



# 1 Einleitung und Zielsetzung

## 1.1 Motivation und Handlungsbedarf

Ein Ziel der Automobilhersteller in der Produktentstehungsphase bis zum SOP (Start of Production) ist es, die Herstellbarkeit des Produktes und die Erfüllung der qualitativen Anforderungen an das Produkt unter Serienbedingungen abzusichern. In der frühen Phase der Produktentstehung gibt es für diese Absicherung noch keine realen Einzelteile; das Fahrzeug existiert bis dahin nur in Form von Konstruktionsdaten im Rechner. Diese frühe Phase einer Fahrzeugentwicklung hat als die konzeptbestimmende und gesamthaft kostenbeeinflussende Entwicklungsphase weitreichende Konsequenzen für die nachfolgende Serienentwicklung und daher eine sehr große Bedeutung. In Zeiten explodierender Modellvielfalt und ständig kürzer werdender Entwicklungszeiträume ist ihre Bedeutung permanent gewachsen. /GÜLICH.08/



**Abbildung 1-1 Produktprozess (PP)**

Ein zentraler Bestandteil der **Produktentstehung (Abbildung 1-1)** ist dabei die virtuelle Absicherung einzelner Fertigungsschritte, bevor die Fertigungsprozesse umgesetzt und die Fertigungsressourcen in Hardware erstellt werden. In diesem Zusammenhang ist es



das Ziel der Automobilhersteller, die realen Fertigungsschritte vom Einzelteil bis zum Endprodukt vollständig in einer durchgängigen virtuellen Prozesskette abzubilden. Dieses Vorgehen bietet zum einen ein großes Einsparpotential bezüglich Entwicklungszeit und –kosten und ermöglicht zum anderen einen Qualitätszugewinn, da Fehler und Potentiale von Produkt, Prozess und Ressource frühzeitig erkannt werden und damit einen höheren Reifegrad dieser erreicht werden kann. Nur bei Beherrschung von Produkt, Prozess und Ressource können optimale Produkte garantiert werden.

Im Bereich der Einzelteilherstellung ist es Stand der Technik, die Auslegung und Einarbeitung der Umformwerkzeuge durch CAE-Programme zu unterstützen. Durch den Einsatz von Umformsimulationen auf Basis der FE-Methode wird dem Prozessverhalten des Werkstoffs während des Umformprozesses bei der Werkzeugkonstruktion Rechnung getragen. Die Werkzeuggeometrie wird dabei gezielt so gestaltet, dass nach Abschluss des Umformvorganges ein Einzelteil vorliegt, dessen Qualitätsmerkmale den Anforderungen entsprechen. Das Werkzeug wird also so ausgelegt, dass die Einflüsse des Umformens auf die Einzelteilgeometrie kompensiert werden. Werkzeug- und Einzelteilgeometrie sind daher in der Regel nicht identisch.

Eine entsprechende Berücksichtigung von Prozesseinflüssen auf die Geometrie der Einzelteile im Rahmen des Fügeprozesses im Karosseriebau ist bei der Konstruktion von Karosserieteilen und der Karosseriebauvorrichtungen hingegen noch nicht der Fall. Die Vorrichtungen des Karosseriebaus werden erfahrungsbasiert zur Sollgeometrie von Einzelteilen und Baugruppen ausgelegt; Einflüsse der Fügeprozesse, die sich auf die Maßhaltigkeit der einzelnen Baugruppen und letztlich der gesamten Karosserie auswirken, bleiben dabei in der frühen Phase unberücksichtigt. Das Potential zur Steigerung der Reife von Produkt, Prozess und Ressource durch den Einsatz eines Simulationstools für den Fügeprozess (analog zur Umformsimulation) bleibt bis dato ungenutzt.

Mit dem Start der **Prototypenphase** (Abbildung 1-1) beginnt die Herstellbarkeitsabsicherung des Produktes mittels realer Fahrzeuge. Das Ziel ist es, ausgehend von der Prototypenphase über die **Vorserie** bis hin zu 0-Serie und SOP, den Reifegrad von Produkt, Prozess und Ressource soweit zu steigern, dass die Qualitätsanforderungen erfüllt werden. Treiber dieses Prozesses sind Analyseteams des Vorseriencenters, deren Aufgabe es ist, Probleme und Potentiale in Produkt, Prozess und Ressource zu identifizieren, Maßnahmen zur Steigerung der Serienreife zu erarbeiten, umzusetzen und deren Wirksamkeit zu kontrollieren.

