

## **Schlussbericht**

**SmartBodySynergy - Smarte Rohbauzellen für einen synergetischen Hochlauf elektrifizierter Fahrzeuge**



**Teilvorhaben: Entwicklung von Schlüsseltechnologien  
in der Füge- und Messtechnik sowie dezentraler  
Steuerungs- und Logistikkonzepte**

## Inhalt

1. Grundlagen des Projekts .....	3
1.1. Aufgabenstellung .....	3
1.2. Voraussetzungen des Vorhabens .....	4
1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens .....	4
1.4. Stand der Technik.....	5
1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
2. Projektergebnisse und Verwertung.....	9
2.1. Erzielte Projektergebnisse.....	9
2.1.1 Arbeitspaket 1: Konzeption einer modularen Rohbauzelle .....	9
2.1.2 Arbeitspaket 2: Entwicklung von plug&produce-fähigen Vorrichtungen und Flex-Fügeköpfen	11
2.1.3 Arbeitspaket 3: Entwicklung von integrierbarer Mess- und Prüftechnik sowie robusten Qualitätsregelkreisen und dynamischen Qualitätsstrategien .....	18
2.1.4 Arbeitspaket 4: Entwicklung eines dezentralen Steuerungs- und Logistikkonzepts für Einzelstückfluss trotz Taktauflösung im Rohbau .....	27
2.1.5 Arbeitspaket 5: Wirtschaftlichkeitsbewertung .....	37
2.2. Verwertung der Ergebnisse.....	40
2.3. Inzwischen bekannt gewordene relevante FE-Ergebnisse von dritter Seite .....	40
2.4. Veröffentlichungen.....	40
3. Quellenverzeichnis .....	41

Zuwendungsempfänger: <b>Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Fakultät für Maschinenbau Institut für Produktionstechnik (wbk) Kaiserstraße 12 76131 Karlsruhe</b>	Förderkennzeichen: <b>01MX15007D</b>
Teilvorhaben: <b>Entwicklung von Schlüsseltechnologien in der Füge- und Messtechnik sowie dezentraler Steuerungs- und Logistikkonzepte</b>	
Projektleiter: <b>Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza</b>	Tel.: <b>+49 721 608-44017</b> Fax: <b>+49 721 608-45005</b> Email: <b>Gisela.Lanza@kit.edu</b>
Laufzeit des Vorhabens: <b>01.01.2016 – 31.12.2018</b>	

## 1. Grundlagen des Projekts

### 1.1. Aufgabenstellung

Ziel des Gesamtvorhabens SmartBodySynergy ist die Entwicklung von modularen Rohbauzellen, die durch einen wirtschaftlichen Mix aus vorgehaltener Flexibilität und vorgedachter Wandlungsfähigkeit in der Lage sind, alle Derivate einer Fahrzeugarchitektur (d.h. unabhängig vom eingesetzten Antriebsstrang) wirtschaftlich in einem Rohbau zu fertigen und somit maximale Synergien zu den bestehen Produktionsstrukturen und -anlagen zu heben. Damit verbunden sind die in Abbildung 1 gezeigten Teilziele, die sich nur durch die neuen Möglichkeiten der Industrie 4.0 bzgl. Informationsverarbeitung, Steuerungskonzepten und Komponentenvernetzung/-kommunikation (über CPS / CPPS) erreichen lassen.

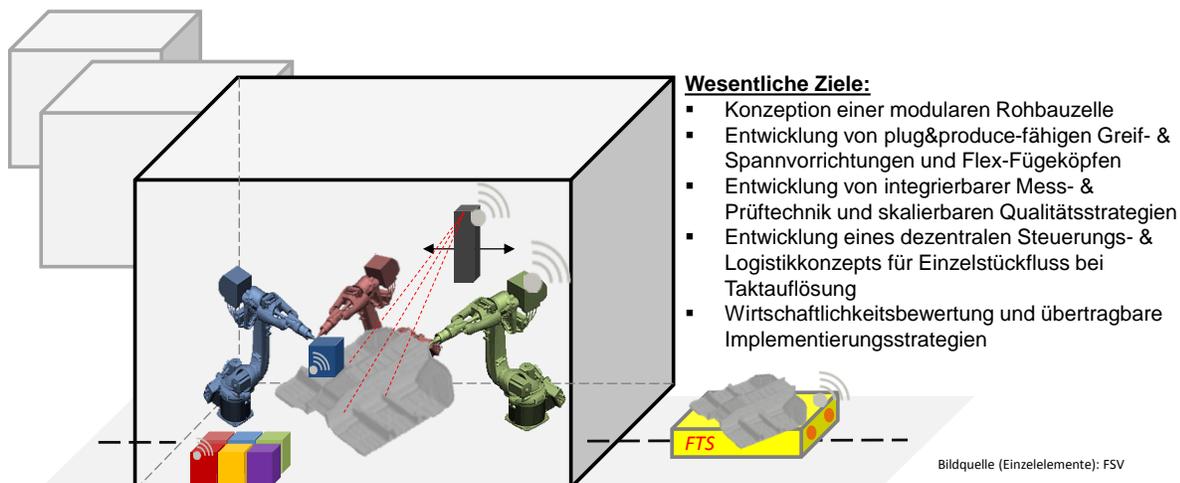


Abbildung 1: Schema und Ziele des Vorhabens SmartBodySynergy

Das vorliegende Teilvorhaben zielt auf die Erforschung der dazu notwendigen Schlüsseltechnologien in der Fügetechnik sowie in der Qualitätssicherung ab. Des Weiteren werden neue durch Industrie 4.0 ermöglichte Steuerungs- und Logistikkonzepte für einen Einzelstückfluss im Rohbau ohne starre Takte methodisch vorbereitet und die Methodik zur Wirtschaftlichkeitsbewertung aufgebaut.

## 1.2. Voraussetzungen des Vorhabens

Das wbk Institut für Produktionstechnik arbeitet im Forschungsbereich „Produktionssysteme“ (von Frau Prof. Lanza) seit Jahren im Bereich der Planung, Bewertung und Optimierung von dynamischen Produktionssystemen (z.B. im SpC BMBF-Projekt Effect 360°, im SpC BMBF-Projekt ProBat, im BMBF-Projekt AnStrom, im BMBF-Projekt VireS, im Projekt EfistO der Baden-Württemberg Stiftung) [Lan-12], [Lan-13a], [Lan-14] sowie dem Qualitätsmanagement und der Qualitätssicherung (bspw. BMBF FunkProMikro, DFG TRR 10). Das Institut verfügt über Kompetenzen im Bereich der Produktionsplanung [Lan-12], [Lan-14], der Simulationstechniken in Modellierungs- und Bewertungstools wie auch in der Bewertung der Anlauffähigkeit [Lan-06]. Die Ertüchtigung von unreifen Prozessen durch die Integration von Fertigungsmesstechnik [Lan-10a], [Lan-13b] ist ebenso Bestandteil aktueller und abgeschlossener Arbeiten wie die Auswahl passender Mess- und Prüfmittel sowie deren Bewertungsmöglichkeiten [Köl-14], [Col-14]. Insbesondere bei Fähigkeitsbewertungen für hochgenaue Messtechniken über Normale konnte das Institut sehr gute Ergebnisse erzielen [Lan-10b], [Lan-11]. Im Rahmen des DFG Sonderforschungsbereiches TRR 10 wurde gemeinsam mit dem Forschungsbereich „Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung“ (von Herrn Prof. Fleischer) die vorrichtungsfreie Montage leichter Aluminiumrahmenstrukturen auf Basis bauteilimmanenter Maßstäbe für die Klein- und Mittelserie erforscht. Zum Einsatz kamen kooperierende Industrieroboter, mit deren Hilfe die am Pressenaustritt gerundeten Strangpressprofile geführt, bearbeitet und montiert wurden [Fle-12], [Fle-13]. Das wbk hat die Arbeiten zu Industrie 4.0 in einem bereichsübergreifenden Forschungsschwerpunkt gebündelt. Ein konkretes Beispiel dazu ist das gemeinsam mit dem Fraunhofer IOSB durchgeführte BMBF-Projekt „Secure Plug and Work“. Darin werden intelligente Komponenten für die verschiedenen Ebenen der Fertigungshierarchie entwickelt. Dies geschieht unter Nutzung offener Standards, die bereits heute in der Industrie eingesetzt werden. Das wbk und die Dürr AG verantworten außerdem das Innovationsfeld Produktion im Spitzencluster „Elektromobilität Süd-West“.

## 1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde zur Prüfung des Projektfortschritts und der Präsentation der Zwischenergebnisse in halbjährliche Meilensteine eingeteilt (Abbildung 2). Abgesehen vom ersten Meilenstein, der als Kickoff zu verstehen war, waren zu jedem Meilenstein konkrete Ergebnisse zur Abstimmung und Freigabe vorgesehen. Dadurch wurde sichergestellt, dass jedem Teilprojekt rechtzeitig die benötigten Vorarbeiten aus anderen Teilprojekten zur Verfügung stehen.

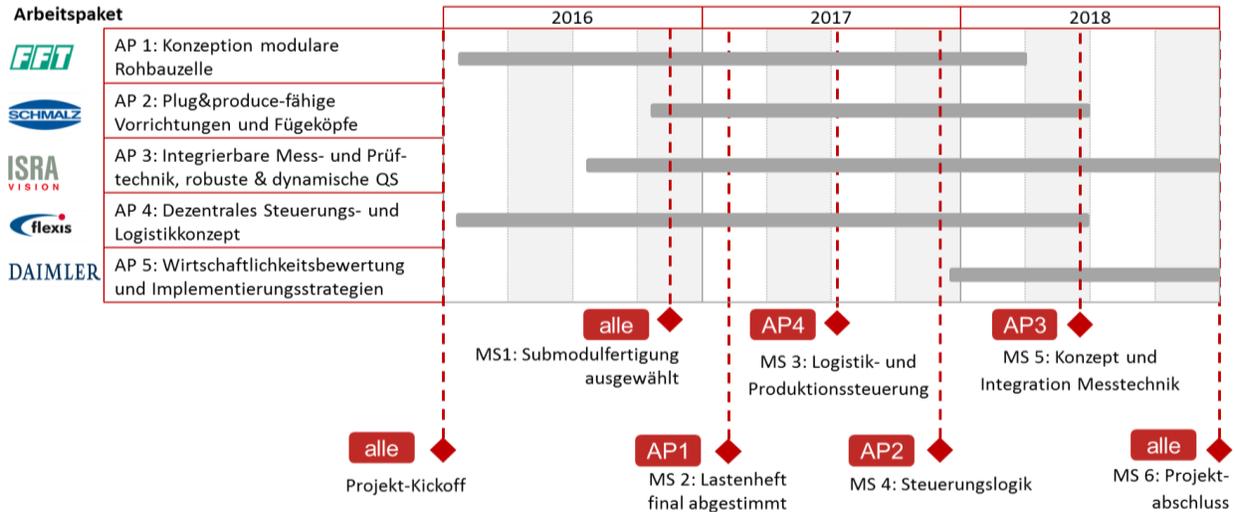


Abbildung 2: Arbeits- und Zeitplan

Der Meilensteinplan des 2. Konsortialtreffens wurde nach Rücksprache mit dem Projektträger angepasst. Die Verzögerung im ersten Projektjahr konnte während der Restlaufzeit aufgeholt werden. Das Vorliegen des Projektabschlussberichts zum letzten Konsortialtreffen war nicht erforderlich. Die im Vorhaben beschriebenen Ziele wurden im vollen Umfang erreicht. Es gibt keine Abweichungen oder Anmerkungen.

## 1.4. Stand der Technik

### Vorrichtungsloses Fügen:

Im Bereich des Großserien-Karosseriebaus werden heute standardmäßig starre Vorrichtungen eingesetzt. Bisher eingesetzte, starre Vorrichtungen lassen sich in Spezialvorrichtungen und in Gruppen- Baukasten- und modulare Vorrichtungen einteilen. Spezialvorrichtungen sind hierbei auf ein einziges Bauteil ausgelegt und lassen somit keine Flexibilität zu, wohingegen die übrigen Vorrichtungstypen eine geringe Flexibilität durch separates Umrüsten zulassen [Hes-97], [Tru-94]. Um die Präzision der starren Vorrichtungen beizubehalten und dennoch eine mögliche Variantenvielfalt zu realisieren, gibt es Ansätze für flexible Systeme. Nach [Hes-97] sind flexible Vorrichtungen dadurch gekennzeichnet, dass sie sich durch einen minimalen Umrüstaufwand an verschiedene Werkstücke oder Baugruppen anpassen lassen (vgl. auch [Bak-13]). Problem hierbei ist die Begrenzung der Genauigkeiten bei der Anordnung durch Abweichungen der angenommenen von der realen Bauteilgeometrie, durch Greiffehler und durch Fehler verursacht aufgrund der Durchbiegung der zu fügenden Bauteile [Fle-12]. Wenig verbreitete, flexible Vorrichtungen sind nach [Shi-95] und [Shi-02] die phasenändernden Vorrichtungen, welchen den Phasenübergang bestimmter Materialien zur Fixierung von Bauteilen nutzen und anpassungsfähige Vorrichtungen, die Eigenschaften von Formgedächtnislegierungen ausnutzen, um Bauteile zu klemmen. Mit Abstand am bedeutendsten und weitesten verbreitet ist die Gruppe der programmierbaren Vorrichtungen. Diese können automatisiert an unterschiedliche Werkstücke und Derivate einer Werkstückgruppe angepasst werden. Eine Vielzahl von einzelnen Spannelementen kann hierbei unabhängig voneinander positioniert werden und somit ein flexibles Greifen realisieren [Shi-95], [Shi-02].

Zur vorrichtungslosen Anordnung mehrerer Bauteile zueinander existieren bereits unterschiedliche Lösungskonzepte. Im Flugzeugbau wurde eine Lösung mittels Standard-Industrierobotern und einem berührungslosen Messsystem entwickelt. Basis des Konzepts sind

Montagebohrungen, die in beide zu fügenden Bauteile eingebracht werden und im Soll-Montagezustand genau übereinander liegen [Web-05], [Jay-07], [Jay-10]. Ebenfalls Montagebohrungen in die ein zusätzlicher Montagezapfen eingebracht wird, wurde in [Wal-00] eingesetzt. Hierbei werden im Montageprozess die Bauteile mit den Bohrungen auf einen Zapfen geschoben und somit entsprechend zueinander angeordnet. Aufgrund des benötigten Zapfens, der im weitesten Sinne eine Vorrichtung darstellt kann hierbei allerdings nur eingeschränkt von einer vorrichtungsfreien Montage gesprochen werden. Die vorrichtungsfreie Blechmontage mit virtuellem Modell ist Gegenstand der Untersuchungen von [Sta-00]. Durch Abgleich des virtuellen Modells mit einem realen, von 2D-Kameras erfassten Bauteils, können diese zueinander ausgerichtet und anschließend gefügt werden. Ein großer Nachteil dieser Methode ist die lange Dauer des Ausrichtvorgangs. Eine Ausrichtung mittels Industrierobotern und der Lasertriangulation wurde in [Par-00] und [Par-02] untersucht. Mittels ortsfest angebrachter Lasertriangulationssensoren wird die Bauteiloberfläche hierbei erfasst und die Istanordnung berechnet. Daraus abgeleitet wird anschließend die Zielanordnung der jeweiligen Bauteile zueinander. Flexible Greifer an Industrierobotern zur vorrichtungsfreien Montage ermöglichen die Aufnahme unterschiedlich geformter Bleche und ermöglichen somit ein gewisses Maß an Flexibilität. Dem gegenüber stehen allerdings die bisher erreichten geringen Messgenauigkeiten von  $\pm 0,5\text{mm}$  [Plu-96], [Plu-97], [Bon-00], [Bon-03]. Speziell im Karosseriebau ist die Montage mittels Best-Fit-Algorithmus weit verbreitet. Hierbei wird der Spalt zwischen zwei zu fügenden Bauteilen durch entsprechende Sensorik ermittelt und anschließend mit einem Algorithmus bestmöglich, iterativ angepasst und korrigiert. Nachteilig bei diesem Verfahren ist, dass es immer exakt auf eine Bauteilpaarung abgestimmt werden muss und die Flexibilität somit beschränkt wird [Kuh-10], [Thy-10].

Bisherige Konzepte zeigen, dass flexible Greif- und Spannsysteme in der Forschung und Industrie untersucht und angewendet werden, jedoch Einschränkungen durch fehlende Präzision und niedrige Prozessgeschwindigkeiten bestehen. Hier gilt es Ansätze zu finden und umzusetzen, um die Defizite auszugleichen und die Flexibilität dennoch in vollem Umfang zu gewährleisten, sodass die Variantenvielfalt zukünftiger Komponenten im Rohbau bewältigt werden kann.

#### Flexible Qualitätssicherung:

Zur Überwachung des Produktionsprozesses werden seit geraumer Zeit inline-fähige Messtechniken im Rohbau eingesetzt [Wen-07]. Neben Messzellen, welche offline betrieben werden und in denen mit Hilfe taktiler oder hochgenauer optischer Messtechnik stichprobenartig Karosserien oder Komponenten geprüft werden [Mod-13], [Wit-14], können zwei verschiedene Möglichkeiten der Qualitätssicherung mit Hilfe von inline Messtechnik im Rohbau identifiziert werden:

- Integration der Sensoren in Zellen, die auch andere Aufgaben (bspw. Fügeoperationen) ausführen und die Bewertung der Merkmale im Prozess oder direkt nachgelagert ermöglichen. Die Sensoren können dabei an Roboter oder fest in Gestellen montiert werden [Mod-13].
- Separate Messzellen, die in die Fertigungsstraße integriert sind. Dabei werden im Fertigungstakt mehrere Merkmale mit Hilfe von Sensoren an Robotern oder Sensoren an festen Gestellen geprüft. Eine Ausführung als fester Messtunnel ist ebenso möglich [Wen-07], [Wir-08], [Bey-14].

In beiden Fällen werden die zuvor definierten Qualitätsmerkmale („Features“) an allen Produkten gemessen und mit Templates verglichen. Features sind dabei die Identifikation und das Bewerten

von Komponenten sowie die prozessintegrierte oder die nachgelagerte Prüfung von Fügeverfahren. Insbesondere müssen beim Bewerten von Karosseriekomponenten geometrische Merkmale, Berandungen, Kanten oder Beschnittpunkte gemessen werden [Sch-13]. Zu Qualitätsmerkmalen, welche verschiedene Fügeverfahren wie das Kleben, Löten, Punkt- oder Laserschweißen sowie mechanische Fügeverfahren auszeichnen, sind die Bewertung von Kleberaunen (Geometrie, Homogenität, Position etc.) [Isr-11], die Prüfung von Schweißnähten (Lage, Geometrie) [Sch-11] und insbesondere das Prüfen von Zapfen, Bolzen, Löchern, Nieten, Clips oder Schrauben zu zählen [Sch-13]. Auch komplexe Messaufgaben, wie das Messen von Schnitten, Oberflächen oder Freiformflächen müssen mit Hilfe von Messtechnik prozessintegriert gelöst werden [Mod-13]. Messprinzipien, welche die genannten Features unter den herausfordernden Umgebungsbedingungen (Staub, Öle, Luftfeuchtigkeit, Temperaturgradienten) zufriedenstellend bewerten können, lassen sich den Gruppen des Laserlichtschnitts [Mod-13], den Kamerasystemen [Wir-08] und thermographischen Prinzipien [Sch-11] zuordnen. Taktile Verfahren wurden im Prozess weitestgehend ersetzt [Gom-10]. Aktuell eingesetzte Messtechniklösungen sind allerdings meistens auf eine konkrete Anwendung, d.h. auf ein Derivat und eine Prüfschärfe abgestimmt. Insbesondere Sensoren, die an feste Gestelle montiert werden, sind im jeweiligen Aufgabenspektrum sehr begrenzt. Zukünftige Messlösungen müssen wandlungsfähiger einsetzbar werden, indem beliebige Messpunkte und variable Qualitätsmerkmale (z.B. Schweißnaht, Klebnaht) auf unterschiedlichen Materialien in verschiedenen Umgebungen bewertet werden („Messtechnik-to-go“).

