

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



DLR Projektträger

Sachbericht – Teil I Kurzbericht

Berichtszeitraum: 1.07.2020 – 31.12.2022

FKZ 01IS20039D

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2020 – 31.12.2022

Vorhabenbezeichnung

Autonome visuelle, industrielle Roboterinteraktion durch Künstliche Intelligenz (AutoVikki)

Teilvorhaben

Entwicklung, Fertigung, Integration und funktionale Optimierung von für die Anwendung in der Roboterzelle angepassten Bearbeitungswerkzeugen. Sicherstellung der digitalen Interaktion mit der Steuerung der Roboterzelle durch Entwicklung eines digitalen Zwillings des Werkzeugs, der im System hinterlegt wird.

Autoren

Nicolas Huth

Zuwendungsempfänger:

August Rüggeberg GmbH & Co. KG (ARG)

Hauptstrasse 13

51709 Marienheide

Deutschland

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01IS20039D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.

Das übergreifende Ziel des Vorhabens AutoVikki war die Konzeption, Implementierung und Evaluierung von Algorithmen, Software und Systembestandteilen für eine „*intelligente Pick&Place Industrieroboterzelle*“ für sehr variable und feingranulare Objekte, die schnell und flexibel eingerichtet werden und sich selbst optimieren kann. Die Forschung und Entwicklung (FuE) für eine Kombination mehrerer 3D-Kameras und Künstlicher Intelligenz (KI), sodass sensorische und kollaborierende Robotergreifer sehr variable und feingranulare Objekte wie in diesem Teilprojekt geschmiedete Bauteile, analysieren, klassifizieren, greifen, bearbeiten und wieder absetzen können, stand im Mittelpunkt des Vorhabens. Der Aufsatzpunkt waren Lösungsansätze aus der Deep-Learning Forschung, wie z. B. *Generative Adversarial Networks*, *Domain Randomization* und *Federated Learning*, um mit möglichst wenig Trainingsdaten die KI für die Struktur- und Oberflächenanalyse, sowie für das Greifen und das Bearbeiten des Objektes zu trainieren. Weiterhin ging es um die Entwicklung von flexiblen Schnittstellen sowie einer zentralen Plattform für die Kommunikation zwischen den Komponenten der Roboterzelle.

Die AutoVikki Technologie wurde durch das im Bereich der autonomen Robotik, der Sensorfusion und Künstlichen Intelligenz qualifizierte FuE-Konsortium in industriellen Pilotszenarien validiert und bis zum *TRL 5 (Technology Readiness Level 5 - Technologie Reifegrad* bis zu einem Versuchsaufbau in Einsatzumgebung) entwickelt: *Szenario A* betraf dieses Teilverhaben und den Projektnehmer Bock Bio Science GmbH (BBS) und bezog sich auf die „autonome *in vitro* Pflanzenvermehrung“ und *Szenario B* die beiden beteiligten Großunternehmen Otto Fuchs KG (OFK) und August Rüggeberg GmbH & Co. KG (ARG) als potentielle Anwender des Systems sowie Arnold IT (AIT) als Entwickler und Konsortialführer und bezog sich auf „automatisches Nachbearbeiten geschmiedeter Bauteile“. Schließlich unterstützte die Forschungseinrichtung Hahn-Schickard (HS) das Gesamtvorhaben als Konsortialpartner mit systematischem Grundlagen *Know-How* und FuE Arbeiten.

Bisher war es in der Industrie nicht zufriedenstellend und effizient möglich, heterogene Objekte vollständig autonom durch Roboter bearbeiten zu lassen. Damit waren mit Bezug auf das Teilprojekt bei Bock Bio Science (BBS), was auf das KIVision-System für die industrielle, autonome robotische Einzelfertigung abstelle, in *Szenario A* insbesondere lebende Pflanzen gemeint, die von Natur aus nicht genormt sind und in *Szenario B* gefertigte Objekte, wie z.B. Door Stops, die aufgrund von Produktionsabweichungen bisher noch nicht automatisch (z. B. durch Schleifen oder Polieren) nachbearbeitet werden konnten, und damit nicht den hohen Anforderungen der Kunden genügten.

