

Abschlussbericht

Nachhaltige Digitalisierung - Ultraeffizienz und Digitalisierung

Teilprojekt **Industrielle Demontagefabrik 4.0**

von

Jan Henning Seelig, Sven Birkenfeld, Henrike Franke, Florian Hansen, Oliver Keich,
Bernd Nawothnig, Oliver Wisser, Torsten Zeller

CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum YX

Förderkennzeichen: L75 18003

Laufzeit: 01.01.2018 - 30.06.2021

Die Arbeiten dieses Projekts wurden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt.

September 2021



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

ZUWENDUNGSGEBER



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

PROJEKTBETREUER



PTKA

Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Projektträger Karlsruhe

Baden-Württemberg Programme

Hermann-von-Helmholtz-Platz 1

76344 Eggenstein-Leopoldshafen

ERSTELLT DURCH

CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum

Leibnizstraße 23

38678 Clausthal-Zellerfeld

IHRE ANSPRECHPARTNER FÜR DIESEN BERICHT

Name	Telefon	E-Mail
Dipl.-Biol. Jan Henning Seelig, M. Eng.	05323 726 144	jan.seelig@cutec.de
Dr. rer. nat. Torsten Zeller	05323 726 206	torsten.zeller@cutec.de
Dipl.-Ing. Sven Birkenfeld	05323 726 471	sven.birkenfeld@cutec.de

Clausthal-Zellerfeld, den 30. September 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
2	Stand der Wissenschaft und Forschung.....	10
3	Projektziele und Arbeitspakete	12
4	Projektergebnisse.....	14
	AP 1: Konzeption des Demontagemoduls.....	14
	AP 2: Einrichtung der Demonstrationsanlage.....	18
	1. Versorgungsinfrastruktur.....	18
	2. Physischer Aufbau des Demontagemoduls	18
	3. Integration bildgebender Komponenten	46
	4. Datenverarbeitende Hardware-Infrastruktur.....	46
	5. Software-Systeme	47
	6. Sicherheitskonzept.....	47
	AP 3: Objekterkennung und -ausrichtung.....	49
	1. Produktidentifikation.....	49
	2. Lage- und Bauteilverifizierung während der Demontage.....	52
	AP 4: Entwicklung & Optimierung der Demontageabläufe.....	67
	1. Definition der Demontageanleitungen.....	67
	2. Datenstruktur, Datenbank und Kommunikation der Systemkomponenten	69
	3. Steuerbefehle und Demontageablauf	72
	AP 5: Robotersteuerung und Benutzer-Interface	77
	1. Robotersteuerung	77
	2. Aufbau der Benutzer-Interface	79
	AP 6: Feedbackfunktionen	91
	1. Zustandsanalyse	91
	2. Eingriffsmöglichkeiten für den Benutzer.....	92
	AP 7: Integration in die Ultraeffizienzfabrik.....	96
	AP 8: Flankierende Maßnahmen.....	97
	1. Materialanalysen der Einzelkomponenten	97
	2. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	107
5	Literaturverzeichnis.....	111
	ANHANG	113

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundkonzept der Demontagefabrik mit Sammelstelle, Anlieferung, Vorsortierung und spezialisierten Demontagemodulen	13
Abbildung 2: Darstellung der Projektstruktur	13
Abbildung 3: Schema einer industriellen Demontagefabrik	14
Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Demontagemoduls.....	15
Abbildung 5: Virtuelle Darstellung der Demontageanlage	17
Abbildung 6: Demontierte Bauteile des Modellprodukts Valeo 03L 903 023 L	19
Abbildung 7: Vermessungswerkzeug für den Zentrischgreifer mit definiertem Arbeitspunkt (TCP).....	21
Abbildung 8: Vermessungswerkzeug für den Artec Space Spider 3D-Scanner.....	21
Abbildung 9: Frontansicht auf ein robotermontiertes SWK-021 mit vier Druckluftanschlüssen (schwarze und blaue Schläuche) und 19-poligem Elektromodul	22
Abbildung 10: Aufsicht auf den Werkzeugbahnhof der KR30-Roboter mit allen zwölf unterschiedlichen Werkzeugen und der Möglichkeit der Erweiterung um zwei weitere Ablageplätze	23
Abbildung 11: Arbeitstisch mit Greifer und Auspressvorrichtung. Links: realer Aufbau, rechts: schematisch.....	24
Abbildung 12: Austreibestempel unter der Welle einer im Spanntisch eingelegten Lichtmaschine	25
Abbildung 13: Gefedertes Schraubsystem für das robotergestützte Entfernen von Schrauben mittels Druckluft-Schlagschrauber. Links: in Verwendung, rechts: schematisch	26
Abbildung 14: Magnetische Schraubernuss, Schlüsselweite 8	27
Abbildung 15: Schraubenabstreifer mit FDM-gedrucktem Gehäuse, Ink-Jet-gedruckten Abstreiflippen, Abstreifer für Torxschrauben (untere rote Markierung) und Druckluftrotationsvibrator (obere rote Markierung).....	27
Abbildung 16: Lötverbindungen zwischen Statorwicklung und Diodenplatte	29
Abbildung 17: Mit Schlauchschellen befestigte pneumatische Schneidzange (Hauptbild), angesetzte gehärtete Klingen (oben rechts)	30
Abbildung 18: Konstruktion der Greiferbacken aus gescannten 3D-Daten der Einzelkomponenten (Hier am Beispiel eines Lichtmaschinen-Gehäuses).....	31
Abbildung 19: Mittels Ink-Jet Verfahren hergestellte Greiferbacken zum Greifen der Lichtmaschine und des Schleifringlagerschilds	31
Abbildung 20: Selbstkonstruierte, formschlüssige Greiferbacken am Parallelgreifer des KR180	32
Abbildung 21: Finger, Backen und Spezialwerkzeuge des großen Parallelgreifers am KR180	33
Abbildung 22: Greifer für den Multifunktionsregler mit justierbarer schwarzer Haltespange zur Begrenzung des Öffnungshubs	34
Abbildung 23: Universalgreifer für Kunststoffhülsen, Schleifringlagerschild, Rotor und Antriebslagerschild	36
Abbildung 24: Kombiniertes Greifer für die Gleichrichterdiodeplatte und die Kunststoffabdeckung der Leitungen.....	37
Abbildung 25: Greifer für die adaptierende Stahlbuchse des Austreibestempels (oben rechts im Bild) mit ausgekleideten Greifflächen	38
Abbildung 26: Statorgreifer mit wechselbaren Kunststoffauflagen und stirnseitigen Stahlblechen	39
Abbildung 27: Magnetgreifer mit Stromversorgung und Signalleitung, montiert auf einem SWA-076 der Firma Schunk	40
Abbildung 28: Automatisiertes Ablagesystem zum Einsortieren der demontierten Bauteile	43
Abbildung 29: Frontansicht auf den 3D-Drucker Ender 5 Plus der Firma Shenzhen Creality 3D Technology Co., Ltd.....	44

Abbildung 30: Frontansicht auf den 3D Ink-Jet Drucker Keyence Agilista 3200W.....	45
Abbildung 31: Scanvorgang der Lichtmaschine auf der Waage mit dem am Roboterarm montierten Artec Space Spider 3D-Scanner.....	50
Abbildung 32: Halterung für die Lichtmaschine vom Typ Valeo 03L 903 023 L (L2) auf der Waage.....	52
Abbildung 33: Beispiel für den 3D-Prototyp vor (links) und nach (rechts) der Bearbeitung in Rhino 6	53
Abbildung 34: Beispiele für die Einpassung des 3D-Prototypen (grün) in der Bildszene (rot) mittels Surface-Matching-Algorithmus (MVTec Halcon 20.11). Aufgrund der Kamerapositionierung über dem Arbeitstisch wird nur ein Teilausschnitt des 3D-Prototyps benötigt.	53
Abbildung 35: 3D-Prototypen der Lichtmaschine vom Typ Valeo 03L 903 023 L (L2), welche für die Lageverifizierung unterschiedlicher Demontagezustände verwendet wurden	54
Abbildung 36: Benutzerinterface des RoboValidEye Service	55
Abbildung 37: Benutzeroberfläche RoboValidEye Setup zur Bestimmung der optimalen Parametereinstellungen für das Surface-Matching.....	59
Abbildung 38: Benutzeroberfläche für Statusanzeige und Auswahl des 3D-Kamerasystems	60
Abbildung 39: Benutzeroberfläche zur Speicherung der Parametereinstellungen für das Surface-Matching in der Datenbank	61
Abbildung 40: Statistik der Posenkoordinaten aus einer Sequenz von 100 Surface-Matchings; Mittelwert (μ), Median, Standardabweichung (std), 95 % Konfidenzintervall (CI), Wahrscheinlichkeit für das Auftreten innerhalb eines Schwellenwertes (hier 0,5 mm) in Prozent (probInThresh(0.5)).....	62
Abbildung 41: Histogramm der Häufigkeit verschiedener Messungen für die Koordinate y_t bei einer Sequenz von 100 Surface-Matchings.....	63
Abbildung 42: Benutzerinterface RoboValidEye Setup zur Erfassung der Koordinaten und Tiefenmessung für die Verifizierung der Schraubendemontage	64
Abbildung 43: Aufsicht auf die Lichtmaschine als Tiefenbild. Die Farbe codiert den Abstand zur Kamera, die Rechtecke zeigen die Schraubenpositionen und sind mit den internen Bezeichnungen der jeweiligen Schraube beschriftet.	65
Abbildung 44: Beispiele für zwei Demontageschritte inkl. Koordinaten und generierter Bauteile	68
Abbildung 45: Sicht der verwendeten KRC Subroutines	70
Abbildung 46: Beispielhafte Darstellung für Logging-Daten, welche in der Datenbank hinterlegt werden.....	72
Abbildung 47: Prinzipielle Abfolge von Einzelschritten einer Teilsequenz des deterministischen endlichen Automaten (DEA)	73
Abbildung 48: Statusanzeige und Kontrollfunktionen für die Roboter im Benutzer-Front-End.....	80
Abbildung 49: Steuerung und Visualisierung der Demontagesequenz im Benutzer-Front-End.....	83
Abbildung 50: Benutzeroberfläche zur Definition einzelner Demontageschritte	86
Abbildung 51: Benutzeroberfläche zur Konfiguration der Pattern-Matching-Algorithmen für die Produktidentifikation	87
Abbildung 52: Visualisierung der Produktidentifikation durch Matching eines 3D-Teilschans (rot) mit den hinterlegten Prototypen der verschiedenen Lichtmaschinen	88
Abbildung 53: Dialogfenster zur Konfiguration der Roboter und derer Unterprogramme	89
Abbildung 54: Benutzerschnittstelle zur Steuerung der peripheren Komponenten.....	90
Abbildung 55: Mobiles Eingabegerät für die optimale Kontrolle über den Prozess. Die nummerierten Tastenbelegungen werden im Text detailliert beschrieben. (Quelle: EasySMX)	93

Abbildung 56: Beispielhafter manueller Demontageschritt des verbauten Stators zur Trennung von Blechpaket und Kupferwicklung (links & Mitte), Blechpaket des Stators vor der Analyse (rechts)	98
Abbildung 57: Materialzusammensetzungen der Al-reichen Komponenten analysiert mit RFA-Handspektrometer vom Typ Niton XL2 plus	100
Abbildung 58: Materialzusammensetzungen der Fe-reichen Komponenten analysiert mit RFA-Handspektrometer vom Typ Niton XL2 plus	102
Abbildung 59: Links: Materialgewinnung mittels Standbohrmaschine, hier am Beispiel der Riemenscheibe; rechts: Materialgewinnung mittels Drehbank, hier am Beispiel der Rotorwelle	103
Abbildung 60: Zusammensetzung der Legierungselemente der Al-reichen Komponenten, analysiert mittels ICP-OES	104
Abbildung 61: Zusammensetzung der Legierungselemente der Fe-reichen Komponenten, analysiert mittels ICP-OES	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über alle definierten Demontage- und Ablageschritte für die Demontage der Lichtmaschine vom Typ L2.....	74
Tabelle 2: Materialzusammensetzungen sowie vorgeschlagene Legierungen der Einzelkomponenten der Lichtmaschine L2, analysiert mittels RFA Handspektrometer. Gehalte sind in Gew.-% angegeben. (<LOD - Wert liegt unter der Nachweisgrenze; n.d. – nicht detektiert)	99
Tabelle 3: Kostenaufstellung für das im Projekt erstellte Demontagemodul	107
Tabelle 4: Bauteile der Lichtmaschine L2 mit Legierungstyp, Gewicht, Schrottart und Verkaufspreis bei theoretisch vollständiger Materialtrennung im Demontageprozess (Stand: 26.09.21).....	108
Tabelle 5: Bauteile der Lichtmaschine L2 mit Legierungstyp, Gewicht, Schrottart und Verkaufspreis für die zum Berichtszeitpunkt vollständig automatisiert erreichte Demontagetiefe (Stand: 26.09.21)	109

1 Einleitung

Das Land Baden-Württemberg konkretisiert derzeit seine ressortübergreifende Digitalisierungsstrategie mit dem Ziel, die Nachhaltigkeit und Innovationskraft, verbunden mit einem konkreten Nutzen für die Bürgerinnen und Bürger, zu intensivieren. In diesem Rahmen hat der Ausbau der baden-württembergischen Vorreiterrolle auf dem Gebiet der Digitalisierung der Industrie – also die Transformation zur Industrie 4.0 – einen hohen Stellenwert. Dies bezieht sich nicht nur auf die Produktionsphase, sondern ebenfalls auf die End-of-Life-Phase (EoL) im Produktlebenszyklus. Der Ausbau der Ressourceneffizienz besitzt in Baden-Württemberg seit Langem einen hohen Stellenwert, da die Schonung natürlicher Ressourcen nicht nur aufgrund ökologischer Aspekte, sondern auch aus wirtschaftlicher Sicht bedeutend ist. Zum einen ist eine gesicherte Rohstoffversorgung für das produzierende Gewerbe unabdingbar, zum anderen können insbesondere Branchen wie der Maschinen- und Anlagenbau von der Weiterentwicklung vorhandener Techniken oder der Entwicklung neuer Recyclingtechnologien profitieren.

Beim Durchlaufen der etablierten Recyclingverfahren erfahren hochwertige Materialien oftmals ein Downcycling. Die Ursachen sind dabei vielfältig. Beispiele sind unzureichende Auftrennung in der Zerkleinerung von EoL-Produkten oder Anhaftungen und Fehlwürfe im Rahmen der Sortierung. Die Materialien stehen damit nicht erneut für hochwertige Anwendungen zur Verfügung, was eine verstärkte Verwendung von Primärmaterialien notwendig macht. Abhilfe soll an dieser Stelle die sogenannte Demontagefabrik im urbanen Raum schaffen. Diese soll die Möglichkeiten der Industrie 4.0 für das Recycling beispielhaft abbilden, indem sie die hochwertige Materialtrennung aus EoL-Produkten im technischen Demonstrationsmaßstab entwickelt und an einem konkreten Produkttyp demonstriert.

Die geplanten Arbeiten basieren auf den vorangegangenen Projekten „Demontagefabrik im urbanen Raum – Erweiterte Stoffstromanalyse“ [1] und „Demontagefabrik im urbanen Raum – Konzeption und Planung“ [2]. In diesen wurde ein Konzept zur Rückgewinnung der in der „Analyse kritischer Rohstoffe für die Landesstrategie Baden-Württemberg“ [3] identifizierten Schlüsselemente auf Basis der Demontage von EoL-Produkten entwickelt. Durch eine Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde in diesem Rahmen aufgezeigt, dass die Demontage definierter Altgerätegruppen zwecks Rückgewinnung sortenreiner Rohstofffraktionen durch den Einsatz von Robotertechnik wirtschaftlich betrieben werden kann. Es zeigte sich dabei, dass hauptsächlich die Massenelemente zur wirtschaftlichen Betriebsweise beitragen, was den Umfang potentiell durch Demontage zu recycelnder Produkte gegenüber vorherigen Annahmen deutlich ausweitet.

Das Konzept der Demontage von Altprodukten bietet Potentiale für die Kreislaufwirtschaft, die über die Rückgewinnung in Produkten enthaltener Materialien deutlich hinausgehen. Ganz im Sinne der Abfallhierarchie, wie sie im Kreislaufwirtschaftsgesetz definiert ist, kann die Demontage auch bei der Vorbereitung zur Wiederverwendung zum Einsatz kommen. Bei dieser ist die durch eine Automatisierung erreichte Wirtschaftlichkeit des Prozesses von besonderer Bedeutung, da diese das Produktspektrum in Richtung kleinerer bzw. kostengünstigerer EoL-Produkte ausweitet, für die bisher nur die maschinelle Zerkleinerung und Sortierung in Frage kam. Das Projekt „Industrielle Demontagefabrik 4.0“ hatte daher zum Ziel, ein automatisiertes Demontagemodul für ein ausgewähltes Modellprodukt zu entwickeln und in Form eines Demonstrators in die Realität umzusetzen.

2 Stand der Wissenschaft und Forschung

Die Demontage von Altgeräten wird bisher nicht auf breiter Basis durchgeführt. Eine Bauteil- und Rohstoffrückgewinnung durch Demontage bzw. eine Wiederaufbereitung von Altgeräten findet vielmehr in einzelnen Ausnahmefällen Anwendung, in denen die Wirtschaftlichkeit durch eine hohe Wertstoffkonzentration bzw. einen hohen Wiederverkaufswert der Produkte gegeben ist. Grund dafür ist die Tatsache, dass im Unterschied zur Montage die Demontage immer noch vornehmlich manuell durchgeführt wird. Dies ist bei den Lohnstrukturen westlicher Industriestaaten nur in wenigen Fällen wirtschaftlich zu rechtfertigen.

Die grundsätzliche Idee der Erzeugung reiner Sekundärmaterialfraktionen durch eine Automatisierung der Demontage ist keine Entwicklung der letzten Jahre. Es wurden in der Vergangenheit bereits diverse Forschungsarbeiten zu der Thematik durchgeführt (z.B. [4]-[9]). Eine Überführung der automatisierten Demontage in die industrielle Praxis wurde bisher jedoch nicht realisiert.

Voraussetzung für eine dauerhaft wirtschaftliche Betriebsweise einer Demontageanlage ist deren Anpassungsfähigkeit auf variierende Produkttypen im Input. Dies ist durch den Einsatz von Industrierobotern möglich, die aufgrund der Vielfalt adaptierbarer Werkzeuge eine hohe Flexibilität hinsichtlich zu bewältigender Demontageaufgaben aufweisen. Die Robotik hat in den vergangenen Jahren im Zuge der zunehmenden Automatisierung der Industrie stark an Bedeutung gewonnen. Dennoch stellt ihre Integration in Maschinenprozesse aufgrund der Synchronisation nach wie vor eine Herausforderung dar [10]. Mit der Entwicklung neuer und leistungstärkerer Rechner sind – auch unter Berücksichtigung sehr hoher Arbeitsschutzrichtlinien – die Anwendungsbereiche von Robotern zur Entlastung menschlicher Arbeitskräfte stetig ausgeweitet worden.

Bezogen auf die Hardware konnte in den letzten Jahrzehnten ebenfalls ein starker Innovationsschub beobachtet werden. Während in den Anfängen durch die Nutzung von Robotik im industriellen Bereich lediglich einfachste Bewegungsabläufe umgesetzt werden konnten, ist inzwischen eine hochpräzise, automatisierte Anpassung der Bewegungsabläufe auf äußere Gegebenheiten realisierbar. Das schließt neben automatisierten Aktionen nach der Analyse vorliegender Bauteile auch Reaktionen auf unvorhersehbare Systemzustände ein. Beispielhaft sind Roboter zu deutlich komplexeren Bewegungsabläufen fähig, wie sie z.B. das Fußball- / Tischtennispielen oder die eigenständige Bewegung auf unwegsamem Untergrund erfordern [11], [12].

Neben der eigentlichen Robotertechnologie ist auch die technische Peripherie für die flexible Arbeitsweise von Industrierobotern stark fortgeschritten. Ein sehr wichtiges Themenfeld ist die

Bildererkennung und der Gewinn von Informationen durch Szenenanalyse. Für die Ableitung und Planung resultierender Bewegungsabläufe sind dabei relevante Informationen zu gewinnen und auszuwerten. Grundlegend für diese Technologie ist eine schnelle und effiziente Bildererkennung, die eine Umwandlung der vorliegenden Gegebenheiten in für das Robotersystem verarbeitbare Informationen erlaubt. Die Geschwindigkeit der Datenverarbeitung ist mitbestimmend für die Wirtschaftlichkeit der Gesamtsysteme.

3 Projektziele und Arbeitspakete

Das Projekt „Industrielle Demontagefabrik 4.0“ hatte zum Ziel, eine Anlage zur automatisierten Demontage eines konkreten Modellproduktes zu entwickeln. Die Beschränkung des Produktspektrums erfolgte mit dem Ziel, den Fokus auf die Entwicklung der grundsätzlich notwendigen Systemfunktionalitäten zu legen. Die Entwicklungen sollen zukünftig als Nukleus für die Ausweitung des Anwendungsspektrums auf weitere Produktgruppen dienen.

Aufbauend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Projekte „Demontagefabrik im urbanen Raum – Erweiterte Stoffstromanalyse“ [1] und „Demontagefabrik im urbanen Raum – Konzeption und Planung“ [2] wurde mit Lichtmaschinen aus dem Kfz-Bereich ein Beispielprodukt aus dem Feld der rotierenden elektrischen Maschinen gewählt. Für diesen Produkttyp bestehen bereits etablierte Strukturen zur Aufbereitung von Altgeräten zwecks Wiederverwendung sowie entsprechende Absatzstrukturen. Daher sind die im Projekt erarbeiteten Entwicklungen als industrienah einzustufen und weisen eine hohe Wahrscheinlichkeit der industriellen Umsetzung auf.

Konkret wurde im Projektverlauf ein funktionsfähiger Demonstrator eines Moduls zur Demontage von Lichtmaschinen durch Industrieroboter erstellt. Im industriellen Maßstab wird die Demontagefabrik zur Verarbeitung großer Stückzahlen verschiedener Produkttypen befähigt, indem eine an die benötigte Verarbeitungskapazität angepasste Anzahl dieser Demontagemodule betrieben wird. Gegenüber einer robotergestützten Montage mit stets identischen Abläufen, stellt sich die Demontage als ungleich komplexere maschinelle Aufgabe dar. Zwecks Sicherstellung der Funktionalitäten des Demontagemoduls war daher die Anwendung unterschiedlicher Felder der digitalen Datenverarbeitung notwendig.

Die gesamte interne Logistik einer zukünftigen Demontagefabrik wird vollautomatisiert unter geringem personellem Einsatz ablaufen. Im Vorgängerprojekt „Demontagefabrik im urbanen Raum – Konzeption und Planung“ [2] wurde, aufbauend auf den Erkenntnissen aus [13], eine zentrale Vorselektion der zu demontierenden Geräte im Anschluss an die Anlieferung seitens spezialisierter Sammelstellen eingeplant. Es wird daher vorgesehen, dass bei dieser Vorsortierung Kategorien nach unterschiedlichen Konstruktionsweisen der Geräte erzeugt werden, die in spezialisierte Demontagemodule zur weiteren Verarbeitung überführt werden (Abbildung 1). Ungeeignete Objekte werden ausgeschleust. Die Vorsortierung hat zudem eine Minimierung der vorzuhaltenden Werkzeuge an den Demontageplätzen zur Folge, was zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit beiträgt.

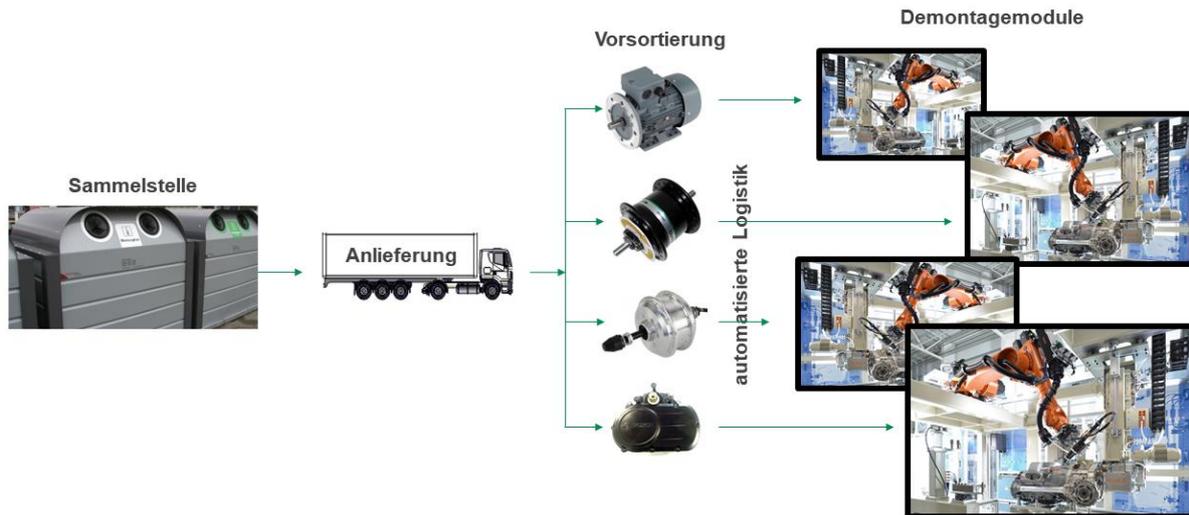


Abbildung 1: Grundkonzept der Demontagefabrik mit Sammelstelle, Anlieferung, Vorsortierung und spezialisierten Demontagemodulen

Ein integriertes, übergreifendes Datenmanagementsystem kann das Zuordnen der EoL-Produkte vornehmen und die Übergabe an die Demontagemodule sowie die internen Abläufe der Demontagemodule steuern. Das Schlüsselement ist dabei die digitale Datenverarbeitung, die eine ganze Reihe unumgänglicher Aufgaben erfüllen muss. Diese werden in den Beschreibungen der durchgeführten Arbeiten in den Arbeitspaketen eingehender skizziert. Die Projektstruktur ist in Abbildung 2 dargestellt.

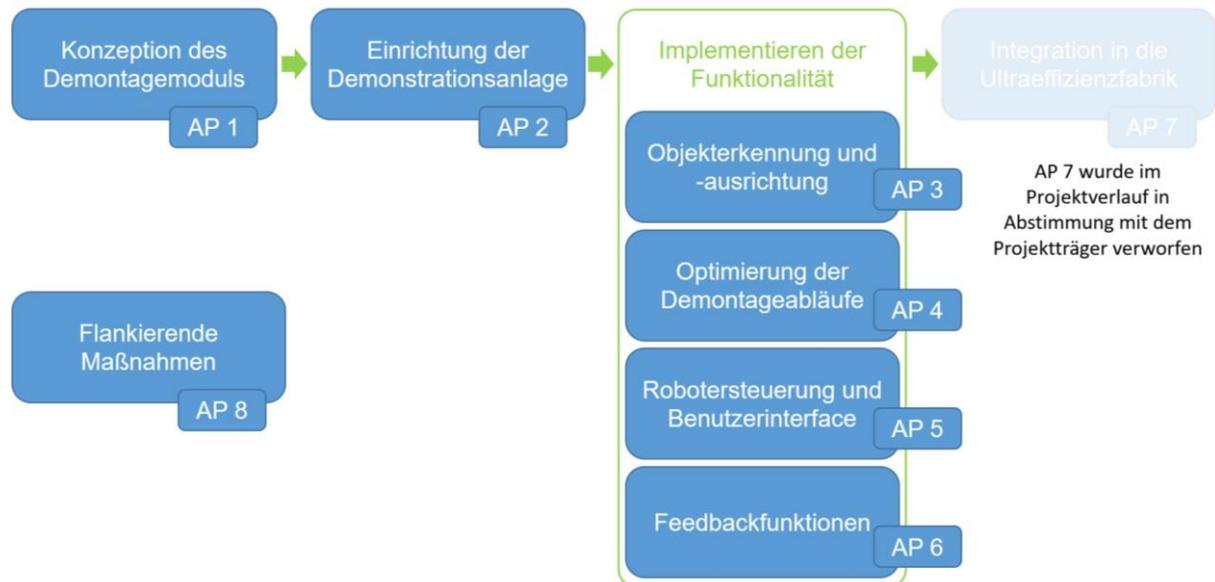


Abbildung 2: Darstellung der Projektstruktur

4 Projektergebnisse

AP 1: Konzeption des Demontagemoduls

In diesem AP wurde zunächst der grundsätzliche physische Aufbau des Demontagemoduls entworfen, welches als zentrales Element zur teilweisen oder vollständigen Demontage definierter EoL-Produkte befähigt ist. Zwecks Erläuterung des Funktionsumfangs des im Projektverlauf erstellten Demontagemoduls wird dessen Position im Umfeld der zukünftigen Demontagefabrik erläutert. Als Übersicht dient Abbildung 3.

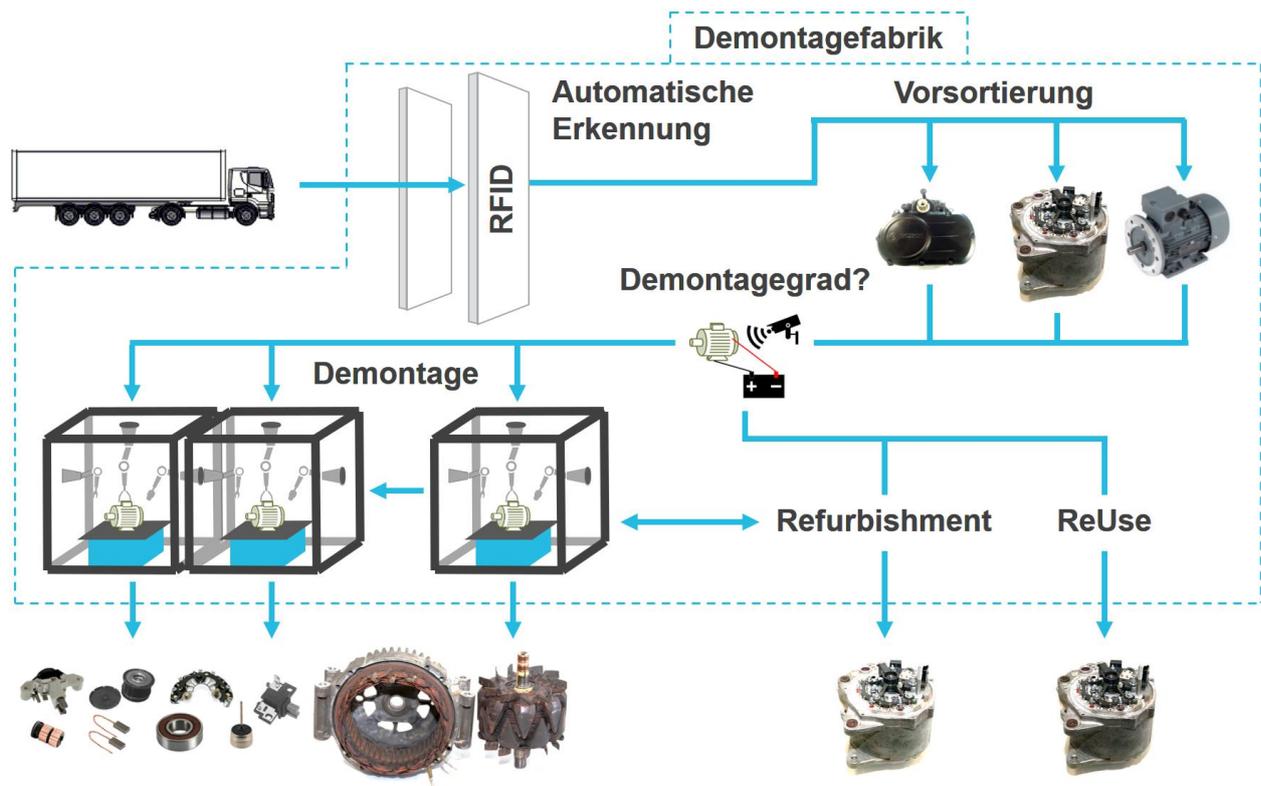


Abbildung 3: Schema einer industriellen Demontagefabrik

Es ist vorgesehen, dass die Demontagefabrik von Sammelstellen mit einer Vorauswahl hinsichtlich des Produkttyps geeigneter EoL-Produkte beliefert wird. Bei Anlieferung dient eine automatische Erkennung der Informationsübermittlung zu den gelieferten Chargen (z.B. per RFID und Abruf aus einer Datenbank). Die EoL-Produkte werden daraufhin vorsortiert, wobei beispielsweise die benötigte Werkzeugausstattung in den Demontagemodulen als Grundlage der Zuordnung dienen kann. Auf diese Weise kann der Umfang der vorgehaltenen Werkzeugausstattung optimiert werden. Nach Zuordnung zu den Modulen sollen zum Einschätzen der Funktionstüchtigkeit verschiedene Testverfahren angewendet werden (z.B. elektrische, mechanische oder akustische Tests). Diese dienen der Entscheidung über das weitere Vorgehen für das individuelle Produkt. Hierbei können verschiedene Optionen als

ökonomisch oder ökologisch vorteilhaft identifiziert werden, wie z.B. rohstoffliches Recycling, Wiederaufbereitung durch Demontage (Refurbishment) oder eine direkte Wiederverwendung (Reuse). Auch eine Kombination der verschiedenen Optionen ist möglich. Die Testergebnisse sowie weitere Kriterien, wie z.B. die Nachfrage nach gebrauchten Exemplaren der Produkte, fließt in die Entscheidung über die Demontagetiefe ein. In den Demontagemodulen selbst (Abbildung 4) werden die so zuvor festgelegten Demontageschritte durchgeführt. Ergebnis sind die entsprechend ausgebauten Bauteile oder Baugruppen.

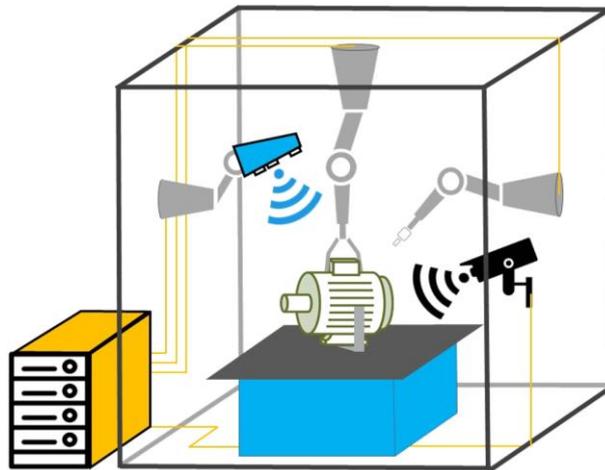


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Demontagemoduls

Ein Demontagemodul muss für die beschriebenen Anforderungen folgende Aufgaben bewältigen können, die durch den Einsatz digitaler Datenverarbeitung ermöglicht werden:

- Identifizierung
- Szenenanalyse
- Lokalisierung
- Spezifikationsabgleich mit einer Datenbank
- Ablaufplanung
- Robotersteuerung

Ein Demontagemodul soll nach Aufgabe eines Produkts an einem definierten Übergabepunkt durch bildgebende Verfahren den Produkttyp identifizieren. Für den Abgleich der optisch erfassten Daten mit den werkseitigen Spezifikationen kommen 3D-Scanner sowie 2D-Kameras zum Einsatz. Die Identifizierung erfolgt durch das Matching eines durch den 3D-Scanner erhaltenen Teilscans (Punktwolke) mit Produktdaten, die zuvor für die zu verarbeitenden EoL-Produkte in einer angebundenen Demontage-Datenbank hinterlegt wurden. Der für den jeweiligen Produkttyp in der Datenbank hinterlegte Demontageablauf mit den konkreten Steuerbefehlen für die Roboter wird daraufhin vom System abgerufen und ausgeführt.

Das Demontagemodul besteht aus den folgenden Komponenten:

- ein zentraler Arbeitstisch mit Aufspanneinheit für das Produkt sowie eine darin integrierte Austreibeeinheit für die Rotoren und die Lager der Lichtmaschinen,
- optische Erkennungshardware (siehe AP 3),
- Demontageroboter inklusive Steuereinheiten,
- Werkzeuge und deren Wechselsysteme,
- Hardware für die Datenverarbeitung,
- ein Ablagesystem für die demontierten Bauteile,
- Sicherheitstechnik sowie
- ein zentrales Prozessleitsystem zur Steuerung aller Komponenten.

Die maschinelle Ausstattung des Demontagemoduls wurde auf Basis am Markt erhältlicher Robotersysteme inklusive der zugehörigen Steuerungseinheiten konzipiert. Das System umfasst drei Roboter der Firma KUKA mit Handlinggewichten von einmal 180 kg sowie zweimal 30 kg. Die zwei leichteren Modelle lösen unterschiedliche Verbindungen und übergeben die demontierten Bauelemente an das Ablagesystem. Dazu stehen Greifer in verschiedensten Größen und Geometrien sowie Schraubwerkzeuge mit unterschiedlichen Bits bzw. Nüssen in Werkzeugbahnhöfen zur Verfügung. Der Roboter mit dem hohen Handlinggewicht verfügt über verschiedene Greifer zur Handhabung und Positionierung der EoL-Produkte. Die Greiftechnik wurde von der Firma Schunk bezogen.

Um anfänglich Informationen über die zu automatisierenden Demontageschritte zu sammeln, wurden manuelle Demontageversuche mit unterschiedlichen Lichtmaschinentypen durchgeführt. Auf dieser Basis wurden die für die Demontage notwendigen Greif- und Schraubwerkzeuge festgelegt, um die Ausstattung und den Aufbau des Demontagemoduls inklusive Werkzeugwechselstationen konkret planen zu können. Des Weiteren konnten mittels der manuellen Demontageversuche verschiedene Arbeitsschritte identifiziert werden, welche eine besondere Herausforderung darstellen und bei der Planung des Moduls berücksichtigt werden mussten. Dies waren z.B. große notwendige Kräfte bei festsitzenden Gehäuseteilen, unzugängliche und zerbrechliche Einzelteile, welche schwer zu greifen sind oder aber verschiedene Typen von Schraubverbindungen, welche unterschiedlich komplexe Automatisierungsstrategien erfordern.

Neben der Ausstattung an sich war deren räumliche Anordnung sinnvoll zu planen, um den Materialfluss der angelieferten Lichtmaschinen und der demontierten Einzelteile kompakt zu gestalten sowie die Erreichbarkeit der Lichtmaschinen durch die Roboter sicherstellen zu können.

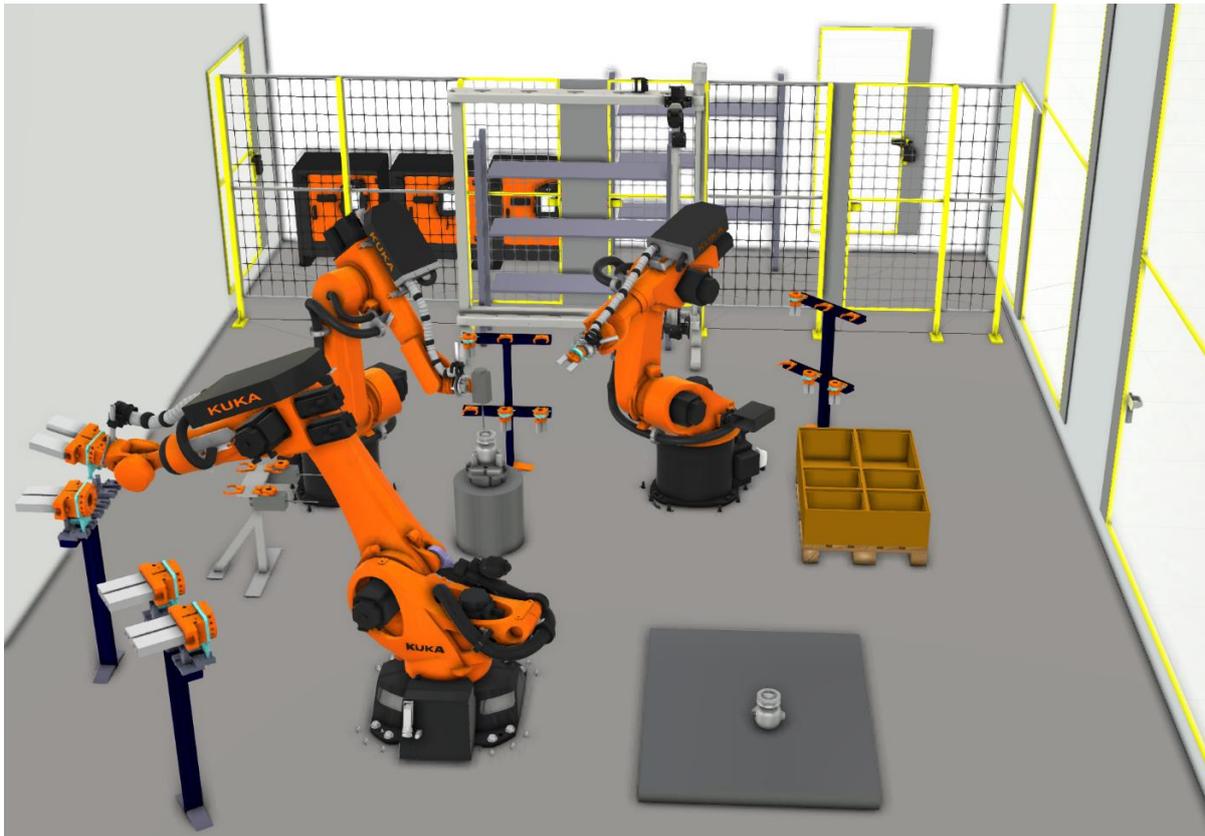


Abbildung 5: Virtuelle Darstellung der Demontageanlage

Abbildung 5 zeigt die Planung der Demontageanlage, die mithilfe des Simulationsprogramms KUKA.Sim erstellt wurde. Hierbei wurden die drei Roboter virtuell so um den zentralen Arbeitstisch positioniert, dass sie sämtliche für die Demontage notwendigen Positionen erreichen können. Da diverse Werkzeuge benötigt werden, vor allem Greifer in verschiedensten Größen und Geometrien für die vielfältigen Gehäuseformen, Abdeckungen und Platinen, sowie Schraubwerkzeuge mit unterschiedlichen (Bit-)Nüssen, sind mehrere Werkzeugwechselstationen eingeplant worden. Hier können die Roboter vollautomatisiert mit den Werkzeugen bestückt werden. Außerdem wurden Bereiche zur vorangehenden Analyse der Lichtmaschine, z.B. per Kamera und Waage, vorgesehen, um frühzeitig Informationen über den Typ und Zustand der jeweiligen Lichtmaschine sammeln zu können. Für den Abtransport der demontierten Bauteile wurde ein autonomes Ablagesystem konzipiert und realisiert. Die Übergabe der Teile durch die Roboter an das Ablagesystem erfolgt an zwei definierten Punkten. Schrauben werden durch einen eigens entwickelten Abstreifer von den magnetischen (Bit-)Nüssen gelöst. Alle übrigen Bauteile werden auf einer Plattform abgelegt. Diese wird von einem Raumportal zum jeweiligen Ablagefach verbracht, wo die Bauteile eingelagert werden. Ein Schutzzaun mit Ampelsystem und automatischer Türverriegelung verhindert ein Betreten des Arbeitsraumes während des Demontageprozesses.

