



# DARSTELLUNG EINES PROTOTYPISCHEN AUTOMATISIERUNGSKONZEPTEES ZUM ROBOTERGESTÜTZTEN REINIGEN UND AKTIVIEREN IN DER FLUGZEUGSERIENFERTIGUNG.

Georg Braun , Patrick Kaufmann ,  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., (DLR) Institut für Bauweisen- und Strukturtechnologie. Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg, Deutschland.

Dr.-Ing. Lucas Kiefer,  
Premium AEROTEC GmbH, Haunstetter Straße 225, 86179 Augsburg, Deutschland.

## Zusammenfassung

Das Projekt AGREED bearbeitete aktuelle Fragestellungen bei der Serienfertigung von Mittelstreckenflugzeugen und dabei auch der Teilschalenfertigung. Viele Prozessschritte bei der Teilschalenfertigung werden heutzutage noch komplett oder zu großen Teilen manuell durchgeführt. Dazu wurde im Projekt zunächst, basierend auf einem bestehenden vorwiegend manuellen Fertigungsprozess, ein Konzept für einen ganzheitlich automatisierten Lösungsansatz entwickelt. Einer der Forschungsschwerpunkte in diesem Projekt war die Entwicklung der Prozesstechnologien für das automatisierte Reinigen und Aktivieren von ausgewählten Bauteiloberflächen.

Dieses Paper gibt eine kurzgefasste, abstrahierte Übersicht über die aktuelle Fertigungsprozesskette sowie die Einordnung der Teilprozessschritte Reinigen und Aktivieren in diesen übergeordneten Prozess. Nachfolgend wird die prototypische Automatisierungslösung für die Teilprozesse Reinigen und Aktivieren und die ersten Funktionstests beschrieben. Weiterhin werden potentielle Entwicklungsziele im Hinblick auf eine ganzheitlich automatisierte Prozesskette thematisiert.

## Keywords

Automatisierung, Flugzeug, Mittelstreckenflugzeug, Fertigung, Endeffektor, Fertigungszelle, Roboter, Reinigen, Aktivieren;

## 1. EINLEITUNG

Das Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie Süd am Standort Augsburg und die Firma Premium Aerotec in Augsburg entwickelten 2021 in Kooperation eine industrie-nahe, prototypische Automatisierungslösung für die beiden Vorgänge Reinigen und Aktivieren, welche vor Ort umgesetzt und ersten Tests unterzogen wurde.

Besondere Herausforderungen bezüglich der Entwicklung der Fertigungstechnologien ergaben sich aus der Zielsetzung neuartige Konzepte und Endeffektoren zu entwickeln, welche zum einen eine schlanke Bauweise, geringes Gewicht und eine möglichst einfache Mediensteuerung realisieren. Zum anderen sollte eine hohe Flexibilität erreicht werden, die es ermöglicht, die Prozesstechnologien für unterschiedliche Rumpfschalenbaugruppen in der Fertigung einzusetzen.

## 2. STAND DER TECHNIK UND MOTIVATION

Zu Beginn des AGREED-Projektes beruhte der Fertigungsprozess zur Schalenmontage (s. a. BILD 1) vorwiegend auf manuellen Fertigungsvorgängen.

Der steigende Kostendruck für das Gesamtprodukt und damit einhergehend in der Schalenvormontage, machen einen höheren Automatisierungsgrad erforderlich. Im Zuge

der Prozessautomatisierung wird außerdem die Erhöhung der Prozesssicherheit und Produktqualität angestrebt. Ein weiterer Vorteil einer Automatisierungslösung ist die schnell zu variierende Fertigungsrate zur kurzfristigen Anpassung an die Marktsituation.