ARG untersuchte und entwickelte in seinem Teilverhaben (*Szenario B*) erfolgreich alternative Bearbeitungsmethoden, um die manuell geführte Bearbeitung auf einen robotergeführten Prozess zu modifizieren. Die Entwicklungsarbeit ist universell ausgerichtet, sodass auch artverwandte, aber geometrisch verschiedene Objekte ohne aufwändige Neueinrichtung des Systems bearbeitet werden können.

Durch die Änderung des Werkzeugtyps und des Prozesses von Bandschleifen zu Seitenschleifen mittels Fiberschleifern auf Stützteller für die Entfernung der Grate und COMBIDISC-Schleifblättern auf Schleifblatthaltern für die Nacharbeit der Fehlstellen, die Wahl einer pneumatisch angetriebenen, geraden Schleifspindel mit automatischem Werkzeugwechselsystem mit ausreichender Leistung und angemessener Drehzahl, einem durch den Roboter autark durchführbaren Werkzeugwechsel sowie eine über die Wegsteuerung des Roboters gelegte Kraftregelung wird ein stabil ablaufender Bearbeitungsprozess mit robustem Parameterfeld implementiert.

Im Projektverlauf hat sich ergeben, dass sowohl ein digitaler Zwilling als auch ein Feed-Back über den Einfluss möglicher Störgrößen und Fehler oder Werkzeug- und Prozessänderungen (z.B. durch Verschleiß) möglich, jedoch bei dem derzeit gefahrenen Prozess nicht erforderlich sind.

Die implementierte Lösung ist in der Lage, die gestellten Aufgaben und Werkstücke zu bearbeiten und bietet gleichzeitig die Möglichkeit, mit geringem Aufwand flexibel auf weitere, ergänzende Anforderungen erweitert und angepasst zu werden.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



DLR Projektträger

Sachbericht – Teil II

Berichtszeitraum: 1.07.2020 – 31.12.2022

FKZ 01IS20039D

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2020 – 31.12.2022

Vorhabenbezeichnung

Autonome visuelle, industrielle Roboterinteraktion durch Künstliche Intelligenz (AutoVikki)

Teilvorhaben

Entwicklung, Fertigung, Integration und funktionale Optimierung von für die Anwendung in der Roboterzelle angepassten Bearbeitungswerkzeugen. Sicherstellung der digitalen Interaktion mit der Steuerung der Roboterzelle durch Entwicklung eines digitalen Zwillings des Werkzeugs, der im System hinterlegt wird.

Autoren

Nicolas Huth

Zuwendungsempfänger:

August Rüggeberg GmbH & Co. KG (ARG)

Hauptstrasse 13
51709 Marienheide
Deutschland

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01IS20039D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.

Das übergreifende Ziel des Vorhabens AutoVikki war die Konzeption, Implementierung und Evaluierung von Algorithmen, Software und Systembestandteilen für eine „*intelligente Pick&Place Industrieroboterzelle*“ für sehr variable und feingranulare Objekte, die schnell und flexibel eingerichtet werden und sich selbst optimieren kann. Die Forschung und Entwicklung (FuE) für eine Kombination mehrerer 3D-Kameras und Künstlicher Intelligenz (KI), sodass sensorische und kollaborierende Robotergreifer sehr variable und feingranulare Objekte wie in diesem Teilprojekt geschmiedete Bauteile, analysieren, klassifizieren, greifen, bearbeiten und wieder absetzen können, stand im Mittelpunkt des Vorhabens. Der Aufsatzpunkt waren Lösungsansätze aus der Deep-Learning Forschung, wie z. B. *Generative Adversarial Networks*, *Domain Randomization* und *Federated Learning*, um mit möglichst wenig Trainingsdaten die KI für die Struktur- und Oberflächenanalyse, sowie für das Greifen und das Bearbeiten des Objektes zu trainieren. Weiterhin ging es um die Entwicklung von flexiblen Schnittstellen sowie einer zentralen Plattform für die Kommunikation zwischen den Komponenten der Roboterzelle.