AP 2: Einrichtung der Demonstrationsanlage

Im Anschluss an die Konzeption und Entwicklung des Aufbaus der Demontageeinheit und der dazugehörigen Funktionalitäten wurde das Demontagemodul am CUTEC Forschungszentrum in Clausthal-Zellerfeld aufgebaut. Hierbei umfasste die Einrichtung der Demonstrationsanlage folgende Teilaspekte:

1. Einrichtung der nötigen Versorgungs-Infrastruktur am CUTEC Forschungszentrum
2. Physischer Aufbau eines Demontagemoduls auf Basis des zu Projektbeginn erstellten Konzepts (AP 1),
3. Integration der bildgebenden Komponenten,
4. Aufbau der datenverarbeitenden Hardware-Infrastruktur,
5. Aufsetzen der benötigten Software-Systeme für die Einzelkomponenten und das Prozessleitsystem sowie
6. Entwicklung und Umsetzung eines angepassten Sicherheitskonzeptes.

Im Folgenden sollen die einzelnen Teilaspekte zur Einrichtung der Demonstrationsanlage näher beschrieben und erläutert werden:

1. Versorgungsinfrastruktur

Die Greif- und Schraubsysteme des Demontagemoduls werden pneumatisch betrieben. Dies ist gegenüber hydraulischen oder elektrisch betriebenen Systemen wesentlich günstiger in der Beschaffung und einfacher anzusteuern. Für die Versorgung wurde das vorhandene Druckluftsystem des CUTEC Forschungszentrums genutzt, erweitert um die Fähigkeit, für druckluftintensive Anwendungen kurzfristig eine größere Durchflussmenge zur Verfügung zu stellen. Zu Projektbeginn sind dazu Teile des Druckluftsystems erneuert worden, wobei die benötigten höheren Druckluft-Volumenströme von 12 l/s bei bis zu 12 bar Druck auf Basis eines Schraubenkompressors realisiert wurden.

2. Physischer Aufbau des Demontagemoduls

Die beschafften 6-Achs-Roboter (KUKA KR180 + 2x KUKA KR30) wurden aufgestellt und eingerichtet, die Erstinbetriebnahme erfolgte durch die Firma KUKA. Anschließend wurden die benötigten Greif- und Schraubwerkzeuge sowie die zugehörigen automatischen Werkzeugwechselsysteme beschafft und integriert. Zur Trennung verlöteter Kontakte wurde eine pneumatische Schneidzange beschafft, für den Einsatz am Roboter modifiziert und getestet. Darüber hinaus sind verschiedene hard- und softwareseitig notwendige Bestandteile

zur Szenenanalyse und Robotersteuerung beschafft und in Betrieb genommen worden (3D-Scanner, Tiefenkameras, Rechner, Entwicklungssoftware).

2.1 Produktstruktur der als Modellprodukt verwendeten Lichtmaschine

An dieser Stelle wird zunächst eine Übersicht über die Produktstruktur des zentralen Modellprodukts (Valeo 03L 903 023 L) anhand seiner wesentlichen Einzelteile gegeben (Abbildung 6). Die in den folgenden Kapiteln dargestellten Demontageeinrichtungen und Abläufe beziehen sich auf die gezeigte Produktstruktur.

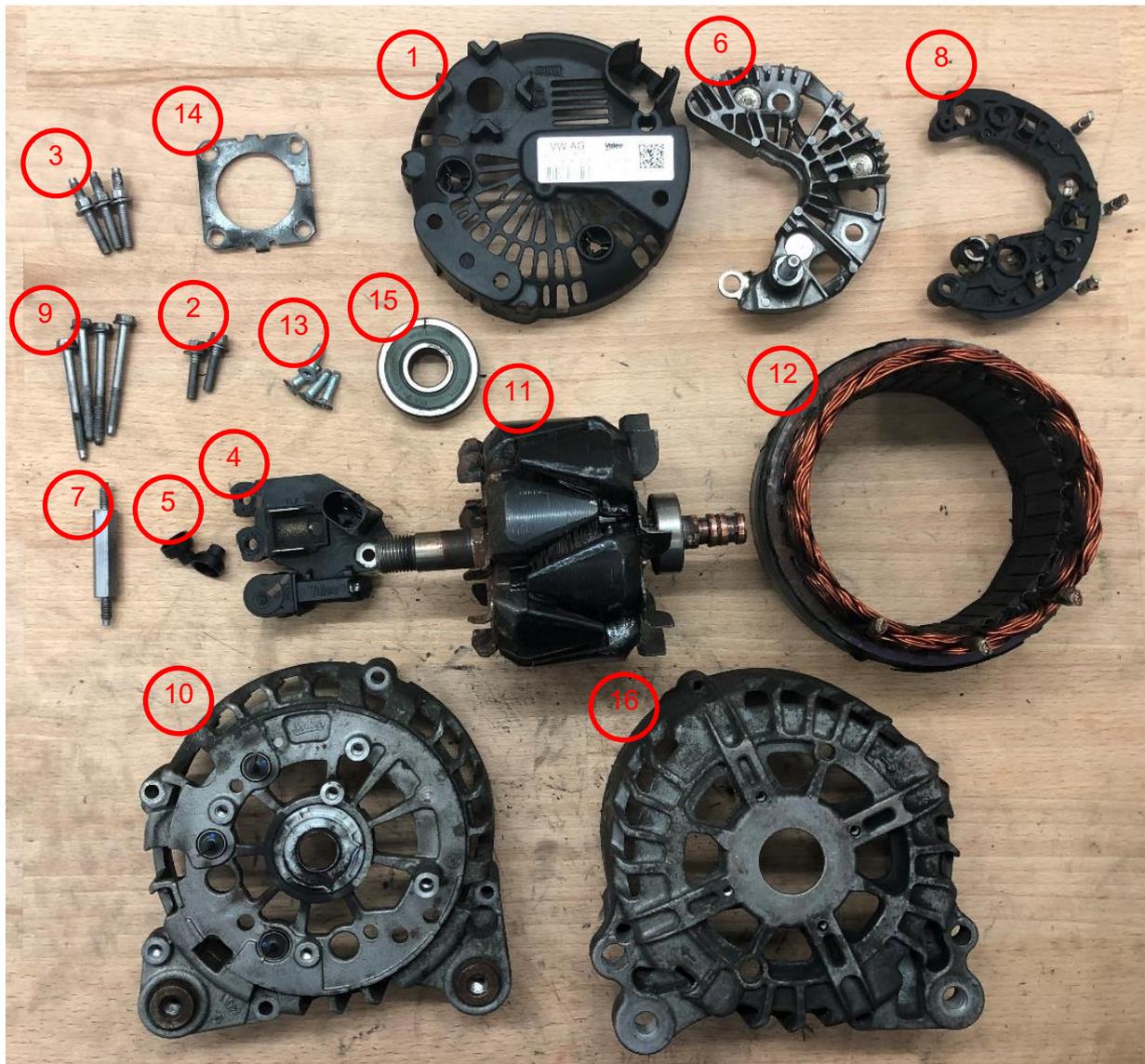


Abbildung 6: Demontierte Bauteile des Modellprodukts Valeo 03L 903 023 L

Die wesentlichen Bauteile in Reihenfolge des Demontageprozesses sind:

- | | |
|--------------------------------------|----------------------------|
| 1. Kunststoffdeckel | 9. M5x52SW8 |
| 2. M5x20SW7 | 10. Schleifringlagerschild |
| 3. M5x36SW7 | 11. Rotor |
| 4. Multifunktionsregler | 12. Stator |
| 5. Kunststoffhülsen | 13. M5x16T20 |
| 6. Gleichrichter | 14. Antriebslagerfixierung |
| 7. M5x66SW10 | 15. Unteres Kugellager |
| 8. Kunststoffabdeckung der Leitungen | 16. Antriebslagerschild |

2.2 Vermessungswerkzeuge

Für die präzise Durchführung der roboterseitigen Arbeitsschritte des Demontagevorganges mit den verschiedenen eingesetzten Werkzeugen (Greifer, Schrauber, Schneidwerkzeug, 3D-Scanner) mussten Position und Lage der lokalen Werkzeugkoordinatensysteme im Sinne der Roboterkinematik präzise vermessen und der Robotersteuerung bereitgestellt werden. Hierzu war für jedes Werkzeug die Einmessung des jeweiligen Arbeitspunktes (Tool Center Point, TCP) notwendig. Dieser musste an einem definierten Referenzpunkt aus verschiedenen Richtungen hochpräzise angefahren werden, um die Position des Werkzeuges am Roboter zu definieren. Darüber hinaus musste die Orientierung des Werkzeuges im Raum, also die rotatorische Information der Koordinatenachsen vom TCP aus vermessen werden. Die hierfür nötigen Messpositionen existieren am Werkzeug meist nicht als physischer Punkt, wie z.B. bei einem Greifwerkzeug der Mittelpunkt zwischen den vorderen Ebenen der Greiferbacken, oder der Koordinatenursprung der Bilddaten im Falle des 3D-Scanners. Um dieses Problem zu lösen, wurden im CUTEC Forschungszentrum für die einzelnen Werkzeuge Vermessungswerkzeuge konstruiert und entweder aus Aluminium gefräst oder mittels 3D-Druck aus Kunststoff erstellt. Diese wurden für den Einmessvorgang am Werkzeugwechsler installiert und stellten einen physischen TCP sowie Kanten für die Definition der Koordinatenachsen bereit. Die folgenden Abbildungen zeigen exemplarisch diese Vermessungswerkzeuge für den Zentrischgreifer der Arbeitsplattform (Abbildung 7) sowie für den Artec Space Spider 3D-Scanner (Abbildung 8). Als TCP für den Scanner diente dabei ein definierter Punkt eines Gewindes auf der Unterseite des Scanners, das zur Befestigung auf einem Stativ vorgesehen ist. Die Koordinaten der von den Kameras gemessenen Bilddaten konnten nun beim Betrieb des Scanners auf dieses TCP-Koordinatensystem transformiert werden, sodass mithin die exakte Lage der erfassten Objekte relativ zur Roboterposition bekannt war und für die weitere Berechnung zur Verfügung stand.

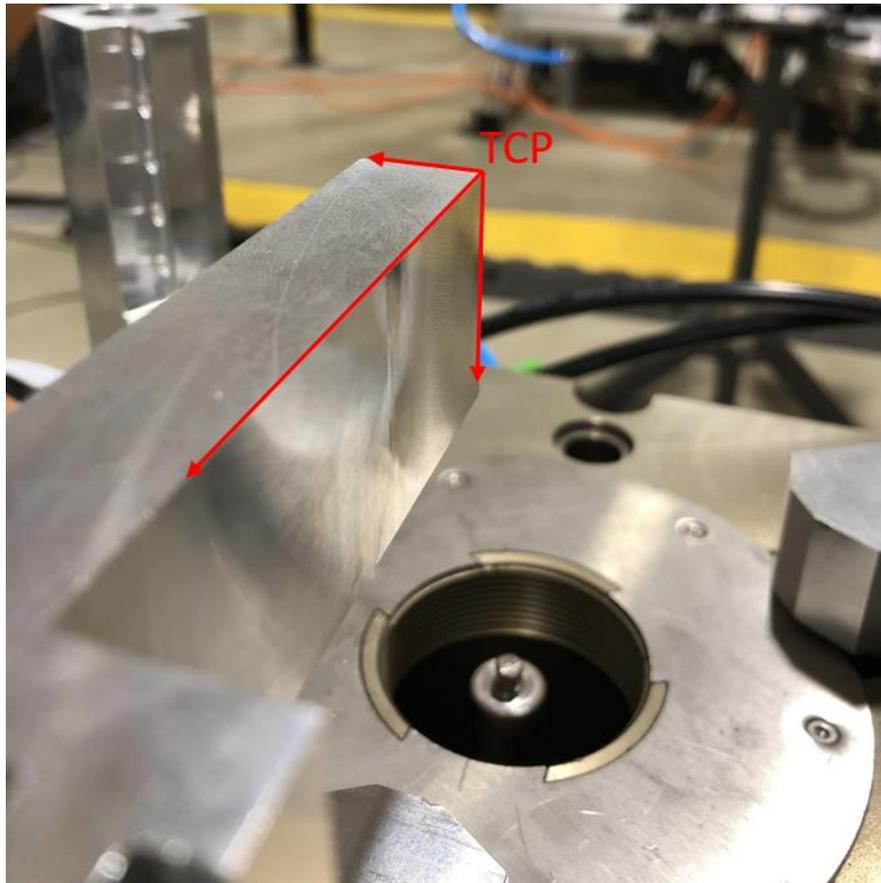


Abbildung 7: Vermessungswerkzeug für den Zentrischgreifer mit definiertem Arbeitspunkt (TCP)

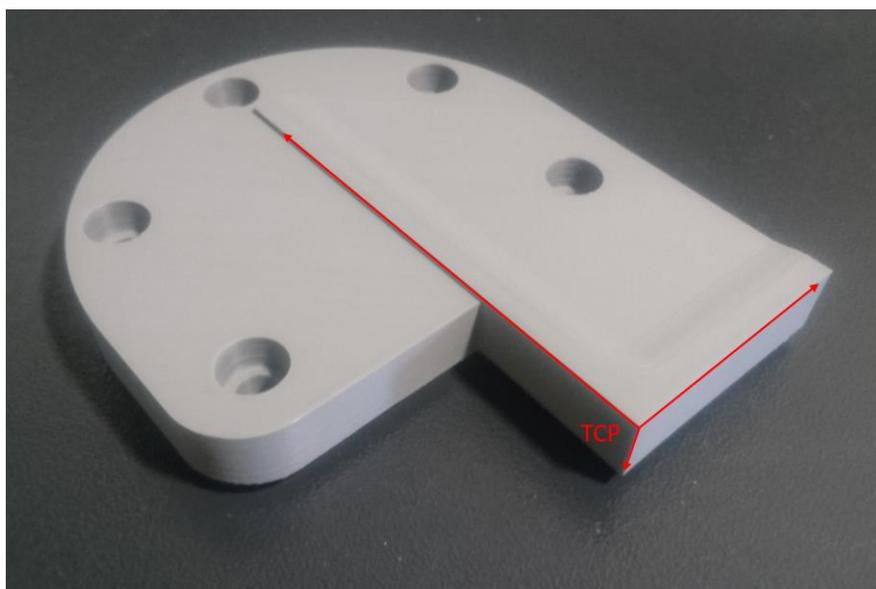


Abbildung 8: Vermessungswerkzeug für den Artec Space Spider 3D-Scanner

2.3 Werkzeugwechselsysteme

Jeder der drei Roboter wurde entsprechend der Art und Größe der von ihm zu verwendenden Werkzeuge mit einem passenden Wechselsystem ausgestattet, welches während des Demontageprozesses vollautomatische Werkzeugwechsel in wenigen Sekunden ohne menschliches Eingreifen ermöglicht. Dazu wurden an den jeweiligen Roboterflanschen die Systeme SWK-021 (für KR30) und SWK-110 (für KR180) der Firma Schunk angebracht (Abbildung 9). Diese sind in der Lage, die entsprechenden Gegenstücke SWA-021 und SWA-110 anzukoppeln. Erst dadurch ist das System in der Lage, ohne nennenswerte Umrüstzeiten flexibel auf verschiedene Produkttypen zu reagieren und diese zu verarbeiten. Jeder Roboter hat dabei Zugriff auf einen Werkzeugbahnhof, in der die von ihm zu verwendenden Werkzeuge exakt positioniert angekoppelt bzw. abgelegt werden können. Die Wechselsysteme der Firma Schunk bieten den Vorteil, dass mehrere Druckluftleitungen gleichzeitig angekoppelt werden können, sodass entsprechende druckluftbasierte Werkzeuge angesteuert und verschiedene Funktionen ausgeführt werden können. Simultan können SWA und SWK auch elektrisch miteinander kontaktiert werden, sodass Signale gemessen und elektrische Aktuatoren mit unterschiedlichen Parametern angesteuert werden können.

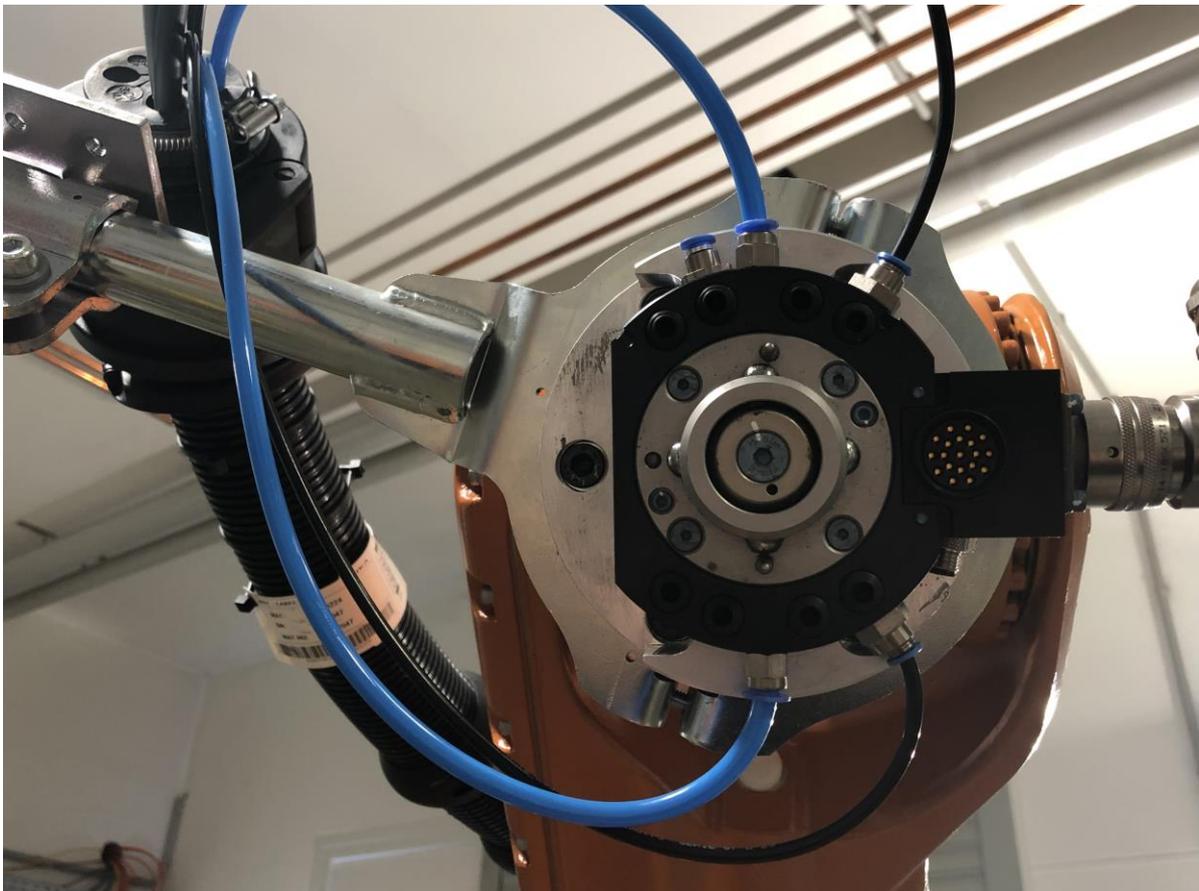


Abbildung 9: Frontansicht auf ein robotermontiertes SWK-021 mit vier Druckluftanschlüssen (schwarze und blaue Schläuche) und 19-poligem Elektromodul

Ein Gros der Werkzeuge wird gebündelt in einem sogenannten Werkzeugbahnhof abgelegt (Abbildung 10). Bei einem fortgeschrittenen Parallelisierungsgrad können so die Werkzeugwechselzeiten verkürzt werden, indem ein Roboter gleich ein benachbartes Werkzeug aufnehmen kann. Die beiden KR30 teilen sich einen Werkzeugbahnhof, sodass beide bei Bedarf alle zwölf darin abgelegten Werkzeuge aufnehmen können. Dies erzeugt eine höhere Flexibilität im Demontageprozess. Das Gerüst des Werkzeugablagersystems wurde mit Aluminiumprofilen konstruiert, sodass nachträgliche Änderungen verhältnismäßig leicht zu realisieren sind. Die Werkzeugaufnahmen (schwarz eloxiert, siehe Abbildung 9) wurden auf Stahlplatten angebracht, da diese mit Passstiften in eine präzise Position gebracht werden können.

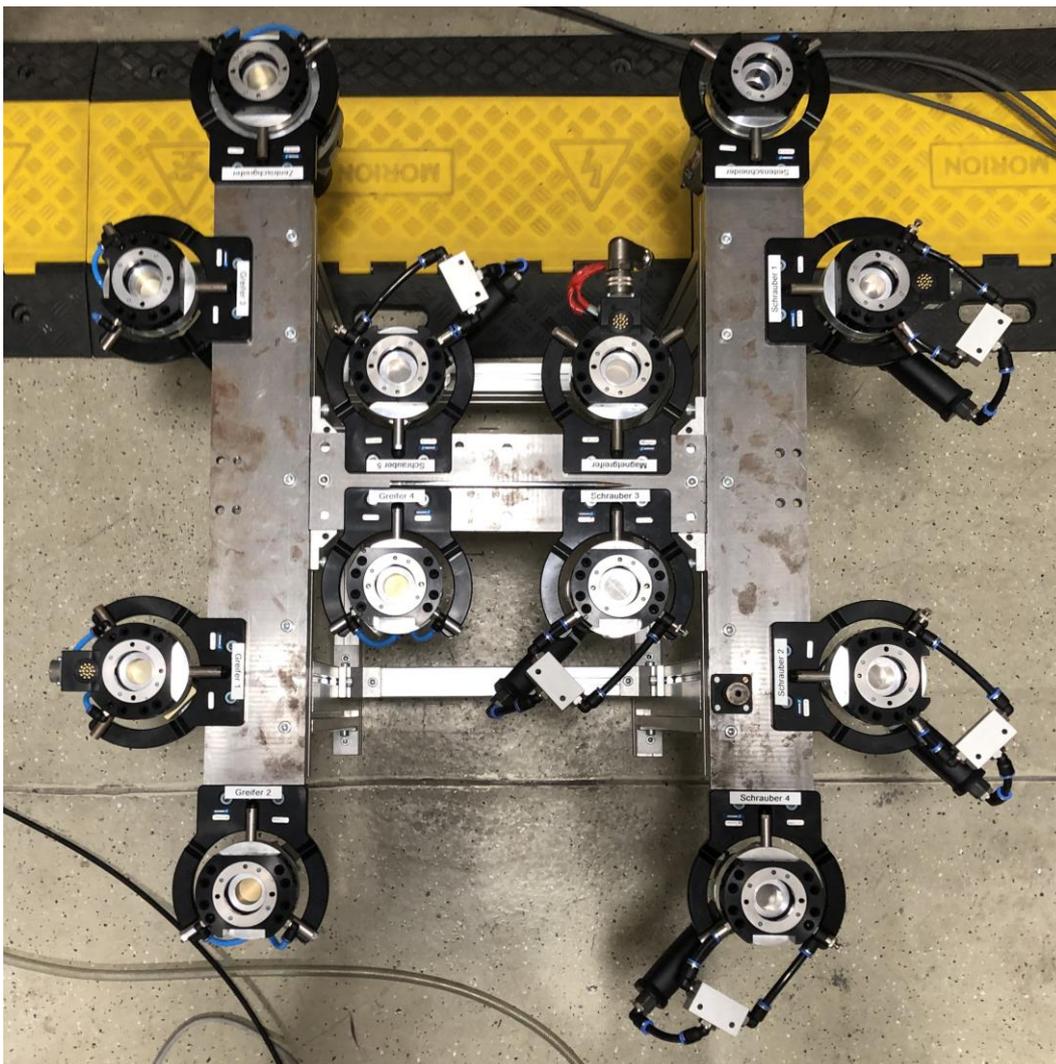


Abbildung 10: Aufsicht auf den Werkzeugbahnhof der KR30-Roboter mit allen zwölf unterschiedlichen Werkzeugen und der Möglichkeit der Erweiterung um zwei weitere Ablageplätze

2.4 Zentraler Arbeitstisch mit Auspressvorrichtung

Zu Beginn der Demontearbeiten wird die identifizierte Lichtmaschine durch den KR180 Roboter auf eine zentrale Arbeitsplattform (Abbildung 11) gehoben, wo sie durch einen Zentrischgreifer formschlüssig und in exakt definierter Position gehalten wird, um die darauf folgenden Arbeitsschritte durchführen zu können. Einer dieser Schritte ist das Entfernen des Rotors. Dieser ist auf einer Welle fixiert, die durch Kugellager gehalten und geführt wird. Das Auspressen der Welle samt Rotor aus den Lagern kann nicht durch die roboterseitig geführten Greifwerkzeuge vollzogen werden, da die Roboter durch die sehr hohen Kräfte, die dafür aufzuwenden sind, eine vermeintliche Kollision erkennen und aus Sicherheitsgründen die Bewegung abbrechen. Aus diesem Grund ist für den zentralen Arbeitstisch eine Auspressvorrichtung mit Austreibestempel konstruiert und installiert worden (Abbildung 12). Diese besteht aus einer pneumatischen Presse sowie einem Schlagwerk (Schema in Abbildung 11), welche über die Steuereinheit des KR180 geschaltet werden. Das System ist an verschiedenen Lichtmaschinentypen erfolgreich getestet worden.

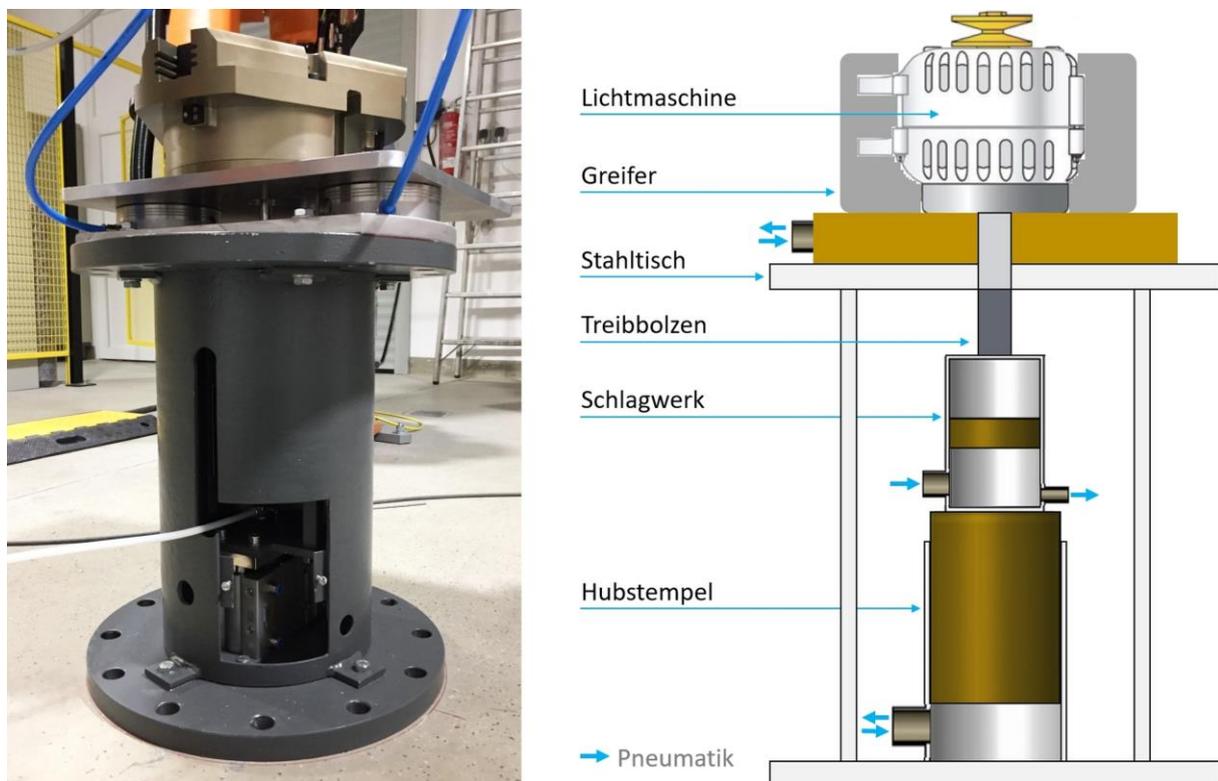


Abbildung 11: Arbeitstisch mit Greifer und Auspressvorrichtung.

Links: realer Aufbau, rechts: schematisch

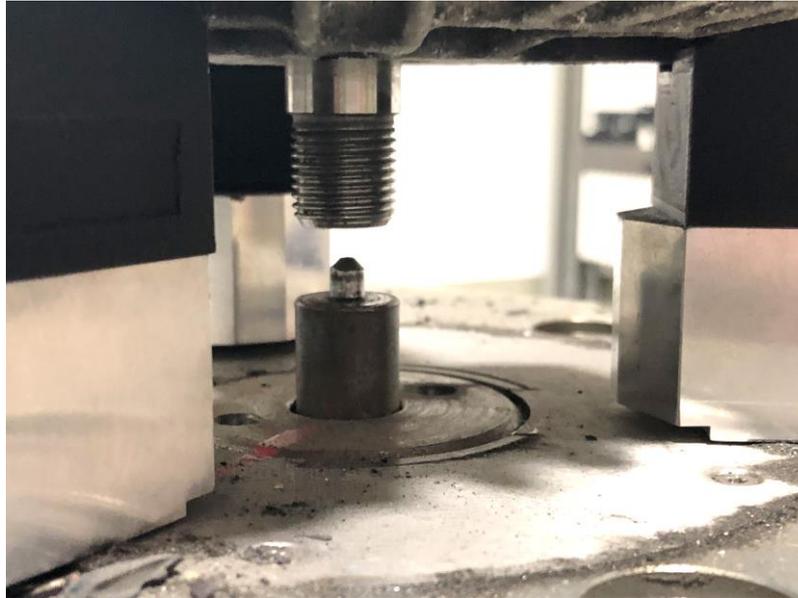


Abbildung 12: Austreibestempel unter der Welle einer im Spanntisch eingelegten Lichtmaschine

2.5 Lösen von Schraubverbindungen

Die zum Lösen der verschiedenen Schraubverbindungen nötigen Werkzeuge für die einzelnen Lichtmaschinentypen wurden im Zuge der manuellen Demontageversuche definiert. Da die derzeit am Markt fertig erhältlichen, vollautomatischen Bit- bzw. Nusswechsellsysteme nur mit sehr hohem Kosten- sowie Steuerungsaufwand zu realisieren sind, die dem Ziel einer kostenneutralen Arbeitsweise der Demontagefabrik entgegenstehen, kommt stattdessen eine entsprechende Anzahl preisgünstiger Schlagschrauber zum Einsatz, die jeweils inkl. Schraubwerkzeug (Bit-)Nuss über das roboterseitige Werkzeugwechselsystem getauscht werden können. Für die Schraubvorgänge ist ein gefedertes Schraubsystem durch die hauseigene Werkstatt konstruiert und gefertigt worden (Abbildung 13). Die integrierte Federung wird eingesetzt, damit eine Rückführung des Systems beim Ausdrehen der Schrauben nicht roboterseitig vollzogen werden muss. Dies ist notwendig, da die eingesetzten Schlagschrauber keine Daten über den Schraubprozess wie etwa den aktuellen Drehwinkel liefern. Darüber hinaus ist damit auch das Lösen von Schrauben unbekannter Gewindeeigenschaften möglich. Der Formschluss zwischen Werkzeug und Schraube zu Beginn des Schraubvorganges erfolgt über langsames Anfahren des Schraubsystems durch verminderte Druckluftzufuhr. Insgesamt konnte so ein robustes und flexibles Schraubverhalten erreicht werden.

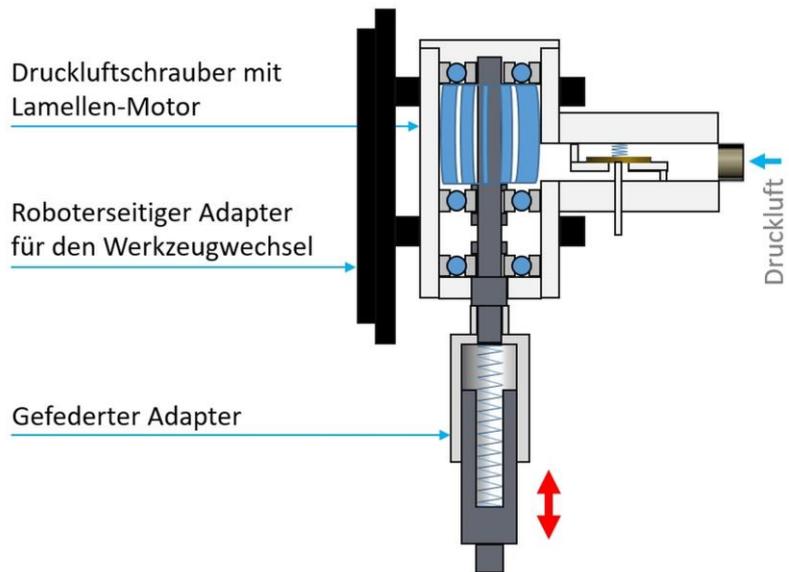


Abbildung 13: Gefedertes Schraubensystem für das robotergestützte Entfernen von Schrauben mittels Druckluft-Schlagschrauber. Links: in Verwendung, rechts: schematisch

Um die Schrauben halten und abtransportieren zu können, wurden Magneten in die Schraubennüsse eingesetzt (Abbildung 14), sodass ferromagnetische Schrauben nach dem Ausschraubvorgang in der Nuss verbleiben und in das Ablagesystem überführt werden können. Ein weiterer Arbeitsschritt zum Greifen oder Halten der gelösten Schraube kann somit entfallen, was die Demontagezeiten reduziert bzw. optimiert. Da die magnetische Haltekraft der Schraubennüsse nicht abgeschaltet werden kann, ist eine Einrichtung erforderlich, die Schrauben im Ablageprozess festhält. Dafür wurde im CUTEC ein Schraubenabstreifer entwickelt, der ohne den Einsatz zusätzlicher Aktuatoren Schrauben zuerst fixieren und anschließend ablegen kann (Abbildung 15).



Abbildung 14: Magnetische Schrauberruss, Schlüsselweite 8

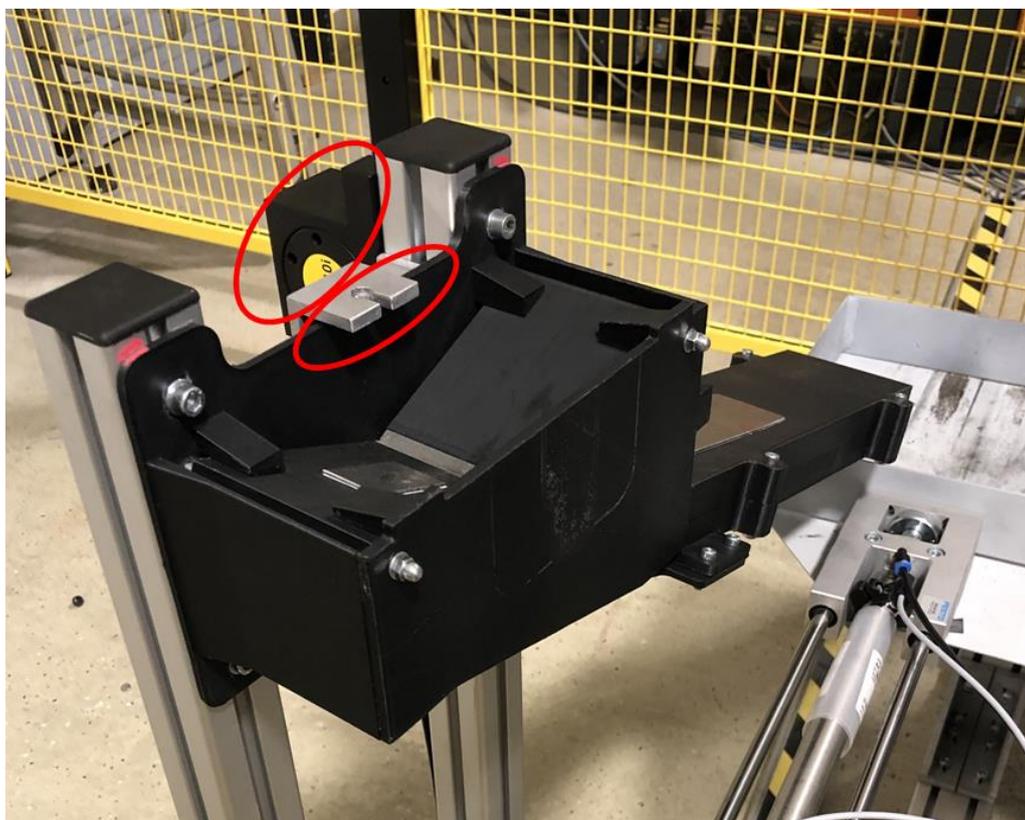


Abbildung 15: Schraubenabstreifer mit FDM-gedrucktem Gehäuse, Ink-Jet-gedruckten Abstreiflippen, Abstreifer für Torxschrauben (untere rote Markierung) und Druckluftrotationsvibrator (obere rote Markierung)

Zwei Kunststoffklappen mit Abstreiflippen aus Silikon werden über modular einstellbare Federn nach oben zusammengedrückt. Sobald eine Schraube zwischen die Abstreiflippen geführt wird, wird diese arretiert. Eine separate Roboterbewegung sorgt für die garantierte Abfuhr der zwischen den Lippen fixierten Schraube.

In weiterführenden Schraubversuchen hat sich gezeigt, dass die Torxschrauben der Antriebslagerfixierung nicht durch magnetische Bits gehalten werden können. Daher wurden nach einer umfangreichen Recherche Torx-Bits der Firma Wera Werkzeuge GmbH angeschafft. Diese weisen eine Haltefunktion für Innentorx-Schrauben auf. Nach dem Ausschraubprozess mittels robotergeführtem Druckluftschrauber werden Torxschrauben so fest auf dem Torx-Bit gehalten, dass sich die Schrauben nicht mehr manuell lösen lassen und auch nicht durch den Schraubenabstreifer abgestreift werden können. Daher wurde eine zusätzliche Abstreifeinrichtung oberhalb des ursprünglichen Schraubenabstreifers eingerichtet, bei der die Schraube letztendlich durch eine U-förmige Kante abgestreift wird.

Es kam während des Demontageprozesses wiederholt vor, dass auch nach einem per se erfolgreichen Abstreifvorgang Schrauben im Abstreifer verblieben. Schrauben, die sich in einer Kante o.ä. verklemmt haben, können durch einen Druckluftrotationsvibrator der Firma Netter GmbH gelöst werden, der an dem mittels Aluprofilen aufgebockten Schraubenabstreifer angebracht ist. Dieser lässt den gesamten Schraubenabstreifer schwingen und löst somit verklemmte Schrauben. Gelöste Schrauben können anschließend in das Ablagesystem sortiert werden.

2.6 Schneidwerkzeuge

Im Laufe des Demontageprozesses müssen zwischen Statorwicklung und Diodenplatte verlötete Verbindungen aufgetrennt werden (Abbildung 16). Hierfür wird eine pneumatische Schneidzange der Fa. Red Rooster eingesetzt. Da diese ab Werk für den Handbetrieb konzipiert ist, wurde im CUTEC eine Halterung konstruiert und gefertigt, die den Auslösemechanismus überbrückt und den automatisierten Schneidvorgang über die Robotersteuerung gewährleistet. Die Befestigung durch mit Gummi ausgelegte Schlauchschellen ermöglicht einen elastischen Ausgleich der Schneidzange, die zu einer verringerten Belastung der Roboterhand führt. Wie bei den anderen beschriebenen Werkzeugen wurde für die Schneidzange ebenfalls die Installation an einem Schnellwechseladapter realisiert.



Abbildung 16: Lötverbindungen zwischen Statorwicklung und Diodenplatte

In Vorversuchen hat sich gezeigt, dass ein kleineres Modell einer pneumatischen Schneidzange die Drahtverbindung zwar kappen kann, im Dauerbetrieb allerdings nicht zuverlässig genug ist. Zudem zeigten die Vorversuche, dass die zu trennenden Drähte Fertigungstoleranzen aufweisen können. Unterschiedliche Dicken der Verzinnung der Drähte und eine willkürliche Verteilung der gelblichen Kunststoffmäntel um die Drähte bedingten, dass teilweise nach 20 konsekutiven Schneidversuchen der Draht nicht durchtrennt werden konnte. Daher wurde auf eine stärkere Schneidzange zurückgegriffen, deren Klingen nach wie vor alle Drähte erreichen können und reproduzierbar im ersten Versuch den Trennschritt vollzogen. Zudem wurden Klingen mit angesetzten gehärteten Schneidflächen ausgewählt, sodass eine längere Standzeit des Werkzeugs erreicht werden kann.



*Abbildung 17: Mit Schlauchschellen befestigte pneumatische Schneidzange (Hauptbild),
angesetzte gehärtete Klingen (oben rechts)*

2.7 Entwicklung und Konstruktion der Greifwerkzeuge

Bei der Demontage fallen vielfältig geformte Einzelkomponenten an, die von den Robotern gegriffen und bewegt werden müssen. Da aufgrund der geforderten Präzision während der Greif- und Schraubvorgänge keine ungeplante Bewegung der Teile erfolgen darf, sollten diese formschlüssig gehalten werden. Die dafür benötigten Greiferbacken wurden individuell gefertigt. Dazu wurden die Einzelkomponenten mit dem Artec Space Spider 3D-Scanner hochpräzise erfasst. Die daraus resultierenden Modelle dienten der digitalen Konstruktion der Greiferbacken (Abbildung 18), welche anschließend mittels eines Kunststoff-3D-Druckers gefertigt (Abbildung 19) und auf einen ebenfalls selbst konstruierten, aus Aluminium gefrästen Adapter montiert wurden. Abbildung 20 zeigt exemplarisch die für den Einsatz am Parallelgreifer gefertigten Greiferbacken fertig montiert am KR180 Roboter.