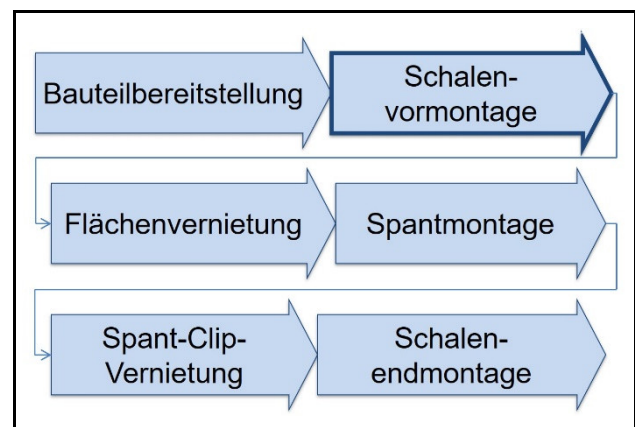


BILD 1. Schalenmontageprozess [1]

## 3. DAS PROJEKT AGREED

Das Projekt AGREED hatte eine Laufzeit vom 01.10.2020 bis zum 31.12.2021. Gemeinsames Ziel der Projektpartner

war es, die anwendungsorientierte Zusammenarbeit für die automatisierte Montage von Rumpfstrukturen voranzutreiben. Um den Transfer in die Praxis zu erleichtern und möglichst viele praxisrelevante Kriterien der Industrie berücksichtigen zu können, wurde eine intensive Zusammenarbeit zwischen Anwendern, Forschungsinstituten und Lieferanten als Projektpartner initiiert.

Die beteiligten Projektpartner sind auf BILD 2 dargestellt.

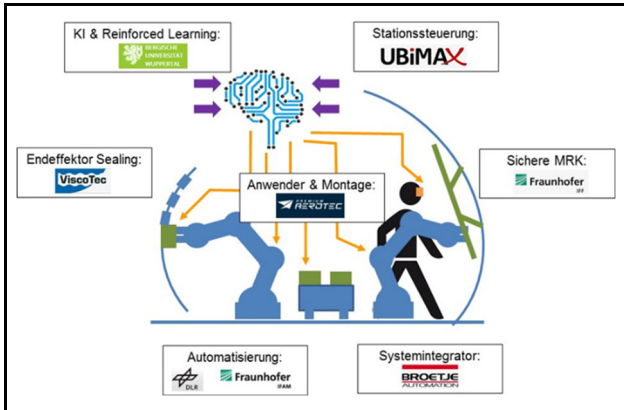


BILD 2. Partner und Themenschwerpunkte im Projekt

Der Forschungsbereich Automatisierung (s. a. BILD 2) beschäftigte sich u. a. mit dem Prozessschritt Schalenvormontage (s. a. BILD 1) und somit mit den Fertigungsvorgängen Reinigen und Aktivieren.

Im weiteren Verlauf, wird vertieft auf den Reinigungs- und Aktivierungsvorgang in der Schalenvormontage eingegangen. Es gibt zum einen die Möglichkeit die Reinigung und Aktivierung durch mechanische Oberflächenbehandlung durchzuführen und zum anderen die Möglichkeit der chemischen Reinigung und Aktivierung.

Maßgebend für die Lösungsfindungen waren hierbei die , Anforderungen und Randbedingungen der PAG-Niederlassung in Augsburg. Aus diesem Grund wurde hier die chemische Vorbehandlung der Fügeflächen an Hautfeld, Stringer und Clips automatisiert.

#### 4. REINIGEN UND AKTIVIEREN

Aufgrund der begrenzten Projektlaufzeit (s. a. Kapitel 3) haben sich die Beteiligten in Augsburg dazu entschlossen, sich bei der Automatisierungslösung nahe an der bestehenden Fertigung zu orientieren.

Die aktuelle Fertigung wurde hinsichtlich benötigter Technologien, Werkzeuge und deren Schnittstellen analysiert.

Die Clips wurden bezüglich ihrer Geometrie, Gewicht, Montageposition und möglicher Greifflächen analysiert und in Gruppen aufgeteilt. Anschließend wurden die Anforderungen bezüglich des automatisierten Handlings und der Vorbehandlung für die Montage am Hautfeld ermittelt.

Ein vereinfachtes Beispiel für einen solchen Clip ist auf BILD 3 dargestellt. Dabei sind die Flächen, welche chemisch gereinigt und aktiviert werden, grün dargestellt.

