

Advanced Vascular Perfusion Model

Einreichung Qualify.ing Contest

Projektkoordinator: Avid Vormann

Tel.: +436509350025

E-Mail: avid.vor@gmail.com

Betreuer: DI Prof. Tito Körner

Tel.: +436508472359

E-Mail: tkoerner@tgm.ac.at

Projektteilnehmer:

Avid Vormann, Josephine Gold, Philipp Sponer, Christina Schramböck

TGM Wien, 2024

Projektdokumentation

2.1 Projektentstehung & -planung

Im Dezember 2021 wurde über eine ärztliche Lehrperson am TGM ein Kontakt zur Medizinischen Universität Wien hergestellt. Die Klinische Abteilung für Gefäßchirurgie am AKH Wien hat uns die Erkrankung „Abdominale Aortenaneurysmen“ beschrieben, die wir im Unterricht kennengelernt haben. Uns wurden minimalinvasive, endovaskuläre Behandlungsmethoden mit sogenannten Stents vorgestellt, die eingesetzt werden, um eine Gefäßruptur zu verhindern. Chirurg:innen meinten, dass es oftmals schwierig ist die richtige Form/Type dieser Stents zu wählen. Die Publikationslandschaft weist einige Lücken auf, wenn es um den Vergleich von selbstexpandierenden und ballonexpandierenden Stents geht. Der Grund dafür ist, dass Studien sehr schwierig durchzuführen sind und Tierversuche die humane Umgebung nicht optimal simulieren. So haben wir uns als Team gedacht, man könnte Stenttestungen in-vitro machen mit einem System, das Herz und Abdomen simuliert. Es gab bereits wenige Versuche so etwas zu realisieren jedoch scheiterte es an der Ideenvielfalt wie man so ein Gerät bauen könnte, dem fachlichen Know-How und einer Expertise für die Interpretation der Daten.

Wir haben zugesagt, jedoch mit der Bedingung ärztliches Personal mit im Team zu haben. Die medizintechnische Komponente konnte von uns abgedeckt werden, jedoch würde es den Rahmen einer Diplomarbeit sprengen sich die notwendige medizinische Expertise vollkommen anzueignen. Das Projekt bekam den Namen „Advanced Vascular Perfusion Model“ (siehe Abbildung 1 und 2), oder kurz „AVPM“. Aufgrund der internationalen Nachfragen wurde folgende These auf Englisch verfasst:

The abdominal aortic aneurysm (AAA) is characterized by an increased diameter of the affected artery, exceeding 50% of the expected diameter [1], or an abdominal aorta larger than 30 mm [2]. Typically asymptomatic, AAA is often incidentally diagnosed through ultrasound scans, computed tomography (CT), or magnetic resonance imaging (MRI). Symptoms such as pain and tenderness accompanying AAA indicate a higher risk of rupture [3], with a staggering 80% mortality rate for a ruptured AAA [4]. Prevalence varies based on age, gender, and origin, with men facing a significantly higher risk (1.9% to 18.5%) compared to females (up to 4.2%) [5]. The reason for this gender difference remains unknown [6]. Other risk factors, besides male gender, include smoking, age, current hypertension, and a positive family history [7, 8].

The pathophysiology of AAA is multifactorial, rooted in changes to the wall structure and thinning of the wall layer. This results from increased oxidative stress, degradation of the extracellular matrix (ECM), loss of vascular smooth muscle cells in the media, and immune cell infiltration in the adventitia. Proteases play a key role in ECM degradation, crucial for supporting the wall structure, leading to AAA development and progression. Medial injury appears to be a major factor, resulting from high oxidative stress and proteolysis [9].

In 1986, Crawford E.S. et al introduced a classification for aortic aneurysms, linking the extent of the aortic aneurysm to surgical outcomes. Type I involves most of the descending thoracic aorta and the upper part of the abdominal aorta. Type II also encompasses the majority of the

descending thoracic and most parts of the abdominal aorta. Type III describes the distal part of the descending thoracic aorta and different segments of the abdominal aorta, whereas type IV solely affects parts or the entirety of the abdominal aorta, also known as AAA [10]. In 1999, Safi H.J. [11] added a type V involving the aorta starting from the sixth intercostal space to just above the renal arteries. AAA can be subdivided into suprarenal, pararenal, juxtarenal, and infrarenal, with 80% of AAA located infrarenally [12].

