

Standardisierte Archivierung von Ultraschall-A-Scans in DICONDE

Frank LEINENBACH¹, Bernd SPRAU¹, Christopher STUMM¹

¹ Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Campus E3.1, 66113 Saarbrücken

Kontakt E-Mail: frank.leinenbach@izfp.fraunhofer.de

Kurzfassung. Um die voranschreitende Digitalisierung der ZfP im Sinne von NDE 4.0 zu erreichen, stellen generische und standardisierte Datenformate eine wesentliche Grundlage dar. Diese erlauben einen herstellerunabhängigen Datenaustausch und gewährleisten die Verwendung von Datensätzen auch über Jahrzehnte hinweg. Eine mögliche Technologie, welche die Anforderungen an solche Datenformate erfüllt, ist DICONDE. Auch wenn die Technologie in der Medizin und letztlich in der Zerstörungsfreien Prüfung bereits langjährige Verbreitung fand, sind die existierenden Standards der ASTM in Bezug auf die Archivierung von mehrdimensionalen Rohdaten nicht vollumfänglich definiert. Im Rahmen dieses Beitrags wird ein erster Entwurf zur standardisierten Speicherung von Ultraschallrohdaten (A-Scans) vorgestellt.

Einführung

Die digitale Transformation ist ein branchenübergreifender Themenkomplex, welcher auch zunehmend in der ZfP adressiert wird. Dabei fokussieren sich die meisten Betrachtungen auf Vernetzungs- und KI-basierte Technologien, wobei für die Erreichung dieser Zielsetzungen auch Datenformate eine wesentliche Rolle spielen. Ein Datenformat folgt einer inneren Struktur, in der anhand eines Informationsmodells Informationen an einer entsprechenden Adresse in einem definierten Datentyp abgelegt werden. Diese Kombination aus Adresse, Datentyp, aber auch das Verständnis der Information werden durch den Ersteller des Informationsmodells definiert und unterliegen somit auch dem damit adressierten Anwendungsfeld. Dies bedeutet, insbesondere für proprietäre Datenformate eine beschränkte Verwendung der Datensätze in einem anderen Software-System. Ein Vorteil für ein solch proprietäres Datenformat mag es sein, dass es speziell für die Bedürfnisse einer Anwendung erstellt wurde und somit eine optimierte Verarbeitung gegenüber generischen Datenformaten oder Datenformaten Dritter aufweisen kann. Gleichzeitig verhindert dieser Ansatz meist aber eine Interoperabilität und damit eine Verwendung der Daten über das geschlossene Ökosystem hinaus. Viele Software-Systeme, sowohl zur Datenverarbeitung als auch Datenerfassung, greifen nur selten auf generische Datenformate zurück, wobei sie offene Beschreibung nutzen könnten, um ein Abbild ihres Informationsmodells in eine textbasierte Beschreibung der Information zu überführen. Diese vollständige Beschreibung führt, falls mitgespeichert, zu einer deutlichen Steigerung der Dateigröße gegenüber dem ursprünglichen Format und kann die Verarbeitung erschweren, könnte aber von einem größeren Anwenderkreis verwendet werden. Gleichzeitig steht und fällt die Interpretation



einzelner Beschreibungen mit der genauen Definition des bestehenden Informationsmodells, was im schlimmsten Falle zur Fehlinterpretation von Informationen führen kann. Generische Datenformate sind als Austauschformat bereits verbreitet. Wichtige Beispiele stellen das Format CSV (Comma-separated values), XML (Extensible Markup Language) und JSON (JavaScript Object Notation) dar. Diese stellen allerdings keinerlei Anforderungen hinsichtlich der Dateneingabe, da es sich lediglich um Datenrepräsentationen handelt. Ein Datenformat, welches auch inhaltliche Strukturen definiert, ist das verbreitete Format HDF5 (Hierarchical Data Format), welches eine Hierarchie der Metadaten und Datensätze vorgibt, deren Strukturierung aber ebenfalls dem Nutzer überlassen wird.

