

# **Standard- und Modulbasierte digitale Rohbauprozesskette**

Frühzeitige Produktbeeinflussung bezüglich Produktionsanforderungen im Karosserierohbau der Automobilindustrie

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktors der Ingenieurwissenschaften**

Fakultät für Maschinenbau des

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Genehmigte

**Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Waldemar Walla

Tag der mündlichen Prüfung 04.12.2015

Hauptreferentin: Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jivka Ovtcharova

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Harald Meerkamm



## **Kurzfassung**

Um die hohe Produktvarianz zu beherrschen, werden in der Automobilindustrie Produkte standardisiert und modularisiert. Standardisierung und Modularisierung bieten nicht nur in der Produktentwicklung viele Vorteile, sondern auch in der Produktion und der Produktionsplanung. Im industriellen Umfeld werden allerdings noch nicht alle Potenziale der Standardisierung und Modularisierung ausgeschöpft. Zwar kann bereits mit vordefinierten Produktionsmodulen die Produktionsplanung in den frühen Phasen des Anlagenentwicklungsprozesses unterstützt werden, allerdings fehlt die methodische Berücksichtigung der standardisierten Produktionsanlagen in der Produktentwicklung. Um diese Lücke zu schließen, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Methode entwickelt, die den Produktentwickler bei der Produktgestaltung unterstützt, sodass sich neue Produkte auf einer standardisierten Produktionsanlage fertigen lassen.

Kern dieser Arbeit ist eine neuartige Methode, die alle Anforderungen einer standardisierten und modularisierten Produktion sammelt und dem Konstrukteur anschaulich zur Verfügung stellt. Dabei werden die Restriktionen und Möglichkeiten der Produktionsanlage ermittelt und anschaulich dargestellt, sodass der Produktentwickler keiner Produktionskenntnisse bedarf.

Die erarbeitete Methode wurde an zwei Beispielen aus dem automobilen Karosserierohbau verifiziert und validiert. Es konnte gezeigt werden, dass trotz der angenommenen Vereinfachungen die Methode zur frühzeitigen Produktbeeinflussung genutzt werden kann.



## **Abstract**

Standardization and modularization of products is a key strategy of the automotive industry to handle the increasing product diversity. Standardization and modularization offers big advantages not only for the product development but also for production and planning departments. But industry often doesn't utilize these advantages. In very early phases of the development cycle a first layout can be generated with the help of predefined production modules. But a clear method which considers the production requirements is missing in the development process. This contribution introduces a new method which supports the developer to design a new product in order to fit to the standardized and modularized production.

The method collects all requirements of a standardized and modularized production and provides them in a descriptive way to the product developer. Therefor the restriction and possibilities of a certain production module are identified and shown to the developer who doesn't need knowledge about the production system.

The introduced method has been verified and validated using two examples from the automotive body shop. The developed method supports the product designer in considering the production requirements in an early phase of the development process.



## **Danksagung**

Mein ganz besonderer Dank gilt Frau Professor Dr. Dr.-Ing Dr.-Ing. h.c. Ovtcharova, der Leiterin des Instituts für Informationsmanagement im Ingenieurwesen, für die Betreuung meiner Dissertation. Durch Ihre präzisen und hilfreichen Anregungen konnte ich schnell einen wissenschaftlichen Zugang zu den industriellen Fragestellungen finden. Des Weiteren danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Meerkamm für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Koreferats.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Doktorandentätigkeit am Forschungszentrum der Daimler AG in Ulm. Für die hochinteressanten Einblicke und hilfreichen Hinweise möchte ich mich bei allen Kollegen bedanken. Besonders meinem ehemaligen Teamleiter Dr.-Ing. Thomas Bär möchte ich für die Förderung und das entgegengebrachte Vertrauen danken. Für die langjährige freundschaftliche Zusammenarbeit möchte ich mich besonders bei Dr.-Ing. Michaël Prieur, Prof. Dr.-Ing. Jens Kiefer, Dr.-Ing. Anton Strahilov, Karl-Joseph Wack und Martin Bergert bedanken.

Ein besonderer Dank gilt den Mitarbeitern des Instituts für Informationsmanagement im Ingenieurwesen für zahlreiche konstruktive Diskussionen. Besonders Dr.-Ing. Stilian Stanev, Ramez Awad und Dr.-Ing. Alexander Burger danke ich für den intensiven Austausch im Rahmen des EU-Projekts MyCar.

Den erfolgreichen Abschluss von Schule, Studium und Promotion verdanke ich ganz wesentlich meinen Eltern Bernadette und Rainer Walla. Durch Ihre tatkräftige Unterstützung schufen Sie den notwendigen Freiraum zur Erfüllung meiner Ziele. Meinem Bruder Gregor Walla möchte ich für die Durchsicht der Arbeit danken.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Freundin Maria für den Ansporn, für den Rückhalt und für das Verständnis für viele entgangene gemeinsame Stunden danken.

Sindelfingen, im Dezember 2015

Waldemar Walla



*Für meine Eltern*



## Inhaltsverzeichnis

|  |     |
|--|-----|
| Kurzfassung .....  | III |
| Abstract .....   | V   |
| Danksagung .....   | VII |
| Inhaltsverzeichnis .....   | XI  |
| 1 Einleitung.....  | 1   |
| 1.1 Motivation der Arbeit.....   | 1   |
| 1.2 Zielsetzung der Arbeit.....  | 3   |
| 1.3 Aufbau der Arbeit .....  | 5   |
| 2 Produktentstehungsprozess im Karosserierohbau der Automobilindustrie.....                                | 9   |
| 2.1 Begriffsverständnis Produktentstehung .....  | 9   |
| 2.1.1 Produktlebenszyklus .....  | 9   |
| 2.1.2 Produktentwicklung .....   | 10  |
| 2.1.3 Produktionsplanung .....   | 15  |
| 2.2 Produktentwicklung in der Automobilindustrie.....  | 16  |
| 2.2.1 Prozessübersicht.....  | 17  |
| 2.2.2 Strategiephase .....   | 19  |
| 2.2.3 Serienentwicklung .....  | 19  |
| 2.2.4 Serienbetreuung .....  | 23  |
| 2.3 Produktionsplanung in der Automobilindustrie .....   | 23  |
| 2.3.1 Prozessübersicht.....  | 24  |
| 2.3.2 Strategiephase .....   | 25  |
| 2.3.3 Produktionsplanung in der Fahrzeugphase .....  | 26  |
| 2.3.4 Serienbegleitung .....   | 30  |
| 2.4 Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung .....                                | 31  |
| 2.4.1 Integration von Produktentwicklung und Produktionsplanung .....                                      | 31  |
| 2.4.2 Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung<br>in der Automobilindustrie ..... | 33  |
| 2.5 Produktion in der Automobilindustrie .....   | 34  |
| 2.5.1 Produktion eines Fahrzeugs .....   | 34  |
| 2.5.2 Produktion einer Fahrzeugkarosserie.....   | 36  |
| 2.6 Herausforderungen im automobilen Karosserierohbau .....  | 38  |
| 3 Stand der Forschung und Technik .....  | 41  |
| 3.1 Standardisierung und Modularisierung in der Produktentwicklung .....                                   | 41  |
| 3.1.1 Standardisierung und Modularisierung von Produkten .....   | 41  |
| 3.1.2 Modularisierung von Karosserien.....   | 46  |
| 3.1.3 Zusammenfassung .....  | 49  |
| 3.2 Standardisierung und Modularisierung in der Produktionsplanung.....                                    | 50  |
| 3.2.1 Standardisierung und Modularisierung in der Produktion.....  | 50  |
| 3.2.2 Standardisierung und Modularisierung im Karosserierohbau .....                                       | 56  |
| 3.2.3 Zusammenfassung .....  | 57  |
| 3.3 Digitale Fabrik .....  | 58  |

---

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 3.3.1 | Begriffsbestimmung und Abgrenzung .....  | 58  |
| 3.3.2 | Anwendungsgebiete der Digitalen Fabrik .....   | 59  |
| 3.3.3 | Ziele der Digitalen Fabrik .....   | 61  |
| 3.3.4 | Modelle der Digitalen Fabrik .....   | 63  |
| 3.3.5 | Digitale Fabrik im Karosserierohbau .....  | 64  |
| 3.3.6 | Zusammenfassung .....  | 67  |
| 3.4   | Produktionsgetriebene Gestaltung eines Produkts .....  | 68  |
| 3.4.1 | Fertigungsgerechtes Konstruieren .....   | 68  |
| 3.4.2 | Design for Retooling .....   | 69  |
| 3.4.3 | Frühzeitige Produktbeeinflussung .....   | 72  |
| 3.4.4 | Berücksichtigung der Produktionsanforderungen im Karosserierohbau ..   | 76  |
| 3.4.5 | Zusammenfassung .....  | 77  |
| 3.5   | Zusammenfassung und Ableitung des Forschungsbedarfs .....  | 78  |
| 3.5.1 | Zusammenfassung des Stands der Forschung und Technik .....   | 78  |
| 3.5.2 | Ableitung der Forschungsfragen .....   | 83  |
| 4     | Methode zur Berücksichtigung von Produktionsmodulen in der<br>Produktentwicklung .....                       | 85  |
| 4.1   | Anforderungen einer standardisierten und modularisierten Rohbauproduktion<br>an die Produktentwicklung ..... | 85  |
| 4.1.1 | Fügefølge .....  | 85  |
| 4.1.2 | Fertigungstechnologie .....  | 86  |
| 4.1.3 | Geometrie der Betriebsmittel .....   | 95  |
| 4.1.4 | Layout der Produktionsmodule .....   | 97  |
| 4.1.5 | Taktzeit .....   | 97  |
| 4.1.6 | Zusammenfassung der Anforderungen an die neue Methode .....  | 98  |
| 4.2   | Grobkonzept der Methode zur frühzeitigen Produktbeeinflussung .....  | 99  |
| 4.2.1 | Grobkonzept der erarbeiteten Vorgehensweise .....  | 100 |
| 4.2.2 | Strategische Festlegung der Produktionsanlage .....  | 102 |
| 4.2.3 | Grobe Vorkonfiguration der Produktionsanlage .....   | 106 |
| 4.2.4 | Analyse der Produktionsanlage .....  | 109 |
| 4.2.5 | Restriktionen und Möglichkeiten eines Produktionsmoduls .....  | 112 |
| 4.2.6 | Gestaltung und Beeinflussung des Produkts .....  | 120 |
| 4.2.7 | Absicherung der Produktionsanlage .....  | 122 |
| 4.2.8 | Anpassungsmanagement .....   | 123 |
| 4.3   | Eingliederung der Methode in den gesamten Produktentstehungsprozess der<br>Automobilindustrie .....          | 126 |
| 4.4   | Anforderungen an die Implementierung .....   | 129 |
| 5     | Prototypische Implementierung der Produktionsumgebung .....  | 133 |
| 5.1   | CAD-System .....   | 133 |
| 5.2   | Struktur und Aufbau des CAD Modells .....  | 134 |
| 5.3   | Vorbereitung des Berechnungsmodells .....  | 135 |
| 5.4   | Applikation zur Berechnung der Zugänglichkeitsräume einer<br>Produktionsanlage .....                         | 136 |
| 5.4.1 | Preprozessor .....   | 137 |
| 5.4.2 | Prozessor .....  | 138 |
| 5.4.3 | Postprozessor .....  | 138 |
| 6     | Verifizierung und Validierung der erarbeiteten Methode .....   | 139 |

---

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 6.1   | Konzept der Verifizierung und Validierung der erarbeiteten Methode ..... | 139 |
| 6.1.1 | Verifizierungsziele des Berechnungsalgorithmus .....                     | 140 |
| 6.1.2 | Validierungsziele der Methode .....                                      | 140 |
| 6.1.3 | Konzept der Validierung und Verifizierung .....                          | 141 |
| 6.1.4 | Ausgangssituation für die Anwendungsszenarien .....                      | 141 |
| 6.2   | Verifizierung der Produktionsumgebung .....                              | 142 |
| 6.2.1 | Erklärung des Verifizierungsszenarios .....                              | 143 |
| 6.2.2 | Aufbau der Produktionsumgebung .....                                     | 144 |
| 6.2.3 | Konventionelle Roboterzugänglichkeitsabsicherung .....                   | 147 |
| 6.2.4 | Vergleich der Ergebnisse .....   | 149 |
| 6.3   | Validierung der erarbeiteten Methode .....                               | 150 |
| 6.3.1 | Erläuterung des Szenarios .....  | 151 |
| 6.3.2 | Anwendung der Methode .....  | 153 |
| 6.3.3 | Bewertung der Methode anhand des Anwendungsszenarios .....               | 165 |
| 6.4   | Kritische Betrachtung .....  | 166 |
| 7     | Zusammenfassung und Ausblick .....                                       | 169 |
| 7.1   | Zusammenfassung .....  | 169 |
| 7.2   | Ausblick .....   | 172 |
| A     | Anhang .....   | 174 |
| A.1   | Herleitung der Werkzeugpositionierung .....                              | 174 |
| A.2   | Aufbau der Eingabedatei .....  | 177 |
| A.3   | Aufbau der Ergebnisdatei .....   | 177 |
| A.4   | Umrechnung in Roll-Pitch-Yaw-Winkeln .....                               | 178 |
| B     | Abkürzungsverzeichnis .....  | 181 |
| C     | Abbildungsverzeichnis .....  | 183 |
| D     | Tabellenverzeichnis .....  | 187 |
| E     | Literaturverzeichnis .....   | 188 |



# 1 Einleitung

*„Jeder Kunde kann seinen Wagen beliebig anstreichen lassen, wenn der Wagen nur schwarz ist.“ - Henry Ford [Ford-35]*

Dieses Henry Ford zugeschriebene Zitat würden heutige Kunden nicht mehr mittragen. Sie wünschen nicht nur eine ausgefallene Fahrzeugfarbe, sondern auch ein individuelles Auto, das sich durch eine spezielle Ausstattung oder Bauform an ihren Bedürfnissen orientiert. Um diese hohe Produktvarianz kostengünstig zu entwickeln und zu produzieren, versucht die Automobilindustrie Standardisierung und Modularisierung in vielen Bereichen, wie der Produktentwicklung oder der Produktion, zu nutzen. Die verschiedenen Ansätze sind aber in vielen Fällen noch nicht aufeinander abgestimmt und nutzen somit nicht das ganze Potenzial aus. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Modularisierung und Standardisierung im gesamten Produktentstehungsprozess des automobilen Karosserierohbaus. Im ersten Kapitel wird die Motivation und Zielsetzung dieser Arbeit näher vorgestellt. Das letzte Teilkapitel 1.3 stellt den Aufbau und die Struktur der Arbeit vor.

## 1.1 Motivation der Arbeit

Unternehmen unterliegen im heutigen globalen Wettbewerb in vielen Branchen einem ständigen Wandel [Tami-05]. Gleichzeitig müssen sie es aber schaffen, bei aller Veränderung ihre identitätsgebenden Werte zu bewahren [Milb-00]. Besonders für die Automobilindustrie, die eine Schlüsselindustrie der deutschen Wirtschaft ist [Heft-01], ergeben sich im Hinblick auf die steigende Globalisierung große Herausforderungen [BrBi-03][ZäSR-03]. Zwar eröffnen sich den Automobilherstellern im Rahmen der Globalisierung neue Absatzmärkte, aber gleichzeitig führen regionale Anforderungen an das Fahrzeug zu einer höheren Komplexität in der Fahrzeugentwicklung. Um Kosten zu sparen und um neue Märkte, wie beispielsweise China, zu erschließen, sind die Automobilhersteller gezwungen ihre Produkte verstärkt auch in ihren Absatzmärkten zu produzieren. Dies führt dazu, dass ein Produkt auch in vielen Fabriken weltweit gefertigt werden muss. Was ebenfalls eine große Komplexität in der Produktionsplanung zur Folge hat.

Seit den 70er Jahren haben sich die Automobilmärkte von einem Verkäufer- zu einem Käufermarkt entwickelt [ZaSc-96][Broc-10]. Als Reaktion auf diese Veränderung gingen die Automobilhersteller noch stärker auf die individuellen Wünsche der Autofahrer ein und erweiterten ihre Produktmodellvarianz [BuVW-06][Lamp-07]. Auf diese Weise sollen durch die Erfüllung von Kundenwünschen neue Kundenkreise erschlossen werden [Krok-06]. Die vom Markt geforderte große Produktvarianz stellt nicht nur die Produktentwicklung, die ganze Produktfamilien möglichst schnell und effizient entwickeln muss, sondern auch die Produktion, die das große Produktportfolio herstellen muss, vor große Herausforderungen. Gleichzeitig werden die Lebenszyklen der einzelnen Fahrzeugmodelle immer kürzer [Wemh-05]. Eine wirtschaftliche Fahrzeugproduktion gestaltet sich somit immer schwieriger, da sich Produktionsanlagen bei geringer werdenden Stückzahlen pro Fahrzeugmodell in einer kürzer werdenden Zeit amortisieren müssen [Broc-10]. Um auch eine große Produktvarianz profitabel produzieren zu können, müssen die Produktionsanlagen so gestaltet sein, dass mehr als nur eine Produktvariante pro Linie gefertigt werden kann. Um die Komplexität der großen Produktvarianz zu beherrschen, strebt die Automobilproduktion eine Steigerung der Wandlungsfähigkeit und Standardisierung von Produktionsanlagen an [Wemh-05]. So sollen neue Fahrzeugmodelle in standardisierten und im Idealfall in bestehende Produktionsanlagen integriert werden [Mban-08].

Um diesen scheinbar sich widersprechenden Anforderungen gerecht werden zu können, sind neue Konzepte und Strategien nicht nur in der Produktion notwendig, sondern auch im Produktentwicklungsprozess. Die übliche Arbeitsweise, ein neues Produkt bis zu einem bestimmten Reifegrad zu entwickeln und dann erst bezüglich Produktionsanforderungen abzusichern, genügt nicht, um eine standardisierte Produktion zu gewährleisten [Broc-10]. Vielmehr müssen die Anforderungen aus der Produktion zielgerichtet und frühzeitig in den Produktentwicklungsprozess eingesteuert werden [Wemh-05]. Hierfür fehlt allerdings eine geeignete methodische Unterstützung, die die beiden Unternehmensbereiche miteinander verknüpft. Daher treten immer wieder zeit- und kostenintensive Abstimmungen auf [BKWM-05].

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

Um den in Kapitel 1.1 beschriebenen Herausforderungen erfolgreich zu begegnen, bedarf es neuer Domänen übergreifender Methoden und Zusammenarbeitsmodelle. Standardisierung und Modularisierung sind bereits in der Industrie weit verbreitet. Allerdings müssen die vorhandenen Ansätze in der Produktentwicklung und Produktion besser aufeinander abgestimmt werden, sodass die Vorteile von Standardisierung und Modularisierung ganzheitlich genutzt werden können.

Der Aufwand, der bei der Erarbeitung eines Produktionsstandards anfällt, wird sich für ein Unternehmen erst rentieren, wenn die erarbeiteten Standards in verschiedenen Fabriken und über mehrere Produktgenerationen hinweg eingesetzt werden können. Die Vorteile von Standardisierung sinken, wenn beispielsweise eine nach Unternehmensstandards aufgebaute Produktionsanlage umgebaut werden muss, nur weil ein neues Produkt auf ihr gefertigt werden soll. Eine standardisierte Produktionsanlage muss somit so flexibel gestaltet sein, dass in der Anlage mehrere Produkte produziert werden können. Allerdings wird es keine Produktionsanlagen geben, die so flexibel sind, dass alle möglichen Produkte auf ihnen gefertigt werden können.

Im Mittelpunkt der Arbeit steht die Produktbeeinflussung bezüglich Produktionsanforderungen, die sich aus einer standardisierten und modularisierten Produktion ableiten lassen. Vor diesem Hintergrund lassen sich folgende Ziele ableiten:

**Ziel 1.1:** *Eine standardisierte und modularisierte Produktion hat bestimmte Anforderungen an ein Produkt. Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode, die in einer sehr frühen Phase des Produktentstehungsprozesses die Anforderungen einer standardisierten und modularisierten Produktion sammelt und das neue Produkt bezüglich diesen Anforderungen beeinflusst.*

Produktionsgerechte Produktgestaltung oder Produktbeeinflussung sind bereits weit verbreitet in der Industrie, allerdings werden diese Ansätze häufig lediglich als Richtlinien oder Gestaltungsempfehlungen gesehen. Durch die weitverbreitete sequenzielle Strukturierung von Produktentwicklung und Produktionsplanung wird üblicherweise zunächst das Produkt unter Berück-

sichtigung der Richtlinien der produktionsgerechten Produktgestaltung entwickelt und konstruiert. Die Produktionsplanung steigt in den Produktentwicklungsprozess häufig erst ein, wenn die Konstruktion des neuen Produkts einen bestimmten Reifegrad erlangt hat. Allerdings ist es häufig zu diesem Zeitpunkt bereits zu spät, um das Produkt noch beeinflussen zu können. Um das neue Produkt dennoch schnell auf den Markt zu bringen, werden unter Verletzung der zuvor erarbeiteten Produktionsstandards die Produktionsanlagen geplant und mit hohem Kostenaufwand umgebaut. Ziel der Arbeit ist es, Anforderungen von zuvor standardisierten Anlagen in die frühe Phase des Produktentwicklungsprozesses einfließen zu lassen. Bereits bei der Gestaltung des neuen Produkts sollen dem Entwickler die Möglichkeiten und Einschränkungen des erarbeiteten Produktionsstandards aufgezeigt werden. Um den Entwickler nicht in seiner Gestaltungsfreiheit einzuschränken, müssen die Einschränkungen und Möglichkeiten der standardisierten Produktion sehr einfach dargestellt werden.

***Ziel 1.2:** Die Anforderungen einer standardisierten und modularisierten Produktion müssen dem Produktentwickler sehr einfach dargestellt werden. Der Produktentwickler soll ohne die Kenntnis aller Anlagendetails in der Lage sein, das neue Produkt so zu gestalten, dass dessen Produktion nicht die zuvor definierten Standards verletzt.*

Der Konstrukteur muss im Laufe des Produktentwicklungsprozesses nicht nur die Anforderungen der Produktion berücksichtigen, sondern eine große Anzahl teilweise sich widersprechender Anforderungen berücksichtigen [EhMe-13]. Damit die Anforderungen einer standardisierten Produktion nicht übersehen werden, müssen diese sehr einfach dem Konstrukteur zur Verfügung gestellt werden. Da in der Regel der Konstrukteur kein Experte auf dem Gebiet der Produktionsplanung ist und somit auch die Produktionsstandards nicht in allen Details kennt, müssen die Anforderungen sehr einfach und anschaulich dargestellt werden. Für die Akzeptanz der neuen Methode ist eine einfache Handhabung und Rechnerunterstützung erforderlich, sodass der Konstrukteur nicht mit zusätzlichen Aufgaben belastet wird. Gleichzeitig darf die neue Methode den Konstrukteur nicht in seiner Kreativität einschränken. Dennoch sollte sie dem Konstrukteur genau aufzeigen, welche Probleme aufgrund der Produktgestalt bei der Produktion des neuen Produkts auftreten können. Dadurch soll die Akzeptanz von Produktionsanforderungen in der Produktentwicklung gestärkt werden. In Ausnahmefällen

werden sich Abweichungen vom Standard beziehungsweise Anpassungen des Standards nicht vermeiden lassen.

***Ziel 1.3:** Lässt sich ein neues Produkt nicht in einer standardisierten Produktion fertigen, so muss eine Anpassung entweder des Produkts, der Produktionsanlage oder des Produktionsstandards vorgenommen werden. Ziel dieser Arbeit ist es ein Vorgehen aufzuzeigen, wie frühzeitig entschieden werden kann, was geändert werden muss.*

Die Abweichung von Standards in der Produktentwicklung als auch der Produktionsplanung kann viele Gründe haben. So können sich beispielsweise im Laufe der Zeit die Kundenwünsche, Gesetzesvorgaben, Fertigungsverfahren oder die eingesetzten Materialien ändern und somit zum Abweichen von festgelegten Standards führen. Lässt sich eine Anforderung der standardisierten Produktion nicht umsetzen, so muss sich der Konstrukteur mit dem Produktionsplaner in Verbindung setzen und nach einer alternativen Lösung suchen. Dies kann eine Anpassung der Produktionsanlage, des Produkts oder des Produktionsstandards sein. Dadurch soll auch die Zusammenarbeit zwischen Produktionsplanung und Produktentwicklung vor allem in den frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses verbessert werden.

Im Fokus dieser Arbeit steht der automobiler Karosserierohbau. Aus diesem Grund wird die neuartige Methode im Umfeld der Automobilindustrie entwickelt, prototypisch umgesetzt und verifiziert beziehungsweise validiert. Nichtsdestotrotz soll die Methode einen allgemeinen Charakter haben, so dass sie auch in anderen Branchen Anwendung finden kann.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

Der Aufbau der Arbeit gliedert sich, wie in Bild 1.1 gezeigt, in sieben Kapitel. Im ersten Kapitel wird kurz die Motivation und Zielsetzung der Arbeit sowie ihr Aufbau vorgestellt.

Grundlage dieser Arbeit ist der Produktentstehungsprozess im automobilen Karosserierohbau. Deshalb werden im Kapitel 2 dem Leser die Grundlagen des Produktentstehungsprozesses vorgestellt. Zunächst wird eine allgemeine Übersicht des Produktentstehungsprozesses vorgestellt. Anschließend werden die Produktentwicklung, die Produktionsplanung und die Produktion

vorgestellt. Abschließend wird die Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung näher beleuchtet. Zwar liegt der Fokus dieser Arbeit auf dem Karosserierohbau der Automobilindustrie, dennoch werden die einzelnen Phasen zunächst branchenunabhängig betrachtet, um dem Leser die Besonderheiten des Karosserierohbaus aufzuzeigen. Zuletzt werden in diesem Kapitel die Herausforderungen der Automobilindustrie und deren Auswirkungen auf den Produktentstehungsprozess aufgezeigt.

Um diese Herausforderungen zu bewältigen, gibt es in der Forschung und Industrie bereits erste Ansätze. In Kapitel 3 werden diese vorgestellt und analysiert. Dabei wird besonders auf die Modularisierung und Standardisierung von Produkten und Produktionsanlagen eingegangen. Des Weiteren werden die Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik sowie die produktionsgetriebene Produktgestaltung vorgestellt. Zuletzt werden die vorgestellten Ansätze hinsichtlich der aufgestellten Anforderungen einer kritischen Diskussion unterzogen und deren Vorteile und Defizite dargestellt. Auf dieser Grundlage wird der Forschungsbedarf für diese Arbeit abgeleitet.

Im Rahmen von Kapitel 4 wird eine neue Methode erarbeitet, die die aufgezeigten Lücken der vorgestellten Ansätze schließt. Hierfür werden zunächst die Anforderungen einer modularisierten und standardisierten Produktion an die Produktentwicklung zusammengetragen. Anschließend wird die erarbeitete Methode vorgestellt und erläutert. Damit die Methode auch im industriellen Umfeld eingesetzt werden kann, wird im nächsten Schritt gezeigt, wie sich die Methode in die bestehenden Produktentwicklungsprozesse der Automobilindustrie eingliedern lässt und was bei deren Implementierung beachtet werden muss.

In Kapitel 5 wird gezeigt, wie sich die erarbeitete Methode in die bestehende Systemlandschaft prototypisch implementieren lässt.

Kapitel 6 beinhaltet die Verifizierung und Validierung der erarbeiteten Methode. Zunächst werden die Konzepte und die beiden Anwendungsszenarien für die Verifizierung und Validierung vorgestellt. Anschließend wird der erarbeitete Berechnungsalgorithmus verifiziert und die erarbeitete Methode validiert.

Kapitel 7 fasst die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschungsaktivitäten.

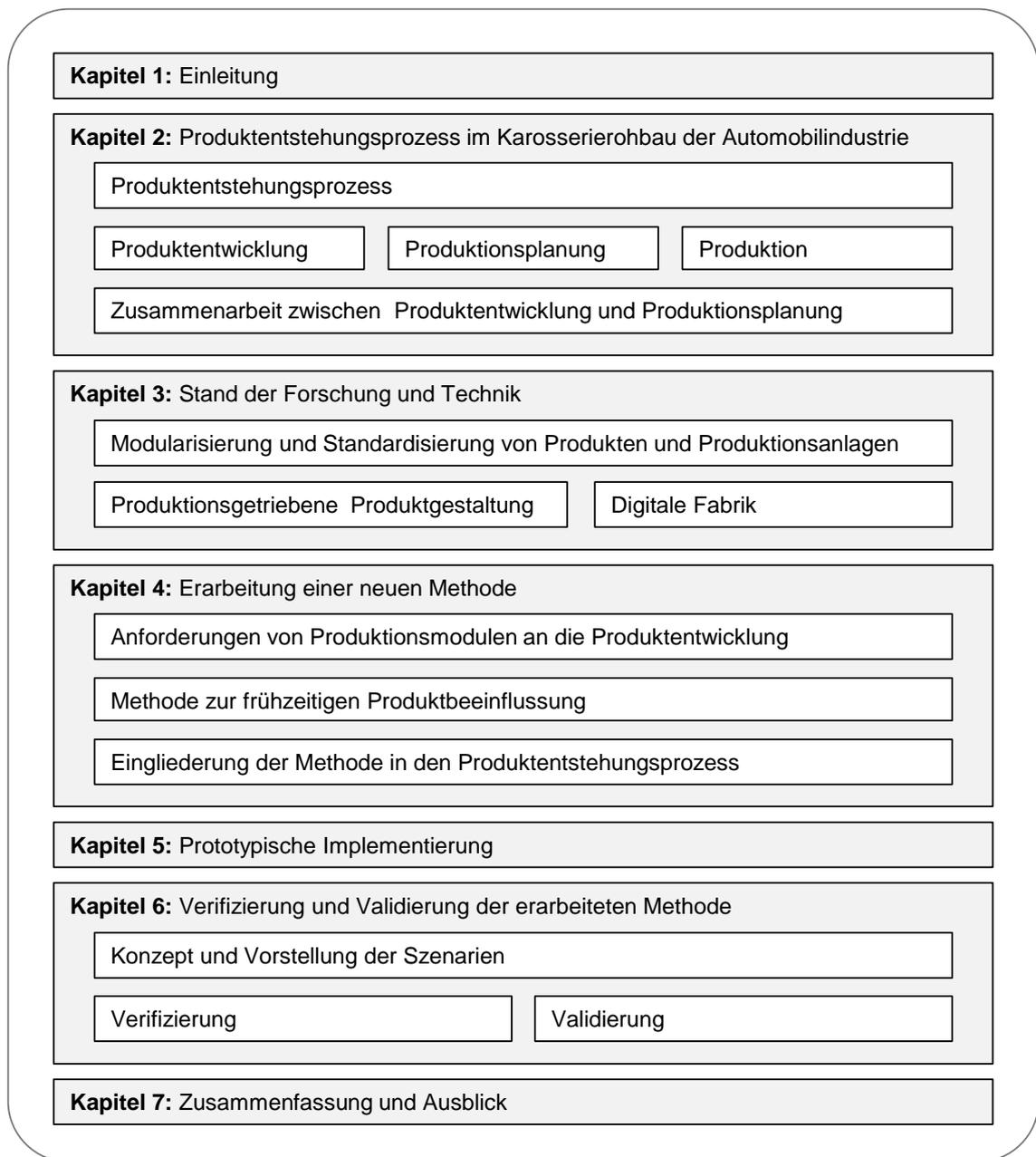


Bild 1.1: Gliederung der Arbeit



## **2 Produktentstehungsprozess im Karosserierohbau der Automobilindustrie**

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen des Produktentstehungsprozesses beschrieben, die für das Verständnis dieser Arbeit unerlässlich sind. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem Karosserierohbau, da dieser im Fokus der Arbeit liegt. Zunächst wird die Definition und inhaltliche Abgrenzung der Begriffe Produktentstehungsprozess, Produktentwicklung und Produktionsplanung formuliert. Anschließend werden die Besonderheiten der Produktentwicklung, der Produktionsplanung und der Produktion von Automobilkarosserien näher erläutert.

### **2.1 Begriffsverständnis Produktentstehung**

Um den Produktentstehungsprozess verstehen zu können, wird zunächst der gesamte Produktlebenszyklus betrachtet. Anschließend wird auf die Besonderheiten der Produktentwicklung und der Produktionsplanung eingegangen, da sich die Arbeit mit diesen Disziplinen intensiv auseinandersetzt.

#### **2.1.1 Produktlebenszyklus**

In Bild 2.1 sind die einzelnen Phasen des Produktlebenszyklus vereinfacht dargestellt. Der Produktentstehungsprozess beginnt mit der Produktplanung, die sich mit der Sammlung der Marktanforderungen und der Formulierung der Aufgabenstellung beschäftigt. Die Ergebnisse dieser Phase sind die Eingangsgrößen für die darauffolgende Phase der Produktentwicklung. Ziel der Produktentwicklung ist ein ausdetailliertes Produkt, das allen zuvor definierten Anforderungen entspricht. Die vollständige Beschreibung des Produkts und dessen Einzelteilen dient dem nachfolgenden Prozessschritt, der Produktions- beziehungsweise der Herstellungsplanung, als Grundlage. Ziel dieses Prozessschritts ist die Definition der für die Produktion notwendigen Herstellungsprozesse und der benötigten Produktionssysteme. Im nächsten Schritt wird das Produkt hergestellt. Die ersten vier Schritte des Produktentstehungsprozesses werden Produktentstehungsprozess genannt.

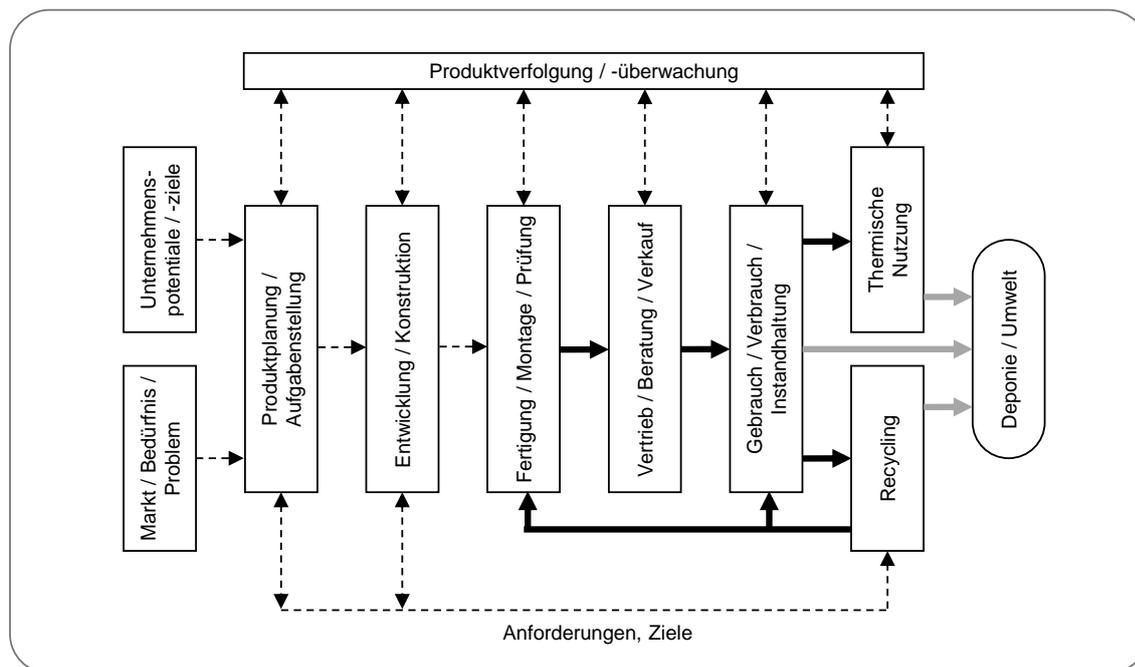


Bild 2.1: Produktlebenszyklus in Anlehnung an [Naef-12] und [VDI-2221]

Nachdem das Produkt hergestellt wurde, folgt üblicherweise sein Vertrieb. Es gibt allerdings auch Ausnahmen. Bei speziell für einen bestimmten Kunden entwickelten und hergestellten Produkten, wie beispielsweise Produkten aus dem Sondermaschinenbau, beginnen die Vertriebsaktivitäten üblicherweise schon deutlich vor der Produktplanung. Ist das Produkt an den Kunden übergeben, so beginnt die Phase der Nutzung. Während der Nutzungsphase können Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten aber auch Reparatur- und Modernisierungsarbeiten durchgeführt werden. Wird ein Produkt nicht mehr gebraucht, so wird der Produktlebenszyklus durch die Phase des Recyclings und der Entsorgung beendet [Meiß-10].

## 2.1.2 Produktentwicklung

Damit ein Unternehmen ein neues Produkt erfolgreich auf den Markt bringen kann, muss seine Entstehung systematisch und in klaren Geschäftsprozessen ausgeführt werden [West-06]. Ziel dabei ist es, den Produktentstehungsprozess von der Produktidee bis hin zu seiner Herstellung zu beschreiben. In der Literatur werden verschiedene Ansätze zur Gliederung eines Produktentwicklungsprozesses diskutiert. Bild 2.2 zeigt eine Auswahl von Produktent-

wicklungsprozessen. PAHL/BEITZ et al. gehen ausschließlich auf die Produktentwicklung ein [PBF-07], während SPUR/KRAUSSE und GAUSEMEIER auch die Phase der Produktidee und der Produktherstellung einschließen [SpKr-97] [Gaus-00].

|             | Produktidee                 | Produktentwicklung  |                          |                    |                     | Produkt-herstellung |
|-------------|-----------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| Pahl/Beiz   |                             | Klären der Aufgabe  | Konzipieren              | Entwerfen          | Ausarbeiten         |                     |
| Spur/Krause | Produktforschung            | Produktplanung      | Produkt-konstruktion     | Produkt-erprobung  | Produkt-herstellung |                     |
| Gausemeier  | Strategische Produktplanung | Produktkonzipierung | Entwurf und Ausarbeitung | Prozessentwicklung |                     |                     |

Bild 2.2: Unterschiedliche Produktentwicklungsprozesse in Anlehnung an [Broc-10] und [Gess-01]

Ein weitverbreitetes und branchenunabhängiges Vorgehensmodell in der Produktentwicklung ist die VDI 2221 Richtlinie. Laut ihr gliedert sich der Produktentwicklungsprozess, wie in Bild 2.3 dargestellt, in vier Phasen mit insgesamt sieben Arbeitsabschnitten [VDI-2221].

Beim Durchlaufen der einzelnen Phasen (Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten) gelangt der Konstrukteur von der Anforderungsliste zur konkreten Produktdokumentation. In der Praxis ist ein iterativer Prozess zwischen den einzelnen Arbeitsabschnitten notwendig. In der Planungsphase soll die Aufgabenstellung möglichst umfassend und vollständig geklärt werden. Als Hilfe hierfür und als Grundlage für später zu treffende Entscheidungen dient die Anforderungsliste. Der erste Schritt der Konzeptphase ist das Abstrahieren der Aufgabenstellung und das lösungsneutrale Formulieren der Funktionsstruktur. Nachdem Wirkprinzipien, die die einzelnen Teilfunktionen erfüllen, gefunden wurden, werden prinzipielle Lösungsvarianten konkretisiert. Da in der Konzeptphase die prinzipielle Lösung im Wesentlichen bereits erarbeitet wurde, steht in der Entwurfsphase die konkrete Gestaltung dieser prinzipiellen Lösung im Vordergrund. Eine solche Gestaltung erfordert spätestens zu diesem Zeitpunkt die Wahl von Werkstoff und Fertigungsverfahren, die Festlegung der Hauptabmessungen und die Untersuchung der

räumlichen Verträglichkeit. Schwerpunkt der Ausarbeitungsphase ist das Erarbeiten der Produktdokumentation und der Fertigungsunterlagen. Hierzu gehören die Einzelteil- oder Werkstattzeichnungen, die Gesamtzeichnung sowie die dazugehörigen Stücklisten [VDI-2221].

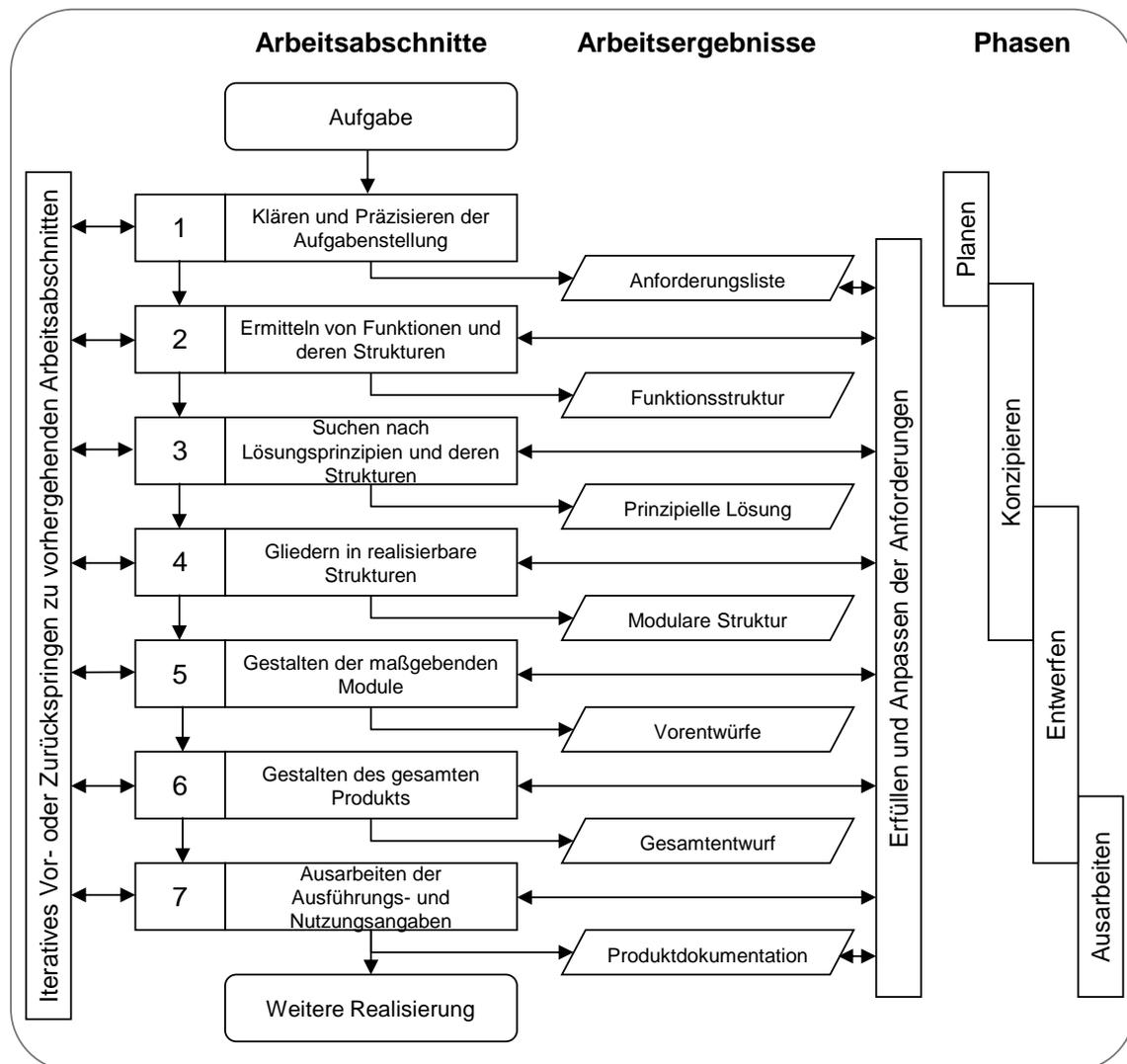


Bild 2.3: Vorgehensmodell des Konstruktionsprozesses nach [VDI-2221]

Der Produktentwicklungsprozess ist in der Regel kein geradliniger Prozess. Während des gesamten Produktentwicklungsprozesses kann es immer wieder zum iterativen Vor- und Zurückspringen zwischen den einzelnen Arbeitsschritten kommen (vgl. Bild 2.3). Nicht nur Anforderungen von Kunden, sondern auch vom Vertrieb, Logistik oder der Fertigung müssen bei der Produktentwicklung berücksichtigt werden. Hierfür muss das Produktdesign hinsichtlich dieser Anforderungen überprüft, beziehungsweise abgesichert

werden. Eine Absicherung ist eine Kontrolle des aktuellen Entwicklungs- und Planungsstandes während des Produktentwicklungsprozesses und unterteilt sich in drei Teilprozesse [Meiß-10]:

- **Analyse des Entwicklungs- und Planungsstandes:** Die Analyse dient der Informationsgewinnung durch Zerlegen, Aufgliedern und Untersuchen von Eigenschaften einzelner Elemente und deren Abhängigkeiten [PBF-07]. Bei der Analyse werden häufig digitale Untersuchungen durchgeführt, wie beispielsweise Simulationen. Bei komplexen Sachverhalten sind aber auch Untersuchungen mit Hardwareprototypen an realen Prüfständen unerlässlich.
- **Auswertung der Analyseergebnisse:** Die Auswertung der Analyseergebnisse beinhaltet die Schritte Datenaufbereitung, Ergebnisinterpretation und Bewertung. Bei der Datenaufbereitung werden die Ergebnisse der Untersuchungen durchs Selektieren, Sortieren, Formatieren und grafischer Aufbereitung in eine interpretationsgerechte Form gebracht. Für die Ergebnisinterpretation existiert keine allgemeine Methodik. Grundsätzlich wird bei der Ergebnisinterpretation versucht, die aufbereiteten Daten mit den Einflussgrößen zu verknüpfen, sodass die genaue Ursache für das Ergebnis ersichtlich wird. Im letzten Schritt werden die ermittelten Ergebnisse hinsichtlich der Eignung, Angemessenheit und Wirksamkeit bewertet.
- **Entscheidung über das weitere Vorgehen:** Sind die Ergebnisse ausgewertet worden, so muss im nächsten Schritt eine Entscheidung getroffen werden. Entsprechen die Soll-Vorstellungen den Analyseergebnissen, so kann mit dem nächsten Schritt im Produktentwicklungsprozess fortgefahren werden. Widersprechen die Analyseergebnisse dagegen den Soll-Vorstellungen und damit den Produktanforderungen, so müssen Maßnahmen eingeleitet werden. Dies kann beispielsweise ein Produktänderungsprozess sein.

In Bild 2.4 auf der linken Seite ist der allgemeine Absicherungsprozess dargestellt. Auf der rechten Seite hingegen ist der Produktänderungsprozess zu sehen [Klee-98]. Entspricht das Ergebnis einer Absicherung nicht den Anforderungen an das Produkt, dies kann beispielsweise seine Fertigbarkeit sein, so muss das Produkt geändert werden. Nach [Klee-98] setzt sich der Änderungsprozess aus folgenden Schritten zusammen:

- Wie auch bei der VDI-Richtlinie 2221 beginnt der Prozess mit der Klärung der Aufgabenstellung. Dabei werden die Gründe und Ursachen für die fehlgeschlagene Absicherung gesucht, sodass eine erneute Absicherung die Anforderungen bestätigt.
- Im nächsten Schritt werden mögliche Lösungen für das Problem gesucht und die zu ändernden Umfänge definiert.
- Wurden mehrere Lösungen für das Problem gefunden, so müssen diese bezüglich technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Kriterien bewertet und anschließend priorisiert werden, sodass eine Lösung ausgewählt werden kann.
- Im letzten Schritt muss die ausgewählte Lösung umgesetzt und realisiert werden.

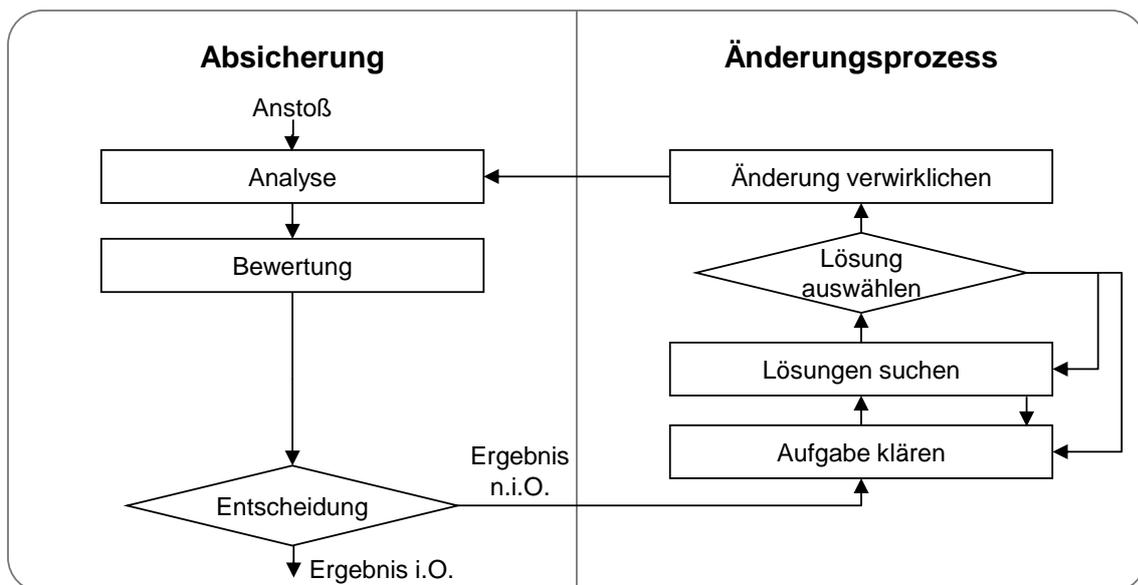


Bild 2.4: Absicherung und Änderungsprozess nach [Meiß-10]

In Bild 2.4 ist das Zusammenspiel zwischen Absicherung und dem Änderungsprozess dargestellt. Entspricht das Ergebnis der Absicherung nicht den gewünschten Anforderungen, so wird der Änderungsprozess angestoßen. Nachdem das Produkt geändert wurde, muss erneut der Absicherungsprozess durchgeführt werden. Ist das Ergebnis zufriedenstellend, so kann mit dem nächsten Schritt im Produktentwicklungsprozess begonnen werden. Entsprechen die Ergebnisse erneut nicht den zuvor definierten Anforderungen, so

muss der Änderungsprozess noch einmal angestoßen werden. Dieses reaktive Vorgehen wird so oft wiederholt, bis die Ergebnisse der Absicherung den Anforderungen entsprechen. Dabei können die einzelnen Produkthanforderungen sich gegenseitig widersprechen. Beispielsweise kann die Erhöhung der Steifigkeit auch eine Erhöhung des Produktgewichts zur Folge haben. Soll ein Produkt eine bestimmte Steifigkeits- und Gewichtsgrenze einhalten, so muss nach jedem Änderungsprozess nicht nur die Steifigkeit, sondern auch das Gewicht des Produkts abgesichert werden. Gerade bei komplexen, voneinander abhängigen Anforderungen kann es zu sehr viel Änderungs- und Absicherungsschleifen kommen. Die einzelnen Produkthanforderungen werden üblicherweise aus vielerlei Sicht immer wieder abgesichert. Diese kontinuierliche Produktabsicherung beinhaltet insbesondere die ständig mitlaufende sowie die zu einem bestimmten Zeitpunkt durchgeführte Produktabsicherung [Broc-10].

### **2.1.3 Produktionsplanung**

Die Produktionsplanung, auch Fabrikplanung genannt, ist ein Grenzgebiet zwischen Betriebswirtschaftslehre, Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen und beschäftigt sich mit der operativen, zeitlichen, mengenmäßigen und räumlichen Planung aller Vorgänge, die bei der Produktion von Waren und Gütern notwendig ist [Pawe-14][ScWi-04]. Produktionsplanung ist der systematisch, zielorientierte, in aufeinander aufbauenden Phasen strukturierte und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführte Prozess zur Planung einer Fabrik von der ersten Idee bis zum Aufbau und Hochlauf der Produktion [Grun-15]. Die Planung umfasst alle einmalig zu treffenden Maßnahmen bezüglich der Gestaltung eines Fertigungssystems und der darin stattfindenden Fertigungsprozesse [Dang-01].

In der Produktionsplanung gibt es unterschiedliche Ausgangssituationen, die auch als Planungsfälle bezeichnet werden können. Existiert noch keine Fabrik, so muss eine neue Fabrik inklusive aller Produktionsmittel, Standorten, Strukturen und Personal geplant werden. Je nach Unternehmensstrategie können bereits existierende Fabriken erweitert, erneuert, reduziert, verlagert oder ausgegliedert werden. Die dafür notwendigen planerischen Tätigkeiten sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst [Baum-10].

| Fabrikplanungsfall | Produktionsprogramm |       | Produktionspotenziale |                   |                 |          |          |             |              |
|--------------------|---------------------|-------|-----------------------|-------------------|-----------------|----------|----------|-------------|--------------|
|                    | Produkte            | Menge | Standort              | Produktionsmittel | Flächen Gebäude | Struktur | Personal | Technologie | Organisation |
| Neuplanung         | ●                   | ●     | ●                     | ●                 | ●               | ●        | ●        | ●           | ●            |
| Erweiterung        | ◐                   | ●     | ○                     | ●                 | ◐               | ●        | ●        | ◐           | ●            |
| Strukturerneuerung | ○                   | ○     | ○                     | ○                 | ◐               | ●        | ○        | ◐           | ●            |
| Reduzierung        | ◐                   | ●     | ○                     | ●                 | ●               | ●        | ●        | ◐           | ●            |
| Verlagerung        | ○                   | ○     | ●                     | ◐                 | ●               | ●        | ◐        | ○           | ●            |
| Ausgliederung      | ○                   | ○     | ◐                     | ◐                 | ◐               | ●        | ◐        | ○           | ●            |

● Bestimmungsgröße neu oder verändert  
 ◐ Bestimmungsgröße nicht zwangsläufig neu oder verändert  
 ○ Bestimmungsgröße nicht neu oder verändert

Tabelle 2.1: Planungsfälle nach [VDI-4499][Bran-96]

Wie in Tabelle 2.1 dargestellt, können abhängig vom Planungsfall Veränderungen beziehungsweise Erneuerungen von Standort, Produktionsmitteln, Flächen, Produktionsstrukturen, Personal, Technologie oder Organisation auftreten.

## 2.2 Produktentwicklung in der Automobilindustrie

In großen Unternehmen, wie beispielsweise Automobilhersteller, werden die im Produktentstehungsprozess anstehenden Aufgaben von Tausenden von Menschen bewältigt. Um die geistige und körperliche Arbeit der Mitarbeiter so zu organisieren, dass zu einem gewünschten Zeitpunkt ein qualitativ hochwertiges und kostengünstiges Produkt erstellt wird, ist eine Strukturierung der betrieblichen Arbeit unumgänglich [Ehrl-07]. Um ihre Fahrzeugprojekte zu steuern, haben die Automobilhersteller ihre eigenen Modelle und Prozess für die Produktentwicklung entwickelt [Webe-09]. In diesem Kapitel wird ein verallgemeinerter, Hersteller unabhängiger, Produktentwicklungsprozess in der Automobilindustrie vorgestellt.

