

# Automatisierte akustische Prüfung von Tunnelstrukturen mit Hilfe von Lasersystemen und maschinellem Lernen

Christoph HEINZE<sup>1</sup>, Valentin VIERHUB-LORENZ<sup>2</sup>, Karsten WEIHER<sup>1</sup>,  
Christoph WERNER<sup>2</sup>, Michael GEIST<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP, Rostock

<sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg

Kontakt E-Mail: christoph.heinze@igp.fraunhofer.de

**Kurzfassung.** Zur Wahrung der Stand- und Verkehrssicherheit von Tunnelbauwerken müssen sowohl bei der Abnahme als auch bei der wiederkehrenden Inspektion verdeckte Fehlstellen hinter der Strukturoberfläche detektiert werden. Stand der Technik ist hierbei das manuelle Abklopfen der Tunnelwand unter großem personellem Aufwand. Das Forschungsprojekt „LaserBeat“ verfolgt das Ziel, diesen Vorgang zu automatisieren und damit den Prüfvorgang wesentlich zu beschleunigen und zu objektivieren.

Voraussetzung für eine effiziente Automatisierung ist eine schnelle und großflächige Abtastung der Tunnelwände. Dies wird durch den Einsatz von Lasersystemen sichergestellt, die eine kontaktlose Prüfung ermöglichen. Zur Anregung wird ein Puls-Laser verwendet, der durch einen stark lokalisierten Energieeintrag mechanische Wellen in der Tunnelwand erzeugt, während ein speziell für diese Anwendung entwickeltes Laservibrometer die Oberflächenschwingung erfasst. Die Schadenserkenkung erfolgt auf Basis von maschinellem Lernen unter der Anforderung, dass das System auch bei wechselnden Bauweisen, Strukturalter und Grundmaterialien zuverlässig Fehlstellen identifizieren kann. Durch die Clusteranalyse als unüberwachtes Lernverfahren ist es möglich Fehlstellen zu erkennen, ohne dass zuvor eine aufwändige Lernphase oder eine große Anzahl an klassifizierten Referenzdaten nötig sind.

Zugang zu Tunnelbauwerken für die Erfassung von Messdaten und die Anforderungsevaluation wurde durch die freundliche Unterstützung der DB Netz AG und der Amberg Technologies AG ermöglicht. Untersuchungen an Betonstrukturen zeigen bereits zum aktuellen Projektstand gute Erkennungsraten. Aktuell wird das System auf diesen Werkstoff ausgelegt, zukünftig ist jedoch mit Anpassungen auch eine Anwendung bei Mauerwerk aus Natursteinen und künstlichen Steinen vorgesehen.

## 1. Einleitung

Tunnelbauwerke stellen wichtige Verbindungselemente unserer Verkehrsinfrastruktur dar, vernetzen aber auch Abwassersysteme. Überlastung, Überalterung und Neuerschließungen führen zu höheren Anforderungen bezüglich effizienter und möglichst objektiver Inspektionen und Prüfungen, welche heute aufgrund fehlender Systeme rein visuell und in Form des sogenannten Hammertests durch Experten erbracht werden. Bei derzeit 400 Straßen-, Eisenbahn- und U-Bahn-Tunneln sowie über 200.000 km tunnelartigem Kanalnetz



alleine in Deutschland lässt sich die Inspektion nur mit einem enormen Zeitaufwand und großen Risiken für das beteiligte Personal bewältigen. Die Kosten alleine für die Inspektion von Tunnelbauwerken belaufen sich in Deutschland auf über 700 Mio. Euro pro Jahr.

Die möglichen Anwendungsfelder des in Entwicklung befindlichen Prüfsystems gehen über die hier adressierten Tunnel weit hinaus. Neben der Inspektion der bereits erwähnten Schächte und Kanäle sind auch die Inspektion von Brücken und Windkraftanlagen von erheblicher Bedeutung. Perspektivisch lassen sich durch die Kombination des „LaserBeat“-Systems mit weiteren Prüfverfahren und autonomen Inspektionsfahrzeugen völlig neue und sehr effiziente Verfahren für die Bauwerksinspektion umsetzen, z. B. eine autonome Inspektion eines kompletten Autobahnabschnitts inkl. Tunnel und Brücken.

