

ECHOLYST – Entwicklung eines Impact-Echo-Systems für Scanning, Analyse und Machine Learning

Daniel Algernon, Sascha Feistkorn, Mark Hagenbruch, Philip Kicherer, Leonardo Rössler, Michael Scherrer

SVTI Schweizerischer Verein für technische Inspektionen, Nuklearinspektorat, Wallisellen, Schweiz

Kontakt E-Mail: daniel.algernon@svti.ch

Kurzfassung. Das Impact-Echo-Verfahren ist ein weit verbreitetes Verfahren der Zerstörungsfreien Prüfung von Stahlbetonbauwerken im Bauwesen (ZfPBau). Hauptanwendungsgebiete sind Bauteildickenmessungen sowie die Ortung flächiger Ablösungen bzw. Hohlräume. Eine signifikante Weiterentwicklung wurde in der Vergangenheit im Rahmen der Forschung durch die bildgebende Anwendung des Verfahrens erreicht. Die auf Basis eines Messrasters erzeugten Profildarstellungen und Quasi-Querschnitte zeigen gegenüber der Auswertung einzelner Signale eine deutlich zuverlässigere Interpretierbarkeit. Diese wissenschaftlichen Fortschritte zeigten ihre Vorteile in zahlreichen Studien. Daraus resultiert die Motivation der Umsetzung dieser Erkenntnisse in einem System für den breiten Impact-Echo-Anwenderkreis.

Ein solches System liefert die Software ECHOLYST. Die Entwicklung erfolgte mit dem Fokus auf eine intuitive Bedienung und Interpretation der Ergebnisse. Ergebnisbilder aus Messrastern werden dreidimensional dargestellt, insbesondere wird durch die Überlagerung der erzeugten Ergebnisbilder mit importiertem Fotomaterial des Testobjektes eine geometrische Zuordnung und Interpretation in verständlicher Weise leicht zugänglich gemacht.

Für die Analyse und Interpretation von Daten der zerstörungsfreien Prüfung besitzt die Machine Learning-Technologie grundsätzlich erhebliches Potenzial. Dies gilt umso mehr für Impact-Echo-Daten, als dort aus der Überlagerung unterschiedlicher Resonanzmoden oder allgemein physikalischer Phänomene eine hohe Komplexität resultiert. Während diese in der herkömmlichen Auswertung als störend angesehen wird, liefert die Informationsmenge gute Voraussetzungen für die Anwendung von Deep Learning-Algorithmen. Im Sinne eines Supervised Learning lassen sich leistungsfähige empirische Modelle prüfproblemspezifisch erstellen. Die Technologie wurde in einem entsprechenden KI-Modul ECHOLYST A.I. umgesetzt.

Um die Datenaufnahme als Grundlage für große und dichte Messraster hinsichtlich Präzision, Geschwindigkeit und Komfort zu optimieren, befindet sich ein Rollscanner ECHOLYST Cart unter luftgekoppelter Anwendung des Verfahrens in der Erprobung und Optimierung, bis hin zu einem industriellen Standard.

1. Einführung

Die Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen (ZfPBau) erhält zunehmenden Einzug in die baubegleitende Qualitätssicherung, Zustandsbeurteilung bestehender Bauwerke sowie Schadensdiagnose. Moderne Prüfverfahren basieren insbesondere auf der Nutzung elektromagnetischer oder elastischer Wellen, welche mit dem Material, Inhomogenitäten oder Spannkänen im Innern sowie den geometrischen Grenzflächen in Wechselwirkung treten. Während das Impact-Echo-Verfahren in seiner ursprünglichen Form als Klassiker für die Dickenmessung bezeichnet werden kann, haben inzwischen erhebliche Weiterentwicklungen stattgefunden, die den Anwendungsbereich des Verfahrens im Feld erweitert haben. Diese erfolgten primär im Rahmen von Forschungsarbeiten.

In seiner ursprünglichen Form entwickelt wurde das Impact-Echo-Verfahren in den 1980er Jahren am National Institute of Standards and Technology (NIST) [1]. Obgleich zum damaligen Zeitpunkt Ultraschallprüfköpfe und -systeme, welche für den Einsatz an Betonkonstruktionen in der Praxis geeignet wären [2], nicht verbreitet waren, wurde die Nutzung elastischer Wellen zu diesem Zwecke als sinnvoll angesehen [3]. Für den Einsatz in der Praxis wurden Leitfäden erarbeitet [4] und ein erster ASTM-Standard erschien im Jahr 1998 [5].

Bauteildickenmessungen [6] sowie die Detektion flächiger Ablösungen sind primäre Aufgaben des Verfahrens (Abbildung 1). Insbesondere ist die Anwendung zur Dickenmessung von Tunnelinnenschalen in Deutschland Teil der diesbezüglichen Richtlinie [7]. Eine umfassende Übersicht über den Einsatzbereich des Verfahrens findet sich im DGZfP-Merkblatt B11 [8].