Dem gegenüber setzen sich innerhalb bestimmter Applikationen strukturierte Datenformate durch. Am Beispiel von Pixeldaten und Volumen-/Sequenzdaten sind hier TIFF und DICOM zu nennen. Das TIFF (Tag Image File Format) ist ein komplexes Containerformat, das verschiedene Informationen in den Metadaten (sogenannten Tags) enthalten kann, u.a. Pixeldatensätze sowie „private tags“ für individuelle Informationen. TIFF eignet sich als Austauschformat für 2D- und 3D- Datensätze, trotzdem nur bedingt, da nicht sichergestellt ist, dass alle benötigten Metadaten auch vorhanden sind [1]. DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) enthält neben den Bild- und Volumendaten umfangreiche Metadaten bzgl. des Untersuchungsobjektes. Das Format wird in der Medizin zur Übertragung und Archivierung von Untersuchungen am Patienten eingesetzt und umfasst ausführliche Standards für diverse medizinische Untersuchungsmethoden [2], wie bspw. Röntgen, CT oder Ultraschall. Da die Domäne der genannten Formatbeschreibungen sich speziell auf Bild- und Volumendaten fokussiert, ist die Struktur der Metadaten nicht immer für industrielle Datenerfassung oder Prüfaufgaben ausreichend. Hier stellen die beiden Datenformate DICONDE (Digital Imaging and Communications for Nondestructive Evaluation) [3] und AQDEF (Advanced Quality Data Exchange Format) [4] potente Alternativen dar, welche einen offenen Datenaustausch, eine industrietaugliche Struktur und bei Bedarf auch eigene Erweiterungen zulassen. DICONDE adressiert dabei besonders den Bedarf der ZfP-Branche, während AQDEF insbesondere im Automotive-Sektor vertreten ist.

Gerade für den Sektor der ZfP stellen dabei solche strukturierten generische Datenformate einen Mehrwert dar, da sie aufgrund ihrer Struktur eine eindeutige Interpretation von bestimmten Informationsadressen bieten, durch die Unabhängigkeit von Herstellern eine Interoperabilität der Datensätze und eine verfahrensunabhängige Verwendung erlauben, aber gleichzeitig auch durch Erweiterungsmöglichkeiten eine stetige Weiterentwicklung des Formats ermöglichen. So können bspw. neue Verfahren in ihnen abgebildet oder bestehende um weitere Informationen angereichert werden. Dies ist mit Bezug auf das Datenformat DICONDE wichtig, da die Standardisierungsorganisation ASTM International (American Society of Testing and Materials) im Subkomitee „E07.11 on Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation“ Standards entwickelt und veröffentlicht. Der Entwurf einer solchen Weiterentwicklung für die standardisierte Archivierung von Ultraschall-A-Scans in DICONDE wird im Folgenden vorgestellt.

1. Einsatz von DICONDE in der ZfP

Bei DICONDE (Digital Imaging and Communication for Nondestructive Evaluation) handelt es sich um einen offenen Standard, der zur Archivierung und Übertragung von ZfP-Datensätzen diverser Prüfverfahren genutzt werden kann. Die erste Version des Standards wurde 2004 veröffentlicht und basiert auf dem medizinischen Standard DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) aus dem Jahr 1985, welcher heute in nahezu jedem bildgebenden oder -verarbeitenden System der Medizintechnik Anwendung findet und

die Grundlage des sogenannte PACS (Picture Archiving and Communication System) darstellt. In der Hierarchie eines DICONDE-Datensatzes stellt die zu prüfende Komponente die oberste Ordnungseinheit dar. Jeder Komponente können dann Studien (Messkampagnen) zugeordnet werden, die sich wiederum aus mehreren Serien (bspw. einzelne Messungen) zusammensetzen. Diese Hierarchie findet sich auch im zugrundeliegenden DICOM-Format wieder, wo bspw. statt der Komponente der Patient das höchste Ordnungselement ist. Äquivalent zu DICOM ist DICONDE somit darauf ausgelegt, die Historie einer Komponente über ihren gesamten Lebenszyklus zu verfolgen. Abbildung 1 zeigt schematisch das Informationsmodell von DICONDE.