### 2.2.1 Prozessübersicht

Ein allgemein formulierter Vorgehensplan für die Konstruktion und Entwicklung von Produkten ist in der VDI 2221 zu finden. In der Praxis wird dieser Vorgehensplan allerdings selten konsequent eingesetzt [Ehrl-07]. Die Automobilindustrie, wie auch andere Branchen, hat den Vorgehensplan nach VDI 2221 an ihre Besonderheiten und Bedürfnisse angepasst.

In Bild 2.5 ist ein Beispiel für den Produktentstehungszyklus in der Automobilindustrie dargestellt. Kennzeichnend für diesen Produktentstehungszyklus sind einzelne Phasen, die jeweils mit einem Quality Gate, je nach Hersteller auch Kontrollpunkt oder Meilenstein genannt, abgeschlossen werden. In Bild 2.5 sind diese Quality Gates mit Rauten gekennzeichnet.

***Definition 2.1:** Ein Quality Gate ist ein im Produktentstehungsprozess vereinbarter Kontrollpunkt, an dem die zuvor definierten Kriterien, Ziele und Standards durch die Verantwortlichen aller beteiligten Bereiche, den sogenannten Gate Keepern, bewertet werden [Zürn-10]. Am jeweiligen Quality Gate ist festgelegt, wer, wann, welche Leistungen zum Fahrzeugprojekt einbringt.*

Die wichtigsten Aufgaben eines Quality Gates sind:

- Ein Quality Gate macht Produkt- und Prozessreifegrad im Projekt messbar und transparent [Pref-14].
- Durch Quality Gates werden kritische Sachverhalte identifiziert.
- Quality Gates legen abgesicherte Projektstände fest, die als Basis für weitere Arbeiten herangezogen werden.
- Über Ressort- und Bereichsgrenzen hinweg sorgen die Quality Gates für einen Gleichschritt aller am Produktentwicklungsprozess beteiligten Bereiche [Zürn-10].
- Am Quality Gate werden verbindliche Entscheidungen getroffen und weitere Vorgehensschritte im Projekt festgelegt.

Die Beschreibung und der Inhalt der einzelnen Prozesse und der jeweiligen Quality Gates sind von den Unternehmen standardisiert beschrieben. Damit die Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Bereichen reibungslos vonstattengeht, sind diese Beschreibungen für alle Unternehmensbereiche verbind-

lich. In Bild 2.5 wird der gesamte Produktentstehungsprozess eines Automobilherstellers als qualitativer Verlauf gezeigt. Allerdings wurde bei dieser Darstellung auf exakte zeitliche Angaben aus Gründen der Vertraulichkeit verzichtet.

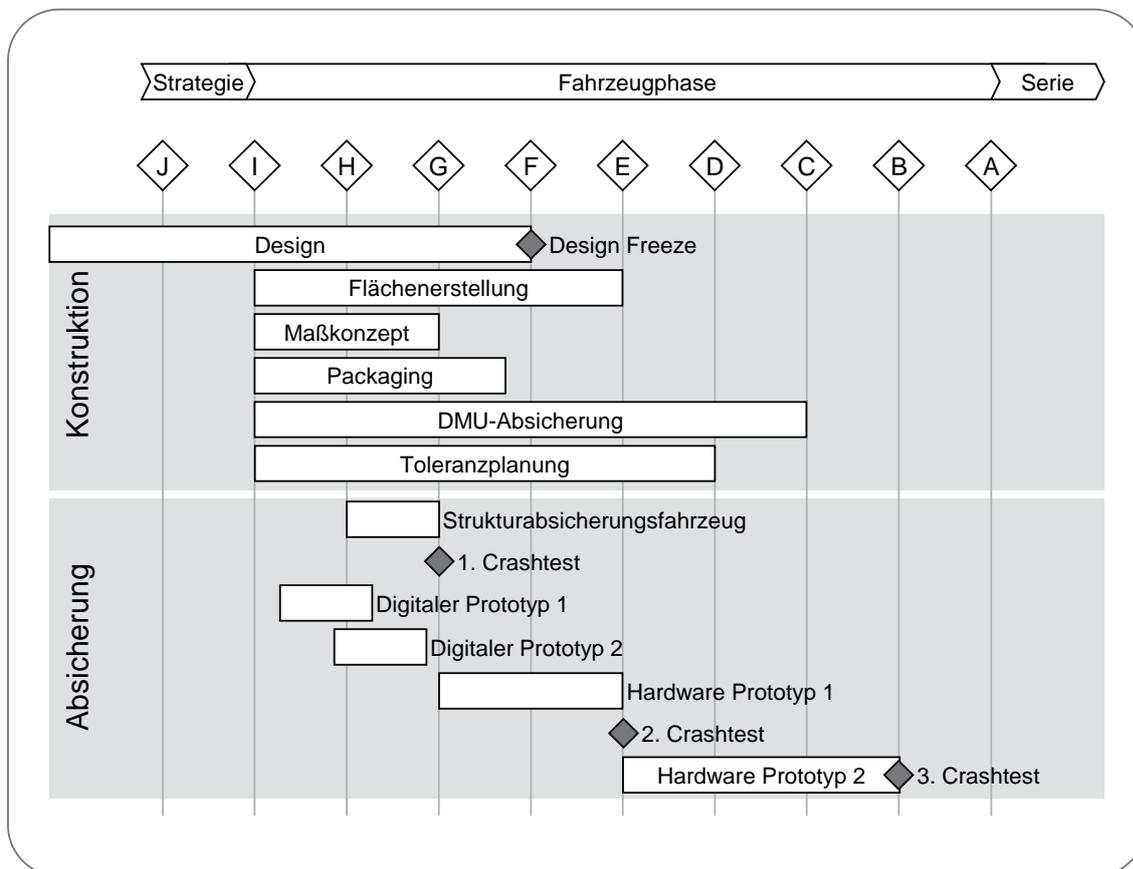


Bild 2.5: Produktentwicklungsprozess in der Automobilindustrie in Anlehnung an [Burr-08]

Die Produktentwicklung in der Automobilindustrie ist in verschiedene Phasen gegliedert. In der Strategiephase werden zunächst die Unternehmensziele festgelegt und daraus die ersten Anforderungen an die neue Baureihe abgeleitet. In der anschließenden Phase wird das Fahrzeug entwickelt und dessen Produktion geplant. Mit dem sogenannten Job#1 beginnen die Produktion und die Serienbetreuung des neuen Fahrzeugs [Baum-10]. Im Folgenden werden die einzelnen Fahrzeugphasen aus Sicht der Konstruktion und der Produktabsicherung näher beleuchtet.

### **2.2.2 Strategiephase**

Die erste Phase des Produktentwicklungsprozesses beschäftigt sich mit der Festlegung der Produktstrategie. Es muss ein Produkt gefunden werden, welches zu der Unternehmensstrategie passt und am Markt platziert werden kann. Die neue Produktidee wird hinsichtlich seiner technologischen und wirtschaftlichen Machbarkeit bewertet. Zum ersten Meilenstein (Quality Gate J) wird zunächst ein Konzeptheft angelegt, in dem die Zielvorgaben für alle an der Produktentstehung beteiligten Bereiche festgelegt werden. Dabei müssen die einzelnen Teilziele auf mögliche Widersprüche untersucht werden [Burr-08]. Ebenfalls in der Strategiephase wird das sogenannte Maßkonzept festgelegt, welches die wichtigsten Außen- und Innenmaße des Fahrzeugs beschreibt und somit auch einen großen Einfluss auf die Karosserie hat.

### **2.2.3 Serienentwicklung**

Da die äußere Erscheinung eines Fahrzeugs die Wahrnehmung und das Image eines Produkts nachhaltig prägt und somit eine wichtige Rolle bei der Kaufentscheidung der Kunden spielt, dominiert das Design die frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses. Bei der Umsetzung der von der Unternehmensführung vorgegebenen Produktstrategie generieren die Designer eine Vielzahl an Skizzen und Zeichnungen. Nach Verdichtung der generierten Ideen werden erste physikalische Modelle zunächst verkleinert und später im Maßstab 1:1 aus Ton hergestellt [Broc-10]. In der Regel entscheidet die Unternehmensleitung, welche der erarbeiteten Vorschläge weiter ausgearbeitet werden und somit später gebaut werden. Zwar haben Designer bei der Gestaltung des Produkts sehr viele Freiheiten, dennoch muss darauf geachtet werden, dass das Maßkonzept eingehalten wird.

Da das äußere Erscheinungsbild des Fahrzeugs durch die Designer sehr früh im Produktentwicklungsprozess festgelegt ist, erfolgt die Detaillierung des Fahrzeugs innerhalb der Konstruktion quasi von außen nach innen [Burr-08]. Sobald die ersten Tonmodelle aufgebaut wurden, werden von diesen Strakflächen, die als Grundlage für die Karosserieentwicklung dienen, abgeleitet. Die Konstruktion der einzelnen Karosseriekomponenten erfolgt in unterschiedlichen Teams, die jeweils bestimmte Karosseriebereiche entwickeln.

Gerade zu Beginn des Produktentwicklungsprozesses orientieren sich die Konstrukteure an Vorgängerbaureihen oder unternehmensspezifischen Standards, die den Aufbau der Karosserie vorgeben [Broc-10]. Produktstrukturen und Geometrieelemente werden einfach übernommen. Mit der Zeit werden die einzelnen Bauteile an die für das neue Fahrzeugprojekt geltenden Design- und Maßvorgaben angepasst [Güli-08]. Da allerdings das Produktdesign bis zum Meilenstein F, dem sogenannten „Design Freeze“, noch angepasst werden kann, muss nach jeder Designänderung auch die Geometrie der einzelnen Karosseriebauteile angepasst werden.

Konstruktionsbegleitend erfolgt die Definition der Bauteilverbindungen. Im klassischen Karosserierohbau stellen die größte Gruppe die Widerstandsschweißpunktverbindungen dar. In den letzten Jahren kommen allerdings auch die Verbindungsprozesse Kleben, Laserschweißen oder Clinchen verstärkt zum Einsatz. Grundlage für die Definition von Bauteilverbindungen ist die Produktgesamtstruktur, die sich größtenteils aus einer fahrzeugübergreifend standardisierten Grundstruktur ableitet. Diese Rohstruktur wird nun sukzessive durch die Einzelteilgeometrien befüllt. Anschließend wird die Sammlung der Einzelteile um Zusammenbauinformationen, wie beispielsweise Schweißpunkte oder Toleranzinformationen, ergänzt [Viel-05].

Parallel zu der Konstruktion der einzelnen Bauteilkomponenten verläuft der Toleranzvergabeprozess. Da enge und gleichmäßige Spaltmaße bei den Übergängen zwischen Karosserieteilen wichtig für Qualitätswahrnehmung beim Kunden sind, wird ein Spalt- und Fugenplan für jedes Fahrzeugprojekt definiert [Burr-08].

Der Produktentstehungsprozess, wie er im Bild 2.5 dargestellt ist, beschreibt den Entstehungsprozess eines Fahrzeugs von der frühen Phase bis hin zum Serienanlauf. Allerdings geht dieser Prozess nicht linear vonstatten, sondern beinhaltet über die gesamte Entwicklungszeit viele Änderungsschleifen [Viel-05]. Da eine Produktänderung oftmals viele Bereiche betrifft, werden alle Änderungen mithilfe eines Produktänderungssystems dokumentiert und verwaltet. Die Änderung der Bauteilgeometrie hat unter anderem Einfluss auf die Definition von Verbindungselementen. Da diese in der Regel nicht mit der Bauteilgeometrie assoziativ verknüpft sind, müssen die Positionen der Verbindungselemente manuell angepasst werden. Natürlich hat eine Ver-

änderung der Bauteilgeometrie unter Umständen auch Einfluss auf die Produktionsanlage, die das Produkt später fertigen soll. So kann beispielsweise die Änderung der Bauteilgeometrie oder der Position von Verbindungselementen die Zugänglichkeit der Betriebsmittel beeinträchtigen [Wils-96]. Diese kann zum teuren Einsatz von Spezialwerkzeugen in der Produktion führen. Werden Änderungen nicht konsequent erfasst und mit allen relevanten Bereichen abgestimmt, so können Änderungen nicht nur aufwendig und teuer, sondern auch Quelle von Fehlern sein.

Wie bereits erwähnt, werden zu bestimmten Meilensteinen die festgelegten Ziele abgesichert. Grundlage für eine solche Absicherung ist der Datenstand zu dem entsprechenden Meilenstein. Eine wichtige Rolle spielen dabei die sogenannten Digitalen Prototypen. Da sehr früh im Produktentwicklungsprozess auf den Aufbau von Hardware Prototypen verzichtet wird, werden die notwendigen Absicherungen und Auslegungen digital durchgeführt. In den letzten beiden Jahrzehnten hat der Einsatz von digitalen Absicherungs- und Auslegungstools den Produktentstehungsprozess dramatisch verbessert [Webe-09], [TePF-08]. Nicht nur bei der Konstruktion der Bauteile mithilfe von CAD-Systemen, sondern auch bei der Berechnung, der Auslegung und Absicherung wird die Produktentwicklung unterstützt. Die Verwendung von virtuellen Methoden in der Fahrzeugentwicklung ist aber nicht in jedem Einsatzfeld sinnvoll. Einige Grenzen der heute eingesetzten virtuellen Methoden werden im Folgenden aufgelistet [BiBK-08]:

- **Unzureichende Simulationsmethoden:** Das zu untersuchende Problem ist modelltechnisch nicht beschreibbar und somit nicht digital abbildbar.
- **Unterbrochene Prozesskette:** Simulationsergebnisse, die in einem System ermittelt wurden, können oftmals nicht in weiterführenden Simulationen verwendet werden.
- **Unbekannte Phänomene:** Ist die Wirkungsweise von physikalischen Problemen nicht klar, so können die entsprechenden Modelle nicht aufgebaut und validiert werden.
- **Nicht wettbewerbsfähiger Simulationsaufwand:** Übersteigt der Aufwand für Modellierung, Simulation und Bewertung eines zu un-

tersuchenden Problems den Aufwand für eine konventionelle Untersuchung mit Hardwarekomponenten, so ist eine digitale Untersuchung nicht mehr wirtschaftlich.

- **Unzureichende Datenqualität:** Gerade in den frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses stehen oftmals nicht alle für die Simulation notwendigen Daten zur Verfügung.

Neben den genannten Grenzen von virtuellen Absicherungen gibt es noch einen Grund, wieso Hardware Prototypen bei der Entwicklung von Fahrzeugen unentbehrlich sind: Gesetzliche Vorgaben aus den Absatzmärkten schreiben bestimmte Testverfahren während der Fahrzeugentwicklung vor. Ein Beispiel hierfür sind Crashtests.

Bei der Entwicklung von komplett neuen Fahrzeugen werden typischerweise zwei Gruppen von Prototypen aufgebaut. Die frühe Gruppe dient zur Erprobung der entwickelten Konzepte und der Ableitung von notwendigen Konstruktionsänderungen. Die spätere Prototypengruppe dient der Bestätigung von den vorgenommenen Anpassungen und Entwicklungen [Webe-09]. Bis zum Meilenstein E wird der Prototyp 1, auch Erprobungsfahrzeug genannt, entwickelt. Mithilfe des Erprobungsfahrzeuges werden die entwickelten Komponenten untereinander getestet (z. B. das Zusammenspiel zwischen Karosserie und Fahrwerk). Der Prototyp 2, auch Bestätigungsfahrzeug genannt, wird bis zum Meilenstein B entwickelt und ist das erste unter Serienbedingungen gefertigte Fahrzeug. Diese Prototypen sollen die im Lastenheft festgelegten Ziele und Funktionalitäten bestätigen. Gleichzeitig werden diese Prototypen auch für Langzeiterprobungen und letzte Crashtests herangezogen [Burr-08]. Neben diesen beiden Prototypengruppen gibt es noch die sogenannten Strukturabsicherungsfahrzeuge (vgl. Bild 2.5). Mithilfe dieser Prototypen soll zusätzlich die Festigkeit der zuvor ausgelegten Karosserie bestätigt werden. Aus Kostengründen wird allerdings versucht diese Prototypen durch digitale Prototypen zu ersetzen [Burr-08]. Der Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess, wann die Prototypen gebaut werden sollen, ist sehr sorgfältig auszuwählen. Je später die Prototypen gebaut werden, desto mehr neu entwickelte Komponenten können untersucht werden. Allerdings kann die Lösung von Problemen, die erst spät im Produktentwicklungspro-

zess aufgedeckt werden, sehr kostspielig sein. Werden die Prototypen wiederum sehr früh im Produktentwicklungsprozess aufgebaut, so können Änderungen jeglicher Art einfacher umgesetzt werden [Webe-09].

### **2.2.4 Serienbetreuung**

Sobald die Serienproduktion stabil angelaufen ist, das heißt die Produktion läuft bei geplanter Kapazität fehlerfrei, endet formal die Serienentwicklungsphase eines Fahrzeugs. Das Projektteam wird aufgelöst und die Verantwortung wird an ein kleineres Team übergeben, das sich mit der Weiterentwicklung des Fahrzeugs, auch nach dessen Produktions- und Verkaufsstart, beschäftigt [Webe-09]. Dabei wird versucht das Fahrzeug bezüglich Qualität und Kosteneffizienz zu verbessern. Oftmals werden neue Trends erst im Laufe des Produktionszyklus erkannt und müssen aufgrund des Marktdrucks möglichst schnell in ein bereits produziertes Fahrzeug integriert werden. Ein Beispiel dafür kann die große Verbreitung von Smartphones in den letzten Jahren sein. Die einzelnen Automobilhersteller sahen sich gezwungen nicht nur für neue Fahrzeugbaureihen, sondern auch für bereits produzierte Fahrzeuge entsprechende Schnittstellen anzubieten. Hierfür müssen sowohl das Produkt als auch dessen Produktion angepasst werden.

Im Laufe des Produktionszyklus eines Fahrzeugs lässt die Nachfrage nach dem Fahrzeugtyp bei den Kunden nach. Deshalb ist es Aufgabe der Entwicklungsteams eine Modelpflege, auch Facelift genannt, vorzubereiten. Ziel dabei ist das Fahrzeug nach einer Zeit durch kleine Veränderungen wieder attraktiver und innovativer beim Kunden erscheinen zu lassen und so wieder den Absatz des Fahrzeugs zu steigern [Webe-09].

## **2.3 Produktionsplanung in der Automobilindustrie**

Nachdem in Kapitel 2.1.3 die Produktionsplanung branchenunabhängig vorgestellt wurde, werden in diesem Kapitel die Besonderheiten der Produktionsplanung in der Automobilindustrie näher beleuchtet.

### 2.3.1 Prozessübersicht

In Bild 2.6 ist ein beispielhafter Produktionsplanungsprozess aus der Automobilindustrie schematisch abgebildet. Auch in dieser Abbildung wurde, aus Vertraulichkeitsgründen, darauf verzichtet eine exakte zeitliche Einordnung der einzelnen Phasen und Meilensteine darzustellen.

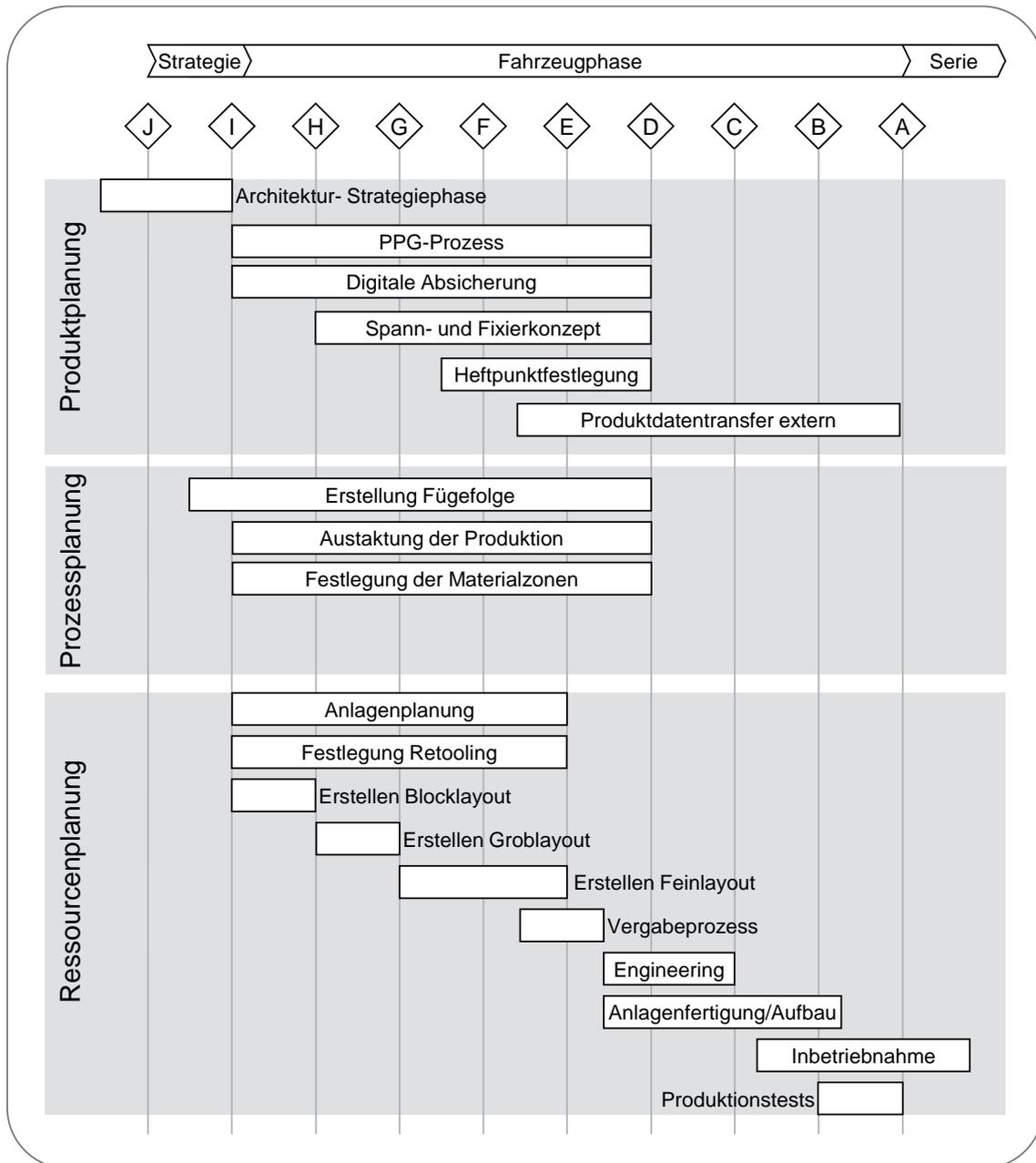


Bild 2.6: Übersicht Produktionsplanung in der Automobilindustrie

Wie der Produktentwicklungsprozess ist auch der Produktionsplanungsprozess durch Meilensteile strukturiert. Zu den jeweiligen Meilensteinen sind fest definierte Aktivitäten und Standarddokumente zugeordnet. Da diese auch mit der Produktentwicklung abgestimmt sind, dienen die Meilensteine zur Synchronisation der Tätigkeiten von Produktentwicklung und Produktionsplanung. Der in Bild 2.6 dargestellte Produktionsplanungsprozess wird parallel zum Produktentstehungsprozess abgearbeitet. Da sich aber die Struktur und Geometrie des Produkts im Laufe des Produktentwicklungsprozesses immer wieder verändern und anpassen, muss die Produktionsplanung auf diese Veränderungen eingehen. So muss beispielsweise eine Fügefolge immer wieder an die sich veränderte Geometrie angepasst werden, da eine Geometrieänderung das Einbauen von einzelnen Bauteilen beeinträchtigen kann. Auch bei der Produktionsplanung im Karosserierohbau werden drei wichtige Bereiche unterschieden: Strategiephase, Produktionsplanungsphase und die Serienbetreuung. Im Folgenden werden die drei Bereiche vorgestellt.

### **2.3.2 Strategiephase**

Zunächst werden in der Strategiephase auf Grundlage der prognostizierten Absatzzahlen Planungsprämissen für die zukünftige Produktion festgelegt [Broc-10]. In der Automobilindustrie werden Fahrzeugmodelle nicht nur in einer Fabrik, sondern oftmals in ganzen Fabriknetzwerken produziert. In der Strategiephase muss festgelegt werden, an welchen Standorten wie viele Fahrzeuge produziert werden sollen, um die prognostizierten Absatzzahlen zu realisieren. Daraus lassen sich die Taktzeit und das Schichtmodell für die einzelnen Fabriken ableiten. Da der Preis des neuen Produkts maßgeblich für dessen Erfolg verantwortlich ist, wird in der Strategiephase besonders auf die Kosten geachtet. Deshalb werden für die einzelnen Planungsprojekte frühzeitig Vorgaben für Investitionen an den jeweiligen Produktionsstandorten und die Produktionskosten je Fahrzeug festgelegt. In der Strategiephase wird auch festgelegt, ob das neue Produkt in einer neuen oder einer bestehenden Anlage gefertigt werden soll. Sind das neue Produkt und das Vorgängerprodukt ähnlich, so kann auch eine Wiederverwendung der bestehenden Produktionsressourcen aus Kostengründen sinnvoll sein. In solchen

Reuse-Projekten ergeben sich Produktionsprozess- und Ressourcenvorgaben, die bei der Planung zu berücksichtigen sind. Neben der Ableitung von Produktionsprämissen werden in der Strategiephase, gerade bei Reuse-Projekten, auch Vorgaben bezüglich der Produktarchitektur an die Produktentwicklung festgelegt, sodass sich das neue Produkt auch in eine bestehende Anlage integrieren lässt.

Da in der Strategiephase das Produkt noch nicht ausdetailliert ist, aber bereits Prämissen an die Planungsprojekte übergeben werden sollen, orientiert sich der Vorplaner an Vorgängerbaureihen beziehungsweise am Konzept ähnlicher Baureihen. Die in der Strategiephase festgelegten Vorgaben und Planungsprämissen sind die Grundlagen für die Planungsprojekte.

### **2.3.3 Produktionsplanung in der Fahrzeugphase**

In der Fahrzeugphase wird die Produktion an den verschiedenen Standorten geplant. Dabei lassen sich die Aufgaben der Produktionsplanung in drei Bereiche einteilen: Produkt-, Prozess- und Ressourcenplanung. Wie in Bild 2.6 dargestellt ist, sind die Produkt-, Prozess- und Ressourcenplanung parallelisiert. Im Folgenden werden ihre Aufgaben und Schnittstellen näher erläutert.

#### **Produktplanung**

Bei der Produktplanung stehen das Produkt und die Schnittstelle zur Produktentwicklung im Mittelpunkt. Im Rahmen der Produktplanung werden die neuen Produkte analysiert und mit den Strategien und Ressourcen der Rohbauproduktion abgeglichen, um daraus Lösungen für neue Produkte gemeinsam mit der Fahrzeugentwicklung zu erarbeiten. Die Produktplanung hat die Aufgabe die Anforderungen des Rohbaus aufzugreifen und diese in die Produktkonzeption, -planung und -entwicklung zu platzieren. Bereits während der Strategiephase wird die vorläufige Produktstruktur der Fahrzeugkarosserie aus der Produktentwicklung in die Produktionsplanung übernommen. Gerade am Anfang des Produktionsplanungsprozesses reichen dem Planer zunächst noch einfache Strukturinformationen und einfache Zahlenangaben aus. So kann beispielsweise mit der Gesamtzahl von Schweißpunkten, die auch aus der Vorgängerbaureihe stammen können, und der geplanten Stückzahl eine erste Abschätzung der Taktzeit durchgeführt werden.

Eine weitere Aufgabe der Produktplanung ist die Ableitung der Fügefolge. Hierfür ist eine enge Zusammenarbeit mit der Produktentwicklung notwendig.

**Definition 2.2:** *Die Fügefolge beschreibt die Reihenfolge, in der die einzelnen Komponenten zu einer Gesamtkarosserie zusammengebaut werden.*

Da diese Reihenfolge einen großen Einfluss auf das Toleranzkonzept hat, wird diese auch in dem bereits erwähnten Toleranzarbeitskreis besprochen und mit allen beteiligten Abteilungen abgestimmt. Auf Grundlage der Fügefolge wird auch das sogenannte Spann- und Fixierkonzept erarbeitet. Dieses beschreibt, an welchen Stellen ein Bauteil oder eine Baugruppe von der Fertigungsvorrichtung aufgenommen wird. Ziel dabei ist die vorgegebenen Toleranzen mit einer hohen Wiederholgenauigkeit einhalten zu können. Das Spann- und Fixierkonzept ist auch die Basis für die Vorrichtungskonstruktion und stellt damit die Schnittstelle zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung dar [Burr-08]. Eng mit dem Spann- und Fixierkonzept ist auch die Heftpunktfestlegung verknüpft. Um eine hohe Karosseriesteifigkeit zu erreichen, müssen große Karosserieteile, wie beispielsweise eine Fahrzeugseitenwand, durch viel Fügepunkte miteinander verbunden werden. Da aufgrund der ermittelten Taktzeit nicht alle Fertigungsoperationen in einer einzigen Zelle gefertigt werden können, müssen die Fertigungsoperationen auf verschiedene Zellen aufgeteilt werden. Hierfür muss das noch nicht fertige Produkt von Produktionszelle zu Produktionszelle transportiert werden. Bei der Heftpunktfestlegung werden die Fügepunkte festgelegt, die als Erstes gefertigt werden müssen, um die Toleranzvorgaben und die für den Transport des nicht fertigen Karosseriebauteils notwendige Steifigkeit zu erreichen.

Eine wichtige Rolle bei der Produktplanung spielt die produktionsgerechte Produktabsicherung, deren Ziel es ist, die Baubarkeit der Produkte sicherzustellen. Die wichtigsten Absicherungsziele sind:

- **Kollisionsfreie Einbaupfade:** Zunächst muss sichergestellt werden, dass sich die einzelnen Karosseriekomponenten in der definierten Fügefolge montieren lassen.
- **Kollisionsfreiheit mit Betriebsmitteln:** Beim Verbauen der einzelnen Karosserieelemente werden viele Betriebsmittel eingesetzt,

die ebenfalls die Zugänglichkeit beim Verbauen der Bauteilen einschränkt.

Viele dieser Absicherungen werden heute bereits digital am Rechner durchgeführt. Allerdings können nicht alle Untersuchungen digital abgesichert werden, da sich viele Sachverhalte nicht modellieren lassen. Als Beispiel hierfür können biegeschleife Teile aufgeführt werden, die sich aufgrund ihrer niedrigen Steifigkeit während des Fertigungsvorgangs verformen können.

Ein weiterer Prozess, an dem auch die Produktionsplanung beteiligt ist, ist die produktionsgerechte Produktgestaltung. Aufgabe der Produktionsplanung ist es, die Anforderungen aus der Produktion zu sammeln und diese der Produktentwicklung zur Verfügung zu stellen. Im Rahmen von verschiedenen Workshops wird versucht, Problemen aus vergangenen Fahrzeugprojekten frühzeitig entgegen zu wirken.

### **Prozessplanung**

Aufgabe der Prozessplanung ist es alle für die Produktion notwendigen Prozesse festzulegen und diese in der richtigen Reihenfolge den einzelnen Stationen zuzuordnen. Wichtig ist dabei die Einhaltung der richtigen Verbaureihenfolge, bei deren Festlegung der Prozessplaner mit der Entwicklung eng zusammenarbeiten muss, da es Restriktionen gibt, welche Bauteile nacheinander zusammengebaut werden müssen. Die Verbaureihenfolge hat einen großen Einfluss auf das Toleranzkonzept [Burr-08].

Im Karosserierohbau sind die Produktionsanlagen üblicherweise getaktet. Das heißt, alle Prozesse einer Produktionsstation müssen innerhalb eines vorgegebenen Taktes abgearbeitet sein, damit die geplante Tagesstückzahl erreicht werden kann. Aufgabe des Prozessplaners ist es, die einzelnen Prozesse so auf die Stationen zu verteilen, dass die Prozesszeit den Takt nicht überschreitet. Allerdings sollten die Prozesszeit in einer Stationen nicht zu klein sein, da sonst die Anlagen nicht ausgelastet sind. Aufgrund der hohen Produktvarianz werden auf einer Produktionslinie häufig mehrere Produkte gefertigt. Im Rohbau müssen die Prozesse so ausgetaktet sein, dass alle Produktvarianten, auch die sehr seltenen, im Takt gefertigt werden könne. Sonst kann keine reibungslose Produktion stattfinden. Eine weitere Aufgabe der Prozessplanung ist es, die Schnittstelle zu der Logistikplanung zu gestalten und zu koordinieren. Es müssen die Materialzonen und Anlieferungskonzepte der Einzelteile definiert und abgestimmt werden [Burr-08].

Zwar ist der Automatisierungsgrad im Karosserierohbau sehr hoch, dennoch können aus Kostengründen einzelne manuelle Prozesse notwendig sein. Dies können beispielsweise das Bestücken von Anlagen, Prüfen der Bauteilqualität oder Einlegen von Bauteilen sein. In Niedriglohnländern können auch Schweiß- oder Klebearbeiten manuell durchgeführt werden. Diese Prozesse zu planen ist ebenfalls Aufgabe der Prozessplanung.

### **Ressourcenplanung**

***Definition 2.3:** Unter Ressourcen werden alle Mittel verstanden, die zur Durchführung eines Prozesses oder allgemein zur Erfüllung einer Aufgabe notwendig sind. Hierzu gehören unter anderem ganze Betriebsstätten (Halle und Infrastruktur) sowie Betriebsmittel.*

Grundsätzlich lässt sich das Vorgehen bei der Ressourcenplanung als „vom Groben zum Feinen“ beschreiben. Zu Beginn des Produktionsplanungsprozesses ist noch sehr wenig über die Produktionsressourcen selbst als auch über das Produkt bekannt. Deshalb wird zunächst ein grobes Blocklayout entwickelt, um die Kosten und den Flächenbedarf zu ermitteln. Grundlage für dieses Blocklayout ist die Produktstruktur, die Fügereihenfolge und, soweit schon vorhanden, die Produktionsprozessübersicht. Bei der Erstellung eines solchen Blocklayouts kann der Planer üblicherweise auf standardisierte Musterzellen beziehungsweise auf Vorgängerprojekte zurückgreifen. Sobald der Flächenbedarf geschätzt ist, wird geprüft, ob sich das entwickelte Blocklayout an dem gewünschten Standort im Rahmen des zur Verfügung stehenden Budgets realisieren lässt [Burr-08].

Im nächsten Schritt wird das Groblayout erstellt. Auch hierfür können standardisierte Produktionszellen, die in Bibliotheken abgelegt sind, zum Einsatz kommen. Im Gegensatz zum Blocklayout wird bei der Grobplanung begonnen die Bibliotheksbausteine an das reale Hallenlayout anzupassen. Ziel dabei ist es, den Materialfluss in das Hallenlayout mit den standardisierten Komponenten zu integrieren.

Bei der Feinplanung wird das Groblayout erneut überprüft und ausdetailliert. Hierbei können einige digitale Absicherungsmethoden zum Einsatz kommen. Ein Automobilhersteller ist bestrebt, möglichst viele Standardbetriebsmittel in seinen Fabriken einzusetzen. Ein Beispiel hierfür ist die Verwendung von standardisierten Schweißzangen, deren Einsatz bereits frühzeitig im CAD-System abgesichert werden kann.

Die Produktionsanlagen werden in den meisten Fällen nicht vom Automobilhersteller selbst, sondern von einem externen Lieferanten gefertigt und aufgebaut. Im Karosserierohbau wird üblicherweise ein großer Generalunternehmer (GU) beauftragt. Dieser Generalunternehmer erbringt in der Regel sämtliche Aufbauleistungen, von der Konstruktion, der Fertigung und des Versands der Anlage bis zu dem Aufbau und der Inbetriebnahme [Gras-02]. Aufgabe des Ressourcenplaners ist es, den Generalunternehmer zu betreuen und unterstützen. Zunächst muss der Ressourcenplaner die Ausschreibungsunterlagen auf Grundlage der Feinplanung erstellen und anschließend nach passenden Angeboten auf dem Markt suchen. Nach der Vergabe der Anlage begleitet der Ressourcenplaner die Konstruktion und Entwicklung der Produktionsanlage. Üblicherweise werden einzelne Meilensteine, wie beispielsweise eine Konstruktionsfreigabe oder eine Versandabnahme, zwischen dem Ressourcenplaner und dem Generalunternehmer vereinbart. Schließlich wird die Anlage in der Fabrik aufgebaut und in Betrieb genommen. Nach einem erfolgreichen Produktionstest, der ebenfalls vom Generalunternehmer und dem Ressourcenplaner begleitet wird, kann die Anlage an die Produktion übergeben werden. Ab diesem Zeitpunkt zieht sich die Neutypplanung aus diesem Projekt zurück.

### **2.3.4 Serienbegleitung**

Nachdem die Anlage an die Produktion übergeben worden ist, übernimmt die serienbegleitende Planung die planerischen Aufgaben. Ihre Aufgabe ist es die laufende Produktion kontinuierlich zu optimieren [Broc-10]. In der laufenden Produktion können Probleme aufgedeckt werden, die während der Planungsphase und des Anlaufs nicht erkannt worden sind. Diese müssen von der seriennahen Planung ausgebessert werden.

Die seriennahe Produktionsplanung kümmert sich auch um die Implementierung der Produkthanpassungen in die laufende Produktion. Anpassungen, die für die Umsetzung der Modellpflege notwendig sind, werden von der seriennahen Planung geplant und umgesetzt. Sind hierfür allerdings umfangreiche Umbauten notwendig, so wird die Neutypplanung herangezogen. Alle Umbauten müssen gründlich dokumentiert werden, damit auch Folgebaureihen reibungslos in diese Anlagen integriert werden können.

## **2.4 Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung**

Auch in diesem Kapitel wird zunächst auf allgemeingültige Ansätze zur Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung eingegangen. Im Wesentlichen sind das Simultaneous Engineering und Concurrent Engineering. Anschließend wird das Zusammenarbeitsmodell zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung im Karosserierohbau näher beleuchtet.

### **2.4.1 Integration von Produktentwicklung und Produktionsplanung**

Um alle an der Produktentstehung beteiligten Unternehmensbereiche in den Entwicklungsprozess zu integrieren und eingefahrene Organisationsformen zu überwinden, entwickelte OLSSON den Ansatz der Integrierten Produktentwicklung [VaBu-14][VaBu-14]. Neben der Lösung technischer Probleme betrachtet die Integrierte Produktentwicklung die dazugehörigen Abläufe [Ehrl-07] [Meer-94] [AnHe-87]. Des Weiteren liegen die interdisziplinäre Zusammenarbeit aller beteiligten Bereiche, das rechtzeitige Bereitstellen aller notwendigen Informationen in der richtigen Menge und Qualität sowie eine Verflachung von Hierarchien im Fokus der Integrierten Produktentwicklung [VWBZ-09].

Wie in Bild 2.7 zu sehen ist, ist der Produktentstehungsprozess durch ein starkes Parallelisieren der durchzuführenden Aufgaben charakterisiert. Dennoch benötigt die Produktionsplanung einen Input von der Produktentwicklung, um mit der Gestaltung der Produktionsprozesse und Betriebsmittel zu beginnen. Abhängig von der Komplexität des Produkts ist der Zeitversatz zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung mehr oder weniger groß. Wie in Bild 2.7 ebenfalls zu sehen ist, nehmen mit der Zeit die Aufgaben der Produktentwicklung immer mehr ab und die Aufgaben der Produktionsplanung immer mehr zu. Diese Tatsache lässt vermuten, dass Probleme, die während der Produktionsplanung auftreten, nicht mehr mit einer Änderung am Produkt gelöst werden können. Deshalb ist es besonders wichtig, dass die Produktionsplanung möglichst frühzeitig ihre Anforderungen an die Produktentwicklung formuliert.

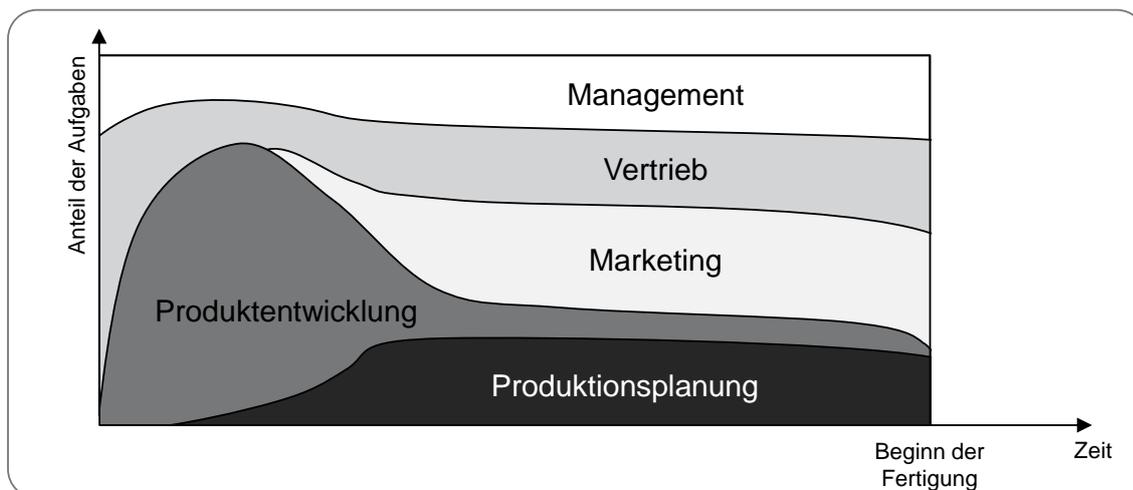


Bild 2.7.: Produktentstehungsprozess

Um die interdisziplinäre Zusammenarbeit in Unternehmen zu verbessern, haben in den letzten Jahren zwei wichtige Instrumente weite Verbreitung gefunden: das sogenannte Simultaneous Engineering und das Concurrent Engineering [Meiß-10].

Um den Produktentwicklungsprozess zu beschleunigen, werden beim Simultaneous Engineering die einzelnen Schritte des Entwicklungsprozesses parallelisiert. Im Gegensatz zur sequenziellen Abarbeitung der einzelnen Schritte werden beim Simultaneous Engineering die voneinander unabhängigen Schritte parallel abgearbeitet und die voneinander abhängigen Schritte so weit wie möglich abgearbeitet. Dabei werden die Aufgaben von interdisziplinären Teams, in denen beispielsweise Experten aus Mechanik, Elektrik oder Fertigung vertreten sind, gelöst [West-06]. Ziele des Simultaneous Engineering sind [Ehrl-07]:

- Zeitersparung bei der Produkterstellung,
- Verringerung der Produktgesamtkosten, insbesondere Entwicklungs- und Herstellkosten,
- Qualitätsverbesserung unter Berücksichtigung der Kundenwünsche.

Der Unterschied zwischen Simultaneous Engineering und dem Concurrent Engineering wird vor allem darin gesehen, dass das Simultaneous Engineering verstärkt auf das Parallelisieren von Prozessen abzielt, während beim

Concurrent Engineering die Arbeit in interdisziplinären Teams im Vordergrund steht [Ehrl-07]. In der Literatur werden oft beide Begriffe als Synonym verwendet. Bei [West-06] wird unter Concurrent Engineering „die Integration und gleichzeitige Ausführung von Entwurfs- und Herstellungsprozessen während des gesamten Produktlebenszyklus“ verstanden. Neben der zeitlichen Beschleunigung ist die erforderliche verstärkte Kommunikation zwischen den beteiligten Personen ein Vorteil dieser Ansätze [West-06].

### **2.4.2 Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung in der Automobilindustrie**

Wie in Bild 2.5 und Bild 2.6 dargestellt ist, sind in der Automobilindustrie der Produktentwicklungsprozess sowie der Produktionsplanungsprozess durch gemeinsame Meilensteine gegliedert. Die Ansätze des Simultaneous Engineering und des Concurrent Engineering sind in der Automobilindustrie sehr verbreitet. Die Produktionsplanung ist bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt im Produktentstehungsprozess beteiligt. Allerdings ist zu diesem Zeitpunkt die Datenqualität noch nicht sehr hoch, wodurch sehr viele Unsicherheiten in den Produktionsplanungsprozess berücksichtigt werden müssen.

Auf Grundlage der Digitalen Prototypen (vgl. Bild 2.5) werden in sehr frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses erste Workshops zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung durchgeführt. Ziel dieser Workshops ist die Absicherung der allgemeinen Produktbaubarkeit. Je nach Hersteller werden diese Workshops „Digitale Baubarkeit“ oder „Virtual Process Week“ genannt [Webe-09]. Dabei steht nicht die Produktionsanlage, sie ist ja zu dem Zeitpunkt noch nicht im Detail bekannt, sondern das Produkt selbst im Mittelpunkt. In der Verbaureihenfolge werden die einzelnen Bauteile des Produkts nacheinander eingeblendet und mit allen beteiligten Parteien diskutiert. Zu diesem Zeitpunkt hat der Produktionsplaner ein erstes Grobkonzept erarbeitet und kann beurteilen, ob es gravierende Probleme geben würde, das neue Produkt auf dieser Anlage zu fertigen. Kann ein Sachverhalt nicht allein aufgrund des CAD Modells bewertet werden, so werden weitere digitale Untersuchungen angestoßen.

Nicht nur in diesen Baubarkeit Workshops ist die Produktionsplanung vertreten, sondern auch in fast allen Gremien der Produktentwicklung. Da sich

das Produkt im Laufe des Produktentstehungsprozesses immer wieder ändert, werden in der Automobilindustrie üblicherweise alle wichtigen Produktänderungen mit allen beteiligten Bereichen besprochen und diskutiert. Somit ist der Produktionsplaner über alle für die Produktion relevanten Produktänderungen informiert und kann entsprechende Maßnahmen gezielt einleiten.

Im Laufe des Produktentstehungsprozesses steigt der Reifegrad der geplanten Produktionsanlage. Fallen dem Produktionsplaner im Laufe des Produktionsplanungsprozesses Probleme auf, die durch eine Produktänderung behoben werden können, so kann er ebenfalls eine Produktänderung bei der Entwicklung anstoßen. Diese muss ebenfalls mit allen Beteiligten diskutiert und abgestimmt werden. Allerdings je später im Produktentstehungsprozess eine Produktänderung umgesetzt werden soll, desto höher sind die Kosten für deren Umsetzung. Dies ist durchaus ein Problem für die Produktionsplanung, da Probleme die sehr spät im Produktentwicklungsprozess entdeckt werden, nicht mehr mittels einer Produktänderung gelöst werden können. Umso wichtiger ist es, die Anforderungen und Standards der Produktion sehr frühzeitig dem Produktentwickler zur Verfügung zu stellen. In der heutigen Automobilindustrie gibt es hierfür allerdings kaum technische Unterstützung.

## **2.5 Produktion in der Automobilindustrie**

In dem folgenden Kapitel wird die Produktion in der heutigen Automobilindustrie vorgestellt. Da der Karosserierohbau im Mittelpunkt dieser Arbeit steht, wird besonders auf die Fertigung der Karosserie eingegangen. Ziel dieses Kapitels ist die Vermittlung der grundlegenden Produktionsabläufe bei der Herstellung einer Fahrzeugkarosserie. Dies ist Grundlage für die erarbeitete Methode.

### **2.5.1 Produktion eines Fahrzeugs**

Die Fahrzeugproduktion lässt sich, wie in Bild 2.8 dargestellt ist, in die Gewerke Presswerk, Karosseriebau, Lackierung und Montage gliedern.

Im Presswerk werden Komponenten aus Blech hergestellt, die später zu der Karosserie zusammengefügt werden. Das Blech wird auf großen Rollen ins Presswerk angeliefert. Im ersten Schritt wird das Blech von der Rolle abgerollt und zugeschnitten. Im nächsten Schritt werden die Zuschnitte mithilfe von Umformmaschinen in die gewünschte Gestalt umgeformt [Anse-97].

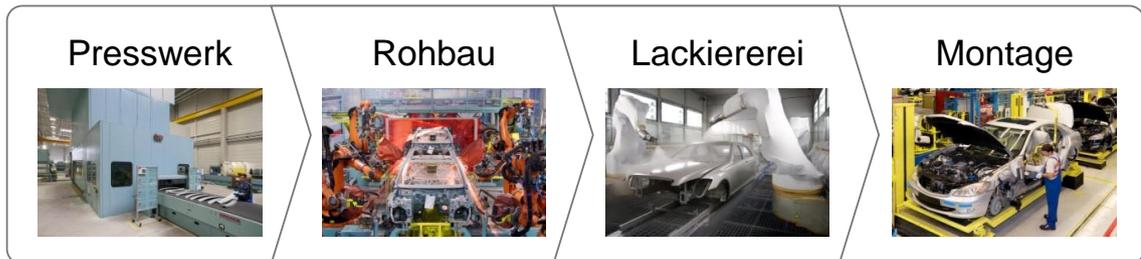


Bild 2.8: Übersicht Fahrzeugfertigung

Im Karosserierohbau werden die einzelnen Karosserieteile miteinander verbunden. Dieses Gewerk wird im nächsten Kapitel näher vorgestellt. Die fertige Rohbaukarosserie wird im nächsten Gewerk gegen Korrosion geschützt. Hierzu durchläuft die Karosserie mehrere Tauchbäder, bis schließlich die Lackfarbe aufgetragen wird. Zum Schluss wird die Karosserie durch eine Schicht Klarlack versiegelt. Im letzten Gewerk wird die lackierte Karosserie um die noch fehlenden Teile ergänzt. Dabei werden zunächst die Fahrzeugtüren demontiert und in einer separaten Linie aufgerüstet. Nachdem die Kabel verlegt wurden, kann im nächsten Schritt das Interieur des Fahrzeugs ausgestattet werden. In der gesamten Montage existieren einige Vormontagelinien, wie beispielsweise Cockpit, Sitze, oder Motorenvormontage. Die fertig vormontierten Baugruppen werden an der Hauptlinie an das Fahrzeug montiert. Aus Kostengründen werden einige Vormontagen häufig aus dem Unternehmen ausgelagert. Die zusammengebauten Baugruppen werden in solchen Fällen vom Lieferanten an das Hauptband geliefert. Zum Schluss werden die am Anfang demontierten Türen erneut an die Karosserie gehängt und das Fahrzeug auf Räder gestellt. Bevor ein Fahrzeug die Montagelinie verlässt, durchläuft es noch eine Qualitätskontrolle [Anse-97].

## 2.5.2 Produktion einer Fahrzeugkarosserie

Innerhalb der Automobilproduktion nimmt der Karosserierohbau in mehrfacher Hinsicht eine herausragende Stellung ein. Die Fahrzeugkarosserie stellt die Außenhaut eines Fahrzeugs dar und prägt damit auch maßgeblich das Erscheinungsbild des Automobils und seiner Marke. Aus diesem Grund wird bei fast allen Automobilherstellern die Entwicklung und Herstellung einer Fahrzeugkarosserie als Kernkompetenz angesehen. So beträgt die Eigenleistungstiefe im Karosserierohbau zwischen 80 und 100 Prozent. Bei den restlichen Fertigungsbereichen einer Automobilproduktion liegt die Eigenleistungstiefe bei etwa 30 bis 35 Prozent [Kief-07].

Üblicherweise wird die Produktion von Automobilkarosserien nach dem Fischgrätenprinzip gegliedert [Wemh-05]. Dabei werden entlang der Hauptlinie kleine Nebenlinien so angeordnet, dass die Unterbaugruppen in der Nähe ihrer Verbauorte in der Hauptlinie fertiggestellt werden. Ein Beispiel für dieses Prinzip ist in Bild 2.9 dargestellt.

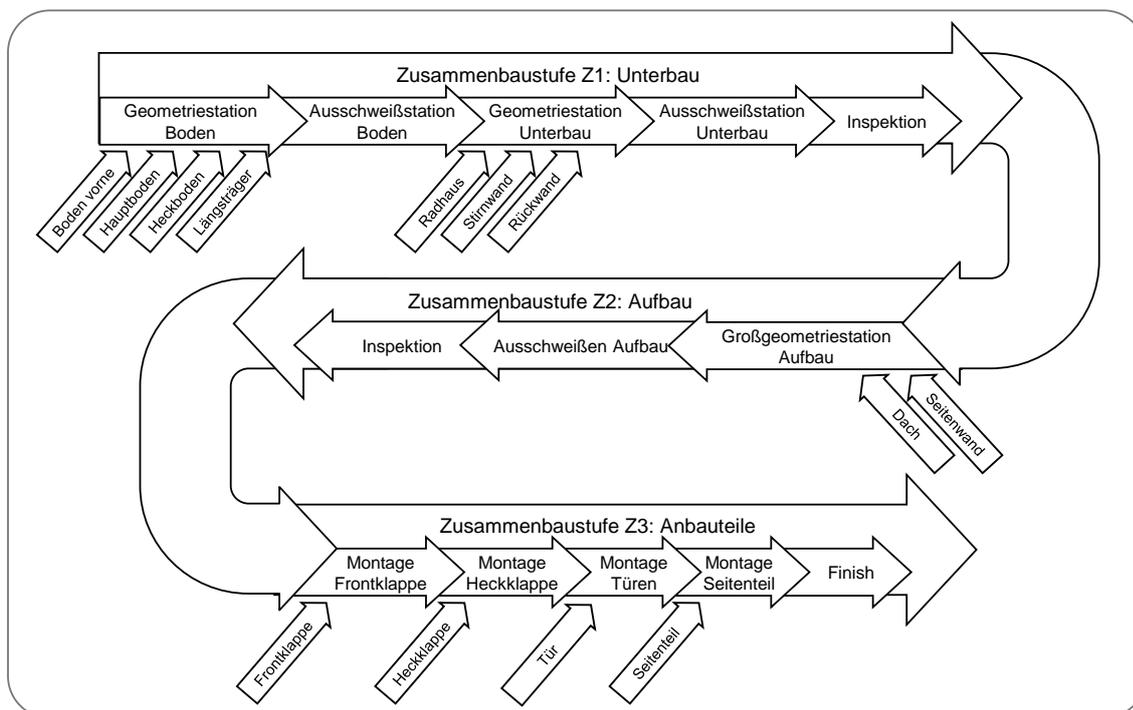


Bild 2.9: Zusammenbaustufen im Karosserierohbau in Anlehnung an [Broc-10]

Wie ebenfalls in Bild 2.9 dargestellt ist, wird bei den meisten Automobilherstellern die Karosserieproduktion in drei Zusammenbaustufen gegliedert:

Unterbau (Z1), Aufbau (Z2) und Anbauteile (Z3). In der Zusammenbaustufe Z1 wird der Unterbau einer Karosserie gefertigt. Je nach Fahrzeugkonzept und Automobilhersteller kann die Verbaureihenfolge geringfügig variieren. Üblicherweise muss der Hauptboden mit dem Frontboden, dem Heckboden und den Längsträgern verbunden werden. Hinzu kommen noch die Radkästen, die Stirn- und die Rückwand. Dabei werden die Unterbaugruppen und die Hauptbaugruppe zunächst in einer Geometriestation positionsgenau verbunden und mit ersten Schweißpunkten, beziehungsweise Durchsetzfügpunkten, fixiert. Da aus Taktzeitgründen nicht alle Verbindungspunkte gefertigt werden können, müssen die restlichen Punkte beispielsweise in einer Ausschweißstation gefertigt werden. Bevor der Unterbau in die nächste Zusammenbaustufe gefördert wird, muss noch die Qualität der Baugruppe geprüft werden. In der Zusammenbaustufe Z2 werden Seitenwand und das Dach in den entsprechenden Geometrie- und Ausschweißstationen mit dem Unterbau verbunden. Nach einer erneuten Inspektion der Qualität werden in der Zusammenbaustufe Z3 alle Anbauteile an die Karosserie montiert. Unter Anbauteilen werden alle zur Karosserie gehörenden Teile verstanden, die nicht mit der Karosserie verschweißt sind [BrSe-13]. Dies sind die Klappen, Türen und Kotflügel eines Fahrzeugs. Bevor die fertige Karosserie in die Lackierung weitergefördert wird, durchläuft sie den Finish-Bereich [Broc-10].

