Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

DATIpilot

DATIpilot Modul 1 Innovationssprints

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Kurzbericht und Eingehende Darstellung öffentlich

Digitaler Zwilling zur Unterstützung bei der optimalen Schlaganfallbehandlung

StrokeGuard

Institution	Name Projektleitung	Förderkennzeichen
Fraunhofer IPA	Christoph Eyberg	03DPS1216

LAUFZEIT: 01.08.2024 – 31.01.2026

Mannheim, den 25.06.2026

Autorenschaft: Christoph Eyberg*, Johannes Horsch

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhalt

1 Kurzbericht 2
1.1 Ausgangslage des Vorhabens 2
1.1.1. Ursprüngliche Aufgabenstellung 2
1.1.2. Ursprüngliche wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele 2
1.1.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 2
1.2 Ablauf des Vorhabens 3
1.3 Ergebnisse des Vorhabens 3
1.3.1. Wesentliche Ergebnisse 3
1.3.2. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 3
2 Eingehende Darstellung 4
2.1 Durchgeführter Arbeitsplan 4
2.2 Erreichte Meilensteine 7
2.3 Erreichte Ergebnisse 7
2.3.1 Erreichung der Gesamtziele 7
2.3.2 Erreichung der wissenschaftlichen und/oder technischen Arbeitsziele 8
2.4 Verwertung 8
2.4.1 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses 8
2.4.2 Fortschritt Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens 9
2.4.3 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse 9
2.4.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit 9

1 Kurzbericht

.

1.1 Ausgangslage des Vorhabens

1.1.1. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Gesamtziel des Innovationssprints	Ziel von StrokeGuard ist die Verbesserung der minimalinvasiven Therapie akuter Schlaganfällen, indem Mediziner erstmals durch ein intelligentes Assistenzsystem bei der Operation unterstützt werden. StrokeGuard ist ein digitaler Zwilling der Instrumente im Patienten, der sich dank Verarbeitung von bereits im OP verfügbaren multimodalen Datenquellen einfach in bestehende Prozesse integrieren lässt und durch zielgerichtete Hinweise dabei hilft, Schlaganfälle effizienter und sicherer zu behandeln.

1.1.2. Ursprüngliche wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele

Geplante konkrete Arbeitsziele
Bewertung der verschiedenen Ansätze zur verformungsbasierten Kontaktkraftbestimmung (vgl. 2.1)
Konzept und Programmcode für Fusionierung des dreidimensionalen Gefäßverlaufs und der Instrumentenverformung auf dem zweidimensionalen Fluoroskopiebild zur Bestimmung der angreifenden Kräfte
Konzept und Programmcode zur dynamischen Entwicklung der Kontaktkräfte bei Bewegung der Instrumente
Übersicht notwendiger nächster Schritte für Transfer der Technologie in die Anwendung

