

Titelbild: Schäden an Tunnelwänden verbergen sich mitunter unter der Oberfläche. Mit laserinduziertem Körperschall lassen sich diese Fehlstellen automatisiert aufspüren – genauer als dies mit der heutigen Hammerschlagmethode möglich ist.

Optischer Hammerschlagtest – neue Technologien für die Tunnelinspektion

Laser spüren bereits heute Fehlstellen in Tunneloberflächen auf. In Zukunft soll dies auch für Delaminationen unter der Oberfläche möglich sein.

VALENTIN VIERHUB-LORENZ |
CHRISTOPH WERNER |
PHILIP VON OLSHAUSEN |
ALEXANDER REITERER

Die DB Netz AG betreibt weit mehr als 760 Eisenbahntunnel [1]. Die Zustandserfassung der Tunnelbauwerke wird auch heute noch zum Teil manuell durch Sichtprüfungen oder taktile Messungen durchgeführt. Laserbasierte Verfahren machen die Inspektion von Tunnelbauwerken effizienter und liefern objektive, BIM-fähige Daten. Am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM arbeitet ein Forschungsteam an einem laserbasierten Verfahren zur Delaminationsprüfung, das den bislang üblichen Hammerschlagtest ersetzen soll. In Kombination mit einem Laserscanner zur Vermessung von 3D-Geometrie und Wandfeuchte soll das System zukünftig umfassende BIM-konforme Zustandsdaten liefern.

Bei der Tunnelinspektion werden neben der Tunnelgeometrie auch Risse, Wassereintritt

oder Delaminationen (Ablösen von Material) untersucht. Zur Messung von Geometrie und Oberflächendefekten setzen spezialisierte Inspektionsfirmen bereits heute vielfach mobile Laserscanner ein. Die Systeme scannen die Tunneloberfläche meist in der Vorwärtsbewegung senkrecht zur Fahrtrichtung und liefern hochaufgelöste Punktwolken der Tunneloberfläche, auf denen wenige Millimeter große Schäden sichtbar werden. Tieferliegende Schadstellen sind auf der Oberfläche naturgemäß nicht erkennbar und werden da-

her von Laserscannern nicht erfasst. Um verborgene Fehlstellen wie z.B. Delaminationen aufzuspüren, ist auch heute noch der Hammerschlag-Test das Mittel der Wahl. Dabei wird die Tunnelwand von Hand mit einem Hammer abgeklopft. Als Sensor dient das menschliche Ohr, das die durch den Hammerschlag angeregten Resonanzschwingungen wahrnimmt. Diese manuelle Messmethode ist langwierig, ineffizient und kostspielig, da die Tunnel für die Inspektion häufig gesperrt werden müssen. Zudem liefert der Hammerschlagtest kei-

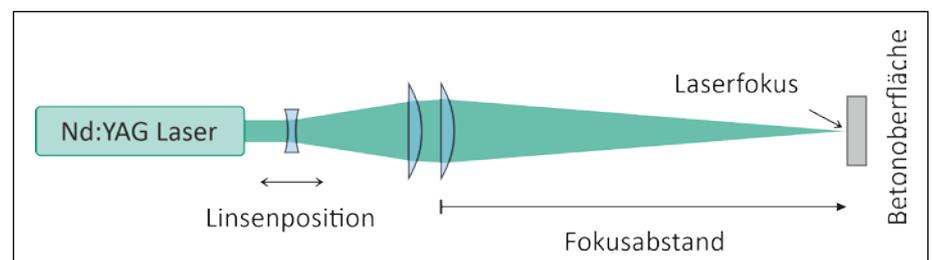


Abb 1: Schematische Darstellung des Aufbaus für die Anregung von Resonanzschwingungen durch die Erzeugung eines Plasmas auf der Zieloberfläche. Die Zündung des Plasmas erfolgt durch einen fokussierten, starken, gepulsten Laser.

ne objektiv quantifizierbaren Messergebnisse. Vergleiche über lange Zeiträume hinweg, die auf sich anbahnende Defekte hindeuten, sind daher nur schwer möglich. Für ein zeitgemäßes Zustandsmonitoring sind digitale, BIM-konforme Daten gefragt, die manuelle Systeme nicht liefern.