Currently, no pharmacological therapy exists for AAA; the primary treatment is surgical repair [12]. The management of AAA depends on its diameter. Most AAA cases are asymptomatic upon diagnosis. When a patient displays symptoms such as back pain or tenderness, intervention is recommended as these are signs of an increased risk of rupture. According to the guidelines of the Society of Vascular Surgery, small AAA with a diameter under 40 mm are at low risk of rupture, suggesting monitoring rather than immediate intervention. Elective repair has not shown positive outcomes for diameters between 45 mm and 54 mm. Surgical intervention is recommended for men with a diameter larger than 54 mm. For diameters between 50 mm and 54 mm in an otherwise healthy patient, surgical intervention should be considered if the patient is female, presents symptoms, or shows rapid growth [13].

Two techniques are known for surgical repair: endovascular aortic repair (EVAR) and open surgical repair (OSR). EVAR, introduced in 1991 by Parodi, J.C. et al., initially aimed to separate the aneurysm sac from circulation [14]. Since then, the technique has evolved, with EVAR now being the preferred treatment, except for younger and healthier patients, where OSR is favored [13].

For complex AAA, two types of EVAR are mainly used: fenestrated and branched EVAR (fEVAR/B-EVAR). Complex AAA includes pararenal, juxtarenal, and thoracoabdominal aneurysms [15]. F-EVAR is a technique where side branches are incorporated into the main stent graft through fenestrations in the material. Visceral arteries may be connected by means of scallops or extra grafts (e.g., bridging stent grafts). In B-EVAR, the stent has branches, which can be built into the renal and visceral arteries. As there is no aortic cross-clamping necessary, renal dysfunction may not occur. Advantages of EVAR over open surgery include a faster recovery and fewer surgical traumas [16]. Bridging stent grafts (BSG) are used to connect the aortic main body with the target vessel (renal or visceral end arteries) during f-EVAR or b-EVAR [17]. Small visceral AAA are treated with f-EVAR, while wide visceral AAA are treated with b-EVAR. Self-expandable stents (SESG) and balloon-expandable stents (BESG) are used off-label as bridging stent grafts. Balloon-expandable stents are typically used for stents with fenestrations, as BESGs are available in shorter lengths, have higher radial force, and are therefore suitable for transversely oriented vessels. On the other hand, for branched stents, SESGs are preferred since they are beneficial for longer and tortuous vessels [18].

OSR is employed for patients who do not meet the anatomic requirements for EVAR. Other indications may include complications after EVAR treatment, such as endoleaks, aneurysm growth, or infected grafts [13].

At the moment there is no evidence which type of bridging stent graft, self-expandable or balloon-expandable, shows a better outcome after b-EVAR management. For f-EVAR treatment the ideal bridging stent is still unknown as well. Since a standard practice does not exist, the choice of which bridging stent is used depends on the operator's preferences, therefore a comparison of SESG and BESG is difficult. Very few studies have examined bridging stents grafts, and few studies have compared bridging covered self- and balloonexpandable stents for f-EVAR or b-EVAR management.

The aim of this study is to evaluate the initial outcome under different hemodynamic parameters (ejection volume and pressure, pulsation frequency) of self- and balloonexpandable stents used as bridging stents. Since there is no strong recommendation which type of stent should be used as BSG this study might be able to contribute to this issue.

- I. Is there a difference between self- and balloon-expandable stents used as bridging stent grafts?
- II. What complications might occur and what is their likelihood?
- III. What is the impact of breathing dependent movement of the kidneys with treatment of self- and balloon-expandable stents in end arteries?

Hypothesis: There is no significant difference between self- and balloon-expandable stents regarding migration, stenosis and kinks in the Advanced Vascular Perfusion Model.