1.1.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Ziel von StrokeGuard ist es, einen digitalen Zwilling für Katheter zu entwickeln, während sich diese bei endovaskulären Eingriffen im Körper der Patienten befinden. Dieser digitale Zwilling ist ein Abbild der Mechanik des Katheters, über welches das Verhalten des Katheters ermittelt und seine Einwirkungen auf die menschlichen Gefäße bestimmt werden können. Dadurch können perspektivisch Hinweise und Empfehlungen für die Mediziner abgeleitet werden, die die Eingriffe schneller und sicherer machen. Dieses Abbild soll über die Kontaktkräfte, die zwischen Katheter und Gefäßwände wirken, modelliert werden. Um diese zu ermitteln, soll allerdings ausschließlich im OP vorhandene Sensorik – primär das Fluoroskopiebild während des Eingriffs – genutzt werden, wodurch die Integrationsfähigkeit in die bestehenden Prozesse zu gewährleistet wird. Für die Extraktion der Verformung der Katheter aus dem Fluoroskopiebild gibt es verschiedene Ansätze: Klassische Verfahren, bei denen die Katheter mit numerischen Verfahren in den Bildern ermittelt werden [Ma 2013] und Verfahren, bei denen dies durch Methoden künstlicher Intelligenz erfolgt [Wagner 2019]. Die Methoden sind dabei weit fortgeschritten, sodass die Bestimmung der Lage und Verformung der Katheter im Rahmen von StrokeGuard als gelöstes Problem betrachtet wird. Es gibt auch Arbeiten, die präoperativ erhobene Gefäßgeometriedaten für die Sensorfusion nutzen, um so die dreidimensionale Lage der Katheter zu bestimmen [Bertsche 2022]. Anders als in StrokeGuard werden bei diesen Verfahren allerdings die mechanische Plausibilität vernachlässigt und die induzierten Kontaktkräfte nicht bestimmt. Um die angreifenden Kräfte bestimmen zu können ist ein Abgleich der Verformung mit einem mechanischen Modell notwendig. Die Modellierung von Kontinuumsrobotern und Kathetern ist dabei Gegenstand aktiver Forschung und es gibt verschiedene Ansätze wie beispielsweise die Modellierung über Finite Elemente. Die Modellierung als Cosserat Balken ist dabei besonders geeignet, da sie recheneffizient und gleichzeitig geometrisch exakt ist [Hooshiar 2020]. Es gibt allerdings auch unterschiedliche Ansätze, um die angreifenden Kräfte aus dem Modell zu bestimmen: Diese lassen sich unterteilen in analytische Ansätze bei denen direkte mechanische Zusammenhänge genutzt werden, um die Kräfte direkt aus der Verformung zu bestimmen [Hooshiar 2018] und iterative Ansätze, in denen Initialschätzungen der Kräfte optimiert werden, bis die gemessene Verformung erreicht wird [Aloi 2022]. Erstere sind dabei anfälliger für Messrauschen während letztere rechenintensiver sind und auf hinreichende Konvexität der mathematischen Problembeschreibung angewiesen sind. Die iterativen Verfahren gehen dabei bislang ausschließlich von statisch vorliegenden Kathetern oder Kontinuumsrobotern aus. Die in StrokeGuard vorgesehene

zusätzliche dynamische Modellierung der Kräfte stellt somit einen klaren weiteren Schritt Richtung Anwendungsfähigkeit dar. Außerdem lassen sich die Forschungsarbeiten unterscheiden in Arbeiten, bei denen die Kräfte direkt aus der Verformung bestimmt werden [Aloi 2022] und Arbeiten, bei denen die Krümmung als Ausgangsparameter genutzt wird [Qiao 2021]. Letztere Verfahren bedienen sich i.d.R. Messungen von in den Katheter integrierter Sensorik, während die Bestimmung der Verkrümmung aus dem Fluoroskopiebild nur indirekt umgesetzt werden kann [Xiao 2023]. StrokeGuard baut auf den aufgeführten Ansätzen zur Kontaktkraftbestimmung auf und erweitert diese in zwei wesentlichen Punkten: Der Bestimmung von Kräften, deren Verformung nicht in der Bildebene ersichtlich ist, durch Sensorfusion mit präoperativer 3D-Bildgebung der Gefäße und durch dynamische Modellierung, durch die in einem Zeitschritt ermittelten Kontaktkräfte zur genaueren Bestimmung der Kräfte im nächsten Zeitschritt genutzt werden können.

1.2 Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsvorhaben konnte im Wesentlichen erfolgreich durchgeführt werden. Innerhalb des zunächst durchgeführten APs 2 wurden Mängel im aktuellen Stand der Technik bei der statischen Detektion von Kontaktpunkten und -kräften aus dem Fluoroskopiebild identifiziert, die eine Anpassung des Projektplans erforderlich gemacht haben. So musste zunächst die Robustheit der Algorithmen zur Bestimmung der angreifenden Kontaktkräfte aus dem 2D-Fluoroskopiebild erhöht werden, die die Voraussetzung zur erfolgreichen Durchführung der APs 3+4+5 stellt. Dies führte gemeinsam mit den Budgetkürzungen durch den Projektträger dazu, dass der Personaleinsatz priorisiert und in AP 3+4+5 gekürzt werden musste. Durch den angepassten Projektplan konnte innerhalb von AP 2 allerdings ein angepasster Algorithmus entwickelt werden, der die Robustheit der intraoperativen Kraftbestimmung wesentlich verbessert. Validierungsexperimente wurden hierzu bereits durchgeführt, diese werden im Juni 26 auf der IEEE ICRA präsentiert, ein Fullpaper wird aktuell vorbereitet. Außerdem konnten in AP 3 Ansätze zur effizienten Bestimmung von 3D Verformung und Kontakten basierend auf der Gefäßgeometrie entwickelt werden und in AP 4 Methoden entwickelt werden, über die sich die Kraftmessungen zwischen einzelnen Messpunkten dynamisch verknüpfen lassen. Darüber kann die Geschwindigkeit der Kraftmessung deutlich gesteigert werden und stochastische Fehler in der Kraftmessung kompensiert werden. In einer Simulation konnten diese Methoden bereits validiert werden, eine experimentelle Validierung in einem Prüfstand steht allerdings noch aus.

