistatische Aufbau ist so ausgelegt, dass der *Footprint* des Laserstrahls und das Gesichtsfeld der Empfangsoptik bei einer vorgegebenen Entfernung vollständig deckungsgleich sind (Abbildung 2.17). Damit dies gewährleistet ist, muss die Divergenz des Laserstrahls und der Öffnungswinkel des Gesichtsfeldes der Empfangsoptik aneinander angepasst werden. Zur Vereinfachung wird die Divergenz gleich dem Öffnungs-

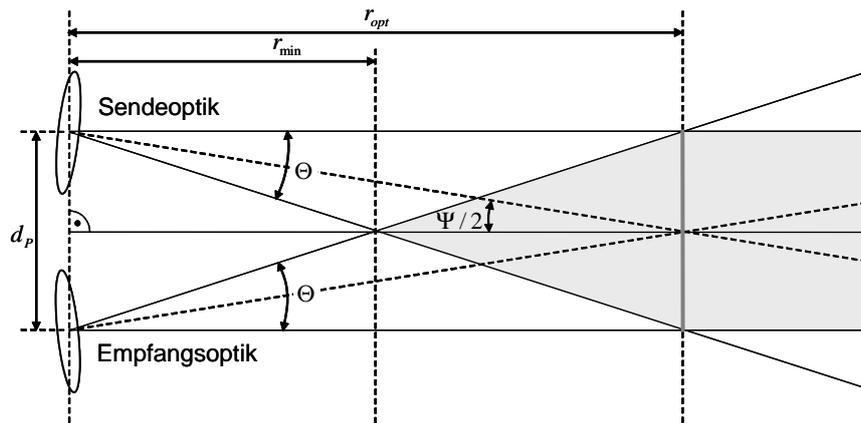


Abbildung 2.17: Schematische Darstellung für die Anordnung der Sende- und Empfangsoptik bei einem bistatischen Lasersystem.

winkel angenommen und im Folgenden mit dem Winkel  $\Theta$  bezeichnet. Der Abstand zwischen der Sende- und Empfangsoptik, die auch als Basis bezeichnet wird, sei  $d_p$ . Nur bei der Entfernung  $r_{opt}$  ist 100% Deckungsgleichheit gewährleistet, d.h. die Laserstrahlung der beleuchteten Oberfläche wird vollständig auf der Empfangsoptik abgebildet. Bei der Beleuchtung von Oberflächen, deren Entfernung ungleich dieser Entfernung ist, wird nur ein Teil der Laserstrahlung von der Empfangsoptik erfasst (Abbildung 2.17, grauer Bereich). Unterhalb der Entfernung  $r_{min}$  kann durch die systembedingte Parallaxe keine Objektvermessung erfolgen, da Sende- und Empfangsoptik aneinander vorbeischaun. Die Entfernung  $r_{min}$  berechnet sich für die in Abbildung 2.17 gezeigte einfache symmetrische Anordnung mit

$$r_{min} = \frac{d_p}{2 \tan \Theta} \approx \frac{d_p}{2\Theta}, \quad (2.13)$$

und der Konvergenzwinkel  $\Psi$  mit

$$\Psi = 2 \arctan \frac{d_p}{2r_{opt}} \approx \frac{d_p}{r_{opt}}. \quad (2.14)$$

Für eine detaillierte Beschreibung der entfernungsabhängigen Auswirkung auf die Messung, durch die Divergenz und die Deckungsgleichheit von bistatischen Lasersystemen, wird auf die Arbeit von Luttermann [2006] verwiesen.

## 2.5 Begriffe und technische Bedeutung

Die Begriffe und Messgrößen, die zur Einschätzung der Systemgüte eines Lasersystems relevant sind, werden in diesem Abschnitt vorgestellt. Es werden die Begriffe Entfernung (Abschnitt 2.5.1), Entfernungsauflösung (Abschnitt 2.5.2) Trennbarkeit (Abschnitt 2.5.3) und Genauigkeit (Abschnitt 2.5.4) und deren technische Bedeutung vorgestellt.

### 2.5.1 Entfernung

Bei einem gepulsten Lasersystem wird über die Laufzeit des Laserpulses vom Sensor zur Objektfläche hin (Hinweg) und von der Oberfläche zum Empfänger zurück (Rückweg)

die *Entfernung* berechnet. Mit der Laufzeit  $t$  berechnet sich die *Entfernung*  $r$

$$r = \frac{t \cdot c}{2}, \quad (2.15)$$

wobei  $c$  der Lichtgeschwindigkeit entspricht [Baltsavias, 1999a; Wehr & Lohr, 1999].

Um eine präzise Analyse der Entfernungsbestimmung durchzuführen, ist es empfehlenswert, sowohl die gesendete Signalform, als auch die empfangene Signalform zu erfassen. Dadurch wird es ermöglicht, einen Zeitpunkt zu einem charakteristischen Verlaufspunkt auf der gesendeten Signalform und den dazu korrespondierenden Verlaufspunkt auf der empfangenen Signalform zu bestimmen und daraus die Entfernung zu ermitteln. Mögliche Probleme bei der Entfernungsberechnung werden in Kapitel 5 verdeutlicht.

### 2.5.2 Entfernungsauflösung

Bei der vorliegenden Arbeit wurde eine analoge Signalbeschreibung verwendet. Für die messtechnische Erfassung und Signalverarbeitung werden diskrete Signale verwendet. Die Abtastung des Signals muss mindestens doppelt so hoch wie die Grenzfrequenz des aufzulösenden Signals sein [Kotelnikov, 1933; Shannon, 1949]. Erfahrungsgemäß wird in der Praxis eine Abtastung, die 3 – 5 mal so hoch ist wie die Grenzfrequenz, vorgenommen. Ein analoges Signal, welches unter Einhaltung dieser Abtastvorschrift erfasst wurde, kann dann wieder eindeutig rekonstruiert werden. Durch das vorgegebene zeitliche Abtastintervall ist die Entfernungsauflösung des Messsystems eindeutig bestimmt. Für das zeitliche Abtastintervall  $\Delta t$  berechnet sich die Entfernungsauflösung  $\Delta r$

$$\Delta r = \frac{\Delta t \cdot c}{2}, \quad (2.16)$$

wobei  $c$  der Lichtgeschwindigkeit entspricht.

Kommerzielle Lasersysteme verwenden derzeit eine Abtastrate von bis zu maximal 1GSamples/s (Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2). Von der Abtastrate lässt sich ableiten, dass die eingesetzten Messsysteme eine maximale Grenzfrequenz von  $\leq 500$  MHz besitzen. Eine Erhöhung der Grenzfrequenz ist nur mit Einschränkung realisierbar, da dadurch das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (engl. *Signal to Noise Ratio*, *SNR*) verschlechtert wird (Abschnitt 6.2.3). Aus der beschriebenen Abtastrate von 1GSamples/s ergibt sich durch das zeitliche Abtastraster eine Entfernungsauflösung von  $\Delta r_A = 0.15$  m. Diese Entfernungsauflösung ist für die Genauigkeitsansprüche eines zeitgemäßen Lasersystems unzureichend.

Um die Entfernungsauflösung zu erhöhen, kann das Signal mit höherer Rate abgetastet werden. Dies ließe sich durch eine erhöhte Abtastung bei der Datenerfassung oder durch eine entsprechende Überabtastung der erfassten Daten realisieren. Eine weitere Möglichkeit ist die Signalbeschreibung durch eine analytische Ausgleichskurve, die der Signalform entspricht (Abschnitt 5.6). Die Analyse der Ausgleichskurve ermöglicht eine Entfernungsauflösung mit theoretisch unbegrenzter Genauigkeit. Voraussetzung hierfür ist, dass die Signalform bekannt ist oder mathematisch beschrieben werden kann.

### 2.5.3 Trennbarkeit

Die Trennbarkeit ist die Leistungsfähigkeit zur Unterscheidung von zwei Bereichen mit geringer unterschiedlicher Entfernung innerhalb des Strahlengangs. Durch kurz hinter-

einander folgende rückgestreute Reflexionen der einzelnen Bereiche, die in ihrer Entfernungsdifferenz zwischen den beleuchteten Bereichen kürzer als die Länge der Signalform sind, ergibt sich ein Signal, welches aus zwei überlagerten Signalformen besteht. Durch eine analoge Entfernungsdetektion kann dann nur ein einzelner Entfernungswert extrahiert werden [Katzenbeisser, 2003]. Die Trennbarkeit kann bei Lasersystemen, die die Signalform erfassen, verbessert werden. Hierfür müssen die zwei überlagerten Signalformen mit Methoden der Signalverarbeitung voneinander getrennt werden und die Entfernungen von jedem einzelnen Bereich bestimmt werden (Abschnitt 5.8.2).

#### 2.5.4 Genauigkeit

Die Genauigkeit ist definiert durch die zu erwartende Abweichung des gemessenen Wertes von dem tatsächlichen Wert. Die Genauigkeit berechnet sich allgemein durch die empirische Standardabweichung  $\sigma_x$  für alle gemessenen Werte  $x_{m_i}$  mit

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{m_i} - \bar{x})^2}, \quad (2.17)$$

wobei  $n$  der Gesamtanzahl der Messwerte und  $i$  dem Laufindex entspricht [Stöcker, 1995]. Der empirische Erwartungswert  $\bar{x}$  (arithmetischer Mittelwert) [Niemeier, 2002] berechnet sich mit

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{m_i}. \quad (2.18)$$

### 3 Modellierung der Signalform von Laserpulsen

In diesem Kapitel wird ein Modell zur Beschreibung der empfangenen Signalform der rückgestreuten Laserpulse entwickelt. Diese Signalform ist abhängig von der gesendeten Signalform des emittierten Laserpulses (Abschnitt 3.1), der örtlichen Energieverteilung des Laserstrahls (Abschnitt 3.2) und der Reflexionseigenschaft der Oberfläche. Letztere hängt von der gegebenen Geometrie und dem Material (Abschnitt 3.3) ab. Zudem wird die Transmission des Laserstrahls durch die Atmosphäre (Abschnitt 3.4) und die Empfängercharakteristik (Abschnitt 3.5) bei der Modellierung berücksichtigt. Zusammenfassend wird in Abschnitt 3.6 die empfangene Signalform der rückgestreuten Laserpulse modelliert. Zudem wird die Messung der Signalform in Abschnitt 3.7 modelliert. In Abschnitt 3.8 wird die Oberflächenantwort vorgestellt.

#### 3.1 Modellierung der gesendeten Signalform des emittierten Laserpulses

In Abhängigkeit von dem verwendeten Lasersystem hat die gesendete Signalform  $s(t)$  der emittierten Laserpulse unterschiedliche Formen. Zur Modellierung der Signalform durch verschiedene Funktionen gibt es folgende Ansätze: Brenner *et al.* [2003] verwenden zur Modellierung der Signalform des raumgestützten *Geoscience Laser Altimeter Systems* (GLAS) eine symmetrische Gaußfunktion

$$s(t) = a \cdot \exp\left(-\frac{(t - \tau)^2}{2w^2}\right), \quad (3.1)$$

wobei  $a$  der Amplitude,  $\tau$  der zeitlichen Verzögerung und  $w$  der Länge der Gaußfunktion entspricht. In diesem speziellen Fall entspricht die Länge  $w$  der Standardabweichung  $\sigma$  der Gaußfunktion.

Bei gütegeschalteten (engl. *Q-Switch*) Lasern kann die Signalform näherungsweise durch eine Exponentialfunktion [Steinval, 2000] beschrieben werden

$$s(t) = \frac{t^2}{w^2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{w}\right). \quad (3.2)$$

Wagner *et al.* [2004] idealisiert die Signalform durch eine Rechteckfunktion. Die Rechteckfunktion ist gegeben durch

$$s(t) = a \cdot \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{w}\right) = \begin{cases} a & \text{für } -\tau \leq t \leq w - \tau, \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (3.3)$$

Einige Laser, wie der für diese Untersuchungen verwendete *Multi-Mode-Laser* (Erbium-Faser-Laser), zeigen typischerweise starke Variationen im Signalverlauf von Puls zu Puls und zusätzlich innerhalb des Signals. Für eine detaillierte Analyse können diese Variationen nicht vernachlässigt werden. In den Abbildungen 3.1 sind drei Beispiele der gesendeten Signalform des verwendeten Lasersystems dargestellt.

Der allgemeine Signalverlauf eines Laserpuls, ist abhängig von der Generierung des Laserpuls, durch die Laserquelle. Ein *Multi-Mode-Laser* hat typischerweise eine zufällige unregelmäßige Intensitätsfluktuation. Die Intensitätsfluktuation entsteht durch *Mode-Beating* im Laserresonator. Als *Mode-Beating* wird die durch Überlagerung von

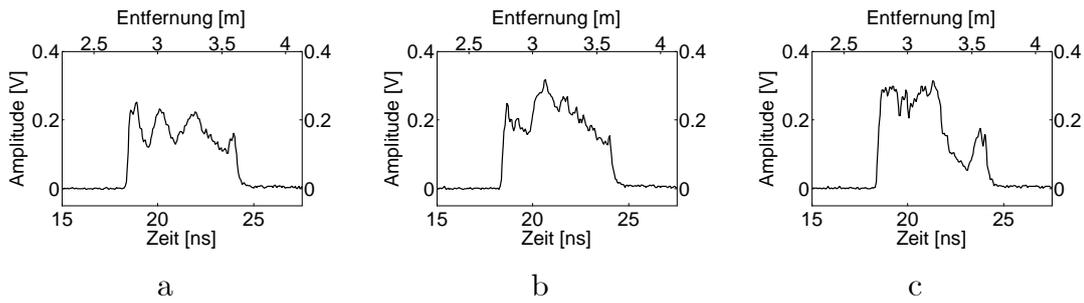


Abbildung 3.1: Beispiele für die gesendete Signalform eines *Multi-Mode*-Lasers.

benachbarten spektralen Moden entstehende Schwebung bezeichnet. Die Schwebungsfrequenz entspricht hierbei dem Frequenzabstand der Moden. Zudem bewirken externe Störungen, Fluktuationen durch Relaxationsoszillation und inharmonischer Oszillation (engl. *Spiking*) eine zusätzliche zufällige Modulation des Signalverlaufs [Anstett, 2003].

Die Grundform des Signalverlaufs bei dem verwendeten Lasersystem kann durch eine zeitverzögerte Gaußfunktion beschrieben werden. Die Länge  $w$  des emittierten Pulses wird dann aus praktischen Gründen bei halber Amplitudenhöhe (engl. *Full Width at Half Maximum*, *FWHM*) definiert. Für die Gaußfunktion ergibt sich demzufolge

$$s(t) = \frac{2a}{w} \cdot \sqrt{\frac{\ln(2)}{\pi}} \cdot \exp\left(-4 \cdot \ln(2) \cdot \frac{(t - \tau)^2}{2w^2}\right), \quad (3.4)$$

wobei die Amplitude mit  $a$  bezeichnet wird.

Die zufällige Modulation der Grundform, bedingt durch Intensitätsfluktuation, wird näherungsweise durch multiplikatives Rauschen  $m(t)$  mit einer gaußförmigen Verteilung modelliert. Durch das multiplikative Rauschen steigt die Variation mit der Größe der Signalamplitude. Bei der gaußförmigen Verteilung steht  $\mu$  für den Gleichanteil und  $\sigma$  für die Standardabweichung. Daraus ergibt sich für die modulierte Signalform  $s_m(t)$

$$s_m(t) = s(t) \cdot m(t) \text{ mit } m(t) \sim N(\mu_m, \sigma_m^2). \quad (3.5)$$

Abschließend ist zu bemerken, dass die Modellierung der Signalform speziell auf das verwendete Lasersystem anzupassen ist. Wird die Signalform gemessen, muss zudem das Rauschen des Empfängers berücksichtigt werden, da dies den Signalverlauf der gemessenen Signalform beeinflusst. Dies wird in Abschnitt 3.7 detailliert erörtert.

## 3.2 Modellierung der örtlichen Energieverteilung des Laserstrahls

Die örtliche Energieverteilung des Laserpulses, auch Strahlprofil genannt, ist im Wesentlichen abhängig von den verwendeten Komponenten des Lasers: Der Pumpquelle, dem optischen Resonator und dem Medium. Für die Modellierung des Strahlprofils wird eine zylinderförmige Verteilung (engl. *Top-Hat Form*) oder eine radialsymmetrische gaußförmige Verteilung verwendet [Kamermann, 1993]. Es empfiehlt sich, eine Messung zur Bestimmung des Strahlprofils vorzunehmen, um eine möglichst genaue Modellierung vornehmen zu können (Abschnitt 7.2). Hierbei muss unterschieden werden, ob der für die Messungen relevante Entfernungsbereich im Nahfeld oder im Fern-

feld liegt (Abschnitt 2.2.1), da hierfür unterschiedliche örtliche Energieverteilungen gegeben sind.

Unter der vereinfachten Annahme, dass ein monostatisches Lasersystem (Abschnitt 2.4.5) vorliegt, ist die Verwendung eines Kugelkoordinatensystems vorteilhaft. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt dann im Zentrum der Sende- und Empfangseinheit des Lasersystems. Für das gewählte Koordinatensystem entspricht die optische Achse der Polarachse. Zudem steht dann die Bezeichnung  $r$  für die Entfernung zum Ursprung,  $\varepsilon$  für den Zenithwinkel und  $\alpha$  für den Azimuthwinkel.

Für eine radialsymmetrische zylinderförmige Energieverteilung  $K_{Zylinder}$  des Laserstrahls in Abhängigkeit von dem Zenithwinkel  $\varepsilon$  ergibt sich durch

$$K_{Zylinder}(\varepsilon) = \begin{cases} E \approx \varepsilon_0^2 \pi & \text{für } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.6)$$

und für eine radialsymmetrische gaußförmige Energieverteilung  $K_{Gauß}$  ergibt sich

$$K_{Gauß}(\varepsilon) = E \cdot \exp(-k \cdot \varepsilon^2). \quad (3.7)$$

Der Parameter  $E$  entspricht hierbei der Amplitude und  $k$  der Breite von der Energieverteilung.

### 3.3 Modellierung der Oberfläche

Die Wirkung der geometrischen Oberflächenstruktur auf die Signalform ist abhängig von der Größe der Struktur (Abschnitt 2.3). Oberflächenstrukturen, deren Ausmaße in der Größenordnung der Wellenlänge der Laserstrahlung liegen, verändern die Kohärenz der Lichtwellen und es kommt zu Interferenzeffekten (Abschnitt 2.3.6). Die Interferenz ergibt sich aus einer konstruktiven und destruktiven Überlagerung von Lichtwellen. Ist die Oberfläche unsystematisch strukturiert, entsteht ein örtliches Intensitätsmuster, welches sich aus einer zufälligen Anordnung von Intensitätsflecken (lokale Intensitätsminima und -maxima) zusammensetzt. Ein einzelner Intensitätsfleck innerhalb dieses Musters wird als *Speckle* (engl.) bezeichnet. Die zufällige Anordnung beeinflusst den zeitlichen Verlauf der Signalform. Ist die Empfangsaperatur hinreichend groß im Vergleich zur Größe der Intensitätsflecken, werden die unterschiedlichen Werte des Intensitätsmusters im Mittel ausgeglichen [Osche, 2002]. Dies wird als Aperturmittelung bezeichnet (engl. *Aperture Averaging*). In diesem Fall wird der Verlauf der Signalform nur unwesentlich beeinflusst. Da diese Gegebenheit bei dem verwendeten Lasersystem vorliegt, kann für die Modellierung der Einfluss von *Speckle* vernachlässigt werden.

#### 3.3.1 Geometrische Reflexionseigenschaften

Setzen wir voraus, die Ausdehnung der beleuchteten Oberfläche sei größer als der Durchmesser des Laserstrahls auf der Oberfläche. Zudem nehmen wir an: (i) das Objekt und der Sensor sind stationär, (ii) der beleuchtete Teil des Objekts sei planar und (iii) die Entfernung zwischen Sensor und Objekt sei sehr groß, verglichen zum Durchmesser des Strahls auf der Oberfläche. Somit ist die Entfernung einer idealisierten unbegrenzten ebenen Fläche  $A$  bezogen auf die optische Achse gegeben mit  $r_{0A}$ , der Winkel zwischen der Normalen der Oberfläche  $\vec{n}$  und der optischen Achse mit  $\varphi$ , der Winkel in Neigungsrichtung mit  $\alpha_A$  und der Radius des Laserstrahls mit  $r_L$ . Die beschriebene

Geometrie der idealisierten Oberfläche ist schematisch dargestellt in Abbildung 3.2(a) und 3.2(b). Die Entfernung  $r_A(\varepsilon, \alpha)$  der beleuchteten Oberfläche ist abhängig von dem Zenithwinkel  $\varepsilon$  und dem Azimutwinkel  $\alpha$  und ist gegeben mit

$$r_A(\varepsilon, \alpha) = r_{0A}(1 + \varepsilon \cdot \tan(\varphi) \cdot \cos(\alpha - \alpha_A)). \quad (3.8)$$

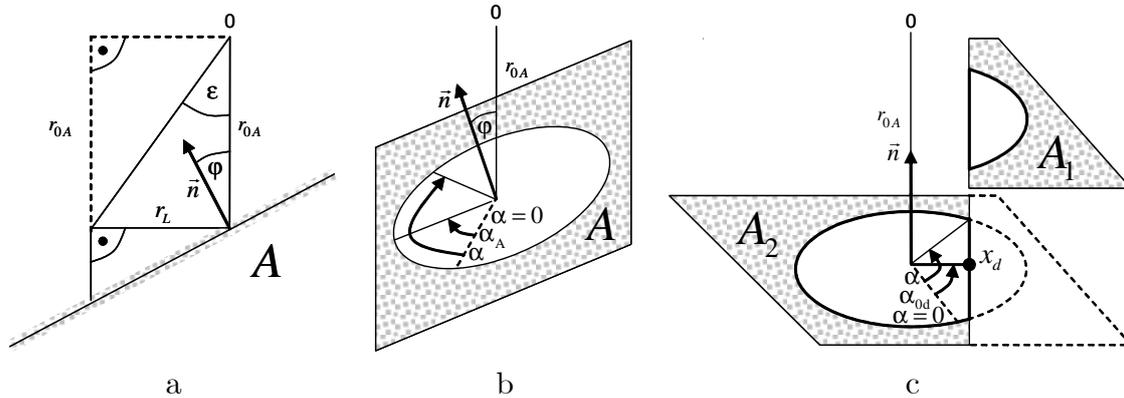


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Oberflächengeometrie. a) Seitliche Ansicht der idealisierten Oberfläche, b) Schräge Ansicht der idealisierten Oberfläche, c) Schräge Ansicht von zwei idealisierten Oberflächen mit unterschiedlicher Entfernung.

### 3.3.2 Reflexionseigenschaften des Materials

Die allgemeine Reflexionsverteilung innerhalb einer Hemisphäre als Funktion in Abhängigkeit vom Winkel ist die *BRDF* (Abschnitt 2.3.1). Um die Reflexionseigenschaften des Materials zu modellieren, wird zur Vereinfachung angenommen, dass der Einfallswinkel der Strahlung mit dem Ausfallswinkel der Strahlung übereinstimmt. Diese Annahme ist erfüllt, wenn es sich um ein monostatisches Lasersystem handelt (Abschnitt 2.4.5).

Für ein ausgedehntes Objekt ist die gesamte hemisphärische Reflexion der Oberfläche gegeben mit  $\rho$ . Ein Spezialfall ist bei spiegelnden Oberflächen (Abschnitt 2.3.1) gegeben. In diesem Fall wird bei dem Winkel  $\varphi = 0$  die Energie des Laserstrahls vollständig reflektiert:

$$\rho_{\text{spiegelnd}}(\varphi) = \begin{cases} 1 & \text{für } \varphi = 0, \\ 0 & \text{für } \varphi \neq 0. \end{cases} \quad (3.9)$$

Ist die Oberflächenreflexion isotrop (gleichmäßig in alle Richtungen), ergibt sich durch die Beleuchtung der Oberfläche  $A_i$  mit einem Laserstrahl eine über dem Winkel  $\varphi$  gleichverteilte Reflexionsverteilung. Diese Beschreibung entspricht einer Lambert'schen Oberfläche und kann als einfache Näherung verwendet werden. In diesem Fall ist die Reflexion abhängig von der Reflektanz des Materials  $\rho_m$  und dem Einfallswinkel  $\varphi$ :

$$\rho_{\text{diffus}}(\varphi) = \rho_m \cdot \cos^2(\varphi). \quad (3.10)$$

Die detaillierte Herleitung für die quadrierte Kosinus-Winkelabhängigkeit am Flächenelement ist anhand des Zusammenhangs zwischen dem Strahlungsfluss am Flächen-

element der Empfangseinheit und der spezifischen Ausstrahlung des Flächenelements der Oberfläche im Anhang A.1 beschrieben.

Die Bestimmung der Reflektanz durch Messungen von verschiedenen Materialien ist in Jelalian [1992] und Leader [1979] beschrieben. Bedingt durch die experimentelle Messsituation ergeben sich erfahrungsgemäß erhebliche Variationen bei der Bestimmung der Reflektanzwerte für dasselbe Material. Die Variationen können beispielsweise durch verschiedene Materialsorten verursacht werden. Deswegen lassen sich Reflektanzwerte zur Charakterisierung von Materialien nur eingeschränkt verwenden. Die Reflektanz des Materials ist zudem abhängig von der verwendeten Wellenlänge der Laserstrahlung. Eine Übersicht von Reflektanzwerten, gemessen bei der Wellenlänge  $1.5\ \mu\text{m}$  für verschiedene Materialien ist in Tabelle 3.1 aufgeführt.

| Material     |                  | Reflektanz |
|--------------|------------------|------------|
| Asphalt      |                  | 10 – 20%   |
| Beton        |                  | 30 – 40%   |
| Sand         |                  | 60%        |
| Schnee       |                  | 0 – 5%     |
| Wasser       |                  |            |
| 0°           | Einfallswinkel   | < 1%       |
| 60°          | Einfallswinkel   | 5%         |
| 80°          | Einfallswinkel   | 35%        |
| Nutzpflanzen |                  |            |
|              | Mais             | 21%        |
|              | Blattsalat       | 10%        |
|              | Weizen           | 27%        |
| Stein        |                  |            |
|              | Grauer Feldspat  | 20%        |
|              | Kalkstein        | 85%        |
|              | Gelber Sandstein | 80%        |

Tabelle 3.1: Reflektanz von verschiedenen Materialien bei einer Wellenlänge  $1.5\ \mu\text{m}$  [Wolfe & Zissis, 1985] .

Durch die Zusammenführung der Informationen von Abschnitt 3.3.1 und Abschnitt 3.3.2 wird die Reflexionsdichtefunktion von einer diffusen Oberfläche in Abhängigkeit von deren Geometrie und Materialeigenschaft bestimmt mit

$$\rho_A(r, \varepsilon, \alpha) = \rho_{diffus}(\varphi) \cdot \delta(r_A(\varepsilon, \alpha), r) = \rho_m \cdot \cos^2(\varphi) \cdot \delta(r_A(\varepsilon, \alpha), r) \quad (3.11)$$

und von einer spiegelnden Oberfläche mit

$$\rho_A(r, \varepsilon, \alpha) = \rho_{spiegelnd}(\varphi) \cdot \delta(r_A(\varepsilon, \alpha), r), \quad (3.12)$$

wobei  $\delta$  der Delta-Funktion entspricht, die wie folgt definiert ist

$$\delta(r_A, r) = \begin{cases} 1 & \text{für } r = r_A, \\ 0 & \text{für } r \neq r_A. \end{cases} \quad (3.13)$$

Mit der Delta-Funktion  $\delta(r_A, r)$  wird die Oberfläche in der Entfernung  $r_A$  beschrieben.

### 3.3.3 Mehrfachreflexionen von Oberflächen

Die bisherige Modellierung berücksichtigt die vollständige Beleuchtung einer einzelnen Oberfläche innerhalb des Strahlengangs. Werden unterschiedlich weit entfernte Oberflächen teilweise von dem Laserstrahl beleuchtet, erhält man unterschiedlich weit entfernte Entfernungswerte. Die Reihenfolge der Oberflächenreflexionen  $1, 2, \dots, n$  von der Quelle aus beobachtet, die sich durch die Rückstreuung der Oberflächen  $A_1, A_2, \dots, A_n$  innerhalb des Strahlengangs ergeben, werden bestimmt mit

$$\rho_{mehrfach}(r, \varepsilon, \alpha) = \sum_{i=1}^n \rho_{A_i}(r, \varepsilon, \alpha) \cdot \delta(r_{A_i}(\varepsilon, \alpha), \min(\{r_{A_i}(\varepsilon, \alpha) \mid i = 1 \dots n\})). \quad (3.14)$$

Die Delta-Funktion  $\delta$  wird verwendet, um jede Oberfläche  $A_i$  in der Entfernung  $r_{A_i}$  zu beschreiben. Der Term  $\min(\{r_{A_i}(\varepsilon, \alpha) \mid i = 1 \dots n\})$  bewirkt, dass nur die beleuchteten Bereiche, jedoch nicht die verdeckten Bereiche berücksichtigt werden. Die vollständige Reflexion  $\rho_{mehrfach}$  ergibt sich durch die Summe aller partiellen Oberflächenreflexionen.

## 3.4 Atmosphärische Transmission

Für die Ausbreitung von Strahlung in eine Richtung (Hinweg beziehungsweise Rückweg) wird unter Verwendung des atmosphärischen Extinktionskoeffizienten  $\sigma_a [dB \text{ km}^{-1}]$  in Abhängigkeit von der Entfernung die atmosphärische Transmission [Kammermann, 1993] bestimmt mit

$$\eta_a(r) = \exp(-\sigma_a \cdot r). \quad (3.15)$$

Die atmosphärische Transmission ist besonders von Interesse bei Messungen über große Entfernungen oder bei schlechten Wetterbedingungen (Abschnitt 2.2.3).

## 3.5 Empfängereffizienz

Mit dem Empfänger wird die Strahlstärke gemessen. Die empfangene Strahlstärke ist abhängig von dem Aperturdurchmesser  $d_{Ap}$  und der Entfernung  $r$  zur Oberfläche. Unter der Annahme  $d_{Ap} \ll r$  ist die Empfängercharakteristik gegeben mit

$$S(d_{Ap}, r) = \frac{\pi d_{Ap}^2}{4\pi r^2} \cdot \eta_r, \quad (3.16)$$

wobei  $\eta_r$  der Empfängereffizienz entspricht.

## 3.6 Die empfangene Signalform der rückgestreuten Laserpulse

Die empfangene Leistung als Funktion der Zeit ist proportional der empfangenen Signalform der rückgestreuten Laserpulse. Die empfangene Signalform  $r(t)$  des rückgestreuten Laserpulses ist abhängig von der modulierten gesendeten Signalform der emittierten Laserpulse (Abschnitt 3.1), der örtlichen Energieverteilung des Laserstrahls (Abschnitt 3.2), der atmosphärischen Transmission auf dem Hinweg vom Sensor zur

Oberfläche (Abschnitt 3.4), der Reflexionsdichtefunktion unter Berücksichtigung der Geometrie (Abschnitt 3.3.1) und des Materials (Abschnitt 3.3.2), der atmosphärischen Transmission auf dem Rückweg von der Oberfläche zum Sensor (Abschnitt 3.4), der Empfängereffizienz (Abschnitt 3.5) und dem beleuchteten Oberflächenbereich des Objekts über ein infinitesimales Volumenelement  $r^2 \sin(\varepsilon) d\alpha d\varepsilon dr$

$$r(t) = \int_{r=0}^{\infty} \int_{\varepsilon=0}^{\pi/2} \int_{\alpha=0}^{2\pi} s_m\left(t - \frac{2r}{c}\right) \cdot K(\varepsilon) \cdot \eta_a(r) \cdot \rho_A(r, \varepsilon, \alpha) \cdot \eta_a(r) \cdot S(d_{Ap}, r) \cdot r^2 \sin(\varepsilon) d\alpha d\varepsilon dr, \quad (3.17)$$

wobei  $c$  der Lichtgeschwindigkeit entspricht. Diese allgemeine Formulierung kann in die folgende Form separiert werden

$$r(t) = \int_{r=0}^{\infty} s_m\left(t - \frac{2r}{c}\right) \cdot h(r) dr, \quad (3.18)$$

mit

$$h(r) = \int_{\varepsilon=0}^{\pi/2} \int_{\alpha=0}^{2\pi} K(\varepsilon) \cdot \eta_a(r) \cdot \rho_A(r, \varepsilon, \alpha) \cdot \eta_a(r) \cdot S(d_{Ap}, r) \cdot r^2 \sin(\varepsilon) d\alpha d\varepsilon. \quad (3.19)$$

Unter Berücksichtigung von Abschnitt 3.3.1 (iii), dass die Entfernung von dem Sensorursprung zur Oberfläche viel größer ist als die geometrischen Reflexionseigenschaften innerhalb des Entfernungsintervalls  $[r_{0A} - \Delta r, r_{0A} + \Delta r]$  sind, kann die Gleichung 3.19 vereinfacht werden

$$h(r) \approx C_{r_0} \int_{\varepsilon=0}^{\pi/2} \int_{\alpha=0}^{2\pi} K(\varepsilon) \cdot \rho_A(r, \varepsilon, \alpha) \cdot r^2 \sin(\varepsilon) d\alpha d\varepsilon, \quad (3.20)$$

mit

$$C_{r_0} = \eta_a^2(r_{0A}) \cdot S(d_{Ap}, r_{0A}) = \exp(-\sigma_a \cdot 2r_{0A}) \cdot \frac{\pi d_{Ap}^2}{4\pi r_{0A}^2} \cdot \eta_r. \quad (3.21)$$

Mit dieser Näherung ist  $r(t)$  nur noch abhängig von der gesendeten Signalform  $s(t)$ , der örtlichen Energieverteilung  $K(\varepsilon)$  des Laserstrahls und der Reflexionsdichtefunktion  $\rho_A(r, \varepsilon, \alpha)$  integriert über den beleuchteten Oberflächenbereich des Objekts.

Im Folgenden wird die in Abbildung 3.2(c) gezeigte geometrische Konstellation angenommen. Die Abbildung zeigt zwei unterschiedlich weit entfernte spiegelnde Oberflächen  $A_1$  und  $A_2$ , die beide teilweise von dem Laserstrahl beleuchtet werden. Die Flächennormalen beider Oberflächen und die Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls sind gleichgerichtet. Es wird angenommen, dass die Oberfläche  $A_2$  eine geradlinige Begrenzung aufweist und der Punkt  $x_d = [r_{0d}, \varepsilon_{0d}, \alpha_{0d}]$  auf der Begrenzungslinie mit dem geringsten Abstand zur optischen Achse ist. Dann ergibt sich unter Berücksichtigung von Gleichung 3.14

$$\begin{aligned}
h(r) = & C_{r_0} \int_{\varepsilon=0}^{\pi/2} \int_{\alpha=0}^{2\pi} K(\varepsilon) \cdot [\delta(r_{A_1}(\varepsilon, \alpha), r) \cdot \delta(r_{A_1}(\varepsilon, \alpha), \min(\{r_{0A_2}, r_{A_1}(\varepsilon, \alpha)\})) \dots \\
& + \delta(r_{0A_2}, r) \cdot \delta(r_{0A_2}, \min(\{r_{0A_2}, r_{A_1}(\varepsilon, \alpha)\}))] r^2 \sin(\varepsilon) d\alpha d\varepsilon
\end{aligned} \tag{3.22}$$

mit

$$r_{A_1}(\varepsilon, \alpha) = \begin{cases} r_{0A_1} & \text{wenn } \varepsilon > \arcsin\left(\frac{\sin(\varepsilon_0 d)}{\cos(\alpha - \alpha_0 d) \cdot \cos(\varepsilon_0 d)}\right) \approx \frac{\varepsilon_0 d}{\cos(\alpha - \alpha_0 d)}, \\ \infty & \text{sonst.} \end{cases} \tag{3.23}$$

### 3.7 Messung der Signalform

Die Messung der gesendeten und der empfangenen Signalform ist durch das Rauschen  $n(t)$  des Empfängers gestört, welches hier als additives Rauschen mit einer mittelwertfreien Normalverteilung  $n(t) \sim N(0, \sigma_n^2)$  modelliert wird. Somit ergibt sich für die gemessene gesendete Signalform

$$s_{m,n}(t) = s_m(t) + n(t) = s(t) \cdot m(t) + n(t) \text{ mit } n(t) \sim N(0, \sigma_n^2) \tag{3.24}$$

und für die gemessene empfangene Signalform

$$r_n(t) = r(t) + n(t) \text{ mit } n(t) \sim N(0, \sigma_n^2). \tag{3.25}$$

### 3.8 Einführung der Oberflächenantwort

In diesem Abschnitt wird die Begriffsdefinition *Oberflächenantwort* eingeführt, um eine zeitabhängige *Oberflächenrepräsentation* zu beschreiben, die sowohl die beleuchtete Oberfläche als auch die örtliche Energieverteilung des Laserstrahls berücksichtigt. Die Oberflächenantwort  $h(t)$  ergibt sich aus der Faltung der örtlichen Energieverteilung des Laserstrahls  $K(\varepsilon)$  (Abschnitt 3.2) mit der beleuchteten Oberfläche  $\rho_A(r, \varepsilon, \alpha)$  (Abschnitt 3.3). Dies entspricht

$$h(t) = K(\varepsilon) * \rho_A(r, \varepsilon, \alpha), \tag{3.26}$$

wobei  $(*)$  der Faltungsoperator ist und der Zusammenhang zwischen der Entfernung  $r$  und der Zeit  $t$  gegeben ist mit

$$r = \frac{t \cdot c}{2}. \tag{3.27}$$

## 4 Simulation der empfangenen Signalform rückgestreuter Laserpulse

Die Simulation der empfangenen Signalform des rückgestreuten Pulses erfolgt für eine ebene Oberfläche mit Neigung und eine sphärische Oberfläche. Um die empfangene Signalform berechnen zu können, muss die gesendete Signalform bekannt sein. Als gesendete Signalformen können gemessene oder synthetische Daten verwendet werden. Eine schematische Darstellung der Verarbeitungsschritte zur Berechnung der empfangenen Signalform ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

Für die *Objektrepräsentation* (Abbildung 4.1(1)) wird ein 3D-Objektmodell und die dazugehörige Reflektanz der Oberfläche verwendet. Die Sensorposition und Sensorausrichtung werden durch die sechs Parameter  $(x_S, y_S, z_S, \alpha_S, \beta_S, \gamma_S)$  zur Beschreibung der äußeren *Orientierung* (Abbildung 4.1(2)) des Sensors berücksichtigt. Diese lassen sich durch Messung von *GPS* (engl. *Global Position System*) und *INS* (engl. *Inertial Navigation System*) Parameter ermitteln oder werden als bekannt vorausgesetzt. Auf das Objektmodell wird eine *2D-Abtastung* (Abbildung 4.1(3)) durchgeführt und daraus ein hochaufgelöstes Entfernungs- und Reflexionsbild bestimmt. Die Auflösung dieser *Abtastung* muss entsprechend hoch genug gewählt werden, um eine Abtastung mit dem Laserstrahl für die weitere Verarbeitung zu gewährleisten. Für den *Laserpuls* (Abbildung 4.1(4)), welcher sich aus der gesendeten Signalform und der örtlichen Energieverteilung des emittierten Pulses zusammensetzt, werden die zeitlichen und örtlichen Pulseigenschaften für die Modellierung berücksichtigt. Zur Simulation der *örtlichen Abtastung* (Abbildung 4.1(5)) des Lasersystems wird sowohl der Abstand des Abtastrasters als auch die Divergenz des Laserstrahls berücksichtigt. Hierfür wird die Faltung des hochaufgelösten Reflexionsbildes mit der örtlichen Energieverteilung des Strahls durchgeführt und daraus wird das hochaufgelöste Intensitätsbild berechnet. Für eine zeitabhängige *Oberflächenrepräsentation* (Abbildung 4.1(6)) durch die Oberflächenantwort (Abschnitt 3.8) wird eine örtliche Unterabtastung am hochaufgelösten Entfernungs- und Reflexionsbild durchgeführt, wodurch der von dem Laserstrahl beleuchtete Bereich zusammengefasst wird. Abschließend wird die Oberflächenantwort mit der gesendeten Signalform gefaltet und daraus die empfangene Signalform, die am Empfänger (Abbildung 4.1(7)) anliegt, bestimmt.

Für die Simulation der empfangenen Signalform des rückgestreuten Laserpulses wird das Sensorsystem (Abschnitt 4.1) und die Oberfläche (Abschnitt 4.2) berücksichtigt.

### 4.1 Simulation des Sensorsystems

Für die Simulation des Sensorsystems werden folgende Eigenschaften berücksichtigt: Die Position und Ausrichtung des Sensorsystems, die Beschreibung des Laserpuls, die örtliche Abtastung und die elektrischen Eigenschaften des Empfängers.