Weil wir uns nicht sicher sind, ob eine englische Einreichung im Qualifying Contest ausreichend ist, befindet sich im Folgenden nochmals das Ziel in deutscher Sprache ausformuliert:

Das Ziel dieser Studie ist es, die anfänglichen Ergebnisse unter verschiedenen hämodynamischen Parametern (Ausstoßvolumen und Druck, Pulsationsfrequenz) von selbstexpandierenden und ballonexpandierenden Stents zu bewerten, die als Bridging-Stents verwendet werden. Da es keine klare Empfehlung gibt, welcher Stenttyp als Bridging-Stents verwendet werden sollte, könnte diese Studie dazu beitragen, diese Frage zu klären.

- I. Gibt es einen Unterschied zwischen selbstexpandierenden und ballonexpandierenden Stents, die als Bridging-Stents verwendet werden?
- II. Welche Komplikationen könnten, auftreten und wie wahrscheinlich ist ihr Auftreten?
- III. Wie beeinflusst die atmungsabhängige Bewegung der Nieren die Behandlung mit selbstexpandierenden und ballonexpandierenden Stents in Endarterien?

Hypothese: Es es ist kein signifikanter Unterschied zwischen selbstexpandierenden und ballonexpandierenden Stents hinsichtlich Migration, Stenose und Krümmungen im Advanced Vascular Perfusion Model ersichtlich.

Wir haben in wissenschaftlichen Journalen, auf Pubmed und anderen relevanten Quellen recherchiert, um ein solides Verständnis zu entwickeln. Zusätzlich haben wir bei sämtlichen Bauteilen, die für unsere Messungen relevant waren, die Datenblätter eingehend studiert. Falls es erforderlich war, ärztlichen Rat einzuholen, haben wir dies getan. Wir wüssten nicht, wie man sonst recherchieren können sollte.

Es wurde eine Doppelspitze für dieses Projekt festgelegt. Mit einer medizinischen Leitung als der Meduni Wien und einer technischen Leitung, gestellt von uns. Anschließend wurden Milestones festgelegt.

2.2 Inhaltliche Beschreibung und Projektaussicht

Das Perfusionssystem wurde entwickelt, um endovaskuläre Behandlungsmethoden von abdominalen Aortenaneurysmen (AAA) miteinander zu vergleichen. Das Modell simuliert den menschlichen Bauchraum sowie die Herzfunktion und es werden diverse hochpräzise Messparameter erheben. Diese Arbeit fokussiert die Setzung von Stentgrafts bei der endovaskulären Aortenreparatur (EVAR) bei komplexen Aortenaneurysmen und ist somit das erste System weltweit in dem dieser Testungen möglich sind. Dieses System ist zudem die erste Alternative zu Tierversuchen und präziser als jede Langzeitstudie. Was also das Gerät besonders macht? Die Idee!

Jedoch war die Umsetzung auch einzigartig. Ein komplexes Messsystem aus Druck (siehe Abbildung 5) und Durchflussmessungen (siehe Abbildung 6) wurde eigens entwickelt und Stent-Dislokationen detektieren zu können. Wir haben uns als Team gegen jegliche Patentierungen der Messsysteme entschieden, um der Forschung den Zugang zu unserem System nicht zu erschweren. Unser Perfusionssystem soll Leben retten und nicht Geld generieren. Die unglaublichen Erweiterungsmöglichkeiten sollten in Betracht gezogen werden. Mit diversen Erweiterungen kann man kardiale Stents (die beispielsweise oft nach Herzinfarkten eingesetzt werden), oder andere endovaskuläre Systeme testen. Diesem Konzept sind keine Grenzen gesetzt! Diverse Universitäten und Unternehmen möchten mit uns kooperieren und publizieren.

Ein Fokus liegt auch auf der Nachhaltigkeit und dem Qualitäts- und Prozessmanagement dieses Projekts. So muss beispielsweise vor und nach einer Testung ein selbstkonzeptioniertes Prüfungs- und Testungsprotokoll ausgefüllt werden, um Komplikationen zu reduzieren. Außerdem gibt es Einschulungsprogramme für Unternehmen und Ärzt:innen, sowie eine Zweckbestimmung. Diese Maßnahmen gehen über das Niveau anderer Diplomarbeiten.