Die *AutoVikki* Technologie wurde durch das im Bereich der autonomen Robotik, der Sensorfusion und Künstlichen Intelligenz qualifizierte FuE-Konsortium in industriellen Pilotszenarien validiert und bis zum *TRL 5 (Technology Readiness Level 5 - Technologie Reifegrad* bis zu einem Versuchsaufbau in Einsatzumgebung) entwickelt: *Szenario A* betraf dieses Teilverhaben und den Projektnehmer Bock Bio Science GmbH (BBS) und bezog sich auf die „autonome *in vitro* Pflanzenvermehrung“ und *Szenario B* die beiden beteiligten Großunternehmen Otto Fuchs KG (OFK) und August Rüggeberg GmbH & Co. KG (ARG) als potentielle Anwender des Systems sowie Arnold IT (AIT) als Entwickler und Konsortialführer und bezog sich auf „automatisches Nachbearbeiten geschmiedeter Bauteile“. Schließlich unterstützte die Forschungseinrichtung Hahn-Schickard (HS) das Gesamtvorhaben als Konsortialpartner mit systematischem Grundlagen *Know-How* und FuE Arbeiten.

Bisher war es in der Industrie nicht zufriedenstellend und effizient möglich, heterogene Objekte vollständig autonom durch Roboter bearbeiten zu lassen. Damit waren mit Bezug auf das Teilprojekt bei Bock Bio Science (BBS), was auf das KIVision-System für die industrielle, autonome robotische Einzelfertigung abstelle, in *Szenario A* insbesondere lebende Pflanzen gemeint, die von Natur aus nicht genormt sind und in *Szenario B* gefertigte Objekte, wie z.B. Door Stops, die aufgrund von Produktionsabweichungen bisher noch nicht automatisch (z. B. durch Schleifen oder Polieren) nachbearbeitet werden konnten, und damit nicht den hohen Anforderungen der Kunden genügten.

ARG untersuchte und entwickelte in seinem Teilverhaben (*Szenario B*) erfolgreich alternative Bearbeitungsmethoden, um die manuell geführte Bearbeitung auf einen robotergeführten Prozess zu modifizieren. Die Entwicklungsarbeit ist universell ausgerichtet, sodass auch artverwandte, aber geometrisch verschiedene Objekte ohne aufwändige Neueinrichtung des Systems bearbeitet werden können. Auch der Wechsel auf alternative Werkzeuge ist realisierbar.

