

# Abschlussbericht zum FuE-Projekt

**Vorhaben:** Modellbasierte Kompensation von Fehlern in der Operationsfolge von Fertigungsprozessen (MoKomp)

**Förderprogramm:** KMU-innovativ: Informations- und Kommunikationstechnologie

**Förderkennzeichen:** 01IS18087A - 01IS18087B

**Durchgeführt von:** inigence GmbH  
Bernbachstraße 36  
74626 Bretzfeld  
und  
Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)  
Nöthnitzer Straße 44  
01187 Dresden

Assoziierter Partner:  
Läpple Automotive GmbH  
August-Läpple-Straße 4  
74076 Heilbronn

**Projektlaufzeit:** 01.07.2019 - 30.09.2021

**Projektleiter:** Prof. Dr.-Ing. Arndt Birkert  
Johannes Weber

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in der Fördermaßnahme „KMU-innovativ: Informations- und Kommunikationstechnologie“ (Förderkennzeichen 01IS18087A und 01IS18087B) gefördert und vom Projektträger Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen/Autoren. Da der Inhalt des Berichts sensible Daten der Projektbeteiligten enthält, die der Geheimhaltung unterliegen, sind teilweise Textpassagen und Abbildungen unkenntlich gemacht.

Autor(en):

Prof. Dr.-Ing. Arndt Birkert

Johannes Weber

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Voraussetzung unter der das Vorhaben durchgeführt wurde .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens .....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Planung und Ablauf des Vorhabens.....</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>Erzielte Ergebnisse.....</b>	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>Nutzen für das Unternehmen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses.....</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenarbeit mit anderen Stellen oder außerhalb des Verbundprojektes .....</b>	<b>11</b>
<b>8</b>	<b>Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen.....</b>	<b>46</b>
<b>9</b>	<b>Veröffentlichungen, Vorträge, Referate .....</b>	<b>46</b>

## 1 Aufgabenstellung

Die **Aufgabenstellung** im Verbundprojekt war es, ein neuartiges Software-Tool zu erforschen und zu erstellen, mit dessen Hilfe die Abstimmung von Baugruppen und Zusammenbauten (ZBs) vereinfacht und automatisiert werden kann. Für die Korrektur bzw. erfolgreiche Abstimmung eines Zusammenbaus wird ein übergeordnetes Modell benötigt, mit dem es gelingt, in der Prozesskette zur Fertigung eines ZBs individuelle Wirkzusammenhänge zu identifizieren. Zur Identifizierung von Hauptbeitragsleistern bezüglich der Maßhaltigkeit über den gesamten Fertigungsprozess wurden mathematische Modelle benötigt, die vom IWU zur Verfügung gestellt und direkt für die Implementierung in das Software-Tool genutzt werden sollten. Die Funktionsfähigkeit des Software-Tools sollte an einer realen Prozesskette des Karosseriebaus (Läpple) verifiziert werden.

Mit Hilfe des neuartigen Software-Tools sollte es möglich sein, dominierende Bauteile respektive Unterbaugruppen zu identifizieren, welche die Maßhaltigkeit der Baugruppe in hohem Maße bestimmen. Diese Bauteile können gezielt korrigiert bzw. abgestimmt werden. Dazu kann zum einen virtuell analysiert werden, wie die Vorrichtung zu modifizieren ist, um die Maßhaltigkeit des ZBs zu verbessern. Zum anderen kann die Rückfederungskompensation des Einzelteils so erfolgen, dass Abweichungen im ZB gezielt entgegengewirkt wird. So kann die Kompensation von Fehlern verschiedener Beitragsleister (Einzelteile, Füge- und Wärmebehandlungsprozesse) in der Toleranzkette erreicht werden, ohne alle Einzelteile oder Unterbaugruppen mit hohem Aufwand einzeln kompensieren bzw. korrigieren zu müssen.

Grundlage des angestrebten Software-Tools sollte eine mathematische Modellierungsmethode auf Basis der CPA (Ackert et al. 2017) (engl. Coupled Process Analysis) sein, welche die Kausalbeziehungen zwischen den Prozessstörgrößen und der Geometrie von Bauteilen und Baugruppen über den gesamten Prozess im Karosseriebau herstellen und analysieren kann. Das Modellierungsverfahren sollte die gesammelten Daten mittels Hauptkomponentenanalyse zu orthogonalen Fehlermoden komprimieren und sie zu einem stochastischen Modell koppeln (CPA-Ansatz (Ackert et al. 2017)). Dieses Modell sollte dann einer varianzbasierten Einflussanalyse unterzogen und die Ergebnisse visualisiert werden. Ergebnis dieses Vorgehens sind die benannten Beitragsleister bzw. die jeweils dominierenden strukturgebenden Komponenten.

Für die Komponenten/Beitragsleister sollten im Anschluss Maßnahmen zur Verbesserung der Maßhaltigkeit entwickelt werden. Aus diesen Maßnahmen können wiederum Empfehlungen für den Justageprozess im Prozessanlauf sowie für die laufende Produktion bei Parameterschwankungen (z. B. Materialschwankungen) formuliert werden.

Folgende Ziele waren angestrebt:

- Erlangung eines grundlegenden Verständnisses über die maßlich relevanten Zusammenhänge beim Umformen, Spannen und Fügen von Baugruppen
- Generierung eines Modellansatzes, welcher es ermöglicht, verschiedenartige Datentypen (z. B. diskret, flächig) aus verschiedenen Datenquellen (z. B. Simulation, Realprozess) in verschiedenen Einheitensystemen (z. B. Kräfte, Abstände, Geschwindigkeiten) zu einem übergeordneten Zusammenhangsmodell zu verknüpfen.
- Aufbau einer benutzerfreundlichen, selbsterklärenden Softwareumgebung, welche es dem Anwender ermöglicht, selbstständig Karosseriebauprozessdaten aufzubereiten, komplexe Wirkzusammenhänge zu interpretieren und darauf aufbauend Stellmaßnahmen abzuleiten
- Systematisierung und Digitalisierung des Matching-Prozesses:
  - Transparenz durch Visualisierung und durchgängige Dokumentation
  - Modellbasierte Abstimmmaßnahmen
- Reduktion der notwendigen Kompetenzen der Anlagen-Inbetriebnehmer, da erfahrungsbasierte Stellmaßnahmen durch modellbasierte Lösungsvorschläge z. T. substituiert werden können
- Reduzierung des Korrektur- und Einarbeitungsaufwandes um ca. 50 %
- Reduzierung der Anlaufzeit um ca. 5 % (Bei einer Anlaufzeit von 9 Monaten beträgt die Reduzierung ca. 15 Tage. Als Faustformel zur Berechnung der Kosten eines Anlagenanlauftages werden allgemein 1 Mio. € Kosten pro Tag angenommen.)

## 2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Antragssteller sind alle bereits seit längerer Zeit im beschriebenen Themengebiet tätig, sodass ausreichend Expertise bestand:

**inigence** sieht im Markt enormes Potential, um OEMs und 1st-tier-Zulieferer im Bereich Maßhaltigkeit Gesamtkarosserie und Karosseriebaugruppen zu unterstützen. Die Betätigung im Bereich Baugruppen ergänzt die bereits laufenden Aktivitäten im Bereich Einzelteil (Bauteilrückfederung + Kompensation => Baugruppenrückfederung + Kompensation) ideal. Das Unternehmen beschäftigt sich bereits seit der Gründung mit der Entwicklung von Software-gestützten Lösungen zur Werkzeugkorrektur und Rückfederungskompensation.

Durch die Erarbeitung von mehreren Einzellösungen wurde ein einzigartiges Know-how in diesem Bereich aufgebaut.

Die Projekte bezogen sich unter anderem auf die Rückfederungskompensation und Werkzeugkorrektur von Einzelteilen mit innovativen Methoden, die dazu führen, dass eine sehr gute Oberflächenqualität erreicht wird. Die logische Folgerung aus dem tieferen Einsteigen in die Materie ist die Betrachtung der Herstellung von Baugruppen. In vielen Fällen wurde deutlich, dass einzeln korrigierte Bauteile nicht automatisch zu einem maßlich korrekten Zusammenbau führen. Dies führte wiederum zu diesem Projekt.

Das **Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)** ist das Leitinstitut für ressourceneffiziente Produktion innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft. Sein Hauptaugenmerk liegt auf der Entwicklung von Effizienztechnologien und intelligenten Produktionsanlagen zur Herstellung von Karosserie- und Powertrainkomponenten sowie der Optimierung der damit verbundenen umformenden und spanenden Fertigungsprozesse, wobei die Betrachtung von gesamten Prozessketten fokussiert wird.

Das Institut arbeitet im Rahmen verschiedener Industrie- und öffentlich geförderter Projekte an neuen Methoden zur effizienten Qualitätsanalyse im Karosseriebau, sowie deren numerische Abbildung als Prozesskette. In diesem Rahmen wurden große Fortschritte in der mathematischen Abbildung von Wirkzusammenhängen mithilfe von Metamodellen erreicht und publiziert.

Die **LÄPPLE AUTOMOTIVE GmbH (LA)** fertigt Blechteile und Baugruppen vorwiegend aus Stahl und Aluminium für den automobilen Karosseriebau. Das Unternehmen bearbeitet Großaufträge der Automobilindustrie und besitzt somit ein riesiges Know-how hinsichtlich der praktischen Rohbauabstimmung.

### **3 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens**

Die Korrektur von Einzelteilen in Umformprozessen war vor Projektbeginn bereits Stand der Technik und wird insbesondere auch von inigence unter Nutzung verschiedener Softwaretools als Dienstleistung angeboten. Im Gegensatz dazu steht die Korrektur von Baugruppen und ZBs noch ganz am Anfang der Entwicklung. Es existieren aktuell keine Softwarelösungen, die eine übergeordnete Analyse von Baugruppen und ZBs ermöglichen. Aus diesem Grund mussten bisher alle einzelnen Bauteile aufwendig korrigiert und kompensiert werden, ohne eine Garantie, dass im Ergebnis die Toleranzen des Zusammenbaus stimmen.

Um die Herstellbarkeit eines einzelnen Zusammenbaus abzusichern, bietet die Firma *AutoForm* das Modul *HemPlannerPlus* an. Im Rahmen dieser Softwarelösung lässt sich nur ein geringer Anteil der bei der Karosserieherstellung verwendeten Fügeverbindungen abbilden. Der überwiegende Anteil aus thermischen und punktförmig-mechanischen Fügeverfahren kann nicht erfasst werden. Zudem ist das Simulationsmodell diversen Limitationen unterlegen, welche den Einsatz im Bereich des Abstimmungsprozesses von Zusammenbaugruppen schwierig gestaltet:

- Simulation von maßlichen Abweichungen an einem einzelnen Zusammenbau ohne Bezug zum Herstellungsprozess
- Erfassung der Bauteilhistorie (Geometrie, Formänderungs-, Blechdickenverteilung und Eigenspannungszustand) nur von zwei Fügepartnern möglich.
- Das Fügen von mehreren Partnern ist standardmäßig möglich, allerdings wird dabei die Bauteilhistorie nicht berücksichtigt.
- Während des Fügens ist das innenliegende Strukturteil idealsteif und kann nicht verformt werden.
- Der *HemPlannerPlus* ist auf die Simulation einer Unterbaugruppe limitiert. Nachfolgende Prozessschritte lassen sich nicht mehr abbilden, somit wird es nicht gelingen, eine ganzheitliche Abbildung des Fertigungsprozesses zu generieren.

Die zu entwickelnde Softwarelösung sollte sich in vielerlei Hinsicht vom *AutoForm HemPlannerPlus* abheben und den weitaus höheren Komplexitätsgrad meistern:

- Betrachtung der Zusammenbau-Gesamtsituation zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Einzelteile
- Ermittlung von Einflüssen sowie Wechselwirkungen über den gesamten Fertigungsprozess
- Abbildung aller Unterbaugruppen ohne Einschränkung hinsichtlich der Fügeverbindung sowie deren Verknüpfung zu einem Gesamtprozess
- Nutzung von Prozessinformationen, wie Messberichte, von Unterbaugruppen

Die Kombination der genannten Bestandteile sollte es möglich machen, den Abstimmungsprozess effizienter zu gestalten. Die Basis für dieses Softwaretool sollte die PCA-Methode sein, sodass es möglich ist, kurzfristig Stellmaßnahmen für den Kunden zu entwickeln, mittelfristig die Korrektur von maßbestimmenden Einzelteilen anzuraten und langfristig die Streuung der Einzelteile zu bewerten und Maßnahmen zu definieren, welche Prozesse nachhaltig verbessern helfen (siehe Abbildung 1).



**Abbildung 1:** Ausbau-/Entwicklungsstufen des Softwaretools zur Verbesserung des Abstimmungsprozesses der Karosserieherstellung

Die Nutzung der PCA (Principal Component Analysis, Hauptkomponentenanalyse), auch in Kombination mit anderen statistischen Verfahren, erstreckt sich über ein breites Anwendungsfeld in der Karosseriebauplanung. 2013 zeigte Lindau (Lindau et al. 2013) an einer punktgeschweißten Baugruppe, dass es mit einer PCA-basierten Methode möglich ist, die resultierenden geometrischen Variationsmuster von einzelnen Prozessschritten als Eingangsdaten zur Bestimmung von Variationsmustern in den Folgeprozessen zu nutzen. Die PCA-Ergebnisse der einzelnen Prozesse können in den Fügepunkten zu übergeordneten PCAs der Folgeprozesse zusammengefasst werden. Das (Das et al. 2015) präsentierte 2015 eine Methode zur Auswertung von Tiefziehschwankungen in einer frühen Produktentwicklungsphase auf Basis von Simulationen. Über eine geometrische Modalanalyse können die entstehenden Schwankungen im Tiefziehprozess in einzelne Fehlermoden zerlegt und so die Einzelteilvariation statistisch charakterisiert und visualisiert werden

Mit Wärmefjord (Wärmefjord et al. 2013) startet 2013 die FEM-basierte prozessübergreifende Analyse der Auswirkung von Prozess- und Streugrößen vom Tiefziehen (z. B. Reibung, Geschwindigkeit) bis in den Zusammenbauprozess. Die Bewertung der Einzelteilvariation erfolgt auf Basis der PCA. Die Ergebnisse der PCA werden wiederum als Ausgangsdaten zur funktionalen Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Eingangsparametern und Bauteildeformation über ein Metamodell verwendet. Das Metamodell ermöglicht sowohl die Generierung von Monte-Carlo-Simulationen zur Ermittlung des 6-Sigma-Levels als auch die Identifizierung von Parametereinflüssen über eine Korrelationsanalyse.



Die bisher veröffentlichten Methoden basieren auf der Annahme, dass alle Prozessdaten durchgängig, vollständig und vom gleichen Typ vorliegen. Dies widerspricht jedoch dem realen Anwendungsfall im Anlauf und/oder Betrieb einer Karosseriebauanlage. Aufgrund begrenzter Kapazitäten werden zumeist nur als kritisch angenommene Tiefzieh- und/oder Zusammenbauprozesse numerisch untersucht.

Gerade im Anlagenanlauf von Fahrzeugkarossen besteht ein großes Interesse darin, die statistischen Wirkzusammenhänge über mehrere Prozessschritte und -linien zu untersuchen, um gezielt die dominierenden Beitragsleister hinsichtlich Maßhaltigkeit einer Baugruppe zu identifizieren und darauf basierend Maßnahmen zur Kompensation einzuleiten. Hierbei gelangten bestehende Ansätze durch die Notwendigkeit einer Datendurchgängigkeit an ihre Grenzen. Ebenfalls ist eine Kombination von Simulations-, Prozess- und Messdaten zu einem übergeordneten Modell mit den im Stand der Technik vorgestellten Ansätzen bislang nicht möglich gewesen. Dies wäre jedoch sinnvoll, um bereits vorhandene Simulationsdaten in die messtechnische Datenanalyse mit einbeziehen zu können, sodass die Ergebnisqualität der stochastischen Modelle durch den erhöhten Versuchsumfang verbessert werden kann.

Daher wird ein Software-Tool benötigt, welches anhand von geometrischen Messungen, Prozess- (z. B. Kräfte, Wege) und Simulationsdaten ein stochastisches Modell erstellen kann, aus dem Korrekturmaßnahmen einfach abgeleitet werden können. Eine Herausforderung war die fehlende Datendurchgängigkeit. Das Software-Tool muss so konzipiert werden, dass es auch dann die Prognosefähigkeit beibehält, wenn in einer Prozesskette nur lückenhaft Daten vorhanden sind. Konkret sollte es gelingen, zunächst die maßlich dominierende Komponente zu identifizieren und durch eine Kompensation derer alle anderen Maßabweichungen der Fügepartner zu korrigieren. Dieses Vorgehen vereinfacht den Abstimmungsaufwand um ein Vielfaches, denn anstelle der Justage aller Komponenten sollte sich der Aufwand in Zukunft auf die maßlich dominierende Komponente beschränken.

## **4 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Projekt wurde in 13 Arbeitspakete unterteilt, die von den Projektpartnern kooperativ bearbeitet wurden:

Das Arbeitspaket 1 diente der Projektorganisation zu Beginn des Projektes und wurde vom Konsortialführer inigence geleitet. Alle Partner waren am Arbeitspaket beteiligt. Ebenfalls direkt zu Beginn startete das zweite Arbeitspaket zur Prozessanalyse. Im Rahmen des Paketes wurden verfügbare und benötigte Daten analysiert. Das AP 3 umfasste die Versuchsplanung zur Datenerzeugung auf Basis der in AP 2 erfassten Bedarfe. Beide

Arbeitspakete liefen also eng koordiniert ab. In beiden Paketen war inigence hauptverantwortlich. Die Partner lieferten Ergebnisse entsprechend ihrer Expertisen.