Das System stellt sich aus zwei unterschiedlichen Flüssigkeitskreisläufen zusammen. Diese setzen sich aus dem Blutkreislauf innerhalb der Aorta und den Abdomen-Kreislauf außerhalb der Aorta zusammen. Eine pulsatile Pumpe simuliert das Herz in Aspekten wie Druck, Frequenz und Zeitvolumen. An einem selbstkonstruierten 3D-Teil wird die Aorta eingespannt und ein Stent eingesetzt. Druck und Durchfluss und weitere Parameter werden vor und nach der eingespannten Aorta gemessen, um durch Differenzen Dislokationen detektieren zu können und damit die Einstellungen der Pumpe validiert werden können. Außerdem wird das Geschehen mit 5 Kameras aufgezeichnet.

Folgende Methoden und Geräte werden angewendet:

- Temperaturmessung
- Gefäßdicke nach der Perfusion
- Genauer Ort des Stent-Grafts vor & nach der Perfusion
- Druckmessung vor & nach Gefäß

Wir verwenden drei WIKA A-10 Drucktransmitter aufgrund folgender Eigenschaften:

- Erfüllt CSA-Normen für Sicherheit und Qualität
- Einfache Implementierung dank benutzerfreundlichem Design
- Speziell konzipierte Membran für Widerstandsfähigkeit gegenüber verschiedenen Medien und hohe Genauigkeit
- Modell DMU 1,6 FB ES gewählt: Messbereich von 0 bis 1,6 Bar, Schutzklasse IP65
- Anpassbare Messbereichseinstellung für höhere Genauigkeit
- Silikonöl als Übertragungsflüssigkeit für präzise Messungen bei hohen Temperaturen
- Betriebsspannung von 10-30 Volt, empfohlen: 24 Volt

- Durchfluss vor & nach Gefäß

Wir verwenden drei Bamoflonic-Ultraschall-Durchflussmessern aufgrund folgender Eigenschaften:

- Einfache Implementierung dank benutzerfreundlichem Design
- Modell BAMOFLONIC DN15 mit präzisiertem Messbereich von 0,9 bis 36 Liter pro Minute
- Betriebsspannung von 24 Volt für einheitliche Versorgung
- Ausgangssignal: 4-20mA Stromsignal für einfache Integration in Steuerungssysteme

- Zeitpunkt und Dauer der Perfusion

- Wird im Programm gemessen (nicht kalibriert) und mit einer kalibrierten Uhr validiert

- Kraft mit der der Stent nach der Perfusion entfernt wird

- Ein Newtonmeter misst die Kraft, die benötigt wird, damit ein Stent disloziert.

- Aufzeichnung der Perfusion durch fünf Kameras aus verschiedenem Blickwinkel

- Es werden 5 Logitech Streamcams gekauft
- Glasobjektive, mit einem Sichtwinkel von 78 Grad
- Besitzen einen Präzisen Autofokus; Aufzeichnung erfolgt in Full HD, mit einer Auflösung von 1080p mit 60 Bilder pro Sekunde
- Dient zur visuellen Aufzeichnung der eingespannten Aorta und zeichnet Komplikationen und auffällige Bewegungen auf
- Aufnahmen werden auf externe Festplatte in einer MKV- und MP4-Dateien gespeichert, um Datenverlust zu vermeiden

Im Folgenden sind Eigenschaften aufgelistet, die das System erfüllt:

- Gesamtsteuerung des Systems
 - Über Relais mit Arduino UNO

- Pulsatile Pumpleistung im physiologischen Druck- und Frequenzbereich
- Erwärmung der Abdominalflüssigkeit auf 37 (± 0.1) °C
 - Abdominalflüssigkeit wird mithilfe des Wärmebeckens erhitzt und reguliert
 - Lineare Thermoregulation im Bereich: -30 bis 200 °C.
 - Mit einer RS232-Digitalschnittstelle und die Möglichkeit für externe Sensoren verfügbar.