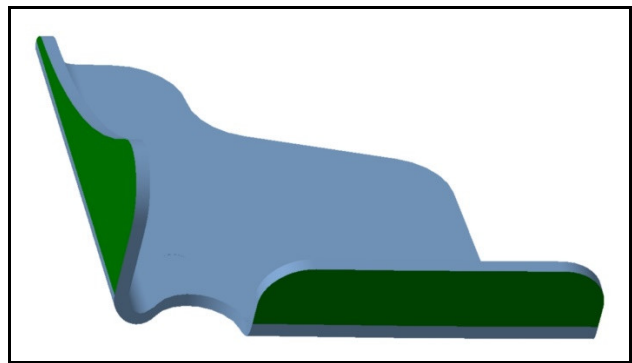


BILD 3. Beispielgeometrie eines Clips

Die Stringer wurden ebenfalls bezüglich ihrer Geometrie- und Handlings Eigenschaften sowie der zu aktivierenden Flächen untersucht. Ein vereinfachter Stringer ist auf BILD 4 dargestellt.

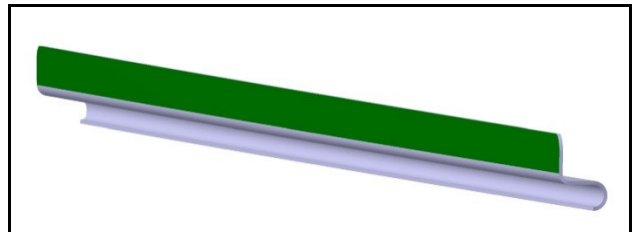


BILD 4. Beispielgeometrie eines Stringers

Weiterhin wurde der Endeffektor ebenfalls zum Reinigen und Aktivieren ausgewählter Flächen des Hautfeldes (Beispiel auf BILD 5, in Anlehnung an [2].) verwendet.

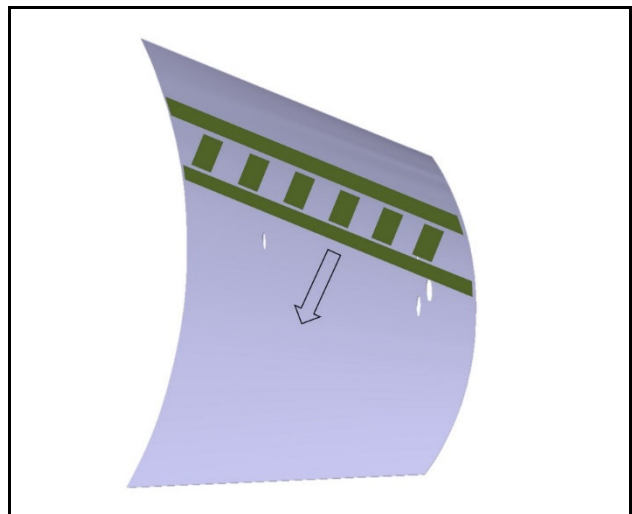


BILD 5. Beispiel einer Hautfeldes mit angedeuteten Verbindungsflächen für Stinger- und Clips

Der Endeffektor wurde für das Reinigen und Aktivieren der Bauteile eines ausgewählten Schalentyps entwickelt, soll aber später auch für das Reinigen und Aktivieren anderer Schalentypen ähnlicher Geometrie verwendet werden können. Die auf BILD 3, BILD 4 und BILD 5 dargestellten Geometrien sind deshalb als generische Bauteile zu verstehen.

## 5. AUTOMATISIERUNGSLÖSUNG ZUM REINIGEN UND AKTIVIEREN

### 5.1. Grundlegende Bemerkungen

Die prototypische Zelle, welche für die Umsetzung der Automatisierungslösung realisiert wurde, ist auf BILD 6 vereinfacht dargestellt.

Nach der Bauteilbereitstellung ist der Prozessschritt Schalenvormontage (s. a. BILD 1) in folgende Vorgänge aufgeteilt (In Anlehnung an [3]).

- **Reinigen und**
- **Aktivieren vorgegebener Bauteilflächen von Stringer, Clips und des Hautfeldes.**
- Sealen der Bauteilflächen.
- Positionierung und Orientierung der Bauteile.
- Fixierung der Bauteile am Hautfeld.
- Weitertransport der fertigen Baugruppe.

Sofern dies für die Durchführung der einzelnen o. g. Vorgänge notwendig ist, wird zuvor eine Bauteilerkennung bzw. Locherkennung durch zwei zusätzliche Kameras, nahe des Endeffektors, durchgeführt.

