
Erste Untersuchungen mit dem Solid-State Laserscanner LeddarTech Vu8

Hannes SARDEMANN

Zusammenfassung

Seit September 2016 bietet der kanadische Hersteller LeddarTech eine modulare Plattform für kompakte Laserscanner an. Das Sensormodul Vu8 baut auf dieser Plattform auf und ist einer der ersten für den Endverbraucher erhältlichen Solid-State Lidars. Solid-State Lidars arbeiten ohne bewegliche Teile. Sie eignen sich daher besonders für den Einsatz auf autonomen Fahrzeugen oder unbemannten Luft- und Wasserfahrzeugen. Diese Einsatzgebiete werden außerdem durch ein kompaktes (70 mm x 35 mm x 46 mm) und leichtes (100 g) Design des Scanners unterstützt.

Der Vu8 setzt sich aus einer Sende- und einer Empfangseinheit zusammen, die auf der modularen Sensorplattform angebracht werden. In der Sendeeinheit wird ein breiter, diffuser Lichtstrahl von LEDs erzeugt und durch eine Optik emittiert. Das Licht wird an Objekten reflektiert und gelangt durch das Empfangsobjektiv auf einen Chip aus acht diskreten Photodetektoren. Der Sichtbereich (in der genutzten Konfiguration: 48° horizontales FOV) wird somit in acht Segmente mit einer horizontalen Auflösung von 6° unterteilt. In jedem Segment wird durch eine Full-Waveform-Analyse die Distanz zu mehreren darin befindlichen Objekten bestimmt. Je nach Oberflächenbeschaffenheit sind laut Angabe des Herstellers Reichweiten bis zu 85 m möglich. Die Genauigkeit wird mit 5 cm angegeben. Mit anderen Optiken lassen sich größere Distanzen und höhere Auflösungen bei schmalere Öffnungswinkeln umsetzen.

In dieser Arbeit werden erste Untersuchungen zum Solid-State Laserscanner Vu8 durchgeführt. Dabei werden tatsächlich erreichbare Genauigkeiten, Auflösungen und maximale Reichweiten analysiert. Es wird außerdem untersucht, welche Anwendungsgebiete sich in der Photogrammetrie, speziell im Bereich unbemannter Luft- und Wasserfahrzeuge, trotz der sehr geringen lateralen Auflösung für die Zukunft ergeben können.

1 Solid-State Lidar Technologie

Laserscanner sind bereits heute für die Umfelderkennung und -kartierung sowohl in autonomen Fahrzeugen, als auch auf unbemannten Luft- oder Wasserfahrzeugen vielfach im Einsatz. Als Assistenzsensor in Serienfahrzeugen werden bisher mechanisch scannende Lidar-Systeme mit einem horizontalen Öffnungswinkel von weniger als 45° und einem noch kleineren vertikalen Öffnungswinkel eingesetzt (GEDULD, 2012). Erste Pilotprojekte, bei denen fahrerlose Autos im Straßenverkehr eingesetzt werden, setzen auf rotierende 3D-Laserscanner, die auf dem Dach des Fahrzeugs befestigt werden und das Umfeld des Fahrzeugs in 360° abtasten. Auf unbemannten Luft- und Wasserfahrzeugen (unmanned aerial/water vehicle, UAV/UWV) werden meist leichte und kompakte 2D-Zeilenscanner eingesetzt. Durch die

Bewegung der Plattform können die einzelnen Zeilen zu einer 3D Punktwolke zusammengesetzt werden (MADER et al., 2015).

360°-Laserscanner sind für den Einsatz in Serienfahrzeugen und auf UAVs und UWVs meist noch zu groß, zu schwer und zu teuer. Da es auf mobilen Plattformen außerdem zu Vibrationen kommt, sind scannende Sensoren mit beweglichen Teilen eher störanfällig. Großes Potential diesen Nachteilen entgegen zu wirken, zeigen Solid-State (Festkörper) Lidars, die in großer Stückzahl sehr preiswert hergestellt werden können und dabei kompakt sind und ohne bewegliche Teile auskommen.