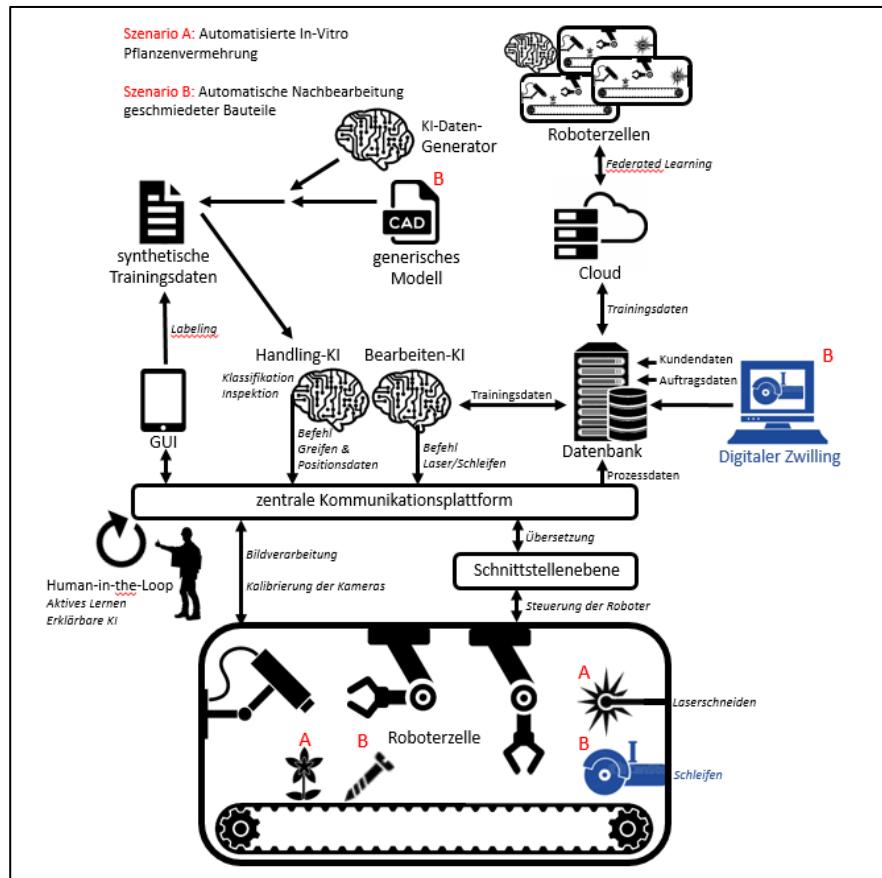


Abbildung 1: Schaubild des AutoVikki-Gesamtsystems (Anteil ARG blau)

Teilvorhabenbeschreibung

AP 2 Anwendungsszenarien & Systemanforderungen (PL: AIT/BBS; beteiligt: HS, alle Partner)

- Auslegung des Bearbeitungsprozesses, Entwicklung des zugehörigen Werkzeugs
- Optimierung des Prozesses hinsichtlich Robustheit und Stabilität, Effizienz und damit Wirtschaftlichkeit sowie erzeugter Bauteilqualität
- Generierung der Grunddaten und zu ermittelnder Informationen für die Nutzung eines digitalen Zwilling, Eingrenzung sinnvoller und für den Prozess nutzbarer Informationen sowie ihrer Gewinnung (Messtechnik, Sensorik), Auswertung und Rückkopplung in den Prozess

AP 3 Systemkonzept und Architekturaspekte der Roboterzelle (PL: AIT; beteiligt: HS, alle Partner)

AP3.1: Konzeptionierung der Hardware: Sensorik und Robotik

- Unterstützende Mitwirkung bei der durch die führenden Projektpartner durchgeföhrten Auslegung des Bearbeitungsprozesses und damit der Roboterzelle hinsichtlich Werkzeug, Antriebskomponenten, Messtechnik und ggf. Aktorik

AP 6 Konzeptionierung, Implementierung und Validierung der Roboterzelle (PL: AIT; beteiligt: HS, alle Partner)

AP6.4: Entwicklung der Werkzeuge und des digitalen Zwillings für Szenario B

- Unterstützung bei der Umsetzung der in AP3.1 definierten Unterpakete Werkzeug, Messtechnik, Prozess und Informationsgewinnung respektive - auswertung

AP6.5: Aufbau der Roboterzelle

- Ausrüstung der konzeptionierten und implementierten Roboterzelle mit Werkzeug und zugehörigem Antrieb
- erste Funktionstests

AP 8 Systemtests der Roboterzellen (PL: BBS; beteiligt: HS, alle Partner)

AP8.2: Szenario B: Automatische Nachbearbeitung geschmiedeter Bauteile

- Systemtests zur Optimierung des Prozess hinsichtlich Prozessführung, Leistungsfähigkeit und Robustheit sowie Informationsgewinnung/-auswertung/-rückkopplung