#### Produktionssteuerung:

Um bei hohen Stückzahlen eine effiziente Produktion zu ermöglichen, kommt meist das Fließprinzip zum Einsatz. Optimal abgestimmte Fließmontagesysteme (in diesem Sinne wird der Rohbau ebenfalls als eine Montage betrachtet) zeichnen sich durch kurze Durchlaufzeiten bei hoher Kapazitätsauslastung der Betriebsmittel aus [Kra-00]. Fließmontagesysteme können in Einprodukt- und Mehrproduktmontagelinien unterschieden werden. Dabei kann für Montagelinien mit mehreren Varianten, also im Mehrproduktfall, weiter differenziert werden in Multi-Model-Montagelinien mit losweiser Montage, bei der zwischen den Produktvarianten umgerüstet wird und Mixed-Model-Montagelinien mit gemischter Montage, bei der die Varianten ohne Umrüstvorgänge auf derselben Linie gefertigt werden. Beim letzteren Fall kann auch von „Losgröße 1“, „Variantenfließmontage“ oder „Modell-Mix Montagelinie“ gesprochen werden [Gan-08], [Kra-00], [Hu-11]. Diese Produktionsvariante stellt den Fokus im beantragten Vorhaben SmartBodySynergy dar, denn in der Automobilproduktion ist heute aus Effizienzgründen (vgl. Lean Production) vorwiegend die Fließmontage anzutreffen. Die aktuellen Strukturen sind durch starre Linienkonzepte gekennzeichnet und damit an die Anforderungen einer Großserienproduktion angepasst. Um den neuen Herausforderungen der kundenindividuellen Massenproduktion im Automobilbau gerecht zu werden, werden heutzutage verschiedene Layouts und Systemkonfigurationen eingesetzt [Hu-11]. Wird ein großes Volumen von Produkten mit einer hohen Anzahl an Anpassungsmöglichkeiten hergestellt, wird dies als variantenreiche Serienproduktion bezeichnet [Vol-09]. Während es für die Endmontage bereits vielversprechende Ansätze zur Flexibilisierung und Erhöhung der Wandlungsfähigkeit gibt (vgl. BMBF Projekt Effect 360° im Spitzencluster Elektromobilität oder den Forschungscampus ARENA 2036 oder [Ros-08]), muss bei der gewünschten Wandlungsfähigkeit für den heute starr-automatisierten (und allenfalls in einzelnen Stationen flexibilisierten) Rohbau ein richtungsweisender Paradigmenwechsel erfolgen, den das Vorhaben unterstützen wird.

Existierende Ansätze für die variantenreiche Serienproduktion gelten vorwiegend für Varianten mit vergleichsweise geringen technologischen Unterschieden (wie sie bisher im Automobilbau vorhanden sind). Varianten mit gravierenden Unterschieden wie elektrische Derivate haben unweigerlich abweichende Prozessschritte und -zeiten zur Folge. Bspw. versagen bestehende Algorithmen zur Sequenzierung von seriellen Mehrproduktlinien bei zu großen Taktzeitunterschieden der einzelnen Varianten mit teils starken Auswirkungen auf Auslastung, Ausbringung und Mitarbeiterbelastungen (vgl. sog. „Driften“ in der Montage und Springereinsätze [Gan-11]). Die Mehrzahl der Ansätze konzentriert sich auf die Fahrzeugendmontage. Flexibilisierungsansätze der Endmontage sind nicht auf einen (aus Gründen der Präzision und des Einsatzes thermischer Füge-technik) automatisierten Rohbau übertragbar. Aus diesem Grund müssen neue technologische Ansätze in der Automatisierung und Betriebsstrategien für den Rohbau vor dem Hintergrund der Möglichkeiten der Industrie 4.0 abgeleitet werden.

### 1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde ausschließlich in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern durchgeführt.

AP 1: Die Konzeption der Rohbauzelle wurde im gesamten Konsortium gemeinschaftlich durchgeführt. Insbesondere in Vorarbeit für die APs 2 und 3 wurden gemeinsam mit Daimler, FFT, ISRA und Schmalz erste Lösungsansätze erarbeitet und Karosserieteile festgelegt, anhand derer der Aufbau der Rohbauzelle validiert wurde.

AP 2: In AP2 fand im Bereich der Proessentwicklung eine enge Zusammenarbeit mit Daimler statt. Im Rahmen von Projekttreffen bei Daimler wurden die Anforderungen anhand des realen Karosserierohbaus hergeleitet, sodass anschließend durch das wbk Konzepte erarbeitet werden konnten. Aus diesen wurde mit Unterstützung von Daimler das finale Zielkonzept ausgewählt. Bei der Umsetzung des Konzeptes konnte auf die Erfahrung von FFT im Greifer- und Vorrichtungsbau zurückgegriffen werden. Konkret wurden hieraus Auflage und Spannungspunkte innerhalb der Greifer abgeleitet. Die Auswahl eines Messsystems für die gegebenen Anforderungen (Messvolumen, Genauigkeit) wurde gemeinsam mit ISRA durchgeführt. Bei der Inbetriebnahme des Versuchsstandes wurden die Kommunikation mit dem Messsystem sowie die korrekte Parameterauswahl von ISRA unterstützt.

AP 3: Es wurde in AP3 eng mit Daimler und ISRA zusammengearbeitet, um die Anforderungen an die Qualitätssicherung im noch aktuellen Rohbau der Gegenwart systematisch aufzuarbeiten und bestehende Engpässe zu identifizieren. Dazu wurde mit Daimler der Karosseriebau zweier Modellreihen im Werk Sindelfingen hinsichtlich bestehender QS-Stationen und QS-Abläufe untersucht. Weiterhin wurden zusammen mit Daimler aktuelle Spezifikationen der Toleranzen ausgetauscht. Zusätzlich wurde die Integration von Messtechnik in der praktischen Umsetzung analysiert, um eine praktische Einteilung in verschiedene Integrationsgrade vornehmen zu können. Weiterhin wurde mit ISRA zusammen darüber beratschlagt, wie das von ISRA zur Verfügung gestellte Messsystem idealerweise verwendet wird. Dazu wurden übliche Störquellen und Unsicherheitseinflüsse diskutiert, um eine optimale Bedienung vor Ort am KIT zu gewährleisten.

AP 4: Die Datenaufnahme für die Produktionsplanung (Beschreibung der zu fügenden Varianten, der Vorranggraphen sowie der geschätzten Bearbeitungszeiten) erfolgte in enger Abstimmung mit Daimler und flexis. Für den Aufbau der Ablaufsimulation wurden zudem nötige Füge-technologien sowie die erforderliche Produktionskapazität mit Daimler ermittelt. Der Aufbau der Ablaufsimulation sowie der Produktionsplanung wurde iterativ fortlaufend mit Daimler und flexis diskutiert und entsprechend des Projektstandes angepasst.

AP 5: Für die Wirtschaftlichkeitsbewertung wurde eine gemeinsame Masterarbeit mit Daimler durchgeführt. Die wesentlichen Szenarien wurden anhand der Ablaufsimulation abgeleitet und bei Daimler mit einer erweiterten Lebenszykluskostenrechnung bewertet.

## 2. Projektergebnisse und Verwertung

### 2.1. Erzielte Projektergebnisse

#### 2.1.1 Arbeitspaket 1: Konzeption einer modularen Rohbauzelle

Der Betrachtungsrahmen für die Arbeitspakete wurde in mehreren multilateralen Arbeitstreffen vor allem mit Daimler und FFT auf die Konzeption einer mehrstufigen Geozelle für die Geometriebildung eingegrenzt. Aktuell wird in den Geozellen für je einen Fertigungsschritt eine Geometrie erzeugt; die Anforderung im Projekt erweitert dies nun zunächst auf zwei Fertigungsschritte. Dadurch ergibt sich die Anforderung einer hohen Flexibilität in Verbindung mit einer hohen geometrischen Genauigkeit, welche gesteigerte und heute nicht erfüllbare Herausforderungen für die Greif- und Spanntechnik sowie die Qualitätssicherung stellen. Die Fügefolge beschreibt die notwendigen Fertigungsschritte und liegt für den im Konsortium betrachteten Heckwagen einer aktuellen E-Klasse (Baureihe W213/S213) vor. Im nächsten Schritt werden aus dieser Fügefolge die beiden Stufen der Geozellen ausgewählt, die in der mehrstufigen Geozelle abgebildet werden sollen. Für die Gesamtkonzeption wurde ein ganztägiges Arbeitstreffen mit allen Projektpartnern am Standort der Fa. FFT in Fulda abgehalten. Als Rahmenbedingungen für die Zellkonzeption wurde festgelegt, dass zwischen 5 und 30 Aufträge je Stunde bearbeitet und insgesamt 4 unterschiedliche Varianten abgebildet werden sollen. Innerhalb des Projekts werden nach Abstimmung vorrangig Punktschweiß- und Stanznietverbindungen betrachtet. Zudem wurden je Arbeitspaket konkrete Informationsbedarfe (Inputs) identifiziert. Die Bedarfe wurden anschließend bei den entsprechenden Partnern formuliert; der Prozess der Zusammenführung der erhaltenen Informationen ist noch nicht abgeschlossen.

Im Bereich der Produktionssteuerung (Arbeitspaket 4) wurden beispielsweise folgende Informationen als notwendig für eine praxiserichte Auslegung der Produktionssteuerung ermittelt, welche zu großen Teilen erhoben wurden:

- Fertigungszellen: Prozesszeiten, Verfügbarkeiten, Ausstattung mit Fügetechnologien
- Layout zur Ableitung von Transportzeiten
- Arbeitsschritte (benötigte Fertigungszellen, Vorgänger-/Nachfolger-Beziehungen z.B. in Form eines Vorranggraphen)
- Rohbauspezifische Restriktionen (z.B. Beschränkung aufeinanderfolgend eingesetzter Fügetechnologien z.B. aufgrund von Wärmeeinfluss an der Fügestelle)
- Aufträge: typische Auftragsstrukturen (Produktmix, früheste Start- und spätestmögliche Endzeiten, „Kosten“ einer Verspätung)

Innerhalb von AP1 wurden verschiedene Greifer- und Endeffektortechnologien im Allgemeinen verglichen und bewertet (Abbildung 3). Darüber hinaus wurden mögliche Endeffektoren für die Einsatzbereiche im Projekt identifiziert. Hierbei wurde auf die Bearbeitungsschritte (Supermarkt, Geozelle, Ausfügezelle) und unterschiedlich steife Bauteile eingegangen. Für die unterschiedlichen Aufgaben und Bauteildimensionen wurden bevorzugte Greiferkonzepte ausgewählt. Im Bereich des Supermarktes (Siehe Abbildung 4) werden hochflexible Greifer zum Einsatz kommen, auf den Greifern der Geozelle werden die Bauteile mit Positionierstiften ausgerichtet und dann an Spannstellen fixiert. Die Greiferentwicklung in der Geozelle bildet die

Grundlage für die Greifer in den Ausfügezellen, da die Anforderungen an den Greifer in letzteren niedriger sind. Hierdurch wird die jeweils nötige Greifpräzision und Bauteilfixierung erreicht.

Um ein gemeinsames Verständnis zu schaffen, wurde zunächst das zu steuernde Produktionssystem definiert. Die in der Submodulfertigung für Heck- und Vorderwagen bereits heute vorhandene Variantenvielfalt führt zu unterschiedlichen Taktzeiten innerhalb der Nebenlinie, wodurch Produktivitätsverluste entstehen. Das Konzept für eine flexible Fertigung von Heck- und Vorderwagen ist in Abbildung 4 dargestellt. Fokus für die Produktionssteuerung in SmartBodySynergy ist die Steuerung des Materialflusses zwischen dem Bereich „GEO Heckwagen“ und „GEO Vorderwagen“ sowie „Ausfügen“. In den Geometriezellen (Geo-Zellen) werden mithilfe weniger Fügepunkte Einzelbleche geometrisch fixiert, sodass die Geometrie beim Transport erhalten bleibt. In den Ausfügezellen (Respot Bereich) werden die restlichen Fügepunkte entlang der definierten Geometrie gesetzt. Je nach benötigter Füge-technologie werden unterschiedliche Ausfügezellen angefahren. Es findet also ein regelmäßiger Transport von Teil-Zusammenbauten zwischen „GEO Heckwagen“ und „Ausfügen“ sowie zwischen „GEO Vorbau“ und „Ausfügen“ statt.

Greifprinzip/Greifer	3-Finger	Traction Gripper	Oktopusgreifer	Niederdruck-flächengreifer	Saugnapfgreifer	Magnetgreifer	Elektrostatischer Greifer	Elektroadhäsionsgreifer	Gecko Greifer	Gefriergreifer	Flex Shape Gripper	Matrixgreifer	Nadelgreifer
Reproduzierbarkeit	++	--	++	+	+	+	--	--	+	--	--	0	--
Positioniergenauigkeit	++	--	++	+	+	+	-	--	++	--	--	0	--
Kosten	+	/	/	+	++	-	-	/	/	/	/	0	+
Bauteilbeschädigung	-	--	-	++	++	-	++	+	++	-	++	+	--
Flexibilität	+	+	+	0	+	-	0	+	-	--	++	+	--
Werkstoffunabhängigkeit	++	+	++	+	++	--	--	--	+	-	++	++	-

++ Sehr gut      + Gut      / Keine Aussage  
 -- Sehr schlecht      - schlecht      0 neutral

Abbildung 3: Vergleich von Endeffektortypen

Die in das System in Losgröße 1 eingebrachten Produktionsaufträge besitzen eine größtenteils feste Bearbeitungsreihenfolge je Variante, die an einigen wenigen Stellen eine Wahlfreiheit der Bearbeitungsschritte erlaubt. Die Problemstellung der Auftragseinplanung wurde gemeinsam mit flexis in die Klasse der Job Shop Probleme [Pin-16] eingeordnet. Die Planungsaufgabe der Produktionssteuerung besteht darin, einen optimalen Belegungsplan der Fertigungszellen und fahrerlosen Transportfahrzeuge (FTF) zu finden, sodass die logistischen Ziele (z.B. Durchlaufzeit, Servicegrad, Bestände) möglichst gut erfüllt werden. Um die Anforderung einer echtzeitfähigen Steuerung erfüllen zu können, wurde in Abstimmung mit flexis die Verwendung von Heuristiken als zielführender Ansatz für eine praxisgerechte Lösung festgelegt. Aufgrund der Vielzahl möglicher Belegungspläne ist ein mathematisch exaktes Verfahren nicht in der Lage, kurzfristige Anpassungen realisieren zu können. Spätere Untersuchungen sollen durch eine nachgelagerte Optimierung zeigen, welche Lücke zwischen der heuristischen und der optimalen Lösung besteht.

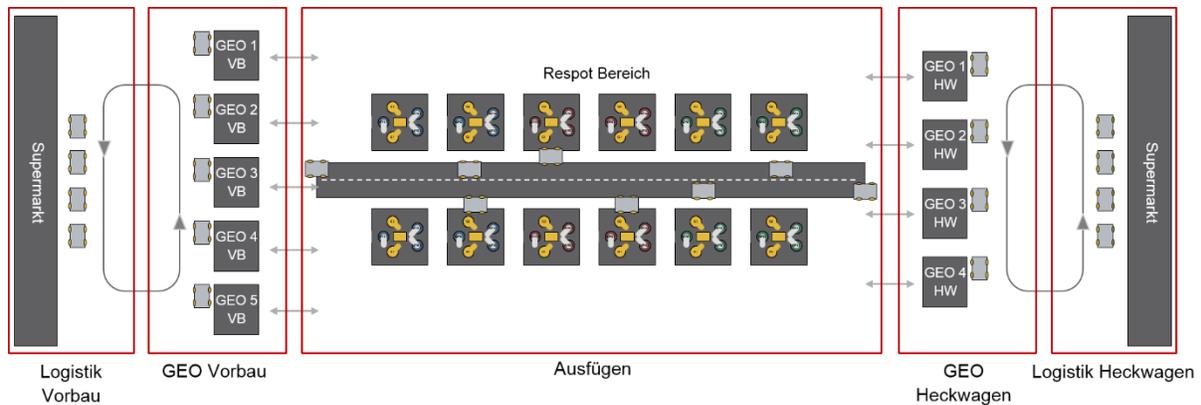


Abbildung 4: Zukünftige Submodulfertigung Heck- und Vorderwagen (Daimler)

Das Konzept des vorrichtungsfreien Fügens mit Unterstützung optischer Messtechnik wurde am wbk im Sonderforschungsbereich Transregio 10 an, mit Markern versehenen, Profilen erprobt. Mithilfe des Regelkreises konnte eine deutlich genauere Positionierung der Fügepartner erreicht werden als die unregelmäßige, gesteuerte Genauigkeit der Roboter es zuließe.

Als Benchmark für die Geozellen wurde die Durchführung von vier aufeinanderfolgenden Stufen aus der Fügefolge der aktuellen E-Klasse in zwei flexiblen Geozellen ausgewählt. Von den Fügestufen sollen jeweils zwei pro Geozelle für unterschiedliche Fahrzeugderivatendurchgeführt werden können.

**2.1.2 Arbeitspaket 2: Entwicklung von plug&produce-fähigen Vorrichtungen und Flex-Fügeköpfen**  
Zunächst wurden ausgehend von starren Vorrichtungen die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Vorgehensweisen bei der Entwicklung vorrichtungsfrei arbeitender Geozellen erarbeitet und miteinander verglichen. Hierbei wurden Konzepte berücksichtigt, in denen die bauteiltragenden Greifer sich untereinander oder gar nicht verriegeln. Vorteile für die verriegelungsfreien Konzepte ergeben sich dadurch, dass die mechanische Komplexität der Greifer sinkt und somit weniger Randbedingungen für den flexiblen Einsatz von Greifern beachtet werden müssen. Weiterhin könnte durch den Einsatz verriegelungsfreier Greifer in Zukunft der Ausgleich von Bauteiltoleranzen im Rahmen einer Best-Fit Anordnung möglich sein. Durch Entfall der Verriegelung der Greifer untereinander wird weiterhin Greifergewicht eingespart.

Die Konzepte wurden auf die Anwendbarkeit bei unterschiedlich steifen Bauteilen hin analysiert. Im ausgewählten Konzept werden die Bauteilgreifer an Roboterarmen befestigt und mit Hilfe eines Regelkreises zueinander positioniert. Zudem wurde ein Grobkonzept für die Regelung (Abbildung 5) aufgestellt und mit der Identifikation der relevanten Parameter sowie Messgrößen begonnen.

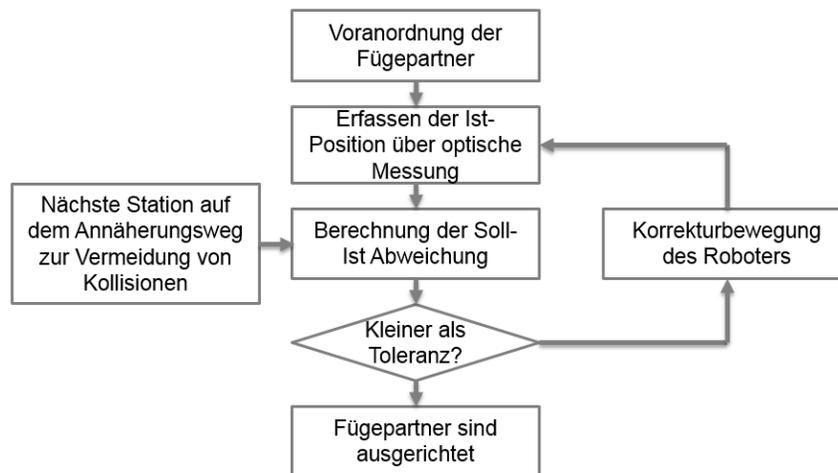


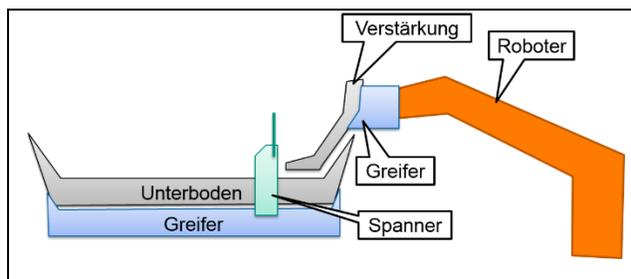
Abbildung 5: Abstrahiertes Regelungskonzept

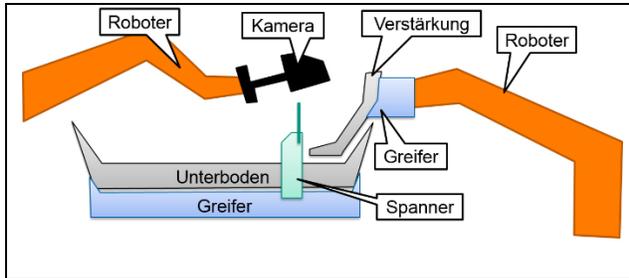
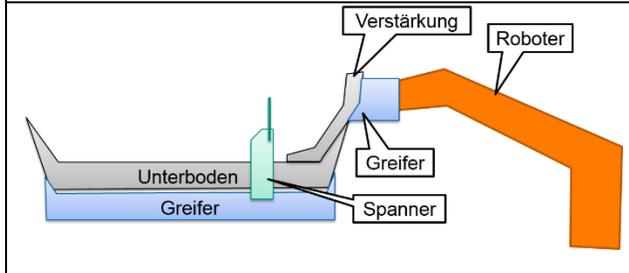
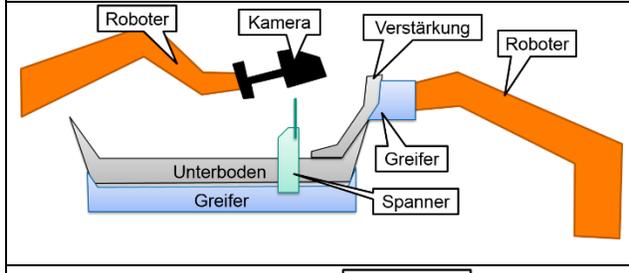
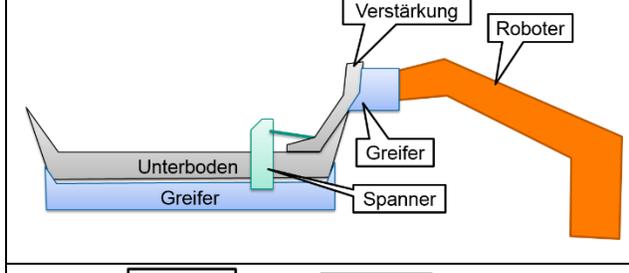
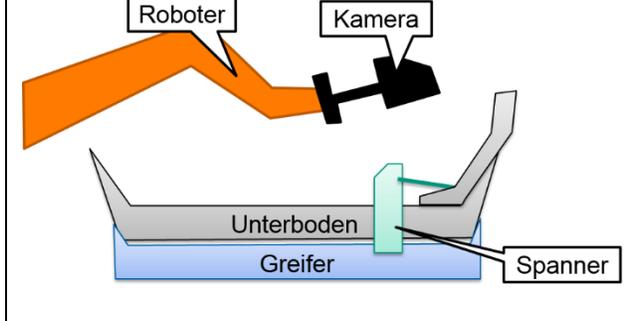
Für die Konzeption des vorrichtungsfreien Fügens wurden gemeinsam mit Daimler Anforderungen an den Prozess erarbeitet. Die wichtigsten Ergebnisse waren:

- Die Teile sollen in Rahmen/Greifern gehalten werden damit ein standardisierter Flansch verwendet werden kann.
- Die Greifer sollen wechselbar an Robotern befestigt sein. Hierdurch sind sie austauschbar und die Position der Fügepartner im Raum kann für eine bessere Zugänglichkeit mit den Fügewerkzeugen frei festgelegt werden. Es kann bei keinem der Fügepartner eine präzise Positionierung vorausgesetzt werden.
- Es stehen im späteren Fertigungsprozess mindestens jeweils ein Roboter für die Fügepartner sowie ein Roboter für das Fügewerkzeug und ein Roboter für das Messsystem zur Verfügung.
- Die Fügepartner sollen nach der Positionierung durch Spanneinheiten gegeneinander fixiert werden.

