Sachbericht zum Verwendungsnachweis
Teil I | Kurzbericht

Zuwendungsempfänger AMS GmbH	Förderkennzeichen 13GW0471A
KMU-innovativ – Verbundprojekt: Kognitiv assistierte Laparoskopie mit robotischem Assistenzsystem für chirurgische Greif- und Halteaufgaben (Koala-Grasp) Teilvorhaben: Kraft- und Momenten-sensitives mechatronisches Interface für die Roboter-gestützte Weichgewebschirurgie	
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2021 – 31.05.2024	
Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 31.05.2024	

Version 1.00 **Datum: 06.11.2024**

AMS GmbH • In den Kuhwiesen 10 • D – 76149 Karlsruhe

Tel.: 0721 / 783 92 0 E-mail: ams-gmbh@ams-online.de
Fax: 0721 / 783 92 28 http://www.ams-online.de

Einordnung und Aufgabenstellung

Das hier beschriebene Teilvorhaben gehört zu einem Verbundprojekt mit der Thematik lernender robotischer Assistenzsysteme für chirurgische Greif- und Halteaufgaben, insbesondere für die minimalinvasive Chirurgie am Beispiel der operativen Gallenblasenentfernung. Das Teilvorhaben befasst sich mit dem Thema eines kraftsensitiven mechatronischen Interfaces. Dieses stellt die Schnittstelle des Robotersystems zu den unterschiedlichen laparoskopischen Instrumenten dar, die bei minimalinvasiven Operationen zum Einsatz kommen.

Die Aufgabe dieses Systems besteht darin, die aktorischen Funktionalitäten der verwendeten laparoskopischen Werkzeuge in gleicher Weise zu übernehmen, wie wenn sie von einem Chirurgen eingesetzt werden. Darüber hinaus gibt es die zweite wesentliche Funktionalität, die bei der Interaktion mit dem Weichgewebe auftretenden Kräfte und Drehmomente in allen sechs Freiheitsgraden hochgenau zu messen. Das Robotersystem erhält somit zusätzliche haptische und taktile Fähigkeiten. Diese taktile Information benötigt die Steuerung des Assistenzroboters zur sicheren Ausführung der Bewegung des OP-Werkzeugs und zur Situationsanalyse und -überwachung – vor allem mit der Zielsetzung, das Risiko für Gewebeverletzungen zu minimieren.

Das Verbundprojekt wurde mit den 3 Projektpartnern [Karlsruhe Institute of Technology (KIT) / Health Robotics and Automation (HERA) / später Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg / Surgical Planning and Robotic Cognition (SPARC)], [Universitätsklinikum Heidelberg / später Universitätsklinikum Carl Gustav Carus an der Technischen Universität Dresden] sowie der [Firma ArtiMinds GmbH] durchgeführt.

Zur Umsetzung wurden zunächst aufbauend auf der fachlichen Expertise der Projektpartner und umfangreichen Datenaufzeichnungen bei mehreren OP-Experimenten die technisch wissenschaftlichen Anforderungen an das mechatronische Interface evaluiert, um ein Verständnis über die Einsatzumgebung des mechatronischen Interfaces bei laparoskopischen OPs und die erforderlichen Funktionalitäten zu erlangen.

Daraus resultierten die folgenden Funktionalitäten:

Bezüglich der Aktuatorik:

- 2 Freiheitsgrade (1 x rotatorisch; 1 x translatorisch (Zange, Greifer etc.);
- Positions- und Kraftmessung für die translatorische Komponente (Zange, Greifer);
- Leistungsfähige Greifwerkzeug-Funktionalitäten mit kombinierter Kraft- und Positionsregelung.

Bezüglich der Kraft-Drehmomentsensor-Messtechnik:

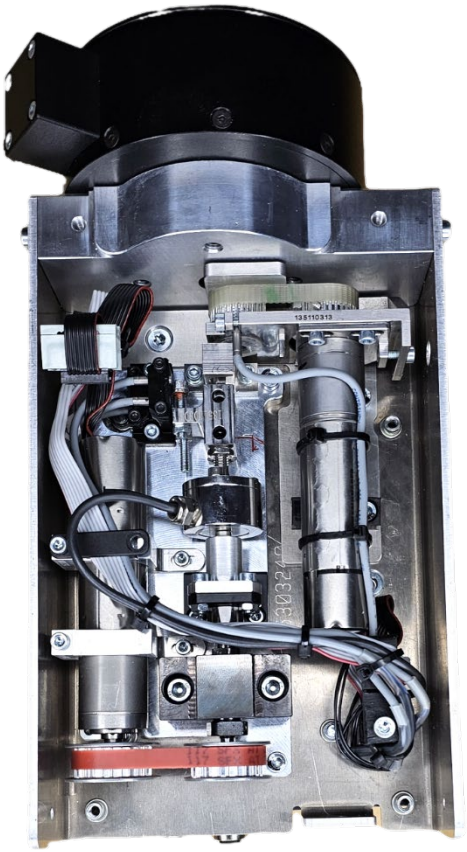
- Idealerweise sollte die Krafteinleitung in den kraftsensitiven Bereich möglichst direkt oder nahe am Schaft des Instrumentes erfolgen, um direkt die mit dem umgebenden Gewebe interagierenden Kräfte und Momente zu erfassen;
- Eine günstig konditionierte Massen-(Schwerpunkt)verteilung soll die störenden Signalpegel bei der 6D Kraft-Drehmoment-Messung gegenüber den eigentlichen Nutzsignalen hinreichend gering halten.

Bezüglich Datenverarbeitung und Schnittstellen:

- Dezentrale Steuerungs- und Datenerfassungsstruktur für eine sichere lokale Kontrolle und störunempfindliche Messdatenerfassung;
- Echtzeitfähiges Kommunikationskonzept zur Integration der dezentralen Einheiten in die Gesamtsteuerung.

© AMS GmbH

Ergebnisse



Während der Projektlaufzeit wurden insgesamt 5 technische Versionsstände von (Prototyp-)Mechaniken für das mechatronische Interface realisiert, die iterativ aufeinander aufbauten.

Für die Steuerungs- und Messfunktionalitäten wurde eine eigene Platine auf der Basis der SAM E54 Familie von Microchip für den direkten Einbau im mechatronischen Interface entwickelt. Die Kommunikation mit den übergeordneten Komponenten erfolgt in Echtzeit über EtherCAT.

Die Anbindung der unterschiedlichen übergeordneten Plattformen in den Laborumgebungen der Projektpartner erfolgt mittels standardisierter TCP-Sockets, die über einen PLC-basierten Gatewayrechner ausgetauscht werden.

Darüber hinaus wurden auf der PLC eine Bedienoberfläche zur Verfügung gestellt, die bei den Experimental-OPs zusätzliche Komfortfunktionen und Notbedienmöglichkeiten ermöglichte.

Schließlich dient die IPC-basierte PLC bei den Evaluierungen und Tests der Aufzeichnung und Analyse aller Echtzeitdaten.

Experimental-OPs

Es wurden umfangreiche Versuchsreihen und Experimental-OPs (Lebermodelle / Schweineleber ex-vivo / in-vivo) mit mehreren Robotersystemen bei den Projektpartnern in Karlsruhe, Heidelberg und Dresden durchgeführt, bei denen wertvolle Erfahrungen und Daten für die Bewertung der technischen Systeme gesammelt wurden. Vor allem wurden wichtige Erkenntnisse über die Gebrauchstauglichkeit (Usability) während der mit Unterstützung der Chirurgen durchgeführten OPs gewonnen.

Die Rückkopplung seitens der Projektpartner über die Gebrauchstauglichkeit der mechatronischen Interfaces im praktischen Einsatz war insgesamt sehr positiv.

© AMS GmbH

Sachbericht zum Verwendungsnachweis
Teil II

Zuwendungsempfänger AMS GmbH	Förderkennzeichen 13GW0471A
KMU-innovativ – Verbundprojekt: Kognitiv assistierte Laparoskopie mit robotischem Assistenzsystem für chirurgische Greif- und Halteaufgaben (Koala-Grasp) Teilvorhaben: Kraft- und Momenten-sensitives mechatronisches Interface für die Roboter-gestützte Weichgewebschirurgie	
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2021 – 31.05.2024	
Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 31.05.2024	

Version 1.00 **Datum: 06.11.2024**

AMS GmbH • In den Kuhwiesen 10 • D – 76149 Karlsruhe

Tel.: 0721 / 783 92 0 E-mail: ams-gmbh@ams-online.de
Fax: 0721 / 783 92 28 http://www.ams-online.de

Vorbemerkung

Im vorliegenden Sachbericht zum Verwendungsnachweis / Teil II werden die Vorgehensweisen, Inhalte und Ergebnisse für das Teilvorhaben *„Kraft- und Momenten-sensitives mechatronisches Interface für die Roboter-gestützte Weichgewebschirurgie“* erläutert.

Die Arbeiten wurden innerhalb des Verbundprojektes *„Kognitiv assistierte Laparoskopie mit robotischem Assistenzsystem für chirurgische Greif- und Halteaufgaben (Koala-Grasp)“* zusammen mit den nachfolgend genannten Projektpartnern ausgeführt:

- Karlsruhe Institute of Technology (KIT) / Health Robotics and Automation (HERA), später Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg / Surgical Planning and Robotic Cognition (SPARC), nachfolgend in diesem Bericht *„HERA/FAU“* genannt;
- Universitätsklinikum Heidelberg / später Universitätsklinikum Carl Gustav Carus an der Technischen Universität Dresden, nachfolgend in diesem Bericht *„UKHD/UKDD“* genannt;
- ArtiMinds GmbH, nachfolgend in diesem Bericht *„ArtiMinds“* genannt.

Die Strukturierung dieses Berichtes orientiert sich an den im Projektantrag definierten Arbeitspaketen, wodurch auch der Bezug zur ursprünglichen Vorhabensbeschreibung gegeben ist. Der Schwerpunkt liegt selbstverständlich auf den Arbeitspaketen des eigenen Teilprojektes. Erläuterungen bezüglich der Arbeitspaketen der Projektpartner werden nur dann vorgenommen, sofern signifikante Arbeitsinhalte für das eigene Teilprojekt damit verbunden sind.