## 2. Stand der Technik

Moderne Tunnelbauwerke werden nahezu ausschließlich in Betonbauweise errichtet. Die Möglichkeit einer großflächigen und automatisierten Tunnelprüfung ist jedoch ebenso für den älteren Baubestand von Interesse. Die Tunnel der DB Netz AG sind zu 60 % in Betonbauweise (Betonfertigteile, Spritz- und Schalbeton) gefertigt. Naturstein- und Ziegelmauerwerk bilden jedoch mit 32 % einen weiteren bedeutenden Anteil, der größtenteils älteren Tunneln zuzuordnen ist. Die Tunnel der Bundesfernstraßen von Deutschland und des hochrangigen Straßennetzes von Österreich sind mehrheitlich in Spritzbetonbauweise gefertigt. [1] Aufgrund des hohen Anteils der Betonbauweise wird das Prüfsystem zunächst für die Fehlerdetektion in diesem Werkstoff ausgelegt. Zukünftig ist jedoch auch eine Anwendung bei anderen Materialien, Bauweisen und Strukturen geplant.

Die Prüfung von Tunneln basiert zunächst auf einer Sichtprüfung der tragenden Struktur und der Einbauten unter Berücksichtigung von Lage, Nutzung, Alter, Bauweise und Bauplänen, soweit vorhanden. Eine Suche nach inneren Defekten erfolgt nur im Rahmen der Tunnelabnahme vollflächig. Bei der wiederkehrenden Inspektion beschränkt sie sich auf Bereiche mit ungewissem inneren Zustand. Bei neueren Tunneln mit Schalen aus Ortbeton oder Betonfertigteilen ist eine akustische Prüfung entsprechend seltener nötig, während Spritzbeton insbesondere bei älteren Tunneln großflächige Prüfungen der inneren Struktur erfordern. Bei einer solchen Prüfung werden durch das Prüfpersonal systematisch die Wände und Decken nach hohlklingenden Bereichen abgeklopft (Abbildung 1). Dieser Prozess ist mit einem hohen Aufwand bezüglich Material, Personal und Zeit verbunden. Ansätze zur systematischen Digitalisierung und Automatisierung konnten sich bisher bei der regulären Prüfung nicht durchsetzen.



Abbildung 1: Tunnelröhre mit fahrbarem Gerüst für die manuelle Prüfung

Ein gewöhnlicher Hammertest hat eine Eindringtiefe von etwa 10 cm [2], was genügt, um die häufigsten Fehlertypen innerhalb der Betondeckung zu finden. Solche Fehlstellen werden im Normalfall ohne nähere Untersuchung geöffnet und repariert. Nur im Fall von Unsicherheiten oder vermuteten tieferliegenden Schäden wird auf fortschrittlichere Prüfverfahren zurückgegriffen. Zur näheren Analyse von Fehlstellen kann beispielsweise auf Ultraschallprüftechnik zurückgegriffen werden. Deren Auflösungsvermögen und Eindringtiefen sind bei Beton jedoch aufgrund der inhomogenen Struktur gegenüber metallischen Werkstoffen begrenzt. Zur Dickenmessung und Fehlerdetektion in größeren Tiefen bietet sich das Impact-Echo-Verfahren an. [3] Radarsysteme eignen sich hingegen zur Ortung von Objekten, zur Bestimmung der Feuchteverteilung im Mauerwerk, um Spannglieder zu detektieren und die Bewehrung in Betonbauteilen zu orten. [4]

Vergleichbar mit dem geplanten Messsystem ist die in Japan entwickelte, laserbasierte Fernerkundungstechnologie (LRSS: Laser Remote Sensing System) zur Erkennung von Defekten in der Betonauskleidung von Tunneln. Es wurde ein automatisches Positionierungssystem entwickelt, welches eine präzise Ausrichtung und Fokussierung der Laser erlaubt. Ein Kurzpulsaser auf Basis eines Neodym-dotierten Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall induziert Stoßwellen im Inneren des Betons, die Schwingungen in der Nähe der Oberfläche erzeugen. Ein Detektionslaser erfasst diese Schwingung durch Interferenz zwischen einem von der Oberfläche reflektierten Strahl und einem Referenzstrahl [2]. Als messbare Tiefe von Rissen und Hohlräumen werden 3-10 cm angeführt, die abhängig vom Bestrahlungspunkt auf der Betonoberfläche und der Energie des Laserpulses ist. Dieses System ist seit etwa einem Jahrzehnt in Entwicklung, jedoch bisher nicht kommerziell verfügbar.