Bei der Auswahl des Messsystems zur Bestimmung der Bauteilposition in Zusammenarbeit mit ISRA hat sich ergeben, dass statische Messsysteme aufgrund der räumlichen Verteilung der zu messenden Bauteilmerkmale und dem daraus folgenden Messbereich nur unter enormem Kostenaufwand und Flexibilitätsverlust einsetzbar sind. Folglich ist ein Robotergeführtes Messsystem erforderlich. Dies ist typischerweise eine Triangulationskamera, die die räumliche Position einer Bohrungsmitte im Raum bestimmen kann. In Tabelle 1 wird ein Überblick über das Prozesskonzept gegeben:

Tabelle 1: Übersicht über die Prozessschritte

	<p>Die beiden Fügepartner werden gesteuert zueinander geführt. Hierbei wird ein geringer Sicherheitsabstand (z.B.: 10mm) eingehalten. Durch den geringen verbleibenden Verfahrweg für die Korrektur entstehen nur wenige Fehler, die von der Messung nicht berücksichtigt werden.</p>
---	---

	<p>Mithilfe des optischen Messsystems wird die Relativposition der beiden Fügepartner zueinander vermessen. Hierfür werden mehrere Bauteilmerkmale gemessen und daran eine Position der idealisierten Teile angenähert. Hieraus wird der Verfahrensweg des beweglichen Teils berechnet.</p>
	<p>Einer der Roboter verfährt das von ihm gehaltene Teil sodass der im zweiten Schritt bestimmte Abstand ausgeglichen wird. Das zweite Teil wird am gleichen Ort gehalten.</p>
	<p>Mithilfe der Kamera kann ggf. die Position der Teile zueinander erneut überprüft und korrigiert werden. Dieser Schritt kann einer Steigerung der Genauigkeit oder der Qualitätssicherung dienen.</p>
	<p>Die pneumatischen Spanner schließen sich und fixieren die Teile zueinander. Anschließend kann der zuführende Greifer des kleineren Teils von der Baugruppe entfernt werden um Fügwerkzeugen gute Zugänglichkeit zu bieten.</p>
	<p>Die Positionierung der Bauteile kann für die Qualitätssicherung ggf. erneut vermessen werden.</p>

Aufgrund des Einsatzes der bewegten, robotergebundenen Kamera muss die Bauteilpositionsvermessung zu diskreten Zeitpunkten stattfinden. Der Regelalgorithmus ist folglich zwischen den Positionsmessungen aktiv. Die Bauteile stehen zum Zeitpunkt der Messung still. Zur Bauteilpositionierung werden aus den Merkmalsmessungen die Positionen der beiden Bauteile berechnet. Aus der Ist-Position des vorläufig stationären Bauteils wird anschließend die Sollposition des bewegten Teils berechnet. Dieses wird anschließend verfahren. Bei Erreichen

der korrekten Position wird diese ggf. nochmals kontrolliert und die Pneumatikspanner werden geschlossen.

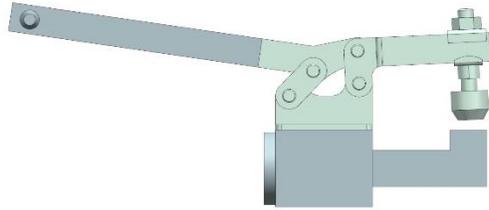


Abbildung 6: Spannklammer

Vorteile dieses Fügeprozesses und Konzepte für das flexiblere gegenseitige Fixieren der Teile wurden im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit [Mer-17] untersucht. Hierbei wurden alternative Konzepte zur Aufnahme von Fügekräften untersucht und Möglichkeiten zur flexiblen Positionierung von Spanneinheiten erarbeitet. Untersuchungsgegenstand war ein universeller Spanngreifer, die Montage von Spannern an einem der vorhandenen Greifer (wie im Demonstrator umgesetzt) oder die Verwendung von Spanneinheiten, die durch einen zusätzlichen Roboter an den Spannstellen angesetzt werden können (Spannklammern, siehe Abbildung 6). Weiterhin wurden Zelllayouts für vorrichtungsfreie Fügezellen und Prozessablaufpläne erarbeitet (Abbildung 7).

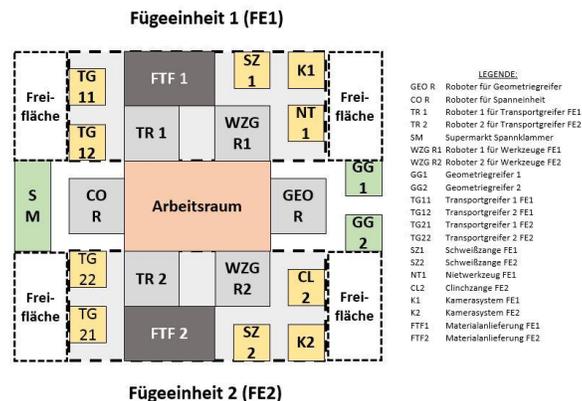


Abbildung 7: Beispielhaftes Zelllayout

Im Rahmen von AP2 wird am wbk eine Demonstratorzelle für das Vorrichtungsfreie Fügen aufgebaut. Es wird das gemeinsam mit Daimler erarbeitete Konzept unter Berücksichtigung von studentischen Arbeiten umgesetzt. Für den Demonstratorprozess wurden im Projektkonsortium Teile des Heckwagens ausgewählt. Die ausgewählten Teile sind in Abbildung 9 dargestellt. Es soll an eine große Unterbaugruppe ein Verstärkungsteil im Bereich des Stoßdämpferdoms angefügt werden. In Abbildung 8 wird das Verstärkungsteil händisch in die Nähe des großen Unterbodenbauteils gehalten.

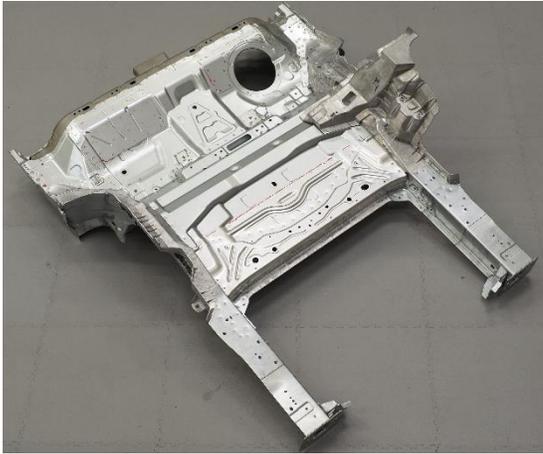


Abbildung 9: Übersicht über die Bauteile



Abbildung 8: Anzufügendes Verstärkungsteil

Aufgrund der Notwendigkeit einen Roboter zur Kamerahandhabung einzusetzen wird im Demonstrator vom ursprünglichen Plan beide Fügepartner mit Robotern zu handhaben abgewichen. Stattdessen wird einer der Fügepartner in einer Vorrichtung gehalten, die lose auf dem Hallenboden abgestellt wird. Hierdurch werden keine genaue Positionierung und keine hohe Haltesteifigkeit erreicht wodurch das Verhalten eines Roboters gut angenähert wird oder sogar noch größere Abweichungen eingebracht werden. Ein Roboter der Zelle hält den Greifer für das bewegte Teil, der zweite führt die Kamera.

Die beiden Teile werden in Greiferrahmen gehalten. Zur Fixierung der Teile in den Greiferrahmen werden Handspanner eingesetzt. Die Greiferrahmen wurden unterstützt von einer studentischen Abschlussarbeit [Haa-17] konzeptioniert und umgesetzt. Als günstigstes Konzept hat sich erwiesen, das Unterbodenteil von oben in den Greiferrahmen einzulegen und das Verstärkungsteil von der Fahrzeugaußenseite aus zu greifen. Beide Teile werden von manuellen Spannern in den Greiferrahmen fixiert. Die Pneumatischen Spanneinheiten sind am Greiferrahmen für die Unterbodenbaugruppe angefügt. Um das Einlegen der Unterbodenbaugruppe in den Greifer zu ermöglichen sind zwei der Spanner pneumatisch verfahrbar. Die beiden Greifer wurden zum Test an Robotern montiert und verfahren (Abbildung 10). Um einen der Roboter anschließend für die Kamerahandhabung nutzen zu können wird der große Greifer im weiteren Verlauf auf dem Hallenboden abgestellt.

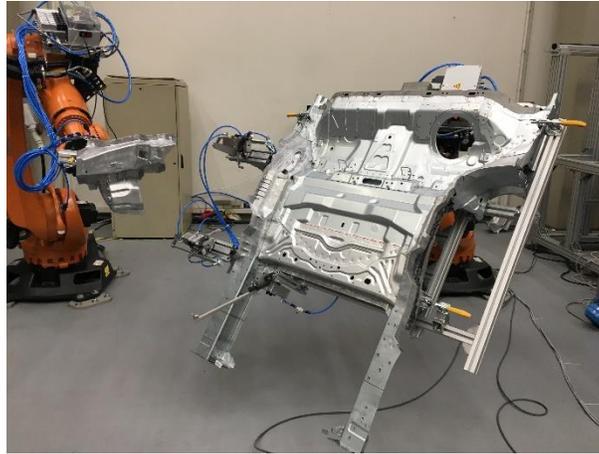


Abbildung 10: Bauteile in Greiferrahmen

Für die Handhabung der Greiferrahmen wurde eine Roboterzelle mit zwei Kuka KR180 R2500 aufgebaut. Diese sind mit jeweils einer Ventilinsel gegenseitig und mit dem Mess-PC für das Kamerasystem vernetzt. Auf dem Mess-PC ist die Software RoVis von ISRA installiert, das die Bestimmung der Merkmalskoordinaten relativ zur Kamera übernimmt. Die Kameraposition kann aus der Robotersteuerung ausgelesen werden. Die Roboter können über Ethernet-KRL vom PC aus verfahren werden. Der Prozess wird von einem Python-Programm („Communicator“) gesteuert. Dieses gibt den Robotern Fahrbefehle zur Positionierung des Verstärkungsteils und der Kamera und nimmt mit Hilfe von RoVis Positionsmesswerte auf. Über das PROFINET-Bussystem der Robotersteuerung löst es pneumatische Bewegungen aus. Die Verknüpfungen innerhalb der Zelle sind in Abbildung 11 dargestellt.

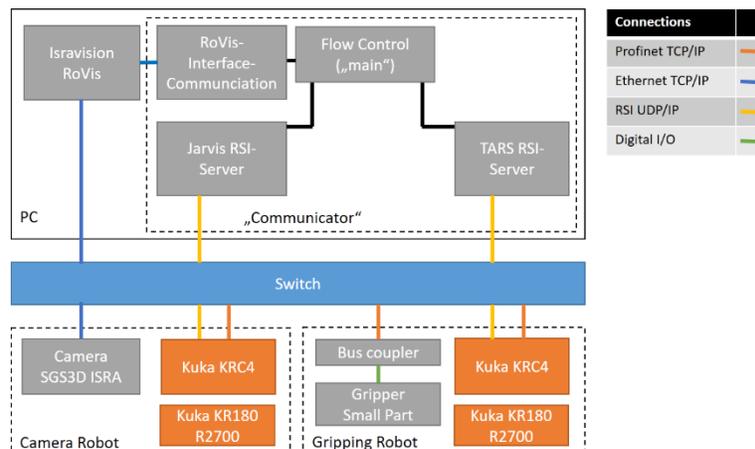


Abbildung 11: Zellvernetzung

Zu Beginn des Regelalgorithmus liegt ein Referenzdatensatz der Sollgeometrie, bestehend aus sechs Punkten, vor und die Teile befinden sich in Vorposition. Diese ist für beide Teile nur ungenau bekannt. In der Vorposition werden die Koordinaten von charakteristischen Bohrungen der Teile vermessen. Anschließend werden zwei Koordinatenverschiebungen und Rotationen durchgeführt. Zuerst wird der Referenzdatensatz so verschoben, dass die drei entsprechenden Punkte möglichst wenig von den realen Bohrungspositionen des Unterbodens abweichen (Siehe Abbildung 12). Danach wird die Verschiebung der drei realen Bohrungspositionen des

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Verstärkungsteils, die nötig ist um möglichst wenig von den entsprechenden verschobenen Referenzpunkten abzuweichen, berechnet. Aus dieser Punktverschiebung wird abschließend die Roboterbewegung des Handlingroboters bestimmt.

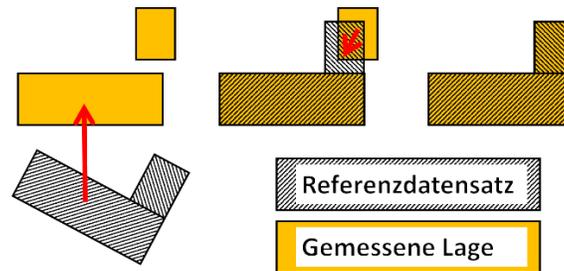


Abbildung 12: Verschiebung der Koordinatendaten

In Abbildung 13 sind die verschiedenen Stadien des Zyklus abgebildet. Zu Beginn des realen Zyklus wird eine Vorposition eingenommen, bei der zwischen den beiden Teilen an ihrer Fügestelle noch genug Sicherheitsabstand besteht, um Kollisionen durch Ungenauigkeiten sicher zu verhindern (Abbildung 13.1). Nach der Vermessung der Relativposition (Abbildung 13.2) und der Berechnung der Korrekturbewegung mit einem Least-Square Schätzer führt einer der Roboter die Korrekturbewegung durch. Hierbei wird nur eine kleine Strecke, die etwa dem Sicherheitsabstand entspricht zurückgelegt. Dadurch sind die Positionsfehler durch Wärmedehnung des Handlingroboters annähernd gleich mit den Fehlern während des Vermessens und werden kompensiert (Abbildung 13.3). Nach dem Ausrichten kann mithilfe der integrierten Messtechnik die Lage geprüft und gegebenenfalls ein weiterer Regelzyklus ausgelöst werden. Die Position der Teile zueinander wird vor dem Ausfügen mithilfe von Spanneinheiten fixiert (Abbildung 13.4). Abschließend kann die Übereinstimmung der Bauteilposition mit der Sollposition geprüft werden.

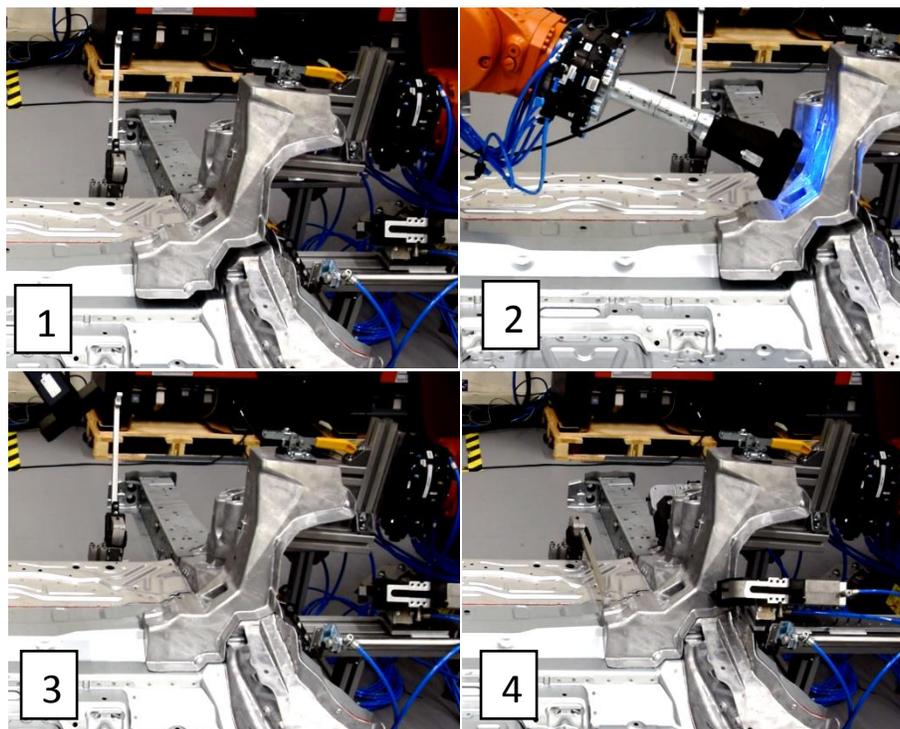


Abbildung 13: Ausrichtung des Verstärkungsteils in vier Schritten

Um die Eignung des Prozesses für die Produktion zu untersuchen, wurden Messungen in der Versuchszelle durchgeführt. Mithilfe des Koordinatenmessarms wurde die Genauigkeit der Ausrichtung der Teile vor dem Spannen bestimmt. Hierzu wurden charakteristische Merkmale vermessen und anschließend die Abweichung von der Referenzposition bestimmt. Bei der Versuchsdurchführung wurde in kurzer zeitlicher Abfolge ein Referenzteil in die Zelle eingelegt, mit Faro Messarm und Roboter vermessen und anschließend ein getrennter Teilesatz mit den Robotern ausgerichtet und mit dem Koordinatenmessarm vermessen. Diese Ausrichtung wurde drei Mal durchgeführt. Zur Bewertung der Ausrichtung wird die Abweichung des Schwerpunktes des Verstärkungsteils von seiner Sollposition herangezogen. Das Ergebnis der Vermessung mit dem Koordinatenmessarm ist in Abbildung 14 dargestellt. Nach der Positionierung der Bauteile zueinander wurden zusätzlich mit dem Messroboter die Ausrichtmerkmale gemessen. Hierbei wurde keine nennenswerte Abweichung von der Sollposition festgestellt. Dies deutet, in Verbindung mit der im Verlauf der Versuche zunehmenden Ungenauigkeit, darauf hin, dass die Ungenauigkeit der Ausrichtung durch Fehler in der Merkmalpositionsbestimmung hervorgerufen werden. Für eine Serienzelle müsste also das Positionsmesssystem noch verbessert werden, indem beispielsweise der Roboter temperaturkompensiert wird oder ein stationäres Messsystem eingesetzt wird.

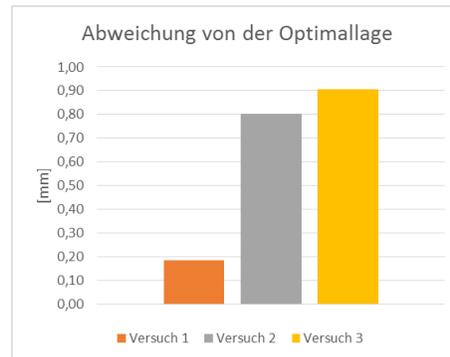


Abbildung 14: In zeitlicher Nähe an die Sollvermessung kann eine gute Genauigkeit erreicht werden

Die Dauer des vorrichtungsfreien Ausrichtprozesses hängt stark vom verwendeten Messmittel ab. Bei der Verwendung einer robotermontierten Kamera werden die zu messenden Merkmale nacheinander angefahren. Hier ist also auch die Anzahl der Messmerkmale ausschlaggebend. Ein einzelner Messvorgang besteht aus der Anfahrt des Merkmals, einer Wartezeit um Schwingungen im Roboter abklingen zu lassen und dem eigentlichen Messvorgang. Letzterer benötigt mit unter einer Sekunde nur einen geringen Anteil der Gesamtzeit. Für die Ausschwingzeit wurde ein Richtwert von zwei Sekunden angenommen. Der gesamte Ausrichtprozess benötigte in der Versuchszelle 45 Sekunden wovon nur ein sehr geringer Teil auf das eigentliche Messen und Ausrichten und der Großteil auf die Bewegung des Messroboters entfielen.