Zusammenfassende Beschreibung der Aufgabenstellung und der Vorgehensweise

Im Kontext des Verbundprojektes zur Forschung im Bereich robotischer Assistenzsysteme für chirurgische Greif- und Halteaufgaben befasst sich das hier beschriebene Teilvorhaben mit dem Thema eines kraftsensitiven mechatronischen Interfaces. Dieses stellt die Schnittstelle des Robotersystems zu den unterschiedlichen laparoskopischen Instrumenten dar, die bei minimalinvasiven Operationen zum Einsatz kommen. Die Aufgabe dieses Systems besteht darin, die aktorischen Funktionalitäten der verwendeten laparoskopischen Werkzeuge in gleicher Weise zu übernehmen, wie wenn sie von einem Chirurgen eingesetzt werden. Darüber hinaus gibt es die zweite wesentliche Funktionalität, die bei der Interaktion mit dem Weichgewebe auftretenden Kräfte und Momente in allen sechs Freiheitsgraden hochgenau zu messen.

Das Robotersystem erhält somit zusätzliche haptische und taktile Fähigkeiten. Diese taktile Information benötigt die Steuerung des Assistenzroboters zur sicheren Ausführung der Bewegung des OP-Werkzeugs und zur Situationsanalyse und -überwachung – vor allem mit der Zielsetzung, das Risiko für Gewebeverletzungen zu minimieren.

Zur Umsetzung wurden zunächst aufbauend auf die fachliche Expertise der Projektpartner die technisch wissenschaftlichen Anforderungen an das mechatronische Interface evaluiert. Das Projektteam musste sich zunächst ein Verständnis über die Einsatzumgebung des mechatronischen Interfaces bei laparoskopischen OPs aneignen. Dies erfolgte auf der Basis medizinischer Fachberichte und Dokumentationsvideo- und Bildmaterials von OPs – mit dem Fokus auf die technischen Aspekte der chirurgischen Instrumente – unterstützt und angeleitet durch

© AMS GmbH

Chirurgen des Projektpartners UKHD/UKDD. Der Projektpartner HERA/FAU vermittelte Wissen über die speziellen Randbedingungen und Anforderungen beim Einsatz von Robotern bei der OP-Durchführung.

Dabei wurden die in der Antragsphase angestellten grundsätzlichen konzeptionellen Überlegungen bestätigt.

Bezüglich der Aktuatorik:

- 2 Freiheitsgrade (1 x rotatorisch; 1 x translatorisch (Zange, Greifer etc.);
- Positions- und Kraftmessung für die translatorische Komponente (Zange, Greifer);
- Leistungsfähige Greifwerkzeug-Funktionalitäten mit kombinierter Kraft- und Positionsregelung.

Bezüglich der Kraft-Drehmomentsensor-Messtechnik:

- Idealerweise sollte die Krafteinleitung in den kraftsensitiven Bereich möglichst direkt oder nahe am Schaft des Instrumentes erfolgen, um direkt die mit dem umgebenden Gewebe interagierenden Kräfte und Momente zu erfassen;
- Eine günstig konditionierte Massen-(Schwerpunkt)verteilung soll die störenden Signalpegel bei der 6D Kraft-Drehmoment-Messung gegenüber den eigentlichen Nutzsignalen hinreichend gering halten.

Bezüglich Datenverarbeitung und Schnittstellen:

- Dezentrale Steuerungs- und Datenerfassungsstruktur für eine sichere lokale Kontrolle und störunempfindliche Messdatenerfassung;
- Echtzeitfähiges Kommunikationskonzept zur Integration der dezentralen Einheiten in die Gesamtsteuerung.

Weitere wichtige und vor allem detaillierte Informationen lieferten die ersten OP-Experimente im Labor des Projektpartners HERA/FAU. Hierzu wurde eine vergleichsweise einfache Laborlösung für die Aufnahme des laparoskopischen Instruments entwickelt und mit einem vorhandenen Standard-6D-Kraft-Drehmomensensor ausgestattet. Durch Beobachten der Abläufe und paralleler Datenaufzeichnung von Roboterpositionen, 6D-Kräften und Drehmomenten sowie Greifpositionen und -kräften konnten umfangreiche Informationen gewonnen werden, aus denen wichtige Design- und Konzeptvorgaben abgeleitet wurden.

Innerhalb der Projektlaufzeit sind einschließlich dem erwähnten Laboraufbau für die ersten Evaluierungen insgesamt 5 jeweils aufeinander aufbauende technische Versionsstände des mechatronischen Interfaces entwickelt worden. Alle Entwicklungsstände sind als voll funktionsfähige physische Evaluierungsmuster aufgebaut worden. Dabei wurde angestrebt, möglichst viele Komponenten einer Vorgängerversionen in der jeweiligen weiterentwickelten Ausführung wieder zu verwenden.

Eine Herausforderung bei der Projektabwicklung bestand darin, dass durch den fachlichen Austausch mit den Projektpartnern und mittels deren Expertise zunächst erst einmal die Anforderungen an Konzepte und technischen Umsetzungen für ein mechatronischen Interface zu entwickeln und Lösungskonzepte abzuleiten waren, dann aber schon zeitnah zumindest

© AMS GmbH

teilweise funktionsfähige Systeme von den Projektpartnern für deren eigene Evaluierungen und experimentelle Untersuchungen benötigt wurden.

Deshalb musste zu Beginn des Projektes relativ früh ein System mit Grundfunktionalität bereitgestellt werden, das dann zunächst in kleineren, später in größeren Schritten weiterentwickelt worden ist. Somit gab es in der Projektabwicklung quasi immer zwei parallele inhaltliche Schwerpunkte. Zum einen die Bereitstellung und die Unterstützung von zunächst technisch eher einfachen und noch nicht optimierten Lösungen, zum anderen die Erforschung und Evaluierung der eigentlichen fortgeschrittenen Lösungsansätze, die die wesentlichen Projektinhalte und -ziele darstellten.

Eine weitere Herausforderung stellte die Problematik der schwierigen Bauteilebeschaffung dar, die vor allem in der ersten Hälfte der Projektlaufzeit sehr ausgeprägt war. Oft bestand die einzige Möglichkeit zur Weiterführung der Projektarbeiten in der Beschaffung von Ersatzkomponenten, mittels derer zumindest bestimmte Teilarbeiten weitergeführt werden konnten, bis dann nach sehr langer Wartezeit die tatsächlich notwendige Komponente zur Verfügung stand. Dieser Punkt war bei den elektronischen Komponenten für Steuerung und Datenerfassung besonders ausgeprägt.

Beschreibung der Arbeitsinhalte der einzelnen Arbeitspakete

Nachfolgend werden die Vorgehensweisen, Inhalte und Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete – so wie sie im Projektantrag festgelegt worden sind – detailliert erläutert. Wie bereits weiter oben erwähnt, werden im Wesentlichen die Arbeitspakete des eigenen Teilprojektes sowie übergeordnete gemeinsame Arbeitspakete dokumentiert. Erläuterungen bezüglich der Arbeitspaketen der Projektpartner werden nur dann vorgenommen, sofern signifikante Arbeitsinhalte für das eigene Teilprojekt damit verbunden sind.

Teilprojekt 1: Klinische, ethische und betriebswirtschaftliche Rahmenbedingungen (UKHD/UKDD)

AP 1.1 Definition der medizinischen Nutzeranforderungen

Hier ging es darum, die Anforderungen, aus den medizinischen und technischen Rahmenbedingungen abzuleiten und für mögliche Lösungskonzepte bereitzustellen.

Dies wurde im Rahmen mehrerer Abstimmungstreffen und experimenteller OP-Durchführungen an Schweinelebern bearbeitet. Für AMS resultierten hieraus wichtige Ableitungen der funktionalen Anforderungen, die in die Konzeption des mechatronischen Interfaces eingeflossen sind.

Das Thema steht in einem engen Kontext mit der Analyse der Anforderungen an ein mechatronisches Interface steht (AP 3.1).

AP 1.2 Ethische, soziale und rechtliche Fragen (ELSI)

Unter Federführung des Projektpartners HERA/FAU wurde ein ELSI Workshop durchgeführt, an dem die AMS Projektmitarbeiter teilgenommen haben.

© AMS GmbH

AP 1.3 Verwertungsstrategie kraftsensitives mechatronisches Interface

Bereits während des laufenden Projektes hat sich herausgestellt, dass die Projektpartner HERA/FAU und UKHD/UKDD sehr interessiert sind, die mechatronischen Interfaces für ihre aktuellen und zukünftigen Forschungsarbeiten intensiv zu nutzen. Somit könnten die Geräte als Werkzeuge zur Unterstützung von experimentellen Operationen auch für andere Forschungseinrichtungen von Interesse sein. Durch das universelle Schnittstellenkonzept wäre eine effiziente Anbindung an unterschiedliche Robotersysteme gegeben.

Eine erste Vermarktung im forschungsnahen Umfeld wäre eine Art Zwischenschritt für weitere Erfahrungen und Optimierungen, bevor der deutlich größere Schritt in Richtung klinischer Tauglichkeit angegangen wird.

Unabhängig von der weiteren Verwertung des mechatronischen Interfaces als medizinisches System wurden im Rahmen des Projektes eine Reihe von Verfahren entwickelt und mit positivem Ergebnis evaluiert, die in künftige Steuerungs- und Sensorprodukte zur Verbesserung der Funktionalität und Performance einfließen werden.

AP 1.5 Ausgründungs-Analyse

Da die beteiligten Partner auch über den Abschluss des Projektes hinaus in engem Kontakt stehen, wird das Thema „Ausgründung“ weiterhin aktuell bleiben. Insbesondere im Hinblick auf die Tatsache, dass die Partner HERA/FAU und UKHD/UKDD die aktuellen mechatronischen Interfaces weiterhin nutzen, wird es auch in Zukunft einen entsprechenden Austausch geben – auch im Hinblick eine weitere gemeinsame Verwertung.