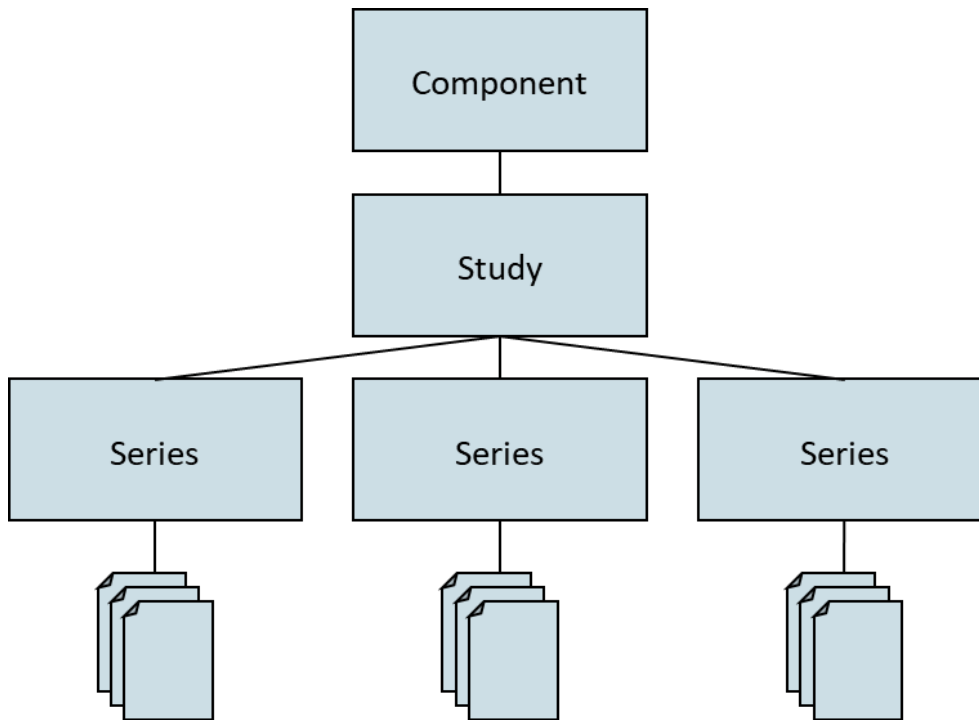


Abbildung 1: Darstellung des Informationsmodells von DICONDE

Ausgehend von dieser Struktur wurden im bereits genannten Subkomitee E07.11 der ASTM International allgemeine und methodenspezifische Standards veröffentlicht. Allgemeine Standards umfassen dabei Anleitungen, sowie Erläuterungen zu Implementierung und Interoperabilität, während die methodenspezifischen Standards die allgemeinen Beschreibungen um zusätzlich benötigte Felder erweitern. In Tabelle 1 sind allgemeine und in Tabelle 2 methodenspezifische Standards aufgelistet.

Tabelle 1: Allgemeine DICONDE Standards

Dokument	Beschreibung
ASTM E3169	Standard Guide for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation
ASTM E3147	Standard Practice for Evaluating DICONDE Interoperability of Nondestructive Testing and Inspection Systems
ASTM E2339	Standard Practice for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation
ASTM E1316	Standard Terminology for Nondestructive Examinations
ASTM E3267	Standard Guide for Building Information Models and Archiving for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation

Tabelle 2: Methodenspezifische DICONDE Standards

Dokument	Beschreibung
ASTM E2738	Standard Practice for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation (DICONDE) for Computed Radiography (CR) Test Methods
ASTM E2699	Standard Practice for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation (DICONDE) for Digital Radiographic (DR) Test Methods
ASTM E2767	Standard Practice for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation (DICONDE) for X-ray Computed Tomography (CT) Test Methods
ASTM E2663	Standard Practice for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation (DICONDE) for Ultrasonic Test Methods
ASTM E2934	Standard Practice for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation (DICONDE) for Eddy Current (EC) Test Methods

Zu allen in Tabelle 2 genannten Methoden, mit Ausnahme der Wirbelstromprüfung (ASTM E2934), existiert ein Pendant aus der Medizintechnik. Der Bedarf nach weiteren methodenspezifischen Standards, bspw. für thermographische Prüfverfahren, ist gegeben, aber auch existierende Standards müssen an aktuelle technische Gegenseiten angepasst werden. Hierzu gehört auch der Standard E2663 für die Ultraschallprüfung.