1.3 Ergebnisse des Vorhabens

1.3.1. Wesentliche Ergebnisse

In StrokeGuard wurde ein neuartiges Lösungsverfahren für die Bestimmung der intraoperativen Kontaktkräfte aus der Verformung von Kathetern und Führungsdrähten entwickelt, welche aus dem Fluoroskopiebild bestimmt werden können. Diese neue Methodik erhöht die Robustheit und Lösungsgeschwindigkeit gegenüber aus der Literatur bekannten Ansätzen und wurde experimentell im Reallabor Hybrid-OP validiert. Bestehende Verfahren scheiterten in Experimenten hingegen an den realen Einsatzbedingungen im OP insbesondere aufgrund der geringen Auflösung der Bildgebungssysteme. Das neue Lösungsverfahren besteht aus einer lokalen Linearisierung der komplexen Cosserat-Balkentheorie, wodurch sich das Kraftverformungsproblem prinzipiell ohne Iterative Verfahren lösen lässt. Lediglich die Bestimmung der Kontaktposition muss noch über Optimierungsverfahren bestimmt werden

Zusätzlich wurde eine Simulationsmethode entwickelt, um aus den präoperativen 3D Gefäßverläufen angreifende Kräfte außerhalb der Fluoroskopiebildebene bestimmt werden können.

Außerdem konnte gezeigt werden, dass sich die Veränderung der Kontaktkräfte aus der zeitlichen Historie der Messpunkte prädizieren lässt. Hierfür wurden Prädiktion von Kraftposition und Kraftvektor getrennt und konsekutiv gelöst.

Das Gesamtziel des Vorhabens, die Transferfähigkeit der Technologie deutlich zu erhöhen wurde erreicht. Außerdem konnte die Planung des Transferpfades erweitert werden: Der digitale Zwilling der endovaskulären Instrumente eignet sich neben der Absicherung der Eingriffe insbesondere als Grundlage für modellbasierte Regel- und Sicherheitsverfahren zur teilautonomen Durchführung der Interventionen.

1.3.2. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Forschungsprojekt wurde ohne Kooperationspartner durchgeführt.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Durchgeführter Arbeitsplan

Arbeitspaket	abgeschlossen	nicht abgeschlossen	nicht durchgeführt
1 *Projektmanagement*	☒	☐	☐
2 *Abgleich Kontaktkraftbestimmung*	☒	☐	☐
3 *Sensorfusion*	☒	☐	☐
4 *Dynamische Modellierung*	☒	☐	☐
5 *Validierung*	☐	☒	☐

Arbeitspaket 1 Projektmanagement

Durch die kontinuierliche Überwachung des Projektfortschritts, konnte frühzeitig erkannt werden, dass sich der Arbeitsaufwand von Arbeitspaket 2 deutlich erhöht, da weder die eigenen noch die Vorarbeiten aus der Literatur die notwendigen Anforderungen an ein robustes Lösungsverfahren unter den anspruchsvollen Anwendungsbedingungen im OP erfüllen. Als Folge dessen, wurde Arbeitspaket 2 aufgestockt, wodurch der Personaleinsatz für die übrigen Arbeitspakete umgeplant bzw. in APs 3, 4 und 5 reduziert werden mussten.