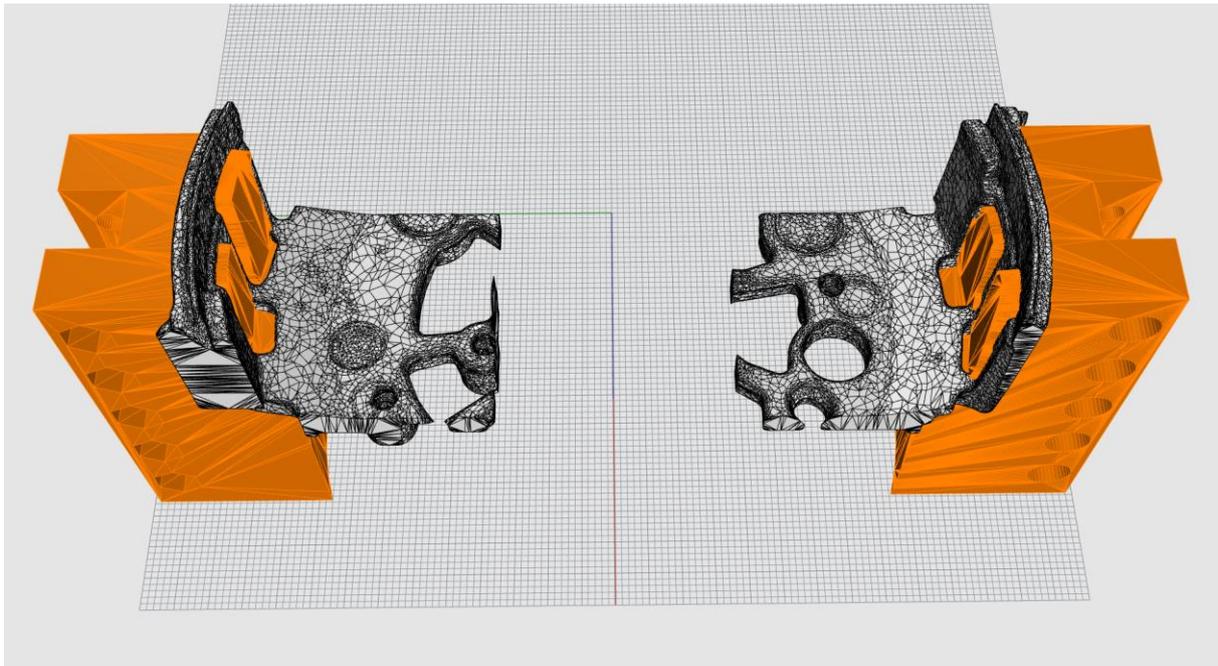


Abbildung 18: Konstruktion der Greiferbacken aus gescannten 3D-Daten der Einzelkomponenten
(Hier am Beispiel eines Lichtmaschinen-Gehäuses)



Abbildung 19: Mittels Ink-Jet Verfahren hergestellte Greiferbacken zum Greifen
der Lichtmaschine und des Schleifringlagerschilds

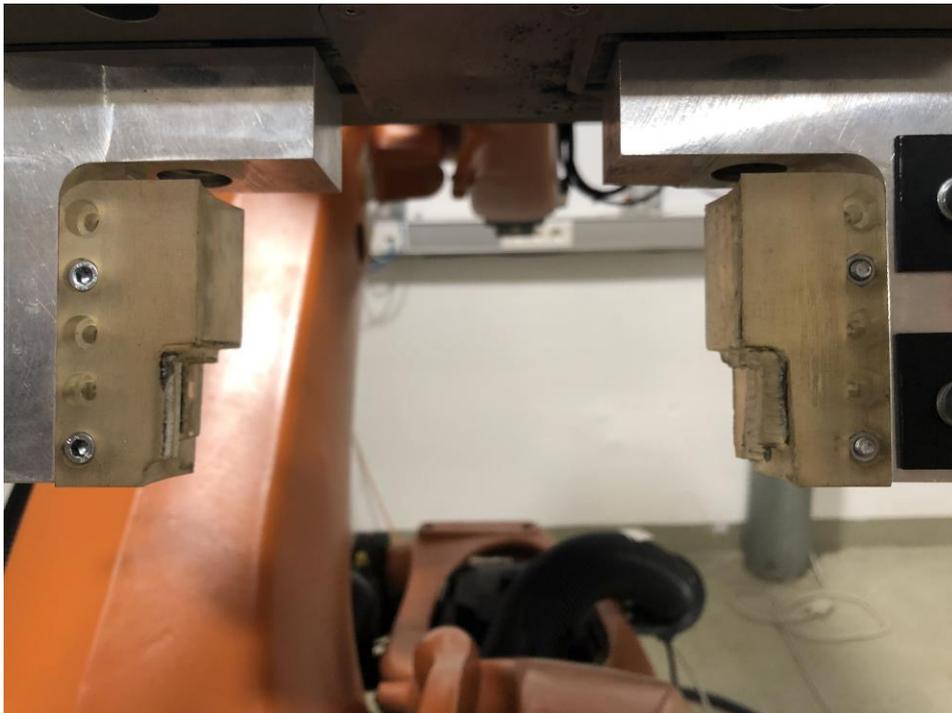


Abbildung 20: Selbstkonstruierte, formschlüssige Greiferbacken am Parallelgreifer des KR180

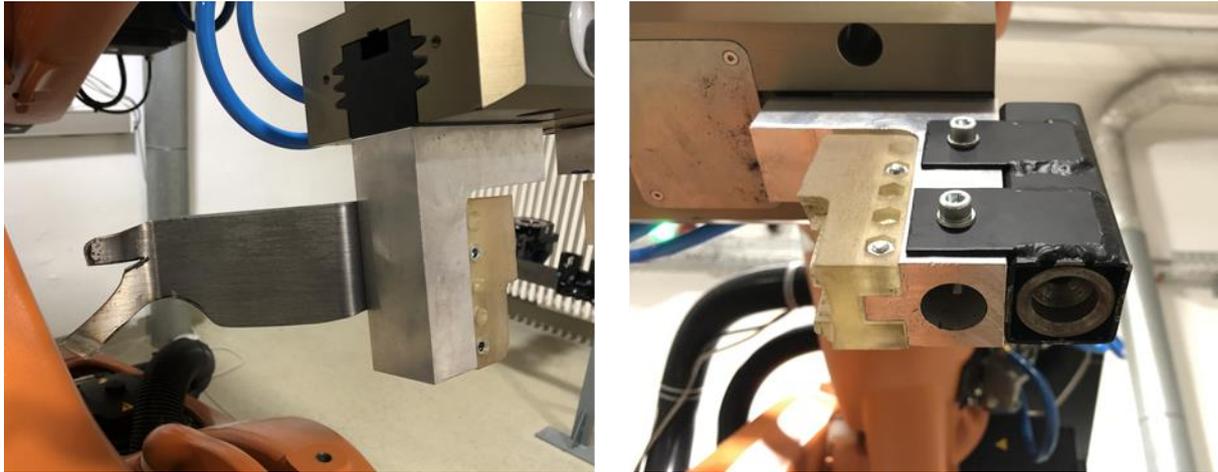
Greifer für die Lichtmaschine und den Schleifringlagerschild

Für den Greifvorgang der Lichtmaschine von der Waage und den Greifvorgang des Bauteils Schleifringlagerschild wird ein Parallelgreifer vom Typ PGN-plus-240 der Firma Schunk verwendet. Auf modularen, mit einem Schienensystem ausgestatteten Fingern aus Aluminium werden hierzu 3D-gedruckte formschlüssige Kunststoffbacken verwendet. Diese liegen bei Verwendung auf dem Gehäuse der Lichtmaschine auf und greifen zudem zwischen deren Belüftungsrippen. Da beim Handling der gesamten Lichtmaschine lediglich der Schleifringlagerschild gegriffen wird, kann dieser nach Demontage durch denselben Greifer entfernt werden.

An jedem Finger des Greifers wurde zudem eine Einrichtung zur Erfüllung spezieller Funktionen angebracht (siehe Abbildung 21): Eine Seite ist mit einer federnden Hülse ausgestattet, die im Austreibeprozess des Rotors verhindert, dass dieser unkontrolliert aus der Lichtmaschine springt. Bei Versuchen hat sich herausgestellt, dass der Kräfteintrag in den Roboterarm verringert werden kann, wenn eine nichtideale Feder durch ihre dämpfenden und federnden Eigenschaften zwischen Rotor und Roboter geschaltet wird. Ein innenliegender Kelch dient zur Aufnahme der Rotorwelle.

Am anderen Finger wurde ein Blech angebracht, welches im Demontageprozess der Gleichrichterdiodeplatte die Kunststoffabdeckung der Leitungen an den Schleifringlagerschild drückt. Die beiden erstgenannten Bauteile sind über den bereits beschriebenen Draht miteinander verbunden und müssen abgerissen werden. Dazu fährt das speziell

gebogene Blech zwischen die beiden Bauteile und kann die Kunststoffabdeckung der Leitungen somit effizient herunterdrücken.



*Abbildung 21: Finger, Backen und Spezialwerkzeuge des großen Parallelgreifers am KR180
(links: Halteblech, rechts: Federhülse)*

Greifer Multifunktionsregler

Der in Abbildung 22 gezeigte Greifer wird dazu verwendet, den Multifunktionsregler demontieren zu können. Da der Verfahrensweg des Greifers für dieses spezielle Bauteil nur wenige Millimeter Spielraum zulässt, wurde im CUTEC eine passende Greifergeometrie entworfen und mittels 3D-Druck gefertigt. Um den Hub des Greifers JGP-80-1 der Firma Schunk zu verringern, wurde eine die Finger des Greifers umfassende Klammer angefertigt. In den Demontageversuchen hat sich gezeigt, dass insbesondere bei älteren Lichtmaschinen (mit vermutlich höheren Laufzeiten) Abnutzungserscheinungen an den Laufflächen der Kupferschleifringe am Rotor auftreten können. Folglich liegen die Graphitstifte federgetrieben tiefer auf den Laufflächen und blockieren somit das Abziehen des Multifunktionsreglers. Um dieser Herausforderung zu begegnen, wurden die Greifflächen mit Schleifpapier ausgekleidet, sodass eine bessere Abziehung durch eine Erhöhung der maximal übertragbaren Scherkräfte zwischen Backeninnenseite und Angriffsfläche des Multifunktionsreglers erzielt werden konnte. Von der Nutzung klingenartiger Inlays zur Erhöhung der Abziehung wurde aufgrund des sehr geringen zur Verfügung stehenden Bauraums abgesehen. Es hat sich gezeigt, dass mittels Fused Deposition Modeling (FDM, siehe Kapitel 2.8) hergestellte Kunststoffbacken den erforderlichen Kräften standhalten können. Für eine Serienanwendung sollte an dieser Stelle jedoch hinsichtlich der Dauerhaltbarkeit die Herstellung der Backen aus Aluminium vorgezogen werden.

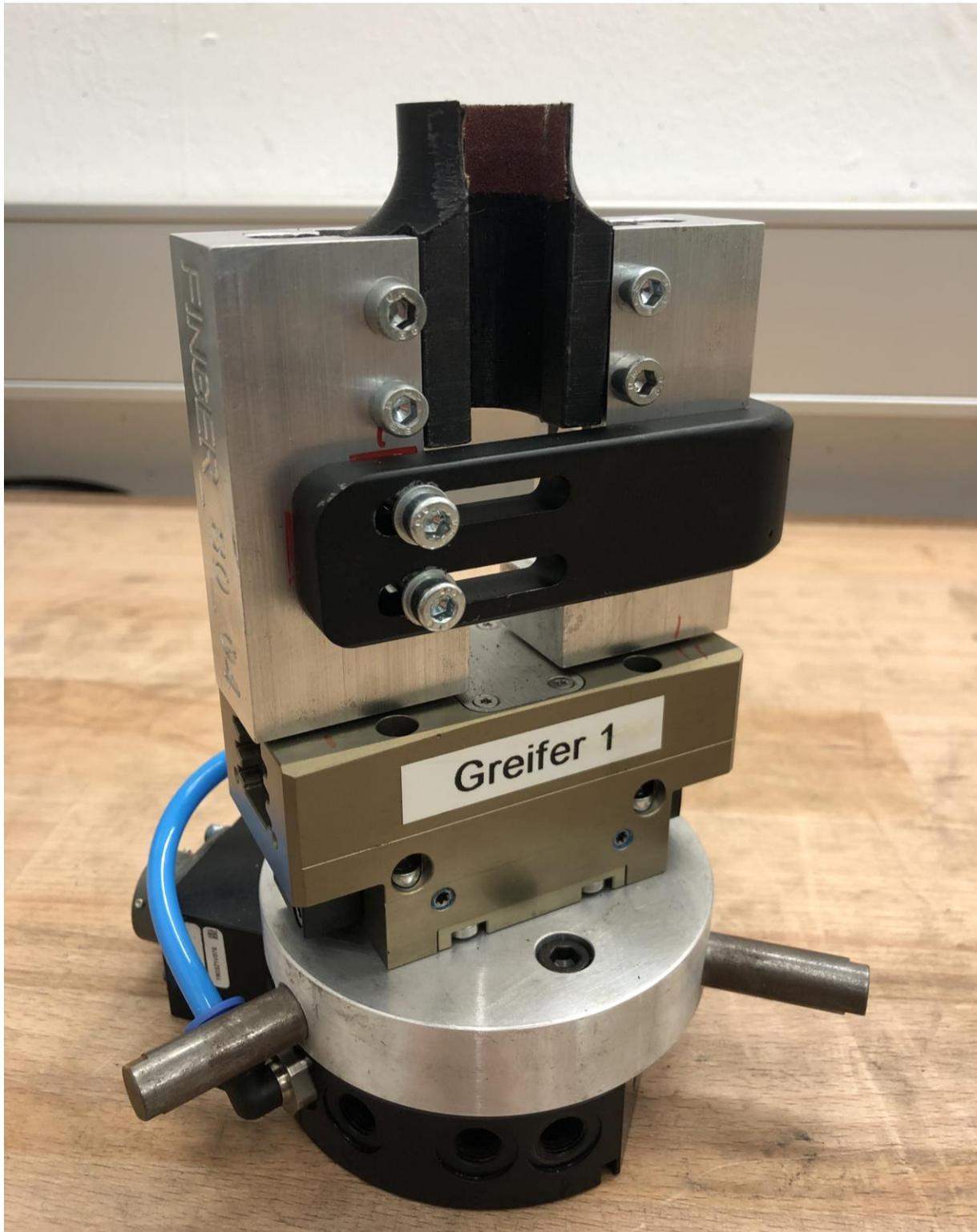


Abbildung 22: Greifer für den Multifunktionsregler mit justierbarer schwarzer Haltespange zur Begrenzung des Öffnungshubs

Universalgreifer für Kunststoffhülsen, Schleifringlagerschild, Rotor und Antriebslagerschild

Der Greifer mit der umfangreichsten Funktionalität ist in der Demontage der Bauteile Kunststoffhülsen, Schleifringlagerschild, Rotor und Antriebslagerschild involviert. Die Basis bildet ein Greifer des Typs JGP-80-1 der Firma Schunk. Dieser wurde im Gegensatz zu den anderen Greifern mit Fingern aus Stahl ausgerüstet (Abbildung 23). Zum Greifen der genannten Bauteile wurden diese mit entsprechenden Konturen und Bohrungen versehen. Für die Kunststoffhülsen sind stirnseitig zwei halbe Zapfen gefräst worden, die die Bauteile von Innen aufspannen und aus der Gleichrichterdiodeplatte ziehen können. Für das Bauteil Rotor wurde eine zur Greiferebene orthogonale Bohrung in die Stahlfinger eingebracht, sodass der Rotor nach einem erfolgreichen Austreibevorgang an der Achse gegriffen und entnommen werden kann. Die Bauteile Schleifringlagerschild und Antriebslagerschild werden durch die ursprünglich belassenen parallelen Flächen der Stahlfinger gegriffen. Da der eigentliche Lösevorgang des Schleifringlagerschildes durch den großen Parallelgreifer stattfindet, muss der Universalgreifer keine großen Haltekräfte mehr aufbringen. Gleiches gilt für den Antriebslagerschild, dieser ist das am Ende der Demontage auf dem zentralen Arbeitstisch verbleibende Bauteil und muss lediglich aus der geöffneten Aufspanneinheit entnommen und abgelegt werden. Die alternative Fertigung aus Kunststoff bietet sich für die Finger des Universalgreifers nicht an, da insbesondere die stirnseitigen Teilzapfen großen Kräften standhalten müssen.

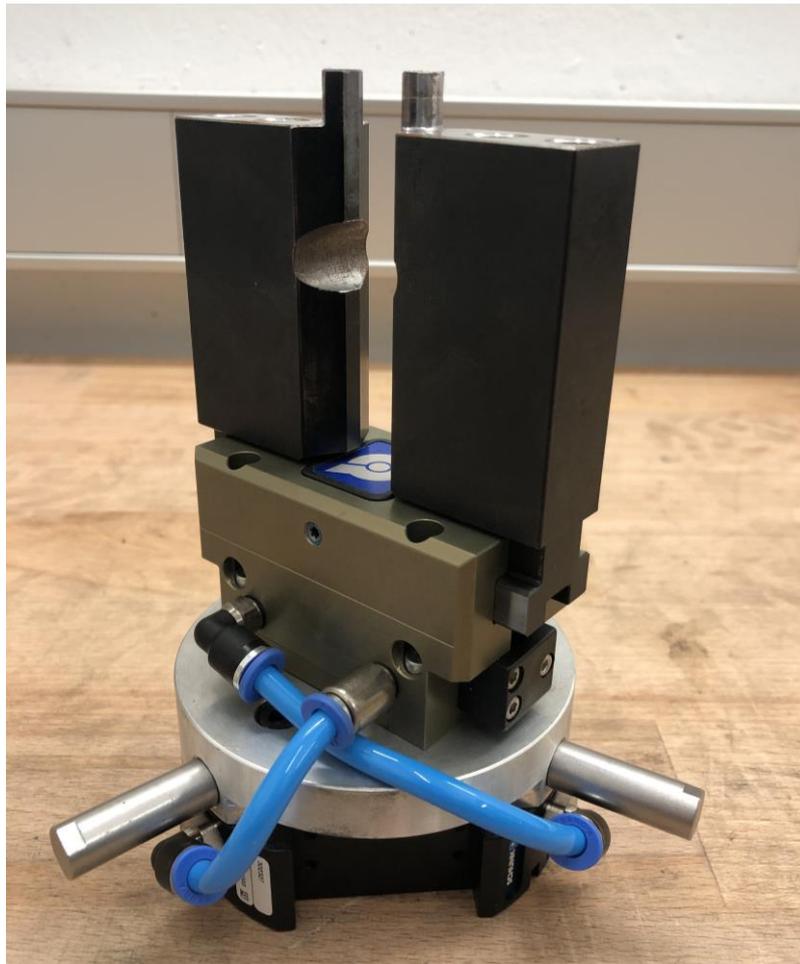


Abbildung 23: Universalgreifer für Kunststoffhülsen, Schleifringlagerschild, Rotor und Antriebslagerschild

Kombinierter Greifer für die Gleichrichterdiodeplatte und die Kunststoffabdeckung der Leitungen

Um die Anzahl der Werkzeuge im Werkzeugbahnhof zu minimieren und daher Einsparpotential in den Bereichen Kosten, Platzbedarf und zeitliche Optimierung des Demontageablaufs zu nutzen, wurden nach Möglichkeit verschiedene Funktionalitäten in einem Greifer kombiniert. Die recht ähnliche Geometrie der Bauteile Gleichrichterdiodeplatte und Kunststoffabdeckung der Leitungen erlaubt es, denselben Greifer zu verwenden (Abbildung 24). Eine besondere Herausforderung bei beiden Bauteilen ist, diese im Greifprozess nicht zu zerstören. Beide Bauteile weisen eine halbmondförmige Geometrie auf, die mit einem kombinierten Greifer idealerweise von außen gegriffen werden. Entsprechend muss der Hub des Greifers (JGP-80-1 der Firma Schunk) an die Maximalbiegung der Bauteile angepasst werden. Damit die Bauteile Gleichrichterdiodeplatte und Kunststoffabdeckung der Leitungen gegen eine Verdrehung geschützt sind, sind jeweils zwei Bleche an die Backe geschraubt bzw. eingeschoben. Diese schieben sich im Greifprozess über und unter das zu

demontierende Bauteile und fixieren es so. Eine Verdrehung des Bauteils während der Demontage trat in den Versuchen entweder durch eine Drahtverbindung oder Verklebung der Bauteile auf. Die Drahtverbindung wird beim Bauteil Kunststoffabdeckung der Leitungen mittels eines Schneidwerkzeugs gelöst. Bei dem Bauteil Gleichrichterdiodeplatte sind die Drahtverbindungen so verbaut, dass sie nicht durch ein Schneidwerkzeug erreicht werden können, hier spielt die Fixierung des Bauteils durch die Stahlbleche eine entscheidende Rolle. Die Erhöhung der Klemmkraft durch einen stärkeren Greifer oder das Anbringen von Schleifpapier zur Erhöhung der Haltewirkung hat sich nicht bewährt, da die Bauteile in den Vorversuchen entweder verbogen oder zerbrochen wurden.



*Abbildung 24: Kombiniertes Greifer für die Gleichrichterdiodeplatte
und die Kunststoffabdeckung der Leitungen*

Greifer für die Stahlbuchse am Austreiber

Für die Demontage des unteren Kugellagers wird neben dem pneumatischen Austreiber aus dem zentralen Spanntisch eine Stahlbuchse benötigt, die als Adapter auf dem ursprünglichen Austreibestempel fungiert. Somit können mit demselben Austreibemechanismus zwei Bauteile demontiert werden. Die Stahlbuchse wird benötigt, da der Austreibestempel für die Demontage des Rotors durch das untere Kugellager getrieben werden muss, dieser bei Demontage des unteren Kugellagers dieses aber nicht durchstoßen darf. Da der zentrale Spanntisch recht kompakt gebaut ist und die Stahlbuchse unter der Lichtmaschine eingebracht werden muss, während diese eingespannt ist, bedarf es eines schlanken Greifers, der die Stahlbuchse auf den Austreibestempel setzen kann. Dazu wurden mittels 3D-Druck lange Backen konstruiert, die in den zentralen Spanntisch hineinreichen können (Abbildung 25). Zur Erhöhung der Haltekraft des Greifers wurden die Greifflächen mit Schleifpapier ausgekleidet.



Abbildung 25: Greifer für die adaptierende Stahlbuchse des Austreibestempels (oben rechts im Bild) mit ausgekleideten Greifflächen

Greifer für den Stator

Der Stator wird bei der Demontage von innen gespannt, da die freiliegenden Außenflächen nicht genug Platz zum Greifen bieten. Aufgrund seiner annähernd rotationssymmetrischen Bauweise wurde auf einen Zentrischgreifer PZN-plus-125 der Firma Schunk zurückgegriffen (Abbildung 26). Auswahlkriterien waren der Fingerhub, die aufbringbaren Kräfte und der Abstand der Finger zueinander. Da der Stator mit Silikon in den Antriebslagerschild geklebt ist, müssen auch die maximalen Querkräfte der Fingerlager im Greifer für entsprechende Belastungen ausgelegt sein. Das spezielle Rillenprofil des PZN-plus-125 ist für die Aufnahme hoher Querkräfte konzipiert.

Die auf den PZN-plus-125 geschraubten Finger wurden aus Aluminium gefertigt und können Auflagen aus Kunststoff aufnehmen. Die Auflagen können vergleichsweise leicht mittels 3D-Druck hergestellt werden und verringern das Beschädigungsrisiko des Elektroblechpakets im Stator. Um eine höhere Prozesssicherheit zu erreichen, wurden stirnseitig Stahlbleche angeschraubt, die im Falle eines Verrutschens unter das Elektroblech greifen und somit die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Demontage des Stators erhöhen.



Abbildung 26: Statorgreifer mit wechselbaren Kunststoffauflagen und stirnseitigen Stahlblechen

Magnetgreifer für die Antriebslagerfixierung und das untere Kugellager

Die Antriebslagerfixierung wird durch vier Torxschrauben im Antriebslagerschild befestigt. Beim Lösen der letzten Schraube kann sich die Antriebslagerfixierung bewegen, was in einem undefinierten Zustand resultiert und ein sicheres Greifen im automatisierten Prozess verhindert. Um dieses Problem zu umgehen, wurde auf den Magnetgreifer EMH 036-B der Firma Schunk zurückgegriffen, der variable Haltekräfte aufbringen und ein- und ausgeschaltet werden kann (Abbildung 27). Der Magnetgreifer wird außerdem dazu verwendet, das untere Kugellager nach dem Austreibevorgang abzutransportieren.



Abbildung 27: Magnetgreifer mit Stromversorgung und Signalleitung, montiert auf einem SWA-076 der Firma Schunk

2.8 Automatisiertes Ablagesystem

Nachdem die einzelnen Bestandteile der Lichtmaschine demontiert wurden, müssen sie sortenrein gesammelt und zwischengelagert werden. Dadurch wird eine, auch unter ökonomischen Gesichtspunkten sinnvolle, Rückführung der Bauteile zur erneuten Montage oder Materialverwertung ermöglicht. Bei der weiteren Ausarbeitung der Demontageanlage hat sich gezeigt, dass aufgrund der Vielzahl der verschiedenen Bauteile, die während des Demontageprozesses anfallen, und der gleichzeitig bestehenden Anforderung, die gesammelten Teile einfach und schnell entnehmen zu können, ein komplexeres, automatisiertes Ablagesystem benötigt wird. Das dazu am CUTEC Forschungszentrum eigens konstruierte und aufgebaute System ist in Abbildung 28 dargestellt.

Grundsätzlich besteht das Ablagesystem aus einem Regal mit Boxen, in die die demontierten Bauteile einsortiert werden. Dieser flexible und kostensparende Aufbau ermöglicht eine schnelle und mit geringem Aufwand verbundene Umstrukturierung, wodurch ein hoher Grad an Adaptivität gegenüber veränderten Anforderungen, neuen Produkttypen etc. erreicht wird. Vor dem Regal ist eine dreiaxige Kinematik befestigt, die ein Verfahren in alle drei Raumrichtungen ermöglicht. Hierbei fiel die Wahl auf ein Raumportal des Unternehmens Schunk GmbH & Co. KG, da dieses für den industriellen Einsatz konstruiert und erprobt ist und sich somit optimal in eine industrielle Demontageanlage einbetten lässt. Die Kinematik erlaubt es, dass die Industrieroboter nicht selbstständig die demontierten Bauteile im Regal ablegen müssen, was zu einer erheblichen Vereinfachung des Prozess- und Steuerflusses führt und den Platzbedarf im Arbeitsbereich der Roboter minimiert. Gleichzeitig wird hierdurch die Entnahme der Bauteile stark vereinfacht, da hierfür nur über eine zusätzliche Sicherheitstür die Boxen aus dem Regal entnommen werden müssen.

Am Endpunkt der dritten Achse ist eine Transportschale angebracht, die zunächst konstruiert und anschließend geschweißt wurde. In der Schale werden die Bauteile zu den Boxen im Regal transportiert, nachdem sie von den Robotern an definierten Positionen übergeben wurden. Wenn die Transportschale an der richtigen Stelle im Regal positioniert ist, wird durch Öffnen eines Magnetventiles ein Pneumatikzylinder ausgefahren, der den Rand der Transportschale verschiebt. Dadurch wird das in der Schale befindliche Bauteil herausgeschoben und in die Box im Regal geworfen. Dieser simple Mechanismus ermöglicht es, diverse Bauteile mit verschiedensten Formen, Gewichten und Materialien zu behandeln, von Schrauben über Gehäuse, Kupferspulen und Plastikabdeckungen bis hin zu schweren Teilen wie dem Rotor und dem Stator.

Zur Steuerung des automatisierten Ablagesystems wird eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) eingesetzt. Der hierfür verwendete Computer ist ein Raspberry Pi, der

Mithilfe der CODESYS Runtime Environment des Unternehmens CODESYS GmbH die Funktionen einer herkömmlicher SPS in Software implementiert. Durch umfangreiche Software-Bibliotheken, die von CODESYS GmbH zur Verfügung gestellt werden, konnten die Frequenzumrichter zur Steuerung der Motoren sowie viele weitere periphere Geräte direkt und zuverlässig eingebunden werden. Hierüber wurden diverse Sensoren und Aktuatoren angesteuert.

Wie bereits erwähnt, steht ein Pneumatikzylinder zum Auswerfen der demontierten Teile aus der Transportschale in die Ablageboxen zur Verfügung. Um diesen mit Druckluft zu versorgen, wurden Steuerkreise aus einer Kombination von optischen Halbleiter- und Spulenrelais verbaut, die wiederum Magnetventile schalten. Hierdurch kann der Pneumatikzylinder ein- und ausgefahren werden. Die jeweiligen Endstellungen werden mit je einem Sensor in der Funktionsweise eines Reedswitches detektiert, wobei ein in der Hubstange des Zylinders verbauter Permanentmagnet genutzt wird. Des Weiteren sind Endtaster an den maximal zulässigen Endpositionen der drei Achsen verbaut, um bei Störungen der Motorregler eine Beschädigung der Anlage zu verhindern, indem beim Überschreiten dieser Endpositionen der sofortige Bremsvorgang der Achse eingeleitet wird.

Auf dem Raspberry Pi läuft, wie für moderne SPSen im Industrieinsatz üblich, ein imperatives Steuerprogramm, das einen endlichen Zustandsautomaten implementiert. Hiermit ist gemeint, dass das Verhalten des Ablagesystems im Entwicklungsprozess zunächst anhand eines strukturierten Diagramms, dem Zustandsautomaten, beschrieben wurde. Dabei befindet sich das System stets in genau einem definierten Zustand, von dem aus es bei Eintreten bestimmter Bedingungen, beispielsweise anhand der Sensormesswerte, oder bei Eintreffen eines neuen Befehls vom Hauptleitreechner, in einen neuen Zustand wechselt. In dem Moment werden die entsprechenden Reaktionen eingeleitet, wie zum Beispiel das Verfahren der dreiachsigen Kinematik hin zu der Position, an der die Industrieroboter die demontierten Bauteile an das Ablagesystem übergeben. Das Steuerungsprogramm wird zyklisch mit einer Periodendauer von acht Millisekunden abgearbeitet, wobei zu Beginn eines jeden Zyklus der Zustand aller Sensoren etc. ausgelesen wird und nach Abarbeitung des Zyklus alle Ausgabewerte gleichzeitig aktualisiert werden. Dadurch kann garantiert werden, dass das System echtzeitfähig agiert, also insbesondere rechtzeitig auf Nothalt-Anforderungen und ähnliches reagiert.

Um das automatisierte Ablagesystem in den Gesamtdemontageprozess einbetten zu können, wurde eine TCP/IP-basierte Schnittstelle sowohl auf der SPS als auch auf dem Hauptleitreechner implementiert. Durch die Verwendung der standardisierten und allumfassend genutzten Protokolle zur IP- und TCP-Kommunikation ist so ein systemunabhängiger und von jedem System unterstützter Kommunikationskanal gegeben. Über diesen kann der

Hauptleitreehner Steuerbefehle ans Ablagesystem senden und Letzteres Antworten und Statusinformationen an den Hauptleitreehner zurüekübermitteln.



Abbildung 28: Automatisiertes Ablagesystem zum Einsortieren der demontierten Bauteile

2.9 3D-Druck

Für die Herstellung diverser Greiferbacken und Prototypen wurden im Rahmen des Projektes verschiedene 3D-Drucker zur Kunststoffverarbeitung angeschafft. Der 3D-Drucker Ender 5 Plus der Firma Shenzhen Creality 3D Technology Co., Ltd (Abbildung 29) nutzt das Fertigungsverfahren Fused Deposition Modelling (FDM), bei dem nach und nach Schichten durch Wärmeeintrag verflüssigten Kunststoffs aufeinander aufgetragen werden. Das verwendete Modell verfügt über ein verhältnismäßig großes Druckbett bei vergleichsweise geringen Kosten.

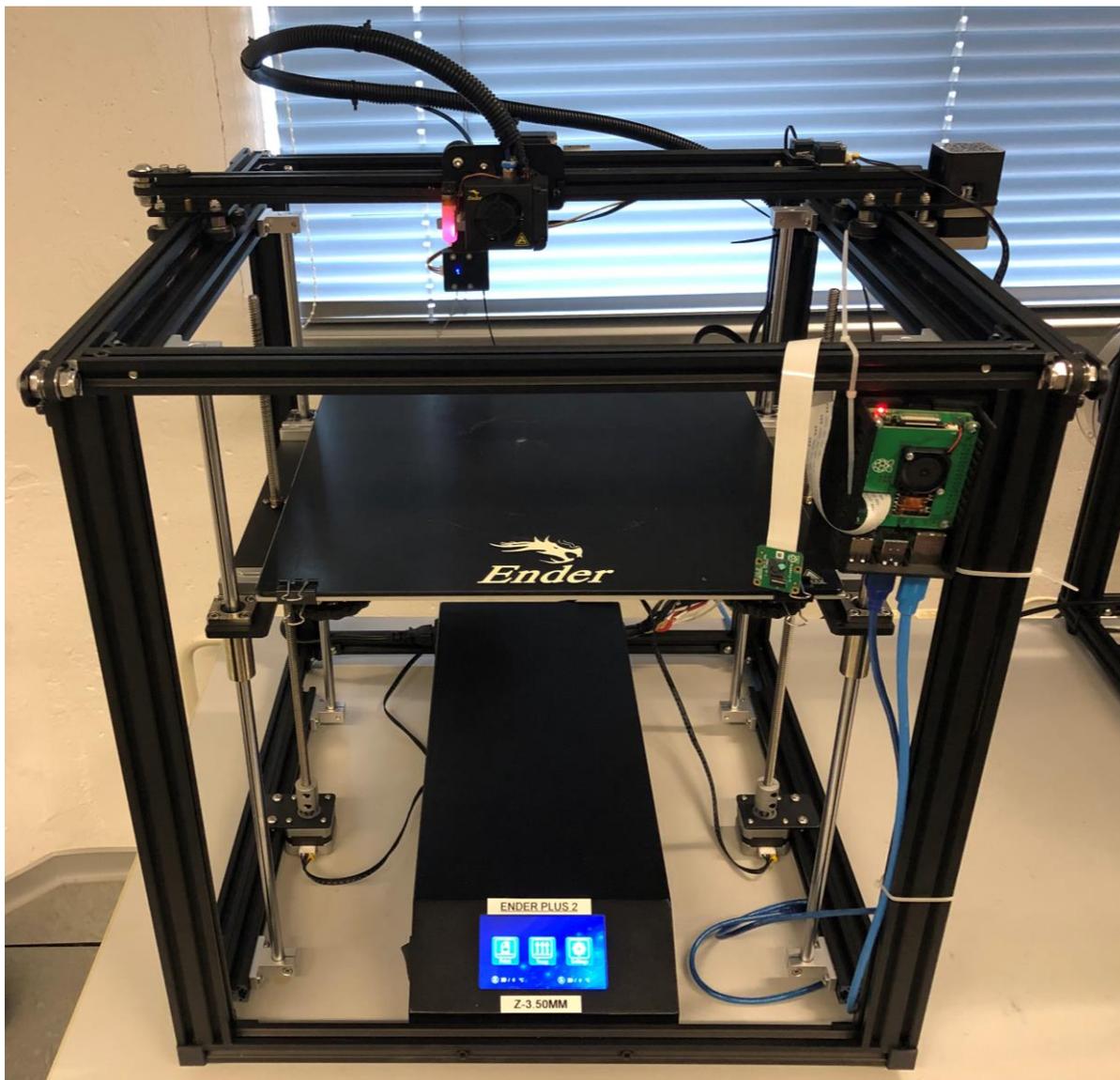


Abbildung 29: Frontansicht auf den 3D-Drucker Ender 5 Plus der Firma Shenzhen Creality 3D Technology Co., Ltd

Zudem wurde ein Agilista 3200W, ein 3D Ink-Jet Drucker der Firma Keyence Corporation, angeschafft (Abbildung 30). Dieser ist in der Lage, hochwertige und präzise Kunststoffteile herzustellen, indem schichtweise feine Tropfen eines photoaktiven Kunstharzes aufgetragen werden. Insbesondere die hochbelasteten Kunststoffbacken, die an den großen Greifern der Klasse 240 befestigt sind, wurden per Ink-Jet Verfahren gefertigt.



Abbildung 30: Frontansicht auf den 3D Ink-Jet Drucker Keyence Agilista 3200W

3. Integration bildgebender Komponenten

Da während des implementierten Demontageprozesses an verschiedenen Stellen mit der Auswertung bildgebender Verfahren gearbeitet wird, war eine Verstärkung der Aufnahmebedingungen für die installierte Kameratechnik notwendig. Der Ausschluss des Umgebungslichts wurde durch den Einbau von lichtdichten Rolltoren realisiert. Eine einheitliche, definierte Lichtverteilung wurde durch die Installation mehrerer Deckenleuchten realisiert.

Folgende bildgebende Hardware wird für den Demontageprozess eingesetzt, deren Verwendung wird in späteren Abschnitten detailliert beschrieben:

- Artec Space Spider 3D-Scanner zur Erstellung der 3D-Prototypen (handgeführt) und zur Produktidentifikation (robotergeführt),
- Intel RealSense D415 Tiefenkamera zur Positionsbestimmung der Lichtmaschine auf der Eingangswaage,
- Ensenso X36 3D-Kameras zur Szenenanalyse während des Prozesses.

4. Datenverarbeitende Hardware-Infrastruktur

In einer Demontagefabrik werden, ebenso wie in Industrie 4.0 Produktionsumgebungen, sicherheitskritische Prozesse über Netzwerke gesteuert. Eine entsprechende Absicherung war daher im Projekt zu implementieren. Das Netzsegment wurde flach ohne aufwendige Routingfunktionen aufgebaut und ist über die Nutzung zweier IP-Adressbereiche abgesichert worden. Dabei wurde ein öffentlicher Netzteil über einen Public-IP-Adressbereich sowie ein Private-IP-Bereich implementiert. Da private IP-Adressen nicht geroutet werden, ist sichergestellt, dass sicherheitsrelevante Geräte von außerhalb des Demontagemoduls und des Entwicklungslabors nicht erreichbar sind. Weitere Sicherungsmaßnahmen wurden im Übergang zum allgemeinen Netzsegment realisiert, dazu gehört der Einsatz einer Layer 3-Firewall.

Die grundsätzlichen Anforderungen an die Netzwerkinfrastruktur orientierten sich an den Standards eines ethernetbasierten Subnetzes und wurden aus dem zum damaligen Zeitpunkt vorhandenen DV-Netz der CUTEC abgeleitet. Durch die Beschaffung eines leistungsfähigen Kopplungselements (Switch) wurde in einem ersten Schritt eine hohe Übertragungsgeschwindigkeit innerhalb des Demontagemoduls realisiert. Im zweiten Schritt wurde das Demontagemodul mit dem Software-Entwicklungslabor, welches sich in einem anderen Gebäudeteil befindet, mit ebenso hoher Geschwindigkeit vernetzt.

Die Netzwerk-Infrastruktur wurde teilweise aus den vorhandenen Ressourcen des

bestehenden Netzwerkes des CUTEC Forschungszentrums umfunktioniert. Dazu gehörten Datenleitungen im 1Gbit/sec-Bereich sowie eine neue Datenleitung mit einer Übertragungskapazität im 10Gbit/sec-Bereich, ausgelegt als OM4-LWL-Kabel (Lichtwellenleiter), die eine Datenübertragung über große Entfernungen sicherstellen. Diese Infrastruktur wurde in Eigenleistung aufgebaut. Durch Auswahl geeigneter Komponenten wurde sichergestellt, dass den einzelnen Komponenten in den Netzsegmenten, dem Demontagemodul und dem Entwicklungslabor ausreichend Bandbreite zur Verfügung steht. Im Laufe der Projektarbeiten ist eine Vielzahl an Netzwerkgeräten implementiert worden – begleitend zu den während der Entwicklung des Demontagemoduls wachsenden Anforderungen.

5. Software-Systeme

Die für das Prozessleitsystem, die Demontagedatenbank sowie die Steuerung des Ablagesystems verwendete Software wurde im Rahmen des Projektes vollständig selbst entwickelt. Die Entwicklung des Prozessleitsystems erfolgte in C++ mit dem Microsoft Visual Studio 2019 unter Verwendung des Qt5-Frameworks, des Intel RealSense SDKs sowie des Ensenso SDKs zur Bilderfassung durch die 3D-Kameras, des MVTec HALCON 20.11 SDKs zur Bildverarbeitung sowie des Artec SDKs für die Steuerung und Auswertung des 3D-Scanners. Zur Steuerung der Roboter dient die KUKA.PLC mxAutomation Schnittstelle. Als Datenbanksystem wird PostgreSQL 13 mit diversen in Python und Go entwickelten Import- und Servicefunktionen verwendet. Für die Steuerung des Ablagesystems kommt die Software CODESYS Runtime der Fa. CODESYS GmbH zum Einsatz. Die einzelnen Software-Komponenten werden in späteren Abschnitten ausführlicher beschrieben.

6. Sicherheitskonzept

Das im CUTEC Forschungszentrum entwickelte Demontagemodul ist nach EG-Maschinenrichtlinie eine Verkettung von Industrierobotern, die hinsichtlich der Arbeitssicherheit in ihrer Gesamtheit betrachtet wird. Wesentliche Rechtsgrundlage dazu ist die EN ISO 120218 (Teile 1+2) in der aktuellen Fassung von 2011. Für das Jahr 2021 war eine zum Berichtszeitraum noch ausstehende Aktualisierung vorgesehen.

Die wesentlichen Gefahrenquellen sind das Einquetschen zwischen festen und beweglichen Teilen, sowie das Herausschleudern von Bauteilen. Die Kräfte, die durch die Roboterarme aufgebracht werden, können schwerste Verletzungen bis hin zum Todesfall verursachen. Nicht zuletzt aus Sicht der Arbeitssicherheit wurde von einer Mensch-Roboter-Kollaboration abgesehen, so dass ein paralleles Arbeiten von Mensch und Maschine auf das Teach-In von Bewegungskordinaten für die Programmierung beschränkt wird.