2. Die Grenzen des bisherigen UT-Standards E2663

Um den Bedarf einer Erweiterung des aktuellen Standards zu erläutern, muss vorab der Aufbau und der Anwendungsbereich dargestellt werden. Die Definitionen der verschiedenen Daten innerhalb des Datenformat DICONDE werden als sogenannte IOD (Information Object Definition) bezeichnet, welche im Folgenden kurz erläutert werden. In Tabelle 3 sind die IODs für das US-MF (Multi-Frame) Image dargestellt. Die IODs für US-Image und US-MF Image sind nahezu deckungsgleich und es wird seitens ASTM dazu geraten, nur die US-MF zu nutzen, weswegen im Weiteren lediglich letztere betrachtet werden. Wie aus der Tabelle 3 hervorgeht, bestehen IODs aus Modulen, welche wiederum die exakten Tags beinhalten.

Tabelle 3: Darstellung von Table 2: US-MF Image Information Object Definition aus E2663

DICOM Module	DICONDE Module	Reference	Usage
Patient	Component	E2339, Section 7	M
Clinical Trial Subject	Not Applicable		
General Study	Component Study	E2339, Section 7	M
Patient Study	Not Applicable		
Clinical Trial Study	Not Applicable		
General Series	Component Series	E2339, Section 7	M
Clinical Trial Series	Not Applicable		
General Equipment	NDE Equipment	E2339, Section 7	M
Contrast / blolous	Not Applicable		
Specimen	Not Applicable		
US Image	NDE US Image	E2663, Section 7.1	M
US Region Calibration	Not Applicable		
	NDE US Equipment	E2663, Section 7.2	U
	NDE US Equipment Settings	E2663, Section 7.3	U
	NDE Indication	E2339, Section 7	U
	NDE Geometry	E2339, Section 7	U

In Tabelle 4 wird das Modul NDE US Image erläutert, welches die Tags zur Speicherung von Multi-Frames beinhaltet. In dieser werden Tags durch einen Attribute Name, einer Tagnummer definiert. Die Spalte VR (Value Representation) gibt den Datentyp und VM (Value Multiplicity), ähnlich einer Array-Dimension, die Anzahl an Einträgen, die

diesem Tag zugeordnet werden können, vor. Jeder Tag wird darüber hinaus über die Eigenschaft „Type“ als Required (1), Conditional Required (1C) oder Optional (3) vorgegeben. Aus Platzgründen wurde auf die Spalte „Description“ verzichtet. Der Begriff Multi-Frames kann hierbei divers ausgelegt werden. So können Volumendaten als Schnittbilder in mehreren Frames, aber auch ein zeitlicher Verlauf gespeichert und dargestellt werden. Hinzu kommen zusätzliche Tags, zur Interpretation der Daten, wie bspw. ob die Pixeldaten eine RGB-Codierung aufweisen oder über eine separat zu definierende Farbtabelle dargestellt werden.

Tabelle 4: Darstellung von Table 4: NDE US Image Module Attributes aus E2663

Attribute Name	Tag	VR	VM	Type
Samples Per Pixel	(0028,0002)	US	1	1
Photometric Interpretation	(0028,0004)	CS	1	1
Bits Allocated	(0028,0100)	US	1	1
Bits Stored	(0028,0101)	US	1	1
High Bit	(0028,0102)	US	1	1
Planar Configuration	(0028,0006)	US	1	1c
Pixel Representation	(0028,0103)	US	1	1
Frame Increment Pointer	(0028,0009)	AT	1-n	1c
Image Type	(0008,0008)	CS	1-n	1
Lossy Image Compression	(0028,2110)	CS	1	1c

Die Darstellungsweise zeigt, dass der vorliegende Stand von E2663 auf klassische Ultraschall-Anwendung wie bspw. das Scannen einer Fläche unter konstantem Abstand und Winkel mit nur einem Prüfkopf ausgelegt ist. Komplexere oder nicht verarbeitete (gerenderte) Daten sind hierbei nicht vorgesehen. Sollen nun aber solche Daten gespeichert und archiviert werden, stellt sich die Frage, wo und wie diese Daten mittels DICONDE abgelegt werden können. Wie bereits beschrieben können über die Vorgaben des Standards hinaus, freie Felder und neben Pixeldaten auch eigene Tags definiert werden, um somit einer Archivierung von Rohdaten zu ermöglichen. Gerade die Speicherung von Rohdaten stellt im Sinne einer Wieder- und Weiterverwendung der Daten einen Mehrwert dar, weswegen zum Erhalt der Interoperabilität eine Erweiterung des Standards nötig wird.