Arbeitspaket 2 Abgleich Kontaktkraftbestimmung

Beim Abgleich der verschiedenen Ansätze aus der Literatur, wurde festgestellt, dass die iterativen Verfahren nur unter bestimmten Annahmen, insbesondere reine Normalkräfte an den Kontaktpunkten, konvergieren. Die direkten Verfahren setzen dagegen eine rauscharme Messung der Krümmung der Instrumente aus dem Fluoroskopiebild voraus. Durch die geringe Auflösung der intraoperativen Bildgebungssysteme ist es allerdings nicht möglich die Krümmung hinreichend genau zu messen. Daher war es notwendig die bestehenden Ansätze zu erweitern. Gelungen ist dies durch Implementierung einer lokal linearisierten Abwandlung des genutzten Cosserat-Balkenmodells, die auch auf der Verformungsebene eine direkte Verknüpfung von Kräft und Verformung möglich macht. Für die Detektion der Kontaktkraftpositionen über ein Optimierungsverfahren wurden außerdem ein Iteratives Konzept entwickelt, das dynamisch Nebenbedingungen für den Lösungsraum aktiviert, sodass die Verfahren schnell und zuverlässig in die optimale Lösung konvergiert. Die Nebenbedingungen (wie z.B. Abstände zwischen aufeinander folgende Kräfte) wurden dabei aus der realen Anwendung abgeleitet.

Zur Validierung wurde mit am Institut vorhandenen Materialien ein Prüfstand aufgebaut, in dem Verformungen auf einen Führungsdraht aufgebracht und dabei die Interaktionskräfte gemessen werden können. Über die medizinischen Bildgebungssysteme im eigenen Hybrid-OP konnte anschließend die Verformung aufgezeichnet und anschließend aus dem Bild ermittelt werden. Abschließend wurden die Kräfte mit dem neuen Verfahren aus der Verformung rekonstruiert. Darüber konnten die entwickelte Methodik, die die Genauigkeit des Stands der Technik deutlich verbessert, erfolgreich validiert werden. Die wissenschaftliche Verwertung durch eine Präsentation auf der IEEE ICRA erfolgte im Juni 26, ein Fullpaper befindet sich aktuell noch in Vorbereitung.

Bild 1: Versuchsaufbau für bildbasierte Kraftrekonstruktion im Reallabor Hybrid-OP

Arbeitspaket 3 Sensorfusion

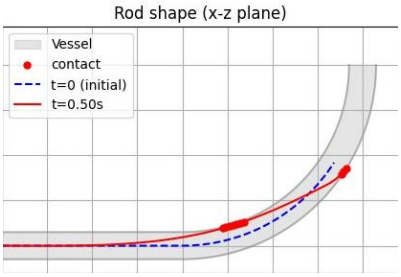

Bild 2: Simulative Bestimmung der Kontaktkräfte basierend auf dem Gefäßverlauf

Um basierend auf präoperativ erhobener 3D-Bildgebung die Kontaktkräfte außerhalb der Fluoroskopiebildebene bestimmen zu können wurde eine Minimalrepräsentation der Gefäße aus Mittelpunktslinien und Radien entwickelt, in der über ein mechanisches Instrumentenmodell für beliebige Konfigurationen die Ruhelagen und damit verbundenen Kontaktpunkte, und -kräfte effizient bestimmt werden können. Über eine Initialisierung der Instrumentenmodellierung auf der Mittelpunktslinie können die Kontakte für beliebige Instrumentenkonfigurationen parallel ermittelt werden, ohne den vollständigen Eingriff bis zu dieser Position modellieren zu müssen. Durch Abgleich mit der 2D-Projektion der Instrumentenverformung während des Eingriffs können so auch die Kräfte außerhalb der Bildebene abgeschätzt werden. Hierfür existiert zum einen die Möglichkeit die zuvor ermittelten Kräfte über eine look-up-table auszulesen oder alternativ die gemessene 2D Verformung über die Kontakte in der Bildebene im den Gefäßverlauf zu registrieren und anschließend über die 3D Modellierung die verbleibenden Kontaktkräfte zu bestimmen.