Im vierten Arbeitspaket wurden benötigte Betriebsmittel zur Erfassung der Daten konstruiert, beschafft und aufgebaut. Die Leitung in diesem Arbeitspaket lag beim IWU. Läßle unterstützte die Auswahl der Messvorrichtungen.

Der Aufbau eines parametrisierten FEM-Modells mit verschiedenen FE-Solvern wurde im AP 5 durchgeführt. Dadurch sollten Einzelteile und Unterbaugruppen numerisch abgebildet werden. Die Verantwortung lag bei inigence. Das IWU unterstützte die Arbeiten.

Die eigentliche Datenakquise beim assoziierten Partner und Anwender Läßle sollte im AP 6 erfolgen. Dafür wurden 1,5 Jahre Laufzeit eingeplant. Alle Partner waren an diesem Arbeitspaket beteiligt, wobei inigence verantwortlich für die Durchführung war. Parallel zur Datenakquise wurden vom IWU Methoden zur Datenreduktion und Modellbildung entwickelt (AP 7). Das hauptverantwortliche IWU wurde dabei von inigence unterstützt. Im AP 8 wurden auf Basis der Methoden aus AP 7 und der Daten aus AP 6 erste Modelle erstellt und somit erste Anwendungsuntersuchungen mit den neuen Methoden durchgeführt. Die Leitung lag bei inigence, das IWU und Läßle unterstützten. Die Verifikation der entwickelten Modelle wurde dann wiederum federführend von inigence (AP 9) durchgeführt.

Im letzten Drittel des Projektes sollte dann im AP 10 mit der Erstellung eines einsatzfähigen Prototypen-Tools zur Anwendung durch inigence begonnen werden. Inigence wurde dabei vom IWU unterstützt. Im AP 11 sollten Maßnahmen zur Kompensation von Baugruppen erarbeitet werden, die in das Softwaretool implementiert werden sollten bzw. die auf Basis der Ergebnisse aus dem Softwaretool umgesetzt werden können. Das Arbeitspaket wurde ausschließlich von inigence durchgeführt. Im AP 12 wurden dann auch konkrete Empfehlungen für den Justageprozess im Fertigungsprozess erarbeitet, um präventive Stellmaßnahmen aus dem Softwaretool zu prüfen. In diesem Arbeitspaket wurde inigence wieder von Läßle unterstützt.

Im letzten Arbeitspaket erfolgte die Dokumentation der Arbeiten.

Der beschriebenen Planung wurde während des Projektes grob gefolgt. Abweichungen ergaben sich aufgrund der praktischen Umsetzung. So wurden beispielsweise die Betriebsmittel in AP 4 zum Teil von inigence konstruiert und nicht von Läßle. Darüber hinaus war die Erfassung der Prozessdaten komplexer als geplant, sodass mehr Aufwand angefallen ist, als ursprünglich angedacht.

## **5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen oder außerhalb des Verbundprojektes**

An der Stelle ist insbesondere die Zusammenarbeit mit Läßle als assoziierter Partner zu benennen. In der Zusammenarbeit wurde zunächst ein Prozessverständnis unter allen Projektbeteiligten hergestellt und die Prozessinfrastruktur im Werk Heilbronn geklärt. Im Detail wurde die Prozessdokumentation besprochen. Die Datenerhebung der vorhandenen inLine-Messtechnik (z. B. die End-Kraft-Weg-Kontrolle der Stanznietzange) wurde diskutiert und die Datenübergabe an inigence bzw. das IWU eingerichtet. Darüber hinaus wurde die Teilebereitstellung gemeinschaftlich geplant und die Erprobungsphasen der im Forschungsprojekt erlangten Ergebnisse abgestimmt, sodass seitens Läßle ein Lieferverzug gegenüber dem Kunden ausgeschlossen werden konnte. Bei der Durchführung von Versuchen wurde seitens Läßle Personal bereitgestellt, um die Aktivität im Forschungsprojekt MoKomp zu unterstützen. Dies umfasst die Unterstützung bei der Umsetzung von Stellmaßnahmen, die Behebung von Stillständen in der SPS in den Erprobungsphasen sowie die Beihilfe zur Produktion von Musterbaugruppen. Des Weiteren wurde seitens Läßle eine Messvorrichtung zur Digitalisierung der gefertigten Musterbaugruppen im Kundenspannkonzert bereitgestellt.

Im Rahmen der Zusammenarbeit wurde festgestellt, dass die Dokumentation der Einstellung der Rohbauanlage meist über einfachste Exceltabellen oder in Phasen hoher Stückzahlen über Klebeetiketten an den Formauflagen der Fügevorrichtung erfolgt und im Nachgang in Exceltabellen eingepflegt wird. Im Rahmen der Diskussion wurde von inigence identifiziert, dass bei diesem Vorgehen Optimierungspotential hinsichtlich einer Automatisierung und anwenderfreundlichen Dokumentation besteht. Dieses Potential wurde von inigence im Rahmen des Projekts erschlossen und im Rahmen einer Testphase bei Läßle erprobt.

Eine engere Zusammenarbeit mit anderen Unternehmen oder Forschungseinrichtungen fand während des Projektes nicht statt.

## 6 Erzielte Ergebnisse

Zur übersichtlichen Zuordnung der Ergebnisse, werden diese getrennt nach den Partnern vorgestellt:

### *Inigence*

Zunächst wurde der Projektablauf gemeinsam mit den Partnern geplant und ein geeignetes Versuchsteil bestimmt. Als Untersuchungsgegenstand für das „MoKomp“-Projekt wurde der ZB „SEITENTEIL“ aus dem Projekt „[REDACTED]“, ausgewählt. Abb.2 zeigt das Bauteil.



**Abbildung 2:** ZB [REDACTED] „ZB-Seitenteil“

Gründe für den ZB „ZB-Seitenteil“ waren:

- Produktentstehungsprozess: Der Herstellungsprozess ist bereits weit fortgeschritten, Daten aus Anlauf sind ggf. noch vorhanden.
- Eine Streuung nach SOP ist durchaus zu erwarten, daher weiter interessant.
- Zugänglichkeit: Der Betrieb der Anlage ist eigenverantwortlich bei Läßple Automotive in Heilbronn. Die Zugänglichkeit ist somit gegeben.
- Teileumfang: Überschaubarer Umfang mit Fertigung diverser UZBs.
- Die Fügestellen der Bauteile lassen viele Wechselwirkungen erwarten.
- Füge-technologie: Die Varianz der Fügeverbindungen ist gering, daher ist die nicht zu bestimmende Abweichung durch ein fehlerhaftes Fügeersatzmodell ebenfalls gering.

Nach der Auswahl einer geeigneten Baugruppe wurde mit der Prozessanalyse begonnen. Dabei wurden alle verfügbaren und benötigten Daten betrachtet. Dies schließt die



██████████	ET	
██████████	UZB	7
██████████	UZB	
██████████	UZB	
██████████	UZB	
██████████	UZB	
██████████	UZB	
██████████	ZB	
██████████	Messvorrichtung	7
██████████	Messvorrichtung	
██████████	Messvorrichtung	
██████████	Messvorrichtung	
██████████	Messvorrichtung	
██████████	Messvorrichtung	
██████████	Messvorrichtung	
10WZ11	Anlage	7
10WZ13	Anlage	
10WZ15	Anlage	
10WZ17	Anlage	
10WZ19	Anlage	
10WZ21	Anlage	
10WU23	Anlage	

Die Daten wurden an unterschiedlichen Stellen der Prozesskette, wie Konstruktion, Teileproduktion und Fertigung, aufgenommen.

Bei den Daten handelt es sich um:

- Bauteildaten: CAD-Bauteile, Catia Drawing, Teilzeichnungen der Bauteile
- Prozessdaten: Simulationsergebnisse aus AutoForm, Dokumentation der Simulationsergebnisse, Methodenplanung in CAD und PDF, Dokumentation der Wirkflächen in CAD und Printversion.
- Messtechnikdaten: Digitale Messberichte und in Printversion, Messvorrichtungen in CAD, Lehrenkontrollmessungen
- Fügetechnikdaten: Verbindungstechnikdaten aus Catia, Fügeprozessparameter aus Catia, Daten aus den Prozessabläufen des Fügeverfahrens in Excel
- Fügevorrichtungsdaten: CAD-Daten der Fügevorrichtung, Layout der Anlage, Shimsbuch

Die Daten wurden anhand einer erstellten Ordnerstruktur archiviert. Zur Übersicht der Daten wurde eine Matrixdatenliste in Excel erstellt. Diese Liste setzt sich aus unterschiedlichen Reitern zusammen und beinhaltet alle Kategorien der Datensätze. Der Reiter Aufbaufolge z. B. zeigt eine einfache grafische Darstellung der Aufbaufolge des Zusammenbaus auf. Abb. 4 zeigt einen Ausschnitt der Aufbaufolge auf.

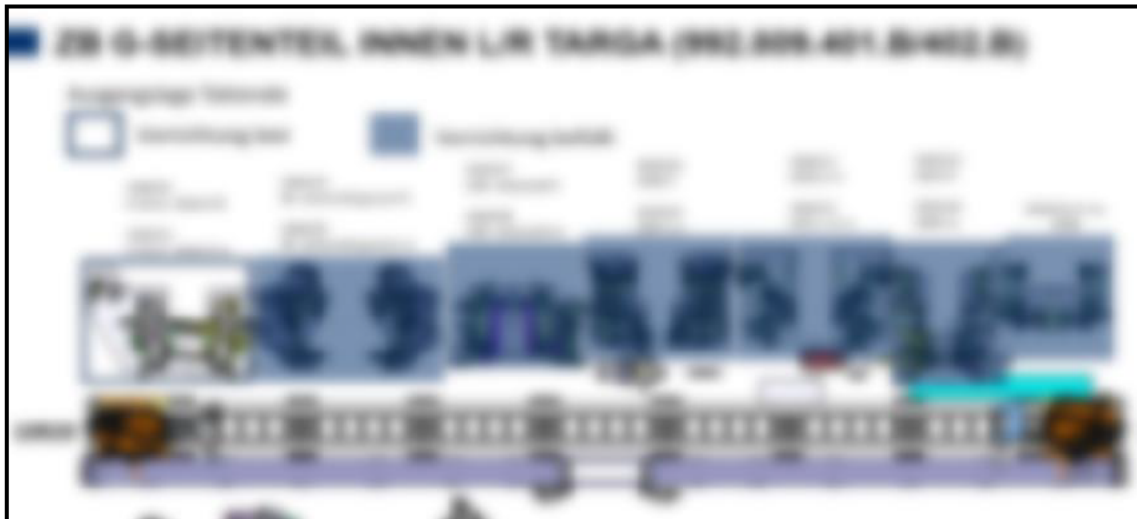


**Abbildung 4:** Ausschnitt Reiter Aufbaufolge

Aus dieser Übersicht ist zu erkennen, in welcher Anlage, welcher UZB aus welchen Einzelteilen gefertigt wird.

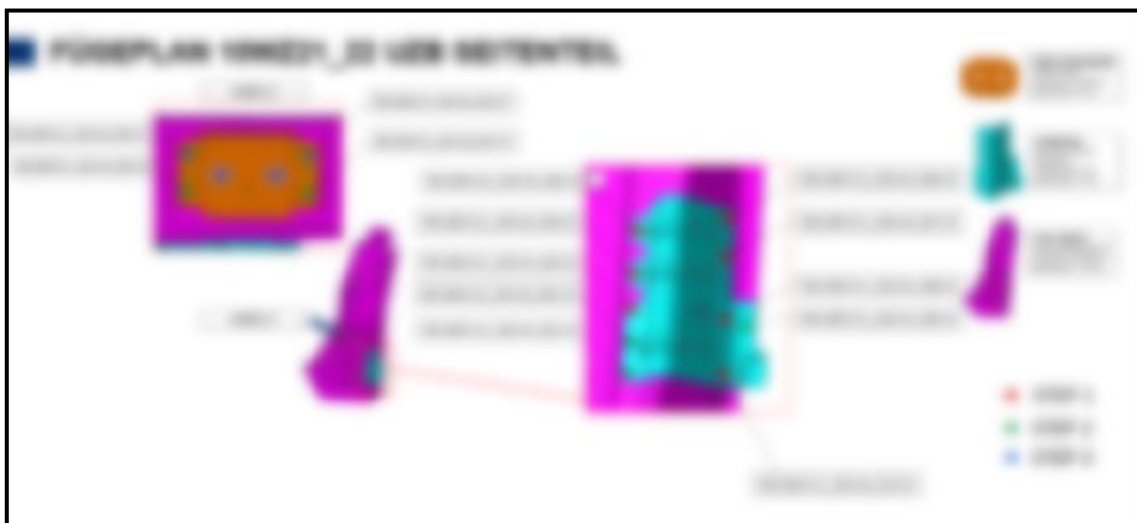
Um ein besseres Verständnis der Prozessabläufe des Zusammenbaus zu gewinnen, wurde der Reiter Bauteilaufbaufolge erstellt. Diese Liste enthält Bilder sowie die entsprechende Identifikationsnummer jedes Einzelteils und Bauteils. Die Aufbauhilfe zeigt den höher geordneten UZB auf und darunter aus welchen Bauteilen dieser zusammengesetzt ist. Des Weiteren ist hinterlegt, in welcher Anlage und unter welchem Fügeverfahren jeder UZB gefügt wird.

Firma Läßle stellte eine Ablaufbeschreibung anhand eines Anlagenlayouts für die Fertigung des ZB's zur Verfügung. Sie ist in der Abb.5 zu sehen.



**Abbildung 5:** Ablaufbeschreibung Fertigung [REDACTED] – „ZB-Seitenteil“

Der Untersuchungsgegenstand besteht aus insgesamt 12 ET, sieben UZB und einem ZB. Dieser wird in acht unterschiedlichen Stationen gefügt. Von der Firma Läßple wurde ein Fügeplan zur Verfügung gestellt. Dieser enthält zu jedem Fügeverfahren die Fügepunkte. In diesem Plan ist nicht näher erläutert, in welcher Reihenfolge gefügt wird (Reihenfolge der gesetzten Fügepunkte und Reihenfolge des Fügeverfahrens in der Anlage), siehe Abb. 6.



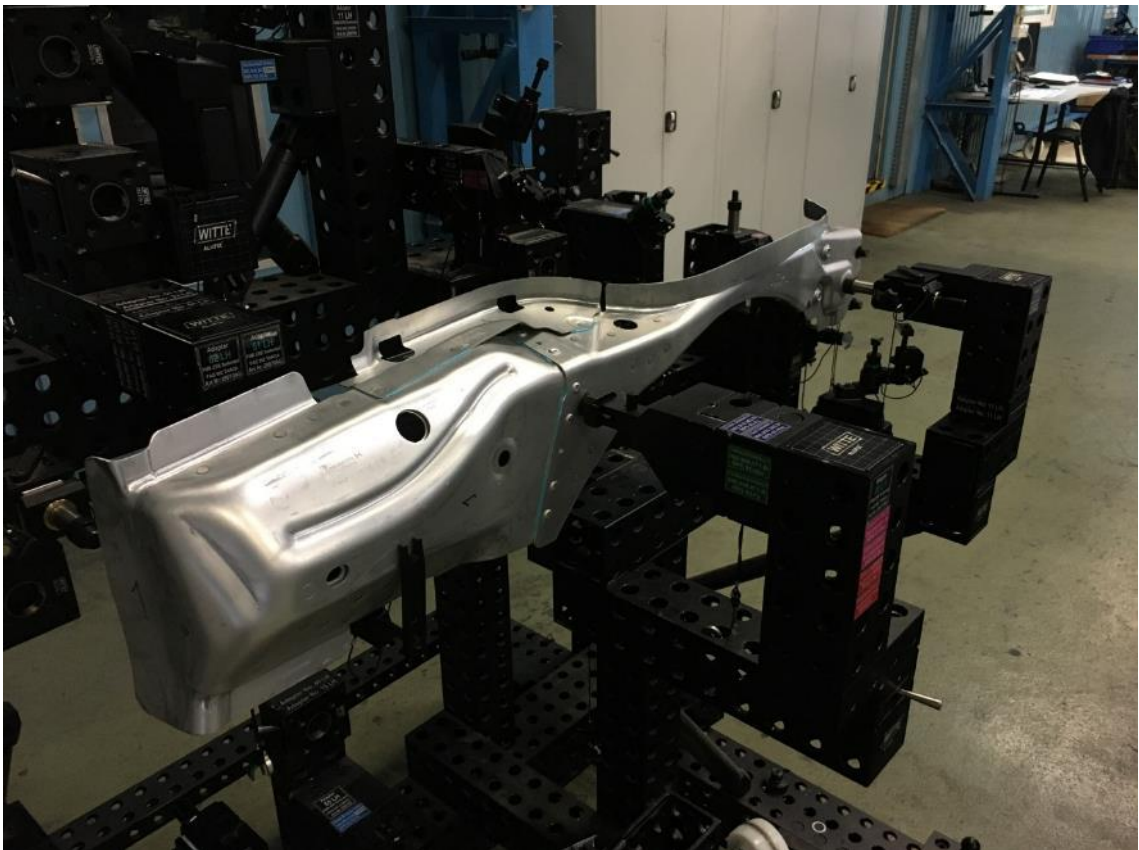
**Abbildung 6:** Ausschnitt des Fügeplans von der Firma Läßple

Um den Prozessablauf besser zu verstehen, wurde bei der Firma Läßple der Fügeprozess von inigence Mitarbeitern begleitet und gefilmt. Aus diesen Daten wurde eine Liste erstellt, in welcher die Reihenfolge des Fügeverfahrens dokumentiert werden konnte.