3. Vorschlag zur Erweiterung der E2663 hinsichtlich Rohdaten

Um die Archivierung von Rohdaten in DICONDE abzubilden, wird eine neue IOD zusammengestellt, welche auf dem DICONDE Standard E2663 und dem DICOM C.10.9 Waveforms aufbaut. C10.9 ist Teil von DICOM C.10 Curve, Graphic and Waveform. Dieser beschreibt wie einzelne Signalverläufe generell in DICOM gespeichert werden können und dient als Basis für weitere Modifikationen. In Tabelle 5 sind Anwendungsfälle beschrieben, die das neue IOD abdecken soll. Aus der Betrachtung dieser Anwendungen zeigt sich, neben den Rohdaten auch die Dimension ein wichtiger Faktor ist. Am Beispiel von Fall 5 würde dies neben den sechs Raumkoordinaten eines Industrie-Roboter zusätzlich die Einschallwinkel eines jeden Sender-/Empfängermodus umfassen. Diese Dimensionen müssen für die Erfassung eindeutig hinsichtlich des Namens und Datentyps beschrieben und fortlaufend nummeriert werden. Die Nummerierung ist dahingehend relevant, als dass die Definition in einem anderen Tag erfasst wird, als die damit verbundenen Werte. Damit ergibt sich folgender Darstellung eines einzelnen A-Scan-Eintrags:

- Index der Dimension entsprechend des Eintrags der Beschreibung
- Wert der Dimension (bspw. 15°, 17cm, etc.)
- A-Scan-Daten als Array,
- Samplingfrequenz

Tabelle 5: Abzudeckende Anwendungsfälle des neuen Entwurfs

	Beschreibung	Dimensionen
Fall 1:	Automatisierte lineare Einzelschwingeraufnahme auf planarer Oberfläche	1
Fall 2:	Automatisierte lineare Einzelschwingeraufnahme am Zylinder	1
Fall 3:	Manuelle Prüfung planarer Fläche	2
Fall 4:	Automatisierte lineare Abtastung mit Phased Array auf planarer Oberfläche	≥ 2
Fall 5:	Roboterabtastung komplexer Oberflächen mit Phased Array und differenzierten Sender- / Empfänger-Modulen	≥ 8

Diese Beschreibung wird im Rahmen der neuen Ultrasonic Waveform IOD in Tabelle 6 erläutert. Auf die vollständige Beschreibung des neuen Moduls wird aufgrund des Umfangs verzichtet, kann aber in [5] frei eingesehen werden.

Tabelle 6: Entwurf der Ultrasonic Waveform IOD

IE	Module	Reference	Usage
Component	Component	E2339, Section 7	M
	NDE Indecation	E2339, Section 7	U
	NDE Geometry	E2339, Section 7	U
Study	General Study	E2339, Section 7	M
Series	General Series	E2339, Section 7	M
Equipment	NDE Equipment	E2339, Section 7	M
	NDE US Equipment	E2663, Section 7.2	U
	NDE US Equipment Settings	E2663, Section 7.3	U
Image	NDE US Image	E2663, Section 7.1	M
Ultrasonic Waveform	Ultrasonic Waveform	DICOM C10.9 (modified)	M

Am Beispiel einer automatisierten 2D-Rasterung mittels Phased-Array-Sektorschwenk soll die Archivierung von Ultraschall-Rohdaten verdeutlicht werden. Das Koordinatensystem ist in Abbildung 2 dargestellt. Unter der Voraussetzung, dass das Beamforming bereits umgesetzt wurde, fallen somit zwei Raumkoordinaten, wobei die Y-Achse orthogonal zur Oberfläche ins Bauteilinnere ausgerichtet ist. Zusätzlich fällt als Dimension der Einschallwinkel α in x und y an. Tabelle 7 stellt einen Auszug der Definition dieser Werte im Attribut „Wave Source Dimensions Sequence“ dar.