Starker Laserpuls imitiert Hammerschlag

Ein Forschungsteam am Fraunhofer IPM hat sich zum Ziel gesetzt, den Hammerschlagtest durch ein berührungsloses, laserbasiertes Verfahren zu ersetzen. Die Idee: Ein starker gepulster Laser imitiert den Hammerschlag. Der Laser erzeugt einen Plasmablitz auf der Betonoberfläche, ohne diese zu beschädigen. Verbergen sich Delaminationen, Hohlräume oder Defekte unter der Oberfläche, regt die plasmainduzierte Schockwelle charakteristische resonante Schwingungen der Oberfläche an – ähnlich wie beim Hammerschlag. Amplitude und Frequenz der Schwingungen geben Aufschluss über die Größe und Tiefe der Hohlräume und Defekte. Typische Defekte in Tunnelbauwerken, die mit der Hammermethode nachgewiesen werden können, weisen Resonanzfrequenzen von einigen 100 Hz bis zu etwa 10 kHz auf. Während beim Hammerschlagtest das Prüfpersonal die Schallwellen interpretiert, werden die Vibrationen bei der laserbasierten Ferndetektion mithilfe eines zweiten Lasers detektiert: Ein Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) misst die mechanische Schwingung der Betonoberfläche direkt über die Frequenzverschiebung des rückgestreuten Lichts, die interferometrisch ausgewertet wird. Messungen mit laserinduzierten Ultraschallsignalen und interferometrischer Auswertung sind in der Materialforschung bereits etabliert – z. B. zur Prüfung von Polymerverbundwerkstoffen, mikroelektronischen Bauteilen oder zur Dickenmessung von Stahlrohren [2]. Forschungsarbeiten zu Messungen aus größeren Abständen und auch am Werkstoff Beton wurden in den vergangenen Jahren publiziert und zeigen, dass das Verfahren grundsätzlich zur Delaminationsprüfung aus mehreren Metern Entfernung geeignet ist [3, 4].

Eignung für Delaminationsprüfung an Tunnelwänden

Fraunhofer IPM arbeitet daran, das Prinzip von Laseranregung und Messung von Resonanzschwingungen in ein produktives System zur Tunnelinspektion zu überführen. Hier sind Messungen aus mehreren Metern Abstand und hohe Messraten gefordert. Anhand eines Laboraufbaus konnte das Team zeigen, dass solche laserbasierten Delaminationsprüfungen grundsätzlich möglich sind [5]. Als Anregungslaser wird ein gepulster Nd:YAG-Laser mit knapp 1 J Pulsenergie, 5 ns Pulsdauer und einer Wiederholrate von 10 Hz verwendet. Der Laser wird auf die Tunnelwand fokussiert, wo durch die hohe Energiedichte ein Plasmablitz

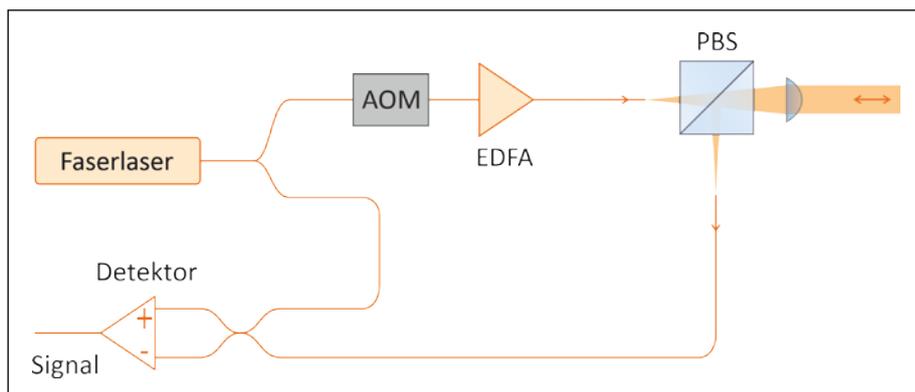


Abb 2: Schematische Darstellung des Laser-Doppler-Vibrometers. Ein Teil des Lichts eines Faserlasers wird als Lokoszillator abgezweigt. Der andere Teil erfährt durch einen akustooptischen Modulator eine Frequenzverschiebung um 40 MHz und wird von einem Faserverstärker (EDFA) verstärkt bevor er durch einen Strahlteiler (PBS) und eine Linse das System verlässt. Das rückgestreute Licht wird von der Linse eingesammelt und durch den Strahlteiler in eine zweite Faser gekoppelt. Von dort aus wird es mit dem Lokoszillator überlagert und von einem symmetrischen Photodetektor in ein elektrisches Signal umgewandelt.