### 2.1.3 Arbeitspaket 3: Entwicklung von integrierbarer Mess- und Prüftechnik sowie robusten Qualitätsregelkreisen und dynamischen Qualitätsstrategien

Zu Beginn des Arbeitspaketes 3 wurde ein QS Konzept entwickelt. Dieses wird im Folgenden beschrieben. Dazu wurden im Bereich der Qualitätssicherung zuerst qualitätskritische Bauteilmerkmale im automobilen Rohbau für die Erarbeitung des Lastenhefts identifiziert. Insbesondere geometrische Merkmale, Berandungen, Kanten und Beschnittpunkte müssen beim Bewerten von Karosseriekomponenten gemessen und geprüft werden. Qualitätsmerkmale verschiedener Fügeverfahren wie das Kleben, Lötten, Punkt- oder Laserschweißen sowie

mechanische Fügeverfahren wurden bewertet. Größere Qualitätsschwankungen dieser Merkmale, die mit gesteigerter Flexibilität und flexiblen Fügeoperationen einhergehen können, müssen geprüft, geregelt und kompensiert werden. In gemeinsamen Arbeitstreffen mit ISRA Vision wurden dazu messtechnische Lösungen zur Prüfung qualitätskritischer Merkmale erörtert.

Ein ganzheitlicher Konzeptvorschlag zur Qualitätssicherung ist in Abbildung 15 dargestellt. Durch prozessnahe Regelkreise sollen Defekte vermieden oder frühzeitig detektiert werden, um Ausschuss möglichst zu vermeiden. Erhobene Qualitätsdaten sollen in einer Datenbasis für den Einsatz flexibler und skalierbarer Qualitätssicherung aggregieren und analysiert werden.

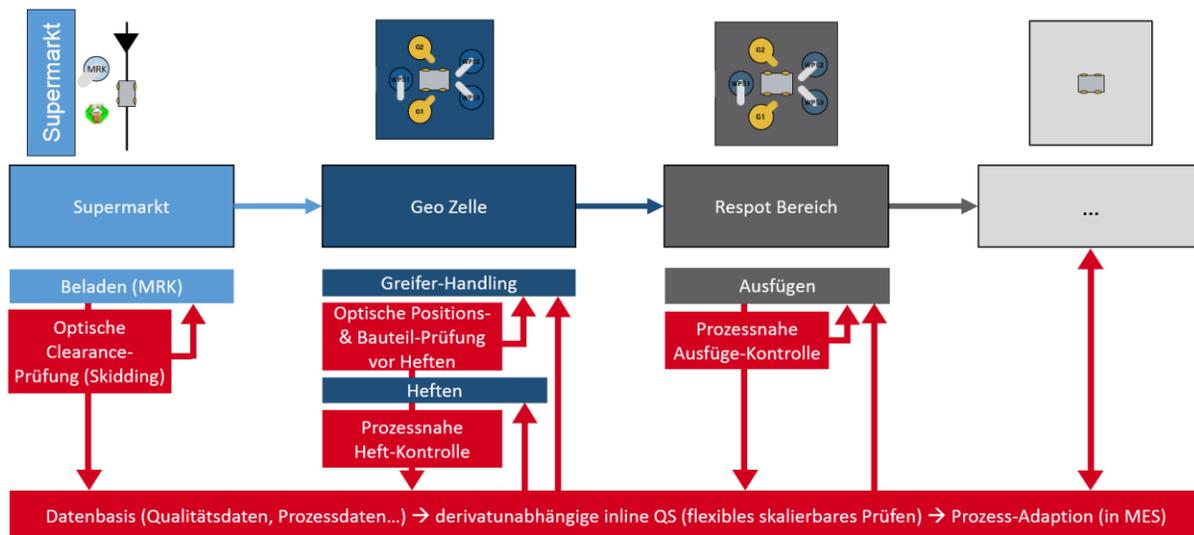


Abbildung 15: Regelungskonzept für die ganzheitliche Qualitätssicherung im flexiblen Rohbau

Zur Präzisierung des Lastenheftes für die Qualitätssicherung (QS) wurden an drei Arbeitstreffen Begehungen im Daimler Werk in Sindelfingen durchgeführt, um gemäß dem Ansatz „Go-And-See“ Eindrücke vom aktuellen Ist-Zustand zu gewinnen. Im Rahmen von anschließenden Treffen mit Daimler und ISRA wurde das Gesehene im Kontext des flexiblen Rohbaus der Zukunft bewertet und geordnet. Der so aufgenommene Ist-Zustand dient als Referenz zum angestrebten Zustand des flexiblen Rohbaus. Dieser unterscheidet sich vom Ist-Zustand dahingehend, dass die starre Verkettung der einzelnen Prozessschritte aufgelöst wird. Weiterhin wird eine Multigeo-Zelle, welche in der Lage ist, die Geometriebildung für mehr als nur eine Karosserievariante zu übernehmen, wahrscheinlich nicht die gleiche Prozesssicherheit aufweisen, wie die bisherigen Geo-Zellen. Diese können lediglich eine Karosserievariante herstellen. Sie erreichen dadurch eine sehr hohe Prozesssicherheit, so dass erst zum Ende einer Teilbaugruppe (z.B. Heckwagen) eine Endprüfung im Takt erfolgen kann. Bedingt durch die Multi-Geozellen ist jedoch damit zu rechnen, dass es Varianten geben wird, welche bei Bedarf öfter als nur am Ende des Fertigungsprozesses geprüft werden müssen. Gleichzeitig hat die Qualitätssicherung an Flexibilität gewonnen, weil sie nicht mehr auf eine feste Zelle beschränkt werden muss, welche sich in den starren Produktionsablauf eingliedert. Zusammenfassend ergibt sich:

- Die QS muss in der Lage sein, bedarfsgerecht auch Zwischenstufen überprüfen zu können

- Die QS ist prozesstechnisch nicht mehr gebunden; sie kann unter Einhaltung der restlichen produktionstechnischen Nebenbedingungen an einer beliebigen Stelle im Produktionsablauf vorgenommen werden.
- An ein QS-Konzept für den modularen Rohbau ergibt sich somit, dass sowohl geeignete Messhardware vorhanden sein muss, als auch dass eine im Sinne der Produktionssteuerung optimaler Einsatzort und Integrationsgrad für die QS-Hardware gefunden werden muss

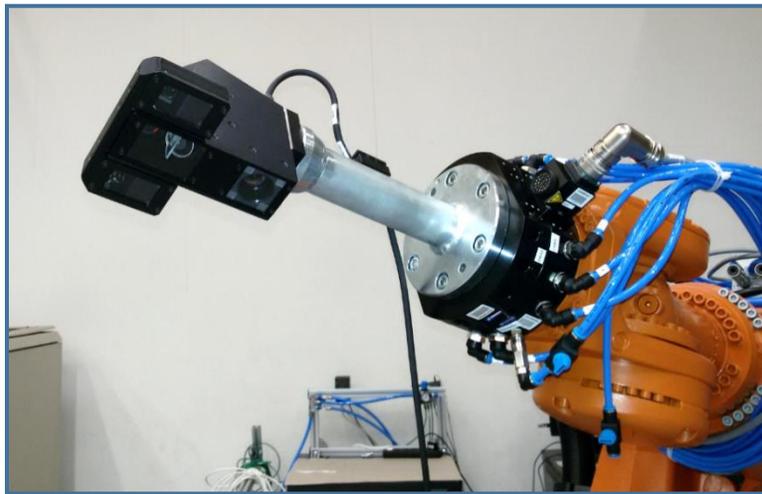


Abbildung 16. Inline-Messtechnik von ISRA auf einem Roboter am wbk-Demonstrator montiert

Aufbauend auf das Konzept, das im vorherigen Abschnitt vorgestellt wurde, wurde als nächstes eine Hardwareumsetzung und messtechnische Bewertung der Hardware vorgenommen. Dazu wurde in einem ersten Schritt das Vorgehen im vorherigen Arbeitspaket analysiert. Bei der ISRA Vision AG ist bereits ein breites Portfolio an QS-Lösungen für den Automobilrohbau vorhanden. Diese Lösungen sind darauf ausgelegt, eine Vielzahl relevanter Kriterien in der Taktzeit zu messen und erfüllen somit die Bedingung an inline-fähige Messtechnik. Es gehen weitere Bestrebungen dahin, Sensorik zu entwickeln, die einen größeren Arbeitsbereich aufweist, komplexere Merkmale erfassen und schneller messen kann. Diese sind für den Inline-Einsatz im Sinne einer Flexibilisierung des Rohbaus besonders wertvoll. Sie könnten an Stellen im Rohbau eingesetzt werden, die bisher für Messtechnik nicht praktikabel sind. Dadurch kann die Anforderung des Lastenheftes erfüllt werden, flexiblere Prüfstandorte zu realisieren. Es können bspw. Teilmessungen in Multigeo-Zellen durchgeführt werden. Dies ist aufgrund der gesteigerten Leistungsfähigkeit erst mit zukünftiger Sensorik möglich, welche der in vorherigen Abschnitt genannten entspricht. Ihre Leistungsdaten sollen im Rahmen des Projektes zur Planung verwendet werden, um selbst bei einer nicht rechtzeitig erreichten Fertigstellung einen Ausblick geben zu können.

Das im vorherigen Arbeitspaket aufgezeigte Vorgehen zur Flexibilisierung der Rohbauzelle, wie es in einer Multigeozelle benötigt wird, bringt die Notwendigkeit einer Regelung mit sich. Diese wird gemäß dem im vorherigen Arbeitspaket vorgestellten Konzept durch eine Inline-Messtechnik von ISRA (s. Abbildung 16) ermöglicht. Die Ergebnisse der Posen-Bestimmung mit Hilfe der Kamera werden gemäß dieses Konzeptes nicht nur zur Regelung der Geometriebildung verwendet, sondern auch zur Qualitätssicherung. Durch die Kombination aus dem prozessintegrierten Messen und der gleichzeitigen Qualitätssicherung ergeben sich hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Messung. Die Genauigkeit eines Messsystems kann durch

die Angabe der Messunsicherheit quantifiziert werden. Durch die Angaben der Messunsicherheit ist es möglich, eine robuste Regelung zu gestalten und der abschließenden Qualitätssicherung eine Zuverlässigkeit zuzuordnen. Um eine Messunsicherheitsanalyse durchzuführen, wird ein zweistufiges Vorgehen angewendet. Dieses basiert in einem ersten Schritt auf der Funktionsprüfung der verwendeten Bauteile. In einem zweiten Schritt wird die eigentliche Messunsicherheit ermittelt. In Abbildung 17 sind potentielle Merkmale auf den beiden Fügeiteile, welche aus AP2 bekannt sind, eingezeichnet. Diese sind typische Merkmale, wie sie im Bereich der Hinterachse vermessen werden. Es ergeben sich nach Abstimmung mit Daimler Toleranzen in der Größenordnung „Zehntelmillimeter“.

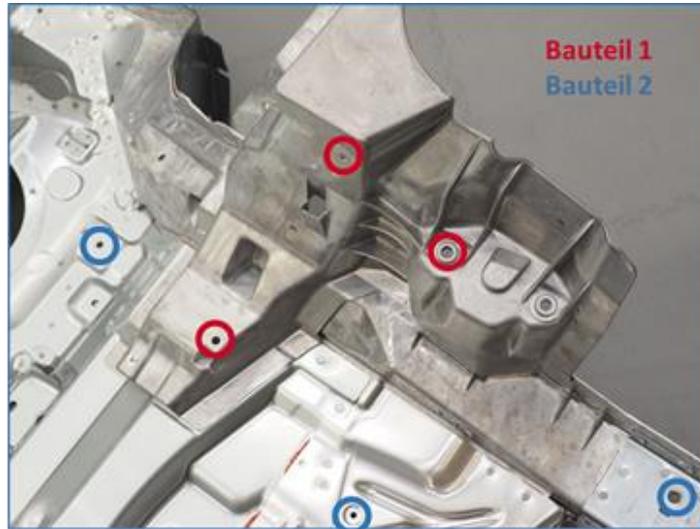


Abbildung 17. Merkmale der in AP2 zu fügenden Bauteile, welche in Rahmen der Qualitätssicherung erfasst werden

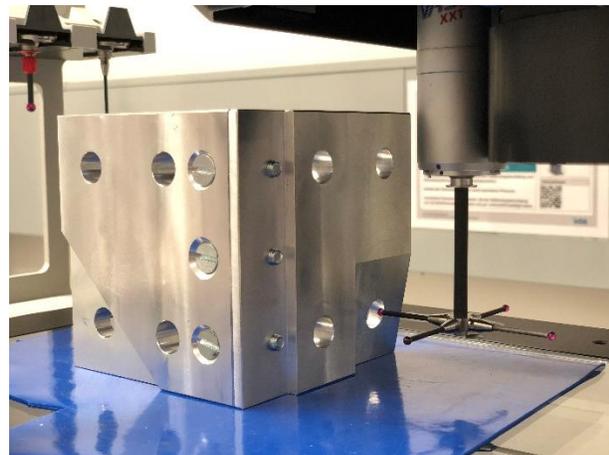
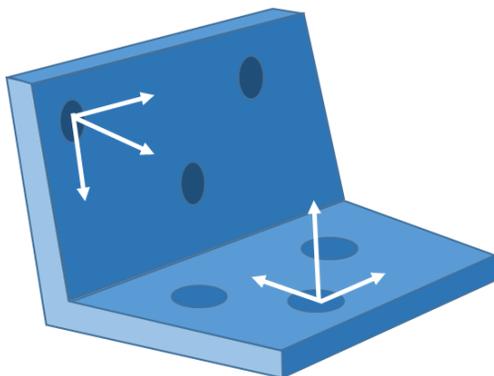


Abbildung 18. Referenzobjekt als Konzept und tatsächliche Ausführung, das mit einer taktilen Koordinatenmessmaschine und der ISRA-Sensorik messbar ist

Zur Bestimmung der Messunsicherheit ist es nun nötig, diese Messaufgabe mit einem hochpräzisen Referenzsystem durchzuführen. Durch einen anschließenden Vergleich mit den Kameramessungen ist es möglich, die Messunsicherheit der Kamera zu ermittelt. Da es sich bei den am KIT vorhandenen Demo-Bauteilen allerdings um unverbundene Fügeiteile handelt, ist es nicht möglich diese gemeinsam zu vermessen. Aus diesem Grund wird ein spezielles

Referenzobjekt hergestellt, das messbar ist, aber trotzdem aufgrund des Materials und der Form grundsätzlich aus messtechnischer Sicht eine Vergleichbarkeit ermöglicht. Dieses Bauteil ist schematisch in Abbildung 18 dargestellt. Es kann auf einer taktilen Koordinatenmessmaschine vermessen werden, wie ebenfalls in Abbildung 18 dargestellt. Anschließend ist die Untersuchung mit dem Kamerasystem möglich (s. Abbildung 20). Ziel ist es dabei, mit beiden Messsystemen die Pose der beiden Seitenbleche zueinander zu bestimmen. Diese entsprechen im Rahmen der Referenzmessung den beiden in Abbildung 17 gezeigten realen Fügeteilen. Die Abweichung zwischen der Messung auf der taktilen Koordinatenmessmaschine und der Kameramessung ergibt die Messunsicherheit.

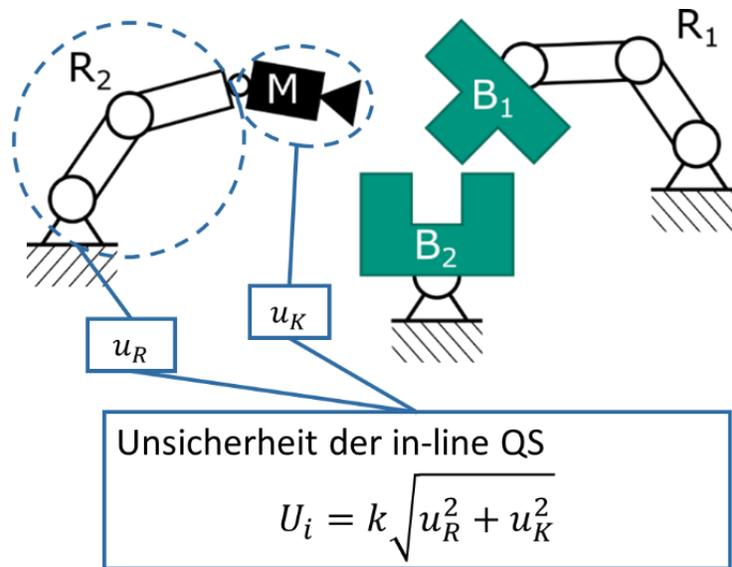


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Messaufgabe sowie der Unsicherheitseinflüsse von Roboter und Kamera

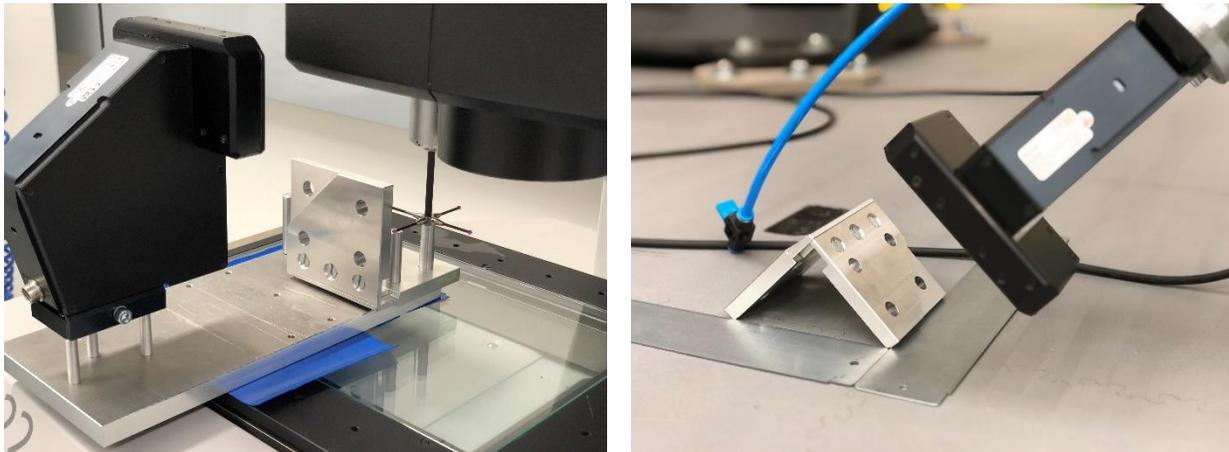


Abbildung 20: Messung des Referenzbauteils mit der Kamera auf zwei Weisen: mit Koordinatenmessgerät-gestützter Bewegungsverfolgung und robotergestütztem Einsatz

Dabei gilt es zu beachten, dass wie in Abbildung 19 dargestellt, der Anteil des Roboters zur Unsicherheit nicht von dem der Kamera getrennt werden kann. Um diese Problematik zu umgehen, wurde das Referenzobjekt auf einer Koordinatenmessmaschine gemessen (s. Abbildung 18). Dazu wurde das Referenzobjekt zwischen jeder Messung bewegt und die Ist-Position nach der Bewegung mit der Koordinatenmessmaschine hochgenau ermittelt. Die so entstandenen Messungen mit der Kamera sind somit näherungsweise nur noch mit der

Unsicherheit der Kamera belastet. Anschließend wurden, wie in Abbildung 20 dargestellt, Messungen durchgeführt, bei denen die Kamera auf einem KUKA Roboter befestigt war. Die dabei festgestellte Messabweichung der Bohrungen zur Koordinatenmessmaschinen-Messung ist folglich mit der Unsicherheit des Roboters und der Kamera beaufschlagt. Unter der Kenntnis der Kamera-Unsicherheit aus dem vorherigen Schritt wurde gemäß Abbildung 19 durch Differenzrechnung die Unsicherheit des Roboters bestimmt. Dabei ergab sich, dass Roboter zwar sehr wiederholgenau arbeitet, aber nicht absolut genau. Die Unsicherheit der Kamera ist im Verhältnis zu dieser Unsicherheit vernachlässigbar. Folglich ist es nötig, beim Inline-Einsatz von Kamera-Hardware besonders genau auf die Auswahl und Bedienung des Roboters acht zu geben. Mit der vorgestellten Methodik – d.h. der hochgenauen Erfassung der Bewegung eines Referenzobjektes relativ zur Kamera und einer sich erst anschließenden roboter-gestützten Messung – kann ein roboterbasiertes Kameramesssystem in seinen Komponenten Roboter und Kamera messtechnisch bewertet werden.

Zusammenfassend:

- Die in AP2 verwendete Kameratechnik wird auch für die Qualitätssicherung verwendet
- Um die Regelung robust zu gestalten und die Qualitätssicherung beurteilen zu können, wird die Messunsicherheit ermittelt
- Dazu wurde ein Referenzobjekt entwickelt, welches mit einem hochgenauen taktilen Koordinatenmessgerät und mit dem Kameramesssystem messbar ist
- Das Referenzobjekt wurde taktil gemessen
- Das Objekt wurde mit einer Kamera gemessen; die dazu nötige Bewegung des Objektes wurde mit einer Koordinatenmessmaschine hochgenau nachvollzogen
- Das Objekt wurde mit der gleichen Kamera montiert auf einem Roboter gemessen
- Der Vergleich der beiden Messungen ergab die Roboter- und die Kameraunsicherheit; der Roboter sorgt für den größten Anteil Unsicherheit

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Messtechnik bewertet wurde und als tauglich für den In-Line-Einsatz befunden wurde – auch zur Regelung gemäß AP2 –, geschah eine planerische Umsetzung des QS-Konzeptes gemäß der Beschreibung vom Beginn des Arbeitspaketes. Dazu wurden die zur Verfügung stehende Hardware und der Rohbau analysiert, um sowohl eine Standortwahl als auch eine Prozessintegration durchzuführen.