Arbeitspaket 4 Dynamische Modellierung

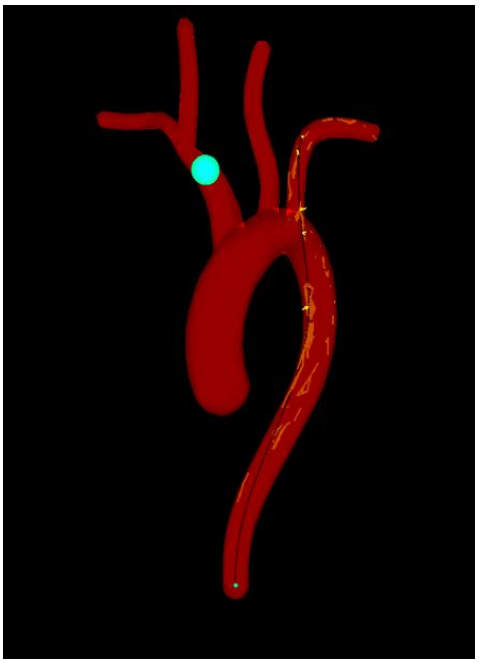

Bild 3: Verlauf einzelner Kräfte entlang der Gefäßwände

Um ein datenbasiertes dynamisches Modell für die Kontaktkräfte aufzubauen, wurde zunächst eine FEM-Simulationsumgebung, die in vorangegangenen Projekten entwickelt wurde, erweitert, sodass aus dieser in jedem Zeitschritt feingranular die Kontaktkräfte ausgegeben werden können. Die verformungsbasierte Kontaktkraftbestimmung kann nicht zwischen punktweise auftretenden und verteilten Kontakten unterscheiden, da sich die Verformung zwischen diesen Lastfällen in der messbaren Größenordnung nicht unterscheidet. Die verteilten Kräfte werden daher durch äquivalente Punktlasten dargestellt, was eine konservative Abschätzung darstellt und hinsichtlich der Instrumentendynamik ebenfalls äquivalent ist. Daher wurde zunächst eine Regelvorschrift entwickelt, über die die Kräfte aus der Simulation in äquivalente Einzelkräfte umgewandelt werden können und die Kontaktpunkte und Kräfte zwischen den einzelnen Zeitschritten als identische Kräfte erkannt werden können. Als geeignete Metriken hierfür wurden Bogenlängenabstand, Kraftorientierung und euklidischer Abstand sowie für die zeitliche Vernetzung Instrumenteneinschublänge und -rotation identifiziert.

Das Bild 3 zeigt die Simulation inkl. visualisierter Spuren verschiedener Einzelkontakte und Bild 4 zeigt exemplarisch, wie hieraus die Position, Größe und Orientierung der Kontaktkräfte prädiziert wurden.

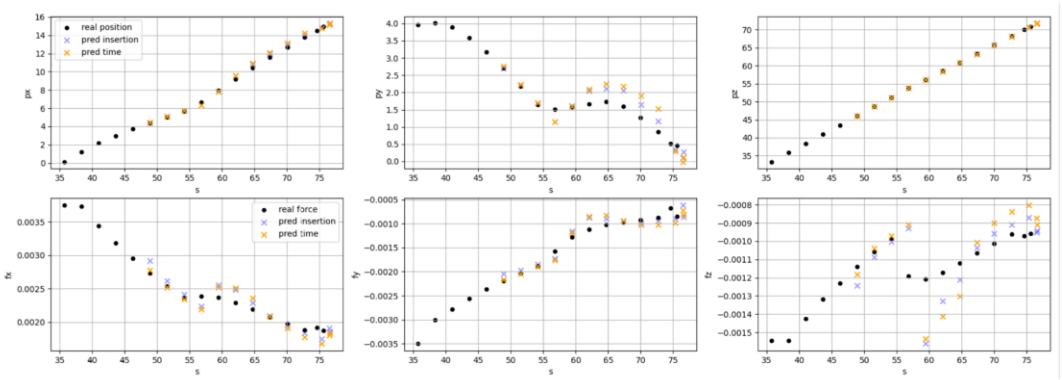

Bild 4: Beispiel für prädizierte Kontaktpunkte und -kräfte

Arbeitspaket 5 Validierung

Die Validierungsexperiment aus AP 2, AP 3 und AP 4 wurden im Wesentlichen bereits in den zugehörigen Arbeitspaketen beschrieben.

Die Lösungsverfahren zur 2D Kraftdetektion und zur dynamischen Modellierung konnten in der Simulation miteinander verknüpft werden, indem die Prädiktion aus den vorangegangenen Zeitschritten als Initiallösung für den neuen Messpunkt gewählt wurde, wodurch die Bestimmung der angreifenden Kräfte deutlich beschleunigt werden konnte. Eine Erweiterung der Messmethode um statistische Verfahren für die kontinuierliche Abschätzung der Kontaktkräfte konnte im Projekt leider nicht mehr umgesetzt werden. Eine Umsetzung soll in Folgeprojekten erfolgen.