- Temperaturüberwachung
 - Temperatursensor Elitech GSP 6
 - Misst Temperatur der Flüssigkeit im Korpus und Luftfeuchtigkeit im Raum
 - Aufnahme Intervall: 10sek – 24h
 - In PDF mit Temperaturverlauf und abgegriffenen Daten dokumentiert und wird auf einer externen Festplatte gespeichert

- Beleuchtung des Systems
 - Mit 2x 36VDC Hochleistungs-LEDs
 - Schaltung über Relais
 - Kühlung mit 24V Ventilatoren

- Sicherheitsvorkehrungen wie Stromlosschalter, Notaus, zusätzliche Erdungsleitung:
 - Stromlosschalter zur Abschaltung
 - Notaus-Taster für Notabschaltungen
 - Spannungsführende Teile: Verdeckung oder Hindernis zur Verhinderung direkten Zugangs
 - FI-Schalter
 - Erdungskabel: Querschnitt von 2,5 cm²
 - Erdung mittels Erdungsschraube und Beilagscheibe (Zahnscheibe DIN 6797)

- Humanähnlicher Korpus (siehe Abbildung 7)
 - Kunststoff, der desinfizierbar ist
 - Maße an einem Körper angepasst (50cm hoch, 40cm breit)
 - Zylindrisch mit runder Grundfläche und abnehmbarem Deckel

- Rohrleitungen, die die Perfusion ermöglichen
 - Aus Edelstahl
 - Abgedichtet mit Silikon und Dichtband

Ausblick

In unserem wegweisenden Forschungsprojekt werden bahnbrechende Fortschritte in der minimalinvasiven Endovaskulärchirurgie erzielt werden, die auf dem Einsatz modernster Technologien und innovativer Ansätze basieren. Durch umfangreiche Testungen und die Entwicklung eines fortschrittlichen Perfusionsmodells konnten wir nicht nur die Grundlagen für die Medizin von morgen legen, sondern auch neue Perspektiven für Ärzt:innen, Unternehmen und die Forschungsgemeinschaft eröffnen.

Durch präzise Testungen können Ärzte nun Guidelines erhalten, die ihnen dabei helfen, den optimalen Stent und die geeignete Stent-Art für unterschiedlichste Ausprägungen von Aortenaneurysmen (AAA) zu bestimmen und verschiedene Behandlungsmethoden (in der Einleitung erwähnt) miteinander zu vergleichen. Diese Erkenntnisse sind nicht nur für die individuelle Patientenversorgung von entscheidender Bedeutung, sondern könnten auch als wertvolle Ausrichtungen für Unternehmen dienen, die sich auf die Produktion und Weiterentwicklung von medizinischen Geräten spezialisieren. Außerdem könnten wir Zertifikate ausstellen und eine standardisierte Zulassungsprozedur für Stent-Grafts gemäß IEC-Normen erstellen. Geschäftsfelder eröffnen sich dadurch unzählige. Als international akkreditierte Prüfstelle wäre man sehr attraktiv für Stent-Graft-Hersteller und könnte pro Zertifikat ein Honorar verrechnen. Jedoch liegt der Fokus dieses Projekts auf das Wohl der Patient:innen und nicht auf finanzielle Aspekte.

Ein besonderer Aspekt unseres Perfusionsmodells liegt in seiner Funktion als Alternative zu Tierversuchen. Die Möglichkeit, Tierversuche zur Testung von Stents vollständig abzuschaffen, eröffnet nicht nur ethische, sondern auch ökologische Perspektiven und könnte andere Forschungsfelder inspirieren mehr in die Entwicklung technischer Alternativen zu investieren. Unsere Forschung gibt Anreiz zur Entwicklung neuer Behandlungsmethoden für komplexe Aneurysmen mit Renalabgangsbeteiligung, wodurch nicht nur die Notwendigkeit von Tierversuchen reduziert wird, sondern auch innovative Therapieansätze für bisher schwer behandelbare Fälle entstehen.

Die Zukunft unseres Projekts liegt nicht nur in der Anwendung des Perfusionsmodells in der aktuellen medizinischen Praxis, sondern auch in der Orientierung für zukünftige Forschungsgruppen. Diese Fortschritte dienen nicht nur der Verbesserung von Diagnose- und Behandlungsmethoden, sondern tragen auch zur Weiterentwicklung des gesamten medizinischen Forschungsfeldes bei.