Eine signifikante Weiterentwicklung des Impact-Echo-Verfahrens wurde in der Vergangenheit im Rahmen der Forschung durch die Entwicklung hin zu einem bildgebenden Verfahren erreicht. Insbesondere haben hierzu an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) die wegweisenden Entwicklungen stattgefunden. Ebenfalls explizit genannt sei die Arbeit der Universität Stuttgart [9] [10] sowie die Zusammenarbeit in der DFG-Forschergruppe FOR384 [11] [12]. Die zunehmend verfügbare Rechenleistung erlaubte die Erfassung großer und engmaschiger Messraster. Gegenüber der Anwendung des Verfahrens als Punktmessverfahren wurden auf diese Weise eindeutige Fortschritte hinsichtlich der Interpretierbarkeit von Messergebnissen im Sinne eines Volumenmessverfahrens erzielt. Diese wissenschaftlichen Fortschritte zeigten ihre Vorteile in zahlreichen Studien [13], jedoch sind die eingesetzten Softwareapplikationen lange Zeit primär Eigenentwicklungen der entsprechenden Forschungseinrichtungen gewesen [14]. So war die Zugänglichkeit zum neuen bildgebenden Impact-Echo für die breite Praxis nur eingeschränkt möglich. Dies war Motivation für die Entwicklung von ECHOLYST im Sinne einer Implementierung des Forschungsstandes in umfassender und dabei anwenderorientierter Software. Durch die Verknüpfung

mit existierenden Geräten sollte ein System für den breiten Anwenderkreis der Impact-Echo-Praktiker geschaffen werden. Darüber hinaus sollte durch eine ergänzende Geräteentwicklung die Effizienz maximiert werden.

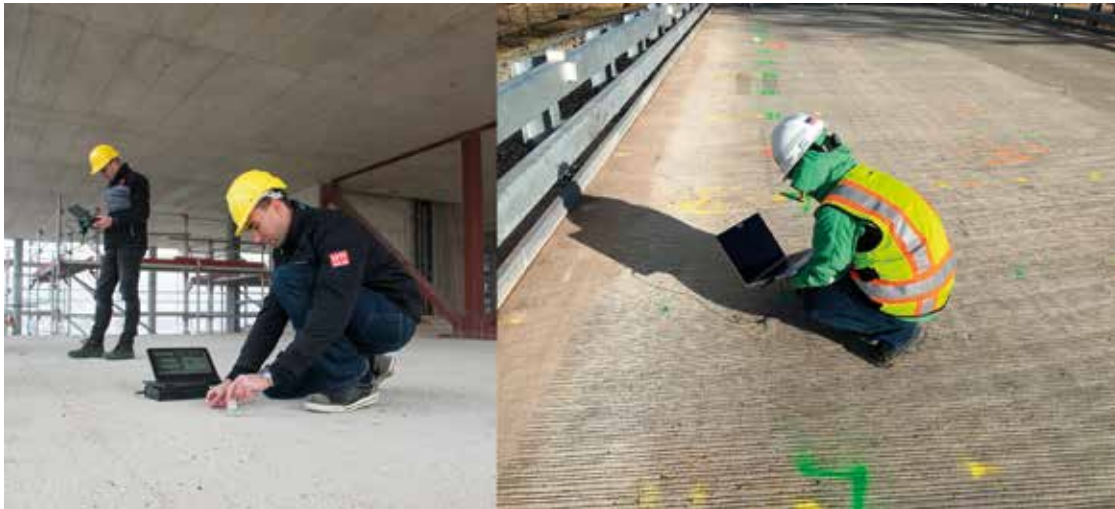


Abbildung 1: Manuelle Impact-Echo-Messungen.

(Quelle Bild rechts: Dr. Arezoo Imani)

1.1 Impact-Echo--Messprinzip

Das Impact-Echo-Verfahren beruht auf der Analyse mechanisch angeregter elastischer Wellen im Frequenzbereich [15]. Die Anregung erfolgt durch einen mechanischen Impuls, klassischerweise eine kleine Stahlkugel, die impulsartig auf das Bauteil geschlagen wird. Ein nahe neben der Anregung platzierter Sensor registriert resultierende Auslenkungen bzw. Beschleunigungen der Bauteiloberfläche. Gebräuchlicherweise kommen hier piezoelektrische Beschleunigungssensoren zur Anwendung.

Durch die Fast-Fourier-Transformation des Zeitsignals in den Frequenzbereich soll die Schichtdickenresonanz, welche die Grundlage für das Verfahren darstellt [16], anhand dominanter Amplituden identifiziert werden (Abbildung 2). Dabei wird eine einfache Beziehung zwischen der Schichtdickenresonanz f und der Schichtdicke d über die Schallausbreitungsgeschwindigkeit c_p elastischer Longitudinalwellen herangezogen:

$$d = \frac{c_p}{2f} \quad \text{Gleichung 1}$$

c_p : Longitudinalwellengeschwindigkeit
 f : Resonanzfrequenz

Obgleich die klassische Anwendungsweise einen einfachen Zusammenhang suggeriert, wird die Auswertung in der Praxis oft dadurch komplex, dass die erwünschte Dickenresonanz f von anderen Effekten bzw. Resonanzen überlagert wird [17].

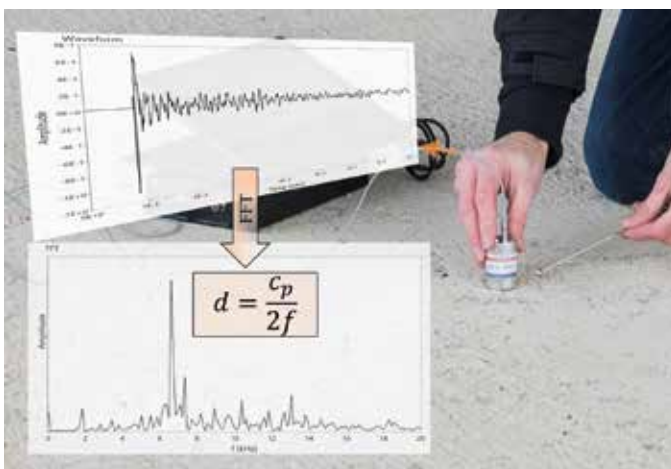


Abbildung 2: Messprinzip des Impact-Echo-Verfahrens.