Verschiedene Maßnahmen sind implementiert worden, um größtmögliche Sicherheit beim Betrieb des Demontagemoduls zu gewährleisten. Da das Demontagemodul den Demontageprozess autonom und ohne Mensch-Maschine-Kollaboration durchführt, liegt die größte Gefahr in der fehlenden Kollisionskontrolle durch die Roboter. Als wesentliches Schutzelement wurde daher ein Schutzzaun eingebaut, der das Betreten des Arbeitsbereichs nur durch eine Sicherheitstür gestattet. Diese wurde mit einer softwareseitig steuerbaren pneumatischen Verriegelung gesichert.

Drei Überwachungskameras sowie eine 360° Dome-Kamera wurden installiert, um vom Leitstand aus die einzelnen Roboter sowie den gesamten Demontagebereich einsehen zu können. Des Weiteren wurde eine Sicherheitsampel installiert, welche durch verschiedene Signale den aktuellen Sicherheitsstatus des Demontagemoduls darstellt. Die Arbeitsbereiche der Roboter wurden eingangs auf Basis von Simulationen mittels der Software KUKA.Sim definiert und softwareseitig implementiert.

AP 3: Objekterkennung und -ausrichtung

AP 3 gliedert sich in zwei Teilaspekte, erstens die Produktidentifikation und zweitens die Lageverifizierung während der Demontage. Bei der Produktidentifikation wird der spezifische EoL-Produkttyp ermittelt, um auf dieser Grundlage die in einer Datenbank hinterlegte Demontageanleitung abzurufen. Drei verschiedene Produkttypen von Lichtmaschinen wurden von Kfz-Herstellerseite bereitgestellt:

- Valeo 06E 903 016 K (interne Bezeichnung L1)
- Valeo 03L 903 023 L (interne Bezeichnung L2)
- Hitachi 59903 015 P (interne Bezeichnung L3)

Bei der Lageverifizierung werden die erforderlichen Informationen über die räumliche Lage des Produktes und somit jeglicher zu entfernender Teilkomponenten (Schrauben, Bauteile) während des laufenden Demontageprozesses überwacht.

1. Produktidentifikation

Als definierter Anlieferungsbereich für die zu demontierenden Produkte ist eine Plattformwaage aufgebaut und an das interne Netzwerk angeschlossen worden. Aufgrund des erfassten Produktgewichtes kann so die Menge der für die Identifikation in Frage kommenden Produkttypen eingeschränkt werden. Da die Algorithmen für den 3D-Punktwolken-Vergleich des 3D-Prototyps und der Bildszene sehr komplex und damit zeitaufwendig sind, lässt sich durch die Vorauswahl, insbesondere bei einer großen Anzahl von Produkttypen, eine erhebliche Reduktion der Rechenzeit erreichen.

Im nächsten Schritt erfolgt ein visueller Abgleich der infrage kommenden Produkttypen. Dazu wird mit Hilfe einer Realsense D415 Tiefenkamera, welche in drei Meter Höhe zentral über der Waage installiert wurde, eine 3D-Bildszene aufgenommen. Eine millimetergenaue Erfassung ist mit der D415 auf diese Distanz nicht möglich, es wird vielmehr eine schematische Punktwolke erzeugt, welche die Abmessungen des Produkts mit einer Genauigkeit von etwa 2 cm wiedergeben. Auf Grundlage des erzeugten 3D-Oberflächenprofils berechnet ein Convex-Hull-Algorithmus zwei Linien oberhalb der Lichtmaschine parallel zu den Rändern der Waage. Die Koordinaten dieser Linien dienen als Führungshilfe für den Artec Space Spider 3D-Scanner, welcher von dem neben der Waage montierten 6-Achs-Roboter (KUKA KR180) bedient wird (Abbildung 31).

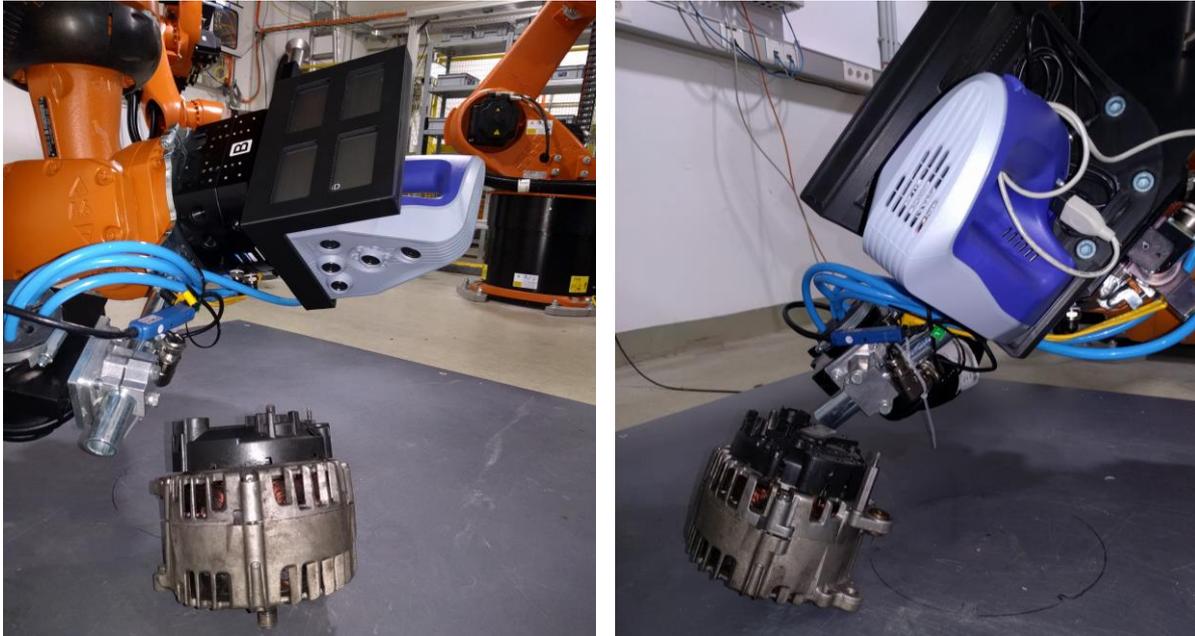


Abbildung 31: Scanvorgang der Lichtmaschine auf der Waage mit dem am Roboterarm montierten Artec Space Spider 3D-Scanner

Die berechneten Linien sind in einem Abstand von etwa 25 cm über der Lichtmaschine angelegt, der Messbereich des 3D-Scanners liegt zwischen 18 und 30 cm. Beim Abtasten der zu identifizierenden Lichtmaschine (ca. fünf Sekunden Scandauer) wird ein wenig rechenintensiver Teilscan erzeugt und mittels folgender Prozesskette zu einem 3D-Teilmodell verarbeitet:

- Globale Registrierung der Einzelbilder,
- Entfernen von Ausreißern,
- Fusionsalgorithmus zum Erstellen eines triangulierten Modells,
- Berechnung eines Oberflächenmodells mit Punktnormalen.

Das erzeugte Teilmodell wird nun mit den in der Datenbank vorhandenen Prototypen verglichen. Der dabei eingesetzte Algorithmus liefert einerseits das Maß der Übereinstimmung, anhand dessen die einzelnen Identifikationswahrscheinlichkeiten berechnet werden, andererseits die Lage des Teilmodells relativ zum jeweiligen Prototypen, aus welcher nach erfolgreicher Erkennung die aktuelle Orientierung des Produkts berechnet werden kann, um erste roboterseitige Greifoperationen zu ermöglichen. Für eine erhöhte Zuverlässigkeit dieser Lagebestimmung wurde ein weiterer Algorithmus zur Verfeinerung der ermittelten Position implementiert. Die numerisch erreichbare Genauigkeit des Verfahrens liegt bei ca. 0,1 % des Modelldurchmessers. Bei einem Durchmesser der identifizierten Lichtmaschine von ca. 20 cm kann deren Position und Orientierung demnach auf ungefähr 0,2 mm genau bestimmt werden.

Die einzelnen Teilschritte des Verfahrens können durch eine Vielzahl von Parametern gesteuert werden, welche umfangreich untersucht wurden, um einen Kompromiss zwischen Berechnungsdauer sowie Robustheit und Exaktheit zu finden.

Nach erfolgreicher Produkt- und Lagebestimmung auf der Waage wechselt der Roboter den 3D-Scanner gegen ein Greifwerkzeug und platziert, basierend auf den ermittelten Koordinaten, die Lichtmaschine auf dem zentralen Arbeitstisch. Auf diesem finden anschließend alle weiteren Schritte des Demontageprozesses statt.

Einschränkungen bei der Lagebestimmung

Da die Koordinaten des Artec Scanners und des Greifers mittels eines Werkzeugs manuell eintrainiert wurden, um sie auf das Koordinatensystem der Robotereinheit zu übertragen (siehe AP 2), ist das Auftreten eines gewissen Fehlers unvermeidbar. Eine weitere Ungenauigkeit ergibt sich bei dem Scanvorgang der Lichtmaschine mit dem Artec Space Spider 3D-Scanner. Die dadurch generierte Punktwolke weicht bei jedem Scanvorgang minimal von der vorherigen ab, was die Einpassung des 3D-Prototyps in diese beeinflusst. Testläufe zeigten, dass durch die Kombination beider Fehler die geforderte Submillimeter-Präzision für den formschlüssigen Greifvorgang nicht gewährleistet ist. Das sich an die Produktidentifikation anschließende, oben beschriebene Verfahren zur Aufnahme der Lichtmaschine aus einer beliebigen Position auf der Waage fand daher im Technikumsmaßstab keine Anwendung. In einer zukünftigen Demontagefabrik im Industriemaßstab kann das vorgestellte Verfahren jedoch als Grundlage für eine Weiterentwicklung dienen. Weiterhin wurde nach Absprache mit dem Auftraggeber statt der drei ursprünglich in Betracht gezogenen Produkttypen nur für die Lichtmaschine vom Typ Valeo 03L 903 023 L (L2) eine Demontageanleitung abschließend erstellt sowie die dafür notwendige technische Umsetzung des Demontagemoduls implementiert, da der zusätzliche Zeit- und Investitionsaufwand im Rahmen des Projektes nicht darstellbar war.

Um trotz des Verwerfens der automatischen Lageerkennung eine definierte Position der Lichtmaschine bei der Anlieferung in das Demontagemodul zu gewährleisten, wird diese in eine eigens dafür konstruierte und auf der Waage fixierte Halterung eingelegt (Abbildung 32). Die Übergabeposition wurde dem 6-Achs-Roboter vom Typ KUKA KR180 statisch vorgegeben, so dass dieser die Lichtmaschine mit Hilfe eines Greifers auf dem zentralen Arbeitstisch mit einer Genauigkeit von wenigen zehntel Millimeter platzieren kann.

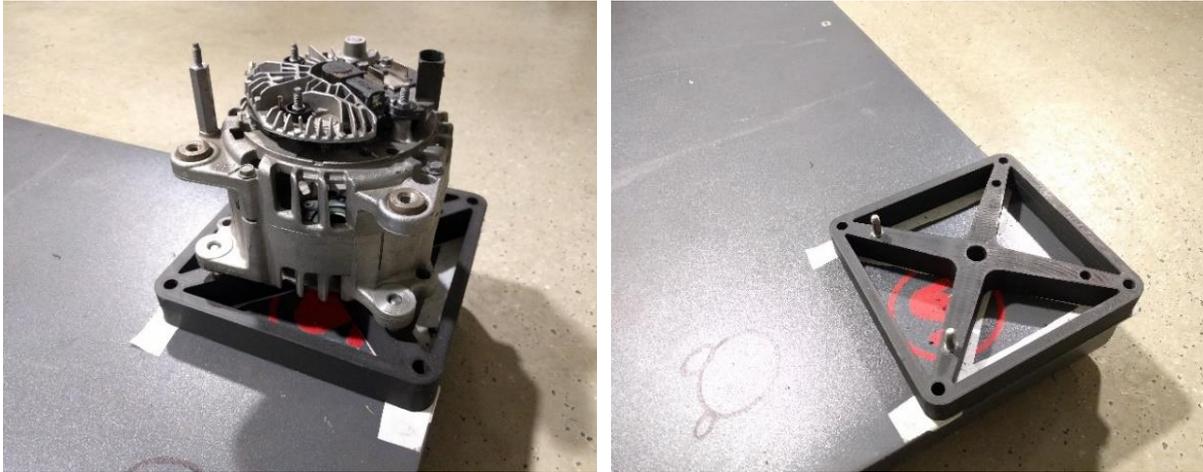


Abbildung 32: Halterung für die Lichtmaschine vom Typ Valeo 03L 903 023 L (L2) auf der Waage

2. Lage- und Bauteilverifizierung während der Demontage

Eine Überprüfung der korrekten Position des zu demontierenden Produktes auf dem Arbeitstisch ermöglicht eine fehlerfreie Werkzeugführung bei Schraub-, Greif- und Schneidoperationen. Ebenfalls können Abweichungen von der hinterlegten Demontageanleitung, wie z.B. zerstörte oder unvollständig gelöste Teile, erkannt werden. Zur Lageverifizierung erstellt ein Ensensio X36 3D-Kamerasystem ein Tiefenbild der Szene aus Objekt und Arbeitstisch, in welches der 3D-Prototyp der Lichtmaschine durch Matching-Algorithmen eingepasst wird. Die Entscheidung für das 3D-Kamerasystem von Ensensio basierte auf der vorhandenen Softwareschnittstelle der Ensensio SDK (Version 3.1.985) zu der für das Surface-Matching verwendeten 3D-Bildverarbeitungssoftware MVTEC Halcon (Version 20.11). Eine Programmierschnittstelle von Python 3 (Version 3.8) zu Halcon ermöglicht zudem einen Zugriff auf die Programmibliothek NxLib (Version 13) von Ensensio und damit auf die Funktionalitäten des 3D-Kamerasystems.

3D-Prototypen

Da keine CAD-Daten der Lichtmaschinen von Herstellerseite vorlagen, wurden entsprechende Prototypen mittels eines 3D-Handscanners (Artec Space Spider) erzeugt. Beim manuell durchgeführten Scan treten in den Prototypen allerdings unerwünschte Artefakte in Form überflüssiger Strukturen auf, die eine Nachbearbeitung notwendig machen. So wurden beispielsweise Teile des Rotors und Stators, welche für die Szenenanalyse nicht relevant sind, aus den digitalen Prototypen entfernt. Zusätzlich wurde die untere Hälfte des Modells entfernt, da die Kamera über dem Arbeitstisch nur den oberen Teil des Produktes in der Bildszene abbildet (Abbildung 33). Dieser Bearbeitungsschritt beschleunigt den Algorithmus zur Einpassung des 3D-Prototypen erheblich und ermöglicht darüber hinaus eine genauere

Lageverifizierung. Die Nachbearbeitung fand mit Rhino 6 statt, einem Softwaretool für computergestützte 3D-Modellierung.

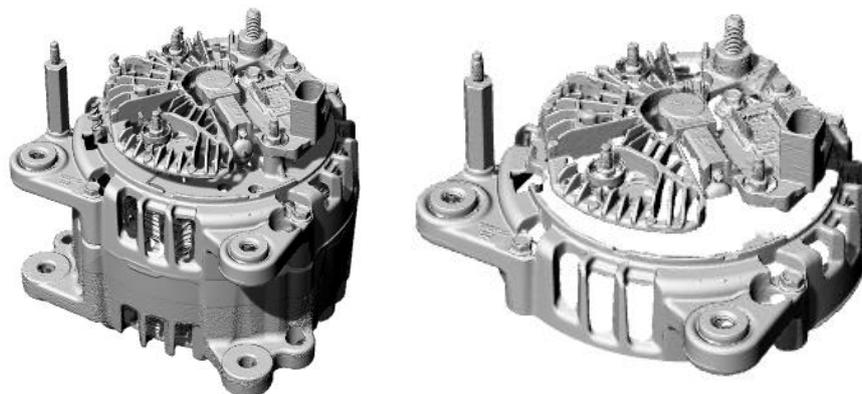


Abbildung 33: Beispiel für den 3D-Prototyp vor (links) und nach (rechts) der Bearbeitung in Rhino 6

Lageverifizierung

Die Einpassung des 3D-Prototyps in die Bildszene erfolgt mittels eines Surface-Matching-Algorithmus, der Bestandteil der Bildverarbeitungssoftware MVTec Halcon (Version 20.11) ist. Dabei wird der mittlere Abstand zwischen den zwei Punktwolken von 3D-Prototyp und erfasster Bildszene mit Hilfe verschiedener Schlüsselpunkte minimiert (Abbildung 34). Die eingepasste Pose des 3D-Prototyps umfasst sechs Koordinaten, welche die Position und Lage des Objekts in der Bildszene festlegen. Drei Koordinaten beschreiben die Translation (x_t , y_t , z_t) und drei weitere die Rotation (x_r , y_r , z_r) ausgehend vom Ursprung des Koordinatensystems der 3D-Kamera. Die Koordinaten der Rotation werden für die Validierung nicht berücksichtigt, nachdem Vorversuche gezeigt haben, dass diese die Lageverifizierung nicht unmittelbar beeinflussen. Abbildung 35 zeigt exemplarisch fünf der erstellten 3D-Prototypen für die Lageverifizierung der entsprechenden Demontagezustände.

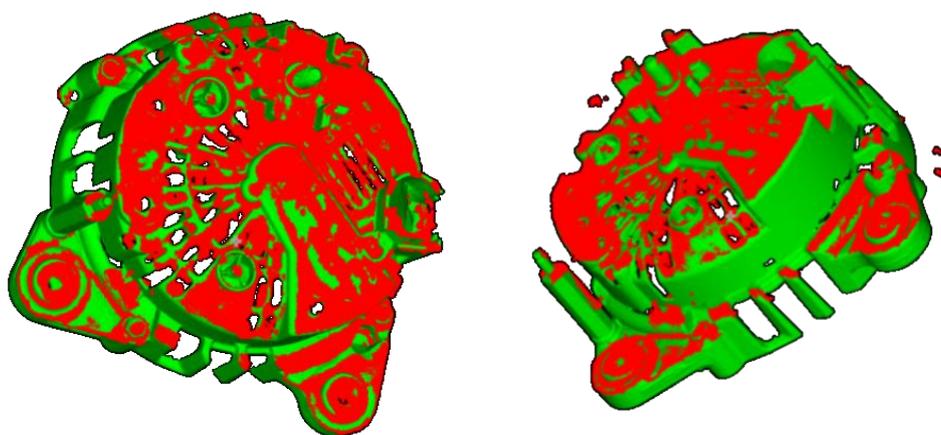


Abbildung 34: Beispiele für die Einpassung des 3D-Prototypen (grün) in der Bildszene (rot) mittels Surface-Matching-Algorithmus (MVTec Halcon 20.11). Aufgrund der Kamerapositionierung über dem Arbeitstisch wird nur ein Teilausschnitt des 3D-Prototyps benötigt.

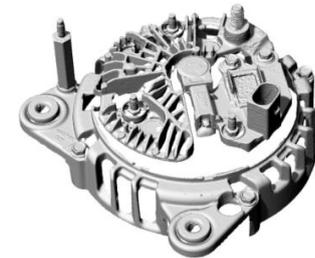
<u>Demontagezustand</u>	<u>3D-Prototyp</u>	<u>Beschreibung</u>
		<p>Schleifringlager schild ohne Kunststoffdeckel</p>
		<p>Schleifringlager schild ohne Multifunktions regler</p>
		<p>Schleifringlager schild ohne Gleichrichter diodenplatte</p>
		<p>Schleifringlager schild ohne Kunststoff abdeckung der Leitungen</p>
		<p>Antriebslager schild ohne Rotor und Stator</p>

Abbildung 35: 3D-Prototypen der Lichtmaschine vom Typ Valeo 03L 903 023 L (L2), welche für die Lageverifizierung unterschiedlicher Demontagezustände verwendet wurden

Die Lageverifizierung wird für ausgewählte Demontagezustände mit einem angepassten 3D-Prototyp durchgeführt. Dafür werden die berechneten Raumkoordinaten des Prototyps in der Bildszene mit den in der Datenbank hinterlegten Raumkoordinaten verglichen. Weicht mindestens eine der ermittelten Koordinaten im Vergleich zu den in der Datenbank hinterlegten Koordinaten um einen festgelegten Schwellenwert (1 mm, siehe Abschnitt *Ermitteln der Toleranzschwelle*) ab, wird ein negatives Feedback über die Datenbank gesendet, welches eine Abbruchroutine initialisiert und ggf. ein manuelles Eingreifen erforderlich macht. Wenn sich andererseits die Raumkoordinaten des Produkts innerhalb der Toleranzschwelle befinden, wird ein positives Feedback an die Datenbank gesendet und der Demontagevorgang wird mit dem nächsten Zustand fortgesetzt.

Benutzer-Interface für den Kameradienst

Die Szenenanalyse ist als im Hintergrund laufender Dienst eingerichtet, welcher über die Datenbank mit dem Prozessleitsystem kommuniziert. Dieses stößt im laufenden Prozess Verifizierungen zu verschiedenen Demontagezuständen an und erhält ein entsprechendes Feedback nach erfolgter Szenenanalyse. Der Dienst kann über eine eigens für das Projekt entwickelte Bedienoberfläche (RoboValidEye Service) kontrolliert, sowie der aktuelle Status der Demontage basierend auf der Szenenanalyse abgerufen werden (Abbildung 36). RoboValidEye Service wurde in Python 3.8 entwickelt und ist auf dem zentralen Kontroll- und Prozessrechner installiert.

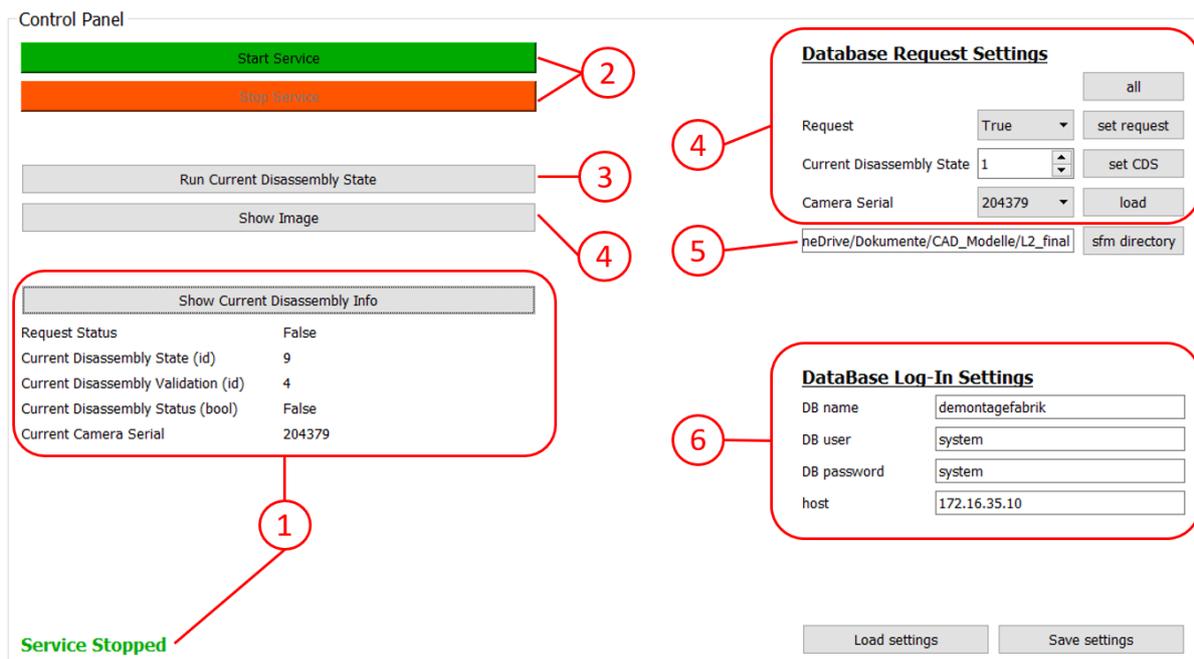


Abbildung 36: Benutzerinterface des RoboValidEye Service

Die Steuerung und Überwachung des Dienstes für die Szenenanalyse wird durch folgende Funktionalitäten des RoboValidEye Service bereitgestellt (vgl. nummerierte Elemente in Abbildung 36):

1. *Aktuelle Informationen zum Demontageprozess*

Hier werden die Informationen der für die Szenenanalyse verwendeten Kamera (*Current Camera Serial*), des aktuellen Demontageschrittes (*Current Disassembly State*), des zugehörigen Validierungsschrittes der Szenenanalyse (*Current Disassembly Validation*) und der Status der zuletzt durchgeführten Validierung (*Current Disassembly Status*) angezeigt, wobei der Wert *True* für eine erfolgreiche und *False* für eine fehlgeschlagene Validierung steht. Der *Request Status* zeigt an, ob aktuell eine Szenenanalyse vom Prozessleitsystem (oder manuell, siehe 4.) angefordert wird. Die Werte werden im laufenden Demontageprozess in Echtzeit aus der Datenbank, beziehungsweise zu Testzwecken über das Bedienelement *Show Current Disassembly Info*, abgerufen und angezeigt. Zusätzlich wird unten links in der Kontrolloberfläche der gegenwärtige Aktivitätsstatus des Dienstes angezeigt.

2. *Dienst starten und stoppen*

Bei Programmstart wird der Dienst automatisch gestartet und lässt sich jederzeit im laufenden Demontageprozess stoppen. Sollte der Service während einer laufenden Prozessanfrage gestoppt werden, so wird die Validierung noch bis zum Ende durchgeführt und erst im Anschluss der Dienst angehalten.

3. *Validierung für den Gegenwärtigen Demontagezustand starten*

Wenn der Dienst gestoppt wurde, kann die Validierung eines einzelnen Demontagezustandes zu Testzwecken durchgeführt werden, ohne dass diese vom Prozessleitsystem angefordert werden muss. Dazu muss vorher ein *Request* gesetzt worden sein (siehe 4.).

4. *Datenbankeinstellungen zur manuellen Prozessanfrage*

Zu Testzwecken kann eine manuelle Prozessanfrage (*Request*) sowohl im aktiven als auch im inaktiven Dienst mit *set Request* gestellt werden, bei gleichzeitiger Auswahl von *True* im Drop-Down Menü. Bei laufendem Dienst wird die Anfrage umgehend abgehandelt. Die Anfrage betrifft dann entweder den zuletzt abgefragten Demontagezustand (siehe 1.) oder kann über *Current Disassembly State* eingestellt und mit *Set CDS* in die Datenbank geschrieben werden. Die in der Datenbank hinterlegten Seriennummern der Kameras (*Camera Serial*) können über *load* geladen und anschließend über das Drop-Down Menü ausgewählt werden. Die ausgewählte Kamera wird für die Validierung verwendet, wobei bei Programmstart die Seriennummern automatisch geladen und die erste in der Liste als Standard ausgewählt wird. Ist die entsprechende Kamera nicht anwählbar (wenn z.B. keine Netzwerkverbindung besteht), wird eine entsprechende Fehlermeldung in der Konsole ausgegeben.

5. *Dateipfad für die Surface-Models*

Die 3D-Prototypen wurden zur Beschleunigung der Laufzeit des Surface-Matching in einen Halcon-spezifischen Objekttyp für Oberflächenmodelle umgewandelt (siehe ebenfalls Abschnitt *Parametereinstellungen für das Surface-Matching*). Da dieser Objekttyp nicht aus einer Datenbank ausgelesen werden kann, wurden die Oberflächenmodelle lokal auf dem Kontroll- und Prozessrechner gespeichert. Der Dateipfad zu diesem Speicherort muss vor der Aktivierung des Dienstes oder einer einzelnen Validierung manuell über das Kontrollelement *sfm directory* gesetzt werden. Bei Programmstart ist in dem nebenstehenden Textfeld ein Default-Wert eingetragen.

6. *Datenbank Log-In Einstellungen*

Die Log-In Daten beziehen sich auf die PostgreSQL-Datenbank, über welche die Kommunikation mit dem Prozessleitsystem stattfindet und auf der die Parametereinstellungen für die Validierungen der einzelnen Demontagezustände abgelegt sind.

Parametereinstellungen für das Surface-Matching

Der Surface-Matching-Algorithmus erlaubt eine Vielzahl von Parametereinstellungen, durch welche im Wesentlichen die Genauigkeit auf Kosten der Dauer des Matchings gesteuert wird. Da in diesem Projekt der Zeitfaktor ein wesentliches Kriterium für die Wirtschaftlichkeit der Demontage ist, galt es auch die Szenenanalyse zeitlich zu optimieren. Gleichzeitig mussten technische Einschränkungen bei der Werkzeugführung berücksichtigt werden. Diese erforderten die Einhaltung eines Mindeststandards bei der Genauigkeit des Matchings. Um für jeden Schritt die optimalen Einstellungen zu ermitteln, musste eine Vielzahl von Matchings für jeden Demontagezustand mit verschiedenen Parameterkombinationen durchgeführt werden. Wesentliche Parametereinstellungen sind wie folgt:

- *relative sampling distance create surface model*: Vor dem Surface-Matching muss aus dem bestehenden 3D-Prototyp (*.stl) ein Halcon-Objekt, ein sogenanntes *surface-model*, generiert werden. Das *surface-model* entspricht einer Punktwolke, wobei die Abstände der Punkte relativ zum ursprünglichen Prototyp definiert sind. Ein Wert von 0,01 entspricht bei einem Produktdurchmesser von 20 cm einem Punktabstand von 2 mm. Je kleiner der Abstand, desto genauer das Surface-Matching auf Kosten der Laufzeit.
- *relative sampling distance find surface model*: Dieser Parameter setzt die Abtastdistanz der Bildszene in Relation zur Größe des *surface-model*. Je kleiner der Wert, desto exakter, aber auch langsamer verläuft das Surface-Matching.

- *key point fraction*: Anteil der Schlüsselpunkte des *surface-models*, welche beim Surface-Matching besonders gewichtet werden. Je mehr Punkte gesetzt werden, desto genauer ist das Matching auf Kosten der Laufzeit.

Zu den genannten Parametern kommen noch verschiedene Einstellungen für das 3D-Kamerasystem, welche z.B. Bild-Filter (Median-Filter) oder den festzulegenden Ausschnitt der Bildszene beinhalten. Darüber hinaus ist der Abstand der Kamera zum zentralen Arbeitstisch relevant. Die Kameraobjektive besitzen eine vom Hersteller festgelegte Brennweite, welche den optimalen Arbeitsbereich des 3D-Kamerasystems einschränken. Die Brennweite der Ensenso X36 liegt bei 2000 mm. Bei diesem Abstand liegt die optische Unschärfe bei 0,88 Bildpixeln, während sie bei 2050 mm schon bei 1,959 Bildpixeln liegt. Eine größere Unschärfe kann zu einer größeren Streuung der ermittelten 3D-Koordinaten in der Bildszene und somit zu einer Ungenauigkeit beim Matching führen. Da das EoL-Produkt während der Demontage von oben abgetragen wird, nimmt im laufenden Prozess der mittlere Abstand der Bildszene zur Kamera zu, was ebenfalls bei der Installation der Kamera und dem Matching der verschiedenen Demontagezustände berücksichtigt werden musste. Die Kamera wurde final in einem Abstand von zwei Metern zum oberen Rand des Schleifringlagerschilds montiert, da die meisten Szenenanalysen mit montiertem Schleifringlagerschild stattfinden. Die Ungenauigkeit beim Matching des Antriebslagerschilds, welcher etwa 5 cm tiefer liegt, wurde mit einem Medianfilter kompensiert, welcher die Bildszene weniger detailgetreu, dafür aber replizierbarer macht. Für zukünftige Projekte wäre es eine Möglichkeit, das Kamerasystem an einer motorisierten vertikal verstellbaren Aufhängung zu montieren, um so die maximale Bildschärfe in jeder Bildszene zu erhalten. Dies ist gerade bei der Demontage größerer Produkte empfehlenswert.

Um die Parametereinstellungen für eine möglichst genaues Matching mit möglichst geringer Laufzeit zu ermitteln, wurde im Projekt ein Testtool mit Benutzeroberfläche entwickelt, welches im nächsten Abschnitt ausführlich beschrieben wird.

Benutzer-Interface für das Testtool Surface-Matching

Zur Ermittlung der optimalen Parametereinstellungen wurde eigens das Testtool RoboValidEye Setup mit Benutzerinterface in der Programmiersprache Python 3.8 entwickelt (Abbildung 37). Über die Oberfläche kann der Nutzer gewünschte Parameterwerte einstellen und im Anschluss eine definierte Anzahl von Wiederholungen des Surface-Matchings durchführen. Bei jedem Durchlauf werden die Raumkoordinaten (die sogenannte Pose) des 3D-Prototyps in der Bildszene und die durchschnittliche Dauer eines Durchlaufs berechnet. Von den so ermittelten Posen-Koordinaten aller Durchläufe können Statistiken angezeigt und in der Datenbank oder in einer lokalen Datei abgespeichert werden. Dies ermöglicht dem

Nutzer den Einfluss verschiedener Parametereinstellungen auf die Genauigkeit der Pose und der Geschwindigkeit des Surface-Matching zu evaluieren und nach anschließendem Vergleich die gewünschten Einstellungen in der Datenbank zu speichern.

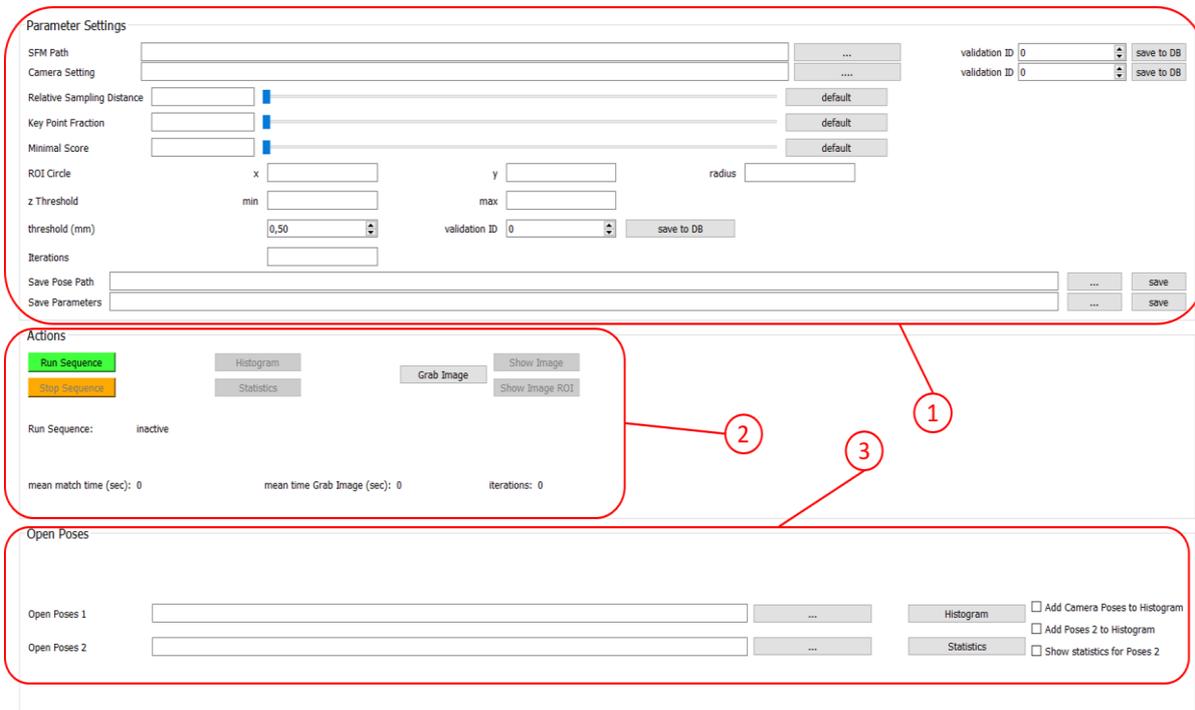


Abbildung 37: Benutzeroberfläche RoboValidEye Setup zur Bestimmung der optimalen Parametereinstellungen für das Surface-Matching

Folgende Funktionalitäten bietet das Testtool für das Surface Matching des RoboValidEye Setup (vgl. nummerierte Elemente in Abbildung 37):

1. Parametereinstellungen

Neben den Parametern, welche direkt den Surface-Matching-Algorithmus steuern (*Relative Sampling Distance*, *Key Point Fraction*, *Minimal Score*), können hier auch weitere Einstellungen vorgenommen werden. *Camera Setting* ist eine optionale Einstellung und gibt den Dateipfad für die Kameraparameter (*.json) des Ensenso 3D-Kamerasystems an. Wird kein Dateipfad angegeben, werden die herstellerseitigen Standardeinstellungen für die Kamera verwendet. *SFM Path* gibt den Dateipfad für das 3D-Oberflächenmodell (*.sfm) an, welches in die Bildszene eingepasst wird. Das Modell muss zuvor mit Halcon (Steady Version 20.11) erzeugt und gespeichert werden. *Threshold (mm)* bestimmt die maximale Positionsabweichung - auch als Toleranzschwelle bezeichnet - der in einer Bildszene gefundenen Raumkoordinaten im Vergleich zur in der Datenbank hinterlegten korrekten Raumkoordinaten und hilft dem Nutzer bei der statistischen Auswertung (siehe auch Abschnitt *Ermitteln der Toleranzschwelle für das Surface-Matching*). Ausschnitte der Bildszene werden mit *ROI Circle* und *z Threshold* definiert und tragen zur Beschleunigung des Surface-

Matching bei, während *Iterations* die Anzahl der Wiederholungen der Testsequenz festlegt. Nach Durchlauf der Testsequenz können die ermittelten Raumkoordinaten jeder Wiederholung sowie die verwendeten Parametereinstellungen jeweils als Liste (*Save Pose Path*, *Save Pose Parameters*) gespeichert werden.

2. Aktionen

Sind alle notwendigen Parametereinstellungen vorgenommen, startet *Run Sequence* eine Sequenz von Surface-Matchings mit der entsprechenden Anzahl von Wiederholungen. Die Sequenz kann jederzeit mit *Stop Sequence* unterbrochen werden, wobei die bis dahin ermittelten Raumkoordinaten nicht verloren gehen. Das zu verwendende 3D-Kamerasystem kann über die Seriennummer in einem externen Fenster ausgewählt werden, mit welchem gleichzeitig auch der Kamerastatus überprüft werden kann (Abbildung 38). Nach Abschluss der Sequenz kann über den Button *Histogram* die Verteilung einer ausgewählten Posenkoordinate [xt, yt, zt, xr, yr, zr] angezeigt (Abbildung 41) und mit den Button *Statistics* statistische Kenngrößen ausgegeben werden (Abbildung 40).

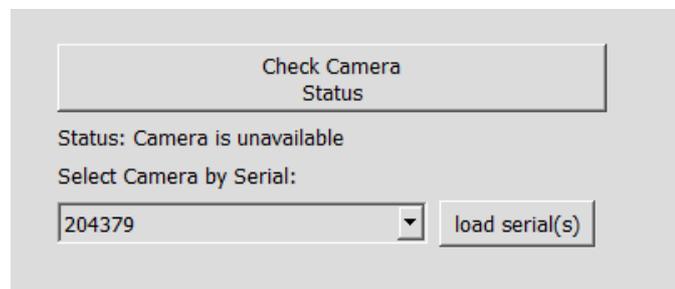
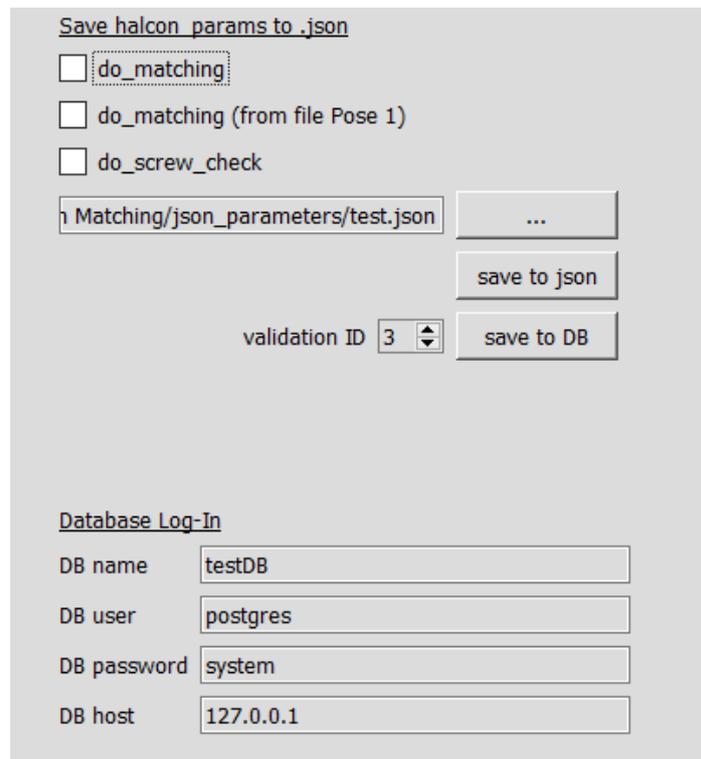


Abbildung 38: Benutzeroberfläche für Statusanzeige und Auswahl des 3D-Kamerasystems

3. Gespeicherte Posen öffnen

Über die Bedienoberfläche können zuvor abgespeicherte Listen mit Posen (Raumkoordinaten) geladen sowie Statistiken und Histogramme angezeigt werden.

Die vom Nutzer eingestellten Parameter sowie die optimale Pose für den jeweiligen Demontagezustand können über ein externes Fenster als json-Datei gespeichert und anschließend – nach Eingabe der Log-In Daten - in der Datenbank mit entsprechender Validierungs-ID abgelegt werden (Abbildung 39). Auf diese Weise wurden die Parameter und die korrekten Posen für die fünf Demontagezustände, welche mit der Szenenanalyse überwacht werden (Abbildung 35), ermittelt und in die Datenbank abgelegt.