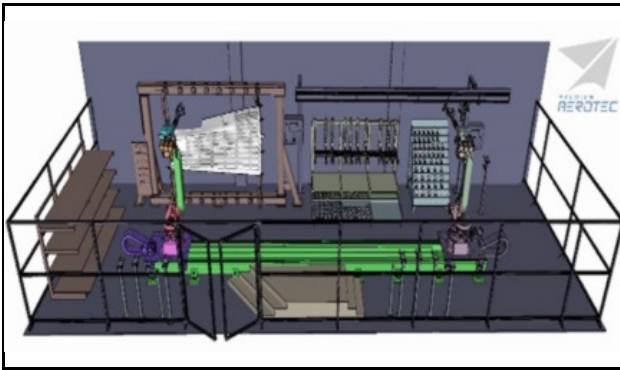


BILD 6. Vereinfachtes Zellenlayout

### 5.2. Systemanforderungen und Randbedingungen

In der auf BILD 6 dargestellten, vereinfachten Fertigungszelle sind zwei COMAU NJ16 mit jeweils einer maximalen Gelenknutzlast von 16kg dargestellt. Diese Traglast muss ausreichen um neben dem Endeffektor noch zwei Kameras mit Halterung und Beleuchtung, Werkzeugwechsler sowie andere Einzelteile aufzunehmen. Diese o. g. Einzelteile benötigen in Summe ca. 7kg Gelenktraglast. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer schlanken Konstruktion des Endeffektors.

Weiterhin ist eine roboterflanschnahe Anordnung der Massen notwendig. Der benötigte Bauraum musste möglichst minimal ausfallen ohne die Funktion zu beeinträchtigen. Diese flanschnahe Anordnung führt ebenfalls zu einem geringeren Trägheitsmoment der Lasten.

Damit sinkt die Wahrscheinlichkeit von Überlastungen an den Roboterachsen, außerdem wirkt sich die kompakte Bauweise positiv auf das Bewegungsprofil innerhalb der beengten Platzverhältnisse aus.

Der geringere Bauraumbedarf wirkt sich ebenfalls positiv auf die Verwendungsmöglichkeit in verschiedenen Flugzeugprogrammen aus, da die Wahrscheinlichkeit einer Kollision mit neuen Störkonturen deutlich gesenkt wird.

Eine solche Bauweise erhöht weiterhin die Ressourceneffizienz [4]. Diese geschieht beispielweise durch einen verminderten Materialverbrauch zur Funktionserfüllung und durch einen verminderten Energieverbrauch der Roboterkomponenten durch das geringe Gewicht, das geringe Trägheitsmoment und der Möglichkeit des Einsatzes von Robotern mit geringer Traglast.

### 5.3. Endeffektor zum Reinigen und Aktivieren

#### 5.3.1. Konzeption

Ein vereinfachtes Modell des Endeffektors ist auf BILD 7 dargestellt.

Da Stringer und Clips jeweils mit unterschiedlichen Flüssigkeiten aktiviert werden müssen und die zulässige Gelenknutzlast eng begrenzt ist wird jeweils ein Endeffektor für die Bearbeitung der Clips-Anschlussflächen und ein Endeffektor zur Bearbeitung der Stringer-Anschlussflächen benötigt.

### 5.3.1.1. Mechanischer Aufbau

Der grundlegende Aufbau des Endeffektors ist auf BILD 7 dargestellt.