Die Automatisierung der Tunnelinspektion ist in vielen Bereichen bereits weit vorangeschritten. Moderne Kamerasysteme und Laserscanner erlauben eine schnelle und lückenlose Erfassung von Geometrie und Oberflächen von Tunneln mit mobilen Plattformen. Entsprechende Systeme sind bereits kommerziell verfügbar, beispielsweise in Form des „Mobile Mapping“ von Amberg Technologies. [5] Weit fortgeschritten sind auch Weiterentwicklungen zur Erkennung von Rissen und Feuchtigkeit auf Basis von hochaufgelösten Bildaufnahmen bzw. spektraler Analyse des reflektierten Lichts der Laserscanner. [6, 7] Während oberflächliche Fehler gut mit diesen Methoden erfasst werden können, müssen für verdeckte Fehlstellen andere Ansätze gewählt werden. Der Großteil solcher internen Schäden treten bei bewehrten Strukturen innerhalb der Betondeckung auf. Kommt es beispielsweise zur Korrosion des Bewehrungsstahls, führt dies zu einer Volumenzunahme, die die Deckschicht ablösen kann. Eine weitere Ursache für Rissbildungen und Ablösungen sind lokal überhöhte Drucklasten, die etwa bei Tübingen bereits bei geringsten Fertigungsabweichungen am Rand auftreten können. Insbesondere im Deckenbereich von Verkehrstunneln sind solche Delaminationen oder Abplatzungen kritisch und sollten detektiert werden solange das Material noch anhaftet.

### **3. Projektübersicht und Konzept zur Tunnelprüfung**

Das Projekt „LaserBeat“ hat das Ziel, ein Messsystem für die Inspektion von Tunneln zu entwickeln, welches innere Schäden auf der Basis laserinduzierten Körperschalls erkennt. Dazu werden Laserpulse auf die Tunneloberfläche fokussiert. Die erzeugten Plasmablitze regen Schallwellen an, welche im Volumen der Tunnelwand an Rissen und Inhomogenitäten reflektiert werden und eine messbare lokale Resonanzüberhöhung erzeugen. Mit einem Laservibrometer können die resultierenden Oberflächenschwingungen kontaktfrei aufgenommen werden. Kombiniert werden soll die Messeinheit mit einem entsprechenden geometrisch scannenden System sowie Algorithmen für die schnelle und zuverlässige

Datenauswertung und -interpretation. Das Gesamtsystem soll auf bewegten Plattformen (z. B. Messfahrzeugen) eingesetzt werden und mit hoher räumlicher Auflösung drohende Abplatzungen des Oberflächenmaterials erkennen, die durch Hohlstellen hinter der verbauten Struktur verursacht werden. Die Integration des Messsystems in bestehende Tunnelinspektionssysteme erlaubt die Kombination mit 3D-Daten und somit die Objektivierung der bisher durch Experten manuell inspizierten Strukturen.

Technisch zerfällt die Aufgabe in drei, jeweils für sich schon anspruchsvolle Pakete: (a) Optisches System zur kontrollierten Anregung des Körperschalls, ohne das Objekt jedoch zu beschädigen, und zur kontaktfreien und zuverlässigen Detektion des Körperschalls, (b) Filter zur Reduktion des Signals auf die relevanten Schallinformationen und (c) Auswertesoftware, die aus den erfassten Daten interpretierbare Informationen für Experten generiert. Das Ergebnis einer Inspektionsfahrt soll die Kartierung gefährdeter Bereiche am Objekt mit entsprechender Visualisierung als Output sein.