Das Fügen der einzelnen Tiefziehteile zu einer Karosserie ist ein komplexer Vorgang. Dabei kommen verschiedene Technologien zum Einsatz. Am weitesten verbreitet ist das Widerstandspunktschweißen [Burr-08][Frei-06]. Je nach Werkstoff oder Einsatzgebiet kommen aber auch folgende Fügeverfahren zum Einsatz:

- Laserschweißen,
- Bolzenschweißen,
- Durchsetzfügen,
- Stanznieten,
- Kleben,
- Falzen.

Nicht nur der hohe Automatisierungsgrad und die unterschiedlichen Füge-technologien machen die Anlagen im Karosserierohbau sehr komplex, sondern auch die notwendige Flexibilität der Anlagen. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, wird in der Automobilindustrie verstärkt versucht verschiedene Fahrzeugmodelle, beziehungsweise Derivate, auf einer Linie zu fertigen. Das heißt, die Anlagen müssen in der Lage sein, unterschiedliche Bauteile der einzelnen Produkte zu verarbeiten. Um dies zu realisieren, werden die produktspezifischen Betriebsmittel auf drehbaren Tischen, Revolvern oder Magazinen installiert. Eine andere Möglichkeit eine Anlage für unterschiedliche Produktvarianten zu betreiben, ist die sogenannte Batch-Fertigung. Hierbei wird die Anlage für die Produktion eines Produkts umgerüstet. Das heißt, die Anlage fertigt eine bestimmte Zeit Produkt A. Nachdem die notwendige Stückzahl produziert wurde, wird die Anlage für ein anderes Produkt umgerüstet. Diese Methode kann sehr gut für Nebenlinien eingesetzt werden. Ein Nachteil dieser Methode ist die Notwendigkeit eines Puffers zwischen Neben- und Hauptlinie.

### 2.6 Herausforderungen im automobilen Karosserierohbau

Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Herausforderungen im automobilen Karosserierohbau für diese Arbeit zusammengefasst:

- **Hohe Produktvarianz in der Entwicklung:** Durch die immer größer werdende Anzahl an Fahrzeugmodellen und die unterschiedlichen Derivate ist die Automobilindustrie gezwungen, den Produktentstehungsprozess schlanker und vor allem kürzer zu gestalten. Das bedeutet, die Produktentwicklung muss beispielsweise durch ein standardisiertes Baukastenprinzip viele Produktvarianten entwickeln.
- **Hohe Produktvarianz in der Produktion:** Die hohe Varianz an Produkten stellt auch die Produktionsplanung vor große Herausforderungen. Es ist nicht wirtschaftlich für jede Fahrzeugvariante, gerade bei Nischenfahrzeugen, deren Stückzahl nicht so hoch ist, eine eigene Fabrik aufzubauen. Deshalb müssen Fabriken möglichst flexibel gestaltet werden. Zum einen müssen die Anlagen so flexibel

gestaltet sein, dass Nachfrageschwankungen bei bestimmten Produkten abgefedert werden können. Gleichzeitig muss die Produktionsplanung die Anlagen so gestalten, dass sich auch zukünftige Produkte auf ihnen fertigen lassen. Dies kann aber nur realisiert werden, wenn sich das alte und neue Produkt ähnlich sind.

- **Wiederverwendung von Produktionsanlagen:** Durch die immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen in der Automobilindustrie steigt die Bedeutung der Wiederverwendung von Produktionsanlagen an. Da heutige Anlagen durchaus mehr als nur in einem Produktionszyklus eingesetzt werden können, entscheiden sich die Automobilhersteller immer häufiger für eine Integration eines neuen Produkts in eine bestehende Anlage. Damit dies gelingt, bedarf es einer frühzeitigen Beeinflussung der Produktgestalt bezüglich den Anforderungen der Bestandsanlage. Aber auch hierbei gibt es heute keine durchgängige Unterstützung. Gerade bei der Nachfolgerflexibilität muss die Produktionsplanung möglichst frühzeitig Einfluss auf das Produkt nehmen. Wie aber in Kapitel 2.4.2 beschrieben wurde, finden in der frühen Phase des Produktentstehungsprozesses lediglich beratende Workshops zwischen Entwicklung und Produktionsplanung statt. Es fehlt dabei methodische und rechnergestützte Unterstützung, um alle Anforderungen der Produktion umzusetzen.
- **Standardisierung und Modularisierung in der Produktion:** Die Vorteile, die ein Baukastenprinzip bei der Gestaltung von neuen Produkten bietet, können auch auf die Produktionsplanung übertragen werden. Erste Ansätze zur Standardisierung und Modularisierung der Produktion sind bereits in der Automobilindustrie umgesetzt. Allerdings fehlt es auch hier an einer methodischen Unterstützung im Produktentwicklungsprozess. Bei der Gestaltung der neuen Produkte muss natürlich auch darauf geachtet werden, dass sich diese auch mit den standardisierten Betriebsmitteln fertigen lassen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Produktionsplanung und Produktentwicklung in Zukunft noch enger miteinander arbeiten müssen, um die vom Markt geforderte Varianz bewerkstelligen zu können.



### **3 Stand der Forschung und Technik**

Um die vorgestellten Herausforderungen der Automobilindustrie zu lösen, gibt es bereits zahlreiche Ansätze in der Industrie und Forschung. Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Ansätze vorgestellt und erörtert. Zunächst wird auf die Modularisierung von Produkten und Produktionsanlagen eingegangen. Anschließend werden die Möglichkeiten und Potenziale der Digitalen Fabrik vorgestellt. Im nächsten Abschnitt wird die Produktionsgetriebene Gestaltung von Produkten näher vorgestellt. Zum Schluss des Kapitels wird eine Bewertung der unterschiedlichen Ansätze durchgeführt und der Forschungsbedarf für diese Arbeit abgeleitet.

#### **3.1 Standardisierung und Modularisierung in der Produktentwicklung**

Um den individuellen Wünschen der Kunden nach zu kommen, müssen die Automobilhersteller eine hohe Produktvarianz auf dem Markt anbieten. Diese Varianz versuchen sie, durch eine modulare Strukturierung und Standardisierung von Produktfamilien in den Griff zu bekommen [Reic-10].

##### **3.1.1 Standardisierung und Modularisierung von Produkten**

Neben der Modularisierung stellt auch die Standardisierung und Normierung von Bauteilen eine wirkungsvolle Maßnahme, um die vom Markt geforderte Vielfalt im Unternehmen handhabbarer zu gestalten.

***Definition 3.1:** Standardisierung bedeutet das einmalige Lösen eines sich immer wiederholenden technischen oder organisatorischen Vorgangs mit optimalen Mitteln des Stands der Technik.*

Nach [EKLM-14] lassen sich Standardisierung und Normierung in drei Ebenen gliedern:

- Überbetriebliche nationale und internationale Standards; Beispiel: Deutsches Institut für Normung,
- Innerbetriebliche Normen und Standards,

- Allgemein einsetzbare Lösungskataloge und sonstige Vorschriften sowie systematische bzw. einheitliche Wissensdarstellung.

In [Jesc-97] ist die Standardisierung in drei Bereiche eingeteilt:

- **Produktstandardisierung:** Ziel dabei ist die Reduzierung der Produktvielfalt beziehungsweise die Vereinheitlichung der Einzelteile.
- **Technologiestandardisierung:** Hierdurch sollen die im Unternehmen eingesetzten Produktionstechnologien vereinheitlicht werden.
- **Prozessstandardisierung:** Mit dieser Maßnahme sollen die Aufbau- und Ablauforganisationen im Unternehmen vereinheitlicht werden.

Diese Standardisierungsmaßnahmen wirken sich unter anderem positiv auf die Produktion aus. So führt eine Standardisierung von Bauteilen auch zu einer Reduktion von Bauteilen in den Fertigungsanlagen. Da standardisierte Komponenten in verschiedenen Produkten verbaut werden, kann das einmal geplante Produktionssystem immer wieder verwendet werden. Wenn bei der Entwicklung eines Produkts ausschließlich standardisierte Produktionstechnologien verwendet werden, hat dies ebenfalls Vorteile für die Produktion und Produktionsplanung. Technologien, die sich in der Vergangenheit bewährt haben und das Unternehmen Erfahrung und Know-How gesammelt hat, bereiten dem Unternehmen beim Anlauf neuer Produkte weniger Schwierigkeiten. Werden auch die unternehmensspezifischen Prozesse, wie beispielsweise die Produktionsprozesse, standardisiert, so führt dies auch zu positiven Effekten in der Produktion und Produktionsplanung.

In der Literatur lassen sich viele Definitionen von Modularisierung finden. In Anlehnung an [Tesc-10] und [Nill-01] sind in Tabelle 3.1 einige Definitionen und deren Anwendungen aufgelistet.

| Autor   | Definition   |
|---------|--|
| KOLLER  | Module zeichnen sich dadurch aus, dass sie „... gleiche Schnittstellen besitzen und an verschiedenen Stellen (Orten) des Systems angebracht (getauscht) werden können ...“ [Koll-98] |
| MAYAS   | „Module sind ... vormontierbare und weitestgehend vorprüfbare Baugruppen mit standardisierten Schnittstellen“ [Maya-93]  |
| GÖPFERT | Ein Modul ist ein „relativ autonom betrachtetes Subsystem“ [Göpf-98]   |
| SALEIN  | „Ein Funktionsmodul ist eine abgegrenzte funktionale Einheit eines Gesamtsystems (Produkt)“ [Sale-99]  |

|                        |   |
|------------------------|---|
| <b>ARNOLD</b>          | Module sind „... fremdbezogene Erzeugnisse, die während des Produktionsprozesses ohne wesentliche Be- bzw. Verarbeitungsgängen in die Endproduktion eines beschaffenden Unternehmens eingehen bzw. zu solchen verbaut werden“ [Arno-97] |
| <b>DENCKER</b>         | „Module sind größere, in sich abgeschlossene Funktionseinheiten..., die am Montageband komplett montiert werden können“ [Denc-95]   |
| <b>PILLER/WARINGER</b> | „Unter einem Modul wird eine nach Montageaspekten abgrenzende und einbaufertige Einheit verstanden, deren Bausteine physikalisch miteinander verbunden sind“ [PiWa-99]  |

Tabelle 3.1: Definition von Modularisierung nach [Tesc-10] und [Nill-01]

In der Literatur finden sich viele Ansätze, um modulare Produkte zu beschreiben. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Attribute ist in Bild 3.1 schematisch dargestellt.

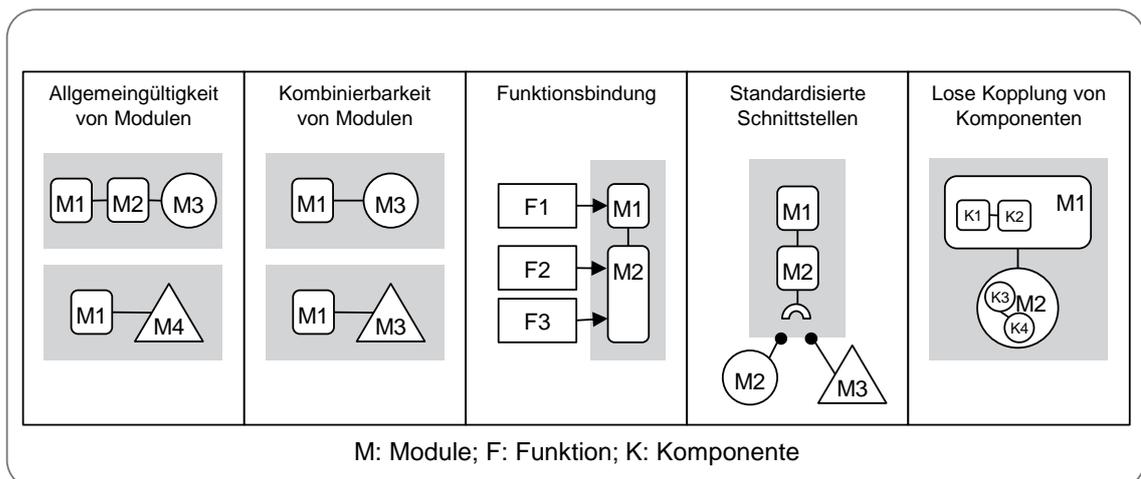


Bild 3.1: Eigenschaften von modularen Produkten nach [KrEi-11]

Die fünf Attribute lassen sich wie folgt beschreiben [Salv-07]:

- **Allgemeingültigkeit von Modulen:** Komponenten beziehungsweise Module werden an verschiedenen Verbauorten einer Produktfamilie eingesetzt.
- **Kombinierbarkeit von Modulen:** Produkte können durch die Kombination verschiedener Module konfiguriert werden.
- **Funktionsbindung:** Module haben eine festgelegte Funktion.

- **Standardisierte Schnittstellen:** Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Modulen sind standardisiert.
- **Lose Kopplung von Komponenten:** Das Zusammenspiel zwischen Komponenten eines Moduls ist stärker als das Zusammenspiel zwischen Komponenten, die sich in unterschiedlichen Modulen befinden.

In [KrEi-11] werden Methoden zur Unterstützung bei der Entwicklung von modularen Produktfamilien vorgestellt. Grundlage dieser Methode ist ein integrierter Ansatz des Variantenmanagements, der im Bild 3.2 abgebildet ist.

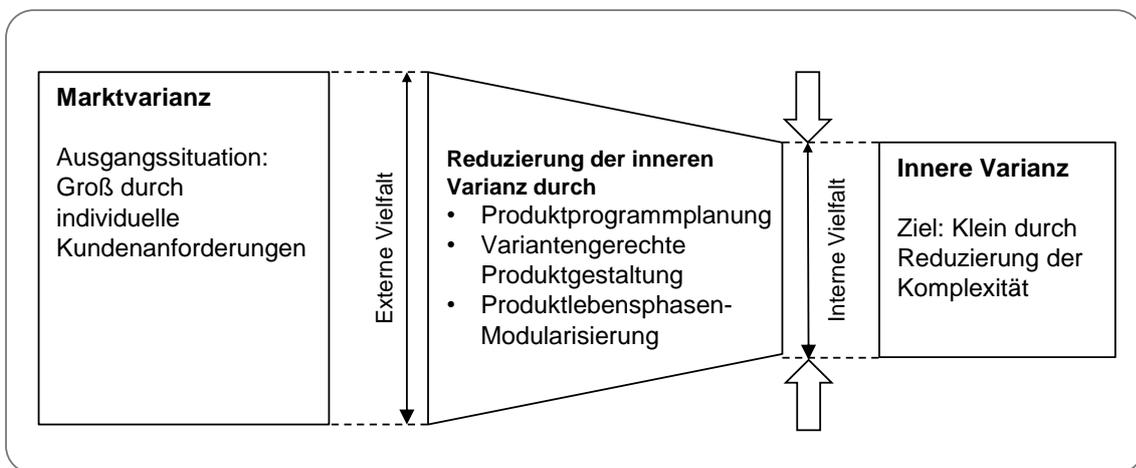


Bild 3.2: Integrierter Ansatz des Variantenmanagements nach [JoKr-10]

Ziel der Methode ist die externe, durch den Markt geforderte, Produktvarianz im Unternehmen möglichst gering zu halten. Hierzu werden die Methoden Produktprogrammplanung, variantengerechte Produktgestaltung und die Produktlebensphasen-Modularisierung vorgestellt. Mit der Produktprogrammplanung wird dem Entwickler ein Werkzeug an die Hand gegeben, das einerseits eine Übersicht über das Produktprogramm visualisiert, andererseits aber auch strategische Grunddaten enthält und einen schnelle Vergleichbarkeit ermöglicht [JoKr-10]. Die variantengerechten Produktgestaltung nach [KiBK-10] unterstützt bei der Abbildung der externen Varianz. Mithilfe eines Netzplans wird die Zuordnung zwischen Unterscheidungsmerkmalen und Komponenten visualisiert. Dadurch wird eine Annäherung der Konstruktion an das Ideal der Eins-zu-eins-Zuordnung zwischen Unterscheidungsmerkmalen und Komponenten unterstützt [JoKr-10]. Die wichtigsten Schritte dieser Methode sind [KrEi-11]:

- Unterscheidung zwischen Standard- und Variantenkomponenten,
- Reduzierung der Variantenkomponenten,
- Eins-zu-eins-Zuordnung zwischen Unterscheidungsmerkmalen und Komponenten,
- Entkopplung der Variantenkomponenten voneinander.

In [BIJK-10] wird die Methode der Produktlebensphasen-Modularisierung vorgestellt, die basierend auf unterschiedlichen Produktlebensphasen zunächst alternative Modularisierungen entwirft. Anschließend werden die erarbeiteten Modularisierungen auf Zielkonflikte hin untersucht und in ein Gesamtlösungskonzept überführt [JoKr-10]. Das Vorgehen ist in folgende Schritte unterteilt [KrEi-11]:

- Entwicklung von technisch funktionalen Modularisierungen,
- Entwicklung von Modularisierungen für alle relevanten Produktlebensphasen,
- Kombination von Modularisierungen,
- Herleitung der modularen Produktstruktur.

Modular aufgebaute Produkte bieten nicht nur für die Produktentwicklung viele Potenziale, sondern auch für deren Produktion und Nutzung. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Potenziale sowie Gefahren von Modularisierung aufgelistet.

| Effekt der Modularisierung | Potenziale in der Entwicklung  | Potenziale in der Produktion  | Potenziale in der Nutzung   | Gefahren   |
|----------------------------|--|---|---|--|
| Wiederverwendbarkeit       | Reduzierter Entwicklungsaufwand durch Rückgriff auf bereits entwickelte Module | Kostenreduzierung und geringere Fehlerraten durch Skaleneffekte und Lernkurveneffekte | Weiterverwendung einzelner Module in anderen Produkten              | Geringe Produktdifferenzierung                             |
| Austauschbarkeit           | Einfache Veränderung der Produktarchitektur durch Austausch                    | Einfacher Austausch von fehlerhaften Modulen in der Produktion                        | Vereinfachte Reparatur des Produkts durch Austausch defekter Module | Beschränkung der Reparaturmöglichkeiten auf Modulaustausch |

|                             |  |  |   |  |
|-----------------------------|--|--|---|--|
| <b>Erweiterbarkeit</b>      | Erweiterung der Produktfunktionalität durch Hinzunahme von Modulen | Produkterweiterung erfordert keine produktions-technische Veränderung        | Nachträgliche Produkterweiterung möglich                                  | Fehlende Produktintegrität   |
| <b>Standardisierbarkeit</b> | Verwendung existierender Lösungen                                  | Reduzierung der Komponentenvielfalt; Verwendung marktverfügbarer Komponenten | Bessere Verfügbarkeit und günstigere Preise durch konkurrierende Anbieter | Geringere Originalität; Substituierbarkeit; Suboptimale Produktleistungen  |
| <b>Stabilität</b>           | Stabiles Produkt trotz Veränderung von einzelnen Modulen           | Fehler bleiben auf einzelne Module begrenzt                                  | Erhöhte Zuverlässigkeit des Gesamtprodukts                                | Späte Entdeckung von Fehlfunktionen  |
| <b>Kombinierbarkeit</b>     | Kombination von Modulen im Baukastenprinzip                        | Einfache Herstellung von Produktvarianten                                    | Individuelle Zusammenstellung und Gestaltung des Produktes                | Erstellung von kombinierbarer Module aufwendig                             |
| <b>Entkopplung</b>          | Reduzierung von Schnittstellen; Parallelisierung der Entwicklung   | Reduzierter Montageaufwand durch weniger physikalische Schnittstellen        | Montage und Demontage durch Nutzer möglich                                | Aufwendige Konstruktion, Spezifikation und Realisierung der Schnittstellen |

Tabelle 3.2: Potenziale und Gefahren von modularen Produkten in Anlehnung an [Corn-02] und [Göpf-98]

### 3.1.2 Modularisierung von Karosserien

Um die Entwicklungskosten von neuen Baureihen zu reduzieren und dennoch dem Kunden eine Vielfalt an Produkten anbieten zu können, entwickeln viel Automobilhersteller Plattformkonzepte, von denen sich unterschiedliche Produkte ableiten lassen [Anse-97]. Sollen beispielsweise drei Produkte A, B und C entwickelt werden, so werden bei einem konventionellen Entwicklungsprozess drei getrennte Produkte entwickelt, die jeweils die vom Markt geforderten Funktionalitäten bieten. Wird ein gemeinsames Plattformkonzept angestrebt, so werden zunächst die gemeinsamen Funktionalitäten identifiziert und anschließend wird ein Produktmodul entwickelt,

welches in allen Varianten verwendet werden kann. Zusätzliche Funktionalitäten, die über die Modulplattform hinausgehen und häufig die Differenzierung der Varianten darstellen, werden dann durch spezifische Module realisiert [Corn-02]. Für den Kunden sollen sich die drei Produktvarianten, trotz einer gemeinsamen Plattform, klar unterscheiden. In Anlehnung an das Trichtermodell von [KrEi-11] (vgl. Bild 3.2) wird durch ein gemeinsames Plattformkonzept extern eine hohe Produktvielfalt geboten und gleichzeitig die innere Varianz reduziert.

Der hohe Kostendruck treibt fast alle Automobilhersteller zur Entwicklung von Plattformkonzepten. Jedoch können die Plattformkonzepte abhängig von der Unternehmensstruktur und dem Produktportfolio unterschiedlich umgesetzt werden. In Bild 3.3 sind Plattformkonzeptstrategien zusammengefasst.

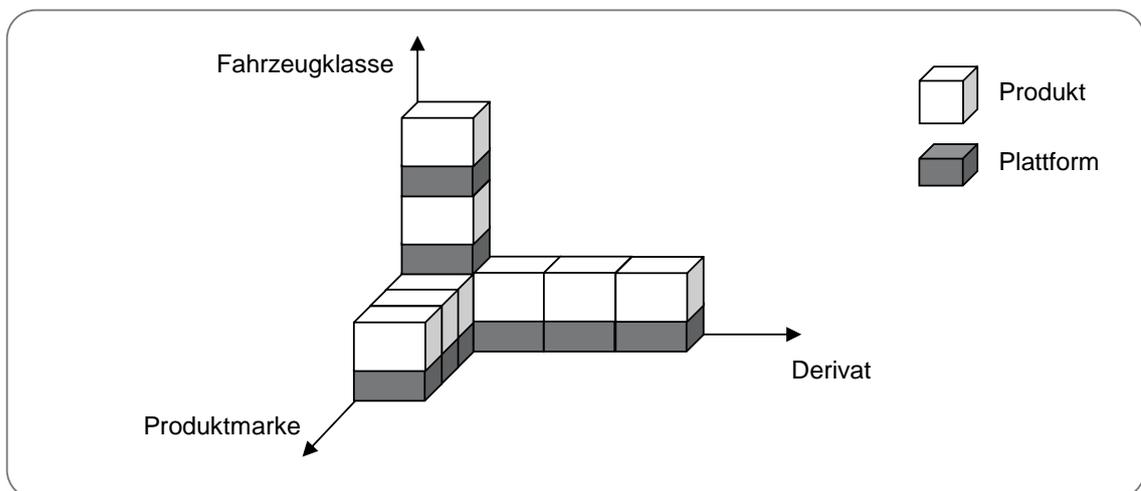


Bild 3.3: Multidirektionale Ableitung von Plattformkonzepten

Je nachdem welche Produkte ein Automobilhersteller anbieten will, können unterschiedliche Plattformkonzepte entwickelt werden. So kann eine Plattform innerhalb einer Fahrzeugklasse entwickelt werden. Dies entspricht den Fahrzeugderivaten, wie beispielsweise Limousine oder Coupé. Aber auch stärker differenzierte Derivate, wie beispielsweise Cabriolet, SUV oder Van, können sich eine gemeinsame Plattform teilen. Hierfür ist aber oftmals eine stärkere Differenzierung in der Bodengruppe erforderlich [Tesc-10].

Eine gemeinsame Plattform kann auch über verschiedene Fahrzeugklassen hinweg entwickelt werden. Allerdings ist dabei eine Differenzierung der Karosserie bezüglich Proportionen wichtig. Ein Fahrzeug der Kompaktklasse muss sich klar von einem Fahrzeug aus dem Luxussegment unterscheiden. Hierzu werden oftmals skalierbare Fahrzeugplattformen entwickelt [Tesc-10]. Durch eine Modularisierung von Komponenten über verschiedene Fahrzeugklassen hinweg werden neuartige Lösungen, die zunächst nur in höherpreisigen Fahrzeugklassen eingeführt werden, sehr schnell auch im Kleinwagensegment angeboten.

Große Automobilkonzerne bieten heute Fahrzeuge unterschiedlicher Marken an. Jede Marke hat dabei ein eigenes Image und differenziert sich von den restlichen Konzernmarken ab. Dennoch kann auch über Marken hinweg eine gemeinsame Fahrzeugplattform entwickelt werden [Tesc-10]. Wie bei allen Plattformkonzepten können auch hier Fahrzeuge mit kleinen Stückzahlen günstig entwickelt werden. Im automobilen Karosserierohbau werden die Karosseriestrukturen herstellerübergreifend analog zur Produktionssequenz in einzelne Module unterteilt. In Bild 3.4 ist eine Unterteilung einer Fahrzeugkarosserie in einzelne Module dargestellt. Das abgebildete Coupé teilt sich einige Module, wie beispielsweise das Frontmodul, den Vorbau und den Hauptboden mit der zugehörigen Limousine.

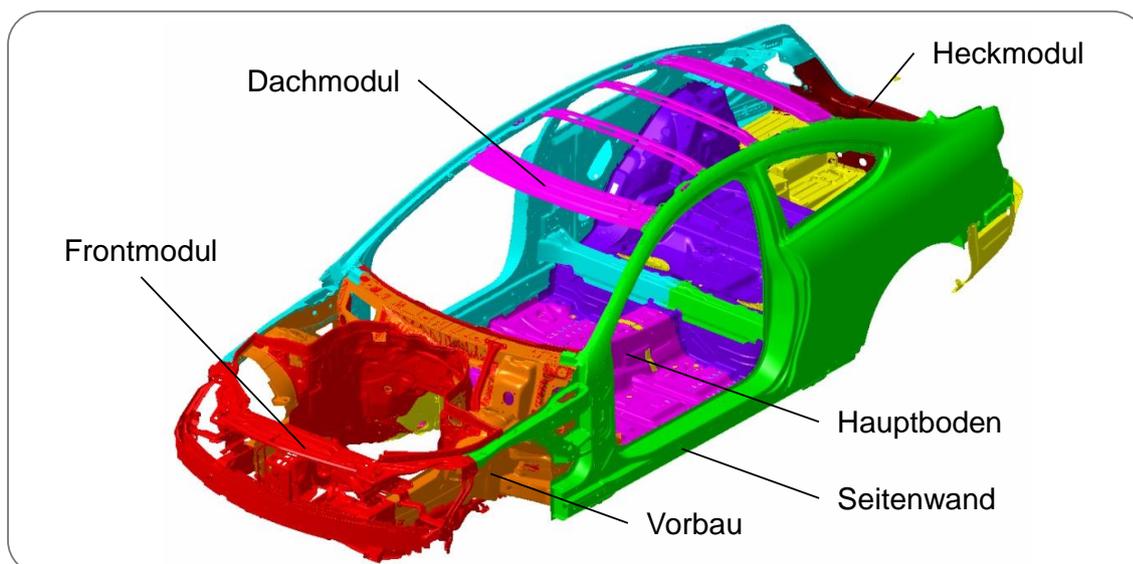


Bild 3.4: Modularisierte Fahrzeugkarosserie

Um die Vorteile von modularisierten Plattformkonzepten auszuschöpfen, werden bei der Entwicklung von Fahrzeugkarosserien verschiedene unternehmensinterne Standards beachtet. Die wichtigsten Standards sind:

- **Rohbaustandardkonzept:** Das Rohbaustandardkonzept legt fest, wie die Fahrzeugkarosserie strukturiert sein soll. Neben der Anzahl der Einzelkomponenten werden auch die Anbindungspunkte der einzelnen Komponenten definiert. Zusätzlich legt das Standardrohbaupkonzept die Materialien fest. Eine Karosserie aus Stahl ist in der Regel anders aufgebaut als eine Aluminiumkarosserie.
- **Standardisiertes Toleranzkonzept:** An das Rohbaustandardkonzept lehnt sich ein standardisiertes Toleranzkonzept an. So werden alle zu tolerierenden Elemente im Sinne von „Best Practice“ standardisiert.
- **Standardisiertes Spann- und Fixierkonzept:** Neben der Struktur der Fahrzeugkarosserie werden auch die Aufnahmepunkte, an denen die einzelnen Komponenten in der Vorrichtung liegen, standardisiert. Ein solches Konzept wird oftmals als Spann- und Fixierkonzept bezeichnet. Als Fixieren wird dabei das Festlegen der Position beziehungsweise der Orientierung eines Bauteils oder einer Baugruppe durch den Formschluss bezeichnet. Wird bei der Positionierung der Bauteile und Baugruppen zusätzlich eine Kraft benötigt (Kraftschluss), so wird dies als Spannen bezeichnet.

#### 3.1.3 Zusammenfassung

Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Kapitel „Standardisierung und Modularisierung in der Produktentwicklung“ lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Um die hohe Produktvarianz zu beherrschen, gibt es zahlreiche Ansätze, die mittels Standardisierung und Modularisierung von Produkten die unternehmensinterne Varianz reduzieren.
- Die Zusammenstellung der verschiedenen Definitionen der Modularisierung zeigt, dass ein modular aufgebautes Produkt viele Vorteile nicht nur für die Produktentwicklung, sondern auch für die

Produktion und Produktionsplanung hat (vgl. Tabelle 3.1). So sprechen DENCKER, PILLER/WARINGER, ARNOLD von „einbaufertigen Einheiten“, die direkt am Band montiert werden können.

- Standardisierung ist ein Widerspruch zu der Individualisierung. Deshalb müssen die Potenziale einer Produktionsanlage möglichst ausgeschöpft werden, um dem Kunden eine Vielzahl von verschiedenen Fahrzeugen zu bieten.
- Auch in der Automobilindustrie werden die Vorteile einer Standardisierung und Modularisierung erkannt und im Karosserierohbau konsequent eingesetzt. Es liegt auf der Hand, dass die Vorteile, die sich bei der Standardisierung und der Modularisierung von Produkten für die Produktentwicklung ergeben auch für die Produktion und Produktionsplanung erzielen lassen. Eine konsequente Standardisierung und Modularisierung bietet ebenfalls zahlreiche Vorteile für den Produktionsplanungsprozess.

## **3.2 Standardisierung und Modularisierung in der Produktionsplanung**

Nicht nur in der Produktentwicklung lassen sich Vorteile aus einer konsequenten Standardisierung und Modularisierung heben. Im Folgenden werden zunächst die Vorteile der Standardisierung und Modularisierung für die Produktion im Allgemeinen vorgestellt und später im Speziellen für den automobilen Karosserierohbau.

### **3.2.1 Standardisierung und Modularisierung in der Produktion**

Nicht nur in der Produktentwicklung gibt es Anstrengungen zur Modularisierung. Um die Vorteile der Standardisierung und Modularisierung auch in der Produktion sicherzustellen, gibt es auch Ansätze die Fabrik zu modularisieren.

Im Kapitel 3.1.1 wurde bereits erwähnt, dass eine Standardisierung von Produkten, beziehungsweise Produktkomponenten, einen positiven Effekt auf die Produktion hat. Dieser Effekt kann noch zusätzlich gesteigert werden, wenn auch die Betriebsmittel in der Produktion weitestgehend standardisiert

werden. So haben standardisierte Betriebsmittel Vorteile für die Instandhaltung, da sich mit der Anzahl an eingesetzten Betriebsmitteln auch die Anzahl der zu lagernden Ersatzteile reduziert. Standardisierte Betriebsmittel lassen sich bei Reuse-Projekten besonders gut wiederverwenden, da die Planung, die Produktion oder die Instandhaltung bereits Erfahrungen mit den Betriebsmitteln gesammelt haben.

Die Modularisierung von Fabriken hat das Ziel, die Übersichtlichkeit von Fertigungseinrichtungen zu erhöhen, die Planungsdauer zu verkürzen und den Planungsaufwand zu reduzieren [NoKL-05]. Insbesondere durch Standardisierung der Produktionsmodule sowie ihrer Schnittstellen wird sichergestellt, dass Module einfach austauschbar sowie reduzier- und erweiterbar sind. Einzelne Fabrikmodule sind auch die Grundlage für eine wandlungsfähige Fabrik. Veränderungen der Produktionssysteme können in gekapselten Modulen zielorientiert durchgeführt werden, ohne dass dadurch das Gesamtsystem in seiner Funktion gestört wird [NoKL-05].

Bevor eine Fabrik systematisch modularisiert werden kann, ist eine detaillierte Kenntnis erforderlich, aus welchen Bestandteilen eine Fabrik aufgebaut ist. NOFEN et al. definiert den Begriff Fabrikelement wie folgt [NoKL-05]:

„Unter einem Fabrikelement wird eine fabrikplanerisch gestaltbare physische oder nicht-physische Einheit einer Fabrik verstanden, die so weit detailliert ist, dass sie eindeutig einem der drei Gestaltungsbereiche einer Fabrik (Betriebsmittel, Organisation sowie Raum und Gebäudetechnik) zugeordnet werden kann. Zum Zweck der konkreten Ausplanung kann ein Fabrikelement in weitere Teilelemente zerlegt werden, allerdings nur so weit, wie es aus der Fabrikplanung zweckmäßig ist.“ [NoKL-05].

Fabrikelemente können, wie in Tabelle 3.3 dargestellt, in die Gestaltungsbereiche Betriebsmittel (B), Organisation (O) und die Raum- und Gebäudetechnik (R) eingeteilt werden.

|                | Gestaltungsbereiche   |  |   |
|----------------|---|--|---|
|                | Betriebsmittel (B)  | Organisation (O)   | Raum- und Gebäudetechnik (R)  |
| Fabrikelemente | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fertigungseinrichtungen</li> <li>• Montageeinrichtungen</li> <li>• Logistikeinrichtungen</li> <li>• Qualitätssicherungseinrichtungen</li> <li>• Informations-/Kommunikationseinrichtungen</li> <li>• Übergeordnete Systeme</li> <li>• Ver-/Entsorgungseinrichtungen</li> <li>• Mobiliar</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Unternehmensstrategie</li> <li>• Logistikkonzept</li> <li>• Prozessgestaltung</li> <li>• Aufbauorganisationsgestaltung</li> <li>• Qualitätssicherungskonzept</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grundstück</li> <li>• Baukonstruktion</li> <li>• Technische Anlagen</li> <li>• Außenanlagen</li> <li>• Ausstattung</li> <li>• Konzept</li> </ul> |

Tabelle 3.3: Gestaltungsbereiche und Elemente einer Fabrik [NoKL-05]

Die vorgestellten Fabrikelemente lassen sich nach [NoKL-05] in sogenannte Fabrikmodule zusammenfassen. Diese sind gekennzeichnet durch folgende Eigenschaften:

- Ein Fabrikmodul muss eine definierte Aufgabe erfüllen.
- In einem Fabrikmodul können Elemente aus den drei Gestaltungsbereichen enthalten ein.
- Submodule können in einem Fertigungsmodul enthalten sein.
- Ein Fertigungsmodul wird durch Mitarbeiter betrieben.
- Ein Fabrikmodul ist ein technisch, organisatorisch und räumlich abgegrenzter Bereich der gesamten Fabrik.
- Ein Fabrikmodul wird über definierte Schnittstellen mit allen für die Erfüllung der Aufgabe notwendigen Flüssen versorgt (Information, Material, Energie, etc.).
- Ein Fabrikmodul verfügt über einen definierten Grad an Wandlungsfähigkeit.
- Fabrikmodule können in der Planung wiederverwendet werden.

In Anlehnung an die vorgestellten Fabrikmodule wird für diese Arbeit der Begriff Produktionsmodul wie folgt definiert:

**Definition 3.2:** *Ein Produktionsmodul ist ein technisch, organisatorisch und räumlich abgegrenzter Bereich einer Produktionsanlage, der bei der Planung einer neuen Anlage immer wieder herangezogen werden kann.*

Wird eine Fabrik aus einzelnen Modulen gebildet, so muss sichergestellt werden, dass die einzelnen Module untereinander kompatibel sind, die Module in das Fabriklayout passen und die Produkte auf den Modulen gefertigt werden können. Um diese Anforderungen sicherzustellen, hat BREITENBACH ein dreistufiges Integrationsvorgehen definiert [Brei-05]:

Mit der Geometrischen Integration (GI) wird überprüft, ob ein Modul in den Bauraum, den eine Fabrik, beziehungsweise das übergeordnete Modul zur Verfügung stellt, passt. Ein Modul belegt eine definierte Fläche auf dem Hallenboden und wird über Leitungen, Anschlüsse etc. mechanisch mit den übergeordneten und den benachbarten Modulen verbunden. Die Anforderungen und Randbedingungen der GI-Schnittstelle sind zum Beispiel Bauvolumen und Stellflächen, Rohrdurchmesser, Kabelquerschnitte sowie die Art und Position von Verbindungen (z. B. Stecker) [Brei-05].

Die Funktionale Integration (FI) fasst sämtliche Flüsse zwischen den Modulen zusammen. Beispiele für Flüsse zwischen den Modulen können sein: Informations-, Kommunikations-, Material-, Fertigungs-, Medien- und Personalfluss [Brei-05].

Mit der Produktionstechnische Integration (PTI) wird untersucht, ob das Produkt innerhalb des Moduls gefertigt werden kann. Da sich ein Produkt im Laufe des Produktentstehungsprozesses verändert, können Konstruktionsänderungen am Produkt neue Vorgaben an die einzelnen Module und Submodule bedeuten. Wird beispielsweise die Produktgeometrie verändert, so hat dies unter Umständen Einfluss auf Greifer und die Spann- und Fixiervorrichtung [Brei-05].

Die geometrischen, funktionalen und produktionstechnischen Schnittstellen zwischen den Modulen und ihren übergeordneten Modulen sind in Bild 3.5 schematisch dargestellt.

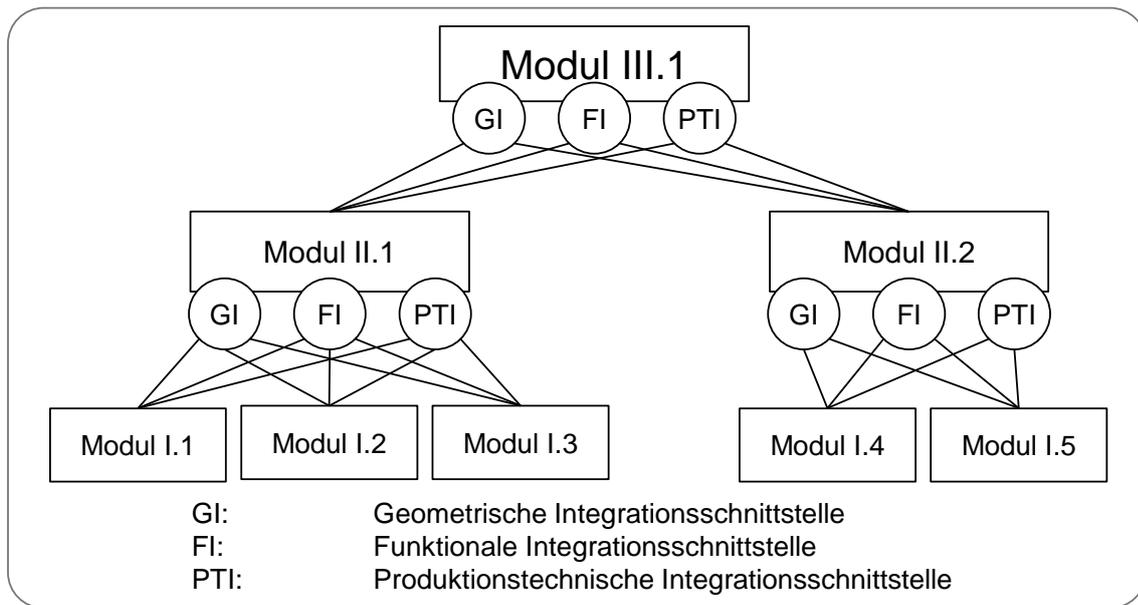


Bild 3.5: Schnittstellenklassifikation innerhalb der Modul-Hierarchie [Brei-05]

Als Beispiel für Schnittstellen eines Produktionsmoduls ist in Bild 3.6 schematisch eine Klebezelle aus der Automobilindustrie dargestellt:

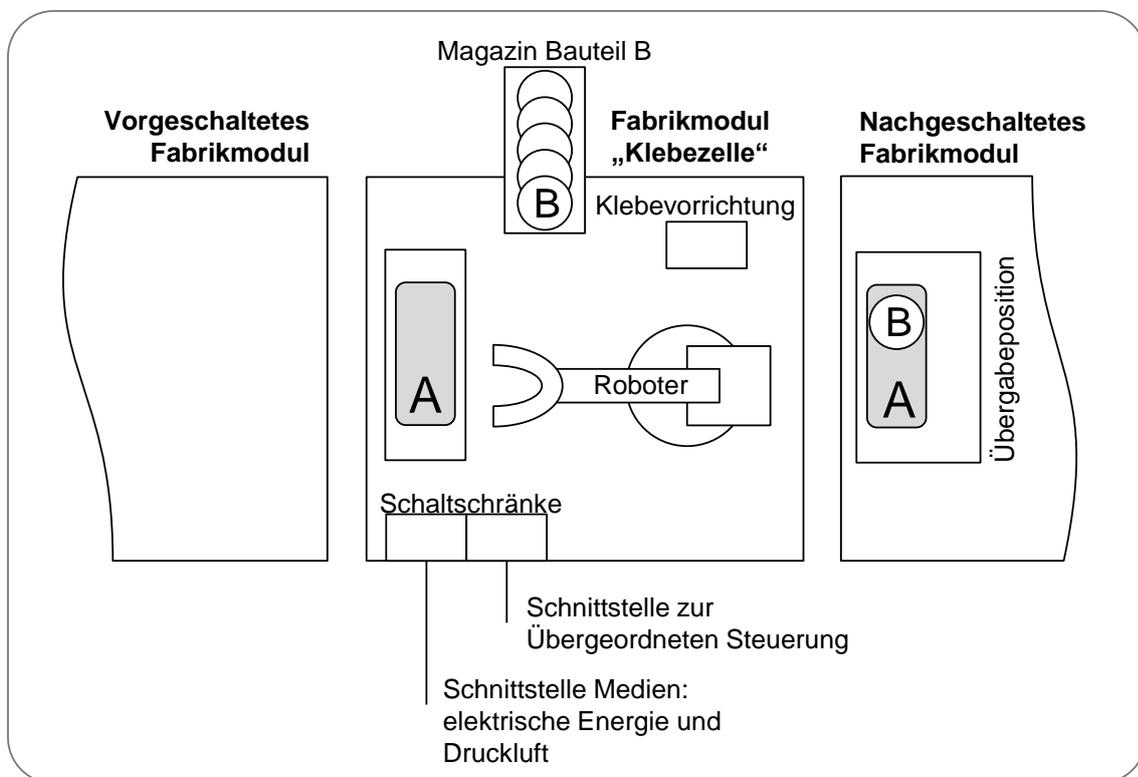


Bild 3.6: Schematische Darstellung eines Fabrikmoduls „Klebezelle“ in Anlehnung an [Brei-05]

In diesem Beispiel besteht das Produktionsmodul aus einem Industrieroboter, der die Bauteile A und B aufnehmen kann. Der Roboter nimmt Bauteil B aus dem Magazin auf, trägt den Kleber an der Klebevorrichtung auf und positioniert das Bauteil B auf dem Bauteil A, das sich in der Übergabevorrichtung befindet. Zuletzt nimmt der Roboter den Zusammenbau auf und legt ihn in die Übergabevorrichtung der nächsten Station. Dieses einfache Beispiel beinhaltet viele Schnittstellen:

- Schnittstelle zur übergeordnete Steuerung,
- Medienschnittstelle: elektrische Energie und Druckluft,
- Schnittstelle zum Fertigungsfluss (Übergabepositionen),
- Schnittstellen zum Materialfluss (Magazin).

Eine modularisierte Fabrik lässt sich aufgrund der Standardisierung nicht nur einfacher und leichter planen, sondern ist auch die Grundlage für die Wandlungsfähigkeit einer Fabrik. Eine wesentliche Voraussetzung einer flexiblen und wandlungsfähigen Fabrik ist die Modularisierung von Fabrikstrukturen. Dazu müssen die einzelnen Module bestimmte, wandlungsbefähigende Eigenschaften aufweisen [Hern-03]. Die wichtigsten Wandlungsbefähiger sind in Bild 3.7 zusammengefasst.

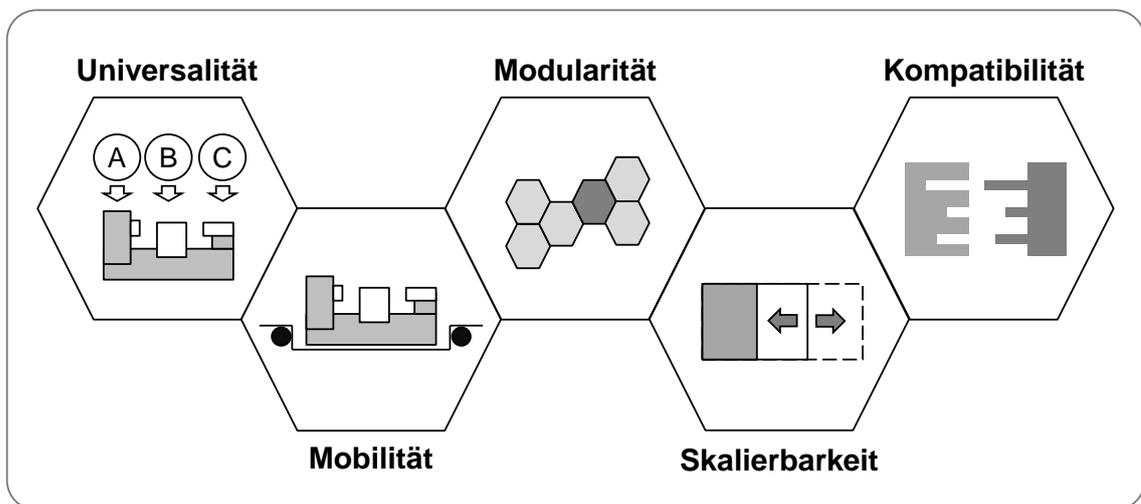


Bild 3.7: Wandlungsbefähiger im Kontext einer modularen Fabrik in Anlehnung an [Nofe-06][Hern-03]

Universalität ist die Eigenschaft von Fabrikmodulen, als auch von Fabrikelementen, für unterschiedliche Aufgaben, Anforderungen und Funktionen in Bezug auf Produkt, Technologie und Organisation einsetzbar zu sein. Hierzu

müssen die Modulbestandteile entsprechend gestaltet werden, wobei in vielen Fällen auch eine Überdimensionierung der Modulelemente zur Erzielung einer hohen Universalität sein kann [Nofe-06].

Unter Mobilität wird die örtliche Beweglichkeit von Produktionsmodulen beziehungsweise von Fabrikelementen verstanden. Als einfaches Beispiel kann ein Betriebsmittel, das sich auf Rollen bewegt, aufgeführt werden [Nofe-06].

Nach [Nofe-06] wird unter Modularität die Art und Weise verstanden, wie die innere Struktur eines Fabrikelements oder eines Fabrikmoduls aufgebaut ist. Ein Fabrikmodul besteht aus möglichst standardisierten, vorgeprüften und funktionsfähigen Komponenten. Fabrikmodule sind demnach „autonom agierende Einheiten oder Elemente, die eine hohe und aufwandsarme Austauschbarkeit und Kompatibilität untereinander gewährleisten“ [Hern-03].

Unter Skalierbarkeit von Produktionsmodulen wird die technische, räumliche und personelle Erweiter- und Reduzierbarkeit von den Produktionsanlagen verstanden. Als Beispiel hierfür können flexible Arbeitsmodelle oder Erweiterungsflächen in bestehenden Fabriken aufgeführt werden [Nofe-06].

Kompatibilität ist in erster Linie die Vernetzungsfähigkeit von Produktionsmodulen beziehungsweise von Betriebsmitteln in Hinblick auf Material, Medien und Energie. Exemplarisch können hierfür standardisierte Software-, Energieversorgungs- und Materialversorgungsschnittstellen genannt werden [Nofe-06].

#### **3.2.2 Standardisierung und Modularisierung im Karosserierohbau**

Nicht nur bei der Entwicklung von Fahrzeugkarosserien, sondern auch bei deren Produktion werden die Vorteile der Standardisierung und Modularisierung genutzt. So hilft beispielsweise die Standardisierung von Betriebsmitteln, die Werkzeugvielfalt in den Fabriken zu reduzieren und damit auch Kosten in der Lagerhaltung zu senken. In der Automobilindustrie, insbesondere dem Karosserierohbau, ist die Standardisierung sehr verbreitet. So sind bei den meisten Automobilherstellern Schweißzangen, Roboter aber auch Spann- und Fixiervorrichtungen standardisiert. Dies hat viele Vorteile auch

für die Entwicklung von neuen Produkten, da die standardisierten Betriebsmittel bei der Produktentwicklung berücksichtigt werden können. Dies ist unvermeidlich, wenn eine Produktionsanlage wiederverwendet werden soll. Allerdings gibt es noch nicht genügend Unterstützung um die standardisierten Betriebsmittel in dem Produktentwicklungsprozess zu berücksichtigen.

Um die Produktionsplanung effizienter zu gestalten, wurde in den letzten Jahren begonnen, die Produktionsanlagen im Karosserierohbau zu modularisieren. Standardisierte Betriebsmittel, die sich in vergangenen Projekten bewährt haben, werden je nach der gewünschten Technologie zu einem Produktionsmodul zusammengefasst und in eine Datenbank abgelegt. Zu einer bestimmten Technologie, wie beispielsweise dem Widerstandsschweißen, kann es mehrere Produktionsmodule geben, die je nach Taktzeit oder Automatisierungsgrad der Anlage zum Einsatz kommen können. Ein Produktionsmodul kann als eine Art Musteranlage gesehen werden, deren Komponenten aufeinander abgestimmt sind und sich in der Vergangenheit bewährt haben. Zudem sind auch das Layout und die Kosten dieser Anlagen bekannt. Die bekannten Informationen, wie Geometrie, Flächenbedarf oder Kosten eines bestimmten Produktionsmoduls werden ebenfalls in der Datenbank gespeichert.

Durch vordefinierte Produktionsmodule, die in einer Datenbank abgelegt sind, ergeben sich viele Vorteile für die Produktionsplanung. Der Produktionsplaner kann bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt im Produktionsplanungsprozess sehr schnell ein erstes Block- beziehungsweise Groblayout (vgl. Kapitel 2.3.3) der Anlage aufstellen und bereits den Flächenbedarf und die Kosten der Anlage abschätzen. Ein weiterer Vorteil einer solchen Planung ist die Reduzierung von Planungsfehlern, da sich die Betriebsmittel in vergangenen Projekten bewährt haben.

### **3.2.3 Zusammenfassung**

Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Kapitel „Standardisierung und Modularisierung in der Produktionsplanung“ lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Standardisierung und Modularisierung bieten nicht nur in der Produktentwicklung viele Vorteile, sondern auch in der Produktion und Produktionsplanung. Standardisierung und Modularisierung senken nicht nur die Kosten für Lagerhaltung, sondern sind auch die

Grundlage für eine effiziente Produktionsplanung. Durch vordefinierte Produktionsmodule lassen sich in frühen Phasen erste Aussagen bezüglich Kosten oder Platzbedarf machen.

- Eine modularisierte Produktion ist die Grundlage für eine wandlungsfähige Fabrik. Universalität, Mobilität, Modularität, Skalierbarkeit und Kompatibilität sind die Wandlungsbefähiger einer Produktionsanlage.
- Im industriellen Umfeld werden allerdings noch nicht alle Potenziale der Modularisierung ausgeschöpft. Zwar kann bereits mit vordefinierten Produktionsmodulen die Produktionsplanung in den frühen Phasen des Anlagenentwicklungsprozesses unterstützt werden, allerdings fehlt die methodische Berücksichtigung der standardisierten Produktionsmodule in der Produktentwicklung.

### **3.3 Digitale Fabrik**

Um die im Vorfeld beschriebenen Herausforderungen der Produktionsplanung und ihrer Zusammenarbeit mit der Produktentwicklung erfolgreich zu begegnen, wurden in den letzten Jahren zahlreiche Lösungen entwickelt, die unter dem Begriff „Digitale Fabrik“ zusammengefasst werden können. In diesem Kapitel werden die Methoden der Digitalen Fabrik, insbesondere diejenigen, die in der Automobilindustrie zum Einsatz kommen, näher vorgestellt. Zum Schluss werden noch die gegenwärtigen Defizite und die sich daraus ergebenden Handlungsfelder identifiziert.

#### **3.3.1 Begriffsbestimmung und Abgrenzung**

Den Begriff der Digitalen Fabrik gibt es schon seit den 1990er Jahren. Seitdem sind in der Literatur grundlegende aber auch teilweise sich widersprechende Definitionen des Begriffs „Digitale Fabrik“ zu finden [Scha-07]. Aus diesem Grund werden zunächst einige ausgewählte Definitionen vorgestellt. KRAUSE bezeichnet die Digitale Fabrik als informationstechnische Umsetzung aller betrieblichen Vorgänge. Dabei werden die Fabrikfunktionen nicht zwingend automatisiert modelliert, sondern werden rechnerunterstützt durch die entsprechenden Planer aufgebaut. Ziel dabei ist es, die Abläufe in der

realen Fabrik transparenter zu gestalten und damit die Fabrikabläufe transparenter darzustellen [Krau-01].