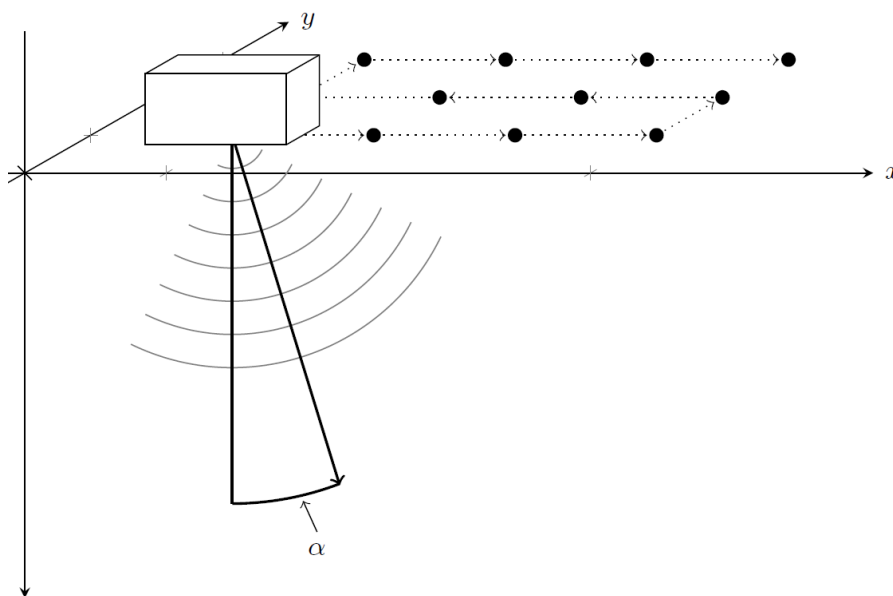


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer 2D-Abtastung in x- und y-Richtung unter Verwendung des Einschallwinkel α

Tabelle 7: Auszug der Sub-Attribute des Attributs „Wave Source Dimensions Sequence“ inkl. Beispielwerte

Abzubildende Dimension	Attribut Name	Wert
X-Achse	Dimension Number	1
	Dimension Name	X-Achse
	Dimension Code Value Type	NUMERIC

Y-Achse	Dimension Number	2
	Dimension Name	Y-Achse
	Dimension Code Value Type	NUMERIC

Winkel α	Dimension Number	3
	Dimension Name	Winkel α
	Dimension Code Value Type	FLOATINGPOINT

Dieses Attribut dient somit der reinen Beschreibung des Prüfprozesses und erlaubt es einem Anwender die Orientierung von A-Scans im Raum nachzuvollziehen. Darüber hinaus wird das Sub-Attribut „Dimension Number“ zur Zuordnung von Messwerten im Attribut „Waveform Sequence“ verwendet. Tabelle 8 zeigt den Aufbau einer solchen Messwertzuordnung für einen ersten und n-ten Eintrag. Diesem Attribut wird ebenfalls durch das Sub-Attribut „Waveform Data“ das binär-kodierte Messsignal zugordnet.

Tabelle 8: Auszug der Sub-Attribute des Attributs „Waveform Sequence“ inkl. Beispielwerte

Eintrags-Nr.	Attribut-Name	Sub-Attribut	Wert	Anmerkung
1	Wave Source Value Sequence	Referenced Dimension	1	Bezugnehmend auf die X-Achse
		Numeric Value	1234	
		
		Referenced Dimension	2	Bezugnehmend auf die Y-Achse
		Numeric Value	5678	
		
		Referenced Dimension	3	Bezugnehmend auf den Winkel α
		Floating Point Value	45,7	
		

...	Waveform Data	-	{Wertereihe}	Wertereihe des A-Scans der o.g. Koordinaten
...
n	Wave Source Value Sequence	Referenced Dimension	1	Bezugnehmend auf die X-Achse
		Numeric Value	2468	
		