Der emittierte Laserpuls des Systems besitzt charakteristische Pulseigenschaften. Für die Simulation wird entweder eine radialsymmetrische zylinderförmige örtliche Energieverteilung oder eine radialsymmetrische gaußförmige örtliche Energieverteilung des Strahlprofils berücksichtigt (Abschnitt 3.2). Diese speziellen Energieverteilungen sind zutreffend für einen Großteil von Lasersystemen. Um eine realistische Beschreibung für die gesendete Signalform zu erhalten, wird eine Auswahl von gemessenen

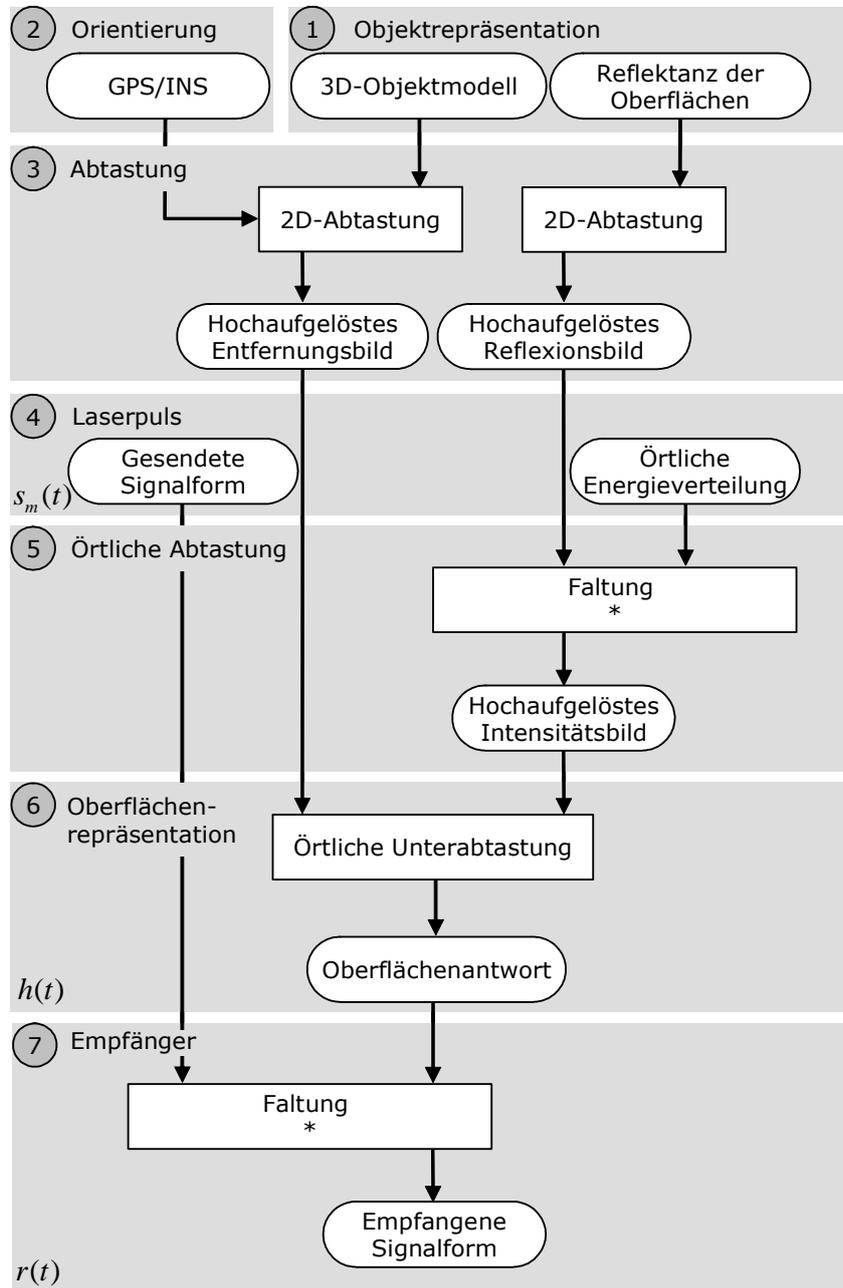


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Verarbeitungsschritte zur Berechnung der empfangenen Signalform.

gesendeten Signalformen für die Simulation verwendet. Die gemessenen Signalformen des verwendeten Empfängers wurden mit einer Grenzfrequenz von 6 GHz erfasst und das Signal wurde mit 20GSamples/s abgetastet. Der Verlauf der gesendeten Signalform zeigt ausgeprägte Intensitätsfluktuation von Puls zu Puls (Abschnitt 3.1). Die hohe Abtastrate stellt detaillierte Information über den Verlauf der Signalform bereit. Der Verlauf der Signalform besteht dann aus mindestens 100 Abtastwerten bei einer typischen Pulslänge von 5 ns bei  $FWHM$ .

In Abhängigkeit von dem Abtastmuster des Lasersystems, dem Rasterabstand der örtlichen Abtastung und der Divergenz des Laserstrahls wird ein Teilbereich des hochaufgelösten Entfernungsbildes und Reflexionsbildes verarbeitet. Hierfür wird der Teilbereich des hochaufgelösten Reflexionsbildes mit der örtlichen Energieverteilung des Laserstrahls gefaltet (Abschnitt 3.2), um jeden einzelnen Reflektanzwert des rückgestreuten Laserstrahls zu berücksichtigen und das hochaufgelöste Intensitätsbild zu berechnen. Das hochaufgelöste Intensitätsbild für eine homogene Oberfläche unter Berücksichtigung einer radialsymmetrischen gaußförmigen örtlichen Energieverteilung des Laserstrahls zeigt die Abbildung 4.2. In dem Beispiel wurde hierbei eine  $m$ -fache Auflösung in  $x$ -Richtung und  $n$ -fache Auflösung in  $y$ -Richtung für die Beleuchtung durch einen einzelnen Laserstrahl gewählt, um ein hochaufgelöstes Intensitätsbild zu erhalten.

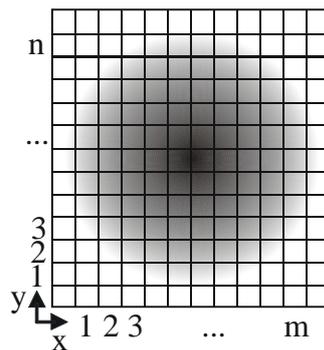


Abbildung 4.2: Hochaufgelöstes Intensitätsbild für eine homogene Oberfläche unter Berücksichtigung einer radialsymmetrischen gaußförmigen örtlichen Energieverteilung des Laserstrahls.

Die Fokussierung des Strahls auf den Detektor des Empfängers unter Berücksichtigung seiner spezifischen Eigenschaften wird dadurch erreicht, indem bei der Simulation eine örtliche Unterabtastung des Teilbereichs erfolgt. Die Berechnung erfolgt, indem das hochaufgelöste Intensitätsbild mit dem hochaufgelösten Entfernungsbild gewichtet wird und daraus die unterabgetastete Entfernungverteilung bestimmt wird. Das Resultat wird als Oberflächenantwort (Abschnitt 3.8) bezeichnet. Die Oberflächenantwort wird abschließend mit der gesendeten Signalform gefaltet und man erhält die empfangene Signalform des rückgestreuten Pulses.

## 4.2 Simulation der Oberfläche

Die Simulation der Oberfläche berücksichtigt für eine 3D-Objektrepräsentation sowohl die geometrischen (Abschnitt 3.3.1) als auch die radiometrischen Eigenschaften (Abschnitt 3.3.2) der beleuchteten Oberfläche. Hierfür wird ein 3D-Objektmodell mit einer

homogenen Oberfläche und einer gleichverteilten Reflexionsverteilung der Oberfläche (Gleichung 3.10) angenommen.

Das Objektmodell mit einer homogenen Oberfläche wird örtlich für die Simulation wesentlich höher abgetastet, als das Abtastraster des Laserstrahls ist. Durch die hohe örtliche Auflösung ist es möglich, die örtliche Energieverteilung des Laserstrahls und die geometrischen Details bei der Simulation zu berücksichtigen. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Position und Ausrichtung des Sensorsystems kann für jede mögliche Beleuchtungssituation durch den Laserstrahl ein hochaufgelöstes Entfernungsbild bestimmt werden. In Abhängigkeit von der vorgegebenen Position und Ausrichtung des Sensorsystems werden die korrespondierenden Entfernungsbild- und Reflexionsbilder entsprechend berechnet.

In den folgenden Abschnitten werden sowohl ebene Oberflächen mit Neigung (Abschnitt 4.2.1) als auch sphärische Oberflächen (Abschnitt 4.2.2) simuliert und deren Oberflächenantwort bestimmt. Für die Simulation werden typische Systemparameter für ein Lasersystem verwendet. Neben der numerischen Berechnung wird für eine ebene Oberfläche mit Neigung die analytische Berechnung durchgeführt und mit der numerischen Berechnung verglichen.

#### 4.2.1 Ebene Oberfläche mit Neigung

Im Folgenden wird die Oberflächenantwort, die durch eine ebene Oberfläche mit unterschiedlichen Neigungen entsteht, simuliert. Zudem wird für die Simulation eine radialsymmetrische zylinderförmige örtliche Energieverteilung als auch eine radialsymmetrische gaußförmige örtliche Energieverteilung des Strahlprofils durchgeführt.

Zur numerischen Bestimmung der Oberflächenantwort von einer ebenen Oberfläche mit unterschiedlichen Neigungen wird ein hochaufgelöstes Entfernungsbild mit  $300 \times 300$  Pixel berechnet. Für die Oberfläche wird eine Reflektanz mit 100% angenommen. Die Divergenz des Laserstrahls sei 1 mrad. Die Entfernungsauflösung zur Berechnung der Oberflächenantwort sei 7.5 mm. Dies entspricht genau einer Abtastrate von 20GSamples/s. Die Entfernung zum Zentrum des Laserstrahls auf der Oberfläche sei 100 m.

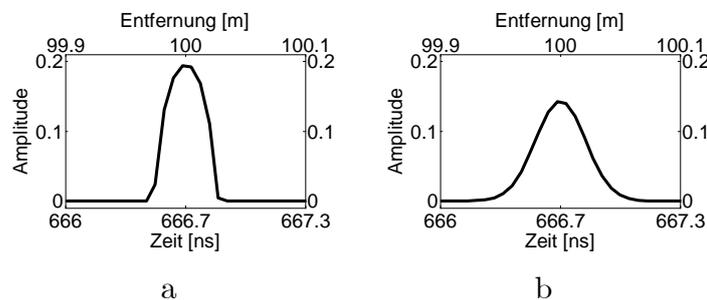


Abbildung 4.3: Oberflächenantworten für eine Neigung der Oberfläche von  $25^\circ$  bestimmt mit unterschiedlicher örtlicher Energieverteilung des Strahlprofils: a) Zylinderförmige Verteilung, b) Gaußförmige Verteilung.

Beispiele der berechneten Oberflächenantworten  $h(t)$  für eine Neigung der Oberfläche von  $25^\circ$  mit einer radialsymmetrischen zylinderförmigen örtlichen Energieverteilung und radialsymmetrischen gaußförmigen örtlichen Energieverteilung des Laser-

strahls sind in den Abbildungen 4.3(a) und 4.3(b) dargestellt. Das Maximum der Oberflächenantworten ist erwartungsgemäß bei einer Entfernung von 100 m.

Neben der numerischen Berechnung der Oberflächenantwort kann für idealisierte unbegrenzte ebene Oberflächen eine analytische Berechnung erfolgen. Dies wird im Folgenden für eine ebene Oberfläche mit unterschiedlicher Neigung gezeigt. Für die Bestimmung der Oberflächenantwort wird hierfür eine radialsymmetrische zylinderförmige örtliche Energieverteilung  $K_{Zylinder}$  des Strahlprofils mit einer Strahldivergenz  $\Theta = 2\varepsilon_0$  (Abschnitt 3.2) des Laserstrahlkegels angenommen. Zudem ist die Entfernung der idealisierten unbegrenzten ebenen Fläche  $A$  entlang der optischen Achse gegeben mit  $r_{0A}$  und der Winkel zwischen der Normalen der Oberfläche  $\vec{n}$  und der optischen Achse mit  $\varphi$ .

Es wurde ein kartesisches Koordinatensystem gewählt, bei dem die Ausrichtung der  $x$  und  $y$ -Achse senkrecht und die  $z$ -Achse parallel zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls ist. Der Strahlkegel kann dann allgemein mit der Form

$$x^2 + y^2 \leq \left(z \tan \frac{\Theta}{2}\right)^2 \quad (4.1)$$

beschrieben werden (Abbildung 4.4). Unter Berücksichtigung des Winkels  $\varphi$  zwischen der optischen Achse und der Normalen der Oberfläche  $\vec{n}$  gilt für die beleuchtete Fläche  $A$

$$x \sin \varphi + z \cos \varphi = r_{0A} \cos \varphi. \quad (4.2)$$

Mit der Gleichung

$$x = (r_{0A} - z) \cot \varphi \quad (4.3)$$

und den Gleichungen 4.1 und 4.2 werden für den Wertebereich von  $y$  die beiden Grenzwerte  $[y_{min}; y_{max}]$  berechnet. Die Grenzwerte sind

$$y_{min} = -\sqrt{\left(z \tan \frac{\Theta}{2}\right)^2 - \left((r_{0A} - z) \cot \varphi\right)^2} \quad (4.4)$$

und

$$y_{max} = \sqrt{\left(z \tan \frac{\Theta}{2}\right)^2 - \left((r_{0A} - z) \cot \varphi\right)^2}. \quad (4.5)$$

Die Oberflächenantwort ist abhängig von der beleuchteten Fläche  $A$  in der Entfernung  $z$ . Durch das gewählte kartesische Koordinatensystem ist gewährleistet, dass die Entfernung  $z$  unabhängig von  $y$  ist. Deswegen berechnet sich die Oberflächenantwort mit

$$h(z) = y_{max} - y_{min} = 2\sqrt{\left(z \tan \frac{\Theta}{2}\right)^2 - \left((r_{0A} - z) \cot \varphi\right)^2}. \quad (4.6)$$

Aus Abbildung 4.4 lässt sich ableiten, dass durch  $y_{min} = y_{max} = 0$  die Grenzwerte des Entfernungintervalls bestimmt sind. Die Entfernung  $z$  ist nur gültig innerhalb des Entfernungintervalls

$$z \in [z_{min}; z_{max}] = \left[ \frac{r_{0A} \cot \varphi}{\cot \varphi + \tan \frac{\Theta}{2}}; \frac{r_{0A} \cot \varphi}{\cot \varphi - \tan \frac{\Theta}{2}} \right]. \quad (4.7)$$

Für eine zeitliche Beschreibung der Oberflächenantwort durch  $h(t)$  muss eine Substitution mit  $z = ct/2$  vorgenommen werden (Abschnitt 3.8), wobei  $c$  der Lichtgeschwindigkeit entspricht. Ist die Entfernung zur Oberfläche im Vergleich zu dem Strahldurchmesser groß, dann ist die Oberflächenantwort symmetrisch.

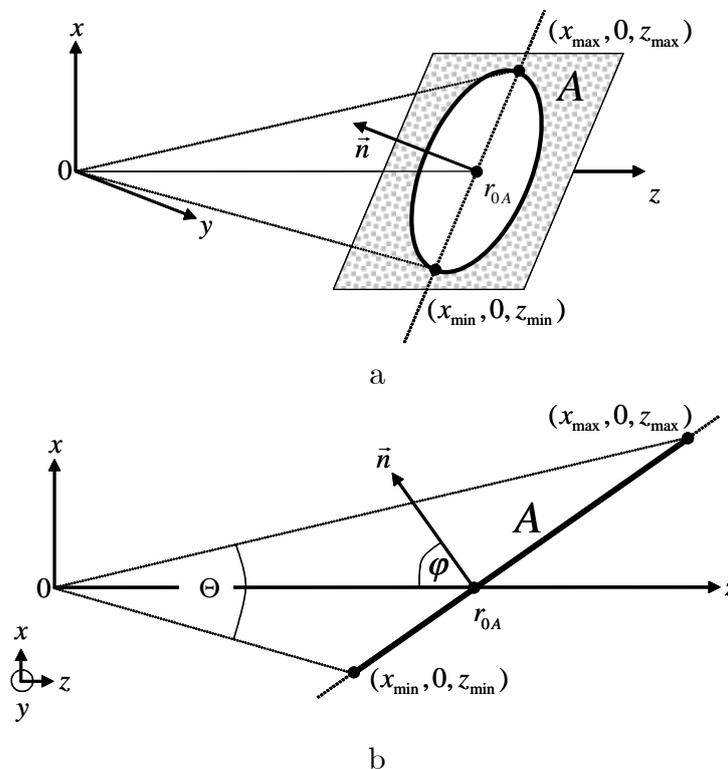


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung der Geometrie der beleuchteten Oberfläche und des Laserstrahls. a) Schräge Ansicht, b) Seitliche Ansicht.

Die analytische Berechnung der Oberflächenantwort benötigt eine deutlich kürzere Rechenzeit als die numerische Berechnung. Im Folgenden wird die numerische Berechnung der analytischen Berechnung der Oberflächenantwort gegenübergestellt. Es werden die Oberflächenantworten  $h(t)$  für unterschiedliche Neigung der Oberfläche von  $5^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $60^\circ$  in Abbildung 4.5 gezeigt. Numerische Ungenauigkeiten durch die Berechnung sind teilweise als Artefakte zu erkennen (Abbildung 4.5, Spalte A). Es ist eine gute Übereinstimmung zwischen den numerisch und analytisch berechneten Kurven ersichtlich.

#### 4.2.2 Sphärische Oberfläche

In diesem Abschnitt wird für eine sphärischen Oberfläche die Oberflächenantwort simuliert. Hierfür wird für eine kleine Kugel mit einem Radius  $r_K = 0.3$  m, deren Ursprung in der Koordinate  $(0,0,100)$  m liegt, ein hochaufgelöstes Entfernungsbild mit  $300 \times 300$  Pixel generiert. Unter der Annahme, dass eine radialsymmetrische gaußförmige örtliche Energieverteilung des Strahlprofils vorliegt, wird für sieben unterschiedliche Positionen  $[p_0, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6]$  auf der Oberfläche die Oberflächenantwort bestimmt. Die gewählten Positionen sind gleichverteilt zwischen dem Zentrum  $p_0$  und der Objektgrenze der Kugel. Dies entspricht einer örtlichen Abtastung mit  $0.5$  mrad, was ungefähr  $1/6$  des

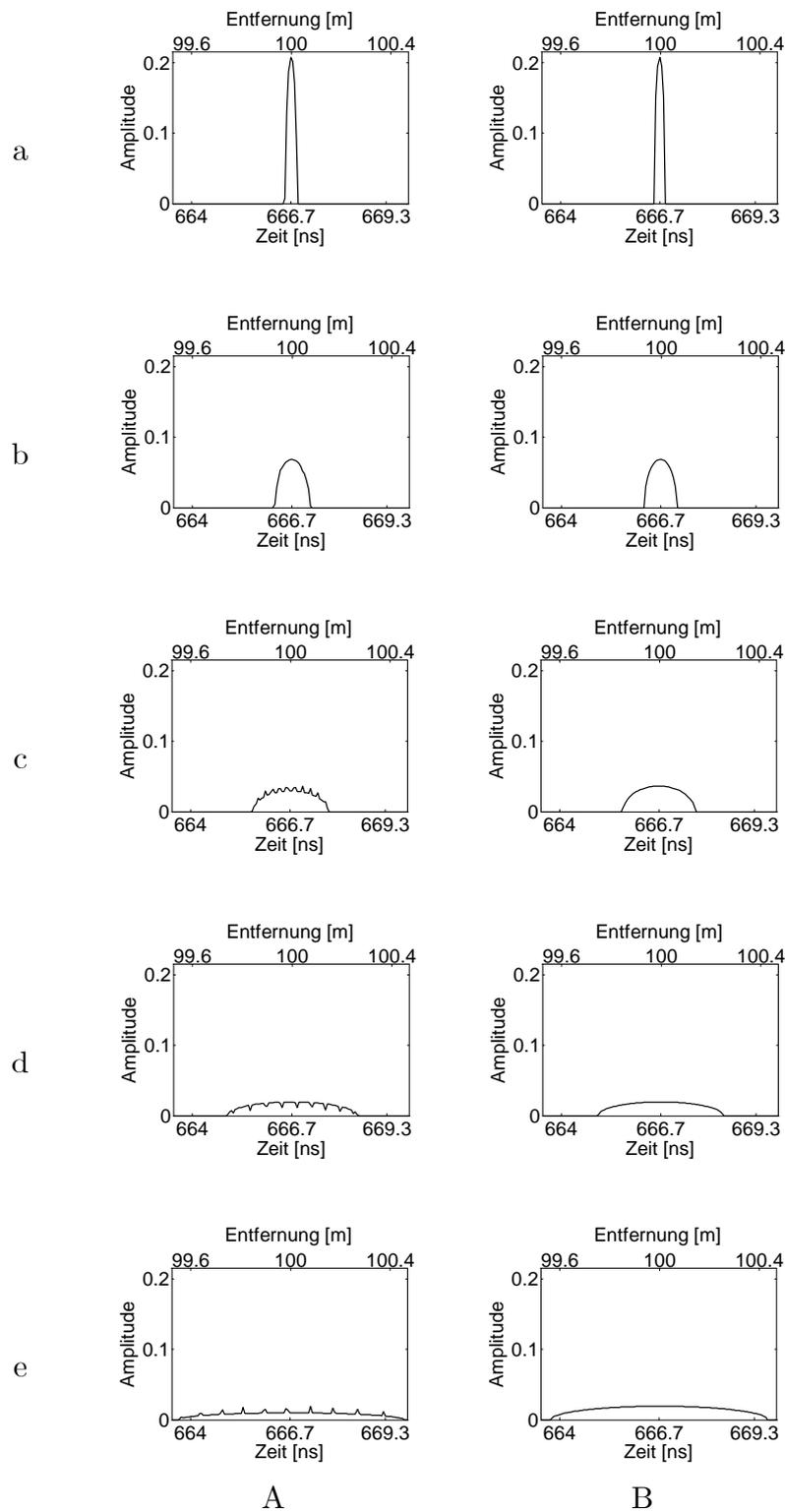


Abbildung 4.5: Oberflächenantworten für unterschiedliche Neigung der Oberfläche: a) 5°, b) 15°, c) 30°, d) 45° und e) 60°. Spalte A) Numerische Berechnung, Spalte B) Analytische Berechnung.

Kugelradius  $r_K$  ist. Entsprechend dem vorangegangenen Abschnitt 4.2.1 wurden für diese Simulation die gleichen Parameter verwendet. Die Divergenz des Laserstrahls ist 1 mrad und die Entfernungsauflösung zur Berechnung der Oberflächenantwort ist 7.5 mm.

Die Spalte A der Abbildung 4.7 zeigt den Laserstrahl auf der Kugeloberfläche, wobei die Objektgrenze durch eine helle Linie visualisiert wurde. In der Spalte B der Abbildung 4.7 ist die korrespondierende Oberflächenantwort dargestellt. Die jeweilige Entfernung für das Strahlzentrum ist als graue Linie hinterlegt.

Der Verlauf der Oberflächenantwort ist asymmetrisch und je weiter der *Footprint* des Laserstrahls vom Zentrum der Kugel entfernt ist, desto weiter entfernt liegt das Maximum der Oberflächenantwort und desto stärker ist der Verlauf der Oberflächenantwort deformiert.

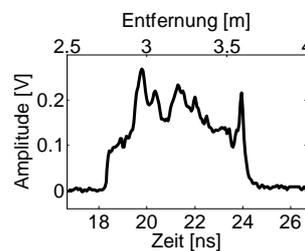


Abbildung 4.6: Beispiel für eine gesendete Signalform.

Mit der berechneten Oberflächenantwort kann die zu erwartende empfangene Signalform bestimmt werden. Exemplarisch wird eine willkürlich gewählte gesendete Signalform verwendet, die in Abbildung 4.6 dargestellt ist. Die hierfür empfangenen Signalformen sind in Spalte C der Abbildung 4.7 dargestellt. Ist die Position des *Footprints* im Zentrum der Kugeloberfläche (Abbildung 4.7Aa), entspricht die empfangene Signalform (Abbildung 4.7Ca) nahezu der gesendeten Signalform (Abbildung 4.6). Je weiter der *Footprint* von dem Zentrum der Kugeloberfläche entfernt liegt, desto weiter entfernt ist die empfangene Signalform (Abbildungen 4.7Cb-4.7Cg) und desto stärker ist sie deformiert.

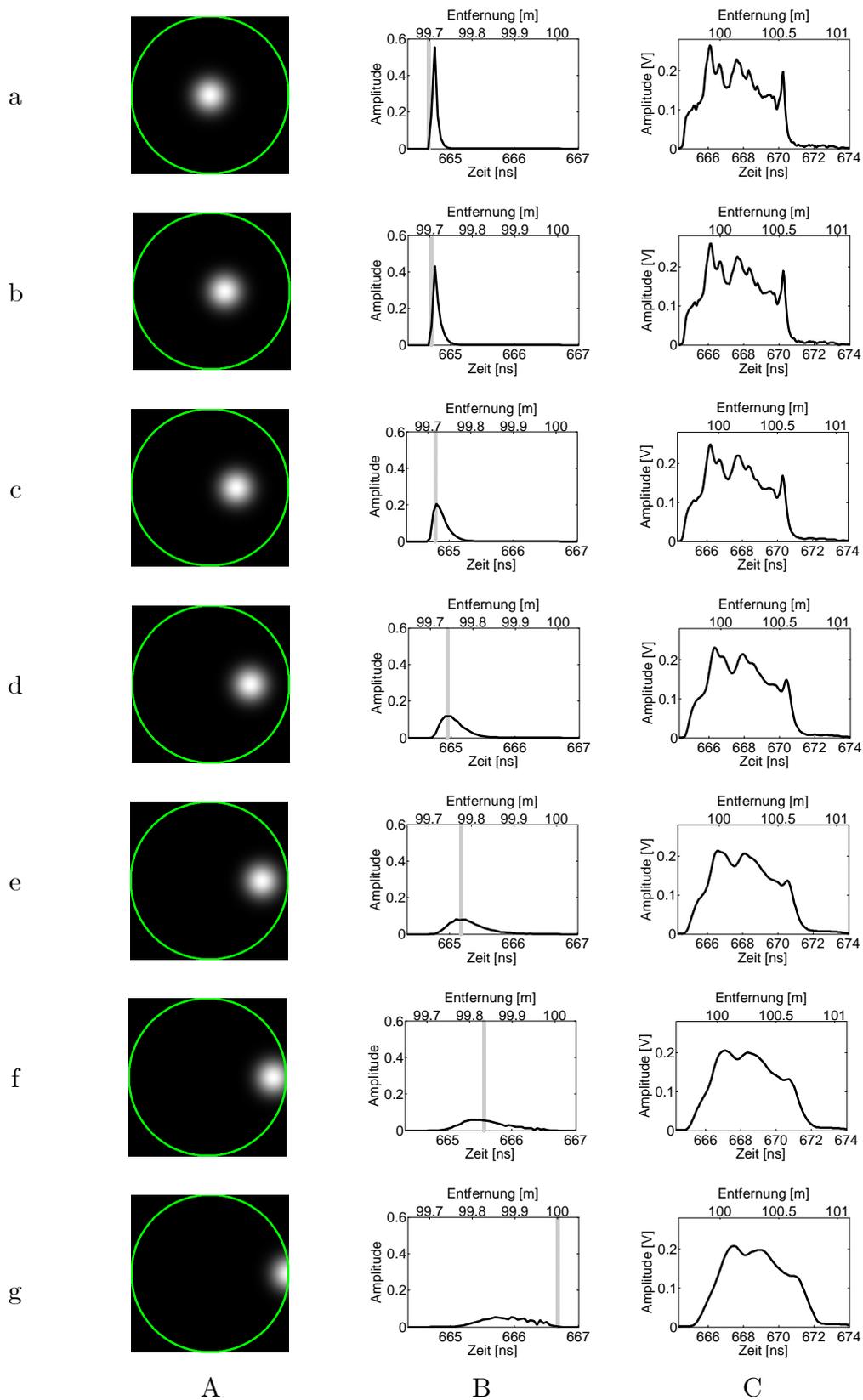


Abbildung 4.7: Position des Laserstrahls auf der Kugeloberfläche (Spalte A), korrespondierende Oberflächenantwort (Spalte B) und die geschätzte empfangene Signalform (Spalte C): a)  $p_0 = 0$  (Zentrum), b)  $p_1 = 1/6r_K$ , c)  $p_2 = 2/6r_K$ , d)  $p_3 = 3/6r_K$ , e)  $p_4 = 4/6r_K$ , f)  $p_5 = 5/6r_K$ , g)  $p_6 = r_K$ .

## 5 Methoden zur Merkmalsextraktion

In diesem Kapitel werden verschiedene Methoden vorgestellt, die eine Merkmalsextraktion anhand der Signalform des Laserpulses ermöglichen. Die zu extrahierenden Merkmale sind *Entfernung*, *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke*. Die zu den Merkmalen korrespondierenden Eigenschaften der Signalform sind die *zeitliche Position*, *zeitliche Pulslänge* und *Amplitude*.

Variiert die Signalform der emittierten Pulse, so sollten die Merkmale sowohl bei der gesendeten als auch bei der empfangenen Signalform getrennt extrahiert und miteinander verglichen werden. Dann kann aus der Veränderung der Eigenschaften des rückgestreuten gegenüber des emittierten Pulses auf die Merkmale geschlossen werden. Ist die gesendete Signalform des verwendeten Lasersystems bekannt und die Amplitude und der Verlauf der Signalform stabil, dann kann die Extraktion der Merkmale auf der empfangenen Signalform erfolgen. In diesem Fall wird vorausgesetzt, dass der Zeitpunkt des emittierten Pulses bekannt ist.

Um die *Entfernung* aus der Signalform zu bestimmen, sind verschiedene Methoden bekannt, beispielsweise *Peak-Detection*, *Leading-Edge-Detection*, *Centre-of-Gravity-Detection* und *Constant-Fraction-Detection*. Diese Thematik wurde von verschiedenen Autoren untersucht. Mamon [1978] beschreibt die Problematik, dass bei unterschiedlichen Amplituden durch einen voreingestellten Schwellwert der Triggerzeitpunkt verschoben wird, wodurch der ermittelte Entfernungswert bei gleicher Objektentfernung variiert, was zu Ungenauigkeiten führt. Bei der Simulation von möglichen Fehlern, die sich bei der Entfernungsbestimmung ergeben, ist es daher wichtig, verschiedene Methoden zu berücksichtigen und zu untersuchen [Budge *et al.*, 2006; Der *et al.*, 1997; Steinvall & Carlsson, 2001; Thiel & Wehr, 2004; Wagner *et al.*, 2004]. Nilsson [1996] konnte anhand gemessener Signalformen zeigen, dass durch Verwendung von *Peak-Detection* und *Leading-Edge-Detection* eine höhere Genauigkeit erzielt wird als durch *Trailing Edge Detection*.

Neben der *Entfernung* können zusätzliche Merkmale mit der Analyse der Signalform untersucht werden: *Reflexionsstärke* und *Entfernungsvariation*. Diese speziellen Merkmale beeinflussen die *Amplitude* und die *Länge* [Brenner *et al.*, 2003; Jutzi *et al.*, 2002; Steinvall *et al.*, 2004; Wagner *et al.*, 2006] der empfangenen Signalform.

Bei den bisher genannten Methoden werden anhand charakteristischer Punkte innerhalb des Verlaufs die Merkmale bestimmt werden. Lässt sich der Verlauf der Signalform durch eine mathematische Funktion beschreiben, kann aus den Parametern der Funktion auf die Merkmale geschlossen werden. Als erste Näherung wird häufig die Gaußfunktion als Beschreibung für die Signalform herangezogen. Die Analyse von Signalformen mit asymmetrischem Verlauf, die sich bei einem Rauheitsprofil der Oberfläche mit einer asymmetrischen Verteilungsdichtefunktion (Abschnitt 2.3.5) oder durch gekrümmte Oberflächen (beispielsweise Kugelform) ergeben, ist durch die Gaußfunktion nicht möglich. Durch bekannte Näherungsverfahren (beispielsweise Gauß-Newton- und Levenberg-Marquardt-Verfahren) [Hofton *et al.*, 2000; Jutzi & Stilla, 2005b; Persson *et al.*, 2005; Reitberger *et al.*, 2006b; Söderman *et al.*, 2005] werden dann die Parameter der bekannten Signalform bestimmt.

In den folgenden Abschnitten wurde sowohl die gemessene gesendete Signalform  $s_{m,n}(t)$  als auch die empfangene Signalform  $r_n(t)$  für die Merkmalsextraktion berücksichtigt. Diese werden aus der Messung (Abbildungen 5.1(1-3)) der gesendeten und

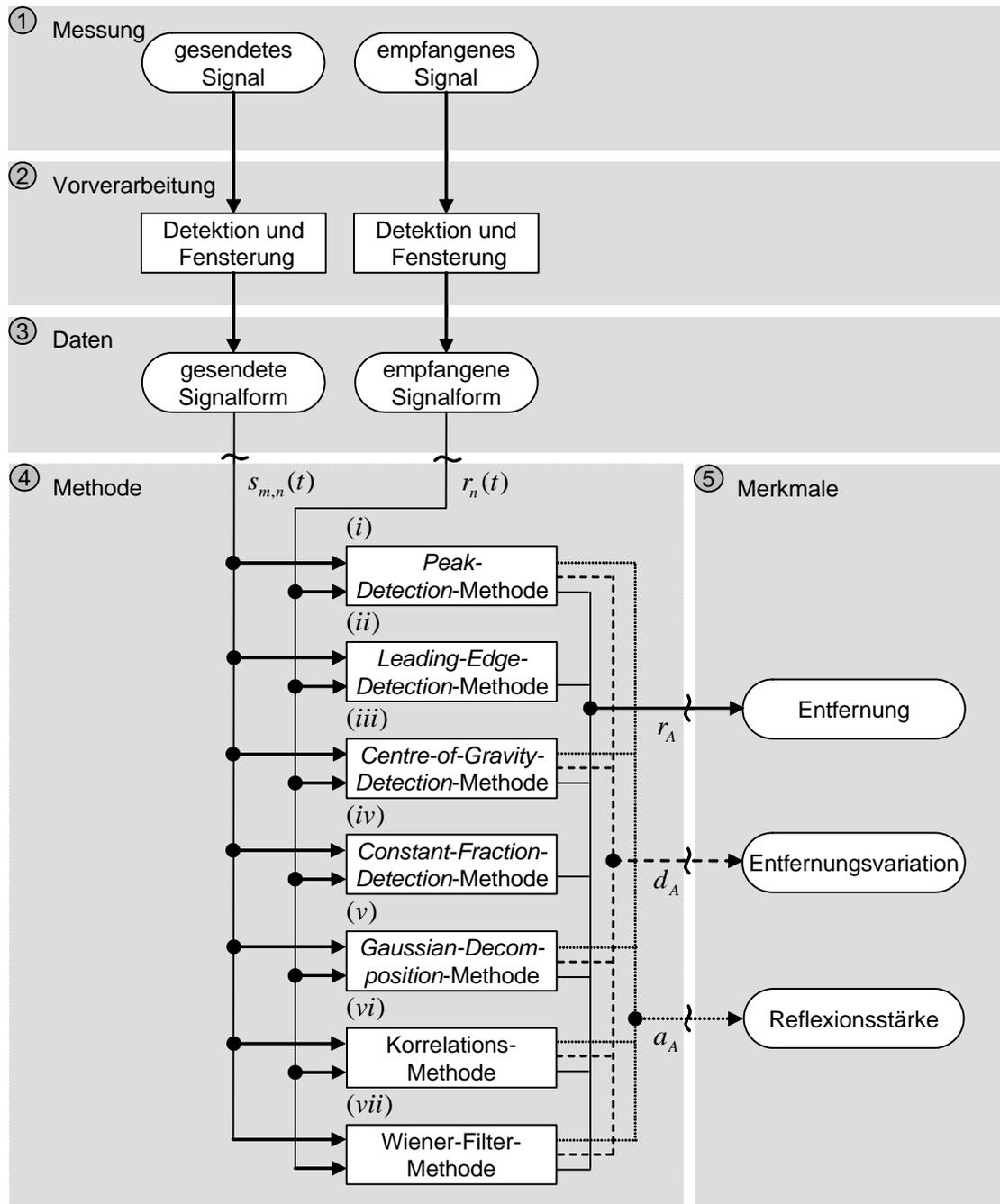


Abbildung 5.1: Schematische Übersicht der einzelnen Verarbeitungsschritte zur Merkmalsextraktion.

empfangenen Signale gewonnen (Abschnitt 5.1). Es werden verschiedene Methoden vorgestellt und auf deren spezifische Eigenschaften eingegangen (Abbildung 5.1(4)): (i) *Peak-Detection*-Methode (Abschnitt 5.2), (ii) *Leading-Edge-Detection*-Methode (Abschnitt 5.3), (iii) *Centre-of-Gravity-Detection*-Methode (Abschnitt 5.4) und (iv) *Constant-Fraction-Detection*-Methode (Abschnitt 5.5). Zudem wird die (v) *Gaussian-Decomposition*-Methode kurz angesprochen (Abschnitt 5.6). Weiterhin wird die (vi) Korrelations-Methode (Abschnitt 5.7) und eine spezielle Form der (vii) Wiener-Filter-Methode (Abschnitt 5.8) vorgestellt. Nicht alle vorgestellten Methoden ermöglichen eine Extraktion der drei genannten Merkmale *Entfernung*, *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke* (Abbildung 5.1(5)). Eine Gegenüberstellung von Methoden und Merkmalen erfolgt in Abschnitt 5.9.

Ergänzend sei erwähnt, dass für diese Analysen der Signalform sehr kurze Pulse im Vergleich zu den beleuchteten Strukturen von Vorteil sind. Um beispielsweise feine Strukturen von Ästen auflösen zu können, sollte die Pulslänge möglichst im Nanosekundenbereich oder darunter liegen. Kurze Pulse haben bei gleicher Amplitude jedoch eine geringere Pulsenergie und sind deswegen schwerer zu detektieren. Durch die geringere Pulsenergie ergibt sich häufig ein schlechtes *SNR* (Abschnitt 5.7.1). Dann sollte ein signalangepasstes Filter (Abschnitt 5.7.2 beziehungsweise Abschnitt 5.7.3) verwendet werden.

## 5.1 Detektion der rückgestreuten Pulse

Zur Analyse der einzelnen Pulse müssen zuerst die Bereiche des Signals, in denen sich ausgeprägte Pulse befinden, detektiert werden. Hierzu werden die gemessenen Daten mit dem gesendeten und empfangenen Signal (Abbildung 5.1(1)) vorverarbeitet. Bei der Vorverarbeitung werden ausgeprägte Pulse detektiert und Bereiche, in denen sich ausgeprägte Pulse befinden, gefenstert (Abbildung 5.1(2)). Die gefensterten Signale werden im Folgenden als gesendete und empfangene Signalform bezeichnet. Die gesendete und empfangene Signalform sind die Eingangsdaten (Abbildung 5.1(3)) für die verschiedenen Methoden zur Merkmalsextraktion.

Die Pulsdetektion beinhaltet verschiedene Verfahrensschritte. Zuerst wird ein dem Rauschanteil angepasster Schwellwert  $s_{th}$  zur Unterscheidung zwischen einzelnen Pulsen und Rauschen bestimmt. Die wesentlichen Ursachen, die Rauschen bewirken, sind beispielsweise: Hintergrundstrahlung, Verstärker- und Photodiodenrauschen. Für die Schätzung des Rauschens wird von dem gesamten empfangenen Signal nur ein Teil prozessiert, von dem bekannt ist, dass kein Puls darin enthalten ist. In dieser pullosen Phase wird der Mittelwert  $\mu$  und die Standardabweichung  $\sigma$  des Rauschens des empfangenen Signals geschätzt. Praktisch kann jedoch auch das gesamte empfangene Signal mit dem darin enthaltenen Puls herangezogen werden, da die Pulsdauer im Vergleich zur Aufzeichnungszeit gering ist. Ist die Signalamplitude mindestens dreimal so hoch wie die ermittelte Standardabweichung des Rauschanteils über mindestens einer Dauer, die der Länge des emittierten Pulses bei halber Amplitudenhöhe (bei dem verwendeten System beträgt die Länge 5 ns) entspricht, wird dieser Puls für die weitere Verarbeitung berücksichtigt. Bei der Fensterung wird darauf geachtet, dass der gesamte Signalbereich, in dem ein Nutzsignal vorliegt, durch eine hinreichende Fensterlänge berücksichtigt wird. Für die Pulsdetektion des gesendeten Signals ist der Zeitbereich, in dem der Puls vorliegt, bekannt und durch die konstante Pulslänge vorgegeben. Des-

wegen erfolgt eine Fensterung für einen fest vorgegebenen Zeitbereich. Somit liegen die gesendete und die empfangene Signalform für die weitere Verarbeitung durch die folgenden Methoden zur Merkmalsextraktion vor.

## 5.2 Peak-Detection-Methode

Bei der *Peak-Detection*-Methode werden die Werte für die *Entfernung* und die *Reflexionsstärke* durch die Position und den Wert des Maximums des Signalverlaufs der Signalform bestimmt. Das Maximum befindet sich an der Stelle mit der höchsten Rückstreuung und wird als Amplitude bezeichnet. Die Amplitude der empfangenen Signalform wird zur Amplitude der gesendeten Signalform in Bezug gesetzt. Dadurch lässt sich erreichen, dass durch das Lasersystem bedingte Intensitätsfluktuationen (Abschnitt 3.1) angepasst werden. Die zufällige Modulation des Signalverlaufs beeinflusst die Merkmalsextraktion, da einzelne Signalspitzen die zu erwartenden Werte nachteilig verfälschen können. Bei starker Modulation des Signalverlaufs empfiehlt es sich, die Signalform vor der Merkmalsextraktion einer Tiefpassfilterung zu unterziehen und daraufhin das Maximum zu bestimmen. Die Berechnung der *Entfernungsvariation* durch die *zeitliche Pulslänge* der Signalform erfolgt bei halber Amplitudenhöhe (engl. *Full Width at Half Maximum, FWHM*).

In den schematischen Abbildungen 5.2 wird gezeigt, wie die Eigenschaften der Signalform durch die *zeitliche Position*, *zeitliche Pulslänge* und *Amplitude* für den emittierten und rückgestreuten Puls bestimmt werden.