Save halcon params to .json

do_matching

do_matching (from file Pose 1)

do_screw_check

Matching/json_parameters/test.json ...

validation ID 3

save to json

save to DB

Database Log-In

DB name testDB

DB user postgres

DB password system

DB host 127.0.0.1

Abbildung 39: Benutzeroberfläche zur Speicherung der Parametereinstellungen für das Surface-Matching in der Datenbank

Ermitteln der Toleranzschwelle für das Surface-Matching

Am Beispiel einer Sequenz von Surface-Matchings soll der Entscheidungsprozess für die Festlegung der Toleranzschwelle, innerhalb derer sich die Koordinaten für eine positive Lageverifizierung befinden müssen, erläutert werden. In Abbildung 40 ist beispielhaft die Statistik einer Sequenz von 100 Matchings mit identischen Parametereinstellungen abgebildet. Die Koordinaten sind annähernd normalverteilt (

Abbildung 41), was eine aussagekräftige Interpretation der statistischen Kenngrößen erlaubt. Die Wahrscheinlichkeit, dass y_t bei einer zufällig ausgewählten Szenenanalyse nicht mehr als 0,5 mm vom Mittelwert ($\mu = -13,86$ mm) abweicht, liegt bei etwa 99,8 % ($probInThresh(0.5)$, vgl. Abbildung 40). Bei einem Schwellenwert von 0,5 mm würden bei etwa 2 von 1000 Durchläufen der Szenenanalyse die Demontage aufgrund der Abweichung der y_t -Koordinate unterbrochen werden, obwohl sich die Lichtmaschine auf dem Arbeitstisch in korrekter Position befindet. Man spricht in diesem Fall von einer falsch-negativ Rate von 0,2 %. Obwohl diese Rate sehr klein erscheint, gilt es zu beachten, dass die Koordinaten x_t , y_t und z_t zur Lageverifizierung in jedem der fünf Demontagezustände herangezogen werden, was zu einer Kumulierung des Fehlers um den Faktor 15 führt. Wenn beispielsweise jede Koordinate bei jedem der fünf zu validierenden Demontagezustände eine falsch-negativ-Rate von 0,2 % aufweisen würde, ergäbe sich eine falsch-negativ-Rate von 2,96 % für den gesamten Demontageprozess.

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Position des Produktes im Gesamtprozess mindestens einmal negativ validiert wird, unter der Bedingung, dass sie immer in richtiger Position war, berechnet sich wie folgt:

$$FalschNegativRate(gesamt) = P(negativ|richtig)_{gesamt} = 1 - \prod_{i=1}^n P(positiv|richtig)_i = 1 - 0,998^{15} = 0,0296$$

; mit $n \hat{=}$ Anzahl der zu validierenden Raumkoordinaten

Vorversuche haben gezeigt, dass die falsch-negativ-Rate von y_t beim Zustand *Antriebslagerschild ohne Rotor und Stator* (vgl. Abbildung 35) bei mindestens 5 % liegt. Unter der Annahme, dass die falsch-negativ-Rate aller anderen Koordinaten bei 0,2 % liegt, kumuliert sich die Fehlerwahrscheinlichkeit, dass die Lageverifizierung bei korrekter Positionierung der Lichtmaschine mindestens einmal im Gesamtprozess fehlschlägt, zu 7,6 %:

$$P(negativ|richtig)_{gesamt} = 1 - 0,95 * 0,998^{14} = 0,076$$

Ein ungewollter Abbruch, welcher beträchtliche Verzögerungen zur Folge hätte, würde die Wirtschaftlichkeit eines automatisierten Demontagebetriebs erheblich einschränken. Aus diesem Grund wurde eine Toleranzschwelle von 1 mm festgelegt, bei dem die akkumulierte falsch-negativ-Rate vernachlässigbar klein und eine zuverlässige Werkzeugführung gerade noch gewährleistet ist.

	mu	median	std	CI	problnThresh (0.5)
x(t)	229.243	229.242	0.158	0.322	99.8436
y(t)	-13.857	-13.853	0.162	0.289	99.8012
z(t)	2068.874	2068.875	0.011	0.017	100.0
x(r)	180.918	180.92	0.017	0.035	100.0
y(r)	359.499	359.499	0.018	0.031	100.0
z(r)	178.528	178.466	0.387	0.528	80.3799

Abbildung 40: Statistik der Posenkoordinaten aus einer Sequenz von 100 Surface-Matchings; Mittelwert (mu), Median, Standardabweichung (std), 95 % Konfidenzintervall (CI), Wahrscheinlichkeit für das Auftreten innerhalb eines Schwellenwertes (hier 0,5 mm) in Prozent (problnThresh(0.5))

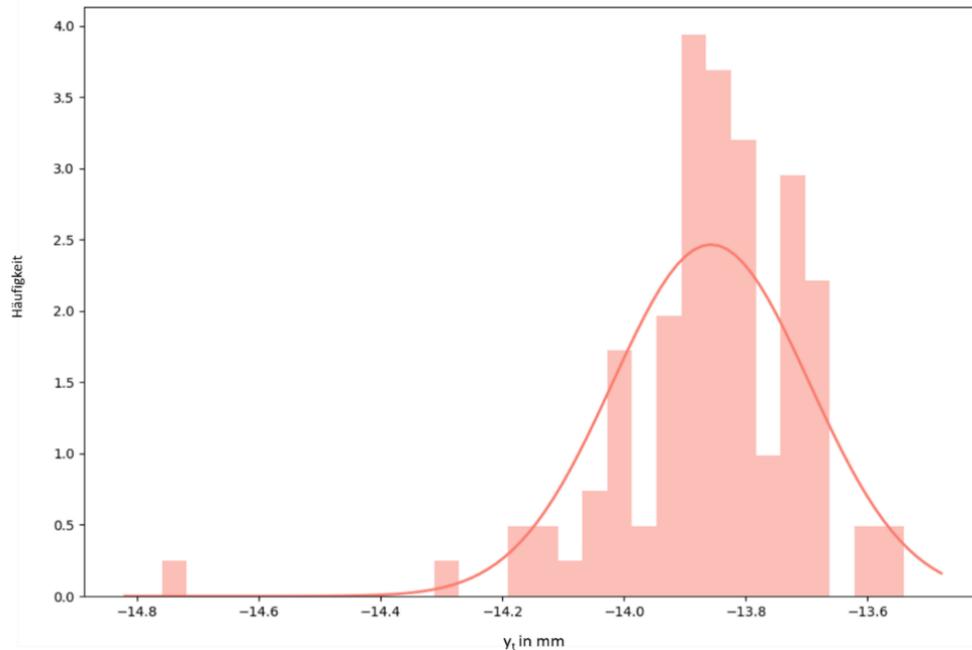


Abbildung 41: Histogramm der Häufigkeit verschiedener Messungen für die Koordinate y_t bei einer Sequenz von 100 Surface-Matchings.

Die Lageverifizierung dauert für den Zustand *Antriebslagerschild ohne Rotor und Stator* (Abbildung 35, S. 54) ca. 5 Sekunden, für die übrigen Zustände etwa 2,5 Sekunden. Es kommt zu keiner Verzögerung der Demontage, da während der Szenenanalyse andere Tätigkeiten der Roboter, wie Werkzeugwechsel oder das Ablegen von Bauteilen, durchgeführt werden.

Verifizierung der Schraubendemontage

Bei ungelösten Schrauben kann die Entfernung eines Bauteils im folgenden Demontageschritt zu einer Beschädigung dieses Bauteils oder, was ein wesentlich ungünstigeres Szenario darstellt, zu einer Beschädigung des eingesetzten Werkzeuges führen. Da bei der Lageverifizierung der Erfolg einer Schraubendemontage nicht überprüft wird, musste für diese Problematik ein eigenes Prüfverfahren entwickelt werden. Die Verifizierung erfolgt über eine Tiefenmessung des 3D-Kamerasystems an den Positionen der zu entfernenden Schrauben. Im Vorfeld müssen alle Schrauben mit Position und entsprechender Tiefe einmal erfasst werden, die Werte werden in der Datenbank hinterlegt. Nachdem ein Schraubvorgang an der Lichtmaschine durchgeführt wurde, wird eine Bildszene aufgenommen und die Tiefe an den entsprechenden Positionen gemessen. Sollte die gemessene Tiefe, sprich der Abstand zur Kamera, mindestens 2 mm größer sein als der in der Datenbank hinterlegte Wert, gilt die Schraube als gelöst. Ein positives Feedback an die Datenbank setzt den Demontagevorgang fort. Im Fall eines negativen Feedbacks wird die Demontage unterbrochen und ein manuelles Eingreifen ist erforderlich, z.B. das Lösen der betroffenen Schraube(n) per Hand. Eine Fortführung der automatisierten Demontage ist im Anschluss möglich. Die korrekten

Schraubenpositionen können mit dem Benutzerinterface RoboValidEye Setup, welches ebenfalls für das Ermitteln der Parameter für das Surface-Matching dient, festgelegt werden.

Benutzer-Interface zum Ermitteln der Schraubenpositionen

RoboValidEye Setup (Abbildung 42) erlaubt es dem Benutzer, ein Areal auf dem Schraubenkopf manuell in der Bildszene auszuwählen. In gleicher Weise, wie bereits für das Testtool für die Lageverifizierung beschrieben, bietet sich die Möglichkeit, eine Sequenz von Bildern aufzunehmen und entsprechende Statistiken über die Tiefenmessung an den Schraubenpositionen aufzurufen. Im Zuge des Projektes wurden die Position und Tiefe für jede der 13 an der Lichtmaschine befindlichen Schrauben mit Hilfe des RoboValidEye Setup ermittelt, in der Datenbank hinterlegt und für die Verifizierung der Schraubendemontage verwendet.

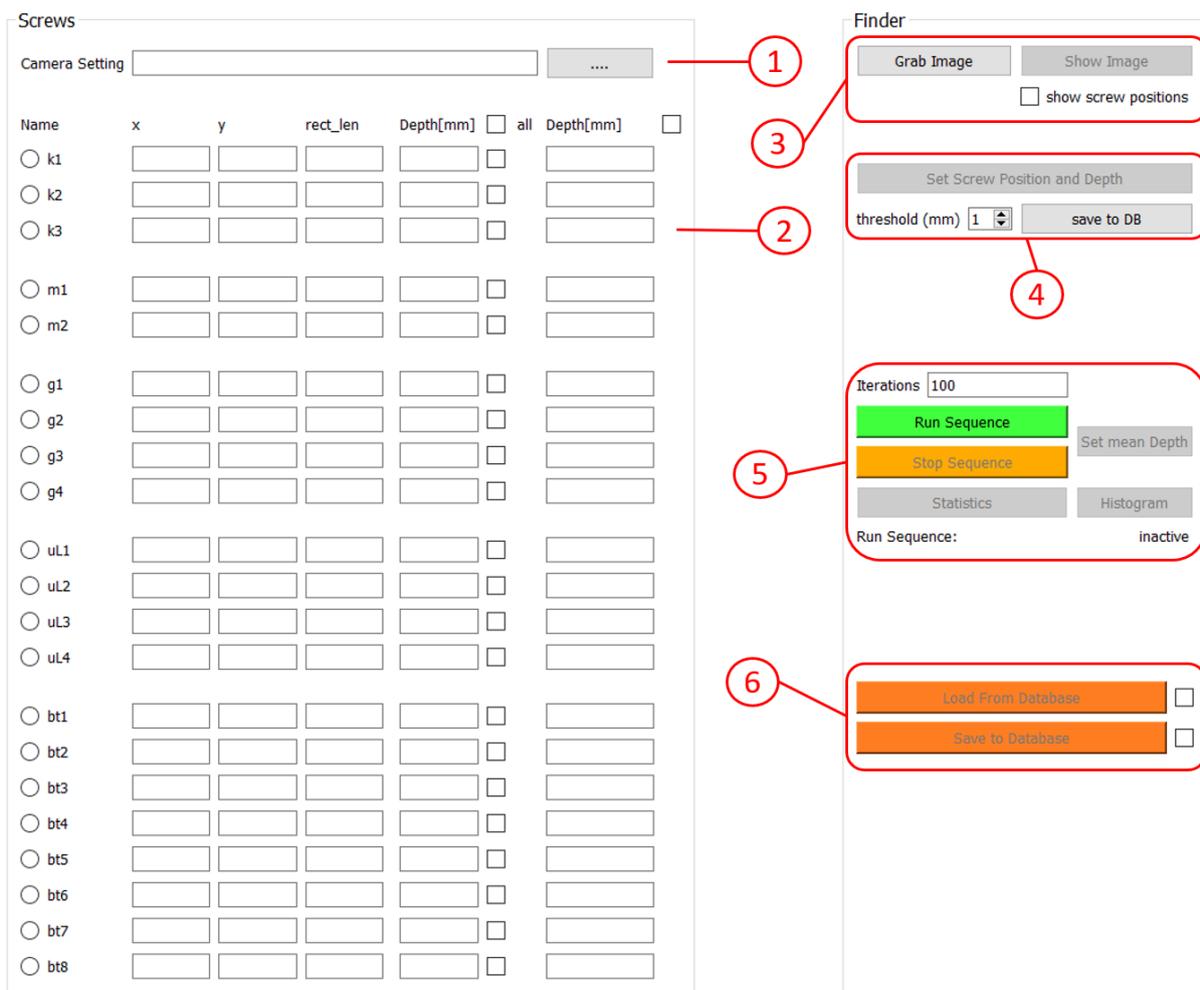


Abbildung 42: Benutzerinterface RoboValidEye Setup zur Erfassung der Koordinaten und Tiefenmessung für die Verifizierung der Schraubendemontage

Die Bedienelemente für das RoboValidEye Setup zum Erfassen der Schraubentiefe werden im Folgenden näher erläutert (vgl. Nummerierung in Abbildung 42):

1. Kameraeinstellungen

Camera Setting ist eine optionale Einstellung und gibt den Dateipfad für die Kameraparameter (*.json) des Ensenso 3D-Kamerasystems an. Wird kein Dateipfad angegeben, werden die herstellereitigen Standardeinstellungen für die Kamera verwendet.

2. Schraubenpositionen in 3D-Bild festlegen

Mit den Bedienelementen *Grab Image* und *Show Image* kann eine Bildszene aufgenommen und in einem separaten Grafikfenster angezeigt werden. Das Grafikfenster ist interaktiv und erlaubt es dem Benutzer Bildereiche zu markieren indem Rechtecke über ein entsprechendes Bildareal gezogen werden (Abbildung 43). Über *Set Screw Position and Depth* wird die Information über die Position ($x, y, rect_len$) des Rechtecks und die mittlere Tiefe ($Depth(mm)$) innerhalb des Rechtecks in die Zeile des ausgewählten Schraubennamens (*Name*) eingetragen. Durch Aktivierung der jeweiligen Check-Box und den Button *save to DB* kann zusätzlich ein Schwellenwert ($threshold(mm)$) für die Schraubenverifizierung in der Datenbank gespeichert werden.

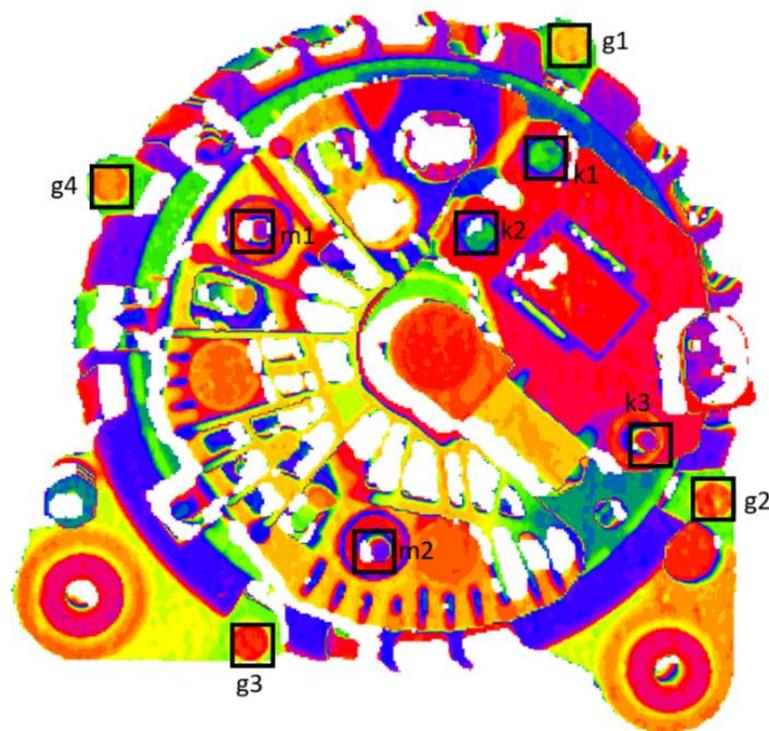


Abbildung 43: Aufsicht auf die Lichtmaschine als Tiefenbild. Die Farbe codiert den Abstand zur Kamera, die Rechtecke zeigen die Schraubenpositionen und sind mit den internen Bezeichnungen der jeweiligen Schraube beschriftet.

3. *Aktionen*

Mit *Run Sequence* kann eine gewählte Anzahl von Aufnahmen (*Iterations*) gemacht werden und die Mittelwerte der Tiefenmessung für die vorher durch die Check-Box markierten Schrauben an den entsprechenden Positionen (siehe Abschnitt 2.) berechnet werden. Hier gibt es ebenfalls die Möglichkeit sich statistischen Kenngrößen (*Statistics*) oder die Verteilung der einzelnen Messungen (*Histogram*) anzeigen zu lassen.

4. *Interaktion mit der Datenbank*

Hier können die Werte für Position und Größe sowie die mittlere Tiefe einer Schraube aus der Datenbank geladen, bzw. gespeichert werden. Die Interaktion mit den einzelnen Schrauben geschieht über die Check-Box (siehe Abschnitt 2.).

Verifizierung der Bauteildemontage

Obwohl beim Matching unvollständig gelöste oder beschädigte Bauteile ebenfalls zu einer inkorrekten Einpassung des Prototyps in die Bildszene führen können und als Folge den Demontageprozess unterbrechen, zeigten Vorversuche, dass dies in einigen Fällen nicht geschieht. Der Grund dafür ist, dass der Algorithmus bei einigen Demontagezuständen Bereiche der Bildszene, in denen sich das entsprechende Bauteil nicht befindet, stärker gewichtet. Dadurch kann es zu einer positiven Lageverifizierung kommen, obwohl das Produkt von dem erwarteten Demontagezustand abweicht. In diesen Fällen ist die Robustheit des Surface-Matching-Algorithmus unerwünscht, da es bei dem Versuch, das Bauteil zu lösen, zu einer Beschädigung von Werkzeugen kommen kann. Um dieses Problem zu umgehen, wurde die Lageverifizierung durch ein zusätzliches Bildverfahren unterstützt, welches den Abstand von Bauteilen zur Kamera bewertet. Das dazu verwendete Verfahren ist weitgehend identisch zu dem Verfahren für die Verifizierung der Schraubendemontage. Der Unterschied ist, dass zum Abgleich die Tiefeninformationen von zwei Arealen auf dem jeweiligen Bauteil herangezogen werden. Das Verfahren wird auf den Kohlestifthalter, den Gleichrichter, die Plastikabdeckung der Leitungen, den Schleifringlagerschild, den Rotor, den Stator und das untere Kugellager angewandt.

AP 4: Entwicklung & Optimierung der Demontageabläufe

Da im Verlauf der Nutzungsphase Veränderungen an den zu demontierenden Produkten auftreten können, ist die Demontage von Altprodukten gegenüber dem Produktionsprozess eine deutlich komplexere Aufgabe. Zur Sicherstellung des Demontageerfolgs ist grundsätzlich ein Abgleich mit den werkseitigen Produktspezifikationen erforderlich, der bei detektierten Abweichungen eine Anpassung der Demontagesequenz zur Folge hat. Dies ist bei wiederholter Demontage eines identischen Produkttyps auch auf Basis zuvor gesammelter Informationen möglich. Sofern die Informationsverarbeitung im zukünftigen Industrie 4.0-Umfeld die Aufrechterhaltung produktbezogener Informationen über die Nutzungsphase hinweg ermöglicht, ist dies auch anhand des „digitalen Zwillings“ aus der Produktion durchführbar.

Veränderungen an Material- und Komponentenverbindungen (z.B. andere Schraubenköpfe, fehlende Schrauben etc.) oder weitergehende Modifikationen (z.B. Verformungen, zusätzliche Anbauten, neue Verbindungsstellen etc.) müssen für reibungslose Abläufe detektiert und bewertet werden. Diese Funktionalität wurde auf Basis der visuellen Daten bzw. des erzeugten 3D-Modells verwirklicht (vgl. AP 3). Daraus gewonnene Informationen über die jeweilige Position und Beschaffenheit zu lösender Verbindungsstellen wurden als Grundlage für die Implementierung der Demontageabläufe genutzt. Ziel war während der Entwicklung primär die Robustheit des Systems, erst zweitrangig die Optimierung hinsichtlich der Demontagezeiten.

1. Definition der Demontageanleitungen

Basierend auf den Erkenntnissen der manuellen Vorversuche wurden Demontageanleitungen definiert, welche die exakte Abfolge der Arbeitsschritte für die roboterseitigen Greif- und Schraubwerkzeuge sowie für weitere Hilfsmittel (Hydraulikpresse, Ablagesystem) beinhalten. Darüber hinaus sind die einzelnen Demontagesustände der Lichtmaschinen mit ihren jeweiligen Parametern erfasst worden (Beispiel siehe Anhang I). Die so definierten Demontageanleitungen beschreiben zudem die voneinander getrennten Untereinheiten (Teile bzw. Baugruppen). Abbildung 44 zeigt zwei Beispiele für verschiedene Demontageschritte am Beispiel der Lichtmaschine vom Typ Valeo 03L 903 023 L (interne Bezeichnung L2). Die einzelnen definierten Zustände beinhalten alle für die Automatisierung nötigen Informationen wie die ausführende Einheit (einer der Roboter oder das Ablagesystem), benötigte Werkzeuge, Ablagedetails für entfernte Bauteile und natürlich auch prozess- und sicherheitstechnische Bedingungen. Die von den Robotern durchzuführenden Demontageschritte wurden als modulare KRL-Unterprogramme auf den jeweiligen Steuerungen definiert und über die Datenbank mit dem Prozessleitsystem verknüpft. Dieses kann die Module dann über die mxAutomation-Schnittstelle aufrufen. Diese Vorgehensweise

bietet den Vorteil, dass die teilweise sehr komplexen, aus vielen einzeln konfigurierbaren Roboterbewegungen bestehenden Abläufe gekapselt und über einen einzigen Steuerbefehl aufgerufen werden, was die Übersichtlichkeit und Wartbarkeit des Prozesses enorm erhöht. Die KRL-Unterprogramme können dabei über verschiedene digitale Ausgänge direkt mit der zentralen Prozesssteuerung und damit implizit auch untereinander kommunizieren, was ein dynamisches Prozessverhalten ermöglicht. So zeigt z.B. jedes Unterprogramm dem Leitsystem mit einem *finished*-Signal an, wann die in diesem Modul durchgeführten Abläufe soweit abgearbeitet sind, dass der nächste Einzelschritt gestartet werden darf, ohne dass es zu Kollisionen kommen kann.

Auf Ebene des Leitsystems ist für die Module eine Sicherheitsüberprüfung bzgl. der eingesetzten Werkzeuge implementiert worden, so dass ein Unterprogramm nur gestartet werden kann, wenn der entsprechende Roboter auch mit dem in der Datenbank für diesen Schritt hinterlegten Werkzeug ausgerüstet ist, was insbesondere beim selektiven Testen von Teilprozessen, bei denen die aktuell verwendeten Werkzeuge nicht durch den Gesamtprozess sichergestellt sind, eine zusätzliche Systemsicherheit gewährleistet.

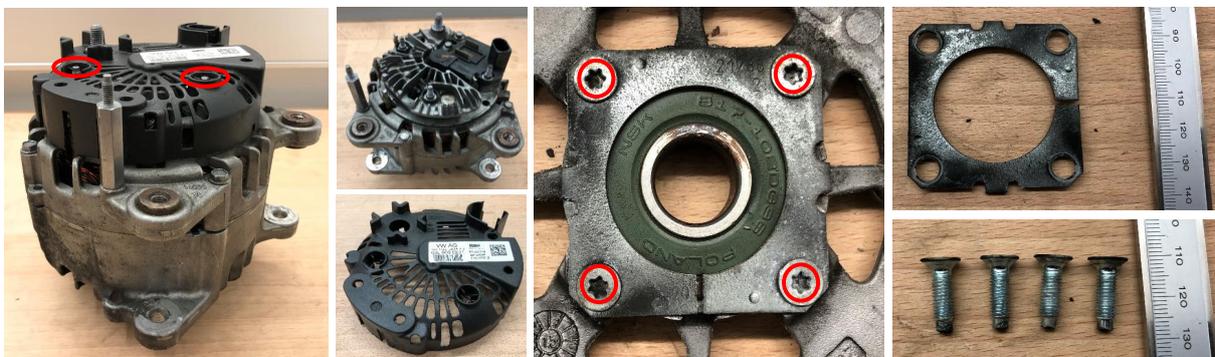


Abbildung 44: Beispiele für zwei Demontageschritte inkl. Koordinaten und generierter Bauteile

2. Datenstruktur, Datenbank und Kommunikation der Systemkomponenten

Die im Projekt anfallenden Daten unterschiedlichster Struktur werden in einer eigens für das Projekt entwickelten Datenbank verwaltet. Dabei mussten die speziellen Anforderungen berücksichtigt werden, die sich aus einem Forschungs- und Entwicklungsprojekt ergaben. Dazu zählte insbesondere der dynamische Charakter zur flexiblen Anpassung der gesamten Struktur. So musste gewährleistet werden, dass im Projektverlauf immer wieder neue, nicht von vornherein planbare Daten und Informationen konsistent in die Datenbankstruktur integriert werden konnten. Da weiterhin in einem Projekt dieser Komplexität eine Aufteilung der Aufgaben in einzelne, möglichst gut abgekapselte Komponenten unerlässlich ist, musste auch eine robuste und verlässliche Kommunikation zwischen diesen einzelnen Komponenten garantiert werden. Neben einer zuverlässigen Datensicherung während des gesamten Projektzeitraumes, war auch ein zentrales Logging zwecks vereinfachter Fehlersuche erforderlich. Das erstellte System erfüllt folgende Aufgaben und Anforderungen:

- Ablage der Projektdaten,
- Gute Dokumentation der Daten,
- Zuverlässige Datensicherung bei gleichzeitiger Erhaltung leichter und schneller Anpassbarkeit,
- Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten des Systems,
- Zentrales Logging für Kontrolle und Debugging.

Diese werden folgend näher erläutert.

Ablage und Dokumentation der Projektdaten

Bei den verwalteten Daten handelt es sich z.B. um die 3D-Prototypen für Lichtmaschinen und Baugruppen, die Demontageanleitungen sowie deren detaillierte Zustandsbeschreibungen, Konfigurationsdetails für die Roboter und verschiedene Netzwerkkomponenten, diverse Daten der verwendeten Sensoren sowie die Logs. So wird auch der komplette deterministische endliche Automat (DEA) mit all seinen Zuständen in der Datenbank gespeichert (Abbildung 45). Die Daten der einzelnen Komponenten der Lichtmaschinen können hierarchisch abgelegt werden, um eine Parallelisierung des gesamten Demontagevorgangs zu ermöglichen. Dabei erhält jede Komponente ihr eigenes lokales Koordinatensystem, damit diese losgelöst von der Hauptkomponente betrachtet und beispielsweise auf einem eigenen Spanntisch weiter zerlegt werden kann. Es besteht weiterhin die Möglichkeit zum Eintragen der jeweiligen Materialtypen, Massenanteile und Bauteilgewichte der Komponenten, so dass über eine Datenbankanfrage die jeweiligen Materialgewichte einer Menge von Komponenten leicht ermittelbar ist, um Wirtschaftlichkeitsanalysen auch für Teilprozesse durchführen zu können.

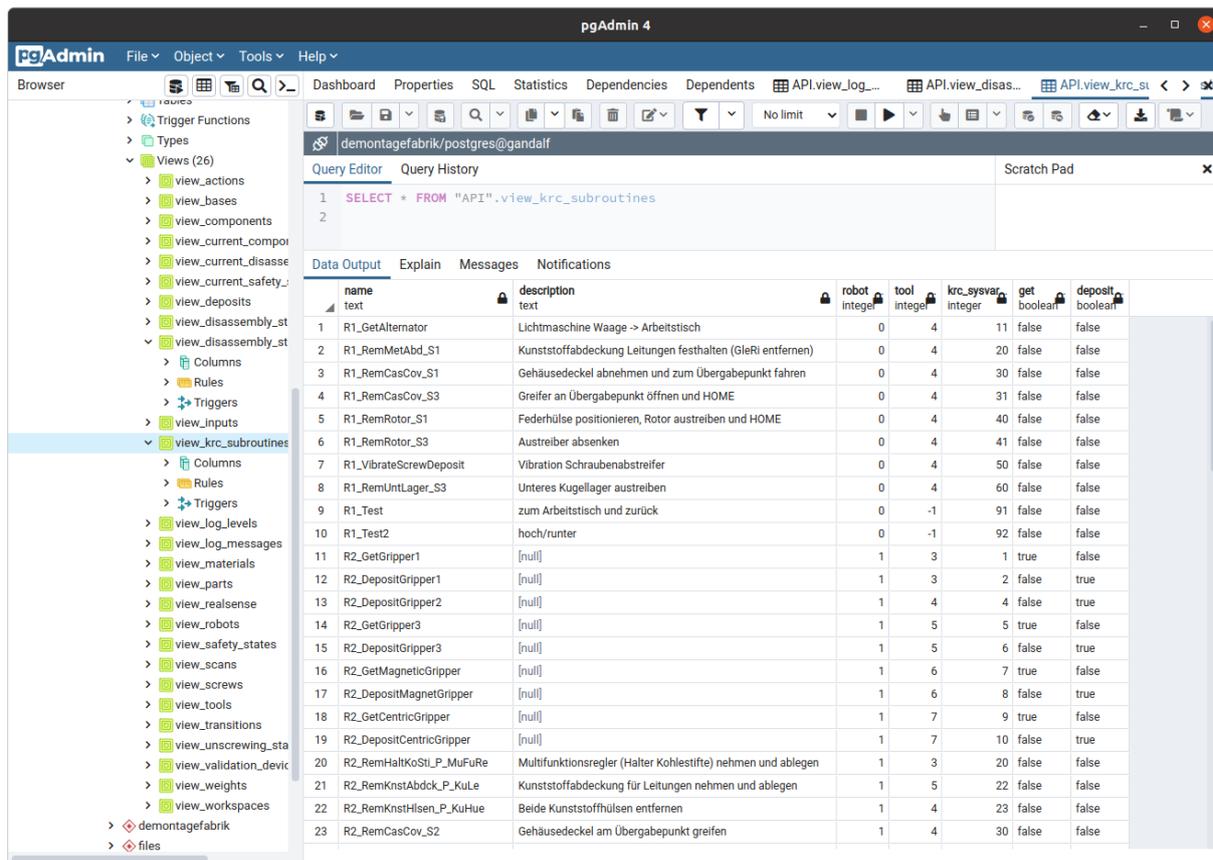


Abbildung 45: Sicht der verwendeten KRC Subroutines

Für die beschriebenen Aufgaben der Datenverwaltung wird ein PostgreSQL Datenbankserver verwendet. Dabei handelt es sich um ein bewährtes objektrelationales Datenbanksystem mit großer Funktionsmächtigkeit und Zuverlässigkeit, welches das Konzept ACID (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability) umsetzt und damit hohe Sicherheit sowie Konsistenz der Daten sicherstellt. Da das PostgreSQL Datenbanksystem auch alle benötigten Fähigkeiten für eine sichere, zuverlässige und rückwirkungsfreie Kommunikation mit sich bringt, wurde dies auch über die Funktionalität des Datenbankservers implementiert.

Beim Design des Datenbankschemas wurde darauf geachtet, möglichst viele Details vor dem Benutzer zu verbergen, um die Programmierschnittstelle (API) einfach zu halten und damit die Fehleranfälligkeit zu verringern. Um dies zu erreichen, wurde ein spezielles Schema API geschaffen, welches von den einzelnen Komponenten (z.B. Robotersteuerung, Szenenanalyse) ausschließlich benutzt wird. Weiterhin wurden bevorzugt Funktionen verwendet, um die Bedienung durch die API noch weiter zu vereinfachen und damit etwaige Fehler zu vermeiden.

Zur besseren Dokumentation und Verständlichkeit existieren spezielle Spalten mit dem einheitlichen Namen „description“, in denen optional detaillierte Beschreibungen der betreffenden Entität hinterlegt werden können. Weiterhin wurde von der nur bei PostgreSQL

vorhandenen Möglichkeit Gebrauch gemacht, die einzelnen Tabellen, Sichten und Spalten zu kommentieren.

Datensicherung

Bei der notwendigen Datensicherung musste besonders berücksichtigt werden, dass bei einem F&E Projekt jeder Teilaspekt eine gewisse Flexibilität erfordert. So kann sich im Laufe des Projektfortschrittes immer wieder herausstellen, dass der zunächst anvisierte Weg nicht optimal ist und daher möglichst leicht modifizierbar sein muss. Aus diesem Grund schieden normale Datenbankdumps zur regelmäßigen Sicherung aus, denn diese setzen immer voraus, dass das Datenbankschema erhalten bleibt, was aber im Entwicklungsprozess praktisch nie garantiert werden konnte. Deswegen wurde ein dynamischerer Ansatz gewählt, bei dem die Daten im JSON-Format und damit flexibel handhabbar gesichert werden und somit leicht auch in ein den Anforderungen besser angepasstes Datenbankschema importiert werden konnten. Durch diesen Ansatz wurde ebenfalls das regelmäßige Debugging enorm erleichtert.

Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten

Auch für die rückwirkungsfreie Entkoppelung der einzelnen Systemkomponenten (z.B. Robotersteuerung, Szenenanalyse) eignet sich eine Kommunikation dieser ausschließlich über den zentralen Datenbankserver, welcher alle dafür benötigten Eigenschaften automatisch mit sich bringt. Dabei wurden auch spezielle Features des PostgreSQL Datenbankservers verwendet, wie z.B. Notifications, mit denen asynchron Signale zwischen den Komponenten ausgetauscht werden können. Wo eine Notification nicht benötigt wird, findet einfaches Polling Anwendung, ein für diesen Zweck ausreichendes und zudem sehr robustes Verfahren.

Zentrales Logging

Um einen guten Überblick über alle ablaufenden Prozesse zu haben und ggf. Fehler schneller finden und beheben zu können, wurde ein zentrales Logging für alle Komponenten des Systems geschaffen. Jede einzelne Komponente des Gesamtsystems erhält so die Möglichkeit, gegebenenfalls anfallende Loggingdaten zentral und damit leicht zugänglich abzulegen. Dabei werden die IP Adresse, der Zeitstempel und der User mitgeloggt, um die einzelnen Nachrichten besser gruppieren und sortieren zu können (Abbildung 46).

	log_level smallint	Log Level character varying	user name	ip inet	ts timestamp without time zone	log_message text
1	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:31:23.480316	Verbindung erfolgreich
2	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:31:23.545499	demontagefabrik auf gandalf
3	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:31:23.548182	Lade Prototypen...
4	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:31:23.699519	Dauer: 0.151s
5	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:31:23.963933	[...] Ampel: Initialisierung ok
6	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:31:24.07144	Ablagesystem: Connected
7	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:31:24.073746	Ablagesystem: Initialisierung ok
8	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:31:24.42718	Initializing UDP Dispatcher...
9	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:31:24.436005	localhost RealRobots: 172.16.35.19
10	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:31:24.439194	Error finding HostIP VirtualRobots
11	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:31:24.440389	localhost VirtualRobots:
12	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:31:24.441538	Initializing Robot 1...
13	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:31:24.443927	Ampel: Connecting Socket
14	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:31:24.461527	Initializing Robot 2...
15	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:31:24.465215	Initializing Robot 3...
16	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:31:24.472807	Initializing Virtual Robot 1...
17	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:31:24.871082	MxAUDPDispatcher running...
18	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:31:25.734105	Controller connected
19	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:35:35.38432	Robot 1: MxA Stop requested
20	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:35:35.386035	Robot 2: MxA Stop requested
21	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:35:35.387437	Robot 3: MxA Stop requested
22	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:35:35.388828	Robot 4: MxA Stop requested
23	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:35:35.389704	Ampel: Connecting Socket
24	0	debug	system	172.16.35.19	2021-09-13 11:40:08.833361	Verbindung erfolgreich

Abbildung 46: Beispielhafte Darstellung für Logging-Daten, welche in der Datenbank hinterlegt werden

3. Steuerbefehle und Demontageablauf

Die Umsetzung der in der Datenbank definierten Zustandsbeschreibungen in konkrete automatisierte Steuerbefehle seitens der zentralen Steuersoftware erfolgt unter Einsatz eines deterministischen endlichen Automaten (DEA). Dieser verwaltet die Zustände und prüft, ob die jeweiligen Bedingungen für die Ausführung erfüllt sind (vorheriger Arbeitsschritt erfolgreich, Roboterbewegungen abgeschlossen, Szenenanalyse bestätigt erwarteten Zustand etc.). Daraufhin wird im Erfolgsfall der aktuelle Arbeitsschritt gestartet, andernfalls ein Fehlerzustand erreicht und der Benutzer über das Problem informiert.

Die für den DEA benötigten Datenstrukturen sind in der Datenbank definiert worden. Der Aufbau der einzelnen Zustände des Automaten erfolgte sequentiell jeweils nach erfolgreicher Erprobung der einzelnen Arbeitsschritte in den sicheren Betriebsarten (T1 und T2) der Roboter.

Abbildung 47 zeigt, dass die Demontage der Lichtmaschine quasi-linear durchgeführt werden kann. Die einzelnen Komponenten der Lichtmaschine werden nach dem Einspannen auf der zentralen Arbeitsplattform von oben nach unten demontiert. Da die Lichtmaschine am Antriebslagerschild festgehalten werden kann und dieser das letzte demontierte Bauteil darstellt, muss der jeweils nach jedem Demontageschritt verbleibende Teil der Lichtmaschine

nicht umgespannt werden.

Das Erreichen der verschiedenen Demontagezustände bedarf einer Reihe unterschiedlicher Schritte, die in dem Demontagemodul durchgeführt werden müssen. Tabelle 1 zeigt eine Auflistung dieser Schritte. Für die Demontage aller 16 unterschiedlichen Bauteilarten wurden 127 Einzelschritte definiert, wobei durch Verzweigungen in Abhängigkeit des Demontagezustandes jeweils nicht sämtliche Schritte benötigt werden. Einzelschritte können dabei Bewegungsabfolgen des Ablagesystems, der Arbeitsplattform oder der Roboter sein. Der prinzipielle Ablauf einer Teilsequenz zur Demontage eines Bauteils sieht beispielhaft wie folgt aus, kann jedoch beliebig komplex werden:

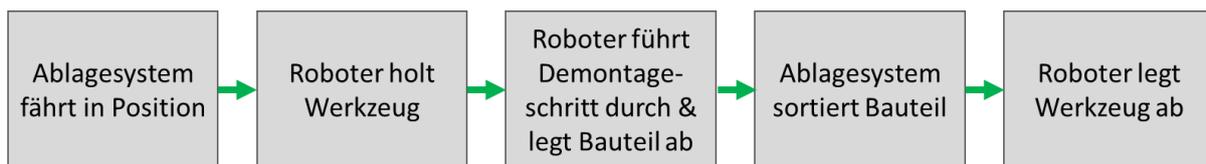


Abbildung 47: Prinzipielle Abfolge von Einzelschritten einer Teilsequenz des deterministischen endlichen Automaten (DEA)

Einige Demontageschritte bedürfen der Zusammenarbeit mehrerer Roboter, des Ablagesystems sowie des Spanntisches bzw. des pneumatischen Austreibers. Als Beispiel kann die Demontage des unteren Kugellagers genannt werden, für die zwölf Schritte nötig sind. Zunächst muss das Ablagesystem in die richtige Position gefahren werden, sodass ein Bauteil aufgenommen werden kann (1). Danach koppelt Roboter 3 Greifer 4 an (2) und kann mit diesem die Adapterbuchse aus dem Werkzeugbahnhof entnehmen (3). Die entnommene Adapterbuchse wird auf den Austreibestempel gesetzt (4). Sobald dieser Schritt erfolgt ist, kann Roboter 2 den Magnetgreifer in die richtige Position oberhalb des unteren Kugellagers bewegen (5) und diesen anschalten (6) (aufgrund des vorherigen Schrittes muss Roboter 2 den Magnetgreifer nicht holen, dieser befindet sich noch am SWK). Als nächstes kann der pneumatische Austreiber im zentralen Spanntisch das Lager herausschlagen (7), dieses hängt danach am Magnetgreifer. Der pneumatische Austreiber kann wieder zurück in den Spanntisch fahren (8) und Roboter 2 kann das untere Kugellager im Ablagesystem ablegen (9). Danach nimmt Roboter 3 mit Greifer 4 wieder die Adapterbuchse aus dem zentralen Spanntisch (10) und legt diese im Werkzeugbahnhof ab (11). Als nächstes fährt das Ablagesystem zur entsprechenden Ablagekiste und kann das untere Kugellager ablegen (12). Nach der erfolgreichen Ablage fährt das Ablagesystem wieder in die Ursprungsposition zurück (13). Danach legen nacheinander Roboter 3 Greifer 4 (14) und Roboter 2 den Magnetgreifer (15) wieder im Werkzeugbahnhof ab.