#### 4. Datenerfassung

Eine flexible und schnelle Prüfung der großen und oft unregelmäßig geformten Oberflächen eines Tunnels kann nur durch ein kontaktloses Verfahren realisiert werden. Im Projekt LaserBeat werden hierzu zwei unterschiedliche Lasertechnologien eingesetzt. Ein Puls laser erzeugt mit kurzen und energiereichen Lichtpulsen eine lokale Erhitzung, die in einer mechanischen Anregung der Tunnelwand resultiert. In Abhängigkeit von Zusammensetzung und Aufbau verändert sich das Schwingungsverhalten der Struktur. Zur Erfassung der erzeugten Schwingungen wird ein vom Fraunhofer IPM eigens entwickeltes Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) verwendet. Die Entscheidung für eine Eigenentwicklung wurde aus mehreren Gründen getroffen. So arbeiten gängige Geräte aus Sicherheitsgründen mit sehr wenig Laserleistung, was die Reichweite limitiert, eine Fokussierung notwendig macht und Anforderungen an die Reflektivität der Probenoberfläche stellt. In Anwendungsszenario mit scannender Abtastung variiert der Abstand jedoch – für jeden Messpunkt eine Autofokusprozedur vorzunehmen würde jedoch die Messrate limitieren. Weiterhin ist beabsichtigt im weiteren Projektverlauf in das System eine Kompensation von Störeinflüssen einzubauen. Dies könnte beispielsweise durch einen zweiten Referenz-Messkanal erfolgen, der nur die Störgeräusche aufnimmt. Auch dies ist nur in einer spezialisierten Lösung umsetzbar.

Der prinzipielle Aufbau des Vibrometers ist in Abbildung 2 dargestellt. Es wird ein extrem schmalbandiger (Linienbreite unter 100 Hz) Erbium-Faserlaser als Lichtquelle genutzt. Dieser wird faseroptisch in einen Mess- und Referenzstrahl aufgespalten. Ein akustooptischer Modulator (AOM) erzeugt eine Frequenzverschiebung auf dem Messstrahl von 40 MHz. Danach wird der Strahl kollimiert und über durch einen Strahlteiler gelenkt.

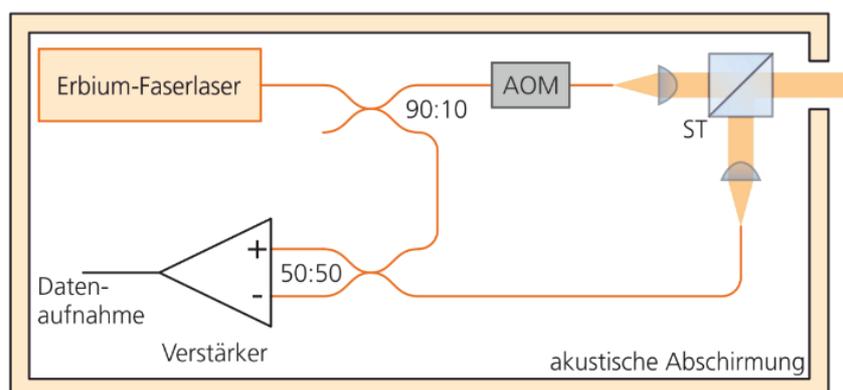


Abbildung 2: Skizze des entwickelten Laser-Doppler-Vibrometers.

Nachdem das Licht von Messobjekt reflektiert wurde, trifft es wieder auf den Strahlteiler und wird in die Empfangsfaser eingekoppelt. Nun wird es mit dem Referenzstrahl überlagert und mit einem symmetrischen Detektor aufgenommen und verstärkt. Danach wird das elektrische Signal digitalisiert und in einem PC oder FPGA ausgewertet.