Erhebliche Fortschritte bezüglich einer zuverlässigen Auswertung und Interpretation von Impact-Echo-Messdaten wurde durch die Etablierung von Visualisierungstechniken in Anlehnung an die Ultraschall- oder Radarprüfung erreicht. Grundlage für die Bildgebung ist die Messdatenaufnahme entlang von Messrastern und die Berechnung der Frequenzdarstellungen entlang des Rasters.

2. Entwicklung der Software ECHOYLST

2.1 Zielstellung

Die primäre Zielstellung bestand in der Implementierung des bildgebenden Impact-Echo-Verfahrens in einem vielseitigen jedoch übersichtlichen und nutzerfreundlichen System, welches für die ZfPBau-Praxis und den breiten Anwenderkreis von Impact-Echo-Praktikern geeignet ist. Dieses System sollte den vollen Prozess von Datenaufnahme über Visualisierung, Analyse und Reporting bis hin zur Anwendung von Machine Learning-Algorithmen zur Generierung Künstlicher Intelligenz abdecken. Wichtig ist im Hinblick auf die Datenaufnahme die Kompatibilität mit gängigen Messköpfen auf dem bestehenden Markt. Auf diese Weise wird bestehendes Equipment in ein bildgebendes System überführt, ohne einen eigentlichen Gerätewechsel. Gleichzeitig sind die Aufnahme­geschwindigkeit bzw. die erreichbare Datendichte pro Zeit sowie die Präzision in der Datenaufnahme maßgeblich für die erreichbare Effektivität. Demzufolge wird eine Geräteentwicklung hin zum Einsatz des Verfahrens in kontinuierlicher Bewegung ebenfalls verfolgt.

2.2 Datenaufnahmesteuerung, Visualisierung und Statistische Auswertung

Für sämtliche Einstellungen wurde eine übersichtliche Benutzeroberfläche erstellt, welche sowohl für eine Touchscreen- als auch für eine herkömmliche Desktopanwendung geeignet ist. Im Sinne einer universellen Lösung wurde grundsätzlich die Analog/Digital-Wandlung durch interne Notebook-Soundkarten implementiert (Abbildung 3). Darüber hinaus wurde für hochfrequente Anwendungen bis zu 1 MHz die Verwendung einer Oszilloskopkarte umgesetzt. Anzahl und Abstand der Messpunkte sind frei wählbar konzipiert. Eine Audio- und Sprachausgabe unterstützt die zügige Datenaufnahme.



Abbildung 3: Direkter Anschluss gängiger Impact-Echo-Messköpfe über die Soundkarte an ein Windows Notebook.

Die aufgenommenen Signale entlang des Messrasters werden in den Frequenzbereich Fourier-transformiert. Optional kann dabei eine Zeitfensterung vorgenommen werden, um die transiente Charakteristik von Impact-Echo-Signalen zu erfassen. Im Frequenzbereich wird eine Blende definiert, innerhalb derer die dominante Frequenz bestimmt wird. Dieses Fenster entspricht der zu erwartenden Bauteildicke, die im Regelfall grob abgeschätzt werden kann. Für jeden Messpunkt wird daraus über Gleichung 1 ein korrespondierender Tiefenwert errechnet. Dies resultiert in einem Tiefenprofil entlang der aufgenommenen Messfläche. Das Dickenprofil wird gemäß einer Farbskala in einer 2D- oder 3D-Abbildung dargestellt. Neben den gebräuchlichen Farbskalen ist die freie Definition von Skalen möglich. Seine Aussagekraft gewinnt das Impact-Echo-Verfahren primär dadurch, dass ein gesamtes Messraster betrachtet wird. Vielfach erweist sich auch innerhalb des Rasters die zusammenfassende Betrachtung benachbarter Punkte in Form von Medianwerten als sinnvoll (Abbildung 4).

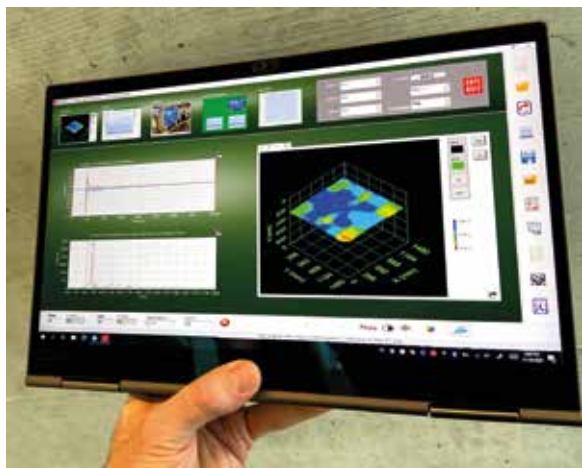


Abbildung 4: 3D-Schichtdickenprofildarstellung in ECHOLYST Software.