1.1 Aktuelle Entwicklungen

In den letzten Jahren haben mehrere Hersteller aus dem Automotive-Bereich Solid-State Lidars angekündigt (GREIS, 2017). Auch wissenschaftliche Institute sind mit der Forschung und Entwicklung der Technologie beschäftigt. Dabei werden unterschiedliche Verfahren angewendet. Die Mehrheit der aktuell vorgestellten Produkte können in die folgenden Gruppen unterteilt werden:

- Durch Änderung der Phase wird ein Laserstrahl oder ein Punktmuster ausgelenkt (*Optical Phased-Array*).
- In kurzen Pulsen wird die Szene flächenhaft beleuchtet und die zurückgelegte Zeit des Lichts in den Elementen des Sensors gemessen (*Flash-Lidar*).

In den folgenden Abschnitten werden die beiden Verfahren kurz erläutert und Entwicklungen und Produkte vorgestellt, die auf diesen Verfahren beruhen.

1.1.1 Optical Phased-Array

Die Technologie der Phased-Array-Antennen ist bereits seit den 1960er Jahren bekannt und wurde bisher vor allem im Radiofrequenzbereich in Radaranlagen angewendet (HANSEN, 2009). Durch eine gezielte Steuerung der Phasenlage in den einzelnen Antennen einer Antennengruppe wird mittels Interferenz eine gerichtete Wellenfront erzeugt (Abb. 1). Auf diese Weise kann die Welle ohne bewegliche Teile ausgelenkt und der Bereich vor dem Antennen-Array abgescannt werden.

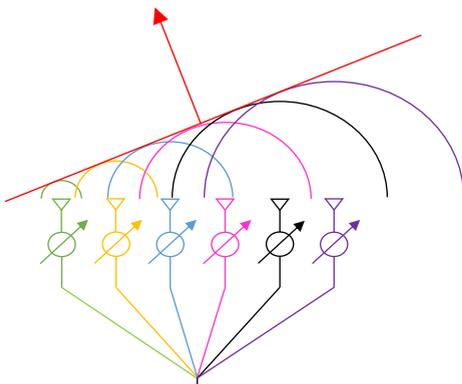


Abb. 1:
Phased-Array-Antenne

Um große Auslenkungen zu ermöglichen, müssen die Elemente eines Phased-Arrays im Abstand von höchstens einer halben Wellenlänge zueinander angebracht werden (MCMANNA-MON, 2005). In den letzten Jahren wurde es möglich, Antennen-Arrays und Schaltkreise zur gezielten Ansteuerung dieser für den Wellenlängenbereich der optischen Strahlung herzustellen. YAACOBİ et al. (2014) stellen einen Optical-Phased-Array (OPA) vor, der ein Laser-Punktmuster im nahen Infrarotbereich (1500 nm) mit einer Rate 100 kHz weitwinklig (51°) auslenken kann. Dazu werden thermo-optische Phasenverschieber verwendet, die sich durch die Anlegung einer Spannung steuern lassen. Durch einen konstanten Phasenunterschied zwischen benachbarten Antennen lässt sich jeder kontinuierliche Winkel ansteuern. Die maximale Auslenkung ist abhängig vom Abstand der Antennen und beträgt bei $1 \mu\text{m}$ etwa 51° . Kleinere Abstände und somit größere Auslenkungen bis 100° sind theoretisch möglich, werden aber durch die Größe der verwendeten Silikon-Wellenleiter begrenzt (POULTON und WATTS, 2016). Durch die Kombination von mehreren dieser $0,5 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ großen OPAs, die in Massenproduktion für 10\$ hergestellt werden können, ließe sich das komplette 360° Umfeld abscannen (POULTON und WATTS, 2016).

Ein Solid-State Lidar mit OPA Technologie wurde 2016 vom Automotive-Startup Quanergy angekündigt und erhielt auf der Consumer Electronics Show (CES) 2017 eine Auszeichnung als beste Innovation in der Kategorie der intelligenten Fahrzeuge. Ein Punktmuster von ca. 20×20 Punkten wird durch einen OPA mit $1 - 1.000 \text{ Hz}$ ausgesendet. Die Auslenkung des Punktrasters und die Punktverteilung kann dabei innerhalb des maximalen Öffnungswinkels von $120^\circ \times 120^\circ$ individuell festgelegt werden. In einem durch CMOS Kreisläufe pixelweise ansteuerbaren Sensor aus Avalanche Photodioden werden Laufzeitmessungen mit einer Auflösung von ca. 100 Pikosekunden durchgeführt. Die Messung findet im Geiger-Mode statt und reagiert somit auf einzelne Photonen, wodurch die benötigte Energie reduziert werden kann (RENKER, 2006). Da das Produkt voraussichtlich erst ab 2017 erhältlich sein wird, beruhen die genannten Spezifikationen auf Ankündigungen des Herstellers (ELDADA, 2016).