Als Vorbereitung weiter Transfertätigkeiten, wurde darüber hinaus der Mehrwert der bildbasierten Kraftbestimmung insbesondere für robotisch durchgeführte endovaskuläre Interventionen untersucht. Dafür wurde eine Anwenderstudie durchgeführt, bei der die Probanden durch einen simulierten Aortenbogen navigieren mussten und dabei den Führungsdraht über ein haptisches Eingabegerät gesteuert haben. Für die Generierung des haptischen Feedbacks wurde dabei die Bestimmung der Kontaktkräfte aus dem Fluoroskopiebild simuliert, also z.B. nur mit einer Frequenz von 7,5 Hz (übliche Bildrate bei Fluoroskopie in der klinischen Anwendung). Zwischen diesen Zeitschritten wurde die Entwicklung der Kräfte über ein dynamisches Kraftmodell extrapoliert. In der Studie konnte dabei gezeigt werden, dass eine Kenntnis der Kontaktkräfte mit Bestimmung der einzelnen Kontakte (insbesondere an der Spitze), wie sie nur über verformungsbasierte Verfahren erreicht werden kann, zu einer schnelleren Zielerreichung bei den Eingriffen führt. (Entwicklung der Interaktionskonzepte sowie Studiendurchführung sind im Wesentlichen in einem anderen Projekt erfolgt, basieren allerdings auf den in StrokeGuard entwickelten Konzepten und wurden ergänzend im Rahmen von StrokeGuard in Hinblick auf den Mehrwert dieser Technologie ausgewertet).

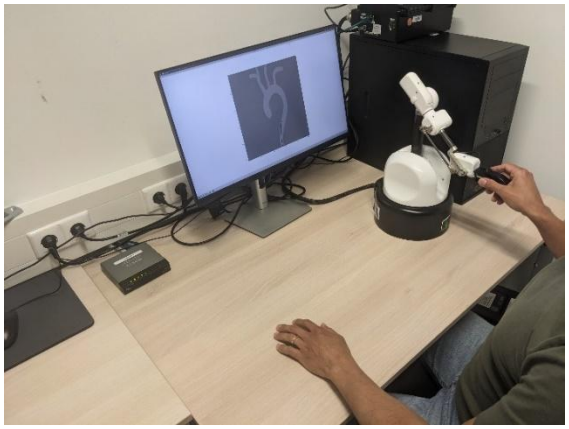
Bild 5: Versuchsaufbau Interaktionsstudie

Für einen erfolgreichen Technologietransfer soll in Folgeprojekten zunächst die Technologiereife der dynamischen und 3D-Messverfahren erhöht werden (u.a. durch Integration in einen kontinuierlichen statistischen Schätzer) und anschließend gemeinsam mit Anwendern Interaktionskonzepte für die Verwendung als Warn- und Assistenzsystem erarbeitet werden. Danach kann die klinische Evaluierung, medizintechnische Zulassung und kommerzielle Verwertung erfolgen.

2.2 Erreichte Meilensteine

Meilensteine

Beschreibung: messbare Zielparameter, Steuerungsfunktion	Nr.	geplanter Monat	realer Monat	Erläuterung (planabweichend/nicht erreicht)
3D Verformung des Drahtes kann aus 3D-Gefäßverlauf und 2D-Instrumentenmessung bestimmt werden	*1*	*PM 8*	*PM 13*	*Mehraufwand in AP 2*
Basierend der auf den Draht wirkenden Kräften und der Manipulation am Instrumentenende können die Kräfte zum nächsten Zeitpunkt prädiziert werden	*2*	*PM 14*	*PM 16*	*Mehraufwand in AP 2*

2.3 Erreichte Ergebnisse

2.3.1 Erreichung der Gesamtziele

Gesamtziel des Innovationssprints	Ziel von StrokeGuard ist die Verbesserung der minimalinvasiven Therapie akuter Schlaganfällen, indem Mediziner erstmals durch ein intelligentes Assistenzsystem bei der Operation unterstützt werden. StrokeGuard ist ein digitaler Zwilling der Instrumente im Patienten, der sich dank Verarbeitung von bereits im OP verfügba-	*Das Gesamtziel des Vorhabens, die Technologiereife eines digitalen Zwillings der endovaskulären Instrumente während des Eingriffs deutlich voranzubringen, wurde erreicht. Mit den Ergebnissen aus StrokeGuard, lassen sich die Verformungsmessungen währen des Eingriffs in ein digitales mechanisches Modell der Instrumente überführen und die zeitdiskreten Messpunkte*

	ren multimodalen Datenquellen einfach in bestehende Prozesse integrieren lässt und durch zielgerichtete Hinweise dabei hilft, Schlaganfälle effizienter und sicherer zu behandeln.	*miteinander verknüpfen. Die nächsten Schritte, die für einen erfolgreichen Transfer notwendig sind, sind bekannt (vgl. 2.1 AP 5).*

2.3.2 Erreichung der wissenschaftlichen und/oder technischen Arbeitsziele

.