Beginnend mit der Prototypenphase ist es eine zentrale Aufgabe des Analyseteams des Karosseriebaus Produkt, Prozess und Ressource so aufeinander abzustimmen, dass die fertige Karosserie trotz aller Prozesseinflüsse schließlich alle Qualitätsanforderungen erfüllt. Im Rahmen dieses Abstimmungsprozesses wird vor allem die Geometrie der Karosseriebauvorrichtung mittels Einstellelemente (Shims) so verändert, dass den Prozesseinflüssen durch lokales Überdrücken der Einzelteile mittels Spanntechnik entgegengewirkt wird.

Die Ermittlung dieser Vorhaltung geschieht heute mittels eines reaktiven, iterativen Analyseprozesses, der auf Messberichten von Einzelteilen und gefertigten Baugruppen basiert. Ausgehend von diesen Berichten werden die Bereiche an Einzelteilen und Baugruppen identifiziert, die nicht innerhalb der Spezifikation gefertigt wurden. Im nächsten Schritt werden entsprechende Optimierungsmaßnahmen an Produkt, Prozess und/ oder Ressource definiert, um die Abweichungen von der Spezifikation zu



minimieren. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen korrekt abzuschätzen stellt dabei eine große Herausforderung dar, weshalb die produktbezogenen Qualitätsziele meist nur sukzessive nach Durchlaufen mehrerer Optimierungsschleifen erreicht werden.

Dieses Vorgehen bietet unter anderem bezüglich des zeitlichen und finanziellen Aufwandes zur Erreichung der produktbezogenen Qualitätsziele deutliches Verbesserungspotential.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Analyseprozess des Karosseriebaus durch eine Simulation des Fügeprozesses ganzheitlich zu unterstützen und damit die Definition von Optimierungsmaßnahmen für Produkt, Fertigungsprozess und Fertigungsressource bereits vor dem Anfertigen von Baugruppen zu ermöglichen. Auf diese Weise gelangt man von einem reaktiven, iterativen Analyseprozess zu einer aktiven Steuerung für die geometrischen Qualitätsziele der Prozesskette Karosseriebau.

Bereits in der **frühen Entwicklungsphase** soll es die Simulationssystematik ermöglichen, die systematischen Einflüsse des Fügeprozesses auf die Baugruppengeometrie zu identifizieren. Im Weiteren sollen mit der Fügésimulation dann Kompensationsmaßnahmen zur Minimierung von Prozesseinflüssen ermittelt und abgesichert werden. Diese Kompensationsmaßnahmen können Produkt, Prozess und/oder Fertigungsressource betreffen:

Bezogen auf das Einzelteil (Produkt) kann dies eine Änderung der Geometrie entgegen Zeichnungsstand bedeuten, so dass das Einzelteil vor dem Fügeprozess zwar nicht der Spezifikation entspricht, im fertigen Fahrzeug aber, nach Einwirkung aller Prozesseinflüsse, die Vorgaben erfüllt.

Im Fertigungsprozess kann eine Minimierung von Prozesseinflüssen beispielsweise durch eine geänderte Reihenfolge der Fügepunkte oder Spannfolge erreicht werden.

Eine Veränderung der Positionen von Aufnahme- und Spannstellen und das Integrieren von Vorhaltungen (gegenüber der Einzelteilgeometrie) sind mögliche Optionen, um über die Karosseriebauvorrichtung (Ressource) Prozesseinflüsse zu kompensieren.