Teilprojekt 2: Software-Framework (ArtiMinds)

AP 2.1 Definition und Erstellung von Framework und Schnittstellen

AP 2.2 Einbindung mechatronisches Interface

Seitens AMS wurden in Zusammenarbeit mit ArtiMinds und HERA/FAU mögliche Schnittstellen evaluiert, spezifiziert und für eine Testumgebung implementiert. Dabei waren die unterschiedlichen Systemumgebungen – zum einen das Laufzeitsystem der ArtiMinds RPS, zum anderen das ROS-basierte Framework von HERA/FAU – zu berücksichtigen. Zur Lösung dieser Aufgabenstellung wird ein PLC-basierter Gatewayrechner verwendet, auf dem ein TCP-Server implementiert wurde, über den die Anbindung an die übergeordneten Plattformen mittels standardisierter TCP-Sockets erfolgt. Durch die Verfügbarkeit der Socket-Mechanismen auf vielen Plattformen ist eine schnelle Anpassung an wechselnde Systemumgebungen während der experimentellen Arbeiten problemlos möglich.

Die Kommunikation des Gateway-Rechners mit den Echtzeitkomponenten des 6D-Kraft-Drehmomentsensors und dem Steuerungssystem für die Antriebskomponenten erfolgt mittels echtzeitfähiger EtherCAT-Schnittstellen.

Im Kontext der Umsetzung und kontinuierlichen Erweiterung und Verbesserung der Steuerungs- und Datenerfassungsfunktionalitäten für das mechatronische Interface wurden auch die

© AMS GmbH

damit korrespondierenden Spezifikationen der Schnittstellen der Systemmodule jeweils erweitert und angepasst.

Darüber hinaus wird der Gateway-Rechner für die Aufzeichnung der Echtzeitdaten bei den Evaluierungen und Tests verwendet. Hierzu sind leistungsfähige Analysewerkzeuge – beispielsweise ScopeView von Beckhoff – verfügbar.

AP 2.3 Einbindung der Software durch chirurgisches Personal

Bezüglich des mechatronischen Interfaces gab es zu diesem Arbeitspunkt Konzeptüberlegungen und Lösungsansätze im Hinblick auf das Wechseln der chirurgischen Werkzeuge. Dabei waren die Benutzeranforderungen bei der Evaluierung mechatronischer Lösungsansätze zu berücksichtigen.

Teilprojekt 3: Kraftsensitives mechatronisches Interface (AMS)

AP 3.1 Analyse der Anforderungen an ein kraftsensitives, mechatronisches Interface für laparoskopische Instrumente und Ableitung der funktionalen Spezifikationen

Hierzu war es notwendig, ein Grundverständnis und detaillierte Informationen über die Einsatzumgebung des mechatronischen Interfaces bei laparoskopischen OPs zu erhalten. Dazu wurden medizinische Fachberichte und Dokumentationsvideo- und Bildmaterial von OPs im Hinblick auf die technischen Aspekte der chirurgischen Instrumente unter fachlicher Anleitung und Begleitung von Chirurgen des Projektpartners UKHD/UKDD analysiert. Unterstützt vom Projektpartner HERA/FAU wurden die speziellen Randbedingungen und Anforderungen beim Einsatz von Robotern bei der OP-Durchführung evaluiert.

Wichtige und detaillierte Informationen lieferten die OP-Experimente im Labor von HERA. Die anwesenden AMS-Mitarbeiter konnten hier durch Beobachten der Abläufe mit paralleler Datenaufzeichnung von Roboterpositionen, 6D-Kräften und Drehmomenten sowie Greifpositionen und -kräften umfangreiche Informationen sammeln. Die Auswertung der Daten lieferte die Informationen, die für die Design- und Konzeptvorgaben benötigt wurden, beispielsweise Arbeitspositionen des chirurgischen Instruments und des gekoppelten mechatronischen Interfaces, Kraft- und Drehmomentbereiche bei der OP-Durchführung, Informationen über Elastizitäten des Gewebes und der Organe, für einen sichereren Halt und zur Vermeidung von Gewebeverletzungen einzuhaltende Kraftbereiche. Weiterhin lieferten die Daten Anhaltspunkte für Genauigkeiten bei der Auslegung von Mechanik und Messsystemen.

Darüber hinaus konnten aus den Daten, die mit hoher Abtastrate aufgezeichnet werden konnten, Informationen zur Dynamik der Bewegungen gewonnen werden, die insbesondere für die Auswahl geeigneter Filtermechanismen verwendet werden.

Diese Evaluierungen fanden im direkten Kontext der OP-Experimente der Partner HERA/FAU, UKHD/UKDD und ArtiMinds statt, die ihrerseits Erkenntnisse und Daten für die Forschungsschwerpunkte ihrer Teilprojekte sammelten. Für diese Versuche wurde eine vergleichsweise einfache Laborlösung für die Aufnahme des laparoskopischen Instruments entwickelt – Abbildung 1. Zur Messung der 6D-Kräfte- und Drehmomente wurde ein in einem anderen Projektkontext beschaffter Standard-6D-Kraft-Drehmomentsensor verwendet, der zwischen der Instrumentenaufnahme und dem Roboterflansch installiert ist. Zwar ist der Messbereich dieses

© AMS GmbH

Sensors für diese Konstellation nicht optimal, aber zur Ermittlung der Daten in dieser Projektphase absolut ausreichend.

Die Datenaufzeichnung erfolgte auf dem bereits erwähnten PLC-basierten Gateway-Rechner, der zu diesem Zweck mit externen schnellen USB-C SSDs ausgestattet wurde. Zur Analyse wurde ScopeView von Beckhoff und ein Engineering-Tool (Scilab) eingesetzt.

In einem weiteren Schritt wurde die Laborlösung um einen Stellantrieb mit Servosteuerung für die translatorische Verstellung des Instruments sowie um einen 1D-Kraftsensor erweitert. Damit konnten auch Erkenntnisse über die Kraftbereiche gewonnen werden, die zum sicheren Halt ohne Verletzung des Gewebes erforderlich sind.

Abbildung 1: Laboraufbau für Evaluierungsexperimente

© AMS GmbH

AP 3.2 Erforschung verschiedener Lösungsansätze für das mechatronische Interface durch Modellierung des kinematischen und dynamischen Verhaltens der Wirkketten

Konzept und Aufbau des 6D-Sensors

Aufbauend auf die positiven Erfahrungen des vorhandenen 6D-Sensorkonzeptes sollte dieses, wenn möglich auch für das mechatronische Interface verwendet werden. Allerdings hat sich gezeigt, dass der bisherige Aufbau des Messkörpers für den hier vorliegenden Anwendungsfall nicht unmittelbar übernommen werden konnte.

Hier waren zum einen die Anforderungen an eine effiziente Einleitung der Kräfte und Drehmomente zu berücksichtigen, die durch den Instrumentenschaft an die 6D-Messvorrichtung übertragen werden. Es zeigte sich, dass die Durchführung der 6D-Messung nahe an der Einspannstelle des Schaftes des laparoskopischen Instruments von Vorteil ist.

Es wurde deshalb eine Struktur favorisiert, bei der alle Komponenten des mechatronischen Interfaces, insbesondere die aktorischen Elemente für den Antrieb des Instruments, auf einer inneren Chassisplatte angeordnet und diese mit den 6D-KMS-Messelementen starr verbunden sind, so dass alle Kraftflüsse über die Messringe an den mit dem Roboter gekoppelten Teil geleitet werden.

Ein weiterer Konzeptpunkt, betrifft die geometrische Anordnung der Messringe. Hier war die äußere Gestalt des mechatronischen Interfaces im Hinblick auf die Positionierung für die OP-Durchführung – gemäß den Erkenntnissen im Kontext des AP 3.1 „Analyse der Anforderungen und Ableitung der Spezifikationen“ – zu berücksichtigen. Bei der Untersuchung der möglichen Positionierungen des mechatronischen Interfaces hat sich gezeigt, dass eine möglichst flache Auslegung im Hinblick auf die Störkonturen zu bevorzugen ist. Die Detailkonzeptionen der Gestaltung der Antriebe führten zu nebeneinander angeordneten Antriebskomponenten, so dass sich ein Aufbau mit rechteckigem Querschnitt als ideal erwiesen hat. Somit ist eine asymmetrische Anordnung der Messringe in Form eines rechteckigen Aufbaus zu favorisieren, damit einhergehend die Verwendung von 4 Messringen, anstelle von 3 Messringen (Abbildung 2). Für die beiden orthogonalen Hauptachsen des Systems (X- und Y) entstehen dadurch jeweils symmetrische Konstellationen. Aufgrund der daraus resultierenden linearen Unabhängigkeit sollte diese Anordnung zu einer gut konditionierten Entkopplungsmatrix für den linearen Entkopplungsansatz führen. Dies muss später bei der Berechnung der Entkopplungsmatrix des physischen Messkörpers noch verifiziert werden.

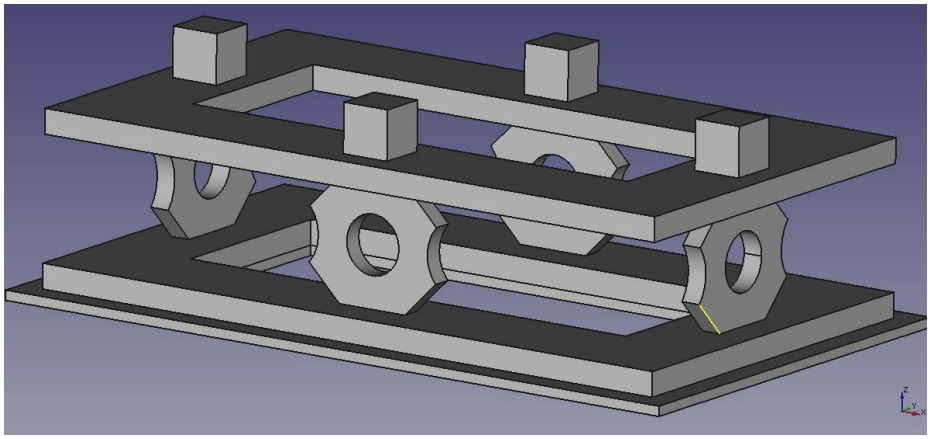


Abbildung 2: Rechteckige Kontur der Anordnung der Messringe

© AMS GmbH

Allerdings ergab sich dadurch eine deutliche Veränderung der Messstruktur und des mechanischen Aufbaus des 6D-Kraft-Drehmomentsensors, die untersucht und validiert werden musste. Im Einzelnen waren folgende Teilaspekte zu betrachten.