Für WESTKÄMPER et al. ist die Digitale Fabrik ein Abbild der realen Fabrik, welches die Strukturen und Fertigungsprozesse visualisiert, simuliert und dadurch erlebbar macht [WeBK-03]. Die Visualisierung aller Gesamtmerkmale und aller Fertigungsprozesse einer Fabrik hat auch bei WIENDAHL et al. und DOMBROWSKI et al. eine zentrale Bedeutung [WiHH-02][DoTB-01]. Für SCHUH et al. ist die Digitale Fabrik ein Modell, in dem alle Prozesse, Produkte und Ressourcen einer Fabrik abgebildet sind [SKSR-02]. Im Rahmen dieser Arbeit wird folgende Definition nach der VDI-Richtlinie 4499 Blatt 1 herangezogen:

**Definition 3.3:** „Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen (u. a. der Simulation und der dreidimensionalen Visualisierung), die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.

*Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“ [VDI-4499]*

Die Definition nach der VDI-Richtlinie 4499 geht nicht nur auf digitale Modelle, Methoden und Werkzeuge ein, mit denen eine Fabrik visualisiert und simuliert werden kann, sondern auch auf den Aspekt der ganzheitlichen Planung, welche auch für diese Arbeit von großer Bedeutung ist.

### **3.3.2 Anwendungsgebiete der Digitalen Fabrik**

Der Fokus der Digitalen Fabrik liegt, wie in Bild 3.8 dargestellt ist, auf der Produktionsplanung und der Fabrikgestaltung, die frühzeitig und sorgfältig mit allen Unternehmensbereichen abgestimmt ist [VDI-4499].

Unter Produktionsplanung wird in diesem Zusammenhang sowohl die Prozessplanung als auch die Planung der Produktionssysteme und Ressourcen verstanden. Dabei sollen Produkte, Fertigungsverfahren und Produktionsabläufe bereits in einer frühen Entwicklungsphase abgesichert werden.

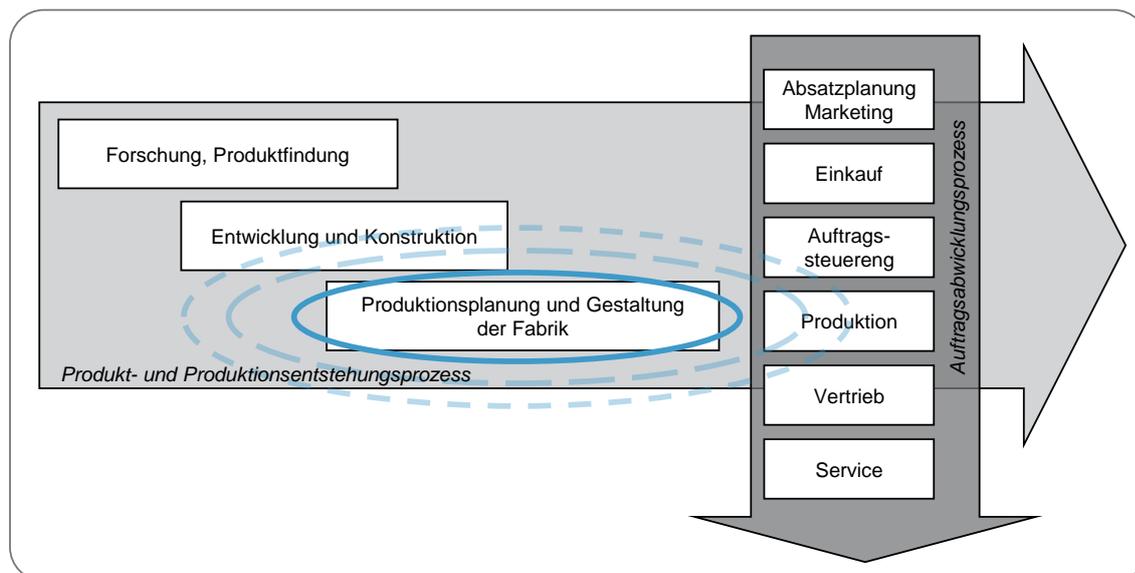


Bild 3.8: Fokus der Digitalen Fabrik im Strahlennetz der Unternehmensprozesse [VDI-4499]

Nicht nur die gesamte Produktionsentwicklung wird durch digitale Modelle begleitet und beschleunigt, die Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik kommen auch beim Produktionsanlauf und dem Fabrikbetrieb zum Einsatz [VDI-4499]. Im Folgenden werden die wichtigsten Anwendungsgebiete der Digitalen Fabrik vorgestellt [VDI-4499][Kühn-06]:

**Produktentwicklung:** Die Produktentwicklung ist die Grundlage der Produktionsplanung und damit auch ein wichtiger Lieferant von Eingangsdaten für die Digitale Fabrik. Dies sind vor allem die dreidimensionalen Modelle der Produkte, deren Struktur und ihre Funktionen.

**Produktionsplanung:** Die Produktionsplanung ist heute das wichtigste Anwendungsgebiet der Digitalen Fabrik. In der Produktionsplanung wird die Digitale Fabrik vor allem eingesetzt, um die Funktionsweise der Produktion zu erproben und zu verbessern, bevor Investitionsentscheidungen getroffen werden [Zafi-14].

**Produktionsanlauf:** Eine reibungslose Inbetriebnahme einer Produktionsanlage hängt entscheidend von der Qualität der vorausgegangenen Produktionsplanung ab. Mit den Werkzeugen der digitalen Fabrik können schon vorab viele Probleme identifiziert und behoben werden. Somit kann die geplante Ausbringungsmenge schneller erreicht werden.

**Produktionsbetrieb:** Während der Produktion laufen im Unternehmen viele technische und kaufmännische Prozesse ab. Die Werkzeuge und Methoden der Digitalen Fabrik können bei der kontinuierlichen Verbesserung der Produktion, der automatisierten Erstellung von SPS-, Roboter- und NC-Programmen, sowie der Auftragsabwicklung unterstützen. In Zukunft ist zu erwarten, dass die Werkzeuge der Digitalen Fabrik noch stärker im laufenden Produktionsbetrieb eingesetzt werden [Saue-05].

**Auftragsabwicklung:** Das Auftragsmanagement hat die Aufgabe durch Fertigungsaufträge die Produktion zu steuern und zu überwachen. Hierfür sind aus der Entwicklung die Stammdaten, Stücklisten und Zeichnungen sowie aus der Arbeitsvorbereitung die Arbeitsvorgänge und -schritte notwendig. Diese Daten sind auch in den Modellen der Digitalen Fabrik enthalten und können auch der Steuerung und Überwachung der Fertigungsaufträge dienen [Pens-04].

### 3.3.3 Ziele der Digitalen Fabrik

Bezüglich der Ziele und Nutzungspotenziale der Digitalen Fabrik herrscht sowohl im industriellen als auch dem wissenschaftlichen Umfeld große Einigkeit: Es sollen die betriebswirtschaftlichen, organisatorischen und technischen Prozesse im Unternehmen verbessert werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Ziele der Einführung und Nutzung der Digitalen Fabrik vorgestellt [VDI-4499]:

**Wirtschaftlichkeit:** Wesentliche wirtschaftliche Nutzungspotenziale der Digitalen Fabrik liegen in der Prozessbeherrschung und insbesondere der frühzeitigen Absicherung der Fertigungsprozesse. Des Weiteren lässt sich mithilfe der Digitalen Fabrik Zeit in der Produktentwicklung und Produktionsplanung einsparen. Die Entwicklungszeit wird konkret durch folgende Aspekte reduziert [Kühn-06]:

- Parallelisierung der einzelnen Phasen, im Sinne von Concurrent Engineering, aufgrund der gemeinsamen Nutzung von digitalen Modellen,
- Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklung, Produktionsplanung und Produktion,

- redundanzfreie, aktuelle und richtige Datenversorgung der einzelnen Bereiche auf Grundlage einer gemeinsamen Datenbank.

Darüber hinaus helfen die Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik Varianten und Alternativen zu bewerten und somit Änderungskosten zu reduzieren.

**Qualität:** Die Methoden der Digitalen Fabrik können zur Harmonisierung und Optimierung der Produktionsplanungsprozesse im Unternehmen beitragen und dadurch die Qualität und den Reifegrad der Planung erhöhen. Dazu tragen sowohl ein durchgängiger Planungsprozess, der auf eine gemeinsame Datenbasis zugreift, als auch eine durchgängig integrierte Ablauforganisation der Produktentwicklung und der Produktionsplanung bei. Zudem wird die Prozessqualität durch die Transparenz der Planung erhöht [Kühn-06].

**Kommunikation:** Die Digitale Fabrik kann einen Beitrag leisten, alle an der Planung einer Produktionsanlage beteiligten Bereiche zusammenzuführen und Probleme gemeinsam zu lösen. Dabei kann die Digitale Fabrik folgende Beiträge zur Kommunikationsunterstützung leisten [Kühn-06]:

- Einheitliche und durchgängige Planungsdaten,
- Visualisierung von komplexen Fertigungsabläufen,
- Überwindung räumlicher Grenzen mittels verteilter und standortübergreifender Planung,
- Unterstützung bei der Entscheidungsfindung.

Für den durchgängigen Einsatz der Modelle der Digitalen Fabrik ist eine unternehmensweite Standardisierung der IT-Werkzeuge notwendig, damit möglichst einfach Daten zwischen den einzelnen Unternehmensbereichen ausgetauscht werden können.

**Standardisierung:** Mithilfe der Digitalen Fabrik können die Planungsprozesse standardisiert werden und Planungsergebnisse wiederverwendet werden. Dabei verfolgt die Digitale Fabrik folgende Teilziele [Kühn-06]:

- Aufbereitung und Wiederverwendung von Best Practice Lösungen,
- Verwendung der Best Practice Lösung als verbindlicher Standard für zukünftige Projekte,
- Wiederverwendung von Teilmodellen der Digitalen Fabrik im Sinne von Bausteinen beziehungsweise von Modulen einer Fabrik.

**Wissenserwerb und -erhalt:** Die Digitale Fabrik schafft Voraussetzungen dafür, dass vorhandenes Wissen bei neuen Planungsprojekten wiederverwendet werden kann. Konkret unterstützt die Digitale Fabrik durch folgende Aspekte [Kühn-06]:

- Standardisierung von Planungsprozessen,
- Reduzierung von Planungskosten und -zeit durch Wiederverwendung von Modellen und Teilergebnissen,
- Erhöhung der Planungssicherheit durch Analyse von möglichen Planungsalternativen,
- Effiziente Einarbeitung von Planungsmitarbeitern.

### 3.3.4 Modelle der Digitalen Fabrik

Um die oben genannten Ziele der Digitalen Fabrik zu erreichen, sollen in diesem Abschnitt die weitverbreiteten Modelle, Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik näher vorgestellt werden. Die Daten und Modelle der Digitalen Fabrik werden häufig nach Produkt, Prozess und Ressource strukturiert. Produktdaten fassen alle Informationen, wie beispielsweise 3D-Modelle oder Stücklisten, zu allen Produkten und ihren Varianten zusammen. Die durch die Produktentwicklung erzeugten Daten sind üblicherweise baumartig und hierarchisch strukturiert. Die Fertigungsplanung arbeitet vorwiegend mit Prozessdaten, die sie aber nach Fertigungsaspekten, wie beispielsweise der Montagereihenfolge, strukturiert. Die Betriebsmittelplaner arbeiten mit Betriebsmitteldaten, dies können je nach Produktionsverfahren Betriebsmittel, Roboter oder Werker sein [MaMe-09]. Ziel der Digitalen Fabrik ist ein integriertes Datenmodell.

In der Digitalen Fabrik kann, je nach Anwendungsfall, eine Vielzahl an digitalen Modellen eingesetzt werden, die unterschiedliche Aspekte, Umfänge und Detaillierungsgrade haben können. Grundsätzlich lassen sich die Modelle der Digitalen Fabrik in statische und dynamische Modelle unterteilen [Kühn-06]. In Bild 3.9 ist eine Klassifizierung der digitalen Modelle dargestellt.

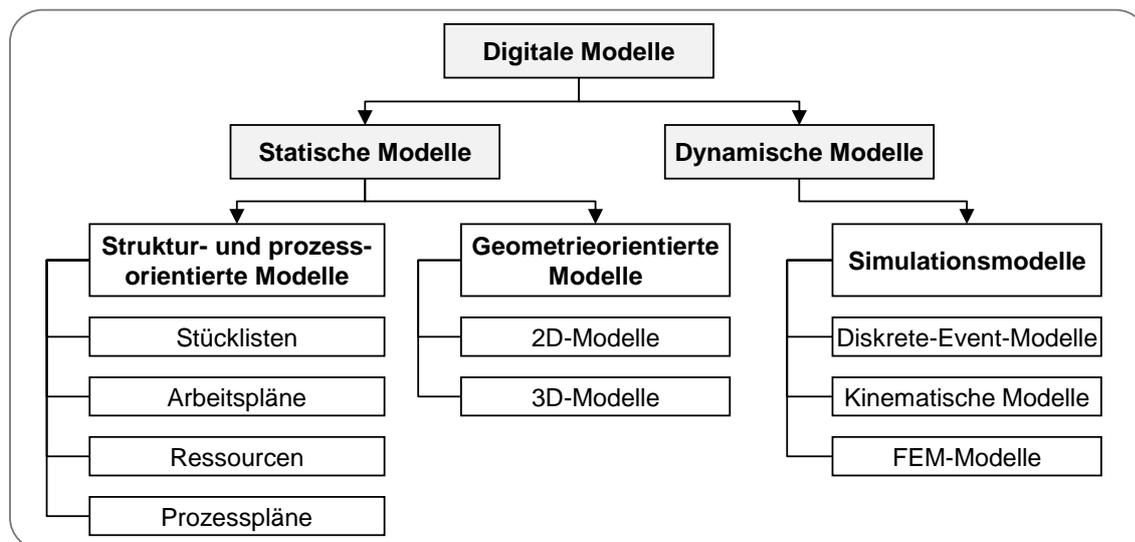


Bild 3.9: Klassifikation digitaler Modelle in der Digitalen Fabrik nach [Kühn-06]

Digitale Modelle können hinsichtlich des zeitlichen Systemverhaltens in statische und dynamische Modelle unterteilt werden. Während sich hinter dynamischen Modellen hauptsächlich Simulationsmodelle wie Kinematik- oder FEM-Modelle verbergen, können statische Modelle noch einmal in geometrieorientierte und struktur- beziehungsweise prozessorientierte Modelle unterteilt werden. Um ein komplexes Produktionssystem zu beschreiben, werden häufig mehrere miteinander vernetzte Modelle verwendet [Kühn-06].

### 3.3.5 Digitale Fabrik im Karosserierohbau

Die Digitale Fabrik kommt im industriellen Umfeld sehr häufig zum Einsatz [BrSp-09]. Im Rahmen dieser Arbeit werden die wichtigsten Anwendungsfelder der Digitalen Fabrik im automobilen Karosserierohbau näher vorgestellt. In Bild 3.10 ist, in Anlehnung an die [VDI-4499], der durchgängige Einsatz von Methoden und Werkzeugen der Digitalen Fabrik in der automobilen Rohbauplanung dargestellt.

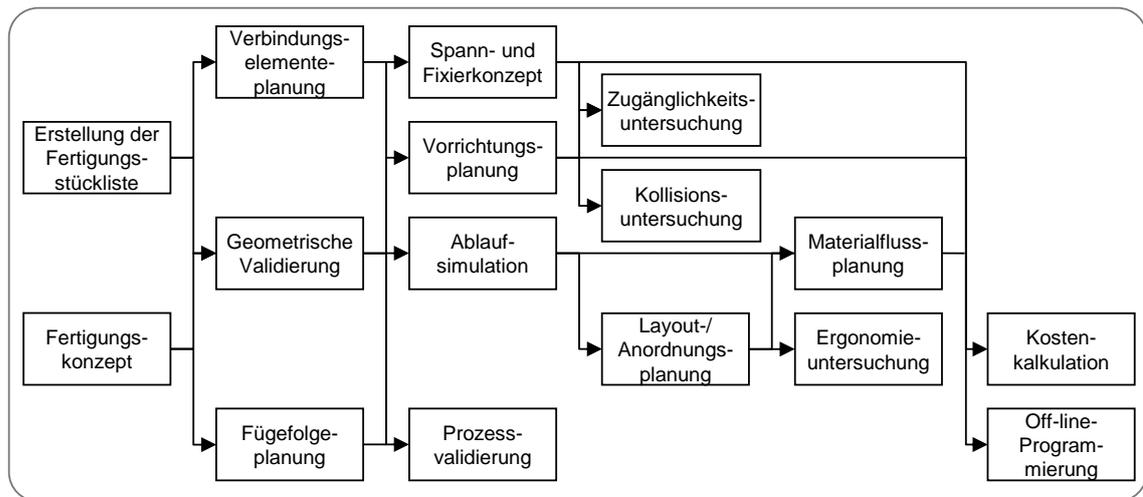


Bild 3.10: Einsatzgebiete der Digitalen Fabrik in der Rohbauplanung [VDI-4499]

Das Ziel der Digitalen Fabrik in der Karosserierohbauplanung ist es, die Fertigung bereits ab der Strategiephase (vgl. Bild 2.6) als Computermodell abzubilden. Dadurch soll die geplante Produktion nach technischen und betriebswirtschaftlichen Kriterien ausgelegt, bewertet und optimiert werden [BrGW-11]. In frühen Phasen bestehen die Modelle überwiegend aus alphanumerischen Informationen, die in Bild 3.9 den struktur- und prozessorientierten Modellen zugeordnet werden können. Gerade in der frühen Phase des Produktentstehungsprozesses spielen die struktur- und prozessorientierten Modelle eine wichtige Rolle. Einer der ersten Schritte im Produktionsplanungsprozess ist das Festlegen der Fügereihenfolge. Hierbei wird zunächst alphanumerisch geplant. Die Ergebnisse werden für die weiteren Planungsprozesse, wie beispielsweise die Prozessplanung oder die Ablaufsimulation genutzt. Sobald die Konstruktion einen bestimmten Reifegrad erreicht, muss der geplante Fügeprozess dreidimensional bezüglich der Baubarkeit abgesichert werden. Hierzu werden beispielsweise Einfahrsimulationen durchgeführt. Sobald die ersten dreidimensionalen Modelle der Spann- und Fixiervorrichtungen, der Betriebsmittel und Anlagen vorhanden sind, werden diese in die Einfahrsimulation integriert. Je höher der Reifegrad des Produkts und der Anlage ist, desto genauer kann eine digitale Absicherung eines Fertigungsprozesses durchgeführt werden. Dies gilt nicht nur für die Einfahrsimulationen, sondern auch für alle anderen Absicherungsprozesse im automobilen Karosserierohbau wie beispielsweise die Layout-Planung, die Schweißsimulationen oder die Materialflusssimulationen [BrGW-11]. In

Bild 3.11 ist die Absicherung einer Schweißverbindung zu verschiedenen Zeitpunkten im Produktionsplanungsprozess abgebildet. In einer sehr frühen Phase lässt sich die Erreichbarkeit eines Schweißpunkts durch standardisierte Schweißzangen absichern. Ist das Spann- und Fixierkonzept bekannt, so kann die vereinfachte Spann- und Fixiereinheit in die Absicherung mitberücksichtigt werden. Eine vollständige Absicherung im ausdetaillierten Anlagenumfeld kann erst sehr spät im Produktentwicklungsprozess durchgeführt werden.

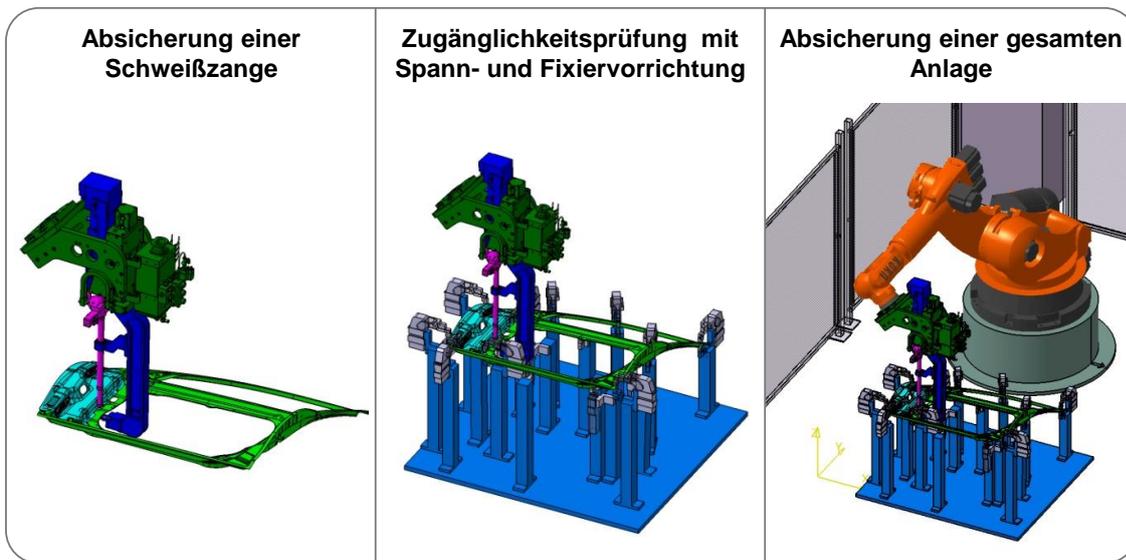


Bild 3.11: Absicherung der Zugänglichkeit eines Schweißpunkts

Beim Einsatz der Digitalen Fabrik in der Automobilindustrie ist der Reifegrad der Modelle sehr wichtig. Um auch in möglichst frühen Phasen des Planungsprozesses aussagekräftige Untersuchungen durchführen zu können, muss der Reifegrad der Modelle möglichst hoch sein. Wie bereits im Kapitel 2.3.3 beschrieben wurde, werden die Anlagen sehr spät im Planungsprozess von den Anlagelieferanten ausdetailliert. Um dennoch möglichst frühzeitig die Planung mit den Werkzeugen der Digitalen Fabrik absichern zu können, wird in der Automobilindustrie, wenn möglich, auf die Modelle vorhergehender Baureihen und auf standardisierte Modelle zurückgegriffen. Im Sinne von „Best Practice“ kann ein Modell eines sich bereits bewährten Produktionssystems auch für die Absicherung des neuen Produkts und dessen Fertigungsprozesse genutzt werden. Der Nutzen von standardisierten Betriebsmitteln hat nicht nur technische und wirtschaftliche Vorteile, sondern erhöht

auch den Reifegrad des Planungsprozesses. Das Heranziehen von standardisierten Betriebsmitteln, die üblicherweise in Datenbanken abgelegt sind und somit für die Absicherungen zur Verfügung stehen, kann die Aussagekraft einer Untersuchung erhöhen, da es im Gegensatz zu neu zu konstruierenden Betriebsmitteln bereits Modelle der standardisierten Betriebsmittel gibt. Viele Betriebsmittel, vor allem produktberührende Betriebsmittel, wie beispielsweise Spann- und Fixiervorrichtungen, werden aber relativ spät im Planungsprozess entwickelt und konstruiert. Um diese dennoch möglichst frühzeitig in Absicherungen berücksichtigen zu können, werden häufig vereinfachte Konzeptmodelle erstellt, die für frühzeitige Absicherungen herangezogen werden können. Diese Konzeptmodelle sind nicht nur für Absicherungen notwendig, sondern bilden die Grundlage für die Konstruktion der Prototypenwerkzeuge und die Entwicklung der Serienbetriebsmittel [Abul-08].

### **3.3.6 Zusammenfassung**

Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Kapitel „Digitale Fabrik“ lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik bieten dem Produktionsplaner Unterstützung bei der Auslegung und Absicherung von Produktionsanlagen. Eine Vielzahl von Modellen und Methoden ist bereits verfügbar.
- Ziel der Digitalen Fabrik ist die frühzeitige Absicherung der Fertigungsprozesse. Damit soll der Reifegrad der Planung erhöht werden. Die Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik sollen die Kommunikation zwischen den verschiedenen Unternehmensbereichen verbessern und die Standardisierung von Anlagen vorantreiben. Erkenntnisse aus bereits vorhandenen Produktionsanlagen sollen in die Planung von neuen Produktionsanlagen einfließen.
- In der Automobilindustrie werden bereits heute diese Möglichkeiten der Digitalen Fabrik sehr stark eingesetzt. Allerdings können gerade Absicherungsmethoden erst sehr spät im Produktentwicklungsprozess zum Einsatz kommen, da für eine detaillierte Absicherung der Reifegrad des Produkts relativ hoch sein muss. Es fehlt

eine enge Verzahnung zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung, um frühzeitig mögliche Probleme, zum Beispiel bei der Integration von neuen Produkten auf bestehende Anlagen, zu erkennen.

### **3.4 Produktionsgetriebene Gestaltung eines Produkts**

Da im Fokus dieser Arbeit die Zusammenarbeit der Produktentwicklung mit der Produktionsplanung steht, wird in diesem Kapitel auf die produktionsgetriebene Gestaltung von Produkten eingegangen. Zunächst wird vorgestellt, wie in der Wissenschaft der Begriff „fertigungsgerechtes Konstruieren“ abgegrenzt wird. Anschließend wird das „Design for Retooling“ und die „frühzeitige Produktbeeinflussung“ vorgestellt. Im letzten Teil wird gezeigt, wie Produktionsanforderungen in der Konstruktion von Fahrzeugkarosserien berücksichtigt werden.

#### **3.4.1 Fertigungsgerechtes Konstruieren**

Bei jeder Konstruktionsaufgabe steht zunächst die Funktionserfüllung im Vordergrund. Ist diese gegeben, so ist darüber hinaus eine Vielzahl von Gesichtspunkten, wie zum Beispiel Beanspruchungsgerechtigkeit, Sicherheit, Ergonomie oder Fertigungsgerechtigkeit, zu berücksichtigen [PBFG-07]. Die Gesamtheit all dieser Gerechtheiten wird unter dem Begriff „Design for X“ (DfX) subsumiert, wobei der Term “X“ einen Platzhalter für eine Lifecycle-Phase (z. B. Produktion), beziehungsweise für eine spezifische Eigenschaft (z. B. Ergonomie) repräsentiert. An dieser Stelle wird näher auf das „Design for Production“ eingegangen, welches die Anforderungen der Produktion zusammenfasst.

Es ist bekannt, dass die Konstruktion einen bedeutenden Einfluss auf Fertigungskosten, Fertigungszeit und Fertigungsqualität hat. Fertigungsgerechtes Konstruieren strebt deshalb durch konstruktive Maßnahmen eine Minimierung der Fertigungskosten und -zeit sowie eine anforderungsgemäße Einhaltung fertigungsabhängiger Qualitätsmerkmale an [PBFG-07]. Durch die Vielzahl der unterschiedlichen Fertigungsverfahren und der sich daraus ergebenden Gestaltungsrichtlinien wird das Themengebiet des fertigungsgerechten Konstruierens allerdings sehr komplex. Eine geeignete und effiziente

Unterstützung des Konstrukteurs ist deshalb gerade in diesem Bereich dringend erforderlich. Zu den in der DIN 8580 beschriebenen Hauptgruppen der Fertigungsverfahren Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Stoffeigenschaften Ändern existieren bereits zahlreiche Gestaltungsrichtlinien, die in der Konstruktion berücksichtigt werden müssen [DIN-8580]. Beispiele für solche Richtlinien lassen sich in [PBFG-07] und anderen Katalogen finden.

Maßnahmen zum fertigungsgerechten Konstruieren sollten so früh wie möglich in dem Konstruktionsprozess berücksichtigt werden. Dies umfasst neben dem Gestalten unter Fertigungsgesichtspunkten auch die Festlegung der Baustruktur in der Konzept- beziehungsweise frühen Entwurfsphase. Durch die Gliederung des Produktes in Fertigungsbaugruppen und Fertigungseinzelteile werden die Weichen für die weiteren Prozesse und Produkteigenschaften gestellt.

Neben der konventionellen papierorientierten Dokumentation von Gestaltungsregeln können auch Multimediasysteme verwendet werden. Die Vorteile solcher Datenbank basierter Systeme liegen in der Verknüpfung und multimedialen Aufbereitung von Informationen. Eine Richtlinie, die dem Konstrukteur als Bild dargestellt wird, kann beispielsweise mit weiteren Informationen zu dem Fertigungsverfahren verknüpft sein.

In der Regel sind die Kataloge und Datenbanken allgemein gefasst. In einem Unternehmen muss allerdings bei der Gestaltung von Produkten nicht nur auf die allgemeine Herstellbarkeit eines Produkts geachtet werden, sondern auch auf die Herstellbarkeit mit den im Betrieb vorhandenen Produktionsanlagen [Hone-91].

#### **3.4.2 Design for Retooling**

Beim Design for Retooling wird im Sinne des zuvor vorgestellten DfX-Ansatzes („Design for X“) ein neues Produkt im Kontext von bestehenden Produktionsanlagen entwickelt. Ziel dabei ist es bestehende Anlagen nach Produktionsschluss nicht abzureißen, sondern das neue Produkt so zu gestalten, dass sich Teile der Anlage beziehungsweise ganze Fertigungslinien wiederverwenden lassen. Um dies zu realisieren, reicht es nicht aus nur allgemeine Richtlinien des fertigungsgerechten Konstruierens zu befolgen. Vielmehr muss das neue Produkt an die bestehenden Anlagen angepasst werden. Dies

setzt eine gewisse Ähnlichkeit des Vorgänger- und Nachfolgerprodukts voraus. So sollten die Struktur, die geometrischen Dimensionen oder die verwendeten Materialien gleich oder ähnlich sein. Die Gefahr bei der Wiederverwendung von ganzen Produktionslinien besteht darin, dass sich das neue Produkt nicht stark genug vom Vorgängerprodukt unterscheidet und der Kunde somit das Nachfolgerprodukt nicht als neu wahrnimmt. Um dies zu vermeiden, sollte eine gewisse Flexibilität in den Fertigungsanlagen vorhanden sein. Wie der Prozessablauf von Design for Retooling am Beispiel des Karosserierohbaus aussehen kann, wird in Bild 3.12 dargestellt.

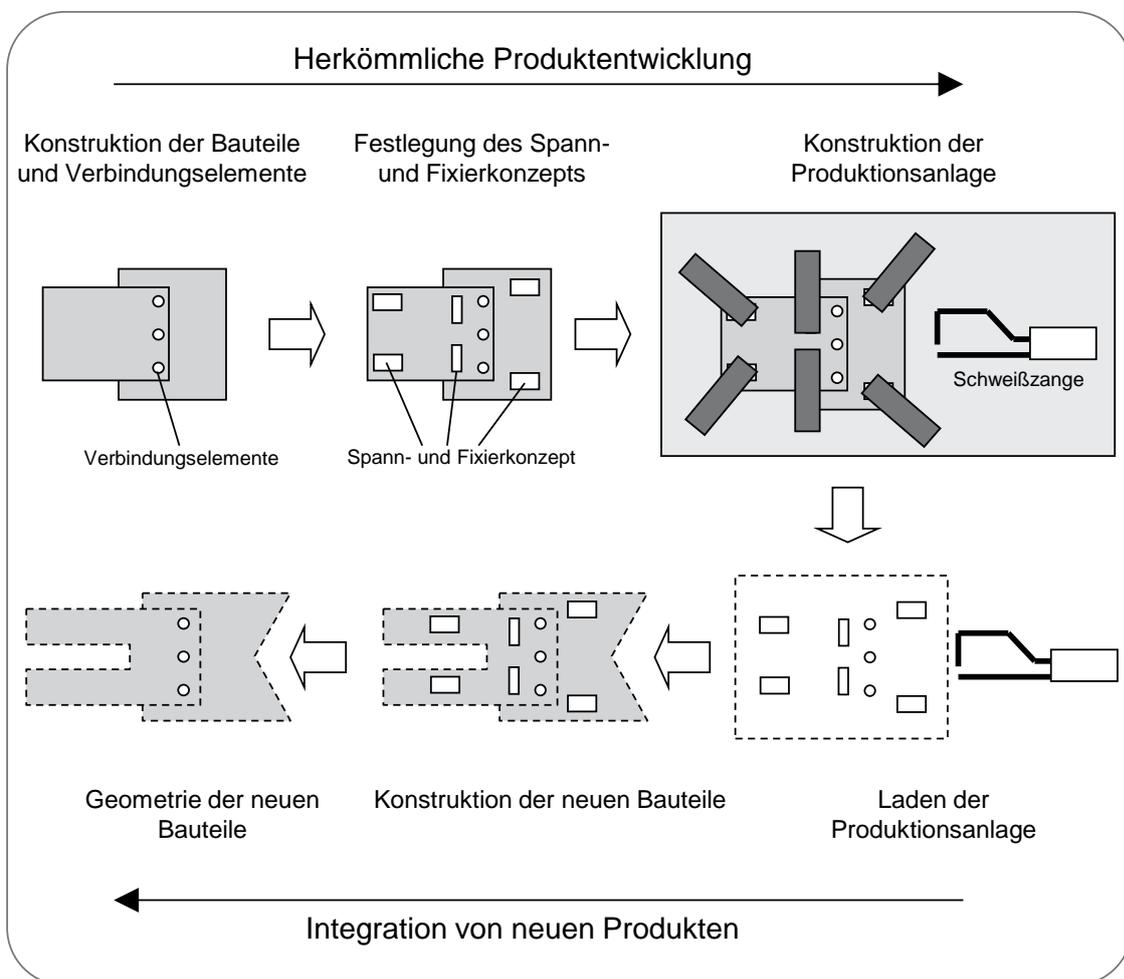


Bild 3.12: Prozessablauf beim Design for Retooling nach [Burr-08]

Zunächst werden ein Produkt und die dazugehörige Produktionsanlage herkömmlich entwickelt und geplant. In dem dargestellten einfachen Beispiel besteht das Produkt aus zwei Platten, die miteinander durch Schweißpunkte verbunden sind. Anlog zu dem in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Prozess wird

im nächsten Schritt das Spann- und Fixierkonzept entwickelt. Dieses dient als Grundlage für die Konstruktion der Produktionsanlage. Im letzten Schritt werden noch die restlichen Betriebsmittel, wie beispielsweise eine Schweißzange, geplant.

Soll ein neues oder ein weiteres Produkt auf dieser Produktionsanlage gefertigt werden, so muss diese Anlage bei der Konstruktion des neuen Produkts berücksichtigt werden. In dem vorgestellten Beispiel sind es die Schweißzange und die Spann- und Fixiervorrichtung. Bei der Gestaltung des neuen Produkts muss der Konstrukteur die Vorgaben der Produktionsanlage beachten. Er kann die Geometrie des neuen Produkts verändern, muss aber darauf achten, dass die Flächen des Spann- und Fixierkonzepts exakt die gleichen wie die des ursprünglichen Produktes sind. Da auch die gleiche Schweißzange verwendet werden soll, müssen die Schweißpunkte von dieser Schweißzange zugänglich sein.

Damit das vorgestellte Konzept in der Praxis Anwendung findet, ist eine ganzheitliche Erfassung aller relevanten Vorrichtungen und Betriebsmittel erforderlich. Die Datenbestände müssen auch nach Anpassungen und Veränderungen während der Produktionszeit kontinuierlich gepflegt und aktualisiert werden.

Eine Methodik zur produktionsorientierten Produktanalyse für die Wiederverwendung von Produktionssystemen wird in [Stan-12] vorgestellt. Ziel der Methodik ist die produktionsorientierte Produktanalyse, die ganzheitlich den Prozess der produktionsgerechten Produktgestaltung in Hinblick auf die Wiederverwendung von Produktionssystemen unterstützt [SAPW-09]. Grundlage dieser Methodik ist ein integriertes lebenszyklusorientiertes Informationsmodell, das Produktinformationen von den unterschiedlichen Phasen des Lebenszyklus zusammenführt [SWAB-10]. Ein Ziel des Informationsmodells ist die Abbildung der von der Serienproduktion entstehenden Anforderungen und deren Integration in den früheren Phasen der Produktentwicklung. Somit wird eine effiziente und nachhaltige Informationserfassung und -bereitstellung von Produktionsanforderungen in der Produktentwicklung realisiert [Stan-12]. Das integrierte lebenszyklusorientierte Informationsmodell ist die Basis der in Bild 3.13 dargestellten Methodik.

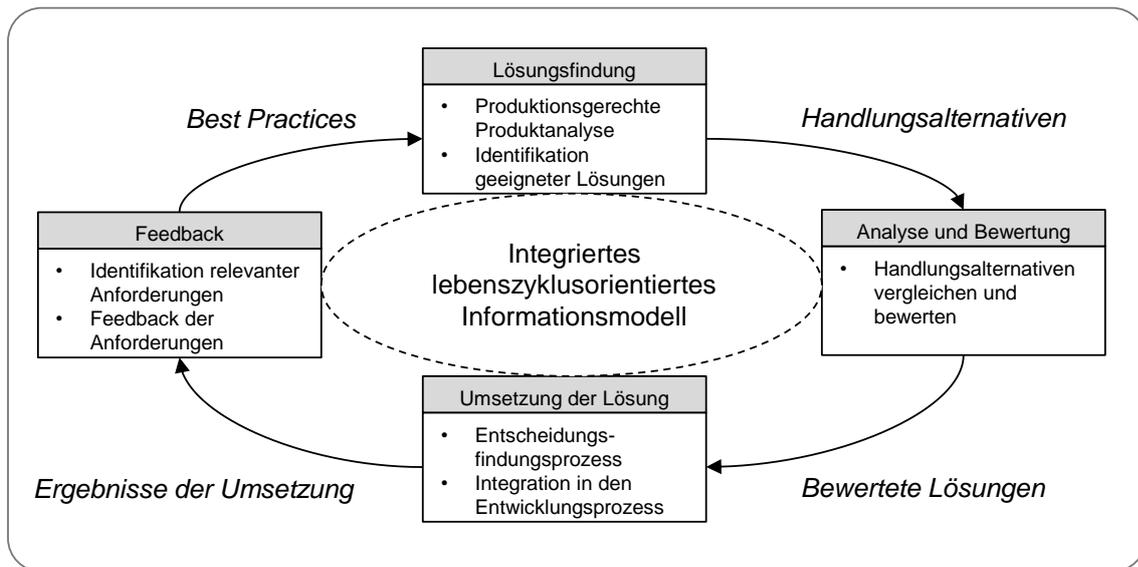


Bild 3.13: Methodik zur produktionsorientierten Produktanalyse für die Wiederverwendung von Produktionssystemen nach [Stan-12]

Im ersten Teilschritt wird die prinzipielle Herstellbarkeit einer Produktkomponente auf einer bestehenden Produktionsanlage untersucht. Falls die Untersuchung der Herstellbarkeit negative Ergebnisse liefert, werden im zweiten Teilschritt diejenigen Abschnitte der Produktionsanlage identifiziert, die aufgrund technologischer oder prozesstechnischer Restriktionen die Zielkomponente nicht produzieren können [StWO-09]. Darauf aufbauend werden die potenziell möglichen Handlungsalternativen zur Rekonfiguration der Anlage bestimmt. Im zweiten Schritt findet die Bewertung der Handlungsalternativen bezüglich Wirtschaftlichkeit und unternehmensspezifischen Kriterien statt. Anschließend wird die favorisierte Handlungsalternative umgesetzt. In der letzten Phase, dem Feedback, werden die relevanten Einflussfaktoren von den zeitlich nachgelagerten Phasen des Produktlebenszyklus identifiziert und über Informationsrückführung in die Phasen der Produktentwicklung sowie der Produktionsplanung in geeigneter Form zur Verfügung gestellt [Stan-12].

### 3.4.3 Frühzeitige Produktbeeinflussung

Im Kapitel 3.3 wurde bereits die kontinuierliche Produktabsicherung mithilfe der Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik vorgestellt. Im Sinne des Frontloadings werden Anforderungen, wie beispielsweise aus der

Produktion, bereits sehr früh im Produktentwicklungsprozess abgesichert [Beer-08]. Da dadurch Probleme früher entdeckt werden, hat der Produktentwickler mehr Zeit nach Lösungen zu suchen. Ziel der frühzeitigen Produktbeeinflussung ist es, das Produkt so zu gestalten, sodass das Produkt vom ersten Entwurf an alle Anforderungen erfüllt und eine Produktabsicherung keine Probleme aufdeckt, sondern den Entwicklungsstand bestätigt.

Das Produkt wird nicht nur von der Produktion, sondern auch von anderen Bereichen, wie beispielsweise dem Design, dem Einkauf, der Qualitätssicherung oder dem Vertrieb, beeinflusst. Hierbei kann es zu Interessenkonflikten zwischen den einzelnen Bereichen kommen. Eine ganzheitliche Betrachtung aller Anforderungen ist deshalb sehr wichtig. In Anlehnung an [Broc-10] lässt sich die frühzeitige Produktbeeinflussung wie folgt definieren:

**Definition 3.4:** *Die frühzeitige Produktbeeinflussung beschreibt ein proaktives Handeln, indem Anforderungen aus unterschiedlichen Unternehmensbereichen bereits zu Beginn des Produktentstehungsprozesses berücksichtigt werden.*

Die proaktive Produktbeeinflussung beginnt bereits in der Initialphase und wird bis in die Konzeptphase des Produktentwicklungsprozesses durchgeführt. Dabei ersetzt sie nicht die Produktabsicherung, sondern vermittelt die Anforderungen aus den verschiedenen Unternehmensbereichen. Da dadurch Fehler in Produktkonstruktion vermieden werden, reduzieren sich die langwierigen Iterationsschleifen des in Kapitel 2.1.2 vorgestellten Problemlösungsprozesses.

Auch in der Automobilindustrie spielt die frühzeitige Produktbeeinflussung eine immer größere Rolle. Für den Karosserierohbau stellt [Broc-10] das Konzept Pro<sup>2</sup>Kar (Produktbeeinflussung und Produktabsicherung im Karosseriebau) vor, welches die Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung durch rechnergestützte Methoden verbessern soll. In Bild 3.14 ist die Eingliederung des Pro<sup>2</sup>Kar Ansatzes in den Produktentwicklungsprozess dargestellt.

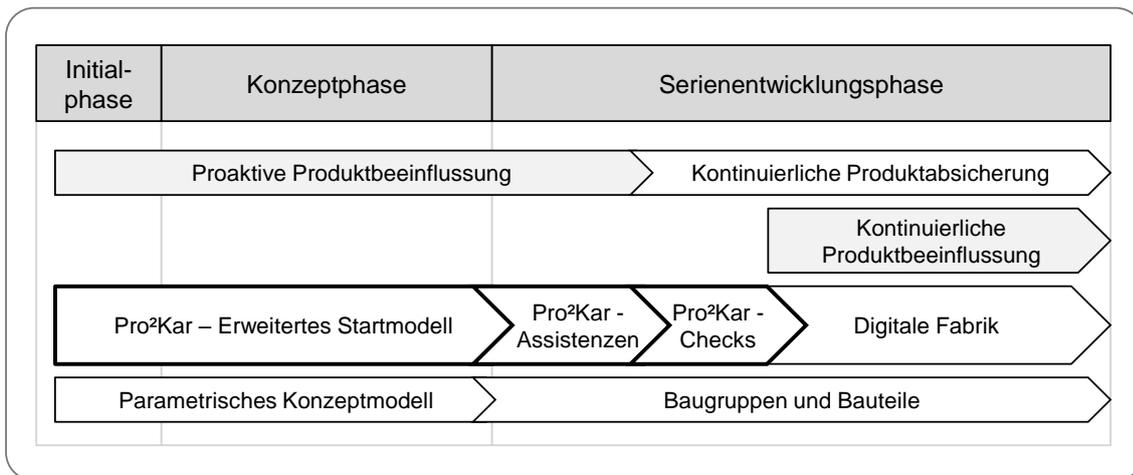


Bild 3.14: Rechnergestützte Methoden im Pro²Kar im Produktentwicklungsprozess nach [Broc-10]

Bei dem Pro²Kar Ansatz nimmt die Produktionsplanung bereits in der Initialphase proaktiv an der Gestaltung des Produkts teil. Schon zur ersten Produktgestaltung werden der Produktentwicklung Anforderungen übergeben, die eine Einhaltung der allgemeingültigen Produktionsanforderungen zusammenfassen. Für diese Phase wurde ein sogenanntes Erweitertes Startmodell entwickelt, welches alle relevanten Produktionsanforderungen für den Entwickler zusammenfasst. Es handelt sich dabei um ein parametrisiertes Konzeptmodell, das die Produktionsanforderungen in die Sprache der Produktentwicklung zusammenfasst. Schematisch ist das Startmodell in Bild 3.15 dargestellt.

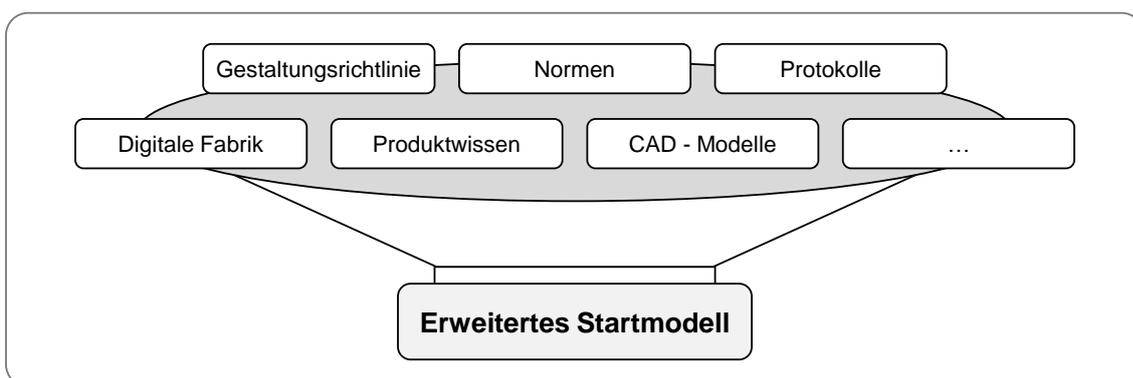


Bild 3.15: Quellen für das erweiterte Startmodell nach [Broc-10]

Da Produkte häufig sehr komplex aufgebaut sind und deshalb von mehreren Konstrukteuren gleichzeitig entwickelt werden, kommen heute schon CAD

Startmodelle in der Industrie zum Einsatz. Durch Startmodelle wird ein einheitlich strukturierter Aufbau der CAD Modelle realisiert, wodurch sich jeder am Projekt arbeitende Konstrukteur einfach zurechtfinden kann. Im Gegensatz zu den bereits in der Karosserieentwicklung verwendeten Startmodellen beinhaltet das Pro<sup>2</sup>Kar Startmodell auch geometrische Elemente der Produktionsanlagen. Das können beispielsweise ganze Betriebsmittel sein oder nur einzelne Flächen, wie die Auflageflächen einer Spann- und Fixiervorrichtung, sein. Diese geometrischen Vorgaben stehen dem Konstrukteur somit bereits zu Beginn der Konstruktion zur Verfügung. Des Weiteren beinhaltet das Erweiterte Startmodell auch zahlreiche alphanumerische Informationen beziehungsweise Vorgaben aus der Produktionsplanung. So können die Fügeparameter, Materialien und sogar Kontaktinformationen zu den verantwortlichen Planern in die Startmodelle hinterlegt werden [Broc-10] [BrLM-08].

Wie in Bild 3.14 dargestellt ist, findet zu Beginn der Serienentwicklungsphase der Übergang von der proaktiven Produktbeeinflussung in die kontinuierliche Produktabsicherung statt. Auch wenn der Produktreifegrad durch die Produktbeeinflussung gesteigert werden konnte, ist die kontinuierliche Produktabsicherung unverzichtbar. Hierfür stehen in dem Pro<sup>2</sup>Kar Konzept sogenannte Checks zur Verfügung, die das Produktdesign hinsichtlich Fertigbarkeit möglichst automatisiert Absichern [MaLB-06]. Die Ergebnisse dieser Checks werden im Sinne der kontinuierlichen Produktbeeinflussung an die Entwicklung weiter gegeben.

Lassen sich in der Serienentwicklung nicht alle Vorgaben aus dem Erweiterten Startmodell umsetzen, so helfen dem Konstrukteur sogenannte Assistenzen, das Produkt neu zu gestalten [Broc-10]. Dies kann erforderlich sein, wenn beispielsweise neue Produktionstechnologien eingesetzt werden sollen, welche nicht im Startmodell hinterlegt sind.

Eine proaktive Produktabsicherung, wie sie das Pro<sup>2</sup>Kar für den Karosserieentwicklungsprozess vorstellt, ist in der Produktionsplanung kaum ausgeprägt. Ein Grund hierfür ist auch das Fehlen geeigneter, rechnerunterstützter Methoden. Um dies zu ändern, ist eine enge Verzahnung der Produktionsplanung und der Produktentwicklung im Sinne der frühzeitigen Produktbeeinflussung erforderlich [Broc-10].

### **3.4.4 Berücksichtigung der Produktionsanforderungen im Karosserierohbau**

Bei alle Automobilherstellern ist die produktionsgerechte Produktgestaltung in den Produktentwicklungsprozess verankert. Üblicherweise werden die wichtigsten Anforderungen in einer Datenbank gespeichert. Quellen für diese Datenbanken sind in der Regel:

- Erfahrungen aus vergangenen Baureihen,
- allgemeine Normen und Richtlinien,
- Erfahrungen aus der aktuellen Produktion in den einzelnen Fabriken,
- Informationen aus der Wettbewerberanalyse.

In Datenbanken sind die wichtigsten Produktgestaltungsregeln der einzelnen Gewerke Presswerk, Karosserierohbau, Lackierung, Montage und Logistik aufgelistet. Zum besseren Verständnis werden die einzelnen Regeln mit Bildern veranschaulicht. Diese Gestaltungsrichtlinien werden von Experten zusammengestellt und in verschiedenen Gremien mit der Produktentwicklung, der Produktionsplanung sowie der Produktion abgestimmt. Der Produktentwickler hat über die entsprechend Datenbank jederzeit Zugriff auf diese Richtlinien. Dadurch soll vorhandenes Wissen dem Konstrukteur zur Verfügung gestellt werden. Des Weiteren werden die einzelnen Anforderungen zu bestimmten Meilensteinen im Produktentwicklungsprozess überprüft. Hieraus ergeben sich folgende Vorteile:

- Erreichung der Kostenziele,
- Reduzierung von Neuinvest durch Nachfolgefähigkeit,
- Vermeidung von unwirtschaftlichen Nebentätigkeiten (z. B. Einstellarbeiten bei ungeschickt ausgelegten Bauteilen),
- Erhöhung der Produktivität,
- Vermeidung von hohen Änderungskosten durch frühzeitige Berücksichtigung der Produktionsanforderungen,
- Verbesserung der Qualität durch sichere Prozesse.

Bei der Verwendung der Datenbanken wird der Produktentwickler üblicherweise methodisch unterstützt. So kann er sich beispielsweise die für einen bestimmten Meilenstein relevanten Prüflisten ableiten. Eine Integration der

Richtlinien in das CAD-System gibt es allerdings nicht. Der Konstrukteur hat aber in der Regel Zugang zu den 3D-Modellen der Digitalen Fabrik. So kann er Standardbetriebsmittel, wie beispielsweise Schweißzangen, zu seinen Bauteilen im CAD-System reinladen. Um herauszufinden, welche Schweißzange für seinen Anwendungsfall die Richtige ist, muss er sich direkt mit dem entsprechenden Produktionsplaner in Verbindung setzen.

### **3.4.5 Zusammenfassung**

Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Kapitel „Produktionsgetriebene Gestaltung eines Produkts“ lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Für die Produktionsgetriebene Gestaltung von Produkten gibt es zahlreiche Anforderungen und Richtlinien. Diese werden üblicherweise in Katalogen oder Datenbanken zusammengefasst und verwaltet. Erste Ansätze, wie diese Richtlinien und Vorgaben in der Automobilindustrie eingesetzt werden können, wurden ebenfalls vorgestellt. Auch im Karosserierohbau werden Produktionsanforderungen im Rahmen der produktionsgerechten Produktgestaltung formuliert und in der Produktentwicklung geprüft. Allerdings fehlt es an dieser Stelle an einer durchgehenden Methode, die im Produktentwicklungsprozess verankert ist.
- Beim Design for Retooling steht die Wiederverwendung einer bestehenden Produktionsanlage im Vordergrund. Die beschriebenen Ansätze erfordern vom Konstrukteur allerdings eine genaue Kenntnis der Produktionsanlage und deren Fertigungsverfahren.
- Die vorgestellten Methoden der frühzeitigen Produktbeeinflussung fassen viele Anforderungen der Produktion in CAD-basierten Startmodellen zusammen. Diese Startmodelle sind die Ausgangssituation für die Konstruktion der neuen Produkte.

## **3.5 Zusammenfassung und Ableitung des Forschungsbedarfs**

Um die Herausforderungen der heutigen Automobilindustrie zu lösen, wurden zunächst verschiedene Methoden und Ansätze aus Wissenschaft und Industrie vorgestellt. Dieses Kapitel fasst noch einmal die wichtigsten Erkenntnisse zusammen und zeigt bestehende Lücken und Probleme in den Ansätzen. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf dem Entwicklungsprozess von Karosseriebauteilen liegt, wird besonders auf die Anwendbarkeit der Methoden auf den Karosserieentwicklungsprozess eingegangen. Auf dieser Grundlage werden schließlich die Forschungsfragen für diese Arbeit abgeleitet und erläutert.

### **3.5.1 Zusammenfassung des Stands der Forschung und Technik**

Für die im Kapitel 2.6 vorgestellten Herausforderungen der Automobilindustrie wurden zahlreiche Methoden entwickelt. Jedoch lassen sich diese Methoden oft nicht uneingeschränkt auf den Karosserieentwicklungsprozess anwenden. Viele dieser Methoden lassen sich nur schwer oder gar nicht in industrielle Entwicklungsprozesse verankern. In der nachfolgenden Tabelle sind die vorgestellten Ansätze aufgelistet und nach ihrer Eignung für den Karosserieentwicklungsprozess bewertet. Dabei wurde bewertet, ob die Methoden bei der Konzepterstellung, der Produktstrukturierung, der Flächenerzeugung, den DMU-Untersuchungen, der Definition von Verbindungselementen, der Suche nach Alternativen und der Rückführung von Daten aus der Produktionsplanung in die Produktentwicklung unterstützen.

|   | Konzepterstellung | Produktstrukturierung | Flächenerzeugung | DMU Untersuchungen | Definition von Verbindungselementen | Suche nach Alternativen | Rückführung der Daten in die Produktentwicklung |
|---|-------------------|-----------------------|------------------|--------------------|-------------------------------------|-------------------------|---|
| <b>Standardisierung und Modularisierung in der Produktentwicklung</b>   |                   |                       |                  |                    |                                     |                         |   |
| Standardisierung in der Produktentwicklung  | ●                 | ●                     | ○                | ○                  | ●                                   | ●                       | ○   |
| Modularisierung in der Produktentwicklung   | ●                 | ●                     | ●                | ●                  | ●                                   | ●                       | ●   |
| <b>Standardisierung und Modularisierung in der Produktionsplanung</b>   |                   |                       |                  |                    |                                     |                         |   |
| Standardisierung in der Produktionsplanung  | ●                 | ●                     | ○                | ○                  | ●                                   | ●                       | ○   |
| Modularisierung in der Produktionsplanung   | ●                 | ●                     | ●                | ●                  | ●                                   | ●                       | ○   |
| <b>Digitale Fabrik</b>  |                   |                       |                  |                    |                                     |                         |   |
| Struktur  | ●                 | ●                     | ○                | ○                  | ○                                   | ○                       | ●   |
| 3D-Modelle  | ○                 | ●                     | ●                | ●                  | ●                                   | ●                       | ●   |
| Simulationen  | ○                 | ○                     | ○                | ●                  | ●                                   | ●                       | ●   |
| <b>Produktionsgetriebene Gestaltung eines Produkts</b>  |                   |                       |                  |                    |                                     |                         |   |
| Fertigungsgerechtes Konstruieren  | ●                 | ●                     | ○                | ○                  | ●                                   | ○                       | ○   |
| Design for Retooling  | ●                 | ○                     | ●                | ●                  | ●                                   | ○                       | ●   |
| Produktbeeinflussung (Pro <sup>2</sup> Kar)   | ●                 | ●                     | ●                | ●                  | ●                                   | ○                       | ●   |
| <p>○ unterstützt nicht</p> <p>● unterstützt geringfügig</p> <p>● unterstützt teilweise</p> <p>● unterstützt größtenteils</p> <p>● unterstützt vollständig</p> |                   |                       |                  |                    |                                     |                         |   |

Tabelle 3.4: Bewertung der Ansätze und Methoden aus der Wissenschaft und Industrie

### **Standardisierung und Modularisierung in der Produktentwicklung**

Standardisierung und Modularisierung von Komponenten sind in der Automobilindustrie ein wichtiges Mittel, um die durch den Markt geforderte Produktvarianz zu realisieren. Die vorgestellten Methoden unterstützen den Konstrukteur durch die vorgegebene Struktur. Standardisierte und modularisierte Komponenten, die in Datenbanken abgelegt sind, können den Konstrukteur bei der geometrischen Gestaltung von neuen Produkten unterstützen. Durch standardisierte Schnittstellen wird der Konstrukteur auch bei der Auslegung der Verbindungselemente unterstützt. Ein standardisiertes beziehungsweise modularisiertes Produkt hat viele Vorteile für die Produktion.