entsteht. Ein LiDAR-Sensor misst den Abstand der zu vermessenden Oberfläche und erlaubt es, den Fokus mithilfe motorisierter Linsen automatisch anzupassen (Abb. 1). Der Mess-

abstand kann dabei ca. zwischen 1 m und 10 m angepasst werden. Ein motorisierter Ablenkspiegel erlaubt es, den Laserstrahl entlang zweier Achsen abzulenken und damit bei

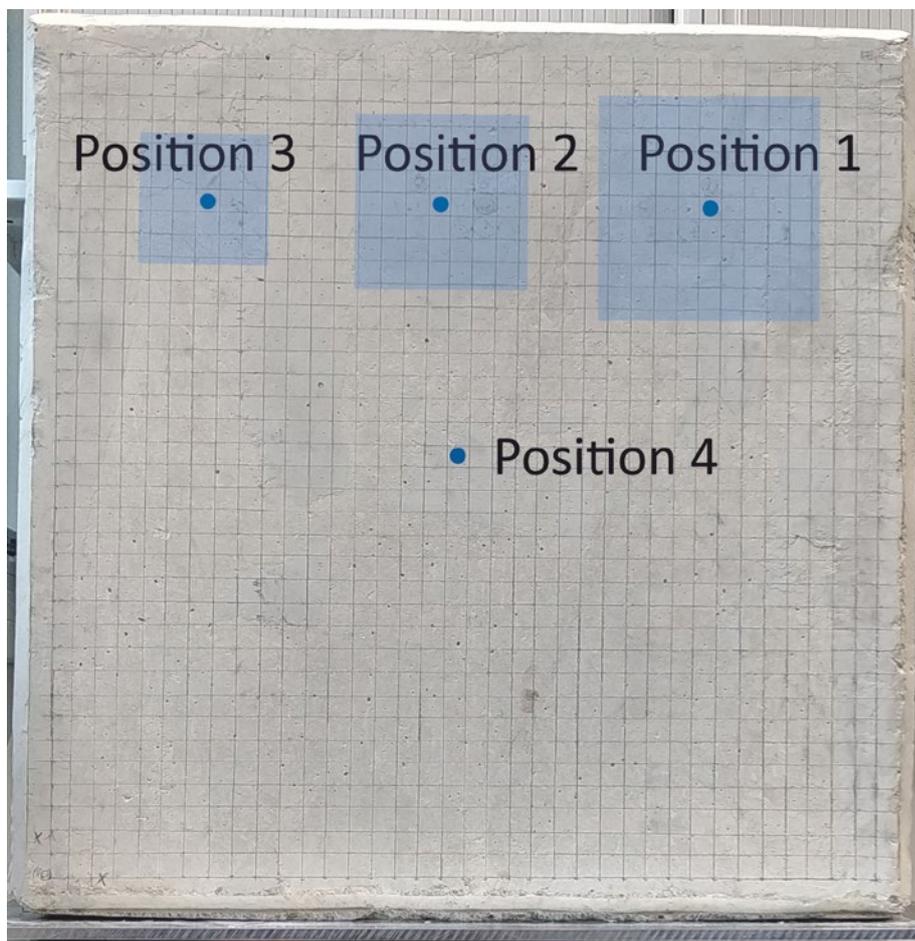


Abb 3: Für Testmessungen wurde ein Betonquader mit künstlichen Fehlstellen präpariert. Die Positionen 1 bis 4 markieren die Messpunkte der in Abb. 4 dargestellten Messsignale. Drei davon liegen auf den Fehlstellen mit einer Größe von 20 cm × 20 cm, 16 cm × 16 cm bzw. 12 cm × 12 cm (hellblauer Bereich). An Position 4 ist das Material fehlerfrei.