Parallel zur Prozessfassung wurde damit begonnen, die Daten mit Hilfe von numerischen Verfahren zu ergänzen. Die numerische Sensibilitätsanalyse gestaltete sich allerdings schwieriger als gedacht, da keine automatischen Schnittstellen zum Export existieren. Von jedem Bauteil existieren insgesamt 384 STL-Exporte mit verschiedenen Variationen. Die Versuchsplanung in AP 3 dauerte somit länger, als ursprünglich geplant.

Entgegen der ursprünglichen Planung hat inigence im Rahmen des AP 4 die Planung der Vorrichtung für die Vermessung der UZSBs bei Läßle übernommen. Dazu wurden die Anforderungen an den Fügemeisterbock formuliert, das Messkonzept überprüft (3-2-1-Regel) und der Aufbau der Messvorrichtung nach Anlieferung des Herstellers kontrolliert. In Abbildung 7 ist ein UZB, im Fügemeisterbock eingelegt, zu sehen.



**Abbildung 7:** Bauteil eingelegt im Fügemeisterbock

Zur numerischen Abbildung von Teilprozessen der Prozesskette, wurde zunächst der Versuch mit der Baugruppe „ZB-Verstärkung Schachtverstärker“ in ANSYS unternommen. Die ausgewählte Versuchsbaugruppe ist Teil des Seitenteiles INNEN und besteht aus vier Blechformteilen aus Aluminium. Abbildung 8 zeigt das Bauteil.



**Abbildung 8:** Bauteil ZB-Schachtverstärker

Die ausgewählte Karosseriestrukturbaugruppe besteht aus vier Einzelteilen und wird in zwei Stufen gefertigt. Die Aufbaureihenfolge besteht aus zwei Aufbaustufen. Abbildung 9 zeigt die Aufbaustufe mit den unterschiedlichen Bauteilen und Baugruppen.

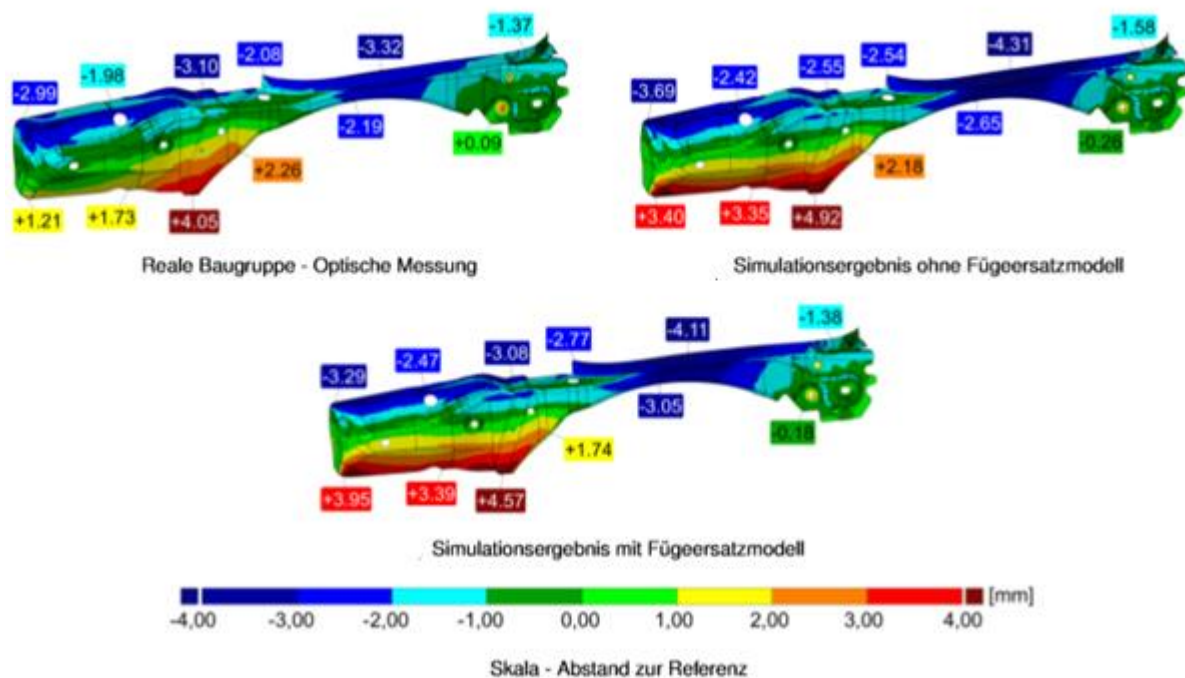


**Abbildung 9:** Aufbaureihenfolge Versuchsbaugruppe ZB-Verstärkung

Zu Beginn der Simulation wurden alle vier Einzelteile optisch vermessen. Somit lagen alle Geometriedaten digital vor. Um mit der Simulation zu beginnen, musste zunächst eine Lösung gefunden werden, die Spannflächen sowie den Fügeprozess abbilden zu können. Für die Spannfläche wurde ein wirkflächenbasierter Ansatz gewählt. Der Fügeprozess wurde zum Teil mit Ansys-Mechanical und zum anderen Teil mit spezifischen APDL-Makros möglich gemacht.

Das Simulationsergebnis wurde mit dem Messergebnis der realen Bauteile verglichen und es konnten bis auf kleine Bereiche zufriedenstellende Ergebnisse prognostiziert werden.

Im weiteren Verlauf wurde versucht, reale Stellmaßnahmen virtuell in der Simulation abzubilden. Nach dem Vergleich mit dem Realbauteil und dem Simulationsergebnis traten große Abweichungen auf. Zur Verbesserung des Prognoseergebnisses wurde ein thermisches Fügeersatzmodell erstellt, welches den Fügeverzug durch das Halbhohlstanzen, virtuell abbildet. Hierbei zeigte sich in Teilbereichen der Baugruppe eine verbesserte Prognosefähigkeit, jedoch ist kein durchweg positiver Effekt auf die Übereinstimmung des Simulationsergebnisses mit der realen Baugruppe nachzuweisen. In Abb.10 ist der Vergleich Realbauteil und Simulationsbauteil mit und ohne Fügeersatzmodell aufgezeigt.



**Abbildung 10:** Vergleich Simulationsergebnisse mit Realbauteil

Aufgrund der Abweichungen und der Tatsache, dass das IWU mit dem Programm Pam-Stamp arbeitet, wurde beschlossen, dass parallel zum Programm ANSYS, die Simulation in Zusammenarbeit mit IWU in Pam-Stamp aufgebaut wird.

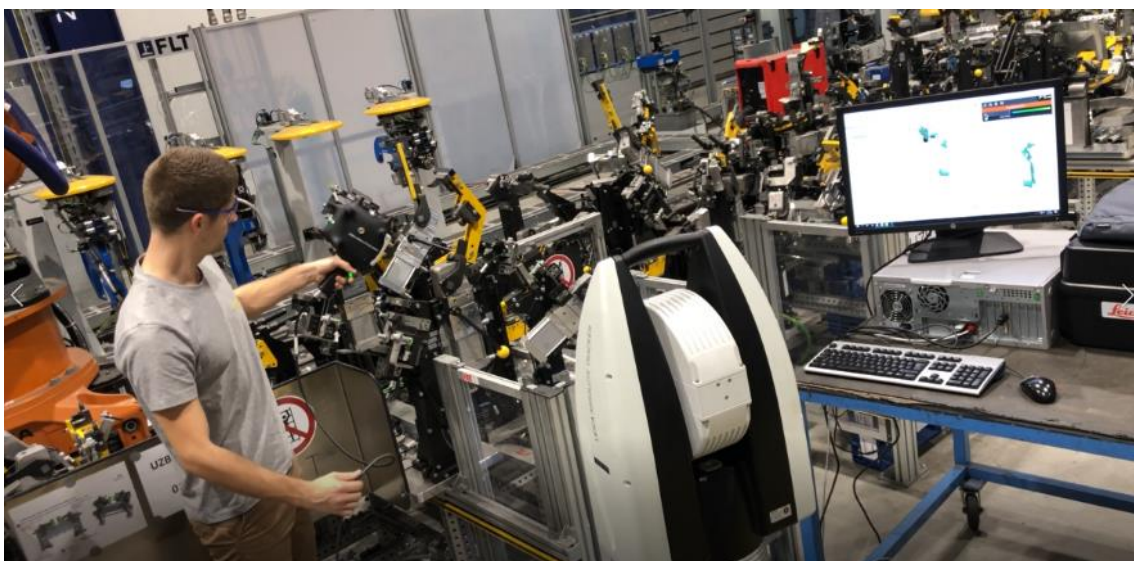
Zur Erfassung weiterer Daten wurde von Läßle die Möglichkeit gegeben, Bauteile eigenständig zu fertigen und nach jedem Fügeprozess zu vermessen. So konnten Daten ermittelt werden, welche die Abweichungen der Bauteilgeometrie nach jedem Fügeverfahren, aufzeigen. Firma Läßle stellte hierfür von jedem Einzelteil der Versuchsbaugruppe 10 Satz zur Verfügung.

Zu Beginn mussten alle Einzelteile vermessen werden. Da das IWU über eine Messstation verfügt, wurden einige Einzelteile nach Dresden versendet. Aus zeitlichen Gründen wurden einige Einzelteile bei Läßple durch inigence Mitarbeiter vermessen und digitalisiert.

Es wurden darüber hinaus vier Baugruppen nach jedem Fügeverfahren vermessen und sechs Baugruppen nach Serienfertigung (nur der ZB wird vermessen). Die Bauteile und der Fügemeisterbock (in der Messeinstellung für die jeweilige Baugruppe) wurden mit einem Leica Tracker vermessen.

Zur Rückverfolgbarkeit der Teile während der Produktion wurde ein Teilelebenslauf erstellt. Im Teilelebenslauf wird festgehalten, welche Bauteile miteinander gefügt wurden, in welchem Zeitraum die Teile gefügt wurden und welches Fügeverfahren in diesem Zeitraum stattfand. Nach der Produktion wurden die SPS-Daten aus der Anlage ausgelesen. Diese zeigen mit Datum und Uhrzeit, den Druck, die Temperatur und weitere Parameter des Fügeverfahrens auf. Diese Daten konnten anhand des Teilelebenslaufs den unterschiedlichen Baugruppen zugeordnet werden.

Nach der Produktion der Bauteile wurde die Anlage mit dem Leica Tracker vermessen. Abbildung 11 zeigt einen inigence Mitarbeiter, der mit dem Leica Tracker die Anlage vermisst.



**Abbildung 11:** Anlagenvermessung bei der Firma Läßple

Die Ergebnisse der Validierung des Simulationsmodells haben gezeigt, dass zwischen dem realen Herstellungsprozess und der Simulation signifikante Abweichungen bestehen. Daher wurde zur Verbesserung der Prozessdokumentation seitens inigence ein *Digitales Shimsbuch* entwickelt (Abbildung 12). Dieses Tool hilft, den Abstimmungsprozess seitens Läßple über wenige Schritte zu erfassen und die Durchführung in der Rohbauanlage zu unterstützen.



**Abbildung 12:** Stellmaßnahmen an der Rohbauanlage koordiniert über das Digitale Shimsbuch der inigence gmbh

Die umgesetzten Stellmaßnahmen werden auf dem inigence-Server gespeichert und erleichtern den Zugang zu prozessrelevanten Daten. Die vorliegende Einstellung der Rohbauanlage bei Läßple ist durch die Nutzung des *Digitalen Shimsbuchs* im Rahmen des MoKomp-Projekts bekannt und kann für die Simulationsmodelle genutzt werden.

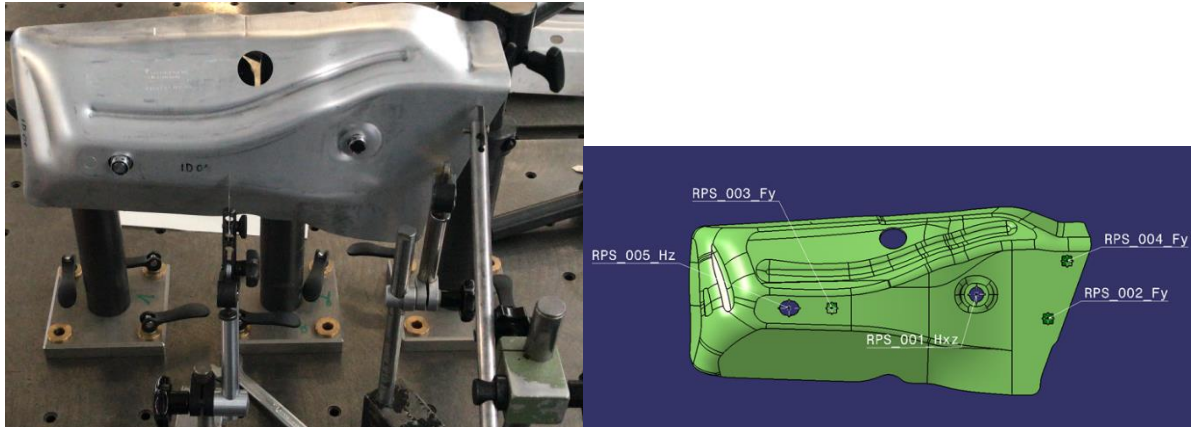
Das *Digitale Shimsbuch* dient nicht nur zur automatisierten Prozessdokumentation, sondern unterstützt den Mitarbeiter vor Ort, durch eine geführte Umsetzung die Stellmaßnahmen in der Rohbauanlage fehlerfrei zu realisieren. Stillstandzeiten und Abweichungen zwischen dem Simulationsmodell und der Anlage vor Ort sollen durch den Einsatz des *Digitalen Shimsbuchs* minimiert werden.

Ferner wurde die ziehtechnische Herstellung diverser Einzelteile in AutoForm abgebildet. Die vorliegenden AutoForm-Simulationen wurden im Zuge des Prozesses auf den aktuellen Datenstand der Bauteile angepasst. So wurden z. B. Bauteiländerungen in den virtuellen Herstellungsprozess eingebunden.

Auf Basis der Einzelteilsimulationen in AutoForm wurden Streuwertanalysen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analyse wurden der prozessbedingten Varianz der Maßhaltigkeit der Bauteile gegenübergestellt.

Zur Digitalisierung der UZSBs steht seitens Läßple eine Vorrichtung zur Verfügung, die genutzt wurde, um UZSBs verschiedener Versuchsreihen zu digitalisieren. Zur Messung der

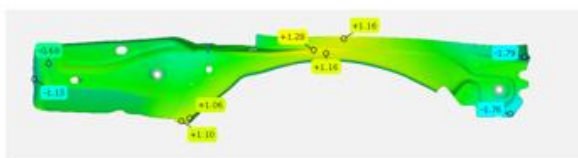
Einzelteile wurde eine flexible Messvorrichtung genutzt, welche auf das jeweilige RPS-System der Einzelteile angepasst wurde. Vor jeder Versuchsreihe wurden die Einzelteile digitalisiert (Abbildung 13).



**Abbildung 13:** links: Flexible Messvorrichtung zur Digitalisierung verschiedener Einzelteile, rechts: Vorgabe RPS-System

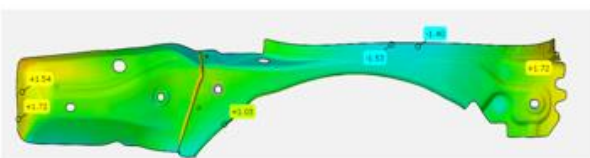
Neben der Verbesserung der Prozessdokumentation ist zur Steigerung der Simulationsqualität der Prozess der geometrischen Annäherung der Einzelteile betrachtet worden. Zudem wurde die Simulationsumgebung zur virtuellen Abbildung des Herstellungsprozesses von Baugruppen von ANSYS auf PamStamp umgestellt. Um bewerten zu können, welche Simulationsumgebung Simulationsergebnisse mit geringer Abweichung zum realen Prozess liefert, wurde der UZSB01 als Referenzbaugruppe in beiden Simulationsprogrammen mit vergleichbaren Eingangsinformationen aufgebaut. Die Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse zeigte signifikante Unterschiede (Abbildung 14).

UZSB 01 – Simulationsergebnis aus ANSYS



- Die Abbildung zeigt einen Vergleich des Scans mit der Simulation aus ANSYS
- Die Maximalen Abweichungen betragen -1,79 mm beziehungsweise +1,28 mm

UZSB 01 – Simulationsergebnis aus Pam-Stamp



- Die Abbildung zeigt einen Vergleich des Scans mit der Simulation aus Pam-Stamp
- Die Maximalen Abweichungen betragen -1,53 mm beziehungsweise +1,72 mm

**Abbildung 14:** Simulation des Fügeprozesses von UZSB 01 ausgewertet nach der Abweichung zur Referenzgeometrie

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Vorhersagegenauigkeit der beiden Simulationsmodelle deutliche Defizite aufweist. Die Ursachenforschung für die Abweichungen zur Realität wurde vorangetrieben, so wurde die geometrische Annäherung abweichungsbehafteter Einzelteile verbessert. Diese Änderung zeigt deutlichen Einfluss auf die Vorhersagegenauigkeit der Baugruppensimulation (Abbildung 15). Wenngleich die maximale Abweichung des Simulationsergebnisses nur um 0,1 mm reduziert werden konnte, ist die durchschnittliche Abweichung des Simulationsergebnisses zur Realität deutlich reduziert worden. Weitere Anpassungen wurden im Bereich der Abbildung des Schachtelprozesses vollzogen. Das Einlegen der Bauteile, welches seither durch ausschließlich einfache Verschiebungen zu simulieren war, wurde auf die komplexen Industrieprozesse erweitert (Nachbildung von robotergeführtem Einlegen der Einzelteile). Kurze sequenzielle Translationen werden nun genutzt, um eine Roboterbahn anzunähern und den Schachtelprozess fehlerunanfällig simulieren zu können. Trotz der Optimierungsmaßnahmen konnte keine hinreichende Vorhersagegenauigkeit der Simulationsmodelle erreicht werden. In Absprache mit den Forschungspartnern wurde festgelegt, dass der Simulationsaufbau und die vorläufige Durchführung zunächst mit CAD-Nulldaten erfolgt. Dabei wurde folgende Annahme getroffen: Die Einflussnahme der Vorrichtung auf die Maßhaltigkeit des ZSBs bei geometrisch idealen Einzelteilen ist vergleichbar zur Einflussnahme bei geometrisch abweichungsbehafteten Einzelteilen.