In der nachfolgenden **Prototypen- und Vorserienphase**, in der die Herstellbarkeitsabsicherung mittels realer Fahrzeuge erfolgt, besteht die Kernaufgabe des Analyseteams darin (wie in Abschnitt 1.1 angesprochen), Produkt, Prozess und Ressource so aufeinander abzustimmen, dass die fertige Karosserie alle Qualitätsanforderungen erfüllt. In dieser Phase soll die Einarbeitung der Karosseriebauvorrichtung durch die Simulation derart unterstützt werden, dass auf Basis der vorliegenden Einzelteilgeometrien, unter Berücksichtigung der Parameter von Fertigungsprozess und Fertigungsressourcen, die zu erwartende Geometrie der Baugruppe berechnet wird. Anhand dieses Simulationsergebnisses können dann bereits vor dem Fertigen realer Baugruppen Maßnahmen (an Produkt, Prozess und Ressource) zur Optimierung der Baugruppengeometrie definiert werden. Damit gelangt man bereits bei der Fertigung der ersten Baugruppe zu einem verbesserten Qualitätsstand.

Die skizzierte Methode der aktiven Steuerung stellt hinsichtlich der Systematik der Analyse zum aktuellen Vorgehen eine deutliche Verbesserung dar.



Die Anforderungen an eine solche Simulationssystematik sind dabei wie folgt:

- Die der Simulation zugrundeliegenden Geometriedaten (Produkt) müssen die gleiche Gestalt haben wie die realen Einzelteile, die zur Fertigung der Karosserie verwendet werden. Nur so können für eine zu diesem Zeitpunkt im Karosseriebau konkret vorliegende Optimierungsaufgabe entsprechende Maßnahmen erarbeitet und abgesichert werden.
- Der Übertrag der Prozessdaten in die Simulation betrifft in erster Linie die Modellierung der eingesetzten Fügetechnologie für die Berechnung. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihen wird das Widerstandspunktschweißen betrachtet.
- Bezüglich der Konfiguration der Karosseriebauvorrichtung (Ressource) muss ein bidirektionaler Abgleich zwischen Simulation und Karosseriebau möglich sein. Zunächst muss der aktuelle Stand der Vorhaltungen aus dem Karosseriebau in die Simulation übertragen werden; nach der Optimierung der Baugruppengeometrie müssen die ermittelten Stellgrößen in die Karosseriebauvorrichtung zurückgespiegelt werden können.
- Im Produktionsbereich ist die schnelle Bereitstellung von Ergebnissen für eine Aufgabenstellung Grundvoraussetzung für den Erfolg einer neuen Methode. Gleichzeitig muss die Simulationssystematik allerdings in der Lage sein, große und komplexe Einzelteile zu berechnen und eine Ergebnisqualität zu bieten, die solide Informationen zur erwartbaren Maßhaltigkeit der Baugruppe garantiert.

Im Spannungsfeld dieser Anforderungen soll im Rahmen dieser Arbeit eine aktive Steuerung für die geometrischen Qualitätsziele der Prozesskette Karosseriebau in der Vorserie entwickelt werden. Mit dieser Qualitätssteuerung sollen folgende Verbesserungen im Produktprozess erreicht werden:

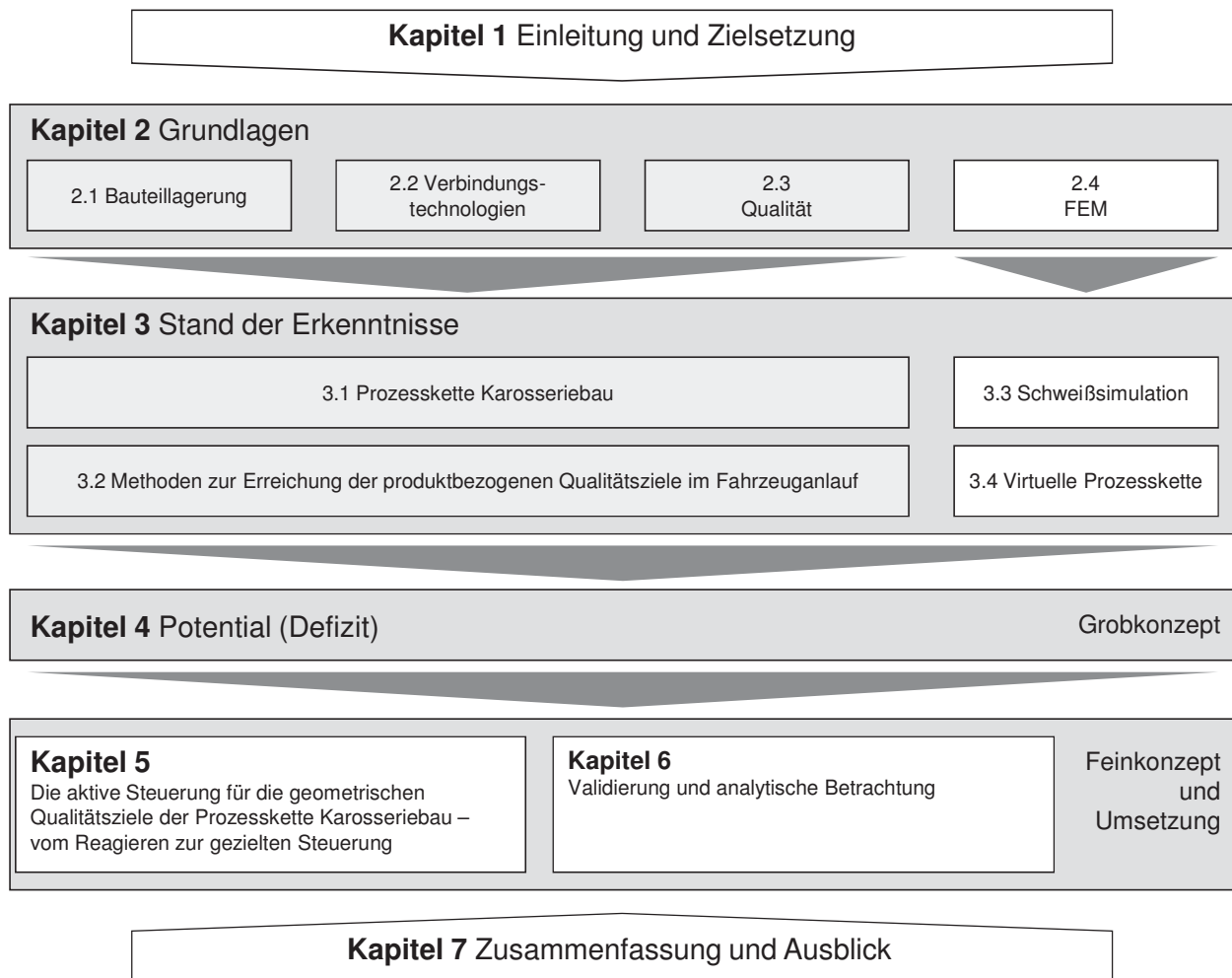
- Vorgelagerte Analysen ermöglichen Erkenntnisse über die zu erwartende Qualität der Baugruppe vor dem Fügen realer Einzelteile
- Schnellere Erreichung der produktbezogenen Qualitätsziele
- Zielgerichtete Optimierung von Einzelteilen und zugehörigen Fertigungsprozessen
- Reduzierung von Einzelteiländerungen im Serienwerkzeug

Im folgenden Abschnitt wird das Vorgehen bei der Entwicklung dieser Steuerung beschrieben.



### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich, wie in **Abbildung 1-2** zu sehen ist, in 7 Kapitel.



**Abbildung 1-2 Strukturierung der Arbeit**

Nach der Einführung wird in Kapitel 2 auf Grundlagen eingegangen, die zum Verständnis der im Rahmen dieser Arbeit behandelten Materie notwendig sind. Dabei liegt der Fokus zunächst auf der Lagerung von Einzelteilen (2.1). Eine durchdachte Aufnahmestrategie für Einzelteile und Baugruppen während des Produktionsprozesses ist die Grundlage, um Produkte, welche den Qualitätsanforderungen genügen, prozesssicher fertigen zu können. Ebenso ist eine durchdachte Aufnahmestrategie im Zuge des Prüfprozesses die Grundvoraussetzung dafür, die Qualität der Produkte richtig beurteilen zu können.

Zur Verbindung der Einzelteile zu Baugruppen und letztlich zu einer Karosserie wird sehr häufig das Widerstandspunktschweißen eingesetzt. Die Grundzüge dieses Verfahrens werden in Kapitel 2.2 betrachtet.