Umsetzung

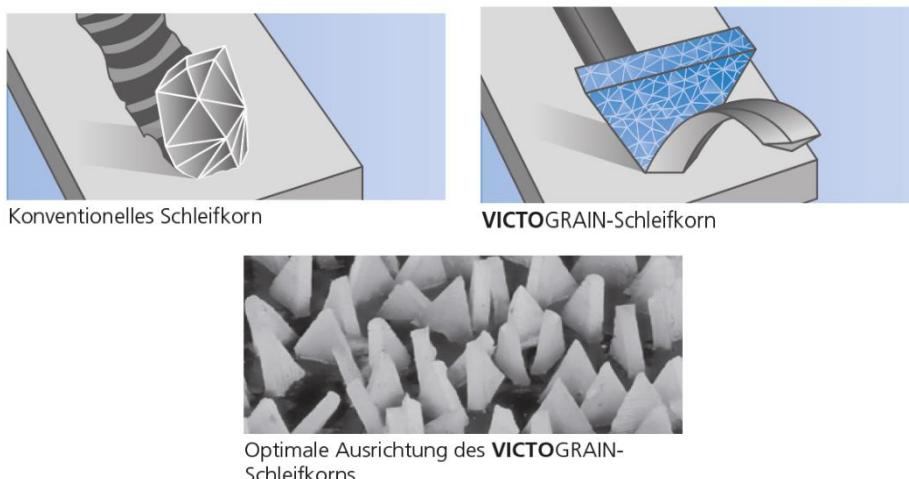
Im ursprünglichen, händischen Prozess bei OF werden durch den Arbeiter die Werkstücke manuell an einem stationären Schleifband geföhrt. Die Standzeit des Schleifbandes ist trotz bereits durchgeföhrter Optimierungen seitens OF mit 6 bis maximal 10 Bauteilen gering. Der Bandwechsel kann nicht automatisch , sondern muss händisch durchgeföhrt werden. Die geringe Standzeit - besonders auch bei dem bisher verwendeten, kleinen Finger-Bandschleifer - schließt diese Werkzeuge und Antriebe für den automatischen Roboterprozess aus.

In manuell durchgeföhrten Screenings und Versuchen zusammen mit OF wurde festgestellt, dass Schleifmittel auf Unterlage dennoch das leistungsfähigste

Werkzeug für die Beseitigung der Grate ist. Galvanisch mit Diamant belegte Werkzeuge wären einen Alternative. Da jedoch die Späne nicht wie bei konventionellem Schleifmittel auf Unterlage als Funken abbrennen, sondern unverbrannte Titanspäne eine Brandlast darstellen würden, wurde diese Alternative ausgeschlossen.

Gewechselt wurde daher der Werkzeugtyp und der Prozess von Bandschleifen zu Seitenschleifen mittels Fiberschleifern auf Stützteller für die Entfernung der Grate und COMBIDISC-Schleifblättern auf Schleifblatthaltern für die Nacharbeit der Fehlstellen.

Wegen der hohen Festigkeit und Zähigkeit sowie der geringen Wärmeleitfähigkeit der Titanbauteile wurde auf Schleifmittel auf Unterlage mit Sol-Gel-Korunden als gebrochenes Korn sowie geformtes, dreieckiges Hochleistungskorn - VICTOGRAIN -, beides mit einer schleifaktiven Deckbindung zurückgegriffen. Als beste Lösung stellte sich das geformte, dreieckige Hochleistungskorn VICTOGRAIN mit COOL-Beschichtung heraus.



Für das Screening und die ersten Eingrenzungen wurden die Versuche manuell auf einem elektrischen, drehzahlregelbaren Biegwellenantrieb Mammut Electronic ME 22/240 durchgeführt, um optimale Drehzahlen finden zu können.