***Handlungsbedarf:** Die vorgestellten Methoden unterstützen den Produktentwickler bei der Realisierung eines modularisierten Produkts, bilden aber nicht die Anforderungen der Produktion ab. Die Anforderungen der standardisierten und modularisierten Produktion müssen in den frühen Phasen des Produktentstehungszyklus stärker berücksichtigt werden.*

### **Standardisierung und Modularisierung in der Produktion**

Die Vorteile der Standardisierung und Modularisierung lassen sich auch auf die Produktion übertragen. Durch vordefinierte Standards und Produktionsmodule kann der Produktionsplanungsprozess beschleunigt werden. Voraussetzung hierfür ist natürlich die Tatsache, dass sich die neuen Produkte mithilfe dieser Produktionsmodule fertigen lassen.

***Handlungsbedarf:** Die vorgestellten Ansätze des Karosserierohbaus konzentrieren sich überwiegend auf den Produktionsplanungsprozess und nicht auf den Produktentwicklungsprozess. Gerade in der frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses ist die Berücksichtigung der Anforderungen der einzelnen Produktionsmodule sehr wichtig. Der Konstrukteur muss beispielsweise die Produktstruktur, die Verbindungselemente oder die Produktflächen an die Produktionsmodule anpassen. Dabei sollte er möglichst früh von der Produktionsplanung unterstützt werden.*

### **Digitale Fabrik**

Wie bereits in Bild 3.9 vorgestellt wurde, können die Modelle der Digitalen Fabrik in struktur- und prozessorientierte Modelle, geometrieorientierte Modelle und Simulationsmodelle eingeteilt werden. Werden diese Modelle auch der Produktentwicklung zur Verfügung gestellt, so kann der Konstrukteur

beispielsweise bei der Entwicklung eines Nachfolgeprodukts unterstützt werden. Die Strukturmodelle, beispielsweise Prozesspläne oder Arbeitspläne, können gerade bei der Konzeptphase des neuen Produkts nützlich sein. Der Konstrukteur kann mit deren Hilfe die Struktur des neuen Produkts an die Struktur des Vorgängerprodukts anpassen. Auch die geometrischen Modelle der Anlagen sind für frühe Absicherungen von beispielsweise Zugänglichkeiten unentbehrlich und unterstützen den Konstrukteur bei der Festlegung der Fügepunkte. Simulationsmodelle bilden die unterschiedlichen Fertigungsverfahren ab und können ebenfalls für die frühen Phasen des Karosserieentwicklungsprozesses sehr wichtig sein.

***Handlungsbedarf:** Die Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik sind sehr verbreitet. Allerdings sind diese Methoden und Werkzeuge speziell auf die Belange der Produktionsplanung zugeschnitten. Nahezu alle produktionsrelevanten Informationen könne datenbankbasiert verwaltet werden. Damit diese Informationen dem Konstrukteur bei der Berücksichtigung von Produktionsanforderungen nützen, müssen diese entsprechend gefiltert und aufbereitet werden. An dieser Stelle werden Methoden, Schnittstellen und digitale Tools benötigt, sodass diese Informationen in die Produktentwicklung überführt werden können.*

#### **Produktionsgetriebene Produktgestaltung**

Auch die Ansätze der produktionsgetriebenen Produktgestaltung lösen nicht alle Herausforderungen des Karosserieentwicklungsprozesses. Beim fertigungsgerechten Konstruieren greift der Konstrukteur auf bekannte Richtlinien und Normen zurück. Unterstützt wird er dabei von verschiedenen Datenbanksystemen. Im Karosserierohbau wird nicht nur auf die allgemeine Herstellbarkeit eines Bauteils geachtet, sondern darauf, ob es sich mit den in der Fabrik vorhandenen Betriebsmitteln beziehungsweise mit den im Unternehmen standardisierten Betriebsmitteln fertigen lässt. Dabei können die Kataloge und Datenbanken nur schwer helfen. Allgemeine Richtlinien und Normen unterstützen nicht bei dem weitverbreiteten Einsatz von CAD-Systemen. Im Gegensatz zu Design for Production geht der Ansatz vom Design for Retooling auf die im Unternehmen vorhandenen Anlagen ein und zeigt, wie Anlagenmodelle in den Konstruktionsprozess eingebunden werden können. Allerdings wird bei diesem Ansatz dem Konstrukteur das ge-

samte CAD-Modell ohne eine Unterstützung und Input von der Produktionsplanung zur Verfügung gestellt. Das neue Produkt muss er in die bestehende Anlage konstruieren. Dabei kann er die Anlagenmodelle für die Definition von Verbindungselementen, die Zugänglichkeitsuntersuchungen oder die Flächendefinition nutzen. Ein neues Produkt kann auch eine Veränderung der bestehenden Anlage erfordern. Hierfür bietet der vorgestellte Ansatz allerdings keine Unterstützung. Bei der produktionsbezogenen Produktbeeinflussung, wie sie im Pro<sup>2</sup>Kar Ansatz vorgestellt wurde, wird dem Konstrukteur nicht ein CAD-Modell der Produktionsanlage zur Verfügung gestellt, sondern ein um die Anforderungen der Produktion angereichertes Startmodell. Da dieses Startmodell beispielsweise Auflageflächen der Anlage enthält, unterstützt es den Konstrukteur bei der Flächenerzeugung. Die Zugänglichkeit der Anlagenkomponenten kann vom Konstrukteur ebenfalls mit den abgebildeten Modellen geprüft werden. Allerdings fehlt auch bei diesem Ansatz eine Unterstützung bei der Anpassung von Anlagen.

***Handlungsbedarf:*** *Bei den vorgestellten Ansätzen ist ein großes Wissen bezüglich Fertigungsverfahren und den im Unternehmen eingesetzten Produktionsmitteln erforderlich. Da der Produktentwickler eine Vielzahl sich unter Umständen auch widersprechender Anforderungen berücksichtigen muss, müssen die Anforderungen der standardisierten und modularisierten Produktion sehr einfach und verständlich dem Produktentwickler zur Verfügung gestellt werden.*

Die Bedeutung der Standardisierung und Modularisierung von Produkten und Produktionsanlagen ist in der heutigen Automobilindustrie unumstritten. Um dies aber flächendeckend in dem Produktentwicklungsprozess der Karosserierohbauentwicklung zu verankern, bedarf es einer Unterstützung des Konstrukteurs bei der Berücksichtigung aller Anforderungen. Keins der vorgestellten Ansätze unterstützt den Konstrukteur vollständig dabei. Ziel dieser Arbeit ist es, den Konstrukteur bei der Berücksichtigung der Produktionsanforderungen während der Entwicklung einer neuen Automobilkarosserie zu unterstützen, sodass das neue Produkt auf einem zuvor definierten Produktionsmodul gefertigt werden kann.

### 3.5.2 Ableitung der Forschungsfragen

Standardisierung und Modularisierung von Produkten und Produktionsanlagen sind in der Automobilindustrie von großer Bedeutung. Allerdings fehlen, wie im vorhergehenden Kapitel dargestellt wurde, Methoden und Werkzeuge, die den Konstrukteur bei der Berücksichtigung der Anforderungen aus der Produktionsplanung unterstützen. Im Folgenden werden die offenen Forschungsfragen, die in dieser Arbeit beantwortet werden sollen, abgeleitet. Da der Fokus dieser Arbeit auf dem Karosserierohbau liegt, muss zunächst geklärt werden, welche Anforderungen aus der Produktionsplanung dem Konstrukteur zur Verfügung gestellt werden müssen. Es bedarf einer Analyse der im Karosserierohbau eingesetzten Fertigungsverfahren und der dazugehörigen Betriebsmittel. Der Einsatz von Robotern hat einen hohen Automatisierungsgrad in der automobilen Karosseriefertigung zur Folge. Von der Anlagengeometrie, der Taktzeit, dem Fabriklayout oder der Anlagenstruktur, lassen sich Anforderungen an die Produktentwicklung ableiten. Die erste Forschungsfrage kann wie folgt formuliert werden:

***Forschungsfrage 1:** Welche Anforderungen müssen während der Produktentwicklung berücksichtigt werden, sodass eine standardisierte und modularisierte Produktion gewährleistet werden kann?*

Der Produktentwickler muss nicht nur Anforderungen aus der Produktionsplanung, sondern aus vielen anderen Phasen des Produktlebenszyklus berücksichtigen. Aufgrund der enormen Anzahl an teilweise sich widersprechenden Anforderungen benötigt er bei der Berücksichtigung der Produktionsanforderungen Unterstützung. Es stellt sich die Frage, in welcher Form müssen die Anforderungen dem Konstrukteur zur Verfügung gestellt werden, sodass er diese ohne großen Aufwand versteht und bei seiner Konstruktion von Anfang an berücksichtigt. Es genügt nicht dem Produktentwickler nur die CAD Modelle der Anlagen zur Verfügung zu stellen, deshalb muss folgende Frage beantwortet werden:

***Forschungsfrage 2:** Wie können dem Produktentwickler die Möglichkeiten und Einschränkungen eines Produktionsmoduls veranschaulicht werden? Wie kann die Flexibilität eines Produktionsmoduls dem Produktentwickler verdeutlicht werden?*

Wenn geklärt ist, welche Anforderungen dem Produktentwickler und in welcher Form diese zur Verfügung gestellt werden, muss noch geklärt werden, wann diese Informationen dem Konstrukteur zur Verfügung gestellt werden. Damit unnötige Iterationsschleifen im Absicherungsprozess vermieden werden, sollte der Produktentwickler die Anforderungen bereits zu Beginn des Entwicklungsprozesses kennen und bei der Konstruktion berücksichtigen. Hierfür ist eine Verankerung der Berücksichtigung dieser Anforderungen in den Gesamtentwicklungsprozess notwendig. Hieraus lässt sich die nächste Forschungsfrage ableiten:

***Forschungsfrage 3:*** *Wie muss der Produktentwicklungsprozess angepasst beziehungsweise verändert werden, sodass die Anforderungen aus den Produktionsmodulen möglichst früh im Produktentwicklungsprozess berücksichtigt werden können? Wie verändert sich der Anlagenabsicherungsprozess?*

In der industriellen Praxis werden sicherlich nicht alle Anforderungen der Produktionsmodule erfüllt werden können. Gründe hierfür können neue Produktionstechnologien oder neue gesetzliche Vorgaben sein. Für diese Fälle muss geklärt werden, wie das Zusammenarbeitsmodell zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung gestaltet werden soll. Damit die Anforderungen der Produktionsmodule nicht die Gestaltungsfreiheit des Produktentwicklers einschränken, muss folgende Frage beantwortet werden:

***Forschungsfrage 4:*** *Welche Möglichkeiten hat der Produktentwickler von einem Standard abzuweichen? Wie sieht das Zusammenspiel zwischen Produktionsplanung und Produktentwicklung aus?*

Ziel der Arbeit ist es, diese Fragen für den Karosserieentwicklungszyklus zu beantworten und zu zeigen, dass eine frühzeitige Berücksichtigung der der Anforderungen aus der Produktionsplanung, die Anzahl der Produktpassungen im Absicherungsprozess reduziert wird.

## **4 Methode zur Berücksichtigung von Produktionsmodulen in der Produktentwicklung**

Nachdem im vorhergehenden Kapitel der Stand der Forschung und Technik vorgestellt wurde, wird in diesem Kapitel eine Methode vorgestellt, um ein Produkt frühzeitig bezüglich Produktionsanforderungen zu beeinflussen. Um die definierten Forschungsfragen zu beantworten, wird dieses Kapitel wie folgt aufgebaut:

Zunächst werden die Anforderungen einer standardisierten und modularisierten Rohbauproduktion an die Produktentwicklung gesammelt. Anschließend wird eine Methode erarbeitet, mit deren Hilfe der Absicherungsprozess in der Produktentwicklung verkürzt werden kann. Zunächst wird das Grobkonzept dieser Methode vorgestellt. Darauf aufbauend werden im Anschluss alle Schritte detailliert beschrieben. Zum Schluss dieses Kapitels wird die erarbeitete Methode in den Rohbauentwicklungsprozess verankert.

### **4.1 Anforderungen einer standardisierten und modularisierten Rohbauproduktion an die Produktentwicklung**

Bevor eine neue Methode zur frühzeitigen Produktbeeinflussung bezüglich Produktionsanforderungen erarbeitet werden kann, müssen zunächst die Anforderungen der Produktionsanlagen an die Produktentwicklung identifiziert werden. In Kapitel 3.2.2 wurde vorgestellt, wie die Produktionsplanung mit standardisierten Produktionsmodulen in der Automobilindustrie aussieht. Die Anforderungen einer standardisierten und modularisierten Produktion wurden im Rahmen von Experteninterviews in der Produktionsplanung und einer umfangreichen Literaturrecherche ermittelt.

#### **4.1.1 Fügefolge**

Die Fügefolge bestimmt die Reihenfolge, in der ein Produkt zusammengebaut wird. Wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben wurde, wird die Fügefolge von der Produktionsplanung in Zusammenarbeit mit der Produktentwicklung festgelegt. Die Fügefolge hat Einfluss auf das Layout der Produktionsanlage

und damit auch auf die verwendeten Produktionsmodule. Damit ein neues Produkt mit den standardisierten Produktionsmodulen gefertigt werden kann, muss bereits in einer sehr frühen Phase des Produktentstehungsprozesses auf die Produktstruktur Einfluss genommen werden. Die wichtigsten Anforderungen bezüglich der Fügefolge sind in Bild 4.1 zusammengefasst.

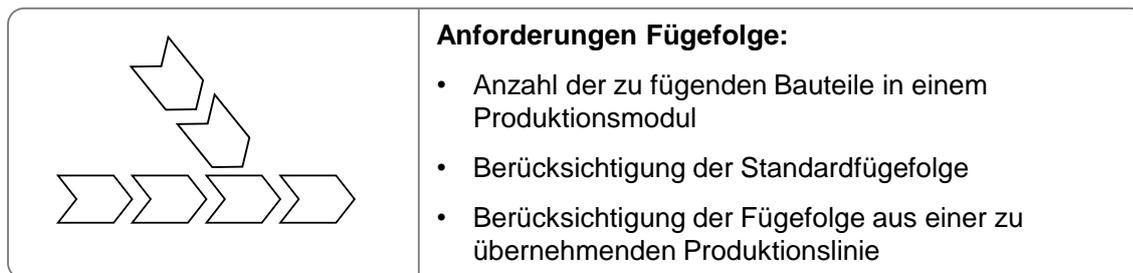


Bild 4.1: Anforderungen Fügefolge

Der Produktentwickler hat die Freiheit die Anzahl der Einzelbauteile, aus denen sich das Produkt zusammensetzt, festzulegen. Da ein Produktionsmodul nur eine bestimmte Anzahl an Einzelkomponenten handhaben kann, muss der Produktentwickler sicherstellen, dass die maximal handhabbare Anzahl von Einzelbauteilen nicht überschritten wird. Darüber hinaus muss er sicherstellen, dass sich die Fügefolge mit den standardisierten Produktionsmodulen abbilden lässt. Um eine Produktstandardisierung über mehrere Baureihen zu realisieren, wurden in der Automobilindustrie sogenannte Standardfügefolgen definiert. Diese sind die Grundlagen für eine modularisierte Produktion und müssen deshalb bereits in der Produktentwicklung von neuen Produkten berücksichtigt werden. Soll das neue Produkt im Sinne der Nachfolgerflexibilität auf einer bereits vorhandenen Produktionslinie integriert werden, so sollte die Fügefolge des Vorgängers übernommen werden. Da lediglich kleinere Anpassungen zulässig sind, muss die Fügefolge bereits sehr früh im Produktentwicklungsprozess zur Verfügung stehen.

### 4.1.2 Fertigungstechnologie

Bei der Konstruktion von neuen Produkten muss die in den Produktionsmodulen verwendete Fertigungstechnologie berücksichtigt werden, falls das neue Produkt ausschließlich mit vorhandenen Produktionsmodulen gefertigt werden soll. So muss beispielsweise während der Produktentwicklung sichergestellt werden, dass die verwendeten Materialien sich auf dem Modul

verarbeiten lassen. Ist die Einführung von neuen Technologien nicht vermeidbar, so muss ein neues Produktionsmodul definiert werden. Dieses soll standardisiert werden und für die Planung weiterer Produktionsanlagen zur Verfügung stehen. Im Folgenden werden die wichtigsten Technologien der automobilen Rohbauherstellung und deren Einflüsse auf die Produktentwicklung vorgestellt.

### **Industrieroboter**

Da der Automatisierungsgrad im automobilen Karosserierohbau sehr hoch ist, werden für die verschiedenen Fertigungsprozesse verstärkt Industrieroboter verwendet. Nach DIN EN ISO 8373 wird ein Industrieroboter wie folgt definiert:

**Definition 4.1:** Ein Industrieroboter ist ein automatisch gesteuerter, frei programmierbarer Mehrzweck-Manipulator, der in drei oder mehr Achsen programmierbar ist und zur Verwendung in der Automatisierungstechnik entweder an einem festen Ort oder beweglich sein kann. Ein Manipulator ist dabei eine Maschine, deren Mechanismus aus einer Folge von Komponenten besteht, die durch Gelenke oder gegeneinander verschiebbar verbunden sind. Ein Manipulator hat den Zweck, Gegenstände, beispielsweise Werkstücke oder Werkzeuge, zu greifen und oder zu bewegen [DIN-8373].

Damit ein Roboter verschiedene Aufgaben erfüllen kann, können Vorrichtungen, sogenannte Endeffektoren, an der mechanischen Schnittstelle des Roboters ausgetauscht werden. Beispiele für Endeffektoren sind Greifer, Schweißzangen, Schrauber oder Spritzpistolen [DIN-8373].

Da Industrieroboter ein Bestandteil vieler Produktionsmodule im automobilen Karosserierohbau sind, muss dies auch während der Entwicklung neuer Produkte berücksichtigt werden. In Bild 4.1 sind die wichtigsten Anforderungen an die Produktentwicklung zusammengefasst.

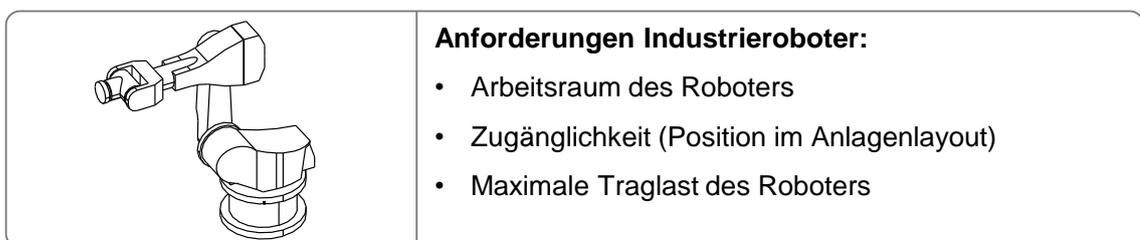


Bild 4.2: Anforderungen Industrieroboter

Damit ein Industrieroboter eine vorgegebene Anwendung durchführen kann, muss der sogenannte Werkzeugarbeitspunkt (Tool Center Point TCP) das Wirkobjekt erreichen. Je nach Werkzeug und Anwendungsfall kann der Werkzeugarbeitspunkt innerhalb (z. B. Punktschweißzange) oder außerhalb (z. B. Farbspritzpistole) des Werkzeugs liegen [VDI-2861]. Die Erreichbarkeit eines Roboters ist durch seinen Bewegungsraum eingeschränkt. Zusätzlich kann der Bewegungsraum eines Roboters durch einen nicht nutzbaren Raum eingeschränkt sein. In Bild 4.3 ist eine Übersicht der Raumaufteilung eines Industrieroboters dargestellt [VDI-2861].

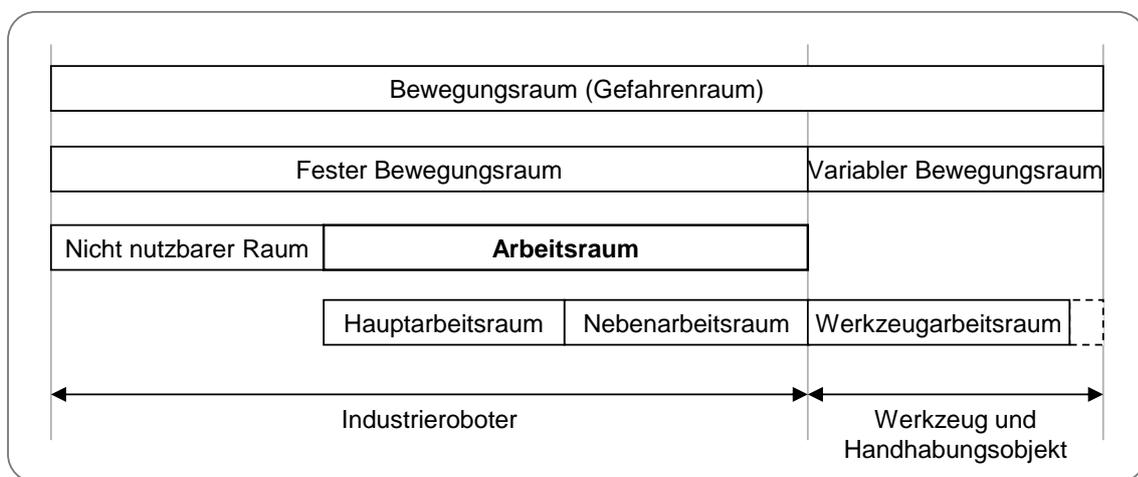


Bild 4.3: Raumaufteilung eines Industrieroboters mit Werkzeug und Handhabungsobjekt nach [VDI-2861]

In Bild 4.4 ist eine Mengendarstellung der Raumaufteilung von Industrierobotern in Zylinderkoordinatenbauweise dargestellt. Industrieroboter können auch auf einer zusätzlichen beweglichen Achse installiert sein, dadurch erweitert sich der Arbeitsraum eines Roboters zusätzlich.

Damit der gesamte Arbeitsraum eines Roboters genutzt werden kann, dürfen sich im Arbeitsraum keine weiteren Produktionsmittel befinden, da diese die Zugänglichkeit des Roboters einschränken würden. Bei der Entwicklung von neuen Produkten muss auch die maximale Nutzlast von Robotern berücksichtigt werden, wenn das neue Produkt mit einem vorgegebenen Roboter gehandhabt werden soll. Als maximale Nutzlast wird die Last angegeben, die unter einschränkenden Bedingungen (z. B. verminderte Geschwindigkeit,

verlängerte Verfahrszeiten, Begrenzung von Arbeitsbereichen oder Einschränkung der Genauigkeit) zusätzlich zu der Werkzeuglast noch gehandhabt werden kann [VDI-2861].

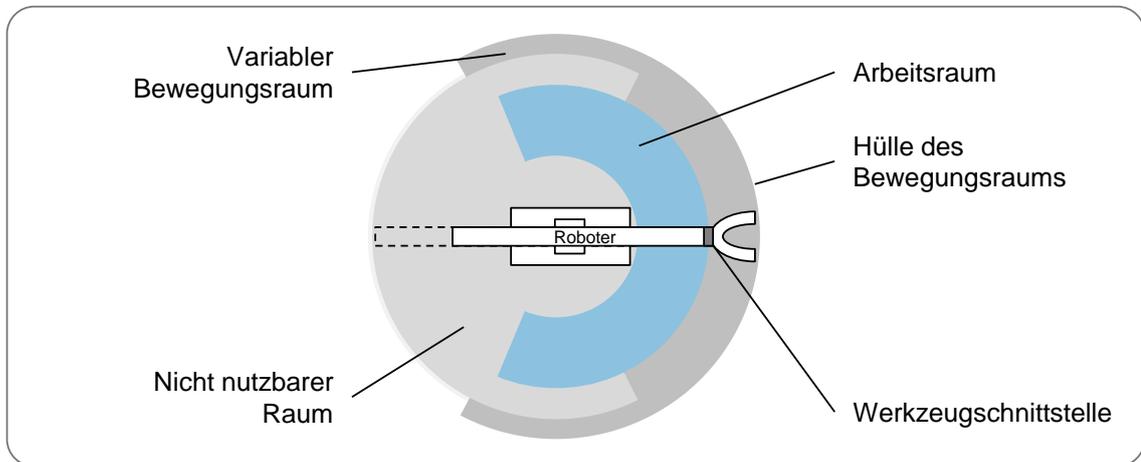


Bild 4.4: Mengendarstellung der Raumaufteilung von Industrierobotern [VDI-2861]

## Schweißen

Im automobilen Karosserierohbau ist das Schweißen eine der wichtigsten Technologien, um Bleche miteinander zu verbinden [HoMe-14]. Die DIN EN 14610 definiert das Schweißen wie folgt:

**Definition 4.2:** Das Metallschweißen ist ein Vorgang, der Metalle unter Aufwand von Wärme und/oder Druck derart verbindet, dass sich ein kontinuierlicher innerer Aufbau des verbundenen Metalls beziehungsweise der verbundenen Metalle ergibt [DIN-14610].

Im Automobilbau ist das Widerstandspunktschweißen ein weitverbreitetes Verfahren zur Verbindung von Karosserieteilen. Dabei entsteht die zum Schweißen erforderliche Wärme durch den Widerstand eines durch die Schweißzone fließenden elektrischen Stroms. Die punktförmige Schweißverbindung entsteht dabei in den Werkstücken zwischen den Punktschweißelektroden [DIN-14610]. Damit der Schweißstrom in die Bauteile eingeleitet werden kann, muss die Fügestelle beidseitig von der Schweißzange zugänglich sein [FaST-14].

Eine Sonderform des Punktschweißens ist das Bolzenschweißen. Bolzen oder Schweißmuttern werden mittels dem Lichtbogenschweißen an den Karosserierohbau geschweißt. Das Verfahren ist ohne eine rückseitige Kontaktierung ausführbar. Im automobilen Karosseriebau werden an Bolzen und

Schweißmuttern weitere Bauteile in der Fahrzeugmontage befestigt [Dilt-06]. Die wichtigsten Anforderungen des Schweißens an das Produkt sind in Bild 4.5 zusammengefasst.

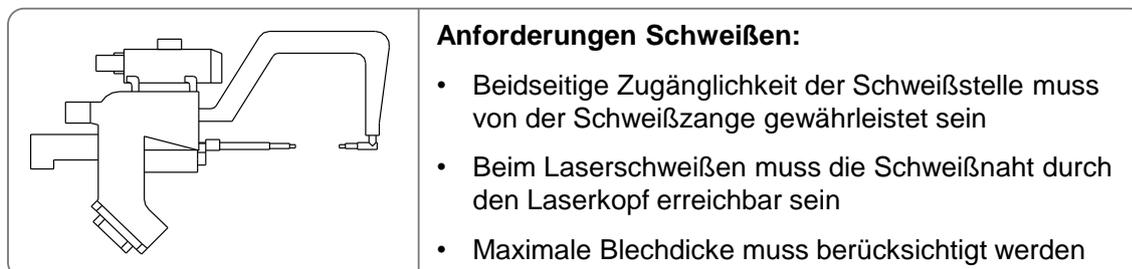


Bild 4.5: Anforderung Schweißen

### Laserschweißen

Das Laserstrahlschweißen zählt zu den Fügetechnologien, bei denen die Verbindung der zu fügenden Teile in schmelzflüssigem Zustand erfolgt [HüGr-09]. Dabei trifft der Laserstrahl auf die Werkstückoberfläche. Je nach Werkstoff und Oberflächenbeschaffenheit wird ein Teil des Laserlichts reflektiert. Ein anderer Teil des Laserstrahls wird abhängig von der Wellenlänge des Lasers und des eingesetzten Werkstoffs im Werkstück absorbiert. Dieser Teil der Laserenergie wird in Wärme umgewandelt und kann somit für das Aufschmelzen des Werkstoffes genutzt werden [FaST-14].

Wie der Laserstrahl über die Bauteiloberfläche bewegt wird, kann auf unterschiedliche Art und Weise realisiert werden [Dilt-06]:

- bewegtes Werkstück, feste Optik,
- bewegte Optik,
- Bewegung von Werkstück und Optik.

Für ein schnelles Positionieren des Laserstrahls kann das sogenannte Remote-Welding-System eingesetzt werden [Lets-12]. Dabei wird der Laserstrahlfokus mittels eines in zwei Achsen drehbaren Spiegels hochdynamisch auf der Bearbeitungsebene positioniert [Dilt-06].

Gegenüber konventionellen Schweißprozessen hat das Laserschweißen folgende Vorteile [FaST-14]:

- Lange Bauteile mit ununterbrochenen Nähten können schneller geschweißt werden.

- Die Dichtheit von Lasernähten ist sehr hoch.
- Durch die schmalen Schweißnähte wird der Schweißverzug reduziert.
- Eine Nacharbeit an Sichtkanten für besonders optisch saubere Nähte ist nicht erforderlich.
- Einfachere Spannvorrichtungen kommen zum Einsatz.

In der Automobilindustrie findet das Ersetzen des Widerstandspunktschweißens durch kurze Laserstrahlnähte aufgrund der möglichen Flanschreduzierung und der daraus resultierenden Gewichtsersparnis große Resonanz [Dilt-06].

### Durchsetzfügen (Clinchen)

**Definition 4.3:** Durchsetzfügen ist der Oberbegriff für die umformtechnischen Fügeverfahren, bei denen unlösbare Verbindungen ohne Zusatzwerkstoff und Wärmeeinwirkung aus dem Material der zu verbindenden Teile erzeugt werden. Das Durchsetzfügen beruht auf örtlicher plastischer Umformung von Blech-, Rohr- und Profilverteilen durch gemeinsames Durchsetzen in Verbindung mit Einschneiden und nachfolgendem Stauchen des Materials [DIN-8593-5]. Üblicherweise besteht ein Durchsetzwerkzeug aus einem Stempel und einer Matrize.

Der Aufbau eines Durchsetzfügemoduls und die daraus resultierenden Anforderungen an die Produktentwicklung sind in Bild 4.6 zusammengefasst.

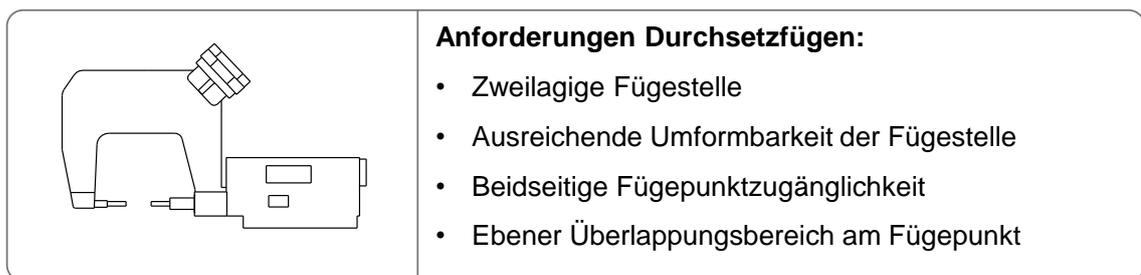


Bild 4.6: Anforderungen Durchsetzfügen

Bei der Konstruktion muss darauf geachtet werden, dass sich die zu fügenden Teile an der ebenen Fügestelle überlappen. Zusätzlich muss darauf geachtet werden, dass eine ausreichende Umformbarkeit der Fügestelle vorhanden ist. Aufgrund des Werkzeugaufbaus muss die Fügestelle beidseitig

zugänglich sein. Die Werkzeugzugänglichkeit ist beim Durchsetzfügen besonders wichtig, da die Werkzeuge aufgrund der hohen Fügekräfte sehr massiv und damit sehr sperrig sind.

### Stanznieten

**Definition 4.4:** Das Stanznieten ist ein umformtechnisches Fügeverfahren, bei dem die Füge Teile ohne Vorlochen und ohne Wärmezuführung mithilfe eines Fügeelements form- und kraftschlüssig verbunden werden.

Es lassen sich beim Stanznieten mit Halbhohlniet zwei- und dreilagige, beim Stanznieten mit Vollniet zwei-, drei- und vierlagige punktförmige Verbindungen sowohl an artgleichen Werkstoffen (Stahl/Stahl, Aluminium/Aluminium) als auch an Werkstoffkombinationen (Stahl/Aluminium, Metall/Kunststoff) herstellen.

Die Anforderungen des Stanznietmoduls an die Produktentwicklung sind gleich wie die des Durchsetzfügemoduls und sind in Bild 4.7 zusammengefasst.

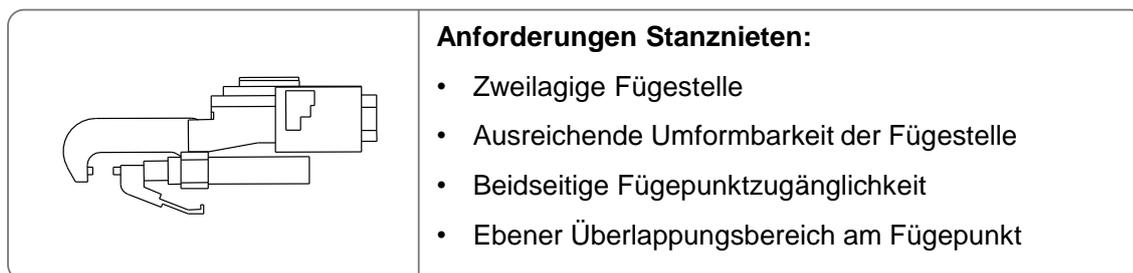


Bild 4.7: Anforderungen Stanznieten

### Kleben

**Definition 4.5:** Kleben ist nach [DIN-8593-8] ein Fügeverfahren unter Verwendung eines Klebstoffes, das heißt eines nicht metallischen Werkstoffes, der Füge Teile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbinden kann.

Beim Kleben im Rohbau handelt es sich um eine stoffschlüssige Füge technik, die zum Fügen von Karosserieteilen eingesetzt wird. Zum Einsatz kommen 1- beziehungsweise 2-Komponenten-Epoxidharzklebstoffe (strukturelles Kleben und Falzkleben) oder weiche 1-Komponenten-Kautschukklebstoffe.

Zu beachten ist, dass eine Klebverbindung im nicht ausgehärteten Klebstoffzustand keine Kräfte übertragen kann, das heißt, die Verbindungskräfte werden bis zur Klebstoffaushärtung lediglich über die mechanische Verbindung gewährleistet. Aus diesem Grund werden im Rohbau die Klebverfahren häufig mit Schweißpunkten, Falzen, Stanznieten oder Falzen kombiniert. Alternativ dazu bietet die 2-Komponenten-Technologie schnelle Klebstoffhärtung durch Induktionserwärmung. Dazu wird nach dem Fügen der Bauteile über das elektromagnetische Feld einer Induktionsschleife Wärme in den Klebeflansch eingebracht und die Klebeschicht angehärtet. Dieses Verfahren eignet sich zum Anhängen von Falzflanschverbindungen. Es kann z. B. zur Fixierung von Bauteilen bis zur vollständigen Aushärtung der Klebstoffschicht eingesetzt werden. Alle Klebstoffe werden in der Lackierung im KTL-Trockner komplett ausgehärtet.

Automatisierte Klebstoffanlagen fördern den (erwärmten) Klebstoff mittels einer Fassungspumpe über ein Leitungssystem bis zur Dosiereinheit. Mit der Dosiersteuerung kann der Klebstoff druck- und mengenabhängig über die beheizte Klebstoffdüse ausgegeben werden. Üblicherweise wird die Dosiereinheit von einem Industrieroboter geführt, sodass eine reproduzierbare Konturführung für den exakten Klebstoffraupenauftrag gewährleistet ist. In Bild 4.8 sind die Anforderungen eines Klebmoduls an die Konstruktion zusammengefasst.

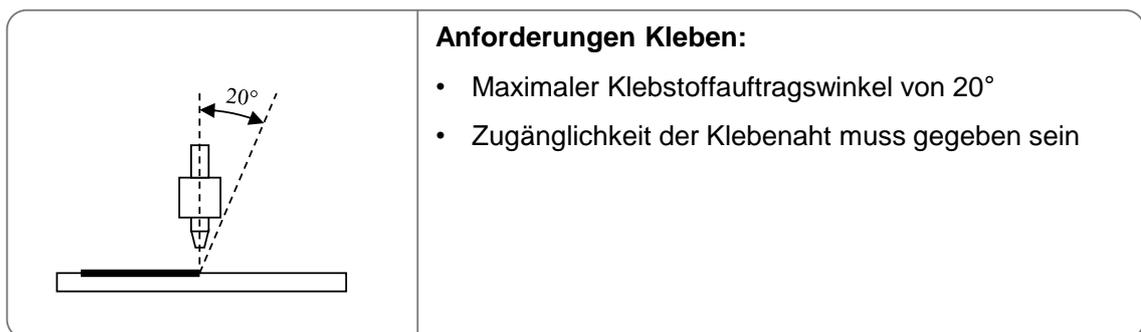


Bild 4.8: Anforderungen Kleben

Beim Abfahren von Klebelinie muss die Zugänglichkeit der Klebedüse gewährleistet sein. Dabei darf der Klebstoffauftragswinkel maximal 20° betragen.

## Falzen

**Definition 4.6:** Das Falzen ist ein Fügeverfahren, bei dem vorbereitete Blechteile ineinander gelegt oder ineinandergeschoben werden und durch Umlegen der Ränder ein Formschluss entsteht [DIN-8593-5].

In der Automobilindustrie wird das Falzen bei der Fertigung von Anbauteilen wie Fahrzeugtüren, Heckklappen und Schiebedächern eingesetzt. Dabei wird der Rand einer Beplankung um ein Innenblech gebogen. Im Normalfall werden hierfür Pressen mit komplexen Stempelgeometrien eingesetzt. Beim Rollfalzen dagegen sind die Bleche in einem Werkzeugbett gespannt. Der Falzvorgang wird durch einen speziellen Rollfalzkopf durchgeführt, der von einem Industrieroboter geführt wird. Auf dem Rollfalzkopf sind Rollen befestigt, die für die einzelnen Bearbeitungsschritte vorgesehen sind. Der große Vorteil vom Rollfalzen ist die hohe Produktflexibilität. Verschiedene Produktvarianten können mit einer Fertigungszelle produziert werden. Der Rollfalzkopf kann natürlich auch gegen andere Werkzeuge ausgetauscht werden. Auf diese Weise kann der Roboter auch andere Aufgaben übernehmen.

Die wichtigsten Anforderungen eines Falzmoduls an die Produktentwicklung sind Bild 4.9 zusammengefasst.

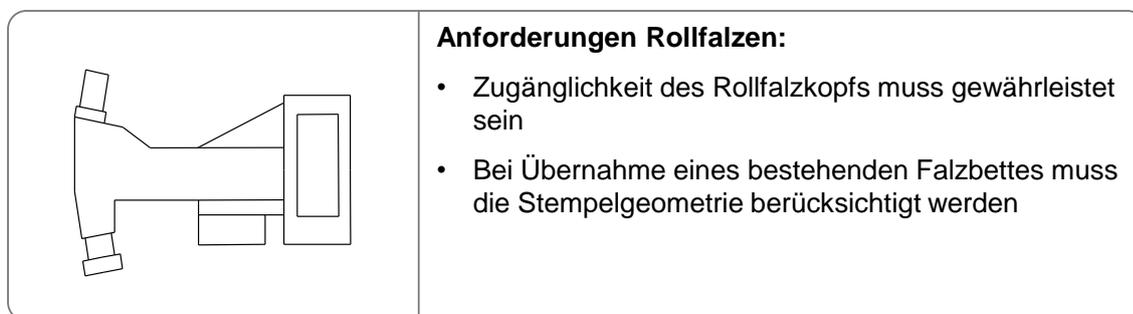


Bild 4.9: Anforderungen Falzen

Auch beim Rollfalzen ist die Werkzeugzugänglichkeit ein wichtiger Aspekt, der auch schon während der Produktentwicklung berücksichtigt werden muss, wenn ein neues Produkt auf einem bestimmten Produktionsmodul gefertigt werden soll. Wird ein Falzbett wiederverwendet, so muss die komplexe Stempelgeometrie übernommen werden.

### 4.1.3 Geometrie der Betriebsmittel

Ein Produktionsmodul besteht aus zuvor festgelegten Produktionsressourcen. Wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, werden in der Produktionsplanung, beispielsweise bei der Erstellung des Fabriklayouts, bereits 3D-Modelle der Produktionsmodule herangezogen. Damit ein neues Produkt auf einem bestimmten Produktionsmodul gefertigt werden kann, darf es keine Kollisionen zwischen Produkt und dem Produktionsmodul geben.

Die Produktionsressourcen im Karosseriebau können in typgebundene und typungebundene Komponenten eingeteilt werden. Beispiele für typungebundene Komponenten sind Industrieroboter, Drehtische, Schweißzangen, etc.. Spann- und Fixiervorrichtungen, Greifer, etc. sind in der Regel typgebundene Komponenten. Eine Übersicht von typgebundenen und -ungebundenen Komponenten ist in Bild 4.10 dargestellt.

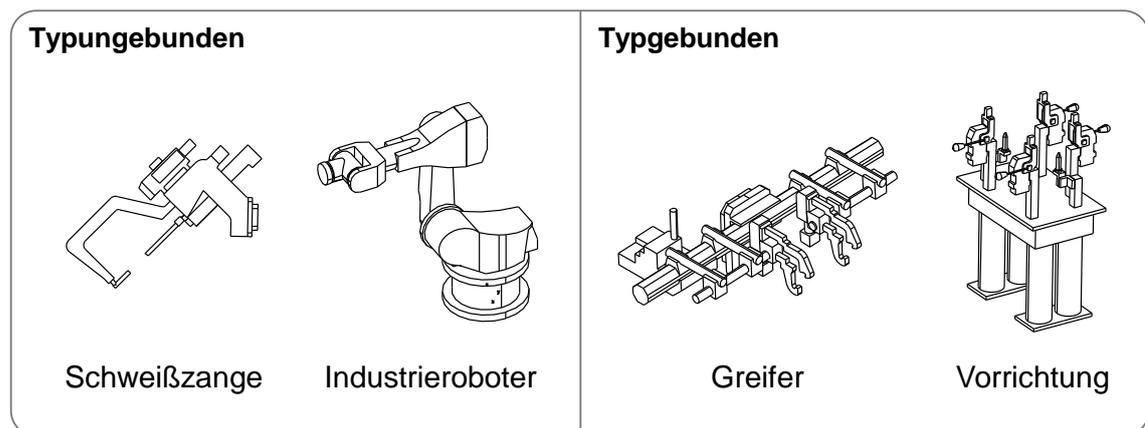


Bild 4.10: Beispiele für typungebundene und typgebundene Produktionsmittel

Im Karosserierohbau der Automobilindustrie liegt der Anteil der typungebundenen Investitionen bei 60 % und der typgebundenen Investitionen bei ca. 40 % [Meic-07]. Durch Standardisierung und Flexibilisierung der Anlagen kann der Anteil sogar auf 85 % gesteigert werden [Meic-07]. Nichtsdestotrotz können typgebundene Komponenten nicht vermieden werden, da der Einsatz von typungebundenen Produktionssystemen die Gestaltungsfreiheit der Produktentwicklung zu stark einschränken würde. Bei der Definition von Produktionsmodulen muss darauf geachtet werden, dass typgebundene Komponenten vermieden werden. Typgebundene Komponenten sollten austauschbar sein, um eine Produktflexibilität einer Anlage zu gewährleisten.

In Bild 4.11 sind die wichtigsten Anforderungen von typgebundenen Betriebsmitteln an die Produktentwicklung zusammengefasst.

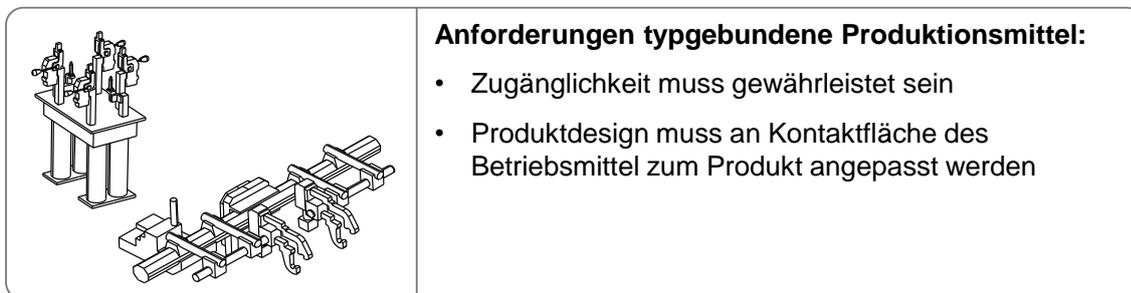


Bild 4.11: Anforderungen typgebundene Produktionsmittel

Die Zugänglichkeit der einzelnen Werkzeuge muss dem Produktentwickler möglichst anschaulich dargestellt werden. Besonders bei den standardisierten Fertigungswerkzeugen muss bereits in einer sehr frühen Phase des Produktentstehungszyklus die Geometrie der Werkzeuge berücksichtigt werden. Typgebundene Ressourcen werden in der Regel sehr spät im Produktentstehungsprozess konstruiert und gebaut, da hierfür die exakte Geometrie der Produkte notwendig ist. Soll eine typgebundene Produktionsressource für ein neues Produkt wiederverwendet werden, so müssen die Flächenkonturen der Ressource in dem neuen Produkt integriert werden. Die Zugänglichkeit muss beim Platzieren des neuen Bauteils auf der Produktionsressource gewährleistet sein (z. B. beim Greifen eines Bauteils mit einem Greifer). Einige typgebundene Ressourcen können durch Verstellungen an unterschiedliche Produkte angepasst werden. Diese Flexibilität muss dem Konstrukteur bewusst sein.

Auch bei den typungebundenen Ressourcen müssen die Möglichkeiten und Einschränkungen der Anlage dem Konstrukteur gezeigt werden. Bild 4.12 fasst die wichtigsten Anforderungen an die Produktentwicklung zusammen.

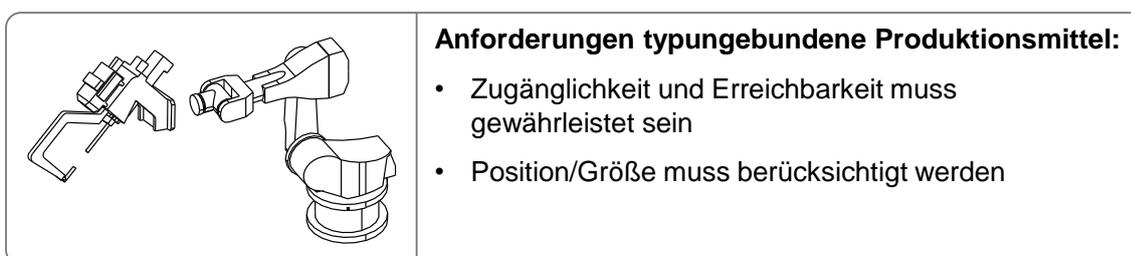


Bild 4.12: Anforderungen typungebundene Produktionsmittel

#### 4.1.4 Layout der Produktionsmodule

Nicht nur die oben erwähnte Ressourcengeometrie schränkt die Zugänglichkeit der Produktionsmodule ein, sondern auch ihre Position im Fabriklayout. Es muss möglichst früh im Produktentstehungsprozess sichergestellt werden, dass Industrieroboter und andere Maschinen das Produkt erreichen können. Die Anforderungen, die sich von dem Modullayout ableiten lassen, sind in Bild 4.13 zusammengefasst.

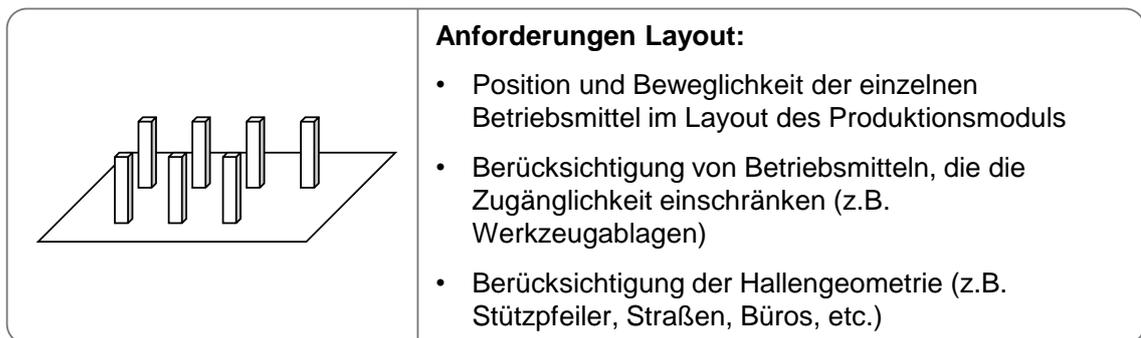


Bild 4.13: Anforderungen Layout

Die Position der einzelnen Betriebsmittel innerhalb eines Produktionsmoduls definiert im hohen Maße die Erreichbarkeit des Moduls. Ist beispielsweise ein Industrieroboter zu weit weg von der Fixier- und Spannvorrichtung entfernt, so kann er die zu fügenden Bauteile nicht erreichen. Zusätzlich können andere Betriebsmittel, wie beispielsweise Steuerschränke, Pumpen oder Werkzeugablagen, die Zugänglichkeit behindern.

Das Hallenlayout muss bei der Wiederverwendung von Produktionsanlagen bereits früh im Produktentwicklungsprozess berücksichtigt werden. Unter Umständen müssen die Produktionsmodule an das Hallenlayout angepasst werden. Dies kann auch sehr spät im Produktentwicklungsprozess entschieden werden.

#### 4.1.5 Taktzeit

Abhängig von den verwendeten Produktionsressourcen ist für ein Produktionsmodul die Taktzeit festgelegt. Durch die Taktzeit ist die Anzahl der Fertigungsoperationen limitiert. Beispielsweise kann ein Roboter in einer bestimmten Zeit nur eine bestimmte Anzahl von Schweißpunkten setzen oder

eine bestimmte Länge einer Kleberraupe abfahren. Diese Einschränkungen müssen dem Produktentwickler vorgegeben werden. Bild 4.14 fasst die wichtigsten Anforderungen an die Produktentwicklung zusammen.

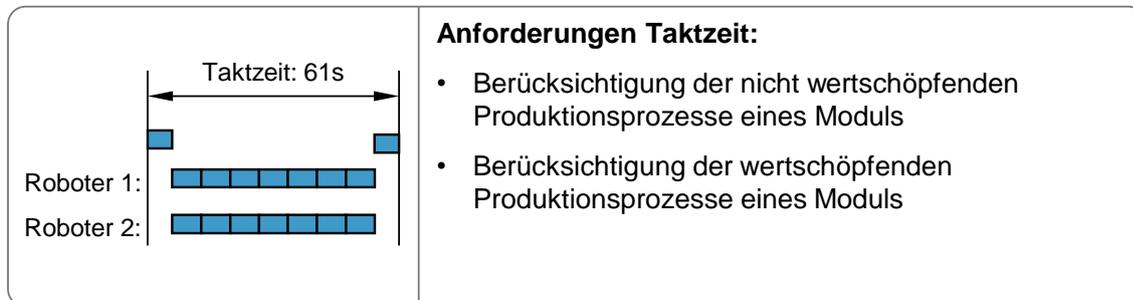


Bild 4.14: Anforderungen Taktzeit

In der Prozessplanung wird zwischen wertschöpfenden und nicht wertschöpfenden Produktionsprozessen unterschieden. Oft sind starke Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Prozessen vorhanden. Möglicherweise dürfen bestimmte Prozesse begonnen werden, wenn ein oder mehrere Prozesse abgeschlossen wurden. Beispiel hierfür kann ein Schweißprozess sein, der erst beginnen darf, wenn alle Spann- und Fixiereinheiten in die richtige Position gefahren sind. Andere Prozesse können wiederum parallel abgearbeitet werden wie beispielsweise das Schweißen mit zwei oder mehreren Robotern. Allerdings muss sichergestellt werden, dass sich die Roboter nicht gegenseitig behindern.

#### 4.1.6 Zusammenfassung der Anforderungen an die neue Methode

Viele der vorgestellten Anforderungen aus dem Rohbau werden bereits in weitverbreiteten Gestaltungsrichtlinien oder in Vorgaben der produktionsgerechten Produktgestaltung dokumentiert. Solche Gestaltungsrichtlinien sind auch in der Automobilindustrie weitverbreitet. Auffällig ist, dass fast bei allen Produktionstechnologien die Zugänglichkeit der Werkzeuge, beispielsweise von Schweißzangen, Robotern oder Greifern, eine wichtige Rolle spielt. Dabei wird die Zugänglichkeit der Werkzeuge durch andere Werkzeuge, das Fabriklayout oder durch das Produkt selbst sehr stark eingeschränkt. Diese Abhängigkeiten können nicht in einfachen Gestaltungsrichtlinien dargestellt werden, sondern müssen im Kontext einer spezifischen

Anlage betrachtet werden. Es wurden nicht nur geometrische Vorgaben an die Produktentwicklung aufgezeigt, sondern auch alphanumerische, wie beispielsweise die geplante Taktzeit für die einzelnen standardisierten Produktionsanlagen.