### Vergleich der UZSB-Simulationen mit ANSYS und PamStamp

Der Vergleich der Simulationsergebnisse von ANSYS zu PamStamp, weisen deutliche Unterschiede auf. Primär ausgewertet wurde der Abstand zur real gefertigten Baugruppe.

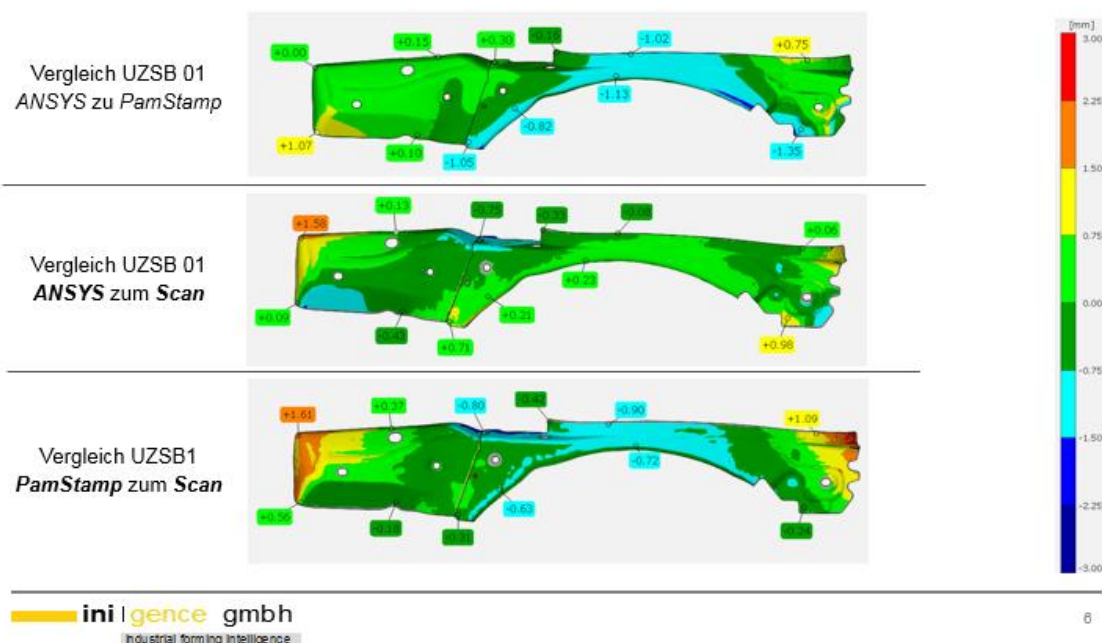


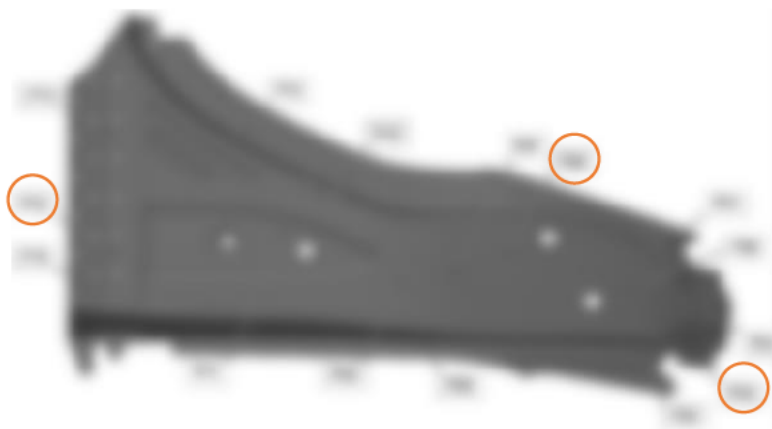
Abbildung 15: Vergleich der UZSB-Simulationsergebnisse aus ANSYS und PamStamp

Weitere Einflussfaktoren hinsichtlich der Steigerung der Simulationsqualität werden geprüft. Gleichzeitig wurde auf weniger relevante Eingangsinformationen mit Vereinfachungen bei der Simulationsmodellerstellung reagiert. So wurde zur Reduzierung der Modellkomplexität die Rotationsbewegung der Spanntechnik durch eine Translation der Spannelemente umgesetzt. Enormer Entwicklungsbedarf besteht bei der Definition/Festlegung der Kontaktbedingungen der einzelnen Fügepartner und der Vorrichtung. Bis dato müssen Kontaktbedingungen manuell definiert werden. In der letzten Aufbaustufe sind zum Beispiel 118 Kontaktbedingungen festzulegen. Dies benötigt deutlich mehr Zeit als geplant, daher ist der Arbeitsaufwand deutlich erhöht. Eine Automatisierung ist bislang nicht erfolgt. Die ZSB-Simulationen sind somit bis dato nicht als eine wirtschaftlich attraktive Dienstleistung anzubieten. Die Simulationserstellung in *AutoForm Assembly* wird in Betracht gezogen, da Kontaktdefinitionen weitestgehend automatisiert erfolgen.

Die Datenakquise wird in einem kontinuierlichen Prozess vollzogen. Zu jeder durchgeführten Versuchsreihe werden Prozessdaten dokumentiert.

Basierend auf der Datenerhebung zur Maßhaltigkeit der Einzelteile wurde die maßliche Varianz, der zu verbauenden Einzelteile analysiert (Abbildung 17, Abbildung 19) und mit der simulierten maßlichen Varianz verglichen. Im Folgenden ist die Auswertung von zwei Einzelteilen gezeigt:

Abbildung 17 veranschaulicht, dass das momentane Simulationssetup hinsichtlich der Bestimmung der zu erwartenden maßlichen Varianz am Einzelteil nicht hinreichend genau gewählt wurde. Signifikante Abweichungen sowohl in der Varianz als auch in der Maßhaltigkeit wurden an der B-Säule im Bereich des Anschlusses zum Dach ermittelt.



**Abbildung 16:** Bauteil XXXXXXXXXX B-Säule



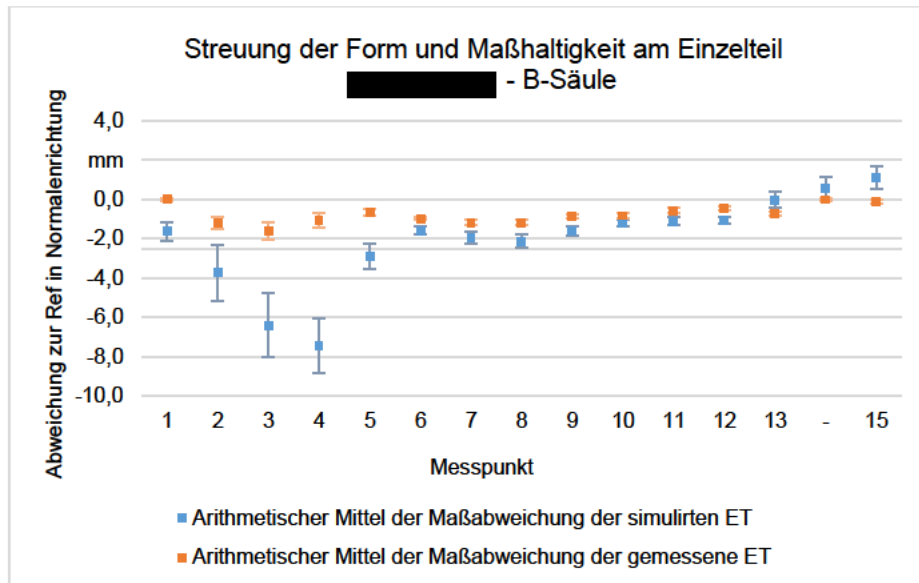


Abbildung 17: Streuung der Form und Maßhaltigkeit am Einzelteil [redacted] B-Säule

Bei einem zweiten Bauteil wurde die geringe maßliche Varianz in der Simulation ermittelt und durch die Auswertung der Messreihe bestätigt. Allerdings wurde eine hinreichende Genauigkeit in der Vorhersage der Bauteilmaßhaltigkeit nicht erreicht. Weitere Prozessinformationen sind erforderlich, um die Vorhersagequalität zu steigern.

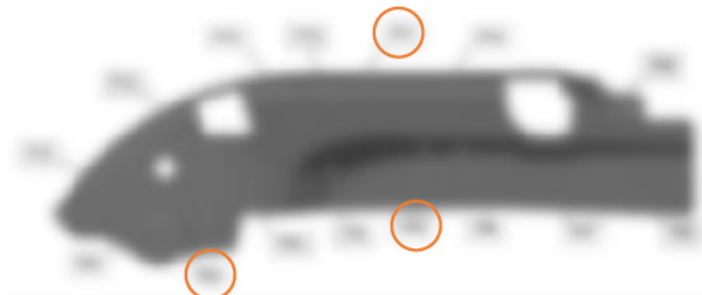
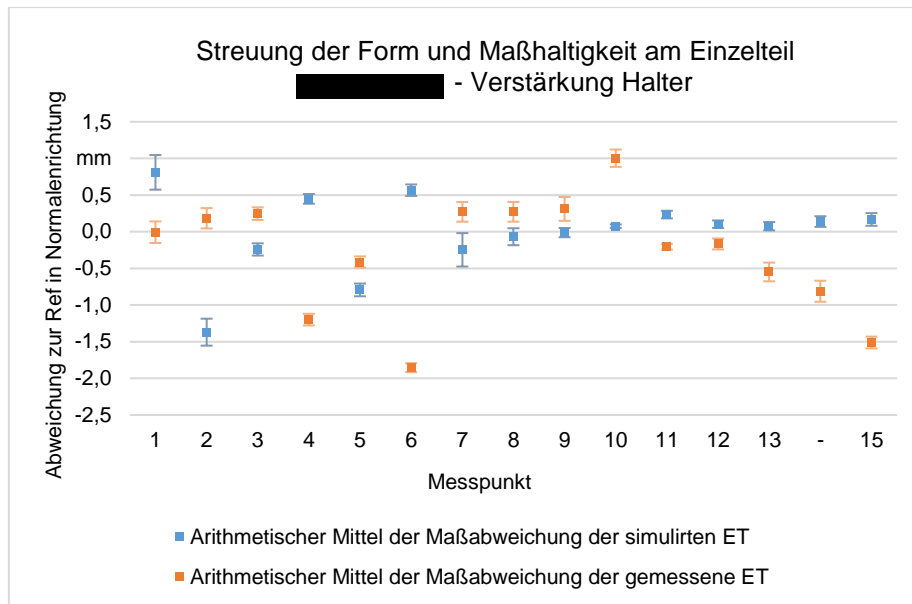


Abbildung 18: Bauteil [redacted] Dichtkanal hinten

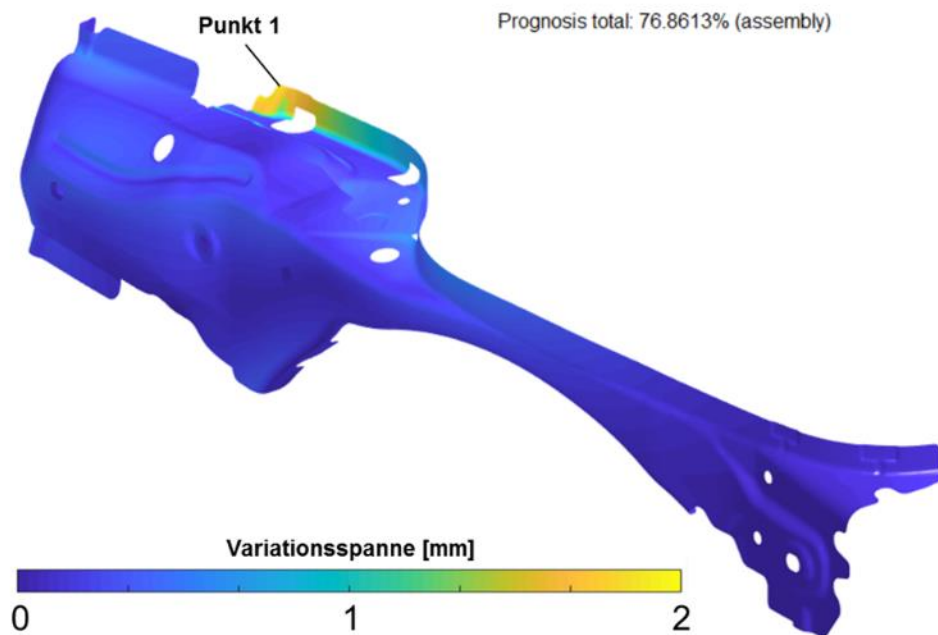


**Abbildung 19:** Streuung der Form und Maßhaltigkeit am Einzelteil ██████████ Verstärkung Halter

Die Weiterentwicklung des CPA-Tools wurde von inigence begleitet. In regelmäßigen Projektsitzungen wurden anwendungsorientiert Themen aufgegriffen und kritisch mit dem IWU diskutiert. So wurde zum Beispiel eine in der Funktion reduzierte Variante des CPA-Tools erstellt, welche bei Kunden in Pilotprojekten genutzt werden kann.

Da die Datengrundlage zur Erstellung es CPA-Tools nicht gemäß dem geplanten Projektfortschritt vorlag, wurde die Zeit genutzt, um einen Prototypen eines *Digitalen Shimsbuchs* zu entwickeln, der bei der Datenerfassung eingesetzt wurde.

Während der Anwendungsuntersuchung wurden Defizite in der Vorhersagequalität des CPA-Tools identifiziert. Um die Vorhersagequalität zu steigern, wurden seitens inigence weitere ZSB-Simulationen mit verschiedenen Einstellungen der Fügevorrichtung durchgeführt. Die generierten Ergebnisse ergänzen die Datenbasis des CPA-Tools und steigern das durchschnittliche Bestimmtheitsmaß des Meta-Modells, welches dem CPA-Tool zugrunde liegt.

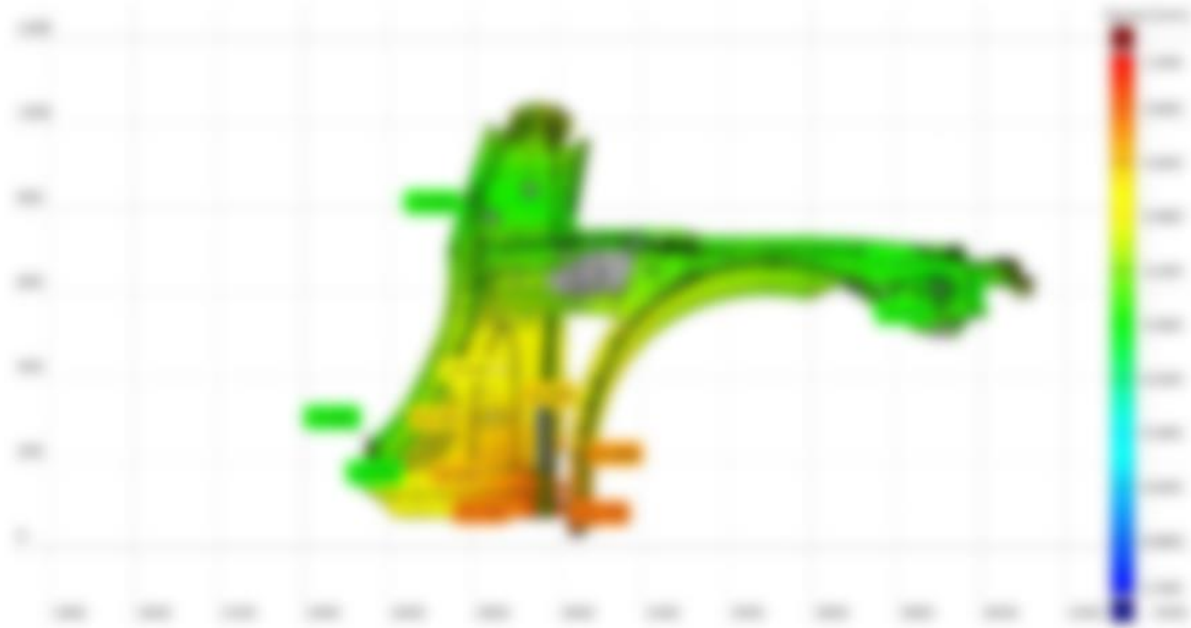


**Abbildung 20:** Beispiel eines unzureichenden Bestimmtheitsmaßes beim CPA-Tool am UZSB4

Weiter wurde im Rahmen der Untersuchung festgestellt, dass die verschiedenen Einstellungen der Fügevorrichtung zur Manipulation der Maßhaltigkeit am ZSB nicht praxisrelevant sind und in der Simulation zu Konvergenzproblemen führen, sodass die Ergänzung der Datengrundlage des CPA-Tool kritisch geprüft werden musste.

Für eine weitere Versuchsreihe bei Läßple wurden verschiedene vorbereitende Maßnahmen getroffen und abgeschlossen. Unter anderem wurden alle zu fügenden Einzelteile digitalisiert und deren Abweichung zur Nullgeometrie ausgewertet.