Durch die Umstellung des Prozesses auf Seitenschleifen konnte als Antrieb auf eine pneumatisch angetriebene, gerade Schleifspindel PGAS 11/58 RS mit 5.800 rpm Leerlaufdrehzahl und 1,1 kW Abgabeleistung zurückgegriffen werden. Die Spindel beinhaltet ein Werkzeugwechselsystem, wodurch ein automatischer Werkzeugwechsel ohne Hilfsenergie in der Roboterzelle möglich ist. Hierdurch können sowohl mehrere Werkzeuge zur Standzeiterhöhung als auch verschiedene Werkzeuge wie z.B. Fiberschleifer und COMBIDISC-Schleifblätter, aber auch Schaftwerkzeuge wie POLIFLEX passend zum Prozess eingewechselt werden. Dieser Umstand ermöglicht eine spätere Anpassung, Erweiterung und Optimierung des Prozesses und trägt so drastisch zur Flexibilität der Roboterzelle bei.



Abbildung 2 Roboterspindel für stationären Einsatz PGAS 11/58 RS



Abbildung 3 Werkzeugwechseladapter mit Gewindeaufnahme M14 (links) und Spannzange (rechts)



Abbildung 4 Magazinplatz für Werkzeugwechseladapter



Abbildung 5 Werkzeugwechselaufnahme zum Greifen der Werkzeugwechseladapter mit dem Roboter

Für den hier vorliegenden Fall ist an der Roboterhand neben dem Greifer für die Werkstücke zusätzlich eine Werkzeugwechselaufnahme montiert, mit der der Roboter Werkzeugwechseladapter mit darauf montierten Werkzeugen von Magazinplätzen greifen und in die Spindel einsetzen kann. Ebenso kann der Roboter Werkzeugwechseladapter mit darauf montierten Werkzeugen aus der Spindel entnehmen und in Magazinplätzen ablegen.

Die Weiterführung der Versuche auf einem Roboter UR16 zeigten, dass ein weggesteuerter Prozess aufgrund extrem hoher Leistungsspitzen (Überlastung des Antriebs, zu starker Funkenflug und Wärmeeinwirkung auf das Bauteil bis hin zu thermischer Überlastung des Werkzeugs) führte. Hieraus resultiert zwingend eine kraftgeregelte Führung des Prozesses.

Kraftregelungen über den Roboter sind bekannt (ForceControl von ABB et al.), jedoch oft schwierig programmierbar/einstellbar und verlangen ähnliche Eingriffsbedingungen zwischen Werkzeug und Werkstück. Praktikabler ist hier eine Lösung über eine Kraftkonstanthaltung durch einen servoelektrischen Antrieb, Schwerkraft oder ein pneumatisches System. Bei Nutzung eines servoelektrischen Antriebs ist neben der elektrischen Ausweichbewegung sowohl die Messung der entstehenden Kraft als auch ein Regelkreis zum Abgleich zwischen Kraft und axialer

Bewegung erforderlich. Bei Kraftkonstanthaltung durch Schwerkraft wird ein definiertes Gewicht über eine Rolle an einen Linearschlitten angehängt. Durch die Ausweichbewegung des Schlittens und das definierte Gewicht kann die Kontaktkraft monoaxial einfach und kontrolliert eingestellt werden. Bei Nutzung eines pneumatischen Systems übernimmt ein Pneumatikzylinder mit Druckregelventil die Funktion des Gewichtes. Gewählt wird hier das pneumatische System, das sich in der Vergangenheit als feinfühlig, robust und einfach einstellbar bewiesen hat.

Der Roboter führt das Werkstück an das auf dem Antrieb montierte Werkzeug, wobei der Antrieb auf dem Ausgleichsschlitten aufgebaut ist.