Wie in Bild 4.15 zu sehen ist, haben die zusammengetragenen Anforderungen Einfluss auf die Gestaltungsfreiheit des Produktentwicklers.

| Anforderung an Produktentwicklung                            | Bedeutung für die Produktentwicklung                     |
|--|--|
| Vorgegebene Fügefolge  | Aufbau der Produktstruktur                               |
| Vorgegebene Fertigungstechnologie                            | Verbindungstechnik                                       |
| Geometrie der Betriebsmittel<br>Layout des Produktionsmoduls | Ort, an dem ein Verbindungselement definiert werden darf |
| Taktzeit   | Anzahl an Verbindungselementen                           |

Bild 4.15: Einfluss der Anforderungen auf die Produktentwicklung

Aufgrund der vorgegebenen Taktzeit des Produktionsmoduls lässt sich nur eine bestimmte Anzahl an Verbindungselementen fertigen. Dies und die anderen Vorgaben müssen dem Produktentwickler möglichst einfach veranschaulicht werden.

## 4.2 Grobkonzept der Methode zur frühzeitigen Produktbeeinflussung

Bevor die einzelnen Schritte der erarbeiteten Methode erläutert werden, wird zunächst das Grobkonzept vorgestellt. Unter einer Methode wird dabei, in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2223, „ein planvolles Vorgehen zum Erreichen eines bestimmten Ziels“ verstanden [VDI-2223]. Eine Methode ist somit ein Verfahren, das auf einem Regelsystem aufbaut und zur Erreichung von wissenschaftlichen und praktischen Ergebnissen dient [Ehrl-07].

### 4.2.1 Grobkonzept der erarbeiteten Vorgehensweise

Die Produktentwicklung wird vom kontinuierlichen Produktabsicherungsprozess begleitet (vgl. Kapitel 2.1.2). Neben den Produktfunktionen werden auch die produktionsbezogenen Anforderungen abgesichert. Wenn bei einer Absicherung Probleme aufgedeckt werden, muss das Produkt oftmals in mehreren Iterationsschleifen angepasst werden.

Um den Produktentwicklungsprozess durch Vermeidung von Iterationsschleifen bei der produktionsgerechten Produktgestaltung und -absicherung zu vermeiden, müssen Anforderungen aus der Produktion bereits vor der Gestaltung des Produkts dem Konstrukteur bewusst gemacht werden [WaKi-11]. Dieses Vorgehen wird in Bild 4.16 schematisch dargestellt.

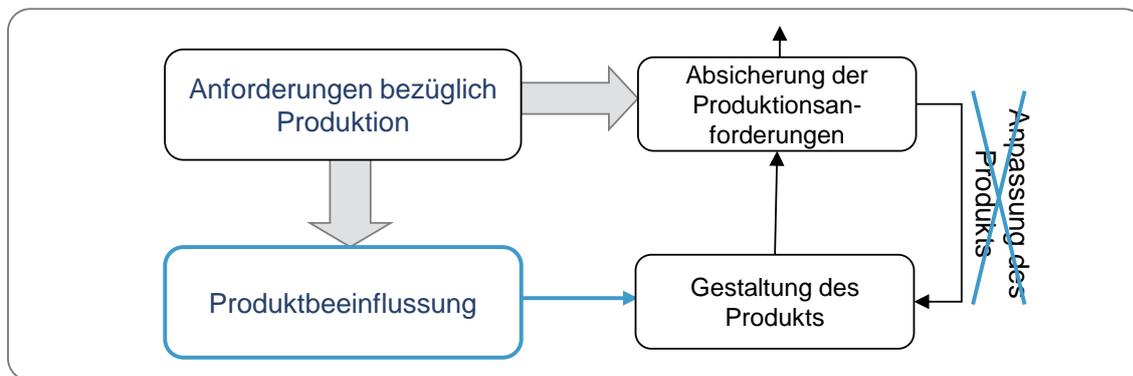


Bild 4.16: Frühzeitige Produktbeeinflussung

Da die Anforderungen von den Produktionsmodulen in die Produktbeeinflussung einfließen, wird durch eine frühzeitige Produktbeeinflussung die Anzahl der Probleme, die bei der produktionsbezogenen Produktabsicherung aufgedeckt werden, sinken. Durch die Vermeidung von immer wiederkehrenden Iterationsschleifen verkürzt sich der Produktionsentstehungsprozess. Wie die einzelnen Schritte der Produktbeeinflussung aussehen, wird in Bild 4.17 veranschaulicht. Im Folgenden werden die vier Schritte der Produktbeeinflussung kurz vorgestellt:

**Schritt 1:** Bevor ein neues Produkt bezüglich Produktionsanforderungen beeinflusst wird, muss zunächst die Produktionsstrategie festgelegt werden. Abhängig von der Unternehmensstrategie kann das neue Produkt auf einer

bestehenden Anlage gefertigt werden oder es wird eine neue Anlage für dieses Produkt konzipiert und gebaut. Die erarbeitete Methode unterstützt den Auswahlprozess der Produktionsstrategie.

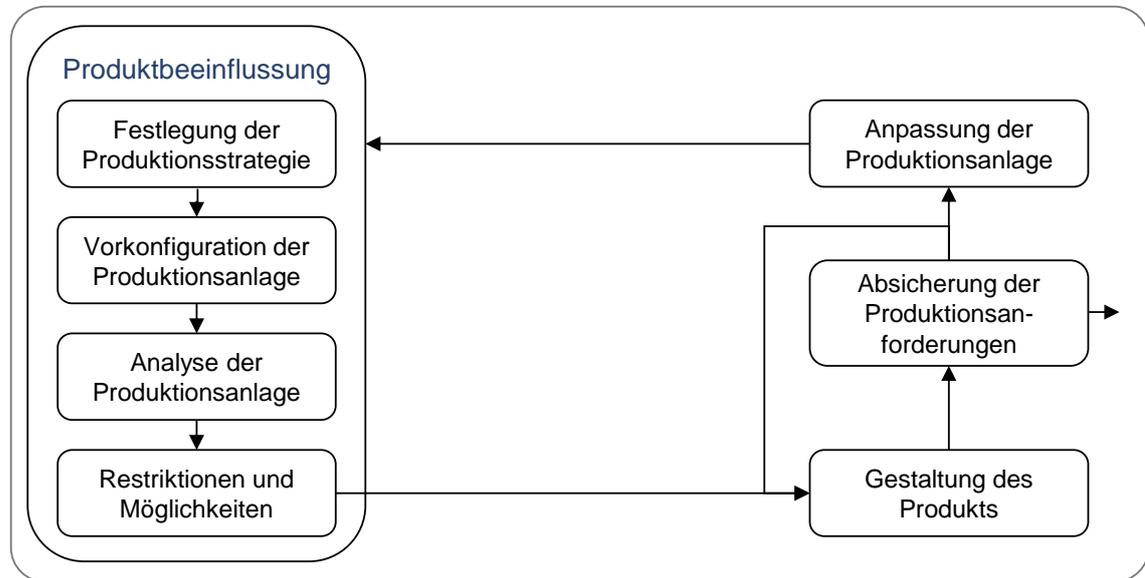


Bild 4.17: Gesamtüberblick der Methode

**Schritt 2:** Nachdem die Produktionsstrategie festgelegt wurde, muss die Produktionsanlage vorkonfiguriert werden. Abhängig davon, ob es sich um eine schon bestehende Anlage oder um eine neu zu gestaltende Anlage handelt, werden unterschiedliche Strategien verfolgt. Bei der Wiederverwendung von Anlagen müssen die Produktionsmodule aus der realen Fabrik abgeleitet werden. Bei der Neukonzeption einer Anlage werden vordefinierte Produktionsmodule herangezogen.

**Schritt 3:** Im nächsten Schritt muss die Anlage analysiert und vereinfacht werden. Da die Produktionsmodule sehr detailliert modelliert sind, müssen die Modelle für die Produktentwicklung aufbereitet werden. Um den Konstrukteur nicht mit Daten und Anforderungen zu überfluten, müssen die Informationen bezüglich Geometrie, Layout, Fügefolge und Taktzeit vereinfacht werden.

**Schritt 4:** Bevor die Gestalt des neuen Produkts definiert wird, müssen im letzten Schritt die Möglichkeiten und Einschränkungen der Anlage ermittelt werden. Neben der Ermittlung der maximalen Anzahl an Fertigungsoperati-

onen werden auch die Zugänglichkeitsräume der Produktionsanlage ermittelt. Diese werden dem Konstrukteur im Rahmen einer sogenannten Produktionsumgebung zur Verfügung gestellt.

Anschließend wird das Produkt unter Berücksichtigung der Einschränkungen und Möglichkeiten der Produktionsanlage konstruiert. Sollte die abschließende produktionsgerechte Produktabsicherung noch nicht berücksichtigte Probleme aufdecken, so muss entweder das Produkt erneut angepasst werden oder die Produktionsanlage wird so verändert, dass das neue Produkt auf ihr fertigbar ist.

#### 4.2.2 Strategische Festlegung der Produktionsanlage

Für die Produktbeeinflussung muss zunächst die Produktionsstrategie festgelegt werden. Dies ist der erste Schritt in der erarbeiteten Methode (vgl. Bild 4.18).

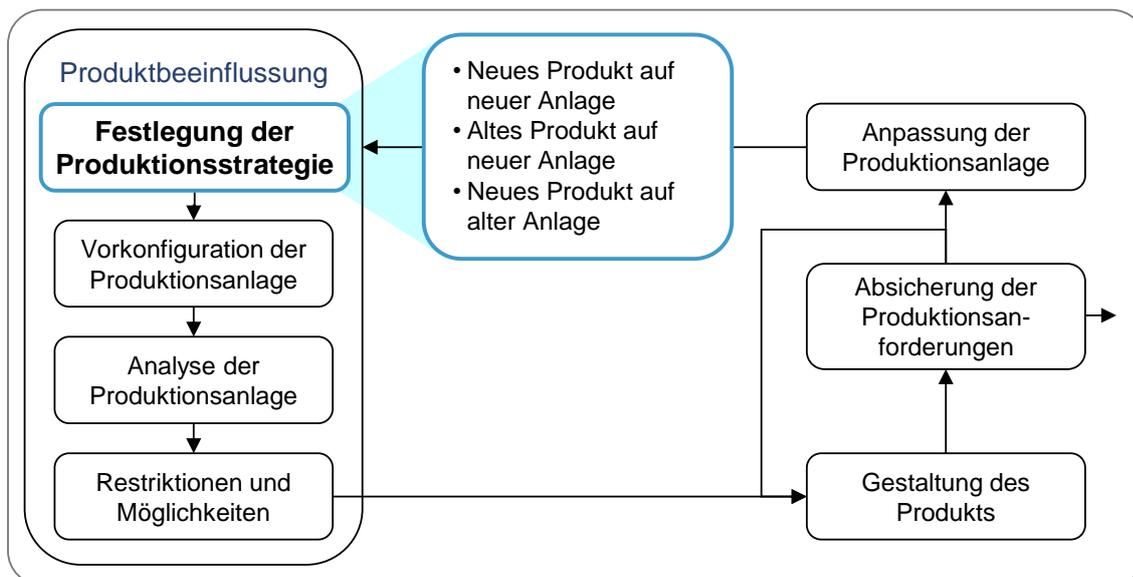


Bild 4.18: Festlegung der Produktionsstrategie

Zu Beginn des Produktentstehungszyklus muss entschieden werden, an welchem Standort das neue Produkt gefertigt werden soll. Abhängig von der strategischen Entscheidung, kann ein neues Produkt auf einer bestehenden Anlage beziehungsweise auf einer neu geplanten Anlage gebaut werden. Eine Übersicht über die möglichen strategischen Entscheidungen wird in Bild 4.19 dargestellt.

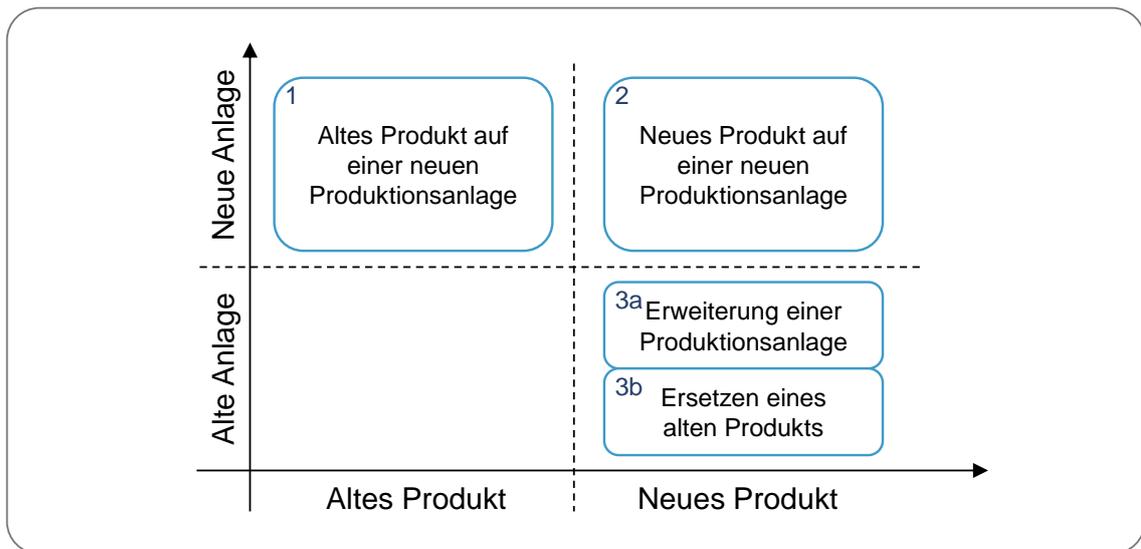


Bild 4.19: Produktionsstrategien

Abhängig davon, ob ein neues Produkt auf einer bereits bestehenden Produktionsanlage, oder auf einer neu zu planenden Anlage gefertigt werden soll, müssen jeweils andere produktionsbezogene Anforderungen bei der Produktentwicklung berücksichtigt werden. Im Folgenden werden die drei Szenarien aus Bild 4.19 bezüglich der jeweiligen Anforderungen an das Produkt diskutiert:

### **Szenario 1:** Ein altes Produkt auf einer neuen Anlage

In einer globalisierten Welt werden Produkte an verschiedenen Standorten produziert. Der Produktionsstart muss nicht zwingend an allen Standorten zur gleichen Zeit beginnen. Abhängig von der Nachfrage nach den Produkten, kann die Produktion durch zusätzliche Produktionsanlagen erweitert werden. Zwar lässt sich auf das Produkt kein Einfluss mehr nehmen, aber die Planung kann mithilfe der Produktionsmodule unterstützt werden. Da das Produkt bereits produziert wird, ist es am einfachsten die neue Anlage in Anlehnung an die Alte aufzubauen. Allerdings müssen auch mögliche Einschränkungen des neuen Standorts mitberücksichtigt werden. Da nur in den wenigsten Fällen das Hallenlayout des neuen Standorts mit dem des Alten übereinstimmen wird, muss das Anlagenlayout angepasst werden. Aus Kostengründen können sich auch die Anlagen verändern. Beispielsweise ist in Niedriglohnländern der Einsatz von hoch automatisierten Anlagen nicht üblich. Stattdessen ist der Anteil an manuellen Stationen höher.

Zwar ist in diesem Szenario keine Produktbeeinflussung mehr möglich, dennoch sollte der Produktionsplaner bei der Gestaltung der Produktionsanlage unterstützt werden. Die wichtigsten Anforderungen sind dabei [Stan-12]:

- Layout der Produktionsanlage,
- Taktzeit der Module,
- Definierte Fügefolge,
- Zugänglichkeit der Betriebsmittel.

### **Szenario 2:** Neues Produkt auf einer neuen Produktionsanlage

Ist bereits zu Beginn des Produktentstehungsprozesses bekannt, dass das neue Produkt auf einer neu gestalteten Produktionsanlage gefertigt werden soll, so kann auf das Produkt als auch auf die Produktionsanlage Einfluss genommen werden. Wird, wie heute in der Automobilindustrie üblich, eine neue Anlage aus vordefinierten Produktionsmodulen geplant, so ist es auch in diesem Fall wichtig, dass die einzelnen Produktionsmodule möglichst nicht verändert werden, um die Vorteile einer standardisierten Produktionsanlage nicht zu verlieren. Allerdings müssen auch bei der Neuplanung einer modularisierten Anlage die Einschränkungen der Produktionsmodule bei der Konstruktion des neuen Produkts berücksichtigt werden.

### **Szenario 3a:** Erweiterung einer Produktionsanlage um ein neues Produkt

Soll ein neues Produkt auf einer bestehenden Anlage, auf der bereits andere Produkte gefertigt werden, produziert werden, so müssen die Einschränkungen der Produktionsanlage bereits im Produktentwicklungsprozess berücksichtigt werden, da aufgrund des laufenden Betriebs die Anlage nicht umfangreich umbaut werden kann. Es muss sichergestellt werden, dass sowohl das neue als auch die älteren Produkte auf dieser Anlage gefertigt werden können. Zudem ist auf eine möglichst kurze Umbauzeit der Anlage zu achten, da der Produktionsbetrieb nicht gestört werden soll. Bei der Integration eines neuen Produkts auf einer bestehenden Anlage muss vorab geklärt werden, ob mit der vorgegebenen Taktzeit die gewünschte Produktstückzahl erreicht werden kann.

In der Produktionsplanung wird die Taktzeit unter Berücksichtigung der geplanten Produktstückzahl wie folgt ermittelt:

$$t_{Taktzeit} = \frac{BNZ}{s \cdot (1+e)} \cdot V \quad (4.1)$$

Die Taktzeit  $t_{Taktzeit}$  hängt von der Betriebsnutzungszeit BNZ, der Anlagenverfügbarkeit V und der Stückzahl S ab. Um auch die auf dieser Anlage zu produzierenden Ersatzteile zu berücksichtigen, wird die geplante Stückzahl mit dem Faktor e multipliziert.

Wenn die Nachfrage nach einem Produkt oder mehreren Produkten, die auf einer Anlage gefertigt werden, sinkt, kann die frei werdende Kapazität der Anlage genutzt werden, um das neue Produkt zu fertigen. Da die Taktzeit einer Anlage nicht ohne Weiteres verändert werden kann, bleibt diese konstant. Somit kann die maximale Stückzahl des neuen Produkts wie folgt errechnet werden:

$$S_{neu\ Produkt} = \frac{BNZ}{t_{Taktzeit} \cdot (1+e)} \cdot V - S_{Summe\ Alt} \quad (4.2)$$

Ist die gewünschte Stückzahl des neuen Produkts kleiner als die errechnete Stückzahl, so reicht die Kapazität der Anlage aus, um auch das neue Produkt auf ihr zu produzieren. Allerdings muss noch überprüft werden, ob die gewünschten Technologien auf dieser Anlage vorhanden sind. Folgende Faktoren müssen überprüft werden:

- Material des Produkts,
- Handhabbarkeit des Produkts,
- Fertigungstechnologie,
- Vorgegebene Fügefolge.

**Szenario 3b:** Ersetzen eines alten Produkts durch ein Neues auf einer bestehenden Anlage

Dieses Szenario kommt zum Einsatz, wenn ein Nachfolgerprodukt auf der gleichen Anlage gefertigt werden soll wie das Vorgängerprodukt. Auch in diesem Szenario muss zunächst überprüft werden, ob die Kapazitäten und Produktionstechnologien der Produktionsanlage für die Produktion des neuen Produkts vorhanden sind.

In der folgenden Tabelle sind die drei Szenarien und ihre Restriktionen zusammengefasst. Sollen die Kosten und der Aufwand für den Aufbau beziehungsweise Umbau der Anlagen möglichst klein gehalten werden, so dürfen diese Vorgaben nicht verletzt werden.

|                    | Fügefolge         | Geometrie der Betriebsmittel         | Berücksichtigung der Fertigungstechnologie | Layout der Anlage | Taktzeit der Linie         |
|--------------------|-------------------|--------------------------------------|--|-------------------|----------------------------|
| <b>Szenario 1</b>  | bedingt anpassbar | aus dem Unternehmensstandard wählbar | aus dem Unternehmensstandard wählbar       | anpassbar         | muss berücksichtigt werden |
| <b>Szenario 2</b>  | bedingt anpassbar | aus dem Unternehmensstandard wählbar | aus dem Unternehmensstandard wählbar       | anpassbar         | muss berücksichtigt werden |
| <b>Szenario 3a</b> | vorgegeben        | vorgegeben                           | vorgegeben                                 | vorgegeben        | muss berücksichtigt werden |
| <b>Szenario 3b</b> | vorgegeben        | vorgegeben                           | vorgegeben                                 | vorgegeben        | muss berücksichtigt werden |

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der drei Szenarien

### 4.2.3 Grobe Vorkonfiguration der Produktionsanlage

Im nächsten Schritt wird, wie im Bild 4.20 dargestellt, die grobe Vorkonfiguration der Produktionsanlagen erstellt.

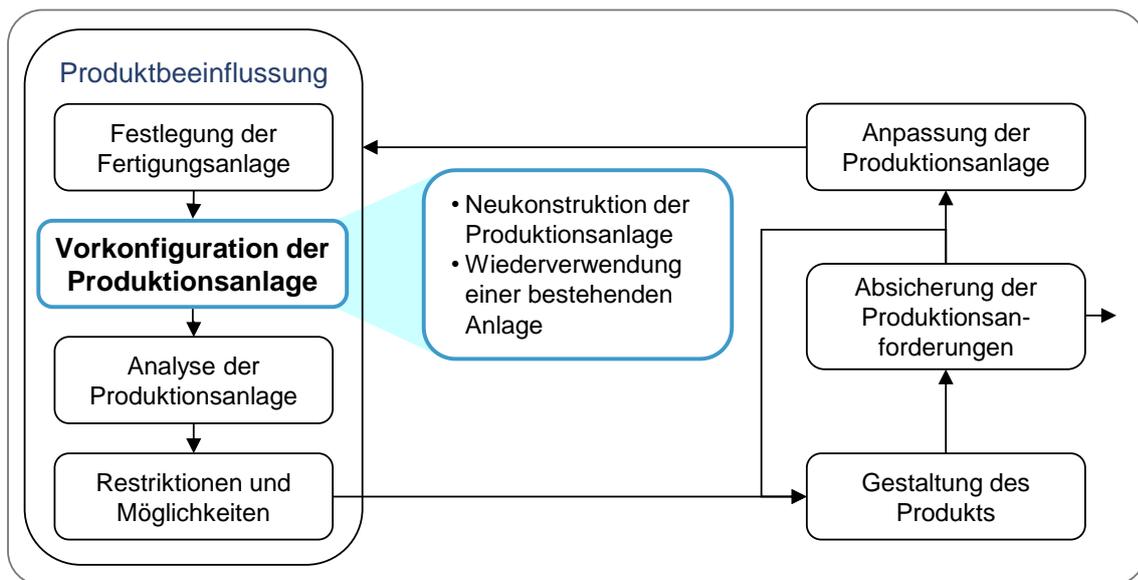


Bild 4.20: Vorkonfiguration der Produktionsanlage

Der Kern der Methode ist eine modularisierte Produktion, wie sie im Kapitel 3.2.2 vorgestellt wurde. Damit Anforderungen an das Produkt abgeleitet werden können, muss zunächst eine Grobstruktur der Produktionsanlage im Zusammenspiel mit der Produktstruktur festgelegt werden. Abhängig von der im vorherigen Schritt festgelegten Produktionsstrategie, wird die Struktur der Produktionsanlage wie folgt definiert:

### Neukonstruktion der Anlage (Szenario 1 und 2)

In Anlehnung an Best Practice Lösungen aus der Vergangenheit wird eine Grobstruktur der Anlage abgeleitet (vgl. Bild 4.21). Dabei werden aus einer zuvor definierten Bibliothek, abhängig von der Taktzeit, die entsprechenden Produktionsmodule aneinandergereiht. Auf diese Weise entsteht auf Basis der Produktstruktur ein erstes Groblayout der Anlage zu einem sehr frühen Zeitpunkt des Produktentstehungsprozesses. Allerdings sind noch nicht alle Eigenschaften des Produkts bekannt, deshalb ist eine Überprüfung und möglicherweise eine Anpassung der Anlagenstruktur zu einem späteren Zeitpunkt notwendig.

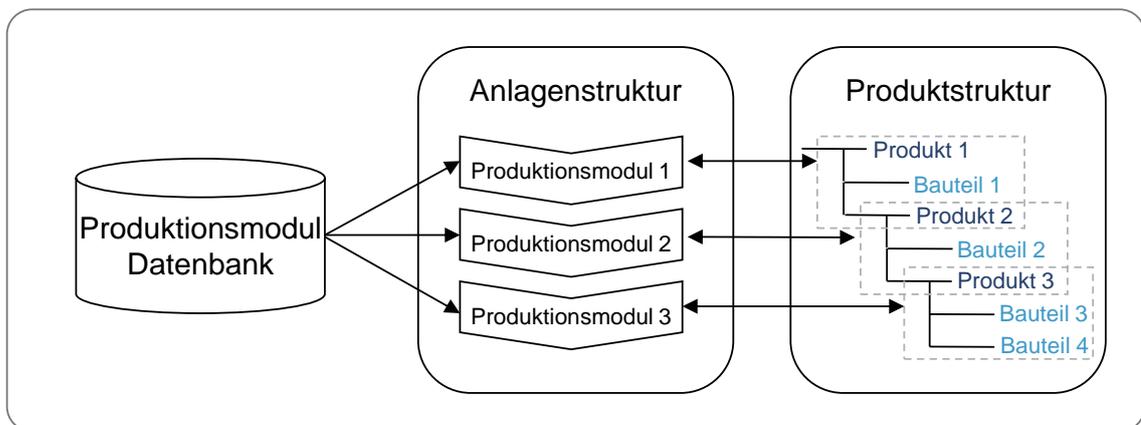


Bild 4.21: Neue Produktionsstruktur

Durch eine frühe Definition der Produktionsanlage kann während des Produktentstehungsprozesses Einfluss auf das Produkt genommen werden, so dass das neue Produkt von einer standardisierten Produktionsanlage gefertigt werden kann. Da die Anlage aus vordefinierten Produktionsmodulen besteht, gibt es bereits ein erstes geometrisches Modell der Anlage. Dieses kann auch sofort in ein vorhandenes Fabriklayout eingefügt werden.

Die Festlegung der Anlagenstruktur wird unter Berücksichtigung der Produktstruktur festgelegt. Da ein Produktionsmodul nur eine beschränkte Anzahl an Bauteilen handhaben kann, muss diese bereits in der Produktstruktur mitberücksichtigt werden.

### Wiederverwendung einer bestehenden Anlage (Szenario 3a und 3b)

Soll das neue Produkt auf einer bestehenden Anlage gefertigt werden, so ist die Anlagenstruktur bereits vorgegeben (vgl. Bild 4.22). Zwar kann eine Anlage umgebaut werden, dies sollte allerdings aus Kostengründen vermieden werden. Deshalb ist in diesem Szenario die Produktbeeinflussung besonders wichtig. Die Produktstruktur muss von der Anlagenstruktur abgeleitet werden [Klep-04]. Dies bedeutet, dass die Struktur des neuen Produkts der Struktur der bereits auf dieser Anlage gefertigten Produkte ähnelt.

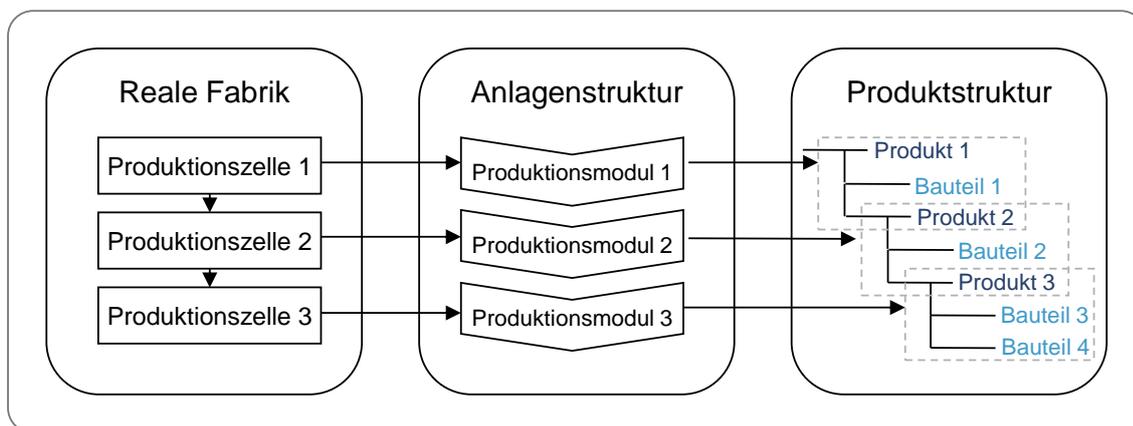


Bild 4.22: Wiederverwendung einer Anlage

Als Grundlage für die Produktbeeinflussung können die Konstruktionsdaten der realen Produktionsanlage verwendet werden [WaBO-11]. Allerdings verändert sich eine Anlage während ihres Lebenszyklus durch Reparatur-, Instandhaltungsarbeiten, Erweiterungen oder Anpassungen der Anlage. Diese Veränderungen müssen sowohl in der Anlagenstruktur als auch in den 3D-Modellen der Anlage angepasst werden.

Im nächsten Schritt wird die Anlage in einzelne Produktionsmodule unterteilt. Da die Anlage in Linien und Stationen gegliedert ist, kann diese Strukturierung der Anlage übernommen werden. Bevor mit der Konstruktion der einzelnen Bauteile begonnen werden kann, muss die Produktstruktur beziehungsweise die Fügefolge des Produkts den einzelnen Produktionsmodulen zugewiesen werden.

#### 4.2.4 Analyse der Produktionsanlage

Wie in Bild 4.22 dargestellt ist, werden im nächsten Schritt die Modelle für die Produktbeeinflussung vorbereitet. Sowohl alphanumerische als auch geometrische Informationen über das Produktionsmodul müssen für die Produktbeeinflussung aufbereitet werden.

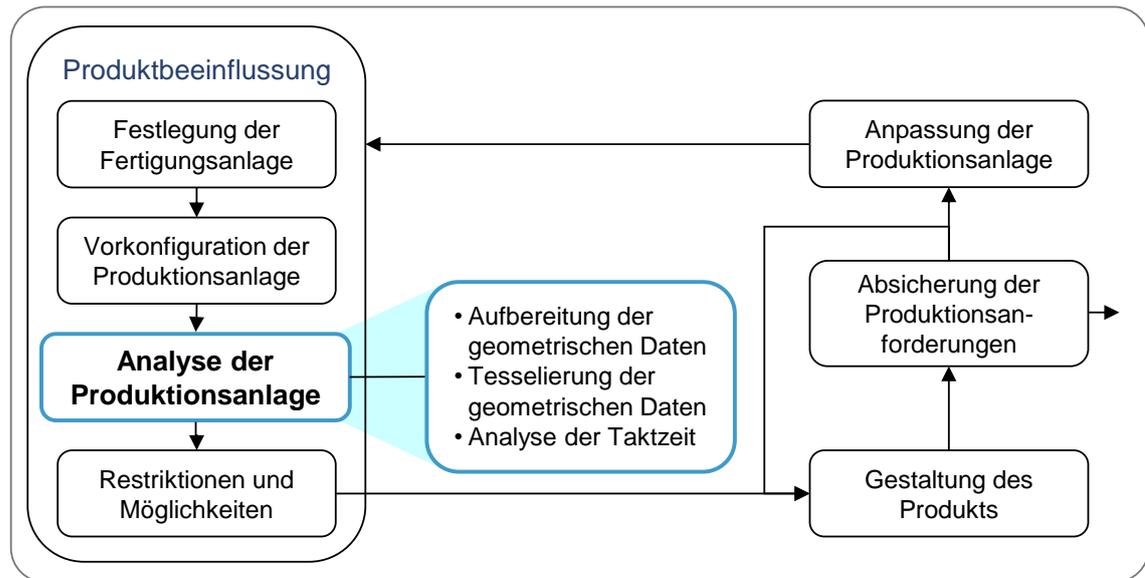


Bild 4.23: Analyse der Produktionsanlage

#### Aufbereitung der geometrischen Daten

Wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben wurde, unterteilen sich die Produktionsmittel in typgebundene und typungebundene Betriebsmittel. Bei der Vorbereitung der Produktionsanlage wird diese Unterteilung berücksichtigt.

Da die typgebundenen Betriebsmittel direkt in Kontakt mit der Produktgeometrie kommen, werden diese Betriebsmittel erst sehr spät im Produktentstehungsprozess definiert. Zu diesem Zeitpunkt ist aber eine Beeinflussung des Produkts nicht mehr möglich. Deshalb muss zu einem sehr frühen Zeitpunkt des Produktentstehungsprozesses ein vereinfachtes Konzeptbetriebsmittel erzeugt werden. Im Rahmen der Erarbeitung des Spann- und Fixierkonzepts werden bereits sehr früh im Produktentwicklungsprozess die Stellen eines Produkts festgelegt, an denen das Produkt fixiert, gespannt oder gehalten werden muss. Für die Erzeugung einer Konzeptvorrichtung können an diesen Stellen standardisierte Klemmen beziehungsweise Fixierdorne herangezogen werden. Zwar entspricht eine solche Konzeptvorrichtung

nicht der realen Spann- und Fixiervorrichtung, aber sie bildet die Einschränkungen der Zugänglichkeit gut ab [Abul-08].

Sollen bei der Wiederverwendung der Produktionsanlage auch die typgebundenen Betriebsmittel wiederverwendet werden, so schränken diese die Gestaltungsfreiheit des Konstrukteurs stark ein. Deshalb muss er die Aufnahmepunkte und -flächen möglichst frühzeitig bei der Konstruktion des neuen Produkts berücksichtigen und benötigt damit die exakte Geometrie der typgebundenen Betriebsmittel. Ein Anwendungsszenario für diesen Fall ist die Modellpflege eines Fahrzeugs. Bei der Modellpflege wird das Produkt nur geringfügig verändert. Dabei sollen die Produktionsanlagen weitestgehend unverändert bleiben.

Das Vorgehen bei der Berücksichtigung von typgebundenen Betriebsmitteln bei der frühzeitigen Produktbeeinflussung ist in Tabelle 4.2 zusammengefasst:

| Neukonstruktion eines typgebundenen Betriebsmittels   | Wiederverwendung eines typgebundenen Betriebsmittels  |
|---|---|
| Die Geometrie einer vereinfachten Konzeptvorrichtung wird in den Produktentwicklungsprozess übernommen. | Die exakte Geometrie des Betriebsmittels wird in den Produktentwicklungsprozess übernommen. |

Tabelle 4.2: Vorgehen bei typgebundenen Betriebsmitteln

Bei typungebundenen Betriebsmitteln gibt es ein einheitliches Vorgehen bei der Vorbereitung der geometrischen Modelle. Wie in Bild 4.24 dargestellt ist, wird die Geometrie des typungebundenen Betriebsmittels entweder beibehalten, vereinfacht oder sogar komplett gelöscht.

Auch typungebundene Betriebsmittel kommen mit dem Produkt in Kontakt, da sie bestimmte Bereiche der Produktgeometrie erreichen müssen. Deshalb muss die exakte Geometrie dieser Betriebsmittel für die Produktbeeinflussung verwendet werden. Beispiele für diese Betriebsmittel sind Schweißzangen, Rollfalzzangen oder Klebedüsen.

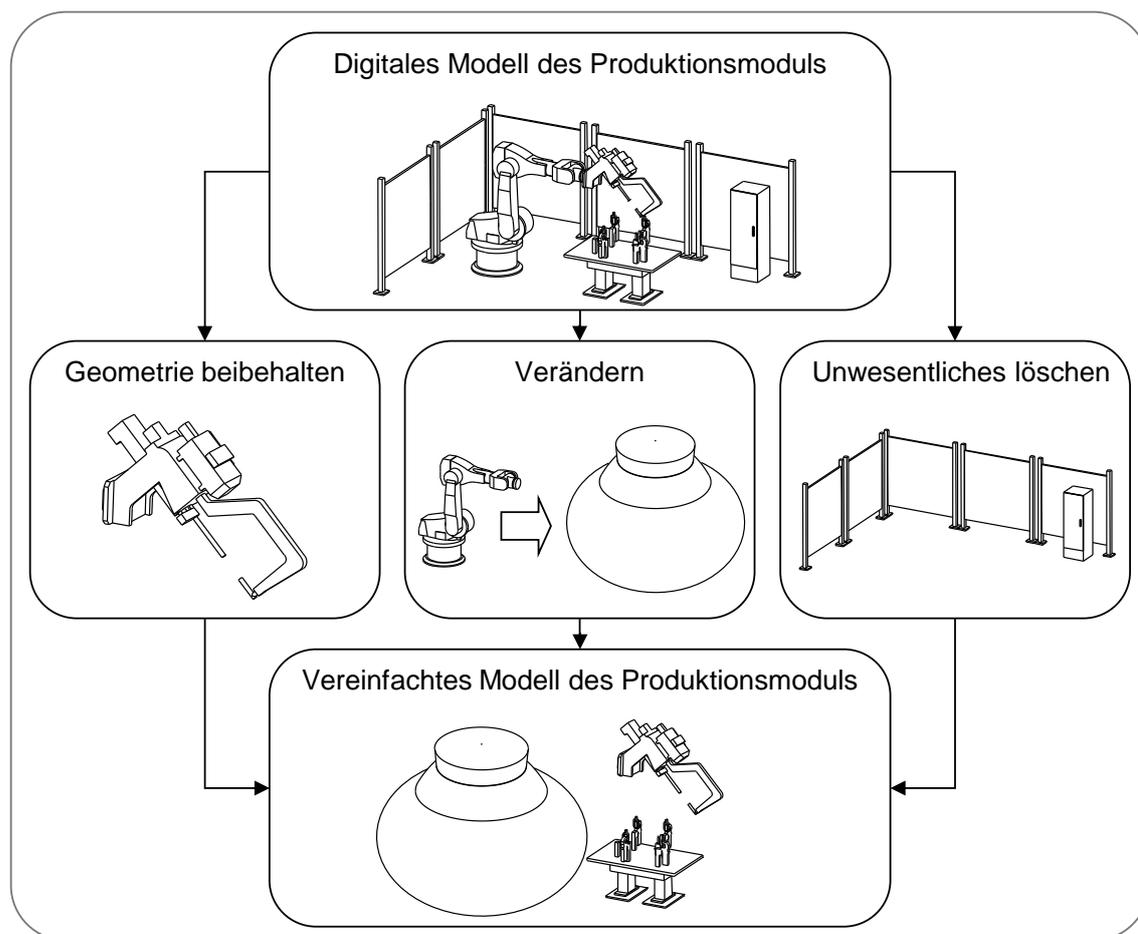


Bild 4.24: Typungebundene Betriebsmittel

In den einzelnen Produktionsmodulen gibt es Betriebsmittel, deren räumliche Bewegungsfreiheit eingeschränkt ist. Die Bewegungsmöglichkeiten dieser Betriebsmittel müssen dem Konstrukteur als Arbeitsvolumen veranschaulicht werden. Sind in dem Produktionsmodul beispielsweise Industrieroboter enthalten, so sind deren Position und Arbeitsraum für die Produktgestaltung von großer Bedeutung, da die Erreichbarkeit der Roboter berücksichtigt werden soll [Wall-10].

Werden bei der Wiederverwendung der Produktionsanlage die Konstruktionsdaten der Anlage als Grundlage für die Beeinflussung des neuen Produkts verwendet, so ist der Detaillierungsgrad der Anlagengeometrie zu groß. Beispielsweise sind für die Entwicklung von neuen Produkten die geometrischen Informationen über Schutzzäune und Steuerungsschränke unwichtig. Geometrische Modelle, die für die Produktentwicklung keine Relevanz haben, müssen aus der Produktionsumgebung entfernt werden.

### Aufbereitung der alphanumerischen Daten

Nicht nur die geometrischen Informationen über ein Produktionsmodul müssen bei der Konstruktion eines neuen Produkts berücksichtigt werden, sondern auch einige alphanumerische Informationen. An erster Stelle ist hier die Fertigungstechnologie zu nennen. Dem Produktentwickler muss bewusst sein, dass er nur Fertigungstechnologien zur Verfügung hat, die auch in den entsprechenden Produktionsmodulen zur Verfügung stehen.

Ihm muss auch bewusst sein, dass jede Fertigungsoperation eine bestimmte Fertigungszeit benötigt. Die Taktzeit einer Anlage muss ebenfalls berücksichtigt werden, da diese einen hohen Einfluss auf die wertschöpfenden und nicht wertschöpfenden Prozesse hat. Um die Taktzeit in einem bestimmten Produktionsmodul nicht zu überschreiten, müssen auch die Prozesszeiten der Produktionstechnologien berücksichtigt werden. Tabelle 4.3 fasste die Prozesszeiten für die wichtigsten Produktionstechnologien im Karosserierohbau zusammen. Dabei handelt es sich um Schätzzeiten, mit denen eine erste Aus-taktung der Anlagen zu einem sehr frühen Zeitpunkt im Produktentstehungsprozess durchgeführt werden kann.

|                | Benötigte Zeit        |
|----------------|-----------------------|
| Schweißen      | 7s pro Schweißpunkt   |
| Laserschweißen | 2s pro Schweißpunkt   |
| Durchsetzfügen | 5s pro Fügepunkt      |
| Rollfalzen     | 1s pro 200mm Rollfalz |
| Kleben         | 1s pro 100mm Klebnaht |

Tabelle 4.3: Prozesszeiten im Karosserierohbau

### 4.2.5 Restriktionen und Möglichkeiten eines Produktionsmoduls

In diesem Kapitel werden die Einschränkungen und Möglichkeiten der Produktionsmodule ermittelt. Zunächst wird auf den Zugänglichkeitsraum hergeleitet. Anschließend werden die Restriktionen bezüglich der Taktzeit aufgezeigt.

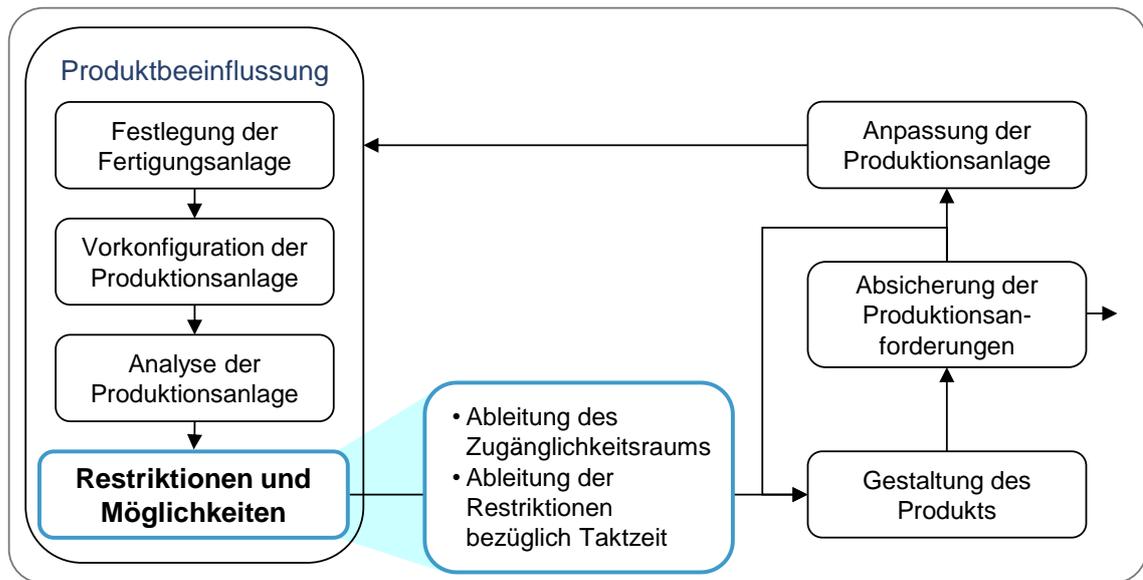


Bild 4.25: Restriktionen und Möglichkeiten einer Produktionsanlage

### Zugänglichkeitsraum

**Definition 4.7:** Unter einem Zugänglichkeitsraum eines Produktionsmoduls wird die Fläche auf der Bauteiloberfläche verstanden, die durch die Roboter und ihre Werkzeuge erreicht werden kann.

Für die Berechnung des Zugänglichkeitsraums sind Informationen bezüglich der Werkzeuggeometrie, der Störgeometrie, der Produktgeometrie und der Roboterarbeitsräume notwendig. Unter der Störgeometrie werden alle Betriebsmittel gesehen, die die Zugänglichkeit des Werkzeugs beim Durchführen der Produktionsprozesse einschränken. Als Beispiel für eine Störgeometrie kann die Spann- und Fixiereinheit aufgeführt werden. Sie positioniert die einzelnen Bauteile in einer definierten Lage, schränkt aber gleichzeitig die Zugänglichkeit der Werkzeuge ein. Für die Berechnung der Zugänglichkeit des Produktionsmoduls wurde ein Berechnungsskript entwickelt, dessen einzelne Schritte in Bild 4.24 dargestellt sind. Die Aufgabe des Berechnungsskripts ist es, die von einer Produktionsanlage zugänglichen und nicht zugänglichen Flächen im CAD-System darzustellen.

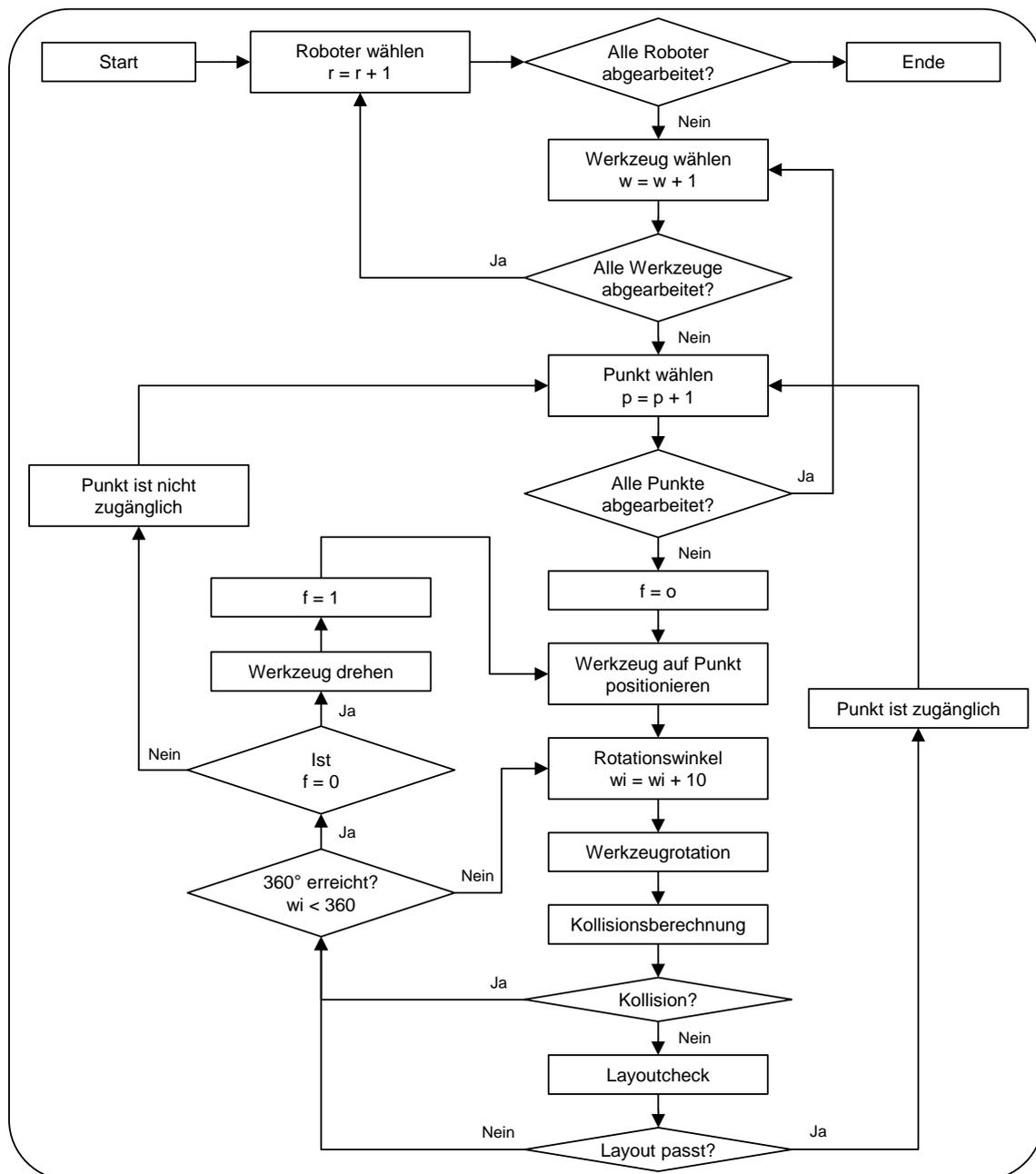


Bild 4.26: Die einzelnen Schritte des Berechnungsalgorithmus

Im ersten Schritt wird der zu untersuchende Bereich durch den Anwender festgelegt. Abhängig vom Fertigungsverfahren kann dies beispielsweise ein Flansch sein. Anschließend werden gleichmäßig verteilte Hilfspunkte und Hilfslinien erzeugt. Die Hilfslinien sind senkrecht zu der zu untersuchenden Fläche ausgerichtet und gehen durch die Hilfspunkte. Nacheinander werden alle im Produktionsmodul enthaltenen Roboter und Werkzeuge auf ihre Zugänglichkeit an den gewünschten Stellen geprüft.

Im nächsten Schritt wird das Werkzeug nacheinander auf allen Hilfspunkten positioniert und entlang der Hilfslinien ausgerichtet. Hierfür wird die Vektortransformation genutzt. Wie in Bild 4.27 dargestellt, wird der Zielvektor  $\vec{s}$  durch einen Hilfspunkt und die dazugehörige Hilfslinie definiert. Der Vektor  $\vec{t}$  repräsentiert den Arbeitspunkt des Werkzeugs während des Fertigungsprozesses. Für eine Schweiß- oder Clinchzange bedeutet dies, dass die Werkzeuge geschlossen sind. Der Ursprung des Vektors liegt dabei im Arbeitspunkt des Werkzeugs. Die Ausgangssituation bei der Positionierung des Werkzeugs ist in Bild 4.27 dargestellt.

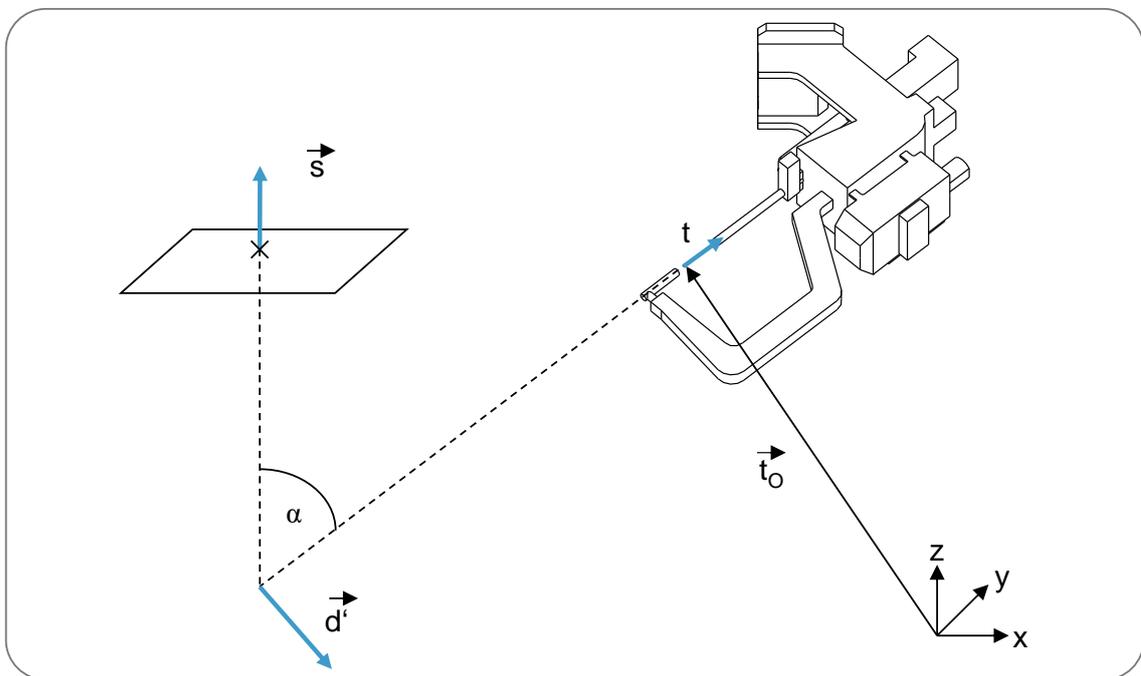


Bild 4.27: Positionierung des Werkzeugs

Um den Vektor  $\vec{t}$ , und damit das Werkzeug, auf den zu untersuchenden Punkt zu platzieren, bedarf es einer Drehung und einer anschließenden Verschiebung. Im Folgenden werden die entsprechenden Transformationsmatrizen hergeleitet. Um die Drehmatrix herzuleiten, ist zunächst der Drehvektor  $\vec{d}'$  erforderlich. Dieser muss senkrecht zu der durch die Vektoren  $\vec{s}$  und  $\vec{t}$  aufgespannten Ebene sein. Der Drehvektor  $\vec{d}'$  errechnet sich aus dem Kreuzprodukt der Vektoren  $\vec{s}$  und  $\vec{t}$ :

$$\vec{d}' = \vec{s} \times \vec{t} \quad (4.3)$$

Für die Rotationsmatrix ist ein normierter Drehvektor  $\vec{d}$  notwendig. Dieser errechnet sich aus dem Vektor  $\vec{d}'$  wie folgt:

$$\vec{d} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{|\vec{d}'|} \vec{d}' \quad (4.4)$$

Im nächsten Schritt muss das Werkzeug um den Winkel  $\alpha$  gedreht werden. Der Winkel  $\alpha$  errechnet sich nach folgender Formel:

$$\alpha = \arccos \left( \left| \frac{\vec{s} \circ \vec{t}}{|\vec{s}| \cdot |\vec{t}|} \right| \right) \quad (4.5)$$

Nachdem die Rotation durchgeführt worden ist, befindet sich der Werkzeugmittelpunkt am Ort  $\vec{t}'_0$ :

$$\vec{t}'_0 = \begin{pmatrix} \cos\alpha + d_1^2(1 - \cos\alpha) & d_1d_2(1 - \cos\alpha) - d_3\sin\alpha & d_1d_3(1 - \cos\alpha) - d_2\sin\alpha \\ d_2d_1(1 - \cos\alpha) - d_3\sin\alpha & \cos\alpha + d_2^2(1 - \cos\alpha) & d_2d_3(1 - \cos\alpha) - d_1\sin\alpha \\ d_3d_1(1 - \cos\alpha) - d_2\sin\alpha & d_3d_2(1 - \cos\alpha) - d_1\sin\alpha & \cos\alpha + d_3^2(1 - \cos\alpha) \end{pmatrix} \cdot \vec{t}_0 \quad (4.6)$$

Im nächsten Schritt muss noch eine Verschiebung des Werkzeugs auf den Hilfspunkt durchgeführt werden. In Bild 4.28 ist die Ausgangssituation schematisch dargestellt.