1. Lineares Signalverhalten des asymmetrischen Aufbaus

Zunächst ist davon auszugehen, dass die Struktur mit den beiden orthogonalen Hauptachsen des Systems (X und Y) aufgrund der daraus resultierenden linearen Unabhängigkeit positive Auswirkungen für eine gut konditionierte Entkopplungsmatrix für den linearen Entkopplungsansatz bietet. Voraussetzung wäre allerdings, dass die Verkopplungen als hinreichend linear anzunehmen sind. Diese Annahme konnte im CAD-System mittels mehrerer FEM-Analysen hinreichend nachgewiesen werden (beispielhaft Abbildung 3).

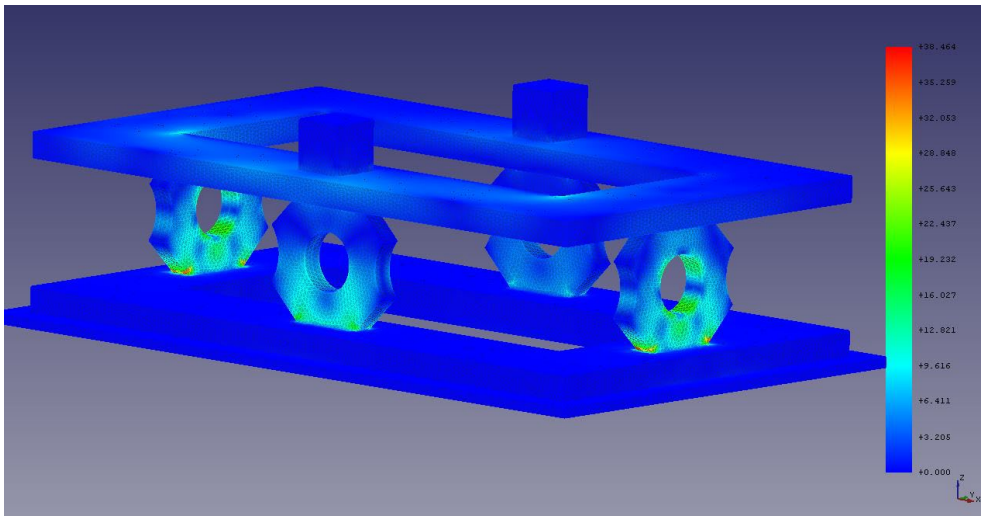


Abbildung 3: FEM-Analyse zur Linearität der rechteckigen Anordnung der Messringe

2. Bestimmung der Entkopplungsmatrix für den asymmetrischen Aufbau

Der orthogonale Aufbau des 6D-KMS und die Anordnung der Messringe führen zu einer unsymmetrischen (8x6) Entkopplungsmatrix. Diese wiederum erfordert eine modifizierte Methodik bezüglich der Kalibrierung und der dabei verwendeten Algorithmen, da die Bestimmung der Entkopplungsmatrix über einen modifizierten Ansatz mit „pseudoinverser“ Zwischenmatrix erfolgt. Die Algorithmen wurden dem entsprechend angepasst und erfolgreich getestet.

Konzept und Aufbau des Antriebssystems

Bei der Lösungsfindung für die Antriebssysteme für die Funktionen der chirurgischen Werkzeuge war jeweils die gesamte Wirkkette zu betrachten. Diese umfasste insbesondere die folgenden Aspekte:

- Ansteuerung und Regelung der Servomotoren,
- Einbeziehung geeigneter Sensorik für Kraft und Position sowie zur Überwachung,
- Umsetzung hybrider Regelungskonzepte (Kraft und Position) auf der Basis der Sensorik,

© AMS GmbH

- Evaluierung geeigneter mechanischer Komponenten, wie Getriebe, Lager, Kugelgewindetriebe etc. vor allem mit dem Ziel eines leichtgängigen und sensiblen Bewegungsverhaltens als Voraussetzung für ein gut konditionierte Regelungsverfahren.
- Ausreichende mechanische Robustheit und gute Gebrauchstauglichkeit den Einsatzbereich.

Wie in den Erläuterungen zum AP 3.3 weiter unten dargestellt, führten jeweils neue Erkenntnisse zu Verbesserungen, die dann in der jeweils nachfolgenden Version berücksichtigt wurden.

Die Thematik ist sehr spezifisch und kann deshalb im Kontext dieses Dokumentes nicht detaillierter ausgeführt werden.

Evaluierung zusätzlicher Sensoren

Der Fokus bezüglich der Sensorik lag zunächst beim haptischen Feedback und bei sensitiven Greifoperationen sowie bei den internen Statusüberwachungen der Antriebskomponenten inklusive der Referenzier- und Homingfunktionen. Diese waren für die vorgesehenen Zielfunktionalität unbedingt erforderlich.

Beim Einsatz des mechatronischen Interfaces in automatisierten Umgebungen können weitere Informationen von Interesse sein, beispielsweise Informationen über die Bewegung und die Lage im Raum.

Zu diesem Zweck wurden einige Untersuchungen über die Möglichkeiten von Trägheitssensoren durchgeführt. Mittlerweile sind sehr leistungsfähige Sensoren verfügbar, meistens unter der Bezeichnung IMU (= Inertial Measurement Unit). Sie werden beispielsweise in Smartphones, vor allem aber in (Consumer-)Drohnen eingesetzt und sind deshalb preiswert am Markt verfügbar.

Es wurde 2 Versionen von IMUs an die Steuerung und Datenerfassung des mechatronischen Interfaces angebunden. Diese enthielten neben dem Accelerometer und dem Gyroskop auch noch ein Magnetometer sowie einige hardwarenah implementierte Algorithmen zur Unterstützung der Weiterverarbeitung der Daten.

Im Rahmen des Koala-Projektes wurden lediglich grundlegende Evaluierungen und Auswertungen vorgenommen. Die Ergebnisse waren aber insgesamt vielversprechend. Insbesondere schienen die Daten des Accelerometers und des Gyroskops sehr zuverlässig zu sein, während die Daten des Magnetometers erwartungsgemäß etwas empfindlicher auf externe Störquellen reagierten.

Bei zukünftigen Weiterentwicklungen ergeben sich hier interessante Perspektiven für wichtige Funktionalitäten, beispielsweise das Monitoring und die Analyse der Bewegungsdaten, das Erkennen von Schwingverhalten oder anderen subtilen Fehlerzuständen oder die Verbesserung der Regelung durch Feed-forward Kompensation auf Basis der Beschleunigungsdaten.

© AMS GmbH

AP 3.3 Umsetzung von Konzeptevaluierungsmustern (Mechanik)

Aufbauend auf den Resultaten des AP 3.2 wurden insgesamt 5 technische Versionsstände von Mechaniken für das mechatronische Interface aufgebaut – einschließlich dem Laboraufbau für die ersten Evaluierungen.

Dabei wurde zum einen angestrebt, Versuchsträger aufzubauen, die die Validierung der Konzeptionen, Berechnungen und Simulationsergebnisse von Teilfunktionalitäten ermöglichten. Zum anderen gab es die Notwendigkeit, dass diese Versuchsträger bereits einen umfangreichen – wenn auch noch nicht optimierten – Funktionsumfang aufweisen, damit die Projektpartner ihrerseits Geräte für ihre experimentellen Untersuchungen verfügbar hatten.

Eine weitere Einflussgröße war die Bauteilebeschaffungsproblematik, die zum Teil technische Zwischenstände auf der Basis verfügbarer Komponenten notwendig machte. Darüber hinaus mussten aufgrund der Beschaffungsproblematik die Entwicklung und Evaluierung von Kernfunktionalitäten auf eigenständige Versuchsträger ausgelagert werden. So wurde beispielsweise ein separates 1-Achs-Linearsystem nur zur Evaluierung von hybriden kraft- und positionsgeregelten Motion-Control Funktionalitäten aufgebaut, weil geeignete Motoren in den für das mechatronische Interface erforderlichen Ausführungen Lieferzeiten von mehr als einem halben Jahr aufwiesen.

Die nachfolgende folgende Aufstellung soll einen groben Überblick über die einzelnen Varianten geben. Allerdings sind wichtige Merkmale der jeweiligen Weiterentwicklung eher in technischen Details verborgen und sind in diesem Kontext nur bedingt dokumentierbar. Darüber hinaus gab es korrespondierend sehr umfangreiche Weiterentwicklungen in den SW-Funktionalitäten innerhalb der Steuerung.

In der Tabelle sind deshalb hauptsächlich einige grundsätzlichen Merkmale aufgeführt.

Von den aufgeführten Versionen ist jeweils 1 Exemplar, von der „aktuellsten“ V3.6 sind 2 Exemplare aufgebaut worden.