Weiter wurde die maßliche Streuung des aktuellen Herstellungsprozess des *ZB-Seitenteils* bei Läßple erfasst (Abbildung 21), sodass bewertet werden kann, ob die zu erwartende maßliche Veränderung als Auswirkung einer getroffenen Stellmaßnahme zu werten ist oder ob diese auf einer standardmäßigen Streuung des Herstellungsprozesses beruht. Die Durchführung der Versuchsreihe erfolgte im Mai 2021.



**Abbildung 21:** Maßliche Streuung des *ZB-Seitenteils* im Serienprozess bei Läßple

Im Jahr 2021 wurde sich dann weiterhin vorrangig mit der Entwicklung des DSTs bzw. des *Digitalen Shimsbuchs* befasst. Dabei wurden signifikante Änderungen in der Programmstruktur vorgenommen. Die Client-Server-Kommunikation wurde optimiert, sodass der Datenverkehr verringert werden konnte. Ferner wurde die Benutzeroberfläche gemäß neuer Anforderungen aus der Praxis restrukturiert.

Es wurde die Funktion *Shimsen* in Folgeoperationen entwickelt und integriert. Ferner fand die Implementierung der Funktionalität von TCC-Spannern im DST statt.

Darüber hinaus wurden weitere Untersuchungen zur Validierung des CPA-Tools durchgeführt. Als Untersuchungsgegenstand wurde der ZSB08 (inkl. Messung der Einzelteile) genutzt und die Stellmaßnahmen am Radhaus untersucht. Auch hier zeigten sich in den Ergebnissen signifikante Abweichungen, sodass die Vorhersagegenauigkeit weiterhin nicht optimal ist. Weitere Versuchsreihen müssen somit über den Projektzeitraum hinaus erfolgen.

## ***Fraunhofer IWU***

### **Ergebnisse des Jahres 2019**

#### **AP1 – AP3:**

Die ersten drei Arbeitspakete umfassten drei Organisations- und Koordinierungsthemen, in denen mit dem Projektpartner die Versuchsbaugruppe ausgesucht und der dazugehörige Versuchsplan entwickelt wurde.

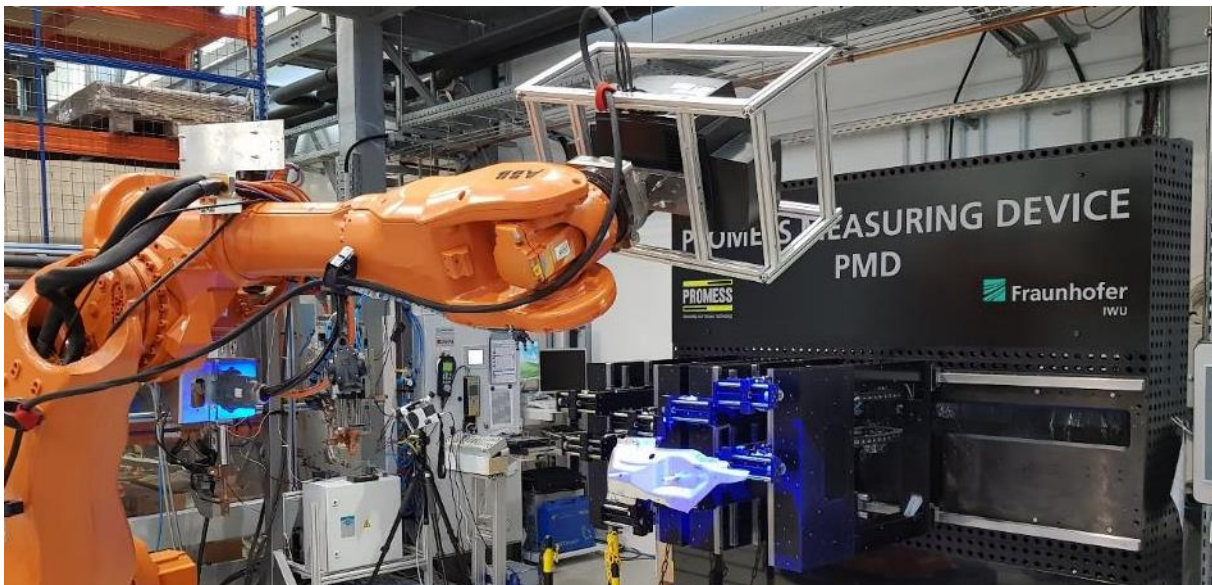
Das Fraunhofer IWU konnte mit der Fraunhofer OwnCloud eine sichere Datenaustauschplattform bereitstellen, die sich darüber hinaus während der Projektbearbeitung bewährt hat.

#### **AP4 u. AP6:**

Die Ermittlung der Wirkzusammenhänge des Zusammenbauprozesses verlangt eine hoch aufgelöste Datenbasis. Dazu war es unter anderem notwendig, alle Versuchsbauteile zu digitalisieren. Der Industriepartner hat zehn Sätze der Versuchsbaugruppe bereitgestellt, welche wiederum aus 13 Einzelteilen bestand.

Das Fraunhofer IWU hat das Vermessen von 100 Einzelteilen übernommen. Dafür wurde zum Teil ein an der Forschungsstelle vorhandener Prototyp einer flexiblen Messvorrichtung verwendet.

Zur Digitalisierung der Bauteile wurde der 3D-Oberflächenscanner GOM ATOS Triplescan verwendet, der von einem Roboter geführt wurde, womit zügige und qualitativ hochwertige Aufnahmen der Geometrien realisiert wurden.



**Abbildung 22:** Einzelteilvermessung am Fraunhofer IWU

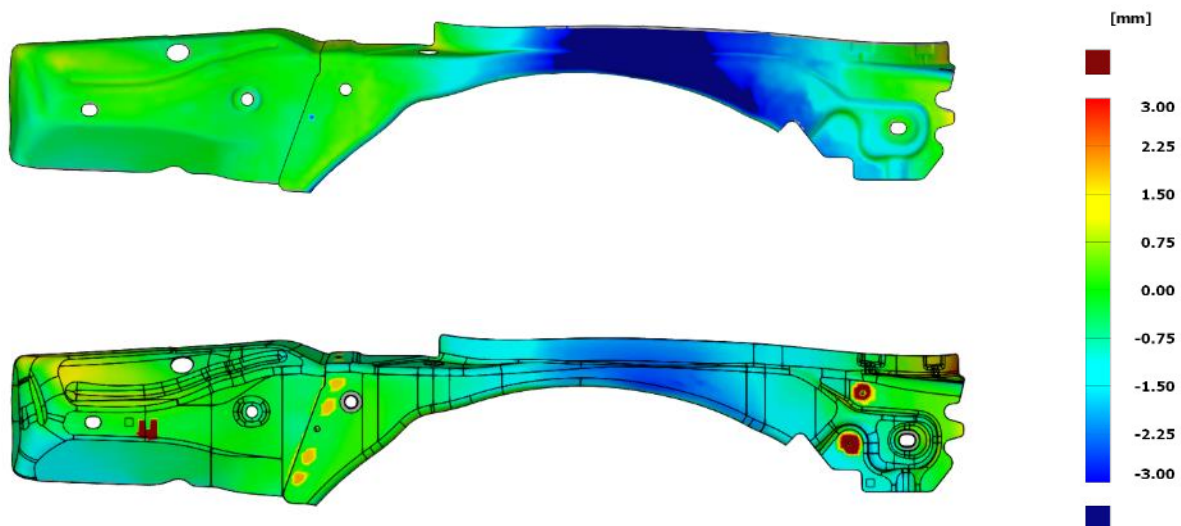
Nach der erfolgreichen Vermessung der Bauteile und dem Rückversand unterstützte das Fraunhofer IWU durch einen Mitarbeiter die Vermessung der Bauteile während des und nach dem Zusammenbau.

**AP5:**

Das Fraunhofer IWU verfügt über eine langjährige Erfahrung bei Zusammenbausimulationen – insbesondere mit dem Programm PamStamp – und konnte daher den Projektpartner in diesem Arbeitspaket unterstützen. Der Wissenstransfer wurde durch eine einmalige Schulung in Dresden und einer darauf aufbauenden kontinuierlichen Unterstützung beim Simulationsaufbau via Tele-Support realisiert.

Als Beispielprojekt wurde die Unteresammenbaugruppe 1 (UZSB1) vom Fraunhofer IWU aufgebaut. Für den Abgleich der Simulation mit den in AP 6 gewonnenen Daten wurden die von inigence bereitgestellten rückgeführten Geometrien verwendet. Des Weiteren ist die Planabweichung der Fügevorrichtung vom CAD berücksichtigt.

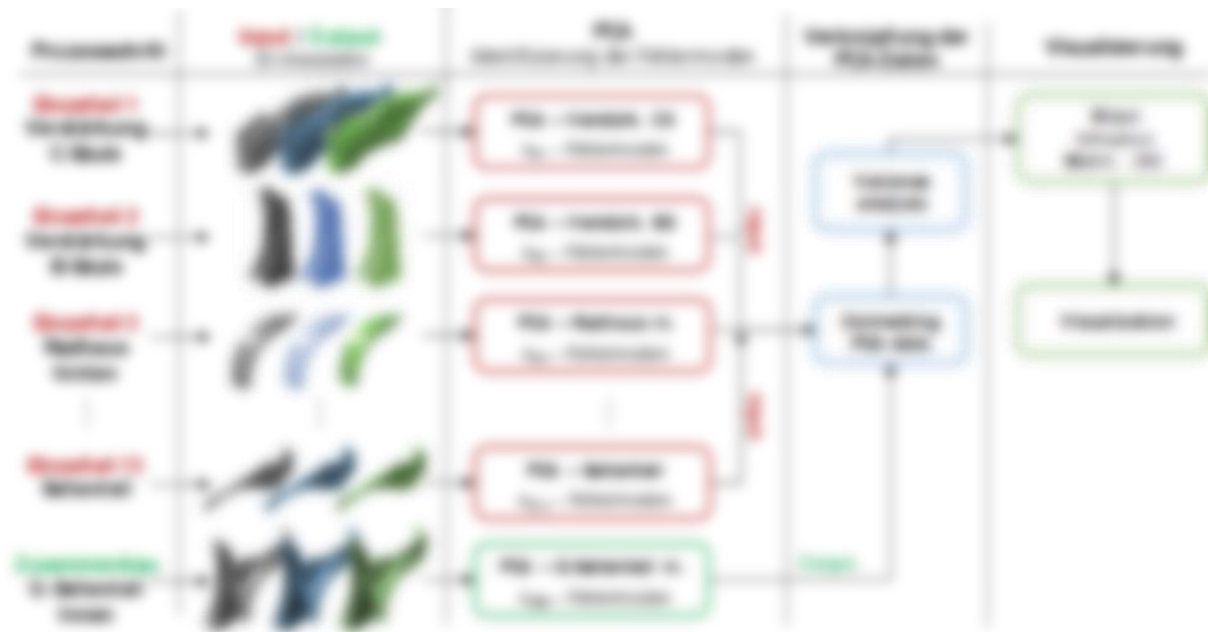
Abbildung 23 zeigt das Ergebnis der Simulation (oben) als Flächenvergleich zum Soll, darunter ist die Messung der UZSB1 abgebildet. Es ist eine gute Übereinstimmung in fast allen Bereichen zu erkennen. Nur über dem Radkasten kommt es zu einer größeren absoluten Abweichung. Diese Stelle war allerdings auch schon bei der Einzelteilvermessung für ihre große Varianz in den Abweichungen zwischen den verschiedenen Einzelteilen auffällig. Dies kann auf die besondere Geometrie mit der daraus resultierenden geringen Steifigkeit zurückgeführt werden.



**Abbildung 23:** Vergleich der Simulation (oben) mit dem Experiment (unten) der UZSB 1

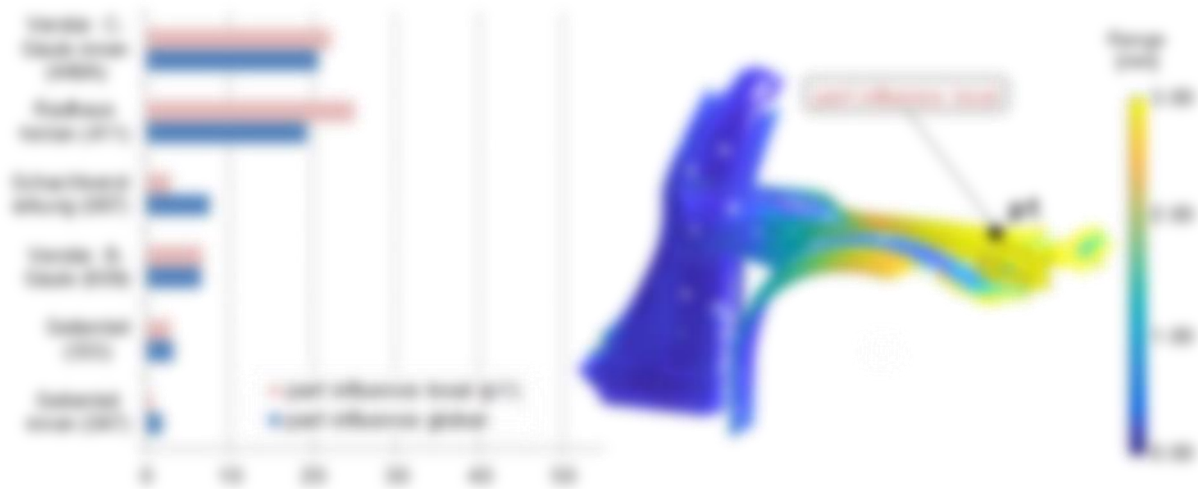
**AP7:**

Innerhalb von AP 7 wird durch das Fraunhofer IWU geprüft, ob mithilfe der CPA-Methode (**C**oupled **P**rocess **A**nalysis-Methode) geometrisch variierende Messdaten aus einer Karosseriebaufolge zu einem übergeordneten Modell zusammengefasst sowie darauf aufbauend Wirkzusammenhänge identifiziert und visualisiert werden können. Datenbasis bildete hierbei die unter AP 6 digitalisierten Bauteile. In Abbildung 24 ist der methodische Ablauf der CPA für den innerhalb des Forschungsvorhabens betrachteten Karosserieprozess schematisch dargestellt.



**Abbildung 24:** Methodischer Ablauf der CPA

Wie in Abbildung 24 zu erkennen ist, wird als Inputgröße (rot) die zur Verfügung stehenden Messdaten von 13 Einzelteilen herangezogen (AP 6). Aus diesen werden in 13 unabhängigen PCAs (**P**incipal **C**omponent **A**nalysis) die geometrischen Fehlermoden der einzelnen Prozessschritte identifiziert. Als geometrische Outputgröße wird die Messung des fertigen Zusammenbaus („ZB-Seitenteil Innen“) verwendet. Die Messung des Zusammenbaus wird ebenfalls auf Basis der PCA in ihre geometrischen Fehlermoden zerlegt und mit der CPA-Methode mit den Inputdaten verknüpft. Mittels Varianzanalyse und der Simulation können dann die Wirkzusammenhänge nutzgerecht visualisiert werden. Die Ergebnisse dieser CPA-Untersuchung hinsichtlich auftretender Wirkzusammenhänge zeigt Abbildung 25.



**Abbildung 25:** Ergebnisse der CPA-Untersuchung

In Abbildung 25 ist auf der rechten Seite die Variationsspanne (in Blechnormalenrichtung) der über die zehn Messungen erzeugten geometrischen Variation der Baugruppe „ZB-Seitenteil Innen“ dargestellt. Das Balkendiagramm links zeigt entsprechend dazu den globalen und lokalen Einfluss der sechs wichtigsten Einzelteile auf diese geometrische Variation. Der globale Einfluss (blaue Balken) beschreibt den mittleren prozentualen Einfluss eines Einzelteils auf die Gesamtvariation der Baugruppe. Der lokale Einfluss (rote Balken) zeigt den prozentualen Einfluss für den spezifischen Punkt „p1“.

Es ist ersichtlich, dass die Verstärkung der C-Säule innen mit 20,6 % den größten Gesamteinfluss auf die Baugruppe aufweist. Das zweiteinflussreichste Einzelteil ist das Radhaus hinten mit ca. 19 %. Demgegenüber sind die Einzelteilschwankungen der Schachtverstärkung mit 7,5 %, die Verstärkung der B-Säule mit 6,4 % sowie der Einfluss des Seitenteils mit 3,2 % kaum relevant für die globale Gesamtschwankung des Zusammenbaus.

Ebenso können mit der vorgestellten CPA-Methode die lokalen Einflüsse der betrachteten Prozessgrößen an jedem Knotenpunkt des Messnetzes ausgegeben werden. Wie Abbildung 25 rechts zeigt, sind die auftretenden geometrischen Variationen der Baugruppe besonders im rechten Bereich mit über 3 mm Variationspanne sehr stark. Die lokale Auswertung der Einflüsse am Punkt „p1“ zeigt die dafür verantwortlichen Prozessgrößen. Demnach ist das Radhaus hinten an diesem Punkt mit ca. 25 % Einfluss auf die Gesamtvariation die Haupteinflussgröße, gefolgt von der Verstärkung der C-Säule innen mit ca. 22 %, der Verstärkung der B-Säule mit ca. 6,7 % Einfluss, der Schachtverstärkung und dem Seitenteil mit jeweils ca. 3 % Einfluss.

Das Beispiel zeigt, dass somit die Möglichkeit besteht, die Gesamtvarianz an jedem Knotenpunkt des Auswertenetzes in ihre prozentualen Varianzanteile zu zerlegen. Dies ist



insbesondere in schwankungsbehafteten Bauteilbereichen mit hoher Variation sinnvoll, um genau quantifizieren zu können, wie stark die verschiedenen Einzelteile für die Variation an einem lokalen Punkt des Zusammenbaus verantwortlich sind. Weiterhin kann mit der vorgestellten Methode der Gesamteinfluss jeder einzelnen Prozessgröße auf den zu analysierenden Zusammenbauschnitt abgeschätzt werden.

