

Abschlussbericht zum Verbundvorhaben

GeckI

**KI-basierte Objekterkennung und adaptive Steuerung
für intelligente, bioinspirierte Robotergreifsysteme**

Autoren:

INNOCISE:	M.Sc. Henrik Ollmann, M.Sc. Jonathan Thiemecke
Fraunhofer IZFP:	Dr.-Ing. Sarah C.L. Fischer, M.Sc. Simon Herter
NEXT.robotics:	M.Sc. Dennis Huber

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 01IS21035 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Teil 1: Kurzbericht

Aufgabenstellung und wissenschaftliche/technische Ausgangslage

Im Rahmen des Projekts „GeckKI – KI-basierte Objekterkennung und adaptive Steuerung für intelligente, bioinspirierte Roboter Greifsysteme“ wurde untersucht, wie künstliche Intelligenz (KI) genutzt werden kann, um bioinspirierte Greifsysteme weiterzuentwickeln und dadurch die Automatisierung in industriellen Produktionsprozessen noch effizienter und flexibler zu gestalten. Herkömmliche Greiftechnologien, wie Vakuum- oder mechanische Greifer, stoßen häufig an ihre Grenzen hinsichtlich Flexibilität und Energieeffizienz, insbesondere wenn es um empfindliche oder Bauteile variierender Geometrie oder Orientierung geht. Bioinspirierte Greifsysteme auf Basis des Gecko-Effekts bieten eine innovative Lösung, indem sie ohne externe Energiezufuhr funktionieren und für Bauteile unterschiedlichster Oberflächenbeschaffenheit eingesetzt werden können.

Da bioinspirierte Greifsysteme noch keinen Informationsaustausch zwischen Greifer und Manipulator ermöglichen, sollte eine KI-gestützte Sensorik in die Haftstrukturen integriert werden, um Prozessparameter wie Verkippung, Anpresskraft und Oberflächengeometrie des Bauteils zu erfassen. Diese Sensordaten sollten zur Optimierung der Bewegungsabläufe durch eine auto-adaptive Robotersteuerung genutzt werden, um eine präzisere und zuverlässigere Handhabung zu ermöglichen.

Ablauf des Vorhabens

Das Projekt gliederte sich in mehrere zentrale Arbeitspakete. Zunächst wurde ein Laborsystem entwickelt, mit welchem die Datengrundlage für die geplante KI-gestützte Sensorik aufgenommen werden konnte. Dazu wurden umfassende Versuche durchgeführt, um die Wechselwirkungen zwischen Haftstruktur und Objekten unter variierenden Prozessparametern, wie z.B. Anpresskräften und Abzugsgeschwindigkeiten zu analysieren. Das Laborsystem ermöglichte es, während dieser Versuche mit den entwickelten Sensoren Messwerte aufzuzeichnen, um möglichst präzise Informationen über den Greifprozess zu gewinnen. Die erfassten Daten dienten in Form von Trainingsdaten als Basis für die Entwicklung von KI-Algorithmen, die eine zuverlässige Vorhersage von Greifparametern wie Verkippung und Anpresskraft ermöglichten.

In einem nächsten Schritt wurde eine robuste Schnittstelle zwischen diesem „Geckotelligent Gripper“ und verschiedenen Robotersystemen entwickelt. Dazu wurde ein mechanisches Trägersystem für die sensorierten Greifer mit Schnellwechselsystem und modularen Roboteradaptern konstruiert und gefertigt, um das Greifsystem am Flansch des Roboters befestigen zu können. Zusätzlich wurde eine Softwareschnittstelle konzipiert und eingerichtet, um einen effizienten Austausch der Daten aus der Messintelligenz mit Steuerintelligenz zu ermöglichen.

Diese Steuerintelligenz wurde in einem weiteren Abschnitt des Projekts entwickelt. Sie verwertet die Daten der Messintelligenz, um zum Beispiel eine Verkippung zwischen Greifer und Bauteil auszugleichen und die Anpresskraft auf einen optimalen Wert zu regeln. Dies führte zu einer erheblichen Verbesserung der Handhabungseffizienz, da der Greifer flexibel auf unterschiedliche Objekte reagieren konnte, ohne dass eine aufwendige manuelle Programmierung erforderlich war. Die durch das KI-System gewonnene Präzision reduzierte zudem Fehlerquellen und erhöhte die Prozesssicherheit.

Zur Validierung und Demonstration dieses Gesamtsystems wurde im letzten Schritt ein mobiler Demonstrator entwickelt, welcher die Funktionsweise mit Hilfe eines 6-Achs-Roboterarms erfolgreich zeigen konnte. Dieser wurde bereits auf einer Messe einem industriellen Publikum vorgestellt, wodurch vielversprechende Kontakte geknüpft werden konnten.

Ergebnisse und Zusammenarbeit im Projekt

Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen der INNOCISE GmbH, der NEXT.robotics GmbH & Co. KG und dem Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) trug wesentlich zum Erfolg des Projekts bei. Während INNOCISE ihre Expertise in der Entwicklung bioinspirierter Haftstrukturen einbrachte und durch ihre Erfahrung bei Fragestellungen zu industriellen Handhabungsprozessen unterstützte, übernahm NEXT.robotics die softwareseitige Integration der Steuerungsalgorithmen in bestehende Robotersysteme. Das Fraunhofer IZFP war für die Entwicklung und Validierung der Sensorik sowie der KI-Modelle verantwortlich. Durch diese enge Kooperation konnten innovative Lösungen entwickelt werden, die sowohl technologisch als auch wirtschaftlich relevant sind.

Die Ergebnisse des Projekts zeigen, dass durch die Kombination bioinspirierter Haftstrukturen mit künstlicher Intelligenz ein leistungsfähiges und vielseitig einsetzbares Greifsystem geschaffen werden kann. Die entwickelte Technologie verbessert nicht nur die Energieeffizienz und Anpassungsfähigkeit von Roboter Greifsystemen, sondern eröffnet auch neue Anwendungsmöglichkeiten in der Automatisierungstechnik. Der abschließende Demonstrator belegte, dass das System großes Potenzial für den industriellen Einsatz und für zukünftige Entwicklungen bietet.

Insgesamt hat das Projekt GeckI wertvolle Erkenntnisse für die Weiterentwicklung intelligenter Greifsysteme geliefert. Zukünftig sollen insbesondere die Sensordatenverarbeitung weiter optimiert und die Technologie für die industrielle Serienproduktion skaliert werden.

Abschlussbericht zum Verbundvorhaben

GeckI

**KI-basierte Objekterkennung und adaptive Steuerung
für intelligente, bioinspirierte Robotergreifsysteme**

Autoren:

INNOCISE:	M.Sc. Henrik Ollmann, M.Sc. Jonathan Thiemecke
Fraunhofer IZFP:	Dr.-Ing. Sarah C.L. Fischer, M.Sc. Simon Herter
NEXT.robotics:	M.Sc. Dennis Huber

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 01IS21035 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Inhalt

Einleitung.....	2
Arbeitspaket 1: Systematische Datengrundlage und KI-Entwicklung am Testsystem	3
Laboraufbau	3
Adhäsionsverhalten der Haftstruktur.....	5
Auswahl und Fertigung der Sensorik und Sensorelektronik	5
Sensorintegration in Teststrukturen	8
KI-Algorithmen	11
Level 1: Erkennung der Verkipfung und Lokalisierung des Kontakts	13
Level 2: Quantifizierung der Anpresskraft.....	14
Level 3: Erkennung von Objekteigenschaften	15
Zusammenfassung.....	17
Arbeitspaket 2: Schnittstelle zwischen „Geckotelligent Gripper“ und Roboter	18
Softwareschnittstelle.....	18
Trägersystem und modularer Roboteradapter	20
Arbeitspaket 3: Auto-adaptive Robotersteuerung.....	23
Anforderungen und Auswahl der Roboter	24
Gestaltung der auto-adaptiven Robotersteuerung.....	24
Steuerintelligenz.....	26
Arbeitspaket 4: Demonstrator und industrielle Akzeptanz.....	27
Demonstrator	27
Herstellung und Erprobung sensorierter Prototypen	28
Zusammenfassung und Ausblick	29
Erläuterung der wichtigsten Kostenpositionen.....	30
Personal.....	30
Material	30
Reisekosten	31
Nutzung und Verwertung der Projektergebnisse.....	31
INNOCISE	31
NEXT.robotics	32
Fraunhofer IZFP	32
Ergebnisse Dritter	33
Liste der Veröffentlichungen.....	33

Teil 2: Ausführlicher Sachbericht

Einleitung

Bioinspirierte Greifsysteme basierend auf dem Gecko Effekt erobern bereits jetzt den Markt, da sie aufgrund ihres Funktionsprinzips Objekte ohne externe Energieversorgung greifen und präzise wieder platzieren können, was industrielle Handhabungsprozesse deutlich günstiger und nachhaltiger gestaltet. Um einen sicheren Handhabungsprozess zu gewährleisten, muss die Haftstruktur flächig mit dem Bauteil in Kontakt gebracht und mit einer definierten Kraft angedrückt werden. Eine Verkippung von weniger als 1° zwischen der Haftstruktur und der Bauteiloberfläche kann bereits zu einer Halbierung der Haftkraft des Greifers im Vergleich zu einer parallelen Ausrichtung führen¹. Der Vorteil des Greifens ohne externen Energiebedarf birgt daher die Herausforderung, dass keine Informationen über den Greifprozess zwischen Greifer und Manipulator (z.B. dem Roboter) ausgetauscht werden können.

Ziel des Projekts GeckI ist daher im ersten Schritt, eine KI-gestützte Sensorik in die Greifer zu integrieren, die kritische Prozessparameter wie Verkippung zwischen Bauteil und Greifer (Level 1), Anpresskraft (Level 2) und Oberflächengeometrie des Bauteils (Level 3) erkennen kann. Diese Informationen werden an eine Steuerintelligenz übergeben, welche diese interpretiert und damit die Bewegung des Roboters so anpasst, dass das Bauteil sicher gegriffen und wieder abgelegt werden kann.

Klärung zur Nomenklatur

Für das bessere Verständnis von im Abschlussbericht genutzten Begriffen sind in Abbildung 1 verschiedene Betrachtungsebenen von Gecko-inspirierten Haftstrukturen deren Einzelkomponenten schematisch dargestellt. Eine Vielzahl von mikroskaligen Einzelstegen – teils mehrere Zehntausend auf

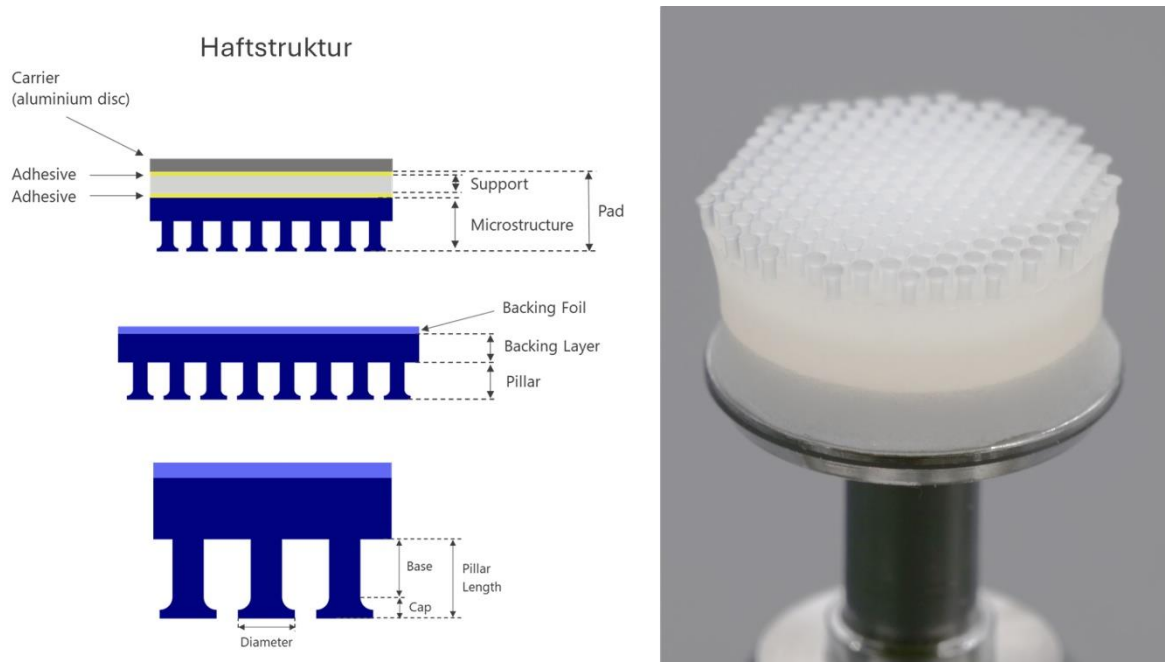


Abbildung 1: Schematische Darstellung verschiedener Betrachtungsebenen von Haftstrukturen (links) und Beispielfoto eines solchen Pads auf einem Metallstift (rechts).

¹ Samri, Manar, et al. "Predicting the adhesion strength of micropatterned surfaces using supervised machine learning." *Materials Today* 53 (2022): 41-50.

einer Haftstruktur – führen zum aus der Natur bekannten „Gecko-Effekt“²; diese Einzelstege werden „Pillars“ genannt (Abbildung 1, links mittig). Wird diese Haftstruktur (viele Pillar auf einem sogenannten Backinglayer) auf eine nachgiebige Stützstruktur geklebt und darüber mit einem soliden, oft metallischen Träger verbunden (Abbildung 1, rechts), bezeichnet man diesen Verbund häufig als Haftpad oder einfach Pad (Abbildung 1, links oben). Damit lassen sich dann verschiedenste Bauteile anheben, bewegen und wieder platzieren.

Arbeitspaket 1: Systematische Datengrundlage und KI-Entwicklung am Testsystem

Ziel des ersten Arbeitspakets (AP) war die Schaffung einer experimentellen und algorithmischen Basis, um die Wechselwirkung zwischen bioinspirierten Haftstrukturen und unterschiedlichen Objekten während des Greifprozesses zu verstehen. Hierzu wurde in AP 1.1 und 1.2 ein Laborsystem entwickelt, welches es erlaubt, mit einer speziell dafür entwickelten Sensorik (AP 1.3 – 1.6) Messdaten während des Greifprozesses aufzuzeichnen und auszuwerten. Auf Basis dieser Daten wurden in verschiedenen Leveln in AP 1.7 – 1.10 KI-Algorithmen entwickelt, die quantitative Rückschlüsse über den Greifvorgang ermöglichen und als Input für die auto-adaptive Robotersteuerung dienen.

Labora Aufbau

Zu Beginn wurde als mechanische Grundkomponente für den Laboraufbau ein 3-Achs-Manipulator vorgesehen, welcher es ermöglichen sollte, ein sensoriertes mikrostrukturiertes Pad kontrolliert auf verschiedene Referenzobjekte abzusenken und dabei Sensorwerte aufzuzeichnen. Dieses System wurde gemeinsam mit INNOCISE und dem Fraunhofer IZFP entwickelt und am IZFP aufgebaut. Während der Erprobungs- und Optimierungsphase dieses Prüfstands wurde der 3-Achs-Manipulator durch einen Meca500-6-Achs-Roboterarm der Firma Mecademic ersetzt, den NEXT.robotics zur Verfügung gestellt und bei der Einrichtung sowie Programmierung unterstützt hat. Dieser Roboter ermöglicht durch seine sehr hohe Wiederholgenauigkeit von nur 5 µm eine wesentlich präzisere Manipulation der Haftstruktur (z.B. Verkippung) und verbessert dadurch die Qualität der Versuchsdaten deutlich. Durch die simple Verbindung über eine Netzwerkschnittstelle wird außerdem die Steuerung und das Auslesen von Daten (z.B. Positionswerte des Roboters) während der Versuche vereinfacht.

Zudem wurde der Probenstisch nach dem Vorbild der Adhäsionsprüfmaschine von INNOCISE so gestaltet, dass das Prinzip der frustrierten totalen internen Reflexion (FTIR)³ genutzt werden konnte, um die Kontaktfläche zwischen Haftstruktur und einem transparenten (Glas-)Substrat visuell sichtbar zu machen. Dazu wird mit Hilfe eines LED-Streifens unter einem flachen Winkel seitlich Licht in das Glassubstrat eingekoppelt, welches an der Grenzfläche Glas-Luft total reflektiert wird und somit nicht aus dem Glas austreten kann. Wird das Glas senkrecht von unten (aus Platzgründen über einen Umlenkspiegel) mit einer Kamera betrachtet, erscheint das Bild in diesem Fall also komplett schwarz, da kein Licht vom Glas zur Kamera gelangt. Sobald nun die Fibrillen der Haftstruktur mit dem Glas in Kontakt treten, wird das Licht an dieser Position diffus gestreut. Diese Stellen erscheinen nun als helle Punkte in der Kamera, wodurch sich die Kontaktfläche sehr genau visuell darstellen lässt.