Tabelle 1: Übersicht über alle definierten Demontage- und Ablageschritte für die Demontage der Lichtmaschine vom Typ L2

0	AS Schraubenablage	25	AS Ablage MuFuRe	51	R3 Gehäuseschraube 1	76	R1 Austreiber absenken	102	R2 Lager ablegen
1	R1 Lichtmaschine holen	26	AS Teileablage	52	R3 Gehäuseschraube 2	77	R2 Zentrischgreifer holen	103	R3 Aufsatz Austreiber entnehmen
2	R3 Schrauber 1 holen	27	R2 Greifer 1 ablegen	53	R3 Gehäuseschraube 3	78	R2 Stator entfernen	104	AS Part UnKu
3	R3 Schraube MFR1	28	R2 Greifer 3 holen	54	R3 Gehäuseschraube 4	79	AS Part Sta	105	AS Ablage UnKu
4	R3 Schraube MFR2	29	R1 Kunststoffabdeckung halten	55	Vibration Schraubenablage	80	AS Ablage Sta	106	AS Teileablage
5	Vibration Schraubenablage	30	R2 Gleichrichter entfernen	56	AS Screw M5x52SW8	81	AS Schraubenablage	107	R3 Greifer 4 ablegen
6	AS Schraube M5x20SW7	31	R1 zurück fahren	57	AS Ablage M5x52SW8	82	R2 Zentrischgreifer ablegen	108	R2 Magnetgreifer ablegen
7	AS Ablage M5x20SW7	32	AS Part GleRi	58	AS Teileablage	83	R3 Schrauber 5 holen	109	R2 Greifer 2 holen
8	AS Schraubenablage	33	AS Ablage GleRi	59	R3 Schrauber 2 ablegen	84	R3 Torx 1	110	R2 unteren Gehäusedeckel greifen
9	R3 Schrauber 1 ablegen	34	AS Schraubenablage	60	R2 Greifer 2 holen	86	R3 Torx 3	111	R1 Zentrischgreifer öffnen
10	R3 Schrauber 4 holen	35	R3 Schrauber 3 holen	61	R1 Gehäusedeckel abnehmen	87	R3 Torx 4	112	R2 unteren Gehäusedeckel ablegen
11	R3 Schraube MFR3	36	R3 lange Schraube lösen	62	Check Gehäusedeckel	88	Vibration Schraubenablage	113	AS Part AnLa
12	R3 Schraube GleRi1	37	Vibration Schraubenablage	63	Check Rotor	89	AS Screw M5x16T20	114	AS Ablage AnLa
13	R3 Schraube GleRi2	38	AS Schraube M5x66SW10	64	R2 Gehäusedeckel übernehmen	90	AS Ablage M5x16T20	115	AS Schraubenablage
14	Vibration Schraubenablage	39	AS Ablage M5x66SW10	65	R1 Gehäusedeckel loslassen	91	AS Teileablage	116	R2 Rotor aus Gehäusedeckel entnehmen
15	AS Schraube M5x36SW7	40	AS Teileablage	66	R2 Gehäusedeckel ablegen	92	R3 Schrauber 5 ablegen	117	AS Part Rot
16	AS Ablage M5x36SW7	41	R3 Schrauber 3 ablegen	67	AS Part SchLag	93	R2 Magnetgreifer holen	118	AS Ablage Rot
17	AS Teileablage	43	R3 Drähte schneiden	68	AS Ablage SchLag	94	R2 Lagerschild entfernen	119	AS Teileablage
18	R3 Schrauber 4 ablegen	44	R3 Seitenschneider ablegen	69	AS Teileablage	95	AS Part AnLaFi	120	R2 Gehäusedeckel übernehmen
19	R2 Greifer 2 holen	45	R2 Kunststoffabdeckung entfernen	70	R1 Rotor austreiben	96	AS Ablage AnLaFi	121	R1 Gehäusedeckel loslassen
20	R2 Kunststoffhülsen entfernen	46	AS Part KuLe	71	R2 Rotor entfernen	97	AS Teileablage	122	R2 Gehäusedeckel ablegen
21	R2 Greifer 2 ablegen	47	AS Ablage KuLe	72	AS Part Rot	98	R3 Greifer 4 holen	123	AS Part SchLag
22	R2 Greifer 1 holen	48	AS Schraubenablage	73	AS Ablage Rot	99	R3 Aufsatz Austreiber einsetzen	124	AS Ablage SchLag
23	R2 Multifunktionsregler entfernen	49	R2 Greifer 3 ablegen	74	AS Teileablage	100	R2 Magnetgreifer positionieren	125	AS Teileablage
24	AS Part MuFuRe	50	R3 Schrauber 2 holen	75	R2 Greifer 2 ablegen	101	R3 Lager austreiben	126	R2 Greifer 2 ablegen

Optimierung des Demontageablaufs

Wie bereits beschrieben, war das primäre Ziel der Entwicklungsarbeiten das Erreichen der grundsätzlichen Funktionalität sowie der Robustheit des Demontagesystems auch bei variablen Produktqualitäten. Die Minimierung der benötigten Demontagezeiten war zunächst zweitrangig, so dass diesbezüglich noch deutliche Optimierungspotenziale bestehen, die u.a. durch folgende Maßnahmen ausgeschöpft werden können:

- *Parallelisierung ganzer Demontageschritte*

Es ist auf zwei Arten möglich, die Ausführung der Demontageschritte zu parallelisieren. Einerseits kann durch entsprechende Anpassungen der Wartebedingungen (vgl. AP 5: Robotersteuerung und Benutzerinterface) erlaubt werden, dass ein Demontageschritt nicht auf die Beendigung des vorhergehenden Schrittes warten muss. Da die Bewegungen der Roboter üblicherweise alle am zentralen Arbeitstisch ausgeführt werden und somit eine Kollisionsgefahr besteht, eignet sich diese Methode hauptsächlich dazu, die Bewegung eines Roboters und die des Ablagesystems zu parallelisieren. So kann beispielsweise ein Roboter bereits mit der Ausführung des nächsten Demontageschrittes beginnen, während das Ablagesystem noch das zuletzt demontierte Bauteil einsortiert und in seine Ausgangsposition zurückfährt. Dabei ist es erforderlich, dass der Roboter bei der Rückfahrt vom Ablagesystem nicht in dessen Arbeitsbereich eindringt. Diese Möglichkeit wurde für einige Schritte des Demontageprozesses bereits umgesetzt.

- *Parallelisierung von Teilschritten*

Die andere Variante ist die gezielte Platzierung des *finished*-Signals innerhalb der KRL-Unterprogramme, welches dem Leitsystem mitteilt, dass der nächste Schritt gestartet werden darf. Damit ist es z.B. möglich, die Bewegung eines Roboters zu veranlassen, sobald der aktuell in Ausführung befindliche Roboter den Arbeitsbereich verlassen hat, um zum Ablagesystem oder zurück in seine Ausgangsposition zu fahren. Hier ist eine exakte Planung notwendig, um Kollisionen zu vermeiden, allerdings kann mit dieser Methode auch ein hohes Maß an Parallelisierung erreicht werden. Auch diese Variante wurde bereits exemplarisch für einige Teilprozesse umgesetzt.

- *Optimierung der Bewegungsabläufe*

Die Steuerbefehle für die Roboter sind für jeden Demontageschritt als modulare KRL-Unterprogramme realisiert worden (vgl. 1. Definition der Demontageanleitungen). Dabei starten die Bewegungen grundsätzlich in der Home-Position des jeweiligen Roboters und enden auch in dieser. Diese definierte Position hat den Vorteil, dass die

Reihenfolge der einzelnen Module in der Entwicklungsphase variiert werden konnte oder neue Schritte eingefügt werden konnten. Allerdings entstehen dadurch viele überflüssige Bewegungen, da z.B. bei einem Werkzeugwechsel nach dem Ablegen des Werkzeugs zunächst wieder die Home-Position angefahren wird, bevor das nächste Werkzeug angekoppelt wird. Durch den Verzicht auf diese Zwischenschritte kann die Demontagezeit deutlich reduziert werden, allerdings auf Kosten der Flexibilität, so dass diese Maßnahme nur für eine finalisierte (Teil-)Sequenz empfohlen werden kann.

- *Verkürzung der Wege im Demontagemodul*

Die letzte hier aufgeführte Maßnahme ist die Optimierung häufig genutzter Fahrwege wie der Abtransport von Bauteilen oder Schrauben zum Ablagesystem bzw. zum Schraubenabstreifer. Letzterer könnte z.B. erheblich näher bei dem für die Schraubvorgänge zuständigen Roboter positioniert werden, um auf diesem Weg Fahrzeit einzusparen. Allerdings wäre dann die Verbindung zum Ablagesystem anzupassen oder eine gänzlich andere Lösung für den sortierten Abtransport zu entwickeln. Diese Möglichkeit zur Reduzierung der Demontagezeit wäre für das bestehende Demontagemodul nur mit hohem Aufwand umsetzbar und würde daher eher in der Konzeptionsphase für zukünftige Module stattfinden.

AP 5: Robotersteuerung und Benutzer-Interface

Die Steuerung und Überwachung sämtlicher Komponenten des Demontagemoduls erfolgt durch einen zentralen Prozessleitrechner mit einer in C++ entwickelten Steuerungssoftware samt Benutzerschnittstelle. Die grundlegenden Aufgaben dieses Prozessleitsystems umfassen die Steuerung der Roboter, des Arbeitstisches (Greifer und Austreibeeinheit), des automatisierten Ablagesystems sowie der Plattformwaage. Darüber hinaus werden je nach aktuellem Betriebszustand der sicherheitsrelevanten Komponenten (Roboter + Ablagesystem) die entsprechenden Sicherheitseinrichtungen wie Statusampel und Türverriegelungen gesteuert, um ein unerlaubtes Betreten des Demontagemoduls zu verhindern und mithin eine Gefährdung des Betriebspersonals während des Demontageprozesses auszuschließen.

Die kamerabasierten Verfahren zur Produktidentifikation sowie zur Szenenanalyse sind modularisiert als externe Dienste realisiert worden, welche teilweise auf eigenen Rechnern laufen und über Datenbankfunktionen vom zentralen Prozess gestartet werden bzw. mit diesem kommunizieren können. Sobald in der Demontagesequenz ein Bauteil entfernt worden ist, startet das Prozessleitsystem die Szenenanalyse für den aktuellen Demontagezustand und wartet auf die entsprechende Benachrichtigung von der Datenbank. So wird sichergestellt, dass der nächste Demontageschritt ordnungsgemäß ausgeführt werden kann. Falls dabei das zuletzt behandelte Bauteil als nicht oder unvollständig entfernt identifiziert wird, wird eine automatische Unterbrechung der Sequenz sowie eine Meldung in der Benutzeroberfläche ausgelöst. Sowohl die Produktidentifikation als auch die Szenenanalyse sind detailliert in AP 3 beschrieben.

Grundsätzlich werden alle Ereignisse, die durch das Prozessleitsystem ausgelöst oder von den externen Steuerungen an dieses gemeldet werden, sei es im manuellen oder im automatisierten Betrieb, dem Benutzer in einem Informationsbereich angezeigt und darüber hinaus in die Datenbank geschrieben. Dadurch ist eine umfangreiche Situations- und Fehlerdiagnostik auch im Nachhinein möglich, was einerseits die Entwicklungsarbeiten bzgl. des Debuggings erheblich erleichtert, andererseits aber auch bei Bedarf eine Prüfung des gesamten Demontageprozesses ermöglicht.

1. Robotersteuerung

Die Steuerung der Roboter erfolgt aus dem Front-End heraus über die KUKA.PLC mxAutomation Schnittstelle und basiert auf der zyklischen Übertragung von User Datagram Protocol-Paketen (UDP) an die jeweiligen Steuerrechner. Eine zusätzliche SPS, wie sonst in industriellen Robotersteuerungen üblich, ist nicht notwendig, die bereitgestellten Funktionen

werden vom Prozessleitsystem über das mxAutomation C++-Interface aufgerufen. Der Austausch der Datenpakete mit den verschiedenen Steuerrechnern erfolgt zyklisch alle 4 ms. Dabei wird jede der drei Robotersteuerungen durch einen einzelnen Thread verwaltet, um die Systemstabilität zu erhöhen und eine Performancesteigerung durch Nebenläufigkeit zu erreichen. Allerdings erlauben die KUKA Steuerungen in der vorliegenden Version KR C4 keine dynamische Vergabe von Kommunikations-Ports, so dass für die korrekte Zuordnung der empfangenen Daten zu den einzelnen Robotern zunächst ein UDP-Dispatcher entwickelt und implementiert wurde, welcher permanent in einem eigenen Thread auf Datenpakete von den Steuerrechnern wartet, diese auswertet und dann entsprechend an die für die einzelnen Roboter zuständigen Threads verteilt. Über die Benutzeroberfläche können alle relevanten Systemeinstellungen wie z.B. IP-Adressen für die Roboter oder die Zuordnungen für Systemaufrufe über die mxAutomation-Schnittstelle verwaltet und in der Datenbank abgelegt werden.

Die elementaren Steuermechanismen für die Roboter sind vollständig in die Benutzeroberfläche implementiert worden, um während der Entwicklungs- und Testphase einen vollumfänglichen Zugriff auch im externen Betriebsmodus der Roboter zu ermöglichen. Dazu gehören zunächst grundlegende Bewegungsoperationen wie das Anfahren von Koordinaten sowohl achsspezifisch als auch bezüglich verschiedener definierbarer Koordinatensysteme, z.B. Welt- oder verschiedene Basis-Koordinatensysteme für die Werkzeugwechselstationen, den Arbeitstisch etc. Weiterhin ist die Überwachung und Ansteuerung sowohl digitaler als auch analoger Ein- und Ausgänge möglich, um die unterschiedlichen pneumatischen robotergeführten sowie stationären Werkzeuge (Greifer, Schrauber, Schneidwerkzeug, Rotor-/Lagerpresse etc.) zu kontrollieren. Auch ist die direkte Ausführung auf der Steuerung befindlicher KRL (KUKA Robot Language) Unterprogramme möglich, wodurch komplexere Aufgaben wie z.B. automatische Werkzeugwechsel oder das Ablegen von Bauteilen gekapselt und mittels eines einzigen Befehls ausgeführt werden können. Darüber hinaus stellt das Front-End für jeden Roboter eine übergeordnete Geschwindigkeitssteuerung bereit, mit der der gesamte programmierte Demontageprozess bzgl. der Ausführungsgeschwindigkeit skaliert werden kann. Dies ist aus sicherheitstechnischen Aspekten nötig, um auch bei automatisierter Ausführung von (Teil-)Prozessen den Aufenthalt menschlichen Personals in dem Demontagemodul zu Entwicklungs- und Testzwecken zu ermöglichen.

Um komplexe oder sicherheitskritische Abläufe zunächst simulativ erproben zu können, wurde im Benutzerinterface der Einsatz virtueller Roboter implementiert. Diese werden über KUKA.OfficeLite auf einer virtuellen Maschine (VMware) definiert und über KUKA.Sim

visualisiert. Bezüglich der Steuerung über das Front-End verhalten sich die virtuellen Roboter exakt wie die realen Roboter im Technikum und bieten somit die Möglichkeit, kritische Teilabläufe, insbesondere solche mit automatisiert berechneten kinematischen Parametern, ausgiebig simulieren zu können, bevor sie für den realen Einsatz im Technikum freigegeben werden.

2. Aufbau der Benutzer-Interface

Die Benutzeroberfläche dient zur Visualisierung des aktuellen Anlagenstatus sowie des Prozessfortschrittes während der automatisierten Demontage und erlaubt dem Bedienpersonal die vollständige Kontrolle über alle Komponenten des Demontagemoduls. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist die Oberfläche weitgehend modular aufgebaut, es können je nach Bedarf einzelne Bereiche der zahlreichen Bedienelemente ein- und ausgeblendet werden oder sind in eigenen Dialogfenstern organisiert worden. Die Entwicklung des Front-Ends erfolgte in C++ unter Verwendung des Qt5-Frameworks. Die wichtigsten Module der Oberfläche und ihre Funktionalität werden im Folgenden detaillierter beschrieben.

Status- und Kontrollbereich

Eine der zentralen Komponenten der Benutzeroberfläche ist der Status- und Kontrollbereich, der dem Benutzer die Aktivierung der Roboter ermöglicht und ihn detailliert über deren aktuelle Betriebszustände informiert. Folgende Bedien- und Status-elemente sind für jeden Roboter implementiert worden (vgl. nummerierte Elemente in Abbildung 48):

1. Aktuelle Ist-Position

Sobald das Prozessleitsystem mit der Robotersteuerung verbunden ist, werden in diesem Bereich permanent sowohl die aktuellen Achspositionen (A1–A6) als auch die kartesischen Koordinaten des jeweiligen Roboters angezeigt. Letztere bestehen aus einer translatorischen (X, Y, Z) und einer rotatorischen Komponente (A, B, C) sowie aus Status- und Turn-Werten (S, T), welche die eindeutige Stellung der einzelnen Achsen zueinander beschreiben. Die kartesischen Koordinaten beziehen sich dabei auf den TCP (Tool Center Point) des gewählten Werkzeugs im aktuellen Basis-Koordinatensystem. Sowohl Werkzeug als auch Basis können in diesem Bereich für jeden Roboter ausgewählt werden.

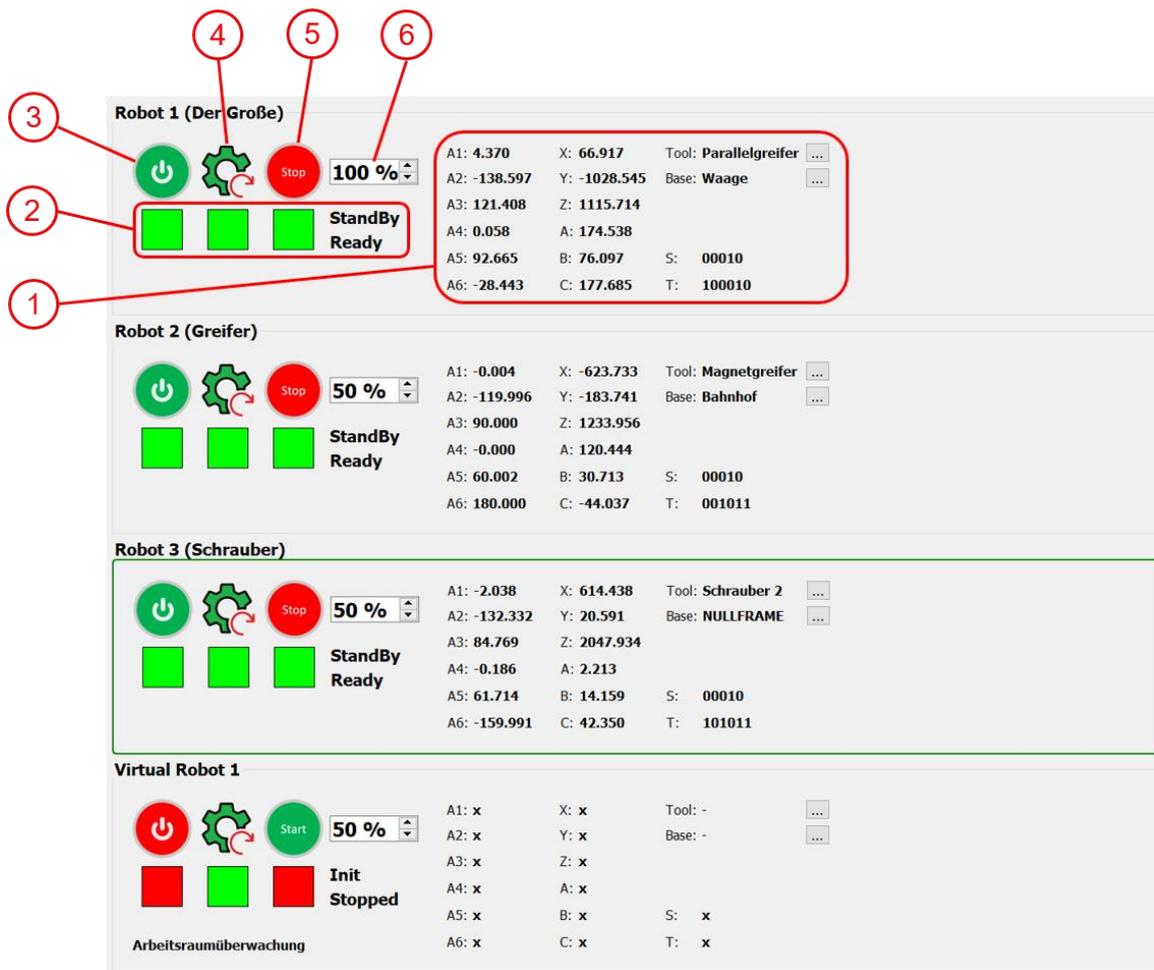


Abbildung 48: Statusanzeige und Kontrollfunktionen für die Roboter im Benutzer-Front-End

2. Statusanzeige / Fehlerdiagnostik

Hier kann der Benutzer über drei Farbwechsel-Anzeigen (grün / rot) den aktuellen Zustand der Roboter ablesen. Die linke Anzeige gibt Auskunft darüber, ob der Roboter betriebsbereit, also online, mit der Prozesssteuerung verbunden und initialisiert ist. Die mittlere Anzeige wird rot, sobald die Robotersteuerung oder die mxAutomation-Schnittstelle einen Fehler meldet, wobei in diesem Fall auch der entsprechende Fehlercode dargestellt wird. Die rechte Anzeige meldet eine Arbeitsraumverletzung. Es können für jeden Roboter bis zu acht Arbeitsräume in der Robotersteuerung definiert werden, die je nach Konfiguration beim Betreten oder Verlassen eine Meldung oder einen Not-Halt auslösen. In diesem Fall wird der Zustand der Arbeitsraumüberwachung z.B. verwendet, um sicherzustellen, dass sich nur ein Roboter am zentralen Arbeitstisch aufhält, was Kollisionen vermeidet (vgl. Abschnitt Demontagesequenz). Die aktuellen steuerungsinternen Zustände der Befehlsbearbeitung sind rechts neben den Farbwechsel-Anzeigen als Klartext dargestellt (StandBy, Executing, Ready, Busy, Waiting, ...).

3. *Roboter aktivieren*

Mit dieser Schaltfläche wird der Kommunikations-Thread gestartet, der für die zyklische Verarbeitung der mxAutomation-Datenpakete für den jeweiligen Roboter zuständig ist. Voraussetzung dafür ist die Betriebsart „Automatik Extern“ in der Robotersteuerung. Ist der Thread aktiv, wird dies durch ein rotes Blinken der Sicherheitsampel im Technikum angezeigt. Für das Bewegen der Roboter ist zusätzlich zu der Aktivierung die Fahrfreigabe (siehe 5.) notwendig.

4. *MxAutomation zurücksetzen*

Diese Schaltfläche sendet ein Reset-Signal an den für die externe Ansteuerung der Roboter zuständigen Funktionsbaustein der mxAutomation-Schnittstelle, wodurch alle gepufferten Anweisungen abgebrochen werden und das mxAutomation-Programm auf der Steuerung neu gestartet wird. Ein erneuter Klick (Continue) erlaubt die weitere Abarbeitung neuer Befehle. Mit der Reset-Funktion können bestimmte (Fehler-)Meldungen der Robotersteuerung quittiert werden.

5. *Fahrfreigabe*

Hiermit wird dem Roboter die Fahrfreigabe erteilt bzw. wieder entzogen, indem die Systemvariable \$MOVE_ENABLE der Steuerung entsprechend gesetzt wird. Ist die Fahrfreigabe erteilt, können Bewegungs- und andere Steuerbefehle ausgeführt werden. In diesem Fall darf das Demontagemodul nicht mehr betreten werden. Die Sicherheitsampel wird auf Rot gesetzt und die Türverriegelung des Sicherheitszauns aktiviert. Wird die Fahrfreigabe während des Betriebs entzogen, wird die aktuelle Bewegung des Roboters sofort unterbrochen und ein Sicherheitshalt (STOP 2) ausgelöst.

6. *Programm-Override*

Der Programm-Override ist die Geschwindigkeit des Roboters beim Programmablauf. Er wird in Prozent angegeben und bezieht sich auf die programmierte Geschwindigkeit. Der eingestellte Override wird mit jedem 4 ms-Zyklus an den Roboter übertragen, eine Änderung daher sofort erkannt und übernommen. Der Override bietet die Möglichkeit, programmierte Abläufe aus dem Prozessleitsystem heraus mit reduzierter Geschwindigkeit (entsprechend der Betriebsart T1) auch in Anwesenheit von Personal im Technikum zu testen. Mit einem Wert von Null kann darüber hinaus eine Bewegung zu Kontrollzwecken pausiert werden, ohne sie abubrechen.

Bereich Demontagesequenz

Dieser Bereich der Benutzeroberfläche steuert und visualisiert den automatisierten Demontageprozess. Die Steuerung des Prozesses ist nach Art eines deterministischen endlichen Automaten organisiert, basiert also auf Zustandsübergängen in Abhängigkeit einer Eingabe. In diesem Fall kann ein Folgezustand nur erreicht und damit der nächste Demontageschritt abgearbeitet werden, wenn verschiedene definierte Voraussetzungen erfüllt sind, andernfalls gelangt das System in einen Fehlerzustand und der Prozess wird angehalten. Abbildung 49 zeigt auf der linken Seite die Liste der einzelnen Demontageschritte, wobei diese aus Gründen der Übersichtlichkeit und Wartbarkeit zu thematischen, farbig hinterlegten Blöcken gruppiert worden sind.

Mit der runden Schaltfläche oben wird der Prozess gestartet bzw. gestoppt, wobei zu Testzwecken die Möglichkeit besteht, die Einzelschritte durch den Benutzer quittieren zu lassen. Darunter sind Informationen zu dem derzeit in Ausführung befindlichen Schritt dargestellt. Im Einzelnen sind dies die Nummern des aktuellen Blocks sowie des Schritts innerhalb dieses Blocks, die Beschreibung des Demontageschrittes, die Bezeichnung der ausführenden Einheit (einer der Roboter oder das Ablagesystem) sowie der Name des aufgerufenen Unterprogramms bzw. Befehls auf der Steuerung. Darunter folgen vier farbige Anzeigen, die den Status der zu erfüllenden Bedingungen visualisieren, bei deren Freigabe der nächste Schritt (darunter angezeigt) ausgeführt werden darf. Je nach Art des zuletzt ausgeführten Demontageschrittes müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

1. Arbeitsraumüberwachung (WS)

Es kann für jeden Schritt festgelegt werden, für welche Roboter eine Arbeitsraumüberwachung notwendig ist, um Kollisionen im nächsten Schritt zu vermeiden. Es gibt Situationen, in denen mehrere Roboter im selben Arbeitsraum aktiv sein müssen, in diesen Fällen wird die Überwachung explizit deaktiviert.

2. Szenenanalyse (Cam)

Nach jedem Schritt, bei dem ein Bauteil entfernt worden ist, wird die Szenenanalyse für den jeweiligen Demontagezustand gestartet. Ist das Bauteil erwartungsgemäß demontiert, erfolgt die Freigabe für diese Bedingung, andernfalls wird in den meisten Fällen die Ausführung der Sequenz gestoppt und eine Fehlermeldung generiert. Die Szenenanalyse kann allerdings auch eine Verzweigung der Sequenz zur Folge haben. Beispielsweise kann bei der Entfernung des oberen Gehäusedeckels der Rotor entweder in der Lichtmaschine verblieben oder mit dem Gehäusedeckel zusammen entnommen worden sein, abhängig davon, welches der beiden Lager fester auf

Demontageablauf

- 000 AS Schraubenablage
- 001 R1 Lichtmaschine holen
- 002 R3 Schrauber 1 holen
- 003 R3 Schraube MFR1
- 004 R3 Schraube MFR2
- 005 Vibration Schraubenablage
- 006 AS Schraube M5x20SW7
- 007 AS Ablage M5x20SW7
- 008 AS Schraubenablage
- 009 R3 Schrauber 1 ablegen
- 010 R3 Schrauber 4 holen
- 011 R3 Schraube MFR3
- 012 R3 Schraube GleRi1
- 013 R3 Schraube GleRi2
- 014 Vibration Schraubenablage
- 015 AS Schraube M5x36SW7
- 016 AS Ablage M5x36SW7
- 017 AS Teileablage
- 018 R3 Schrauber 4 ablegen
- 019 R2 Greifer 1 holen
- 020 R2 Multifunktionsregler entfernen
- 021 AS Part MuFuRe
- 022 AS Ablage MuFuRe
- 023 AS Teileablage
- 024 R2 Greifer 1 ablegen
- 025 R2 Greifer 3 holen
- 026 R1 Kunststoffabdeckung halten
- 027 R2 Gleichrichter entfernen
- 028 R1 zurück fahren
- 029 AS Part GleRi
- 030 AS Ablage GleRi
- 031 AS Schraubenablage
- 032 R3 Schrauber 3 holen
- 033 R3 lange Schraube lösen
- 034 Vibration Schraubenablage
- 035 AS Schraube M5x66SW10
- 036 AS Ablage M5x66SW10
- 037 AS Teileablage
- 038 R3 Schrauber 3 ablegen
- 039 R3 Seitenschneider holen
- 040 R3 Drähte schneiden
- 041 R3 Seitenschneider ablegen
- 042 R2 Kunststoffabdeckung entfernen
- 043 AS Part KuLe
- 044 AS Ablage KuLe
- 045 AS Schraubenablage
- 046 R2 Greifer 3 ablegen
- 047 R3 Schrauber 2 holen
- 048 R3 Gehäuseschraube 1
- 049 R3 Gehäuseschraube 2
- 050 R3 Gehäuseschraube 3
- 051 R3 Gehäuseschraube 4
- 052 Vibration Schraubenablage
- 053 AS Screw M5x52SW8
- 054 AS Ablage M5x52SW8
- 055 AS Teileablage
- 056 R3 Schrauber 2 ablegen
- 057 R2 Greifer 2 holen
- 058 R1 Gehäusedeckel abnehmen
- 059 Check Gehäusedeckel
- 060 Check Rotor
- 061 R2 Gehäusedeckel übernehmen
- 062 R1 Gehäusedeckel loslassen
- 063 R2 Gehäusedeckel ablegen
- 064 AS Part SchLag
- 065 AS Ablage SchLag
- 066 AS Teileablage
- 067 R1 Rotor austreiben
- 068 R2 Rotor entfernen
- 069 AS Part Rot
- 070 AS Ablage Rot
- 071 AS Teileablage
- 072 R2 Greifer 2 ablegen
- 073 R1 Austreiber absenken
- 074 R2 Zentrischgreifer holen
- 075 R2 Stator entfernen
- 076 AS Part Sta
- 077 AS Ablage Sta
- 078 AS Schraubenablage
- 079 R2 Zentrischgreifer ablegen
- 080 R3 Schrauber 5 holen
- 081 R3 Torx 1
- 082 R3 Torx 2
- 083 R3 Torx 3
- 084 R3 Torx 4
- 085 Vibration Schraubenablage
- 086 AS Screw M5x16T20
- 087 AS Ablage M5x16T20
- 088 AS Teileablage
- 089 R3 Schrauber 5 ablegen
- 090 R2 Magnetgreifer holen
- 091 R2 Lagerschild entfernen
- 092 AS Part Anl.aFi

Stop

L2 Demontage

Vollständige Sequenz

Einzelschritte bestätigen

0 R3 Schrauber 1 holen

2 Robot 3

R3_GetDriver1

WS

Cam

Rob

Abl

0 R3 Schraube MFR1

3 Robot 3

R3_ScrewMFR1_P_M5x20SW7

Abbildung 49: Steuerung und Visualisierung der Demontagesequenz im Benutzer-Front-End

der Welle sitzt. Nach diesem Schritt prüft die Szenenanalyse daher zunächst, ob der Deckel ordnungsgemäß entfernt wurde. Ist dies der Fall, wird untersucht, ob sich der Rotor in der Lichtmaschine befindet. Falls dem so ist, wird als nächstes der Block ausgeführt, der für das Austreiben und Entnehmen des Rotors zuständig ist. Falls dem nicht so ist, wird alternativ der Rotor aus dem entfernten und noch nicht abgelegten Gehäusedeckel entnommen. In der rechten Spalte der Einzelschrittliste (Abbildung 49) sind anhand farbiger Balken diejenigen Demontageschritte erkenntlich, nach denen eine Szenenanalyse durchgeführt wird. Als Konsequenz eines negativen Ergebnisses können zwei verschiedene Folgen eintreten:

- 1) Stopp der Demontage. Dies wird markiert durch einen roten Balken.
- 2) Wechsel zu einem alternativen Demontageblock (Verzweigung). Diese Option ist markiert durch einen farbigen Balken, wobei die Farbe identisch ist mit der Markierung der dann eingeleiteten Schritte. Dies ist beispielsweise in Schritt 060 zu sehen.

3. *Programmausführung Roboter (Rob)*

Ist beim aktuell ausgeführten Schritt ein KRL-Unterprogramm auf einem der Roboter gestartet worden, wird zyklisch ein digitaler Ausgang auf der Steuerung ausgewertet, der dessen Beendigung signalisiert, bzw. den Zeitpunkt, ab dem der nächste Schritt gestartet werden darf. Wird diese Bedingung deaktiviert, kann Parallelität erzeugt werden, sofern sicher ist, dass keine Kollisionen auftreten können. So ist es z.B. möglich, Bewegungen der Roboter und des Ablagesystems gleichzeitig auszuführen, um die Demontagezeit zu reduzieren.

4. *Programmausführung Ablagesystem (Abl)*

Werden Befehle an das Ablagesystem gesendet, antwortet dieses mit definierten Meldungen, auf die entsprechend gewartet werden muss. Auch hier kann explizit Parallelität erreicht werden, sofern der Demontageablauf dies erlaubt. Sendet das Ablagesystem eine Fehlermeldung, wird diese dem Benutzer angezeigt und der Prozess unterbrochen.

Für die Definition der einzelnen Demontageschritte der Sequenz ist ein separates Dialogfenster implementiert worden, in das folgende Informationen eingegeben werden können (Abbildung 50):

- Name des Schritts, wie er in der Sequenz angezeigt wird
- Weiterführende Beschreibung (optional)
- Blockzugehörigkeit
- Bauteilbezogener Demontagezustand
- Bedingungen für die Ausführung:
 - Arbeitsraumüberwachung (Roboter einzeln wählbar)
 - Freigabe durch Szenenanalyse (bzgl. des aktuellen Demontagezustandes)
 - Warten auf *finished*-Signal der aktiven Robotersteuerung
 - Warten auf definiertes Signal des Ablagesystems
- Auszuführendes KRL-Unterprogramm auf der Robotersteuerung
 - Roboternummer
 - Werkzeugnummer (als Sicherheitsmaßnahme, damit kein Programm mit falschem Werkzeug ausgeführt werden kann)
 - Aufzurufendes Unterprogramm
- Alternativ: Steuerung des Ablagesystems
 - Befehl für die Steuerung
 - Name des abzulegenden Teils, sofern erforderlich (dadurch wird die Ablageposition im Regalsystem bestimmt)
- Blocknummer des Folgezustandes
- Folgezustand im Fall eines negativen Resultats der Szenenanalyse

Demontageschritt

Neue Eingabe

Block 1

10

L2 ohne Gleichrichter Diodenplatte (12)

Bedingungen

Arbeitsraumüberwachung

Warten auf KRLSubFinished

Freigabe durch Szenenanalyse

Warten auf Ablagesystem

Roboter

Robot 1

Parallelgreifer

R1_RemMetAbd_S3

Ablagesystem

PART

GleRi

Nächster Block

Block 1

Fehler

Abbildung 50: Benutzeroberfläche zur Definition einzelner Demontageschritte

Verwaltung der 3D-Modelle

Die Steuerung des Artec Space Spider 3D-Scanners sowie die umfangreiche Parametrisierung für den robotergeführten Scanvorgang sind unter Verwendung des Artec SDKs in das Benutzerinterface implementiert worden. Weiterhin sind die Algorithmen für die Produktidentifikation, also für das 3D-Matching mit den Prototypen aus der Datenbank über das Front-End konfigurierbar (Abbildung 51).

Die Benutzerschnittstelle erlaubt die Definition einer Auswahl der für das automatische Matching zu verwendenden Prototypen aus der Gesamtheit der in der Datenbank hinterlegten 3D-Modelle. Aufgrund der großen Datenmenge der Modelle wird diese Auswahl bei jedem Programmstart gemäß der aktuellen Definition automatisch geladen, um aus

Performancegründen bei Bedarf den sofortigen Zugriff durch die Matching-Algorithmen zu erlauben. Die 3D-Modelle können darüber hinaus in verschiedenen üblichen Dateiformaten (STL, PLY, OBJ) gespeichert und wieder geladen werden, um einen Datenaustausch mit externer Software, etwa für die beschriebenen Konstruktionsaufgaben, zu ermöglichen.

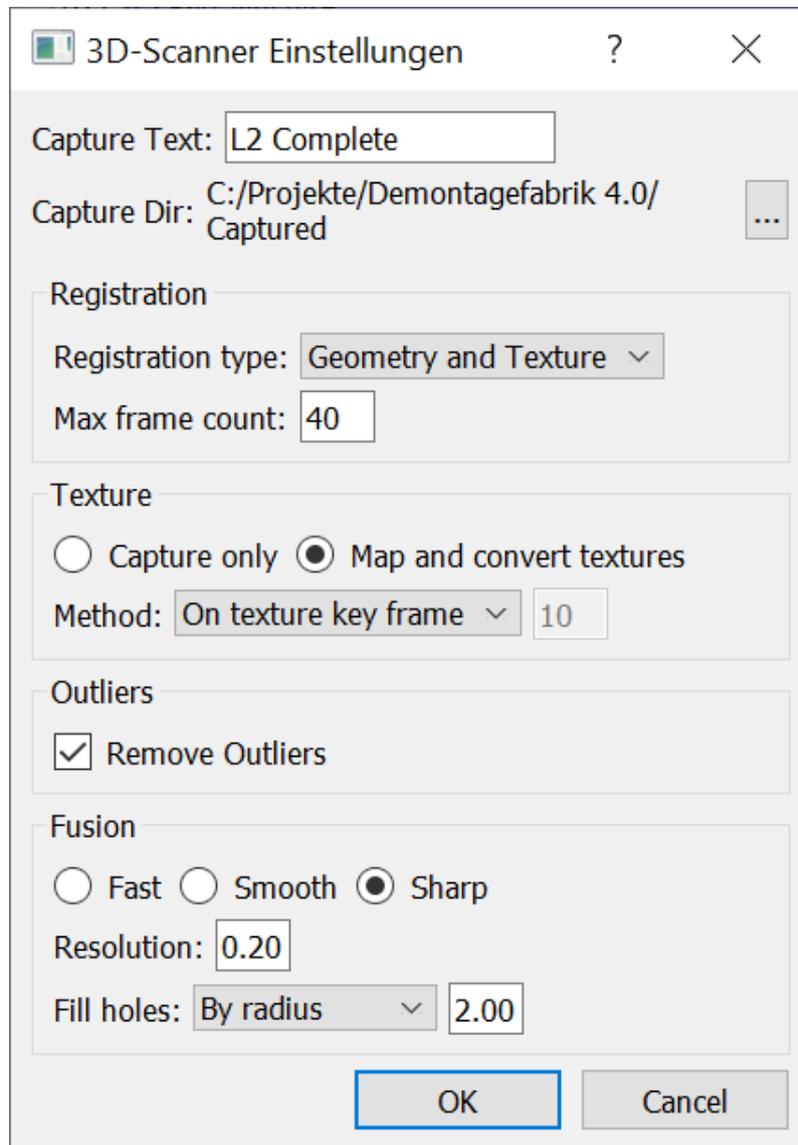


Abbildung 51: Benutzeroberfläche zur Konfiguration der Pattern-Matching-Algorithmen für die Produktidentifikation

Sowohl die Modell-Prototypen als auch die durch den Artec 3D-Scanner erfassten Teils cans können in der Oberfläche verwaltet und in gewissem Umfang bearbeitet werden, um die benötigte Zeit sowie die Qualität der Matching-Algorithmen zu optimieren. Die Ergebnisse der Produktidentifikation können bei Bedarf visualisiert werden. Abbildung 52 zeigt das erfolgreiche Matching eines Teils cans (rot) mit einem der drei hinterlegten Prototypen.