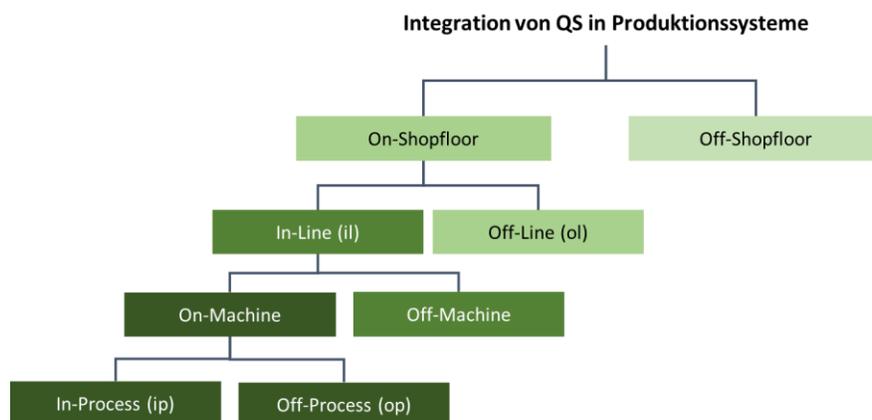


Abbildung 21. Integrationsgrade von Messtechnik [Lan-19]

Aufbauend auf der Präzisierung des Lastenheftes geht es neben der Entwicklung von Sensoren darum, eine stabile Produktion im flexiblen Rohbau der Zukunft zu ermöglichen, welche durch

eine im Vergleich zum Status Quo unverändert hohe Qualität glänzt. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Möglichkeiten erwogen, wie Qualitätssicherung konkret im Rahmen des flexiblen Rohbaus umgesetzt werden soll. Dazu wurde verschiedene Integrationsgrade gemäß Abbildung 21 unterschieden. Während für dieses Projekt nur die On-Shopfloor-Messtechniken von Interesse sind, ergeben sich noch weitere Aufschlüsselungen. Während In-Line Messungen taktgebunden sind, befinden sich On-Machine Messungen in der Maschine oder innerhalb des Prozessschrittes. Off-Machine Messtechnik befindet sich in einer eigenen Station. On-Machine Messungen lassen sich noch weiter danach unterscheiden, ob sie während der Hauptzeit (in-process) oder im Anschluss (off-process) an diese stattfinden. Anschließend wurde der Rohbau in einer schematischen Version betrachtet und es wurden potentielle Stellen ermittelt, an denen Qualitätssicherungstechnik eingesetzt werden kann (s. Abbildung 22). Die Stellen wurden gemäß der zur Verfügung stehenden baulichen Möglichkeiten hinsichtlich der möglichen Integrationsgrade analysiert. In Abbildung 22 ist dargestellt, an welche Stelle im Rohbau welcher Integrationsgrad realisiert werden kann.

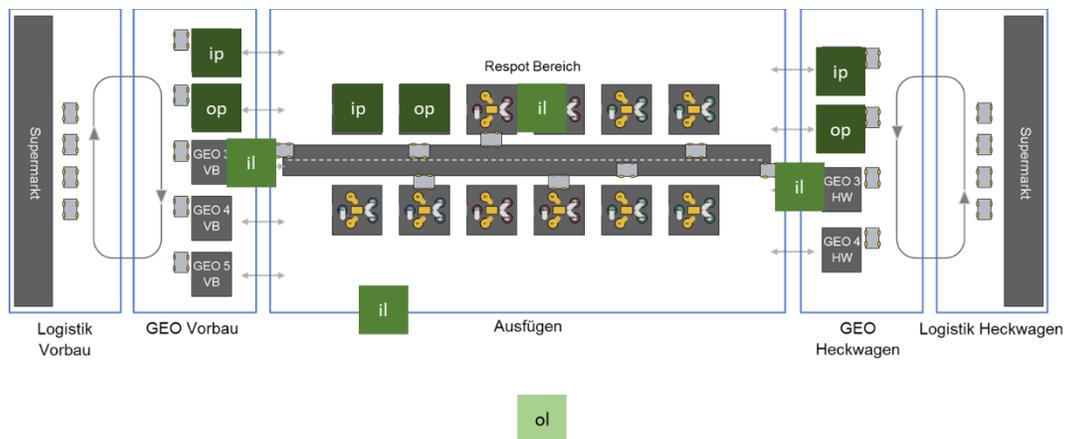


Abbildung 22: Potentielle Einbaumöglichkeiten für QS-Hardware im flexiblen Rohbau

Dabei wurden gemäß der bereits zuvor vorgestellten Integrationsgrade von Messtechnik verschiedene Realisierungsmöglichkeiten unterschieden. Das bedeutet, es wurde danach unterschieden, wie die Messtechnik in den Produktionsprozess eingebunden ist. Anhand dieser verschiedenen Realisierungsmöglichkeiten sind verschiedenen Ziele verfolgbar. Beispielsweise lässt sich mit In-Process-Sensorik eine direkte Qualitätssicherung während eines Fügevorganges realisieren, während Off-Line-Techniken lediglich eine Stichproben-Prüfung zulassen. Der Grundgedanke hinter dieser Aufteilung ist der folgende: Im Rahmen der Flexibilisierung ist es nötig, einige Qualitätsmerkmale besonders gründlich zu prüfen, weil diese durch das vorrichtungsfreie Fügen in ihrer Qualität eingeschränkt werden könnten. Andere Merkmale brauchen nur adaptiv nach Bedarf oder in Stichproben geprüft, weil bei diesen Prozessen von Beherrschtheit ausgegangen werden kann. Auf diese Weise ist es möglich, unter Verwendung möglichst geringer Kosten bei gleichzeitig hoher Qualität mit einer minimalen Messzeit zu messen. Um diesem Ziel gerecht zu werden, wurden gemäß der obigen Einteilung Alternativen gesammelt, um sie beurteilen zu können. Dazu wurden sie anschließend hinsichtlich der Taktzeitverluste, der Messdauer, des Realisierungs-Aufwandes und der Prozessnähe analysiert, um eine optimale Alternative auszuwählen. Dabei ist zu beachten, dass nur die Geometriebildung taktzeitgebunden ist, während der Ausfügebereich durch den Einsatz von führerlosen Transportfahrzeugen zeitlich flexibel ist. Folglich führt im Geobereich eine außerhalb der Hauptzeit des Prozesses liegende Messung zu einer Taktzeitverlängerung, was zu vermeiden ist. Andererseits führt eine lange

Messdauer dazu, dass die Produktionsplanung im Ausfügezeit erschwert wird. Generell wird bei der Bewertung davon ausgegangen, dass eine in-process Integration den höchsten Aufwand verursacht. Anhand dieser Regeln ergibt sich die Bewertung in Abbildung 23. Es ist ersichtlich, dass eine in-line Lösung im Geobereich zu favorisieren ist. Eine solche Lösung misst im Takt in einer eigenen Messzelle. Sie führt somit weder zu einer extra Messdauer, die den FTF-Betrieb behindert noch zu einer Taktzeitverlängerung. Weil es sich um eine separate Zelle handelt, ist auch der Aufwand begrenzt. Gleichzeitig ist eine Prozessnähe noch immer gegeben. Wenn ein Bauteil nach der Geometriebildung fehlerhaft ist, kann es sofort nachbehandelt werden. Und auch Teile aus dem Ausfügebereich, die der nächsten Geometriebildungsstufe unterzogen werden, haben nur einen zusätzlichen Wertschöpfungsschritt erfahren, bis sie geprüft werden, weil alle Teile nach dem Ausfügen wieder in eine Geozelle gebracht werden. Somit ist die in-line Lösung zu favorisieren. Eine solche Lösung ist schematisch in Abbildung 24 dargestellt. Aufbauend auf diesem Schema wurde in Kooperation mit FFT ein 3D-Mockup erstellt, welches in Abbildung 24 zu sehen ist. In der Folge sind nun auch Simulationen mit dieser Konfiguration möglich.

	Geobereich			Ausfügebereich			QS-Zellen	
	ip	op	il	ip	op	il	il	ol
<b>(T)</b> Taktzeitverl.	→	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑
<b>(D)</b> Messdauer	↑	↑	↑	↑	→	→	↓	↑
<b>(A)</b> Aufwand	↓	↓	→	↓	↓	↓	↑	↑
<b>(P)</b> Prozessnähe	↑	→	→	↑	→	→	↓	↓

Abbildung 23: Bewertung von Integrationsmöglichkeiten von Messtechnik in den Rohbau

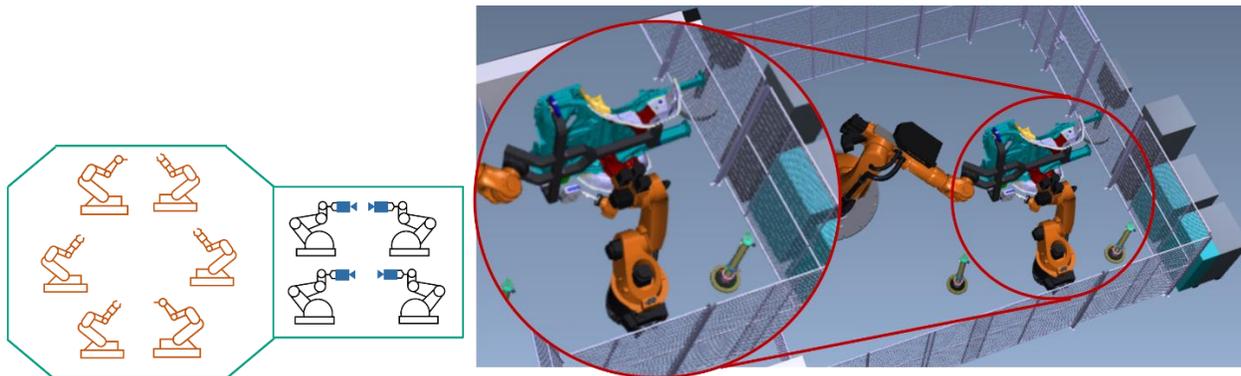


Abbildung 24: Schematische Umsetzung des favorisierten Integrationskonzeptes und 3D Mockup des Konzeptes

Zusammengefasst:

- Der flexible Rohbau wurde schematisch genutzt, um verschiedene QS-Alternativen zu erarbeiten, welche sich durch ihre Einbindung in den Produktionsprozess unterscheiden

- Durch eine geschickte Auswahl und Integration der QS-Hardware wurde eine Lösung ermittelt werden, welche geringe Kosten und Messzeit bei höchster Qualität ermöglicht
- Die Lösung wurde in einem 3D Mockup umgesetzt

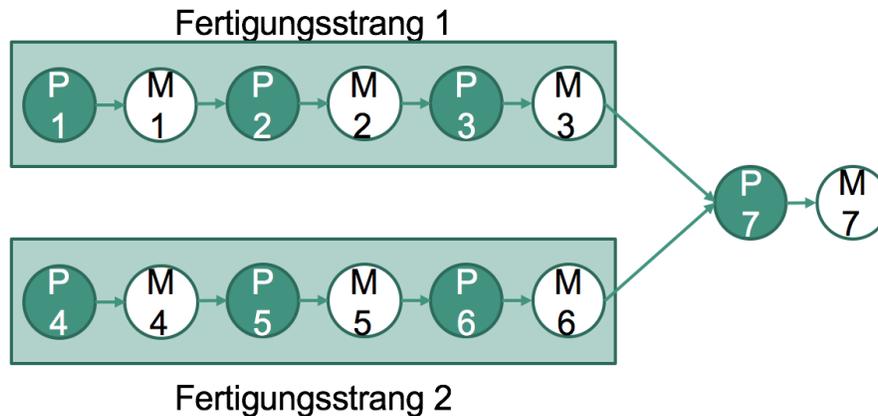


Abbildung 25: Schematische Darstellung einer Abfolge von Produktionsschritten

Um einer eventuellen Veränderung des flexiblen Rohbau schnellst möglich begegnen zu können, ist es nötig, ein standardisiertes Vorgehen zu entwickeln, welches in der Lage ist, die neuen Gegebenheiten zu reflektieren hinsichtlich der verwendeten QS-Hardware und der eingesetzten Prüfpläne. Zu diesem Zweck wurde das zuvor geschilderte Vorgehen formalisiert. Dazu wurde eine Methode entwickelt, die zweigeteilt ist. Zuerst wird ein aktueller Produktionsablauf in eine abstrakte Darstellung überführt (s. Abbildung 25). Diese ermöglicht es, die einzelnen Produktionsschritte zu trennen. Anschließend wird für jeden Produktionsschritt eine QS-Realisierung ermittelt, die einem der identifizierten Integrationsgrade entspricht. Dazu wird jedem Produktionsschritt jeder Integrationsgrad zugeordnet. So spannt sich eine Art morphologischer Kasten mit technischen Realisierungen auf. Diese werden anschließend ausgearbeitet. Das bedeutet, dass jedes Feld im Morphologischen Kasten bestehend aus Produktionsschritt x Integrationstiefe hinsichtlich der Kosten, Messdauer und Qualitätsrate in einer Überschlagrechnung bewertet wird, so dass Kosten, Messdauer und Qualitätsrate dieser Teillösungen bekannt sind. Anschließend können die generierten Alternativen in ein Optimierungsmodell überführt werden. Dazu werden nach einem Brute-Force-Ansatz alle Lösungen für alle Produktionsschritte durchgerechnet. Dabei ergeben sich Gesamtkosten, eine Gesamtmessdauer, ein Gesamtaktverlust und eine Qualitätsrate gemäß der Einteilung im vorherigen Abschnitt. Nach einer zuvor definierten Zielfunktion wird jede Teillösung bewertet. Es ergibt sich die günstigste Gesamtlösung und auch der zugehörige Prüfplan ergibt sich. Die beschriebene Methode kombiniert den Morphologischen Kasten als Kreativtechnik mit einem objektiven Optimierungsproblem. Diese Zusammenfassung ermöglicht es, standardisiert – d.h. wiederholbar – auch ungewöhnliche Lösungen zu bedenken und auszuwählen. Die Methodik kann somit genutzt werden, um die oben beschriebene qualitative Lösung für ein konkretes Produktionssystem in eine quantitative Lösung zu übersetzen. Zusammengefasst:

- Eine zweistufige Methode, welche einen morphologischen Kasten und ein Optimierungsproblem kombiniert, wurde entwickelt
- Die Methode vereint Kreativität und Objektivität zur Standardisierung
- Dazu werden allen Produktionsschritten alle Integrationsgrade zugeordnet

- Anschließend wird mit einem enumerierenden Ansatz die nach einer vorgegebenen Zielfunktion optimale Lösung ermittelt

#### 2.1.4 Arbeitspaket 4: Entwicklung eines dezentralen Steuerungs- und Logistikkonzepts für Einzelstückfluss trotz Taktauflösung im Rohbau

Neben der Herausforderung einer komplexeren Planung bietet eine Boxenfertigung im Vergleich zu einer starr getakteten Linie Vorteile in Form zusätzlicher Freiheitsgrade, die eine geeignete Produktionssteuerung nutzen können muss. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel entstehen die Freiheitsgrade durch die lose Verkettung des Produktionssystems mithilfe von FTF sowie durch redundante Bearbeitungszellen. Die statische Planung (vor Beginn der Produktion) muss durch eine dynamische Planung (während der Produktion) ergänzt werden, um die aufgrund unvorhersehbarer Ereignisse entstehende Dynamik handhaben zu können. Zunächst wurden für die dynamische Planung relevante Störereignisse und die daraus resultierenden Planungsaufgaben für das echtzeitnahe Balancing in Anlehnung an [Vie-03] identifiziert:

- Ausfall von Maschinen: Eine gültige alternative Fertigungszelle muss ermittelt werden. Falls die Bearbeitungsreihenfolge fest ist, muss diese dieselbe Fügetechnologie bereitstellen, andernfalls sind auch alternative Fügetechnologien möglich.
- Auftragsstornierungen / Eilaufträge: Die Auftragssequenz muss angepasst werden,

Anschließend wurden in mehreren mit flexis und Daimler die Anforderungen an die dynamische Produktionssteuerung aufgenommen, die in den Optimierungsansatz in Form der Zielfunktion eingehen. Die ermittelten Zielgrößen lassen sich in drei Bereiche einteilen:

- Effizienz der Logistik: Ziel ist die Minimierung der Durchlaufzeiten und die Einhaltung der Liefertreue gemessen an den geplanten Lieferterminen
- Effizienz der Produktion: Ziel ist eine möglichst hohe Auslastung des gesamten Produktionssystems. Allerdings muss ein Auslastungspuffer noch unbekannter Größe bestehen, um bei unvorhersehbaren Mehrlasten das Produktionsziel nicht zu gefährden
- Problemspezifische Größen: Ziel ist eine möglichst hohe Sequenzgüte, d.h. möglichst geringe Abweichungen zwischen der am Supermarkt eingesteuerten Sequenz und der Sequenz der fertigen Heck- und Vorderwägen. Auf Basis einer Literaturrecherche wurden hierbei die möglichen Kennzahlen „Reihenfolgegüte“ und „Positionsbandbreitengüte“ identifiziert [Klu-10], [Wey-02]

Um das Gesamtkonzept der Logistik bewerten zu können, wurde ein Simulationsmodell basierend auf der schematischen Darstellung aus Abbildung 4 erstellt. Hierfür wurde die in der Automobilindustrie weit verbreitete Software PlantSimulation der Firma Siemens genutzt, mit der sich komplexe Materialflusssysteme darstellen lassen. Das entwickelte Simulationsmodell ist in Abbildung 27 dargestellt. Der Aufbau des Modells ist modular, sodass bei Bedarf sowohl das Layout (Ort und Anzahl der Ausfügezellen) sowie die Steuerungslogik (für die beschriebenen Störereignisse) mit geringem Aufwand angepasst werden können.

Das Simulationsmodell ist als Vorarbeit für das in Arbeitspaket 5 zu entwickelnde Tool zur Entscheidungsunterstützung zu sehen, da es in leicht abgewandelter Form dazu verwendet werden kann, Anzahl und Layout der Fertigungszellen im Ausfüge-Bereich, die Anzahl der FTF sowie Layout und Größe eventueller Pufferzonen zu dimensionieren. Zur Reduzierung der Komplexität (aufgrund zwei Einsteuereinstellen und zusätzlicher Koordination konkurrierender Aufträge) wurde die Integration der Geo-Zellen für die Vorbaufertigung bisher nicht vorgenommen. Diese Einschränkung wird im nächsten Schritt aufgehoben.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die multikriterielle Optimierung hat das Ziel, bei Störereignissen die angegebenen Entscheidungsprobleme so zu lösen, dass eine Vielzahl von Kriterien (resultierend aus den Anforderungen an die Produktionssteuerung) berücksichtigt und gegeneinander abgewogen werden. Aufgrund der geforderten Echtzeitfähigkeit sowie der Skalierbarkeit der Produktionssteuerung hinsichtlich Stückzahl und Stückzahlmix liegt es nahe, dezentrale Ansätze dafür zu untersuchen. Da in SmartBodySynergy durch Industrie 4.0 befähigte Produktionssysteme entwickelt werden, sind aufgrund der zunehmenden Datenverfügbarkeit und verteilten Rechenkapazitäten Multiagentensysteme (MAS) als möglicher Lösungsansatz identifiziert worden. Erste Vorarbeiten für den prinzipiellen Einsatz eines MAS sind am wbk durchgeführt und eine einfache Prioritätsregel zur Berücksichtigung von Durchlaufzeit und Liefertreue berücksichtigt.

Im neuen flexiblen Rohbau wird die starre Verkettung durch den Einsatz fahrerloser Transportfahrzeuge (FTF) aufgelöst und so der Einzelstückfluss ermöglicht. In diesem Produktionskonzept hat die Transportzeit zwischen den Fügezellen einen entscheidenden Einfluss auf die Effizienz (hinsichtlich Durchlaufzeit) und damit die Gesamttragfähigkeit des flexiblen Konzepts. Die räumliche Anordnung der Fügezellen wird in der Produktionsplanung festgelegt und bestimmt zum Großteil bereits die minimal möglichen Transportwege. Aus diesem Grund wurde ausgehend von dem durch Daimler definierten Grundszenario eine Zuordnung der unterschiedlichen Zelltypen zu den möglichen Stellplätzen im Respot-Bereich (**Layoutplanung**) durchgeführt (siehe Abbildung 26).