Zusätzlich wurde der Aufbau um eine Kraftmessdose der Firma ME-Messsysteme erweitert, die eine Referenz für die Vorhersage der Kraft bietet. Diese beschriebenen Optimierungen des Laborsystems ermöglichen eine Bewertung der Sensorsignale hinsichtlich relevanter Prozessparameter wie der

² Hensel, René, Karsten Moh, and Eduard Arzt. "Engineering micropatterned dry adhesives: from contact theory to handling applications." *Advanced Functional Materials* 28.28 (2018): 1800865.

³ Tinnemann, Verena, et al. "In situ observation reveals local detachment mechanisms and suction effects in micropatterned adhesives." *Advanced Functional Materials* 29.14 (2019): 1807713.

Anpresskraftkraft, Verkippung und Kontaktfläche zwischen Bauteil und Haftstruktur, was die Grundlage für die Erstellung KI-basierter Modelle zur Interpretation dieser Sensordaten darstellt.

Der optimierte Laboraufbau, so wie er am Fraunhofer IZFP mit Unterstützung von INNOCISE und NEXT.robotics aufgebaut wurde, ist in Abbildung 2 links zu sehen⁴. Rechts daneben ist dargestellt, wie die Kontaktfläche zwischen der Haftstruktur und dem Glassubstrat unter verschiedenen Verkippungen durch das FTIR-Prinzip visuell detektiert werden kann.

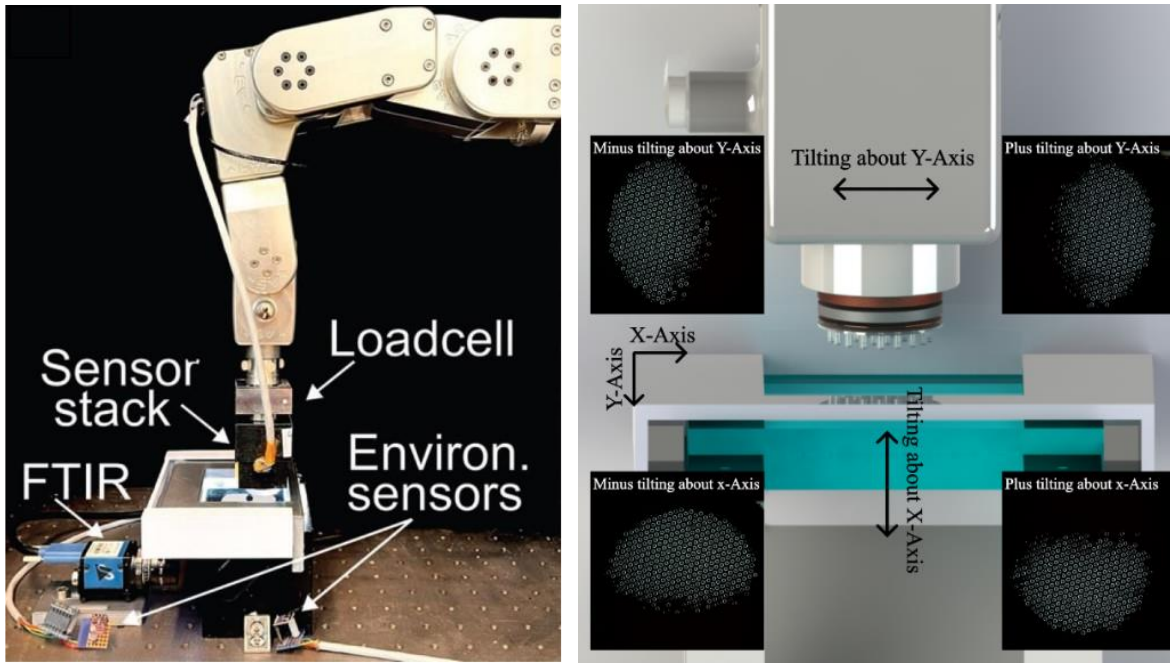


Abbildung 2: Links: Foto des optimierten Laboraufbaus bestehend aus: Meca500 Roboterarm, Sensorsystem, Kraftmessdose, Probenstisch mit FTIR, Umweltsensoren. Rechts: Schematische Darstellung der Haftstruktur am Roboter und Fotos der Kontaktfläche bei verschiedenen Verkippungen.

⁴ Herter, Simon, Philipp Stopp, and Sarah CL Fischer. "Soft Tactile Coil-Based Sensor for Misalignment Detection of Adhesive Fibrillary Gripping Systems." *Advanced sensor research* 3.1 (2024): 2300098.

Adhäsionsverhalten der Haftstruktur

Während der Aufbauphase dieses Laborsystems wurden durch INNOCISE ausgiebige Tests durchgeführt, um geeignete Haftstrukturen und Referenzobjekte für die Versuche am Laborsystem zu bestimmen. Dazu wurden Referenzobjekte verschiedener Geometrien (flache Bauteile, Linsen mit variierender Krümmung), aus unterschiedlichen Materialien (z.B. Glas, Metall) und diverser Oberflächenbeschaffenheiten (glatt, gewebt, gewellt) ausgewählt und vermessen (z.B. Oberflächenrauheit). So wurden beispielsweise Glasbauteile wie Linsen verschiedener Krümmungen oder Keilprismen unterschiedlicher Winkel untersucht. Um ein umfassendes Verständnis über das Adhäsionsverhalten der Mikrostrukturen zu erlangen, wurden Adhäsionsmessungen auf diesen Bauteilen durchgeführt, in denen ebenfalls der Einfluss verschiedener Prozessparameter, wie der Anpresskraft, Abzugsgeschwindigkeit oder Verkipfung untersucht wurde. Dadurch konnte festgestellt werden, dass die Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit der Bauteile einen starken Einfluss auf die Adhäsionskraft haben, da sie sich direkt auf die Kontaktfläche zwischen Greifer und Bauteil auswirken. Das Material hingegen spielt dabei eine eher untergeordnete Rolle. Um die Kontaktfläche während der Versuche am Laboraufbau beobachten zu können, wurde daher für den Großteil der Versuche ein Glassubstrat als Referenzobjekt verwendet. Weiterhin wurde festgestellt, dass auch Prozessparameter einen starken Einfluss auf das Adhäsionsverhalten haben. So steigt die Adhäsionskraft mit höheren Anpresskräften und Abzugsgeschwindigkeiten stark an (vgl. Abbildung 3). Auf dieser Grundlage wurden geeignete Haftstrukturen ausgewählt und die Versuchsparameter so festgelegt, dass die Adhäsionskräfte in einem sinnvollen Bereich liegen. Damit konnte unter anderem verhindert werden, dass die Belastungsgrenzen des Roboters und der Kraftmessdose überschritten werden und diese dadurch beschädigt werden.

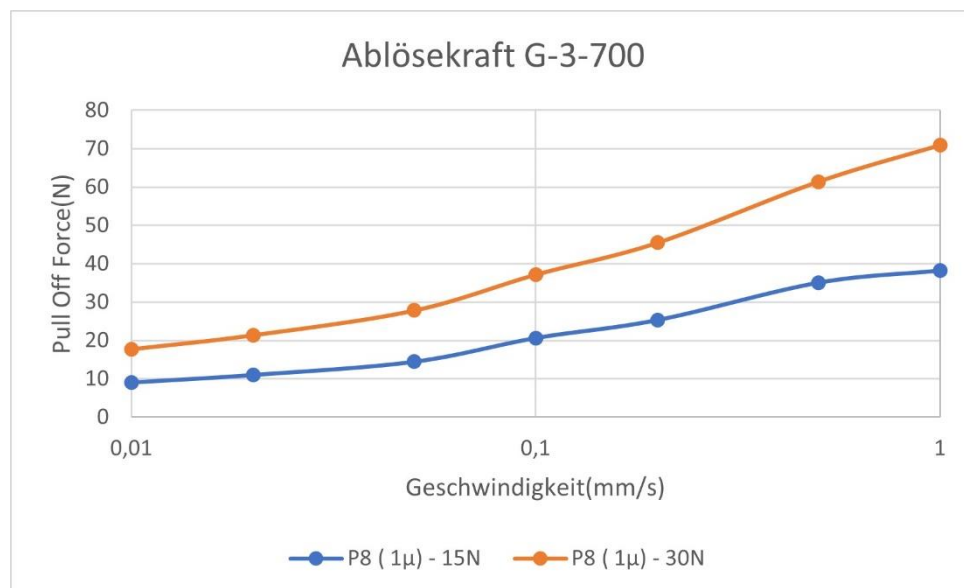


Abbildung 3: Ablösekraft einer Haftstruktur bei zwei unterschiedlichen Anpresskräften aufgetragen gegen die Abzugsgeschwindigkeit auf einer logarithmischen Skala.

Auswahl und Fertigung der Sensorik und Sensorelektronik

Um geeignete Messdaten aufnehmen zu können, welche die Basis für das Training der KI-Algorithmen bilden, stellt die Sensorik einen essenziellen Bestandteil des Laborsystems dar. Der Sensor samt zugehöriger Elektronik und Systemkomponenten wurde speziell durch das Fraunhofer IZFP für die geforderten Aufgaben im Projekt entwickelt und in Austausch mit INNOCISE weiter optimiert. INNOCISE unterstützte dabei mit der Anbindung des Sensors an die Haftstrukturen und den Roboter und gab Input zu anwendungsrelevanten Fragestellungen, wie die Adaption an neue Haftstrukturen oder auch die effiziente Handhabung durch ein modulares Systemdesign (siehe AP 2).

Zu Beginn wurden verschiedene Designkonzepte diskutiert und einzelne Spulen durch das Fraunhofer IZFP erprobt. Daraufhin wurde ein erstes Sensordesign entwickelt, welches aus einer Sende- und drei Empfangsspulen besteht. Auf Basis von Wirbelströmen lässt sich mit diesen Spulen der Abstand zu einer leitfähigen Referenzschicht messen, wodurch das Deformationsfeld der nachgiebigen Stützstruktur zwischen Spulen und Referenzschicht bestimmt werden soll. Ein Prototyp dieses ersten Designs ist in Abbildung 4 dargestellt.

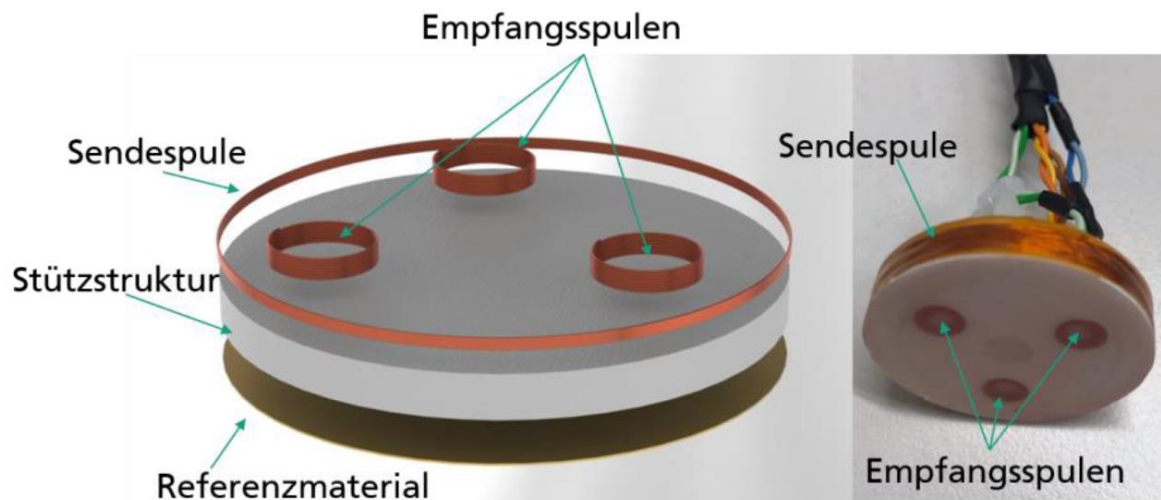


Abbildung 4: Links: Schematische Darstellung des Sensorsystems, Rechts: Foto eines Prototypens.

Das Messsystem besteht aus zwei Komponenten: Dem Sensor als Messsonde und der Elektronik als Signalgenerator und Datenaufnehmer. Hierbei wird der Sensor, wie oben beschrieben, aus Spulen aufgebaut und bietet dadurch frei konfigurierbare Designoptionen. Die Elektronik besteht aus einer Platine, welche primär als IQ-Demodulator dient und eine Signalanregung erlaubt. Diese Platine wurde durch ein kommerziell verfügbares FPGA Board (RedPitaya) ergänzt. Diese Modularität und die einfach gehaltene Datenübertragung wahlweise via TCP/IP oder UDP ermöglicht eine einfache Erweiterung des Systems um mehr Rechenpower, um eine höhere Abtastrate und somit eine besser Echtzeitauflösung zu ermöglichen. Das entwickelte System und die darauf basierten wissenschaftlichen Ergebnisse wurden im Rahmen des Projekts durch das Fraunhofer IZFP in der Publikation „Soft Tactile Coil-Based Sensor for Misalignment Detection of Adhesive Fibrillary Gripping Systems“ veröffentlicht.⁵

Im Laufe des Projekts wurden verschiedene Sensorkonzepte, wie handgewickelte und gedruckte Spulen erprobt, sowie mehrere Spulengeometrien (rechteckig, hexagonal, kreisförmig) angefertigt und getestet. Eine Auswahl dieser Spulen ist in Abbildung 5a zu sehen. Um die Sensoreigenschaften zu überprüfen, wurden Magnetfeldmessungen und Testmessungen mit den unterschiedlichen Geometrien und unterschiedlichen Lagenaufbauten durchgeführt. Nach der Auswertung der elektrischen Kennwerte wurde die vierlagige PCB (Printed Circuit Board) Spule mit kreisförmiger

⁵ Herter, Simon, Philipp Stopp, and Sarah CL Fischer. "Soft Tactile Coil-Based Sensor for Misalignment Detection of Adhesive Fibrillary Gripping Systems." *Advanced sensor research* 3.1 (2024): 2300098.

Geometrie ausgewählt, da diese das stärkste Magnetfeld in Messrichtung und ideale elektrische Parameter (Induktivität, Impedanz) aufweist.

In mehreren Iterationsschritten wurde dieses Konzept vom Fraunhofer IZFP gemeinsam mit INNOCISE weiter optimiert. So wurde beispielsweise die Geometrie der Sensorplatine und die Position der elektrischen Kontakte iterativ so angepasst, dass eine stabile Anbindung über ein modulares Trägersystem an den Roboteradapter ermöglicht wird (siehe AP 2). Zusätzlich wurde eine weitere Version mit einem innovativen Einkanalssystem bestehend aus 4 Empfangsspulen (eine zusätzliche

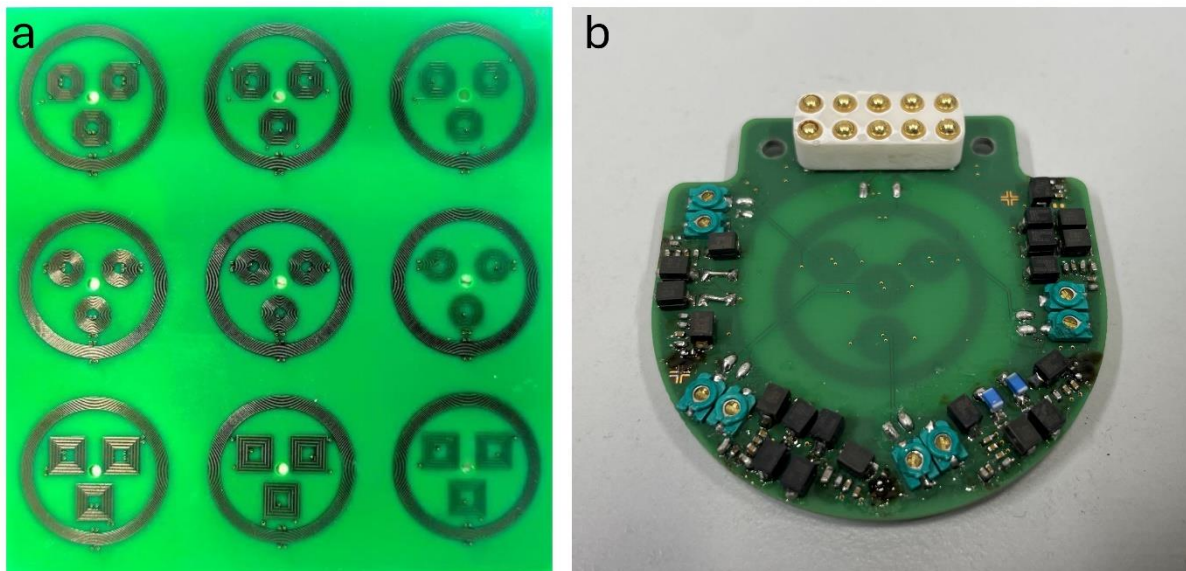


Abbildung 5: a) Erste gefertigte Prototypen der PCB-Spulen in verschiedenen Ausführungen. b) Finales Sensordesign mit 5 Spulen im Einkanalssystem bestückt mit Filtern, Verstärkern und Schleifkontaktpins.