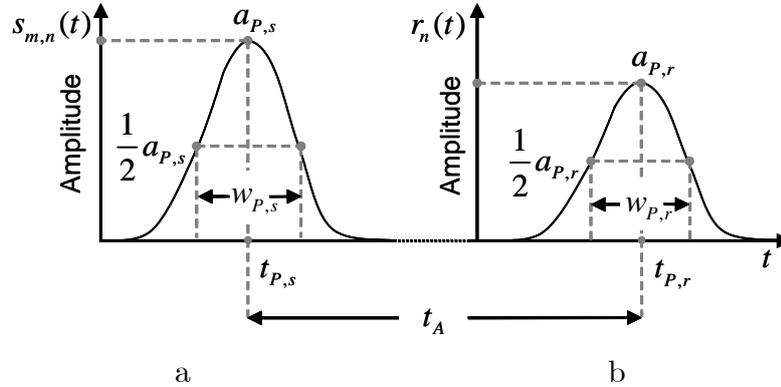


Abbildung 5.2: Merkmalsextraktion bei der *Peak-Detection*-Methode. a) Gesendete Signalform  $s_{m,n}(t)$ , b) Empfangene Signalform  $r_n(t)$ .

Für den emittierten und rückgestreuten Puls werden zuerst die Eigenschaften der Signalform getrennt bestimmt. Die *zeitliche Position*  $t_A$  berechnet sich dann aus der Differenz von  $t_{P,r}$  und  $t_{P,s}$ . Die Pulsverlängerung  $w_A$  berechnet sich aus der Differenz von der *zeitliche Pulslänge*  $w_{P,r}$  und  $w_{P,s}$ . Die normierte *Amplitude*  $a_A$  berechnet sich aus dem Quotienten  $a_{P,r}/a_{P,s}$ . Mit der *zeitlichen Position*  $t_A$  und der Pulsverlängerung  $w_A$  werden dann unter Berücksichtigung der Lichtgeschwindigkeit  $c$  die Merkmale *Entfernung*  $r_A$  und *Entfernungsvariation*  $d_A$  berechnet mit

$$r_A = \frac{t_A \cdot c}{2} \quad (5.1)$$

und

$$d_A = \frac{w_A \cdot c}{2}. \quad (5.2)$$

Die Verarbeitungsschritte zur Merkmalsextraktion durch die *Peak-Detection-Methode* in Abbildung 5.3 dargestellt.

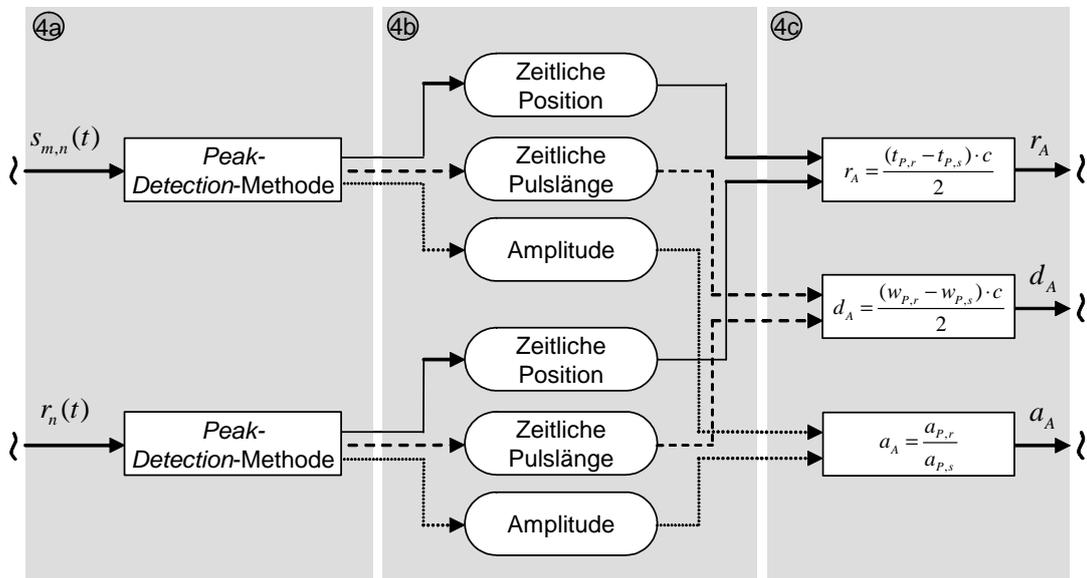


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung der Verarbeitungsschritte der *Peak-Detection-Methode* zur Merkmalsextraktion.

### 5.3 *Leading-Edge-Detection-Methode*

Bei der *Leading-Edge-Detection-Methode* wird der Wert für die *Entfernung* anhand einer Schwellwertüberschreitung bei der ansteigenden Flanke des Signalverlaufs bestimmt. Als Schwellwert kann ein vorgegebener fester Wert verwendet werden. Bei gleichem Signalverlauf ergeben unterschiedliche Amplituden des Signals unterschiedliche Werte für die Entfernung. Der ermittelte Wert für die Entfernung ist stark abhängig von der maximalen Amplitude des Signals. Dieses Phänomen wird als zeitlicher *Jitter* (engl.) bezeichnet. Die unterschiedlichen Amplituden können sich bei der gesendeten Signalform durch systembedingte Intensitätsfluktuationen (Abschnitt 3.1) und bei der empfangenen Signalform durch unterschiedliche Reflektanz des Materials (Abschnitt 3.3.2) ergeben. Da jedoch die zeitliche Signalform durch die Messung bekannt ist, kann der Schwellwert relativ zur maximalen Amplitude für jeden Puls angepasst werden.

Vorausgesetzt, dass ein gaußförmiger Funktionsverlauf für die Signalform gegeben ist und die Entfernung der beleuchteten Oberfläche im Zentrum des *Footprints* ermittelt werden soll, wird für den Schwellwert die Hälfte der Amplitude angesetzt. Dies hat den Vorteil, dass damit die Entfernung sehr genau bestimmt werden kann, da bei der Hälfte der Amplitude die ansteigende Flanke die höchste Steilheit aufweist. Bei Mehrfachreflexionen (Abschnitt 3.3.3) können nur Entfernungen von Oberflächen bestimmt werden, wenn eine ausgeprägte ansteigende Flanke im Signalverlauf der Signalform vorliegt.

In den Abbildungen 5.4 wird gezeigt, wie die *zeitliche Position* der Signalform sowohl für den emittierten als auch für den rückgestreuten Puls bestimmt wird.

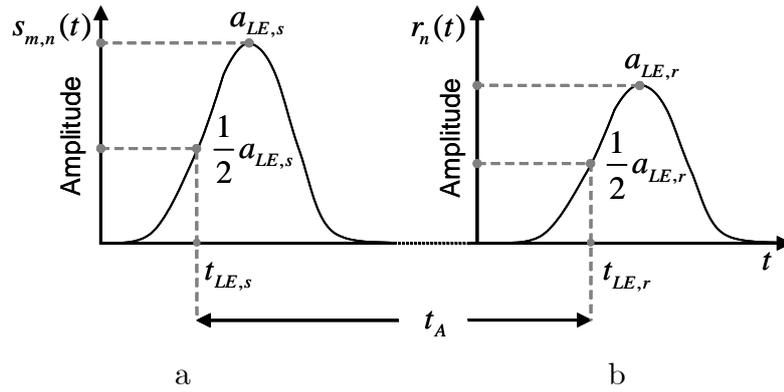


Abbildung 5.4: Merkmalsextraktion bei der *Leading-Edge-Detection*-Methode. a) Gesendete Signalform  $s_{m,n}(t)$ , b) Empfangene Signalform  $r_n(t)$ .

Für den emittierten und rückgestreuten Puls werden zuerst die *zeitlichen Positionen*  $t_{LE,r}$  bei  $\frac{1}{2}a_{LE,r}$  und  $t_{LE,s}$  bei  $\frac{1}{2}a_{LE,s}$  bestimmt. Aus der Differenz von  $t_{LE,r}$  und  $t_{LE,s}$  wird die *zeitliche Position*  $t_A$  berechnet. Mit der *zeitlichen Position*  $t_A$  wird die *Entfernung*  $r_A$  entsprechend nach Gleichung 5.1 berechnet. Die Verarbeitungsschritte zur Merkmalsextraktion durch die *Leading-Edge-Detection*-Methode sind in Abbildung 5.5 schematisch dargestellt.

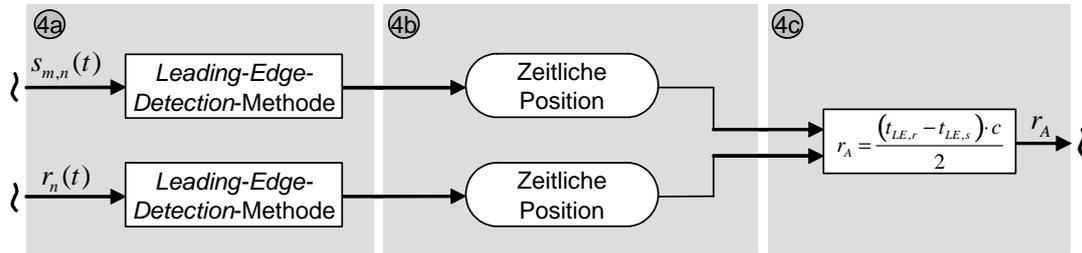


Abbildung 5.5: Schematische Darstellung der Verarbeitungsschritte der *Leading-Edge-Detection*-Methode zur Merkmalsextraktion.

## 5.4 Centre-of-Gravity-Detection-Methode

Bei der *Centre-of-Gravity-Detection*-Methode wird der Wert für die *Entfernung* durch den zeitlichen Schwerpunkt  $t_{CoG}$  des Signals bestimmt mit

$$t_{CoG} = \frac{\int_{t=t_{CoG_1}}^{t_{CoG_2}} t \cdot s_{m,n}(t) dt}{\int_{t=t_{CoG_1}}^{t_{CoG_2}} s_{m,n}(t) dt}. \quad (5.3)$$

Für die Berechnung wird über die gesamte Signalform integriert. Die Integrationsgrenzen  $t_{CoG_1}$  und  $t_{CoG_2}$  müssen nicht exakt sein, falls die Signalform innerhalb der Integrationsgrenzen liegt und die Signalform von mittelwertfreiem Rauschen umgeben ist.

Diese Methode liefert gute Ergebnisse bei kleinen durch Rauschen beeinflussten Signalen und bei *a priori* unbekanntem Verlauf der Signalform mit zufälliger Modulation (Abschnitt 3.1). Bei asymmetrischem Signalverlauf liegt der daraus berechnete Entfernungswert nicht beim Maximum des Signalverlaufs, was jedoch keinen Nachteil darstellt.

Die folgende Bestimmung von zusätzlichen Merkmalen ist eine Erweiterung der Standardmethode von *Centre-of-Gravity-Detection*. Um Merkmale zu extrahieren, ist die Integration über einen Bereich des Signals den Methoden überlegen, die nur auf einem einzelnen Messwert basieren [Vosselman, 2002]. Dies ist dadurch begründet, dass bei Rauschen die Integration über viele Werte im Mittel weniger beeinflusst wird, als ein einzelner Wert.

Zur Berechnung des Merkmals *Reflexionsstärke* wird hierfür die Signalenergie von  $s_{m,n}(t)$  verwendet. Die Signalenergie wird durch den Nenner von Gleichung 5.3 bestimmt. Da bei der Integration über das Signal auch die Länge des Pulses bei der Berechnung berücksichtigt wird, ist die Signalenergie des Pulses im Gegensatz zur Amplitude von der Neigung der Oberfläche unabhängig. Die Beschaffenheit der Oberfläche hat durch ihre Reflexionseigenschaften jedoch Einfluss auf die Signalenergie.

Mit der Annahme einer Gaußfunktion für die Signalform (Gleichung 3.4) berechnet sich die *Reflexionsstärke*  $a_{CoG}$  unter Verwendung der Inversen-Fehler-Funktion  $\text{erf}^{-1}$  [Bronstein *et al.*, 2001] und der *zeitlichen Pulslänge*  $w_{CoG}$  mit

$$a_{CoG} = \frac{2 \cdot \text{erf}^{-1}(0.5)}{w_{CoG} \sqrt{\pi}} \int_{t=t_{CoG_1}}^{t_{CoG_2}} s_{m,n}(t) dt. \quad (5.4)$$

Die *zeitliche Pulslänge*  $w_{CoG}$  der Signalform für die *Entfernungsvariation* wird näherungsweise aus dem folgenden Zusammenhang ermittelt:

$$\int_{t=t_{CoG}-\frac{w_{CoG}}{2}}^{t_{CoG}+\frac{w_{CoG}}{2}} s_{m,n}(t) dt = \text{erf}(\sqrt{\ln 2}) \int_{t=t_{CoG_1}}^{t_{CoG_2}} s_{m,n}(t) dt, \quad (5.5)$$

wobei das Integral über die *zeitliche Pulslänge*  $w_{CoG}$  mit den Integrationsgrenzen  $[t_{CoG} - \frac{w_{CoG}}{2}, t_{CoG} + \frac{w_{CoG}}{2}]$  ungefähr 76% der gesamten Integrationsfläche entspricht.

In den Abbildungen 5.6 wird schematisch gezeigt, wie die Eigenschaften der Signalform sowohl für den emittierten als auch für den rückgestreuten Puls bestimmt werden.

Für den emittierten und rückgestreuten Puls werden zuerst die Eigenschaften der Signalform getrennt bestimmt. Die *zeitliche Position*  $t_A$  berechnet sich dann aus der Differenz von  $t_{CoG,r}$  und  $t_{CoG,s}$ . Die Pulsverlängerung  $w_A$  berechnet sich aus der Differenz der *zeitlichen Pulslänge*  $w_{CoG,r}$  von  $w_{CoG,s}$ .  $a_A$  berechnet sich aus dem Quotienten  $a_{CoG,r}/a_{CoG,s}$ . Mit der *zeitlichen Position*  $t_A$  und der Pulsverlängerung  $w_A$  werden entsprechend nach Gleichung 5.1 und 5.2 die Merkmale *Entfernung*  $r_A$  und *Entfernungsvariation*  $d_A$  berechnet. Die Verarbeitungsschritte zur Merkmalsextraktion durch die *Centre-of-Gravity-Detection-Methode* sind in Abbildung 5.7 schematisch dargestellt.

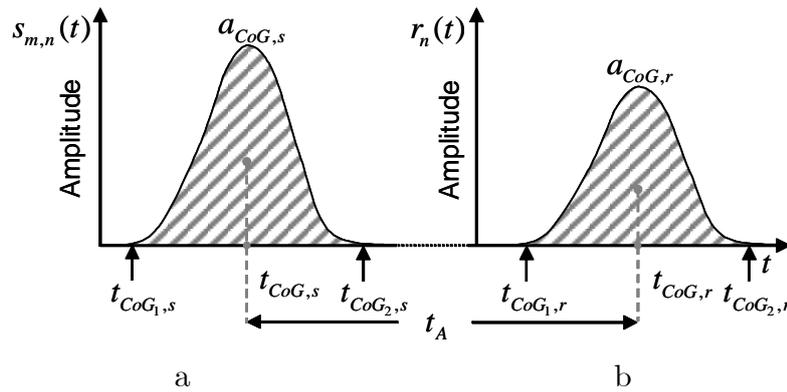


Abbildung 5.6: Merkmalsextraktion bei der *Centre-of-Gravity-Detection*-Methode. a) Gesendete Signalform  $s_{m,n}(t)$ , b) Empfangene Signalform  $r_n(t)$ .

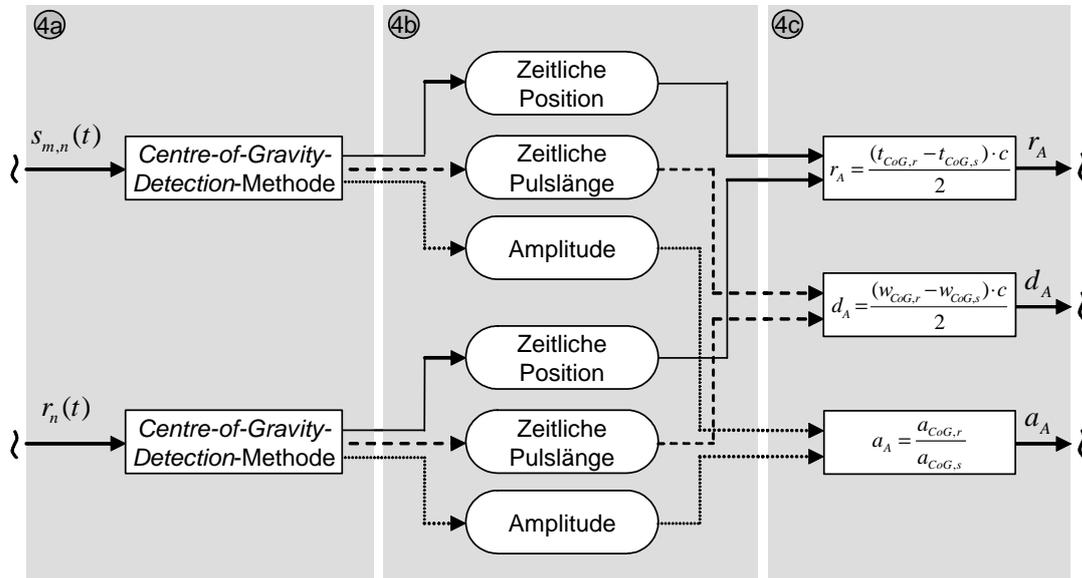


Abbildung 5.7: Schematische Darstellung der Verarbeitungsschritte der *Centre-of-Gravity-Detection*-Methode zur Merkmalsextraktion.

## 5.5 Constant-Fraction-Detection-Methode

Mit der *Constant-Fraction-Detection*-Methode wird der Wert für die *Entfernung* berechnet. Das Signal wird hierfür invertiert und nach einer fest vorgegebenen Verzögerung  $\tau$  zum ursprünglichen Signal addiert. Für die zeitliche Verzögerung  $\tau$  empfiehlt sich erfahrungsgemäß ein Wert, der ungefähr der *zeitlichen Pulslänge* der Signalform  $w$  bei halber Amplitudenhöhe (engl. *Full Width at Half Maximum, FWHM*) entspricht. Das daraus berechnete Signal  $s_{CFD}(t)$  besitzt einen Zeitpunkt des Nulldurchgangs der unabhängig von der Signalamplitude ist, wobei jedoch der Zeitpunkt des Nulldurchgangs durch die Signalform und die Signallänge beeinflusst wird [Kammermann, 1993]. Der Zeitpunkt des Nulldurchgangs besitzt die *zeitliche Position*  $t_{CFD}$  und wird bestimmt durch

$$s_{CFD}(t_{CFD}) = 0 \text{ mit } s_{CFD}(t) = s_{m,n}(t) - s_{m,n}(t + \tau). \quad (5.6)$$

Die Verfahrensschritte sind in Abbildung 5.8 schematisch dargestellt.

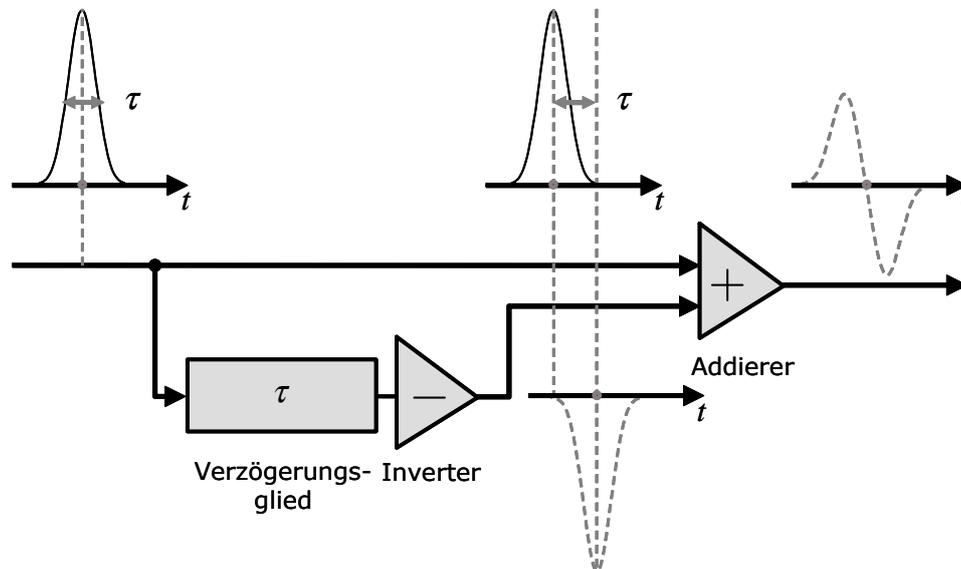


Abbildung 5.8: Vereinfachte schematische Darstellung der Verfahrensschritte bei *Constant-Fraction-Detection-Methode*.

In den Abbildungen 5.9 wird in Anlehnung an die vorangegangene Beschreibung gezeigt, wie die *zeitliche Position* der Signalform, sowohl für den emittierten, als auch für den rückgestreuten Puls bestimmt wird.

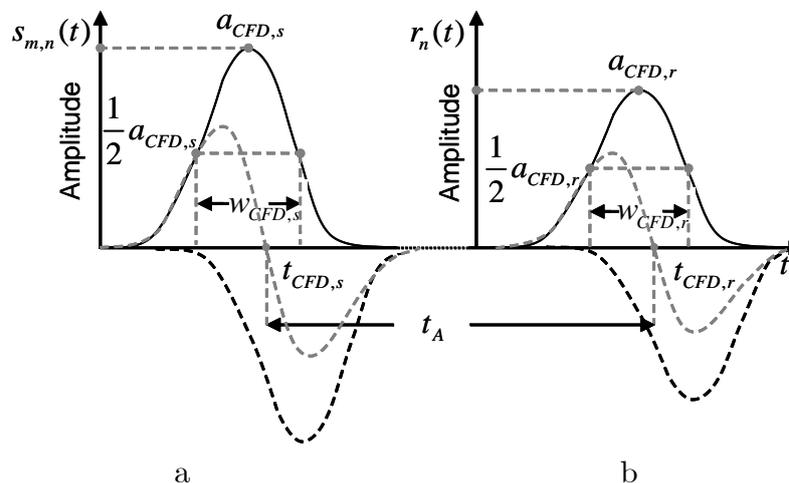


Abbildung 5.9: Merkmalsextraktion bei der *Constant-Fraction-Detection-Methode*. a) Gesendete Signalform  $s_{m,n}(t)$ , b) Empfangene Signalform  $r_n(t)$ .

Für den emittierten und rückgestreuten Puls werden zuerst die *zeitlichen Positionen*  $t_{CFD,r}$  und  $t_{CFD,s}$  bestimmt. Die *zeitliche Position*  $t_A$  berechnet sich aus der Differenz von  $t_{CFD,r}$  und  $t_{CFD,s}$  und nach Gleichung 5.1 wird die *Entfernung*  $r_A$  bestimmt. Die Verarbeitungsschritte zur Merkmalsextraktion durch die *Constant-Fraction-Detection-Methode* sind in Abbildung 5.10 schematisch dargestellt.

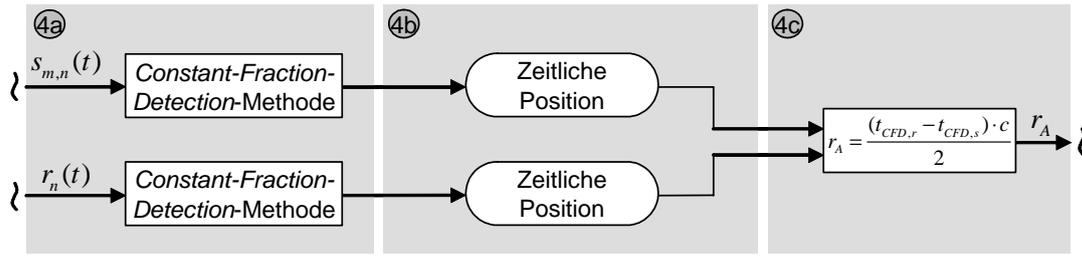


Abbildung 5.10: Schematische Darstellung der Verarbeitungsschritte der *Constant-Fraction-Detection-Methode* zur Merkmalsextraktion.

## 5.6 *Gaussian-Decomposition-Methode*

Mit der Annahme einer Gaußfunktion für die Signalform (Gleichung 3.4) können die Merkmale durch Parameterschätzung mittels Anpassung der Gaußfunktion an die Signalform bestimmt werden. Für diese Anpassung stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Persson *et al.* [2005] verwendet das aus der Statistik bekannte *Expectation-Maximization*-Verfahren, um die Normalverteilung (Gaußfunktion) zu bestimmen. Auch das Gauß-Newton-Verfahren kann zur Parameterschätzung eingesetzt werden, wobei bei dieser Methode die Konvergenz für eine numerische Lösung nicht immer gewährleistet ist [Jutzi & Stilla, 2005d]. Eine Verbesserung hierzu ist das Levenberg-Marquardt-Verfahren [Levenberg, 1944; Marquardt, 1963]. Bei dem Levenberg-Marquardt-Verfahren ist die Konvergenz ebenfalls nicht gewährleistet, jedoch besitzt dieses Verfahren einen größeren Konvergenzradius als das Gauß-Newton-Verfahren. Für den Fall, dass die Gaußfunktion und die Signalform eine erhebliche Abweichung zueinander besitzen, wird die Konvergenz durch das Levenberg-Marquardt-Verfahren häufiger erreicht als durch das Gauß-Newton-Verfahren. Das Levenberg-Marquardt-Verfahren wird von Hofton *et al.* [2000], Jutzi & Stilla [2005b] und Reitberger *et al.* [2006b] verwendet.

Die detaillierte Beschreibung der *Gaussian-Decomposition-Methode* mittels Levenberg-Marquardt-Verfahren erfolgt mit der Parameterschätzung der Oberflächenantwort in Abschnitt 5.8.3. Die Parameterschätzung der Oberflächenantwort (Abschnitt 5.8.3) kann direkt auf die Parameterschätzung der Signalform (Abschnitt 5.6) übertragen werden, da auch hier die Parameterschätzung mittels Anpassung einer Gaußfunktion erfolgt. Es wird hierbei davon ausgegangen, dass nur ein einzelner Puls rückgestreut wird.

In den Abbildungen 5.11 wird gezeigt, wie die Eigenschaften der Signalform durch die *zeitliche Position*, *zeitliche Pulslänge* und *Amplitude* für den emittierten und den rückgestreuten Puls bestimmt werden. Die Signalform ist als durchgehende Linie und die Gaußfunktion als gestrichelte Linie dargestellt.

Für den emittierten und rückgestreuten Puls werden zuerst die Eigenschaften der Signalform getrennt bestimmt. Die *zeitlichen Position*  $t_A$  berechnet sich dann aus der Differenz von  $t_{LM,r}$  und  $t_{LM,s}$ . Die *Pulsverlängerung*  $w_A$  berechnet sich aus der Differenz von der *zeitlichen Pulslänge*  $w_{LM,r}$  und  $w_{LM,s}$ . Die *normierte Amplitude*  $a_A$  berechnet sich aus dem Quotienten  $a_{LM,r}/a_{LM,s}$ . Mit der *zeitlichen Position*  $t_A$  und der *Pulsverlängerung*  $w_A$  wird entsprechend nach Gleichung 5.1 und 5.2 die *Entfernung*  $r_A$  und die *Entfernungsvariation*  $d_A$  berechnet. Die Verarbeitungsschritte zur Merkmalsextraktion bei der *Gaussian-Decomposition-Methode* mittels Levenberg-Marquardt-Verfahren

sind in Abbildung 5.12 schematisch dargestellt.

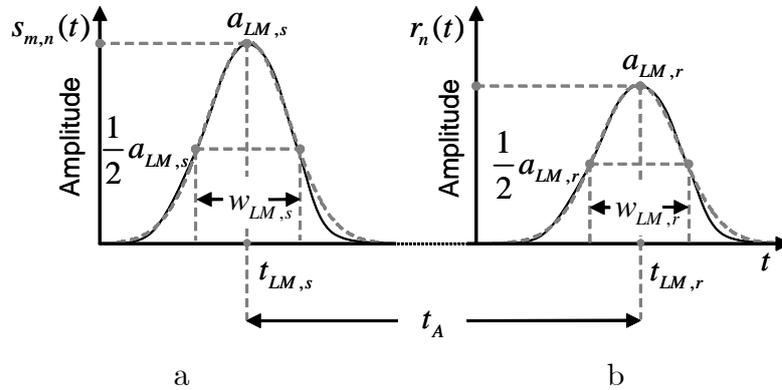


Abbildung 5.11: Merkmalsextraktion bei der *Gaussian-Decomposition*-Methode mittels Levenberg-Marquardt-Verfahren. a) Gesendete Signalform  $s_{m,n}(t)$ , b) Empfangene Signalform  $r_n(t)$ .

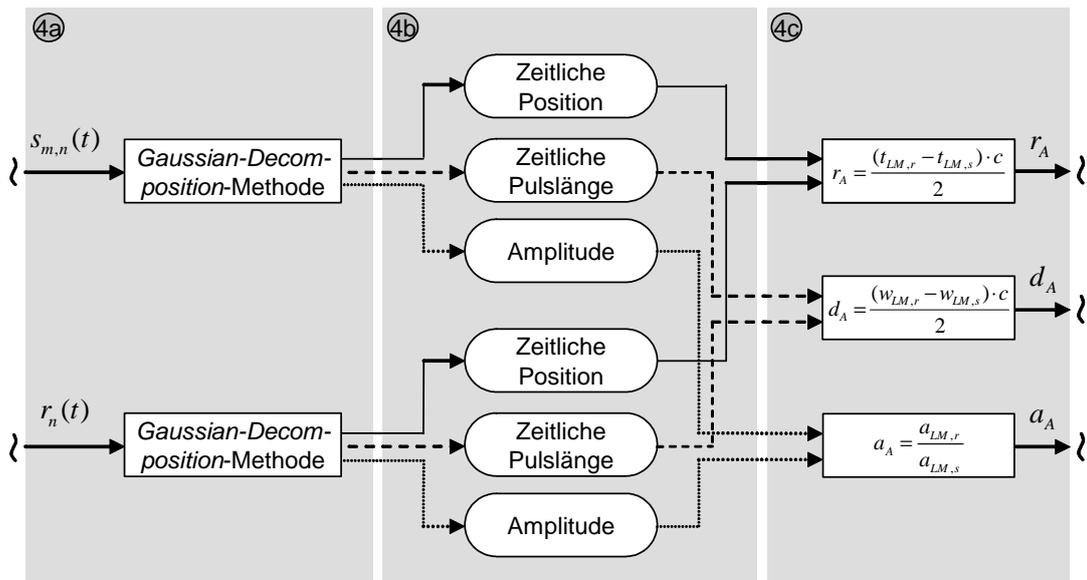


Abbildung 5.12: Schematische Darstellung der Verarbeitungsschritte der *Gaussian-Decomposition*-Methode mittels Levenberg-Marquardt-Verfahren zur Merkmalsextraktion.

## 5.7 Korrelations-Methode

Bei Verwendung der Korrelations-Methode wird der gesamte Signalverlauf der gesendeten und empfangenen Signalform für die Merkmalsbestimmung berücksichtigt. Mit der gesendeten und empfangenen Signalform wird die normierte Kreuzkorrelationsfunktion ( $KKF$ ) berechnet. Eine Signalformänderung, bedingt durch die Oberfläche, bewirkt eine Veränderung der Kreuzkorrelationsfunktion. Um mögliche Änderungen detailliert zu erfassen, sollte das zu analysierende Signal mit einer hohen zeitlichen Abtastung aufgezeichnet werden.

Der Wert für die *Entfernung* wird durch die Position des Maximums der *KKF* berechnet. Die Korrelations-Methode ermöglicht eine hochgenaue und zuverlässige Entfernungsschätzung. Die mit der Korrelations-Methode bestimmte Entfernung hat eine wesentlich höhere Genauigkeit als Methoden, die nur die empfangene Signalform zur Entfernungsbestimmung verwenden [Hoften & Blair, 2002; Jutzi & Stilla, 2005b; Thiel *et al.*, 2005].

Für die Analyse der Signalform muss zuerst die Signalform der rückgestreuten Pulse im Empfangssignal detektiert werden, damit die empfangene Signalform gegeben ist. Hierfür kann die in Abschnitt 5.1 beschriebene Methode herangezogen werden. Ist das Empfangssignal durch Störeinflüsse stark verrauscht, dann sollte eine erweiterte Detektionsmethode verwendet werden. Die Detektion des rückgestreuten Pulses in einem verrauschten Empfangssignal und die Ermittlung der korrespondierenden Signallaufzeit sind bekannte Probleme, die bereits ausführlich in der Radartechnik [Mahafza, 1998; Skolnik, 1980] und in der Systemtheorie [Kailath & Poor, 1998; Papoulis, 1984; Turin, 1960; Unbehauen, 1996] diskutiert wurden. Zur Lösung dieses Problems wird ein *signalangepasstes Filter* (engl. *Matched Filter*) verwendet, welches das *SNR* zwischen dem zu detektierenden Puls und dem verrauschten Empfangssignal optimiert. Die Bestimmung des *SNR* für ein *signalangepasstes Filter* wird in Abschnitt 5.7.1 gezeigt. Das *signalangepasste Filter* wird in Abschnitt 5.7.2 für eine unbekannte Oberfläche und in Abschnitt 5.7.3 für eine als bekannt vorausgesetzte Oberfläche beschrieben.

### 5.7.1 *SNR* für das signalangepasste Filter

Das maximale Signal-zu-Rausch-Verhältnis (engl. *Signal to Noise Ratio, SNR*) soll für die *zeitliche Position*  $t_A$  bestimmt werden. Es wird zur Vereinfachung vorausgesetzt, dass keine Änderung im Signalverlauf zwischen gesendeter und empfangener Signalform vorliegt. Weiterhin wird angenommen, dass der Rauschanteil des Systems durch die Signalenergie von weißem Rauschen mit dem konstanten Faktor  $E_W$  beschrieben werden kann und die Signalenergie  $E_S$  der gesendeten Signalform gegeben sei. Hierfür ergibt sich

$$SNR(t_A) = \frac{2E_S}{E_W}. \quad (5.7)$$

Somit hängt das ermittelte *SNR* nur von der Signalenergie des emittierten Pulses und dem Rauschen ab. Sie ist vollkommen unabhängig vom Signalverlauf [Mahafza, 1998].

### 5.7.2 Signalangepasstes Filter für eine unbekannte Oberfläche

Es soll ein signalangepasstes Filter entworfen werden, welches auf die empfangene Signalform des rückgestreuten Pulses optimiert wurde. In der Praxis ist es schwierig, dieses Filter eindeutig zu bestimmen, da die Messung verschiedenen unvorhersehbaren Einflüssen unterliegt. Können Einflüsse, die auf die gesendete Signalform wirken, nicht näher bestimmt werden, muss ein suboptimal signalangepasstes Filter verwendet werden, welches nicht notwendigerweise ein optimales *SNR* liefert.

Betrachten wir hierzu zuerst den einfachen Fall, bei dem keine Änderung im Signalverlauf zwischen gesendeter und empfangener Signalform vorliegt. Dies ist beispielsweise

se dann gegeben, wenn die empfangene Signalform gleichmäßig abgeschwächt wird. Das ist der Fall bei einer homogenen Dämpfung durch Reflexion an einer ebenen Oberfläche oder auch bei Abschwächung durch atmosphärische Einflüsse. Liegt keine Änderung im Signalverlauf vor, dann kann die gesendete Signalform als signalangepasstes Filter für die Detektion des rückgestreuten Pulses verwendet werden, da der Signalverlauf des emittierten Pulses genau dem des rückgestreuten Pulses entspricht.

Das signalangepasste Filter wird dann ohne zusätzliches *a priori* Wissen durch die *normierte Kreuzkorrelation*  $R_{sr}$  zwischen der gesendeten Signalform  $s_{m,n}(t)$  des emittierten Pulses und der empfangenen Signalform  $r_n(t)$  des rückgestreuten Pulses berechnet. Die Korrelationsfunktion  $R_{sr}(t_A)$  berechnet sich mit

$$R_{sr}(t_A) = \frac{\int_{t=-\infty}^{\infty} s_{m,n}(t) \cdot r_n(t + t_A) dt}{\sqrt{\int_{t=-\infty}^{\infty} s_{m,n}^2(t) dt \cdot \int_{t=-\infty}^{\infty} r_n^2(t) dt}}. \quad (5.8)$$

Der Wert für die *zeitliche Position*  $t_A$  wird durch die Position des Maximums der *KKF*  $R_{sr}(t_A)$  bestimmt. Mit der *zeitlichen Position*  $t_A$  wird die *Entfernung*  $r_A$  berechnet.

Die *zeitliche Pulslänge* der Korrelationsfunktion ist ein Maß für die Ähnlichkeit von benachbarten Werten des Signalverlaufs. Je länger die berechnete *zeitliche Pulslänge*, desto ähnlicher sind die benachbarten Werte innerhalb des Signalverlaufs. Die Pulsverlängerung  $w_A$  berechnet sich aus der Differenz zwischen der *zeitlichen Pulslänge*  $w_{K,rr}$  und  $w_{K,ss}$  der Autokorrelationsfunktionen (*AKF*). Entsprechend der Gleichung 5.8 berechnet sich die normierte *AKF*  $R_{ss}(t_0)$  der gesendeten Signalform  $s_{m,n}(t)$  mit

$$R_{ss}(t_0) = \frac{\int_{t=-\infty}^{\infty} s_{m,n}(t) \cdot s_{m,n}(t + t_0) dt}{\sqrt{\int_{t=-\infty}^{\infty} s_{m,n}^2(t) dt \cdot \int_{t=-\infty}^{\infty} s_{m,n}^2(t) dt}} \quad (5.9)$$

und die normierte *AKF*  $R_{rr}(t_0)$  der empfangenen Signalform  $r_n(t_0)$  mit

$$R_{rr}(t_0) = \frac{\int_{t=-\infty}^{\infty} r_n(t) \cdot r_n(t + t_0) dt}{\sqrt{\int_{t=-\infty}^{\infty} r_n^2(t) dt \cdot \int_{t=-\infty}^{\infty} r_n^2(t) dt}}. \quad (5.10)$$

Da die zeitliche Verschiebung hierbei nicht von Interesse ist, wird diese zur Vereinfachung mit  $t_0$  bezeichnet. Aus der *AKF*  $R_{ss}(t_0)$  und  $R_{rr}(t_0)$  wird die *zeitliche Pulslänge*  $w_{K,rr}$  und  $w_{K,ss}$  bei halber Amplitudenhöhe bestimmt. Die Pulsverlängerung  $w_A$  zwischen den Autokorrelationsfunktionen berechnet sich dann aus der Differenz zwischen der *zeitlichen Pulslänge*  $w_{K,rr}$  und  $w_{K,ss}$ .

Die *Amplitude*  $a_A$ , die durch den Wert des Maximums der *KKF* bestimmt wird, beschreibt die Ähnlichkeit der gesendeten zur empfangenen Signalform. Die *Amplitude* ist gleich dem normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten. Interessanterweise kann mit dem normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten darüber hinaus eine Aussage über die Reflektanz der Oberfläche gemacht werden. Wird beispielsweise eine ebene Oberfläche mit

geringer Reflektanz beleuchtet, wobei angenommen wird, dass sich die Oberfläche idealerweise senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls befindet, dann ergibt sich für die empfangene Signalform derselbe Signalverlauf wie für die gesendete Signalform, jedoch mit einer geringen Auslenkung. Bei einer geringen Auslenkung und konstantem Rauschen verschlechtert sich das  $SNR$  und bei einem diskreten Signal wirkt zusätzlich Quantisierungsrauschen auf das Signal. Der Einfluss des Quantisierungsrauschens auf die Berechnung des Kreuzkorrelationskoeffizienten ist wesentlich geringer als der Einfluss durch das schlechtere  $SNR$ . Dies bedeutet, dass beim selben Signalverlauf der berechnete Wert des normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten vom  $SNR$  beeinflusst wird [Mäder, 2006].

Sowohl die *zeitliche Pulslänge* als auch die *Amplitude* lassen sich aus den vorangegangenen beschriebenen Gründen nicht direkt mit den durch die anderen Methoden extrahierten Merkmalen vergleichen. Die Verarbeitungsschritte zur Merkmalsextraktion durch die Korrelations-Methode sind in Abbildung 5.13 schematisch dargestellt.

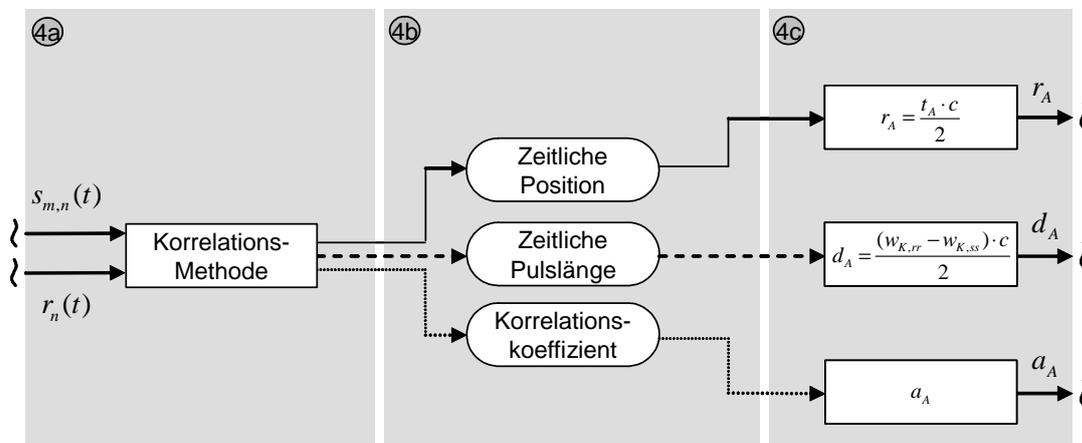


Abbildung 5.13: Schematische Darstellung der Verarbeitungsschritte der Korrelations-Methode zur Merkmalsextraktion.