Eine zentrale Aufgabe, welcher der Produktionsbereich eines Unternehmens gerecht werden muss, ist die Erfüllung der Qualitätsanforderungen. Wie Qualitätsanforderungen definiert sind und welche Methoden es gibt, die Erreichung der Anforderungen sicher zu stellen, wird im Abschnitt 2.3 beschrieben.



Zur Simulation des Fügeprozesses wird das numerische Verfahren der Finiten Elemente eingesetzt. Zum Ende des zweiten Kapitels wird deshalb in 2.4 auf die Grundlagen der Finiten-Elemente-Methode eingegangen.

In Kapitel 3 wird der Stand der Technik dargestellt. Für diese Arbeit von zentraler Bedeutung sind dabei aus dem automobilen Produktionsbereich die Herstellung und das Fügen von Einzelteilen im Karosseriebau. In Kapitel 3.1 wird daher Grundlegendes der Prozesskette Karosseriebau erläutert. Unterschiedliche Strategien zur Erreichung der Qualitätsanforderungen im Fahrzeuganlauf werden in Kapitel 3.2 beschrieben. Zur Unterstützung der Analyse ist im Rahmen der aktiven Steuerung eine Schweißsimulation angedacht. In Abschnitt 3.3 wird deshalb der aktuelle Entwicklungsstand in diesem Bereich dargelegt. Abschließend zum Kapitel 3 wird in 3.4 die virtuelle Prozesskette betrachtet, in deren Kontext auch die aktive Steuerung gesehen werden muss.

Aufbauend auf dem Stand der Technik erfolgt in Kapitel 4 die Ableitung des Potentials, welche zur Idee der aktiven Steuerung für die geometrischen Qualitätsziele des Karosseriebaus führt. Dabei wird ausführlich auf die Anforderungen an diese Systematik eingegangen.

Die Beschreibung des Prozessprinzips der aktiven Steuerung ist Inhalt von Kapitel 5. Dabei wird auch detailliert die Simulation des Fügeprozesses auf Basis realer Einzelteilgeometrien behandelt.

Die Beschreibung und Auswertung der Versuchsreihen, die zur Validierung der vorgestellten Steuerungssystematik durchgeführt wurden, ist in Kapitel 6 zu finden.

Das 7. Kapitel sieht eine Zusammenfassung der Erkenntnisse sowie einen Ausblick vor.



## 2 Grundlagen

### 2.1 Bauteillagerung

Jeder Körper hat im dreidimensionalen Raum sechs Freiheitsgrade: drei translatorische und drei rotatorische. Um einen Körper eindeutig bestimmt zu lagern, müssen diese sechs Freiheitsgrade gebunden werden. Die Ausrichtung eines Bauteils erfolgt üblicherweise über die „3-2-1 Regel“. Über die Definition einer Primärebene (3 Punkte), einer Sekundärebene (2 Punkte) und einer Tertiärebene (1 Punkt) wird das Teil statisch bestimmt gelagert. Die Geometrie des Teils wird durch die statisch bestimmte Lagerung nicht beeinflusst.