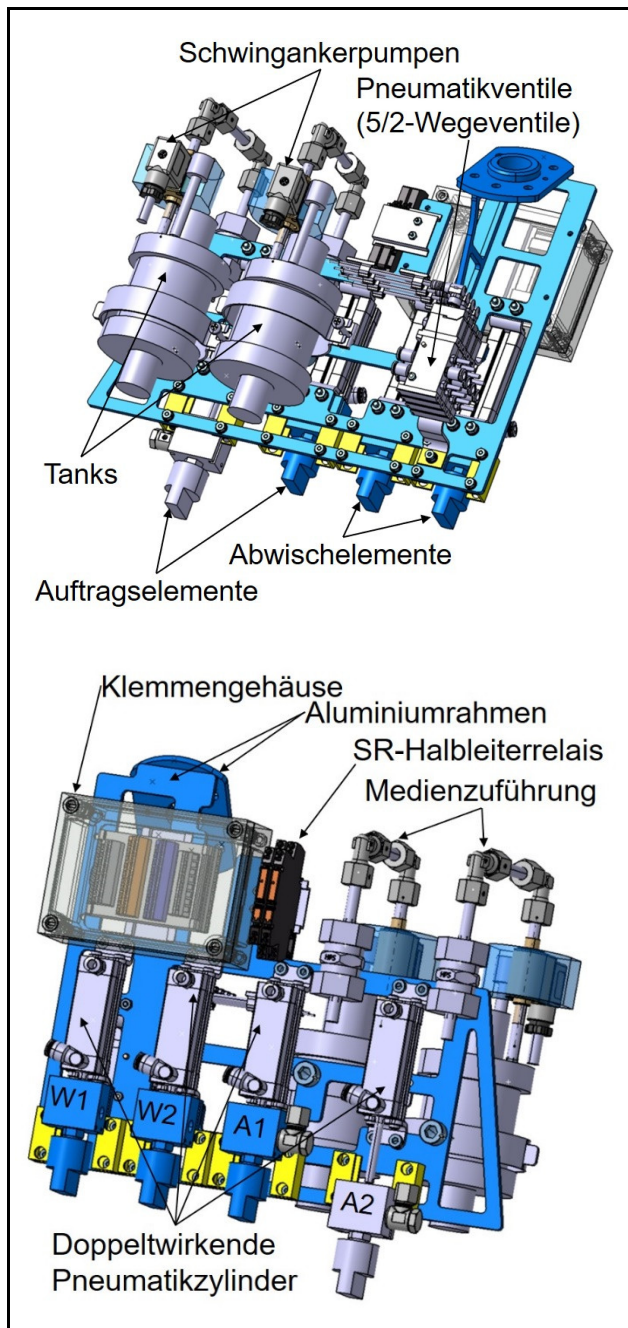


BILD 7. Vereinfachtes CAD-Modell des Endeffektors

Sämtliche Einzelkomponenten sind an einem Aluminiumrahmen angebunden. Der werkzeugseitige Flansch ist Bestandteil dieses Rahmens.

Die Anbindung an den Roboterflansch musste außermittig erfolgen, da links des Klemmgehäuses (BILD 7, unten) ein freier Bauraum für die beiden Kameras (s. a. Kapitel 5.1), die zugehörige Beleuchtung sowie für den Sichtkanal der Kameras freigehalten werden musste.

An der dem Werkzeugflansch abgewandten Seite (BILD 7, unten) sind im unteren Bereich die doppelwirkenden Zy-

linder mit der Auftrags- bzw. den Abwischelementen befestigt. In diesem Bereich sind während des Flüssigkeitsauftrages im Hautfeld teilweise zahlreiche Störkonturen vorhanden, sodass es nicht sinnvoll ist weitere Elemente in diesem Bereich anzuordnen.

Im oberen Bereich sind dann Teile mit größeren Bauvolumen wie beispielsweise Klemmgehäuse und SR-Halbleiterrelais angeordnet, da hier keine Störkonturen dies verhindern.

Aufgrund von Bauraumuntersuchungen hat es sich herausgestellt, dass es sinnvoll ist die großvolumigen Tanks, die Pumpen sowie die Pneumatik Ventile an der dem Werkzeugflansch zugewandten Seite zu montieren (s. a. BILD 7, oben).

Bedingt durch die zahlreich vorhandenen Öffnungen im Aluminiumrahmen, aufgrund der Forderung eines minimalen Rahmengewichtes, waren zahlreiche Möglichkeiten der Leitungsführung am Endeffektor verfügbar.

### 5.3.1.2. Medien- und Energieversorgung

Bei der Versorgung der Auftrags-elemente mit den entsprechenden Flüssigkeiten wurden unterschiedliche Konzepte betrachtet. Für die Auswahl waren im Wesentlichen die Kriterien Gewicht, Bauraum und Nachhaltigkeit entscheidend. Wesentlich für das Thema Nachhaltigkeit war, dass während des Produktionsprozesses keine Einwegverpackungen/-behälter am Endeffektor Verwendung finden.

Aus diesem Grund wurde die Flüssigkeitsversorgung hier auf Basis von wiederverwertbaren Hydraulikkomponenten ausgelegt. Der Aufbau der ausgewählten Lösung ist auf BILD 8 symbolisch dargestellt.