Neben der Darstellung von Dickenprofilen war die B-, C- und D-Bilddarstellung ebenfalls als ein wesentlicher Teil des Systems umzusetzen. Diese sind exemplarisch in Abbildung 5 dargestellt. Die Daten wurden an einem Testkörper der BAM aufgenommen, die diesbezüglich sowohl über ein weitreichendes Inventar von prüfproblembezogenen Testkörpern als auch Elemente realer Bauwerke verfügt. Die Darstellungen definieren sich in Anlehnung an die Terminologie in der Ultraschallprüfung. Somit ist bezeichnet ein B-Bild die Darstellung von Amplitude über Frequenz (respektive Tiefe) entlang einer Messlinie (x-Richtung), das C-Bild hingegen die Amplitude einer ausgewählten Frequenz (respektive Tiefe z) über das gesamte Messraster. Ein D-Bild definiert sich analog zum B-Bild, lediglich in dazu senkrechter (y-) Richtung. Durch Mittelung mehrerer aufeinanderfolgender Bilder werden die entsprechenden B-, C- und D-Projektionen erzeugt.

Im Sinne einer verbesserten Interpretierbarkeit, werden die jeweiligen Schnittbilder/-projektionen u.a. in einer 3D-Darstellung abgebildet. Zusätzlich wurde eine Überlagerung der Daten mit Bildmaterial konzipiert (Abbildung 5).

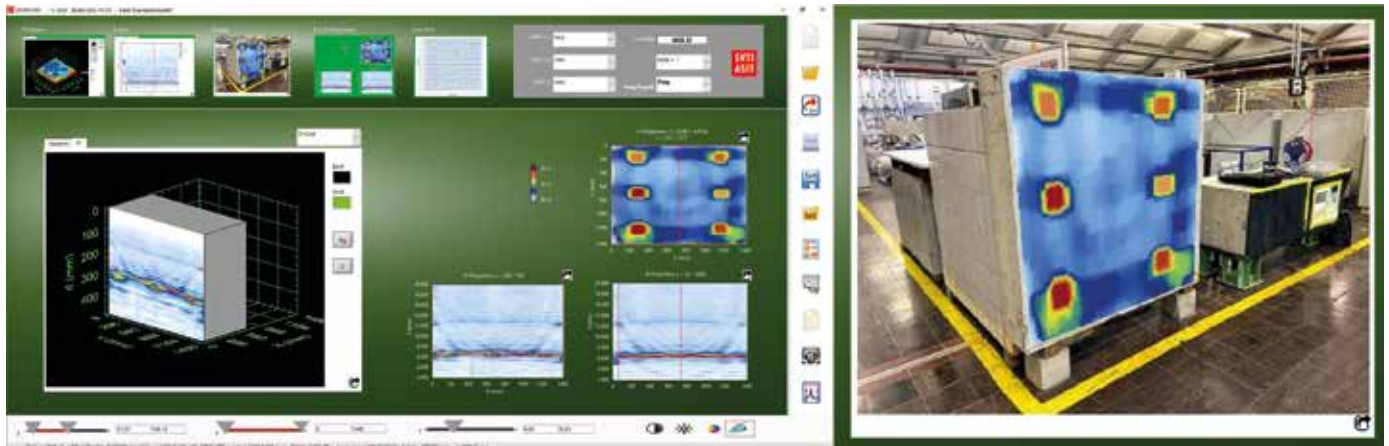


Abbildung 5: Scheibendarstellungen. Links: B-, C- & D-Bild-Fenster, rechts: Overlay.

Ein wichtiges Element der Impact-Echo-Datenanalyse stellen statistische Betrachtungen dar. Eine Histogramm-Darstellung ist nicht nur bei quantitativen Messaufgaben essenziell, vor allem lassen sich bei qualitativen Prüfaufgaben darin Unregelmäßigkeiten identifizieren. Die statistische Betrachtung kann für das gesamte Messraster ebenso wie für selektierte Teilbereiche erfolgen.

Ausblickend ist eine aktuelle Weiterentwicklung im Sinne einer Schnittstelle zum Building Information Modeling (BIM) und insbesondere zum übergreifenden System der digitalen Bauwerksdiagnostik der Firma IFSB geplant [18]. Es wird darin großes Potenzial hinsichtlich der Einbeziehung von ZfP-Ergebnissen in ganzheitliche Betrachtungen gesehen.

3. Entwicklung des Machine Learning Moduls – ECHOLYST A.I.

3.1 Motivation

Während die Auswertung und Interpretation von Impact-Echo-Daten sich in der Praxis oft als komplex erweisen, bedeutet die zugrundeliegende physikalische Komplexität einen hohen Informationsgehalt der Signale, weit über die dominante Frequenz hinaus. Intelligente Auswertungsansätze besitzen das Potenzial dieses Informationsvolumen zu nutzen [19].

Die Entwicklung des Machine Learning-Moduls ECHOLYST A.I. folgte dem Ziel, Machine Learning-Technologie dem breiten Kreis von Impact-Echo-Anwendern in effizienter Form zugänglich zu machen. Datensätze und Messraster sollten direkt in das A.I.-Modul transferiert und dort in das Training und die Validierung prüfaufgabenspezifischer Künstlicher Intelligenz (KI)-Modelle einfließen. Letztlich sollen trainierte Modelle auf neue ECHOLYST-Datensätze zur Lösung von Prüfaufgaben angewendet werden.

Eine wesentliche Priorität bestand darin, dass Vorgehensweise und Konzepte des Machine Learning transparent werden. Unter keinen Umständen sollte eine Blackbox-Applikation geschaffen werden. Das große Potenzial von Machine Learning im Zusammenhang mit Impact-Echo wird darin gesehen, dass die konventionelle Form der Auswertung lediglich ein einziges Merkmal eines Signals nutzt, die dominante Frequenz. Ein Machine Learning-Modell ist hingegen in der Lage, den gesamten Signalgehalt in die Auswertung einfließen zu lassen und zuvor verborgene Korrelationen zu nutzen [20] [21].