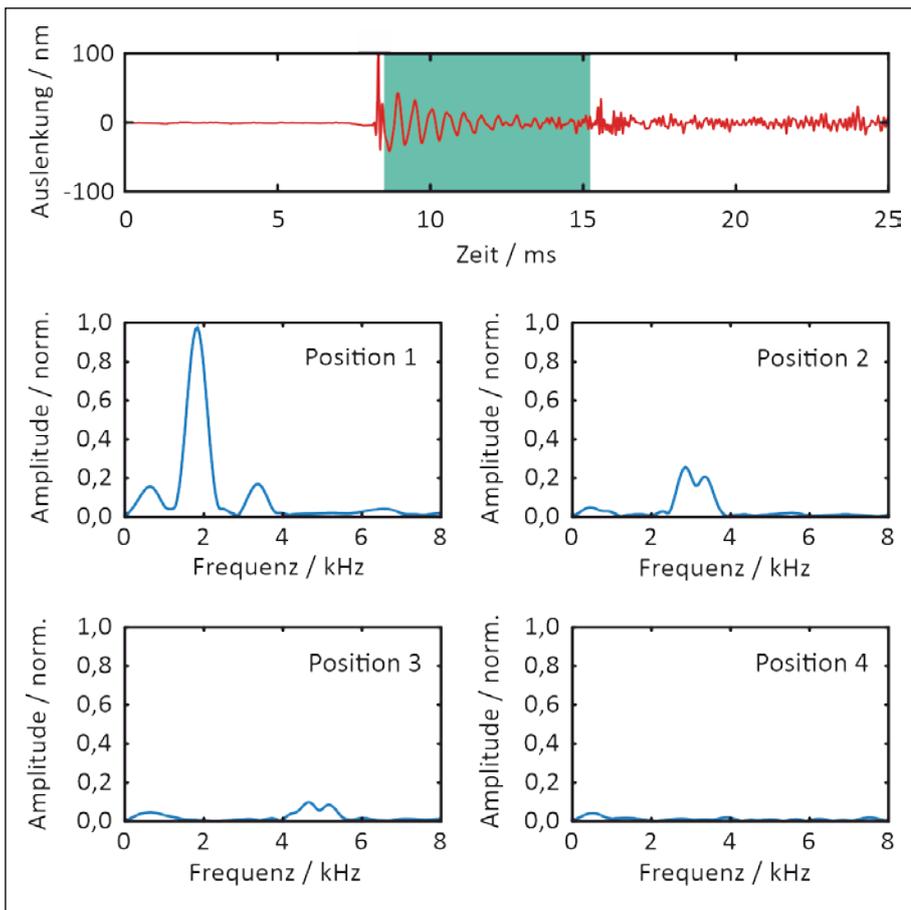


Abb. 4: (oben) Auslenkung der Oberfläche durch die plasmainduzierte Körperschallwelle an Position 1: Der grün markierte Bereich zeigt das für die spektrale Auswertung genutzte Zeitfenster mit der abklingenden Resonanzschwingung. (unten) Die spektrale Auswertung der Signale zeigt für alle drei Schadstellen (Pos. 1-3) deutlich ausgeprägte Spitzen. Amplitude und Frequenz variieren mit der Größe der Fehlstelle.

stationärem Aufbau eine Fläche zu erfassen. Die maximal mögliche Messrate ist durch die Wiederholrate des Anregungslasers auf 10 Hz begrenzt.

Für den Nachweis der vom Anregungslaser ausgelösten Resonanzschwingungen hat das Forschungsteam ein Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) gebaut, das optimal auf die Detektion von Fehlstellen in Betonwänden und die Messbedingungen im Tunnel ausgelegt ist. Kernkomponente des LDV ist ein ultraschmalbandiger Faserlaser mit einer Linienbreite < 100 Hz und einer Wellenlänge von 1.550 nm. Die Laserleistung wird in einen lokalen Oszillator (LO) und einen Signalkanal aufgeteilt, dessen Frequenz durch einen Modulator (AOM) um 40 MHz verschoben wird. Die optische Leistung des Signalkanals wird durch einen Erbium-dotierten Faserverstärker (EDFA) auf etwa 200 mW verstärkt, bevor das Licht einen Polarisationsstrahlteiler (PBS) durchläuft und von einer Linse auf die Oberfläche fokussiert wird. Der Laserstrahl wird über denselben motorisierten Spiegel wie der Anregungslaser abgelenkt und die Position des Fokus wird auch hier automatisch an den gemessenen Abstand der Oberfläche angepasst. Das von