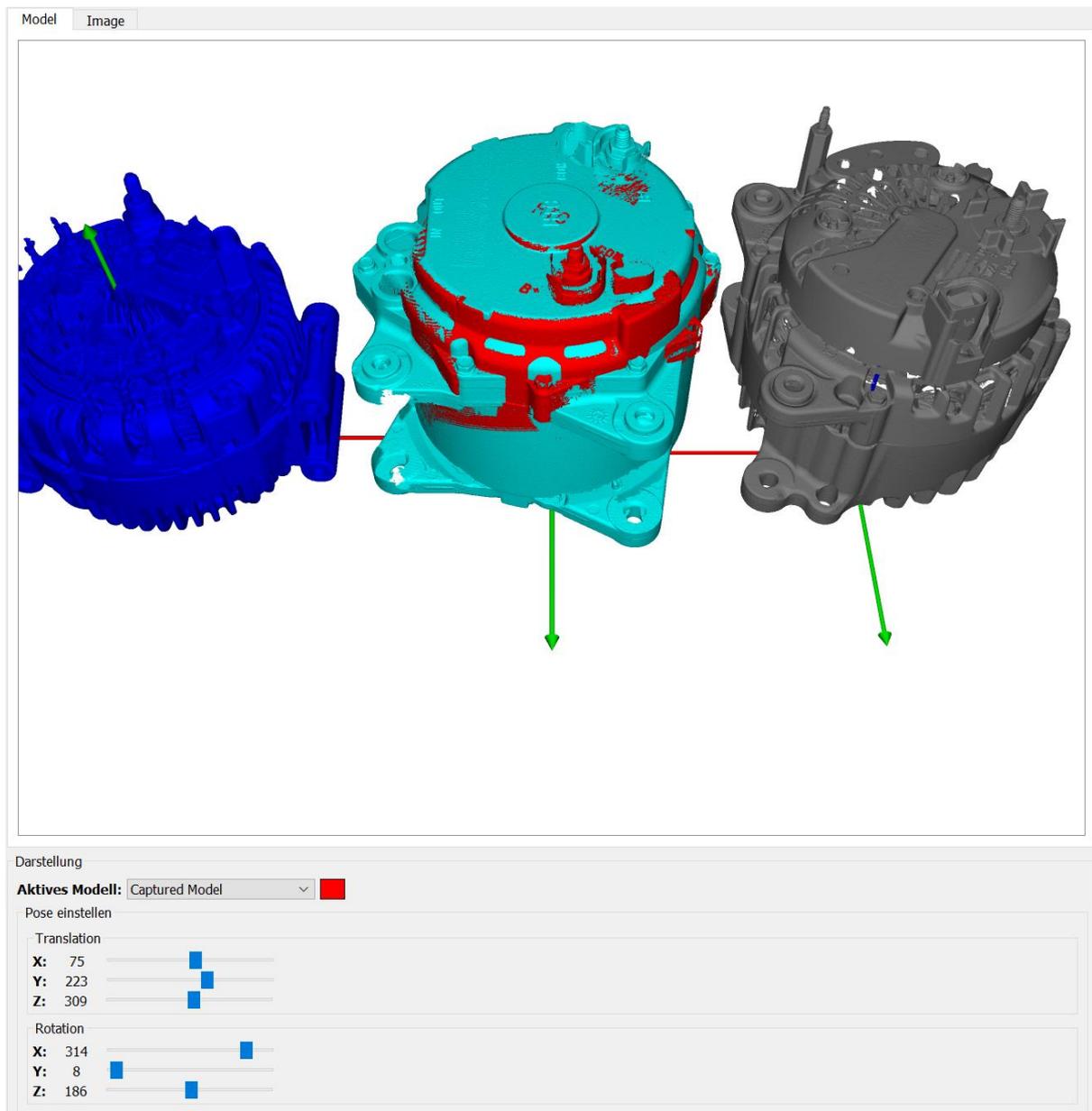
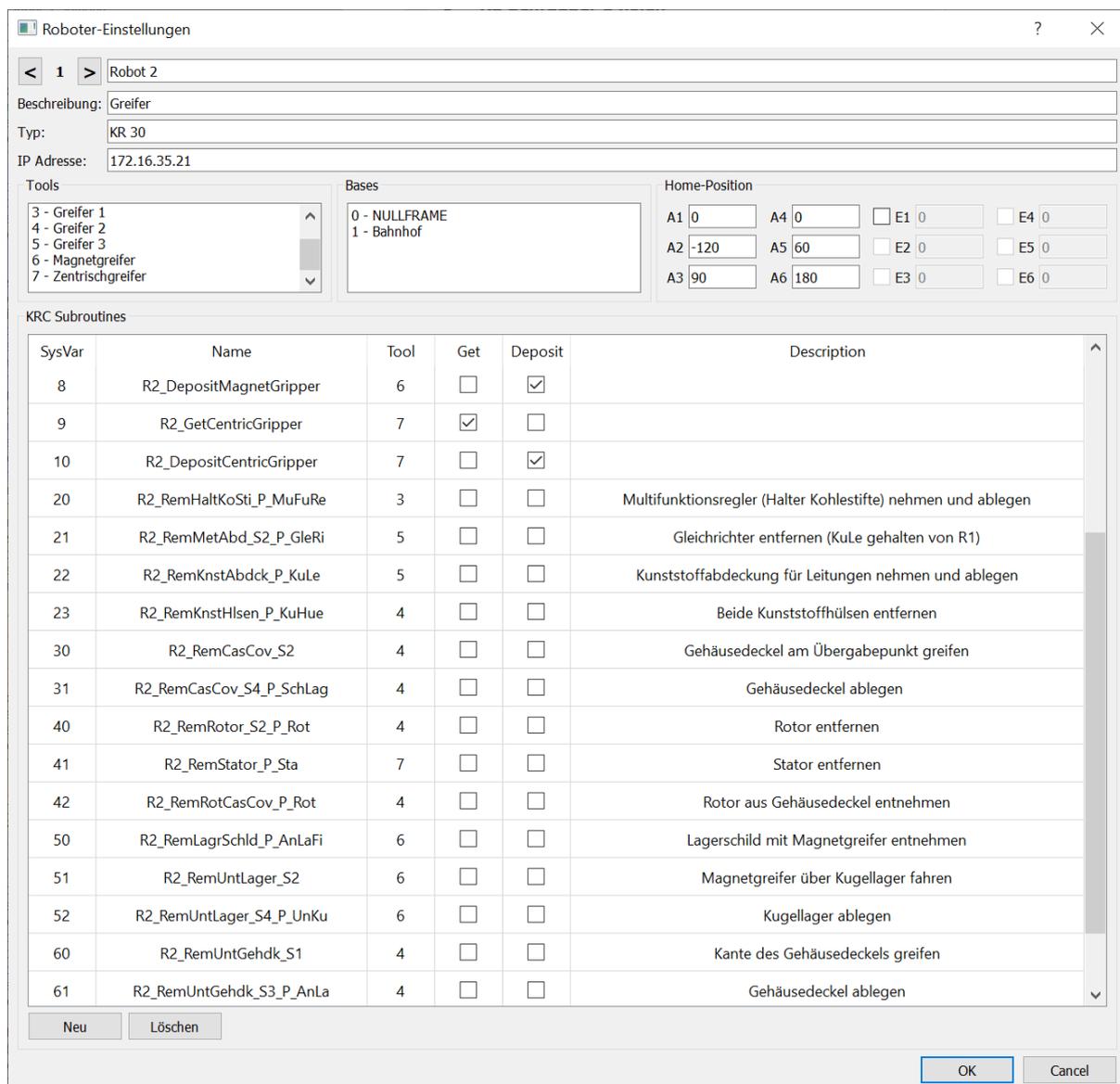


Abbildung 52: Visualisierung der Produktidentifikation durch Matching eines 3D-Teils (rot) mit den hinterlegten Prototypen der verschiedenen Lichtmaschinen

Konfiguration der Roboter

Für die Konfiguration der Roboter steht ein weiteres Dialogfenster zur Verfügung (Abbildung 53). Hier können grundsätzliche Einstellungen festgelegt werden, wie der in der Benutzeroberfläche angezeigte Name, eine optionale Beschreibung, die IP-Adresse für den Zugriff auf die Steuerung sowie die Home-Position. Weiterhin erhält der Nutzer Einblick in die auf der Steuerung definierten Werkzeuge und Basis-Koordinatensysteme. Darüber hinaus dient dieses Fenster zur Verknüpfung des Prozessleitsystems mit den auf den Robotersteuerungen definierten KRL-Unterprogrammen. Die Abläufe für die Demontage-sequenz sind auf der Steuerung als einzelne Module verwaltet, in welchen die teils sehr

komplexen Handlungsabfolgen gekapselt sind. Diese können dann über Systemaufrufe an die mxAutomation-Schnittstelle gestartet werden. Die notwendigen Systemvariablen für die Steuerungen, die Namen der Module sowie die benötigten Werkzeuge werden hier definiert und stehen daraufhin dem System zur Verfügung. Als zusätzliche Sicherheitsmaßnahme wird vor dem Start geprüft, ob das aktuelle Werkzeug des Roboters dem des Unterprogramms entspricht. Meldet der Roboter z.B. Werkzeug Nummer 1 als aktiv, so können nur die Systemaufrufe ausgelöst werden, die genau dieses Werkzeug entweder verwenden oder ablegen. Insbesondere nach einem Nutzereingriff im Falle einer unterbrochenen Sequenz sorgt diese Maßnahme für ein konsistentes Systemverhalten.



Roboter-Einstellungen

Robot 2

Beschreibung: Greifer

Typ: KR 30

IP Adresse: 172.16.35.21

Tools

- 3 - Greifer 1
- 4 - Greifer 2
- 5 - Greifer 3
- 6 - Magnetgreifer
- 7 - Zentrischgreifer

Bases

- 0 - NULLFRAME
- 1 - Bahnhof

Home-Position

A1 0 A4 0 E1 0 E4 0

A2 -120 A5 60 E2 0 E5 0

A3 90 A6 180 E3 0 E6 0

KRC Subroutines

SysVar	Name	Tool	Get	Deposit	Description
8	R2_DepositMagnetGripper	6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
9	R2_GetCentricGripper	7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	R2_DepositCentricGripper	7	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
20	R2_RemHaltKoSti_P_MuFuRe	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Multifunktionsregler (Halter Kohlestifte) nehmen und ablegen
21	R2_RemMetAbd_S2_P_GleRi	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Gleichrichter entfernen (KuLe gehalten von R1)
22	R2_RemKnstAbdck_P_KuLe	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Kunststoffabdeckung für Leitungen nehmen und ablegen
23	R2_RemKnstHlsen_P_KuHue	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Beide Kunststoffhülsen entfernen
30	R2_RemCasCov_S2	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Gehäusedeckel am Übergabepunkt greifen
31	R2_RemCasCov_S4_P_SchLag	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Gehäusedeckel ablegen
40	R2_RemRotor_S2_P_Rot	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Rotor entfernen
41	R2_RemStator_P_Sta	7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Stator entfernen
42	R2_RemRotCasCov_P_Rot	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Rotor aus Gehäusedeckel entnehmen
50	R2_RemLagrSchld_P_AnLaFi	6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Lagerschild mit Magnetgreifer entnehmen
51	R2_RemUntLager_S2	6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Magnetgreifer über Kugellager fahren
52	R2_RemUntLager_S4_P_UnKu	6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Kugellager ablegen
60	R2_RemUntGehdk_S1	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Kante des Gehäusedeckels greifen
61	R2_RemUntGehdk_S3_P_AnLa	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Gehäusedeckel ablegen

Neu Löschen

OK Cancel

Abbildung 53: Dialogfenster zur Konfiguration der Roboter und derer Unterprogramme

Die meisten Module starten und enden derzeit in der Home-Position des jeweiligen Roboters. Dies hat den Vorteil, dass in der Entwicklungsphase die Reihenfolge der Einzelschritte in der Gesamtsequenz noch problemlos geändert werden kann, ohne dadurch unvorhergesehene Bahnbewegungen und damit etwa Kollisionen auszulösen. Dieses Verhalten geht naturgemäß zu Lasten der Performance, da etwa bei einem Werkzeugwechsel zunächst wieder die Home-Position angefahren wird, bevor das neue Werkzeug angekoppelt wird. An dieser Stelle existiert mithin noch ein deutliches Optimierungspotential für den Demontageprozess, welches mit geringem Aufwand ausgeschöpft werden kann, sobald der Ablauf einer (Teil-)Sequenz finalisiert ist.

Steuerung der Peripherie

Neben der Steuerung der Roboter ist das Prozessleitsystem auch für die Bedienung des Ablagesystems, der Waage sowie der Sicherheitstechnik (Ampel und Türverriegelung) zuständig. Diese Komponenten des Demontagemoduls kommunizieren jeweils über eigene TCP/IP-Schnittstellen mittels definierter Befehlssätze mit dem Leitrechner und werden üblicherweise im Rahmen der Demontagesequenz automatisiert gesteuert. Insbesondere in der Entwicklungs- und Testphase ist jedoch häufig ein manueller Zugriff notwendig, welcher daher vollumfänglich in das Benutzer-Front-End implementiert wurde. Abbildung 54 zeigt dies exemplarisch für die Steuerung des Ablagesystems.

Tools	
Ablagesystem ▶	EMERG_STOP
Ampel ▶	EMERG_END
Türverriegelung ▶	ERROR_ACK
Waage ▶	CMD_CLEAR
UDP Dispatcher starten	STOP
UDP Dispatcher stoppen	START
KNN ▶	SLEEP
	WAKEUP
	SCREW_SOON
	SCREW
	SCREW_READY
	PART_SOON
	PART
	PART_READY
	SET_VOVER

Abbildung 54: Benutzerschnittstelle zur Steuerung der peripheren Komponenten

AP 6: Feedbackfunktionen

Auch und gerade bei einem hohen Grad der Systemoptimierung können unvorhersehbare Betriebszustände auftreten, in denen der automatisierte Demontageprozess keinen Lösungsansatz bietet. Insbesondere bei End-of-Life-Produkten mit einer langen Nutzungsdauer wie den hier behandelten Lichtmaschinen ist mit vielfältigen Herausforderungen aufgrund der per se sehr heterogenen Produktqualität zu rechnen. Beispiele hierfür sind festsitzende Lager, korrosionsbedingt nicht mehr handhabbare Schraubverbindungen, Verformungen durch Schäden, aber auch Modifikationen durch ersetzte Bauteile oder Baugruppen, die nicht der erwarteten Spezifikation entsprechen. Um solchen Situationen begegnen zu können, müssen diese zunächst zuverlässig erkannt werden. Nur dann kann der Prozess koordiniert und sicher unterbrochen werden, um ein menschliches Eingreifen durch das Betriebspersonal zu ermöglichen.

1. Zustandsanalyse

Das wichtigste Instrument zur Detektion von Abweichungen im Demontageprozess ist die bereits beschriebene Szenenanalyse durch 3D-Kameras. Von der initialen Platzierung der Lichtmaschine im Zentrischgreifer der Arbeitsplattform bis zur finalen Entnahme des letzten Bauteils wird nach jeder von den Robotern durchgeführten Änderung (also Bauteilentnahme und Abtransport durch das Ablagesystem) der aktuelle Demontagezustand verifiziert. Durch die Erfassung der vollständigen Tiefeninformationen und den 3D-Oberflächenabgleich des vorliegenden Zustandes mit der in der Datenbank hinterlegten Spezifikation wird also nicht nur geprüft, ob das zuletzt behandelte Bauteil ordnungsgemäß entfernt wurde, sondern auch, ob die verbleibende Baugruppe dem Soll-Zustand entspricht. Im schlimmsten Fall werden also bei einem nicht entfernten Bauteil lediglich noch Anweisungen gestartet, die zu Leerfahrten der Roboter oder des Ablagesystems führen, bis die nächste Szenenanalyse einen Fehler meldet und der Prozess unterbrochen wird.

Während des Entwicklungsprozesses sind erwartungsgemäß immer wieder Situationen aufgetreten, die zu einem Abbruch der Demontagesequenz geführt haben. Häufig ließen sich durch Modifikationen an den Werkzeugen oder am Programmablauf diese Situationen für die Zukunft in der Häufigkeit verringern oder ganz vermeiden und so die Stabilität des Prozesses deutlich steigern. Allerdings gibt es auch Fälle, in denen eine Lichtmaschine als nicht demontierbar ausgeschleust werden muss. So kommt es etwa bei sehr festsitzenden Lagern im unteren Gehäusedeckel vor, dass die Welle des Rotors mit den verwendeten Werkzeugen und vorgesehenen Kräften nicht aus diesen ausgetrieben werden kann. Ein Sensor in der Arbeitsplattform stellt fest, ob der Austreibevorgang erfolgreich war. Ansonsten endet der Versuch nach einer festgelegten Zeit, um Schäden am System durch übermäßig langen

Betrieb des pneumatischen Schlagwerks zu vermeiden. In diesem Fall wird eine Fehlermeldung ausgelöst und die automatisierte Demontage beendet. Im bereits geschilderten Beispiel des im oberen Lager festsitzenden Rotors (Abschnitt „Bereich Demontagesequenz“) konnte das Problem hingegen für die Zukunft gelöst werden, indem die Demontageanleitung entsprechend erweitert wurde und das System nun auf mehrere Arten angemessen reagieren kann, ohne den Prozess unterbrechen zu müssen.

Alle vom erwarteten Zustand abweichenden Situationen erfordern mindestens beim ersten Auftreten ein menschliches Eingreifen in den Prozess, entweder nach dem automatischen Halt, ausgelöst durch ein negatives Ergebnis der Szenenanalyse oder aber bereits nach einer durch den Benutzer ausgelösten Unterbrechung der Sequenz. Welche Möglichkeiten für den Nutzereingriff bis zum Projektende implementiert wurden, wird im Folgenden beschrieben.

2. Eingriffsmöglichkeiten für den Benutzer

Eine optimale Kontrolle über den Demontageprozess durch den Benutzer wurde ermöglicht, indem zahlreiche Funktionen des Prozessleitsystems zusätzlich zur Eingabe über den Prozessleitreechner über einen drahtlosen Controller als mobiles Eingabegerät bereitgestellt wurden. Dieser ist sowohl über das Qt5-Framework als auch über die XInput-Schnittstelle von Microsoft implementiert worden. Diese Herangehensweise bietet verschiedene Vorteile im Vergleich zur ausschließlichen Bedienung am Prozessleitreechner. Zum einen ist der Benutzer durch die so erreichte Mobilität in der Lage, direkt am Sicherheitszaun (bzw. mit entsprechend der Betriebsart T1 reduzierter Geschwindigkeit sogar in dem Demontagemodul) den Prozess mit optimalem Blick auf das aktuelle Geschehen zu steuern. Zum anderen ist die Reaktionszeit für eventuelle nutzerseitige Aktionen im Vergleich zu einer Eingabe durch Maus und Tastatur deutlich reduziert. Darüber hinaus erhält der Benutzer durch die Vibrationsfunktion des Controllers verschiedene Feedback-Informationen zum Prozessverlauf oder bei auftretenden Fehlern, ohne den Blick vom Prozessablauf abwenden zu müssen. Die implementierte Funktionalität wird im Folgenden kurz beschrieben (Abbildung 55):

1. Geschwindigkeitsanpassung

Bei Bedarf kann die Geschwindigkeit des aktiven Roboters oder auch des Ablagesystems in 10%-Schritten verstellt werden. Für die Roboter entspricht dies der bereits beschriebenen Programm-Override-Funktion im Kontrollbereich der Benutzeroberfläche. Für das Ablagesystem ist dieselbe Funktionalität implementiert worden, auch hier wird der eingestellte Wert in der zyklischen Kommunikation mit dem Leitsystem sofort umgesetzt. Ist die minimale/maximale Geschwindigkeit erreicht, quittiert der Controller dies durch eine kurze Vibration.

2. *Override für die Bedingungen der Demontageschritte*

Hiermit können die bis zu vier Bedingungen, die zur Freigabe des nächsten Demontageschrittes erfüllt sein müssen, manuell gesetzt werden. Aus Sicherheitsgründen geschieht dies über Kombinationen mehrerer Eingaben, wobei die Freigabe sowohl für einzelne Bedingungen als auch für alle gleichzeitig erfolgen kann. Diese Funktion wird insbesondere dann verwendet, wenn die Demontagesequenz nicht ab dem ersten Schritt, sondern an einer ausgewählten Stelle gestartet oder fortgesetzt wird und der aktuelle Schritt aufgrund seiner Definition vergeblich auf Signale vorangegangener Schritte warten würde.



Abbildung 55: Mobiles Eingabegerät für die optimale Kontrolle über den Prozess. Die nummerierten Tastenbelegungen werden im Text detailliert beschrieben. (Quelle: EasySMX)

3. *Start / Stopp der Demontagesequenz*

Mit diesen Tasten wird der Prozess beim aktuell ausgewählten Schritt gestartet bzw. beendet. Die Funktionalität entspricht der Start/Stop-Schaltfläche der Benutzeroberfläche. Wird die Sequenz auf diese Weise beendet, wird die aktuelle Bewegung anders als bei einem Not-Halt noch bis zum Ende ausgeführt.

4. *Pausieren der Demontagesequenz*

Diese Eingabe setzt die Geschwindigkeit (Programm-Override) aller Roboter auf Null und sendet ein Stopp-Signal an das Ablagesystem. Dadurch wird der Prozess augenblicklich angehalten, kann aber durch erneutes Drücken mit den vorher eingestellten Geschwindigkeiten fortgesetzt werden, ohne dass Bewegungen oder sonstige Steuerbefehle abgebrochen werden müssen. Aus Sicherheitsgründen sind im Pause-Modus die Programm-Override-Einstellungen der Benutzeroberfläche verriegelt, der Betrieb kann ausschließlich über den Controller fortgesetzt werden.

5. *Not-Halt*

Diese Eingabe entzieht dem gesamten System die Fahrfreigabe, wodurch augenblicklich die Bewegungen aller Roboter und des Ablagesystems beendet werden. Die Demontagesequenz wird gestoppt und die Sicherheitstür entriegelt.

6. *Bestätigung manueller Steuerbefehle*

Werden manuelle Steuerbefehle im Automatik Extern Betrieb über die Benutzeroberfläche ausgelöst (vgl. 5.1: Robotersteuerung), wartet der entsprechende Roboter zunächst auf eine Bestätigung, bevor die Bewegung tatsächlich gestartet wird. Die Quittierung erfolgt entweder am Prozessleitrechner oder aber mit dieser Eingabe.

7. *Einzelschrittbestätigung im automatisierten Demontageprozess*

Ist für die Ausführung der Demontagesequenz eine Einzelschrittbestätigung aktiviert worden, erfolgt die Quittierung durch diese Eingabe. Dem Benutzer wird durch eine kurze Vibration des Controllers signalisiert, dass das System auf diese Eingabe wartet. Ist die Einzelschrittbestätigung deaktiviert, wird durch die Vibration die automatische Ausführung des nächsten Schrittes angezeigt.

Ist aufgrund eines ungeplanten Zustandes der Demontageprozess durch Szenenanalyse oder Nutzereingriff unterbrochen worden, stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, mit der Situation umzugehen. Ist der Grund für die Unterbrechung ein nicht oder unvollständig entferntes Bauteil, kann dies manuell entfernt und der Prozess fortgesetzt werden. Erfordert die Situation die erneute Ausführung zurückliegender Schritte, kann mit einem Klick auf die entsprechende Stelle der Sequenz (Abbildung 49, S. 88) der entsprechende Schritt für die Fortsetzung der Sequenz ausgewählt werden, eventuelle Wartebedingungen können dann wie beschrieben manuell quittiert werden. Ebenso können auf diese Weise nicht benötigte Schritte übersprungen werden, wie z.B. der bei manueller Bauteilentnahme nicht nötige Abtransport durch das Ablagesystem. Ist zunächst ein Freifahren eines Roboters oder eine

Neupositionierung des Ablagesystems notwendig, kann dies durch die manuellen Steuerbefehle geschehen und die Sequenz anschließend fortgesetzt werden.

Erfordert eine unerwartete Situation eine Anpassung oder Änderung der Sequenz, kann diese, sofern sie gestoppt ist, sehr einfach editiert werden. Es können Einzelschritte verändert, hinzugefügt oder gelöscht werden, wobei die Änderungen entweder gespeichert oder auch nur temporär für diesen Durchlauf gültig sein können. Die geänderte Sequenz kann dann augenblicklich wieder an beliebiger Stelle gestartet werden. Durch diese Eingriffs- und Kontrollfunktionen ist es möglich, auf die meisten zu einer Unterbrechung führenden Szenarien mit minimalem Zeitverlust zu reagieren. Im Falle einer editierten Sequenz können die Szenarien bei erneutem Eintreten in Zukunft automatisch überwunden werden.

AP 7: Integration in die Ultraeffizienzfabrik

Im Rahmen des assoziierten Projektes „Ultraeffizienzfabrik im urbanen Umfeld“ war die Realisierung einer effizienzfokussierten Demonstrator-Produktionsanlage in Baden-Württemberg geplant. Die Überführung des Demontagemoduls in die Räumlichkeiten der Ultraeffizienzfabrik war zum Projektende vorgesehen. Da die Ultraeffizienzfabrik zum Projektende noch nicht realisiert wurde, verbleibt das Demontagemodul im CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum.

AP 8: Flankierende Maßnahmen

Nach Aufbau und Einrichtung des Moduls wurden die zu diesem Zeitpunkt real erreichbaren Demontagezeiten ermittelt und als Basis für die Durchführung einer wirtschaftlichen Betrachtung der robotergestützten Demontage genutzt. Zusätzlich wurden diverse Materialanalysen an den Komponenten der Lichtmaschine vom Typ Valeo 03L 903 023 durchgeführt, um so die anschließende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu verfeinern.

1. Materialanalysen der Einzelkomponenten

Als Beitrag für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden materialspezifische Untersuchungen der einzelnen Komponenten der Lichtmaschine vom Typ Valeo 03L 903 023 L (interne Bezeichnung L2) durchgeführt. Hierzu wurde das mobile Röntgenfluoreszenzanalyse-Handspektrometer (RFA) vom Typ *Niton XL2 plus* vom Hersteller Analyticon verwendet, welches eine schnelle, einfache und zerstörungsfreie Analyse der Materialzusammensetzungen für metallische Komponenten ermöglicht. Das Gerät erkennt in der Grundkonfiguration sämtliche Elemente im Massenbereich von Chlor bis Uran und ist zusätzlich durch einen integrierten Silizium-Drift-Detektor (SDD) in der Lage, leichtere Elemente, wie Aluminium, Magnesium, Schwefel und Silizium zu analysieren. Als Anode ist hier eine Ag-Röhre mit einer Maximalleistung von 2 Watt verbaut. Die verwendete analytische Methode basiert auf dem Prinzip der Röntgenfluoreszenz, d.h. auf der Eigenschaft von Atomen, bei Ionisation und daraus resultierender Bewegung von Elektronen auf weiter innen liegende Atomschalen elementspezifisch unterscheidbare Spektren an Fluoreszenzstrahlung abzugeben. Die analysierten Messwerte werden durch das Gerät automatisch mit einer integrierten Werkstoffdatenbank abgeglichen und die entsprechende Legierung mit zugehöriger Werkstoffnummer ausgegeben. Die Identifikation der verarbeiteten Legierungen diente im Projektverlauf u.a. während der Erarbeitung der Demontageprozesse der Vermeidung von Werkstoffvermischungen, die den Wert der erhaltenen Wertstofffraktionen mindern und ein hochwertiges Recycling verhindern. Gleichzeitig bilden die Ergebnisse der Quantifizierung der unterschiedlichen Werkstoffe und Materialzusammensetzungen die Basis für die abschließende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

Zur Vorbereitung der Proben wurde eine repräsentative Lichtmaschine Typ L2 mit Hilfe von manuellen, physikalischen und thermischen Methoden in ihre Einzelkomponenten zerlegt. Die generelle manuelle Zerlegung wurde bereits für andere Arbeiten des Projektes durchgeführt, das dazugehörige Protokoll ist in Anhang I hinterlegt. Vereinzelt mussten Komponenten durch zusätzlichen Einsatz physikalischer und thermischer Verfahren auf die RF-Analytik vorbereitet werden (Abbildung 56).



Abbildung 56: Beispielhafter manueller Demontageschritt des verbauten Stators zur Trennung von Blechpaket und Kupferwicklung (links & Mitte), Blechpaket des Stators vor der Analyse (rechts)

Alle Bauteile wurden nach jedem Schritt gereinigt und gewogen, um eventuellen Verschleiß bzw. Verlust zu dokumentieren. Um die Teile selbst und nicht etwa die Bestandteile der eventuell vorhandenen Lackierung oder Beschichtung zu erfassen, wurde jedes Bauteil an den zu messenden Stellen vorher sandgestrahlt. Einige Teile wurden zusätzlich an anderer Stelle, die entweder unbehandelt oder manuell überfräst oder gefeilt wurde, nochmals untersucht, um eine etwaige Verfälschung der Messwerte durch das Sandstrahlen ausschließen zu können.

Insgesamt wurden 58 Einzelanalysen an 14 Komponenten der Lichtmaschine L2 durchgeführt. Hierbei wurden pro Stelle jeweils zwei Messungen von je zehn Sekunden Dauer ohne SDD sowie je zwei Messungen von je 20 Sekunden Dauer mit aktiviertem SDD durchgeführt. Sofern vorhanden, sind daher enthaltene Mengen der Elemente Mg, Al, Si, P, S oder Cl nur in den 20-Sekunden-Messungen ersichtlich. Für die anschließende Auswertung wurden diejenigen Messwerte eines Bauteils verwendet, welche die größte Übereinstimmung mit einer im Gerät hinterlegten Legierung zeigten. Um statistische Ausreißer in den verwendeten Daten zu vermeiden, wurden zumeist jeweils zwei Messungen mit der gleichen Messdauer ausgewertet und die sich daraus ergebenden Mittelwerte verwendet.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Analytik der Einzelkomponenten drei verschiedene Materialgruppen: a) Aluminiumreiche Legierungen, b) Kupferreiche Zusammensetzungen und c) Eisenreiche Legierungen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Materialzusammensetzungen sowie vorgeschlagene Legierungen der Einzelkomponenten der Lichtmaschine L2, analysiert mittels RFA Handspektrometer. Gehalte sind in Gew.-% angegeben. (<LOD - Wert liegt unter der Nachweisgrenze; n.d. – nicht detektiert)

Nr.	Bauteilbezeichnung	Abkürzung	Legierung	Fe	Cu	Al	Si	Zn	Mn	Ni	Cr	Pb
1	Diodenplatte	GleRi_PI	AC226 AlSi9Cu3	0,95	2,45	94,9	n.d.	1,14	0,23	0,10	<LOD	0,11
2	Antriebslagerschild	AnLa	AC226 AlSi9Cu3	1,24	2,52	94,4	n.d.	1,31	0,23	0,11	0,09	0,13
3	Schleifringlagerschild	SchLa	AC226 AlSi9Cu3	0,86	2,78	94,8	n.d.	1,09	0,21	0,10	<LOD	0,11
4	Antriebslagerfixierung	AnLaFi	Fe/C-Stahl	99,3	<LOD	<LOD	n.d.	0,39	0,20	<LOD	0,05	<LOD
5	Rotor_Welle	Rot_W	1.1181 o. Fe/C-Stahl	99,1	<LOD	<LOD	n.d.	<LOD	0,72	<LOD	0,09	<LOD
6	Rotor_Sicherungsring	Rot_SR	Fe/C-Stahl	98,3	<LOD	<LOD	0,25	<LOD	1,22	<LOD	0,07	<LOD
7	Rotor_Kupferschleifring	Rot_KSR	E-Cu	0,06	99,9	<LOD	n.d.	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
8	Rotor_Pol	Rot_Pol	Fe/C-Stahl	99,5	<LOD	<LOD	n.d.	<LOD	0,38	<LOD	0,04	<LOD
9	Rotor_Lüfterrad	Rot_Lüfterrad	1.1181 o. Fe/C-Stahl	98,9	<LOD	<LOD	n.d.	<LOD	0,78	<LOD	0,08	<LOD
10	Rotor_Ringspule	Rot_RS	E-Cu	0,2	99,5	<LOD	n.d.	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
11	Stator_Wicklung	Sta_W	E-Cu	0,04	99,8	<LOD	n.d.	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
12	Stator_Kern	Sta_K	Fe/C-Stahl	99,7	<LOD	<LOD	n.d.	<LOD	0,21	<LOD	0,04	<LOD
13	Unteres Kugellager_ Außenring	UnKu_A	1.2063 o. 1.2067	97,0	0,15	<LOD	0,28	<LOD	0,39	0,11	1,40	<LOD
14	M5x66_Gewindestift_ mit_Langmutter	M5x66SW10	Fe/C-Stahl	98,1	<LOD	<LOD	n.d.	0,46	1,20	0,15	0,04	<LOD

- a) Bei den Al-reichen Legierungen der Diodenplatte, des Antriebslagerschildes und des Schleifringlagerschildes, kurz des Gehäuses der Lichtmaschine, zeigen die Ergebnisse der Materialanalytik sehr gute Übereinstimmungen mit dem Material der Werkstoffbezeichnung AC226 mit der chemischen Zusammensetzung AlSi9Cu3 . Hierbei handelt es sich um eine preiswerte Aluminium-Gusslegierung mit guten Fließ- und Formfüllungseigenschaften [14]. Industriell wird diese Legierung beispielsweise für Maschinen- und Motorenteile sowie Gehäuse in der Automobilindustrie, im Bergbau oder in der Elektronik verwendet. Hauptbestandteil dieses Materials ist mit etwa 95 Gew.-% Aluminium, Haupt-Legierungselemente sind Silizium und Kupfer. Als weitere Legierungselemente können hier Eisen, Zink, Mangan, Nickel und Bei enthalten sein (Abbildung 57). Die Analysen mittels des SD-Detektors ergaben hier eventuell aufgrund der Bearbeitung mit dem Sandstrahlgerät zu hohe Silizium-Werte, daher wurden für die weitere Betrachtung die Ergebnisse ohne die Analytik der leichten Elemente herangezogen.

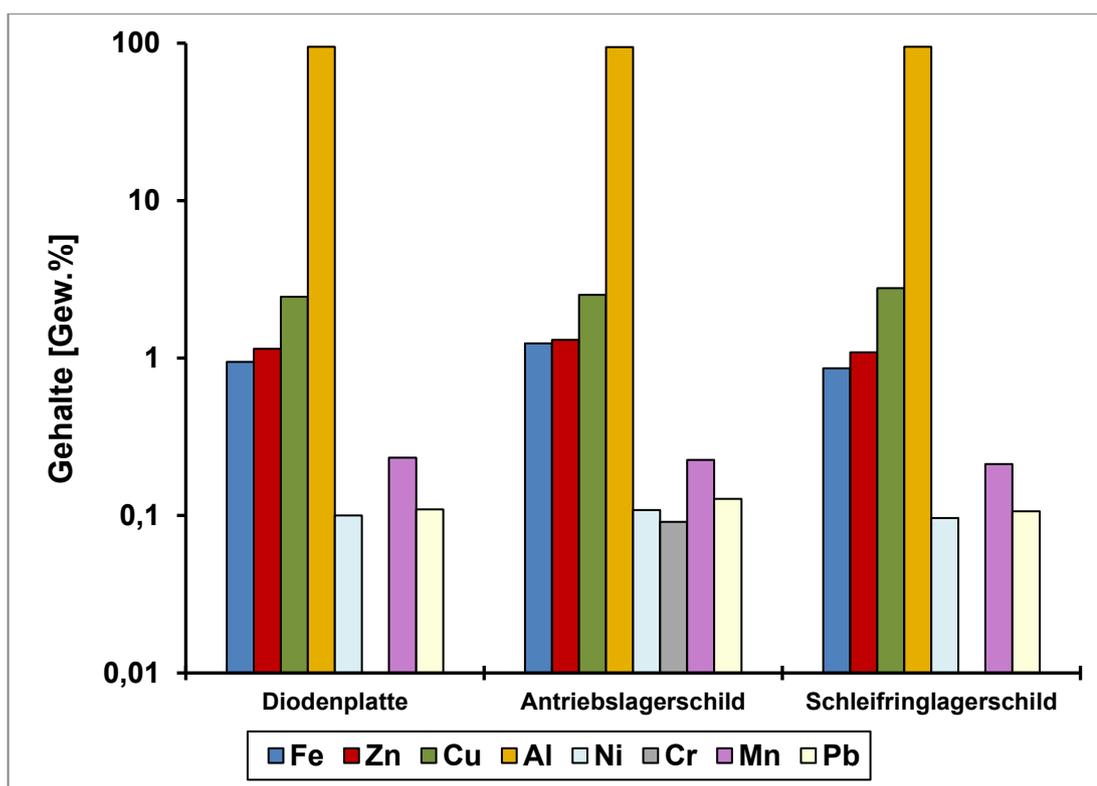


Abbildung 57: Materialzusammensetzungen der Al-reichen Komponenten analysiert mit RFA-Handspektrometer vom Typ Niton XL2 plus

- b) Die Ringspule und der Schleifring des Rotors sowie der Kern des Stators bestehen laut Analyse aus E-Kupfer mit der Werkstoffnummer 2.0060. Dieses zeichnet sich besonders durch die hohe Leitfähigkeit bei relativ hoher Korrosionsbeständigkeit aus.

Typische Anwendungen stellen Wicklungen für elektrische Maschinen und Apparate (Motoren, Transformatoren) aber auch Kontakte dar. Als Hauptbestandteil ist hier über 99,9 Gew.-% Kupfer sowie als Legierungspartner Eisen, Phosphor, Blei und/oder Wismut enthalten. Die hohe Reinheit und die relativ hohe Menge an verbautem Material machen die Ringspule des Rotors sowie den Kern des Stators zu den wirtschaftlich interessantesten Bauteilen der Lichtmaschine.

- c) Die Mehrheit der Fe-reichen Komponenten kann in die Gruppe der Eisen-Kohlenstoff-Stahllegierungen eingeordnet werden (Abbildung 58). Diese sind aufgrund der breiten Auswahl an Möglichkeiten, ihre Eigenschaften zu beeinflussen, vielseitig einsetzbar, wie z.B. als Walz- und Schmiedestahl aber auch für Gusslegierungen bei Konstruktionsteilen und Werkzeugen. Die Materialzusammensetzung der Welle und des Lüfterrades des Rotors wurden als Werkstoff 1.1181 identifiziert. Hierbei handelt es sich um einen unlegierten Vergütungsstahl, der im Wesentlichen in der Automobilindustrie, im Maschinenbau sowie für Befestigungselemente mit niedrigen Vergütungsfestigkeiten eingesetzt wird [15]. Er ist hauptsächlich für gering beanspruchte Bauteile mit hoher Zugfestigkeit geeignet. Für das Kugellager konnte der Werkstoff 1.2063 bzw. 1.2067 ermittelt werden. Beides sind Kaltarbeitsstähle mit einem Kohlenstoffanteil von 1,4–1,6 Gew.-% respektive 0,95–1,1 Gew.-% [15], die sich durch ihre Zähigkeit sowie gute Verschleiß- und Druckfestigkeit auszeichnen. Diese werden für die Fertigung von Schneidwerkzeugen, Fräsern und Kugellagern verwendet. Insgesamt zeigen die in der Lichtmaschine L2 verwendeten Stahllegierungen eine große Varianz in ihrer Zusammensetzung. Als Hauptbestandteil ist in allen analysierten Komponenten über 97 Gew.-% Eisen enthalten. Weiterhin zeigen die Legierungen Chrom und Mangan als Legierungselemente. Zusätzlich treten noch Zink (Antriebslagerfixierung, Gewindestift), Kupfer (Kugellager), Nickel (Kugellager, Gewindestift) und Silizium (Sicherungsring) auf. Diese Spuren sind allerdings nur unter Vorbehalt zu betrachten, da sie an die Nachweisgrenzen der analytischen Methode heranreichen. Zur Spezifizierung wurden weiterführende Analysen auf nasschemischer Basis durchgeführt.

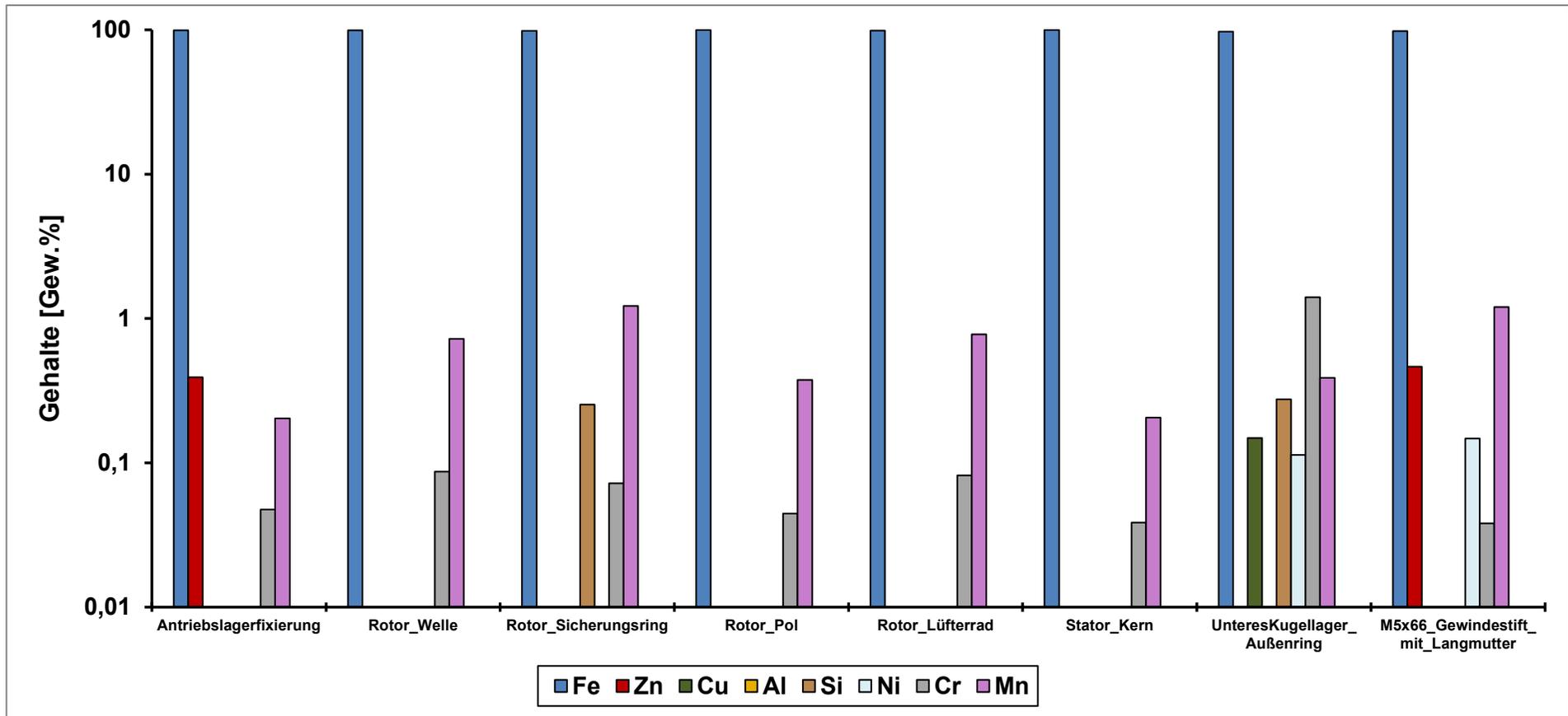


Abbildung 58: Materialzusammensetzungen der Fe-reichen Komponenten analysiert mit RFA-Handspektrometer vom Typ Niton XL2 plus

Da die Analyse mit dem mobilen RFA-Handspektrometer lediglich Aussagen zu den Hauptbestandteilen der einzelnen Komponenten liefert, wurde zusätzlich im Verlauf des Projekts eine nasschemische Analytik mit optischer Emissionsspektroskopie mittels induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) durchgeführt. Hier wurde das Gerät PlasmaQuant PQ 9000 Elite des Instituts für Metallurgie der TU Clausthal verwendet. Diese Methode diente hauptsächlich zur präzisen Bestimmung der wirtschaftlich interessanten Legierungselemente, wie z.B. Chrom, Nickel, Mangan und Selen. Hierfür war eine umfangreiche Materialvorbereitung notwendig, da das zu analysierende Material in Pulverform vorliegen muss, um es bestmöglich für die Messung in Lösung zu bekommen. Zur Vorbereitung wurde eine repräsentative Lichtmaschine Typ L2 mit Hilfe von manuellen, physikalischen und thermischen Methoden in ihre Einzelkomponenten zerlegt. Im Anschluss wurden alle metallischen Bauelemente separiert, gewogen und die Oberflächen mechanisch und chemisch gereinigt. Für die Gewinnung von mindestens zwei Gramm Material kamen unterschiedliche Methoden zum Einsatz (Abbildung 59). So wurden u.a. das Pulver des Antriebslagerschildes mit Hilfe einer Handfeile gewonnen und Späne der Riemenscheibe durch Nutzung einer Standbohrmaschine erzeugt. Längliche, runde Bauteile, wie die Rotorwelle, wurden hingegen mit einer Drehbank bearbeitet. Das gewonnene Material wurde abschließend gewogen und dann im nasschemischen Labor durch auf die unterschiedlichen Legierungen angepasste Aufschlussverfahren auf die Analyse vorbereitet. Details zu den Aufschlussverfahren sowie die genutzten Geräteparameter und Wellenlängen bei der Analyse können dem Anhang II entnommen werden.



Abbildung 59: Links: Materialgewinnung mittels Standbohrmaschine, hier am Beispiel der Riemenscheibe; rechts: Materialgewinnung mittels Drehbank, hier am Beispiel der Rotorwelle

Die Auswertung wurde auch hier anhand der drei verschiedenen Materialgruppen (Al-reich, Cu-reich, Fe-reich) vorgenommen und zeigt diverse auf die Verwendung abgestimmte Legierungselemente in den Einzelkomponenten der Lichtmaschine L2:

- a) In den Al-reichen Legierungen mit der chemischen Zusammensetzung AlSi9Cu3 der Diodenplatte sowie des Antriebs- und Schleifringlagerschildes konnten mithilfe der nasschemischen Analytik die exakten Gehalte an Silizium mit 8,90 bis 8,94 Massen-% bestimmt werden. Dies entspricht auch den Angaben der Werkstoffdatenblätter für diese Legierung. Zusätzlich sind Kupfer (1,83 – 2,34 Massen-%), Zink (1,01 – 1,32 Massen-%), Eisen (0,82 – 1,26 Massen-%) sowie akzessorisch Magnesium ($\leq 0,23$ Massen-%), Eisen (0,82 – 1,26 Massen-%) sowie akzessorisch Magnesium ($\leq 0,23$ Massen-%), Mangan ($\leq 0,19$ Massen-%), Nickel ($\leq 0,10$ Massen-%), Titan ($\leq 0,07$ Massen-%) und Chrom ($\leq 0,08$ Massen-%) enthalten (Abbildung 60).