3.2 Implementierung

Es wurde ein individuelles Modul entwickelt, welches über eigene Benutzeroberflächen (Abbildung 6) verfügt. Alle Arbeitsschritte wurden in einer Weise ausgelegt, welche kein Programmieren bzw. kein Erstellen von Machine Learning Code erfordert. Eine grobe Gliederung ergibt sich zunächst in 1) Trainieren und 2) Applizieren des KI-Modells.

3.2.1 Trainieren des KI-Modells

Das Training Modul widmet sich dem Einlesen von Daten aus der ECHOLYST-Basissoftware (gemäß Abschnitt 2), einem optionalen Preprocessing und der Applikation von Deep Learning-Algorithmen, mit dem Resultat eines KI-Modells.

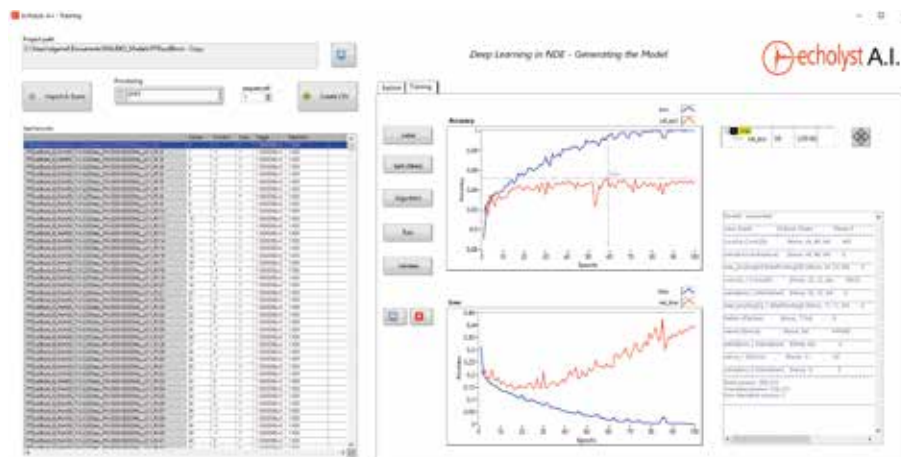


Abbildung 6: Trainieren des Deep Learning-Modells (links) und Anwendung auf Impact-Echo-Datensätze (rechts)

Die einzubeziehenden Datensätze werden importiert. Für das Training ist die Verfügbarkeit von Datensätzen mit bekannter Klassenzugehörigkeit notwendig. Im Sinne eines Supervised Learning, wird ein Labeling vorgenommen. Die Klassen sind je nach Prüfaufgabe frei definierbar. Beispielsweise könnte eine einfache (binäre) Festlegung von Klassen bestehen in 1) «intakt» und 2) «Anzeige». Für das Labeling wurde ein Werkzeug entwickelt, um diesen für das Supervised Learning sehr wichtigen Prozess schnell und in übersichtlicher Form zu absolvieren.

Dem Algorithmus wird nur ein Teil der vorhandenen Daten übergeben, der andere Teil wird zur Validierung des Modells verwendet. Somit erfolgt eine Aufteilung der Gesamtheit aller zur Verfügung stehenden Daten in Trainingsdatensätze und Testdatensätze. Die Datensätze sollten die entsprechenden Klassen in gleichem Maße repräsentieren. Ein implementiertes Statistik-Werkzeug ermöglicht die Aufteilung in ausgewogene Training- und Testdatensätze.

3.2.2 Algorithmen

Für die Generierung des KI-Modells wird ein Deep Learning angewendet. Deep Learning bezeichnet den Teil des Machine Learnings, welcher auf mehreren aufeinanderfolgenden Schichten neuronaler Netze basiert [22]. Dies wird zunächst durch Multi-Layer-Perceptron (MLP)-Architekturen realisiert. Darüber hinaus haben sich Convolutional Neural Networks (CNN's) als eine erweiterte Form des Deep Learnings etabliert [23]. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass dem MLP ein Preprocessing vorangeht, welches aus mehrkanaligen Faltungsoperationen (Convolutional Layers) einerseits und Reduktionsoperationen (Max Pooling Layers) andererseits besteht. Insbesondere für die Mustererkennung in rasterförmig aufgenommenen Daten ist dies von Vorteil.

Sowohl die direkte Anwendung des MLP als auch CNN sind im Modul realisiert worden. Für diese Art der Algorithmen hat sich in der Deep Learning Community die Python-Bibliothek Tensorflow [24] etabliert. Sämtliche Berechnungen sollten auf dieser Basis durchgeführt werden, um eine eindeutige Vergleichbarkeit und Kompatibilität herzustellen. Die Eingabe der Hyperparameter in der Eingabemaske betrifft insbesondere die Definition von Convolutional-, Max Pooling- und Fully Connected Layers, deren Dimensionen und Aktivierungsfunktionen. Eine grafische Ausgabe stellt die jeweils definierte Architektur individuell dar.