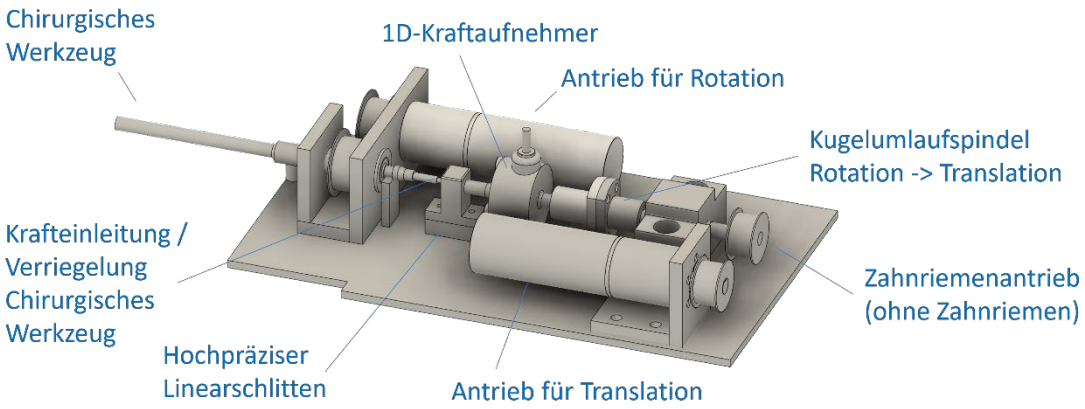


Abbildung 4: Antriebskomponenten des mechatronischen Interfaces

© AMS GmbH

	V1 (Laboraufbau)	V2	V3	V3.5	V3.6
Grundgehäuse	Grundplatte	Grundplatte	Gehäuse versteift	Gehäuse versteift mit abnehmbarem Deckel	Gehäuse versteift mit abnehmbarem Deckel
Komponentenanordnung	Einzeln auf Grundplatte	Einzeln auf Grundplatte	Einzeln auf Grundplatte	Baugruppen auf Modulträger	Baugruppen auf Modulträger
Werkzeugwechsel	– (fest eingebaut)	Eingeschränkt (Verschraubungen)	Eingeschränkt (Verschraubungen)	Motorisch (abgesichert)	Motorisch (abgesichert + Sichtfenster)
Antrieb (interne Kommunikation)	CAN proprietär	CAN proprietär	CANopen	CANopen	CANopen
Antriebsüberwachung	–	–	–	Sensorisch	Sensorisch (optimiert)
Getriebe 1	25:1	25:1	44:1	44:1	20:1
Getriebe 2	Zahnräder	Zahnräder (optimiert)	Zahnriemen	Zahnriemen	Zahnriemen (optimiert)
Spindel	Messingspindel M5 x 0.8mm	Messingspindel M5 x 0.8mm	Kugelgewindetrieb 6mm x 1mm	Kugelgewindetrieb 6mm x 1mm	Kugelgewindetrieb 6mm x 2mm (optimiert)
1D-Sensor	–	100N	100N	100N	200N
6D-KMS Integration	Roboterflansch	Roboterflansch	Roboterflansch	Werkzeugaufnahme	Werkzeugaufnahme
Steuerung / Datenerfassung	Manuelle Verstellung	Adaptierter CAN-EtherCAT Konverter	Evaluierungsboards	MIC-Platine im Gehäuse	MIC-Platine im Gehäuse
Gateway/ HMI	–	TCP-IP	TCP-IP	HMI und TCP-IP	HMI und TCP-IP

Tabelle 1: Überblick über die realisierten MI-Versionen

Das Grundkonzept des Aufbaus und der Antriebs- und Messsysteme ist bereits in der V2 umgesetzt worden und wurde aus den Evaluierungen und den Erfahrungen beim Einsatz der Projektpartner stetig verbessert und um zusätzliche Funktionalitäten erweitert. Es ist in Abbildung 4 weiter oben dargestellt (allerdings anhand einer CAD-Darstellung der V3, die für diesen Zweck anschaulicher ist).

Wesentliche Fortschritte bei der V3 wurden aufgrund spezialisierter und angepasster Detailkomponenten – Motoren, Getriebeelemente, Linearführungen, Spindelantriebe, … – erzielt, die ein sehr gutes Laufverhalten mit sich brachten, was eine Voraussetzung für gute Eigenschaften der Antriebsregelungsverfahren der Steuerungskomponenten darstellt.

Bei der V3.5 (Abbildungen 5 und 6) wurde neben einer Vielzahl von Detailverbesserungen ein Servo-basiertes Wechselsystem mit Verriegelung für die chirurgischen Werkzeuge umgesetzt,

© AMS GmbH

das den Wechsel von Werkzeugen gegenüber der Vorgängerversion deutlich vereinfacht (Linearantrieb für Wechselsystem in Abbildung 9 weiter unten dargestellt).

Dazu war auch eine Neukonzeption der Kalibrier- und Referenzierverfahren für die Antriebs- und Kraftmesssysteme erforderlich, die über zusätzliche Sensoren ein weitgehend automatisch überwachtes Referenzieren der Antriebe durchführen.

Gegenüber der Vorgängervariante wurde die Integration und Anordnung des 6D-Kraft-Drehmoment-Sensors neu gestaltet. Dabei konnte die in der Evaluierungs- und Konzeptphase favorisierte Lösung grundsätzlich umgesetzt werden. Die 6D-KMS-Messelemente wurden so angeordnet, dass eine direkte Einleitung der Kraftflüsse aus der Interaktion des chirurgischen Werkzeuges in die Sensormesselemente erfolgt.

Praktisch konnte dies dadurch erreicht werden, dass ein Serienmesskörper mit einem freien Durchgangsloch – durch das das chirurgische Werkzeug geführt wird – quasi invers montiert wird. Damit verbindet diese Lösung die wichtige Zielsetzung einer kinematisch und dynamisch gut konditionierten Krafteinleitung und der daraus resultierenden Messgenauigkeit mit dem Kostenvorteil einer Serienkomponente.

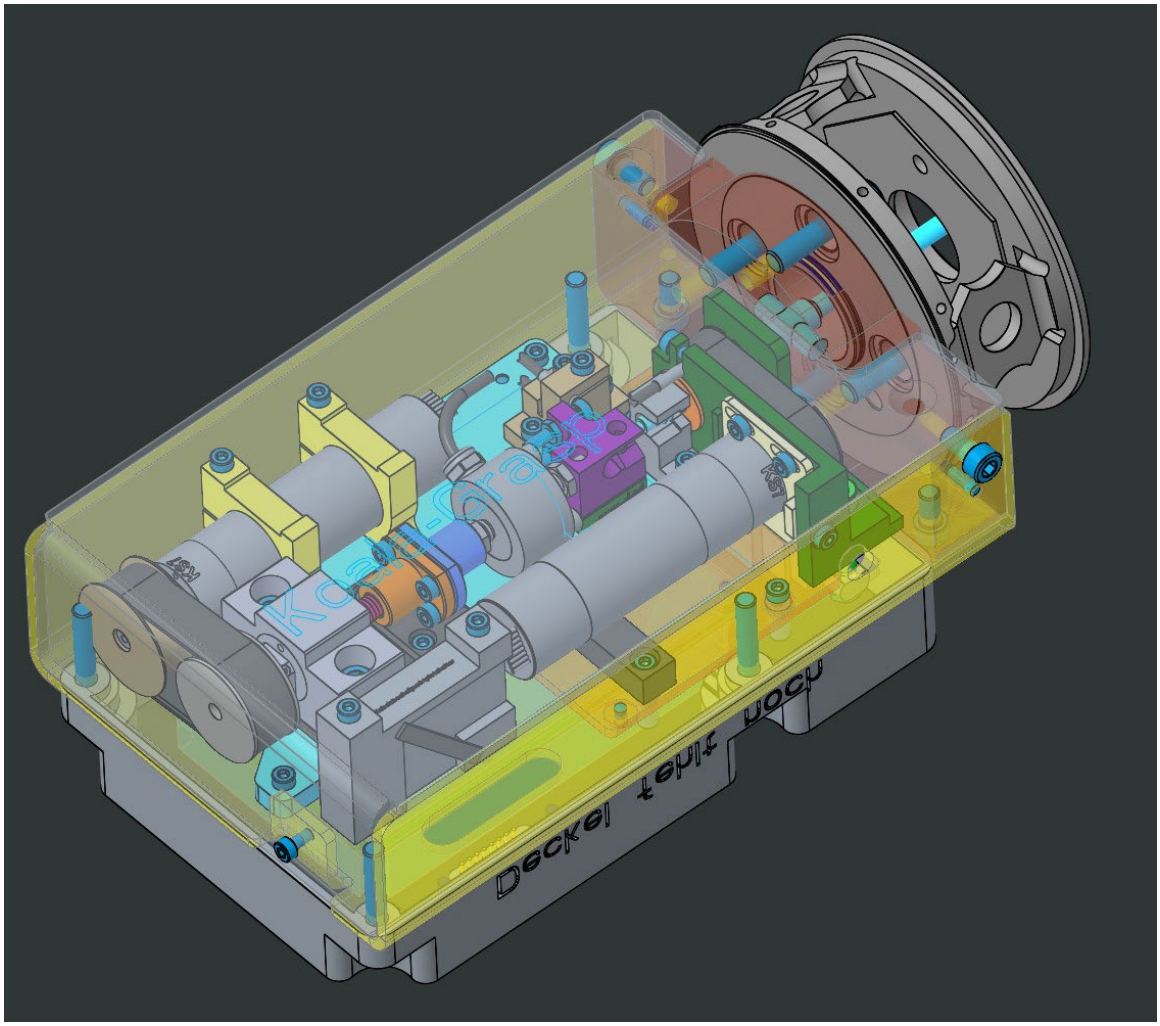


Abbildung 5: 3D-CAD-Ansicht der Version 3.5 des mechatronischen Interfaces

© AMS GmbH

Allerdings wird bei dieser Lösung auf die Verwendung von orthogonal angeordneten Messringen (8 Messringe / 90°) zugunsten der einfacheren Variante (6 Messringe / 120°) verzichtet. Es gibt aktuell keinen geeigneten 6D-KMS-Sensor am Markt, der orthogonal angeordnete Messringe (8 Messringe / 90°) aufweist. Die individuelle Fertigung eines solchen Sensors schien angesichts der nur noch geringen Verbesserungen nicht mehr sinnvoll. Zum einen wegen der sehr hohen individuellen Fertigungskosten eines Einzelstückes. Zum anderen, weil der inhaltliche Schwerpunkt innerhalb des Forschungsprojektes nach unserer Einschätzung zu sehr in einen Bereich verschoben worden wäre, der schon eher in Richtung einer Produktentwicklung, bzw. Produktoptimierung ginge.