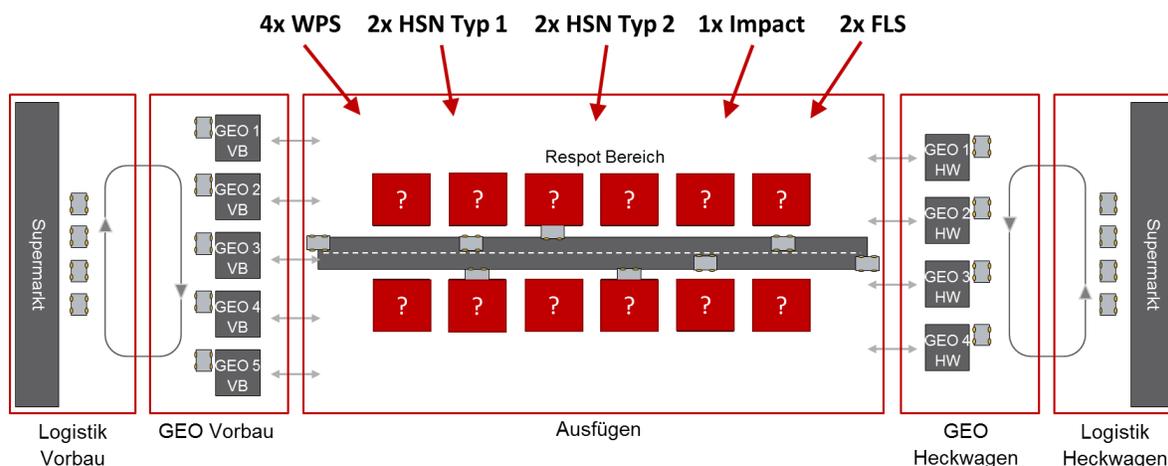


Abbildung 26: Zuordnungsproblem Zellen zu Stellplätzen im Ausfügebereich

Dafür wurde ein mathematisches Optimierungsmodell auf Basis eines quadratischen Zuordnungsproblems definiert. Input des Modells sind Daten zum Produktionssystem selbst (Art und Anzahl an Ausfügestationen unterschiedlicher Fügetechnologien, Entfernungsmatrix zwischen den potentiellen Stellplätzen im Respot-Bereich) sowie zum zu produzierenden Produktprogramm (Mit Daimler und flexis festgelegtes, zu produzierendes Variantenspektrum inkl. möglicher Bearbeitungsreihenfolgen und –zeiten, erwarteter Stückzahlmix). Mithilfe der Optimierung wird als Output eine gesamttransportstreckenminimale Zuordnung von Ausfügezellen zu Stellplätzen im Respot Bereich ausgegeben sowie zusätzlich über die Zielfunktion eine mittlere Gesamttransportstrecke je Vorder-/Heckwagen ermittelt.

Die Formulierung des Optimierungsproblems lautet wie folgt:

Zielfunktion

$$\min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^M \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^N t_{ik} d_{jl} x_{ij} x_{kl} \quad (1)$$

s.t.

Nebenbedingungen

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 1, i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^M x_{ij} = k_j, j \in M \quad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (4)$$

Die *Zielfunktion* (1) minimiert die Gesamttransportstrecke, indem die Anzahl der Transportvorgänge zwischen unterschiedlichen Fügezellen multipliziert wird mit der Strecke zwischen den Zellen (in Abhängigkeit von der realisierten Zuordnung). Die *Nebenbedingung* (2) stellt sicher, dass jedem Standort im Respot-Bereich genau eine Fügezelle zugewiesen wird. Außerdem wird mit *Nebenbedingung* (3) erreicht, dass alle zuzuordnenden Fügezellen auch tatsächlich Standorten im Respot-Bereich zugeordnet werden. Die *Ganzzahligkeitsbedingung* (4) ist nötig, da eine Zuordnung eine logische Entscheidung ist und damit nur Werte von 0 (nicht zugeordnet) oder 1 (zugeordnet) sinnvoll interpretierbar sind.

Mithilfe einer Implementierung in IBM ILOG CPLEX 12.7 wurde das Optimierungsproblem gelöst und unterschiedliche Lösungen (=Zuordnungen von Fügezellen zu Stellplätzen im Respot-Bereich) generiert. Bei der Auswahl einer bevorzugten Lösung kommen prinzipiell zwei Ansätze infrage:

- Robustes Layout: Hier besteht das Ziel darin, eine *mittlere Fahrstrecke* je Heck-/Vorderwagen zu ermitteln, die *möglichst unabhängig vom Variantenmix* ist (d.h. das Layout ist für eine vorliegende Situation nicht unbedingt optimal, aber die Fahrstrecke ändert sich auch kaum, wenn z.B. der Anteil an E-Fahrzeugen steigt)
- Wandlungsfähiges Layout: Hier besteht das Ziel darin, eine Konfiguration zu ermitteln, die sich *möglichst aufwandsarm bei einem veränderten Variantenmix anpassen* lässt. Hierfür sind detaillierte technische und wirtschaftliche Daten zu Umbauaufwänden vonnöten, die für den flexiblen Rohbau nur schwer abgeschätzt werden können.

Aufgrund der Konzeptphase des Produktionssystems wurde ein robustes Layout ausgewählt und anhand einer Sensitivitätsanalyse hergeleitet, welche Zuordnung am wenigsten gegenüber einer Schwankung des Variantenmix sensitiv hinsichtlich der Fahrstrecken reagiert.

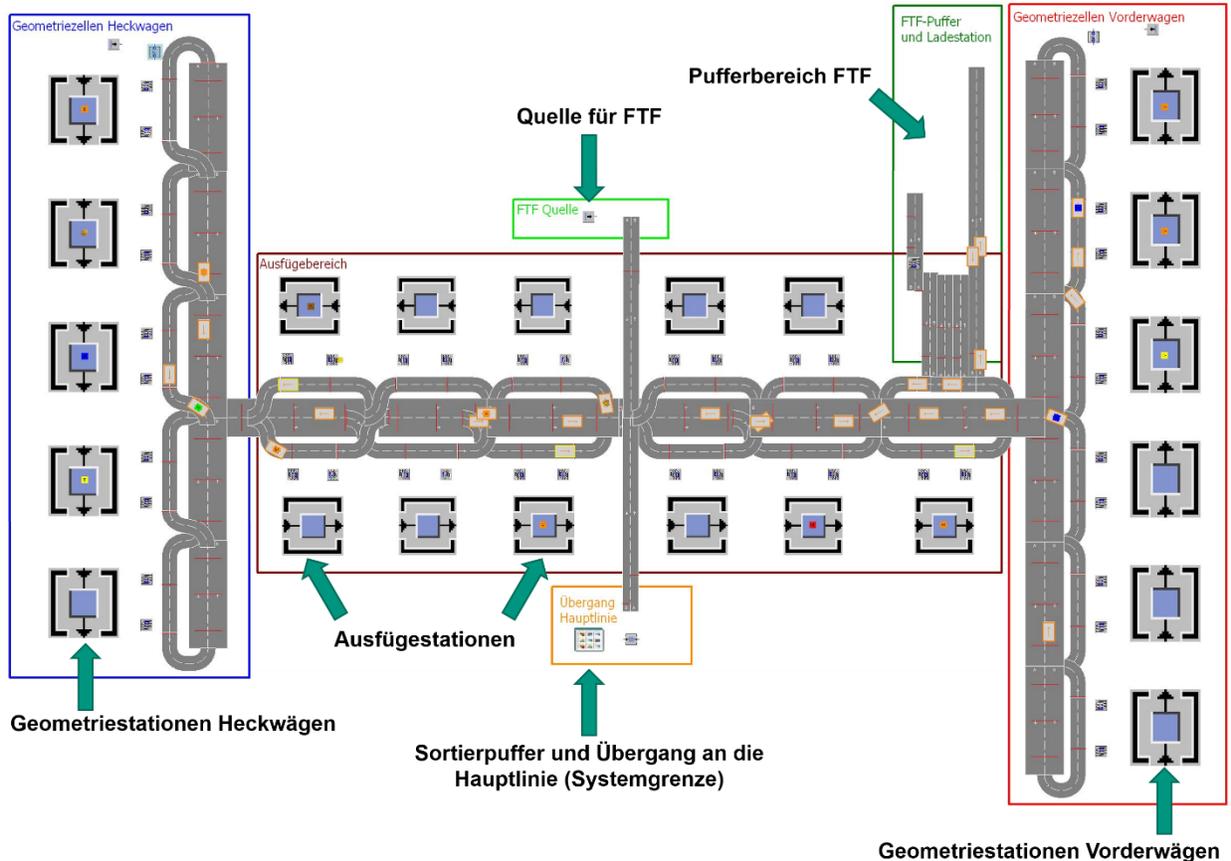


Abbildung 27: Materialflusssimulation

Auf Basis des ausgewählten robusten Layouts wurde eine **Weiterentwicklung der Materialflusssimulation** vorgenommen (siehe Abbildung 27). Diese soll durch eine möglichst gute Annäherung an die Realität erlauben, Produktionspläne von flexis zu verarbeiten sowie auf dynamischen Ereignissen basierende Abweichungen zur Um- bzw. Neuplanung an flexis über eine Datenbankschnittstelle zurück zu spielen. Die wichtigsten Neuerungen sind:

- Der FTF-Puffer wurde eingerichtet, um nicht benötigte FTF zwischenparken zu können. Dadurch wird der Verkehr auf den Fahrstraßen verringert und durch wechselseitige Abhängigkeiten entstehende Deadlocks (=Verklemmungen im System) aufgelöst. Je nach Ladekonzept kann der FTF-Puffer auch dazu genutzt werden, Batterien der FTF zu wechseln.
- Der Sortierpuffer nimmt produzierte Heck- und Vorderwagen auf und sequenziert diese in der Reihenfolge, wie sie in der außerhalb der Systemgrenze liegenden Hauptlinie benötigt werden.

Für die **FTF-Steuerung** stehen zwei grundsätzlich unterschiedliche Paradigmen zur Verfügung:

- Auftragsgebundene FTF begleiten einen ihnen zugewiesenen Auftrag von der Quelle bis zur Senke, bleiben also bei ihrem jeweiligen Vorder- bzw. Heckwagen, bis dieser fertig produziert ist. Der Umlaufbestand ist dadurch auf die Anzahl der FTF begrenzt. Vorteil dieses Vorgehens ist es, dass eine einfache Steuerung realisiert werden kann und im System eine geringe Deadlock-Gefahr besteht.

- Nicht auftragsgebundene FTF können wahlfrei jeden Transport bearbeiten, d.h. die Wartezeit an Stationen während der Bearbeitung eines Heck- bzw. Vorderwagens kann dazu genutzt werden, andere Transporte durchzuführen. Hierbei entsteht eine große Steuerungskomplexität, allerdings können gerade bei im Vergleich zu Bearbeitungszeiten kurzen Wartezeiten große anderweitig verschenkte Transportkapazitäten der FTF genutzt werden.

Im Forschungsprojekt stellen FTF eine wesentliche Investition dar, die im Vergleich zum Status Quo in der verketteten Linie nicht getätigt werden müsste. Es gilt daher insbesondere zu untersuchen, inwiefern die Auslastung der FTF maximiert werden kann, um deren Anzahl möglichst gering zu halten. Daher wurde eine dynamische Steuerung implementiert, die nicht auftragsgebundene FTF verwendet. Für die Realisierung der Steuerung müssen kontinuierlich Transportaufträge (= Zusammenbauten von Vorder-/Heckwägen) mit verfügbaren FTF abgeglichen werden. Die prinzipielle Funktionsweise ist in Abbildung 28 dargestellt. Dabei existieren zwei Ereignisse, die die Steuerungslogik auslösen:

- Erzeugung eines Transportauftrages: Sobald die Bearbeitung in einer Fügezelle abgeschlossen ist, wird in einer *Liste verfügbarer FTF* das örtlich am nächsten gelegene FTF angefordert. Sind alle FTF mit Transporten ausgelastet, wird der Auftrag in einer *Transportliste* gespeichert.
- Transportauftrag abgeschlossen: Sobald ein Transport zu einer Fügezelle abgeschlossen ist, überprüft das freigewordene FTF zunächst, ob im *Ausgangspuffer der Fügezelle* noch weitere Zusammenbauten auf den Weitertransport warten. Sollte das der Fall sein, wird der Zusammenbau dem freien FTF zugeordnet und eine eventuell bestehende Zuordnung zu einem anderen FTF gelöscht. Ist der Ausgangspuffer hingegen leer, wird in der *Transportliste* nachgeschlagen, ob weitere Teile an anderen Fügezellen warten. Sollte dem so sein, wird der räumlich am nächsten gelegene Transportauftrag ausgeführt. Andernfalls wird das FTF in eine *Liste verfügbarer FTF* gespeichert.

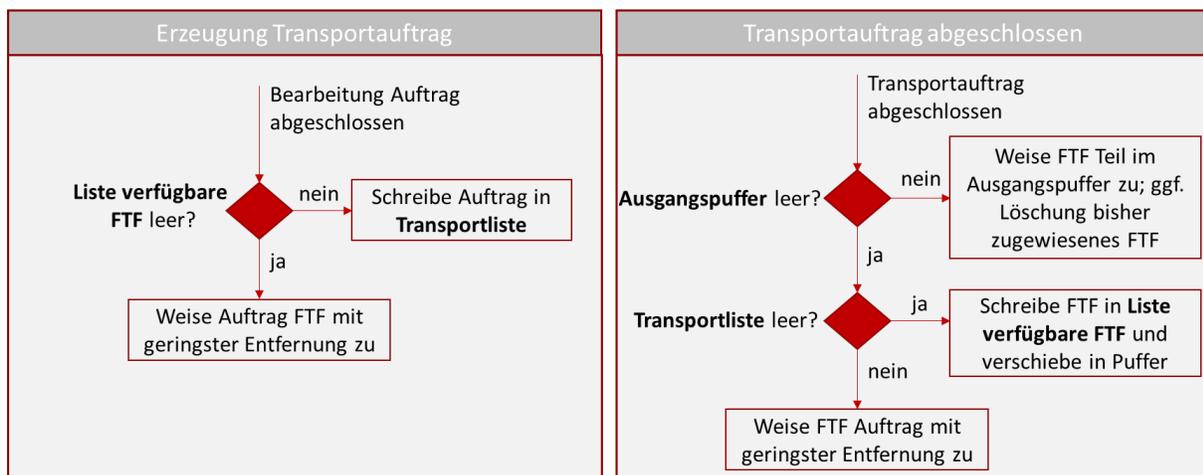


Abbildung 28: Ablaufschema der FTF-Steuerung

Im Anschluss wurde eine **simulative Puffer- und FTS-Dimensionierung** (also Anzahl Stellplätze je Fügezelle und Anzahl der FTF im System) vorgenommen. Die simultane Dimensionierung wurde auf dem Konsortialtreffen im März 2017 diskutiert, da FTF als mobiler Puffer aufgefasst

werden können. Es wurde vermutet, dass der Effekt auf den Durchsatz (gemessen in jobs per hour – jph) sich nicht isoliert berechnen lässt.

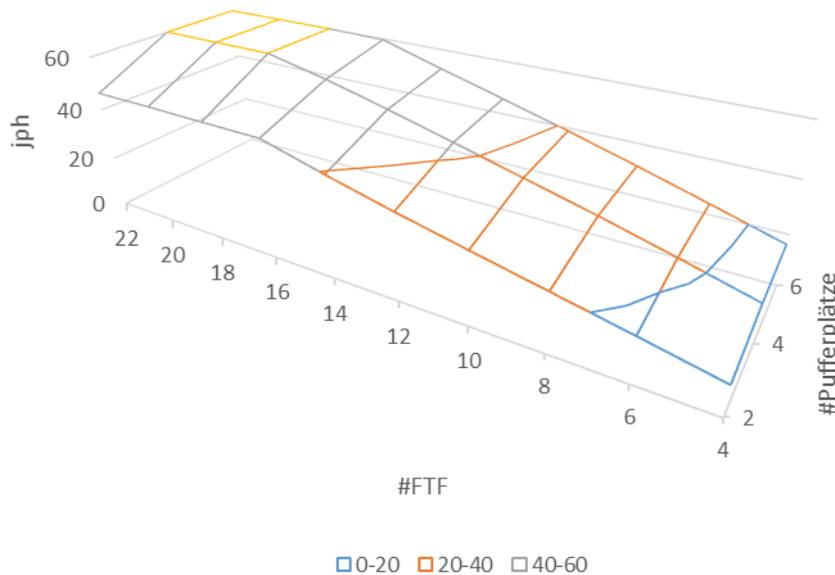


Abbildung 29: Einfluss von Anzahl FTF und Pufferplätze auf den Durchsatz (jph)

In der darauf aufbauenden Simulationsstudie wurden die Anzahl der FTF zwischen 4 und 22 sowie die Anzahl der Pufferplätze je Station zwischen 2 und 6 variiert. In der Darstellung der Ergebnisse (siehe Abbildung 29) zeigt sich, dass die Anzahl der FTF einen größeren Effekt auf den Durchsatz als die Anzahl der Pufferplätze je Station besitzt. Insbesondere bei geringer FTF-Anzahl hat die Puffergröße kaum eine Auswirkung auf den erzielbaren Durchsatz. Bei hoher FTF-Anzahl ist es allerdings auch essentiell, über genügend Pufferplätze zu verfügen, um alle eingesteuerten Aufträge (Annahme hier: 40 jph) rechtzeitig abarbeiten zu können.

Parallel zu der Erweiterung der Ablaufsimulation und der Systemdimensionierung sowie FTF-Steuerung wurde gemeinsam mit flexis eine **Kopplung zwischen zentraler Planung (flexis) sowie Simulation und dezentraler Steuerung (wbk)** konzeptioniert und implementiert (siehe Abbildung 30). Dabei wird zunächst ein *Produktionsprogramm* (in Form einer Auftragsliste für Heck- und Vorderwägen, Ressourcen (verwendbare Fügezellen inkl. technologischer Ausstattung und Anzahl) und den Fügefolgen für die Vorder- und Heckwägen) durch Daimler als Input bereitgestellt. Darauf aufbauend erzeugt flexis im Rahmen der *zentralen Planung* einen Produktionsplan (Schedule), der Informationen darüber enthält, welcher Auftrag zu welcher Zeit in welcher Fügezelle mit welcher Fügeoperation bearbeitet wird. Zudem wird eine Bewertung des Schedules erzeugt, der Werte für entscheidungsrelevante Kennzahlen, z.B. Durchlaufzeiten (DLZ), Verfrühung oder Verspätung von Aufträgen prädiktiv ermittelt. Dieser Produktionsplan wird anschließend in die Ablaufsimulation importiert und dort ausgeführt.

Aufgrund nicht antizipierter Stationsausfälle kann sich in der *Simulation* eine Abweichung vom Soll-Zustand ergeben. Diese wird durch eine dezentrale Steuerung innerhalb der Simulation ausgeglichen (wbk).

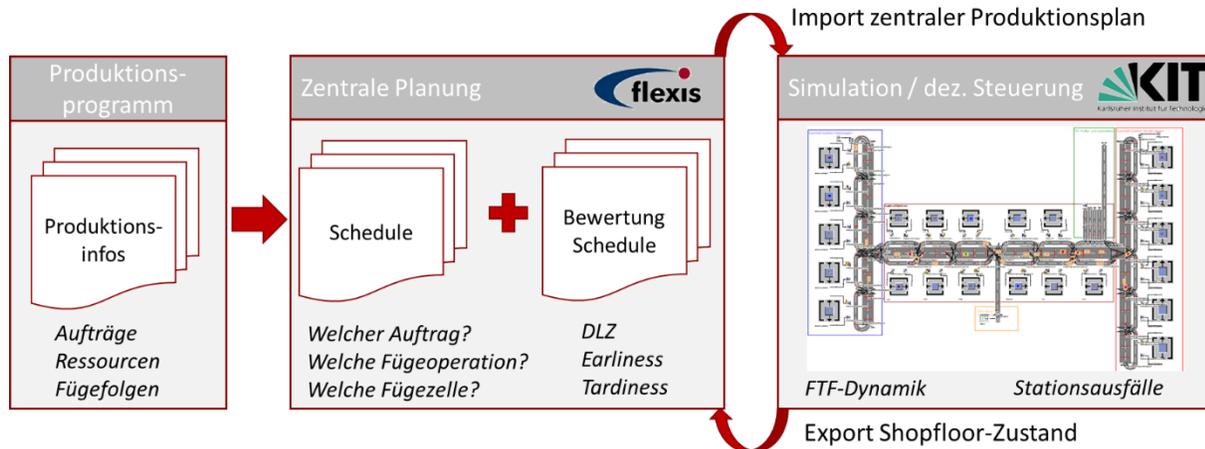


Abbildung 30: Kopplung zwischen Simulation und Optimierung mit flexis

Der Ablauf an der Schnittstelle zwischen Produktionsplanung und –steuerung ist in Abbildung 31 dargestellt. Der zentrale erzeugte Produktionsplan wird in Schritt (1) der Ablaufsimulation übergeben. Dort werden stochastische Störungen erzeugt, die die Stationen im Respot-Bereich betreffen. Die Störungen hängen von der Verfügbarkeit und der Mean Time To Repair (MTTR) ab und betreffen unterschiedliche Stationen unterschiedlich stark. Sobald in der Ablaufsimulation eine relevante Störung erzeugt wird (die zu einer Verzögerung einer geplanten Bearbeitung aus dem zentralen Schedule führen würde), wird in Schritt (2) ein Modul zum Störungsmanagement innerhalb der Ablaufsimulation aufgerufen. Dieses erzeugt ausgehend von der vorliegenden Störung und dem zentralen Schedule eine im Folgenden als Rescheduling-Korridor bezeichnete Datenbasis, die die mindestens umzuplanenden Bearbeitungsschritte enthält. Dazu wurde das Match-Up-Verfahren von [Mor-12] weiter entwickelt und an die Ablaufsimulation angepasst. Sobald in diesem Schritt (3) ein Rescheduling-Korridor ermittelt wurde, wird dieser an ein externes Tool übergeben, welches das MAS repräsentiert. Das Ergebnis aus dem MAS wird in Schritt (4) an das Modul zum Störungsmanagement übergeben. Dieses überprüft, ob der umgeplante Teil des Schedules eine kürzere Gesamtdurchlaufzeit als der Rescheduling-Korridor hat. Diese Bedingung ist zwingend erforderlich, wenn das umgeplante Teil des Schedules in den ursprünglichen Schedule reintegriert werden soll. Ist dies nicht der Fall, ruft das Störungsmanagement erneut Schritt (3) auf und erweitert den Rescheduling-Korridor um weitere Bearbeitungsschritte. Sobald aus Schritt (4) ein umgeplanter Teil des Schedules erzeugt wurde, dessen Gesamtdurchlaufzeit die Länge des Rescheduling-Korridors nicht übersteigt, wird die Reintegration in den zentralen Schedule in Schritt (5) durchgeführt. Dabei werden die Bearbeitungsschritte im Rescheduling-Korridor durch die umgeplanten Bearbeitungsschritte ersetzt. Das Vorgehen wird iterativ wiederholt, bis der zentrale Schedule vollständig abgearbeitet und der Simulationslauf damit beendet ist.