Zusammenfassend kann gefolgert werden, dass die Anwendung der CPA-Methode dem Anwendenden eine Vielzahl von Möglichkeiten bietet. So kann mittels prozessübergreifender Sensitivitätsanalyse innerhalb der Planungsphase des Karosseriebaus z. B. bestimmt werden, ob und wieviel Einfluss eine mögliche geometrische Varianz eines Einzelteils auf die Maßhaltigkeit der Baugruppe hat. Damit wäre es zukünftig möglich, Einzelteile im Karosseriebau bereits in der Planungsphase des Karosseriebaus bedarfsgerecht zu tolerieren, um damit Kosten zu sparen. Weiterhin kann im laufenden Karosseriebauprozess nach den Ursachen für die Variation in bestimmten Bauteilbereichen gesucht werden. Die Menge der integrierbaren Daten sowie die effektive Kompression dieser ermöglichen es, in Abhängigkeit von der verfügbaren Datenbasis jede geometrische Variation eines Bauteils einem spezifischen Prozess und darin einer spezifischen Stell-/Störgröße zuzuordnen.

### **Ergebnisse des Jahres 2020**

#### **AP 6:**

Inhalt dieses Arbeitspunktes ist die automatisierte Entnahme und Standardisierung der verschiedenen Datentypen (Mess-, Prozess- und Simulationsdaten), welche aus den unterschiedlichen Prozesszwischenstufen resultieren. Die im Projekt verwendeten Schnittstellen zum Aufbau einer datenformatneutralen Sammeldatenbank sind in Abbildung 26 zusammengefasst.

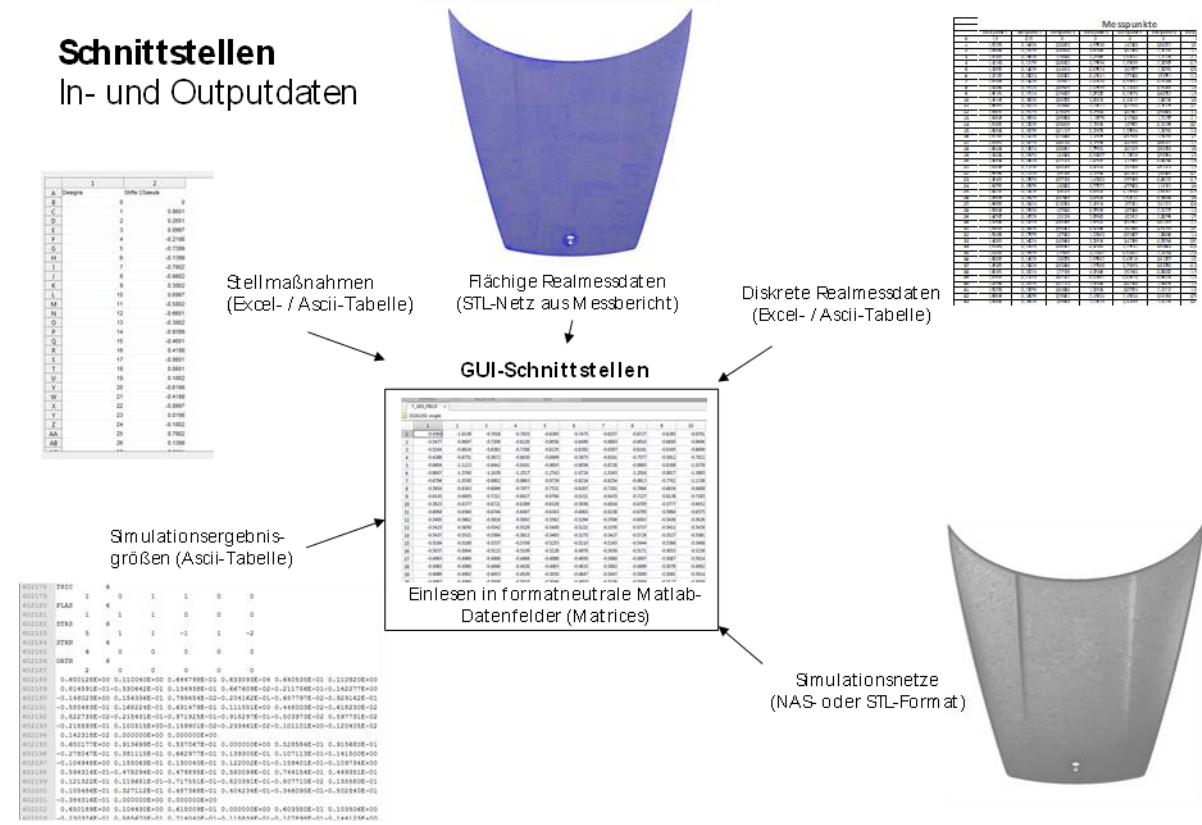


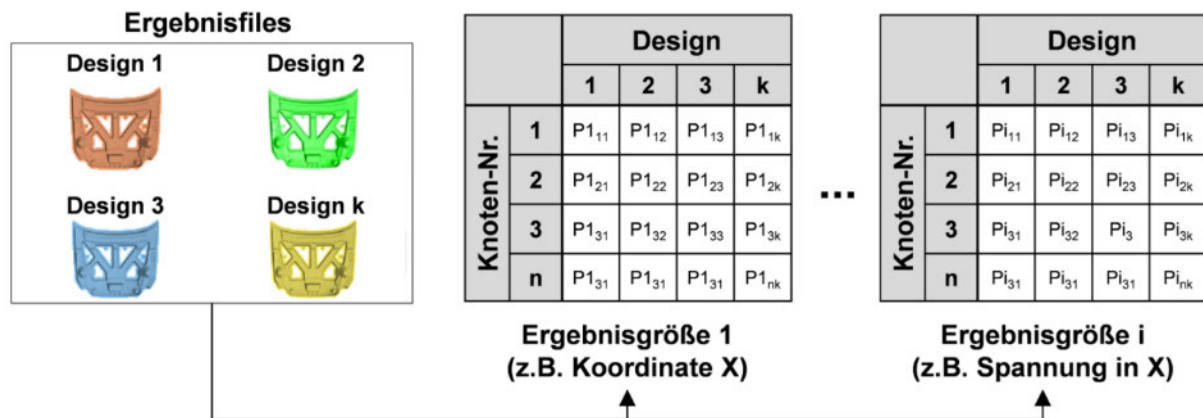
Abbildung 26: Schnittstellen der Datenakquise

Es kann sich hierbei um folgende fünf Ergebnisgrößen handeln:

- Stellmaßnahmen (Excel- oder anderes Ascii-Format)
- Trianguliertes Messnetz (STL-Format)
- Diskrete Realdmessdaten (Excel- oder anderes Ascii-Format)
- Simulationsnetzdaten (STL-Format)
- Simulationsergebnisgrößen (Ascii-Format)

Im ersten Schritt wurde für jeden Datentyp eine MATLAB-basierte Schnittstelle zur Datenbank geschaffen, um automatisiert alle vorliegenden Ergebnisse der Datenakquise in formatneutrale, rechteckige Datenfelder (Matrizen) umwandeln zu können. Durch diese Datenstandardisierung können die Ergebnisdaten so eingelesen werden, dass diese mit mathematischen Modellen weiterverarbeitet werden können. Dabei wird für jede Ergebnisgröße ein Datenfeld angelegt (z. B. Knotenkoordinaten in X, Knotenkoordinaten in Y, Spannung in X usw.), wobei die Ergebnisse für jede Versuchsvariante (Designs) nacheinander eingelesen werden (Abbildung 27). Gemäß dieser Systematik ergibt sich beispielsweise für das Datenfeld der 1. Ergebnisgröße (Knotenkoordinaten in X), dass in der ersten Spalte alle X-Koordinaten des triangulierten Messnetzes der ersten Versuchsvariante (1. Design)

angeordnet sind. In der 2. Spalte stehen dann alle X-Koordinaten der zweiten Simulationsvariante (2. Design) usw.

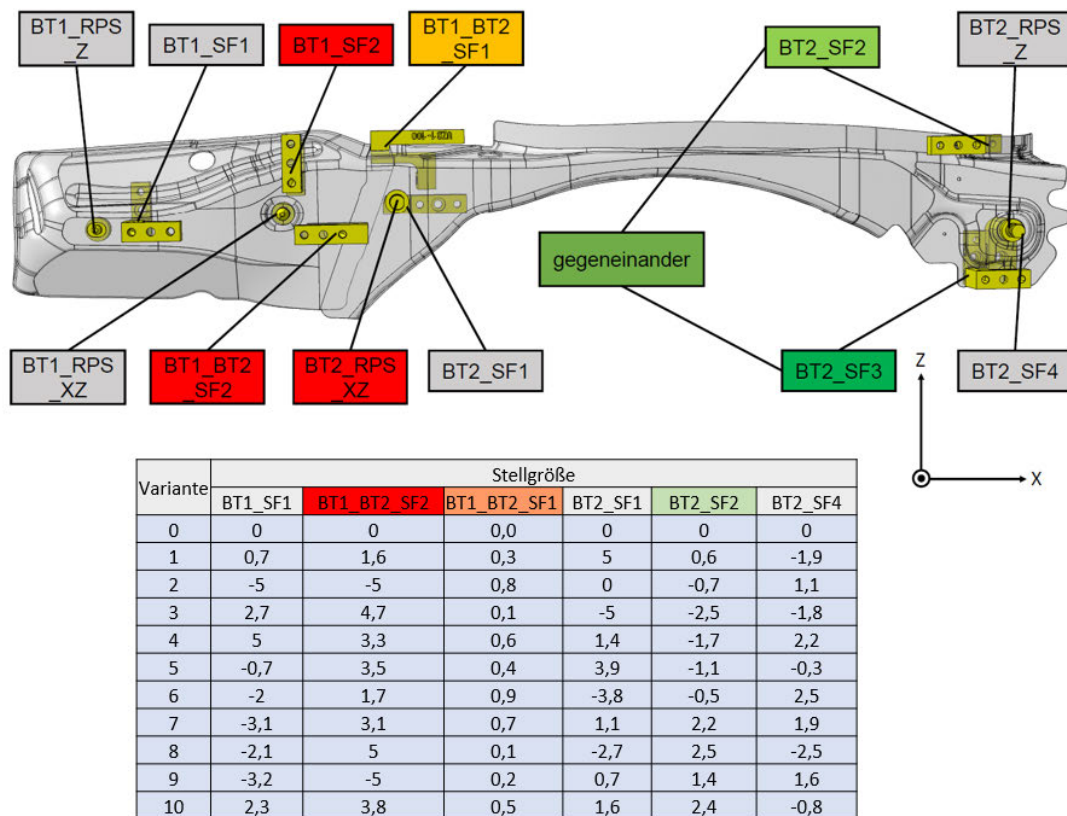


**Abbildung 27:** Einlesen der Ergebnisgrößen in zweidimensionale Datenfelder

Wie aus Abbildung 27 ersichtlich wird, muss die Anzahl der Ergebnismerkmale immer gleichbleibend ausfallen, um die i-te Ergebnisgröße aller Simulationsvarianten gleichzeitig in einem Datenfeld speichern zu können. Da sich jedoch insbesondere bei Simulations- und Messnetzen im STL-Format die Knotenanzahl zwischen den einzelnen Varianten unterscheiden kann, erfolgt während der Einleseprozedur der Ergebnisfiles eine automatische Standardisierung der inhomogenen Netzstruktur. Hierfür wurde im zweiten Teil von AP 6 ein Mapping-Algorithmus entwickelt, welcher in jeder Iteration ein vorgegebenes Referenznetz so auf das vorhandene Netz mappt, dass jede Simulationsvariante unter Beibehaltung ihrer ursprünglichen Geometrie die gleiche Anzahl an Knotenpunkten und zugehörigen Ergebnisgrößen besitzt. Die Gitterstrukturen von Referenz- und Ist-Netz werden dabei so aufeinander abgebildet, dass die Ergebnisgrößen an den Netzknoten (Knotenkoordinaten, Spannungs- und Dehnungswerte) auf die Referenz interpoliert werden können.

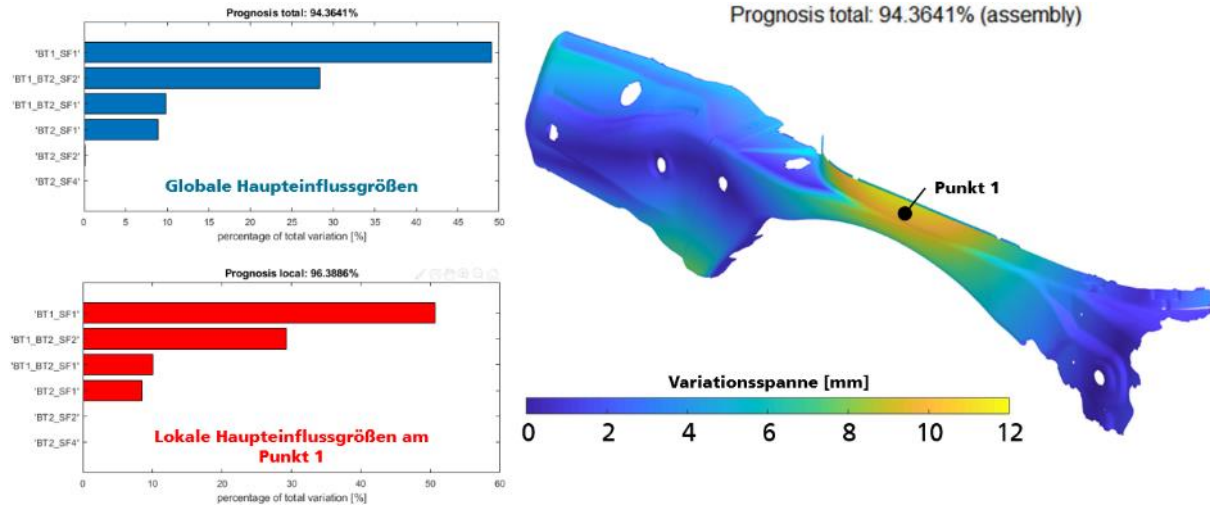
#### **AP 7 u. 8:**

Ziel dieser Arbeitspunkte war die Herstellung eines funktionalen Zusammenhanges zwischen definierten Stellmaßnahmen und den FE-Netzen aus der Simulation sowie Messnetzen aus der Realität. Um die CPA-Methode anwenden zu können, wurden für jeden Prozessschritt geeignete Stellgrößen und deren Variationsgrenzen festgelegt. Abbildung 28 zeigt dies am Beispiel von UZSB 1.



**Abbildung 28:** Stellgrößen und Latin-Hypercube-Versuchsplan

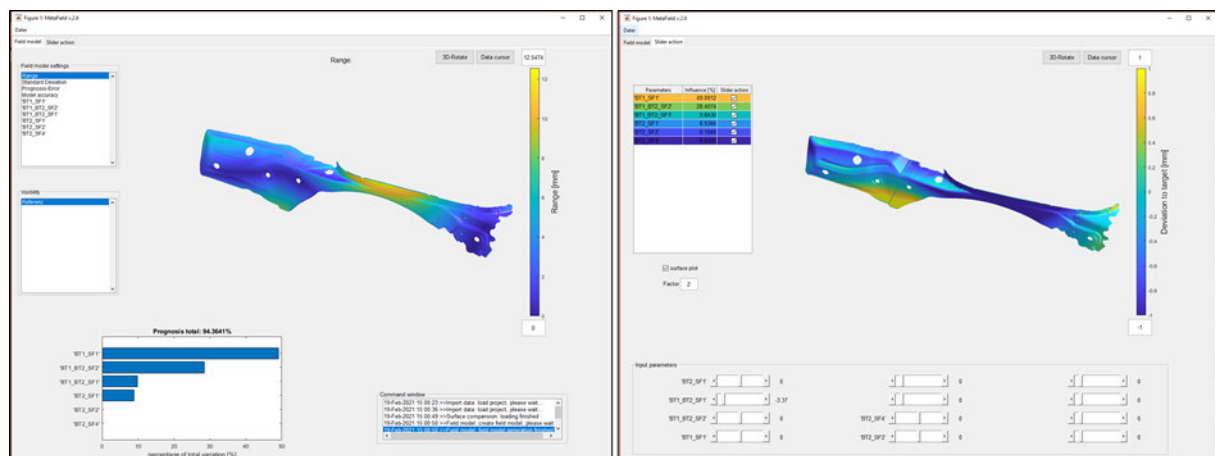
Auf Basis der gewählten Stellgrößen wurde anschließend über eine zufallsbasierte Sampling-Strategie ein Latin-Hypercube-Versuchsplan mit zehn Stichproben erzeugt und für jede Versuchsvariante die finale Maßhaltigkeit mit dem Simulationsprogramm Ansys berechnet. Die errechneten Simulationsergebnisse (FE-Netze) wurden standardisiert und in die Sammeldatenbank überführt. Durch die Datenstandardisierung konnte nun der CPA-Algorithmus angewendet werden. Die Ergebnisse der CPA-Methode zur Identifizierung von Wirkzusammenhängen am Beispiel des UZSB 1 ist in Abbildung 29 zu sehen.



**Abbildung 29:** Anwendung der CPA-Methode auf Karosseriebauanwendungen (UZSB 1)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Prognosegüte des CPA-Modells sehr hoch ist. Es kann eine Gesamtprognose von ca. 94,36 % erreicht werden. Anhand des blauen Balkendiagramm in Bild 4 links ist erkennbar, dass die Stellgröße „BT1\_SF1“ mit fast 50 % den größten Einfluss auf die Maßhaltigkeit besitzt, gefolgt von Stellgröße „BT1\_BT2\_SF2“ mit 27 %. Ebenfalls kann die lokale Stellgrößensensitivität vom CPA-Modell bestimmt werden. Dies ist am Beispiel von Punkt 1 (vgl. Abbildung 29 rechts) in dem roten Balkendiagramm links dargestellt. Durch die hohe Prognosegüte des Modelles kann festgestellt werden, dass das CPA-Modell für mehrteilige Karosseriebaugruppen sehr gut funktioniert.