Erfahrungsgemäß unterliegt die empfangene Signalform verschiedenen Änderungen, die in dem folgenden Abschnitt 5.7.3 beschrieben wird, um das signalangepasste Filter zu optimieren.

### 5.7.3 Signalangepasstes Filter für eine bekannte Oberfläche

Entgegen der Voraussetzung der in Abschnitt 5.7.2 beschriebenen Korrelations-Methode zur Merkmalsextraktion wird jetzt vorausgesetzt, dass die beleuchtete Oberfläche bekannt sei. Zusätzlich wird vorausgesetzt, dass aus der bekannten Oberfläche die dazugehörige Oberflächenantwort bestimmt werden kann (Abschnitt 3.3 und Abschnitt 4.2). Sind diese Bedingungen erfüllt, dann kann die Oberflächenantwort verwendet werden, um ein signalangepasstes Filter zu berechnen. In diesem Fall erhält man ein optimales  $SNR$ . Eine schematische Darstellung der Verarbeitungsschritte zur Berechnung der Merkmale durch ein signalangepasstes Filter für eine bekannte Oberfläche ist in Abbildung 5.14 dargestellt. Diese zusätzlichen Verfahrensschritte ersetzen den in Abbildung 5.13 beschriebenen Block 4a.

Die empfangene Signalform  $r_n(t)$  wird beeinflusst durch die gesendete Signalform  $s_{m,n}(t)$  (Abschnitt 3.1), die Impulsantwort der Empfangseinheit des Lasersystems  $h_n(t)$

(Abschnitt 6.3.1), die örtlichen Energieverteilung des Laserstrahls  $K(\varepsilon)$  (Abschnitt 3.2) und die beleuchtete Oberfläche  $\rho_A(r, \varepsilon, \alpha)$  (Abschnitt 3.3).

Die empfangene Signalform  $r_n(t)$  kann vereinfacht dargestellt werden als Faltung zwischen den genannten Termen und daraus ergibt sich

$$r_n(t) = s_{m,n}(t) * h_n(t) * K(\varepsilon) * \rho_A(r, \varepsilon, \alpha), \quad (5.11)$$

wobei  $(*)$  dem Faltungsoperator entspricht. Unter Berücksichtigung der örtlichen Energieverteilung des Laserstrahls  $K(\varepsilon)$  und der beleuchteten Oberfläche  $\rho_A(r, \varepsilon, \alpha)$  wird zur Vereinfachung die in Abschnitt 3.8 eingeführte Oberflächenantwort  $h(t)$  verwendet. Hieraus ergibt sich für die empfangene Signalform  $r_n(t)$  mit

$$r_n(t) = s_{m,n}(t) * h_n(t) * h(t). \quad (5.12)$$

Die Oberfläche wirkt auf die Signalform des emittierten Pulses. In Abhängigkeit von Oberflächengeometrie und Reflexionseigenschaft der Oberfläche wird die empfangene Signalform des rückgestreuten Pulses verändert. Dies kann bei einer bekannten Oberfläche für das signalangepasste Filter berücksichtigt werden, indem eine *Modellierung* der bekannten Oberfläche vorgenommen wird (Abbildung 5.14(1)). In Abschnitt 4.2 wird Modellwissen von Oberflächen verwendet, um damit eine zur Oberfläche korrespondierende Oberflächenantwort  $h(t)$  zu generieren.

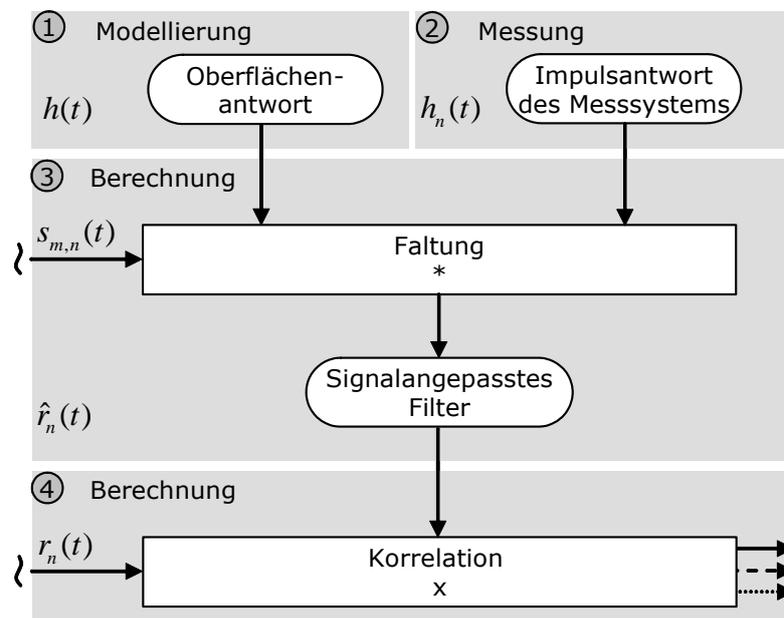


Abbildung 5.14: Darstellung der Verarbeitungsschritte zur Berechnung der Merkmale durch ein signalangepasstes Filter für eine bekannte Oberfläche.

Die Empfangseinheit des Lasersystems verändert in Abhängigkeit von den verwendeten Photodioden, dem Signalverstärker und dem Strahlengang die gemessene Signalform. Diese Systemeinflüsse lassen sich durch *Messung* der Impulsantwort der Empfangseinheit bestimmen (Abschnitt 6.3.1). Die Impulsantwort der Empfangseinheit  $h_n(t)$  kann dann für ein signalangepasstes Filter berücksichtigt werden (Abbildung 5.14(2)). In Abschnitt 7.3 werden die hierzu durchgeführten Messungen beschrieben.

Sind die Impulsantwort der Empfangseinheit  $h_n(t)$  und die Oberflächenantwort  $h(t)$  von Messungen oder durch Simulation bekannt, dann wird damit eine *Berechnung* des signalangepassten Filters für die gesendete Signalform  $s_{m,n}(t)$  durchgeführt (Abbildung 5.14(3)). Das signalangepasste Filter muss für jeden emittierten Laserpuls neu bestimmt werden, da die Signalform von Puls zu Puls variiert (Abschnitt 3.1). Das signalangepasste Filter  $\hat{r}_n(t)$  für die geschätzte empfangene Signalform wird in Anlehnung an Gleichung 5.12 durch Faltung der genannten Terme berechnet mit

$$\hat{r}_n(t) = s_{m,n}(t) * h_n(t) * h(t). \quad (5.13)$$

Im letzten Verarbeitungsschritt (Abbildung 5.14(4)) erfolgt die *Berechnung* der *KKF*  $R_{\hat{r}r}(t_A)$  mit dem signalangepassten Filter  $\hat{r}_n(t)$  und der empfangenen Signalform  $r_n(t)$  durch

$$R_{\hat{r}r}(t_A) = \frac{\int_{t=-\infty}^{\infty} \hat{r}_n(t) \cdot r_n(t + t_A) dt}{\sqrt{\int_{t=-\infty}^{\infty} \hat{r}_n^2(t) dt \cdot \int_{t=-\infty}^{\infty} r_n^2(t) dt}}. \quad (5.14)$$

Entsprechend der in Abschnitt 5.7.2 beschriebenen Methode werden die Merkmale aus der *KKF* bestimmt.

## 5.8 Wiener-Filter-Methode

Mit der Wiener-Filter-Methode wird eine neue Methode zur Gewinnung von Merkmalen vorgestellt. Die Wiener-Filter-Methode ermöglicht die Berechnung der Merkmale aus der Oberflächenantwort. Der Vorteil bei dieser Methode ist, dass die Berechnung der Merkmale unabhängig von der Anregung durch den Laserpuls erfolgt. Da die Merkmale sich oft nur ungenau aus der Oberflächenantwort bestimmen lassen, erfolgt durch eine Gaußfunktion eine Anpassung an die Oberflächenantwort. Dadurch werden geringe Abweichungen kompensiert. Aus der Gaußfunktion können die Parameter der Merkmale direkt bestimmt werden. Zur Parameterschätzung wird mit dem Levenberg-Marquardt-Verfahren ein robustes Verfahren eingesetzt.

Folgende Verarbeitungsschritte sind notwendig: (i) Detektion des rückgestreuten Pulses (Abschnitt 5.1), (ii) Entfaltung der empfangenen Signalform durch die gesendete Signalform (Abschnitt 5.8.1), (iii) Wiener-Filterung zur Schätzung der Oberflächenfunktion (Abschnitt 5.8.2) und (iv) Schätzung der Parameter der Oberflächenantwort (Abschnitt 5.8.3). Auf den Einfluss der Impulsantwort der Empfangseinheit wird in diesem Abschnitt nicht eingegangen. Die Impulsantwort der Empfangseinheit wird in Abschnitt 6.3 behandelt.

### 5.8.1 Entfaltung

Die empfangene Signalform  $r(t)$  entspricht einer Faltung von der gesendeten Signalform  $s_m(t)$  mit der Oberflächenantwort  $h(t)$ . Somit ist die empfangene Signalform

$$r(t) = s_m(t) * h(t). \quad (5.15)$$

Durch Übergang von Zeit- in den Frequenzbereich ergibt sich aus Gleichung 5.15 für die Spektralfunktion der Oberflächenantwort

$$\underline{H}(f) = \frac{\underline{R}(f)}{\underline{S}_m(f)}. \quad (5.16)$$

Zur Berechnung von  $\underline{H}(f)$  müssen die Spektralfunktionen  $\underline{R}(f)$  und  $\underline{S}_m(f)$  bekannt sein, was bedeutet, dass  $r(t)$  und  $s_m(t)$  bestimmt werden müssen. Die Messung zur Bestimmung dieser Signalformen ist immer durch das Rauschen  $n(t)$  des Empfängers gestört, welches als additives Rauschen berücksichtigt wird (Abschnitt 3.7) mit

$$s_{m,n}(t) = s_m(t) + n(t) = s(t) \cdot m(t) + n(t) \quad (5.17)$$

und

$$r_n(t) = r(t) + n(t). \quad (5.18)$$

Bei starkem Empfängerrauschen kann es zu großen numerischen Fehlern bei der Berechnung von  $\underline{H}(f)$  kommen. Dieses Inversproblem soll gelöst werden. Hierfür wird ein Filter benötigt, welches das Rauschen reduziert, möglichst ohne die Spektralfunktion der Oberflächenantwort nachteilig zu verändern. Im folgenden Abschnitt wird dazu das Wiener-Filter eingeführt.

### 5.8.2 Wiener-Filterung zur Schätzung der Oberflächenfunktion

Zur Schätzung der Spektralfunktion der Oberflächenantwort, die im Folgenden auch als Oberflächenfunktion bezeichnet wird, soll das Wiener-Filter [Wiener, 1949] angewendet werden. Hierfür setzt man das Wiener-Filter  $\underline{W}(f)$  als Spektralfunktion an, die mit der gestörten Oberflächenfunktion  $\underline{H}(f)$  multipliziert wird und erhält die Spektralfunktion der geschätzten Oberflächenantwort  $\hat{\underline{H}}(f)$

$$\hat{\underline{H}}(f) = \underline{H}(f) \cdot \underline{W}(f) = \frac{\underline{R}_n(f)}{\underline{S}_m(f)} \cdot \underline{W}(f). \quad (5.19)$$

Um  $\hat{\underline{H}}(f)$  berechnen zu können, wird das Wiener-Filter hergeleitet. Dazu wird zwischen der Spektralfunktion der ungestörten Oberflächenantwort  $\underline{H}(f)$  und der Spektralfunktion der geschätzten Oberflächenantwort  $\hat{\underline{H}}(f)$  die mittlere Fehlerquadratsumme minimiert:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |h(t) - \hat{h}(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |\underline{H}(f) - \hat{\underline{H}}(f)|^2 df \stackrel{!}{=} \min. \quad (5.20)$$

Unter Verwendung von Gleichung 5.16, 5.18 und 5.19 mit 5.20 ergibt sich

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{\underline{R}(f)}{\underline{S}_m(f)} - \frac{\underline{R}(f) + \underline{N}(f)}{\underline{S}_m(f)} \cdot \underline{W}(f) \right|^2 df \stackrel{!}{=} \min. \quad (5.21)$$

Das Betragsquadrat wird ausgeschrieben und man erhält

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\underline{S}_m(f)|^{-2} \{ \underline{R}(f) - \underline{R}(f) \cdot \underline{W}(f) - \underline{N}(f) \cdot \underline{W}(f) \} \dots \cdot \{ \underline{R}(f) - \underline{R}(f) \cdot \underline{W}(f) - \underline{N}(f) \cdot \underline{W}(f) \}^* df, \quad (5.22)$$

wobei  $(\{\})^*$  dem konjugiert komplexen Spektrum entspricht.

Es wird vorausgesetzt, dass die Spektralfunktion des empfangenen Signals  $\underline{R}(f)$  und die Spektralfunktion des Rauschens  $\underline{N}(f)$  unkorreliert sind, dann ergibt sich für das Kreuzprodukt über die Frequenz  $f$  der Wert Null. Gleichung 5.22 kann dadurch vereinfacht werden zu

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\underline{S}_m(f)|^{-2} \{ |\underline{R}(f)|^2 + |\underline{R}(f)|^2 \cdot |\underline{W}(f)|^2 + |\underline{N}(f)|^2 \cdot |\underline{W}(f)|^2 \dots - |\underline{R}(f)|^2 \cdot \underline{W}(f)^* - |\underline{R}(f)|^2 \cdot \underline{W}(f) \} df. \quad (5.23)$$

Unter Berücksichtigung von

$$\underline{W}(f) = W_{Re}(f) + jW_{Im}(f) \quad (5.24)$$

und

$$|\underline{W}(f)|^2 = W_{Re}(f)^2 + W_{Im}(f)^2 \quad (5.25)$$

erhält man als imaginärwertige Lösung

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\underline{S}_m(f)|^{-2} \{ |\underline{R}(f)|^2 \cdot W_{Im}(f) - |\underline{R}(f)|^2 \cdot W_{Im}(f) \} df = 0 \quad (5.26)$$

und als reellwertige Lösung

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\underline{S}_m(f)|^{-2} \{ \{ |\underline{R}(f)|^2 + |\underline{N}(f)|^2 \} \cdot \{ W_{Re}(f)^2 + W_{Im}(f)^2 \} \dots - 2|\underline{R}(f)|^2 \cdot W_{Re}(f) + |\underline{R}(f)|^2 \} df. \quad (5.27)$$

Zur Minimierung müssen die Gleichungen 5.26 und 5.27 partiell differenziert [Forster, 1984] und anschließend zu Null gesetzt werden. Der Differentialoperator hierfür ist

$$\frac{\partial}{\partial \underline{W}(f)} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial}{\partial W_{Re}(f)} - j \frac{\partial}{\partial W_{Im}(f)} \right). \quad (5.28)$$

Gleichung 5.26 erfüllt bereits diese Bedingung, d.h. der Imaginärteil ist Null. Aus Gleichung 5.27 berechnet man

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\underline{S}_m(f)|^{-2} \{ W_{Re}(f) \cdot \{ |\underline{R}(f)|^2 + |\underline{N}(f)|^2 \} - |\underline{R}(f)|^2 \} df = 0 \quad (5.29)$$

und für ein reellwertiges Wiener-Filter folgt schließlich als Lösung für das Optimierungsproblem 5.20

$$W_{Re}(f) = \frac{|\underline{R}(f)|^2}{|\underline{R}(f)|^2 + |\underline{N}(f)|^2}. \quad (5.30)$$

$\underline{N}(f)$  kann sehr einfach aus dem Hintergrundrauschen des Signals geschätzt werden und man erhält das geschätzte Rauschen  $\hat{\underline{N}}(f)$ .  $\underline{R}(f)$  entspricht der Spektralfunktion des rückgestreuten Signals, welches von der Spektralfunktion des gesendeten Signals und der Oberflächenantwort abhängt. Da die Oberflächenfunktion nicht bekannt ist, besteht keine Möglichkeit,  $\underline{R}(f)$  direkt zu bestimmen. Ein wichtiger Schritt, um einen Wiener-Filter zu entwerfen, ist die angemessene und passende Wahl von  $\underline{R}(f)$ .

Nimmt man an, dass eine einfache ebene Oberfläche im rechten Winkel zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls beleuchtet wird, dann entspricht die Oberflächenantwort  $h(t)$  der DIRACschen-Funktion  $\delta(t)$  und es gilt

$$h(t) = \delta(t), \quad (5.31)$$

so erhält man

$$\underline{R}(f) = \underline{S}_m(f). \quad (5.32)$$

Das gesendete Signal  $s_m(t)$  ist *a priori* nicht bekannt, es kann jedoch das gestörte Signal  $s_{m,n}(t)$  (Gleichung 5.17) gemessen werden. Man kann beispielsweise direkt an der Sendeoptik den Strahl über einen Lichtwellenleiter auf den Empfänger einkoppeln, um das gesendete Signal zu messen. Dann ist das gemessene Nutzsignal sehr groß im Vergleich zu dem gemessenen Rauschen. Zusätzlich wird der Rauschanteil des gemessenen Signals  $s_{m,n}(t)$  reduziert, indem mit einem Binominal-Filter im Zeitbereich tiefpassgefiltert wird. Als Ergebnis erhält man das geschätzte gesendete Signal  $\hat{s}_m(t)$  und im Frequenzbereich  $\hat{\underline{S}}_m(f)$ . Mit dieser einfachen Schätzung lässt sich das Wiener-Filter bestimmen mit

$$W_{Re}(f) = \frac{|\hat{\underline{S}}_m(f)|^2}{|\hat{\underline{S}}_m(f)|^2 + |\hat{\underline{N}}(f)|^2}. \quad (5.33)$$

Anstelle des im Divisor der Gleichung 5.19 verbleibende unbekanntes Spektrums  $\underline{S}_m(f)$  könnte in erster Näherung das durch die Messung gestörte Spektrum  $\underline{S}_{m,n}(f)$  verwendet werden. Dies kann jedoch wegen des Rauschanteils zu Problemen führen. Um dieses Problem zu vermeiden, wird auch hierfür das geschätzte Spektrum  $\hat{\underline{S}}_m(f)$  eingesetzt und man erhält

$$\hat{\underline{H}}(f) = \frac{\underline{R}_n(f)}{\hat{\underline{S}}_m(f)} \cdot W_{Re}(f) = \underline{R}_n(f) \cdot \frac{\{\hat{\underline{S}}_m(f)\}^*}{|\hat{\underline{S}}_m(f)|^2 + |\hat{\underline{N}}(f)|^2}. \quad (5.34)$$

Zur Berechnung der geschätzten Oberflächenantwort  $\hat{h}(t)$  muss abschließend nur noch  $\hat{\underline{H}}(f)$  in den Zeitbereich zurück transformiert werden.

### 5.8.3 Parameterschätzung der Oberflächenantwort

Durch die Berechnung der *zeitlichen Position*, *zeitlichen Pulslänge* und *Amplitude* der Signalform können Merkmale in Form von *Entfernung*, *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke* aus der Oberflächenantwort gewonnen werden. Diese Merkmale lassen sich berechnen, indem eine Ausgleichskurve in Gaußform mit der Hilfsfunktion  $\tilde{h}(t)$  an die geschätzte Oberflächenantwort  $\hat{h}(t)$  angepasst wird

$$\hat{h}(t) \rightarrow \tilde{h}(t) = \sum_{i=1}^n \tilde{h}_{A_i}(t) = a_{A_i} \cdot \exp\left\{-4 \cdot \ln(2) \cdot \frac{(t - t_{A_i})^2}{w_{A_i}^2}\right\}. \quad (5.35)$$

Zur Schätzung der drei Pulsparameter (i) *zeitliche Position*  $t_{A_i}$ , (ii) *zeitliche Pulslänge*  $w_{A_i}$  und (iii) *Amplitude*  $a_{A_i}$ , die den Verlauf der Gaußkurve beschreiben, wird das iterative Levenberg-Marquardt-Verfahren [Levenberg, 1944; Marquardt, 1963] angewandt. Der Index  $i$  steht für die detektierte Antwort und  $n$  für die Gesamtanzahl der Antworten. Die generalisierte Iterationsregel zur Schätzung der Parameter  $\tilde{q}_{A_i} = [t_{A_i}, w_{A_i}, a_{A_i}]$  wird beschrieben mit

$$\{\tilde{q}_{A_i,k} - \tilde{q}_{A_i,k+1}\} = \{J^T \Sigma^{-1} J\}^{-1} J^T \Sigma^{-1} \{\hat{h}(t) - \tilde{h}_{A_i,k}(t)\}, \quad (5.36)$$

wobei  $\tilde{q}_{A_i,k}$  die Pulsparameter  $t_{A_i,k}$ ,  $w_{A_i,k}$  und  $a_{A_i,k}$  die Pulsparameter des aktuellen Iterationsschrittes  $k$  sind;  $J$  ist die Jacobi-Matrix der geschätzten Hilfsfunktion und  $\Sigma$  ist die Kovarianzmatrix der geschätzten Parameter.

Zur Berechnung startet man die Iteration mit den drei Anfangswerten  $t_{A_i,1}$  für die *zeitliche Position* des Maximalwertes der Oberflächenantwort,  $w_{A_i,1}$  für die *Länge* der Oberflächenantwort und  $a_{A_i,1}$  für den maximalen Wert der *Amplitude* der Oberflächenantwort. Die Iteration wird so oft wiederholt, bis die Änderung der geschätzten Parameter einen festgesetzten Schwellwert unterschreitet. Aus der geschätzten *Position*  $t_{A_i}$  wird die *Entfernung*  $r_{A_i}$  zum Objekt berechnet mit

$$r_{A_i} = \frac{t_{A_i} \cdot c}{2}, \quad (5.37)$$

wobei  $c$  der Lichtgeschwindigkeit entspricht. Aus der geschätzten *Länge*  $w_{A_i}$  wird die *Entfernungsvariation*  $d_{A_i}$  der Oberfläche berechnet mit

$$d_{A_i} = \frac{w_{A_i} \cdot c}{2}. \quad (5.38)$$

Die Verarbeitungsschritte zur Merkmalsextraktion durch die Wiener-Filter-Methode sind schematisch in Abbildung 5.15 dargestellt.

Ein Gütemaß zur Beschreibung der Qualität der geschätzten Parameter  $t_{A_i}$ ,  $w_{A_i}$  und  $a_{A_i}$  sind deren Varianzen  $\sigma_{t_{A_i}}^2$ ,  $\sigma_{w_{A_i}}^2$  und  $\sigma_{a_{A_i}}^2$ . Diese Varianzen können durch die Hauptdiagonale der Kovarianzmatrix direkt ermittelt werden. Sind alle ermittelten Varianzen kleiner als die empirisch ermittelten Schwellwerte, gilt eine Oberflächenantwort als detektiert. Dann wird die Hilfsfunktion  $\tilde{h}_{A_i}(t)$  von der geschätzten Oberflächenantwort  $\hat{h}(t)$  subtrahiert und die daraus berechnete Signalform erneut auf gleiche Weise prozessiert. Diese sequentielle Art der Prozessierung wird so oft wiederholt, bis alle Oberflächenantworten mit hoher Qualität, also mit kleinem Wert für die Varianzen  $\sigma_{t_{A_i}}^2$ ,  $\sigma_{w_{A_i}}^2$  und  $\sigma_{a_{A_i}}^2$ , detektiert wurden.

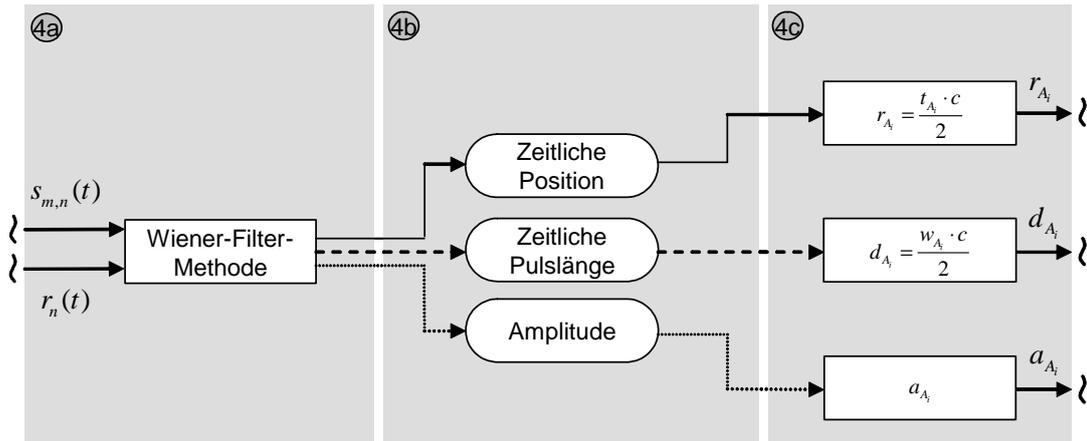


Abbildung 5.15: Schematische Darstellung der Verarbeitungsschritte der Wiener-Filter-Methode zur Merkmalsextraktion.

Im Folgenden wird angenommen, dass zwei Antworten mit der gleichen *Länge*  $w_A = w_{A_1} = w_{A_2}$  und der gleichen *Amplitude* in unterschiedlicher Entfernung vorliegen. Die Abbildungen 5.16(a-c) zeigen hierzu eine Simulation von zwei überlappenden einzelnen Antworten (gestrichelte Linie) für unterschiedliche Abstände und die daraus resultierende Oberflächenantwort (durchgehende Linie). In Abbildung 5.16(a) ist der zeitliche Abstand  $\Delta T$  zwischen den einzelnen Antworten  $2w_A$ . Die einzelnen Antworten befinden sich hintereinander und überlappen sich geringfügig. Die daraus resultierende Oberflächenantwort besteht aus der Summe der beiden einzelnen Antworten und zeigt zwei ausgeprägte voneinander getrennte Signalverläufe. In Abbildung 5.16(b) ist der zeitliche Abstand  $\Delta T$  der einzelnen Antworten  $w_A$ . Die einzelnen Antworten sind nah hintereinander und überlappen sich deutlich. Die daraus resultierende Oberflächenantwort besitzt zwei ausgeprägte lokale Maxima. Die lokalen Maxima der Oberflächenantwort besitzen jedoch einen kürzeren Abstand zueinander als die Maxima der einzelnen Antworten. In Abbildung 5.16(c) ist der zeitliche Abstand  $\Delta T$  der einzelnen Antworten  $0.85w_A$ . Die einzelnen Antworten liegen in diesem Fall sehr nah hintereinander und überlappen sich mehr als beim vorherigen Beispiel. Die daraus resultierende Oberflächenantwort besitzt nur ein einziges Maximum. Unterhalb des numerisch berechneten Grenzwertes  $0.85w_A$  liegt immer nur ein einziges Maximum vor.

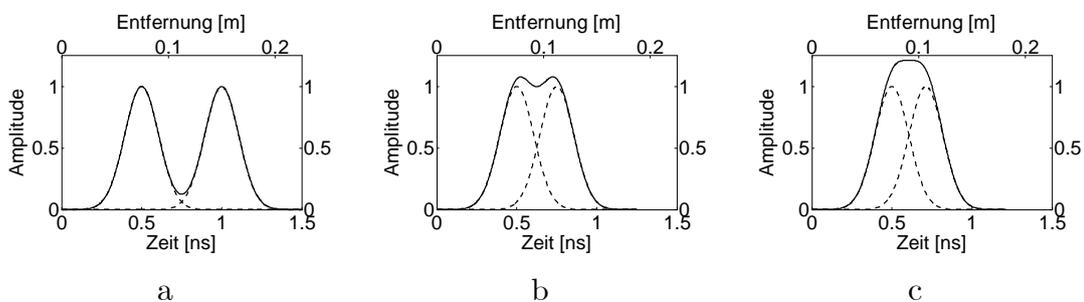


Abbildung 5.16: Überlappung einzelner Antworten (gestrichelte Linie) und die daraus resultierende Oberflächenantwort (durchgehende Linie) für unterschiedliche zeitliche Abstände. a)  $\Delta T = 2 w_A$ , b)  $\Delta T = w_A$ , c)  $\Delta T = 0.85 w_A$ .

Ist der Fall gegeben, dass zwei Antworten detektiert wurden, werden dann zur

Schätzung der Hilfsfunktion zwei Ausgleichskurven in Gaußform mit insgesamt 6 Parametern ( $t_{A_1}, w_{A_1}, a_{A_1}, t_{A_2}, w_{A_2}, a_{A_2}$ ) verwendet und die geschätzten Parameter werden erneut berechnet, um die gegenseitige Beeinflussung durch die vorangegangene sequentielle Berechnung zu kompensieren; für drei Antworten werden 9 Parameter ( $t_{A_1}, w_{A_1}, a_{A_1}, t_{A_2}, w_{A_2}, a_{A_2}, t_{A_3}, w_{A_3}, a_{A_3}$ ) bestimmt; und so weiter.

## 5.9 Gegenüberstellung von Methoden und Merkmalen

Abschließend erfolgt eine Gegenüberstellung der vorgestellten Methoden mit den Merkmalen *Entfernung*, *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke*. Nicht alle Methoden ermöglichen die Extraktion aller drei genannten Merkmale. Dies wird in Tabelle 5.1 veranschaulicht.

| Methode                            | Merkmale          |                             |                         |
|------------------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------|
|                                    | <i>Entfernung</i> | <i>Entfernungsvariation</i> | <i>Reflexionsstärke</i> |
| <i>Peak-Detection</i>              | •                 | •                           | •                       |
| <i>Leading-Edge-Detection</i>      | •                 |                             |                         |
| <i>Centre-of-Gravity-Detection</i> | •                 | •                           | •                       |
| <i>Constant-Fraction-Detection</i> | •                 |                             |                         |
| <i>Gaussian-Decomposition</i>      | •                 | •                           | •                       |
| Korrelation                        | •                 | •                           | •                       |
| Wiener-Filter                      | •                 | •                           | •                       |

Tabelle 5.1: Gegenüberstellung von Methoden und Merkmalen.

Die *Entfernung* kann mit allen Methoden bestimmt und die erzielten Resultate können miteinander verglichen werden. Die Merkmale *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke* können nicht mit allen Methoden berechnet werden. Bei den Methoden die eine Berechnung ermöglichen, kann es sein, dass die Resultate nicht miteinander vergleichbar sind. Abgesehen von der Korrelations-Methode, wie bereits in Abschnitt 5.7.2 beschrieben, ist die Genauigkeit der Werte für die *Entfernungsvariation* mit den anderen Methoden vergleichbar. Bei der Genauigkeit der Werte für die *Reflexionsstärke* ist ein direkter Vergleich zueinander nicht möglich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die *Reflexionsstärken* unterschiedlich berechnet werden und deswegen nicht zueinander in Bezug gesetzt werden können. In Abschnitt 7.6 werden die hierzu durchgeführten Experimente gezeigt.

## 6 Erfassung der Szene

In diesem Kapitel werden die derzeit operationelle *Full-Waveform*-Lasersysteme (Abschnitt 6.1) vorgestellt, um einen direkten Vergleich mit dem aufgebauten Experimentalsystem (Abschnitt 6.2) zu ermöglichen. Die Empfangseinheit ist hierbei eine wichtige Komponente für die Erfassung der Signalform, da diese die Qualität der Messung entscheidend beeinflusst. Die Empfangseinheit lässt sich anhand ihrer Impulsantwort charakterisieren (Abschnitt 6.3). Zudem wird die mit dem Experimentalsystem gewählte Art der Speicherung der Szene im Datenquader (Abschnitt 6.4) beschrieben. Es wird der komplette Signalverlauf gespeichert. Operationelle *Full-Waveform*-Lasersysteme berücksichtigen zur Reduzierung des Speichervolumens nur den gefensterten Bereich, in dem eine ausgeprägte Signalform detektiert wurde.

### 6.1 Operationelle *Full-Waveform*-Lasersysteme

Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick über die derzeit operationellen Lasersysteme gegeben, die es ermöglichen, die Signalform aufzuzeichnen. Hierbei erfolgt eine Unterscheidung nach *Large-Footprint*- und *Small-Footprint*-Lasersystemen. Als *Large-Footprint*-Lasersystem ist das raumgestützte *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS) und der *Laser Vegetation Imaging Sensor* (LVIS) bekannt. Deren Spezifikationen sind in Tabelle 6.1 aufgeführt. Die Detektorgrenzfrequenzen sind nach Literaturangaben maximal 1 GHz.

Die derzeitig kommerziell verfügbaren *Small-Footprint*-Lasersysteme sind das Optech ALTM 3100, TopEye Mark II und TopoSys Harrier 56. Das zuletzt genannte System basiert auf dem Riegl LMS-Q560. Die Spezifikationen sind in Tabelle 6.2 aufgeführt. Von diesen Lasersystemen sind keine Detektorgrenzfrequenzen bekannt.

Diese Systeme operieren mit einem gesendeten Puls, der die zeitliche Länge von 4 – 10 ns aufweist, und die Digitalisierung der aufgezeichneten Signalform erfolgt mit 0.5 – 1GSamples/s. Ein direkter Vergleich zwischen Signalformen gemessen von derselben Geländeoberfläche durch *Large-Footprint*- und *Small-Footprint*-Lasersysteme ist in Neuenschwander *et al.* [2006] gegeben.

| <b><i>Large-Footprint</i>-Lasersysteme</b> | <b>LVIS</b>   | <b>GLAS</b>    |
|--|---------------|----------------|
| Wellenlänge                                | 1064 nm       | 1064 nm        |
| Pulslänge bei <i>FWHM</i>                  | 10 ns         | 6 ns           |
| Pulswiederholrate                          | 100 – 500 Hz  | 40 Hz          |
| Ausgangsenergie                            | 5 mJ          | 75 mJ          |
| Strahldivergenz                            | ~ 5 mrad      | 0.11 mrad      |
| Operationshöhe                             | 10 km         | 600 km         |
| Durchmesser des <i>Footprints</i>          | 40 m@5 km     | 70 m           |
| Abtastwinkel                               | ±7°           | 0°             |
| Detektorgrenzfrequenz                      | 90 MHz        | 160 & 1000 MHz |
| Abtastrate                                 | 0.5GSamples/s | 1GSamples/s    |

Tabelle 6.1: Spezifikationen von operationellen *Large-Footprint*-Lasersystemen zur Aufzeichnung der Signalform: LVIS [Blair *et al.*, 1999] und GLAS [Zwally *et al.*, 2002].

| <i>Small-Footprint-Lasersysteme</i> | <b>Riegl<br/>LMS-Q560</b> | <b>Optech<br/>ALTM 3100</b> | <b>TopEye<br/>Mark II</b> |
|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Wellenlänge                         | 1550 nm                   | 1064 nm                     | 1064 nm                   |
| Pulslänge bei <i>FWHM</i>           | 4 ns                      | –                           | 5 ns                      |
| Pulswiederholrate                   | 200 kHz                   | 50 kHz                      | 50 kHz                    |
| Ausgangsenergie                     | –                         | –                           | –                         |
| Strahldivergenz                     | $\leq 0.5$ mrad           | 0.3 oder 0.8 mrad           | 1 mrad                    |
| Operationshöhe                      | < 1500 m                  | < 2500 m                    | < 1000 m                  |
| Durchmesser des <i>Footprints</i>   | 0.5 m@1 km                | 0.3 oder 0.8 m@1 km         | 1 m@1 km                  |
| Abtastwinkel                        | $\pm 22.5^\circ$          | $\pm 25^\circ$              | $\pm 20^\circ$            |
| Detektorgrenzfrequenz               | –                         | –                           | –                         |
| Abtastrate                          | 1GSamples/s               | 1GSamples/s                 | 1GSamples/s               |

Tabelle 6.2: Spezifikationen von operationellen *Small-Footprint*-Lasersystemen zur Aufzeichnung der Signalform: Riegl LMS-Q560 (<http://www.riegl.com>), Optech ALTM 3100 mit *Intelligent Waveform Digitiser* (<http://www.optech.on.ca>) und TopEye Mark II (<http://www.topeye.com>).

## 6.2 Aufbau des Experimentalsystems

Zur Entwicklung von Auswertelgorithmen und zur Untersuchung von Grenzleistungen bei der Objektdetektion mit gepulsten Lasern wurden verschiedene Experimentalsysteme [Jutzi *et al.*, 2002; Jutzi & Stilla, 2003b; Jutzi & Stilla, 2005b] aufgebaut. Zunächst wurde ein monostatisches Lasersystem (Abschnitt 2.4.5(a)) mit dem Messprinzip *Einzel-Photon-Detektion* (Abschnitt 2.4.4(a)) und dann ein bistatisches Lasersystem (Abschnitt 2.4.5(b)) mit dem Messprinzip *Mehrfach-Photonen-Detektion* (Abschnitt 2.4.4(b)) verwendet. Zur 2D-Abtastung wurde beim ersten System ein in zwei Achsen beweglicher Umlenkspiegel und beim zweiten System ein um die vertikale Achse beweglicher Umlenkspiegel kombiniert mit einer horizontal beweglichen Schwenkeinheit verwendet. Bei allen Lasersystemen wurden jeweils die Empfangseinheiten so modifiziert, dass eine zeitliche Aufzeichnung der empfangenen Signalform möglich ist.

Vom zuletzt genannten bistatischen Lasersystem soll der Systemaufbau exemplarisch dargestellt werden (Abbildung 6.1). Es setzt sich im Wesentlichen aus drei Komponenten zusammen, nämlich der Sende- (Abschnitt 6.2.1), der Abtast- (Abschnitt 6.2.2) und der Empfangseinheit (Abschnitt 6.2.3). Weiterführende spezielle Details des Systemaufbaus, insbesondere die Modifikation der Empfangseinheit, sind in der Arbeit von Luttermann [2006] aufgeführt.

### 6.2.1 Sendeeinheit

Die Sendeeinheit besteht aus einem Multi-Mode-Laser (Erbium-Faser-Laser), der mit einer Wellenlänge von  $1.55 \mu\text{m}$  und einer Pulsspitzenleistung von 10 kW Laserpulse emittiert. Die Strahldivergenz des Laserstrahls beträgt ca. 1 mrad. Mit einer Pulswiederholrate von 42 kHz werden Laserpulse über eine Glasfaser an der Sendeoptik emittiert. Die Laserpulse besitzen bei halber Amplitudenhöhe eine Länge von 5 ns (*FWHM*) und zeigen starke Variationen im Signalverlauf von Puls zu Puls und innerhalb des Signals. In den Abbildungen 3.1(a-c) sind drei Beispiele für die gesendete Signalform dieses Lasersystems dargestellt.

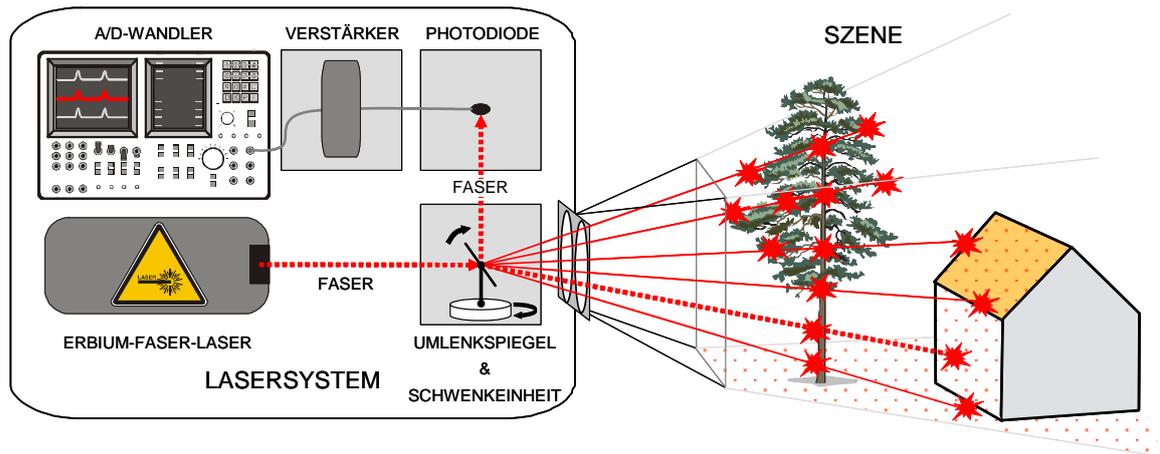


Abbildung 6.1: Aufbau des Experimentalsystems mit Sendeeinheit (Erbium-Faser-Laser), Abtasteinheit (Umlenkspiegel, Schwenkeinheit) und Empfangseinheit (Photodiode, Verstärker, A/D-Wandler).

### 6.2.2 Abtasteinheit

Die 2D-Abtasteinheit besteht aus einem vertikal beweglichen Umlenkspiegel, der im Lasersystem integriert ist und einer horizontal beweglichen Schwenkeinheit (Newport RV240), auf der das Lasersystem montiert wurde. Die Abtastung in vertikaler Richtung durch den Umlenkspiegel erfolgte in 320 Rasterschritten mit  $0.1^\circ$  pro Rasterschritt. Die Abtastung in horizontaler Richtung durch die Schwenkeinheit erfolgte ebenfalls mit  $0.1^\circ$  pro Rasterschritt.

### 6.2.3 Empfangseinheit

Die Empfangseinheit zur Aufzeichnung der Signalform besteht im Wesentlichen aus (i) Photodiode, (ii) Verstärker und (iii) A/D-Wandler.

**Photodiode:** Die rückgestreute Laserstrahlung wird mit der Empfangsoptik über eine Glasfaser auf eine Photodiode eingekoppelt, um die empfangene Signalform der rückgestreuten Laserpulse zu erfassen. Zudem wird ein geringer Teil der emittierten Laserstrahlung direkt über eine Glasfaser an der Sendeoptik auf eine zweite Photodiode eingekoppelt, um auch die gesendete Signalform der emittierten Laserpulse zu erfassen. Es wurden sowohl *PIN* (engl. *Positive Intrinsic Negative Diode*), als auch die empfindlicheren *APD* (engl. *Avalanche Photodiode*) eingesetzt. Die InGaAs (Indium-Gallium-Arsenid) Photodiode, deren Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich des verwendeten Lasers liegt, und ein Vorverstärker sind in einem Modul integriert. Das gesamte Modul wird im Folgenden als Empfänger bezeichnet. In Tabelle 6.3 sind Empfänger mit unterschiedlicher Grenzfrequenz aufgeführt, die bei den Experimenten zum Einsatz gekommen sind.