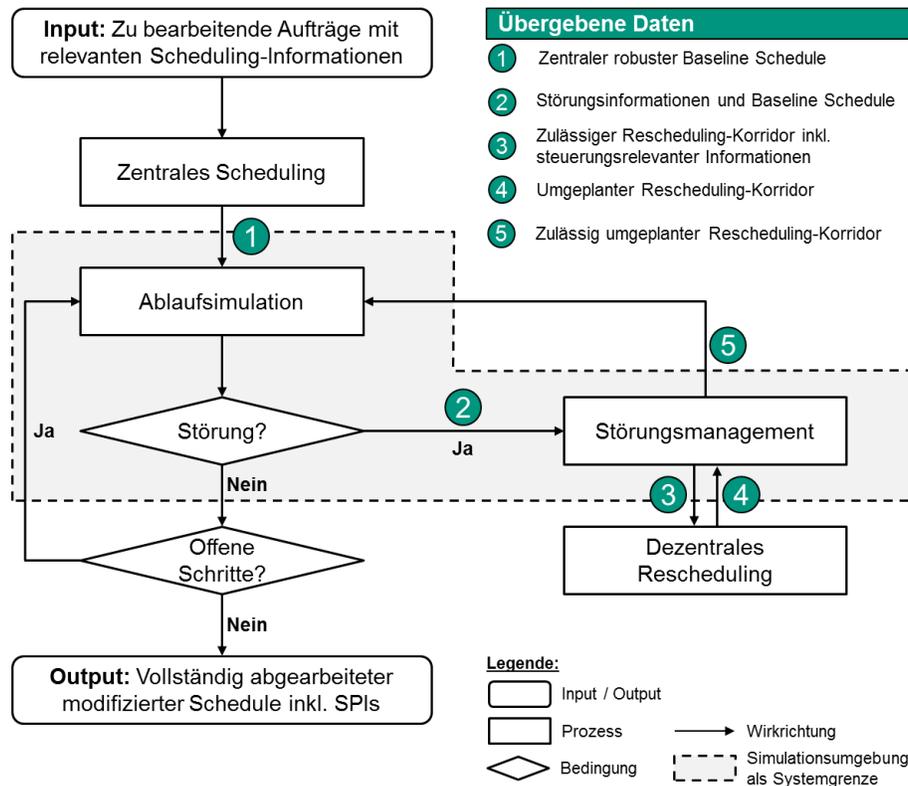


Abbildung 31: Schnittstelle zwischen Produktionsplanung und -steuerung

Ein möglicher Rescheduling-Korridor (RK) wie er in Schritt (3) erzeugt wird, ist in Abbildung 32 dargestellt. Die hellgrau schraffierten Bereiche stellen eine in der Simulation zum Zeitpunkt der Erzeugung des Rescheduling-Korridors aufgetretene Störung dar (in dem Fall an Station M22). Die dunkelgrau schraffierten Bereiche stellen zudem relevante Reststördauern dar, die aus vorangegangenen Störungen resultieren. Die dunkel- und hellblau eingefärbten Bearbeitungsschritte schneiden die untere bzw. obere Grenze des Rescheduling-Korridors und sollen daher für die Umplanung nicht berücksichtigt werden, während die dunkel- und hellgrün eingefärbten Bearbeitungsschritte umgeplant werden können bzw. müssen. Der Rescheduling-Korridor enthält zusätzlich zu den Informationen, welche Bearbeitungsschritte umgeplant werden müssen Angaben darüber, welche Stationen zum Zeitpunkt der Störung welche Aufträge wie lange noch bearbeiten und welche relativen Transportentfernungen sich für aktuell transportierte Aufträge sich zu den jeweils möglichen nächsten Stationen ergeben. Damit liegt der Zustand auf dem Shopfloor zum Zeitpunkt einer Störung vollständig für einen Rescheduling-Algorithmus vor.

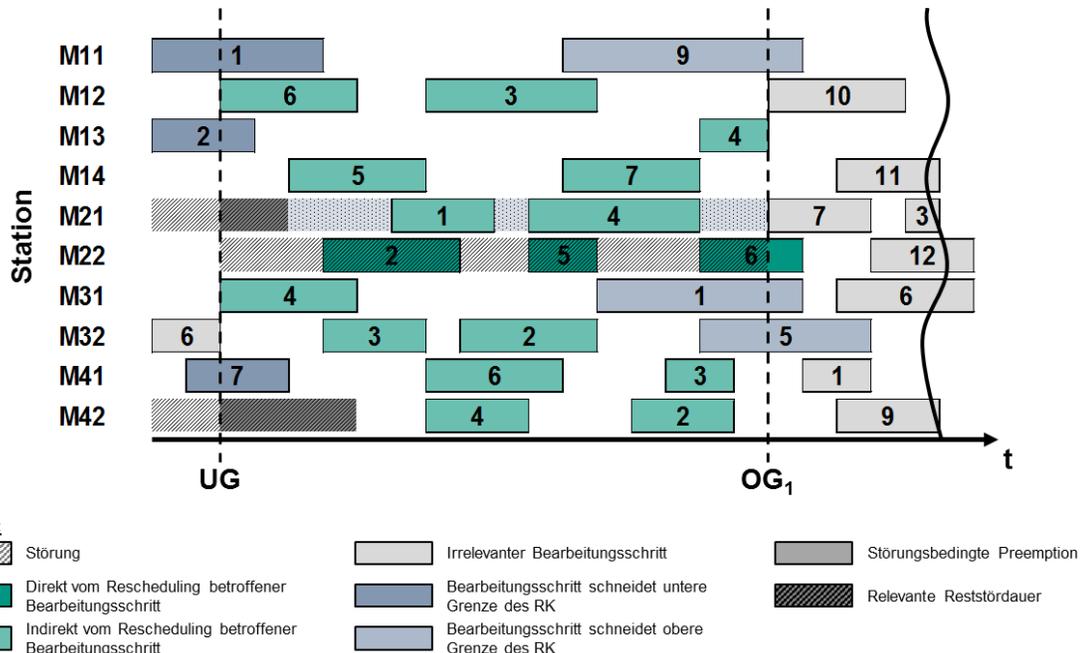


Abbildung 32: Möglicher Rescheduling-Korridor

Für das Rescheduling mit MAS wurde ein auf Reinforcement Learning basierendes Verfahren von [Gab-12] in einem separaten Java-Tool implementiert und um die Charakteristika des vorliegenden Steuerungsproblems erweitert. Konkret wurden

- Auftragsarten statt einzelne Aufträge (z.B. Heckwagen Elektro Linkslenker Laststufe 2)
- Parallele Stationen (z.B. WPS 1-4)
- Rezirkulation (Aufträge besuchen eine Station mehrmals)
- Fahrt- und Rüstzeiten

zusätzlich implementiert. Das Rescheduling-Problem wird in dem Verfahren als sequentieller Markov'scher Entscheidungsprozess modelliert (siehe Abbildung 33): Jede Station im Karosserierohbau wird als separater *Agent* interpretiert, dessen *Aktionen* die Auswahl nächsten zu bearbeitenden Auftrag unter den für ihn jeweils verfügbaren Aufträgen anhand einer gelernten Prioritätsregel darstellt. Verfügbare Aufträge sind dabei Vorder- und Heckwagen, die entweder bereits im Eingangspuffer auf die Bearbeitung warten, oder noch an einer Vorgängerstation bearbeitet werden. Der *Zustand* des Systems zu einem Zeitpunkt wird durch die Menge der Agenten und der Aktionsräume beschrieben. Der Zeithorizont wird in diskrete Schritte der Länge 1s zerlegt. In jedem Zeitschritt wählen alle Agenten, die gerade keine Fügeoperationen durchführen, den nächsten Auftrag aus ihrem Aktionsraum aus. Der betroffene Auftrag wird dann aus dem Aktionsraum entfernt und bei Bearbeitungsbeginn in den Aktionsraum der möglichen Nachfolgestationen eingefügt. Durch dieses *Übergangsgesetz* ergibt sich ein über die Zeit veränderlicher Aktionsraum. Es werden so viele Zeitschritte durchlaufen, bis die Aktionsräume aller Agenten leer sind. Die Bewertung des Rescheduling erfolgt durch eine *Gewinnfunktion*, die die Gesamtdurchlaufzeit der vom Rescheduling betroffenen Aufträge beschreibt.

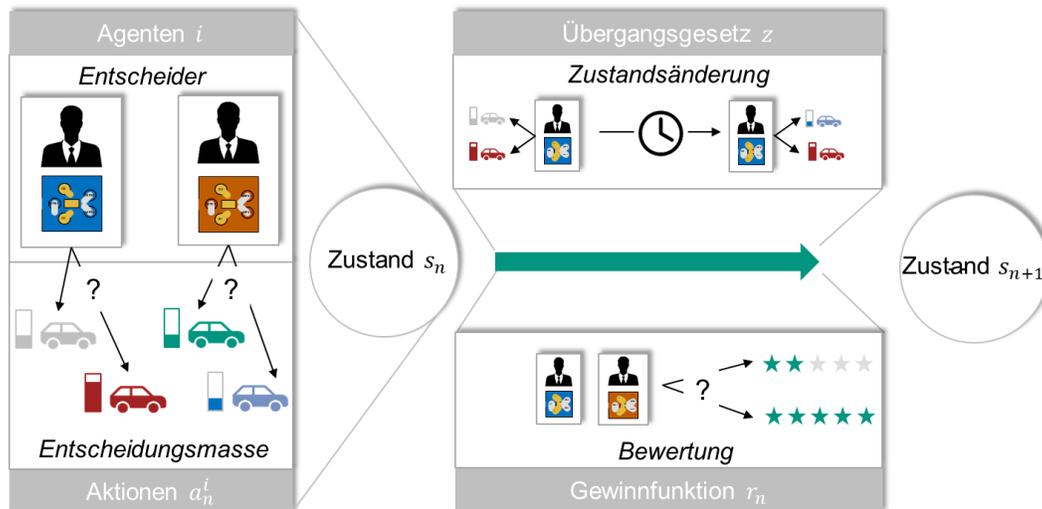
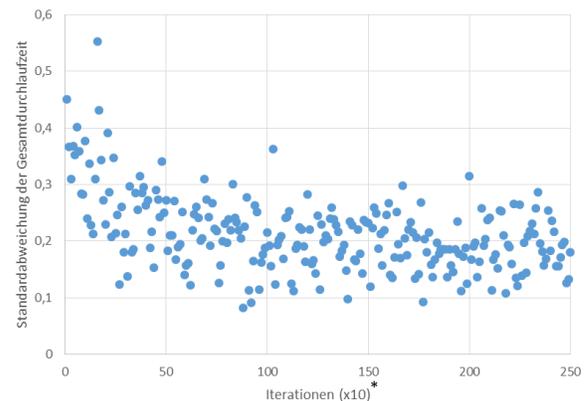
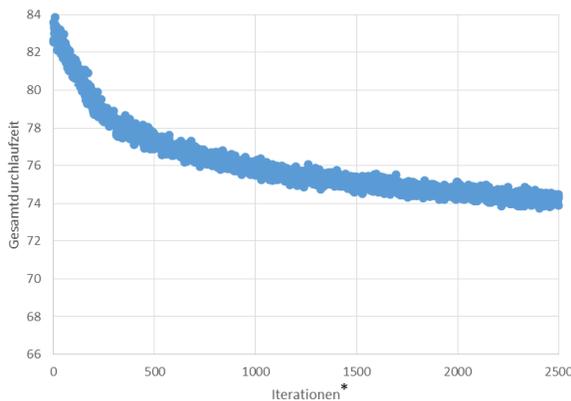


Abbildung 33: Modell des MAS

Das MAS lernt für jeden Agenten eine Entscheidungsregel, indem Rescheduling-Korridore wiederholt neu geplant und die resultierende Gesamtdurchlaufzeit ermittelt wird. Die Entscheidungsregel kommt über Lernparameter für jeden Auftragstyp und jeden Agenten zustande. Für 22 Stationen und 16 Auftragstypen werden also insgesamt  $22 \cdot 16 = 352$  Lernparameter iterativ gelernt. Gewählte Aktionen betreffen immer einen dieser Lernparameter und führen zu dessen Erhöhung, wenn die Gesamtdurchlaufzeit geringer ausfällt bzw. zu dessen Verringerung, wenn die Gesamtdurchlaufzeit höher ausfällt. Über viele Lerniterationen hinweg werden die Lernparameter so angepasst, dass sie ein relativ gutes Rescheduling in sehr geringer Zeit erreichen und somit die Echtzeitfähigkeit des Reschedulings sicherstellen können.



\*1 Iteration entspricht 200 unterschiedlichen Störungen

Abbildung 34: Absolute Gesamtdurchlaufzeiten und relative Abweichungen für ein Benchmark-Problem

In Abbildung 34 ist im linken Schaubild die Gesamtdurchlaufzeit über die Anzahl durchgeführter Lerniterationen für ein ausgewähltes Benchmark-Problem angegeben. Es zeigt sich zum einen, dass die Gesamtdurchlaufzeit mit höherer Anzahl Lerniterationen sinkt, es zeichnet sich allerdings außerdem ein asymptotischer Trend ab. Im rechten Schaubild ist die Standardabweichung der Gesamtdurchlaufzeit über die Anzahl durchgeführter Lerniterationen dargestellt. Neben der absoluten Verbesserung zeigt sich hier eine Verringerung der Streuung mit höherer Anzahl Lerniterationen. Die verbleibende Streuung resultiert aus der Stochastik der Rescheduling-

Korridore, da zufällige Störungen simuliert werden. Eine gelernte Prioritätsregel kann unter solchen Umständen nicht für jeden Einzelfall das beste Ergebnis ermitteln, sondern strebt ein im Mittel möglichst optimales Ergebnis an.

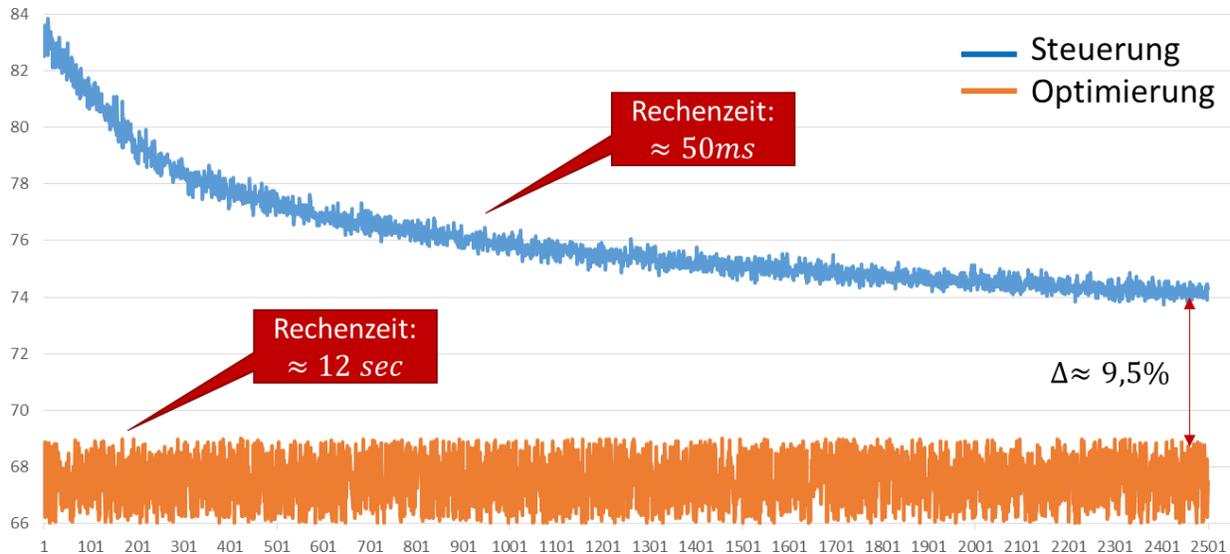


Abbildung 35: Vergleich zwischen MAS und Optimierung

Der Vergleich zwischen MAS und einer mathematischen Optimierung ist in Abbildung 35 dargestellt. Die Optimierung (orangene Linie) erzielt immer das optimale Ergebnis, da dort kein Lernmechanismus integriert ist. Die Schwankungen kommen durch die stochastisch erzeugten Stationsausfälle zustande. Das MAS (blaue Linie) stellt denselben Verlauf wie in Abbildung 34 dar. Nach 2500 Trainingsiterationen zeigt sich, dass die Abweichung der erzielbaren Gesamtdurchlaufzeiten noch lediglich 9,5% ergibt. Wesentlicher Unterschied ist die Rechenzeit, die für die Optimierung jeweils ca. 12s benötigt, während das MAS innerhalb von 50ms eine Lösung erzeugt. Großes Potenzial ergibt sich hinsichtlich der Skalierbarkeit der Rescheduling-Korridore, da die Rechenzeit der Optimierung exponentiell ansteigt, während diejenige des MAS linear mit der Problemgröße ansteigt.

Für das Steuerungsproblem insgesamt lässt sich feststellen, dass die in die Simulation von flexis eingespeisten Produktionspläne bei unerwarteten Störungen zur Generierung eines Rescheduling-Korridors führen, der dann extern in einem anzulernenden MAS umgeplant und wieder in die Simulation eingespielt wird. Je nach Trainingsdatenmenge lässt sich damit eine Approximation einer mathematisch optimalen Lösung mit einer Abweichung von unter 10% erreichen, während die Rechenzeiten allerdings um ein Vielfaches geringer sind.

### 2.1.5 Arbeitspaket 5: Wirtschaftlichkeitsbewertung

Die Wirtschaftlichkeitsbewertung im flexiblen Karosserierohbau ist ein entscheidender Schritt für die Anwendung des neuen Konzeptes in der Praxis und wurde daher in SmartBodySynergy in diesem Arbeitspaket entsprechend weiterentwickelt (siehe Abbildung 36). Der flexible Karosserierohbau bewusst durch einen Vorhalt von Flexibilität und eine wandlungsfähige Gestaltung überdimensioniert ist, kann eine konventionelle Kostenrechnung für diesen Fall nicht sinnvoll verwendet werden. Die heutige Kostenrechnung betrachtet die Kostenstruktur für jeden Produktlebenszyklus (LC) separat in Blöcken à 7 Jahre. Dabei wird davon ausgegangen, dass für jeden LC eine komplett neue Anlage beschafft werden muss. Die Investition muss sich daher

bezogen auf einen LC bereits amortisieren. Ziel des flexiblen Karosserierohbaus ist eine teilweise Wiederverwendung bestehender Anlagen und Tätigung vergleichsweise geringer Investitionen für den zweiten LC.