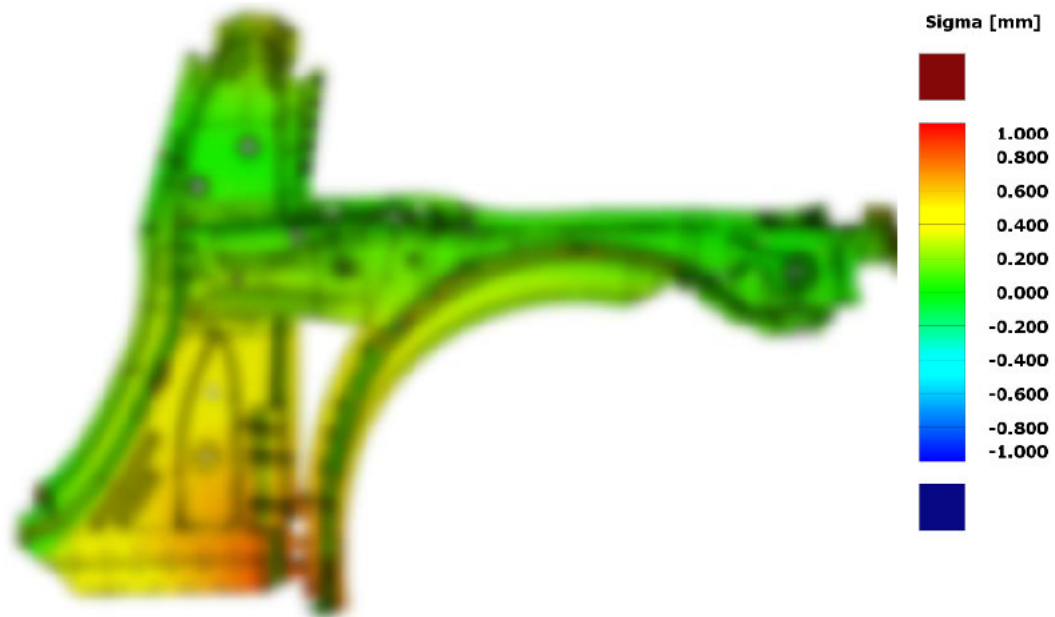
Im letzten Teil des Arbeitspaketes wurde eine MATLAB-basierte graphische Benutzeroberfläche (GUI) entworfen, womit der Anwender in der Lage ist, selbstständig und menügeführt den CPA-Algorithmus anwenden zu können. Die GUI ist in Abbildung 30 dargestellt.



**Abbildung 30:** GUI zur nutzgerechten Darstellung des CPA-Modelles

**AP 9:**

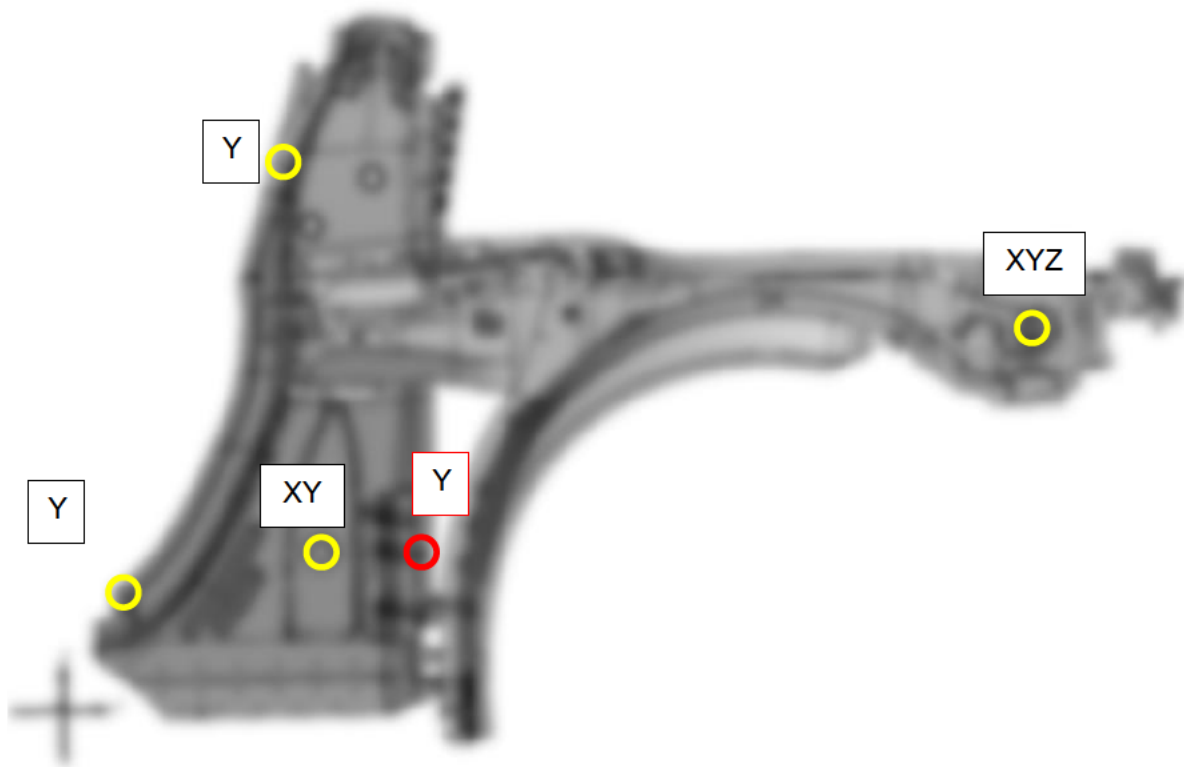
In diesem Arbeitspunkt sollen die experimentell gemessenen Abweichungen analysiert werden. Bei ersten Messungen konnte im Bereich der Verbindung zwischen Radhaus und Schweller eine auffällige Abweichung zur Soll-Geometrie beobachtet werden (vgl. Abbildung 31).



**Abbildung 31:** Streuung der gemessenen Bauteile

Da die Abweichung nicht durch den Prozess erklärt werden kann, wurde nach anderen Ursachen gesucht. Die Lösung wurde im Aufbau der Messvorrichtung gefunden.

Messvorrichtungen müssen die sechs Freiheitsgrade des Messobjekts sperren, wozu meist eine 3-2-1-Aufnahme verwendet wird, bei der eine Raumrichtung in drei Punkten, die zweite in zwei Punkten und die dritte in einem Punkt gesperrt wird. Diese Punkte werden Haupt-RPS genannt. Da Blechbauteile aber nicht als starr angesehen werden und sich durch Schwerkrafteinflüsse deformieren können, werden meist weitere Punkte (Hilfs-RPS) benutzt. Da in einem RPS per Definition die Abweichung zur Soll-Geometrie minimal ist, wird mit jedem weiteren Hilf-RPS das Bauteil zur Soll-Geometrie deformiert, in eine Zwangslage gebracht und damit die geometrischen Abweichungen in innere Spannungen umgewandelt. Da der Forschungsinhalt in der gezielten geometrischen Beeinflussbarkeit des Zusammenbauprozesses besteht, wurde auf alle Hilfs-RPS verzichtet. Dies resultierte aber in einer möglichen Verklemmung am RPS (XY vgl. Abbildung 32), wodurch es zu Einlegefehlern und den beobachteten Abweichungen in Abbildung 31 kommt.



**Abbildung 32:** Messaufnahme mit Haupt- (gelb) und Hilfs-RPS (rot)

Für die folgenden Verifikationen wurde ein Hilfs-RPS hinzugefügt (roter Spanner in Abbildung 32), welcher die Einlegefehler behebt.

### **Ergebnisse des Jahres 2021**

#### **AP 6:**

Im Jahr 2021 wurden die Arbeiten in AP 6 für die restlichen UZSB finalisiert. Die Ergebnisse werden an einer Auswahl dargestellt (vergl. UZSB1 Abbildung 28).

Im UZSB 5 wird der Radkasten mit der Schachtverstärkung verbunden. Aufgrund der Vielzahl an Spannern, wurde diese zu Spanngruppen zusammengefasst für welche realistische Stellszenarien entwickelt wurden, die in Abbildung 33 dargestellt sind.

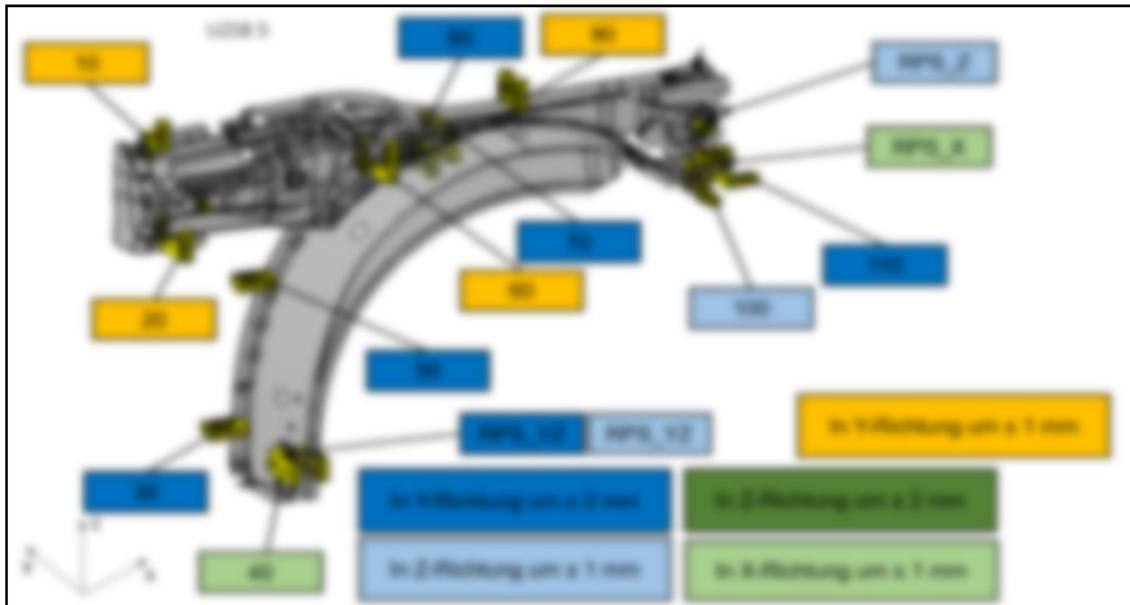


Abbildung 33: Stellmaßnahmen im UZSB 5

Die vorgenommenen Stellmaßnahmen haben sich hauptsächlich in einer Y-Verschiebung des Radkastens ausgeprägt (Abbildung 34). Die Prognosegüte ist mit über 90 % sehr gut.

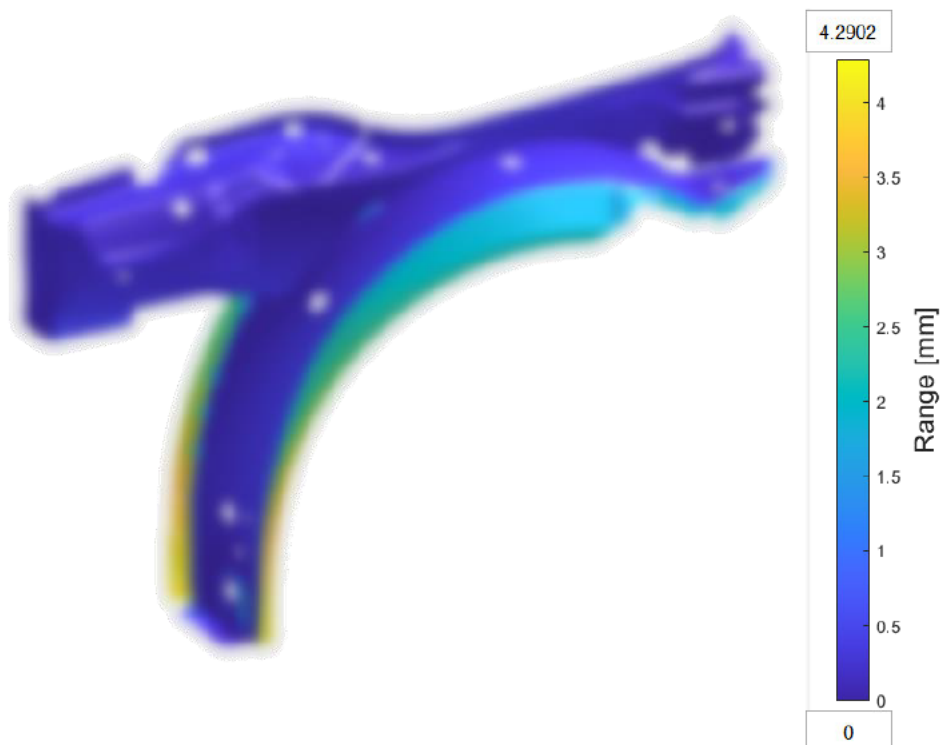
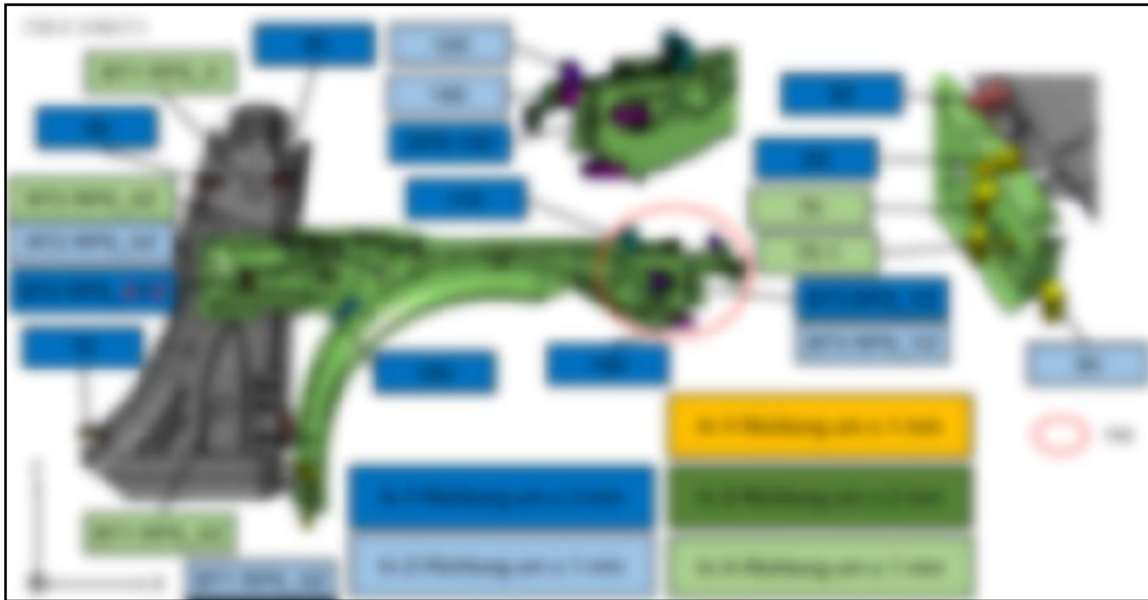


Abbildung 34: resultierende Verschiebung im UZSB 5

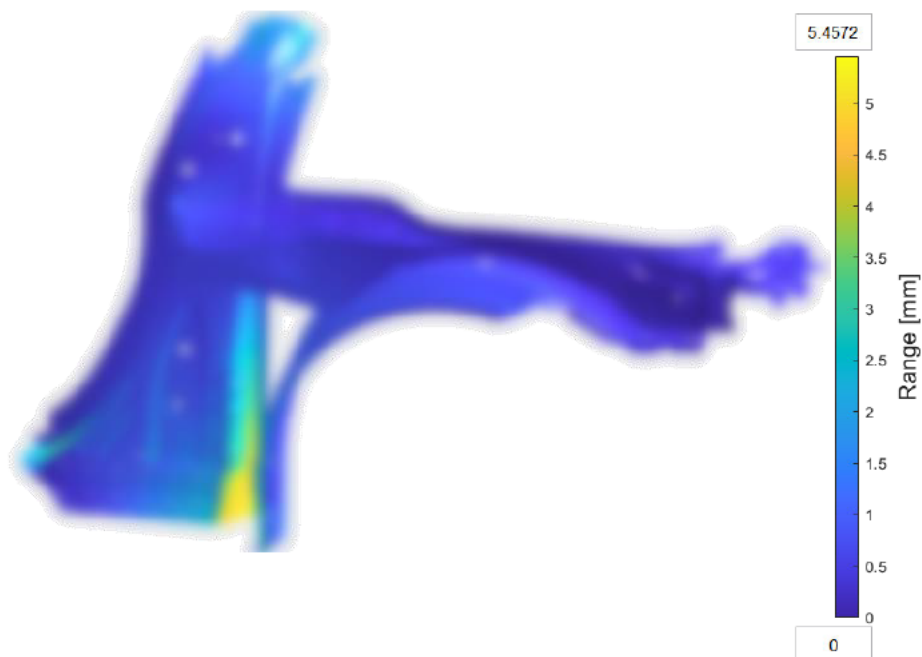


Im (für diese Untersuchung) finalen Zusammenbau wird die B-Säule mit der Heckpartie zusammengefügt. In Abbildung 35 sind die Spanngruppen mit den zugehörigen Stellgrößen und -richtungen dargestellt.