1.1.2 Flash-Lidar

Bei dem Flash-Lidar Verfahren wird die Szene nicht von einem Laserstrahl abgetastet, sondern mit einem breiten diffusen Lichtkegel beleuchtet. Das Licht reflektiert an den Objekt-oberflächen und gelangt durch eine Optik zurück auf den Sensor. In den Sensorelementen wird die Laufzeit des Lichts gemessen und daraus die Distanz zum Objekt bestimmt. Ein Vorteil gegenüber scannenden Systemen ist die simultane flächenhafte Erfassung in Video-rate.

Seit einigen Jahren bietet der kanadische Hersteller LeddarTech Solid-State Lidars an, die auf dem Flash-Lidar Verfahren beruhen. Seit 2016 ist die modulare Plattform LeddarVu erhältlich, die sich wegen ihrer kompakten und leichten Bauweise besonders für den Einsatz in UAVs eignet. Das Lidar-Modul Vu8 ist der erste Sensor, der auf dieser Plattform angebracht werden kann. Dieser Flash-Lidar besteht aus einer Sendeeinheit und einer Empfangseinheit, bei der sich ein Sensor mit acht Elementen hinter einer Optik befindet. In jedem der acht Elemente wird das empfangene Signal digitalisiert (Full-Waveform-Analyse) und daraus mit konfigurierbaren Schwellwerten Objekte extrahiert (OLIVIER, 2016). Der Öffnungswinkel kann durch den Einsatz von Optiken auf der Sende- und Empfangseinheit angepasst werden. In einer Rate von bis zu 100 Hz werden Frames mit einer Auflösung 8×1 aufgenommen,

direkt auf dem Chip verarbeitet und als Richtungs- und Streckenwert an den Nutzer ausgegeben. Dabei sind wegen der Full-Waveform-Analyse mehrere Distanzen pro Segment möglich.

Der deutsche Automobilzulieferer Continental hat ebenfalls auf der CES 2017 einen Flash-Lidar Sensor für die Fahrerassistenz für 2020 angekündigt (CONTINENTAL, 2017). Dafür wurde das Lidar Geschäft des amerikanischen Herstellers Advanced Scientific Concepts (ASC) übernommen, der bereits in der Vergangenheit Erfahrung in der Entwicklung von Flash-Lidar im militärischen Bereich und in der Raumfahrt gesammelt hat (STETTNER et al., 2004). In bisherigen Produkten von ASC werden Frames mit 128×128 Elementen aufgenommen. In jedem Element findet eine Digitalisierung des kompletten Signals in ca. 44 Samples statt.

2 Erste Messungen mit dem Leddar Vu8

Am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden wurden erste Untersuchungen mit dem Flash-Lidar Vu8 von LeddarTech durchgeführt (Abb. 2). Um erste Eindrücke über die erreichbaren Messgenauigkeiten und Auflösungen zu bekommen, wurde die Streckenmessung mit Soll-Distanzen verglichen. Im Hinblick auf mögliche photogrammetrische Anwendungen wurde der Solid-State Lidar auf einer festen Basis zu einer Kamera aufgebaut und orientiert. Somit konnten die Distanzen des Lidar in das Bild der Kamera transformiert werden.

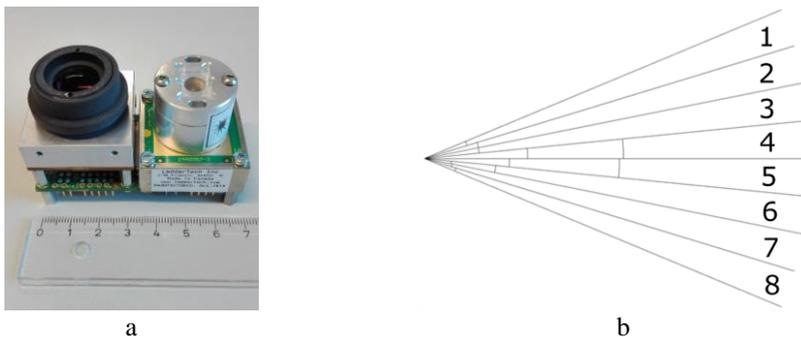


Abb. 2: Der Solid-State Lidar Vu8 (a) mit Messungen in acht Segmenten (b).

