

## ABSTRACT

---

**PURPOSE:** Treatment of severe aortic stenosis requires careful assessment of the aortic root to select an appropriate prosthesis for Transcatheter Aortic Valve Implantation (TAVI). For this purpose, pre-operative CT images of the heart are analyzed, and relevant parameters, such as the aortic annulus area or perimeter, are determined. Two software solutions are presently used at the German Heart Center Berlin for obtaining these measurements, the fully-automated HeartNavigator3 (HN) and the semi-automated 3mensio (3m). In this work, the feasibility of a neural network-based approach is assessed, which is independent of specific imaging protocols or vendors.

**METHODS:** To deduce the aortic annulus area and perimeter, image regions of interest are segmented using a cascade of Convolutional Neural Networks, following the U-Net architecture. A U-Net uses so-called transposed convolutions to predict each voxel's probability to be part of the sought-after segmentation. First, the region of interest surrounding the device landing zone is segmented, second, the aorta, including the aortic valve within that region, and third, the area around the annulus. From this final segmentation, the aortic annulus plane is deduced by principal component analysis. Area and perimeter are obtained from a segmentation of the annulus in this plane.

**RESULTS:** The neural networks were trained using a data set of 90 expert-annotated CT scans. Segmentation of the aorta within the device landing zone achieved an F1 score of 0.94 on a test set of seven patients; segmentation of the annulus in the two-dimensional plane reached an F1 score of 0.95. The deep learning model calculated an average annulus area of  $543.2 \text{ mm}^2$  and an average perimeter of  $83.9 \text{ mm}$  on an evaluation data set of 100 patients. Those calculated means differ significantly from the two software solutions' measurements on the same data set (area:  $481.5 \text{ mm}^2$  (HN),  $463.5 \text{ mm}^2$  (3m); perimeter:  $79.3 \text{ mm}$  (HN),  $77.2 \text{ mm}$  (3m)). While the discrepancy between the two software solutions is consistent with reported inter-observer differences, the deep learning results deviate more than twice as much from the software solutions' measurements.

**CONCLUSION:** Even with a relatively small training set of 90 CT scans, the neural network approach enables the reliable assessment of the aortic root. However, further work is required to optimize the annulus plane detection for correct annulus measurement. An extended training data set is required to further improve this method's applicability and robustness. It should also include several examples of uncommon cases, such as pre-implanted artificial valves.

**Key words:** Deep Learning, Convolutional Neural Network, U-Net, ResNet, Image Analysis, Segmentation, Medical Data, CT

## ZUSAMMENFASSUNG

---

**MOTIVATION:** Zur Behandlung einer schweren Aortenklappenstenose ist eine sorgfältige Analyse der Aortenwurzel von größter Bedeutung, um eine geeignete Prothese für eine Transkatheter-Aortenklappen-Implantation (TAVI) zu wählen. Hierfür werden vor der Operation CT-Aufnahmen des Herzens betrachtet und relevante Messwerte, wie Fläche und Umfang des Aortenannulus, berechnet. Am Deutschen Herzzentrum Berlin werden zur Bestimmung dieser Messwerte bisher die Softwarelösungen HeartNavigator (HN) und 3mensio (3m) genutzt, die teils manuelles Eingreifen erfordern. Diese Arbeit erprobt einen voll-automatisierten Ansatz basierend auf neuronalen Netzen, welcher unabhängig von bestimmten Bildgebungsprotokollen oder Softwareanbietern nutzbar ist.

**METHODEN:** Um Fläche und Umfang des Aortenannulus zu bestimmen, werden zunächst relevante Bildregionen segmentiert. Hierfür wird ein Deep-Learning-Ansatz mit einer Abfolge von Convolutional Neural Networks entsprechend der U-Net-Architektur verwendet. Das U-Net nutzt *transposed convolutions* (umgekehrte Faltungen), um den Voxeln eines Bildes eine Wahrscheinlichkeit zuzuordnen, ob diese zu einer gesuchten Segmentierung gehören. Zuerst wird die Region um die Aortenklappe, in der die Prothese eingesetzt werden soll, segmentiert, als zweites die Aorta inklusive Aortenklappe und zuletzt die Region um den Annulus. Mithilfe einer Hauptkomponentenanalyse wird diejenige Ebene abgeleitet, in der der Annulus liegt. Anhand der Segmentierung des Annulus innerhalb dieser Ebene werden letztlich Fläche und Umfang des Annulus bestimmt.

**ERGEBNISSE:** Die neuronalen Netze wurden mit 90 CT-Aufnahmen trainiert, die von Experten annotiert wurden. Die Aortensegmentierung erreichte einen F1-Wert von 0.94 auf einem Testdatensatz von sieben Patienten; die Segmentierung des Annulus erreichte einen F1-Wert von 0.95. Der Deep-Learning-Ansatz bestimmte durchschnittlich eine Fläche des Aortenannulus von  $543.2 \text{ mm}^2$  und einen Umfang von  $83.9 \text{ mm}$  auf einem weiteren unabhängigen Datensatz von 100 Patienten. Diese Durchschnitte unterscheiden sich deutlich von denen, die die Softwarelösungen auf demselben Datensatz ermittelten (Fläche:  $481.5 \text{ mm}^2$  (HN),  $463.5 \text{ mm}^2$  (3m); Umfang:  $79.3 \text{ mm}$  (HN),  $77.2 \text{ mm}$  (3m)). Die Diskrepanz zwischen den Softwarelösungen entspricht etwa der beobachteten Diskrepanz zwischen von Medizinern getätigten Messungen. Die Ergebnisse des Deep-Learning-Ansatzes weichen um mehr als das Doppelte davon ab.

**FAZIT:** Bereits mit einem recht kleinen Datensatz von 90 CT-Aufnahmen ermöglicht der hierarchische Deep-Learning-Ansatz die zuverlässige Segmentierung der Aortenwurzel. Allerdings muss die Detektion des Aortenannulus weiter optimiert werden, um diesen exakt vermessen zu können.

Ein erweiterter Datensatz ist erforderlich, um diesen Ansatz zuverlässiger und robuster zu gestalten. Dieser sollte ebenfalls einige untypische Fälle, wie bereits implantierte künstliche Aortenklappen enthalten.

Schlagwörter: Deep Learning, Convolutional Neural Network, U-Net, Res-Net, Bildanalyse, Segmentierung, Medizinische Daten, CT