Durch die Änderung des Werkzeugtyps und des Prozesses von Bandschleifen zu Seitenschleifen mittels Fiberschleifern auf Stützteller für die Entfernung der Grate und COMBIDISC-Schleifblättern auf Schleifblatthaltern für die Nacharbeit der Fehlstellen, die Wahl des Antriebs mit ausreichender Leistung und angemessener Drehzahl, einem durch den Roboter autark durchführbaren Werkzeugwechsel sowie eine über die Wegsteuerung des Roboters gelegte Kraftregelung wird ein stabil ablaufender Bearbeitungsprozess mit robustem Parameterfeld implementiert.

Eine weitere Optimierung des Prozesses hinsichtlich Robustheit und Stabilität, Effizienz und damit Wirtschaftlichkeit wird in der Serienbearbeitung der Werkstücke bei OFK durchgeführt.

Im Projektverlauf hat sich ergeben, dass sowohl ein digitaler Zwilling als auch ein Feed-Back über den Einfluss möglicher Störgrößen und Fehler oder Werkzeug- und Prozessänderungen (z.B. durch Verschleiß) möglich, jedoch bei dem derzeit gefahrenen Prozess voraussichtlich nicht erforderlich sind. Es ist nicht einschätzbar, welche der zugehörigen, für die Prozessführung und die Beschreibung des Werkzeugzustandes möglichen Informationen wie die geometrische Beschaffenheit des Werkzeugs, zerspanungstechnische Merkmale, der fortgeschrittene Zustand des Werkzeugs (wie Verschleiß oder Anzahl bearbeiteter Werkstücke) sowie über den zum Messzeitpunkt aktuellen Zustand von Werkzeug und Prozess (wie auftretende Vibrationsbelastung, Antriebsleistung, Werkzeugtemperatur, mögliche Zusetzung mit Werkstückmaterial, Kontaktkräfte) tatsächlich notwendig sind, da zunächst mit einem robusten Prozess gearbeitet wird. Das bedeutet, dass die derzeit bekannten Störgrößen wie z.B. die Gratausprägung in Höhe, Stärke und ggf. Werkstoffunterschieden durch den Schleifprozess gepuffert werden und der Prozess zwischen Antrieb-Werkzeug und Werkstück mit den gegebenen Unterschieden

zurechtkommt. Das verwendete Werkzeug kann mit unterschiedlichen und teilweise schlecht vorhersehbaren Kontakt- und Eingriffsbedingungen arbeiten. Weiterhin wird die Standzeit der Werkzeuge basierend auf empirischen Erkenntnissen festgelegt und die Werkzeuge dementsprechend gewechselt. Eine darüber hinausgehende Aufnahme von Werten wurde durch das Projektteam zurückgestellt, wird zukünftig jedoch - wenn Bedarf entsteht - neu aufgegriffen.

Die implementierte Lösung ist in der Lage, die gestellten Aufgaben und Werkstücke zu bearbeiten und bietet gleichzeitig die Möglichkeit, mit geringem Aufwand flexibel auf weitere, ergänzende Anforderungen erweitert und angepasst zu werden.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Außer dem alternativen Antrieb für die Bearbeitung der Door Stops sind ausschließlich Personalkosten für Besprechungen, Recherche und durchgeführte Versuche angefallen.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Durch die durchgeführten Versuche, die Abwägung und Auswahl des Prozesses, der Werkzeuge und des Antriebs ist mit geringem Aufwand der Nachweis erfolgt, dass der eigentliche Bearbeitungsprozess einfach, flexibel und variabel durchgeführt werden kann und bei Folgeprojekten nicht im Mittelpunkt steht.

Auch andere, wesentlich weniger hochtechnisierte Anwendungen sind mittels Roboter durchführbar. Hiermit werden robotergeführte Bearbeitungsfälle auch für Kleinanwender möglich.

Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Das entwickelte System kann sowohl von OFK als auch weiteren Firmen für eine einfache, robuste Bearbeitung von Bauteilen wie z.B. Guss putzen, entgraten oder bearbeiten von Oberflächen angewendet werden.

Veröffentlichungen

Es werden keine Veröffentlichungen seitens ARG angestrebt.