Spule im Mittelpunkt des Sensors) entwickelt, welche eine bessere Erkennung von gekrümmten Oberflächen bietet. Dieses neue Einkanalssystem bietet den Vorteil, dass lediglich ein Empfangssignal für die Abtastung der vier Empfangsspulen notwendig ist, da die einzelnen Signale durch Filter auf der Platine wieder separiert werden können. Diese finale Version des Sensors ist in Abbildung 5b abgebildet.

Dadurch, dass in jedem dieser beschriebenen Iterationsschritte zur Optimierung des Sensors ein neues Design entwickelt, gefertigt und getestet werden musste, kam es aufgrund von Lieferverzögerungen elektronischer Bauteile zu Verzögerungen, welche sich auch auf die darauf aufbauenden Arbeitspakete 1.8-1.10 auswirkte. Diese Entwicklung und Optimierung des Sensorsystems waren notwendig, um die Qualität der damit aufgenommen Messdaten sicherzustellen, welche die Basis für die Entwicklung und das Training der KI-Algorithmen darstellen und nicht hinreichend durch synthetische Daten ersetzt werden konnten.

Sensorintegration in Teststrukturen

Um eine geeignete Anbindung der Haftstrukturen an den Sensor sicherstellen zu können, musste ein geeignetes System aus Stützstruktur (Schaum), Targetmaterial (elektrisch leitfähige Schicht als Referenz für die Sensoren) und Klebung gefunden werden, welches allen Anforderungen (z.B. Einfluss auf die Adhäsionskraft, mechanisches Verhalten (Steifigkeit, Festigkeit) und Verarbeitbarkeit) entspricht. Abbildung 6 zeigt eine schematische Darstellung der einzelnen Komponenten.

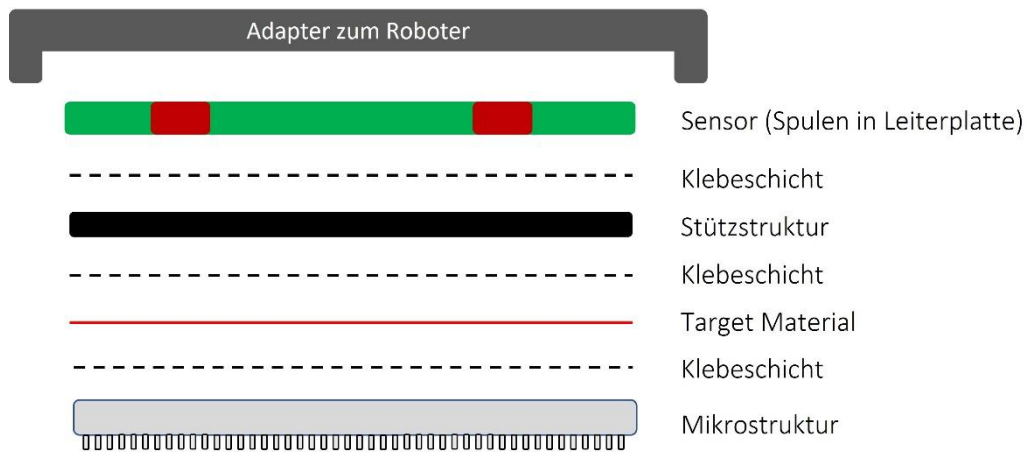


Abbildung 6: Schematische Darstellung aller Komponenten des kompletten Sensorsystems.

Stützstruktur:

Die Stützstruktur wurde so gewählt, dass ihr negativer Einfluss, beispielsweise durch eine Verringerung der Adhäsionskraft der Mikrostruktur, so gering wie möglich ist. Dazu wurden im ersten Schritt durch INNOCISE ausgiebige Untersuchungen durchgeführt, um den Zusammenhang zwischen verschiedenen Schäumen unterschiedlicher Dicke und Steifigkeit und deren Einfluss auf die Ablösekraft der Mikrostruktur festzustellen. In Abbildung 7a sind die untersuchten Proben zu sehen, bestehend aus je einer Mikrostruktur mit unterschiedlichem Schaum. Um die Adhäsion dieser Proben zu messen, wurden spezielle Metallträger anfertigen lassen, worauf die Proben aufgeklebt wurden, um sie damit in die Adhäsionsprüfmaschine bei INNOCISE einzuspannen.

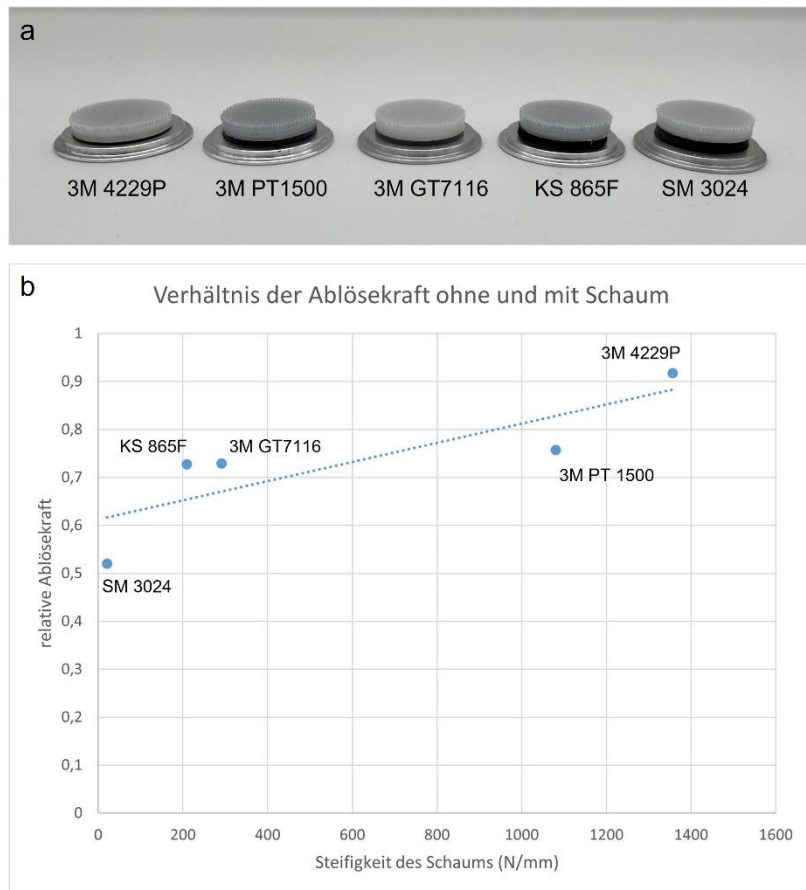


Abbildung 7: Einfluss der Stützstruktur auf die Ablösekraft. a) Foto der untersuchten Proben mit unterschiedlichen Schäumen. b) Einfluss der Steifigkeit des Schaums auf die Ablösekraft der Haftstruktur.

In Abbildung 7b ist der Einfluss einer Auswahl der getesteten Schäume auf die Ablösekraft gegen die Steifigkeit der Schäume aufgetragen. Die relative Ablösekraft beschreibt hier das Verhältnis zwischen der Ablösekraft einer Haftstruktur mit einer Stützstruktur zur Ablösekraft derselben Haftstruktur ohne Stützstruktur. Niedrigere Werte beschreiben dabei einen stärkeren Abfall der Ablösekraft bei Verwendung der entsprechenden Stützstruktur und sind somit als negativer zu interpretieren. Dabei wurde ersichtlich, dass die Ablösekraft tendenziell stärker abnimmt, je geringer die Steifigkeit des Schaums ist. Aus diesem Gesichtspunkt wäre eine möglichst steife Stützstruktur optimal, um die maximale Adhäsion auf einer ebenen, glatten Oberfläche zu erzielen. Dies würde allerdings die Anpassungsfähigkeit an Oberflächen komplexerer Geometrie (z.B. Linsen) negativ beeinflussen. Weiterhin verringert sich bei einem sehr harten Schaum die „Auflösung“ der Messintelligenz, da gleiche Kräfte zu einer geringeren Deformation des Schaums führen, welche durch die Sensorik gemessen wird. Somit mussten weitere Faktoren in Betracht gezogen werden. Alle getesteten Schäume zeigten viskoelastische Materialeigenschaften und ein nichtlineares Deformationsverhalten. Da dauerhafte Verformungen des Schaums, z.B. durch längeres Andrücken an ein Objekt, zu fehlerhaften Messwerten führen könnten, musste überprüft werden, wie hoch der viskose Anteil des Schaums ist und wie sich der Schaum unter verschiedenen Belastungen verhält. In Abbildung 7 sind die Kraft-Weg Kurven zweier Schäume dargestellt, welche durch wiederholtes Belasten des Schaums zwischen 100 N Druck- und Zug-Kraft bestimmt wurden.

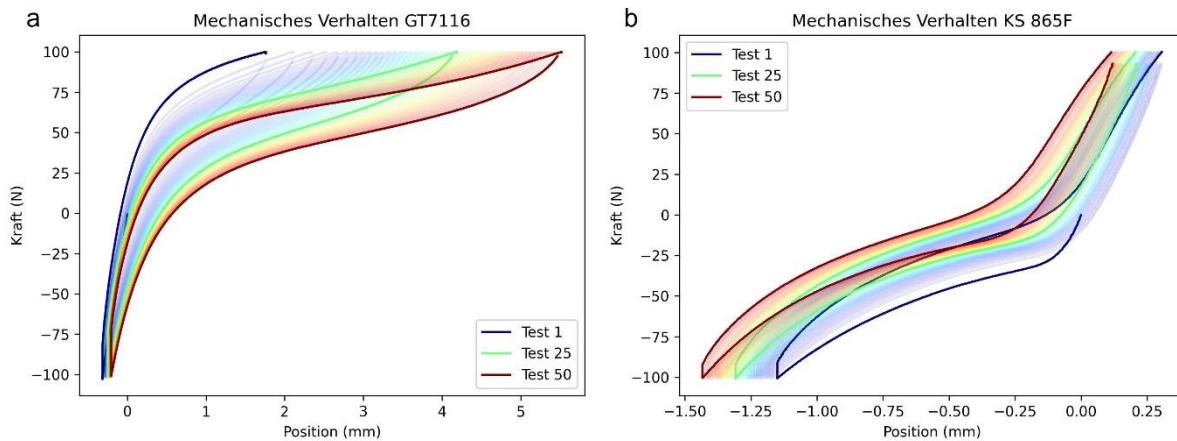


Abbildung 8: Gemessene Kraft-Weg-Kurven der Schäume "3M GT7116" (a) und "KS 865F" (b).

Nach allen durchgeführten Tests eignete sich der Schaum „KS 865F“ am besten als Stützstruktur zwischen Sensor und Targetmaterial, da er die folgenden Eigenschaften besitzt:

- Geringe Steifigkeit unter Kompression → hohe Auflösung für die Messung der Verformung des Schaums
- Höhere Steifigkeit unter Zug → geringer negativer Einfluss auf das Adhäsionsverhalten der Haftstruktur
- Geringe dauerhafte Verformung bei wiederholten Anpress- und Ablösevorgängen

Um zu überprüfen, ob der Schaum auch bei höheren Zyklenzahlen mechanisch stabil bleibt, wurden Dauertests durchgeführt, bei der die Haftstruktur mit besagtem Schaum als Stützstruktur wiederholt auf eine Referenzoberfläche angedrückt und wieder abgezogen wurde. In regelmäßigen Abständen wurde die Abzugskraft des Greifers auf der Referenzoberfläche und Glas gemessen. Die Ergebnisse dieses Versuchs sind in Abbildung 9 grafisch dargestellt. Dabei konnte beobachtet werden, dass der

Schaum über die gesamte Testdauer mechanisch stabil blieb, während die Adhäsionskraft der Haftstruktur auf Glas nach über 2 Millionen Zyklen nahezu konstant war.

Diese Erkenntnisse ermöglichten nicht nur die Auswahl einer geeigneten Stützstruktur für diesen Anwendungsfall, sondern lieferten generell wichtige Informationen bezüglich des Einflusses verschiedener Stützstrukturen in Kombination mit bioinspirierten Haftstrukturen. Dieses Wissen trägt zur Expertise von INNOCISE im Bereich der industriellen Anwendung solcher Greifsysteme bei und kann auch in anderen Applikationen verwertet werden.

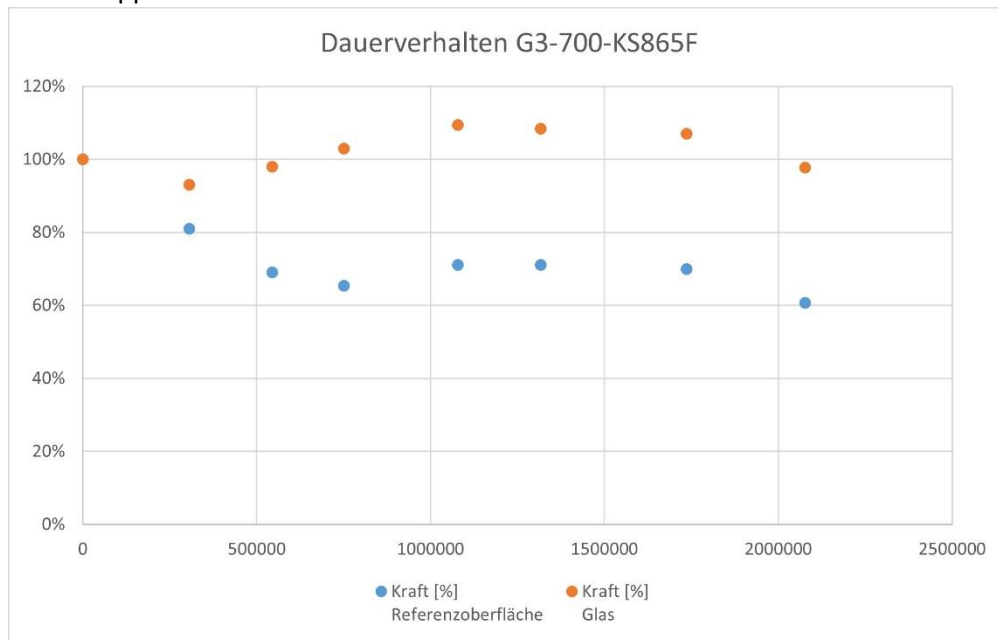


Abbildung 9: Dauerverhalten eines Adhäsionsgreifers mit ausgewählter Stützstruktur (Schaum KS 865F).

Target Material:

Durch das Fraunhofer IZFP wurde eine Vorauswahl aus 3 leitfähigen Materialien in Form dünner Schichten getroffen. Diese wurden auf ihre elektromagnetischen Eigenschaften untersucht, wobei das leitfähige Gewebe „Shieldex Kassel RS“ die besten Ergebnisse brachte. Anschließend wurden die 3 Materialien durch INNOCISE auf ihre Verarbeitbarkeit und ihren Einfluss auf das Adhäsionsverhalten einer Haftstruktur überprüft. Da sich insgesamt das Targetmaterial nur sehr geringfügig auf das Adhäsionsverhalten auswirkt, wurde das Material „Shieldex Kassel RS“ für das weitere Vorgehen ausgewählt, da es die besten elektromagnetischen Eigenschaften aufwies.⁶

KI-Algorithmen

Um die gemessenen Sensordaten auswerten zu können und die daraus notwendigen Informationen zu ziehen, mussten klassische und KI-gestützte Datenverarbeitungsalgorithmen ausgewählt und entwickelt werden. Diese Algorithmen sollen aus den Messdaten quantitative Rückschlüsse über den Greifprozess liefern, wie der Verkippung zwischen Greifer und Bauteil (Level 1), der Anpresskraft (Level 2) oder Objekteigenschaften (z.B. Unterscheidung von flachen und gekrümmten Objekten, Level 3). Mit diesen Informationen, welche als Input für die auto-adaptive Robotersteuerung dienen, soll dann der Greifprozess flexibler und zuverlässiger gestaltet werden können.

⁶ Herter, Simon, Philipp Stopp, and Sarah CL Fischer. "Soft Tactile Coil-Based Sensor for Misalignment Detection of Adhesive Fibrillary Gripping Systems." *Advanced sensor research* 3.1 (2024): 2300098.

Dazu wurden über mehrere Monate umfangreiche Versuche durch das Fraunhofer IZFP am entwickelten Laboraufbau durchgeführt, in denen eine sensorierte Haftstruktur kontrolliert auf eine Referenzoberfläche angedrückt und wieder abgezogen wurde. Die aufgezeichneten Messwerte dienen als Datengrundlage für die Entwicklung der Auswertelgorithmen. INNOCISE hat hierbei erfolgreich bei der Bestimmung sinnvoller Rahmenbedingungen wie der Abtastrate, Reaktionszeit, Beschreibung des initialen Kontaktes, etc. unterstützt. Durch oben beschriebene Voruntersuchungen bei INNOCISE wurden außerdem gemeinsam mit dem Fraunhofer IZFP geeignete Haftstrukturen, Referenzobjekte und Testparameter für die Datenerhebung am Laboraufbau gewählt.