der Oberfläche zurückgestreute Licht wird von der gleichen Linse aufgefangen. Aufgrund der Rauheit der Oberfläche ist das rückgestreute Licht größtenteils depolarisiert, sodass die Hälfte des Lichts vom PBS zurück zum Ausgangsfaser übertragen wird, während die andere Hälfte in die Signalfaser reflektiert wird. Das rückgestreute Licht wird dann in einem 50/50-Strahlteiler mit dem LO überlagert und auf einen symmetrischen Photodetektor gekoppelt (Abb. 2). Das resultierende elektrische Schwingungssignal wird von einem Analog-Digital-Wandler (ADC) mit einer Abtastrate von 5 GSPS digitalisiert und von einem FM-Demodulationsalgorithmus auf einem Computer ausgewertet, der die Dopplerverschiebungsfrequenz in Bewegungsinformationen der Oberfläche umwandelt. Die Signale werden über einen Bandpass gefiltert und dezimiert, um sie an den anwendungsspezifischen Frequenzbereich von 500 Hz bis 15 kHz anzupassen.

Lasermethode ermöglicht objektive, reproduzierbare Messungen

Mit dem Laboraufbau führten die Forschenden Messungen an einem Betonquader mit 80 cm Kantenlänge durch, in den wenige

Zentimeter unter der Oberfläche künstliche Fehlstellen unterschiedlicher Größe aus extrudiertem Polystyrolschaum eingebettet waren (Abb. 3). Nur die beiden größeren Defekte von 20×20 cm² und 16×16 cm² konnten mit dem klassischen Hammerschlagtest akustisch sicher detektiert werden. Die laserbasierte Messung zeigte auch für die kleinste Fehlstelle von 12×12 cm² ein deutliches Signal. Die Messungen an den drei Fehlstellen und an einer vierten intakten Stelle des Testobjekts wurden aus einer Entfernung von 2 m durchgeführt; der Auftreffpunkt des Anregungslasers lag 2 cm unterhalb des LDV-Messpunkts. Abb. 4 zeigt die Bewegung der Oberfläche durch die plasmainduzierte Körperschallwelle: Etwa 8 ms nach Beginn der Messung trifft der Laserpuls auf die Oberfläche, anschließend ist deutlich eine abklingende Schwingung zu erkennen. Für die Auswertung wurde eine Fourier-Transformation des Signals durchgeführt. Das Zeitfenster für die Signalanalyse (Abb. 4, grün markiert) beginnt mit dem Impuls der Schockwelle und hat eine Länge von etwa 7 ms. Die resultierenden Spektren zeigen eine kleine Spitze um 500 Hz, die auf das niederfrequente Hintergrundrauschen zurückzuführen ist. Alle drei Defekte sind als ausgeprägte Spitzen deutlich zu erkennen. Die Amplitude bei kleineren Defekten ist geringer, während die Frequenzen ansteigen. An Position 4, also der Stelle ohne Defekt, sind keine ausgeprägten Resonanzfrequenzen erkennbar.

Im Ergebnis zeigen die Probemessungen, dass Fehlstellen mit einer Größe bis zu wenigen Zentimetern in Betonwänden mithilfe von laserinduziertem Körperschall sicher detektiert werden können. Dass das System robust und zuverlässig auch unter realen Bedingungen im Tunnel misst, haben die Wissenschaftler anhand von Probemessungen in verschiedenen Tunneln gezeigt (Abb. 5). Derzeit arbeiten sie daran, die Parameter für den Anregungslaser und das LDV weiter zu optimieren. Weitere Ziele sind die Unterdrückung und Filterung von Umgebungsschwingungen und anderen Störeinflüssen sowie die Entwicklung einer optimierten Signalanalyse.

Tunnelinspektion mit optischer Messtechnik und KI

Optische Messsysteme werden die Tunnelinspektion in Zukunft effizienter machen und BIM-konforme Daten liefern. Derzeit ist die Messgeschwindigkeit des Systems durch den Anregungslaser auf zehn Messungen pro Sekunde beschränkt; die Zeit für die Erfassung eines Tunnels hängt außerdem stark vom geforderten Messraster ab. Hochgerechnet bedeutet das zum Beispiel für die Erfassung einer Fläche von 100 m² mit einem Messraster von 10 cm eine Messdauer von knapp 17 Minuten. Integriert werden könnte das System zum Beispiel auf einer Roboter-



Abb 5: Die Einsatztauglichkeit des Messsystems wurde bereits unter realen Bedingungen erfolgreich in einem Tunnel getestet.

plattform, die den Tunnel im Stop-and-Go in 5 m Schritten durchfährt, da das Messprinzip keine Messungen von einer sich in Bewegung befindenden Plattform erlaubt.