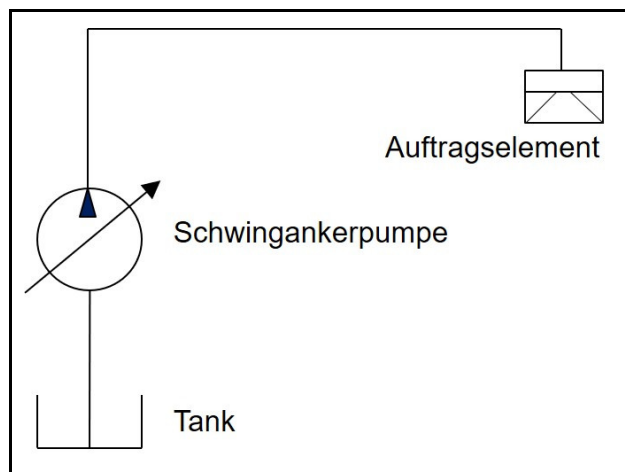


BILD 8. Symbolische Darstellung der hydraulischen Schaltung (in Anlehnung an [5])

Die benötigte Flüssigkeit wird in den Tank (s. a. BILD 9) über die Einfüllöffnung eingefüllt. Diese ist so angeordnet das sie später mit einem geeigneten Einfüllstutzen versehen werden kann um eine automatisierte Betankung zu ermöglichen.

Der Tank wurde dabei so entworfen, dass der Ansaugschlauch, auch bei einer Orientierung des Endeffektors in der Form, dass eine ungünstige Schräglage vorliegt sowie bei niedrigem Füllstand den Tank noch bis auf ein Minimum leeren kann.

Die Belüftung während der Flüssigkeitsabsaugung erfolgt



über das Belüftungsventil. Dieses ist so ausgeführt, dass keine Flüssigkeit nach außen entweichen kann.

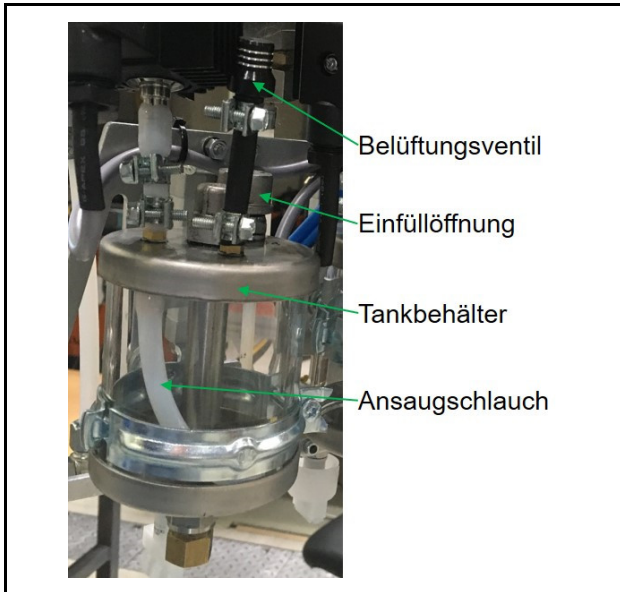


BILD 9. Tank

Das Pumpen der Flüssigkeit erfolgt mit einer Schwingankerpumpe. Diese wird auch als Schwingkolbenpumpe oder Vibrationspumpe bezeichnet [6].

Dieser Pumpentyp wurde ausgewählt aufgrund des geringen Gewichtes, der chemischen Beständigkeit, der einfachen Anschlussmöglichkeiten und der einfachen Ansteuerungsmöglichkeiten hinsichtlich des Volumenstromes.

Die Ansteuerung der Schwingankerpumpe (s. a. BILD 7) wird in Kapitel 5.3.1.3 erläutert.

Die Pumpe entnimmt die Flüssigkeit an der Saugseite aus dem Tank wobei die Ansaugleitung bis zum Tankboden reicht und pumpt die Flüssigkeit dann auf der Druckseite zu dem Auftragselement.

Jeder doppelwirkende Zylinder wird durch ein Wegeventil angesteuert, welches wiederum das Steuerungssignal sowie die Druckluft über den Werkzeugwechsler erhält.

Die Energieversorgung wird ebenfalls über den Werkzeugwechsler sichergestellt.