Zur parallelen Ausrichtung der Haftstrukturen mit dem Referenzobjekt wurde basierend auf den optischen Kamera-Daten ein automatisiertes Ausrichten entwickelt. INNOCISE unterstützte das

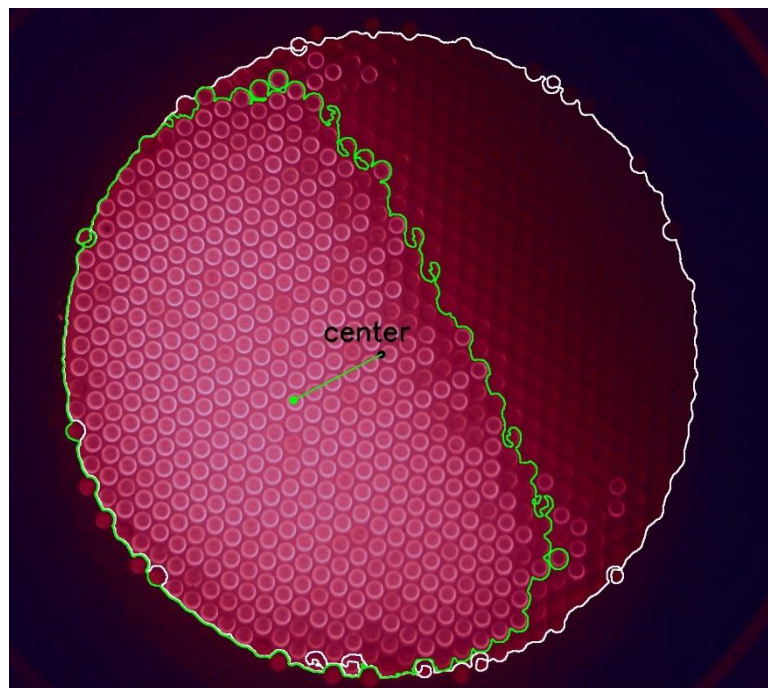


Abbildung 10: Bild der Kontaktfläche zwischen Haftstruktur und verkipptem Glassubstrat. Visuell dargestellt ist die Verschiebung des Flächenschwerpunkts der Kontaktfläche relativ zum Mittelpunkt der gesamten Haftstruktur.

Fraunhofer IZFP bei der automatischen Detektion der Kontaktfläche. Hierfür wurden die Bilder der Kontaktfläche mittels gängiger Computer Vision Algorithmen wie einem Canny Edge Detector ausgewertet (siehe Abbildung 10). Während des Anfahrprozesses wurden kontinuierlich Bilddaten aufgenommen, welche hinsichtlich der Bewegung des Kontaktflächen-Schwerpunkts ausgewertet wurden. Anhand einer Bildreihe (Anfahrprozess) konnte so die Verschiebung des Schwerpunkts als Vektor berechnet werden. Bei einem ideal ausgerichteten Pad sollte sich dieser Schwerpunkt nicht verschieben, wodurch ausgehend von diesem Vektor ein Schwellwert definiert wurde, ab welchem das Pad als ausgerichtet gilt. Ausgehend von den berechneten Schwerpunktsvektoren, kann entsprechend eine Ausgleichsbewegung durchgeführt werden. Dieser Ablauf wird iterativ so lange wiederholt, bis der gesetzte Schwellwert unterschritten wird.

Level 1: Erkennung der Verkippung und Lokalisierung des Kontakts

Die aufgenommenen Sensordaten wurden im ersten Schritt softwareseitig gefiltert, um hochfrequente Störanteile zu eliminieren. Anschließend wurden die demodulierten Signalanteile in die Amplitude und die Phase des Signals rückgerechnet (vgl. Abbildung 11a). Die so erhaltene Amplitude korreliert für jede Empfangsspule mit der relativen Abstandsänderung der leitfähigen Referenzschicht zu ebendieser. Zur Triangulation einer Ebene, welche als Ersatzschaubild für die Verkippung des Pads dient, ist es erforderlich die ermittelten Amplitudenwerte in Abstandswerte umzurechnen. Hierfür wird der Sensor kalibriert, was bedeutet, dass definierte Wege gefahren und gleichzeitig das

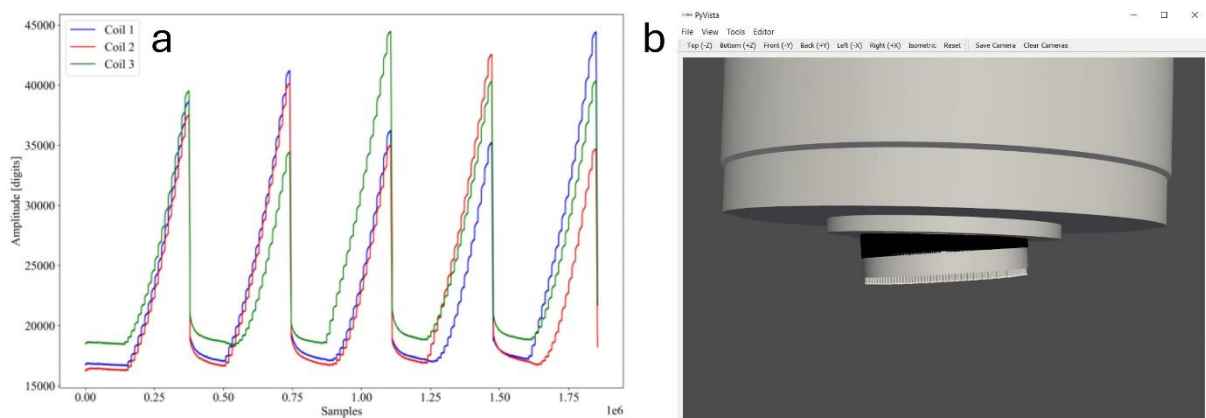


Abbildung 11: a) Aufgenommene Sensordaten der einzelnen Spulen bei verschiedenen Kippwinkeln. b) Visuelle Darstellung der berechneten Verkippungswerte aus den Sensorwerten.

Sensorsignal gemessen wird. Anschließend lässt sich über polynomiales Fitting eine Kalibrierkurve berechnen, durch deren Koeffizienten die Sensorwerte in relative Abstandsänderung umgerechnet werden. Zur Veranschaulichung dieser Daten wurde durch INNOCISE ein Programm entwickelt, welches die durch die Messintelligenz gemessene Orientierung der Haftstruktur relativ zum Roboterflansch mit Hilfe von animierten CAD-Modellen visuell und in Echtzeit anschaulich darstellt (vgl. Abbildung 11b).

Folgend kann durch die Bestimmung des Ebenennormalenvektors eine Vorhersage des Kippwinkels und der Ausrichtung erfolgen. Dies wurde erfolgreich für verschiedene Kippwinkel gezeigt. Die Vorhersage der Verkippungsrichtung funktioniert hierbei besonders früh und bei Objekten beliebiger Form (soweit getestet), schon wenn nur ein kleiner Teil des Pads ($< 50\%$) in Kontakt mit dem Substrat ist. Die quantitative Vorhersage des Verkippwinkels konnte an ebenen Flächen bei ausreichendem Kontakt mit einer zuverlässig nachgewiesen werden. Bei gekrümmten Oberflächen kann die Richtung korrekt vorhergesagt werden, allerdings ist die quantitative Vorhersage eingeschränkt, da dem ersten Sensorkonzept eine Empfangsspule inmitten des gleichschenkligen Dreiecks fehlte. Aus diesem Grund wurde dem innovativen ‚Einkanalsystem‘ eine zusätzliche Empfangsspule hinzugefügt, um auch die Vorhersagequalität bei nicht-planaren Flächen zu verbessern (vgl. Kapitel Auswahl und Fertigung der Sensorik). Die Algorithmik sowie die erzielten Ergebnisse sind in der oben beschriebenen Veröffentlichung des Fraunhofer IZFP genauer beschrieben⁷.

Exemplarische Ergebnisse der Winkelvorhersage bei optimaler Anpresskraft sind in Tabelle 1 gegeben. Dabei konnten Verkippwinkel zwischen $0-1^\circ$ sehr präzise vorhergesagt werden. In diesem Bereich ist wirkt sich eine Verkippung besonders stark auf das Adhäsionsverhalten der Haftstrukturen aus,

⁷ Herter, Simon, Philipp Stopp, and Sarah CL Fischer. "Soft Tactile Coil-Based Sensor for Misalignment Detection of Adhesive Fibrillary Gripping Systems." *Advanced sensor research* 3.1 (2024): 2300098.

weshalb hier eine hohe Genauigkeit von großer Bedeutung ist. Auch größere Verkippwinkel bis zu mehreren Grad können noch zuverlässig durch die Messintelligenz bestimmt werden.

Tabelle 1: Ergebnisse der vorhergesagten Kippwinkel im Vergleich zu den eingestellten Kippwinkeln.

Kippwinkel [Grad]	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Berechneter Winkel [Grad]	-1.07	-0.83	-0.65	-0.43	-0.14	0.23	0.43	0.65	0.9	1.09
Std. Abweichung [Grad]	0.018	0.011	0.007	0.0018	0.014	0.017	0.026	0.048	0.004	0.05

Level 2: Quantifizierung der Anpresskraft

Basierend auf den aufgenommenen Messdaten wurden maschinelle Lernalgorithmen sowie Feature Extraction Methoden zur Kraftvorhersage entwickelt und erprobt. Fokussiert wurde sich bei der Modellbildung auf lineare Regressionsmodelle. Zur Erstellung der Datenbasis wurden die Messwerte der Kraftmessdose und die Sensordaten über die Zeitstempel und die bekannten Abtastraten synchronisiert, wodurch ein Datenset zur Vorhersage der Kraft erstellt werden konnte.

Zu Beginn wurden aus den aufgenommenen Rohdaten Features extrahiert, welche anschließend in einem maschinellen Lernmodell verwendet wurden. Die Rohdaten bestehen aus einem I und Q Part (In-Phase-&-Quadrature Modulation) für jede Spule. Aus diesen Daten wurden die Phasen- und Amplitudeninformationen extrahiert, welche anschließend in reale Deformationen der Stützstruktur (in μm) umgewandelt wurden. Zusätzlich wurden der berechnete Winkel und das komprimierte Volumen als Features genutzt. Anschließend wurde eine konventionelle Verarbeitungspipeline erprobt. Hierzu wurden die Rohdaten skaliert (Standardscaler) und anschließend mittels einer multiplen linearen Regression (MLR) verarbeitet.

Das Modell ist in der Lage Druck- und Zugkräfte in einem vorgegeben trainierten Kraftbereich (-10 N bis 30 N) vorherzusagen. Abbildung 12 zeigt Ergebnisse des ausgewählten Modells für die Vorhersage von Validations- und Testdaten. Dabei lag die mittlere quadratische Abweichung (MSE = mean squared error) bei etwa 1,6 N, womit die optimale Anpresskraft im Handhabungsprozess präzise eingestellt werden kann. In weiteren Versuchen wurden gezielt Randbedingungen variiert, um die Robustheit der Modelle gegen sich ändernde Umwelteinflüsse (bspw. Temperatur, Geschwindigkeiten) zu validieren.

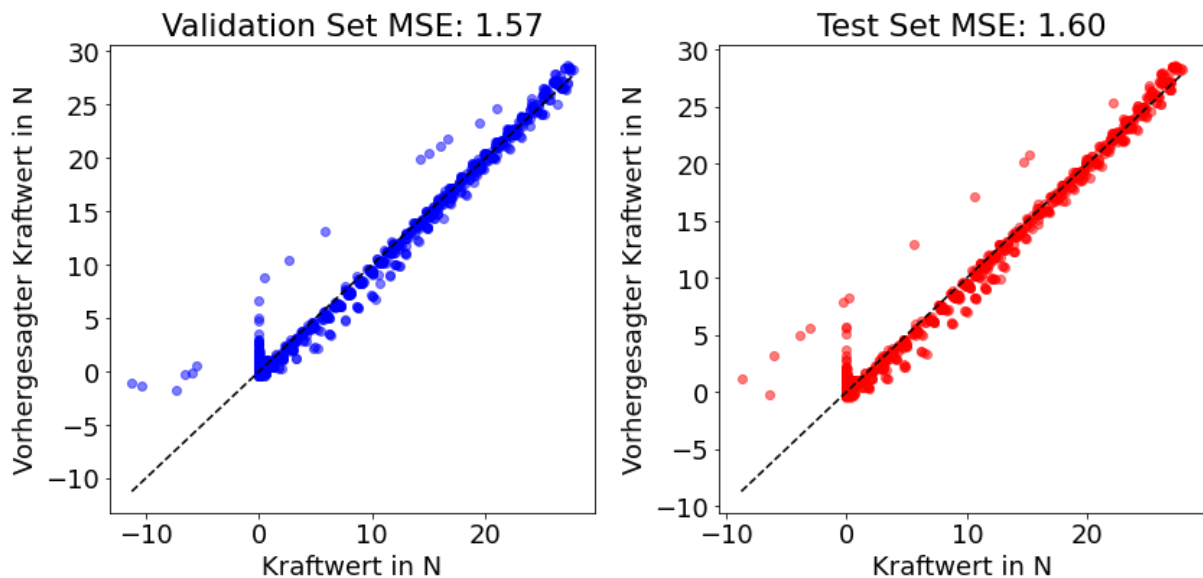


Abbildung 12: Ergebnisse des trainierten linearen Regressionsmodells für den Validation- und Testdatensatz.

Des Weiteren wurde die Übertragbarkeit der Modelle beim Wechsel der Stütz- und Haftstruktur getestet, indem das trainierte Modell für weitere Kombinationen genutzt und validiert wurde. Es wurde festgestellt, dass das Modell unbeeinflusst vom Stütz- und Haftstrukturwechsel ist. Dies ist durch die Tatsache zu begründen, dass für die Features des Modells lediglich physikalisch kalibrierte Messgrößen genutzt wurden (Distanzen, Volumina, etc.). Hierdurch übernehmen die verschiedenen Kalibrierfaktoren die Aufgabe die Übertragbarkeit zu sichern. Hierdurch muss das Modell nicht einzeln für jede Sensor-Stützstruktur-Haftstruktur Kombination erstellt werden, wodurch sich eine einfachere und wirtschaftlich effiziente Applikation der Modelle ergibt.

Level 3: Erkennung von Objekteigenschaften

In Level 3 hat sich das Fraunhofer IZFP mit der Vorhersage der Kontaktfläche befasst. Hierzu wurden die aufgenommen Bilddaten analysiert und mittels der zuvor beschriebenen Algorithmik ausgewertet. Es konnte so ein Datenset erstellt werden, welches zu jedem Sensorsignal ein aufgenommenes Kontaktbild beinhaltet. Die Kontaktbilder wurden mit speziellen Verfahren (Canny Edge, Hough Transformation) ausgewertet, womit die Anzahl der Pillar in Kontakt bestimmt werden konnte, woraus anschließend die Kontaktfläche der Haftstruktur abgeleitet wurde. Ein Beispiel für ein solches Bild der Kontaktfläche und die zugehörige Detektion der Pillar ist in Abbildung 13 zu sehen. Pillar, die mit dem Glassubstrat in Kontakt sind, wurden in der rechten Abbildung grün markiert.

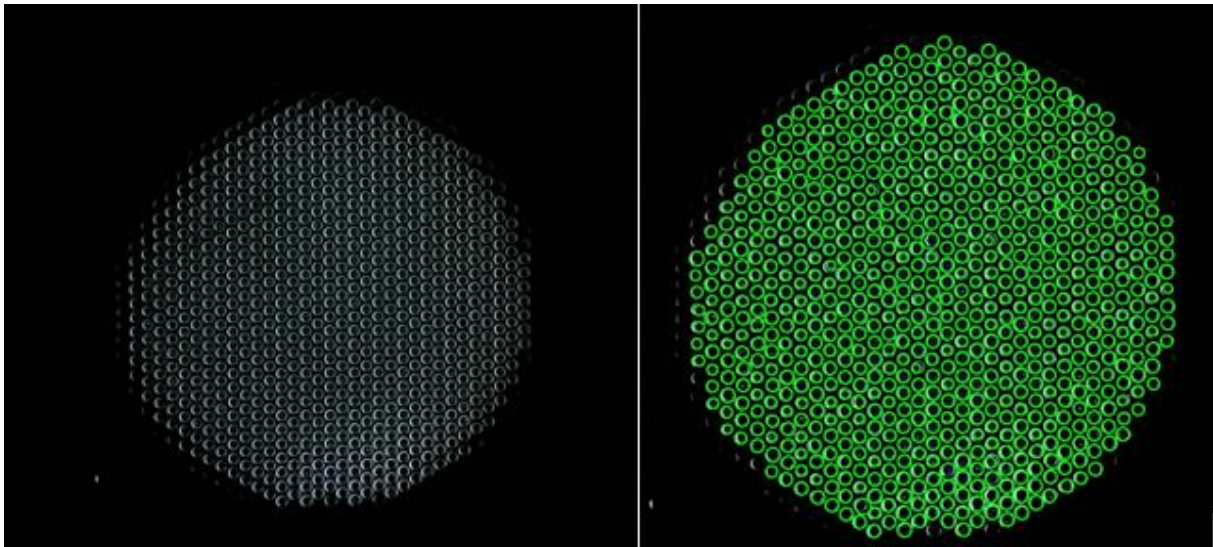


Abbildung 13: Links: Aufgenommenes FTIR-Bild. Rechts: Ausgewertetes FTIR-Bild auf dessen Basis die Pillar in Kontakt gezählt werden.