Die Spezifikationen des in den Versuchen verwendeten Sensors sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Öffnungswinkel sind fest, während die Messrate von der in der Software vorgenommenen Konfiguration abhängt. Durch Erhöhung der Werte für Akkumulation und Oversampling wurde der Schwerpunkt der Untersuchungen auf Genauigkeit gelegt. Für mobile Anwendungen kann die Konfiguration zugunsten der Messrate angepasst werden.

Tabelle 1: Spezifikationen des verwendeten Vu8

	Wert	Kommentar
FOV horizontal	48°	unterteilt in acht Spalten je 6°
FOV vertikal	3°	nur eine Zeile
Messrate	15 Hz	Akkumulation und Oversampling mehrerer Einzelmessungen

2.1 Streckenmessgenauigkeit

Zur Evaluation der Distanzmessgenauigkeit des Sensors wurden Strecken zu einem Zielobjekt gemessen, welche sich in einer mit übergeordneter Genauigkeit bekannten Distanz befinden. Um den kompletten Distanzbereich abzudecken, wurden drei Messkonfigurationen verwendet. Zum einen wurde ein weißes Testobjekt (matte Leinwand) auf einer Komparatorbahn bis zu einer Distanz von 5 m bewegt (Abb. 3a). Die Schrittweite wurde mit steigender Distanz von 10 cm über 20 cm auf 50 cm erhöht. Eine Interferometermessung lieferte die Soll-Distanz. In der zweiten Konfiguration wurde ein Wagen auf einer Schiene bewegt, deren Anlaufpunkte mit einer Standardabweichung von 0,01 mm – 0,05 mm eingemessen wurden (Abb. 3b). Die Abstände zwischen den Messungen lagen bei 8 cm bis 3 m und 25 cm bis zur Maximaldistanz von 10 m. Bei dem verwendeten Ziel handelt es sich um ein Din-A2 großen leicht glänzenden Papierbogen (Kalenderrückseite). Die Ebenheit des Zielobjekts kann zwar nicht mit der gleichen übergeordneten Genauigkeit vorausgesetzt werden wie bei der Komparatorbahn, für die zu erwartende Genauigkeit von 5 cm (LeddarTech, 2016) war sie allerdings ausreichend (Abb. 3c). Im dritten Versuch wurde der Kalender entlang eines Messbands im Abstand von 1 m bis zu einer Maximaldistanz von 30 m verschoben.



Abb. 3: Streckenmessung mit Soll-Distanzen aus Interferometrie (a) und durch Verschiebung eines Wagens mit Steckzapfen (c) auf einer eingemessenen Schiene (b).

Die Differenzen aus Soll- und Ist-Distanz für die drei Versuche (Komparatorbahn, Schiene, Messband) zeigen trotz unterschiedlicher Konfigurationen und unterschiedlicher Zielobjekte gleiche systematische Effekte (Abb. 4). Es wurden Streckenmessungen in den Segmenten 2,

4, 5, 6 und 8 durchgeführt (von links nach rechts, vgl. Abb. 2b). Die Standardabweichung aller Messungen beträgt 4,6 cm bei einem mittleren Offset von 4,3 cm und einer maximalen Abweichung von 19,5 cm.