Ein weiterer vielversprechender Ansatz liegt im Training von neuronalen Netzen mittels CT-Bild Detektoren Software. Die Simulation von bildgebenden Verfahren kombiniert mit unserem Perfusionsystem bietet nicht nur die Möglichkeit, künstliche Intelligenz in der Medizin zu trainieren, sondern könnte auch dazu beitragen, die Diagnosegenauigkeit zu verbessern und personalisierte Therapieansätze zu entwickeln.

Insgesamt markiert unser Forschungsprojekt einen bedeutenden Schritt in Richtung einer modernen, ethischen und fortschrittlichen Medizin. Die gewonnenen Erkenntnisse legen nicht nur den Grundstein für verbesserte Patientenversorgung, sondern eröffnen auch Türen für zukünftige Innovationen und die Gestaltung einer nachhaltigen, tierversuchsfreien

Forschungslandschaft. Wir sind überzeugt, dass diese Entwicklungen nicht nur unser Projekt, sondern die gesamte medizinische Gemeinschaft nachhaltig prägen werden.

2.3 Bericht des Projektkoordinators

Mein Name ist Avid Vormann, ich bin 19 Jahre alt. Ich durfte die Leitungsfunktion im Rahmen dieser Diplomarbeit ausüben. Die Teamzusammenstellung erfolgte aufgrund primär sozialer und sekundär fachlicher Kompetenz. Mir war klar, dass wir uns dank unserer Ausbildung komplexen Fragestellungen stellen konnten und Lösungen finden werden. Vielmehr lag der Fokus bei meiner Auswahl der Teammitglieder auf charakterliche Merkmale.

Wir haben mit Josephine Gold eine sehr strukturierte und gut organisierte Kollegin im Team. Die detaillierte Protokollierung des Geschehens sowie die Planung und Konzeptionierung dieses großen Projekts wäre in dieser hohen Qualität ohne Josephine Gold nicht möglich gewesen. Ihre fachliche Expertise in Visualisierungssysteme und Biomechanik waren außerdem sehr wichtig in der Teamkonstellation.

Philipp Sponer kennzeichnet seine hohe Flexibilität und Kreativität. Sobald ein Problem mit herkömmlichen Vorgehensweisen nicht lösbar ist, hatten wir dank Philipp Sponer immer Lösungsansätze. Inhaltlich fokussierte sich Philipp auf die Sensorik und Datenverarbeitung. Dieses gesamte Themengebiet hat er sich auf erlernte Grundlage in der Schule im Rahmen der Diplomarbeit selbst beigebracht.

Christina Schramböck strahlt durch ihre Motivation und Arbeitsbereitschaft. Sie war zweifelsohne für den massiven Fortschritt im Wintersemester 2023/24 verantwortlich. Dank ihrer selbstständigen Arbeitsweise, ihrer breiten fachlichen Expertise und der Hingabe für dieses Projekt, entlastete sie fachlich alle Projektmitglieder und entwickelte eigene Konzepte.

Die Zusammenarbeit mit der Meduni Wien ist hervorragend. Wir genießen das vollste Vertrauen der Ärzt:innen und es ist ein wertschätzender Umgang. Auf das schulinterne Lehrpersonal waren wir fachlich nicht wirklich angewiesen. Im medizinischen Kontext hatten wir genügend Ansprechpartner im AKH und in technischen Fragestellungen wussten wir uns selbst zu helfen. Projektplanungstechnisch haben wir jedoch viel Unterstützung von unserem Diplomarbeitsbetreuer Prof. Tito Körner bekommen.

Es war eine sehr dichter Zeitplan und sehr viele Tasks. Der Arbeitsaufwand war nicht zu vergleichen mit anderen Diplomarbeiten. An Wochenenden und in Ferien in der Schule zu sein, war für uns keine Seltenheit. Jedoch motivierte uns diese sinnvolle Tätigkeit zum Wohle vieler Patient:innen.