### 5.3.1.3. Steuerungstechnik

Die Beschreibung der Steuerungstechnik in diesem Kapitel orientiert sich an dem Verhältnissen des ZLP-Augsburg vor Ort. Hier wurden zunächst erste Tests des Endeffektors in Verbindung mit der dort verfügbaren Steuerungstechnik durchgeführt.

Die Steuerung des Endeffektors zum Reinigen- und Aktivieren wurde möglichst einfach gehalten. Im verwendeten Setup am DLR in Augsburg, kam ein KUKA KR 270 zum Einsatz. Die Ansteuerung der doppelwirkenden Zylinder erfolgte über 5/2-Wegeventile als Stellglieder die via EtherCAT über digitale Ausgangssignale geschaltet wurden (s. a. BILD 7). Diese Signale wurden über die KRC, abhängig von der Roboterposition, geschaltet. Dazu wurde eine digitale Ausgangsklemme von Beckhoff genutzt.

Zur Ansteuerung der Schwingankerpumpe wurde in der KUKA internen Software SPS (sps.sub) ein entsprechendes Steuersignal erzeugt und über einen weiteren digitalen Ausgang an die Pumpe geleitet.

Dabei ergaben sich zwei Besonderheiten. Zum einen das die Pumpe in unserem Aufbau mit Gleich- statt mit Wechselspannung betrieben wurde. Um die volle Pumpwirkung zu erhalten musste daher darauf geachtet werden, dass bei der Beaufschlagung mit einer Rechteckspannung (gepulste Gleichspannung) der Einschaltimpuls sowie der Ausschaltimpuls mindestens 12 Millisekunden (ms) lang sind. Da ein längerer Einschaltimpuls keine weitere Veränderung für die Pumpwirkung darstellt, wurde die Fördermenge lediglich über die Länge des Ausschaltimpulses gesteuert. Damit stellt eine Zykluszeit von 24 ms (12 ms Einschalt- und 12 ms Ausschaltimpulsdauer) den Vollastbetrieb dar.

Die zweite Besonderheit entstand durch die relativ hohe Schaltgeschwindigkeit des Pumpensignals. Diese ist zu schnell für ein herkömmliches Relais. Daher wurde dieses durch ein elektronisches SR-Halbleiterrelais ersetzt. Dieses SR-Relais wird dann von einer digitalen Ausgangsklemme angesteuert.

Um die geförderte Flüssigkeitsmenge konstant zur Verbrauchsmenge zu halten, wurde bei der Erzeugung des Pumpensignals noch die aktuelle Robotergeschwindigkeit mitberücksichtigt. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass bei unterschiedlichen Robotergeschwindigkeiten immer die richtige Menge an Reinigungs- oder Aktivierungsflüssigkeit gefördert wird.

Im späteren Projektverlauf wurde die Steuerung in die Gesamtanlage der Firma PAG-Augsburg integriert und entsprechend die Steuerungslogik in ein SINUMERIK-Umfeld überführt.

### 5.3.1.4. Funktionsbeschreibung und Integration

Obwohl zwei Endeffektoren zum Reinigen und Aktivieren zum Einsatz kamen wird hier nur eine gemeinsame Funktionsweise beschrieben, da beide Endeffektoren baugleich sind (s. a. BILD 7).

Der Endeffektor ist durch einen Werkzeugwechsler der Fa. Schunk mit dem Roboterflansch verbunden. Dieser ist notwendig, da mit dem Roboter ebenfalls Endeffektoren zum Handling von Clipsen und Stringern aufgenommen und bewegt werden müssen.

Jeder Endeffektor kann, bezogen auf seine Kombination an Reinigungs- und Aktivierungsmitteln, nur die zugeordneten zu behandelnden Flächen Reinigen und Aktivieren.

Zum besseren Verständnis soll beispielhaft eine Bewegungsabfolge der Elemente am Endeffektor beschrieben werden.

Das Auftragselement A1 (s. a. BILD 7, unten) trägt die Reinigungsflüssigkeit als dünnen Film auf die Bauteiloberfläche auf und das Abwischelement W1 wischt angelöste Verschmutzungen sowie überschüssige Reinigungsflüssigkeit ab.

Anschließend bringt das Auftragselement A2 die Aktivierungsflüssigkeit als dünne Schicht auf die Bauteiloberfläche auf und das Abwischelement W2 wischt innerhalb einer definierten Zeit erneut über die Oberfläche um einen gleichmäßigen Auftrag zu garantieren.