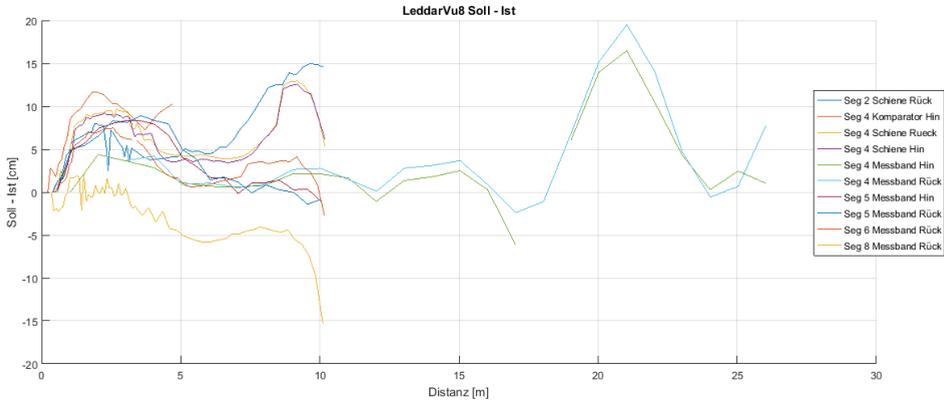


Abb. 4: Soll-Ist Vergleich der Streckenmessungen.

2.2 Orientierung zwischen Lidar und Kamera

Auf einer kompakten UAV oder UWV Plattform, die bisher ausschließlich mit einer Kamera ausgestattet ist, kann problemlos ein kompakter und leichter Solid-State Lidar zusätzlich integriert werden. Bei einer mit Structure-from-Motion (SfM) generierten Punktwolke kann die fehlende Maßstabsinformation aus der Lidar-Messung integriert werden. Dazu werden Kamera und Lidar fest zueinander angebracht und in einem geeigneten Verfahren die Orientierung vom Lidar zur Kamera bestimmt. Für erste Betrachtungen wurde die Orientierung nur horizontal berechnet und vorausgesetzt, dass die beiden Sensoren etwa auf gleicher Höhe und rechtwinklig zur Basis angebracht sind. Aus den Strecken und Richtungsmessungen des Vu8 und einer photogrammetrischen Kalibrierung der äußeren Orientierung der Kamerapositionen kann mittels Kosinussatz die Basis und die Orientierung der beiden Sensoren zur Basis bestimmt werden. Als Kalibrierobjekt wurde ein 8 cm breites Profil vertikal aufgestellt. Dies kann in den Messwerten des Vu8 klar identifiziert werden. Auf Grund der geringen Breite des Profils können die Kalibrieraufnahmen so vorgenommen werden, dass sich das Objekt bei der Aufnahme etwa mittig in einem Segment befindet. Zur Bestimmung der äußeren Orientierung der Kamera wurden zusätzlich senkrecht dazu Messmarken befestigt, die außerhalb des Sichtfelds des Vu8 liegen. Nachdem die relative Orientierung und Basis kalibriert wurden, können die Messungen des Lidar in den Bildraum der Kamera projiziert werden. Abb. 5 zeigt eine Kameraaufnahme des Kalibrierobjekts mit projizierten Distanzen.



Abb. 5: Kamerabild des Kalibrierkörpers mit Lidar-Distanzen

3 Ausblick

Die ersten Untersuchungen mit dem Solid-State Flash-Lidar Vu8 von LeddarTech zeigen das grundsätzliche Potential der Technologie. Die klaren Vorteile liegen in der kompakten und leichten Bauweise und im Verzicht auf mechanische Bauteile. Eindeutige Nachteile liegen in der Auflösung (horizontal 6° , vertikal nur ein Wert) und der Genauigkeit (5 cm Standardabweichung in der Streckenmessung). In den Versuchen konnten bis zu einer Distanz von 30 m Messwerte aufgenommen werden. Durch den gleichzeitigen Einsatz mehrerer Sensoren mit kleineren Öffnungswinkeln und somit schmalere Segmenten könnte für bestimmte Anwendungen die Auflösung erhöht werden.

Werden die Messwerte des Lidars in das Bild einer Kamera projiziert, können die Distanzinformationen zur Maßstabgenerierung (z.B. bei gleichzeitigem SfM) verwendet werden. Je nach Anwendungsgebiet werden sich Probleme ergeben, wenn innerhalb eines Segments nicht klar definierbar ist, welche Oberfläche gemessen wurde. In weiteren Untersuchungen sollte daher analysiert werden, wie sich die Messung bei unterschiedlichen Objekten verhält. Außerdem hat sich in den ersten Messungen gezeigt, dass sowohl in der Distanz, als auch in der Intensität eine distanzabhängige Systematik erkennbar ist, die weiter untersucht werden muss.