Da alle relevanten Ergebnisse aus den Simulationen und FEM-Analysen vorliegen, ebenso die Untersuchungen und Algorithmen für die Berechnung der Entkopplungsparameter eines orthogonalen (8 Messringe / 90°) Sensors, könnte im Falle einer nachgelagerten Produktentwicklung vergleichsweise einfach auf diesen Ansatz gewechselt werden.

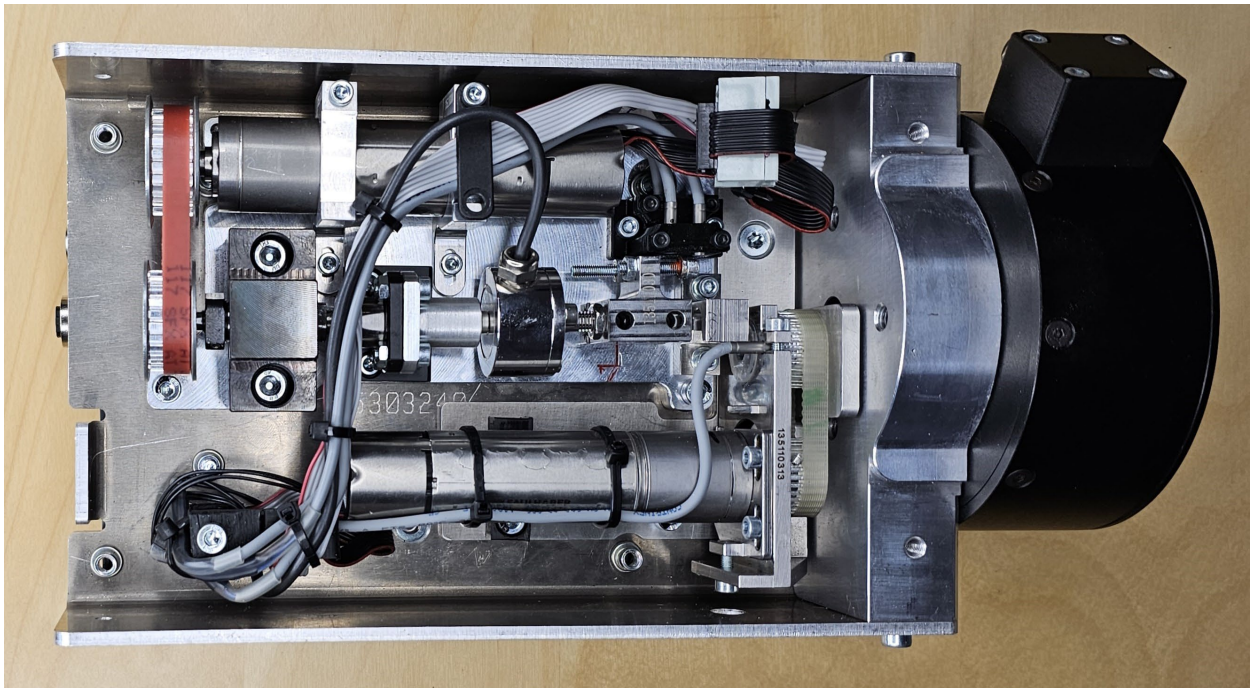


Abbildung 6: Version 3.5 des mechatronischen Interfaces (Mechanik des Antriebs- und Sensorsystems)

Die zum Ende des Projektzeitraums fertiggestellte Version 3.6 (Abbildung 7) weist viele Detailverbesserungen auf, die aus den Erfahrungen in der Zusammenarbeit mit den Projektpartnern herausgearbeitet wurden. Vor allem konnte durch Änderungen bei der Auslegung einiger mechanischer Komponenten das Verhalten insbesondere der Kraftregelung deutlich verbessert werden.

Beim Wechsel von V3.5 auf V3.6 konnte ein Großteil der Komponenten direkt wiederverwendet werden. Diese Vorgehensweise wurde – soweit technisch akzeptabel – auch bei den Vorgängerversionen angewendet.

© AMS GmbH

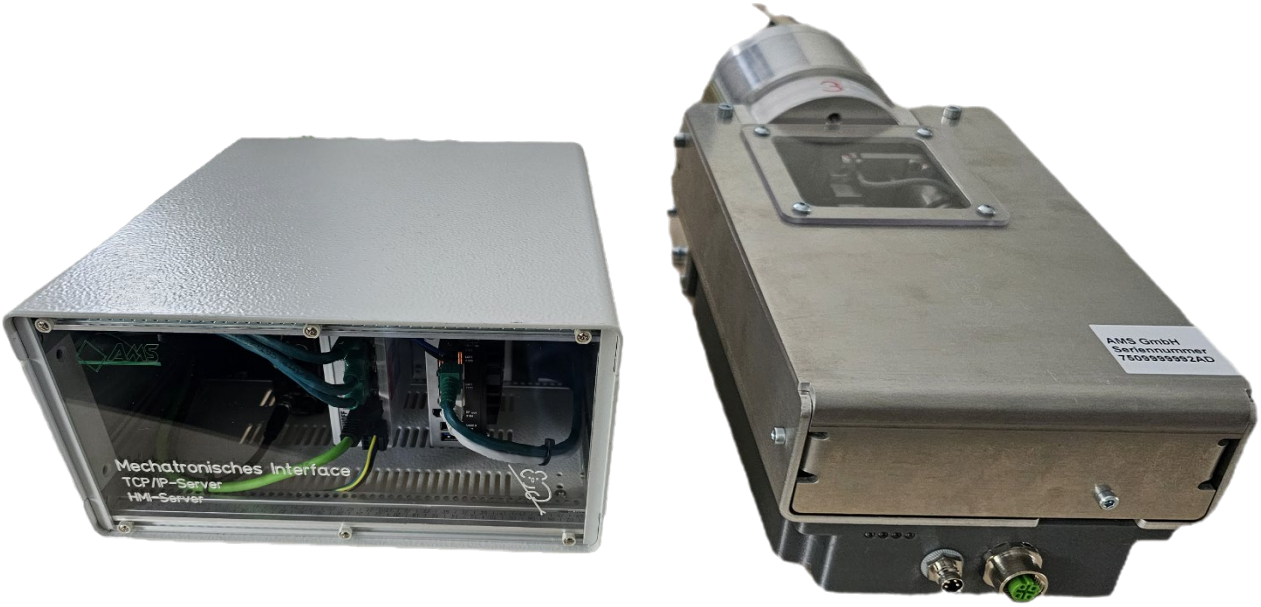


Abbildung 7: Gateway-Rechner / HMI und Version 3.6 des mechatronischen Interfaces

AP 3.4 Steuerungs- und Schnittstellenkonzept

Begleitend zu den Verbesserungen der Konzepte und der Funktionalitäten des mechatronischen Interfaces wurden auch die steuerungstechnischen Anforderungen angepasst und entsprechende Lösungen umgesetzt.

Es wurde ein Lösungskonzept für die Steuerung, Datenerfassung und Kommunikation des mechatronischen Interfaces gemäß Abbildung 8 fixiert. Für die Steuerung der Antriebe und die Datenerfassung des 6D-KMS werden 2 Module eingesetzt, basierend auf Microcontrollern aus der SAM E54 Familie von Microchip (32-bit ARM® Cortex® Architektur mit FPU), die jeweils mit spezifischer Peripherie ausgestattet sind. Die Softwareentwicklung erfolgt in C. Für die Echtzeitkommunikation wird ein EtherCAT-Netzwerk verwendet.

Wie in den Erläuterungen zum AP 2.2 weiter oben bereits erwähnt, wurde zur Anpassung an die unterschiedlichen Systemumgebungen der Projektpartner eine Gateway-Lösung erforderlich. Hierzu wird ein PLC-basierter Gatewayrechner verwendet, auf dem ein TCP-Server implementiert wurde, über den die Anbindung an die übergeordneten Plattformen mittels standardisierter TCP-Sockets erfolgt. Durch die Verfügbarkeit der Socket-Mechanismen auf vielen Plattformen ist eine schnelle Anpassung an wechselnde Systemumgebungen während der experimentellen Arbeiten problemlos möglich.

Darüber hinaus wird der Gateway-Rechner für die Aufzeichnung der Echtzeitdaten bei den Evaluierungen und Tests verwendet.

Bei Einsatzbereichen mit hohen Echtzeitanforderungen sollte die direkte Kommunikationsschnittstelle auf Basis EtherCAT verwendet werden.

Bei der Umsetzung und kontinuierlichen Erweiterung und Verbesserung der Steuerungs- und Datenerfassungsfunktionalitäten für das mechatronische Interface wurden auch die damit

© AMS GmbH

korrespondierenden Spezifikationen der Schnittstellen der Systemmodule jeweils erweitert und angepasst.