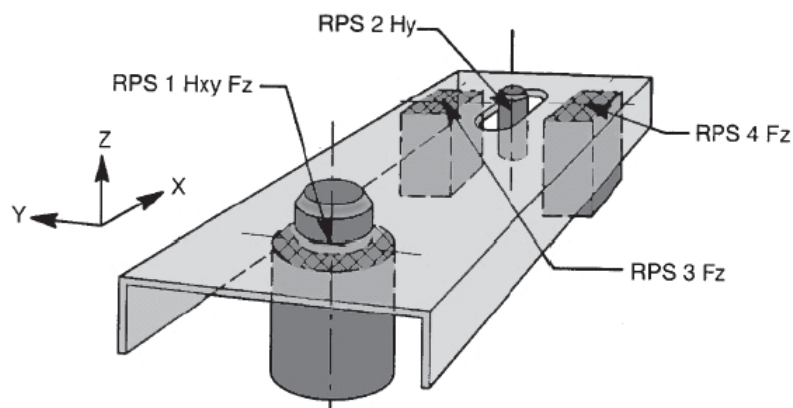
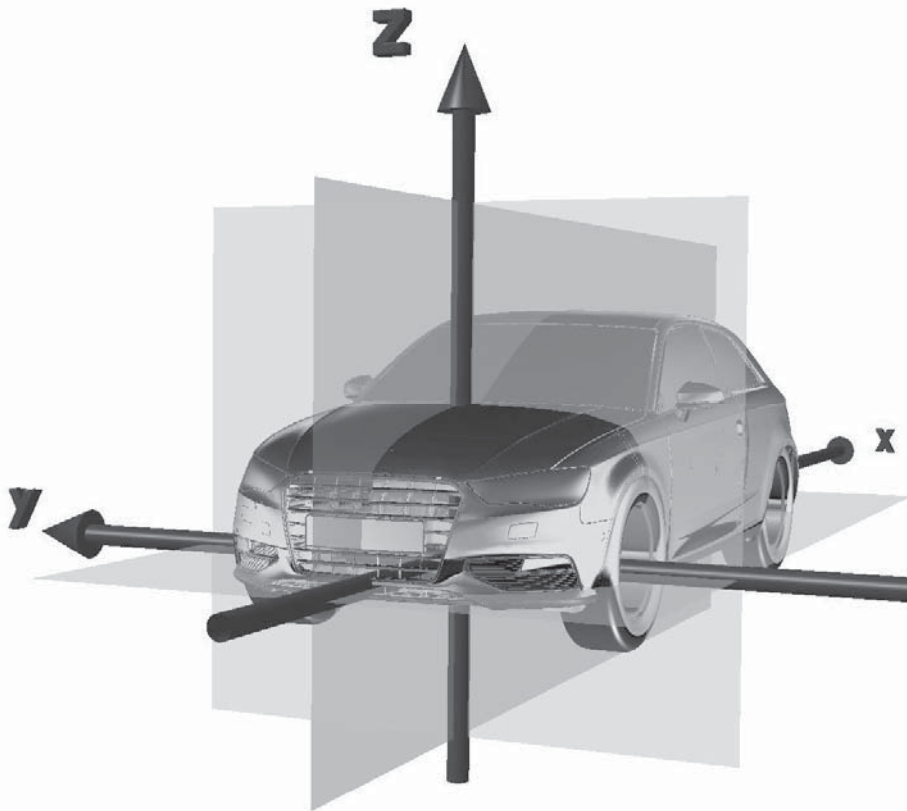


Abbildung 2-1 Bauteilausrichtung gemäß 3-2-1 Regel /UNGERMANN.06/





Die zur Ausrichtung eines Bauteils definierten Punkte werden häufig als Referenzpunkte bezeichnet (siehe **Abbildung 2-1**). Dem Referenzpunktsystem (RPS) zugrunde liegt ein Fahrzeugkoordinatensystem, das seinen Ursprung mittig auf Höhe der Vorderachse eines Fahrzeuges hat (siehe **Abbildung 2-2**). Die Referenzpunkte eines Bauteils bilden zum einen ein bauteilorientiertes Koordinatensystem (das unter anderem zur Tolerierung der Teile notwendig ist) und definieren zum anderen die Lage des Bauteils im Fahrzeugkoordinatensystem.