Zur Impulsanregung wird ein Nd:YAG-Laser verwendet. Dieser liefert bis zu 10 Pulse pro Sekunde mit bis zu 1 J Energie bei einer Pulsdauer von ca. 10 ns. Der Testaufbau ist in Abbildung 3 gezeigt. Der Laser wird auf eine Betonprobe fokussiert und erzeugt dort ein Plasma – lediglich mit einem kollimierten Strahl auf die Oberfläche zu leuchten hat sich als nicht ausreichend erwiesen. Gleichzeitig misst das entwickelte Vibrometer die erzeugte Schwingung. Die Messzeit erstreckt sich dabei über etwa 80 ms nach dem Laserpuls. Zusätzlich ist ein klassischer Piezo-Sensor auf der Probe angebracht, um eine Referenzmessung zu erhalten. Eine akustische Abschirmung schützt das LDV vor Störeinflüssen. Erste Messergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den vom Piezo-Sensor und dem LDV gemessenen Resonanzfrequenzen (Abbildung 3). Abweichungen der Amplituden sind darauf zurückzuführen, dass die Amplitude des LDV proportional zur Geschwindigkeit, die des Piezo-Sensors zur Beschleunigung ist.

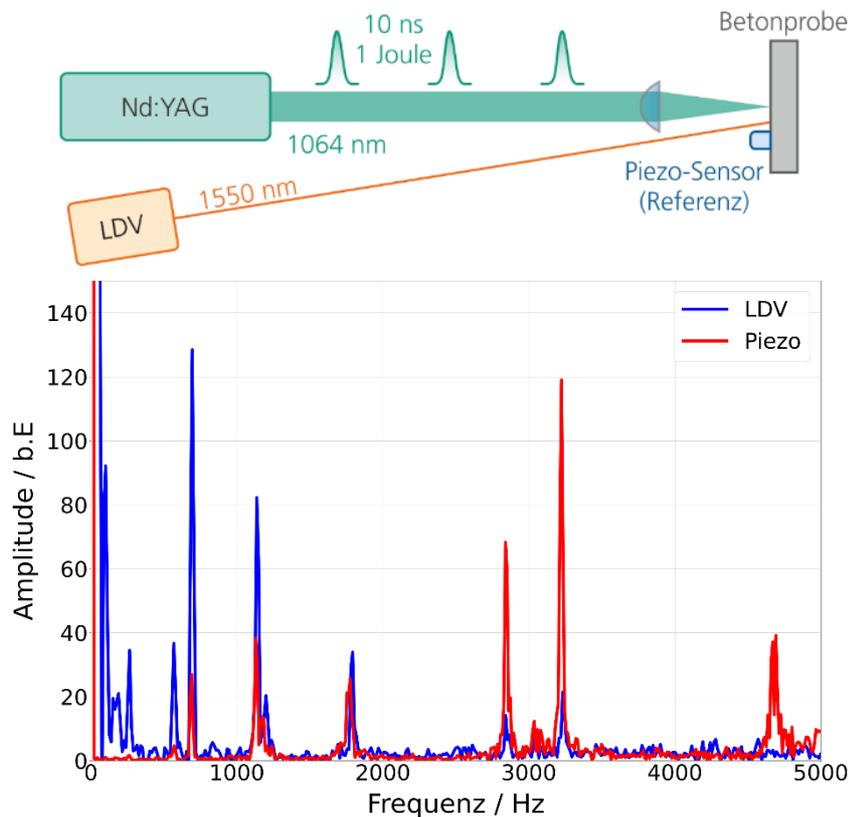


Abbildung 3: Oben: Skizze des Testaufbaus im Labor. Ein Pulslaser regt eine Betonprobe an. Die Schwingungen werden mittels LDV und Piezo-Beschleunigungssensor erfasst. Unten: Mit dem LDV und dem Piezo-Sensor gemessene Signale im Vergleich.

Durch die Verwendung von Lasern zur kontaktlosen Anregung und Erfassung von Oberflächenschwingungen, ist nicht nur eine schnelle gerasterte Abtastung vieler Messpunkte möglich, sondern es wird auch vorzugsweise Körperschall erfasst. Dies ist ein Vorteil gegenüber anderen akustischen Prüfmethode, wie dem Impact-Echo-Verfahren, die Luftschall erfassen und damit für entsprechende Störungen anfällig sind, wie sie sehr häufig bei arbeitendem Personal oder Fahrzeuge in der Nähe auftreten. Zusätzlich sind unterhalb der Erdoberfläche nur sehr wenige störende Quellen von Körperschall zu erwarten, die sich in der Wandstruktur ausbreiten.