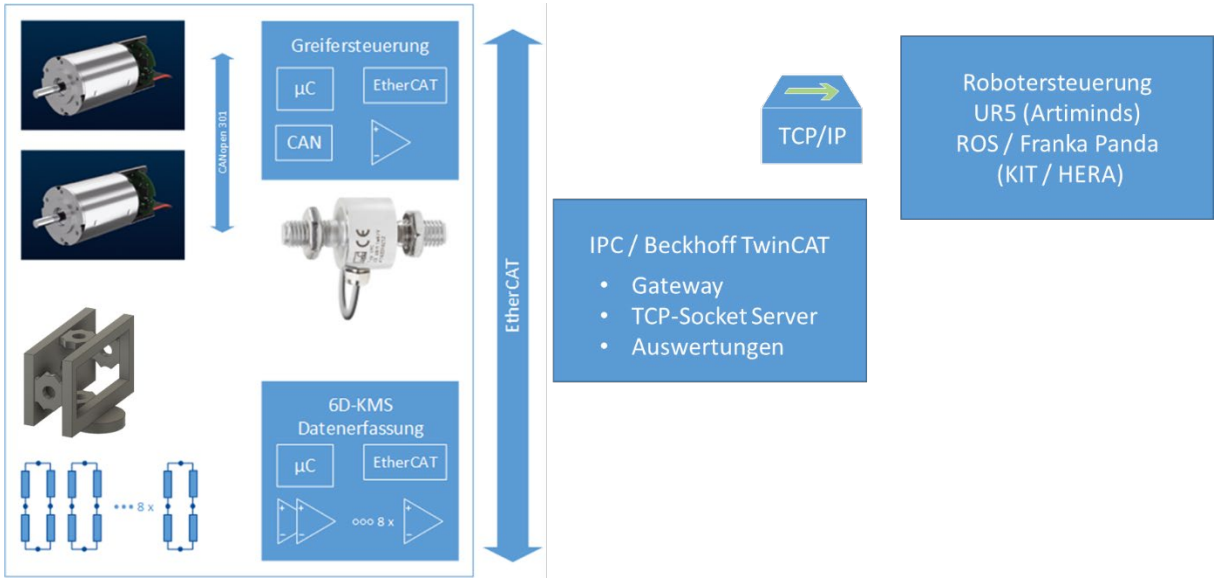


Abbildung 8: Steuerungs- und Schnittstellenkonzept

AP 3.5 Steuerungs- und Datenerfassungssystem für die Konzeptevaluierungsmuster

Hardware

Hardware-seitig wurden zwei Vorablösungen der Steuerungs- und Datenerfassungssysteme realisiert. In der 1. Umsetzungsstufe wurde eine bei AMS – für einen anderen Anwendungsbereich – vorhandene Hardwareplattform zur Ansteuerung der Servoantriebe mit zunächst „einfachem“ Funktionsumfang verwendet. Auch wenn auf dieser Plattform noch zusätzliche Softwarefunktionen zu implementieren waren, so stand doch frühzeitig eine schnelle Lösung für die Durchführung der OP-Experimente und Anforderungsuntersuchungen zur Verfügung. Allerdings handelte es sich nur um einen Zwischenschritt, da die Hardwareplattform für die Implementierung der im weiteren Verlauf des Projektes erforderlichen anspruchsvollen Funktionsumfängen nicht geeignet war.

Für die Bereitstellung der geplanten – wesentlich leistungsfähigeren – Funktionsumfänge wurde eine aufwärtskompatible Hardwareplattform ausgewählt.

Um eine schnelle Verfügbarkeit zu ermöglichen, wurden in der 2. Umsetzungsstufe für die Entwicklungsumgebung marktverfügbare Evaluierungsboards der jeweiligen Hersteller der verwendeten Hardwaremodule verwendet. Diese wurden in einem kompakten Baugruppenträger integriert, um einen Einsatz in der OP-Laborumgebung zu ermöglichen.

Nachdem alle Steuerungs- und Messfunktionalitäten auf der Basis dieser Evaluierungssystemen entwickelt, getestet und validiert worden sind, wurde ein eigenes PCB-Design für die MIC-Platine (MIC = Mechatronic Interface Controller) für den direkten Einbau im mechatronischen Interface umgesetzt (3. Umsetzungsstufe).

© AMS GmbH

Die MIC-Platine besitzt die folgenden Funktionalitäten:

- Ansteuerung der Servocontroller über CANopen zur Positionierung der beiden Antriebe mit unterschiedlichem Bewegungsverhalten;
- Spezifische Funktionen für die OP-Instrumente (Kraftbegrenzung, Kraftüberwachung, Kraftregelung, „feinfühliges“ Schließen);
- Kalibrier-, Referenzier- und Homing-Funktionen für das Basis-Antriebssystem und die individuellen laparoskopischen Werkzeuge unter Verwendung von Referenzschaltern;
- Kommunikation mit der Hoststeuerung über EtherCAT.

Die Steuerung ist auf der Rückseite des mechatronischen Interfaces in einem kompakten Gehäuse platziert (Abbildung 9).

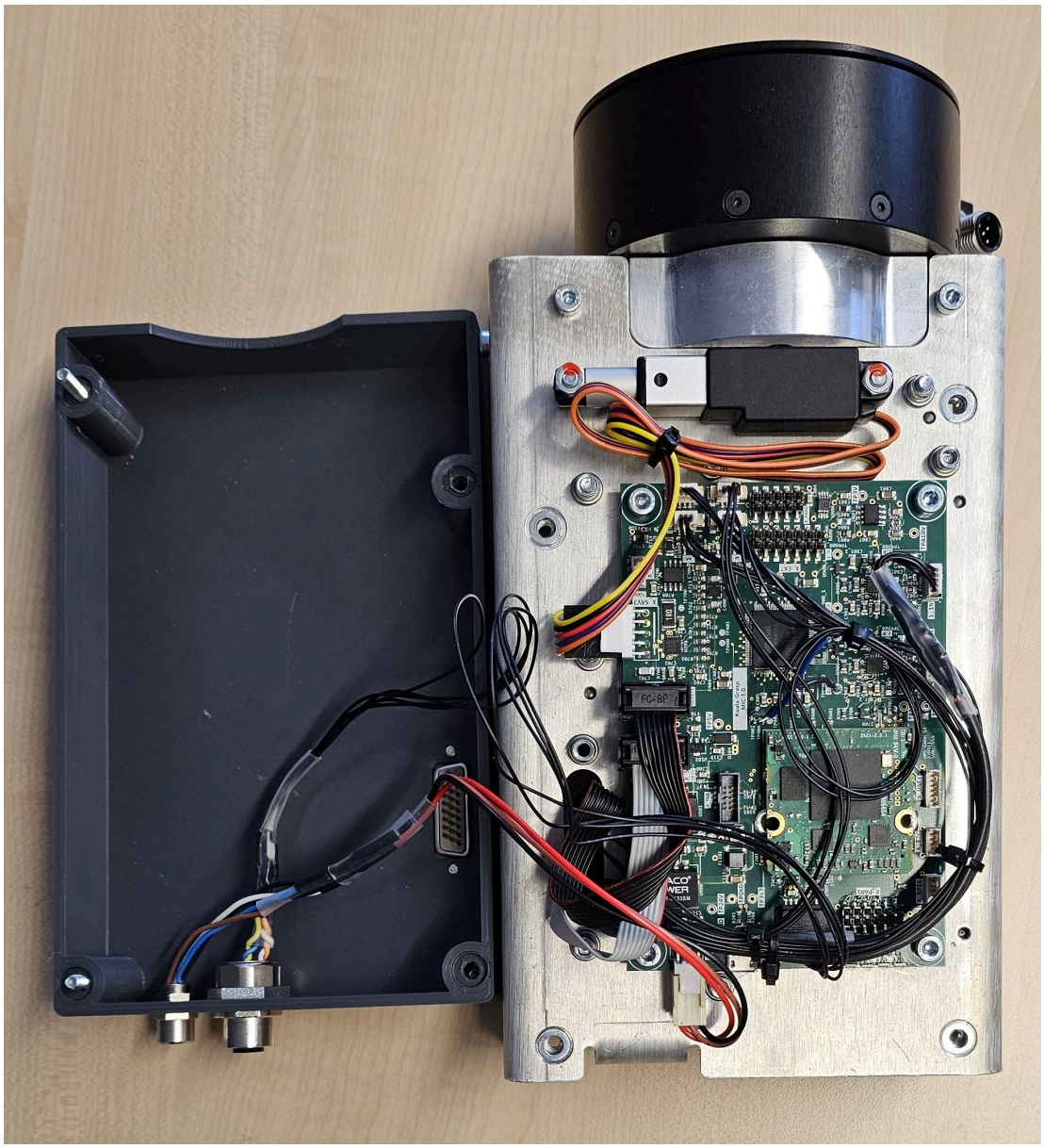


Abbildung 9: Steuerungsplatine des Mechatronischen Interfaces sowie Servoantrieb für Werkzeugwechsel (oberhalb der Steuerplatine)

© AMS GmbH

Software

Eine besondere Herausforderung lag dabei in der Koordination von zwei unterschiedlichen Echtzeitebenen, zum einen der Ansteuerung der Motion-Controller als Basisfunktionen und zum anderen der Ausführung von übergeordneten komplexeren Bewegungsfunktionen entsprechend dem Einsatzbereich des mechatronischen Interfaces. Hierzu wurde unter anderem ein spezielles Koordinationsmodul entwickelt.

Für die Umsetzung der 6D-Messfunktionen konnte auf viele Softwarefunktionen eines bei AMS bereits verfügbaren Frameworks zurückgegriffen werden. Für die Anforderungen des Projektes wurden unter anderem spezielle Filteralgorithmen evaluiert sowie Anpassungen, insbesondere im Hinblick auf die Verwendung von 8 statt 6 Messbrücken, vorgenommen.

Ein umfangreicher Arbeitspunkt war die Evaluierung und Umsetzung von speziellen Kalibriermethoden, die aus dem orthogonalen Aufbau mit 8 Messbrücken resultierten.

Begleitend zum Hardwaredesign der MIC-Platine wurden Optimierungs- und Konsolidierungsarbeiten an den Softwarefunktionalitäten durchgeführt.

Bedienfunktionen auf dem PLC-basierten Gatewayrechner

Auf dem PLC-Teil des Gateway-Rechners zur TCP-Kommunikation wurde zusätzlich ein HMI-Server (Human Machine Interface) installiert. Es wurde eine Benutzeroberfläche für Operierende und Experimentierende erstellt, mit der sich bis zu zwei Interfaces bedienen lassen. So konnten schnelle Versuche ohne aktive TCP-Befehlsgabe der anderen Projektpartner durchgeführt werden. Außerdem ließen sich hier Diagnose und Notbedienmöglichkeiten schnell bereitstellen.