Anschließend wurden verschiedene Features sowie Modelle erprobt, welche in Tabelle 2 aufgezählt sind. Die linke Spalte gibt dabei die Modelltypen und die rechte Spalte die verwendeten Features für das Training des KI-Modells an.

Tabelle 2: Modell und Featurekonfigurationen

Modelle	Features
Polynomielle Regression	Sensordaten (Distanz)
Support Vector Regression	Sensordaten + zeitl. Features
Random Forest	Sensordaten + Summe + Varianzen
XGBoost	Sensordaten + zeitl. Features + Summe + Varianzen

Bei den verwendeten Features handelt es sich um die kalibrierten Distanzwerte der Sensoren, sowie zeitliche Features, die aus den vorherigen Distanzwerten bestehen (sog. Lag Features), sowie statistische Features in Form der Summe und Varianz. Als zuverlässigstes Modell mit höchster Performance hat sich die Kombination aus allen Features (Distanzwerte, zeitlichen Features, statistische Features) und einer Support Vector Regression gezeigt. In Abbildung 14 ist der entsprechende Graph exemplarisch für die Vorhersage der Kontaktfläche mittels Support Vector Regression während eines Anpressvorgangs dargestellt. Bei ca. 800 Pillar ist das Pad vollständig in Kontakt.

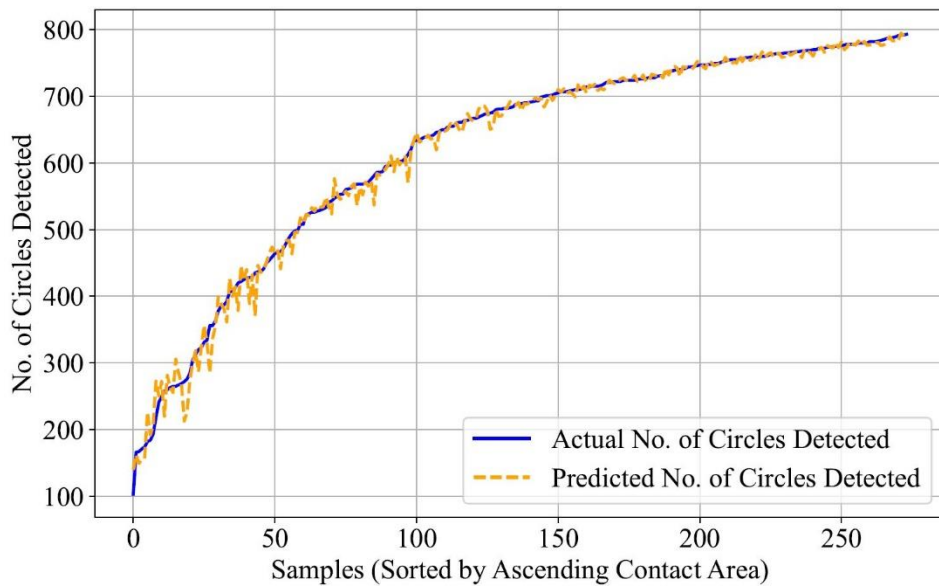


Abbildung 14: Ergebnisse der Kontaktflächenvorhersage mittels einer Support Vector Regression.

Bei Betrachtung der Verteilung der Vorhersagefehler (vgl. Abbildung 15) ist zu erkennen, dass das Fehlerbild einer Normalverteilung ähnelt. Dies lässt darauf schließen, dass die meisten Vorhersagefehler sehr klein sind und somit das Modell die Kontaktfläche sehr zuverlässig bestimmen kann.

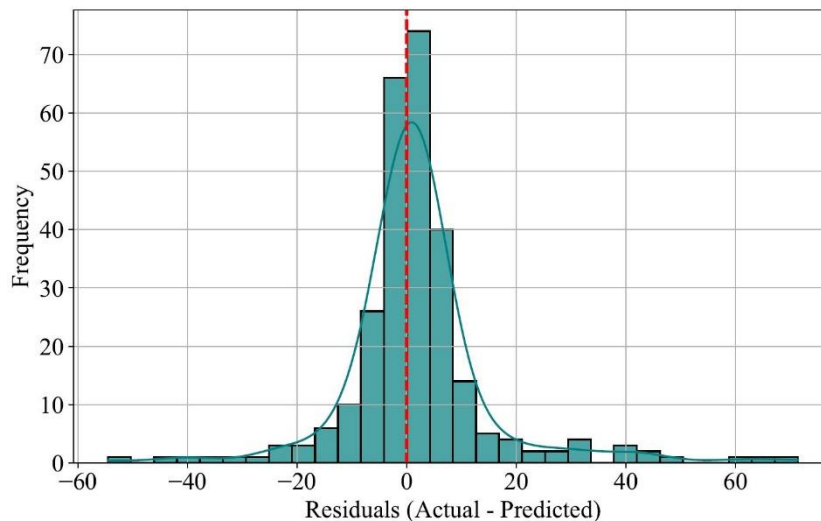


Abbildung 15: Verteilung der Vorhersagefehler des Machine Learning Modells auf Basis der Support Vector Regression.

Zusammenfassung:

In Arbeitspaket 1 wurde ein Sensor samt Elektronik entwickelt, welcher sowohl die Winkel- als auch die Kraft- sowie Kontaktflächenvorhersage während des Handhabungsprozesses realisiert. Hierfür wurde eine Kombination aus klassischen Algorithmen zur Winkelvorhersage und maschineller Lernalgorithmen im Falle, der Kraft- und der Kontaktflächenvorhersage etabliert. Die Weiterentwicklung der Objektformdetektion wird auch in der Verwertungsphase noch weiter vorangetrieben.

Basierend auf diesem Lastenheft wurde gemeinsam mit allen Projektpartnern ein Kommunikationsschema für die Schnittstelle zwischen Roboter, Steuer- und Messintelligenz entwickelt, welches für den industriellen Einsatz geeignet ist. Dieses Schema ist in Abbildung 17 dargestellt.

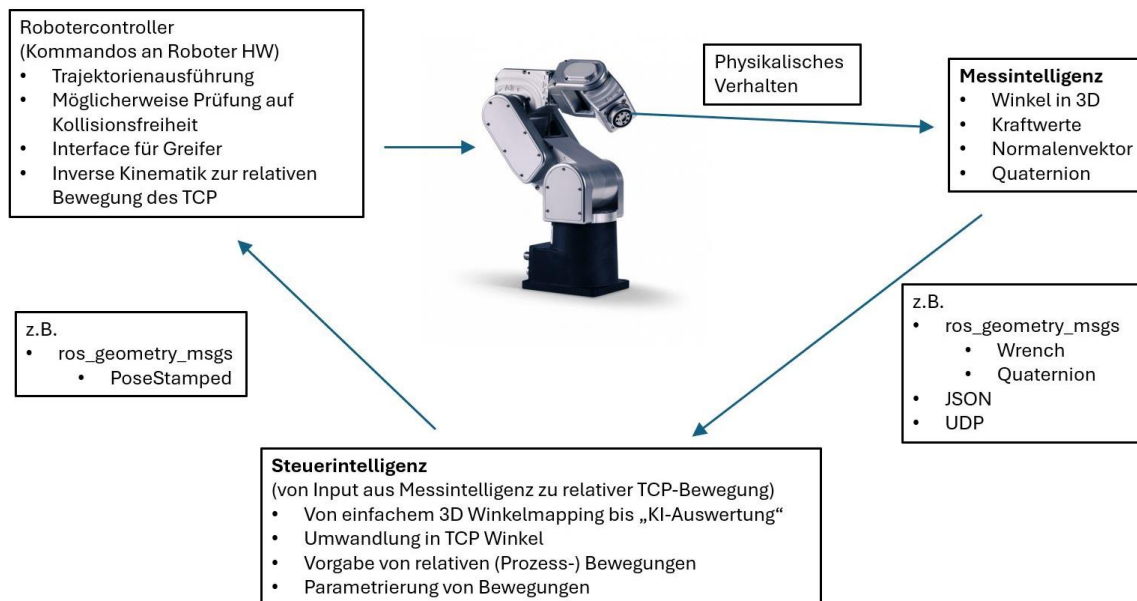


Abbildung 17: Schema für die Kommunikation zwischen Mess- und Steuerintelligenz und Roboter.

Dabei werden die Output-Werte der Messintelligenz im JSON Format (JavaScript Object Notation) über eine UDP-Schnittstelle (User Datagram Protocol) an den PC gesendet, auf dem die Steuerintelligenz ausgeführt wird. In den JSON-Files ist zum Beispiel die Verkippung als Quaternion enthalten und die Kraft als skalarer Wert. Quaternionen sind die kompakteste Darstellung einer Verkippung im Raum und wurde gewählt, um die Dateigröße möglichst gering zu halten und so eine hohe Übertragungsgeschwindigkeit zu ermöglichen. Der Vorteil der UDP-Verbindung im Vergleich zur ursprünglich geplanten TCP/IP Verbindung ist ebenfalls die Übertragungsgeschwindigkeit. Die höhere Übertragungsrate über eine UDP-Schnittstelle vermeidet Verzögerungen bei der Übertragung der Sensordaten und beugt so einer verspäteten Reaktion der Steuerintelligenz vor.

Der Input aus der Messintelligenz wird durch die Steuerintelligenz verarbeitet und in Bewegungsbefehle für den Roboter umgewandelt. Dadurch soll zum Beispiel eine Verkippung beim Anfahren an das Bauteil ausgeglichen werden und die Anpresskraft auf einen optimalen Wert geregelt werden. Diese Bewegungsbefehle werden in der ROS-Sprache (Robot Operating System) an die Robotersteuerung gesendet, welche die Bewegung dann am Roboter ausführt. ROS ist eine herstellerunabhängige Programmiersprache und wurde, wie ursprünglich geplant, ausgewählt, um damit einen flexiblen Einsatz an verschiedenen Robotersystemen zu ermöglichen.

Um die Verzögerungen, die durch Optimierungszyklen der Sensorik in vorangehenden Arbeitspaketen entstanden sind zu minimieren, wurde die Programmierung der Kommunikationsroutinen zu Beginn auf Basis von synthetischen Verkippungs- und Kraftwerten durch das FZI (als Unterauftrag von NEXT.robotics) durchgeführt. Diese konnten an Stelle der später verfügbaren Sensorwerte genutzt werden, um die Kommunikationsroutinen in ROS zu programmieren und die gemeinsam festgelegten Ausgleichs- und Adaptierbewegungen des Roboters umzusetzen. Später konnte dann nach geringfügiger Anpassung der Software der Output des Sensors als Input für die auto-adaptive Robotersteuerung genutzt werden, um die programmierten Bewegungsabläufe umzusetzen. Diese Bewegungsabläufe wurden durch NEXT.robotics und INNOCISE umfangreich an Bauteilen

verschiedener Geometrie (z.B. schräge und plankonvexe Linsen, Keilprismen und komplex geschliffene Glasbauteile) getestet und so iterativ optimiert.

Zur Durchführung der Versuche und einfachen Handhabung durch den Endanwender entwickelte NEXT robotics ein UR-Cap (Software-Erweiterung für Roboter von Universal Robots), da ein Großteil der Versuche an einem UR5e 6-Achs-Roboter durchgeführt wurde. Dieses UR-Cap ermöglicht es dem Benutzer über eine graphische Oberfläche auf dem Bedienpanel des Roboters durch Schieberegler sehr einfach die für Adhäsionsgreifer wichtigsten Prozessparameter, wie z.B. die gewünschte Anpresskraft oder die Anfahrgeschwindigkeit an das Bauteil, einzustellen. Diese Parameter werden dann über ROS an die Steuerintelligenz gesendet, wo sie für die Umsetzung der Ausgleichsbewegung verwendet werden. Ein Foto dieses entwickelten UR-Caps ist in Abbildung 18 zu sehen.

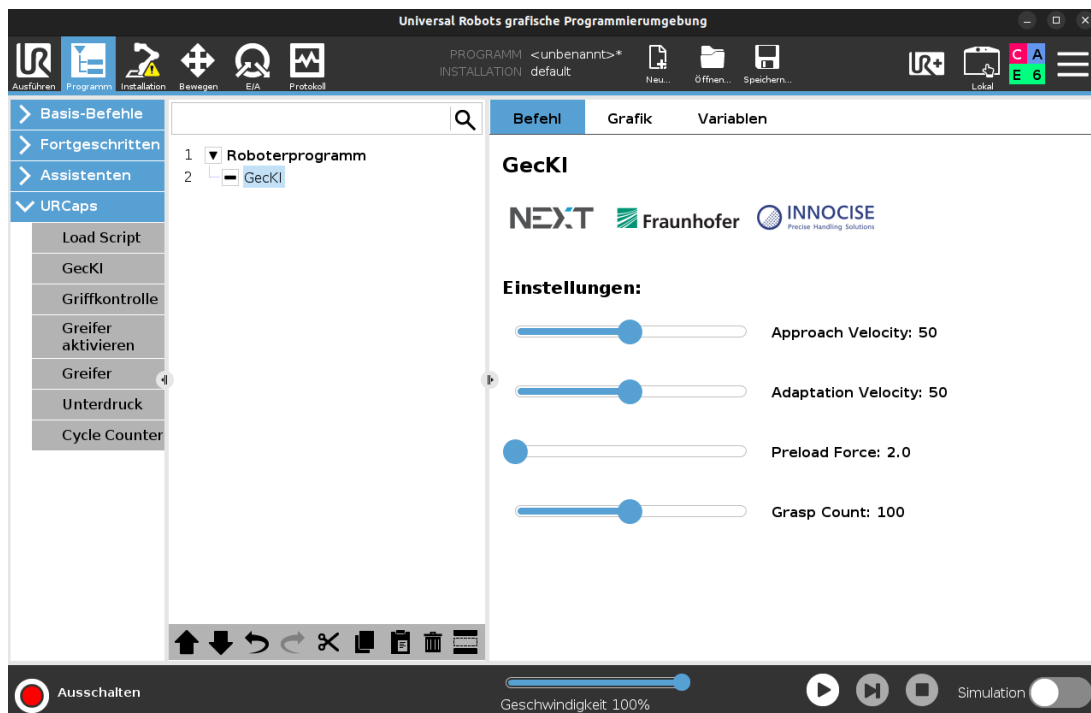


Abbildung 18: Bildschirmaufnahme des entwickelten UR-Caps. Durch die Schieberegler lassen sich die für Adhäsionsgreifer wichtigsten Prozessparameter einstellen.

Trägersystem und modularer Roboteradapter

Um eine mechanische und elektrische Verbindung zwischen Roboter und sensorierter Haftstruktur zu schaffen, wurde zu Beginn als einfacher Ansatz ein Trägersystem mit industriellen Steckverbindern gewählt. Für die ersten Prototypen wurden Steckverbinder der Firmen Amphenol, Lemo und Harting ausgewählt.