		Referenced Dimension	2	Bezugnehmend auf die Y-Achse
		Numeric Value	1357	
		
		Referenced Dimension	3	Bezugnehmend auf den Winkel α
		Floating Point Value	45,7	
		

...	Waveform Data	-	{Wertereihe}	Wertereihe des A-Scans der o.g. Koordinaten

Durch die Kombination neuer Attribute zur u.a. Beschreibung der Raumorientierung und dem DICOM Standard C.10 Curve, Graphic and Waveform wird es somit möglich, A-Scans in DICONDE einzubinden und zu einer Vielzahl von Aufnahmekoordinatensystemen in Bezug zu setzen. Darüber hinaus erlaubt es der vorliegende Entwurf, Anhand der Beschreibung eine Messung zu Rekonstruieren und ggf. mittels weiterer Verarbeitungsalgorithmen neue Informationen zu gewinnen. Gleichzeitig bleiben die Felder des alten Standards erhalten und erlauben somit derzeitigen Anwendern weiterhin die konforme Prüfdurchführung, aber auch den Schritt hinsichtlich der digitalen Dokumentation komplexerer Ultraschall-Applikationen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags wurde der Bedarf nach strukturierten generischen Datenformaten erläutert und wie DICONDE als Datenformat einen wichtigen Beitrag zur digitalen Transformation der ZfP leisten kann. Dabei wurden mit Blick auf den Standard E2663 Schwächen aufgezeigt bzgl. der Sicherung von Rohdaten und ein Entwurf wie diese durch Ergänzungen im Einklang mit der bestehenden Version mit archiviert werden können.

Der dargestellte Entwurf wurde bereits in der DGZfP-Arbeitsgruppe DICONDE im Unterausschuss „Schnittstellen und Dokumentation“ des Fachausschuss ZFP4.0, sowie im Subkomitee E07.11 der ASTM International vorgestellt. Bisherige Rückmeldungen aus beiden Gruppen waren positiv. In einem nächsten Schritt ist die Vorstellung des Entwurfs in den jeweiligen Fachgruppen der DGZfP und ASTM vorgesehen, um durch zusätzliches Anwenderfeedback den Entwurf weiter zu optimieren und langfristig über die ASTM in den Standard zu überführen. Des Weiteren ist die Entwicklung weiterer Konzepte für noch nichtexistierende Standards geplant. Auf diese Weise wird das langfristige Ziel verfolgt, DICONDE für die ZfP als übergreifenden Standard zu etablieren, wie es DICOM im Medizinsektor ist.

Danksagung

Unser Dank geht an die Kollegen im DGZfP-Unterausschuss „Schnittstellen und Dokumentationen“, im speziellen der Arbeitsgruppe DICONDE, sowie der Task Group des Subkomitee E07.11 der ASTM, welche uns bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt und wertvolles Feedback für die Struktur des Entwurfs gegeben haben.

Referenzen

- [1] V. Alfio, D. Costantino and M. Pepe. 2020, "Influence of Image TIFF Format and JPEG Compression Level in the Accuracy of the 3D Model and Quality of the Orthophoto in UAV Photogrammetry", *Journal of Imaging*, 6 (5), 30, 2020, <https://doi.org/10.3390/jimaging6050030>
- [2] P. Mildenerger, M. Eichelberg and E. Martin, "Introduction to the DICOM standard", *Eur Radiol* 12, 920–927, 2002, <https://doi.org/10.1007/s003300101100>
- [3] B. Valeske et al., "Cognitive sensor systems for NDE 4.0: Technology, AI embedding, validation and qualification", *tm - Technisches Messen*, 89 (4), 253–277, 2022, doi: 10.1515/teme-2021-0131.
- [4] D. Edgar, "Geeignete Messprozesse – Valide Informationen", *tm - Technisches Messen*, 86 (9), 528-539, 2019, doi: 10.1515/teme-2019-0104
- [5] B. Sprau, C. Wirth, F. Leinenbach, "Ultrasonic Waveform IOD", In: <https://www.izfp.fraunhofer.de/content/dam/izfp/en/documents/2023/Ultrasound-Waveform-IOD.pdf>, 2023, letzter Zugriff: 24. März 2023.