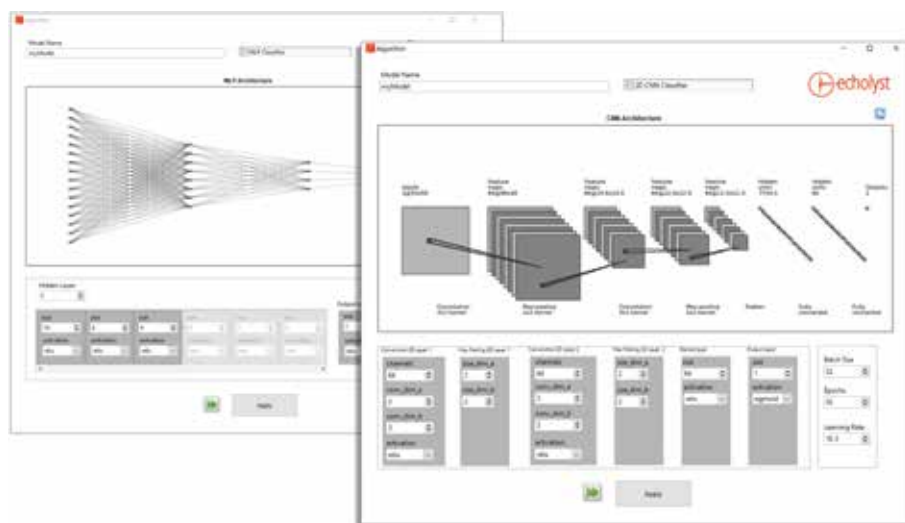


Abbildung 7: Definition der Deep Learning- Architektur in ECHOLYST A.I. und deren grafische Darstellung. Links: Definition eines MLP, rechts: Definition eines CNN.

Der Algorithmus läuft in Form aufgerufener Tensorflow-Funktionen ab. Die Lernkurven werden jeweils für die Trainingsdaten (blau) und die Testdatensätze (rot) dargestellt (Abbildung 6). Diese Kurven zeigen die über die absolvierten Lernepochen erzielte Genauigkeit sowie den Verlauf der Verlustfunktion (Loss Function).

3.2.3 Anwendung des KI-Modells

Ein generiertes Modell kann an beliebig vielen Datensätzen appliziert werden. Eine Prämisse ist dabei, dass die Anwendung innerhalb des durch das Modell abgedeckten Geltungsbereiches erfolgt. Die Ergebnisse werden für den jeweils zur Analyse ausgewählten Datensatz grafisch dargestellt (Abbildung 8). Darüber hinaus erfolgt die Ausgabe der Ergebnisse in tabellarischer Form sowie in eine Datei.

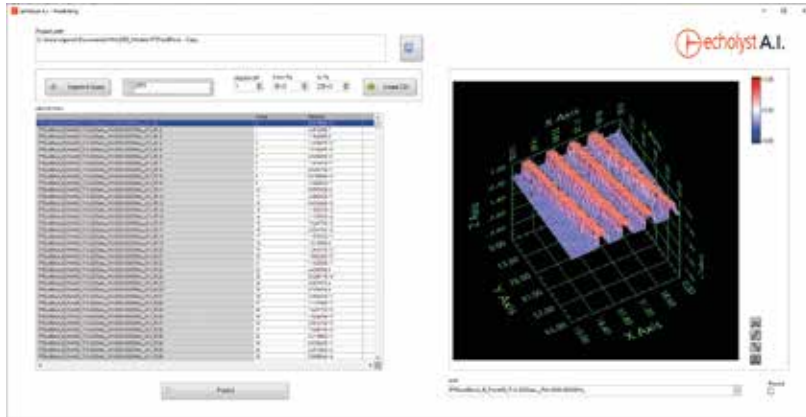


Abbildung 8: Anwendung eines KI-Modells auf Impact-Echo-Datensätze und grafische Darstellung der Vorhersageergebnisse (rot: Anzeige, blau: intakt).

4. Sensorik zur luftgekoppelten Messung – ECHOLYST Cart

Trotz der Vorteile des bildgebenden Impact-Echo-Verfahrens setzt dieses die Aufnahme eines entsprechend dichten Messrasters als Grundlage für die Auflösung der resultierenden Darstellungen voraus. Das Potenzial der mechanisierten Durchführung [25] von Impact-Echo-Messungen wurde in Forschungsvorhaben sowie im praktischen Einsatz [26] in der Vergangenheit bereits deutlich herausgestellt.

Dieses Potenzial soll durch einen speziell auf die ECHOLYST Software abgestimmten Rollscanner ECHOLYST Cart (Abbildung 9) in optimaler Form abgerufen werden. Sowohl die Anregung des Bauteils (Impactor) als auch die Sensorik sind integriert und werden durch die Software



Abbildung 9: Konzeptdarstellung des Rollscanners ECHOLYST Cart.

gesteuert bzw. ausgelesen. Die Positionsinformation steht über einen Radencoder in der Software zur Verfügung. Auf diese Weise wird die Datenaufnahme von grossen Messrastern und hohen Messpunktdichten in kontinuierlicher Bewegung umgesetzt. Die Aufnahmegeschwindigkeit und -präzision wird maximiert. Abbildung 10 zeigt das Cart bei der Erprobung im Feld.



Abbildung 10: Rollscanner ECHOLYST Cart. Impact-Echo-Messungen mit Radencoder und in Luftankopplung.

Die Entwicklung basiert auf der luftgekoppelten Messung, d.h. dem Einsatz berührungslos über die Messfläche geführter Mikrofone. Die damit verbundenen Herausforderungen sind bekannt. Insbesondere der Anteil der direkten Luftwelle hat gegenüber dem Signal, welches aus der Dickenresonanz resultiert, eine sehr hohe Amplitude und beeinträchtigt die Messung wesentlich. Des Weiteren resultieren wesentliche Störeinflüsse aus Umgebungsgeräuschen [27], welche im Baustelleneinsatz beträchtlich sein können. Durch weitergehende Signalverarbeitung [27] [28] und den Einsatz mehrerer Mikrofone in einer Arrayanordnung [29] [30] wird eine Minimierung der Störeinflüsse angestrebt.