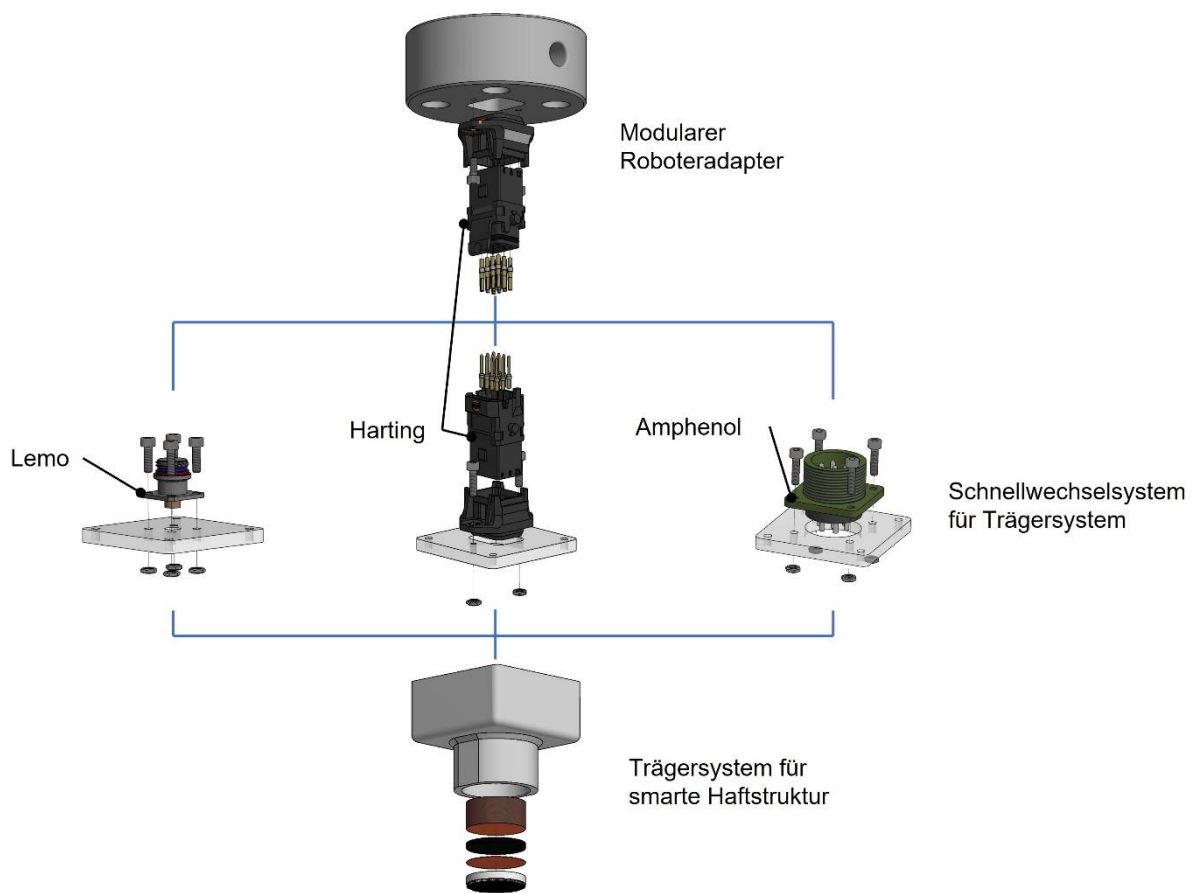


Abbildung 19: Konzept für das schnellwechselbare Trägersystem der smarten Haftstruktur.

Abbildung 19 zeigt eine Übersicht des Konzepts, bestehend aus dem Adapter auf Roboterseite (oben), welcher auf einen Flansch nach ISO 9409-1-50-4-M6 ausgelegt wurde, dem Schnellwechselsystem bestehend aus den Steckverbindern (mittig) und dem Trägersystem unten. Ein Vorteil des vorgestellten Konzepts ist die schnelle und einfache Auswechslung der sensorierten Haftstruktur über den Steckverbinder. Durch die Verbindung mittels Steckverbinder ist auch eine präzise Ausrichtung des Systems am Roboter gewährleistet, da alle Stecker nur in einer Ausrichtung kraftschlüssig miteinander verbunden werden können.

Zur Herstellung der ersten Prototypen für Tests am Roboter wurden die Komponenten mit Hilfe eines 3D-Druckers mit PLA als Filament, sowie lasergeschnittenem Acrylglas gefertigt. Hier wurde im ersten Schritt nur eine Haftstruktur ohne Sensor befestigt, um zu Beginn die mechanische Stabilität des Gesamtsystems während Pick and Place Versuchen am Roboter zu überprüfen. Dabei wurde festgestellt, dass das Wechseln des Trägersystems einfach und schnell möglich war. Weiterhin konnte das Aufheben und Ablegen verschiedener Objekte unter Verwendung unterschiedlicher Ablösemechanismen erfolgreich durchgeführt werden. Es wurde allerdings auch beobachtet, dass durch die Länge des Steckverbinders und somit die Länge des Gesamtsystems beim Aufnehmen und Ablegen des Objekts Momente am Steckverbinder auftreten, welche zu einer leichten Verformung/Biegung im gesamten Adapter führten. Ein weiteres, „nicht-technisches“ Problem bei der Verwendung von kommerziell erhältlichen Industriesteckverbindern war deren sehr schlechte Verfügbarkeit. Aus diesen Gründen wurde das ursprüngliche Konzept verworfen und eine Variante angestrebt, welche die mechanische und elektrische Verbindung separat löst.

Bei diesem verbesserten Konzept wurden fast alle Komponenten durch INNOCISE entwickelt und gefertigt, bzw. später bei einem Lohnfertiger angefertigt. Dabei wurde die mechanische Verbindung über einen Bajonettverschluss gelöst, mit welchem die sensorierte Haftstruktur einfach und schnell über den modularen Adapter am Flansch des Roboters befestigt und wieder gelöst werden kann. Die elektrische Verbindung wurde durch federgelagerte Kontaktpins gelöst, welche direkt auf die verbesserte Sensorplatte gelötet wurden. Das beschriebene optimierte Konzept ist in Abbildung 20 dargestellt.

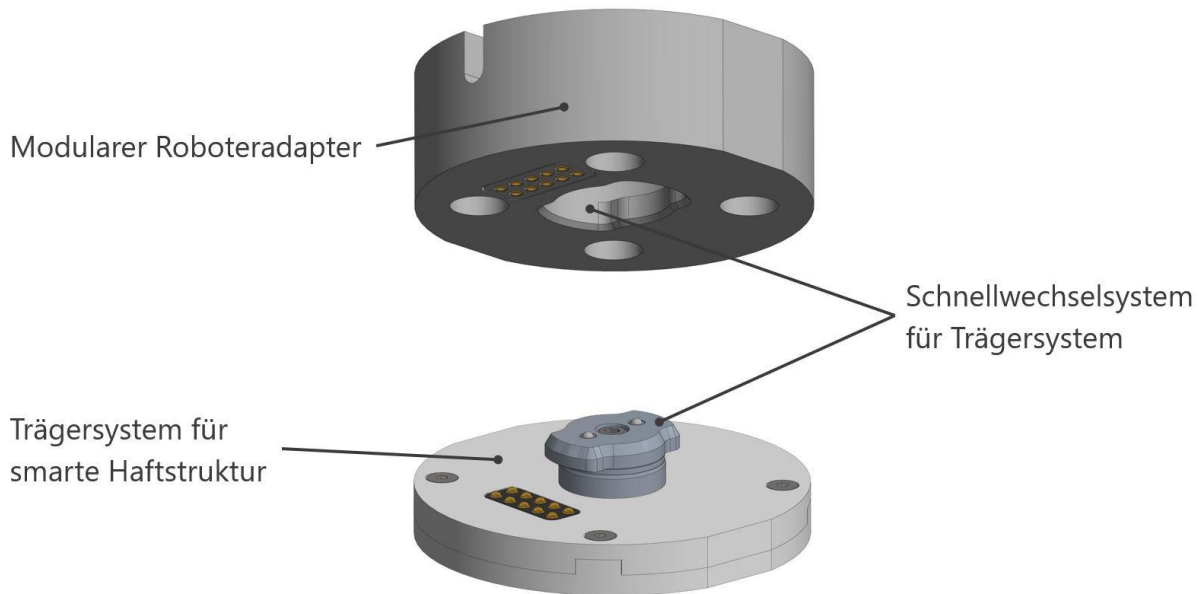


Abbildung 20: Verbessertes Konzept des Trägersystems für die smarte Haftstruktur mit Schnellwechselsystem.

Zum Verbinden des sensorierten Greifers mit dem Roboter wird das Bajonett, welches am Trägersystem der smarten Haftstruktur befestigt ist, in die dafür vorgesehene Aufnahme am Roboteradapter eingesetzt und durch eine Rotation um 90° befestigt. Dabei schleifen die Kontakte mit einer rotierenden, federgelagerten Kugelspitze über die Oberfläche des Roboteradapters, bis sie in der finalen Position die passenden Gegenkontakte berühren, welche den Sensor mit der Messelektronik verbinden. Federkugelspitze im Bajonett und ein Anschlag in der Aufnahme des Roboteradapters sorgen dabei für einen stabilen Halt des Trägersystems. Ein großer Vorteil des neuen Konzepts ist die verbesserte mechanische Stabilität aufgrund der stark verringerten Bauhöhe des Systems. Durch FEM-Analysen wurde zusätzlich sichergestellt, dass die konstruierten mechanischen Komponenten des Trägersystems unter Kräfteinwirkung keine großen Deformationen aufweisen.

Für den modularen Roboteradapter wurden mehrere Varianten entworfen, welche für verschiedene Robotersysteme geeignet sind. Zwei dieser Varianten sind in Abbildung 21 dargestellt, wobei die linke Variante auf einen Roboterflansch nach ISO 9409-1-50-4-M6 ausgelegt wurde, welche beispielsweise bei Robotern der Marke Universal Robots, Kuka oder Stäubli verwendet werden. Die rechte Variante wurde für den Flansch des Meca500 Roboters von Mecademic Robotics entwickelt. Zu sehen ist auch, dass der für diese Anwendung selbst entwickelte Stecker, welcher den Sensor mit der Vorschaltelktronik verbindet, in den Roboteradapter ein- und ausgebaut werden kann. Dies bietet den Vorteil, dass im Falle eines Defekts am Kabel oder den Kontakten nicht der komplette

Roboteradapter ersetzt werden muss, sondern die defekten Komponenten einzeln ausgetauscht werden können, was zusätzlich die Nachhaltigkeit des Gesamtsystems erhöht.

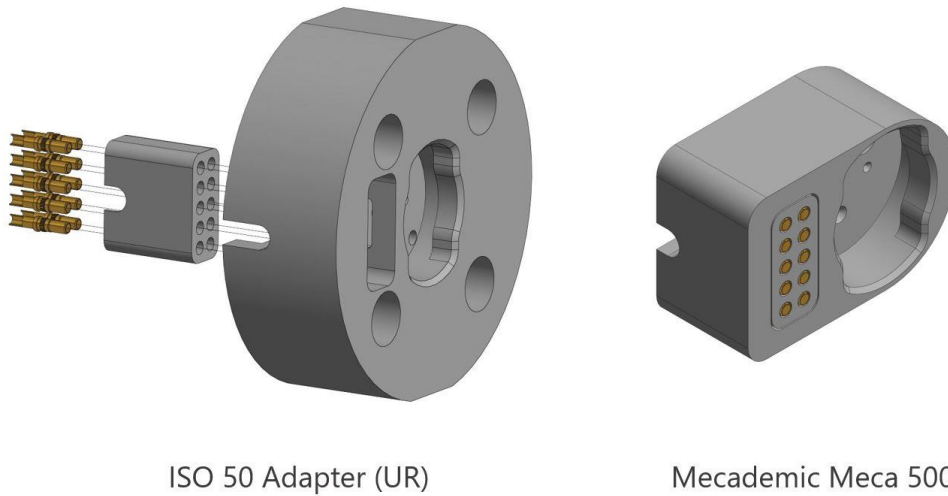


Abbildung 21: Entwickelter modularer Roboteradapter für verschiedene Robotersysteme.

Das verbesserte Konzept des Trägersystems für die smarten Haftstrukturen war im Vergleich zum simpleren Konzept mit Industriesteckern stärker an die Sensorentwicklung gekoppelt, da die Kontakte auf der Sensorplatine neu angeordnet werden mussten und das Trägersystem der smarten Haftstruktur an die neue Sensorgeometrie angepasst werden musste.

Nachdem erste Prototypen des neuen Trägersystems und Roboteradapters mittels 3D-Druck gefertigt wurden, konnten diese auf ihre Funktion getestet werden. Bei Versuchen am Laboraufbau ist aufgefallen, dass ein unerwartet starkes Signalrauschen des neuen Sensors auftritt. Um dieses Problem zu lösen, mussten statt der vorher geplanten 8 Kontakte nun 10 Kontakte verbaut werden, was sowohl eine Anpassung der Sensorplatine als auch des mechanischen Trägersystems erforderte, da ein neuer Stecker mit anderen Abmessungen benötigt wurde. Da die Variante des Steckers mit 10 Kontakten beim Hersteller nicht verfügbar war, wurde dieser im Rahmen des Projekts selbst entwickelt und gefertigt, um die damit verbundenen Verzögerungen so gering wie möglich zu halten. Auch die mechanischen Komponenten mussten iterativ verbessert werden, um eine stabile mechanische und elektrische Verbindung des Trägersystems mit dem Roboteradapter zu ermöglichen.

Das Trägersystem für die sensorierte Haftstruktur sowie die modularen Roboteradapter wurden nach der Optimierung bei einem Lohnfertiger aus POM gefertigt, was einen Hauptbestandteil der im Projekt angefallenen Materialkosten darstellte. Dieser Kunststoff erhöht aufgrund besserer mechanischer Eigenschaften nochmal die Robustheit des Systems im Vergleich zu den 3D-gedruckten Teilen, während eine Beeinflussung des Sensorsystems durch metallische Bauteile vermieden wird.

Arbeitspaket 3: Auto-adaptive Robotersteuerung

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, basierend auf der in AP2 entwickelten Schnittstelle zwischen „Geckotelligent Gripper“ und Roboter eine auto-adaptive Steuerung (Steuerintelligenz) zu entwickeln. Durch diese Steuerintelligenz sollen die während des Greifvorgangs durch die Messintelligenz bestimmten Prozessparameter, wie z.B. die Verkippung zwischen Bauteil und Greifer und die Anpresskraft, verarbeitet und in Bewegungsbefehle umgewandelt werden. Durch diese

Bewegungsbefehle soll der Greifprozess so anpasst werden, dass die Verkipfung während des Greifprozesses ausgeglichen und die Kraft dabei auf einen definierten Zielwert geregelt wird, was den gesamten Greifprozess optimiert und dadurch sicherer und flexibler gestaltet, ohne eine Verlängerung der Prozesszeit durch einen neuen Greifversuch zu verursachen.

Anforderungen und Auswahl der Roboter

Anfangs wurde dazu gemeinsam durch NEXT.robotics und INNOCISE entschieden, dass zwei unterschiedliche Ausgleichsbewegungen des Roboters in die Steuerintelligenz implementiert werden sollen. Einerseits sollte die Möglichkeit bestehen, eine Verkipfung durch Adaptieren beim Anfahren an die Oberfläche eines ebenen Objekts auszugleichen, bis ein vollständiger Kontakt zwischen Greifer und Objekt hergestellt ist. Diese kontinuierliche Adaption soll geschehen, sobald ein verkippter Kontakt zwischen Greifer und Bauteil detektiert wird. Währenddessen wird die Anpresskraft kontrolliert erhöht, bis der vorher eingestellte optimale Wert erreicht ist. Dies bietet den Vorteil, dass die Prozesszeit nicht wesentlich erhöht wird, da kein neuer Greifversuch nötig ist. Die Korrekturbewegung ist jedoch komplex, da eine Rotation um den erkannten Kontaktpunkt zwischen Greifer und Bauteil durchgeführt werden muss, welcher in der Regel nicht im Zentrum der Haftstruktur liegt und jeden Zyklus variieren kann. Daher sollte die zweite Möglichkeit daraus bestehen, dass der Roboter den Kontakt wieder löst, sobald eine verkippte Kontaktaufnahme erkannt wurde, anschließend um den gemessenen Winkel korrigiert und erneut mit dem Objekt in Kontakt fährt. Diese Bewegung ist einfacher umzusetzen, da immer um den Mittelpunkt der Haftstruktur rotiert wird, kostet aber auch mehr Zeit. Bei späteren Tests am Roboter durch INNOCISE wurde außerdem festgestellt, dass in dieser zweiten Variante der initiale Kontakt mit dem Bauteil oft ausreichte, dass dieses beim Versuch den Greifer wieder zu lösen, verschoben wurde. Aus diesen Gründen wurde die erste Variante für weitere Versuche und Optimierungsschritte bevorzugt.

Als Robotersysteme wurden für die Entwicklung der Steuerintelligenz und -schnittstelle im Rahmen des Projekts ein UR5e Roboter der Firma Universal Robots⁸ und ein Meca500 Roboter der Firma Mecademic⁹ ausgewählt. Universal Robots ist mit einem Marktanteil von etwa 50% ein führender Anbieter kollaborativer Roboter und dadurch sehr relevant für die spätere Anwendung einer solchen Steuerintelligenz. Ein weiterer Vorteil dieser Roboter ist die verfügbare ROS-Schnittstelle der Robotersteuerung. Der Meca500 ist der kompakteste 6-Achs-Industrieroboter der Welt und aufgrund seiner sehr hohen Präzision ebenfalls sehr interessant für diesen Anwendungsfall, weshalb er auch für den Laboraufbau am Fraunhofer IZFP genutzt wurde. Nachteil des Meca500 ist allerdings, dass er noch keine ROS-Schnittstelle besitzt, weshalb hierfür die Steuerintelligenz später durch INNOCISE und das IZFP so angepasst wurde, dass die Kommunikation über eine Netzwerkschnittstelle ablaufen konnte. Der Fokus lag in der Entwicklung auf der ROS-Schnittstelle zum UR5e, da diese auch auf anderen ROS-kompatiblen Robotersystemen (z.B. Stäubli, KUKA) eingesetzt werden kann.