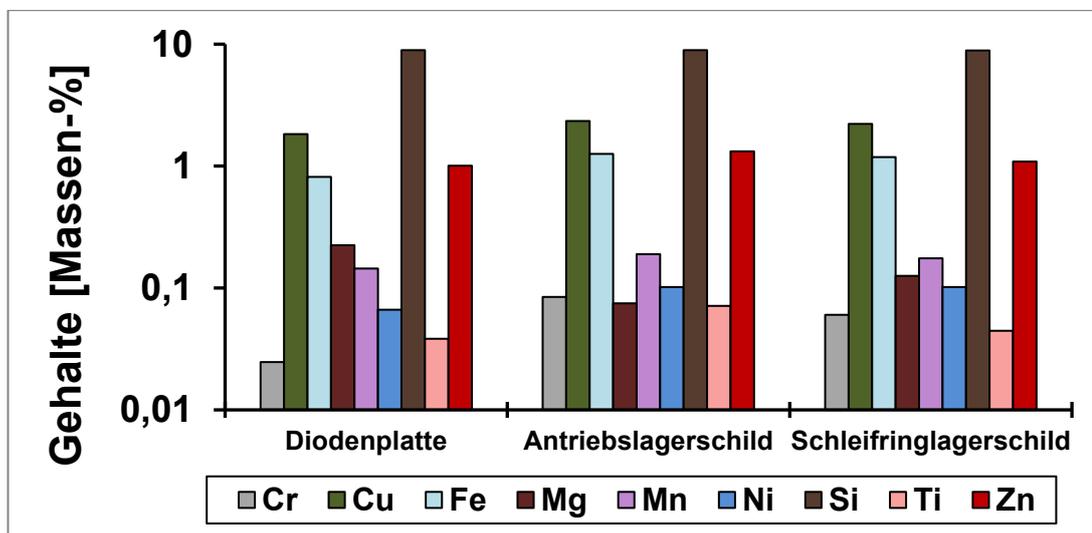


Abbildung 60: Zusammensetzung der Legierungselemente der Al-reichen Komponenten, analysiert mittels ICP-OES

- b) In der aus E-Kupfer bestehenden Ringspule des Rotors und dem Kern des Stators konnten keine Spurenelemente nachgewiesen werden. Lediglich im Kupferschleifring des Rotors sind akzessorisch Eisen (0,01 Massen-%), Phosphor (0,03 Massen-%) und Blei (0,001 Massen-%) enthalten. Dieses Ergebnis zeigt die hohe Reinheit und die einhergehend hohe wirtschaftliche Bedeutung dieser Komponenten.
- c) Die aus Fe-Legierungen bestehenden Komponenten zeigen den größten Variationsbereich hinsichtlich ihrer elementaren Zusammensetzungen (Abbildung 61). Selen, welches der besseren Bearbeitbarkeit der Stähle dient, ist hier z.B. in allen Legierungen in einem Variationsbereich von 0,09 bis 1,65 Massen-% enthalten. Weiterhin konnten Mangan (0,21 – 1,24 Massen-%), Chrom (0,03 – 1,43 Massen-%)

und akzessorisch Molybdän ($\leq 0,03$ Massen-%) zur besseren Härtebarkeit nachgewiesen werden. Chrom wird zur Verbesserung der Zugfestigkeit hinzugefügt. Als einer der häufigsten Zuschlagsstoffe zur Verbesserung der Alterungsunempfindlichkeit von Stählen weisen die verwendeten Legierungen Aluminiumgehalte mit bis zu 0,05 Massen-% auf. Des Weiteren ist Kupfer mit bis zu 0,14 Massen-% in den verwendeten Legierungen enthalten. Dieses dient der Verbesserung der Festigkeit. Für eine weitere Erhöhung der Festigkeit und Härte sind u.a. im Kugellager und Gewindestift Niob ($\leq 0,03$ Massen-%) und Phosphor ($\leq 0,05$ Massen-%) enthalten. Phosphor gilt durch seine Eigenschaft die Seigerung zu beeinflussen eigentlich als Schädling in Stählen, wird aber in niedriglegierten Stählen, wie den hier verwendeten Kaltarbeitsstählen, zusätzlich zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit hinzugefügt.

Zusammenfassend enthalten die in der Lichtmaschine L2 verwendeten Legierungen diverse, auch wirtschaftlich relevante Legierungselemente wie Chrom, Nickel, Selen, Molybdän und Niob. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind diese allerdings in zu geringen Gehalten und Mengenanteilen in den untersuchten Bauteilen der Lichtmaschine L2 verarbeitet, sodass sie für die weitere Betrachtung nicht mit einbezogen werden.

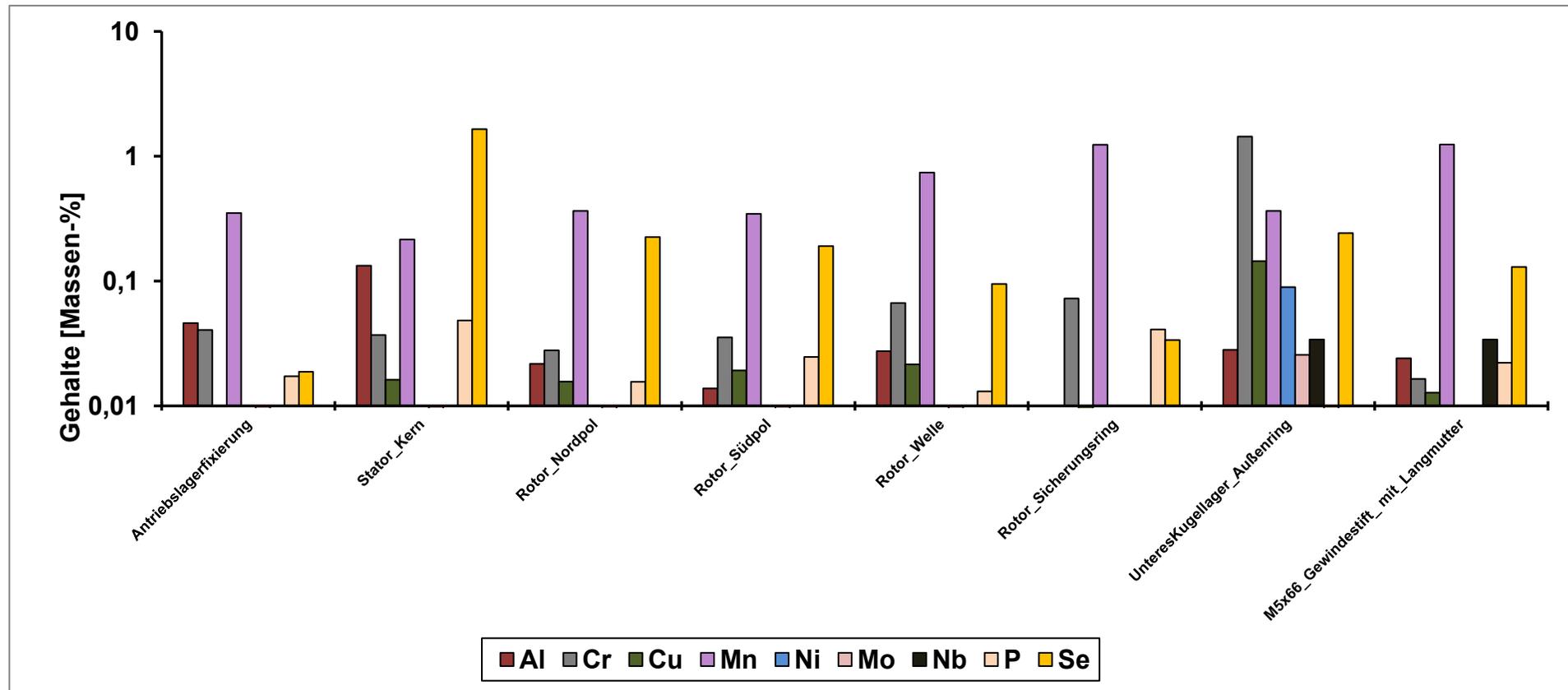


Abbildung 61: Zusammensetzung der Legierungselemente der Fe-reichen Komponenten, analysiert mittels ICP-OES

2. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die ökonomische Betrachtung dient hier der Beurteilung, unter welchen Umständen sich eine automatisierte Demontage von Lichtmaschinen lohnen würde. Dazu wurden die anfallenden Kosten den mit den zurückgewonnenen Materialien zu erzielenden Gewinnen gegenübergestellt.

Für die Festlegung der Kosten wurde der Prozess der Demontage selbst betrachtet. Dafür wurde der Stundensatz des im Projekt erstellten Demontagemoduls berechnet (Tabelle 3). Dieser setzt sich aus den Anschaffungskosten sämtlicher Hard- und Software, den laufenden Kosten und den Energiekosten (inkl. Stromsteuer, Abgaben und Umlagen) zusammen. Als weitere Einflussgröße floss die Nutzungsdauer mit in die Berechnung ein, diese wurde auf eine Dauer von zehn Jahren angesetzt. Für die Betriebszeit wurde ein Ganzjahresbetrieb mit täglich 14 Stunden bei einer Verfügbarkeit von 90% angenommen. Die nicht verfügbare Anlagenzeit setzt sich zusammen aus Wartungsarbeiten und nicht erfolgreichen Demontageabläufen. Aus den Anschaffungskosten von 200.000 Euro und einer Gesamtnutzungsdauer von 46.000 h ergeben sich Abschreibungskosten in Höhe von ca. 4,35 €/h. Die permanente Leistungsaufnahme wird konservativ auf 5 kW eingeschätzt. Unter Verwendung des durchschnittlichen Industriestrompreisen für das Jahr 2021 in Höhe von 19,09 ct/kWh ergeben sich Energiekosten von 0,95 €/h. Nach [16] wurden 3% jährliche Wartungskosten für die gesamte Anlage einkalkuliert, sodass sich für das Demontagemodul 6.000 €/a bzw. ca. 1,30 €/h ergeben. In Summe fallen somit Kosten von 6,61 €/h für das Demontagemodul an.

Tabelle 3: Kostenaufstellung für das im Projekt erstellte Demontagemodul

Kategorie	Wert	Einheit	Beschreibung
Anschaffung	200.000	€	Ausstattung Demontagemodul
Betriebsdauer	10	a	
Betriebszeit	4.600	h/a	365 Tage, 14 h/d, Verfügbarkeit 90 %
Abschreibungskosten	4,35	€/h	
Leistungsaufnahme (permanent)	5.000	W	Demontagemodul
Stromkosten	19,09	ct/kWh	durchschnittlicher Industriestrompreis 2021 [17]
Stundenpreis Energie	0,95	€/h	
Wartung	6.000	€/a	3 % des Kaufpreises für die jährliche Wartung [18]
Gesamtkosten	6,61	€/h	

Unter Berücksichtigung der zum Projektende erreichten Demontagedauer von 15 min, bei der verschiedene Optimierungspotentiale noch nicht ausgeschöpft wurden, ergeben sich Demontageskosten von ca. 1,65 Euro pro Lichtmaschine. Davon fallen ca. 0,24 Euro für Energiekosten an.

Für die Berechnung der zu erzielenden Gewinne wurden aktuelle Marktpreise für Altmetalle in verschiedenen Schrottkategorien herangezogen. Mit den im Projekt ermittelten Gewichten der Bauteile und den zum Berichtszeitpunkt aktuellen Schrottpreisen der enthaltenen Materialien lässt sich der Schrottwert einer Lichtmaschine ermitteln. Unter Voraussetzung einer vollständigen Trennung der enthaltenen Materialien ergäbe sich ein Schrottwert von 11,67 €/Stk (Tabelle 4).

Tabelle 4: Bauteile der Lichtmaschine L2 mit Legierungstyp, Gewicht, Schrottart und Verkaufspreis bei theoretisch vollständiger Materialtrennung im Demontageprozess (Stand: 26.09.21)

Bauteil	Legierungstyp	Gewicht [g]	Schrottart	Verkaufspreis [€]	Quelle
Antriebslagerschild	Al-Legierung	495	Al-Guss	1,26	[19]
Schleifringlagerschild	Al-Legierung	525	Al-Guss	1,26	[19]
Diodenplatte	Al-Legierung	115	Al-Guss	1,26	[19]
Statorwicklung	Cu-Legierung	895	Kupfer schwer (98%)	6,5	[16]
Rotorringenspule	Cu-Legierung	490	Kupfer schwer (98%)	6,5	[16]
Rotorschleifring	Cu-Legierung	5	Kupfer schwer (98%)	6,5	[16]
Rotor Nordpol	Fe-Legierung	1.295	E3 Schwerschrott	0,31	[16]
Rotor Südpol	Fe-Legierung	1.250	E3 Schwerschrott	0,31	[16]
Statorkern	Fe-Legierung	980	E3 Schwerschrott	0,31	[16]
Rotor Welle	Fe-Legierung	225	E1 Eisen	0,25	[16]
Antriebslagerfixierung	Fe-Legierung	15	E1 Eisen	0,25	[16]
Langmutter	Fe-Legierung	29	E1 Eisen	0,25	[16]
Rotor Sicherungsring	Fe-Legierung	13	E1 Eisen	0,25	[16]
Unteres Kugellager	Fe-Legierung	110	E1 Eisen	0,25	[16]
Rotorkugellager	Fe-Legierung	44	E1 Eisen	0,25	[16]

Da für die Demontage von Rotor und Stator bis zur vollständigen Materialtrennung weiterführende Arbeiten notwendig sind, können diese Komponenten zum Berichtszeitpunkt lediglich zur Kategorie Elektromotorschrott gezählt werden. Bei Vermarktung in diesem Zustand unvollständiger Materialtrennung ergibt sich ein Schrottwert von 4,48 €/Stk (Tabelle 5). Somit verbleibt eine Differenz von 7,19 €/Stk, mit denen die zusätzlich nötigen Prozessschritte finanziert werden könnten, die zu einer vollständigen Materialauftrennung führen.

Tabelle 5: Bauteile der Lichtmaschine L2 mit Legierungstyp, Gewicht, Schrottart und Verkaufspreis für die zum Berichtszeitpunkt vollständig automatisiert erreichte Demontagetiefe (Stand: 26.09.21)

Bauteil	Legierungstyp	Gewicht [g]	Schrottart	Verkaufspreis [€]	Quelle
Antriebslagerschild	Al-Legierung	495	Al-Guss	1,26	[19]
Schleifringlagerschild	Al-Legierung	525	Al-Guss	1,26	[19]
Diodenplatte	Al-Legierung	115	Al-Guss	1,26	[19]
Stator	Mischung	1875	Elektromotoren	0,58	[19]
Rotor	Mischung	3322	Elektromotoren	0,58	[19]
Antriebslagerfixierung	Fe-Legierung	15	E1 Eisen	0,25	[16]
Langmutter	Fe-Legierung	29	E1 Eisen	0,25	[16]
Unteres Kugellager	Fe-Legierung	110	E1 Eisen	0,25	[16]

In einem realistischen Szenario werden die Demontagemodule im Rahmen einer sogenannten Demontagefabrik betrieben. Dies verursacht zusätzliche zu berücksichtigende Kosten:

Fixe Kosten:

- Abschreibung der Investition
- Miete
- Personal
- Versicherungen
- Instandhaltung
- Energie

Variable Kosten:

- Einkauf von Lichtmaschinen
- Fracht- und Transport
- Energie (prozessbezogen)
- Schmier- und Reinigungsmittel

Diese Kosten müssen aus der Differenz des aus der Vermarktung erzielbaren Erlöses (aktuell 4,48 €/Stk) und den Demontagekosten (aktuell 1,65 €/Stk) beglichen werden können, um die Demontage von Lichtmaschinen kostenneutral oder gar mit Gewinn betreiben zu können.

Vor dem Hintergrund der dargestellten Berechnungen erscheint es sinnvoll, den zusätzlichen Aufwand zur vollständigen Materialtrennung zu betreiben, da dies voraussichtlich den Gewinn pro Lichtmaschine deutlich steigert. Auf Basis der im Projektverlauf erzielten Ergebnisse und Erfahrungen wird der zusätzliche Aufwand gegenüber dem aktuellen Demontageprozess als deutlich geringer eingeschätzt. Der Mehraufwand an Demontagekosten sollte demnach deutlich unter 1,65 €/Stk. ausfallen. Aufgrund der relativ hohen Differenz (7,19 €/Stk.) der

erzielbaren Erlöse zwischen den unterschiedlichen Demontagestadien liegt in der feiner aufschließenden Demontage ein deutlich höheres Gewinnpotenzial. Daher sollte dies das angestrebte Ziel bei einer industriellen Realisierung einer Demontagefabrik mit dem Ziel der Materialrückgewinnung sein. Ein darüber hinaus gesteigertes Gewinnpotenzial bietet tendenziell der Verkauf demontierter Bauteile mit dem Ziel der Wiederverwendung. Dies würde zudem die im Kreislaufwirtschaftsgesetz verankerte Abfallhierarchie unterstützen.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Faulstich, M., Benker, B., Seelig, J. H., Franke, M., Reh, K. (2015): Demontagefabrik im urbanen Raum - Erweiterte Stoffstromanalyse, Abschlussbericht. Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC), veröffentlicht durch: LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe. 150 S.
- [2] Zeller, T., Birkenfeld, S., Keich, O., Nawoithnig, B., Seelig, J. H. (2016): Demontagefabrik im urbanen Raum - Konzeption und Planung, Abschlussbericht. Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC), veröffentlicht durch: LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe. 221 S.
- [3] Kroop, S., Kaufhold, T., Lohmeyer, R., Mocker, M., Franke, M., u. a. (2014): Analyse kritischer Rohstoffe für die Landesstrategie Baden-Württemberg. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT; Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft, Sulzbach-Rosenberg, Stuttgart. 274 S.
- [4] BMBF (2017): r3, InAccess - Entwicklung eines ressourceneffizienten und wirtschaftlichen Recyclingprozesses für LCD-Bildschirmgeräte [033R088] (Online). URL: http://www.r3-innovation.de/r3/en/navi/index.php?we_objectID=15428 (Abgerufen am: 30.6.2017).
- [5] KOPACEK, B.; KOPACEK, P. (2003): Semi-automatisierte Demontage für Elektronikschrottreycling. e&i Elektrotechnik und Informationstechnik 120 (5), S. 149–153.
- [6] NATKUNARAJAH, N. (2014): Automatisierte Demontage von Lithium-Ionen-Batterien - Ein wichtiger Beitrag zur Rohstoffrückgewinnung. In: 3. Symposium Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen. Teipel, U.; Reller, A. (Hrsg), Fraunhofer Verlag, 496 S.
- [7] FRIEDRICH; SCHÜTTE; HESSELBACH (1997): Abschlussbericht zum Projekt: Automatisierte Demontage elektronischer Altgeräte und Bestimmung der Recyclingmöglichkeiten. Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Osnabrück, 81 S. URL: <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-01540.pdf>
- [8] NAVE, M. (2003): Beitrag zur automatisierten Demontage durch Optimierung des Trennprozesses von Schraubenverbindungen. Dissertationsschrift, Universität Dortmund, 171 S.
- [9] Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), GEPRIS (2006): SFB 281: Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen (Online). URL: <http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/5476059> (Abgerufen am: 29.6.2021).
- [10] Sariana Kunze (2020): Robotik Nachgefragt: Wie die flexible Produktion mit Kollege Roboter gelingt (Online). URL: <https://www.elektrotechnik.vogel.de/nachgefragt-wie-die-flexible-produktion-mit-kollege-roboter-gelingt-a-937772/> .
- [11] Technische Universität Clausthal (2006): Projekt: Robot Football. In: Biennial Report 2004/2005, Department of Informatics, S.72-73, URL: <https://www.in.tu-clausthal.de/fileadmin/homes/Jahresbericht/report-2004-2005.pdf>

- [12] Boston Dynamics (2021): Atlas (Online). URL: <https://www.bostondynamics.com/atlas> (Abgerufen am: 27.6.2021).
- [13] Spitzbart, M.; Schneider, F.; Salhofer, S.; Stengeli, A.; Luger, T. (2008): Semimanuelle Demontage von Elektro(nik)-Kleingeräten. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 22/2008, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 91 S.
- [14] Tucan, K.-P.; Hofer, P.; Schindelbacher, G.; Schumacher, P.; Gschwandtner, R. (2014): Untersuchung der Wirkung der Hauptlegierungselemente bei konventionellen Druckgusslegierungen _ A Focus on the Major Elements of HDPC-Alloys. GIESSEREI RUNDSCHAU 61 (2014), Heft 9/10, S. 303–310 URL: https://pure.unileoben.ac.at/portal/files/936478/Untersuchung_der_Wirkung_der_Hauptlegierungselemente_bei_konventionellen_Druckgusslegierungen.pdf (Abgerufen am 26.09.2021)
- [15] pauly Stahlhandel (2021): Stahldatenbank und Werkstoffsuche (Online). URL: <https://pauly-stahlhandel.com/de/werkstoffe> (Abgerufen am 24.09.21)
- [16] Schrottpreise-Info.de (2021): Schrottpreise: Aktuell für Altmetall und Schrott in einer Tabelle (Online). URL: <https://schrottpreise-info.de/> (Abgerufen am 26.09.21)
- [17] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2021): BDEW – Strompreisanalyse 2021 (Online). URL: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/> (Abgerufen am 26.09.21)
- [18] A. Pott; T. Dietz (2019): Industrielle Robotersysteme – Entscheiderwissen für die Planung und Umsetzung wirtschaftlicher Roboterlösungen. Springer Vieweg, Stuttgart
- [19] Schrott24 GmbH (2021): Altmetallankauf (Online). URL: <https://www.schrott24.de/altmetall-ankauf/> (Abgerufen am 26.09.21)

Anhang

Anhang I: Anleitung zur manuellen Demontage der Lichtmaschine Typ L2 (Valeo 03L 903 023 L)

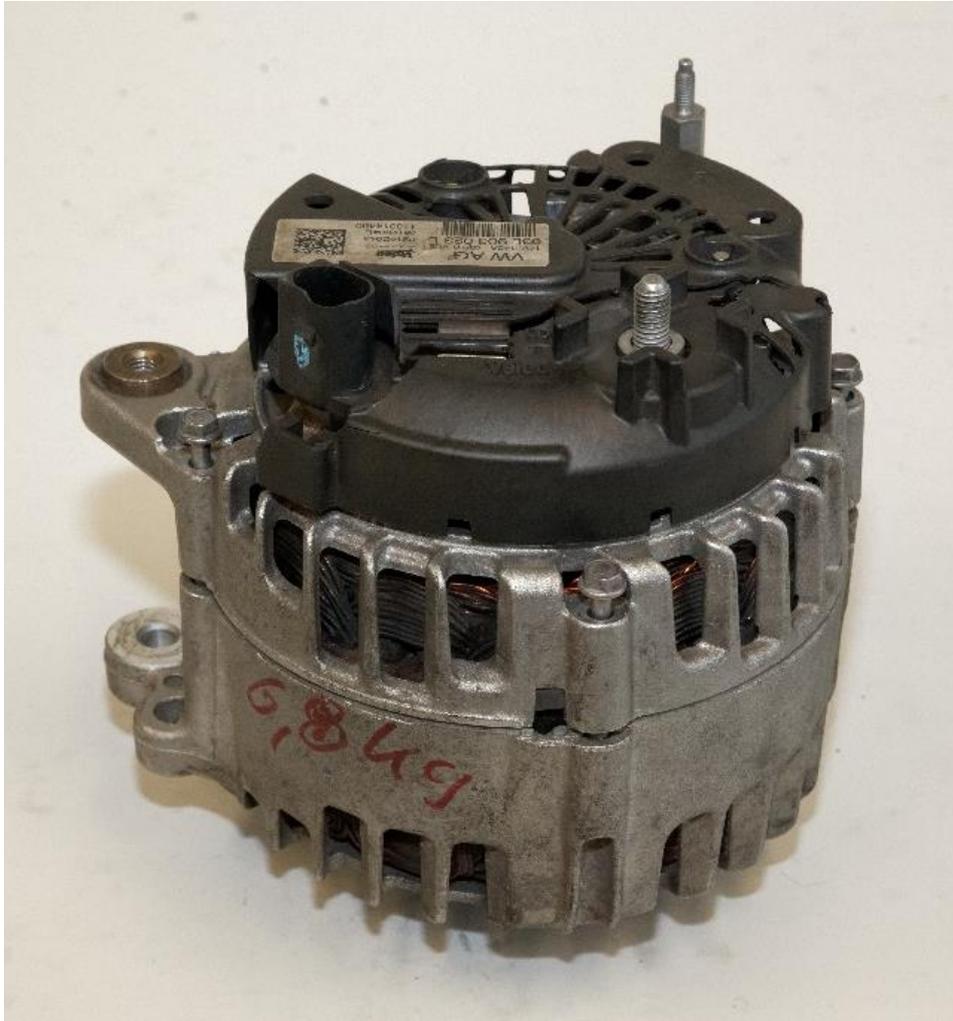


Abbildung 62: Lichtmaschine Typ L2 (Valeo 03L 903 023 L)

Vorbereitung:

- ➔ Eventuell Riemenscheibe mittels Schlagschrauber mit Vielzahn-Bitaufsatz demontieren

1. Entfernung des Kunststoffdeckels vom Gehäuse

- Mittels Hebelwirkung möglichst nah an den beiden Gewinden (in Abbildung 63 rot markiert) ansetzen und die umliegenden gerasterten Lüftungslöcher zum Aushebeln und Lösen des Kunststoffdeckels nutzen

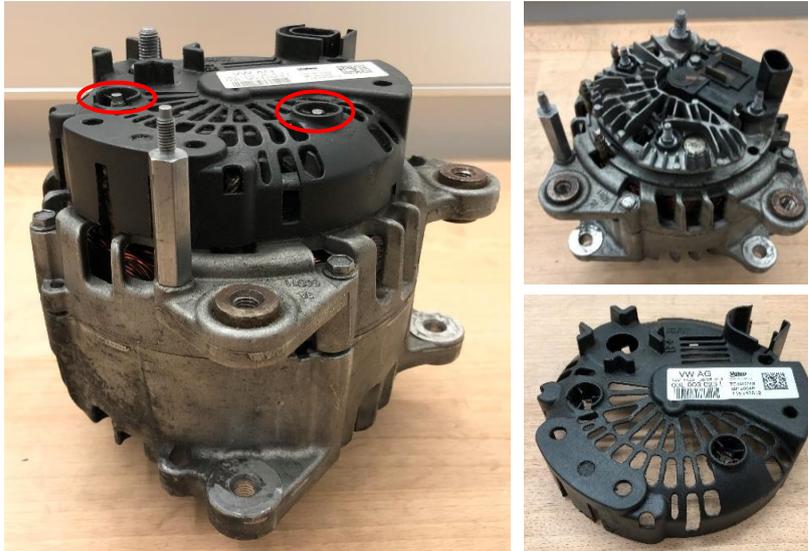


Abbildung 63: links – Lichtmaschine Typ L2 gesamt; rechts – Lichtmaschine ohne Kunststoffdeckel und Bauteil Kunststoffdeckel

2. Lösen und Entfernen von drei Gewindestiften mit Muttern und zwei Außensechskantschrauben

- alle 7mm Maulweite
- 3x M5x36 Gewindestift, mit Mutter (SW7) und Unterlegscheibe + Zapfen als Verbindung der Metallabdeckung für die Leitungen (in Abbildung 64 rot markiert)
- 2x M5x20 Außensechskant-Kombischraube mit Flansch + Unterlegscheibe (Festigkeitsklasse 8.8) zur Befestigung des Multifunktionsregler (in Abbildung 64 grün markiert)

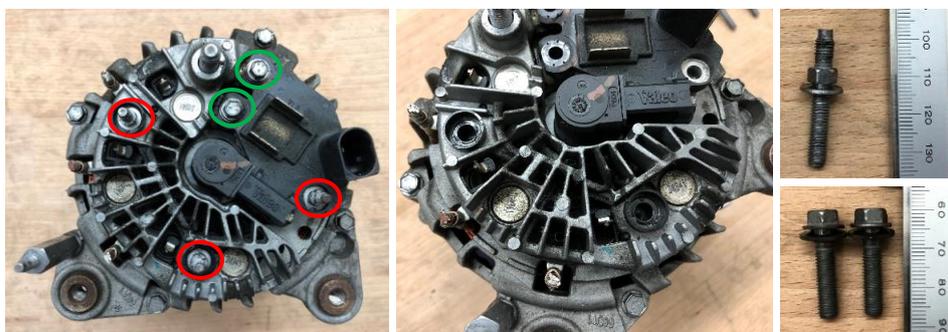


Abbildung 64: links – Lichtmaschine Typ L2 ohne Kunststoffdeckel; rechts – Lichtmaschine ohne Gewindestifte und Außensechskantschrauben und beispielhaft M5x36 Gewindestifte mit Unterlegscheibe und M5x20 Außensechskant-Kombischraube

3. Demontieren des Multifunktionsreglers

- nach oben abziehbar durch Greifen des zentral an der Lichtmaschine gelegenen rundlichen Elements (in Abbildung 65 rot markiert)

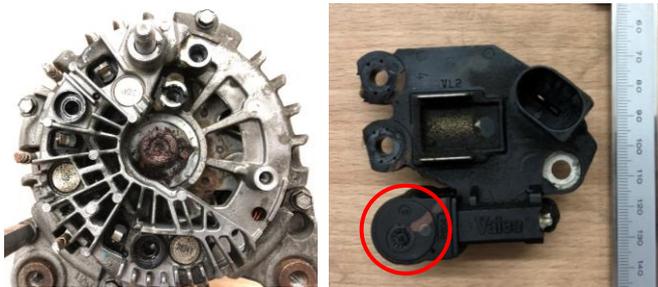


Abbildung 65: links – Lichtmaschine Typ L2 ohne Multifunktionsregler; rechts – Multifunktionsregler

4. Entfernung der zwei schwarzen Kunststoffhülsen aus Gleichrichter

- nach oben abziehbar (Positionen in Abbildung 66 rot markiert)



Abbildung 66: links – Lichtmaschine Typ L2 ohne Kunststoffhülsen; rechts – Kunststoffhülsen

5. Entfernung des Gleichrichters

- nach oben abziehbar durch Greifen oder Hebeln
- Lötverbindungen werden beim Abziehen abgetrennt (in Abbildung 67 grün markiert)
- enthaltene M5x66SW10 sollte möglichst stecken bleiben

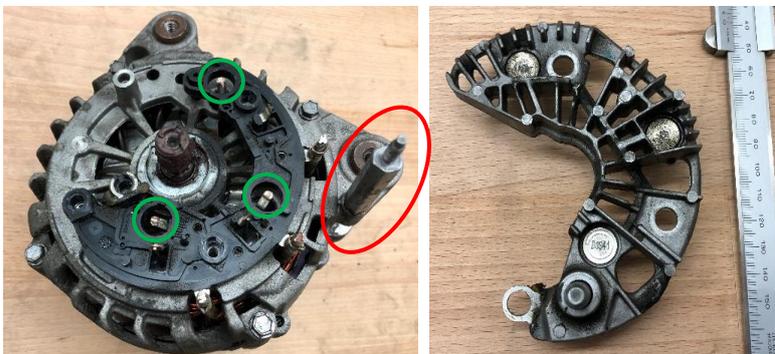


Abbildung 67: links – Lichtmaschine Typ L2 ohne Gleichrichter; rechts – Gleichrichter

6. Herauslösen der M5x66SW10 aus dem Schleifringlagerschild

- M5x66SW10 (Abbildung 68, Position in Abbildung 67 rot markiert)

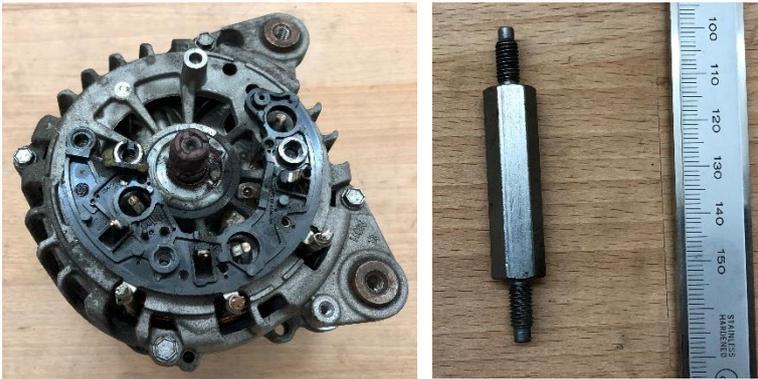


Abbildung 68: links – Lichtmaschine Typ L2 ohne M5x66SW10; rechts – M5x66SW10

7. Trennung der drei Verbindungskabel vom Stator

- Zerschneiden mit Zange unterhalb der Lötverbindungen (Abbildung 69)

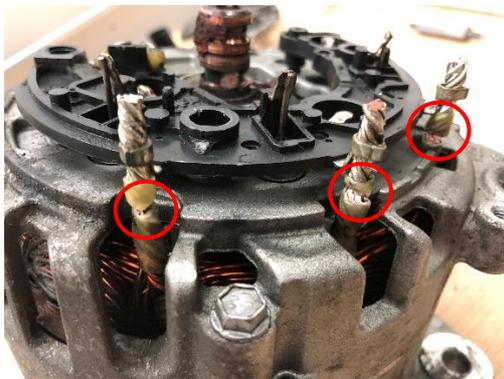


Abbildung 69: Lichtmaschine Typ L2 mit aufgetrennten Verbindungskabeln

8. Entfernung der Kunststoffabdeckung für Leitungen

- nach oben abziehbar durch Greifen oder Hebeln
- Lötverbindungen zu den Dioden werden beim Abziehen abgetrennt (Abbildung 70)



Abbildung 70: Lichtmaschine Typ L2 ohne Kunststoffabdeckung für Leitungen

9. Lösen und Entfernung der vier Verbindungsschrauben des Gehäuses

- 4x M5x52SW8 Außensechskantschraube mit Zapfen (Festigkeitsklasse 9.8) und 8mm Sechskant (Abbildung 71)



Abbildung 71: links – Lichtmaschine Typ L2 ohne Verbindungsschrauben; rechts – M5x52SW8

10. Trennung und Entfernung des Schleifringlagerschilds

- Schleifringlagerschild nach oben abziehen (Greifen am äußeren Rand)
- eventuell an den Verbindungsstellen mit einem Hebel ansetzen und dadurch Schleifringlagerschild vom Antriebslagerschild trennen



Abbildung 72: links - Lichtmaschine Typ L2 ohne Schleifringlagerschild; rechts – Schleifringlagerschild

11. Herauslösen des Stators aus dem Antriebslagerschild

- Stator nach oben herausziehen (leichter Widerstand, da mit Silikon befestigt)



Abbildung 73: links - Lichtmaschine Typ L2 ohne Stator; rechts – Stator

12. Demontage des Rotors aus dem Antriebslagerschild

- mittels Hammerschlägen den Rotor aus dem Schleifringlagerschild austreiben



Abbildung 74: links – Schleifringlagerschild; rechts – Rotor

13. Lösen und Entfernung der vier Innentorxschrauben und der Antriebslagerfixierung

- 4x M5x16 Innentorx T20 mit Zapfen (in Abbildung 75 rot markiert) herausschrauben
- Antriebslagerfixierung nach oben herausnehmen

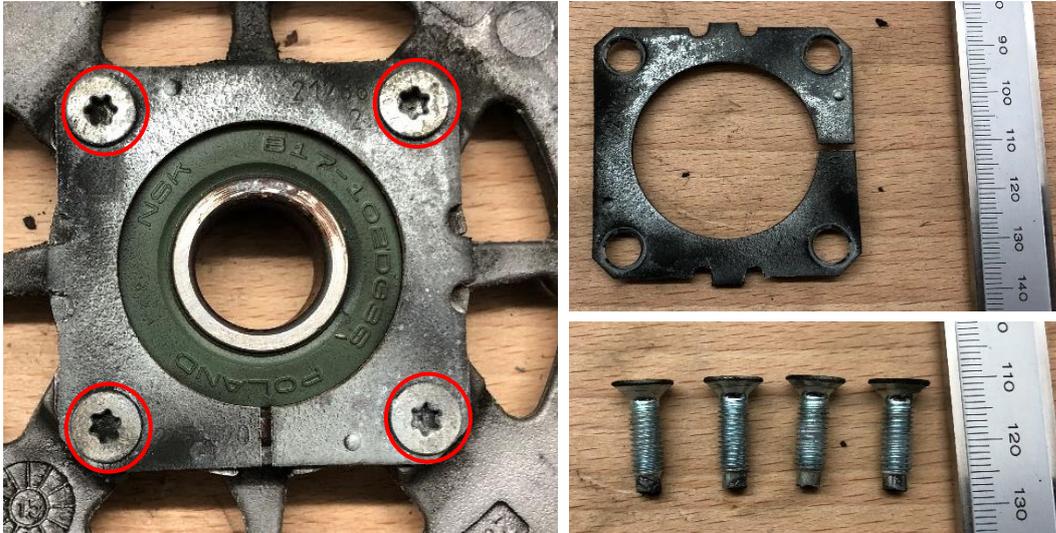


Abbildung 75: links – Antriebslagerfixierung mit Innentorxschrauben; rechts oben – Antriebslagerfixierung; rechts unten – 4x M5x16 Innentorx T20 mit Zapfen

14. Entfernung des unteren Kugellagers aus dem Antriebslagerschild

- Unteres Kugellager heraus schlagen



Abbildung 76: links – Antriebslagerschild; rechts – unteres Kugellager

Anhang II: Zusatzinformationen zur Analytik

Tabelle 6: Geräteparameter für die ICP-OES PlasmaQuant PQ 9000 Elite

Parameter	Al	Cu	Fe 1	Fe 2
Torch Außen	Sialon-Keramik	Quarz	Quarz	Sialon-Keramik
Torch Innen	Aluminiumoxid	Quarz	Quarz	Aluminiumoxid
Injektor	Aluminiumoxid 2,0 mm	Quarz 2,0 mm	Quarz 2,0 mm	Aluminiumoxid 2,0 mm
Sprühkammer	Zyklonkammer mit Tauchrohr	Zyklonkammer mit Tauchrohr	Zyklonkammer mit Tauchrohr	PFA-Kammer
Zerstäuber	Parallelpfad, Burgener PFA250	SeaSpray- Zerstäuber	SeaSpray- Zerstäuber	Parallelpfad, Burgener PFA250
Plasmaleistung	1300 W	1200 W	1200 W	1200 W
Kühlgasfluss	15 l/min	14 l/min	14 l/min	14 l/min
Hilfsgasfluss	0,75 l/min	0,75 l/min	0,75 l/min	0,75 l/min
Zerstäubergasfluss	0,75 l/min	0,50 l/min	0,50 l/min	0,75 l/min
Pumprate	1ml/min	1 ml/min	1 ml/min	1 ml/min

Verwendete Aufschlussverfahren für die verschiedenen Legierungen zur Messung mit der ICP-OES PlasmaQuant PQ 9000 Elite:

Al-Legierungen

Die Proben für die Aluminiumlegierungen sind von den Komponenten Antriebslagerschild, Diodenplatte und Schleifringlagerschild. Der Aufschlussprozess wird in einem PTFE-Becher vorgenommen. Es wurden 0,5 g Probe in 6 ml NaOH (10 mol/l) und 1 ml Wasserstoffperoxid ($w(\text{H}_2\text{O}_2) = 30\%$) erwärmt und gelöst, es entsteht eine sirupartige Konsistenz. Diese wird mit 30 ml Wasser aufgefüllt und vermengt. Eine Mischung aus 25 ml Salpetersäure ($w(\text{HNO}_3) = 40\%$) und 25 ml Salzsäure ($w(\text{HCl}) = 18\%$) wird hinzugegeben. Diese Lösung wird erwärmt bis alle Salze gelöst sind und in einen 250 ml Messkolben umgefüllt. Diesen bis zur Markierung auffüllen.

Cu-Legierungen

Die Messungen für die Kupferlegierungen wurden an der Wicklung des Stators, der Ringspule des Rotors sowie des Kupferschleifring des Rotors durchgeführt. Beim Aufschlussprozess wurden 0,5 g der Proben in 20 ml Salpetersäure ($w(\text{HNO}_3) = 40\%$) unter leichter Erwärmung gelöst. Diese Lösung wird in einem 250 ml Messkolben gegeben und bis zur Markierung verdünnt.

Fe-Legierungen

Der Aufschlussprozess für die Eisenlegierungen wurde an den Proben der Riemenscheibe, der Antriebslagerfixierung, dem Kern des Stators sowie am Nordpol, Südpol und der Welle des Rotors durchgeführt. Für die Eisenlegierungen wurden 2 Aufschlüsse durchgeführt.

Prozess 1: In eine Mischung aus 15 ml Salzsäure ($w(\text{HCl}) = 37\%$), 5 ml Salpetersäure ($w(\text{HNO}_3) = 70\%$) und 10 ml Wasser werden 0,5 g der Probe unter leichtem Erwärmen gelöst. Diese wird in einen 250 ml Messkolben verdünnt und gegebenenfalls filetiert.

Prozess 2: 0,5 g der Probe werden bei leichtem Erwärmen in eine Mischung aus 10 ml Salzsäure ($w(\text{HCl}) = 37\%$), 5 ml Salpetersäure ($w(\text{HNO}_3) = 70\%$) und 25 ml Wasser aufgelöst. Danach werden 3 ml Fluorwasserstoffsäure ($w(\text{HF}) = 48\%$) hinzugegeben. Die Lösung wird in einem Kunststoff-Messkolben auf 250 ml verdünnt. Diese Bestimmung ist gültig für Al, Nb, Si, Ta, Ti, W, Zr.

Tabelle 7: Verwendete Wellenlänge bei der ICP-OES [in nm]

Element	Al-Matrix	Cu-Matrix	Fe-Matrix
Al		396,152	396,152
As		188,979	
Be		313,107	
Bi		190,174	
Ce	418,660	418,660	394,275
Co	228,615	238,892	228,615
Cr	267,716	205,552	267,716
Cu	324,754		324,754
Fe	259,940	259,940	
Mg	279,553		
Mn	257,610	259,372	293,306
Mo			202,030
Nb			210,942
Ni	231,604	231,604	231,604
P	178,224	178,224	178,224
Pb		220,353	220,353
Se		196,028	
Si	251,611	251,611	251,611
Sn		189,927	189,927
Ta			240,063
Te		238,578	
Ti		336,112	336,112
V			309,311
W			207,911
Zn	206,200	206,200	206,200
Zr			339,198