Je höher die Grenzfrequenz des Empfängers, desto kleiner ist die Detektorfläche der Photodiode. Die Detektorflächen der verwendeten Empfänger haben einen Durchmesser von 25 bis  $100\ \mu\text{m}$ . Der Durchmesser des Kerns (engl. *Core*) der verwendeten Glasfaser beträgt hingegen  $300\ \mu\text{m}$ . Um die Laserstrahlung, die aus der Glasfaser austritt,

möglichst verlustfrei auf die Photodiode abzubilden, werden spitz zulaufende Glasfasern (engl. *Tapered Fiber*), optische Bank oder direkte Einkopplung verwendet.

| Empfänger                | TTI-TIA<br>950 <sup>a</sup>     | TTI-TIA<br>950 <sup>b</sup> | New Focus<br>1611  |
|--------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Grenzfrequenz ( $-3dB$ ) | 250 MHz                         | 750 MHz                     | 1000 MHz           |
| Detektor                 | InGaAs/ <i>PIN</i> <sup>d</sup> | InGaAs/ <i>PIN</i>          | InGaAs/ <i>PIN</i> |
| Wellenlänge              | 900 – 1700 nm                   | 900 – 1700 nm               | 900 – 1700 nm      |
| Minimum <i>NEP</i>       | 3p W/ $\sqrt{Hz}$               | 3p W/ $\sqrt{Hz}$           | 20p W/ $\sqrt{Hz}$ |
| Detektordurchmesser      | 100 $\mu\text{m}$               | 100 $\mu\text{m}$           | 100 $\mu\text{m}$  |

| Empfänger                | TTI-TIA<br>4000 <sup>c</sup>    | New Focus<br>1544 <sup>c</sup> |
|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Grenzfrequenz ( $-3dB$ ) | 7000@6000 MHz                   | 12000@6000 MHz                 |
| Detektor                 | InGaAs/ <i>APD</i> <sup>e</sup> | InGaAs/ <i>PIN</i>             |
| Wellenlänge              | 950 – 1650 nm                   | 950 – 1650 nm                  |
| Minimum <i>NEP</i>       | 16p W/ $\sqrt{Hz}$              | 33p W/ $\sqrt{Hz}$             |
| Detektordurchmesser      | 30 $\mu\text{m}$                | 25 $\mu\text{m}$               |

Tabelle 6.3: Spezifikationen von Empfängern mit unterschiedlichen Grenzfrequenzen.

<sup>a</sup> Verstärkungsfaktor 10.0

<sup>b</sup> Verstärkungsfaktor 1.0

<sup>c</sup> 6 GHz ist durch die Grenzfrequenz des Digital-Speicheroszilloskops vorgegeben

<sup>d</sup> *Positive Intrinsic Negative Diode*

<sup>e</sup> *Avalanche Photodiode*

**Verstärker:** Bei schwachen Signalen am Empfängerausgang wird das Signal mit bis zu zwei kaskadierten Verstärkern (PICOAMPS pA2-0380-26) zusätzlich verstärkt. Der Verstärker PICOAMPS pA2-0380-26 hat eine Verstärkung von 18dB bei einer Grenzfrequenz von 8 GHz.

**A/D-Wandler:** Das analoge Signal der gesendeten und empfangenen Signalform am Empfängerausgang wurde durch einen A/D-Wandler mit 20GSamples/s abgetastet. Die A/D-Wandlung und Speicherung der Signalform erfolgte durch ein Digital-Speicheroszilloskop (LE CROY - WAVEMASTER 8600A). In dem Digital-Speicheroszilloskop (*DSO*) ist ein leistungsfähiger PC integriert, auf dessen Festplatte die Daten gespeichert wurden. Das Digital-Speicheroszilloskop mit einer Grenzfrequenz von 6 GHz gibt zugleich die oberste Grenzfrequenz des Messsystems vor. Dies hat zur Folge, dass bei Empfängern mit höherer Grenzfrequenz (Tabelle 6.3<sup>c</sup>) die Datenerfassung indirekt durch das Digital-Speicheroszilloskop auf 6 GHz begrenzt wird.

### 6.3 Charakterisierung der Empfangseinheit

Werden Daten von einem realen System verwendet, muss die Impulsantwort der Empfangseinheit für die Parameterschätzung berücksichtigt werden, da die systembedingten Eigenschaften der Empfangseinheit des Lasersystems die Messung der Signale beeinflusst. Die Beeinflussung der Signalform durch die Empfangseinheit lässt sich durch die

Impulsantwort des verwendeten Lasersystems charakterisieren (Abschnitt 6.3.1). Untersuchungen zur Impulsantwort des Lasersystems wurden mit Empfängern mit unterschiedlichen Grenzfrequenzen durchgeführt [Jutzi & Stilla, 2006a; Luttermann, 2006]. Hierfür wurde sowohl die Empfangseinheit für die Erfassung der gesendeten Signalform als auch für die empfangene Signalform berücksichtigt. Die Erfassung der Signalform wird durch die Grenzfrequenz der verwendeten Photodiode und der Verstärker beeinflusst. Mit der Grenzfrequenz kann die zu erwartende Länge der Impulsantwort geschätzt werden (Abschnitt 6.3.2).

### 6.3.1 Bestimmung der Impulsantwort der Empfangseinheit

Die gemessene empfangene Signalform des rückgestreuten Laserpulses  $r_n(t)$  ist abhängig von der gesendeten Signalform  $s_m(t)$  des emittierten Laserpulses, der Oberflächenantwort  $h(t)$  und der Impulsantwort  $h_r(t)$  der Empfangseinheit für die empfangene Signalform. Aus Abschnitt 5.8.1 ist zu entnehmen, dass durch Faltung der gesendeten Signalform mit der Oberflächenantwort die empfangene Signalform  $r(t)$  bestimmt werden kann (Gleichung 5.15). Für die gemessene empfangene Signalform  $r_n(t)$  muss die empfangene Signalform  $r(t)$  zusätzlich mit der Impulsantwort  $h_r(t)$  gefaltet werden

$$r_n(t) = r(t) * h_r(t) = s_m(t) * h(t) * h_r(t), \quad (6.1)$$

wobei  $(*)$  dem Faltungsoperatoren entspricht. Für die gemessene gesendete Signalform  $s_{m,n}(t)$  erhält man

$$s_{m,n}(t) = s_m(t) * h_s(t), \quad (6.2)$$

wobei  $h_s(t)$  die Impulsantwort der Empfangseinheit der gesendeten Signalform entspricht. Die Impulsantworten  $h_r(t)$  und  $h_s(t)$  werden durch die verwendeten Photodioden und Verstärker beeinflusst. Unter der Annahme, dass eine einfache ebene Oberfläche im rechten Winkel zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls beleuchtet wird, entspricht die Oberflächenantwort  $h(t)$  der DIRACschen-Funktion  $\delta(t)$  (Gleichung 5.31) und man erhält

$$r_n(t) = s_m(t) * h_r(t). \quad (6.3)$$

Die gemessenen Signalformen  $s_{m,n}(t)$  und  $r_n(t)$  entsprechen hierbei näherungsweise dem tatsächlichen Verlauf der Signalformen der Laserpulse. In Abhängigkeit von der Grenzfrequenz der verwendeten Photodioden und Verstärker können die gemessenen Signalformen des verwendeten Lasersystems mehr oder weniger detaillierte Information über den tatsächlichen Signalverlauf beinhalten. Im Folgenden wird die Impulsantwort  $h_n(t)$  der Empfangseinheit bestimmt.

Die Schätzung der Impulsantwort  $h_n(t)$  der Empfangseinheit kann durch eine Entfaltung erfolgen. Die Entfaltung wird durch die Transformation von Gleichung 6.2 und 6.3 im Frequenzbereich durchgeführt

$$\underline{S}_m(f) = \frac{\underline{S}_{m,n}(f)}{\underline{H}_s(f)} = \frac{\underline{R}_n(f)}{\underline{H}_r(f)}. \quad (6.4)$$

Die Terme  $\underline{S}_m(f)$ ,  $\underline{S}_{m,n}(f)$ ,  $\underline{R}_n(f)$ ,  $\underline{H}_s(f)$  und  $\underline{H}_r(f)$  entsprechen den Fouriertransformierten der korrespondierenden Terme  $s_m(t)$ ,  $s_{m,n}(t)$ ,  $r_n(t)$ ,  $h_s(t)$  und  $h_r(t)$ .

Hieraus ergibt sich

$$\underline{R}_n(f) = \underline{S}_{m,n}(f) \cdot \frac{\underline{H}_r(f)}{\underline{H}_s(f)} = \underline{S}_{m,n}(f) \cdot \underline{H}_n(f), \quad (6.5)$$

wobei  $\underline{H}_n(f)$  der Übertragungsfunktion des Lasersystems entspricht.

Zur Schätzung der Übertragungsfunktion  $\underline{H}_n(f)$  wird eine Division im Frequenzbereich von  $\underline{R}_n(f)/\underline{S}_{m,n}(f)$  durchgeführt. Durch inverse Fouriertransformation von  $\underline{H}_n(f)$  ergibt sich die Impulsantwort  $h_n(t)$  der Empfangseinheit.

Die Messung der gesendeten und der empfangenen Signalform ist typischerweise beeinflusst durch das Eigenrauschen der verwendeten Messkomponenten (beispielsweise Photodiode und Verstärker). Deswegen führt die direkte Division zu einer gestörten Übertragungsfunktion und somit auch zu einer gestörten Impulsantwort. Die Störung durch das Rauschen kann so stark sein, dass keine weiterführende Verarbeitung mehr möglich ist. Um dies zu vermeiden, wird eine repräsentative Stichprobe von  $N$  einzelnen Impulsantworten gemittelt und man erhält die gemittelte Impulsantwort

$$\bar{h}_n(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N h_{n_k}(t), \quad (6.6)$$

die die Empfangseinheit des Lasersystems beschreibt.

### 6.3.2 Länge der Impulsantwort der Empfangseinheit

Ein Gütemaß zur Beschreibung der Qualität der verwendeten Empfangseinheit ist die Grenzfrequenz und die daraus resultierende Länge der Impulsantwort. Je nach Qualität der verwendeten Empfangseinheit zeigt die gemessene Signalform mehr oder weniger feine Details im Verlauf. Ist die Grenzfrequenz kleiner als der spektrale Anteil der zu messenden Signalform, wird die Signalform durch die verwendete Empfangseinheit tiefpassgefiltert. Dadurch gehen feine Details im Verlauf der Signalform verloren. Zudem nimmt mit zunehmender Grenzfrequenz die Empfindlichkeit der Empfangseinheit ab und das  $SNR$  verschlechtert sich [Kamermann, 1993]. Aus diesem Grund muss die Empfangseinheit möglichst optimal an das verwendete Lasersystem angepasst werden.

Um den direkten Zusammenhang zwischen der Grenzfrequenz der Empfangseinheit  $f_g$  und der Länge der Impulsantwort  $w_g$  zu ermitteln, wird ein gaußförmiger Frequenzgang angenommen. In Abbildung 6.2(a) ist der Frequenzgang eines gaußförmigen Spektrums und in Abbildung 6.2(b) der im Zeitbereich korrespondierende gaußförmige Funktionsverlauf dargestellt.

Typischerweise wird die Grenzfrequenz  $f_g$  bei einer Dämpfung des Frequenzgangs von  $-3dB$  ermittelt (Abbildung 6.2(a)). Zudem wird für die Länge  $w_g$  der Impulsantwort bei halber Amplitudenhöhe ( $FWHM$ ) angenommen. In Anlehnung an Brigham [1988] ergibt sich für das Spektrum  $\underline{G}(f)$  im Frequenzbereich

$$\underline{G}(f) = \exp\left\{-\ln \sqrt{2} \cdot \left(\frac{f}{f_g}\right)^2\right\} \text{ mit } \underline{G}(f_g) = -3dB = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (6.7)$$

und für den korrespondierenden Funktionsverlauf  $g(t)$  (Abbildung 6.2(b)) im Zeitbereich

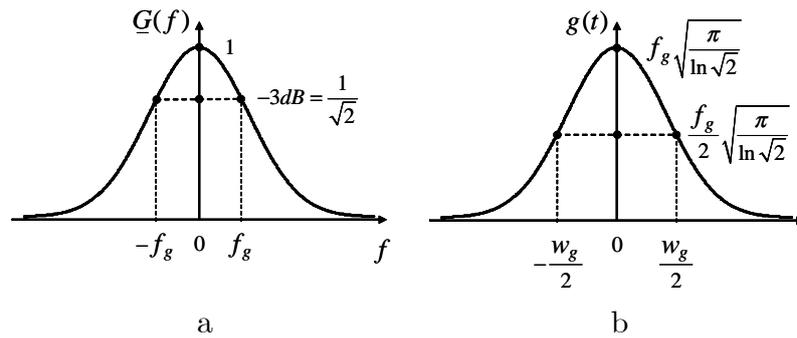


Abbildung 6.2: Gaußförmiger Funktionenverlauf. a) Frequenzbereich, b) Zeitbereich.

$$g(t) = \frac{2}{w_g} \cdot \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \cdot \exp\left\{-4 \ln 2 \cdot \left(\frac{t}{w_g}\right)^2\right\} \text{ mit } g\left(\frac{w_g}{2}\right) = \frac{f_g}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\ln \sqrt{2}}}. \quad (6.8)$$

Für die Länge  $w_g$  der Impulsantwort in Abhängigkeit von der Grenzfrequenz  $f_g$  gilt dann

$$w_g = \frac{2}{\pi} \sqrt{\ln \sqrt{2} \cdot \ln 2} \cdot \frac{1}{f_g} = \frac{0.312}{f_g}. \quad (6.9)$$

## 6.4 Speicherung der Szene im Datenquader

Wie aus der Beschreibung des vorhergehenden Abschnitts 6.2 und aus Abbildung 6.1 ersichtlich, wurde das scannende Lasersystem stationär betrieben. Dem Experimentalsystem kommt dabei lediglich die Aufgabe zu, Daten für die Entwicklung von Algorithmen zur Analyse der zeitlichen Signalform zu liefern.

In den ersten Untersuchungen wurden Aufzeichnungen der Signalform und Abtastung von urbanen Materialien auf einer Testplatte (Abbildung 6.3(a)) im Labor durchgeführt. Dazu wurde in ersten Untersuchungen ein Lasersystem mit einem Abtastraster von  $128 \times 128$  Punkten verwendet.

Die Gesamtheit aller Aufzeichnungen eines Abtastrasters kann als diskretisierter Datenquader  $(x, y, t)$  visualisiert werden. Dabei geben die Koordinaten  $(x, y)$  jeweils die Position des Strahls im Winkelraum und die Koordinate  $t$  den Zeitwert an. Zu jeder Ausrichtung des Laserstrahls im Abtastraster wurde das empfangene Signal über der Zeit  $t$  für ein Zeitintervall  $t_{min}$  bis  $t_{max}$  aufgezeichnet. Das gewählte Zeitintervall hängt von der zu erfassenden Tiefe des Raums und der erwarteten Entfernung interessierender Objekte ab. Zu jedem diskretisierten Zeit- beziehungsweise Entfernungswert wurde ein Intensitätswert gespeichert. In den Bereichen vor und hinter den Objekten, wo es keine Reflexion gibt, ist die aufgenommene Intensität näherungsweise Null.

Ein Beispiel für einen aufgenommenen Datenquader ist in Abbildung 6.3(b) dargestellt. Die aufgenommene Szene besteht aus einer Testplatte mit verschiedenen Objekten in unterschiedlicher Entfernung und Ausrichtung (Abbildung 6.3(a)). Die Objekte sind Wellblech (links oben), Kieselsteine (im Hintergrund), schiefe Schieferplatte (rechts oben) und ein flacher Dachziegel (rechts unten). Der Ausschnitt des dazu gemessenen Datenquaders zeigt an verschiedenen Positionen die gemittelte rückgestreute Intensität in einem Zeitraster. Man sieht das Wellblech auf der linken Seite und den Dachziegel

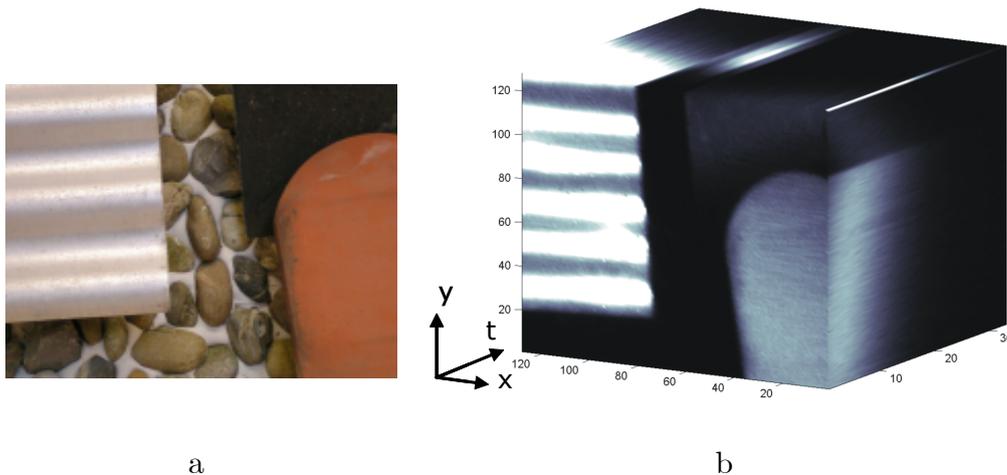


Abbildung 6.3: Urbane Materialien auf einer Testplatte. a) Foto der Testplatte (links), b) Ausschnitt des aufgenommenen Datenquaders (rechts). Die gemittelte rückgestreute Intensität in einem Zeitraster ist durch die Helligkeit dargestellt.

auf der rechten Seite in der  $x$ - $y$ -Ebene (Vorderseite des Quaders). Die Kieselsteine befinden sich innerhalb des Datenquaders und sind deswegen nicht sichtbar. Die zeitliche Abhängigkeit der Intensität an den Positionen der obersten Zeile und der rechten Spalte ist sichtbar durch die obere und die rechte Fläche des Quaders.

In den weiteren Untersuchungen wurde mit dem Faser-Lasersystem von einer 15 m erhöhten Plattform eine Szene im Außenbereich aufgenommen (Abbildung 6.4). Die Szene wurde mit einem Abtastraster von  $320 \times 600$  Punkten erfasst. Die Ausrichtung des Lasersystems war hierfür nahezu waagrecht. Objekte in der Szene sind Gebäude, Strassen, Fahrzeuge, Parkbuchten, Bäume, Büsche und Wiese. Einige Objekte sind teilweise verdeckt, und die Materialien besitzen unterschiedliche Reflexionseigenschaften.



Abbildung 6.4: Foto der aufgenommenen Szene.

## 7 Experimente

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Experimente zur Analyse der rückgestreuten zeitlichen Signalform von Laserpulsen beschrieben. In Abschnitt 7.1 wird anhand von Messungen die Variation in der gesendeten Signalform gezeigt. Die örtliche Energieverteilung des Laserstrahls wird in Abschnitt 7.2 untersucht und mit der modellierten Energieverteilung verglichen.

Die Länge der Impulsantwort der Empfangseinheit (Abschnitt 7.3) wird in Abhängigkeit von der Grenzfrequenz berechnet und mit den gemessenen Werten verglichen. Die Länge der Impulsantwort gibt zugleich den unteren Grenzwert für die Länge der Oberflächenantwort wieder, die mit dem Lasersystem erfasst werden kann. Untersuchungen zur Trennbarkeit und Genauigkeit, die durch Schätzung der Oberflächenantwort erreicht werden kann, werden in Abschnitt 7.4 beschrieben. In Abschnitt 7.5 wird die Genauigkeit untersucht, mit der die Neigung einer ebenen Oberfläche durch die Wiener-Filter und die Korrelations-Methode bestimmt werden kann.

Darüber hinaus wird die Genauigkeit bei der Extraktion der Merkmale *Entfernung*, *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke* durch verschiedene Methoden in Abschnitt 7.6 miteinander verglichen. In Abschnitt 7.7 werden für eine gemessene Szene die Merkmale durch die Wiener-Filter-Methode und die *Peak-Detection*-Methode bestimmt und gegenübergestellt.

### 7.1 Messung der gesendeten Signalform der emittierten Laserpulse

In Abschnitt 3.1 wurde bereits beschrieben, dass der verwendete *Multi-Mode*-Laser (Erbium-Faser-Laser) typischerweise starke Variationen im Signalverlauf von Puls zu Puls und zusätzlich innerhalb des Signals zeigt. In diesem Abschnitt wird diese zufällige Modulation der Signalform anhand einer Überlagerung von mehreren gesendeten Signalformen ( $N = 500$ ) in Abbildung 7.1 gezeigt. Hierbei wird die Dichte der überlagerten Signalwerte als Grauwert dargestellt. Die Grenzfrequenz der für die Messung verwendeten Empfänger ist  $f_g = 6$  GHz.

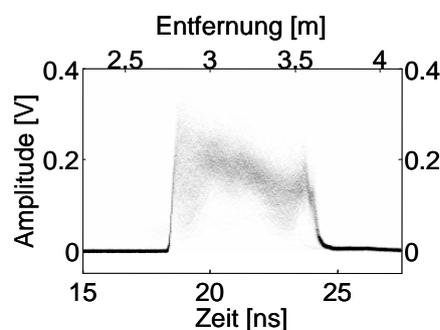


Abbildung 7.1: Überlagerung von mehreren gesendeten Signalformen ( $N = 500$ ).

## 7.2 Messung der örtlichen Energieverteilung des Laserstrahls

Die empfangene Signalform des rückgestreuten Laserpulses wird auch durch die örtliche Energieverteilung des Laserstrahls beeinflusst. In diesem Abschnitt wird ein Vergleich zwischen der modellierten und der gemessenen örtlichen Energieverteilung angestellt. Die Messung der örtlichen Energieverteilung erfolgte durch eine Infrarot-Kamera, deren Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich von  $1.5 - 2.5 \mu\text{m}$  liegt.

Bei *Single-Mode*-Lasern oszilliert ausschließlich die  $TEM_{00}$ -Mode, auch transversal-elektromagnetisch Mode niedrigster Ordnung genannt. Der verwendete Laser wurde optimiert, um Laserpulse mit hoher Energie zu emittieren. Dies wird erreicht durch den *Multi-Mode*-Betrieb, bei dem auch die  $TEM$ -Moden höherer Ordnung oszillieren. Die  $TEM$ -Moden höherer Ordnung bewirken im Nahfeld ein Strahlprofil mit zylinderförmiger Verteilung (engl. *Top-Hat Form*) (Abschnitt 3.2).

Die Messung des Strahlprofils des verwendeten Lasers im Nahfeld zeigt, dass eine zylinderförmige Verteilung nahezu dem gemessenen Strahlprofil entspricht (Abbildung 7.2). Die Modellierung der örtlichen Energieverteilung erfolgte ebenfalls im Nahfeld. Der Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld wird durch die Rayleigh-Entfernung bestimmt (Abschnitt 2.2.1). Bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  und einem Durchmesser an der Strahltaile von ungefähr  $d_{Ap} = 2\omega_0 \approx 60 \text{ mm}$  ergibt sich eine Rayleigh-Entfernung von ungefähr 1800 m. Die maximale Entfernung der durchgeführten Experimente liegt deutlich unterhalb der Rayleigh-Entfernung, deswegen wird eine zylinderförmige Verteilung vorausgesetzt. Die in den Abschnitt 3.2 durchgeführte Modellierung mit Gleichung 3.6 ist damit zulässig. Für Anwendungen oberhalb der Rayleigh-Entfernung im Fernfeld ist ein gaußförmiges Strahlprofil zu erwarten. Das gaußförmige Strahlprofil (Gleichung 3.7) muss dann bei der Modellierung der Signalform berücksichtigt werden.

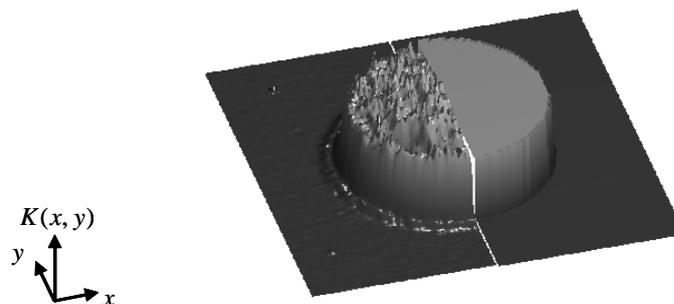


Abbildung 7.2: Gegenüberstellung der örtlichen Energieverteilung (Strahlprofil) des Laserstrahls: Gemessenes Profil (linke Hälfte) und modelliertes Profil (rechte Hälfte).

## 7.3 Impulsantwort der Empfangseinheit

Die gemittelte Impulsantwort (Abschnitt 6.3.1) wurde für Empfänger mit unterschiedlichen Grenzfrequenzen mit  $N = 1000$  Messungen bestimmt. Die Abbildungen 7.3 zeigen die gemittelten Impulsantworten des Lasersystems für Empfänger mit unterschiedlicher Bandbreite. Durch den Messaufbau ergibt sich eine Verschiebung der Impulsantwort um ungefähr 6 ns. Die Messungen der gesendeten, als auch der empfangenen Signalform, wurde mit folgenden Grenzfrequenzen durchgeführt: 250 MHz, 750 MHz, 1 GHz

und 6 GHz. Je höher die Grenzfrequenz der für die Messung verwendeten Empfänger, desto kürzer ist die Länge der gemittelten Impulsantwort. Bei den gemittelten Impulsantworten wurden Störungen in Form von Rauschen und Unregelmäßigkeiten im Signalverlauf beobachtet. Dieses Rauschen war etwas größer bei der Verwendung von Empfängern mit niedriger Grenzfrequenz.

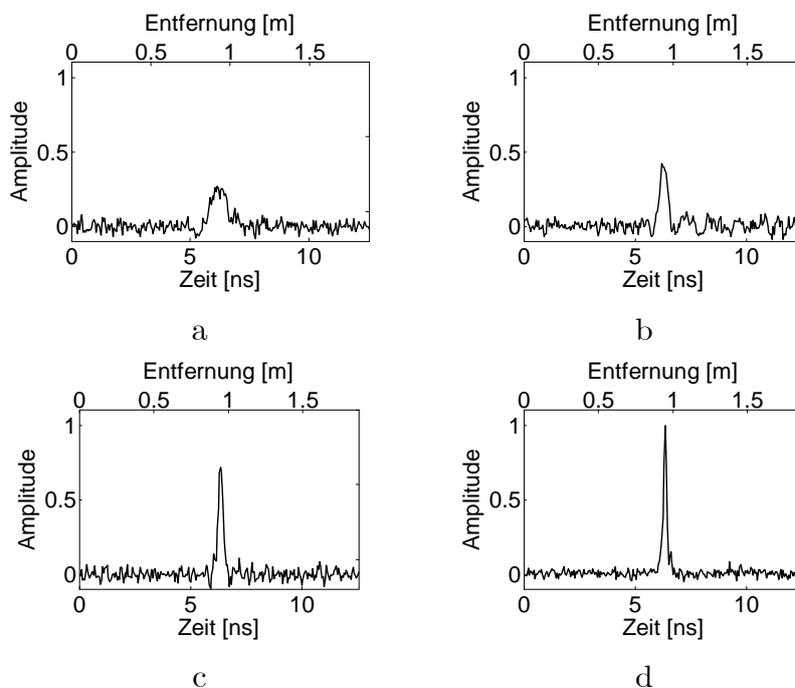


Abbildung 7.3: Gemittelte Impulsantworten des Lasersystems für Empfänger mit unterschiedlicher Bandbreite. a) 250 MHz Grenzfrequenz, b) 750 MHz Grenzfrequenz, c) 1 GHz Grenzfrequenz, d) 6 GHz Grenzfrequenz.

Für die gemittelte Impulsantwort  $\bar{h}_n(t)$  (Gleichung 6.6) wurde die Länge  $w_g$  der Impulsantwort bei halber Amplitudenhöhe ( $FWHM$ ) berechnet (Gleichung 6.9) und zusätzlich aus den gemessenen Daten bestimmt. Der Funktionsverlauf der berechneten Länge der Impulsantwort ist in Abbildung 7.4 (Kurve) gezeigt. Darüber hinaus ist die gemessene Länge der Impulsantwort (Punkte) für die vier Empfänger eingetragen. Die Länge der Impulsantwort wurde durch eine gaußförmige Ausgleichskurve

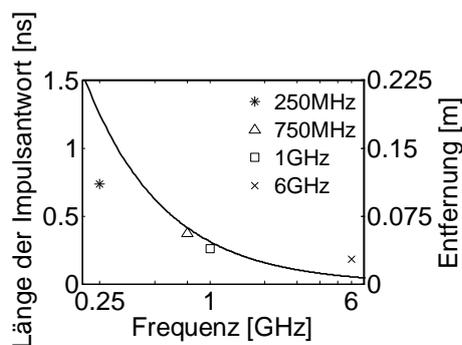


Abbildung 7.4: Berechnete (Kurve) und gemessene Länge (Punkte) der Impulsantwort  $w_g$ .

mit dem Levenberg-Marquardt-Verfahren bestimmt (Abschnitt 5.8.3). Die gemessene Länge für die Grenzfrequenz 750 MHz und 1 GHz stimmen hierbei sehr gut mit der berechneten Länge überein. Bei der Grenzfrequenz 250 MHz und 6 GHz ist die richtige Tendenz ersichtlich. Die Abweichungen lassen sich damit erklären, dass der für die Anregung verwendete Laserpuls nicht notwendigerweise alle Frequenzanteile enthält. Zudem wurden die Angaben der Hersteller nicht verifiziert. Deswegen sind zusätzliche Abweichungen möglich. Die genauen Werte der berechneten und gemessenen Länge der Impulsantwort unter Berücksichtigung der vom Hersteller spezifizierten Grenzfrequenz sind zum Vergleich in Tabelle 7.1 aufgeführt.

| Grenzfrequenz<br>$f_g$ | Länge der Impulsantwort<br>(Berechnung)<br>$w_g$ | Länge der Impulsantwort<br>(Messung)<br>$w_g$ |
|------------------------|--|---|
| 250 MHz                | 1.25 ns  | 0.73 ns                                       |
| 750 MHz                | 0.42 ns  | 0.37 ns                                       |
| 1 GHz                  | 0.31 ns  | 0.26 ns                                       |
| 6 GHz                  | 0.05 ns  | 0.18 ns                                       |

Tabelle 7.1: Gegenüberstellung der berechneten mit der gemessenen Länge der Impulsantwort  $w_g$  unter Berücksichtigung der vom Hersteller spezifizierten Grenzfrequenz  $f_g$ .

## 7.4 Bestimmung der Oberflächenantwort

Zur Untersuchung der Entfernungsunterscheidung von zwei Oberflächen, die sich in geringem Abstand zueinander befinden, wurde die Signalform analysiert, indem die Oberflächenantwort bestimmt wurde. Für die Analyse der Signalform wurde sowohl die gesendete als auch die empfangene Signalform berücksichtigt. Es wurde ein bistatischer Aufbau verwendet, bei dem der *Footprint* des Laserstrahls und das Gesichtsfeld der Empfangsoptik, in der für das Experiment zu Grunde liegenden Entfernung, vollständig deckungsgleich sind (Abschnitt 2.4.5). Es wurden zum Erfassen der Laserstrahlung zwei Empfänger verwendet, wobei jeder Empfänger aus einem InGaAs Detektor und einem Vorverstärker besteht. Die Grenzfrequenz  $f_g$  der Empfänger ist 1 GHz. Die Abtastung beider Signale erfolgte mit 20GSamples/s.

Aus der Grenzfrequenz der Empfänger lässt sich mit Gleichung 6.9 näherungsweise die zu erwartende Länge der Impulsantwort mit  $w_g = 0.3$  ns schätzen (Abschnitt 6.3.2). Das Beispiel für die Impulsantwort, berechnet aus der Mittelung von mehreren einzelnen Impulsantworten ( $N = 1000$ ) einer spiegelnden Oberfläche, ist in Abbildung 7.5(a) dargestellt.

Zur Reduzierung der Signalschwankung im Verlauf der einzelnen Impulsantwort (Abbildung 7.5(b)) wird eine Tiefpassfilterung durchgeführt. Da die Tiefpassfilterung die Grenzfrequenz nach unten verschiebt, erhöht sich die Länge der Impulsantwort von  $w_g = 0.3$  ns auf  $\bar{w}_g = 0.5$  ns. Die Länge der tiefpassgefilterten Impulsantwort ist der untere Grenzwert, der für die Länge der Oberflächenantwort bestimmt werden kann. Diese Länge ist wichtig bei der Unterscheidung von mehreren Oberflächen, die nah hintereinander liegen.

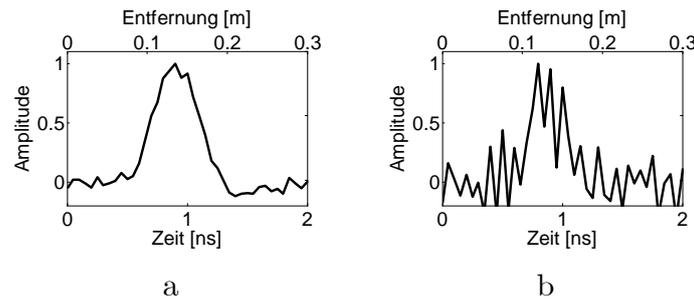


Abbildung 7.5: Impulsantwort der Empfangseinheit. a) Gemittelte Impulsantwort geschätzt aus mehreren einzelnen Impulsantworten ( $N=1000$ ), b) Einzelne Impulsantwort mit Signalschwankung.

Zur Bestimmung der Qualität der geschätzten Oberflächenantwort wurden Experimente zur Entfernungsmessungen mit einer einzelnen Oberfläche (Abschnitt 7.4.1) und zur Entfernungsunterscheidung zwischen zwei Oberflächen mit geringem Abstand (Abschnitt 7.4.2) durchgeführt. Für beide Experimente wurden Messungen ( $N = 500$ ) von der gesendeten und der empfangenen Signalform aufgezeichnet. Die Messung erfolgte auf ebenen Messplatten mit spiegelnder Reflexionseigenschaft (polierte Metallplatten), um ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis ( $SNR$ ) zu erreichen. Um die Entfernungsgenauigkeit zu ermitteln, wurde die Standardabweichung der geschätzten Entfernungswerte bestimmt. Für die Unterscheidung von nah hintereinanderliegenden Oberflächen wurden zwei Messplatten mit unterschiedlichen Abständen hintereinander positioniert (Gleichung 3.22). Die unterschiedlich gewählten Abstände entsprachen der Pulslänge beziehungsweise waren deutlich unterhalb der Pulslänge. Bei der Messung wurde darauf geachtet, dass beide Messplatten jeweils von der Hälfte des *Footprints* beleuchtet wurden und dass die Flächennormalen der Messplatten genau in Strahlrichtung ausgerichtet wurden. Der bistatische Aufbau wurde so ausgerichtet, dass der *Footprint* des Laserstrahls und das Gesichtsfeld der Empfangsoptik in der für das Experiment zu Grunde liegenden Entfernung vollständig deckungsgleich sind (Abschnitt 2.4.5). Die Entfernung der Messplatten zum Laser betrug 100 m und die gewählten Abstände zwischen den Messplatten 0.15 m, 0.30 m und 0.75 m. Der Abstand 0.15 m entspricht genau  $2\bar{w}_c$  und somit dem dargestellten Beispiel in Abbildung 5.16(a). Der Abstand 0.30 m ist entsprechend  $4\bar{w}_c$  und deutlich unterhalb der Pulslänge. Der Abstand 0.75 m entspricht genau der Pulslänge ( $FWHM$ ) von 5 ns des verwendeten Lasersystems.

#### 7.4.1 Einzelne Oberfläche

Zur Bestimmung der Entfernungsgenauigkeit (Abschnitt 2.5.4) wurde eine ebene Oberfläche in einer Entfernung von 100 m positioniert, und die Oberflächenantworten durch mehrere Messungen geschätzt. Die Abbildungen 7.6(a) und 7.6(b) zeigen Beispiele einer einzelnen Messung mit dem emittierten und dem rückgestreuten Puls. Bei den Abbildungen 7.6(a-e) wurde ein Entfernungsintervall von 2 m für die Darstellung ausgewählt. Es ist zu erkennen, dass der Verlauf der empfangenen Signalformen in Abbildung 7.6(b) dem der gesendeten Signalform in Abbildung 7.6(a) sehr ähnlich ist, jedoch die Höhe der Amplituden sich unterscheiden. Da nur ein geringer Teil der emittierten Laserstrahlung direkt über eine Glasfaser an der Sendeoptik auf eine Photodiode eingekoppelt wird, kann die gemessene Spannungsamplitude der gesendeten Signalform durchaus

geringer sein als die der empfangenen Signalform. Die geschätzte Oberflächenantwort wurde mit dem Wiener-Filter (Abschnitt 5.8.2) berechnet und ist in Abbildung 7.6(c) dargestellt. Zu sehen ist ein einzelner ausgeprägter kurzer Signalverlauf mit einem Maximum bei 100 m Entfernung, umgeben von geringem Signalrauschen. Das Ergebnis in Abbildung 7.6(c) wurde mit dem Levenberg-Marquardt-Verfahren (Abschnitt 5.8.3) weiterverarbeitet, um die Parameter der Oberflächenantwort zu bestimmen. Aus den geschätzten Parametern wurde die Signalform der Oberflächenantwort berechnet, die in Abbildung 7.6(d) dargestellt ist.

Die Verteilung der geschätzten Entfernungswerte ist als Histogramm in Abbildung 7.6(e) dargestellt. Eine um den Faktor 20 gespreizte Darstellung ist in Abbildung 7.6(f) zu sehen. Jeder der 500 emittierten Pulse, die von der in 100 m Entfernung positionierten ebenen Messplatte rückgestreut wurden, konnte detektiert werden. Entsprechend Abschnitt 5.8.3 wurde die Oberflächenantwort berechnet und die Parameter der Signalform bestimmt. Die Verteilung der Entfernungswerte zeigen ein Minimum bei  $r_{A_1,\min} = 99.9765$  m, ein Maximum bei  $r_{A_1,\max} = 100.0202$  m und eine Standardabweichung von  $\sigma_{A_1,r} = 0.0058$  m bei einer mittleren Entfernung von  $\bar{r}_{A_1} = 99.9971$  m (Tabelle 7.2).

| $\Delta r$          | 0 m        | 0.15 m     | 0.30 m     | 0.75 m     |
|---------------------|------------|------------|------------|------------|
| $r_{A_1,\min}$      | 99.9765 m  | 99.9765 m  | 99.9656 m  | 99.9735 m  |
| $\bar{r}_{A_1}$     | 99.9971 m  | 99.9982 m  | 100.0014 m | 100.0010 m |
| $r_{A_1,\max}$      | 100.0202 m | 100.0182 m | 100.0200 m | 100.0333 m |
| $\sigma_{A_1,r}$    | 0.0058 m   | 0.0052 m   | 0.0063 m   | 0.0076 m   |
| $r_{A_2,\min}$      | —          | 100.1321 m | 100.2840 m | 100.6970 m |
| $\bar{r}_{A_2}$     | —          | 100.1532 m | 100.2992 m | 100.7542 m |
| $r_{A_2,\max}$      | —          | 100.1727 m | 100.3182 m | 100.7851 m |
| $\sigma_{A_2,r}$    | —          | 0.0061 m   | 0.0052 m   | 0.0109 m   |
| $\Delta r$          | —          | 0.1550 m   | 0.2978 m   | 0.7532 m   |
| $\sigma_{\Delta r}$ | —          | 0.0049 m   | 0.0042 m   | 0.0072 m   |

Tabelle 7.2: Ergebnisse der Entfernungsschätzung.

#### 7.4.2 Zwei Oberflächen

Bei diesen Experimenten wurden zwei Messplatten mit verschiedenen Abständen hintereinander positioniert. Die eine Messplatte wurde hierfür in einer Entfernung von 100 m aufgestellt und die andere Messplatte in den Entfernungen 100.15 m, 100.30 m und 100.75 m. Beide Messplatten wurden jeweils von der Hälfte des *Footprints* beleuchtet und orthogonal zur Strahlrichtung ausgerichtet. Es wurden sowohl die gesendete als auch die empfangene Signalform erfasst. Die Verarbeitung der Signalformen erfolgte nach folgenden Verfahrensschritten: Detektion des rückgestreuten Pulses (Abschnitt 5.1), Unterscheidung und Schätzung der Entfernung (Abschnitt 5.8.3) der beiden Oberflächenantworten ( $i = 1, 2$ ) mit möglichst hoher Genauigkeit.