Gestaltung der auto-adaptiven Robotersteuerung

Durch NEXT.robotics wurde unter Einbeziehung der anderen Projektpartner ein System entwickelt und aufgebaut, in welchem der UR5e über einen separaten Steuer-PC (Shuttle-PC) über den UR-ROS-Treiber angesteuert wird. Die sensorierte Haftstruktur wird über das Trägersystem am Endeffektor des Roboters angebracht und über die eigene Sensorelektronik angesteuert. Die Daten der Messintelligenz werden über eine UDP-Schnittstelle an den Shuttle-PC gesendet, auf dem die Steuerintelligenz läuft. Der Steuer-PC nutzte Ubuntu 20.04 und ROS Noetic, welches ein Open-Source-Roboterbetriebssystem ist, und häufig in der Robotik-Forschung und -Entwicklung eingesetzt wird. ROS Noetic ist eine

⁸ <https://www.universal-robots.com/de/produkte/ur5-roboter/> (aufgerufen am 30.03.2025)

⁹ <https://mecademic.com/products/meca500-industrial-robot-arm/> (aufgerufen am 30.03.2025)

spezifische Version von ROS, die im Bereich der Robotik als verbreiteter Standard gilt, welches den Vorteil der Eingliederung in die Forschung bringt.

Zur Steuerung des Roboters wurde das Konzept der „Admittance Control“ verwendet. Kräfte und Verkippen, die von der Messintelligenz übergeben werden, wandelt die Steuerintelligenz in Gelenkbeschleunigungen um, die anschließend weiterverarbeitet werden und in Form von Soll-Gelenkpositionen an den Roboterarm übergeben werden. Für die Programmierung wurden folgende frei verfügbare Drittanbieter-Pakete genutzt:

- Universal_robots_driver
https://github.com/UniversalRobots/Universal_Robots_ROS_Driver:
 Der Universal Robots ROS Driver ist eine Softwarekomponente, die es ermöglicht, Universal-Robots-Roboterarme nahtlos in ROS (Robot Operating System) zu integrieren. Diese Art von Treiber wird von vielen Roboterherstellern angeboten, wodurch eine universelle und plattformunabhängige Nutzung ermöglicht wird.
- cartesian_controllers https://github.com/fzi-forschungszentrum-informatik/cartesian_controllers:
 Der Cartesian Controller ist ein ROS-Paket, das eine präzise kartesische Bewegungssteuerung von Roboterarmen ermöglicht. Es bietet Funktionen wie Interpolation und die Definition benutzerdefinierter Trajektorien für sanfte Bewegungen im kartesischen Raum. Durch die nahtlose Integration mit ROS ist es flexibel anpassbar und in bestehende ROS-Anwendungen integrierbar. Der Controller erleichtert die Entwicklung intuitiver und effizienter Roboteranwendungen, indem er eine einfache Steuerung entlang der X-, Y- und Z-Achsen sowie Rotationen ermöglicht. Bei 6-Achs-Robotersystemen müssen dafür im Gegensatz zu Linearachsen alle Gelenke gemeinsam koordiniert werden, um eine geradlinige Bewegung im Raum durchzuführen, was vergleichbar mit einem menschlichen Arm ist. Diese Funktionen sind besonders nützlich in Umgebungen, in denen präzise Positionierung und Bewegung erforderlich sind und bieten eine benutzerfreundliche Methode zur Bewegungssteuerung von Robotern.

Der Aufbau der Steuerungssoftware folgt dem in Abbildung 22 dargestellten Schema. Auf dem Shuttle-PC wird der ROS-Master von zwei ROS-Nodes verwaltet. Für den UR wurde speziell für diesen

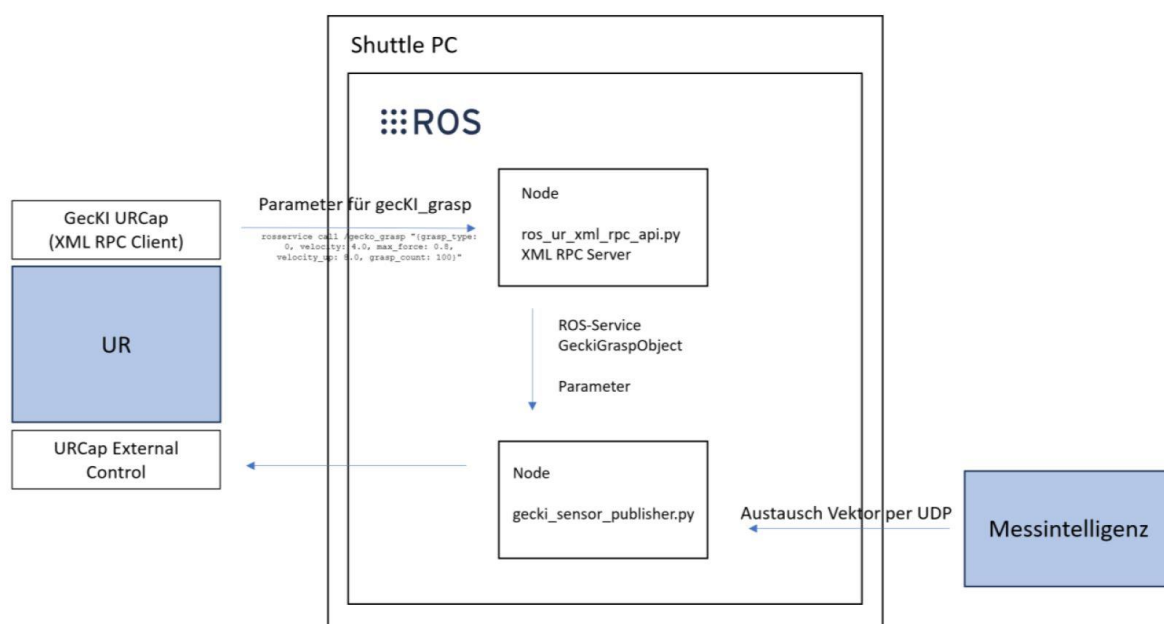


Abbildung 22: Aufbau der ROS Struktur inklusiver der Hardware- und Softwarekomponenten.

Anwendungsfall von NEXT.robotics ein UR-Cap entwickelt (vgl. Abbildung 18). Dies ist ein Erweiterungspaket, welches es dem Bediener erlaubt über die graphische Oberfläche des Bedienpanels spezielle Parameter für den Greifprozess einzustellen. Diese Parameter werden über eine Schnittstelle vom Robotercontroller an den Shuttle-PC gesendet und dort nach dem Empfang weiterverarbeitet. Bei Aufruf des Dienstes gewährt die UR External Control die Steuerungsfreigabe für den Roboter, woraufhin die Steuerintelligenz die Kontrolle über den Roboter übernimmt.

Folgende Parameter können über die Benutzeroberfläche eingestellt werden:

- Approach Velocity [1-100]: Beschreibt die Geschwindigkeit des Roboters beim Anfahren an ein Bauteil, bevor ein Kontakt durch die Messintelligenz erkannt wurde. Ein Wert von 1 entspricht dabei einer sehr niedrigen Geschwindigkeit, während ein Wert von 100 der schnellstmöglichen Geschwindigkeit entspricht, bei der das System auf einen Kontakt noch ausreichend schnell reagieren kann, um ein zu festes Andrücken der Haftstruktur und damit ein Abknicken der Pillar verhindern kann.
- Adaption Velocity [1-100]: Beschreibt die Geschwindigkeit während der Anpassungsbewegung des Roboters an das Bauteil, die startet, nachdem eine Anpresskraft von 2 N oder eine Verkippung von mehr als $0,2^\circ$ erkannt wurde.
- Preload Force [2-30]: Beschreibt die Anpresskraft in Newton, mit welcher der Greifer an das Bauteil angedrückt werden soll.
- Grasp Count: Beschreibt die Anzahl an Datenpunkte der Messintelligenz, die kontinuierlich innerhalb des eingestellten/optimalen Wertebereichs für die Anpresskraft und die Verkippung liegen müssen, bevor die Adaption als abgeschlossen gilt. Dabei hat sich ein Wert von 50-100 Datenpunkten bewährt, was einer Dauer von etwa 0,2 Sekunden entspricht.

Steuerintelligenz

Im Rahmen des Projekts wurde die Programmierung der auto-adaptiven Steuerung von NEXT.robotics koordiniert und als Unterauftrag durch das FZI in Karlsruhe unter Einbeziehung der anderen Projektpartner durchgeführt. Als Programmiersprachen wurden dazu hauptsächlich ROS und Python verwendet.

Die auto-adaptive Robotersteuerung wurde sowohl durch NEXT.robotics, als auch durch INNOCISE in ausgiebigen Versuchen am Roboteraufbau getestet und iterativ optimiert, wobei das IZFP beratend unterstützte. Im Rahmen dieser Versuche wurden mehrere Pick and Place Szenarien für verschiedenste Bauteile und Prozessparameter (Geschwindigkeiten, Kräfte) programmiert und durchgeführt. So wurde zu Beginn das Aufheben flacher Bauteile einfacher Geometrie getestet, wobei ein Überdrücken der Haftstruktur beim Anfahren festgestellt wurde, was ein Ablösen des Bauteils zur Folge hatte. Durch Anpassung einiger Parameter, wie der Adaptionsgeschwindigkeit und der Schwellwerte zur Kraft- und Verkippungserkennung in den Steuerfunktionen der Steuerintelligenz konnte dieses zu feste Andrücken vermieden werden, und die Bauteile mit der eingestellten Anpresskraft erfolgreich angehoben werden. Anschließend wurden diese Versuche auch an Bauteilen komplexerer Geometrie getestet (Linsen, schräg geschliffene Glassteine, Keilprismen). Hierbei wurde beispielsweise festgestellt, dass einige Bauteile beim Ausgleichen der Verkippung während des Adaptionsvorgangs leicht verschoben wurden. Um dies zu vermeiden, wurden Anpassungen an der Steuersoftware durchgeführt, um die Rotation während des Adaptionsprozesses zu optimieren.

Dadurch konnten auch Teile komplexerer Geometrie erfolgreich aufgenommen und wieder platziert werden.

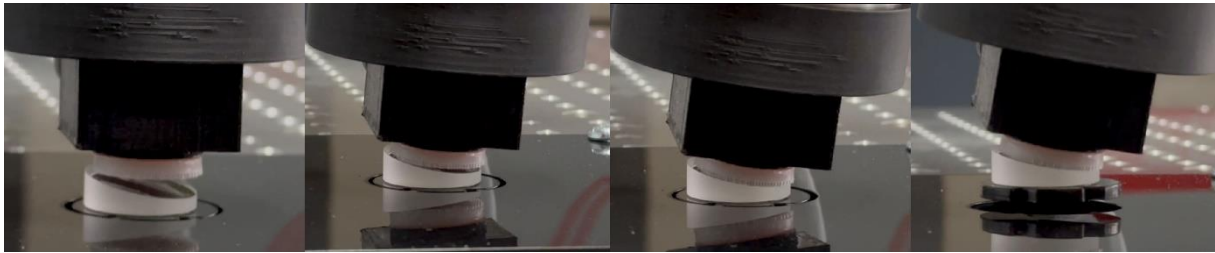


Abbildung 23: Bildausschnitte aus dem Video eines auto-adaptiven Greifvorgangs eines Keilprismas.

Ein Beispiel eines solchen auto-adaptiven Greifprozesses ist in Abbildung 23 dargestellt. Das erste Bild (links) zeigt ein sensorisiertes Pad beim Anfahren an ein Keilprisma, wobei eine Verkippung von etwa 12° zwischen der Haftstruktur und der Oberfläche des Keilprismas vorliegt. Im zweiten Foto ist das Pad mit dem Bauteil bereits in Kontakt und die Ausgleichsbewegung hat begonnen. Im dritten Bild ist die Adaption an die Bauteiloberfläche abgeschlossen und das Prisma konnte anschließend erfolgreich angehoben werden, was im letzten Bild zu sehen ist.

Arbeitspaket 4: Demonstrator und industrielle Akzeptanz

Ziel dieses Arbeitspakets war der Aufbau eines industrierelevanten Demonstrators, welcher eine modulare und kompakte Plattform bildet, um die Funktionsweise der entwickelten Mess- und Steuerintelligenz an verschiedenen Objekten unter prozessnahen Bedingungen zu demonstrieren.

Demonstrator

Dazu wurde gemeinsam mit NEXT.robotics, dem IZFP und INNOCISE ein Konzept entwickelt, welches auf einem mobilen Robotertisch basiert. Als Manipulator für den Demonstrator wurde der kollaborative 6-Achs-Roboter UR5e von Universal Robots gewählt, welcher auch zum Programmieren und Testen der Kommunikationsroutinen und auto-adaptiven Robotersteuerung verwendet wurde. Der Vorteil dieses Cobots (Collaborative Robot) im Vergleich zu anderen Industrierobotern ist, dass er auf Messen ohne besondere Schutzmaßnahmen (z.B. Einhausung) verwendet werden kann, da er bereits interne Schutzeinrichtungen besitzt, welche bei niedrigen Bewegungsgeschwindigkeiten Kollisionen erkennen können und daraufhin die Bewegung unterbrechen würden. Dieser wurde auf dem mobilen Robotertisch befestigt, welcher alle notwendigen Hardware- und Softwarekomponenten enthält. So konnten beispielsweise die Vorschalt elektronik des Sensors, auf welcher die Messintelligenz läuft und der Shuttle-PC, der die Steuerintelligenz enthält, im Inneren des geschlossenen Tisches verbaut werden. Dadurch kann der gesamte Aufbau, welcher in sich funktionsfähig ist, leicht bewegt werden, was für den Einsatz auf Messen sehr vorteilhaft ist. Auf dem Tisch befindet sich eine Lochplatte mit regelmäßig angeordneten Bohrungen mit Innengewinden, auf der mechanische Komponenten (z.B. Bauteilnester) einfach angebracht werden können. Auf der Lochplatte wurde ein speziell gefertigtes Tray installiert, in dem verschiedene Bauteile platziert werden. Diese können durch den Roboter wiederholt aufgenommen und wieder platziert werden, wodurch eine kontinuierlich laufende Applikation für die Demonstration des Systems auf Messen möglich ist. Dadurch konnte gezeigt werden, dass das entwickelte Gesamtsystem aus Mess- und Steuerintelligenz dazu in der Lage ist, unterschiedlich orientierte Bauteile wiederholt und ohne Interaktion des Bedieners auto-adaptiv zu Greifen und anschließend wieder präzise in der Halterung abzulegen. Ein CAD-Modell des beschriebenen Demonstrator-Konzepts ist in Abbildung 24a zu sehen.

Rechts daneben ist ein Foto des echten Aufbaus am Stand von Fraunhofer auf der Control Messe 2024 abgebildet.



Abbildung 24: a) CAD Modell des Konzepts für einen mobilen Demonstrator. b) Foto des Demonstrators am Stand von Fraunhofer auf der Control Messe 2024 in Stuttgart.

Der Demonstrator wurde bei NEXT robotics unter Einbeziehung der anderen Projektpartner aufgebaut und eingerichtet. Anschließend wurden an diesem Aufbau bei INNOCISE anwendungsnahe Pick and Place Szenarien programmiert und durchgeführt, um die im Projekt entwickelte Mess- und Steuerintelligenz wie oben beschrieben zu testen und zu optimieren. Dafür wurden Bauteile verschiedener Geometrie angeschafft und spezielle Aufnahmen konstruiert, welche auf der Lochplatte des Demonstrators befestigt werden konnten. Zur visuellen Darstellung der Sensordaten in Echtzeit, wurde die zuvor entwickelte, graphische Darstellung der verkippten Haftstruktur (vgl. Abbildung 11b) auf einem Monitor am Demonstrator gezeigt.

Dieser Demonstrator wurde dann erfolgreich auf der Control Messe 2024 in Stuttgart am Stand von Fraunhofer gemeinsam mit allen Projektpartnern vorgestellt. Durch Gespräche mit Interessenten aus der Industrie konnten bereits vielversprechende Kontakte für eine potenzielle Anwendung der intelligenten Greiftechnologie geknüpft werden.

Herstellung und Erprobung sensorierter Prototypen

Es wurden gemeinsam durch INNOCISE und das Fraunhofer IZFP sensorierte Prototypen gefertigt. Diese bestehen aus Haftstrukturen verschiedener Größen und Geometrie, welche an den Sensor angebunden und im mechanischen Trägersystem eingefasst sind (vgl. Abbildung 25).

Diese Prototypen wurden am Laboraufbau getestet und erfolgreich auf mechanische und elektrische Stabilität untersucht. Weitere Versuche dazu sollen noch in der Verwertungsphase am Roboter für speziellen industrielle Anwendungsfälle durchgeführt werden.