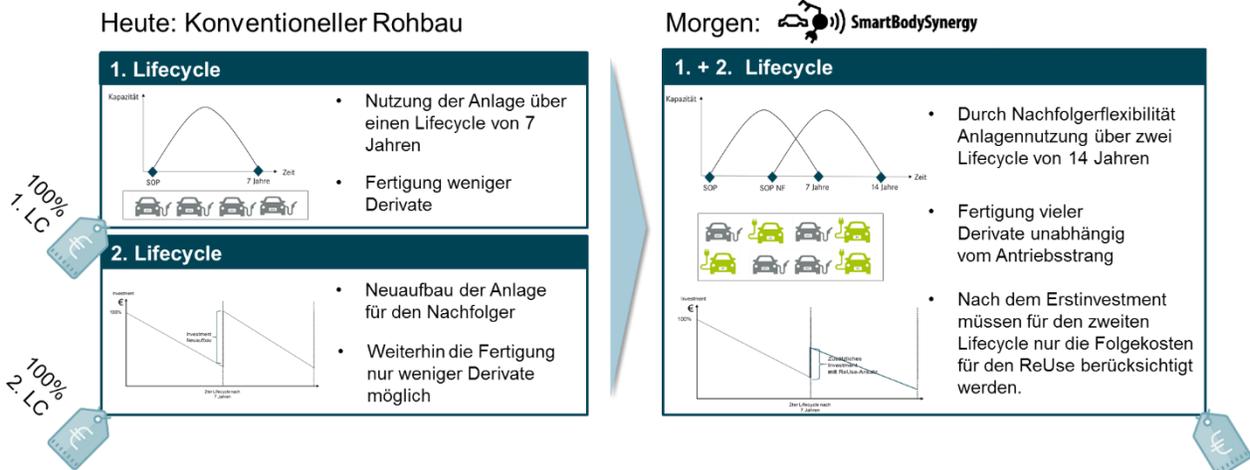
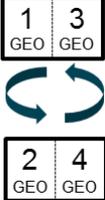
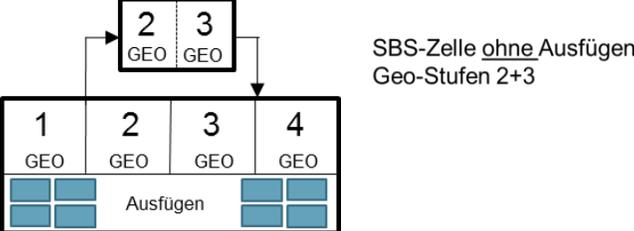


Abbildung 36: Herausforderung der Wirtschaftlichkeitsbewertung im flexiblen Karosserierohbau

Auf Basis dieser Voruberlegungen wurden drei Szenarien entwickelt, die sich über jeweils zwei LC erstrecken. Für jedes Szenario wurde Flächen- und Investitionsbedarfe mit Experten geschätzt. Grundlage der Szenarien war die Anforderung, einen Heckwagen mit drei Derivaten und einer Gesamtkapazität von 30 jph zu fertigen und ein Elektroderivat mit einer Kapazität von 8 jph nachträglich zu integrieren. Die Szenarien sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Szenarien für die Wirtschaftlichkeitsbewertung

	Systemaufbau		Funktionsweise
Szenario 1	3 Derivate Gesamtkapazität: 30 jph  konventionell	+ 1 Derivat Gesamtkapazität: 8 jph  „Mini“ konventionell	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine Integration in die bestehende konventionelle Anlage</li> <li>Freie Verteilung der Stückzahlen zwischen den Anlagen ist nicht möglich</li> <li>Fertigung einer zusätzlichen Stückzahl von 8 J/h</li> </ul>
	Szenario 2a	3 Derivate Gesamtkapazität: 30 jph  CubeTEC Vollversion	+ 1 Derivat Gesamtkapazität: 15 jph  SmartBodySynergy-Zelle ohne Ausfügen Geo-Stufen 1-4

<b>Szenario 2b</b>	<p>4 Derivate Gesamtkapazität: 30 jph</p>  <p>SBS-Zelle <u>ohne</u> Ausfügen Geo-Stufen 2+3</p> <p>CubeTEC Voll-Version</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Integration spezifischer Geometriestufen in bestehende CubeTEC-Anlage</li> <li>freie Skalierbarkeit des zusätzlichen Derivats von 0-15 jph innerhalb der Gesamtkapazität</li> <li>Keine Kapazitätserweiterung</li> <li>Kapazitätsausgleich bei Absatzverschiebungen im Markt möglich</li> </ul>
<b>Szenario 3</b>	<p>3 Derivate Gesamtkapazität: 30 jph</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Volle Geometrie- und Fügeflexibilität mit dem zusätzlichen Flexibilisierungsequipment</li> <li>Zusätzliche NC-Locatoren</li> <li>Flexible Greifer</li> <li>Matrizenwechsler</li> <li>Keine Integration einer SBS-Zelle mehr notwendig</li> <li>Freie Verteilung der Stückzahlen aller Derivate innerhalb der Gesamtkapazität möglich</li> <li>Keine Kapazitätserweiterung</li> </ul>

Eine exemplarische Auswertung der Szenarien 1 und 2a/2b ist in Abbildung 37 dargestellt. Es zeigt sich, dass durch die Flexibilisierung des Produktionssystems geschätzte Einsparungen der Mittelbedarfe in Höhe von 14% gegenüber einem konventionellen Rohbau realisiert werden können. Die Flächenbedarfe sind in der Auswertung nahezu konstant. Die Mehrbedarfe durch Überinstrumentierung im ersten LC werden durch geringe Zusatzbedarfe im zweiten LC nahezu komplett kompensiert. Fazit der gesamten Auswirkungen ist die Empfehlung, unter volatilen Marktbedingungen Szenario 2b zu wählen. Die Anlage ermöglicht die optimale Nutzung von Synergien zwischen bestehenden Produktionsanlagen und einer nachträglichen Integration einer SmartBodySynergy-Zelle und bietet Vorteile, auf Stückzahlschwankungen durch einen Kapazitätsausgleich zu reagieren und spezifische Geometriestufen sehr wirtschaftlich zu fertigen.

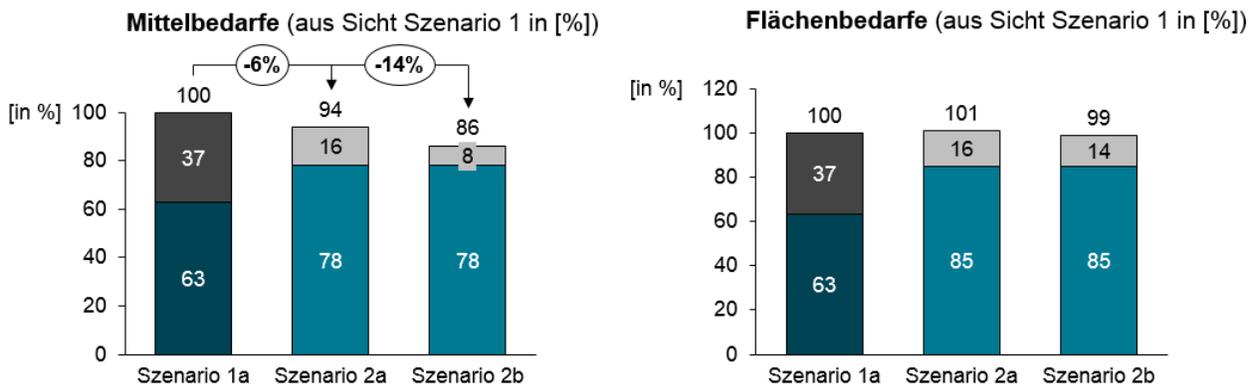


Abbildung 37: Vergleich der Mittel- und Flächenbedarfe zwischen Szenario 1 und 2a/2b

## 2.2. Verwertung der Ergebnisse

Lfd. Nr.	Ergebnis	Verwertung
1	Forschung zu Fügetechnik, Qualitätssicherung und Steuerungs- und Logistikkonzepten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einbindung des Demonstrators zum verriegelungsfreien Fügen mit Positionierungsalgorithmus in die Lehrveranstaltung „Produktionsintegrierte Messtechnik“ (<a href="https://www.wbk.kit.edu/lehrveranstaltungen_3431.php">https://www.wbk.kit.edu/lehrveranstaltungen_3431.php</a>)</li> <li>• Einbindung der Ablaufsimulation und der Produktionssteuerung in die Lehrveranstaltung „Integrierte Produktionsplanung im Zeitalter von I4.0“ (<a href="https://www.wbk.kit.edu/lehrveranstaltungen_1885.php">https://www.wbk.kit.edu/lehrveranstaltungen_1885.php</a>)</li> </ul>
2	Abschlussarbeiten	Siehe 2.4 Veröffentlichungen
3	Dissertationen	1 Dissertation zum Thema Produktionssteuerung in 2020
4	Schriftliche Publikationen	Siehe 2.4 Veröffentlichungen
5	Workshops / Tagungen	
6	Beteiligung an Transfermaßnahmen	Mitwirkung bei BMWi Workshops zum Thema elektromobile Wertschöpfungskette in Deutschland sowie bei der e-mobil bw
7	Website	<a href="http://www.wbk.kit.edu/wbkintern/Forschung/Projekte/SmartBodySynergy/">http://www.wbk.kit.edu/wbkintern/Forschung/Projekte/SmartBodySynergy/</a>

## 2.3. Inzwischen bekannt gewordene relevante FE-Ergebnisse von dritter Seite

Es sind keine neuen FE-Ergebnisse bekannt, die für das Vorhaben relevant sind.

## 2.4. Veröffentlichungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden 19 studentische Abschlussarbeiten betreut (10 Bachelor- und 9 Masterarbeiten).

Die in SmartBodySynergy Veröffentlichungen werden auch auf der Projektwebsite <http://www.wbk.kit.edu/wbkintern/Forschung/Projekte/SmartBodySynergy/> aufgeführt.

- Echsler Minguillon, F., Lanza G., (2017), „Maschinelles Lernen in der PPS - Konzept für den Einsatz von maschinellem Lernen für eine Matrix-Produktion“ in: wt Werkstattstechnik 9/2017, S. 630-634
- Echsler Minguillon, F.; Lanza, G. (2018): Coupling of centralized and decentralized scheduling for robust production in agile production systems, 12th CIRP Conference on

- Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 18-20 July 2018, Gulf of Naples, Italy (angenommen, aber noch nicht veröffentlicht)
- Kupzik, D. (2017), „Vorrichtungsfreies Fügen in smarten Rohbauzellen“, in: handling 6/2017, S. 36–37
  - Kupzik, D., Haas, S., Stemler, D., Pfeifle, J., Fleischer, J., (2018), „Development of a manufacturing cell for fixtureless joining in car body assembly“ in: Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter, S. 22-30
  - Kupzik, D., Coutandin, S., Fleischer, J., 2018, „Flexibles vorrichtungsfreies Fügen“ in: VDI-Z 10/2018, S.21-25
  - Kupzik, D., Coutandin, S., Fleischer, J., 2018, „Vorrichtungsfreies Fügen - Variantenflexibler Karosserierohbau in smarterer Werkstattfertigung“ in: wt Werkstattstechnik online 10/2018, S.703-707
  - Kupzik, D., Coutandin, S., Fleischer, J., 2018, „Entwicklung des vorrichtungsfreien Fügens zur Flexibilisierung des Karosserierohbaus“ in: Tagungsband Neue Robotertechnologien in Produktion, Montage und Service, Hrsg. Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

### 3. Quellenverzeichnis

- [Bak-13] Bakker, O.J.; Papastathis, T.N.; Ratchev, S.M.; Popov, A.A.: Recent research on flexible fixtures for manufacturing processes, Recent Patents on Mechanical Engineering, Vol. 6, S. 107-121, 2013.
- [Bey-14] Beyer, R.: FlexMesCell. Flexible Fertigungsüberwachung im Karosserierohbau. VDI-Fachtagung Koordinatenmesstechnik. VDI Wissensforum GmbH. Braunschweig, 19.11.2014.
- [Bon-00] Bone, G.M.; Balan, L.: Gripper Design and Grasp Planning for Fixtureless Assembly, In: 31st International Symposium on Robotics (ISR), Montreal, 2000.
- [Bon-03] Bone, G.M.; Capson, D.: Vision-guided fixtureless assembly of automotive components, In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 19/1-2, S. 79-87, 2003.
- [Col-14] Colledani, M.; Tolio, T.; Fischer, A.; Iung, B.; Lanza, G.; Schmitt, R.; Váncza, J.: „Design and management of manufacturing systems for production quality“, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 63, Nr. 2, S. 773–796, 2014.
- [Fle-12] Fleischer, J.; Elser, J.: Spatial alignment of joining partners without fixtures, based on component inherent markings, In: Proceedings of the 4th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems, 20.-22.05.2012, Ann Arbor, Michigan, USA, 2012.
- [Fle-13] Fleischer, J.; Lanza, G.; Otter, M.; Elser, J.: Flexible Montage leichter Rahmenstrukturen. in: VDI-Z Integrierte Produktion, Heft/Band 6, Springer Verlag, S. 28 – 30, 2013.
- [Gab-12] Gabel, Thomas ; Riedmiller, Martin: Distributed policy search reinforcement learning for job-shop scheduling tasks. In: International Journal of Production Research 50 (2012), Nr. 1, S. 41–61

- [Gan-08] Gans, J.-E.: Neu- und Anpassungsplanung der Struktur von getakteten Fließproduktionssystemen für variantenreiche Serienprodukte in der Montage. Universität Paderborn, Dissertation, 2008.
- [Gan-11] Gans, J.-E.; Lanza, G.; Müller, R.; Peters, S.; Schoen, L.: Prognose des Driftverhaltens getakteter Montagelinien. In: wt Werkstattstechnik online, Vol. 101, Nr. 3, S. 162-166, 2011.
- [Gom-10] Gom-Gesellschaft für optische Messtechnik: Die Zukunft der Messtechnik im Fahrzeugbau - Anwendungsbeispiel: Automatisierte Roboterzelle zur Inspektion von Blechteilen. Pressemitteilung vom 29.11.2010.
- [Haa-17] Haas, Simon (2017), Entwicklung und Aufbau eines Greifers für das vorrichtungsfreie Fügen im Karosserierohbau. Bachelorarbeit, KIT Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.
- [Hes-97] Hesse, S.; Nörthemann, K.-H.; Krahn, H.; Strzys, P.: Vorrichtungen für die Montage, Expert Verlag, 1997.
- [Hu-11] Hu, S.J.; Ko, J.; Weyand, L.; ElMaraghy, H.A.; Lien, T.K.; Koren, Y.; Bley, H.; Chryssolouris, G.; Nasr, N.; Shpitalni, M.: Assembly system design and operations for product variety. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 60, S. 715–733, 2011.
- [Isr-11] ISRA Vision: Flexibel, Effizient, Wirtschaftlich... für die Zukunft der automobilen Produktion, Darmstadt, 2011.
- [Jay-07] Jayaweera, N.; Webb, P.: Adaptive robotic assembly of compliant aero-structure components, In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 23, S. 180-194, 2007.
- [Jay-10] Jayaweera, N.; Webb, P.: Metrology-assisted robotic processing of aerospace applications, In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 23/3, S. 283-296, 2010.
- [Klu-10] Klug, Florian (2010): Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-05293-4>.
- [Kuh-10] Kuhn, D.: Internationaler Rohbau-Expertenkreis - Moderner Karosseriebau erfordert neue Fertigungs- und Automatisierungslösungen, In: MM Logistik - Das Fachportal für Logistikentscheider, [www.mm-logistik.vogel.de/distributionslogistik/articles/194522/](http://www.mm-logistik.vogel.de/distributionslogistik/articles/194522/), 09.07.2010.
- [Köl-14] Kölmel, A.; Sauer, A.; Lanza, G.: „Quality-oriented Production Planning of Battery Assembly Systems for Electric Mobility“, Procedia CIRP, Vol. 23, S. 149–154, 2014.
- [Kra-00] Kratzsch, S.: Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen. Essen: Vulkan-Verlag, 2000.
- [Lan-06] Lanza, G.; Fleischer, J.; Ender, T.: Modeling of Quality Development during Production Ramp-up by Elementary Processes. In: Butulana, P.; Hlebanja, G.

(Hrsg.): Proceedings of the 39th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Ljubljana, S. 505-510, 2006.

- [Lan-10a] Lanza, G.; Kippenbrock, K.; Kuhn, G.: Process Capability Indices for the Evaluation of Micro-Manufacturing Processes. 7th CIRP International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 23 - 25 June 2010, Capri, Italy, Conference Proceedings, ISBN 978-88-95028-65-1, S.1-4, 2010.
- [Lan-10b] Lanza, G., Viering, B.: Proposal of a Cylindrical Standard to Evaluate the Uncertainty of Measurement for Micro Gear Measurements. In: 10th International Symposium on Measurement and Quality Control, Osaka, Japan, F3-030-1, 2010.
- [Lan-11] Lanza, G., Viering, B.: A novel standard for the experimental estimation of the uncertainty of measurement for micro gear measurements, CIRP Annals Manufacturing Technology, Volume 60, Issue 1, Verlag Elsevier B.V., S. 543-546, 2011.
- [Lan-12] Lanza, G.; Peters, S.: Integrated capacity planning over highly volatile horizons. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, Elsevier, Vol. 61, S. 395-398, 2012.
- [Lan-13a] Lanza, G.; Stoll, J.; Krämer, A.: Assessment of Lamination Stack Production. In: 3rd International Electric Drives Production Conference (E|DPC), 29.-30.10.2013, Nürnberg, Deutschland, Proceedings, S. 52-59, 2013.
- [Lan-13b] Lanza, G.; Brabandt, D.; Bingemann, P.: Timesaving quality assurance for preforming in the automotive serial production of CFRP. 19th International Conference on Composite Materials, 2013, Montreal, Kanada, eProceedings by: Electronic Publishing BytePress.com, Suong Van Hoa; Pascal Hubert, Composite Materials: The Great Advance, S. 8309-8317, 2013.
- [Lan-14] Lanza, G.; Sauer, A.; Kölmel, A.: Configuration of a multi-use battery production. In: Zaeh, M.F. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Proceedings of the 5th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2013), München, Deutschland, 06.10.2013-09.10.2013., Springer, S. 473-478, 2014.
- [Lan-19] Lanza, G.: Inline Measurement Technology and Quality Control. In: Gao, W. (Hrsg.): Metrology, Springer Singapore, 2019 (In Vorbereitung)
- [Mer-17] Mertes, Thomas (2017), Zellentwicklung für das vorrichtungsfreie Fügen im Karosserierohbau. Bachelorarbeit, KIT Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.
- [Mod-13] Modrich, K.-U.: Inline-Messtechnik mit Industrierobotern. Expertenforum Automatisierte Messtechnik, Vortrag vom 03.12.2013.
- [Mor-12] Moratori, P.; Petrovic, S.; Vázquez-Rodríguez, J.-A.: Match-up approaches to a dynamic rescheduling problem, International Journal of Production Research, 2012
- [Par-00] Park, E.J.; Mills, J.K.: 6 DOF Localization of Sheet Metal Parts in Fixtureless Assembly Scheme, In: 31st International Symposium on Robotics (ISR), Montreal, 2000.

- [Par-02] Park, E.J.; Mills, J.K.: Three-Dimensional Localization of Thin- Walled Sheet Metal Parts for Robotic Assembly, In: Journal of Robotic Systems, 19/5, S. 207-217, 2002.
- [Pin-16] Pinedo, Michael L. (2016): Scheduling. Theory, Algorithms, and Systems. 5th ed. 2016. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-26580-3>.
- [Plu-96] Plut, J.W.; Bone, G.M.: Limited Mobility Grasp for Fixtureless Assembly, In: Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, 1996.
- [Plu-97] Plut, J.W.; Bone, G.M.: 3-D Flexible Fixturing Using a Mult- Degree of Freedom Gripper for Robotic Fixtureless Assembly, In: Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1997.
- [Ros-08] Roscher, J.: Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie. Universität Stuttgart, Dissertation, 2008.
- [Sch-11] Schlichting, J.; Steinfurth, H.; Maierhofer, C.; Kreuzbruck, M.: Thermografische Prüfung von Punktschweißverbindungen. DGZfP-Jahrestagung 2011.
- [Sch-13] Scheffler, M.: Inline-Messtechnik mit Industrierobotern - Elektronische Augen erkennen Fehler und messen im rauen Industriefeld. Automations Praxis Forum, Automatisierte Messtechnik. 2013.
- [Shi-02] Shirinzadeh, B.: Flexible fixturing for workpiece positioning and constraining, In: Assembly Automation, 22/2, S. 112-120, 2002.
- [Shi-95] Shirinzadeh, B.: Flexible and automated workholding systems, In: Industrial Robot, 22/2, S. 29-34, 1995.
- [Sta-00] Stavnitzky, J.; Capson, D.: Mutliple Camera Model-Based 3-D Visual Servo, In: IEEE Transactions on Robotics and Automation, 16/6, 2000.
- [Thy-10] ThyssenKrupp Drauz Nothelfer, Best-Fit, [www.drauznothelfer.com/deu/hlights12.htm](http://www.drauznothelfer.com/deu/hlights12.htm), 21.06.2010.
- [Tru-94] Trummer, A.; Wiebach, H.: Vorrichtungen der Produktionstechnik, Vieweg Verlag, 1994.
- [Vie-03] Vieira, Guilherme E.; Herrmann, Jeffrey W.; Lin, Edward (2003), "Rescheduling Manufacturing Systems: A framework of strategies, policies and methods". In: Journal of Scheduling 6 (1), S. 39–62. DOI: 10.1023/A:1022235519958.
- [Vol-09] Volling, T.: Auftragsbezogene Planung bei variantenreicher Serienproduktion. Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2009.
- [Wal-00] Walczyk, D.F.; Raju, V.; Miller, R.: Fixtureless assembly of sheet metal parts for the aircraft industry, In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, S. 173-182, 2000.
- [Web-05] Webb, P.; Eastwood, S.; Jayaweera, N.; Chen, Y.: Automated aerostructure assembly, In: Industrial Robot: An International Journal, 32/5, S. 383-387, 2005.

- [Wen-07] Wendt, K.; Keck, C.; Schwenke, H.: Prüfprozesseignung von Inline-Messtechnik im Karosseriebau, PTB Mitteilungen 117, Heft 4, S. 417-424, 2007.
- [Wey-02] Weyer, Matthias (2002): Das Produktionssteuerungskonzept Perlenkette und dessen Kennzahlensystem. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2002. Karlsruhe: Helmesverlag
- [Wir-08] Wirth, H.: Qualitätsdatenrückfluss und Qualitätsdatenmanagement am Beispiel der optischen 3D-Inline-Messtechnik. Automatica 2008, Vortrag vom 12.06.2008.
- [Wit-14] Horst Witte Gerätebau Barskamp e.K: Automatisierte Karosseriemessung. Pressemitteilung vom 17.12.2014.