5. Fazit

Das Impact-Echo-Verfahren ist unter den modernen Verfahren der ZfPBau ein klassisches und weit verbreitetes Verfahren. Durch die bildgebende Anwendung auf der Basis von Messrastern wird das Verfahren bedeutend aufgewertet, indem es als Volumenverfahren interpretierbar wird und die Gefahr von Fehldeutungen, wie sie bei Vorgehensweisen basierend auf isolierten Messpunkten gegeben ist, beträchtlich reduziert wird. Mit der Entwicklung der Software ECHOLYST ist es gelungen, diese Vorteile der Praxis zugänglich zu machen. Neben der schnellen Datenverarbeitung wurden darüber hinaus Funktionen integriert, welche in zwei- und dreidimensionaler Form die Ergebnisbilder darstellen, externes Fotomaterial importieren, Ergebnisbilder darauf projizieren und eine umfassende Berichterzeugung möglich machen.

Machine Learning bzw. Deep Learning zur Erzeugung künstlich intelligenter Modelle besitzen großes Potenzial in der ZfPBau und insbesondere für das Impact-Echo-Verfahren, da nicht nur eine markante Frequenzanzeige, sondern das gesamte Messsignal ausgewertet wird. Mit dem KI-Modul ECHOLYST A.I. wird es für den breiten Kreis von Impact-Echo-Praktikern möglich, künstlich intelligente Modelle zu generieren, zu testen und anzuwenden. Die Schwelle zur Anwendung dieser Technologie wird erheblich herabgesetzt, während gleichzeitig keine Blackbox erzeugt wurde, sondern vielmehr dem Nutzer die vollständige Kontrolle über den Machine Learning-Prozess zukommt.

Um die Anzahl der aufnehmbaren Datenmengen bzw. die Größe und Dichte von Messrastern zu maximieren, kam der Datenerfassung besondere Aufmerksamkeit zu. Eine rasche Messdatenaufnahme wurde ermöglicht, durch welche auch in manueller Form gute Messfortschrittsgeschwindigkeiten erreichbar werden.

Ein wichtiger Aspekt der Entwicklung war die Schaffung einer flexiblen Software, welche mit den gängigen Geräten auf dem Markt kompatibel ist. Dadurch werden herkömmliche Impact-Echo-Systeme in neuartige Systeme transformiert, welche die Möglichkeiten des bildgebenden (Scanning) Impact-Echo umsetzen.

Um Datenaufnahmegeschwindigkeit, -präzision und -komfort weiter zu maximieren, ist der Rollscanner ECHOLYST Cart konzipiert worden und befindet sich in der weiteren Entwicklung. Darin wird das Impact-Echo-Verfahren in Luftankopplung umgesetzt. Ein Prototyp des Cart ist derzeit in der Erprobung.

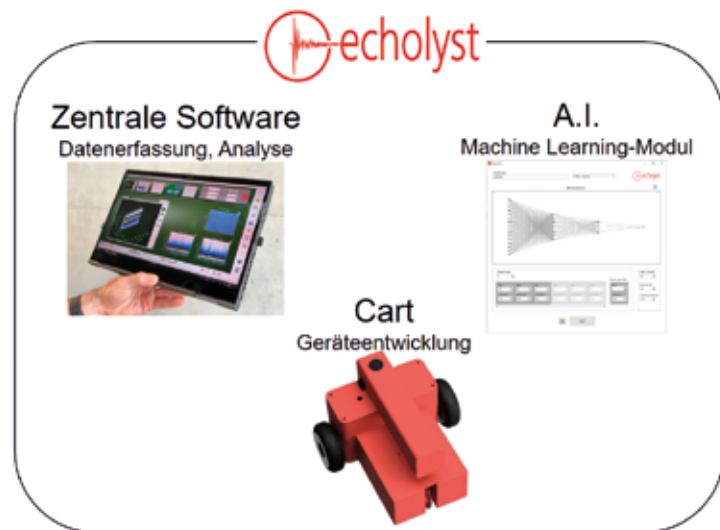


Abbildung 11: ECHOLYST-Gesamtkonzept, bestehend aus der zentralen Software, A.I.-Modul und Rollscanner

6. Danksagung

Die Entwicklung von ECHOLYST basiert auf Forschungsarbeiten, insbesondere der langjährigen Arbeit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Fachbereich VIII.2. Auch die DFG-Forschergruppe FOR 384 hat in ihrer Arbeit bedeutend zum derzeitigen Stand des Verfahrens beigetragen, welcher in ECHOLYST zur Anwendung kommt. Allen an diesen Forschungsarbeiten Beteiligten sei gedankt; ohne diese Grundlagen wäre die beschriebene Entwicklung nicht möglich gewesen.

Allen internationalen Anwendern und externen Experten gilt unser Dank für ihre Anregungen, welche signifikant zur Erreichung des heutigen Standes beigetragen haben.

Der Geschäftsleitung sowie den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Schweizerischen Vereins für technische Inspektionen (SVTI) sei für ihr großes Engagement in der kontinuierlichen Ausweitung des Spektrums von ECHOLYST gedankt.