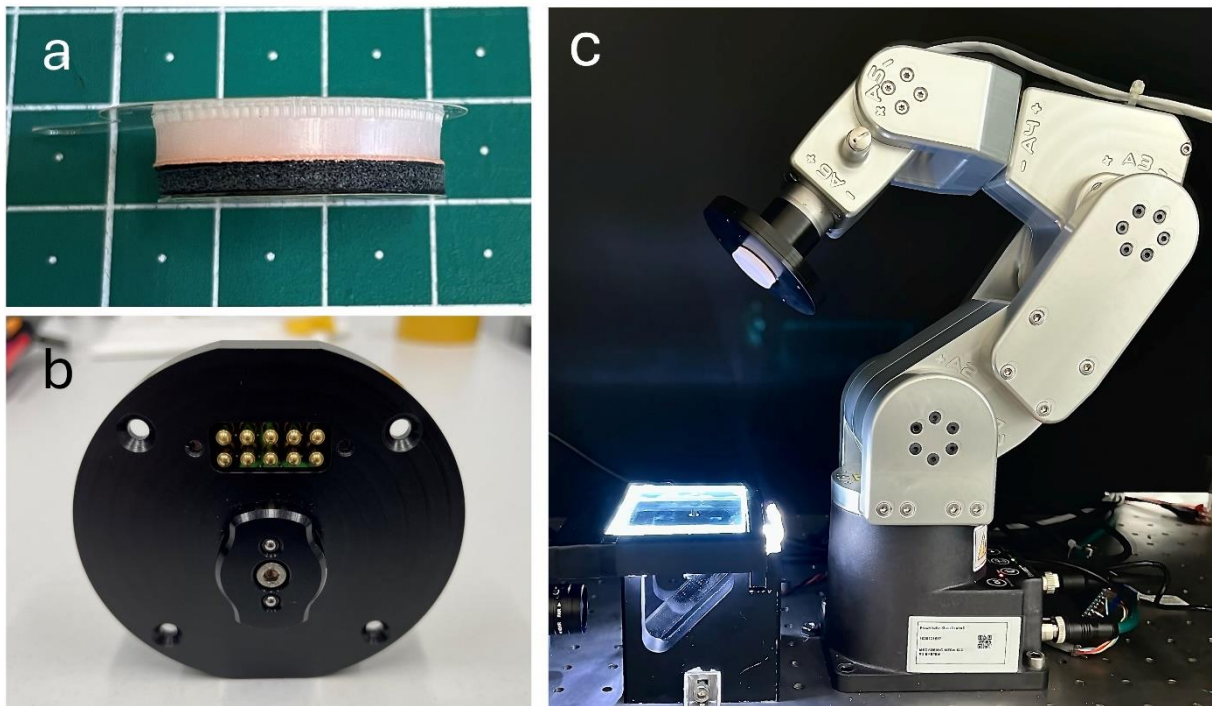


Abbildung 25: a) Seitenansicht eines Pads bestehend aus der Haftstruktur, Stützstruktur und Referenzschicht mit mehreren Klebeschichten. b) Foto eines sensorierten Prototyps mit sichtbaren Kontaktpins und Bajonettverschluss. c) Sensorierter Prototyp am Laboraufbau.

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammengefasst konnte im Projekt GeckI erfolgreich gezeigt werden, dass die Kombination aus bioinspirierten Haftstrukturen und künstlicher Intelligenz neue Möglichkeiten für die Automatisierung und Robotik eröffnet. Durch die Entwicklung eines sensorgestützten Greifsystems mit adaptiver Steuerung konnten wesentliche Herausforderungen konventioneller Greiftechnologien überwunden werden. Dies ging aus der positiven Resonanz der Industrie bei der Ausstellung des Systems auf einer Messe hervor.

Die zentralen Ergebnisse des Projekts lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Erfolgreiche Entwicklung einer KI-gestützten Sensorik:
 - Es wurde ein spezieller Laboraufbau entwickelt, an welchem die Messdaten einer eigen entwickelten Sensorik, basierend auf Wirbelströmen, aufgenommen werden konnten.
 - Diese Datengrundlage diente als Basis für die Entwicklung KI-basierter Auswertalgorithmen, welche es der Messintelligenz ermöglichen, kritische Parameter wie die Verkippung, Anpresskraft und Kontaktfläche während des Greifprozesses zu bestimmen.
- Integration einer robusten Schnittstelle zur industriellen Nutzung:
 - Es wurde ein mechanisches Trägersystem und verschiedene modulare Roboteradapter entwickelt und gefertigt, mit denen die sensorierte Haftstruktur schnell und stabil am Flansch eines Roboters befestigt werden kann.
- Entwicklung einer auto-adaptiven Robotersteuerung:

- Es wurde Steuerintelligenz entwickelt, welche die Daten der Messintelligenz verarbeitet und in Bewegungsbefehle umwandeln kann, wodurch der Greifprozess optimiert und dadurch sicherer und effizienter gestaltet werden kann.
- Dafür wurde eine effiziente Softwareschnittstelle basierend auf dem ROS-Framework geschaffen, um eine flexible Integration des Systems in bestehende Robotersysteme zu ermöglichen.
- Entwicklung eines Demonstrators:
 - Es wurde ein mobiler Demonstrator konzipiert und aufgebaut. An diesem konnten Pick and Place Abläufe für Bauteile verschiedener Geometrien programmiert und validiert werden.
 - Der Demonstrator konnte genutzt werden, um die entwickelten Technologien einem industriellen Publikum auf der Control Messe 2024 vorzustellen und dadurch vielversprechende Kontakte zu knüpfen.

In der Verwertungsphase sollen die entwickelte Technologie so weiterentwickelt werden, dass sie in industriellen Prozessen eingesetzt werden kann. Dafür sind voraussichtlich weitere Test- und Optimierungsschritte nötig, um den sicheren Einsatz der sensorierten Greifer und Steuerintelligenz auch in komplexeren Anwendungen gewährleisten zu können.

Erläuterung der wichtigsten Kostenpositionen

Im Rahmen des Projekts wurden alle Ressourcen stets zweckmäßig und wirtschaftlich sparsam eingesetzt. Die wichtigsten im Projekt getätigten Ausgaben sind im Folgenden genauer erläutert und begründet.

Personal

Im Rahmen des Projekts wurde von allen Projektpartnern fachliches Personal beschäftigt. Insbesondere für die Planung, Durchführung und Interpretation der Versuche vor allem in Arbeitspaket 1 und 2 und die Konzipierung und Entwicklung von Prototypen und Aufbauten (Arbeitspaket 2-4) war eine fundierte wissenschaftliche und technische Ausbildung unerlässlich. Nur mit entsprechender Expertise in den Bereichen Materialwissenschaften, Messtechnik, Sensorik und Robotik war die Erarbeitung der Ergebnisse möglich. Neben den leitenden Wissenschaftlern waren auch Hilfwissenschaftler von entscheidender Bedeutung, da sie maßgeblich an der Durchführung der Versuche beteiligt waren und somit einen wichtigen Beitrag zum Erfolg des Projekts leisteten.

Material

Im Rahmen des Projekts waren Anschaffungen und Ausgaben für Material notwendig, wobei im Folgenden die wichtigsten Positionen dargelegt sind:

- Herstellung von Proben für Adhäsionsmessungen und andere Versuche (Haftstrukturen, Probenträger, Stützstrukturen, Referenzobjekte)
- Entwicklung der Sensorik und zugehöriger Elektronik (PCBs, elektrische Kontakte, Filter, Verstärker)
- Fertigung und Beschaffung mechanischer Komponenten (Trägersystem für die sensorierte Haftstruktur, modulare Roboteradapter, Laborprüfstand, Demonstrator)

Dabei wurde stets ressourcenschonend gehandelt, indem beispielsweise erste Prototypen durch Methoden wie 3D-Druck gefertigt wurden, wodurch Zeit und Kosten eingespart werden konnten.

Reisekosten

Ein weiterer Kostenfaktor waren die Reisekosten, die für Projekttreffen und gemeinsame Vor-Ort-Versuche am Demonstrator, sowie Dienstreisen zu Messen und Konferenzen notwendig waren. Diese Vor-Ort-Versuche waren für die Fortschritte des Projekts von großer Bedeutung aber auch die Vorstellung der Ergebnisse auf Messen und Konferenzen half durch den Austausch mit industriellem und wissenschaftlichem Publikum maßgeblich weiter.

Nutzung und Verwertung der Projektergebnisse

Wie in Teil 1 beschrieben, können bioinspirierte Greiftechnologien genutzt werden, um herkömmliche Greifsysteme zu ersetzen und dadurch industrielle Produktionsprozesse noch effizienter und flexibler zu gestalten. So scheitern beispielsweise Vakuumgreifer häufig bei der Handhabung perforierter oder poröser Bauteile und mechanische Greifer stoßen an ihre Grenzen, wenn es um das Greifen von sehr empfindlichen Bauteilen, wie Linsen oder Folien geht. Bioinspirierte Greifsysteme auf Basis des Gecko-Effekts bieten dafür eine innovative Lösung, indem sie ohne externe Energiezufuhr funktionieren und für Bauteile unterschiedlichster Oberflächenbeschaffenheit eingesetzt werden können, ohne diese zu beschädigen oder zu verschmutzen.

Eine Herausforderung beim Einsatz dieser Adhäsionsgreifer bestand darin, dass zwischen Greifer und Manipulator kein Informationsaustausch über Prozessparameter stattfinden konnte. Dadurch konnte es Probleme beim Greifen von Bauteilen geben, die durch ihre komplexe Geometrie oder variierende Positionierung nicht parallel zum Greifer ausgerichtet waren oder wenn beim Anfahren an das Bauteil die Haftstruktur nicht mit optimaler Kraft an die Oberfläche angedrückt wurde.

Durch die im Projekt entwickelte KI-gestützte Sensorik, welche direkt im Greifsystem integriert wurde, können nun Echtzeit-Daten zur Anpresskraft und Verkipfung zwischen Greifer und Bauteil während des Greifvorgangs gemessen und verarbeitet werden. Durch die entwickelte auto-adaptive Robotersteuerung können diese Daten genutzt werden, um den Greifvorgang zu optimieren und sicherer zu gestalten.

INNOCISE

INNOCISE konnte durch die ausgiebigen Adhäsionsmessungen verschiedener Haftstrukturen auf unterschiedlichen Bauteilen und Oberflächen umfangreiche Informationen über das Adhäsionsverhalten ihrer Greifer erhalten. So können beispielsweise die gewonnenen Erkenntnisse über den Einfluss der Stützstruktur auf die Adhäsionskraft direkt dabei helfen eine geeignete Kombination aus Haftstruktur und Stützstruktur auszuwählen, um aktuelle und zukünftige Handhabungsverfahren prozesssicher umzusetzen. Auch die Informationen über den Einfluss von Bauteileigenschaften (Rauheit, Oberflächengeometrie) und Prozessparametern (Anpresskraft, Abzugsgeschwindigkeit) sind dabei besonders wichtig. All diese gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Wissensdatenbank von INNOCISE mit ein und führen zu einer noch größeren Expertise im Bereich bioinspirierter Greifsysteme.

Die im Projekt entwickelte KI-gestützte Sensorik mit zugehöriger Steuerintelligenz bietet für INNOCISE außerdem das Potential, ihre Greifer in zuvor schwer umsetzbaren Prozessen einzusetzen. Dazu gehören Anwendungen, bei denen beispielsweise die Positionierung oder die Geometrie der Bauteile (z.B. Linsen unterschiedlicher Krümmungen, Prismen, komplex geschliffene Dekorteile) variieren. Mit Hilfe der entwickelten Prototypen wird INNOCISE weiterhin versuchen solche Anwendungsmöglichkeiten zu identifizieren und an industriellen Prozessen zu erproben, um die Technologie dort einzusetzen.

Das von INNOCISE entwickelte mechanische Trägersystem und die modularen Roboteradapter ermöglichen den einfachen und flexiblen Einsatz der Greiftechnologie in verschiedensten Robotersystemen. Dieses Konzept kann auch als Basis für weitere Entwicklungen dienen, in denen beispielsweise neue Sensoren in den Greifer integriert werden, wobei ein elektronischer und mechanischer Anschluss an den Roboter gegeben sein muss.

NEXT.robotics

NEXT.robotics eröffnen die im Projekt entwickelten Technologien ebenfalls die Möglichkeit neue Prozesslösungen für die Robotik und Automation anzubieten. Dazu wird NEXT.robotics versuchen, die erzielten Ergebnisse aktiv in Gesprächen mit Kunden zu präsentieren und gemeinsam mögliche Anwendungsfälle zu identifizieren. Bei Interesse von Kundenseite wird in enger Abstimmung mit den Projektpartnern geprüft, wie die entwickelten Technologien auf die spezifischen Anforderungen des Kunden angepasst und weiterentwickelt werden können, um eine passgenaue Lösung bereitzustellen.

Die entwickelten KI-basierten Steuerungsalgorithmen, sowie die erprobte Softwareschnittstelle werden in bestehende und neue Robotersysteme integriert, um intelligente, adaptive Greiflösungen anzubieten. Darüber hinaus plant NEXT.robotics, die erarbeiteten Steuerungskonzepte im Rahmen von kundenspezifischen Automatisierungslösungen weiterzuentwickeln und als Beratungs- und Entwicklungsdienstleistungen anzubieten. Durch die enge Zusammenarbeit mit Industriepartnern und die Nutzung der Demonstratoren auf Messen sollen weitere Anwendungsfelder identifiziert und die Technologie in marktfähige Produkte überführt werden.

Fraunhofer IZFP

Das Fraunhofer IZFP wird die im Projekt entwickelten KI-basierten Sensoren weiter vorantreiben und das Potential für die Übertragung des Sensorprinzips auf weitere Märkte überprüfen. Insbesondere die Weiterentwicklung von Algorithmen zur Objekt- und Eigenschaftsdetektion stellt ein zukünftiges Forschungsfeld dar. Ziel ist es, diese Algorithmen sowohl methodisch zu optimieren als auch praxisnah einzusetzen. Durch die modulare Auslegung des Designs wird zudem die Voraussetzung geschaffen, weitere Anwendungsfelder systematisch zu erschließen, welche durch das Fraunhofer IZFP mit Partnern aus Forschung und Wirtschaft eruiert werden. So wird bereits im Anschluss an dieses Forschungsvorhaben ein Fraunhofer internes Projekt im Rahmen des Cluster of Excellence Programmierbare Materialien, mit der entwickelten Sensorik und Algorithmik zur Charakterisierung neuartiger Metamaterialien im Zusammenspiel mit den innovativen Haftstrukturen von INNOCISE, umgesetzt.

Nach dem Projekt strebt das IZFP an, auf Basis der Projektergebnisse weitere Forschungsprojekte zu beantragen, um den Wissensgewinn weiter auszubauen, und Forschungs- und Entwicklungsprojekte sowie ZIM-projekte mit Industriekunden durchzuführen, um die Erkenntnisse auf neue Anwendungsfelder zu adaptieren und weiterzuentwickeln.

Das Fraunhofer IZFP verfolgt im wissenschaftlichen-technischen Bereich weiterhin seine Ziele, die erarbeiteten Ergebnisse durch Präsentationen auf Fachkonferenzen und Tagungen sowie open-access Publikationen der Forschungs- und Wirtschaftslandschaft zugänglich zu machen. Im Kalenderjahr 2023 wurde die erste open-access Publikation eingereicht und später veröffentlicht [<https://doi.org/10.1002/adsr.202300098>]. Darüber hinaus sind auch Fachkonferenzbeiträge in der Planung. Hierdurch soll die Sichtbarkeit der Projektergebnisse sowie die Anschlussfähigkeit an nationale und internationale Forschungsgruppen gesteigert werden. Beispielsweise wird gerade ein Beitrag für das Messtechnische Symposium im September 2025 vorbereitet, eine erste Kurzfassung wurde bereits akzeptiert.

Ergebnisse Dritter

Während der Projektlaufzeit sind keine Fortschritte oder FuE-Ergebnisse an anderer Stelle bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant waren.

Liste der Veröffentlichungen

Die wissenschaftlichen Ergebnisse wurden in enger Abstimmung mit den Projektpartnern durch das Fraunhofer IZFP in folgender Publikation veröffentlicht:

- Herter, Simon, Philipp Stopp, and Sarah CL Fischer. "Soft Tactile Coil-Based Sensor for Misalignment Detection of Adhesive Fibrillary Gripping Systems." *Advanced sensor research* 3.1 (2024): 2300098.

Eine zweite Veröffentlichung der weiteren Projektergebnisse ist bereits durch das Fraunhofer IZFP für 2025 geplant.

Weiterhin wurden die wissenschaftlichen Ergebnisse durch das IZFP und INNOCISE mit einem Poster auf der Mittelstandskonferenz im November 2023 in Berlin einem breiten wissenschaftlichen Publikum vorgestellt. Der entwickelte Demonstrator wurde am Stand von Fraunhofer auf der Control Messe 2024 in Stuttgart gemeinsam mit allen Projektpartnern einem industriellen Publikum präsentiert. Ein weiterer Messeauftritt ist durch NEXT.robotics auf der Motek 2025 in Stuttgart geplant.