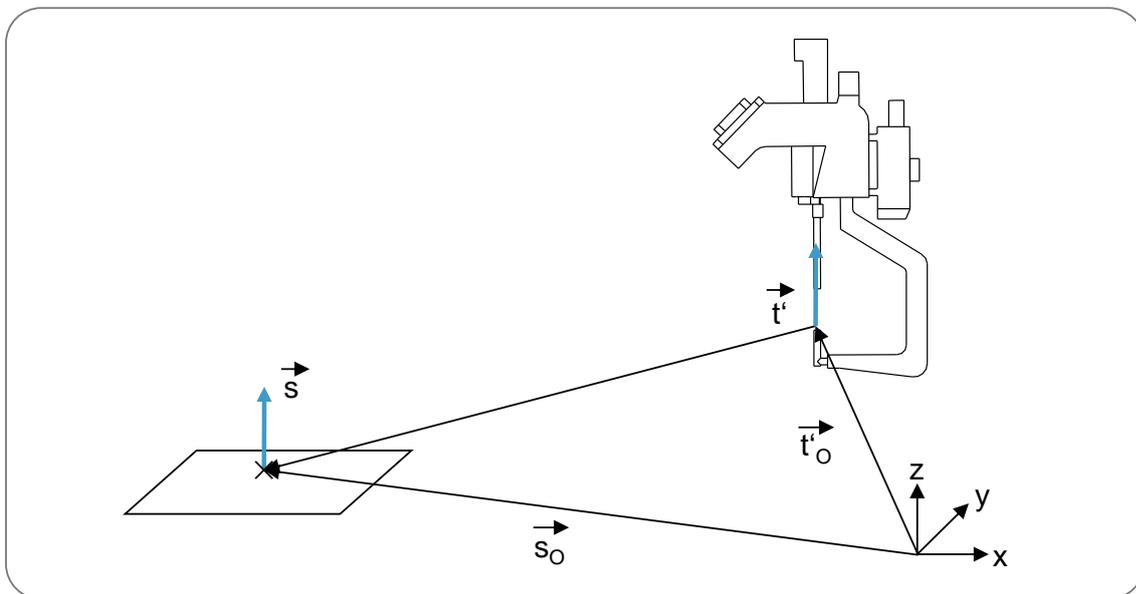


Bild 4.28: Verschiebung des Werkzeugs

Der Verschiebungsvektor  $\vec{v}$  errechnet sich dabei nach folgender Formel:

$$\vec{v} = \vec{s}_O - \vec{t}'_O \quad (4.7)$$

Eine ausführliche Herleitung aller notwendigen Matrizen und Vektoren für die Positionierung der Werkzeuge ist im Anhang A.1 zu finden.

Ist das Werkzeug auf dem Hilfspunkt positioniert und ausgerichtet, so wird im nächsten Schritt das Werkzeug um den normierten Vektor  $\vec{s}$  in  $10^\circ$  Schritten gedreht. Hierzu wird ebenfalls die Drehmatrix verwendet:

$$R_{\vec{s}}(10^\circ) = \begin{pmatrix} \cos 10^\circ + s_1^2(1 - \cos 10^\circ) & s_1 s_2(1 - \cos 10^\circ) - s_3 \sin 10^\circ & s_1 s_3(1 - \cos 10^\circ) - s_2 \sin 10^\circ \\ s_2 s_1(1 - \cos 10^\circ) - s_3 \sin 10^\circ & \cos 10^\circ + s_2^2(1 - \cos 10^\circ) & s_2 s_3(1 - \cos 10^\circ) - s_1 \sin 10^\circ \\ s_3 s_1(1 - \cos 10^\circ) - s_2 \sin 10^\circ & s_3 s_2(1 - \cos 10^\circ) - s_1 \sin 10^\circ & \cos 10^\circ + s_3^2(1 - \cos 10^\circ) \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

Nach jedem Rotationsschritt wird eine Kollisionsuntersuchung zwischen dem Werkzeug und der Produktgeometrie sowie der Störgeometrie, wie beispielsweise der Spann- und Fixiervorrichtung durchgeführt. Dieser Schritt wird so lange wiederholt, bis entweder eine komplette Rotation der Schweißzange durchgeführt oder eine kollisionsfreie Position des Werkzeugs gefunden wurde. Wird keine kollisionsfreie Position des Werkzeugs gefunden, so wird, wie in Bild 4.29 dargestellt, das Werkzeug um  $180^\circ$  gedreht. Eine ausführliche Herleitung der entsprechenden Drehmatrix ist im Anhang A.1 zu finden.

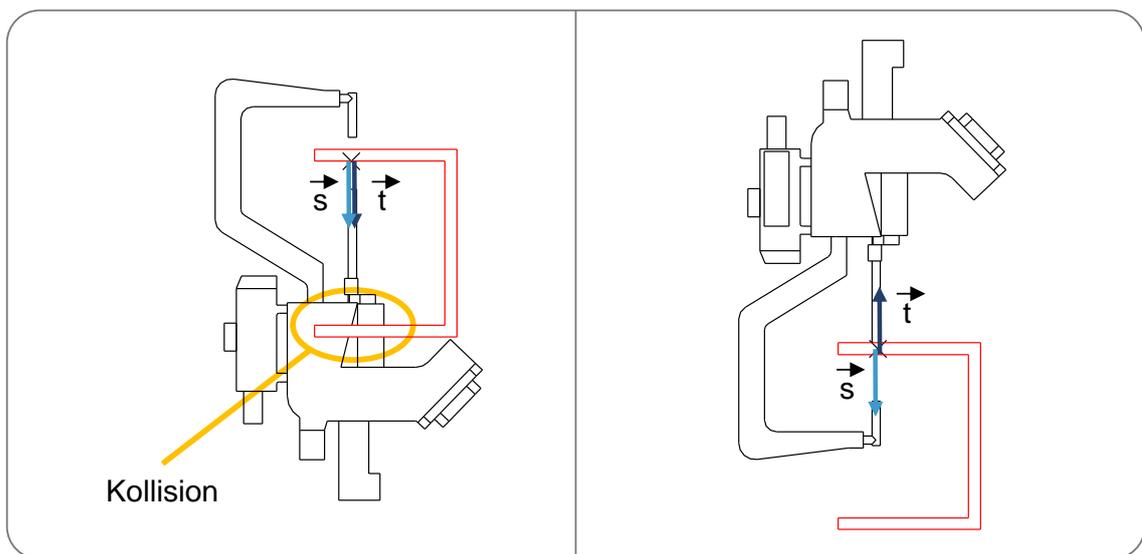


Bild 4.29: Drehen von Roboterwerkzeugen

Anschließend werden erneut die Rotation der Schweißzange und die Kollisionsprüfung durchgeführt. Wird eine kollisionsfreie Position der Schweißzange gefunden, so wird im nächsten Schritt die Erreichbarkeit des Roboters

im vorgegebenen Fabriklayout geprüft. In Bild 4.30 ist die Erreichbarkeitsprüfung schematisch dargestellt.

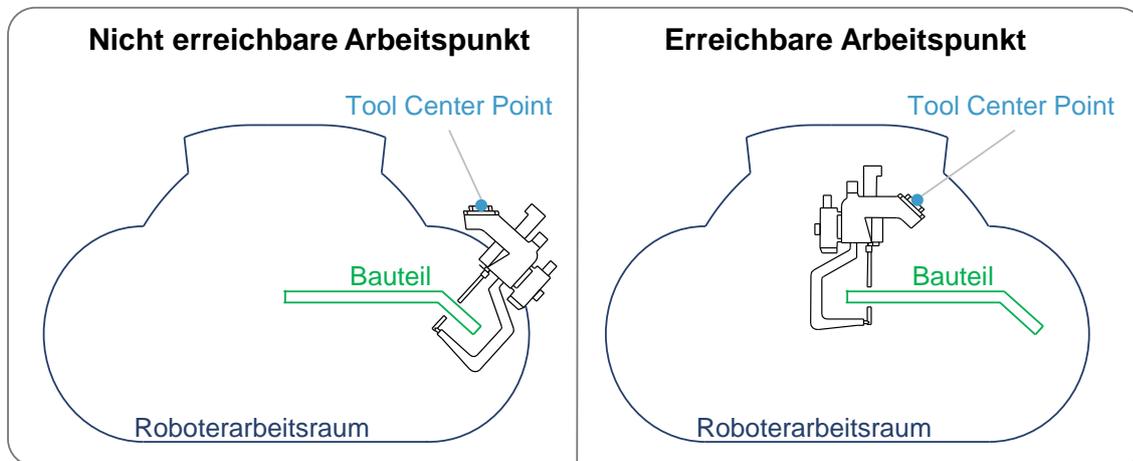


Bild 4.30: Prüfung der Erreichbarkeit eines Roboters

Für die Überprüfung, ob ein Roboter die zuvor ermittelte kollisionsfreie Position des Werkzeugs erreichen kann, ist der Arbeitsraum des Roboters notwendig (vgl. Bild 4.30). Der Arbeitspunkt des Werkzeugs ist erreichbar, wenn sich der sogenannte Tool Center Point (TCP) im Arbeitsraum des Roboters befindet. Der Tool Center Point ist der Punkt, an dem der Roboter das Werkzeug aufnimmt. Auf diese Weise lässt sich, ohne eine aufwendige Robotersimulation durchzuführen, in einer frühen Phase des Produktentstehungsprozesses sehr einfach und schnell die Erreichbarkeit eines Roboters prüfen. Liegt der Tool Center Point außerhalb des Roboterarbeitsraums, so ist der Arbeitspunkt definitiv nicht erreichbar durch das Produktionsmodul (vgl. Bild 4.30 links). In diesem Fall muss nach einer anderen kollisionsfreien Position des Werkzeugs gesucht werden. Hierzu wird das Werkzeug weitergedreht. Erst wenn eine kollisionsfreie Position des Werkzeugs gefunden und die Erreichbarkeit des Werkzeugs durch den Roboter gegeben ist, wird ein Hilfspunkt als zugänglich markiert. Falls eins der Kriterien nicht erfüllt wird, ist der Punkt durch das Produktionsmodul nicht erreichbar. Dieses Vorgehen kann auch analog für stationäre Schweiß- oder Clinchzangen hergeleitet werden. Dabei bewegt der Roboter nicht das Werkzeug, sondern das Bauteil.

Im letzten Schritt werden die Ergebnisse der Berechnung farblich gekennzeichnet. Zugängliche Bereiche der Bauteilgeometrie werden grün und die unzugänglichen Bereiche rot eingefärbt.

### Taktzeit

Die Anzahl der wertschöpfenden Prozesse ist beschränkt durch die festgelegte Taktzeit der Produktionsanlage. Mit anderen Worten, ein Produktionsmodul kann nicht unendlich viele Fertigungsoperationen durchführen. Für rein serielle Prozesse, also Prozesse, die nicht parallel sind, kann folgende Ungleichung aufgestellt werden:

$$t_{Taktzeit} \geq \sum_i t_i + \sum_j t_j \quad (4.9)$$

Die Summe der nicht wertschöpfenden Prozesse  $\sum_j t_j$  bleibt für ein bestimmtes Produktionsmodul gleich. Prozesse wie Spannen, Einlegen, Verriegeln sind für ein bestimmtes Modul unabhängig von den Produkten. Somit lässt sich die maximale Zeit für wertschöpfende Prozesse  $\sum_i t_i$  wie folgt errechnen:

$$T_{max\_ws} = t_{Taktzeit} - \sum_j t_j \quad (4.10)$$

Abhängig vom Fertigungsverfahren lässt sich die Anzahl der wertschöpfenden Prozesse wie folgt bestimmen:

|                        | Einschränkung            | Benötigte Zeit        | Formel                                       | Einheit |
|------------------------|--------------------------|-----------------------|--|---------|
| <b>Schweißen</b>       | Anzahl der Schweißpunkte | 7s pro Schweißpunkt   | $\frac{t_{Taktzeit} - \sum_j t_j}{7s}$       | []      |
| <b>Laser-schweißen</b> | Anzahl der Schweißpunkte | 2s pro Schweißpunkt   | $\frac{t_{Taktzeit} - \sum_j t_j}{2s}$       | []      |
| <b>Durchsetzfügen</b>  | Anzahl der Fügepunkte    | 5s pro Fügepunkt      | $\frac{t_{Taktzeit} - \sum_j t_j}{5s}$       | []      |
| <b>Rollfalzen</b>      | Länge des Falzes         | 1s pro 200mm Rollfalz | $\frac{t_{Taktzeit} - \sum_j t_j}{1s/200mm}$ | [mm]    |
| <b>Kleben</b>          | Länge der Klebnaht       | 1s pro 100mm Naht     | $\frac{t_{Taktzeit} - \sum_j t_j}{1s/100mm}$ | [mm]    |

Tabelle 4.4: Übersicht Prozesszeiten

Soll ein Produkt so konstruiert werden, dass es in einem vordefinierten Produktionsmodul gefertigt werden kann, darf die durch die Taktzeit eingeschränkte maximale Zeit für wertschöpfende Prozesse nicht überschritten werden. Als Orientierung bei der Gestaltung des neuen Produkts können die in der Tabelle 4.4 aufgelisteten Formeln verwendet werden. Die „benötigte Zeit“ ist dabei ein Erfahrungswert aus früheren Baureihenprojekten. Dies ist in einem sehr frühen Zeitpunkt des Produktentstehungsprozesses ausreichend genau. Exakte Untersuchungen bezüglich Auslastung werden zu einem späteren Zeitpunkt des Produktionsplanungsprozesses durchgeführt.

#### 4.2.6 Gestaltung und Beeinflussung des Produkts

Die im vorhergehenden Kapitel ermittelten Einschränkungen und Möglichkeiten des Produktionsmoduls müssen im nächsten Schritt dem Konstrukteur möglichst anschaulich zur Verfügung gestellt werden (vgl. Bild 4.31).

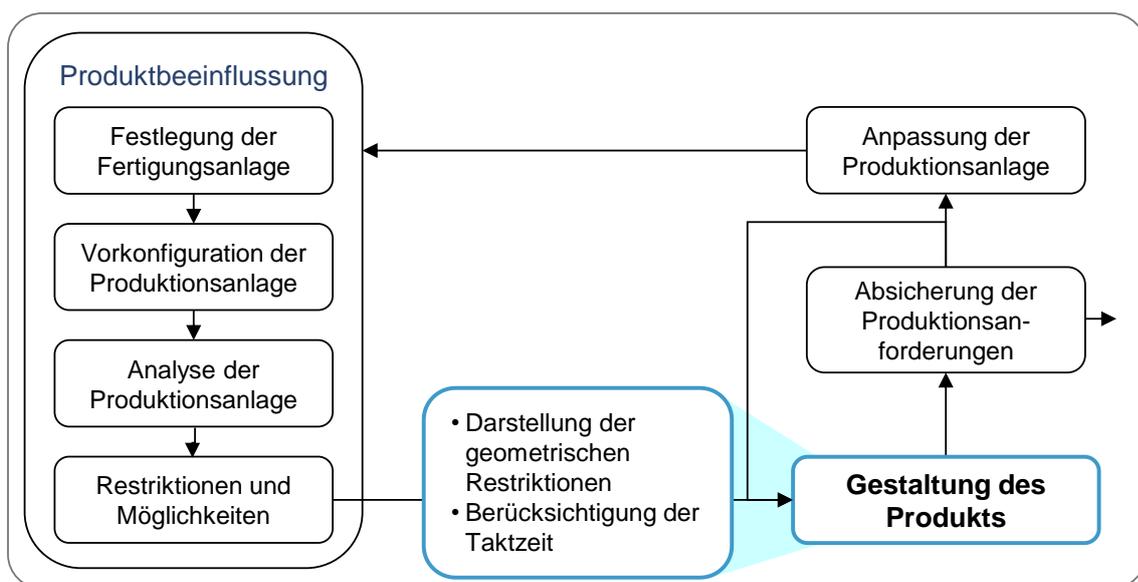


Bild 4.31: Gestaltung des Produkts

In der Produktentwicklung spielt das CAD-System eine zentrale Rolle. Aus diesem Grund werden die ermittelten Restriktionen und Einschränkungen der Produktionsmodule dem Produktentwickler im CAD-System dargestellt. Hierzu wird das Produkt in einer sogenannten Produktionsumgebung konstruiert. Die Struktur dieser Produktionsumgebung ist in Bild 4.32 schematisch dargestellt.

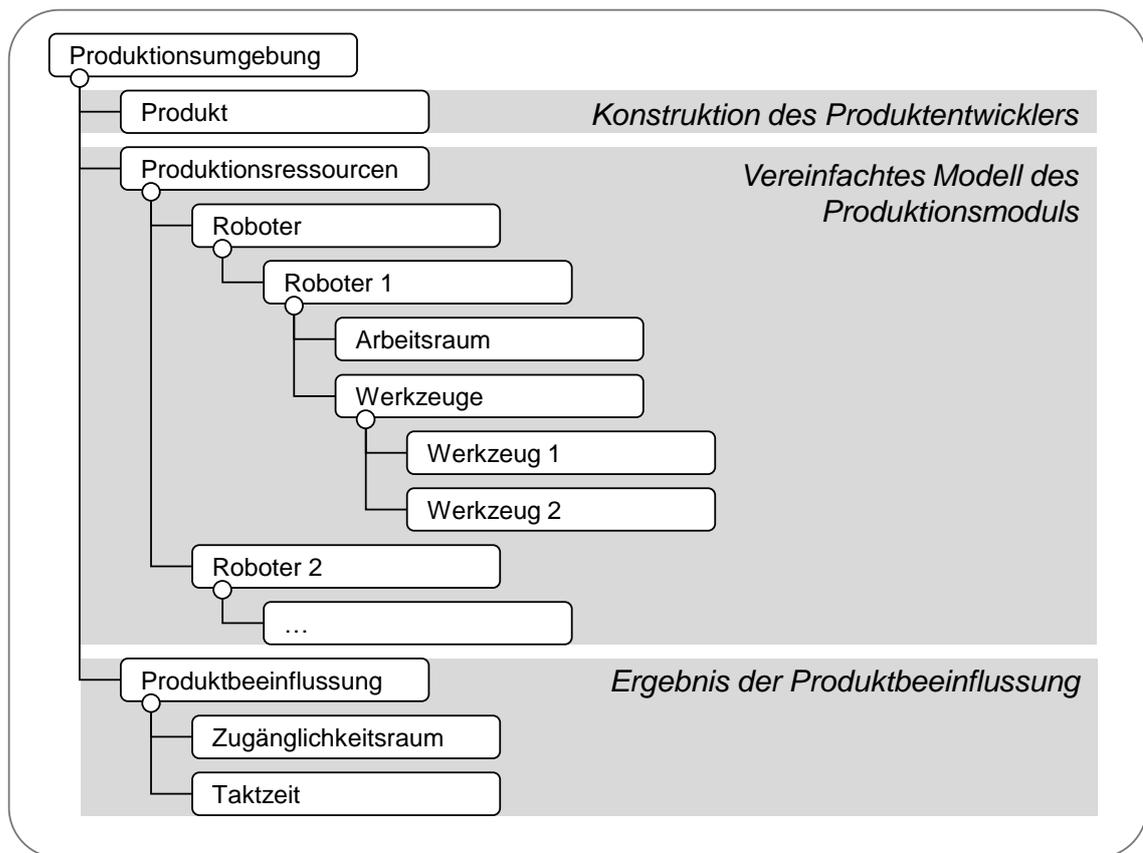


Bild 4.32: Struktur der Produktionsumgebung

Die Struktur der Produktionsumgebung ist allgemeingültig gegliedert, so dass verschiedene Fertigungsmodule aus dem Karosserierohbau gleich aufgebaut werden können. Auf diese Weise wird das Navigieren durch die Produktionsumgebung erleichtert. Der Produktentwickler konstruiert das neue Produkt in der Produktumgebung und fügt die entsprechenden Bauteile unter dem Knoten Produkt ein. Die für die Produktbeeinflussung notwendigen Informationen über die Produktionsmodule werden im Knoten „Produktionsressourcen“ abgelegt. Die geometrischen und alphanumerischen Informationen über das jeweilige Produktionsmodul werden analog dem Vorgehen aus Kapitel 4.2.5 aufbereitet. Die Verknüpfung der Arbeitsräume und Werkzeuge mit den im entsprechenden Produktionsmodul verwendeten Industrierobotern ist in Bild 4.32 schematisch dargestellt.

Die Möglichkeiten und Restriktionen, die für das entsprechende Modul hergeleitet wurden, werden dem Konstrukteur in dem Knoten „Produktbeeinflussung“ zur Verfügung gestellt. Informationen über den Zugänglichkeitsraum, die Taktzeit, etc. befinden sich unter diesem Knoten. Diese

Informationen sollen den Produktentwickler bei der Konstruktion unterstützen und ihm die Möglichkeiten und Einschränkungen eines Produktionsmoduls aufzeigen. Wenn aufgrund von funktionalen, gesetzlichen oder technologischen Gründen ein Produkt so gestaltet werden muss, dass es nicht auf dem vorgesehenen Produktionsmodul gefertigt werden kann, müssen Schritte eingeleitet werden, um die Produktionsanlage anzupassen.

#### 4.2.7 Absicherung der Produktionsanlage

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben wurde, werden im Laufe des Produktentstehungsprozesses zu definierten Meilensteinen produktionsbezogene Absicherungen durchgeführt. Bild 4.33 ordnet den Absicherungsprozess in den Ablauf der Gesamtmethode ein.

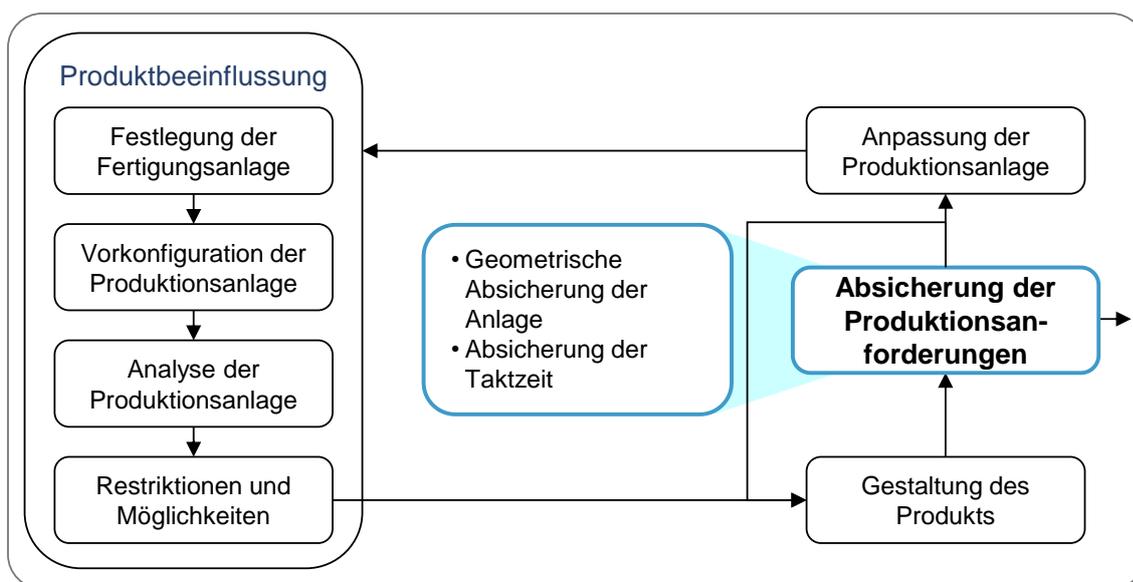


Bild 4.33: Absicherung der Produktionsanforderungen

Da bereits für die Produktbeeinflussung Modelle der Produktionsanlagen herangezogen wurden, können diese auch für die Absicherungen genutzt werden. Auf diese Weise wird der Aufwand für die Modellerstellung erheblich reduziert. Das Zusammenspiel zwischen Produkt und Produktionsmodell ist in Bild 4.34 schematisch dargestellt.

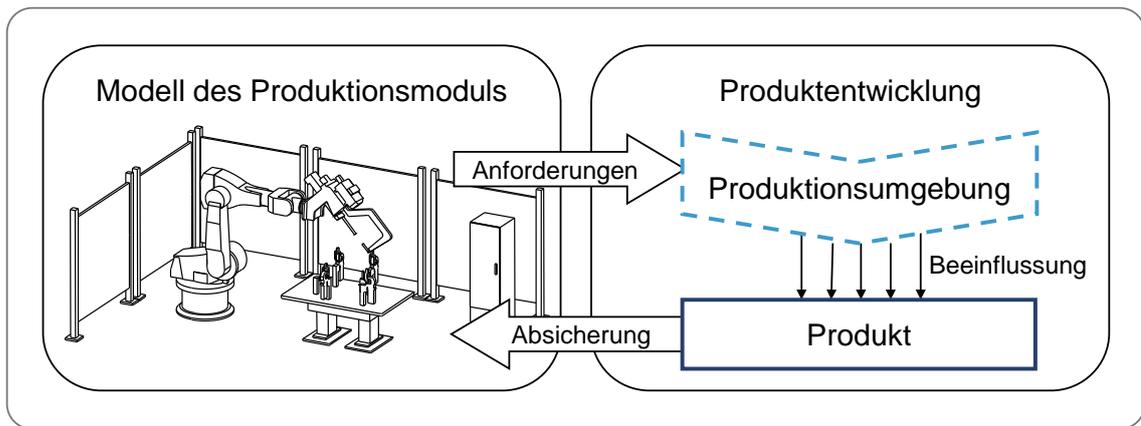


Bild 4.34: Absicherungsvorgang

Da die Anforderungen eines Produktionsmoduls an das Produkt bekannt sind und durch die Produktionsumgebung im Idealfall während der Konstruktion berücksichtigt wurden, ist bei der detaillierten Untersuchung nur mit einer geringen Anzahl an Problemen zu rechnen. Im Gegensatz zu den Produktionsmodulen ist der Detaillierungsgrad der Modelle, die für die Absicherung herangezogen werden, viel höher. Da die Modelle in aller Regel bereits kinematisiert sind, können die Produktionsprozesse realitätsnah abgesichert werden [WaBO-11]. In der vorgestellten Produktbeeinflussung wird nur der Arbeitsraum der Roboter berücksichtigt. Das exakte Roboterverhalten wird erst mit dem ausdetaillierten digitalen Modell der Produktionsanlage abgesichert. Dabei können im Rahmen der Offline-Programmierung (OLP) die entsprechenden Roboterprogramme abgeleitet werden.

#### 4.2.8 Anpassungsmanagement

Ist die Absicherung des Produktionsmoduls gescheitert, so gibt es zwei Vorgehensweisen. Zum einen kann das Produkt erneut angepasst werden, zum anderen kann die Produktionsanlage verändert werden. Beide Anpassungen haben Vor- und Nachteile. Ist die Lösung eine Veränderung des Produktionsmoduls, so können die Vorteile einer standardisierten Produktion unter Umständen nicht erreicht werden. Soll stattdessen das Produkt angepasst werden, so steigen automatisch der Änderungsaufwand und die Entwicklungskosten des neuen Produkts.

Die vorgestellte Produktionsumgebung kann bei der Findung der richtigen Lösung unterstützen. Da in der Produktionsumgebung bereits alle Anforderungen eines bestimmten Produktionsmoduls gesammelt sind, muss der Produktentwickler lediglich innerhalb der erlaubten Möglichkeiten bleiben. Ist dies nicht möglich, so muss das Produktionsmodul angepasst werden (vgl. Bild 4.35).

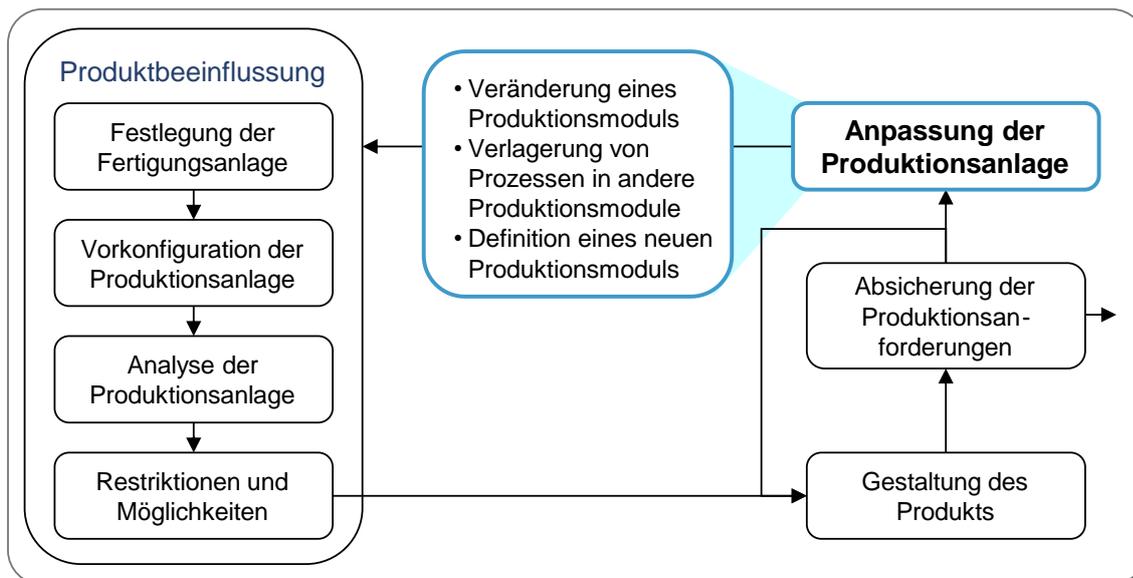


Bild 4.35: Anpassung der Produktionsanlage

Können die Restriktionen des Produktionsmoduls nicht eingehalten werden, so muss die Produktionsanlage angepasst werden. Hierzu können nacheinander folgende Vorgehensweisen abgearbeitet werden:

**Einbeziehung eines benachbarten Produktionsmoduls:** Kann ein Fertigungsschritt nicht von dem vorgesehenen Produktionsschritt durchgeführt werden, so muss als Erstes geprüft werden, ob ein benachbartes Produktionsmodul diesen Produktionsschritt durchführen kann. Wird beispielsweise die Taktzeit in einem Produktionsmodul überschritten, so können Fertigungsschritte auf andere Produktionsmodule verlagert werden. Allerdings muss zuvor geklärt werden, ob die Montagereihenfolge dies erlaubt. Eine Verlagerung von Produktionsschritten darf aber die für dieses Produktionsmodul vorgesehenen Produktionsschritte nicht einschränken oder behindern. Dies muss im Rahmen einer Absicherung bestätigt werden.

**Umstrukturierung des Produktionsmoduls:** Zugänglichkeits- und Erreichbarkeitsprobleme können unter Umständen durch eine Veränderung des

Produktionsmodul-Layouts behoben werden. Wird beispielsweise der Ort eines Roboters verändert, so verschiebt sich auch sein Arbeitsraum. Eine Layoutänderung kann auch Einfluss auf die Auslastung der Taktzeit haben, da die Verfahrswege der Roboter vom Produktionslayout abhängen. Mit der Länge des Verfahrsweges steigt auch die benötigte Verfahrszeit. Ist für die Lösung des Problems eine Veränderung des Fabriklayouts erforderlich, so muss die Produktionsumgebung angepasst werden. Eine erneute Absicherung des Produktionsmoduls ist ebenfalls notwendig, damit die Fertigbarkeit des Produkts sichergestellt ist.

**Erweiterung des Produktionsmoduls:** Treten bei der Absicherung eines Produktionsmoduls Problemen auf, die nicht mit den Möglichkeiten der Betriebsmittel eines bestimmten Produktionsmoduls gelöst werden können, ist eine Erweiterung des Produktionsmoduls notwendig. Um die Vorteile der Standardisierung beizubehalten, sollte die Vielfalt der Betriebsmittel nicht erhöht werden. Deshalb sollte das ergänzende Betriebsmittel aus dem Kreis der standardisierten Betriebsmittel stammen. Mit einer Erweiterung des Produktionsmoduls können beispielsweise Taktzeitprobleme behoben werden. Um die Produktivität einer Anlage zu steigern, kann ein weiterer Roboter installiert werden. Zugänglichkeitsprobleme können auch durch zusätzliche größere oder kleinere Werkzeuge gelöst werden.

**Änderung des Produktionsmoduls:** Ist der Aufwand für eine Veränderung beziehungsweise eine Erweiterung des Produktionsmoduls zu groß, so muss überprüft werden, ob nicht ein anderes Produktionsmodul herangezogen werden soll. Das neue Produktionsmodul kann neue Produktionstechnologien beinhalten oder für eine größere Stückzahl konzipiert sein und somit die aufgetretenen Probleme beheben. Für die Produktentwicklung bedeutet dies, dass die Produktbeeinflussung nicht unbedingt zu einer positiven Produktabsicherung bezüglich der Produktionsanforderungen führt. Womöglich ist eine Anpassung des Produkts notwendig. Hierfür kann die Produktionsumgebung des neuen Produktionsmoduls herangezogen werden.

**Schaffung eines neuen Produktionsmoduls:** Kann ein Problem mit keinem der Produktionsmodule aus der Modulbibliothek gelöst werden, so muss ein neues Modul definiert werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass das Modul möglichst allgemeingültig aufgebaut ist und damit für weitere Projekte wiederverwendet werden kann. Um die Vorteile der Standardisierung

zu nutzen, sollte ein neues Produktionsmodul möglichst aus bereits vorhandenen Komponenten bestehen. Da das neu definierte Produktionsmodul nicht bei der Produktbeeinflussung berücksichtigt wurde, kann dies auch zu einer Anpassung des Produkts führen. Die Produktentwicklung kann nach der vorgestellten Methode von den Anforderungen des neuen Produktionsmoduls beeinflusst werden.

In der Tabelle 4.5 sind die Strategien zur Lösung der auftretenden Probleme zusammengefasst:

|                   | Beschreibung                                      | Probleme, die gelöst werden können  |
|-------------------|---|---|
| <b>Maßnahme 1</b> | Einbeziehung eines benachbarten Produktionsmoduls | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Taktzeit des vorgesehenen Moduls reicht nicht aus.</li> <li>• Die benötigten Werkzeuge sind in dem Modul nicht vorhanden.</li> <li>• Technologie fehlt.</li> </ul> |
| <b>Maßnahme 2</b> | Umstrukturierung des Produktionsmoduls            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erreichbarkeit ist nicht gewährleistet.</li> </ul>   |
| <b>Maßnahme 3</b> | Erweiterung des Produktionsmoduls                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Taktzeit des vorgesehenen Moduls reicht nicht aus.</li> <li>• Die benötigten Werkzeuge sind in dem Modul nicht vorhanden.</li> <li>• Technologie fehlt.</li> </ul> |
| <b>Maßnahme 4</b> | Änderung des Produktionsmoduls                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Kapazität des Moduls ist zu klein.</li> <li>• Die Produktionstechnologie muss geändert werden.</li> </ul>  |
| <b>Maßnahme 5</b> | Schaffung eines neuen Produktionsmoduls           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• In der Moduldatenbank existiert kein entsprechendes Modul.</li> </ul>  |

Tabelle 4.5: Zusammenfassung der Anpassungsmöglichkeiten

### 4.3 Eingliederung der Methode in den gesamten Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie

Ein verallgemeinerter Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie wurde bereits im Kapitel 2 ausführlich vorgestellt. Da die erarbeitete Methode für den Einsatz im automobilen Karosserierohbau entwickelt wurde,

müssen sich die einzelnen Schritte in den Produktentwicklungs- und Produktionsplanungsprozess verankern lassen. Damit die erarbeitete Methode in der Industrie Akzeptanz findet, muss die Methode zusätzlich mit Strukturen, Prozessen und Datenständen zu den jeweiligen Meilensteinen auskommen. Bild 4.36 fasst die wichtigsten Prozesse und Meilensteine der in Kapitel 2.2 und 2.3 vorgestellten Produktentstehungsprozesse der Automobilindustrie zusammen. Zusätzlich sind in diesem Bild die für die erarbeitete Methode wichtigen Meilensteine hervorgehoben und mit den einzelnen Schritten der Methode verknüpft.

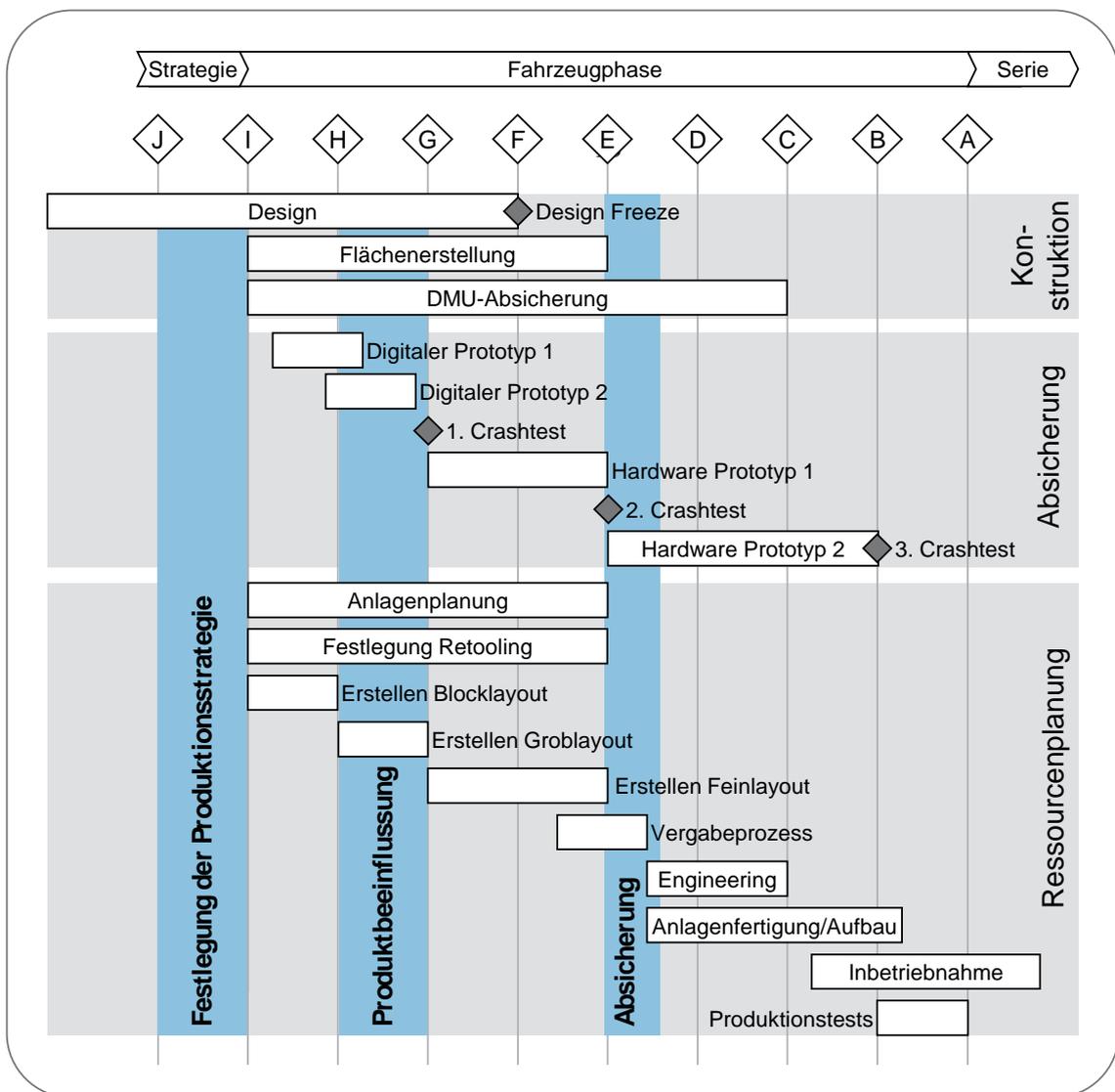


Bild 4.36: Eingliederung der Methode in den gesamten Produktentstehungsprozess

Der erste Schritt der erarbeiteten Methode ist die Festlegung der Produktionsstrategie. Dieser Schritt kann in die Strategiephase zwischen den Meilensteinen J und I verankert werden. Da in dieser Phase üblicherweise bereits Standort- und Kapazitätsentscheidungen getroffen werden, kann auch die Strategie der modularisierten Produktion getroffen werden.

Die einzelnen Schritte der Produktbeeinflussung können das erste Mal im Produktentstehungsprozess zum Meilenstein H durchgeführt werden, da zu diesem Zeitpunkt alle notwendigen Informationen zur Verfügung stehen. Wie in Bild 4.36 dargestellt ist, wird bis zum Meilenstein H ein Blocklayout der Produktionsanlage erstellt. In dieser Zeit muss nach der erarbeiteten Methode die Produktionsanlage vorkonfiguriert und analysiert werden. Sobald die gerade beschriebenen Schritte durchgeführt worden sind, können die Möglichkeiten und Restriktionen ermittelt werden und für die Gestaltung des Produkts genutzt werden. Parallel dazu wird bereits von der Produktentwicklung ein erster digitaler Prototyp des Fahrzeugs aufgebaut. Eine Produktbeeinflussung bezüglich Produktionsanforderungen, wie sie in dieser Arbeit vorgestellt wurde, kann Probleme reduzieren. Allerdings ersetzt sie nicht die digitalen Absicherungen der Produktionsanforderungen. Diese beginnen bereits ab Meilenstein I.

Im Laufe des Produktentstehungsprozesses verändert sich die Produktgestalt immer wieder. Dies liegt unter anderem an dem Produktdesign, das erst zum Meilenstein F abgeschlossen und endgültig festgelegt ist. Auf Grundlage des „Design Freeze“ dauert die Flächenerstellung sogar bis zum Meilenstein E. Dies hat zur Folge, dass der Schritt „Produktgestaltung“ der erarbeiteten Methode mehrfach wiederholt werden muss. Hierfür eignet sich der Meilenstein G, da zu diesem Zeitpunkt das Groblayout der Anlage festgelegt wurde. Final kann die Methode auch noch zusätzlich zum Meilenstein E angewendet werden, da zu diesem Zeitpunkt die Flächenerstellung abgeschlossen ist. Allerdings sollte dies lediglich eine zusätzliche Absicherung der Produktgestalt sein.

Noch bevor die Produktgestalt endgültig festgelegt wurde, beginnt bereits die Ausschreibung der Anlage und damit die Suche nach einem Anlagenbauer, der die Produktionsanlagen um- beziehungsweise aufbaut. Zu diesem Zeitpunkt muss sich der Automobilhersteller sicher sein, dass das Produkt so gebaut werden kann, wie es geplant wurde. Deshalb werden die geplanten

Produktionsabläufe auf Grundlage des Datenstands zum Meilenstein E noch einmal abgesichert. In der erarbeiteten Methode entspricht dies der finalen Absicherung, bevor der Anlagenbauer ausgewählt wird und mit der Konstruktion der Anlage beginnt. Die Produktionsplanung begleitet den Anlagenbauer bei der Konstruktion und Aufbau der Anlage. Dies ist allerdings nicht mehr Fokus dieser Arbeit.

#### **4.4 Anforderungen an die Implementierung**

Die erarbeitete Methode verändert das Vorgehen bei der Konstruktion von neuen Produkten grundlegend. Damit die Methode in der Industrie breite Anwendung findet, muss die Methode in die vorhandene Systemlandschaft integriert werden. Das Werkzeug, das der Produktentwickler bei der Gestaltung von Produkten am intensivsten nutzt, ist das CAD-System. Deshalb ist es besonders wichtig, dass die erarbeitete Methode für den Konstrukteur in seiner vertrauten Umgebung, sprich dem CAD-System, nutzbar ist. Um den Aufwand für den Konstrukteur bei der Anwendung der Methode möglichst gering zu halten, müssen die vorgestellten Algorithmen im CAD-System des Entwicklers implementiert werden. Gerade die Berechnung der Zugänglichkeitsräume muss so umgesetzt sein, dass der Konstrukteur möglichst wenig vorbereiten muss und lediglich sich mit dem Ergebnis auseinandersetzen muss.

Des Weiteren muss die erarbeitete Methode möglichst an die in der Produktionsplanung verwendeten Werkzeuge der Digitalen Fabrik angebunden werden. Ein wichtiger Input für die erarbeitete Methode ist das digitale Abbild der Produktionsmodule beziehungsweise der realen Produktionsanlage. Auf Basis dieser Daten werden die Produktionsmodule abgeleitet. Grundlage der erarbeiteten Methode ist eine standardisierte und modularisierte Produktion, die als digitales Modell vorhanden ist. Des Weiteren müssen die geometrischen Anlagenmodelle sowohl der Produktionsplanung als auch der Produktentwicklung zur Verfügung gestellt werden.

Die intensive Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung, die bei der vorgestellten Methode zur Produktbeeinflussung



Erweiterungen von Modulen auch auf die Produktionsumgebungen übertragen werden können. Bei der Absicherung des Produkts bezüglich der Produktionsanforderungen werden Daten sowohl aus dem PDM-System der Produktentwicklung als auch die Anlagendaten aus dem EDM-System der Produktionsplanung herangezogen. Das Ergebnis der Absicherung kann dabei Einfluss auf die Produktionsplanung als auch auf die Produktentwicklung haben.



## **5 Prototypische Implementierung der Produktionsumgebung**

Die jahrelange Anwendung von kommerziellen CAD-Systemen in der Industrie zeigt, dass die Produktentwickler mehr Unterstützung bei der Arbeit benötigen, als die heutigen Systeme bieten [Ovtc-97]. Deshalb wird die erarbeitete Methode in ein CAD-System eingebettet.

Um die in Kapitel 4 vorgestellte Vorgehensweise validieren zu können, wurden die erarbeiteten Berechnungsalgorithmen prototypisch mithilfe von Skripten in einem kommerziellen CAD-System umgesetzt. Dadurch soll gezeigt werden, dass die erarbeitete Methode im industriellen Umfeld einsetzbar ist.

### **5.1 CAD-System**

In der Automobilindustrie und insbesondere der Karosserieentwicklung ist das CAD-System CATIA V5 von der Firma Dassault Systèmes zurzeit sehr weit verbreitet [Hasl-05][Braß-09]. Aus diesem Grund wurde die erarbeitete Methode in diesem System prototypisch umgesetzt. CATIA V5 ist ein parametrisch-assoziatives CAD-System, das auch feature- und wissensbasierte Konstruktion ermöglicht. Da CATIA V5 umfangreiche Funktionalitäten für die Flächenmodellierung bietet, wird dieses CAD-System in der Karosserieentwicklung häufig eingesetzt [GrNo-06].

Ein großer Vorteil von CATIA V5 ist die Möglichkeit des wissensbasierten Konstruierens. Neben Formeln, Regeln, Prüfungen und Reaktionen stehen Makro- und Skriptsprachen zur Verfügung, um die Funktionalitäten des Systems zu erweitern und immer wiederkehrende Tätigkeiten zu automatisieren. Für die prototypische Umsetzung der erarbeiteten Methode wurde die Skriptsprache CATvba verwendet. CATvba ist der Programmiersprache Basic sehr ähnlich und basiert auf Objekten und Methoden aus der CATIA Bibliothek [Ziet-11][Hans-09].

## 5.2 Struktur und Aufbau des CAD Modells

Grundlage für die Implementierung der erarbeiteten Berechnungsalgorithmen ist ein strukturierter Aufbau der Produktionsumgebung. Damit das Berechnungsskript ohne Probleme auf die benötigten Informationen in dem CAD-Modell zugreifen kann, dürfen die Namen der einzelnen Gliederungsebenen nicht verändert werden. In Bild 5.1 ist der Aufbau der Produktionsumgebung dargestellt. Ausgangssituation hierfür ist die in Kapitel 4.2.6 vorgestellte Struktur. In den drei Gliederungsebenen sind alle für die Berechnung des Zugänglichkeitsraums notwendigen Informationen enthalten. Unter dem Knoten „Produkt“ befinden sich die einzelnen Karosseriebauteile. Unter diesem Knoten kann der Produktentwickler unter Anwendung der unternehmensinternen Konstruktionsmethodik die entsprechenden Karosseriebauteile konstruieren.

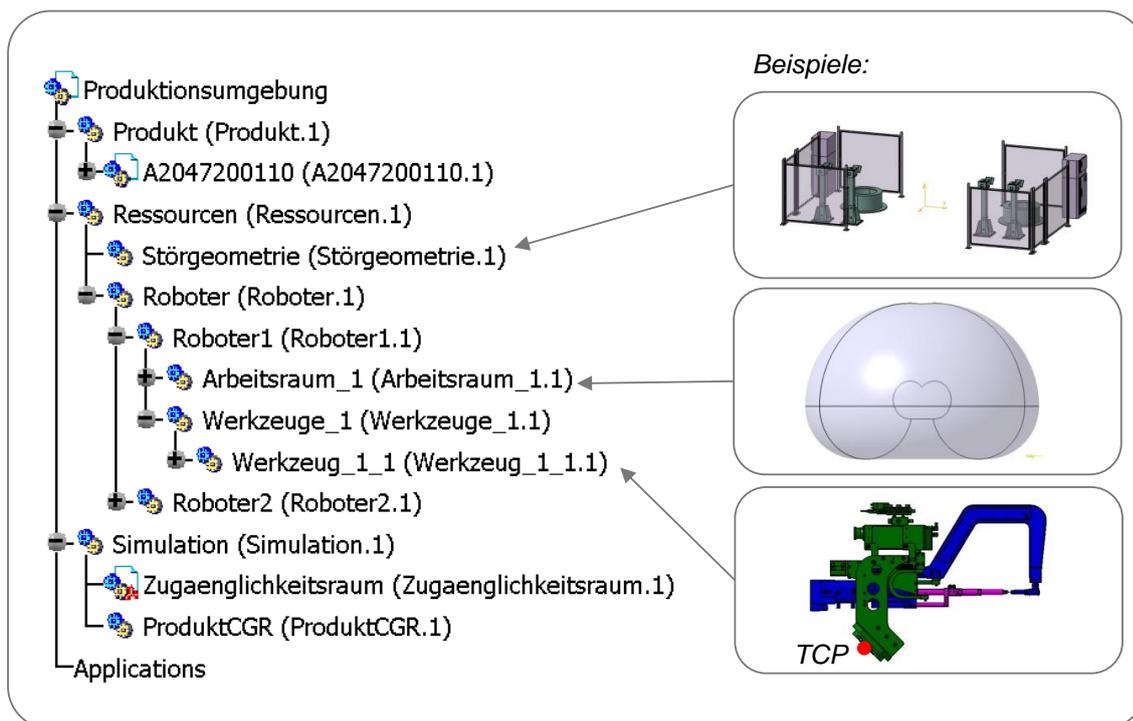


Bild 5.1: Aufbau der CAD Struktur

Unter dem Knoten „Ressourcen“ befinden sich alle Betriebsmittel, die in einem bestimmten Produktionsmodul verwendet werden. Wie bereits im vorhergehenden Kapitel beschrieben wurde, werden unter dem Knoten „Störgeometrie“ alle Produktionsmittel zusammengefasst, die die

Fertigungsoperationen stören können. Im Gegensatz zu einer konventionellen Zugänglichkeitsabsicherung werden für die Berechnung der Zugänglichkeitsräume nicht kinematisierte Industrieroboter herangezogen, sondern lediglich ihre Arbeitsräume. Diese werden unter dem entsprechenden Knoten abgelegt. Da jeder Roboter mehrere Werkzeuge handhaben kann, sind die geometrischen Modelle der Werkzeuge den jeweiligen Robotern zugewiesen. Damit das Werkzeug auf den zu untersuchenden Simulationspunkten positioniert werden kann, entspricht der Arbeitspunkt des Werkzeugs dem Nullpunkt des Werkzeugmodells. Um die Layout-Prüfung (vgl. Bild 4.30) durchgeführt zu können, ist der TCP-Punkt durch eine kleine Kugel im CAD-Modell gekennzeichnet (vgl. Bild 5.1).

Die dritte Gliederungsebene dient der Berechnung und Visualisierung des Zugänglichkeitsraums. Unter Simulation werden die für die Berechnung notwendigen Hilfsflächen, -punkte und -linien erzeugt und gespeichert. Der Berechnungsalgorithmus enthält viele zeitintensive Kollisionsberechnungen. Da die Kollisionsberechnung in CATIA mit nativen CAD-Daten deutlich zeitintensiver als mit tesselierten Daten ist, werden die Produktgeometrie und Störgeometrie tesseliert und unter dem Knoten „Simulation“ abgelegt. Diese werden dann für die automatisierte Berechnung der Zugänglichkeitsräume herangezogen. Die Erzeugung der tesselierten Modelle ist durch ein Makro automatisiert. Das Makro zieht die native Produktgeometrie aus den Knoten „Produkt“ heran und legt die tesselierte Geometrie unter dem Knoten „ProduktCGR“ ab.

### 5.3 Vorbereitung des Berechnungsmodells

Um das Berechnungsskript anwenden zu können, muss zunächst das Berechnungsmodell aufgebaut werden. Dies bedarf folgender manueller Arbeiten, die vom Anwender durchgeführt werden müssen:

- **Produkt laden:** Im ersten Schritt muss der Benutzer die Bauteile und Baugruppen aus dem PDM-System laden und in dem dafür vorgesehenem Produktionsmodul einfügen. Da üblicherweise das Produkt in Fahrzeuglage konstruiert wird, muss der Knoten Produkt so im Raum gedreht werden, dass das Produkt in der Haltevorrichtung der Anlage liegt.

- **Betriebsmittel laden:** Im nächsten Schritt müssen die digitalen Modelle der in diesem Produktionsmodul enthaltenen Betriebsmittel, analog zu der in Bild 5.1 dargestellten Struktur, geladen werden. Welche Betriebsmittel und in welcher Form geladen werden müssen, wurde bereits in Kapitel 4.2.4 beschrieben. Des Weiteren müssen die einzelnen Betriebsmittel in der Produktionsumgebung positioniert und ausgerichtet werden.
- **Punktwolke erzeugen:** Der Berechnungsalgorithmus prüft die Werkzeugzugänglichkeit an vordefinierten Punkten. Die Koordinaten dieser Punkte werden über eine Eingabedatei automatisiert von dem Berechnungsskript eingelesen und verarbeitet. Der Benutzer muss lediglich die Eingabedatei erzeugen. Moderne CAD-Systeme bieten Funktionalitäten, um gleich verteilte Punktewolken auf bestimmten Flächen zu erzeugen. Normalerweise werden diese Punktewolken für die Stereolithografie benötigt, sie können aber auch als Eingabedatei für die Ermittlung der Zugänglichkeitsräume dienen. Hierfür muss der Benutzer sich erst entscheiden, welche Bereiche der Bauteilgeometrie er untersuchen möchte. Diese kopiert er anschließend in den Berechnungsordner und erzeugt die Punktewolke. CATIA V5 bietet hierfür die Funktionen „Tessellation“ und „STL Export“ an. Der Aufbau der Eingabedatei für den erarbeiteten Berechnungsalgorithmus ist in Anhang A.2 dargestellt.

Nachdem die Aufbereitung der Daten durchgeführt wurde, kann das implementierte Tool gestartet werden.