Die Abbildungen 7.7(a) und 7.7(b) zeigen Beispiele einer einzelnen Messung des emittierten und des rückgestreuten Laserpulses. Die geringen Entfernungsunterschiede der Messplatten bewirken eine Überlappung der empfangenen Signalformen. Dieses gemischte Signal ist geringfügig länger als das gesendete Signal und besitzt eine veränderte

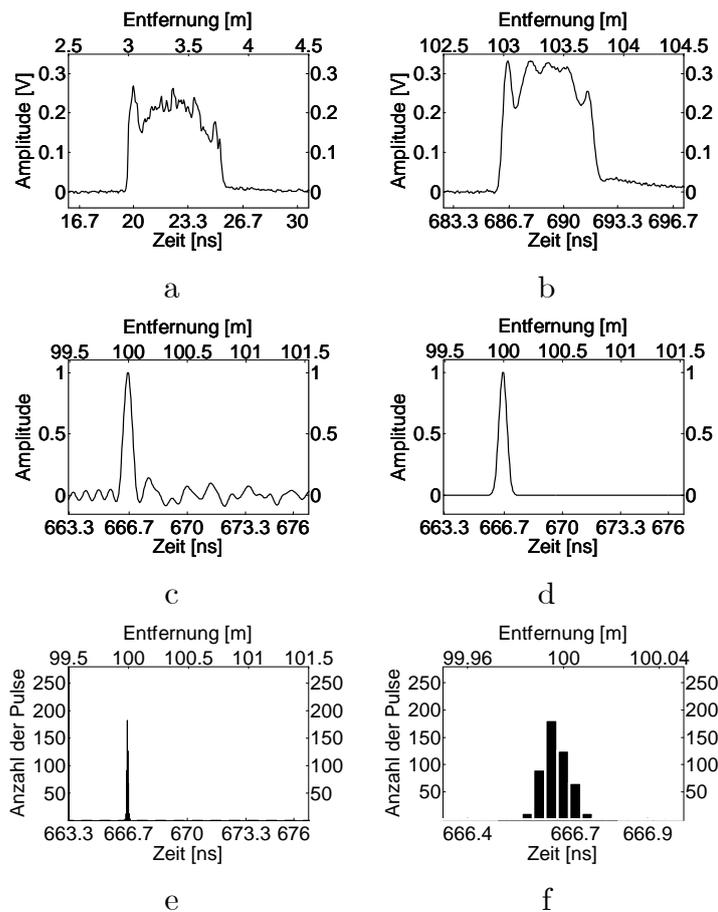


Abbildung 7.6: Beispiel für die gemessene Signalform und die Verarbeitungsergebnisse bei einer Oberfläche. a) Gesendete Signalform des emittierten Laserpulses, b) Empfangene Signalform des rückgestreuten Laserpulses, c) Geschätzte Oberflächenantwort, d) Näherungsfunktion der Oberflächenantwort, e) Histogramm der geschätzten Entfernungswerte, f) Vergrößerte Darstellung von der Verteilung in der Entfernung  $r_{A_1}$ .

Signalform. Das Ergebnis der Wiener-Filterung ist in Abbildung 7.7(c) dargestellt. Zu sehen sind zwei einzelne ausgeprägte kurze Signalverläufe mit zwei lokalen Maxima. Es befindet sich das eine lokale Maximum in 100 m und das andere lokale Maximum in 100.15 m Entfernung (Abbildung 7.7(c)).

Die aus den geschätzten Parametern berechnete Signalformen sind in Abbildung 7.7(d) dargestellt. Die Funktionsverläufe der geschätzten Oberflächenantworten berühren sich am unteren Ende und die einzelnen Antworten überlappen sich geringfügig. Die Überlappung von einzelnen Antworten sind ein Problem für eine präzise Entfernungsschätzung. Die Überlappung bewirkt, dass die lokalen Maxima der Oberflächenantwort einen kürzeren Abstand zueinander aufweisen (Abbildung 7.7(c)) als die Maxima der einzelnen Antworten (Abbildung 7.7(d)). Dies ist anhand der Simulation von zwei überlappenden einzelnen Antworten (gestrichelte Linie) und die daraus resultierende Oberflächenantwort (durchgehende Linie) in Abbildung 5.16(b) ersichtlich. Aus diesem Grund ist die Position der lokalen Maxima der Oberflächenantwort, die normalerweise für die Entfernungsschätzung verwendet werden, mit einem systematischen Fehler behaftet. Um diesen Fehler zu kompensieren, werden zugleich zwei Ausgleichskurven in

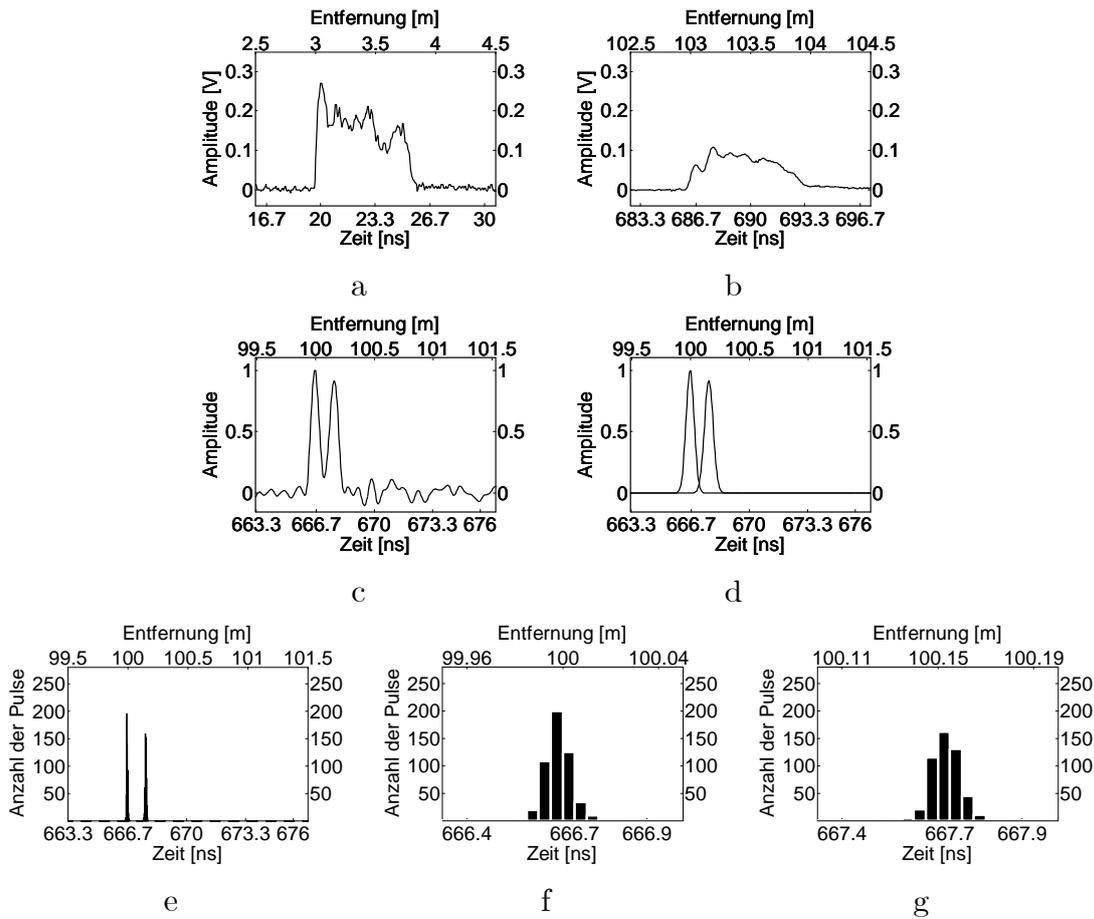


Abbildung 7.7: Beispiel für die gemessene Signalform und die Verarbeitungsergebnisse bei zwei Oberflächen mit einem Entfernungsunterschied von 0.15m. a) Gesendete Signalform des emittierten Laserpulses, b) Empfangene Signalform des rückgestreuten Laserpulses, c) Geschätzte Oberflächenantwort, d) Näherungsfunktion der Oberflächenantwort, e) Histogramm der geschätzten Entfernungswerte, f) Vergrößerte Darstellung von der Verteilung in der Entfernung  $r_{A_1}$ , g) Vergrößerte Darstellung von der Verteilung in der Entfernung  $r_{A_2}$ .

Gaußform verwendet (Abschnitt 5.8.3) und daraus die Parameter geschätzt.

Es wurden zwei ebene Messplatten mit einem Entfernungsunterschied von 0.15 m Entfernung mit 500 Laserpulsen beleuchtet. Die Histogramme der berechneten Entfernungswerte zeigen eine bimodale Verteilung (Abbildung 7.7(e)) mit zwei ausgeprägten Anteilen (Abbildungen 7.7(f) und 7.7(g)). Auch hier wurden die Histogramme zur besseren Anschaulichkeit um den Faktor 20 gespreizt. Bei einem Entfernungsunterschied von 0.15 m besitzt die linke Verteilung der Entfernungswerte ein Minimum bei  $r_{A_1,\min} = 99.9765$  m, ein Maximum bei  $r_{A_1,\max} = 100.0182$  m und eine Standardabweichung von  $\sigma_{A_1,r} = 0.0052$  m. Die rechte Verteilung hat ein Minimum bei  $r_{A_2,\min} = 100.1321$  m, ein Maximum bei  $r_{A_2,\max} = 100.1727$  m und eine Standardabweichung von  $\sigma_{A_2,r} = 0.0061$  m. Die mittlere Entfernung, berechnet für die einzelnen Messplatten, ist  $\bar{r}_{A_1} = 100.0031$  m und  $\bar{r}_{A_2} = 100.1620$  m, woraus der mittlere Abstand  $\bar{\Delta r} = 0.1550$  m mit einer Standardabweichung von  $\sigma_{\Delta r} = 0.0049$  m resultiert.

Zudem wurden zwei ebene Messplatten mit einem Entfernungsunterschied von 0.30 m

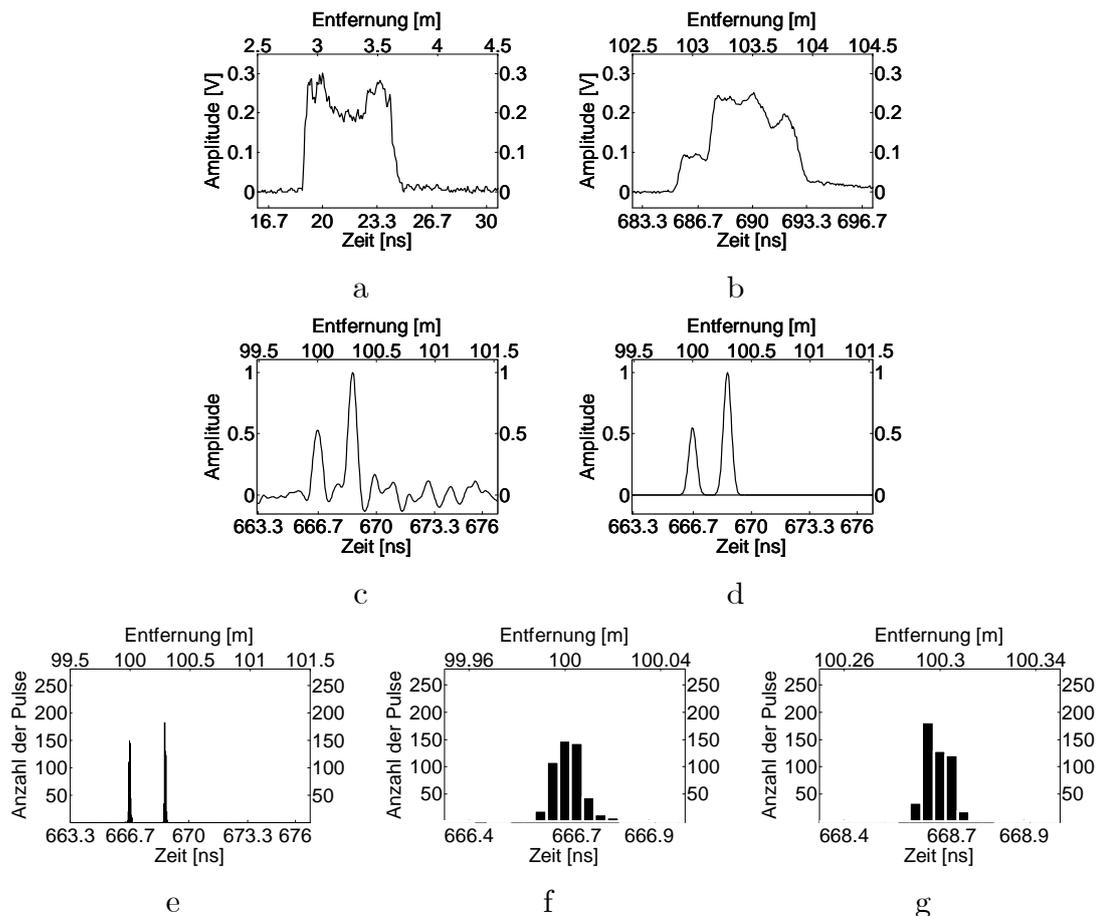


Abbildung 7.8: Beispiel für die gemessene Signalform und die Verarbeitungsergebnisse bei zwei Oberflächen mit einem Entfernungsunterschied von 0.30m. a) Gesendete Signalform des emittierten Laserpulses, b) Empfangene Signalform des rückgestreuten Laserpulses, c) Geschätzte Oberflächenantwort, d) Näherungsfunktion der Oberflächenantwort, e) Histogramm der geschätzten Entfernungswerte, f) Vergrößerte Darstellung von der Verteilung in der Entfernung  $r_{A_1}$ , g) Vergrößerte Darstellung von der Verteilung in der Entfernung  $r_{A_2}$ .

und 0.75 m in einer Entfernung von 100 m mit 500 Laserpulsen beleuchtet. Die dazugehörigen Signalverläufe wurden entsprechend den bisherigen Beispielen in den Abbildungen 7.8 und 7.9 dargestellt.

In Abhängigkeit von den gewählten Abständen zwischen den Messplatten ist das eine lokale Maximum in einer Entfernung von 100 m und das andere lokale Maximum in einer Entfernung von 100.30 m (Abbildung 7.8(c)) beziehungsweise in einer Entfernung von 100.75 m (Abbildung 7.9(c)). Die aus den geschätzten Parametern berechnete Signalformen sind in den Abbildungen 7.8(d) und 7.9(d) dargestellt. In den Abbildungen sind die korrespondierenden Funktionsverläufe der geschätzten Oberflächenantworten deutlich voneinander getrennt. Die Überlappung der einzelnen Oberflächenantworten beeinflussen wegen des großen Abstandes zueinander die Entfernungsschätzung nicht. Aus diesem Grund könnten die Entfernungswerte der einzelnen Antworten auch direkt bestimmt werden. Die Histogramme der berechneten Entfernungswerte zeigen wiederum eine bimodale Verteilung (Abbildungen 7.8(e) und 7.9(e)) mit zwei ausgeprägten

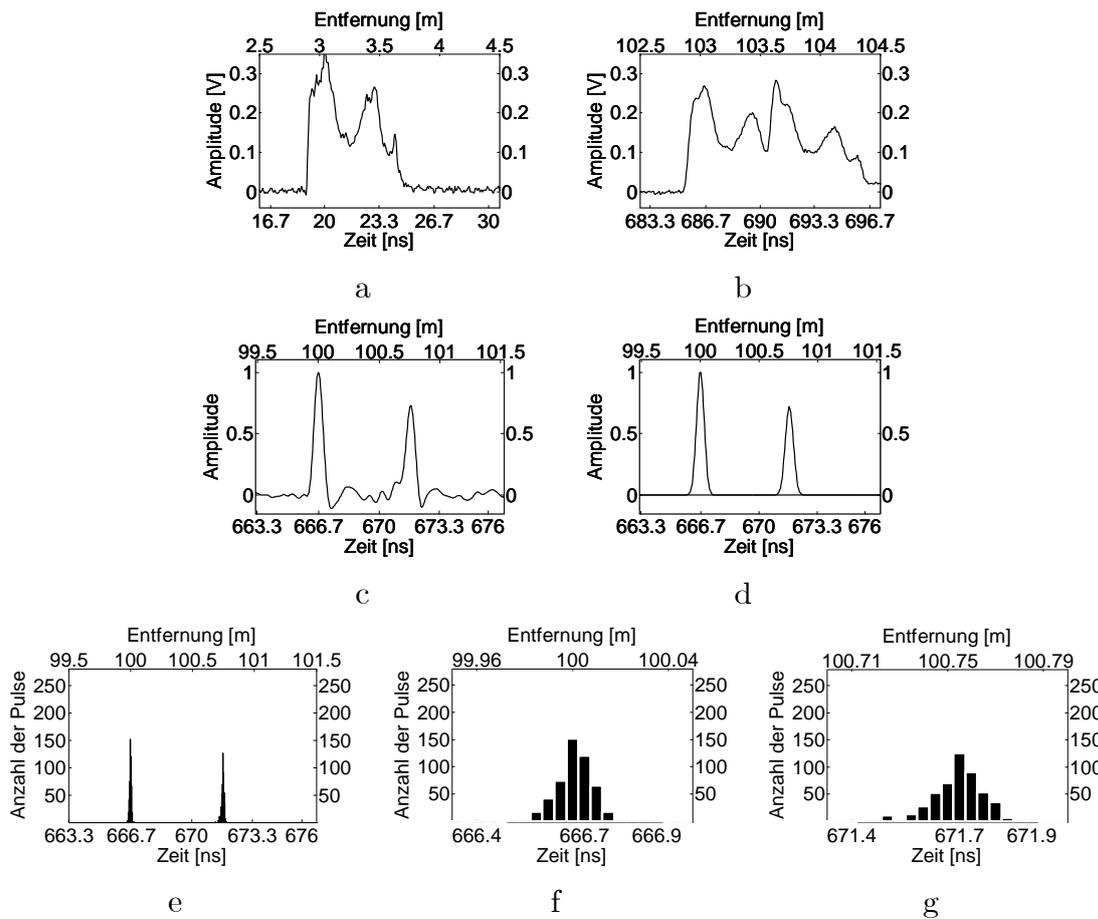


Abbildung 7.9: Beispiel für die gemessene Signalform und die Verarbeitungsergebnisse bei zwei Oberflächen mit einem Entfernungsdifferenz von 0,75 m. a) Gesendete Signalform des emittierten Laserpulses, b) Empfangene Signalform des rückgestreuten Laserpulses, c) Geschätzte Oberflächenantwort, d) Näherungsfunktion der Oberflächenantwort, e) Histogramm der geschätzten Entfernungswerte, f) Vergrößerte Darstellung von der Verteilung in der Entfernung  $r_{A_1}$ , g) Vergrößerte Darstellung von der Verteilung in der Entfernung  $r_{A_2}$ .

Anteilen (Abbildungen 7.8(f) und 7.8(g) und Abbildungen 7.9(f) und 7.9(g)).

Auffällig ist bei den Entfernungsdifferenzen von 0,30 m und 0,75 m, dass die Amplituden der Oberflächenantworten (Abbildungen 7.8(c) und 7.8(d) und Abbildungen 7.9(c) und 7.9(d)) stark unterschiedlich ausgeprägt sind. Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei der Versuchsanordnung offenbar nicht exakt die Hälfte des *Footprints* auf jeder Messplatte abgebildet wurde, und deswegen die rückgestreute Energie für die Oberflächenantworten unterschiedlich ist. Beim Entfernungsdifferenz von 0,30 m war die beleuchtete Fläche auf der Messplatte in einer Entfernung von 100 m kleiner als bei der Messplatte in einer Entfernung von 100,30 m. Beim Entfernungsdifferenz von 0,75 m entsprechend umgekehrt.

Entsprechend der bisherigen Beispiele wurden die berechneten Ergebnisse für die Entfernungsdifferenzen 0,30 m und 0,75 m ausgewertet und in Tabelle 7.2 eingetragen.

## 7.5 Untersuchungen zur Oberflächenantwort bei einer ebenen Oberfläche mit Neigung

Mit den hier dokumentierten Experimenten wurde untersucht, mit welcher Genauigkeit die Neigung einer ebenen Oberfläche bestimmt werden kann (Abschnitt 4.2.1). Es werden hierfür die Wiener-Filter- und die Korrelations-Methode verwendet. Diese beiden Vorgehensweisen sind grundlegend verschieden. Bei der Wiener-Filter-Methode wird die Oberflächenantwort direkt aus der gesendeten und der empfangenen Signalform geschätzt. Bei der Korrelations-Methode wird die optimale Übereinstimmung zwischen der gemessenen gesendeten Signalform und dem signalangepassten Filter für unterschiedliche Neigungswinkel bestimmt.

Für die Experimente wurden Messungen ( $N = 500$ ) der gesendeten und der empfangenen Signalform für eine ebene Oberfläche mit unterschiedlicher Neigung aufgezeichnet. Die Neigungswinkel  $\varphi$  der Oberfläche wurde in  $5^\circ$  Schritten in einem Intervall von  $0^\circ$  bis  $60^\circ$  variiert. Die Messung erfolgte auf Messplatten, die eine diffuse Reflexionseigenschaft (sandgestrahlte Metallplatte) besitzen. Diese Messung wurde unter Laborbedingungen durchgeführt, um ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis ( $SNR$ ) zu erreichen. Die Entfernung der Messplatte vom Laser betrug 6 m.

Die Strahldivergenz des Laserstrahls wurde für dieses Experiment extrem aufgeweitet, so dass der Durchmesser des *Footprints* auf der Oberfläche 0.25 m war. Dieser Durchmesser des *Footprints* würde bei der gegebenen Strahldivergenz des Lasersystems von 1 mrad (Abschnitt 6.2.1) einer Entfernung von 250 m entsprechen. Der bistatische Aufbau wurde entsprechend modifiziert, so dass der *Footprint* des Laserstrahls und das Gesichtsfeld der Empfangsoptik in der für das Experiment gewählten Entfernung möglichst deckungsgleich waren (Abschnitt 2.4.5). Die gesendete und empfangene Signalform wurde mit einer Grenzfrequenz  $f_g$  von 1 GHz erfasst. Die Abtastung der Signale erfolgte mit 20GSamples/s.

### 7.5.1 Schätzung der Neigung durch die Wiener-Filter-Methode

Zur Schätzung der Neigung einer ebenen Oberfläche durch die Wiener-Filter-Methode wird zuerst die Oberflächenantwort entsprechend Abschnitt 5.8 geschätzt. Aus der Oberflächenantwort werden die zeitliche Position  $t_A$  und die zeitliche Pulslänge  $w_A$  berechnet. Anhand der zeitlichen Position wird die Entfernung  $r_A$  zwischen Sensor und Oberfläche bestimmt. Die zeitliche Pulslänge  $w_A$  wird nicht nur durch die Neigung der Oberfläche, sondern auch durch die für die Messung verwendete Empfangseinheit beeinflusst. Da die Impulsantwort der Empfangseinheit in Abschnitt 7.3 bereits bestimmt wurde und deswegen als bekannt vorausgesetzt wird, kann die Beeinflussung durch die Empfangseinheit für die Berechnung der Entfernungsvariation aus der zeitlichen Pulslänge berücksichtigt werden. Hierfür wird in erster Näherung angenommen, dass sowohl die Impulsantwort der Empfangseinheit als auch die Oberflächenantwort einen gaußförmigen Funktionsverlauf aufweist. Die Entfernungsvariation  $d_A$  berechnet sich dann mit

$$d_A = \frac{\sqrt{w_A^2 - w_g^2} \cdot c}{2}. \quad (7.1)$$

Für den Neigungswinkel  $\varphi$  zwischen der optischen Achse und der Normalen der

Oberfläche  $\vec{n}$  ergibt sich

$$\varphi = \arctan \frac{\frac{d_A}{2}}{(r_A - \frac{d_A}{2}) \tan \frac{\Theta}{2}} = \arctan \frac{1}{(2\frac{r_A}{d_A} - 1) \tan \frac{\Theta}{2}}, \quad (7.2)$$

wobei die Strahldivergenz  $\Theta$  als gegeben vorausgesetzt wird.

Für jede einzelne Messung wird die Entfernung und die Entfernungsvariation berechnet und daraus der Neigungswinkel  $\varphi$  bestimmt.

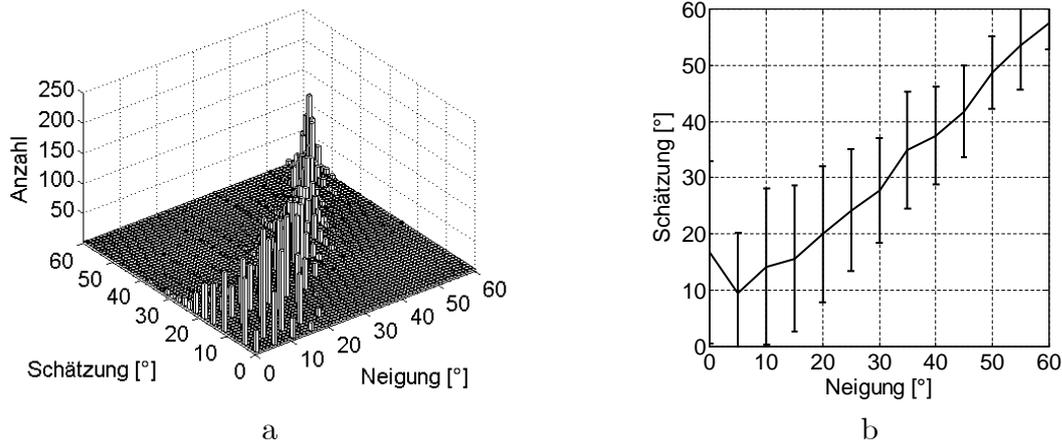


Abbildung 7.10: Geschätzter Neigungswinkel der Oberfläche, bestimmt durch die Wiener-Filter-Methode. a) 3D-Histogramm, b) Mittelwert und Standardabweichung der geschätzten Neigungswinkel.

| $\varphi$ | $\bar{\varphi}$ | $\sigma_{\varphi}$ | $\hat{\sigma}_{\varphi}$ |
|-----------|-----------------|--------------------|--------------------------|
| 0°        | 16.72°          | 16.24°             | $\infty$ °               |
| 5°        | 9.49°           | 10.70°             | 14.45°                   |
| 10°       | 14.19°          | 13.89°             | 14.08°                   |
| 15°       | 15.60°          | 12.99°             | 13.48°                   |
| 20°       | 19.98°          | 12.14°             | 12.66°                   |
| 25°       | 24.24°          | 10.94°             | 11.66°                   |
| 30°       | 27.81°          | 9.36°              | 10.50°                   |
| 35°       | 34.98°          | 10.42°             | 9.21°                    |
| 40°       | 37.47°          | 8.71°              | 7.85°                    |
| 45°       | 41.85°          | 8.14°              | 6.45°                    |
| 50°       | 48.74°          | 6.51°              | 5.06°                    |
| 55°       | 53.55°          | 7.84°              | 3.73°                    |
| 60°       | 57.58°          | 4.63°              | 2.51°                    |

Tabelle 7.3: Ergebnisse der Wiener-Filter-Methode für die geschätzten Neigungswinkel.

In Abbildung 7.10(a) wird die Anzahl der geschätzten Neigungswinkel für jeden vorgegebenen Neigungswinkel als 3D-Histogramm dargestellt. Der Mittelwert der geschätzten Neigungswinkel  $\bar{\varphi}$  liegt nahezu auf der Diagonalen des Histogramms, zeigt jedoch erhebliche Variationen. Mit zunehmendem Neigungswinkel verringern sich die

Standardabweichungen der geschätzten Neigungswinkel  $\sigma_\varphi$ . Zudem ist in Abbildung 7.10(b) der Mittelwert  $\bar{\varphi}$  und die Standardabweichung  $\sigma_\varphi$  für jeden vorgegebenen Neigungswinkel aufgetragen.

Diese quantitativen Aussagen werden durch Tabelle 7.3 gestützt. Eine auffällige Abweichung ist bei dem Mittelwert der geschätzten Neigungswinkel zu beobachten, falls für die Oberfläche eine Neigung von  $0^\circ$  gegeben ist. Die Standardabweichungen für die geschätzten Neigungswinkel liegen im Wertebereich von  $4.63^\circ \leq \sigma_\varphi \leq 16.24^\circ$ .

### 7.5.2 Schätzung der Neigung durch die Korrelations-Methode

Bei der folgenden Untersuchung wurde vorausgesetzt, dass es sich um eine ebene Oberfläche nach Abschnitt 4.2.1 handelt und dass eine radialsymmetrische zylinderförmige örtliche Energieverteilung des Laserstrahls gegeben ist. Nach Gleichung 4.6 kann damit für eine bekannte Entfernung die Oberflächenantwort bestimmt werden.

Für jede einzelne Messung wird zuerst die Entfernung durch die Korrelations-Methode bestimmt. Als Hypothese werden dann Oberflächenantworten mit unterschiedlichem Neigungswinkel  $\varphi$  der Oberfläche im Intervall von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  in  $1^\circ$  Schritten berechnet. Jede dieser Oberflächenantworten wird mit der gesendeten Signalform gefaltet und damit die daraus resultierende empfangene Signalform berechnet, die als signalangepasstes Filter bezeichnet wird (Abschnitt 5.7.3). Das signalangepasste Filter wird mit der gemessenen gesendeten Signalform korreliert, um die normierte Kreuzkorrelationsfunktion zu bestimmen. Für jede Hypothese wird der Wert des Maximums der normierten Kreuzkorrelationsfunktion berechnet. Um die Hypothesen für die unterschiedlichen Neigungswinkel miteinander vergleichen und bewerten zu können, wird nach der größten Ähnlichkeit gesucht. Die größte Ähnlichkeit ergibt sich für den größten Wert der Maxima der normierten Kreuzkorrelationsfunktion, womit die dazu korrespondierende Neigung mit dem geschätzten Winkel bestimmt ist.

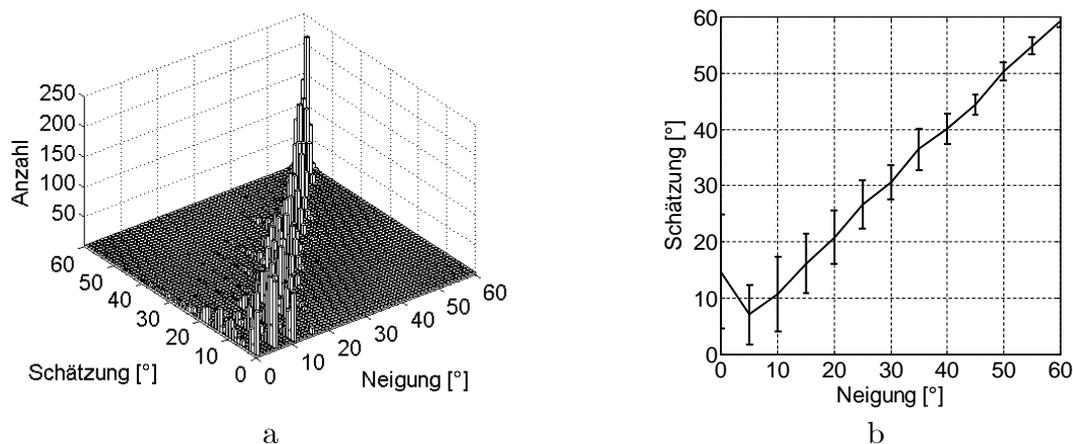


Abbildung 7.11: Geschätzter Neigungswinkel der Oberfläche, bestimmt durch die Korrelations-Methode. a) 3D-Histogramm, b) Mittelwert und Standardabweichung der geschätzten Neigungswinkel.

In Abbildung 7.11(a) wird die Anzahl der geschätzten Neigungswinkel für jeden vorgegebenen Neigungswinkel als 3D-Histogramm dargestellt. Der Mittelwert der geschätzten Neigungswinkel  $\bar{\varphi}$  liegt nahezu auf der Diagonalen des Histogramms. Mit zu-

nehmendem Neigungswinkel verringern sich die Standardabweichungen der geschätzten Neigungswinkel  $\sigma_\varphi$ . In Abbildung 7.11(b) ist der Mittelwert  $\bar{\varphi}$  und die Standardabweichung  $\sigma_\varphi$  für jeden vorgegebenen Neigungswinkel aufgetragen.

Diese quantitativen Aussagen werden durch Tabelle 7.4 gestützt. Eine auffällige Abweichung ist bei dem Mittelwert der geschätzten Neigungswinkel zu beobachten, falls eine Neigung von  $0^\circ$  für die Oberfläche gegeben ist. Die Standardabweichungen für die geschätzten Neigungswinkel liegen im Wertebereich von  $0.99^\circ \leq \sigma_\varphi \leq 10.13^\circ$ .

| $\varphi$  | $\bar{\varphi}$ | $\sigma_\varphi$ | $\hat{\sigma}_\varphi$ |
|------------|-----------------|------------------|------------------------|
| $0^\circ$  | $14.67^\circ$   | $10.13^\circ$    | $\infty^\circ$         |
| $5^\circ$  | $7.02^\circ$    | $5.28^\circ$     | $5.35^\circ$           |
| $10^\circ$ | $10.67^\circ$   | $6.68^\circ$     | $5.22^\circ$           |
| $15^\circ$ | $16.15^\circ$   | $5.34^\circ$     | $4.99^\circ$           |
| $20^\circ$ | $20.83^\circ$   | $4.84^\circ$     | $4.69^\circ$           |
| $25^\circ$ | $26.61^\circ$   | $4.32^\circ$     | $4.32^\circ$           |
| $30^\circ$ | $30.65^\circ$   | $3.10^\circ$     | $3.89^\circ$           |
| $35^\circ$ | $36.47^\circ$   | $3.60^\circ$     | $3.41^\circ$           |
| $40^\circ$ | $40.14^\circ$   | $2.71^\circ$     | $2.91^\circ$           |
| $45^\circ$ | $44.47^\circ$   | $1.83^\circ$     | $2.39^\circ$           |
| $50^\circ$ | $50.36^\circ$   | $1.56^\circ$     | $1.87^\circ$           |
| $55^\circ$ | $54.92^\circ$   | $1.55^\circ$     | $1.38^\circ$           |
| $60^\circ$ | $59.34^\circ$   | $0.99^\circ$     | $0.93^\circ$           |

Tabelle 7.4: Ergebnisse der Korrelations-Methode für die geschätzten Neigungswinkel.

### 7.5.3 Vergleich zwischen der zu erwartenden Standardabweichung der Neigungswinkel und der Standardabweichung der geschätzten Neigungswinkel

Mit der Annahme, dass die Verteilung der Längen der Oberflächenantworten einer Normalverteilung mit der konstanten Standardabweichung  $\sigma_w$  folgt, kann die zu erwartende Standardabweichung  $\hat{\sigma}_\varphi$  der Neigungswinkel aus Gleichung 4.7 berechnet und mit der Standardabweichung  $\sigma_\varphi$  der geschätzten Neigungswinkel verglichen werden. Hierfür wird zuerst die Funktion  $f_w(\varphi)$  für die winkelabhängige Länge der Oberflächenantwort bestimmt mit

$$f_w(\varphi) = z_{max} - z_{min} = \frac{2r_{0A} \cot \varphi \tan \frac{\Theta}{2}}{\cot^2 \varphi - \tan^2 \frac{\Theta}{2}}. \quad (7.3)$$

Unter Berücksichtigung des *Genauigkeitsniveaus der Messung* nach Niemeier [2002] wird die inverse Kovarianzmatrix für die Längenvariation der Oberflächenantwort  $\Sigma_{ww}^{-1}$  herangezogen, um die inverse Kovarianzmatrix  $\Sigma_{\varphi\varphi}^{-1}$  zu berechnen mit

$$\Sigma_{\varphi\varphi}^{-1} = f_w'(\varphi) \cdot \Sigma_{ww}^{-1} \cdot f_w'(\varphi) = (\sigma_w^{-1} \cdot \frac{2r_{0A} \tan \frac{\Theta}{2} \cdot (1 + \cot^2 \varphi) \cdot (\cot^2 \varphi + \tan^2 \frac{\Theta}{2})}{(-\cot^2 \varphi + \tan^2 \frac{\Theta}{2})^2})^2, \quad (7.4)$$

wobei  $f_w'(\varphi)$  der Ableitung der winkelabhängigen Länge der Oberflächenantwort entspricht und  $\sigma_w$  als unbekannter skalarer Faktor mitgeführt werden muss.

Die zu erwartende Standardabweichung  $\hat{\sigma}_\varphi$  einer Normalverteilung in Abhängigkeit vom Winkel berechnet sich mit

$$\hat{\sigma}_\varphi(\varphi) = \sigma_w \cdot \frac{(-\cot^2 \varphi + \tan \frac{\Theta}{2})^2}{2r_{0A} \tan \frac{\Theta}{2} \cdot (1 + \cot^2 \varphi) \cdot (\cot^2 \varphi + \tan \frac{\Theta}{2})}. \quad (7.5)$$

Für die Darstellung in der Abbildung 7.12 wurde für die Wiener-Filter-Methode der skalare Faktor  $\sigma_w = 7.3$  und für die Korrelations-Methode der skalare Faktor  $\sigma_w = 2.7$  angenommen. Der Verlauf der Kurven zeigt die zu erwartende Standardabweichung  $\hat{\sigma}_\varphi$  der Neigungswinkel. Die Punkte entsprechen der Standardabweichung  $\sigma_\varphi$  der geschätzten Neigungswinkel. Diese beiden Faktoren wurden geschätzt, so dass  $\hat{\sigma}_\varphi$  und  $\sigma_\varphi$  gut übereinstimmen. Die Werte der zu erwartenden Standardabweichungen wurden in Tabelle 7.3 und Tabelle 7.4 eingetragen.

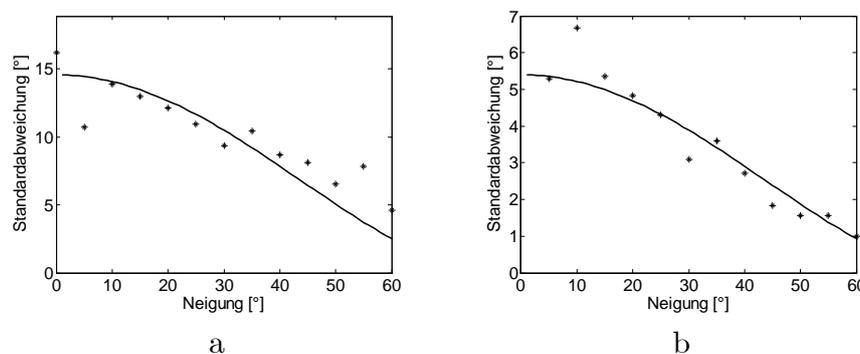


Abbildung 7.12: Die zu erwartende Standardabweichung  $\hat{\sigma}_\varphi$  (Kurve) der Neigungswinkel und die Standardabweichung  $\sigma_\varphi$  (Punkte) der geschätzten Neigungswinkel. a) Wiener-Filter-Methode, b) Korrelations-Methode.

## 7.6 Extraktion von Merkmalen bei bekannter Oberfläche

In dem folgenden Experiment wird die Extraktion der Merkmale *Entfernung*, *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke* durch verschiedene Methoden (Abschnitt 5) bei einer bekannten Oberfläche durchgeführt, um die Grenzleistung der verschiedenen Methoden zu untersuchen. Hierfür wurde entsprechend der Experimente in Abschnitt 7.4.1 wieder eine ebene Oberfläche in einer Entfernung von 100 m positioniert und die Merkmale für mehrere Messungen bestimmt. Für die Experimente wurden Messungen ( $N = 500$ ) der gesendeten und der empfangenen Signalform aufgezeichnet. Die Messung erfolgte auf einer ebenen Messplatte mit spiegelnder Reflexionseigenschaft (polierte Metallplatte), um eine hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis ( $SNR$ ) zu erreichen.

### 7.6.1 Extraktion der Entfernung

In den Abbildungen 7.13(a-g) werden die geschätzten Entfernungswerte gezeigt, die durch verschiedene Methoden extrahiert wurden. Für die Darstellung wurde ein Ent-

fernungsintervall von 0.25 m gewählt. Um die Entfernungsgenauigkeit zu ermitteln, wurde die Standardabweichung der geschätzten Entfernungswerte bestimmt.

Die Genauigkeit der extrahierten Entfernungswerte ist in Tabelle 7.5 aufgeführt. Die Genauigkeit ist bei allen Methoden, abgesehen von der *Peak-Detection*-Methode, sehr hoch mit  $\sigma_{A_1,r} \leq 0.0330$  m. Bedingt durch die Variationen im Signal (Abschnitt 3.1) bewirken lokale Signalmaxima eine große Ungenauigkeit bei der Entfernungsbestimmung durch die *Peak-Detection*-Methode ( $\sigma_{A_1,r} = 0.1134$  m). Der arithmetische Mittelwert der berechneten Entfernung ist bei allen Methoden, abgesehen von der *Centre-of-Gravity-Detection*-Methode, nahe der erwartenden Entfernung von 100 m. Die Abweichung bei der *Centre-of-Gravity-Detection*-Methode lässt sich dadurch erklären, dass bedingt durch ein verzögertes Abklingverhalten des Empfängers sich der Schwerpunkt des empfangenen Signals verschiebt [Mäder, 2006]. Die beiden höchsten Genauigkeiten werden durch die Korrelations-Methode (Abschnitt 5.7) und die Wiener-Filter-Methode (Abschnitt 5.8.2) mit einer Standardabweichung von  $\sigma_{A_1,r} \leq 0.0060$  m erreicht.