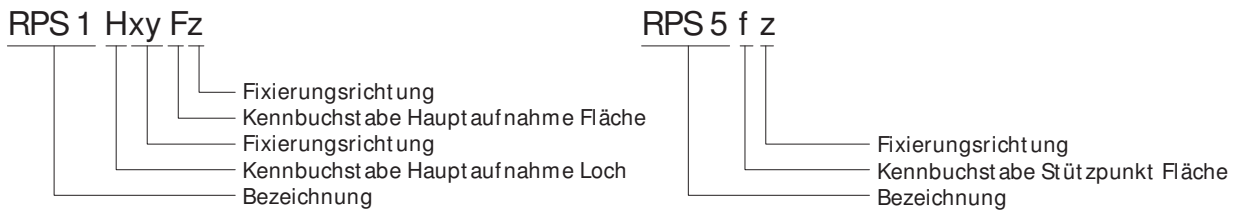


**Abbildung 2-2 Fahrzeugkoordinatensystem**

Die Definition von sechs (Haupt-)Referenzpunkten ist allerdings nur für einen idealstarrten Körper ausreichend. Bei realen Bauteilen kann es bedingt durch den Einfluss der Schwerkraft zu Deformationen kommen. Um eine prozesssichere und wiederholgenaue Positionierung zu gewährleisten und eine zielorientierte Repräsentation des Qualitätsstandes zu erreichen, kann die Bestimmung zusätzlicher Aufnahmepunkte (Stützstellen, auch Nebenreferenzpunkte) notwendig sein. Dabei ist allerdings zu beachten, dass ein Körper durch zusätzliche Stützpunkte statisch überbestimmt wird, wodurch die Geometrie des Körpers im Allgemeinen durch die zusätzlichen Stützpunkte beeinflusst wird.

Alle Referenzpunkte eines Objektes sind in der technischen Zeichnung eingetragen. Als Aufnahmepunkte dienen in der Regel Rund- oder Langlöcher (H / Hole) und Flächen (F / Face). Die Bezeichnung der RPS ist wie folgt:





Im Rahmen des Qualitätsprozesses in der Prozesskette Karosseriebau ist die Lagerung von Einzelteilen und Baugruppen bei zwei Ereignissen essentiell:

### Lagerung zur Beurteilung der Qualität (Messaufnahme)

Auf Basis des Ergebnisses der Bauteilvermessung (ET/ BG) werden Optimierungsmaßnahmen an Einzelteilen und/ oder Optimierungsmaßnahmen im Prozess definiert. Der Qualitätsstand muss durch das Messergebnis realistisch wiedergegeben werden. Insbesondere bei nicht-eigenstabilen Einzelteilen oder Baugruppen müssen die zusätzlichen Stützpunkte aufgrund ihres Einflusses auf die Geometrie daher sorgfältig gewählt werden.

Für die Bemaßung und Tolerierung nicht-formstabiler Teile existiert die Norm DIN ISO 10579, welche diese Problematik erfasst. Ein nicht-eigenstabiles Bauteil ist demnach ein Teil, das sich „im freien Zustand bis zu einem Ausmaß verformt, dass es außerhalb der in der Zeichnung eingetragenen Maßtoleranzen (...) liegt“. Der freie Zustand wird in dieser Norm als der Zustand definiert, in dem das Teil nur der eigenen Schwerkraft unterliegt. Gemäß der genannten Norm kann es erforderlich sein, für diese Art von Teilen in der Zeichnung Bedingungen einzutragen (beispielsweise die Richtung der Schwerkraft oder die Aufnahmebedingungen), unter denen die Toleranzen einzuhalten sind.

Die zugrundeliegende Erkenntnis ist die, dass die eigentliche Geometrie des Körpers vor dem Messen gar nicht bekannt ist. Werden bei einer überbestimmten Lagerung die zusätzlichen Stützstellen, wie es üblich ist, auf das Nominalmaß eingestellt, wird das Bauteil in diesen Bereichen unter Umständen also in eine Zwangslage gebracht und das Messergebnis beeinflusst. Daher muss vor der Definition der Bauteillagerung bestimmt werden, welche Aussage die Messung liefern soll.

### Lagerung während des Fügeprozesses im Karosseriebau

In der Karosseriebauvorrichtung werden die Bauteile im Rahmen des Fügeprozesses zueinander positioniert und gespannt. Dies geschieht mittels Ausrichtelementen wie Zentrierbolzen, Auflagern, Einweisern und Spannern. Die Karosseriebauvorrichtung muss dabei so konzipiert sein, dass eine wiederholgenaue Positionierung der Teile zum Fügen gewährleistet ist, um eine Reproduzierbarkeit der Baugruppengeometrie sicher zu stellen. Die Position der einzelnen Elemente einer Karosseriebauvorrichtung auf dem Bauteil wird im Aufnahme- und Spannplan festgelegt.

Über die Position der Spanner auf dem Bauteil und durch Überdrücken einzelner Bereiche eines Bauteils lässt sich die Geometrie der resultierenden Baugruppe deutlich beeinflussen. Die Abstimmung der Karosseriebauvorrichtung auf die real vorliegenden Einzelteilgeometrien und den Einfluss des Fügeprozesses ist, wie in der Einleitung angesprochen, eine zentrale Aufgabe des Analyseteams im Produktprozess.