Die Entwicklungen anderer Solid-State Lidar Systeme, die z.B. mit Optical-Phased-Arrays arbeiten und somit nicht-mechanische scannende bzw. auslenkbare Abtastungen ermöglichen, werden in den nächsten Jahren spannende Erkenntnisse bringen. Auch andere Ansätze zur Umsetzung der Solid-State Lidar Technologie sind möglich. Das israelische Start-Up Oryx hat beispielsweise ein sogenanntes Terahertz-Radar angekündigt, bei dem langwellige Infrarotstrahlung durch Nano-Antennen übertragen werden und das Lichtsignal in seiner Wellenform anstatt in seiner Teilchenform betrachtet wird (HARRIS, 2016). Auf diese Weise wären - wie bei Radar - auch Dopplermessungen zur direkten Geschwindigkeitsbestimmung möglich.

Literatur

- Continental (2017): *Alles im Blick – jederzeit und überall: Continental entwickelt das Umfeldmodell der nächsten Generation*. http://www.continental-corporation.com/www/presseportal_com_de/themen/pressemitteilungen/3_automotive_group/chassis_safety/press_releases/pr_2017_01_04_umfeldmodell_de.html (abgerufen am 08.02.2017)
- Eldada, L. (2016): *Solid State LiDAR for Autonomous Vehicles, Security, Industrial Automation, and 3D Mapping*. Stanford EE Computer Systems Colloquium, Stanford University, <https://www.youtube.com/watch?v=uPqzo29Q9Wc> (abgerufen am 08.02.2017).
- Geduld, G. (2012): *Lidarsensorik*. In: Winner, H., Hakuli, S., Wold, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, 2. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, S. 172-185.
- Greis, F. (2017): *Laserscanner für den Massenmarkt kommen*. <https://www.golem.de/news/autonomes-fahren-laserscanner-fuer-den-massenmarkt-kommen-1701-125585.html> (abgerufen am 13.02.2017)
- Hansen, R. C. (2009): *Phased Array Antennas, 2nd Edition*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Harris, M. (2016): *Can Israeli Start-up Oryx Oust Lidar From Self-Driving Cars?* IEEE Spectrum, Cars That Think, Transportation, Sensors, <http://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/sensors/can-israeli-startup-oryx-oust-lidar-from-selfdriving-cars> (abgerufen am 13.02.2017)
- LeddarTech (2016): *LeddarVu Spec Sheet*. LeddarTech, Quebec, Kanada. http://leddar-tech.com/app/uploads/dlm_uploads/2016/09/Specsheet-Leddar-Vu-3.pdf (abgerufen am 13.02.2017)
- Mader, D., Blaskow, R., Westfeld, P. & Maas, H.-G. (2015): *UAV-based Acquisition of 3D Point Clouds - A Comparison of a Low-Cost Laser Scanner and SfM Tools*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 40, Nr. 3, S. 335-341.
- McMannamon, P. (2005): *An overview of optical phased array technology and status*. Congress on Optics and Optoelectronics, International Society for Optics and Photonics, S. 59470I-1-59470I-10.
- Olivier, P. (2016): *Leddar Optical Time-Of-Flight Sensing Technology: A New Approach To Detection And Ranging*. White Paper, LeddarTech, Quebec, Kanada.
- Poulton, C. V. & Watts, M. R. (2016): *MIT and DARPA Pack Lidar Sensor Onto Single Chip*. IEEE Spectrum, Tech Talk, Semiconductors, Optoelectronics, <http://spectrum.ieee.org/tech-talk/semiconductors/optoelectronics/mit-lidar-on-a-chip> (abgerufen am 08.02.2017).
- Renker, D. (2006): *Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 567, Nr. 1, S. 48-56.
- Stettner, R., Bailey H., Richmond R. D. (2004): *Eye-safe laser radar 3D imaging*. Defense and Security, International Society for Optics and Photonics, S. 111-116.
- Yaacobi, A., Sun, J., Moresco, M., Leake, G., Coolbaugh, D., & Watts, M. R. (2014): *Integrated phased array for wide-angle beam steering*. Optics letters, 39, Nr. 15, S. 4575-4578

Bitte geben Sie auf einer separaten Seite zu allen genannten Autoren folgende Informationen:

Sardemann, Hannes

TU Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung

hannes.sardemann@tu-dresden.de