Ziel ist es, möglichst umfassende Daten mit einer einzigen Tunneldurchfahrt zu erfassen und automatisiert auszuwerten. Das Tunnel Inspection System TIS von Fraunhofer IPM ist ein weiterer Schritt in diese Richtung: Das TIS nutzt für die Abstandsmessung das Phasenvergleichsverfahren, bei dem die Intensität des Messstrahls hochfrequent moduliert wird. Die Laufzeit des Lichts zum Objekt und wieder zurück wird aus der Phasenverschiebung zwischen Sendee- und Empfangssignal errechnet. Um mit dem System simultan die Oberflächenfeuchtigkeit zu messen, kommt ein multispektrales Verfahren zum Einsatz: Statt nur eines werden zwei kollineare Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge (1.320 nm und 1.450 nm) ausgesendet, die von Wasser unterschiedlich, aber sehr spezifisch absorbiert werden. Aus der Intensität der rückgestreuten Signale lassen sich Rückschlüsse über die Wandfeuchte ziehen. Für die Auswertung der digitalen Messdaten können Machine-Learning-Verfahren genutzt werden, mit denen die Daten klassifiziert werden und in BIM-fähige Formate überführt werden. Langfristiges Ziel der Wissenschaftler ist es, das System zur Geometrie- und Feuchtemessung mit der laserinduzierten Körperschallmessung zu kombinieren, um so eine große Bandbreite an wichtigen Tunnelparametern mit einem System messen zu können. ■

Die Autoren bedanken sich bei der DB Netz AG und der ARGE Flughafentunnel, insbesondere bei Herrn Christoph Illner sowie Herrn Andreas Aucher, für die wertvolle Unterstützung bei Testmessungen im Tunnel auf dem Gelände der Neubaustrecke in Stuttgart.

QUELLEN

- [1] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/13361/umfrage/anzahl-der-tunnel-im-besitz-der-db-ag/> 01.08.2023, 14 Uhr
- [2] Jean-Pierre Monchalin, "Laser-Ultrasonics: From the Laboratory to Industry", AIP Conference Proceedings 700, 3-31 <https://doi.org/10.1063/1.1711602> (2004).
- [3] Weiher, K., Heinze, C., Pankrath, H., Vierhub-lorenz, V., Werner, C., Geist, M., & GEIST, M. "Laser Sensing System for Contactless Detection of Subsurface Defects in Concrete Tunnel Lining." International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2022), 16-18 August 2022, Zurich, Switzerland. e-Journal of Nondestructive Testing Vol. 27(9). <https://doi.org/10.58286/27320> (2022).
- [4] Kurahashi, S.; Mikami, K.; Kitamura, T.; Hasegawa, N.; Okada, H.; Kondo, S.; Nishikino, M.; Kawachi, T.; Shimada, Y. "Demonstration of 25-Hz-inspection-speed laser remote sensing for internal concrete defects." In: J. Appl. Rem. Sens. 12(1) 015009, <https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.015009> (2018).
- [5] Vierhub-Lorenz, V., Werner, C. Olshausen, P.v., Reiterer, A., Towards Automating Tunnel Inspections with Optical Remote Sensing Techniques, AVN Allgemeine Vermessungs Nachrichten 1-2/2023

Alle Autoren:
Fraunhofer-Institut für Physikalische
Messtechnik IPM, Freiburg



Valentin Vierhub-Lorenz

Doktorand
valentin.vierhub-lorenz
@ipm.fraunhofer.de



Dr. Christoph Werner

Gruppenleiter Airborne- und
Unterwasserscanning
christoph.werner@ipm.fraunhofer.de



Dr. Philipp von Olshausen

Gruppenleiter Mobiles terrestrisches
Scanning
philipp.olshausen@ipm.fraunhofer.de



Prof. Dr. Alexander Reiterer

Abteilungsleiter Objekt- und
Formerfassung
alexander.reiterer@ipm.fraunhofer.de