Die Schwierigkeit liegt hierbei beim Aufbringen der genauen Menge an Aktivierungsflüssigkeit. Zu wenig bedeutet eine nicht ausreichende Aktivierung der Oberfläche, wohingegen zu viel Aktivierungsflüssigkeit zu einer eher trennenden Wirkung führt.

Die Auftrags- und Abwischelemente sind hierbei nur aufgesteckt und können leicht gewechselt werden.

Beispiele für zu reinigenden und aktivierenden Flächen sind auf BILD 3, BILD 4 und BILD 5 grün dargestellt.

Nach der Auswertung der vorangegangenen Untersuchungsergebnisse (s. a. Kapitel 4) musste dann entschieden werden ob oder ggf. wie die zu behandelnden Bauteile gehandhabt werden müssen für den Reinigungs- und Aktivierungsvorgang und welche Anlagentechnik hierfür erforderlich ist. Die Handhabung war hier zum Reinigen und Aktivieren der Clips notwendig.

Beim späteren Zusammenbau von Hautfeld, Stringern und Clipsen werden die Endeffektoren ebenfalls dafür genutzt einige Flächen des Hautfeldes zu Reinigen und zu Aktivieren. Welcher Endeffektor zum Reinigen und Aktivieren der Hautfeldfläche zum Einsatz kommt, entscheidet dabei ob ein Clip oder ein Stringer mit dieser Fläche verbunden werden soll.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die automatisierte Schalenvormontage inklusive des Reinigen und Aktivierens von Hautfeld, Stringer und Clips wurde in der Versuchszelle bei der Premium Aerotec GmbH in Augsburg im Rahmen einer Demonstration erfolgreich präsentiert.

Der Prozessschritt Schalenvormontage konnte autonom durchlaufen und die automatisierte Ausführung der Vorgänge konnten auf einem hohen Level demonstriert werden.

Hinsichtlich des Reinigens und Aktivierens konnte der oben beschriebene Endeffektor während der Demonstration der Zellenfunktionalitäten überzeugen.

Ob und welche Modifikationen ggf. an dem Endeffektor notwendig sind sollte im Rahmen eines Langzeittestes unter industriellen Rahmenbedingungen ermittelt werden.

Zielvorgaben beispielsweise hinsichtlich der Stückzahl pro Zeiteinheit können es notwendig machen, das Befüllen der Behälter und den Wechsel der Auftrags- bzw. Abwischelemente zu automatisieren und zu parallelisieren und damit die hiermit verbundenen Zeitbedarfe zu minimieren.

Weiterentwicklungsbedarfe können weiterhin dadurch auftreten, dass weitere Schalentypen automatisiert montiert werden sollen und dadurch zusätzliche Störkonturen auftreten die eine konstruktive Anpassung erforderlich machen.

## 7. LITERATUR

- [1] M. Malecha, „Projektplan AGREED (Automatisierung für flexible und erweiterbare Schalenmontagen mit digitaler Intelligenz) Laufzeit: 01.12.2020 – 31.12.2021“, Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie / Zentrum fuer Leichtbauproduktionstechnologie Augsburg, Augsburg, 2021.
- [2] Augsburg. • *Fully automated shell pre-assembly in project AGREED*. (2021). [Online Video]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=wVorUo0YROE>
- [3] M. Niemair, „AGR33D-SÜD: Automated Shell Assembly - ASA; Bericht HAP3.1; Reinigen und Aktivieren“, PAG Augsburg, Augsburg, 2021.
- [4] Z. I. E. EnArgus, „Ressourceneffizienz“, *EnArgus-Wiki*. 2022. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d10794-2/\\*\\*/Ressourceneffizienz.html?op=Wiki.getwiki](https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d10794-2/**/Ressourceneffizienz.html?op=Wiki.getwiki)
- [5] M. Barthel, W. Mogilowski, M. Scheurmann, W. Eckhard und W. Friedrich, *Friedrich Tabellenbuch Metall- und Maschinentechnik*, 169. Auflage. Köln: Bildungsverlag EINS; westermann, 2017.
- [6] Wikipedia, „Schwingankerpumpe — Wikipedia, die freie Enzyklopädie“. 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Schwingankerpumpe&oldid=194811549>