## 5. Signalverarbeitung und Dateninterpretation

Zur Erkennung von Schäden als Anomalien in einer Vielzahl von Messdaten bieten sich prinzipiell zwei Herangehensweisen an. Das klassische Vorgehen konzentriert sich auf die meist manuelle Suche nach unveränderlichen Signalmerkmalen, die eindeutig für fehlerhafte oder intakte Bereiche bzw. Bauteile stehen. Bei wenigen Systemparametern und konstanten Umgebungsbedingungen ist dieser Ansatz legitim. Gibt es jedoch eine Vielzahl von Einflussparametern, sind Merkmale nur unter größtem Aufwand manuell bestimmbar, da praktisch jeder zu erwartende Zustand a priori analysiert werden muss. Während der großflächigen Prüfung von Bauwerken ist im Gegensatz zu einer kontinuierlichen Überwachung zwar nicht mit einer zeitlichen, jedoch mit einer räumlichen Veränderung der Merkmale zu rechnen. Hierzu gehören mögliche Variationen der Bauweise, Materialien, Umgebungsbedingungen und des Strukturalters. Eine Schadenserkenkung muss demnach zuverlässig funktionieren, ohne dass jeweils eine manuelle Anpassung der Merkmale zur Schadenserkenkung durchgeführt wird. Für diese Anwendung bieten sich adaptive und selbstlernende Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens (ML) und der künstlichen Intelligenz (KI) an.

Aufgrund der möglichen Veränderungen der Bausubstanz und Umgebungsparameter sowohl innerhalb als auch zwischen einzelnen Tunnelstrukturen, ist eine überwachte Anlernphase (engl. supervised learning) bei einer Tunnelprüfung nicht praktikabel. Unter dieser Maßgabe wurde Clustering als Verfahren des unüberwachten ML ausgewählt, um automatisiert Schäden zu erkennen. Bei diesem Verfahren werden Messdaten im Merkmalsraum (engl. feature space) abgebildet und vom ML-Algorithmus in Gruppen (engl. Cluster) aufgeteilt. Das größte Cluster wird als fehlerfrei angenommen und die weiteren Cluster als Defekte. Vorteil dieser Methode ist, dass keine Trainingsdaten benötigt werden und die Schadenserkenkung sensibel für lokale, jedoch nicht für großflächige (globale) Änderungen ist. Allerdings kann der Clustering-Algorithmus nicht bestimmen, um welchen Fehlertyp es sich handelt.

Zentrale Herausforderung bei der Anwendung solcher Verfahren ist die korrekte Aufbereitung und Reduzierung der Daten sowie die Wahl der zu verwendenden Clustering-Algorithmus und der Anzahl der Cluster. Bei der Signalaufbereitung und -reduzierung müssen Merkmale erhalten bleiben, die sensitiv für Veränderungen infolge von Strukturschäden sind. Zur Datenreduktion bieten sich zunächst allgemeine Ansätze an, wie die Begrenzung des Signal- und Frequenzraums durch Filterung, Fensterung oder die Reduzierung der Abtastrate an. Ein spezialisierter Ansatz, der insbesondere für ML-Verfahren geeignet ist und automatisiert eine drastische Datenreduktion erlauben, ist die principal component analysis (PCA). Die durch das Prüfsystem zu findenden verdeckten Fehlstellen, wie Ablösungen und Hohlräume, zeichnen sich bei einer akustischen Anregung durch lokalen Eigenformen aus. Entsprechend werden die Merkmale zur Schadenserkenkung mittels Clustering im Frequenzspektrum gesucht und mittels PCA reduziert.

## 6. Experimentelle Untersuchungen

Zur Erprobung der Messhardware und Algorithmen wurden zunächst Probekörper mit und ohne künstlichen Defekten im Labor analysiert. Abbildung 4 zeigt die hierbei gefundenen Cluster, die für den Fall der Delamination und des Hohlraums gut mit den künstlich in den Testkörper integrierten Fehlstellen korrelieren. Wie erwartet, wird das Kiesnest nicht zuverlässig erkannt, da es keine klar identifizierbare lokale Eigenform ausbildet. Dies liegt einerseits an der geringen Größe der Fehlstelle, aber auch am diffusen Übergang zwischen intakter und defekter Struktur.