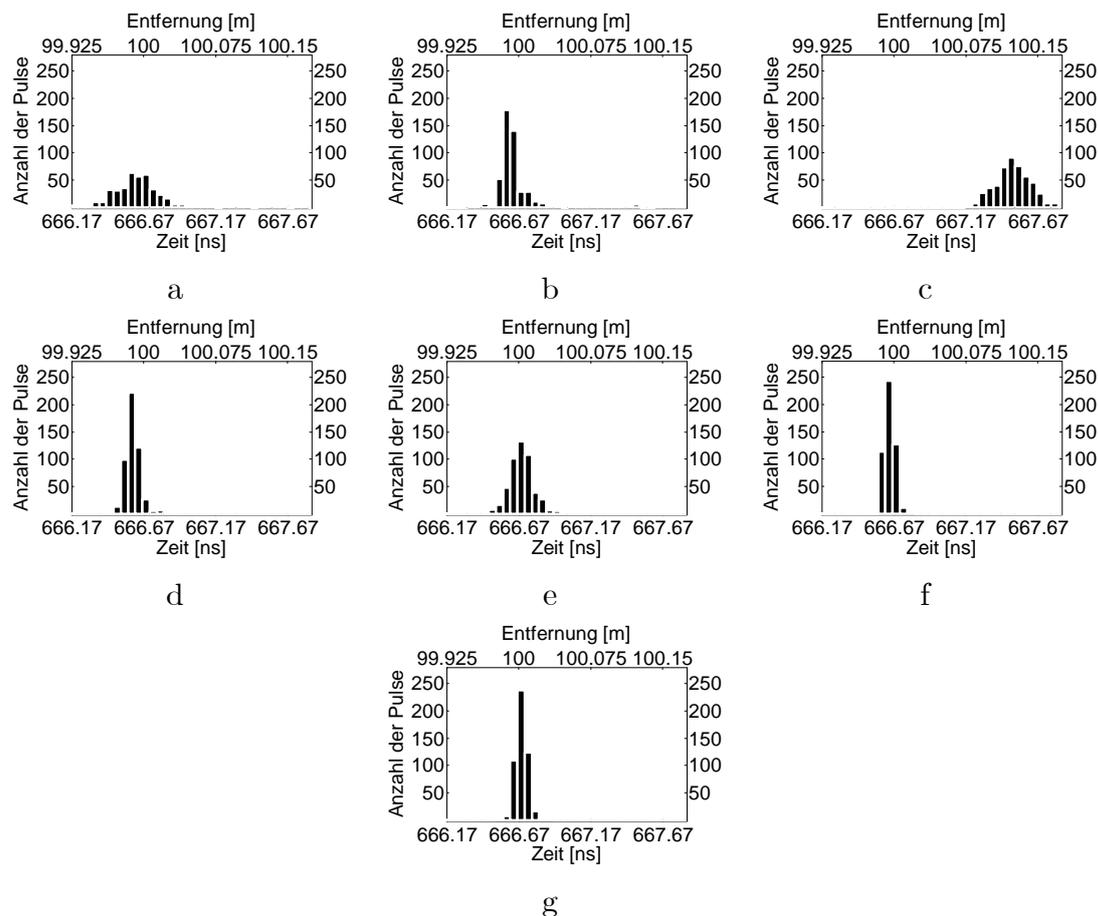


Abbildung 7.13: Histogramme des geschätzten Merkmals *Entfernung* für verschiedene Methoden. a) *Peak-Detection*, b) *Leading-Edge-Detection*, c) *Centre-of-Gravity-Detection*, d) *Constant-Fraction-Detection*, e) *Gaussian-Decomposition*, f) Korrelation, g) Wiener-Filter.

| Methoden                           | $r_{A_1,\min}$ | $\bar{r}_{A_1}$ | $r_{A_1,\max}$ | $\sigma_{A_1,r}$ |
|------------------------------------|----------------|-----------------|----------------|------------------|
| <i>Peak-Detection</i>              | 99.4875 m      | 100.0198 m      | 100.5450 m     | 0.1134 m         |
| <i>Leading-Edge-Detection</i>      | 99.9525 m      | 100.0028 m      | 100.1775 m     | 0.0330 m         |
| <i>Centre-of-Gravity-Detection</i> | 100.0744 m     | 100.1244 m      | 100.1815 m     | 0.0184 m         |
| <i>Constant-Fraction-Detection</i> | 99.9675 m      | 99.9914 m       | 100.0275 m     | 0.0080 m         |
| <i>Gaussian-Decomposition</i>      | 99.6180 m      | 100.0031 m      | 100.4302 m     | 0.0343 m         |
| Korrelation                        | 99.9825 m      | 99.9981 m       | 100.0275 m     | 0.0060 m         |
| Wiener-Filter                      | 99.9765 m      | 99.9971 m       | 100.0202 m     | 0.0058 m         |

Tabelle 7.5: Ergebnisse des geschätzten Merkmals *Entfernung*.

### 7.6.2 Extraktion der Entfernungsvariation

In den Abbildungen 7.14(a-e) werden die geschätzten Werte der Entfernungsvariation dargestellt, die durch verschiedene Methoden extrahiert wurden. Für die Darstellung wurde ein Entfernungsintervall von 0.3 m gewählt. Die Entfernungsvariation schwankt bei der *Peak-Detection*-Methode im Mittel um den Nullpunkt. Eine negative Entfernungsvariation ist physikalisch nicht zu begründen, da die *zeitliche Pulslänge* der empfangenen Signalform nicht kürzer als die *zeitliche Pulslänge* der gesendeten Signalform sein kann. Dies ist alleine auf die Ungenauigkeit bei der Merkmalsextraktion zurückzuführen. Bei der *Centre-of-Gravity-Detection*- und der Korrelations-Methode liegt der arithmetische Mittelwert der Entfernungsvariation etwas oberhalb des Nullpunkts im positiven Bereich. Bei der Wiener-Filter-Methode schwankt die Entfernungsvariation um die zeitliche Pulslänge der Oberflächenantwort von 0.51 ns. Wie bereits in Abschnitt 7.4 erwähnt, ist die zeitliche Pulslänge der Oberflächenantwort abhängig von dem verwendeten Tiefpass und kann bestenfalls 0.3 ns betragen. Um die Genauigkeit der Entfernungsvariation zu ermitteln, wurde die Standardabweichung der geschätzten Werte für die Entfernungsvariation bestimmt.

Die Genauigkeit der extrahierten Werte für die Entfernungsvariation ist in Tabelle 7.6 aufgeführt. Die *Peak-Detection*-Methode hat mit  $\sigma_{A_1,d} = 0.0643$  m die schlechteste Genauigkeit.

Bei der *Centre-of-Gravity-Detection*-Methode ist die Genauigkeit der Entfernungsvariation  $\sigma_{A_1,d} = 0.0232$  m und bei der *Gaussian-Decomposition*-Methode beträgt die Genauigkeit der Entfernungsvariation  $\sigma_{A_1,d} = 0.0555$  m.

Die Genauigkeit der extrahierten Werte für die Entfernungsvariation ist bei der Korrelations-Methode, wie bereits in Abschnitt 5.7 beschrieben, nicht direkt mit den anderen Methoden vergleichbar und die ermittelten Werte müssen deswegen gesondert betrachtet werden. Der arithmetische Mittelwert der berechneten Entfernungsvariation liegt wegen der größeren Ähnlichkeit von benachbarten Werten im Signalverlauf der empfangenen Signalform zur Ähnlichkeit von benachbarten Werten im Signalverlauf der gesendeten Signalform etwas oberhalb des Nullpunkts im positiven Bereich. Dies lässt sich nur damit erklären, dass die empfangene Signalform im Mittel eine größere Ähnlichkeit von benachbarten Werten im Signalverlauf aufweist als die gesendete Signalform.

Die Genauigkeit der Entfernungsvariation bei der Wiener-Filter-Methode ist am höchsten mit  $\sigma_{A_1,d} = 0.0084$  m.

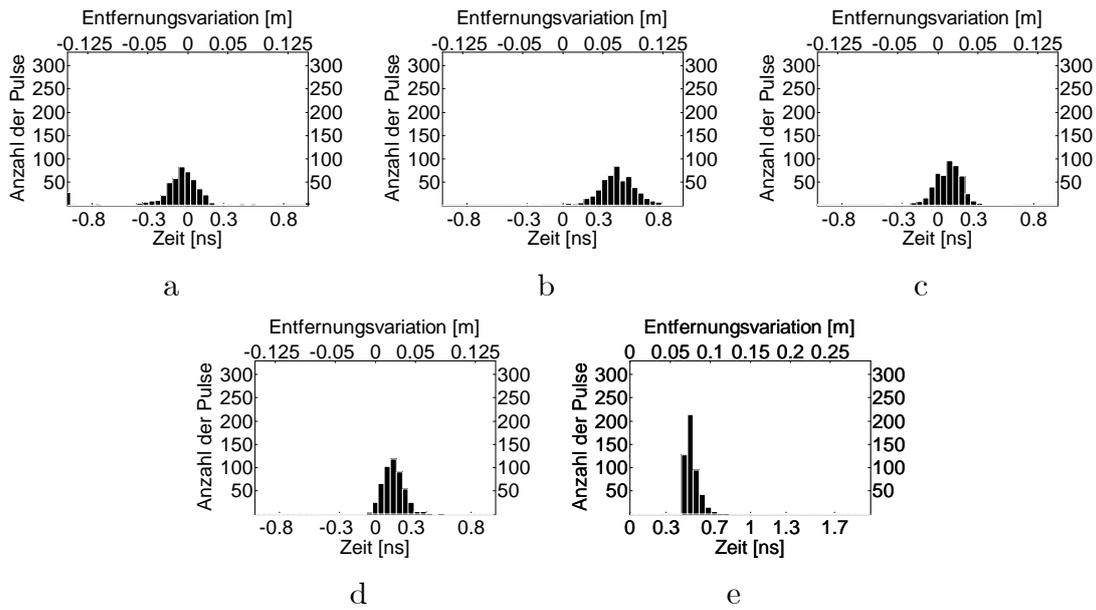


Abbildung 7.14: Histogramme des geschätzten Merkmals *Entfernungsvariation* für verschiedene Methoden. a) *Peak-Detection*, b) *Centre-of-Gravity-Detection*, c) *Gaussian-Decomposition*, d) Korrelation, e) Wiener-Filter.

| Method                             | $d_{A_1, \min}$ | $\bar{d}_{A_1}$ | $d_{A_1, \max}$ | $\sigma_{A_1, d}$ |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| <i>Peak-Detection</i>              | -0.3375 m       | -0.0144 m       | 0.4275 m        | 0.0643 m          |
| <i>Centre-of-Gravity-Detection</i> | -0.0450 m       | 0.0686 m        | 0.1500 m        | 0.0232 m          |
| <i>Gaussian-Decomposition</i>      | -0.5740 m       | 0.0138 m        | 0.6181 m        | 0.0555 m          |
| Korrelation                        | -0.0075 m       | 0.0230 m        | 0.1725 m        | 0.0148 m          |
| Wiener-Filter                      | 0.0640 m        | 0.0769 m        | 0.1200 m        | 0.0084 m          |

Tabelle 7.6: Ergebnisse des geschätzten Merkmals *Entfernungsvariation*.

### 7.6.3 Extraktion der Reflexionsstärke

Die Genauigkeit für die extrahierte Reflexionsstärke kann für jede Methode einzeln bestimmt werden, ein direkter Vergleich zueinander ist jedoch nicht möglich. Dies ist dadurch bedingt, dass die extrahierten Merkmale der einzelnen Methoden unterschiedlich berechnet werden, die nicht zueinander in Bezug gesetzt werden können. Für einen direkten Vergleich sind zusätzliche Messungen mit Oberflächen, die aus Materialien mit kalibrierten Reflektanzeigenschaften bestehen, notwendig. Diese waren zum Zeitpunkt der Ausführung der Experimente nicht vorhanden. Deswegen sind die Resultate nur sehr eingeschränkt für die jeweilige Methode nutzbar.

Es wird die bestimmte Genauigkeit der Reflexionsstärke als Histogramm in den Abbildungen 7.15(a-e) gezeigt und die dazugehörigen charakteristischen Werte in Tabelle 7.7 aufgeführt. Bei der *Centre-of-Gravity-Detection*-Methode wurde die Verteilung der Reflexionsstärke mittelwertfrei dargestellt.

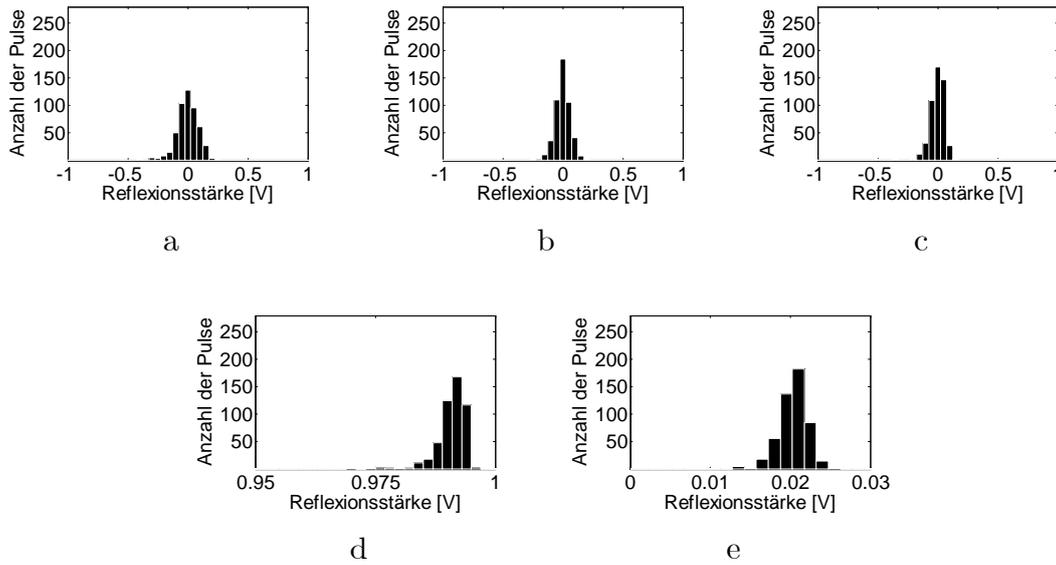


Abbildung 7.15: Histogramme des geschätzten Merkmals *Reflexionsstärke* für verschiedene Methoden. a) *Peak-Detection*, b) *Centre-of-Gravity-Detection*, c) *Gaussian-Decomposition*, d) Korrelation, e) Wiener-Filter.

| Method                             | $a_{A_1, \min}$ | $\bar{a}_{A_1}$ | $a_{A_1, \max}$ | $\sigma_{A_1, a}$ |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| <i>Peak-Detection</i>              | -0.4052 V       | 0 V             | 0.2371 V        | 0.0858 V          |
| <i>Centre-of-Gravity-Detection</i> | -0.2343 V       | 0 V             | 0.1809 V        | 0.0599 V          |
| <i>Gaussian-Decomposition</i>      | -0.4867 V       | 0 V             | 0.5113 V        | 0.0638 V          |
| Korrelation                        | 0.9708 V        | 0.9909 V        | 0.9957 V        | 0.0031 V          |
| Wiener-Filter                      | 0.0129 V        | 0.0204 V        | 0.0254 V        | 0.0018 V          |

Tabelle 7.7: Ergebnisse des geschätzten Merkmals *Reflexionsstärke*.

## 7.7 Extraktion von Merkmalen bei einer gemessenen Szene

In diesem Abschnitt werden die Merkmale einer gemessenen Szene (Abbildung 6.4) durch die Wiener-Filter-Methode und die *Peak-Detection*-Methode extrahiert. Bei den gewählten Methoden lassen sich die extrahierten Merkmale direkt miteinander vergleichen.

Die gemessene Szene beinhaltet sowohl „*man-made*“ als auch natürliche Objekte. Die „*man-made*“ Objekte der gemessenen Szene sind beispielsweise Gebäude, Straßen, Fahrzeuge und Parkbuchten. Die natürlichen Objekte der Szene sind beispielsweise Bäume, Büsche und Wiese. Die Extraktion erfolgte ohne Berücksichtigung von räumlichen Nachbarschaften, damit die Bewertung alleine anhand der extrahierten Merkmale vorgenommen werden kann. In der Praxis können räumliche Nachbarschaften bei der Auswertung berücksichtigt werden. Es kann beispielsweise eine Auswertung von benachbarten Intensitätswerten im Datenquader durch Approximation von Geradenstücken mit der Hough-Transformation erfolgen, um Hinweise für geradlinige Strukturen (beispielsweise Wände und Dächer von Gebäuden) zu erhalten [Jutzi *et al.*, 2005a; Jutzi & Stilla, 2005a; Jutzi & Stilla, 2005d]. Wird die Amplitude der Signalform für jeden rückgestreuten Laserpuls extrahiert und die räumliche Position für die Auswer-

tung berücksichtigt, können Kanten (beispielsweise die Dachkante von Gebäuden) mit Subpixelgenauigkeit [Vosselman, 2002; Jutzi *et al.*, 2005b] bestimmt werden.

Die Aufzeichnung des Datenquaders erfolgte entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 6.4. Die Szene wurde mit einem Abtastraster von  $320 \times 600$  Punkten erfasst. Es wurde sowohl das gesendete als auch das empfangene Signal aufgezeichnet. Die Grenzfrequenz  $f_g$  der verwendeten Empfänger ist 250 MHz und die Abtastung beider Signale erfolgte mit 20GSamples/s.

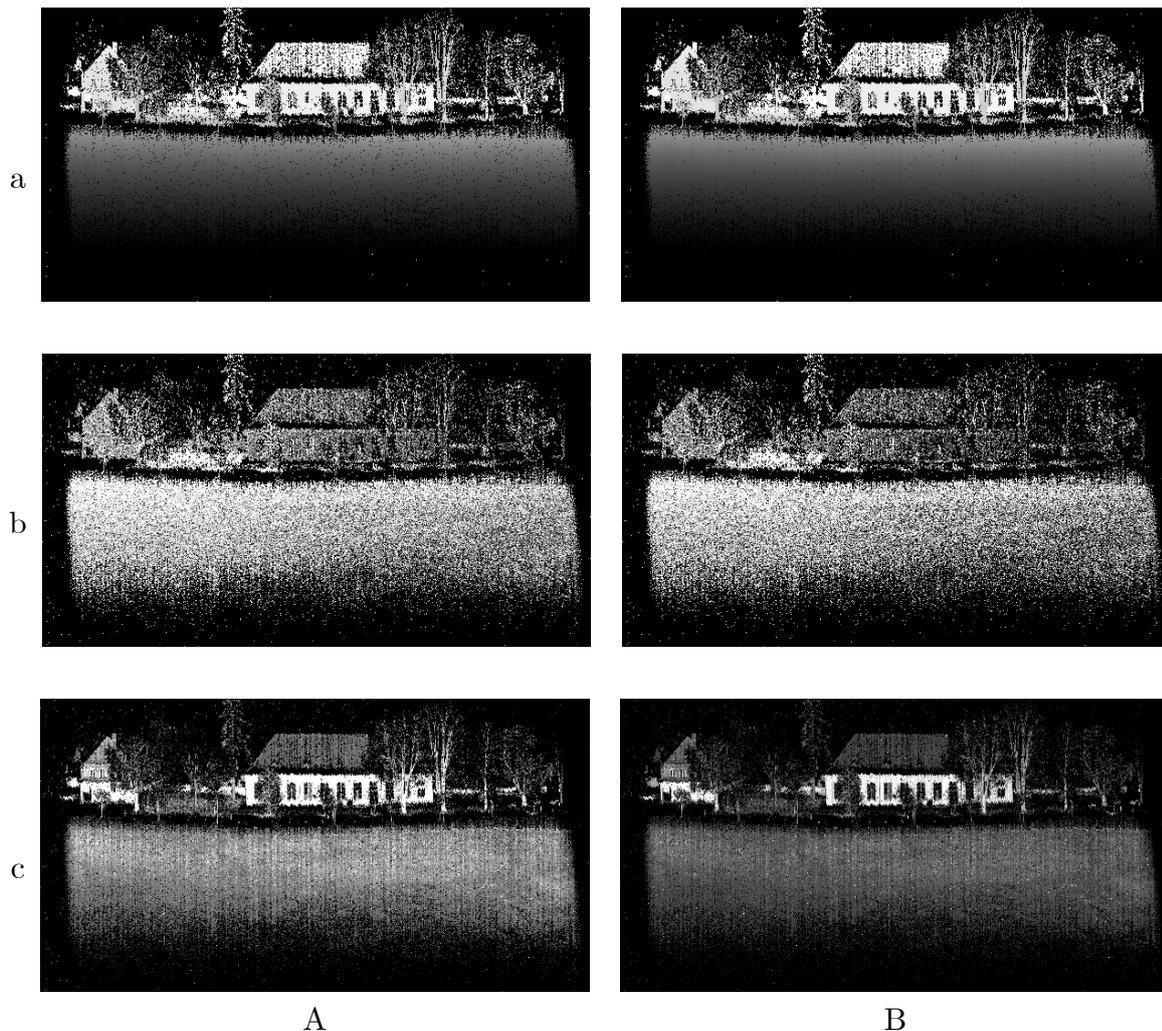


Abbildung 7.16: Darstellung der extrahierten Merkmale der Szene. a) Entfernungsbild, b) Entfernungsvariationsbild, c) Reflexionsstärkebild. Spalte A) Wiener-Filter-Methode, Spalte B) *Peak-Detection*-Methode.

Für die Analyse der Signalform werden zuerst die Bereiche des Signals, in denen sich ausgeprägte Pulse befinden, detektiert. Mit der Wiener-Filter-Methode (Abschnitt 5.8) werden daraus die Merkmale der Oberflächenantwort aus der Signalform für die gesamte Szene bestimmt. Zum direkten Vergleich wurden auch mit der *Peak-Detection*-Methode (Abschnitt 5.2) die Merkmale für die gesamte Szene berechnet.

Die Ergebnisse für die extrahierten Merkmale werden in Abbildung 7.16 dargestellt. Große Werte der Merkmale werden bei der Darstellung durch hohe Helligkeitswerte repräsentiert. Da bei der Darstellung nur ein einzelner Wert im Abtastraster von  $320 \times 600$

Punkten gezeigt werden kann, wird bei Mehrfachreflexionen nur die Reflexion mit der größten *Reflexionsstärke* berücksichtigt. Spalte A in Abbildung 7.16 zeigt die extrahierten Merkmale der Szene, die mit der Wiener-Filter-Methode berechnet wurden. Spalte B in Abbildung 7.16 zeigt die extrahierten Merkmale der Szene, die mit der *Peak-Detection*-Methode berechnet wurden. Das Entfernungsbild ist in den Abbildungen 7.16a, das Entfernungsvariationsbild in den Abbildungen 7.16b und das Reflexionsstärkebild in den Abbildungen 7.16c dargestellt. Die Ergebnisse, die durch die beiden Methoden berechnet wurden, zeigen keine wesentliche Unterschiede. Es ist ersichtlich, dass für die Strasse vor dem Hauptgebäude in der Mitte der Szene keine Merkmale bestimmt werden konnten, wegen der geringen Reflektanz der Strassenoberfläche. Im vorderen Bereich des Daches des Hauptgebäudes sind ebenfalls Lücken zu beobachten. Ebenso treten einzelne Falschdetektionen im Bereich des Himmels auf. Das Reflexionsstärkebild lässt sich sehr gut mit dem Foto der aufgenommenen Szene in Abbildung 6.4 vergleichen. Es ist ersichtlich, dass besonders die weiße Fassade des Hauptgebäudes eine hohe *Reflexionsstärke* besitzt. Die Fahrzeuge, die auf dem Foto der aufgenommenen Szene zu sehen sind, waren bei der Messung nicht alle vorhanden. Die *Entfernungsvariation* ist in Bereichen links neben dem Hauptgebäude geringfügig erhöht und bei dem Hauptgebäude etwas geringer als im Rest der Szene. Die Wiese besitzt höhere Werte als die Gebäude. Außerdem ist ersichtlich, dass bei der Wiese die *Entfernungsvariation* mit der Entfernung zunimmt. Es ist ersichtlich, dass die *Entfernungsvariation* der gesamten Szene starken Rauscheinflüssen unterliegt.

Darüber hinaus werden Histogramme von der *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke* berechnet und in den Abbildungen 7.17 visualisiert, um die extrahierten Merkmale zu bewerten. Die Verteilung der *Entfernungsvariation* (Abbildung 7.17Aa), welche mit der Wiener-Filter-Methode berechnet wurde, liegt oberhalb der zeitlichen Länge der Impulsantwort, die von einem Empfänger mit einer Grenzfrequenz von 250 MHz zu erwarten ist. Die zeitliche Länge der Impulsantwort der Empfänger wurde in Abschnitt 7.3 mit  $w_g = 1.25$  ns berechnet und mit  $w_g = 0.73$  ns gemessen. Um ein hohes *SNR* für das gemessene empfangene Signal zu erhalten, wurde die Tiefpassfilterung (Abschnitt 5.8.2) bei der Wiener-Filter-Methode angepasst. Dies hat zur Folge, dass sich die zeitliche Pulslänge  $w_A$  der Oberflächenantwort deutlich erhöht. Aus diesem Grund ist der minimale Wert der Verteilung im Histogramm 2.4 ns. Die Verteilung der *Entfernungsvariation* (Abbildung 7.17Ba), welche mit der *Peak-Detection*-Methode berechnet wurde, ist teilweise negativ. Physikalisch ist eine negative *Entfernungsvariation* nicht zu begründen, da die *zeitliche Pulslänge* der empfangenen Signalform nicht kürzer als die zeitliche Pulslänge der gesendeten Signalform sein kann. Die Ursache hierfür ist die Ungenauigkeit bei der Merkmalsextraktion. Der Verlauf der beiden Histogramme für die *Entfernungsvariation* ist nicht identisch, was sich auch anhand der vorliegenden Merkmalsbilder nicht verifizieren lässt. Der Verlauf der beiden Histogramme für die *Reflexionsstärke* (Abbildungen 7.17b) ist nahezu identisch. Die Verteilung der *Reflexionsstärke* (Abbildung 7.17Bb), welche mit der *Peak-Detection*-Methode berechnet wurde, ist stark quantisiert. Dies ist durch die ganzzahligen Messwerte bedingt. Für die Darstellung wurde der Bereich mit der Anzahl der Pulse angepasst.

Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen *Reflexionsstärke* und *Entfernungsvariation* für die gemessene Szene untersucht, um daraus mögliche Objektidentifikationsmöglichkeiten abzuleiten. Die Untersuchung erfolgte für die gesamte Szene und für drei ausgewählte Objekte der Szene. Die ausgewählten Objekte der Szene sind Ge-

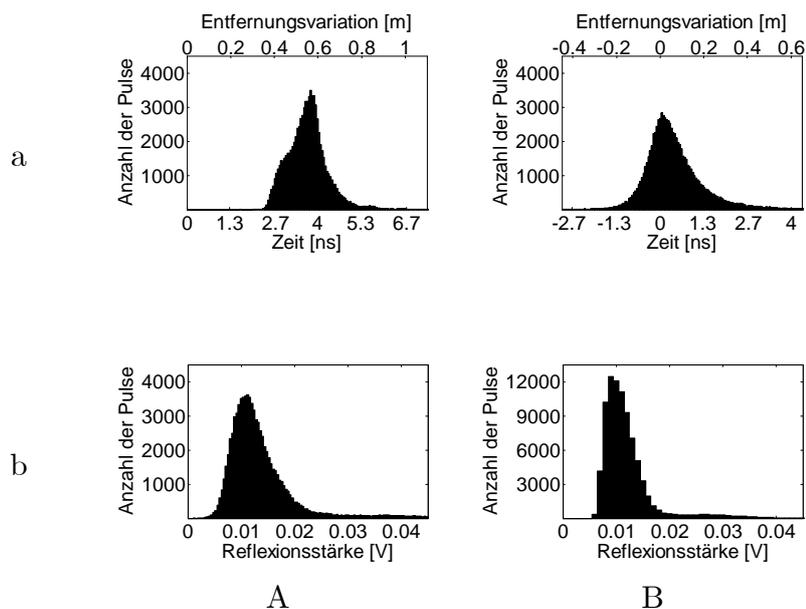


Abbildung 7.17: Histogramme der extrahierten Merkmale der Szene. a) *Entfernungsvariation*, b) *Reflexionsstärke*. Spalte A) Wiener-Filter-Methode, Spalte B) *Peak-Detection*-Methode.

bäude, Bäume und Wiese. Die Entfernungsbilder der Szene (Abbildung 7.18Aa) und der ausgewählten Objekte (Abbildung 7.18Ab-7.18Ad) wurden zur Veranschaulichung dargestellt. Die Berechnung der Merkmale *Reflexionsstärke* und *Entfernungsvariation* erfolgte mit der Wiener-Filter-Methode. Um den Zusammenhang zwischen den extrahierten Merkmalen zu verdeutlichen, wurde die *Reflexionsstärke* der *Entfernungsvariation* gegenübergestellt (Abbildung 7.18, Spalte B).

In den Abbildungen 7.18Aa und 7.18Ba wird die gesamte Szene den ausgewählten Objekten der Szene gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass bei kleinen Werten für die *Reflexionsstärke* eine größere Streuung bei den Werten für die *Entfernungsvariation* vorliegt. Es ist zu erwarten, dass die *Entfernungsvariation* bei Vegetation (Bäume und Wiese) größer ist, als bei einer ebenen Oberfläche mit geringer Neigung (Fassade des Gebäudes). Bei dem Gebäude wird durch Abbildung 7.18Bb ersichtlich, dass die *Entfernungsvariation* vergleichsweise gering ist und die *Reflexionsstärke* sich über einen großen Bereich verteilt. Die *Reflexionsstärke* ist zudem geringfügig höher als bei den Bäumen und der Wiese. Diese erhöhte *Reflexionsstärke* lässt sich durch die weiße Fassade erklären. Es kann davon ausgegangen werden, dass die weiße Fassade eine hohe Reflektanz besitzt. Bei den Bäumen wird durch Abbildung 7.18Bc gezeigt, dass die *Entfernungsvariation* eine beträchtliche Streuung aufweist und eine geringe *Reflexionsstärke* gegeben ist. Bei der Wiese, im vorderen Bereich der Szene, wird durch Abbildung 7.18Bd gezeigt, dass die *Entfernungsvariation* ebenfalls eine beträchtliche Streuung aufweist und eine geringe *Reflexionsstärke* vorliegt. Es ist ersichtlich, dass sowohl für die Bäume als auch für die Wiese eine höhere *Entfernungsvariation* als für das Gebäude bestimmt wurde.

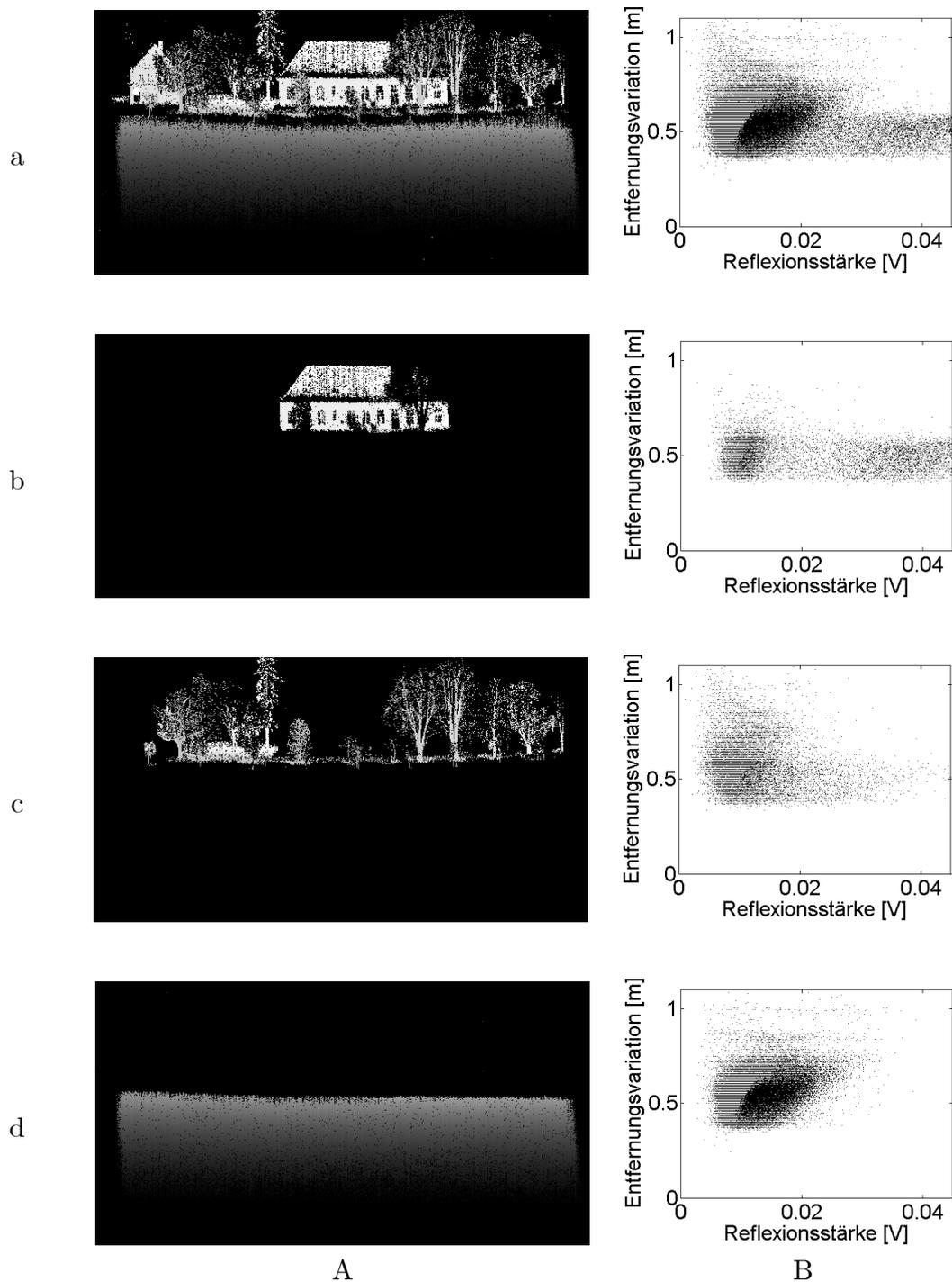


Abbildung 7.18: Gegenüberstellung der *Reflexionsstärke* und der *Entfernungsva-riation* für die gesamte Szene und ausgewählte Objekte. a) Szene, b) Gebäude, c) Bäume, d) Wiese. Spalte A) Entfernungsbild, Spalte B) *Reflexionsstärke* gegenüber *Entfernungsva-riation*.

## 8 Diskussion

In dieser Arbeit wurden verschiedene Experimente zur Analyse der zeitlichen Signalform von Laserpulsen durchgeführt, die gezeigt haben, dass bei dem verwendeten Lasersystem die Form der Signale stark variiert. Die Variation ist in Abbildung 7.1 anhand einer Überlagerung von 500 gesendeten Signalformen gezeigt. Allen Signalformen gemeinsam ist offenbar ein steiler Anstieg und ein etwas flacherer Abfall. Das Signal dazwischen variiert stark. Zur Modellierung dieser Signalform wurde eine Gaußform mit zufälliger Modulation gewählt (Abschnitt 3.1). Es zeigt sich, dass die für die gesendete Signalform angesetzte Modellierung nur als sehr grobe Näherung angesehen werden kann. Durch weiterführende Untersuchungen zur Entstehung des Laserpulses könnten wichtige Hinweise für die gesendeten Signalform gewonnen werden, um die Modellierung zu erweitern und zu verfeinern.

Das Strahlprofil hat unterschiedliche Verteilungen im Nah- und Fernfeld. Das Strahlprofil des verwendeten Lasers wurde im Nahfeld durch eine zylinderförmige Verteilung modelliert. Die Messung im Nahfeld zeigt, dass das Strahlprofil gut approximiert wird (Abbildung 7.2). Es sind lediglich geringe lokale Intensitätsschwankungen auf der Kreisfläche zu beobachten. Die Flanke steigt im Randbereich steil an und der steile Anstieg zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem Modell. Der Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld wird durch die Rayleigh-Entfernung bestimmt. Die Rayleigh-Entfernung für das Experimentalsystem beträgt ungefähr 1800 m. Die maximale Entfernung aller durchgeführten Experimente lag deutlich unterhalb der Rayleigh-Entfernung. Oberhalb der Rayleigh-Entfernung ist ein gaußförmiges Strahlprofil zu erwarten.

Bei den Untersuchungen in den Abschnitten 7.4 und 7.6 erfolgten die Messungen unter Verwendung von polierten Metallplatten als Oberflächen. Diese Oberflächen besitzen eine spiegelnde Reflexionseigenschaft. Sie wurden verwendet, um ein möglichst hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis ( $SNR$ ) zu erreichen. Dadurch konnte die Signalform mit hoher Qualität erfasst werden und Grenzleistungen der Analyse bestimmt werden. Bei natürlichen Szenen wird man jedoch selten solche spiegelnde Oberflächen mit idealer Lage vorfinden. Spiegelnde Oberflächen würden bei suboptimaler Lage den Puls nicht zum Empfänger zurücksenden. Für diffuse Oberflächen mit hoher Reflektanz werden Resultate erwartet, die unterhalb der Grenzleistung liegen. Bei geringer Reflektanz würden die Resultate deutlich unterhalb liegen. Untersuchungen zu den Grenzleistungen bei geringer Reflektanz wurden jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht vorgenommen.

Es wurden Experimente zur Bestimmung der Länge der Impulsantwort für Empfänger mit den Grenzfrequenzen 250 MHz, 750 MHz, 1 GHz und 6 GHz durchgeführt (Abbildung 7.4). Sehr gute Übereinstimmung zwischen der gemessenen und der berechneten Länge ist bei den Grenzfrequenzen 750 MHz und 1 GHz gegeben. Es ergeben sich jedoch Abweichungen bei den Grenzfrequenzen 250 MHz und 6 GHz, die sich damit erklären lassen, dass der für die Anregung verwendete Laserpuls nicht notwendigerweise alle Frequenzenanteile gleichmäßig enthält. Abweichungen sind auch deswegen zu erwarten, weil die Angaben der Hersteller zu den Grenzfrequenzen nicht verifiziert wurden.

Die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Länge der Impulsantwort und der Grenzfrequenz der Empfänger ist ein wichtiger Aspekt, da die Länge der Impulsantwort zugleich der untere Grenzwert für die Länge der Oberflächenantwort ist. In

Abhängigkeit von der Grenzfrequenz kann die Länge der Oberflächenantwort wesentlich kürzer als die Länge der verwendeten gesendeten Signalform sein. Ist die Länge der Oberflächenantwort kürzer als die Länge der gesendeten Signalform, stellt diese Verbesserung einen wesentlichen Gewinn dar, wodurch beispielsweise die Trennung von zwei Oberflächen, die sich in geringem Abstand zueinander befinden, deutlich verbessert werden kann.

Zur Untersuchung der Entfernungsunterscheidung von zwei Oberflächen wurden in 100 m Entfernung Entfernungsunterschiede von 0.15 m, 0.30 m und 0.75 m gewählt. Beide Messplatten wurden möglichst so ausgerichtet, dass jeweils die Hälfte des *Footprints* eine Messplatte beleuchtet. Auffällig ist bei den Entfernungsunterschieden von 0.30 m (Abbildungen 7.8) und 0.75 m (Abbildungen 7.9), dass die Amplituden der Oberflächenantworten stark unterschiedlich ausgeprägt sind. Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei der Versuchsanordnung offenbar nicht exakt die Hälfte des *Footprints* auf jeder Messplatte abgebildet wurde und deswegen die rückgestreute Energie für die Oberflächenantworten unterschiedlich ist. Beim Entfernungsunterschied von 0.30 m war die beleuchtete Fläche auf der Messplatte in einer Entfernung von 100 m kleiner als bei der Messplatte in einer Entfernung von 100.30 m. Beim Entfernungsunterschied von 0.75 m war die beleuchtete Fläche auf der Messplatte in einer Entfernung von 100 m größer als bei der Messplatte in einer Entfernung von 100.30 m. Je höher die rückgestreute Energie, desto geringer ist die Standardabweichung der geschätzten Entfernungswerte. Die Standardabweichung der geschätzten Entfernungswerte ist bei allen Experimenten kleiner gleich 0.0109 m. Die Ergebnisse der mittleren Abstände zwischen den beiden Messplatten mit 0.1550 m, 0.2978 m und 0.7532 m aus Tabelle 7.2 stimmen sehr gut mit dem für die Versuchsanordnung gewählten Entfernungsunterschied überein. Dies zeigt, dass die Unterscheidbarkeit von zwei Bereichen mit einem Entfernungsunterschied kleiner oder gleich der Pulslänge mit hoher Genauigkeit möglich ist.

Der Vergleich zwischen den beiden Methoden Wiener-Filter und Korrelation zur Schätzung der Neigung einer ebenen Oberfläche zeigt, dass die Wiener-Filterung nur dann brauchbar ist, wenn mindestens  $15^\circ$  Neigung vorliegen, ansonsten versagt dieses Verfahren (Tabelle 7.3). Bei der Korrelation muss mindestens  $10^\circ$  Neigung gegeben sein, damit brauchbare Werte bestimmt werden können (Tabelle 7.4). Mit zunehmender Neigung erhöht sich die Genauigkeit für die geschätzten Neigungswinkel. Für die Schätzung der Neigung wird durch die Korrelation eine deutlich höhere Genauigkeit erreicht als durch die Wiener-Filterung. Der Nachteil hierbei ist, dass für die Berechnung durch die Korrelations-Methode ein hoher Rechenaufwand notwendig ist. Abschließend ist zu bemerken, dass die Messung für diese Untersuchung unter Laborbedingungen durchgeführt wurde. Bei natürlichen Szenen ist zu erwarten, dass die Aussagekraft der geschätzten Parameter gering ist.

Die Bestimmung der Oberflächenantwort ermöglicht eine von der gesendeten Signalform unabhängige Beschreibung der Oberfläche. Mit dem Levenberg-Marquardt-Verfahren, angewendet auf die Oberflächenantwort, werden die Parameter *zeitliche Position*, *zeitliche Pulslänge* und *Amplitude* geschätzt. Aus diesen Parametern werden die Merkmale in Form von *Entfernung*, *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke* gewonnen.

Mit den in Abschnitt 5 vorgestellten Methoden wird die Genauigkeit der extrahierten Merkmale miteinander verglichen. Die höchste Genauigkeit für die Bestimmung der *Entfernung* in 100 m wird von der Wiener-Filter-Methode mit 0.0058 m erreicht,

gefolgt von der Korrelations-Methode mit 0.0060 m. Die erzielten Genauigkeiten sind für ein gepulstes Lasersystem ein sehr gutes Resultat, verglichen mit den bekannten Werten operationeller Lasersysteme [Baltsavias, 1999b].