**Abbildung 35:** Spanngruppen des ZSB 8

Abbildung 36 zeigt die Bereiche an, welche durch die Stellmaßnahmen beeinflussbar sind.



**Abbildung 36:** Möglichkeiten zur maßlichen Beeinflussung des ZSB 8

Der Fuß der B-Säule zeigt das stärkste Antwortverhalten auf Änderungen der Spanngruppen.

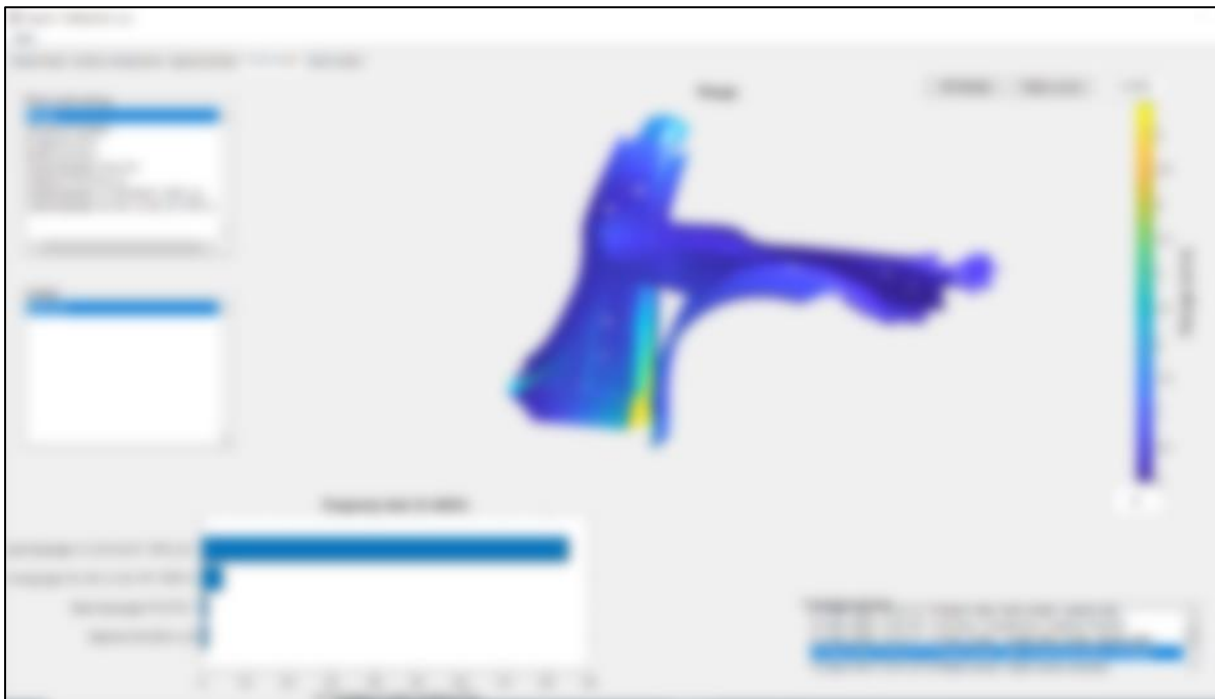
**AP 9:**

Die in AP 6 erstellten Modelle haben trotz der verhältnismäßig geringen Sample-Anzahl eine hohe Prognosegüte, welche durch Kreuzvalidierung der Eingangsdaten berechnet wurde.

Die Realversuche in den Anlagen von Läßle und damit die finale Validierung des Modells stehen noch aus.

**AP 10:**

Die entwickelten mathematischen Methoden wurden in Matlab als Programm realisiert und mit einer GUI versehen. In dieser ist es möglich, die Simulations- oder Messdaten in Form von STL-Netzen einzulesen.



**Abbildung 37:** Darstellung der Prognosegüte und Haupteinflussgrößen

Nachdem die verwendeten Stellgrößen abgefragt wurden, beginnt die mathematische Modellbildung. Um dem Nutzer eine möglichst einfache Repräsentation der Wirkzusammenhänge zu geben, werden diese in Form von Falsch-Farben Darstellungen am 3D-Bauteil dargestellt. Mit der Hilfe von Schiebereglern ist es nun möglich, die Auswirkung von Stellmaßnahmen sofort am Bauteil zu sehen und damit einen intuitiven Zugang zu gewährleisten.

## **Fazit**

Die gesteckten Ziele konnten weitestgehend erreicht werden. Es ist gelungen den Prozess vollständig virtuell abzubilden (*ANSYS-* und *AutoForm-Simulation*) und variierende Eingangsparameter in ein Vorhersagemodell zu überführen. Zur Strukturierung der Eingangsdaten wurde eine Datenbank erstellt. Defizite bei der Datenerhebung wurden bei der korrekten Erfassung der Konfiguration der Rohbauanlage erkannt. Hierfür wurde ein Tool (*Digitales Shimstool* – kurz *DST*) entwickelt, das die Nachverfolgbarkeit verschiedener Anlagenkonfigurationen sicherstellt. Die Vereinigung des DSTs mit dem CPA-Tool ist im Rahmen des Projekts nicht erfolgt, wird allerdings von den Projektpartnern diskutiert und für sinnvoll erachtet. Das entwickelte CPA-Tool ist in der Lage, effizient Prognosemodelle zu erstellen und diese nutzbringend darzustellen.

Die Validierung dieses Modells bzw. des CPA-Tools ist nach Projektende zu vervollständigen. Versuchsreihen, die dies möglich machen, müssen mit Läßle abgestimmt werden. Da die betreffende Baugruppe aus dem Projekt noch weitere zwei Jahre produziert wird, stehen die Chancen auf eine weitere Versuchsreihe gut.

## **7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises von inigence waren die Personalkosten (inklusive nicht zuschlagsfähiger Entgelte) sowie die sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten. Die Personalkosten machten in der Projektplanung 78 % der Gesamtkosten aus. Die sonstigen Kosten insbesondere für Lizenzen für verschiedene Simulationsprogramme 11 %. Trotz leichter Verschiebungen im Kostengefüge ergab sich letztlich ein ähnliches Bild zum Abschluss des Projektes. Die Personalkosten machten 89 % der Gesamtkosten aus. Die sonstigen Kosten für Lizenzen noch knapp 7 %. Im Großen und Ganzen konnte die ursprüngliche Kostenplanung eingehalten werden.

Am IWU wurde die Kostenplanung eingehalten.

## **8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten**

Eine Karosserie beinhaltet, je nach Fahrzeugtyp, zwischen 250 und 500 Blechbauteile, welche im Zusammenbau in 50 bis 120 Vorrichtungen gefügt werden. Sowohl die Herstellung der

Einzelteile und das Fügen zu Baugruppen sowie schließlich zur Gesamtkarosserie als auch der Lackierprozess mit anschließender Trocknung beeinflussen die finale Maßhaltigkeit der Karosserie.

Die Entwicklung der Maßhaltigkeit während der oben genannten Prozessschritte der Fertigung wird in der Regel an jeder Unterbaugruppe, Baugruppe und schließlich der Gesamtkarosserie überprüft. Die gemessenen Abweichungen sollen innerhalb der Toleranz liegen (Birkert et al. 2013). Treten im Anlagenanlauf oder im laufenden Fertigungsprozess Baugruppen auf, die nicht den Qualitätskriterien entsprechen, müssen aufwändige Justageprozesse zur Wiedererreichung der geforderten Bauteiltoleranzen durchlaufen werden. Der Prozess, der derzeit hauptsächlich auf erfahrungsbasierten, zeit- und materialintensiven Iterationsschleifen beruht, ist einer der Hauptkostentreiber im Karosseriebau.

Mit dem neuartigen Tool wird erstmals sowohl ein qualitatives als auch quantitatives Verständnis für Fehlereinflüsse (Beitragsleister) bezüglich der Maßhaltigkeit von Karosseriebaugruppen geschaffen. Bis heute werden in der Praxis in einem sehr teuren iterativen Korrekturprozess so lange Einzelteile und der Zusammenbauprozess variiert, bis eine maßhaltige Baugruppe vorliegt. Mit dem neuen Ansatz wird es möglich sein, aufgrund durchgängigen Verständnisses den oder die wesentlichen Beitragsleister gezielt und softwaregestützt zu modifizieren.

Am Beispiel einer aus drei Einzelteilen bestehenden Baugruppe (z. B. Seitenwandrahmen hinten außen) kann der heutige Einarbeitungsaufwand leicht ca. 300 T€ betragen. In Einzelfällen kommt es sogar vor, dass ein Werkzeugsatz ein zweites Mal gebaut werden muss, was Kosten in Höhe von deutlich > 1 Mio. € nach sich zieht. Weitere Abstimmungskosten im Karosserierohbau kommen oben drauf. Etwaige Ausfallkosten im Anlauf sind hierbei nicht mitgerechnet. Weiterhin fallen in laufender Serie gerade bei maßlich und optisch anspruchsvollen Teilen immer wieder Analyse- und Korrekturkosten an, um „erfahrungsbasiert“ auf Parameterschwankungen zu reagieren.

Wir gehen davon aus, dass mit dem neuen Software-Tool der Korrektur- und Einarbeitungsaufwand um 50 % reduziert werden kann. Bei dieser sehr konservativen Bewertung des tatsächlichen Potentials ergibt sich für das Beispiel leicht ein Einsparpotential von 150-200 T€ – in inigence bekannten Extremfällen auch durchaus 500 T€. Wie hoch das Einsparpotential in laufender Produktion sein wird, hängt stark von der Komplexität der Baugruppe und den zu erwartenden Parameterschwankungen ab. Insbesondere neuere hochfeste und leichte Karosseriewerkstoffe, wie Aluminiumlegierungen und hoch- sowie höchstfeste Stähle, verursachen aufgrund größerer elastischer Rückfederung häufig höheren Ausschuss und mehr Nacharbeit.

Die geleisteten Projektarbeiten können als angemessen angesehen werden, da nachgewiesen werden konnte, dass eine softwaretechnische Bestimmung und Anpassung der Beitragsleister möglich ist. Es wurde überwiegend der ursprünglichen Arbeitsplanung gefolgt, sodass keine „unnötigen“ Aufwände entstanden sind.

Trotz der wirtschaftlichen Durchführung des Projektes waren einige Zusatzarbeiten (Shimstool, umfangreichere Simulationsvergleiche, Aufbau von Betriebsmitteln etc.) notwendig, um das Projekt zum Ziel zu bringen. Dies war vorher in dem Umfang nicht abzusehen und führt dazu, dass über das Projektende hinaus weitere Untersuchungen auf eigene Kosten durchgeführt werden.

## **9 Nutzen für das Unternehmen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses**

Mit Abschluss des Projektes kann inigence ein neuartiges Softwaretool vorweisen, um modellbasiert Kompensationsmaßnahmen für Karosseriebaugruppen abzuleiten, welches insbesondere für den Automobilbereich eingesetzt werden soll. Inigence akquiriert bis zu 90 % der Aufträge im Bereich des Fahrzeugbaus, somit ist der Zugang zum Markt bereits vorhanden, um das Softwaretool in der Praxis einzusetzen. Mit dem neuen Softwaretool wird der heute nur von wenigen Fachleuten durchführbare manuelle Prozess zur Abstimmung von Karosseriebaugruppen durch eine Datenbasis kombiniert mit einem klugen mathematischen/statistischen Modellierungsverfahren ersetzt. Dadurch weist die inigence GmbH ein Alleinstellungsmerkmal auf, welches ermöglicht, Zeit und Kosten im automobilen Karosseriebau einzusparen.

Zunächst ist geplant, das Tool selbst zu nutzen, um so den Kunden weitere innovative Engineering-Dienstleistungen anbieten zu können und dem „neuen“ Unternehmenszweig der inigence GmbH stetiges Wachstum zu sichern. Die erste Nutzungsphase dient vor allem dazu, das Tool hinsichtlich der täglichen Anwendung bedienerfreundlicher zu gestalten und Automatismen zur Aufbereitung der Eingangsdaten zu implementieren. Parallel werden Erkenntnisse der inigence-Mitarbeiter aus dieser ersten Nutzungsphase in die Weiterentwicklung des Tools einfließen. Die erste Nutzungsphase soll nach 2 Jahren abgeschlossen sein. Alle dort auftretenden Herausforderungen werden gelöst sein, sodass im dritten Jahr nach dem Projekt *MoKomp* an der weiteren Programmierung für eine kommerzielle Nutzung gearbeitet wird.

## **10 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen**

Es sind keine wesentlichen Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen bekannt geworden.

## **11 Veröffentlichungen, Vorträge, Referate**

Ein Artikel zum Projekt wurde im Jahresbericht 2019/2020 des Fraunhofer IWU veröffentlicht („MoKomp: Modellbasierte Kompensation von Fehlern in der Operationsfolge von Fertigungsprozessen“). Für die Internationale Conference on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (NUMISHEET 2022) ein Abstract eingereicht worden, welches akzeptiert wurde („Data-based prediction model for an efficient matching process in the body shop“). Eine Veröffentlichung erfolgt somit demnächst.

## **Literatur**

Ackert, Patrick; Schwarz, Christian; Mauermann, Reinhard (2017): Geometric Accuracy of a Design Based Process Chain Simulation in Comparison to the Results of Real Car Body Manufacturing. Automotive Engineering Congress 2017. Vincentz.net. Nürnberg, 30.05.2017.

Das, Abhishek; Franciosa, Pasquale; Ceglarek, Darek (2015): Fixture Design Optimisation Considering Production Batch of Compliant Non-Ideal Sheet Metal Parts. In: *Procedia Manufacturing* 1, S. 157–168. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.09.079

Lindau, Björn; Lindkvist, Lars; Andersson, Alf; Söderberg, Rikard (2013): Statistical shape modeling in virtual assembly using PCA-technique. In: *Journal of Manufacturing Systems* 32 (3), S. 456–463. DOI: 10.1016/j.jmsy.2013.02.002.

Wärmefjord, Kristina; Söderberg, Rikard; Ottosson, Peter; Werke, Mats; Lorin, Samuel; Lindkvist, Lars; Wandebäck, Frederik (2013): Prediction of Geometrical Variation of Forged and Stamped Parts for Assembly Variation Simulation. In: Pavel Hora (Hg.): Proceedings of iddrg Conference 2013. Conference 2013, Zurich, Switzerland, June 2 - 5, 2013. Zürich: Institute of Virtual Manufacturing ETH Zurich, S. 99–104.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel  Vorhaben:     Modellbasierte Kompensation von Fehlern in der Operationsfolge von Fertigungsprozessen (MoKomp)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Prof. Dr.-Ing. Arndt Birkert Johannes Weber	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2021
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  inigence GmbH Bernbachstraße 36 74626 Bretzfeld  Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) Nöthnitzer Straße 44 01187 Dresden	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 01IS18087A-B
	11. Seitenzahl 46
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 4
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 37
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)  DLR Projektträger, Gesellschaft, Innovation, Technologie; Software-intensive Systeme	
18. Kurzfassung Ziel des Vorhabens war es, ein neuartiges Software-Tool zu erforschen und zu erstellen, mit dessen Hilfe die Abstimmung von Baugruppen und Zusammenbauten (ZBs) vereinfacht und automatisiert werden kann. Für die Korrektur bzw. erfolgreiche Abstimmung eines Zusammenbaus wird ein übergeordnetes Modell benötigt, mit dem es gelingt, in der Prozesskette zur Fertigung eines ZBs individuelle Wirkzusammenhänge zu identifizieren. Zur Identifizierung von Hauptbeitragsleistern bezüglich der Maßhaltigkeit über den gesamten Fertigungsprozess wurden mathematische Modelle vom IWU erstellt. Inigence erarbeitete Softwaretools, mit denen die Erfassung von notwendigen Daten (Shimstool) und die Abbildung des Prozesses gelingt. Die Funktionsfähigkeit der Software-Tools wurde an einer realen Prozesskette des Karosseriebaus (Läpple) verifiziert. Die Validierung des Modells bzw. des CPA-Tools gelang bis zum Abschluss des Projektes noch nicht vollständig. Die Validierung erfolgt somit über das Projektende hinaus. Eine schnelle wirtschaftliche Verwertung ist parallel mit Teilergebnissen (Shimstool) möglich.	
19. Schlagwörter Korrektur, Kompensation, Zusammenbau, Shimstool, CPA, Karosseriebau	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title  Project:    Model-based compensation of errors in the operation sequence of manufacturing processes (MoKomp)	
4. author(s) (family name, first name(s))  Prof. Dr.-Ing. Arndt Birkert Johannes Weber	5. end of project 30 September 2021
	6. publication date
	7. form of publication Final report
8. performing organization(s) (name, address)  inigence GmbH Bernbachstraße 36 74626 Bretzfeld  Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) Nöthnitzer Straße 44 01187 Dresden	9. originator's report no.
	10. reference no. 01IS18087A-B
	11. no. of pages 46
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 4
	14. no. of tables 1
	15. no. of figures 37
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)  DLR Projektträger, Gesellschaft, Innovation, Technologie; Software-intensive Systeme	
18. abstract The aim of the project was to research and create a new type of software tool that can be used to simplify and automate the coordination of subassemblies and assemblies. For the correction or successful coordination of an assembly, a superordinate model is required with which it is possible to identify individual interdependencies in the process chain for the production of an assembly. Mathematical models were created by IWU to identify the main contributors to dimensional accuracy throughout the entire manufacturing process. Inigence developed software tools with which the collection of necessary data (shim tool) and the mapping of the process succeed. The functionality of the software tools was verified on a real process chain of car body construction (Läpple). The validation of the model and the CPA tool was not yet complete by the end of the project. The validation will therefore continue beyond the end of the project. Rapid economic exploitation is possible in parallel with partial results (shim tool).	
19. keywords Correction, compensation, assembly, shim tool, CPA, body shop	
20. publisher	21. price