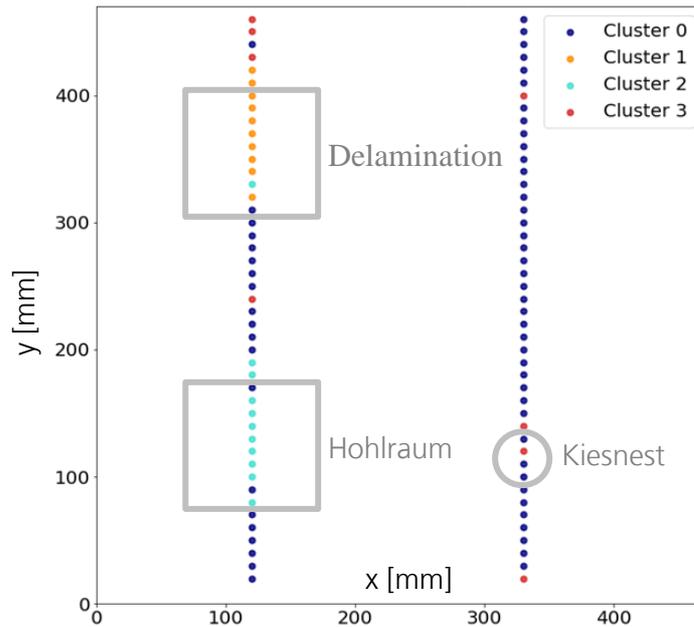


Abbildung 4: Messpunkte auf dem Testkörper mit farblich markierten Ergebnissen der automatischen Klassifizierung mittels Clustering. Graue Umrisse markieren die Lage der internen Defekte.

Weiterhin konnten Messdaten in Tunnelumgebungen aufgezeichnet werden (siehe Abbildung 1). Da zum Zeitpunkt der Messungen die entwickelte Hardware noch nicht mobil einsetzbar war, wurde auf eine mechanische Anregung und Messmikrofone zurückgegriffen, die bei entsprechender Positionierung und kontrollierten Umgebungsbedingungen vergleichbare Ergebnisse liefern. Messungen wurden an Schäden durchgeführt, die zuvor bei regulären Prüfungen durch manuelles Abklopfen entdeckt wurden. Für die Auswertung dieser Messungen wurde der Clustering-Algorithmus erweitert, um auch die räumliche Position der Messpunkte relativ zueinander mit einzubeziehen. Hierdurch kann die Anzahl von Ausreißern deutlich reduziert werden. Abbildung 5 zeigt die untersuchte Betonfläche überlagert mit den Messpunkten und ermittelten Clustern. In den Ergebnissen zeichnet sich sowohl die Abplattung als auch die Schraubtasche ab.