Bei der *Entfernungsvariation* wird die höchste Genauigkeit durch die Wiener-Filter-Methode erreicht mit 0.0084 m. Hierbei schwankt die *Entfernungsvariation* um die zeitliche Pulslänge der Oberflächenantwort. Bei der *Centre-of-Gravity-Detection*-Methode liegen die ermittelten Werte etwas oberhalb des Nullpunkts im positiven Bereich. Der Grund hierfür ist ein systematischer Fehler, der auf das geringfügig verzögerte Abklingverhalten der empfangenen Signalform zurückzuführen ist. Durch das verzögerte Abklingverhalten kommt es zu einer Verschiebung des Schwerpunktes des empfangenen Signals, jedoch nicht des gesendeten Signals. Dadurch ist der Wert für die *Entfernungsvariation* systematisch zu groß. Durch Anpassung der Integrationsgrenzen könnte dies kompensiert werden. In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass eine negative *Entfernungsvariation* physikalisch nicht zu begründen ist. Die zeitliche Pulslänge der empfangenen Signalform kann nicht kürzer als die zeitliche Pulslänge der gesendeten Signalform sein. Die Ursache hierfür ist alleine auf die Ungenauigkeit bei der Merkmalsextraktion zurückzuführen. Bei der Korrelations-Methode können die ermittelten Werte der *Entfernungsvariation* nicht direkt mit den anderen Methoden verglichen werden (Abschnitt 5.7).

Die ermittelte Genauigkeit der durch die vorgestellten Methoden berechneten *Reflexionsstärken* kann nicht direkt miteinander verglichen werden, da hierfür unterschiedliche Berechnungen zugrunde liegen. Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, sind zusätzliche Messungen mit Oberflächen, die aus Materialien mit kalibrierten Reflektanzeigenschaften bestehen, notwendig. Diese waren zum Zeitpunkt der Ausführung der Experimente nicht vorhanden.

Die Extraktion der Merkmale *Entfernung*, *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke* für eine gemessene Szene erfolgte durch die Methoden Wiener-Filter und *Peak-Detection*, da deren Resultate direkt vergleichbar sind. Die *Reflexionsstärke* lässt sich sehr gut mit dem Foto der aufgenommenen Szene in Abbildung 6.4 vergleichen. Bei der *Entfernungsvariation* sind starke Rauscheinflüsse zu beobachten. Es ist ersichtlich, dass die Wiese höhere Werte als die Gebäude besitzt. Außerdem ist zu bemerken, dass bei der Wiese die *Entfernungsvariation* mit der Entfernung zunimmt. Eine zusätzliche differenzierte entfernungsabhängige Untersuchung der *Entfernungsvariation* unter Berücksichtigung des Neigungswinkels der zugrundeliegenden Oberfläche würde sicherlich eine verfeinerte Bewertung dieser Ergebnisse ermöglichen. Eine Klassifikation der in der Szene enthaltenen Objekte, alleine anhand der *Entfernungsvariation*, erscheint wegen der starken Rauscheinflüsse schwierig. Durch Kombination der Merkmale *Reflexionsstärke* und *Entfernungsvariation* ergeben sich bessere Objektidentifikationsmöglichkeiten.

Abschließend ist zu bemerken, dass die in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Methoden zur Extraktion von Merkmalen für Daten verwendet werden können, die sowohl mit terrestrischen als auch mit luftgestützten Lasersystemen erfasst werden. Für die gezeigten Untersuchungen wurden ausschließlich terrestrisch gemessene Daten verwendet. Die Daten wurden mit einem stationären Experimentalsystem erfasst. Abgesehen von den systembedingten Besonderheiten von terrestrischen und luftgestützten Lasersystemen, beispielsweise durch die Größe des *Footprints* oder die unterschiedlich starke atmosphärische Beeinflussung, sind die erzielten Ergebnisse allgemeingültig.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

### 9.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde das Potential der Analyse der empfangenen zeitlichen Signalform von rückgestreuten Laserpulsen an verschiedenen Beispielen gezeigt.

Bei Lasersystemen mit starken Variationen im Signalverlauf von Puls zu Puls und innerhalb des Signals ist es notwendig, dass sowohl die gesendete als auch die empfangene Signalform getrennt erfasst und verarbeitet werden. Mit einer getrennten Verarbeitung können die Veränderungen im Signalverlauf bei der Auswertung berücksichtigt werden. Die Grenzfrequenzen der verwendeten Photodioden und Verstärker beeinflussen die tatsächliche Signalform. Der Einfluss der verwendeten Komponenten auf die erfasste Signalform lässt sich durch Messung der Impulsantwort der Empfangseinheit bestimmen. Die Länge der Impulsantwort ist das wesentliche Merkmal, welches die Signalform beeinflusst. Es wurde gezeigt, dass die gemessene Länge tendenziell mit der berechneten Länge der Impulsantwort für die verschiedenen Grenzfrequenzen der Empfangseinheiten übereinstimmt. Dieser Zusammenhang ist wichtig für die Auswertung mit der Wiener-Filter-Methode, da die Länge der Impulsantwort zugleich der untere Grenzwert für die Länge der Oberflächenantwort ist. In Abhängigkeit von der Grenzfrequenz der verwendeten Empfangseinheit kann die Länge der Oberflächenantwort wesentlich kürzer als die Länge der gesendeten Signalform sein. Ist die Länge der Oberflächenantwort kürzer als die Länge der gesendeten Signalform, kann die Trennbarkeit bei gepulsten Lasersystemen deutlich verbessert werden. Dies wurde durch experimentelle Untersuchungen nachgewiesen. Dies ist für die Praxis von Interesse, wenn mehrere Bereiche mit geringer unterschiedlicher Entfernung (beispielsweise Objektkanten oder Vegetation) getrennt erfasst werden sollen.

Darüber hinaus wurde die Oberflächenantwort zur Bestimmung der Neigung einer ebenen Oberfläche verwendet. Mit den Methoden Wiener-Filter und Korrelation wurden dafür zwei unterschiedliche Vorgehensweisen vorgestellt. Bei der Wiener-Filterung wird die Oberflächenantwort direkt aus der gesendeten und der empfangenen Signalform berechnet. Aus der zeitlichen Pulslängenänderung wird der Neigungswinkel der Oberfläche geschätzt. Die Ergebnisse der durchgeführten Experimente zeigen, dass die geschätzten Neigungswinkel mit erheblichen Abweichungen behaftet sind. Bei der Korrelations-Methode wird die optimale Übereinstimmung zwischen der gemessenen gesendeten Signalform und jener Form bestimmt, die sich ergibt, wenn man für jeweils variierende Neigungswinkel ein signalangepasstes Filter anwendet. Mit Optimierung des Korrelationskoeffizienten durch Variation des Neigungswinkels ergibt sich eine deutlich höhere Genauigkeit der Schätzung. Der Nachteil hierbei ist, dass für die Berechnung ein hoher Rechenaufwand notwendig ist.

In der vorliegenden Arbeit wurden mögliche Merkmale und verschiedene Methoden zu deren Gewinnung vorgestellt, um die Grenzleistung für die Objektdetektion mit gepulsten Lasersystemen zu bestimmen. Für die Entwicklung der Verfahren wurde eine Simulationsumgebung geschaffen. Bei der Auswertung von Messungen wurden für das Merkmal *Entfernung* die beiden höchsten Genauigkeiten durch die Korrelations-Methode und die Wiener-Filter-Methode erreicht. Dies zeigt, dass die höchsten Genauigkeiten dann erreicht werden, wenn die Signalform in die Analyse einfließt und die Formen miteinander verglichen werden können. Die in den Experimenten erzielten Genauigkeiten sind sehr gute Ergebnisse, verglichen mit operationellen luftgestützten

Lasersystemen [Baltsavias, 1999b]. Es konnte gezeigt werden, dass bei der Auswertung des Merkmals *Entfernungsvariation* die Wiener-Filter-Methode die höchste Genauigkeit liefert. Die erzielten Ergebnisse für das Merkmal *Reflexionsstärke* können nicht zueinander in Bezug gesetzt werden. Deswegen erfolgt keine Bewertung hinsichtlich der Genauigkeit. Um eine Bewertung zu ermöglichen, hätten aufwendige Messungen mit Oberflächen, die aus Materialien mit kalibrierten Reflektanzeigenschaften bestehen, durchgeführt werden müssen. Die Resultate sind deswegen nur sehr eingeschränkt nutzbar.

Abschließend wurden die Merkmale einer gemessenen Szene extrahiert. Stellvertretend für die untersuchten Methoden wurden die Merkmale durch die Methoden Wiener-Filter und die *Peak-Detection* berechnet. Es wurden die Merkmale *Entfernung*, *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke* für die vorliegende Szene bestimmt. Eine Klassifikation der in der Szene enthaltenen Objekte, alleine anhand der *Entfernungsvariation*, ist nicht erfolversprechend. Die Merkmale *Reflexionsstärke* und *Entfernungsvariation* zusammen ergeben bessere Objektidentifikationsmöglichkeiten. Um eine aussagekräftige Klassifikation zu erzielen, sind zukünftige Forschungsarbeiten erforderlich.

## 9.2 Ausblick

Die Analyse der zeitlichen Signalform bei gepulsten Lasersystemen stellt viele weitere wissenschaftliche Fragestellungen, sowohl hinsichtlich der Beschreibung von „*man-made*“ als auch von natürlichen Objekten. In dieser Arbeit konzentrierte sich die Analyse der zeitlichen Signalform primär auf „*man-made*“ Objekte. Detaillierte Untersuchungen von natürlichen Objekten wurden im Rahmen dieser Dissertation nicht durchgeführt. Sie stellen aber ein interessantes Forschungsziel für die Zukunft dar.

Im Folgenden werden einige spezielle Fragestellungen aufgegriffen, die zusätzliches Potential zu den gezeigten Untersuchungen beinhalten:

- Eine Vorsegmentierung zur automatischen Bestimmung von Oberflächenprimitiven in Form von ebenen Oberflächen kann im ersten Schritt anhand von ausgeprägten Merkmalen erfolgen. Im folgenden Schritt kann unter Berücksichtigung der Oberflächengeometrie in der räumlichen Nachbarschaft die Segmentierung zusätzlich verfeinert werden. Hierfür kann für teilweise verdeckte Bereiche eine Prädiktion für die zu erwartenden Entfernungswerte erfolgen. Unter Verwendung der zu erwartenden Entfernungswerte kann eine Analyse der Signalform an der dazu korrespondierenden Stelle in der gemessenen Signalform erfolgen. Dies hätte den Vorteil, dass Bereiche der Signalform, die im ersten Verarbeitungsschritt wegen geringem *SNR* nicht berücksichtigt wurden, gezielt in die Auswertung einfließen können. Dieser Verarbeitungsschritt kann so lange wiederholt werden, bis alle brauchbaren Merkmale für die Bestimmung der Oberfläche berücksichtigt wurden. Erste Untersuchungen wurden bereits vorgenommen.
- Insbesondere die Untersuchung von natürlichen Objekten anhand der Analyse der Signalform ist von Interesse. Aus der Signalform können signifikante Hinweise für die feinen Strukturen von Vegetation gewonnen werden. Es können beispielsweise Mehrfachreflexionen mit geringer Entfernung zueinander bestimmt werden, wobei die Entfernungsdifferenz der beleuchteten Bereiche kürzer als die Länge des Laserpulses sein kann. Dies hat zur Folge, dass zusätzliche rückgestreute Laserpulse

detektiert werden können. Auch die feinen Strukturen von Vegetation können damit erfasst werden. Zudem können die Merkmale *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke* für jeden detektierten rückgestreuten Laserpuls als zusätzliches Merkmal berücksichtigt werden. Es konnte in ersten Untersuchungen gezeigt werden [Reitberger *et al.*, 2006b], dass mit diesen Merkmalen die Klassifikation von Baumarten verbessert werden kann.

- Die Unterscheidung von „*man-made*“ und natürlichen Objekten bei der automatischen Auswertung ist problematisch. Anhand erster Untersuchungen wurde das Potential der gewonnenen Merkmale zur Unterscheidung von Objekten gezeigt. Es besteht jedoch noch zusätzlicher Forschungsbedarf, um eine eindeutige Unterscheidung zu erzielen. Hierfür könnte eine kombinierte Auswertung der gewonnenen Merkmale *Entfernungsvariation* und *Reflexionsstärke* nützlich sein.
- Sind die durch den Laserstrahl beleuchteten Objekte kleiner als der Strahl, ist die Analyse der empfangenen Signalform des rückgestreuten Laserpulses eine Möglichkeit, um Informationen über die Geometrie des beleuchteten Objekts zu gewinnen. Dies ist beispielsweise bei Objekten in großer Entfernung gegeben oder für den Fall, dass keine örtliche Abtastung erfolgt und durch Strahlaufweitung großflächig die Szenen beleuchtet wird.

Die Erfahrungen und Erkenntnisse, die in der vorliegenden Arbeit gewonnen wurden, können sich für diese zukünftigen Aufgaben als wertvoll erweisen.

## A Anhang

### A.1 Zusammenhang zwischen dem Strahlungsfluss und der spezifischen Ausstrahlung

Nehmen wir an, mit einem Lasersystem wird eine ideal diffus reflektierende Oberfläche beleuchtet, die auch als Lambert'sche Fläche bezeichnet wird. Die Sendeeinheit und die Empfangseinheit des Lasersystems sei in dieselbe Richtung ausgerichtet, befindet sich somit auf derselben optischen Achse. Diese Konstellation wird als monostatisches Lasersystem bezeichnet. Zudem sei die räumliche Orientierung der Oberfläche gegenüber dem Lasersystem geneigt, d.h. der Winkel zwischen der Normalen der Oberfläche  $\vec{n}$  und der optischen Achse spannt den Winkel  $\varphi$  auf. Dasselbe gilt für das Gesichtsfeld der Empfangseinheit. Somit können die differentiellen Flächenelemente  $dA_S$  für die Sendeeinheit,  $dA_E$  für die Empfangseinheit und  $dA_O$  für die Oberfläche eingeführt werden.

Im Folgenden wird zunächst der *Strahlungsfluss*  $\Phi_E[\text{W}]$  am Flächenelement der Empfangseinheit hergeleitet, welcher auch als empfangene Strahlungsleistung an der Empfangseinheit direkt gemessen werden kann. Davon ausgehend wird die *spezifische Ausstrahlung*  $M_O[\text{W m}^{-2}]$  des Flächenelements  $dA_O$  der um den Winkel  $\varphi$  geneigten Oberfläche bestimmt.

#### A.1.1 Allgemeine Grundlagen

Bei einem Kugelkoordinatensystem (Abbildung A.1) besteht zwischen dem differentiellen Raumwinkel  $d\Omega[\text{sr}]$ , dem Zenithwinkel  $\varepsilon$  und dem Azimutwinkel  $\alpha$  der Zusammenhang

$$d\Omega = \sin(\varepsilon) d\alpha d\varepsilon. \quad (\text{A.1})$$

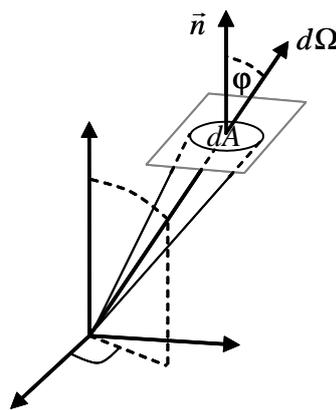


Abbildung A.1: Schematische Darstellung der von der Sendeeinheit auf das differentielle Flächenelement  $dA$  mit dem differentiellen Raumwinkel  $d\Omega$  einstrahlende Leistung.

Ein differentielles Flächenelement  $dA$  in Kugelkoordinaten definiert sich mit

$$dA = \frac{r^2}{\cos(\varphi)} \sin(\varepsilon) d\alpha d\varepsilon, \quad (\text{A.2})$$

wobei  $\varphi$  dem Winkel zwischen der Normalen der Fläche  $\vec{n}$  und der Projektionsrichtung des Lasersystems entspricht. Der Abstand von  $dA$  zum Projektionszentrum ist  $r$ . Aus Gleichung A.1 und A.2 folgt für den differentiellen Raumwinkel  $d\Omega$

$$d\Omega = \frac{\cos(\varphi)}{r^2} dA. \quad (\text{A.3})$$

Wir betrachten im Folgenden die gesamte beleuchtete Fläche. Gehen wir zudem davon aus, dass der restliche Raum keine Strahlung emittiert, so gilt für alle differentiellen Raumwinkel

$$d\Omega_S = d\Omega_O = d\Omega_E. \quad (\text{A.4})$$

Aus energetischen Gründen darf die Strahlungsleistung, die durch eine geschlossene Fläche geht, nicht von der Form und der Größe der Fläche abhängen. Daraus folgt, dass die Strahlungsleistung durch eine Fläche nur von dem Raumwinkel abhängt, den diese Fläche von der Sendeeinheit aus gesehen, einnimmt. Daraus folgt für den differentiellen Raumwinkel  $d\Omega_S$  und der Strahlstärke  $I_S[\text{W sr}^{-1}]$  der Sendeeinheit für den differentiellen Strahlungsfluss  $d\Phi_S[\text{W}]$

$$d\Phi_S = I_S d\Omega_S. \quad (\text{A.5})$$

Unter der Annahme, dass die Oberfläche keine Strahlung absorbiert, gilt wegen der Energieerhaltung für den differentiellen Strahlungsfluss

$$d\Phi_S = d\Phi_O. \quad (\text{A.6})$$

### A.1.2 Strahlungsfluss am Flächenelement der Empfangseinheit

Für eine Lambert'sche Oberfläche gilt die folgende Winkelabhängigkeit für die Strahlstärke  $I$

$$\frac{d\Phi_S}{d\Omega_S} = \frac{d\Phi_O}{d\Omega_O} = I_O(\varphi) = I_n \cos(\varphi), \quad (\text{A.7})$$

wobei  $I_n$  der maximalen Strahlstärke entspricht, die in die Richtung der Normalen der Oberfläche  $\vec{n}$  gerichtet ist.

Der empfangene differentielle Strahlungsfluss  $d\Phi_E$  ist somit gegeben durch

$$d\Phi_E = I_O(\varphi) d\Omega_E = I_n \cos(\varphi) d\Omega_E. \quad (\text{A.8})$$

### A.1.3 Spezifische Ausstrahlung des Flächenelements der Oberfläche

Die spezifische Ausstrahlung  $M_O$  für ein Flächenelement auf der Oberfläche erfüllt die Bedingung

$$d\Phi_E = M_O dA_O. \quad (\text{A.9})$$

Unter Berücksichtigung von Gleichung A.3, A.4 und A.8 ergibt sich für die spezifische Ausstrahlung  $M_O$

$$M_O = \frac{d\Phi_E}{dA_O} = I_n \cos(\varphi) \frac{d\Omega_E}{dA_O} = I_n \frac{\cos^2(\varphi)}{r^2}. \quad (\text{A.10})$$

## Literatur

- ASME B46.1 (2002) Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay). An American National Standard. The American Society of Mechanical Engineers, ASME International, New York.
- Alexander SB (1997) Optical Communication Receiver Design. In: SPIE Tutorial Texts in Optical Engineering, Vol. TT22, SPIE Press, Bellingham, WA.
- Andrews LC & Phillips RL (1998) Laser Beam Propagation Through Random Media, SPIE Press, Bellingham, WA.
- Anstett G (2003) Räumliche und spektrale Dynamik der Nanosekunden-Impulse gütegeschalteter Festkörperlaser und optisch parametrischer Oszillatoren. Dissertation, Universität Kaiserslautern.
- Baltsavias EP (1999a) Airborne Laser Scanning: Basic Relations and Formulas. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (2-3): 199-214.
- Baltsavias EP (1999b) Airborne Laser Scanning: Existing Systems and Firms and Other Resources. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (2-3): 164-198.
- Bergmann L, Schaefer C (1987) Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III: Optik. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 8. Auflage.
- Blair JB, Rabine DL, Hofton MA (1999) The Laser Vegetation Imaging Sensor (LVIS): A Medium-Altitude, Digitization-Only, Airborne Laser Altimeter for Mapping Vegetation and Topography. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (2-3): 112-122.
- Brenner AC, Zwally HJ, Bentley CR, Csatho BM, Harding DJ, Hofton MA, Minster JB, Roberts LA, Saba JL, Thomas RH, Yi D (2003) Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) - Derivation of Range and Range Distributions from Laser Pulse Waveform Analysis for Surface Elevations, Roughness, Slope, and Vegetation Heights. Algorithm Theoretical Basis Document - Version 4.1. [http://www.csr.utexas.edu/glas/pdf/Atbd\\_20031224.pdf](http://www.csr.utexas.edu/glas/pdf/Atbd_20031224.pdf) (Accessed 1. September 2006).
- Brigham EO (1988) The Fast Fourier Transform and Its Applications. Englewood Cliffs, Prentice-Hall Inc., NJ: 27.
- Bronstein IN, Musiol G, Muehlig H, Semendjajew KA (2001) Taschenbuch der Mathematik. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main, 5. überarbeitete und erweiterte Auflage: 477.
- Budge S, Leishman B, Pack R (2006) Simulation and Modeling of Return Waveforms from a Ladar Beam Footprint in USU LadarSIM. In: Kamerman GW, Turner MD (Eds.) Laser Radar Technology and Applications XI. SPIE Proceedings, Vol. 6214, <http://link.aip.org/link/?PSI/6214/62140N/1>.
- Buften JL (1989) Laser Altimetry Measurements from Aircraft and Spacecraft. Proceedings of the IEEE 77 (3): 463-477.

- Der S, Redman B, Chellappa R (1997) Simulation of Error in Optical Radar Measurements. *Applied Optics* 36 (27): 6869-6874.
- Ducic V, Hollaus M, Ullrich A, Wagner W, Melzer T (2006) 3D Vegetation Mapping and Classification Using Full-Waveform Laser Scanning. In: Koukal T, Schneider W (Eds.) *3D Remote Sensing in Forestry*: 211-217.
- Duong H, Pfeifer N, Lindenbergh R (2006) Analysis of Repeated ICESAT Full Waveform Data: Methodology and Leaf-On / Leaf-Off Application. In: Koukal T, Schneider W (Eds.) *3D Remote Sensing in Forestry*: 228-237.
- Ertl F (1978) Aufbau und Untersuchung eines berührungslos optisch arbeitenden Längenmessverfahrens für den Einsatz in der Fertigung. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt.
- Forster O (1984) Analysis - Integralrechnung im  $IR^n$  [IRn] mit Anwendungen. Vieweg, Braunschweig, 3. Auflage: 204.
- Gagliardi RM, Karp S (1976) Noncoherent (Direct) Detection. *Optical Communications*. John Wiley & Sons, New York.
- Gardner CS (1982) Target Signatures for Laser Altimeters: An Analysis. *Applied Optics* 21 (3): 448-453.
- van Ginnegeen B, Stavridi M, Koenderink JJ (1998) Diffuse and Specular Reflectance from Rough Surfaces. *Applied Optics* 37 (1): 130-139.
- Hecht E (2002) *Optics*. Fourth Edition. Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley, San Francisco, CA.
- Hecht J (1992) *The Laser Guidebook*. Second Edition. Blue Ridge Summit, Tab Books, PA.
- Henderson FM, Lewis AJ (1998) Radar Fundamentals: The Geoscience Perspective. In: Ryerson RA (Ed.) *Manual of Remote Sensing, Third Edition, Volume 2: Principles and Applications of Imaging Radar*. John Wiley & Sons, Inc, New York: 131-176.
- Ho C, Albright KL, Bird AW, Bradley J, Casperson DE, Hindman M, Priedhorsky WC, Scarlett WR, Smith RC, Theiler J, Wilson KS (1999) Demonstration of Literal Three-Dimensional Imaging. *Applied Optics* 38 (9): 1833-1840.
- Hofton MA, Blair JB (2002) Laser Altimeter Return Pulse Correlation: A Method for Detecting Surface Topographic Change. *Journal of Geodynamics* 34 (3): 477-489.
- Hofton MA, Minster JB, Blair JB (2000) Decomposition of Laser Altimeter Waveforms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38 (4): 1989-1996.
- Horn BKP, Brooks MJ (1989) *Shape from Shading*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Horn BKP, Sjöberg RW (1979) Calculating the Reflectance Map. *Applied Optics* 18 (11): 1770-1779.

- Hug C, Ullrich A, Grimm A (2004) LITEMAPPER-5600 - A Waveform Digitising Lidar Terrain and Vegetation Mapping System. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (Part 8/W2): 24-29.
- Huising EJ, Gomes Pereira LM (1998) Errors and Accuracy Estimates of Laser Data Acquired by Various Laser Scanning Systems for Topographic Applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 53 (5): 245-261.
- Irish JL, Lillycrop WJ (1999) Scanning Laser Mapping of the Coastal Zone: The SHOALS System. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54 (2-3): 123-129.
- Irish JL, McClung JK, and Lillycrop WJ (2000) Airborne Lidar Bathymetry: The SHOALS System. *PIANC Bulletin*. 2000 (103): 43-53.
- Jelalian AW (1992) *Laser Radar Systems*. Artech House, Boston, MA.
- Johansen EL (1993) Millimeter-Wave Radar. In: Fox CS (Ed.) *Active Electro-Optical Systems, The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook*. SPIE Optical Engineering Press, Michigan.
- Jutzi B, Eberle B, Stilla U (2002) Estimation and Measurement of Backscattered Signals from Pulsed Laser Radar. In: Serpico SB (Ed.) *Image and Signal Processing for Remote Sensing VIII*. SPIE Proceedings Vol. 4885: 256-267.
- Jutzi B, Neulist J, Stilla U (2005a) High-Resolution Waveform Acquisition and Analysis for Pulsed Laser. In: Heipke C, Jacobsen K, Gerke M (Eds.) *High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (Part 1-W3): (on CD-ROM).
- Jutzi B, Neulist J, Stilla U (2005b) Sub-Pixel Edge Localization Based on Laser Waveform Analysis. In: Vosselman G, Brenner C (Eds.) *Laserscanning 2005*. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (Part 3-W19): 109-114.
- Jutzi B, Stilla U (2003a) Analysis of Laser Pulses for Gaining Surface Features of Urban Objects. 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion on Urban Areas, URBAN 2003. IEEE (ISBN 0-7803-7719-2): 13-17.
- Jutzi B, Stilla U (2003b) Laser Pulse Analysis for Reconstruction and Classification of Urban Objects. In: Ebner H, Heipke C, Mayer H, Pakzad K (Eds.) *Photogrammetric Image Analysis PIA'03*. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34 (Part 3/W8): 151-156.
- Jutzi B, Stilla U (2004) Extraction of Features from Objects in Urban Areas Using Space-Time Analysis of Recorded Laser Pulses. In: Altan MO (Ed.) *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 35 (Part B2): 1-6.
- Jutzi B, Stilla U (2005a) Erfassung und Analyse der zeitlichen Signalform bei gepulsten Lasersystemen. In: Luhmann T (Hrsg.) *Photogrammetrie - Laser-Scanning -*

- Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg: 203-213.
- Jutzi B, Stilla U (2005b) Measuring and Processing the Waveform of Laser Pulses. In: Gruen A, Kahmen H (Eds.) Optical 3-D Measurement Techniques VII, Vol. I: 194-203.
- Jutzi B, Stilla U (2005c) Waveform Analysis of Laser Pulses for Gaining Range Accuracy. In: ISPRS WGI/2 Workshop on 3D Mapping from InSAR and LiDAR: (on CD-ROM).
- Jutzi B, Stilla U (2005d) Waveform Processing of Laser Pulses for Reconstruction of Surfaces in Urban Areas. In: Moeller M, Wentz E (Eds.) 3th International Symposium: Remote Sensing and Data Fusion on Urban Areas, URBAN 2005. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 8/W27): (on CD-ROM).
- Jutzi B, Stilla U (2006a) Characteristics of the Measurement Unit of a Full-Waveform Laser System. Symposium of ISPRS Commission I: From Sensors to Imagery. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 1/A): (on CD-ROM).
- Jutzi B, Stilla U (2006b) Precise Range Estimation on Known Surfaces by Analysis of Full-Waveform Laser. In: Förstner W, Steffen R (Eds.) Symposium of ISPRS Commission III: Photogrammetric Computer Vision PCV06. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3): 234-239.
- Jutzi B, Stilla U (2006c) Range Determination with Waveform Recording Laser Systems Using a Wiener-Filter. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 61 (2): 95-107.
- Kailath T, Poor HV (1998) Detection of Stochastic Processes. IEEE Transaction of Information Theory 44 (6): 2230-2259.
- Kamermann GW (1993) Laser Radar. In: Fox CS (Ed.) Active Electro-Optical Systems, The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook. SPIE Optical Engineering Press, Michigan.
- Kammeyer KD & Kroschel K (1998) Digitale Signalverarbeitung. B. G. Teubner, Stuttgart.
- Katzenbeisser R (2003) Technical Note on Echo Detection. <http://www.toposys.de/pdfext/Engl/echo-detec3.pdf> (Accessed 1. September 2006).
- Kern F (2003) Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrie aus 3d-Laserscanner-Daten. Dissertation, Braunschweig: Geodätische Schriftenreihe der Technische Universität Braunschweig, Heft 19.
- Kneubühl FK, Sigrist MW (1988) Laser. B. G. Teubner, Stuttgart.

- Koskinen M, Kostamovaara J, Myllylä R (1991) Comparison of Continuous-Wave and Pulsed Time-of-Flight Laser Range-Finding Techniques. In: Svetkoff DJ (Ed.) Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision VI. SPIE Proceedings Vol. 1614: 296-305.
- Kotelnikov VA (1933) On the Capacity of the 'Ether' and of Cables in Electrical Communication. In: Procs. of the First All-Union Conference on the Technological Reconstruction of the Communications Sector and Low-Current Engineering, Moscow.
- Kraus K (2004) Photogrammetrie, Band 1. Geometrische Information aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. Walter de Gruyter, Berlin, 7. Auflage.
- Leader JC (1979) Analysis and Prediction of Laser Scattering from Rough-Surface Materials. Journal of the Optical Society of America, Vol. 69 (4): 610-628.
- Levenberg K (1944) A Method for the Solution of Certain Nonlinear Problems in Least-Squares. Quarterly Journal on Applied Mathematics, Vol. 2: 164-168.
- Lillycrop WJ, Banic JR (1993) Advancements in the US Army Corps of Engineers Hydrographic Survey Capabilities: The SHOALS System. Marine Geodesy, Vol. 15: 177-185.
- Lim K, Treitz P, Wulder M, Benoit SO, Flood M (2003) LiDAR Remote Sensing of Forest Structure. Progress in Physical Geography 27 (1): 88-106.
- Loudon R (1973) The Quantum Theory of Light. Clarendon Press, Oxford.
- Luttermann H (2006) Erfassung und Aufzeichnung der Signalform bei abtastenden Lasersystemen. Diplomarbeit Nr. 1428. Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft.
- Mahafza BR (1998) Introduction to Radar Analysis. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Mamon G, Youmans DG, Sztankay ZG, Mongan CE (1978) Pulsed GaAs Laser Terrain Profiler. Applied Optics 17 (6): 868-877.
- Marquardt D (1963) An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics 11 (2): 431-441.
- Mäder O (2006) Analyse und Bewertung der Signalform bei abtastenden Lasersystemen. Diplomarbeit Nr. 1427. Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft.
- Nayar SK, Ikeuchi K, Kanade T (1991) Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives. IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence 13 (7): 611-634, Appendix D.
- Neuenschwander AL, Gutierrez R, Schutz BE, Urban TJ (2006) Comparison of Small-Footprint and Large-Footprint Waveform Lidar for Terrestrial Surface Characterization. Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2006 - 2006 IEEE International: (on CD-ROM).

- Nicodemus FE, Richmond JC, Hsia JJ, Ginsberg IW, Limperis T (1977) Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance, NBS Monograph 160, National Bureau of Standards, Washington, D.C.
- Niemeier W (2002) Ausgleichsrechnung. Walter de Gruyter, Berlin.
- Nilsson M (1996): Estimation of Tree Heights and Stand Volume Using Airborne Lidar System. *Remote Sensing of Environment* 56: 1-7.
- Osche GR (2002) Optical Detection Theory for Laser Applications. Wiley-Interscience, NJ.
- Papoulis A (1984) Probability, Random Variables, and Stochastic Processes. McGraw-Hill, Tokyo.
- Penny MF, Abbot RH, Phillips DM, Billard B, Rees D, Faulkner DW, Cartwright DG, Woodcock B, Perry GJ, Wilsen PJ, Adams TR, Richards J (1986) Airborne Laser Hydrography in Australia. *Applied Optics* 25 (13): 2046-2058.
- Penny MF, Billard B, Abbot RH (1989) LADS - the Australian Laser Airborne Depth Sounder. *International Journal of Remote Sensing* 10 (9): 1463-1479.
- Persson Å, Söderman U, Töpel J, Ahlberg S (2005) Visualization and Analysis of Full-Waveform Airborne Laser Scanner Data. In: Vosselman G, Brenner C (Eds.) *Laserscanning 2005. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (Part 3/W19): 109-114.
- Pfeifer N, Gorte B, Elberink SO (2004) Influences of Vegetation on Laser Altimetry - Analysis and Correction Approaches. In: Thies M, Koch B, Spiecker H, Weinacker H (Eds.) *Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (Part 8/W2): 283-287.
- Priedhorsky WC, Smith RC, Ho C (1996) Laser Ranging and Mapping with a Photon-Counting Detector. *Applied Optics* 35 (3): 441-452.
- Reitberger J, Krzystek P, Heurich M (2006a) Full-Waveform Analysis of Small Footprint Airborne Laser Scanning Data in the Bavarian Forest National Park for Tree Species Classification. In: Koukal T, Schneider W (Eds.) *3D Remote Sensing in Forestry*: 218-227.
- Reitberger J, Krzystek P, Stilla U (2006b) Analysis of Full Waveform LIDAR Data for Tree Species Classification. In: Förstner W, Steffen R (Eds.) *Symposium of ISPRS Commission III: Photogrammetric Computer Vision PCV06. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (Part 3): 228-233.
- Shannon CE (1949) Communication in the Presence of Noise. In: *Proceedings Institute of Radio Engineers* 37 (1): 10-21.
- Siegman AE (1986) *Lasers*. University Science Books, Sausalito, CA.

- Skolnik MI (1980) Introduction to Radar Systems. McGraw-Hill International Editions. Second Edition.
- Söderman U, Persson Å, Töpel J, Ahlberg S (2005) On Analysis and Visualization of Full-Waveform Airborne Laser Scanner Data. Laser Radar Technology and Applications X. In: Kamerman W (Ed.) SPIE Proceedings, Vol. 5791: 184-192.
- Steinvall O (2000) Effects of Target Shape and Reflection on Laser Radar Cross Sections. Applied Optics 39 (24): 4381-4391.
- Steinvall O, Carlsson T (2001) Three-Dimensional Laser Radar Modeling. In: Kamerman GW (Ed.) Laser Radar Technology and Application VI, SPIE Proceedings, Vol. 4377: 23-34.
- Steinvall O, Larsson H, Gustavsson F, Chevalier T, Persson Å, Klasén L (2004) Characterizing Targets and Backgrounds for 3D Laser Radars. Military Remote Sensing. In: Kamerman W, Willetts DV (Eds.) SPIE Proceedings, Vol. 5613: 51-66.
- Stilla U, Rottensteiner F, Hinz S (2005) (Eds.) Object Extraction for 3D City Models, Road Databases, and Traffic Monitoring - Concepts, Algorithms, and Evaluation (CMRT05). International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3/W24): (on CD-ROM).
- Stover JC (1990) Optical Scattering: Measurements and Analysis. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA.
- Stöcker H (1995) Taschenbuch mathematischer Formeln und moderner Verfahren. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main, 3. überarbeitete und erweiterte Auflage.
- Thiel KH, Wehr A (2004) Performance Capabilities of Laser-Scanners - An Overview and Measurement Principle Analysis. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 8/W2): 14-18.
- Thiel KH, Wehr A, Hug C (2005) A New Algorithm for Processing Fullwave Laser Scanner Data. EARSeL 3D-Remote Sensing Workshop: (on CD-ROM).
- Torrance KE, Sparrow EM (1967) Theory for Off-Specular Reflection from Roughened Surfaces. Journal of the Optical Society of America 57 (9): 1105-1114.
- Troup GJ (1972) Photon Counting and Photon Statistics. In: Sanders JH, Stenholm S (Eds.) Progress in Quantum Electronics. Vol. 2 (Part 1) Oxford: Pergamon.
- Turin GL (1960) An Introduction to Matched Filters. IEEE Transaction on Information Theory, Vol. IT-6: 311-329.
- Unbehauen R (1996) Systemtheorie 1. Oldenbourg Verlag, München, 7. Auflage.
- Vosselman G (2002) On Estimation of Planimetric Offsets in Laser Altimetry Data. International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing 34 (Part 3A): 375-380.

- Wagner W, Ullrich A, Briese C (2003) Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation*, VGI 4/2003: 223-235.
- Wagner W, Ullrich A, Ducic V, Melzer T, Studnicka N (2006) Gaussian Decomposition and Calibration of a Novel Small-Footprint Full-Waveform Digitising Airborne Laser Scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 60 (2): 100-112.
- Wagner W, Ullrich A, Melzer T, Briese C, Kraus K (2004) From Single-Pulse to Full-Waveform Airborne Laser Scanners: Potential and Practical Challenges. In: Altan MO (Ed.) *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 35 (Part B3): 201-206.
- Weber H, Herziger G (1972) *Laser - Grundlagen und Anwendung*. Physik Verlag GmbH, Weinheim/Bergstr..
- Wehr A, Lohr U (1999) Airborne Laser Scanning - An Introduction and Overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54 (2-3): 68-82.
- West GR, Lillycrop WJ (1999) Feature Detection and Classification with Airborne Lidar - Practical Experience. *Shallow Survey '99*. International Conference on High Resolution Surveys in Shallow Water, Sydney: (on CD-ROM).
- Wiener N (1949) *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Wolfe WL, Zissis GJ (1985) *The Infrared Handbook*. Revised Edition. IRIA Series in Infrared and Electro Optics. The Infrared Information Analysis (IRIA) Center, Environmental Research Institute of Michigan.
- Zwally HJ, Schutz B, Abdalati W, Abshire J, Bentley C, Brenner A, Bufton J, Dezio J, Hancock D, Harding D, Herring T, Minster B, Quinn K, Palm S, Spinhirne J, Thomas R (2002) ICESat's Laser Measurements of Polar Ice, Atmosphere, Ocean, and Land. *Journal of Geodynamics* 34 (3-4): 405-445.

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Forschungsgesellschaft für angewandte Naturwissenschaften am Forschungsinstitut für Optronik und Mustererkennung (FGAN-FOM) in Ettlingen.

An erster Stelle möchte ich meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Stilla, Leiter des Fachgebiets für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München, für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit und die Übernahme des Hauptreferates herzlich danken. Die zahlreichen Diskussionen mit ihm waren für mich sowohl fachlich als auch persönlich sehr wertvoll. Dem Zweitgutachter, Herrn Prof. Norbert Pfeifer von der Technischen Universität Wien, danke ich für die hilfreichen Anmerkungen bei der Fertigstellung der Arbeit.

Die Herren Prof. Dr. rer. nat. Maurus Tacke, Dr.-Ing. Karl Lütjen, Dipl.-Inform. Ulrich Thönnessen und Dipl.-Ing. Karlheinz Bers haben durch die von Ihnen geschaffenen Rahmenbedingungen diese Arbeit erst möglich gemacht.

Allen meinen Kollegen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich herzlich für ihre Hilfsbereitschaft danken. Mein besonderer Dank gilt den Herren Dr. rer. nat. Bernd Eberle, Dipl.-Math. Michael Kirchhof, Dipl.-Phys. Peter Lutzmann und Dipl.-Math. techn. Jörg Neulist für die wertvollen fachlichen Diskussionen und Anregungen. Für das Korrekturlesen meiner Dissertation danke ich den Herren Dipl.-Math. Michael Kirchhof und Dr.-Ing. Eckart Michaelsen. Den Herren Dipl.-Ing. Hanno Luttermann und Dipl.-Ing. Olaf Mäder danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung der Messungen. Herrn Dipl.-Phys. Harald Hopfmüller von Dornier EADS möchte ich für die angenehme Zusammenarbeit danken.

Zum Schluss möchte ich ganz besonders meiner Frau Pamela und meinen Kindern Lewin und Quentin danken, ohne deren Verständnis und Unterstützung die vorliegende Arbeit kaum möglich gewesen wäre.

# Lebenslauf

Name Boris Jutzi  
Geburtstag und -ort 12.3.1969 in Frankenthal/Pfalz  
Familienstand verheiratet, zwei Kinder  
Wohnort Camill-Siegwarth-Str. 23  
76275 Ettlingen



## Ausbildung/Tätigkeit

1975 – 1979 Grundschule in Ebertsheim und Göllheim

1979 – 1985 Staatliche Realschule in Eisenberg  
Abschluss: Mittlere Reife

1985 – 1988 Technisches Gymnasium in Ludwigshafen/Rhein  
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

1988 – 1996 Studium der Elektrotechnik an der Technischen  
Universität Kaiserslautern  
Abschluss: Diplom

1992 – 1997 Wissenschaftliche Hilfskraft am Lehrstuhl für  
hochfrequente Signalübertragung und -verarbeitung  
an der Technischen Universität Kaiserslautern

seit 1997 Wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Forschungsinstitut für  
Optronik und Mustererkennung (*FGAN-FOM*) in Ettlingen

2004 – 2008 Sekretär bei der International Society for Photogrammetry  
& Remote Sensing (*ISPRS*) Working Group I/2  
*SAR and LIDAR Systems*