7. Referenzen

- [1] N. J. Carino, „The Impact-Echo Method: An Overview“, in *Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, Washington, D.C. (USA), 2001*.
- [2] M. Krause, „Ultraschallechoverfahren an Betonbauteilen“, in *Bauphysik-Kalender, E. Cziesielski, Hrsg., Berlin, Ernst & Sohn, 2004, pp. 341-352*.
- [3] N. J. Carino und M. Sansalone, „Pulse-Echo Method for Flaw Detection in Concrete“, *National Bureau of Standards, 1984*.
- [4] M. J. Sansalone und W. B. Streett, *Impact-Echo. Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry., Jersey Shore, PA (USA): Bullbrier Press, 1997*.
- [5] ASTM C 1383, „Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates using the Impact-Echo Method“, *ASTM International, West Conshohocken, PA (USA), 1998*.
- [6] M. Schickert, „Dickenmessung mit dem Impact-Echo-Verfahren: meist zügig, manchmal überraschend“, in *Fachtagung Bauwerksdiagnose, Berlin, 2018*.
- [7] BAST Bundesanstalt für Strassenwesen, *Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen (RI-ZFP-TU), 2007*.
- [8] DGZfP Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, „DGZfP-Merkblatt B11: Merkblatt über die Anwendung des Impact-Echo-Verfahrens zur Zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauteilen.“, *DGZfP, Berlin, 2020*.
- [9] C. Große und H.-W. Reinhardt, „The resonance method - application of a new nondestructive technique which enables thickness measurements at remote concrete parts“, *Otto-Graf-Journal, Bd. 3, pp. 75-94, 1992*.
- [10] C. Große, H.-W. Reinhardt und R. Beutel, „Impact-Echo Measurement on Fresh and Hardening Concrete“, in *Concrete Science and Engineering, 2004, pp. 95-104*.
- [11] F. Schubert und R. Lausch, „Geometrical Effects on Impact-Echo Testing of Finite Concrete Specimens“, in *Proceedings of the International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) 2003, Berlin, 2003*.
- [12] C. Große, H. Wiggenhauser, D. Algernon, R. Beutel und F. Schubert, „Impact-Echo“, in *Betonkalender, Ernst & Sohn, 2007, pp. 496-505*.
- [13] Y. Tinkey, L. Olson und H. Wiggenhauser, „Impact-Echo Scanning for Discontinuity Detection and Imaging in Post-tensioned Concrete Bridges and Other Structures“, *Materials Evaluation, Bd. 63, Nr. 1, pp. 64-69, 2005*.
- [14] H. Wiggenhauser, „Homemade“, *iX, p. 96ff, 12 2003*.
- [15] B. Köhler und F. Schubert, „Ten Lectures on Impact-Echo“, *Journal of Nondestructive Evaluation, Bd. 27, Nr. 1, pp. 5-21, 2008*.
- [16] A. Gibson und J. Popovics, „Lamb Wave Basis for Impact-Echo Method Analysis“, *Journal of Engineering Mechanics, Bd. 131, Nr. 4, pp. 438-443, 2005*.
- [17] D. Algernon, „Impact-Echo: Analyse Akustischer Wellen in Beton“, *ZfP-Zeitung, Nr. 110, pp. 42-47, 2008*.
- [18] J. Ebers und C. S. Tan, „Automatisierte Erfassung von Rissen in Betonflächen“, in *Kolloquium Parkbauten, Esslingen, 2020*.
- [19] D. Algernon, „Machine Learning – Potenzial und Anwendung in der Zerstörungsfreien Bauwerksprüfung“, in *Fachtagung Bauwerksdiagnose 2020, Berlin, 2020*.
- [20] J. Schmidhuber, „Deep Learning in Neural Networks: An Overview“, *Neural Networks, Bd. 61, pp. 85-117, 2015*.
- [21] S. Russel und P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach., 2 Hrsg., New York: Prentice-Hall, 2003*.
- [22] I. Goodfellow, Y. Bengio und A. Courville, *Deep Learning, MIT Press, 2016*.
- [23] A. Krizhevsky, I. Sutskever und G. E. Hinton, „ImageNet Classification with Deep Convolutional“, in *Advances in neural information processing systems, Lake Tahoe, NV, 2012*.
- [24] M. Abdolhnejad, R. Bhagwat und M. Moocar, *Applied Deep Learning with Keras, Packt Publishing, 2019*.
- [25] C. Colla, G. Schneider, J. Wöstmann und H. Wiggenhauser, „Automated Impact-Echo: 2-D and 3-D Imaging of Concrete Elements“, in *Proceedings of DGZfP Fachtagung Bauwerksdiagnose, Munich, 1999*.
- [26] L. D. Olson, Y. Tinkey und P. Miller, „Concrete Bridge Condition Assessment with Impact Echo Scanning“, in *GeoHunan International Conference, Hunan (China), 2011*.
- [27] D. Algernon, H. Ernst und K. Dressler, „Signalverarbeitungsmethoden zur Anwendung des Impact-Echo Verfahrens in Luftankopplung in Array-Anordnung“, in *DGZfP-Jahrestagung, Bremen, 2011*.
- [28] D. Algernon, H. Ernst und K. Dressler, „Untersuchung von Betonbauteilen mit dem Impact-Echo-Verfahren in Luftankopplung“, in *Fachtagung Bauwerksdiagnose 2012, Berlin, 2012*.
- [29] R. Groschup und C. U. Große, „MEMS Microphone Array Sensor for Air-Coupled Impact-Echo“, *Sensors, Bd. 15, Nr. 7, pp. 14932-14945, 2015*.
- [30] J. F. Scherr und C. Große, „Delamination detection on a concrete bridge deck using impact echo scanning“, *Structural Concrete, pp. 1-7, <https://doi.org/10.1002/suco.202000415>, 2020*.