Geplante konkrete Arbeitsziele	Erfüllung
Bewertung der verschiedenen Ansätze zur verformungsbasierten Kontaktkraftbestimmung (vgl. 2.1)	Erfüllt, Ansätze von Qiao, Aloi, Xiao wurden implementiert, mit eigenen Ansätzen verglichen und weiterer Forschungsbedarf festgestellt
Konzept und Programmcode für Fusionierung des dreidimensionalen Gefäßverlaufs und der Instrumentenverformung auf dem zweidimensionalen Fluoroskopiebild zur Bestimmung der angreifenden Kräfte	Erreicht, Methode zur Bestimmung der angreifenden Kräfte aus dem dreidimensionalen Gefäßverlauf konnte implementiert werden. Technologiereife allerdings noch gering.
Konzept und Programmcode zur dynamischen Entwicklung der Kontaktkräfte bei Bewegung der Instrumente	Erreicht, Methode zur dynamischen Modellierung der Kontaktkräfte konnte implementiert werden. Technologiereife allerdings noch gering.
Übersicht notwendiger nächster Schritte für Transfer der Technologie in die Anwendung	Erreicht, notwendige Arbeitsschritte zur Weiterentwicklung der Technologie wurden definiert

Zusätzliche oder neue Arbeitsergebnisse, die im Projektverlauf entstanden sind:

Weiterentwicklung der Methoden zur Fluoroskopiebild-basierten Kontaktkraftbestimmung bei endovaskulären Eingriffen für robuste Detektion: Iterativ konnte ein robustes Verfahren entwickelt werden, über das sich Kontaktkräfte aus der Verformung der Instrumente ermitteln lassen.

2.4 Verwertung

2.4.1 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses

Fraunhofer nutzt zur Verwertung der Projektergebnisse grundsätzlich sämtliche Transferpfade wie Ausgründungen, Lizenzierung/Übertragung, Transfer über Köpfe oder Veröffentlichungen. Hierbei verfolgt Fraunhofer eine aktive Patentpolitik und meldet schutzrechtsfähige Ergebnisse im Rahmen der rechtlichen Möglichkeiten und der wirtschaftlichen Vertretbarkeit national und ggf. auch international an.

Im konkreten Vorhaben konnten zwar noch keine Schutzrechte angemeldet werden, die Ergebnisse fließen allerdings in geplante Folgeprojekte ein und sollen so einer wirtschaftlichen Verwertung zugeführt werden. Die dabei zu erwartenden geschützten und/oder ungeschützten Ergebnisse werden vorzugsweise - vorbehaltlich gesonderter Vereinbarungen - im Rahmen sachlich, zeitlich oder örtlich konkretisierter Lizenzvereinbarungen mit den häufig international tätigen Verbundpartnern und deren weltweiten Konzerngesellschaften verwertet.

Daneben ergänzen die Ergebnisse des Vorhabens den Pool an Background-IP von Fraunhofer, das für künftige Auftragsforschungsvorhaben relevant und im Rahmen gesondert vereinbarter Background-Lizenzen an nationale, europäische und internationale Vertragspartner verwertet werden kann. Die Ergebnisse des Vorhabens können insofern die Basis für weitere Aufträge aus der Wirtschaft bilden und deren konkrete Umsetzung in neue Produkte oder Verfahren unterstützen.

Abschließend kommt eine isolierte Lizenzierung oder Übertragung der Ergebnisse an Dritte ohne Projektbezug, z.B. auch an Ausgründungen, in Betracht. Der Fokus liegt hier bei nationalen und europäischen Interessenten, beschränkt sich aber nicht auf diesen Kreis.

Ungeachtet der Möglichkeit, die Ergebnisse des Vorhabens im Wege der Lizenzierung oder Übertragung an Dritte oder im Rahmen einer Ausgründung zu verwerten, dienen die Ergebnisse des Vorhabens der Anschlussfähigkeit und Stärkung weiterer Forschungs- und Entwicklungsvorhaben von Fraunhofer.