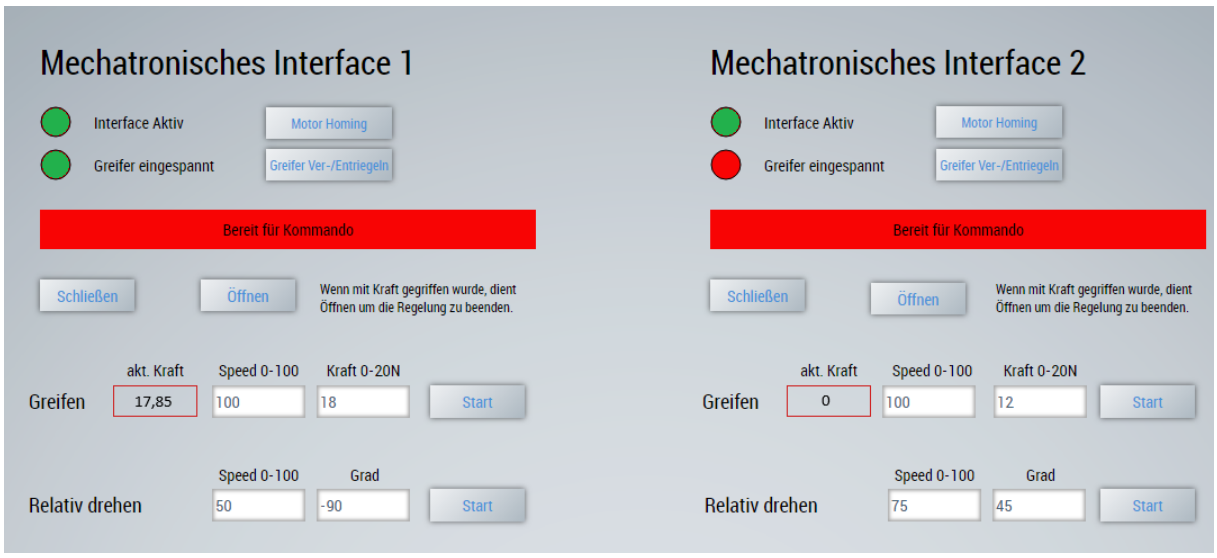


Abbildung 10: Zusätzliche Bedienoberfläche

© AMS GmbH

AP 3.6 Konzeptevaluierung

Mit den aufgebauten Evaluierungsmustern wurden umfangreiche Versuche und Tests im AMS-Labor durchgeführt, aus deren Auswertung die Maßnahmen zur Fehlerbehebung und funktionalen Optimierungen abgeleitet wurden.

In diesem Kontext wurden auch einige nicht erwartete negative Auffälligkeiten – vor allem bei der Auswertung der 6D-KMS-Daten und bei den Kommunikationsprotokollen – evaluiert und durch optimierte Datenverarbeitungsverfahren behoben.

Insgesamt sind die Ergebnisse sehr zufriedenstellend, sowohl bezüglich der Funktionalität und der Gebrauchstauglichkeit für den vorgesehenen Anwendungsbereich als auch im Hinblick auf die Auswertung der diversen quantitativen Messungen.

Teilprojekt 4: Automation der Greif- und Halteausführung (HERA/FAU)

AP 4.1 Implementierung und Aufbau der Experimentalumgebung

In Abstimmung mit den Projektpartnern wurden die technischen Voraussetzungen für die jeweiligen Experimental-OPs in Karlsruhe, Heidelberg und Dresden geschaffen. Dies umfasste die Bereitstellung von Labor- und Systemaufbauten sowie Adaptionen für die jeweils eingesetzten Robotersysteme, ebenso wie die Erweiterung der Bedienoberflächen um zusätzliche Komfortfunktionen und Notbedienmöglichkeiten sowie alle erforderlichen Inbetriebnahme- und Supporttätigkeiten – vor Ort oder auch über spezielle bereitgestellte Remote-Zugänge.

AP 4.2 Teleoperation Gallenblasenentfernung

AP 4.4 Automatisierung Haltefunktion

AP 4.5 Automatisierung der Greifausführung

AP 5.1 Planung von vorgegebenen Bewegungen durch Anwender

AP 5.2 Bahnplanungslösung für die Manipulation biegeschlaffer Objekte

AP 5.3 Bahnplanungslösung für das Greifen biegeschlaffer Objekte

Die Arbeiten der Projektpartner wurden unterstützt, wenn dies erforderlich war – wie in den Erläuterungen zum AP 4.1 dargestellt.

AP 6.1 Technische Verifikation und Validation

AP 6.2 Medizinische Versuche am Leber-Phantom/Modell

AP 6.3 Medizinische Versuche an Ex-Vivo Schweinelebern

AP 6.4 Medizinische Versuche im Tier

AMS hat die umfangreichen Versuchsreihen bei den Projektpartnern in Karlsruhe, Heidelberg und Dresden (Abbildung 11) sowohl bezüglich der Vorbereitung als auch während der Durchführung mit mehreren Projektmitarbeitern intensiv unterstützt.

Die Versuche und deren Vorbereitung waren extrem wertvoll, um umfangreiche Erfahrungen und Daten für die Bewertung der technischen Systeme zu gewinnen. Hier wurden wichtige

© AMS GmbH

Erkenntnisse über die Gebrauchstauglichkeit (Usability) während der mit Unterstützung von Chirurgen durchgeführten OPs gewonnen. Diese ergänzen die im Kontext des AP 3.6 gewonnenen Erkenntnisse aus den im eigenen Labor durchgeführten Evaluierungen.

Auch die Rückkopplung von den Projektpartnern über die Gebrauchstauglichkeit der mechatronischen Interfaces im praktischen Einsatz war sehr positiv.

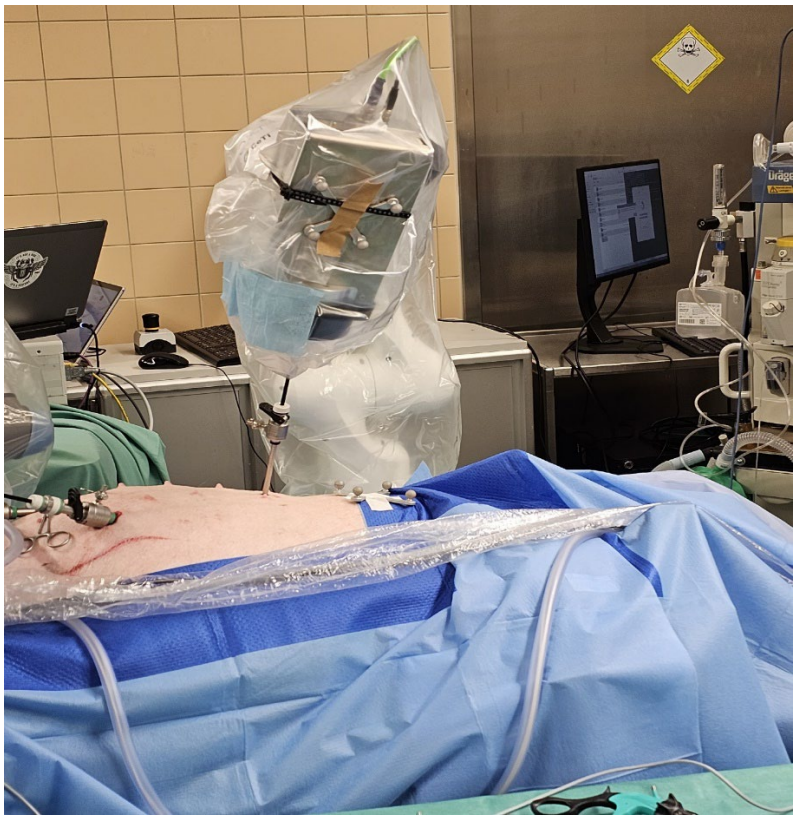


Abbildung 11: Experimental-OPs am Schwein beim Projektpartner Uni Dresden

Veröffentlichungen

Seitens AMS gab es bis zum Projektabschluss noch keine eigenen Veröffentlichungen. Allerdings ist noch eine Publikation mit anderen Projektpartnern vorgesehen, bei der die technisch-wissenschaftlichen Inhalte des mechatronischen Interfaces detaillierter präsentiert werden.

Von den Projektpartnern gab es die folgenden Veröffentlichungen, bei denen auch das mechatronische Interface vorgestellt wurde.

Alt, B., Kunz, C., Katic, D., Younis, R., Jäkel, R., Müller-Stich, B. P., ... & Mathis-Ullrich, F. (2022, October). LapSeg3D: Weakly Supervised Semantic Segmentation of Point Clouds Representing Laparoscopic Scenes. In 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 5265-5270). IEEE.

https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9981178

© AMS GmbH

Kunz, C., Maierhofer, P., Gyenes, B., Franke, N., Younis, R., Müller-Stich, B. P., ... & Mathis-Ullrich, F. (2022). Augmented Reality-based Robot Control for Laparoscopic Surgery. Current Directions in Biomedical Engineering, 8(1), 54-57.

https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/cdbme-2022-0014/html

Schüßler, Alexander, et al. "Interactive Surgical Liver Phantom for Cholecystectomy Training." Current Directions in Biomedical Engineering. Vol. 10. No. 2. De Gruyter, 2024.

https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/cdbme-2024-1076/html

Kunz, C., Kraus, M., Younis, R., Wagner, M., & Mathis-Ullrich, F. (2024, September). Statistical Shape Models for Grasp Point Determination in Laparoscopic Surgeries. In Current Directions in Biomedical Engineering (Vol. 10, No. 1, pp. 41-44). De Gruyter.

https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/cdbme-2024-0111/html

Younis, R., Yamlahi, A., Bodenstedt, S., Scheikl, P. M., Kisilenko, A., Daum, M., ... & Wagner, M. (2024). A surgical activity model of laparoscopic cholecystectomy for co-operation with collaborative robots. Surgical Endoscopy, 1-13.

https://link.springer.com/article/10.1007/s00464-024-10958-w

© AMS GmbH