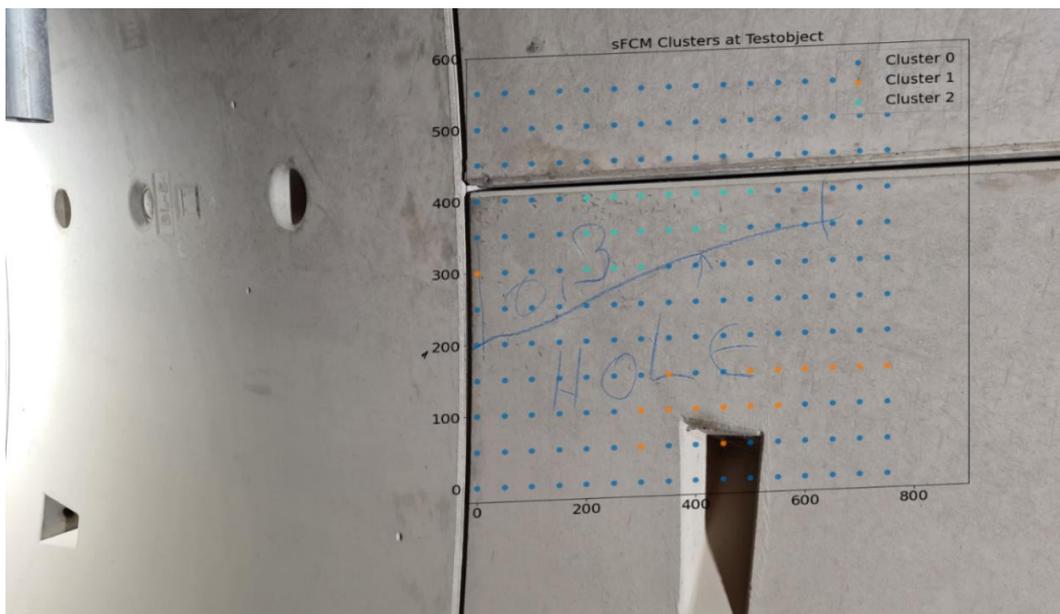


Abbildung 5: Betonstruktur überlagert mit Messpunkten (Hellblau und Orange markieren die identifizierten Hohlstellen)

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Im Forschungsprojekt „LaserBeat“ entsteht ein System zur automatisierten Detektion von verdeckten Defekten in Tunnelstrukturen, die bisher durch manuelles Abklopfen gefunden werden. Der Einsatz angepasster Lasersystemen zur Anregung und Messung mechanischer Schwingungen ermöglicht eine kontaktlose und schnelle Abtastung großer Flächen auch bei variablen Abständen und Oberflächen. Die Datenauswertung und Schadenserkenkung basiert auf dem Ansatz des Clustering, das ohne Trainingsdaten in der Lage ist, anomale Bereiche in der Struktur zu erkennen. Hierdurch kann eine Schadenserkenkung auch bei wechselnden Strukturen und Umgebungsbedingungen zuverlässig erfolgen.

Der nächste Schritt in der Systementwicklung ist die Zusammenstellung der entwickelten Einzelkomponenten zu einem Prototyp. Dieser soll zunächst an Testkörpern im Labor und anschließend unter realen Bedingungen in Tunnelumgebungen erprobt und optimiert werden. Bisher wird das System auf die Fehlerdetektion in Beton ausgelegt. Langfristig ist jedoch eine Anpassung an weitere Bauweisen, wie Mauerwerk, oder andere Strukturen möglich.

## Danksagung

Wir danken der DB Netz AG, der Amberg Technologies AG, der Geodata Group, der Ruhr-Universität Bochum und dem Karlsruher Institut für Technologie für die Beratung und Unterstützung im Projekt.

## Referenzen

- [1] ASFINAG, DB Netz AG und Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen e. V, Hg., U-Verkehr und unterirdisches Bauen: Sachstandsbericht 2017 "Instandsetzungsstrategien und -verfahren für Verkehrstunnel". Berlin: Ernst & Sohn, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.wiley-vch.de/publish/dt/books/ISBN978-3-433-03253-4/>
- [2] Y. Shimada et al., „Development of laser-based remote sensing technique for detecting defects of concrete lining“, Electron Comm Jpn, Jg. 102, Nr. 6, S. 12–18, 2019, doi: 10.1002/ecj.12168.
- [3] D. ALGERNON, S. FEISTKORN und M. SCHERRER, „Zerstörungsfreie Prüfung von Betonbauteilen mit dem Impact-Echo-Verfahren“, Nuklearinspektorat, Wallisellen, Schweiz, Fachtagung Bauwerksdiagnose Poster 7, 2016.
- [4] A. Taffe, M. Stoppel und H. Wiggenhuaser, „Zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau)“, Betoninstandsetzung im Ingenieur- und Wohnungsbau, 2010.
- [5] <https://ambergtechnologies.com/de/loesungen-dienstleistungen/geomatik-services/amberg-mobilemapping/>, zuletzt aufgerufen am 22.03.2021
- [6] Schneider, O. & Prokopová, A. & Modetta, F. & Petschen, Veronika. (2019). The use of artificial intelligence for a cost-effective tunnel maintenance. 10.1201/9780429424441-323.
- [7] V. Vierhub-Lorenz, K. Predehl, S. Wolf, C. Werner, F. Kühnemann, A. Reiterer, „A multispectral tunnel inspection system for simultaneous moisture and shape detection“ in Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments IV, 2019, doi: 10.1117/12.2533101