2.4.2 Fortschritt Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens

Verschiedene Gruppen forschen zur intraoperativen Bestimmung der Kontaktkräfte bei Eingriffen mit flexiblen Instrumenten. Zur Bildbasierten Bestimmung der Kontaktkräfte haben Hooshiar et al. 2026 (McGill University, Montreal, Canada) mit „A Soft Robotics Approach to Sensor-Free Force Measurement in Robot-Assisted Cardiovascular Procedures“ einen Ansatz zur Kontaktkraftbestimmung veröffentlicht, der den in AP 2 erzielten Entwicklungen in Teilen ähnelt. Der präsentierte Ansatz setzt allerdings voraus, dass die Verformung über Bezier-Kurven angenähert wird, während der in StrokeGuard entwickelte Ansatz diese Anforderung nicht stellt. Während diese Publikation den gewählten Ansatz bestätigt, ist noch zu klären, inwiefern die Verwertung von StrokeGuard beeinflusst.

Gaston et al. (The University of Tennessee, Knoxville, USA) haben darüber hinaus 2026 in „A 3D Discrete Elastic Rod Model and Observer for Continuum Robots” einen Ansatz präsentiert, über den nicht nur die Verformung, sondern auch die Dynamik von flexiblen robotischen Systemen genutzt werden kann, um Informationen vom realen System auf einen digitalen Zwilling zu übertragen. Während sich die Veröffentlichung auf die Regelung eines frei hängenden Kontinuumroboters fokussiert, bietet die Methodik das Potenzial auch Kontakte und Instrumentdynamik bei endovaskulären Interventionen zu bestimmen, wenn sie mit den Vorarbeiten aus StrokeGuard kombiniert wird.

2.4.3 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Forschungsergebnisse aus AP 4+5 sind teilweise in die Publikation „Experimental Comparison of Control Methods for Endovascular Robots with Haptic Feedback“ von Eyberg et al. eingeflossen. Diese wurde 2025 auf der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Computer und Roboterassistierte Chirurgie präsentiert. (Kern der Publikation war der Vergleich verschiedener Interaktionskonzepte, die in einem anderen Projekt entwickelt wurden. In der Publikation selbst sind aber auch die Beiträge und das Förderkennzeichen von StrokeGuard vermerkt.)

Die Forschungsergebnissen aus AP 2 wurden im Juni 2026 zunächst als Poster auf er IEEE ICRA präsentiert (Eyberg et al.: „Local Linearized Cosserat Rod Model for Contact Force Estimation in Flexible Medical Instruments and Continuum Robots“), ein Fullpaper hierzu ist aktuell noch in Arbeit.

2.4.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Bei StrokeGuard handelte es sich um ein komplexes und ambitioniertes Forschungsprojekt dessen notwendige Forschungs- und Entwicklungsaufwände die verfügbaren Ressourcen der antragsstellenden Forschungseinrichtung deutlich überstieg und mit erheblichen Forschungsrisiken behaftet war. Gerade Arbeitspaket 2 hat gezeigt, dass trotz intensiver Literaturrecherche und eigenen Vorarbeiten, der dokumentierte Stand der Technik aus Laboraufbauten nicht in die Anforderungen im Reallabor übertragbar waren und hier noch zusätzliche Arbeiten notwendig wurden, die so nicht vorhersehbar waren. Aufgrund des hochgradig komplexen Verhaltens der Katheter war unklar, ob eine Prädiktion der Kontakte über mehrere Zeitschritte tatsächlich umsetzbar ist. Tatsächlich haben die Modellierungen gezeigt, dass dies in der Simulation tatsächlich möglich ist und bietet so die Grundlage für weitere Forschungstätigkeiten, die Prädiktion weiter zu verbessern. Bei erfolgreicher Weiterführung und erfolgreichem Transfer wird bietet die StrokeGuard-Technologie einen klaren gesellschaftlichen Mehrwert, da es die Grundlage bietet die Behandlung von Schlaganfällen schneller, sicherer und erfolgreicher zu machen und damit das Patientenwohl erheblich zu steigern. Das Forschungsprojekt war nur mit der DATIpilot Förderung des BMBF umsetzbar.