Die Gesprächskultur war sehr offen. Kritik wurde immer gleich kommuniziert und in vielen Aspekten hat uns diese offene Gesprächskultur zu schnelleren Fortschritten verholfen. Wichtig war nur, dass sobald eine Idee ausdiskutiert, wurde die Umsetzung rasch und fristgerecht erfolgte. Konflikte hab es in diesem Team nicht.

Von unseren Familien bekamen wir alle Unterstützung. Sowohl Inspiration als auch fachliche Meinungen wurden von Freunden und Familie eingeholt. Rückschläge im klassischen Sinne hatten wir nicht. Ich würde den Begriff Rückschlag per se auch nicht verwenden. Wir hatten immer wieder Herausforderungen, wo wir gesehen haben, dass gewisse Lösungen in einer Form nicht funktionieren. Da galt es Alternativen zu finden.

Die Arbeitszeit beläuft sich in diesem Semester auf rund 15h pro Woche. Im Sommer wurde weniger gearbeitet und im vorherigen Schuljahr wurde rund 10h/Woche an der Diplomarbeit gearbeitet. Die Kosten werden von der Medizinischen Universität Wien gedeckt.

Bildverzeichnis



Abbildung 1: Advanced Perfusion Model

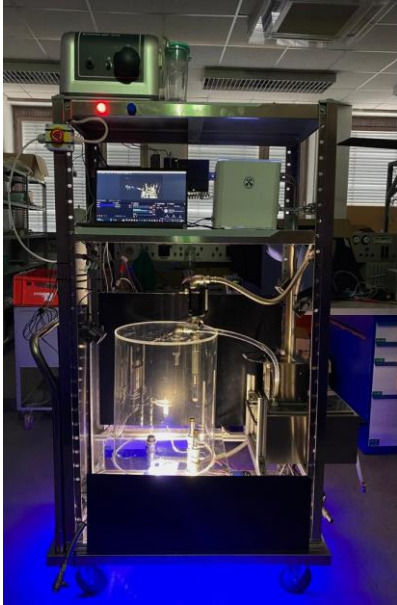


Abbildung 2: Beleuchtetes Gerät

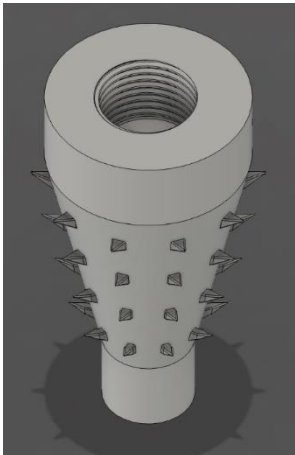


Abbildung 2: 3D Ansicht des AortaSpikeHolder

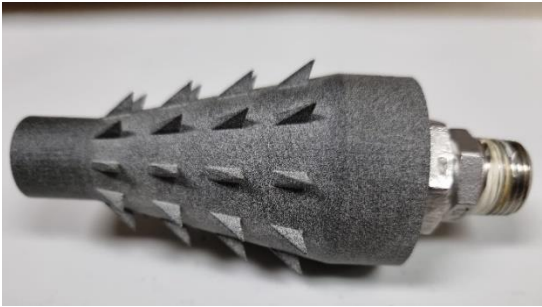


Abbildung 4: AortaSpikeHolder



Abbildung 5: Drucksensor



Abbildung 6: Durchflusssensor

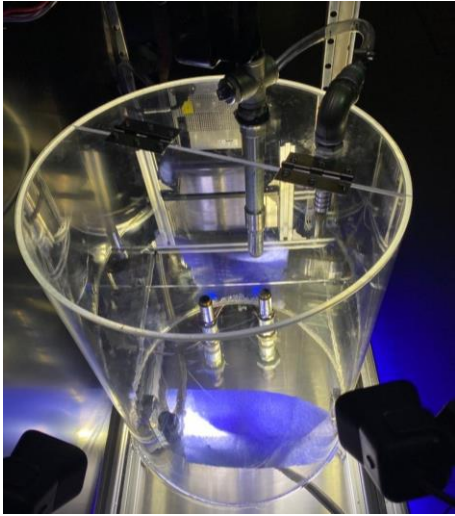


Abbildung 7: Korpus