#### **5.4 Applikation zur Berechnung der Zugänglichkeitsräume einer Produktionsanlage**

Das Skript zur Berechnung von Zugänglichkeitsräumen ist in drei Teile gegliedert: Preprozessor, Prozessor und Postprozessor (vgl. Bild 5.1). Im Folgenden werden die einzelnen Schritte des Berechnungsskripts, die sich auch in der Benutzeroberfläche des Tools wiederfinden, aus Anwendersicht beschrieben und erläutert.

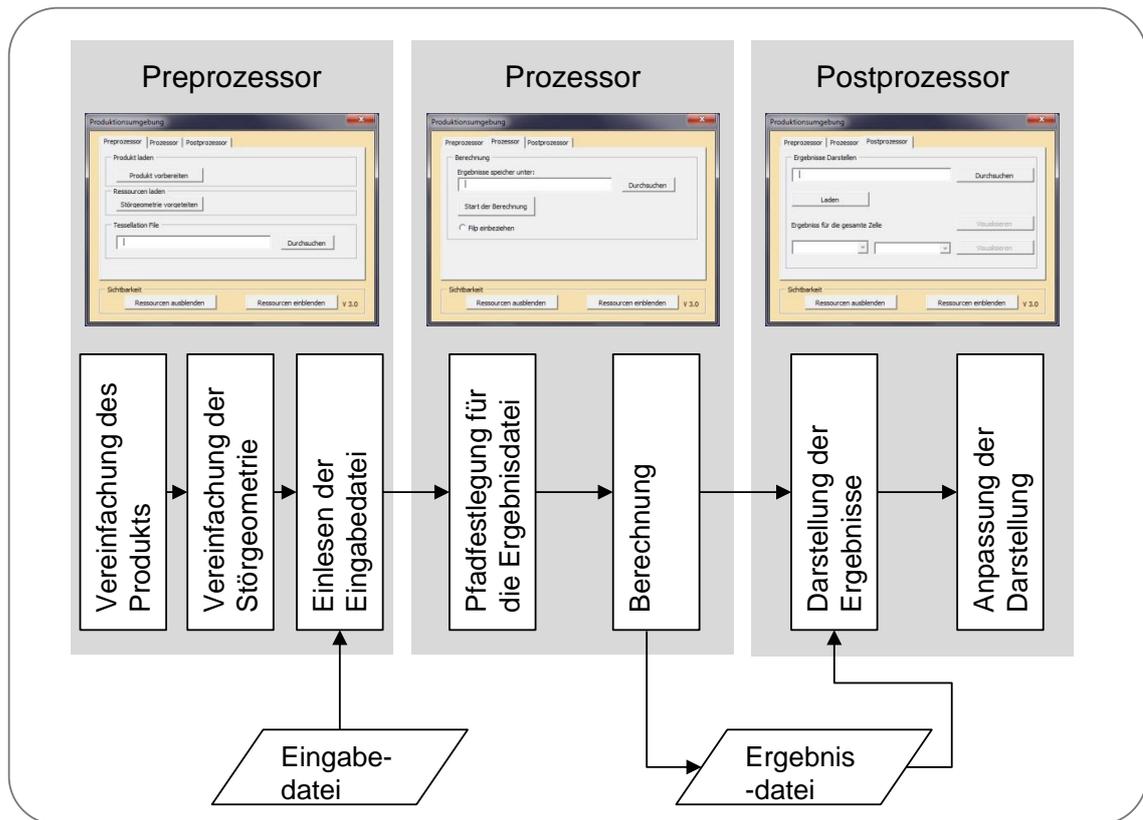


Bild 5.2: Benutzeroberfläche und Ablauf des Berechnungsskripts

### 5.4.1 Preprozessor

Aufgabe des Preprozessors ist es, die eigentliche Berechnung vorzubereiten. Wie bereits im Kapitel 5.2 erwähnt wurde, verwendet das Berechnungsskript für die Kollisionsberechnungen tesselierte Daten der Produkt- und Störgeometrie. Da sich im Laufe des Produktentwicklungszyklus die Geometrie der Produkte und Betriebsmittel verändert, müssen die tesselierten Modelle immer wieder erzeugt und in der Produktionsumgebung ersetzt werden. Hierfür kann der Benutzer die Funktion „Produkt laden“ und „Ressource laden“ nutzen. Das Skript erzeugt automatisch die tesselierten Daten und ersetzt diese in der Struktur (vgl. Bild 5.1).

Damit die Berechnung gestartet werden kann, muss der Benutzer die zuvor erzeugte Eingabedatei, die die Informationen zu der Punktwolke enthält, festlegen. Hierfür steht ein Eingabefeld zur Verfügung.

## 5.4.2 Prozessor

Aufgabe des Prozessors ist es, die Berechnung der Zugänglichkeitsräume durchzuführen. Bevor die Durchführung des in Kapitel 4.2.5 vorgestellten Algorithmus durchgeführt werden kann, muss der Benutzer noch den Speicherort festlegen, an dem das Ergebnis gespeichert werden soll. In der Ergebnisdatei sind Informationen bezüglich der Zugänglichkeit jedes einzelnen Punktes abgespeichert. Der Aufbau der Ergebnisdatei ist im Anhang A.3 dargestellt. In einer Liste sind zu jedem Punkt die dazugehörigen Ergebnisse in Abhängigkeit vom Roboter und Werkzeug abgespeichert. Zusätzlich hat der Benutzer noch die Möglichkeit festzulegen, ob bei der Berechnung der Zugänglichkeitsräume das Werkzeug nur in der Ausgangslage oder auch gedreht einbezogen werden soll.

## 5.4.3 Postprozessor

Der Postprozessor hat die Aufgabe, die berechneten Zugänglichkeitsräume dem Produktentwickler anschaulich darzustellen. Nachdem die Berechnung der Zugänglichkeitsräume durchgeführt wurde, stellt das Berechnungsskript eine Zusammenfassung der einzelnen Ergebnisse dar. Das heißt, wenn ein Punkt mindestens von einem Roboter mit einem seiner Werkzeuge zugänglich ist, wird dieser Punkt grün, was für „zugänglich“ steht, markiert. Lässt sich für einen Punkt keine Roboter-Werkzeug-Paarung finden, die zugänglich ist, so wird der Punkt rot markiert, was für „nicht zugänglich“ steht. Möchte der Produktentwickler seine Fügepunkte auf einer zugänglichen Fläche definieren, so reicht ihm normalerweise diese Information. Findet er aber auf den zugänglichen Flächen keinen passenden Ort für die Fügepunkte oder -linien, so bedarf es einer genaueren Untersuchung, welche Roboter und Werkzeuge angepasst werden könnten. Hierfür steht im Postprozessor die Möglichkeit, sich die Zugänglichkeit der einzelnen Roboter mit ihren Werkzeugen darzustellen.

Die Ergebnisdatei kann nicht nur direkt nach der Berechnung dargestellt werden, sondern zu jedem beliebigen Zeitpunkt. Dies bedeutet, der Zugänglichkeitsraum kann vorab berechnet und vorbereitet werden und anschließend dem Konstrukteur zur Verfügung gestellt werden.

## 6 Verifizierung und Validierung der erarbeiteten Methode

Zur Überprüfung der Praxistauglichkeit der erarbeiteten Methode wird in diesem Kapitel anhand von zwei ausgewählten Anwendungsszenarien die Methode verifiziert und validiert. Dabei wird überprüft, ob die erarbeitete Methode für ihren Zweck geeignet ist und ob die an sie gestellten Anforderungen erfüllt werden können. Die beiden Anwendungsszenarien wurden aus der Automobilindustrie entnommen. Um internes Unternehmenswissen zu schützen, wurden die beiden Anwendungsszenarien leicht modifiziert und verfremdet. Nach der Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse wird abschließend eine kritische Betrachtung abgeleitet, inwieweit die im Rahmen der Arbeit betrachteten Forschungsfragen beantwortet werden konnten.

### 6.1 Konzept der Verifizierung und Validierung der erarbeiteten Methode

Im Qualitätsmanagement wird zwischen Verifizierung und Validierung unterschieden.

***Definition 6.1:** Unter der Verifizierung versteht die Norm ISO 9000 eine „Bestätigung durch einen objektiven Nachweis, dass festgelegte Anforderungen erfüllt worden sind“. Die Bestätigung kann unter anderem durch die Durchführung einer alternativen Berechnung oder das Vornehmen von Tests oder Demonstrationen erbracht werden [ISO-9000].*

***Definition 6.2:** Unter der Validierung versteht die Norm ISO 9000 hingegen eine „Bestätigung durch einen objektiven Nachweis, dass die Anforderungen für einen spezifisch beabsichtigten Gebrauch oder eine spezifische beabsichtigte Anwendung erfüllt worden sind“. Dabei können die Anwendungsbedingungen echt oder simuliert sein [ISO-9000].*

Die erarbeitete Methode soll in diesem Kapitel anhand von zwei Anwendungsszenarien verifiziert und validiert werden. Verifizierung und Validierung sind Prozesse, die sicherstellen, dass die erarbeitete Methode die Anforderungen erfüllt. Ein wichtiger Bestandteil der erarbeiteten Methode ist der Algorithmus für die Berechnung des Zugänglichkeitsraums. Zunächst muss dieser verifiziert werden, um zu bestätigen, dass die an ihn gestellten

Anforderungen, das richtige Aufzeigen von zugänglichen und nicht zugänglichen Flächen, erfüllt werden. Im nächsten Schritt muss dann die gesamte Methode validiert werden. Mit anderen Worten, es muss gezeigt werden, dass bei Anwendung der Methode sich ein neues Produkt frühzeitig bezüglich Produktionsanforderungen beeinflussen lässt und somit Probleme schneller erkannt werden können.

### 6.1.1 Verifizierungsziele des Berechnungsalgorithmus

Bei der Verifizierung des Berechnungsalgorithmus für die Ermittlung des Zugänglichkeitsraums werden folgende Ziele verfolgt:

- **Prüfen der Aussagekraft des Berechnungsalgorithmus:** Im Rahmen der Arbeit wurde ein neuartiger Berechnungsalgorithmus entwickelt, der die Zugänglichkeitsräume von Produktionsanlagen errechnet. Punktuelle Zugänglichkeiten können bereits heute mit vielen Werkzeugen der Digitalen Fabrik geprüft werden. Da in dem erarbeiteten Berechnungsalgorithmus einige Vereinfachungen getroffen wurden, muss nun im Rahmen der Verifizierung geprüft werden, wie weit die Ergebnisse des erarbeiteten Algorithmus von konventionellen Zugänglichkeitsuntersuchungen abweichen.
- **Anwendbarkeit des Berechnungsalgorithmus:** Die Ermittlung der Zugänglichkeitsräume wird mehrfach im Laufe des Produktentstehungsprozesses durchgeführt, deshalb ist es besonders wichtig, dass der implementierte Berechnungsalgorithmus einfach anzuwenden ist.

### 6.1.2 Validierungsziele der Methode

Im Rahmen der Methodvalidierung sollen folgende Punkte untersucht werden:

- **Anwendbarkeit im industriellen Umfeld:** Es muss gezeigt werden, dass sich die erarbeitete Methode in die bestehenden Prozesse der Produktentwicklung und der Produktionsplanung integrieren lässt. Zusätzlich muss sichergestellt werden, dass sich die neue Methode in die Systemlandschaft eines Automobilherstellers integrieren lässt.

- **Erfüllung der Anforderungen eines Produktionsmoduls:** In Kapitel 4.1 wurden die Anforderungen an die Produktentwicklung zusammengefasst, die berücksichtigt werden müssen, um die Fertigung eines neuen Produkts auf einem bestimmten Produktionsmodul sicherzustellen. Im Rahmen der Validierung muss gezeigt werden, dass die erarbeitete Methode diese Anforderungen vollständig berücksichtigt.
- **Reduzierung von fehlgeschlagenen produktionsbezogenen Absicherungen:** In Kapitel 4.2.1 wurde die Annahme getroffen, dass eine frühzeitige Produktbeeinflussung eine Reduzierung von produktionsbezogenen Problemen zur Folge hat und damit die iterative Verbesserung des Produkts beschleunigt werden kann. Im Rahmen der Validierung muss diese Annahme bestätigt werden.

### 6.1.3 Konzept der Validierung und Verifizierung

Für die Verifizierung und Validierung der erarbeiteten Methode werden zwei Szenarien aus bereits abgeschlossenen Fahrzeugprojekten aus der Automobilindustrie herangezogen. Da die Produktionsanlagen bereits aufgebaut und in Betrieb genommen sind, kann geprüft werden, ob Probleme früher erkannt werden können und somit der Reifegrad der Anlagen zu einem frühen Zeitpunkt erhöht werden kann.

Da sich der Produktentwicklungsprozess in der Automobilindustrie über mehrere Jahre erstreckt, wird die erarbeitete Methode an bestimmten Zeitpunkten des Produktentstehungsprozesses validiert. Das heißt, die Methode muss mit den Entwicklungs- und Planungsständen, die zu dem Zeitpunkt vorhanden sind, auskommen. Dadurch wird gezeigt, dass sich die Methode in den heutigen Produktentstehungszyklus der Automobilindustrie integrieren lässt.

### 6.1.4 Ausgangssituation für die Anwendungsszenarien

Die erarbeitete Methode soll anhand von zwei ausgewählten Szenarien aus dem automobilen Karosserierohbau validiert werden. Folgende Grundannahmen sollen dabei für den Automobilhersteller gelten:

- **Modularisierter Produktaufbau:** Um die Vorteile einer Produktstandardisierung zu nutzen, ist der Automobilhersteller bemüht, seine Fahrzeugkarosserien nach einem Standard-Rohbau-Konzept aufzubauen.
- **Gestaltungsfreiheit beim Produktdesign:** Der Automobilhersteller legt viel Wert auf ein aussagekräftiges Design seiner Fahrzeuge. Die unterschiedlichen Fahrzeugtypen sollen ein eigenständiges Design haben und sich voneinander unterscheiden. Um die Anforderungen der Kunden nach innovativen Produkten gerecht zu werden, muss ein Nachfolgerprodukt als solches erkennbar sein.
- **Hoher Automatisierungsgrad der Produktionsanlagen:** Aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen werden die Fahrzeugkarosserien auf automatisierten Fertigungsstraßen gefertigt.
- **Planung nutzt Produktionsmodule:** Wie in Kapitel 3.2 beschrieben wurde, werden bei der Gestaltung von Produktionsanlagen vordefinierte Produktionsmodule herangezogen.
- **Produktion an verschiedenen Standorten:** Der Automobilhersteller produziert seine Produkte an unterschiedlichen Standorten. Dabei ist der Automatisierungsgrad der Anlagen unterschiedlich.

## 6.2 Verifizierung der Produktionsumgebung

Ein zentraler Bestandteil der erarbeiteten Methode ist die Produktionsumgebung, in der die wichtigsten Einschränkungen und Möglichkeiten einer Produktionsanlage dem Produktentwickler anschaulich dargestellt werden. Damit ein Produkt beeinflusst werden kann, muss zunächst geprüft werden, ob die angenommenen Vereinfachungen zu aussagekräftigen Ergebnissen führen. Hierzu wird auf Grundlage einer Schweißzelle aus der Türenfertigung die Produktionsumgebung abgeleitet und mit dem Ergebnis einer konventionellen Roboterzugänglichkeitsprüfung verglichen.

### 6.2.1 Erklärung des Verifizierungsszenarios

Die erarbeiteten Berechnungsalgorithmen der Produktionsumgebung sollen am Beispiel einer Fahrzeugtür verifiziert werden. Der Aufbau dieser Tür ist in Bild 6.1 schematisch dargestellt.

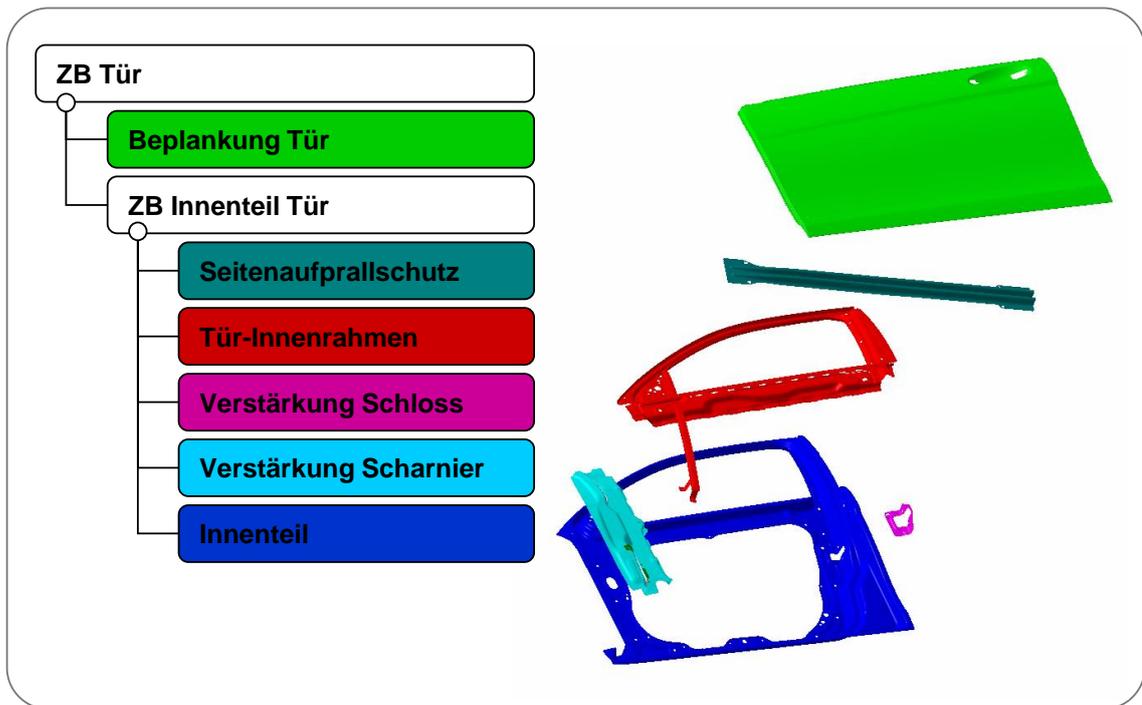


Bild 6.1: Aufbau Fahrzeugtür

Bei der Türenherstellung werden zuerst die Scharnier- und Schlossverstärkungen mit dem Innenteil durchs Widerstandspunktschweißen verbunden. An der Innenteilverstärkung sind bereits die Gewindeplatten vormontiert. Anschließend wird der ebenfalls schon vormontierte Tür-Innenrahmen eingesetzt und mit dem Innenteil verschweißt. Im nächsten Schritt wird der Seitenaufprallschutz mit dem Innenteil verschweißt. Nachdem ein Kleber auf das zusammengebaute Tür-Innenteil aufgetragen wurde, wird im letzten Schritt die Bepankung aufgesetzt und mittels Rollfalzen mit dem Innenteil verbunden.

Im Rahmen der Verifizierung wird das Verschweißen der Scharnierverstärkung mit dem Innenteil der Tür betrachtet. Das digitale Modell des Produktionsmoduls ist in Bild 6.2 dargestellt.

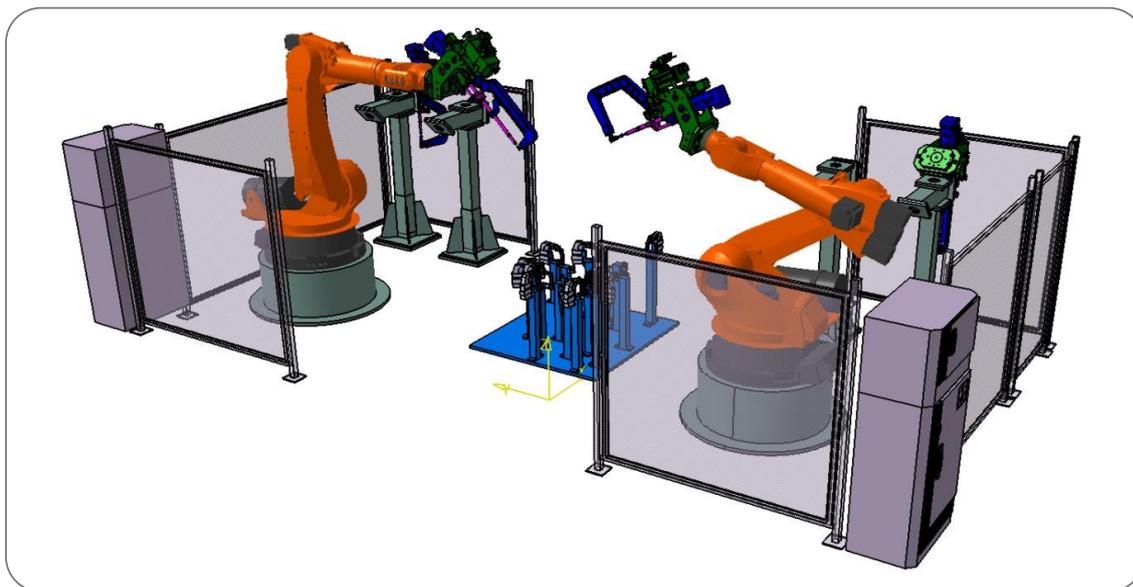


Bild 6.2: Produktionsmodul

In der Mitte des Produktionsmoduls befindet sich die Spann- und Fixiervorrichtung, die das Produkt in der definierten Lage für die Bearbeitung fixiert. Links und rechts davon stehen zwei Industrieroboter, die jeweils zwei Schweißzangen führen. Dabei handelt es sich um zwei Standardschweißzangen. In Bild 6.2 führt Roboter 1 die Schweißzange 1 und Roboter 2 die Schweißzange 2. Die nicht gebrauchten Schweißzangen sind jeweils in den dahinterliegenden Ständern abgelegt. In Bild 6.2 sind auch die zu dem Produktionsmodul dazugehörigen Roboter- und Schweißsteuerungen sowie die Sicherheitszäune zu sehen.

Das Produktionsmodul entspricht einem Standardmodul, wie es für die Neuplanung von Anlagen genutzt wird. Die Roboter sind so positioniert, dass sich fast das gesamte Produkt im Arbeitsraum beider Roboter befindet. Damit bei der Verifizierung auch die Nichterreichbarkeit eines Roboters untersucht werden kann, ist Roboter 2 um 580 mm von der Spann- und Fixiervorrichtung verschoben worden.

### 6.2.2 Aufbau der Produktionsumgebung

In der erarbeiteten Methode wird die Produktionsumgebung auf Grundlage des digitalen Modells eines Fertigungsmoduls abgeleitet. Dabei wird zu-

nächst, wie in Kapitel 4.2.4 beschrieben, das digitale Modell der Anlage vereinfacht. Für den Fertigungsprozess unwichtige Daten, wie beispielsweise die Schutzzäune und Steuerschränke, wurden aus dem Modell entfernt. Die Industrieroboter wurden durch deren Arbeitsräume ersetzt. Die Geometrie der Schweißzangen und der Spann- und Fixiervorrichtung wurde dagegen beibehalten, da diese mit dem Produkt in Kontakt kommt (vgl. Bild 6.3).

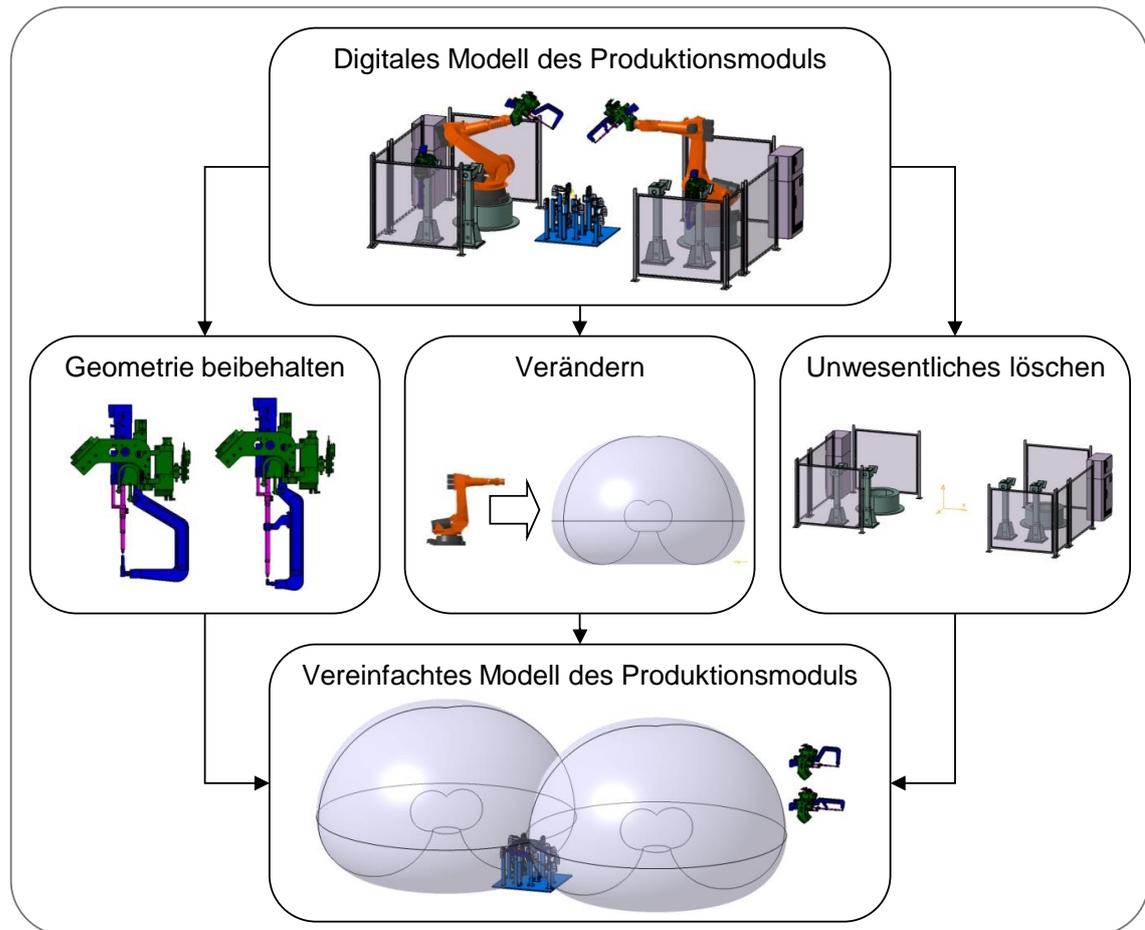


Bild 6.3: Vereinfachung des digitalen Modells

Damit, wie in Kapitel 4.2.5 beschrieben wurde, für die Ermittlung der Zugänglichkeitsräume das Berechnungsskript angewendet werden kann, muss die zu untersuchende Fläche als Punktwolke beschrieben sein. Für die Verifizierung wurde die gesamte Oberfläche der Scharnierverstärkung untersucht. Für die Definition von Schweißpunkten genügt dem Konstrukteur die Information, ob die Flansche, auf dem die Schweißpunkte gesetzt werden sollen, durch die Produktionsanlage erreichbar sind oder nicht. Für die Veri-

fizierung der Ergebnisse wird dennoch die gesamte Oberfläche der Scharnierverstärkung herangezogen, um eine möglichst große Anzahl von Untersuchungen betrachten zu können.

Die Zugänglichkeitsanalyse wird an 1932 Punkten durchgeführt, die gleichmäßig im Abstand von 20 mm auf der Oberfläche der Scharnierverstärkung verteilt sind. Das Ergebnis der Untersuchung ist in Bild 6.4 dargestellt.

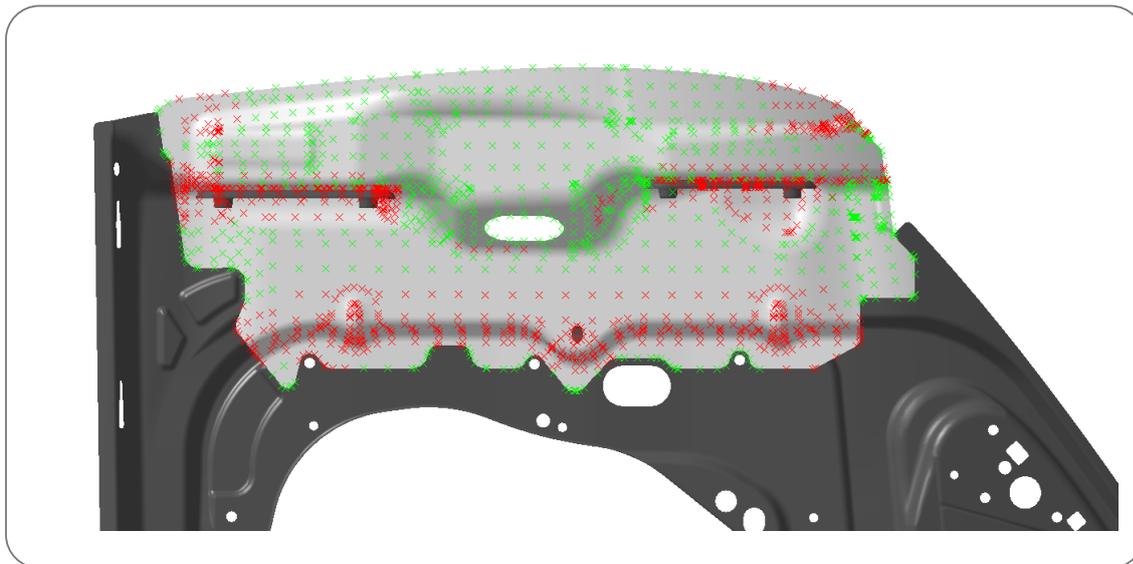


Bild 6.4: Verifizierungsergebnis

Die grünen Punkte kennzeichnen den durch das Schweißmodul zugänglichen Bereich auf der Bauteiloberfläche. Die roten Bereiche dagegen sind durch die Schweißroboter nicht erreichbar. Diese Darstellung veranschaulicht dem Konstrukteur sehr einfach, wo er Schweißpunkte definieren darf und wo er es vermeiden sollte. In dem untersuchten Beispiel ist sehr gut zu erkennen, dass die Flansche, an denen die Scharnierverstärkung mit dem Innenteil verschweißt wird, zugänglich sind. Die roten Bereiche sind beispielsweise aufgrund von Kollisionen der Schweißzange mit dem Produkt beziehungsweise der Spann- und Fixiervorrichtung oder der Nichterreichbarkeit des Schweißpunkts durch den Roboter nicht zugänglich.

|           | Werkzeug 1         | Werkzeug 2         |
|-----------|--------------------|--------------------|
| Roboter 1 | 48,24 % zugänglich | 46,01 % zugänglich |
| Roboter 2 | 43,84 % zugänglich | 32,92 % zugänglich |

Tabelle 6.1: Ergebnisse der Produktionsumgebung

In Bild 6.5 sind die Zugänglichkeitsräume der einzelnen Roboter mit den entsprechenden Werkzeugen dargestellt. Wie zu erwarten war, ist die Erreichbarkeit des Roboters 2 stark eingeschränkt, da der Roboter von der Spann- und Fixiervorrichtung um 580 mm entfernt wurde.

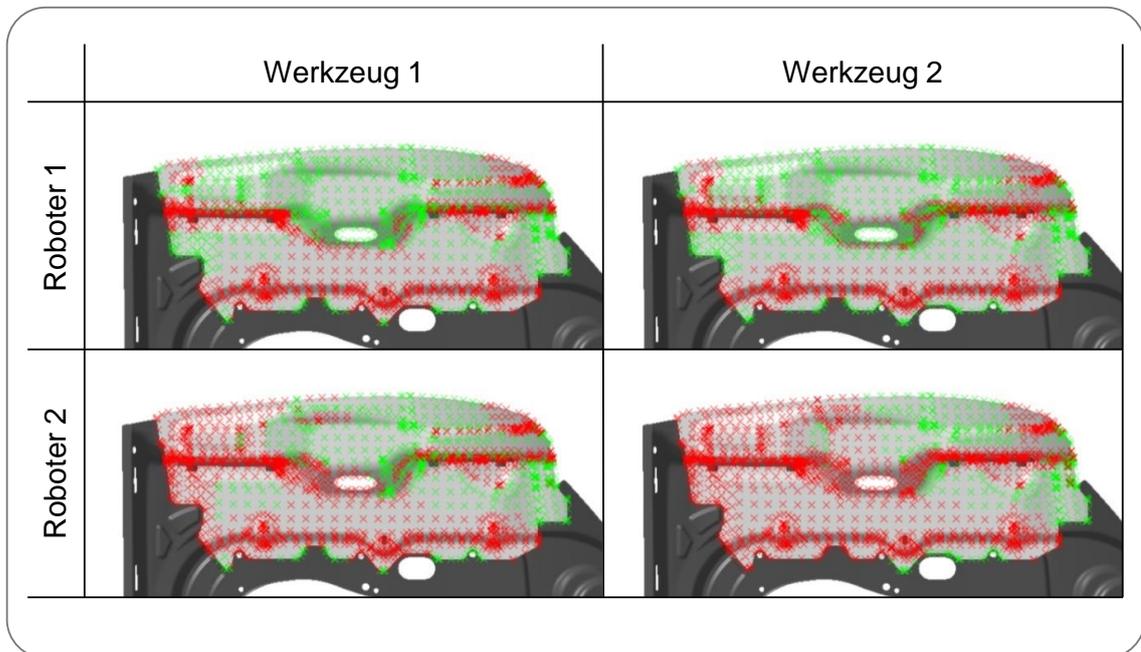


Bild 6.5: Detaillierte Untersuchung

### 6.2.3 Konventionelle Roboterzugänglichkeitsabsicherung

Um zu prüfen, wie sich die getroffenen Vereinfachungen des digitalen Modells auf den Zugänglichkeitsraum auswirken, wird die Zugänglichkeit der im Verifizierungsszenario definierten 1932 Punkte mithilfe der kommerziellen Software DELMIA V5 geprüft und anschließend mit dem Ergebnis aus der Produktionsumgebung verglichen.

Damit die Zugänglichkeit geprüft werden kann, müssen die zu untersuchenden Punkte als sogenannte Tags modelliert werden. Dies sind Achsenkreuze, die auf dem Punkt positioniert werden. Die z-Achse entspricht dabei der Ausrichtung der Fügerrichtung. Die Ausrichtung der Achsen im Raum wird mithilfe der Roll-Pitch-Yaw-Winkeln beschrieben. Eine ausführliche Herleitung, wie die Fügerrichtung in den Roll-Pitch-Yaw-Winkeln umgerechnet wird, ist im Anhang A.4 zu finden.

Um die 1932 Achsenkreuze schnell und effizient modellieren zu können, wurde die Umrechnung der Fügerichtung in die Roll-Pitch-Yaw-Winkeln und deren Erzeugung mithilfe eines Skripts automatisiert. Das Ergebnis der Simulationsmodell-Vorbereitung ist in Bild 6.6 zu sehen.

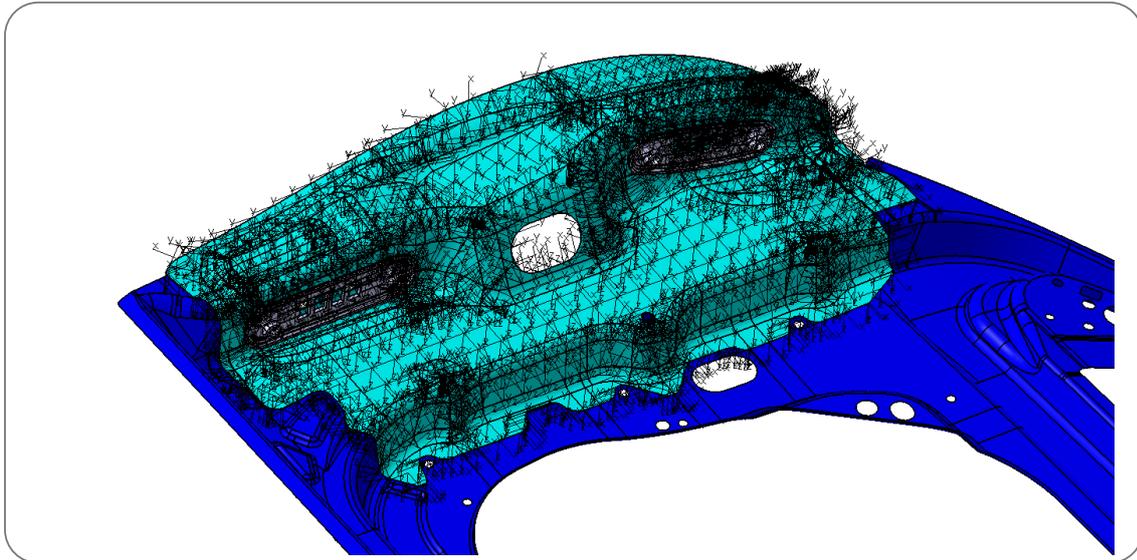


Bild 6.6: Simulationsmodell

Jeder der in Bild 6.6 dargestellten Punkte wird bei der Simulation in DELMIA V5 auf Erreichbarkeit durch die Roboter geprüft. Zusätzlich wird die Schweißzange so lange um den Schweißpunkt gedreht, bis eine kollisionsfreie Position der Schweißzange gefunden ist. Bei der Untersuchung werden neben dem Produkt und der Spann- und Fixiervorrichtung auch die Industrieroboter miteinbezogen. Das Ergebnis der Untersuchung wird in einer xml-Datei ausgegeben. Diese Absicherung ist für die Prüfung der Erreichbarkeit von Schweißpunkten gedacht. Im Gegensatz zu der in dieser Arbeit vorgestellten Methode sollen nur die vom Konstrukteur definierten Schweißpunkte abgesichert werden. Aus diesem Grund wirken die Achsenkreuze und die xml-Datei bei 1932 untersuchten Punkten sehr unübersichtlich.

|           | Werkzeug 1         | Werkzeug 2         |
|-----------|--------------------|--------------------|
| Roboter 1 | 46,38 % zugänglich | 40,01 % zugänglich |
| Roboter 2 | 43,12 % zugänglich | 32,66 % zugänglich |

Tabelle 6.2: Ergebnisse der konventionellen Absicherung

### 6.2.4 Vergleich der Ergebnisse

Aus Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2 kann abgelesen werden, dass das Ergebnis der mit der Produktionsumgebung ermittelten Zugänglichkeitsräume leicht von dem Ergebnis der Zugänglichkeitsuntersuchung mit der kommerziellen Software abweicht. In Tabelle 6.3 ist die Abweichung zusammengefasst.

|                             | Fehler insgesamt | Als grün markiert und Fehler |
|-----------------------------|------------------|------------------------------|
| <b>Roboter 1 Werkzeug 1</b> | 1,86 %           | 3,86 %                       |
| <b>Roboter 1 Werkzeug 2</b> | 6 %              | 13,05 %                      |
| <b>Roboter 2 Werkzeug 1</b> | 0,72 %           | 1,65 %                       |
| <b>Roboter 2 Werkzeug 2</b> | 0,26 %           | 0,79 %                       |
| <b>Mittelwert Gesamt</b>    | 2,21 %           | 5,18 %                       |

Tabelle 6.3: Zusammenfassung der Abweichungen

Alle Punkte, die mithilfe der Produktionsumgebung als nicht zugänglich ermittelt wurden, sind auch als nicht zugänglich mit der kommerziellen Software bestätigt worden. Das heißt die Kollisionen zwischen Werkzeug und dem Produkt beziehungsweise der umgebenden Störgeometrie werden richtig ermittelt.

Es kann allerdings passieren, dass Punkte, die als zugänglich markiert wurden, nicht zugänglich sind. Bei der Berechnung der Zugänglichkeitsräume mithilfe der Produktionsumgebung wird lediglich der Arbeitsraum des Roboters berücksichtigt. Dabei wird aber nicht untersucht, ob der Roboter mit dem Produkt, der Störgeometrie oder sich selbst kollidiert. Beispiele für nicht erkannte Kollisionen sind in Bild 6.7 abgebildet. Kann ein Roboter aufgrund seines Arbeitsraums einen bestimmten Punkt nicht erreichen, so wird dieser Punkt als nicht erreichbar gekennzeichnet. Obwohl 97,79 % der untersuchten Punkte richtig bestimmt werden, ersetzt die frühzeitige Produktbeeinflussung nicht eine detaillierte Absicherung der Produktionsabläufe mithilfe der gängigen Tools der Digitalen Fabrik. Eine frühzeitige Produktbeeinflussung durch die Produktionsumgebung verringert allerdings die Anzahl an Fehlern, die möglicherweise erst sehr spät im Produktentwicklungsprozess aufgedeckt worden wären. Deshalb sollte der Konstrukteur die als

unzugänglich ermittelten Bereiche auf der Produktgeometrie berücksichtigen. Zwar schränken die nicht zugänglichen Bereiche die gestalterische Freiheit des Konstrukteurs ein, vermeiden aber einen aufwendigen Umbau des Produktionsmoduls.

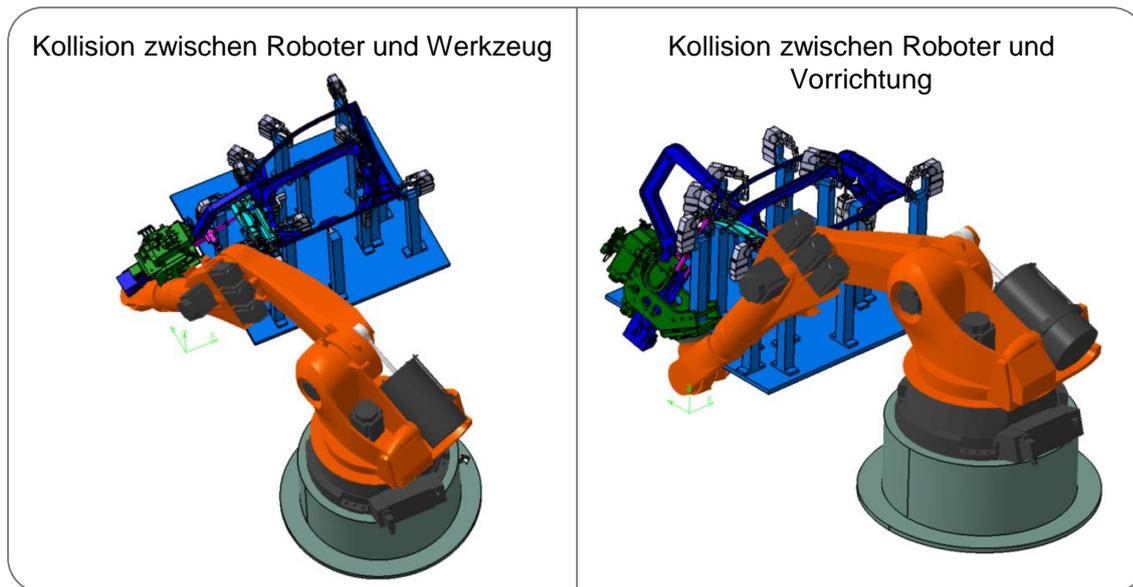


Bild 6.7: Nicht berücksichtigte Kollisionen zwischen Roboter und Umgebung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die als nicht zugänglich ermittelten Bereiche auch durch kommerzielle Absicherungswerkzeuge als nicht zugänglich bestätigt wurden. Damit ein Produktionsmodul nicht umgebaut werden muss, müssen diese Restriktionen vom Konstrukteur beachtet werden. Bei den als zugänglich berechneten Bereichen kann eine detaillierte Untersuchung noch Kollisionen zwischen den Robotern und der Umgebung aufdecken. Nichtsdestotrotz ist die Anzahl der Fehler bei in der Praxis gebräuchlichen Produktionsmodulen sehr gering.

### 6.3 Validierung der erarbeiteten Methode

Im Rahmen des Validierungsszenarios soll ein neues Produkt in eine bereits existierende Anlage integriert werden. Dabei soll die erarbeitete Methode bei der Konstruktion des neuen Produkts unterstützen, sodass das neue Produkt ohne große Umbauten in die existierende Anlage integriert werden kann.

### 6.3.1 Erläuterung des Szenarios

Bei der Entwicklung eines neuen Fahrzeugs hat der Automobilhersteller entschieden, dass für die Produktion der Motorhaube die gleichen Produktionsanlagen verwendet werden sollen, auf denen bereits zwei weitere Modelle gefertigt werden. Grundlage der Entwicklung ist ein standardisierter Aufbau der Motorhauben, welcher in Bild 6.8 schematisch dargestellt ist.

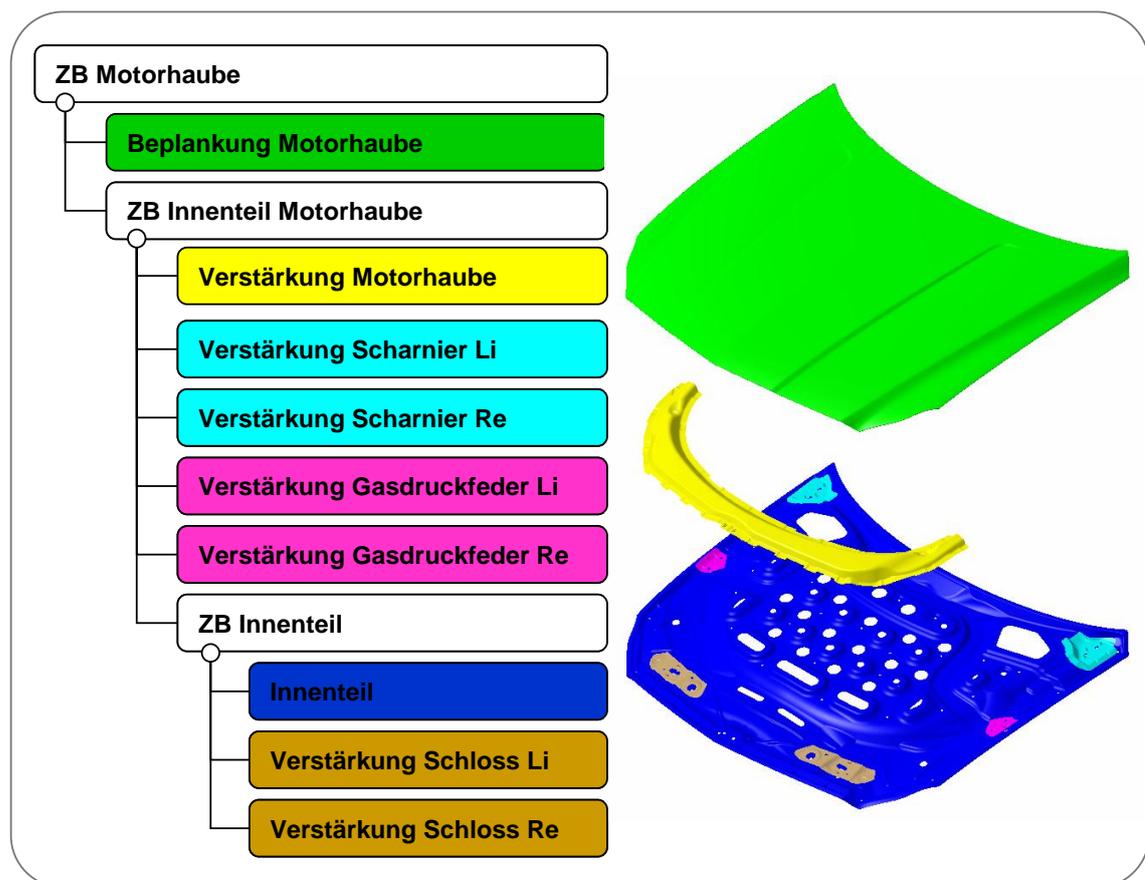


Bild 6.8: Standardisierter Aufbau der Motorhaube

Die Motorhaube besteht aus einer Bepankung und einem Innenteil. Aus Steifigkeitsgründen werden an das Innenteil weitere Verstärkungen für Scharniere, Gasdruckfedern und das Schloss angebracht. Das Innenteil selbst ist zusätzlich durch zwei weitere Platten im Bereich des Schlosses verstärkt. Die einzelnen Verstärkungen werden mithilfe des Durchsetzfügens miteinander beziehungsweise mit dem Innenteil verbunden. Die Bepankung wird mithilfe vom Kleben und Falzen mit dem Innenteil der Motorhaube verbunden. Die einzelnen Komponenten bestehen aus einer Aluminiumlegierung.

Das neue Produkt soll zusammen mit zwei weiteren bereits auf dieser Anlage gefertigten Motorhauben gebaut werden. Es handelt sich dabei um eine sogenannte Batch-Fertigung. Das heißt, es werden im Gegensatz zur Varianten-Mix-Fertigung die verschiedenen Produkte nacheinander auf einer Anlage gefertigt. Um die Anlage zwischen den Fertigungszyklen auf ein anderes Produkt umzurüsten, muss die laufende Produktion unterbrochen werden. Ein großer Vorteil einer solchen Fertigung ist die große Flexibilität. Abhängig von der Nachfrage nach den einzelnen Produkten kann die Länge der jeweiligen Produktionszyklen angepasst werden. Das Layout, der für dieses Szenario verwendeten Produktionsanlage ist in Bild 6.9 schematisch dargestellt.

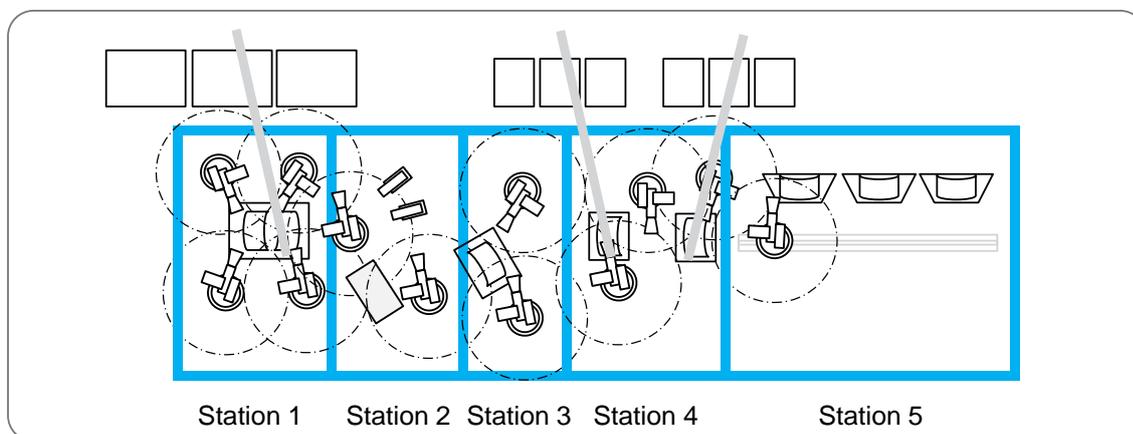


Bild 6.9: Schematisches Layout der Motorhaubenfertigung

Die Produktionsanlage ist auf eine Taktzeit von 60 s ausgelegt. Dabei ist die Fertigung der Motorhauben in folgende Schritte eingeteilt:

Zunächst werden die Schlossverstärkungen auf der linken und rechten Seite und das Innenteil mithilfe des Durchsetzfügens miteinander verbunden. Anschließend werden die Gasdruckfeder-Verstärkungen mit dem Innenteil verbunden. In der Station 1 werden die Schlossverstärkung und die Scharnierverstärkungen eingelegt und anschließend mit dem Innenteil mittels Durchsetzfügens verbunden. Die übrigen Durchsetzfügestellen werden in den folgenden Stationen gesetzt. Dabei wird das Produkt durch einen Handlingsroboter geführt und mit einer stationären Zange bearbeitet. Nachdem ein Kleber auf das Innenteil aufgetragen wurde, wird in der nächsten Station die

Beplankung auf das zusammengebaute Innenteil gelegt und mittels Rollfalten mit diesem verbunden. Zuletzt wird die Motorhaube von einem Handlingsroboter in einen Ofen zum Aushärten gelegt.

Für die Umrüstung der Produktionsanlage müssen die typgebundenen Betriebsmittel ausgetauscht werden. Außerhalb der Produktionsanlage sind Stellflächen für die in diesem Produktionszyklus nicht gebrauchten Betriebsmitteln vorgesehen. Für einen schnellen Umbau werden die Betriebsmittel mithilfe eines Deckenkran in die jeweiligen Produktionszellen gefahren. Die Umrüstung der Anlage dauert etwa 15 Minuten.

Um den Umbau der Anlage möglichst klein zu halten, wird bei der Integration des neuen Produkts auf dieser Anlage versucht, alle typungebundenen Ressourcen unverändert wiederzuverwenden. Das gesamte Layout der Anlage soll nicht verändert werden. Wie bereits erwähnt wurde, wird bei diesem Szenario sehr viel Wert auf ein eigenständiges Produktdesign gelegt. Aus diesem Grund können die typgebundenen Produktionsmittel nicht von den bereits auf der Anlage gefertigten Produkten übernommen werden, sondern müssen neu konzipiert und gebaut werden. Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben wurde, werden neue Produktionsmittel erst sehr spät im Produktentstehungsprozess im Detail konstruiert und gebaut. Deshalb steht die exakte Geometrie der typgebundenen Ressourcen für die Produktbeeinflussung nicht zur Verfügung.

### **6.3.2 Anwendung der Methode**

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der erarbeiteten Methode am Beispiel der Motorhauben-Konstruktion durchgeführt. Die Methode muss in einer möglichst frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses angewendet werden. In Anlehnung an Bild 4.36 begleitet die Methode den Produktentwicklungsprozess ab den Quality Gate J.

#### **Festlegung der Fertigungsstrategie**

Das neue Produkt soll auf einer bereits existierenden Anlage gefertigt werden. Das Layout und die Betriebsmittel sollen möglichst nicht verändert werden. Diese Ausgangssituation entspricht dem Szenario 3a aus Kapitel 4.2.2. Daher müssen nach der erarbeiteten Methode folgende Punkte überprüft werden:

- **Fügefølge:** Die Fügefølge des neuen Produkts entspricht der Fügefølge der bereits auf der Anlage gefertigten Produkte.
- **Produktstruktur:** Das neue Produkt ist nach dem Rohbaustandardkonzept aufgebaut. Das heißt, dass Materialien und Produktaufbau aller Produkte auf dieser Anlage gleich sind.
- **Technologie:** Auch bei dem neuen Produkt wird die gleiche Produktionstechnologie verwendet. In diesem Szenario werden die Produktionsverfahren: Stanznieten, Kleben und Rollfalzen verwendet. Da auch das neue Produkt aus Aluminium hergestellt wird, können die in der Anlage verwendeten Produktionstechnologien auch bei der Herstellung des neuen Produkts verwendet werden.
- **Auslastung der Anlage:** Es muss in diesem Schritt sichergestellt werden, dass die Kapazität der Produktionsanlage ausreicht, um neben den anderen Produkten auch noch das neue Produkt zu fertigen. In Bild 6.10 ist der Verlauf der erwarteten Nachfrage nach den einzelnen Produkten dargestellt. Es wird erwartet, dass die maximale erforderliche Stückzahl des neuen Produkts nicht 440 Fahrzeuge pro Tag überschreitet. Gleichzeitig kann davon ausgegangen werden, dass die Nachfrage nach den bereits auf dem Markt vorhandenen Modellen nachlassen wird.

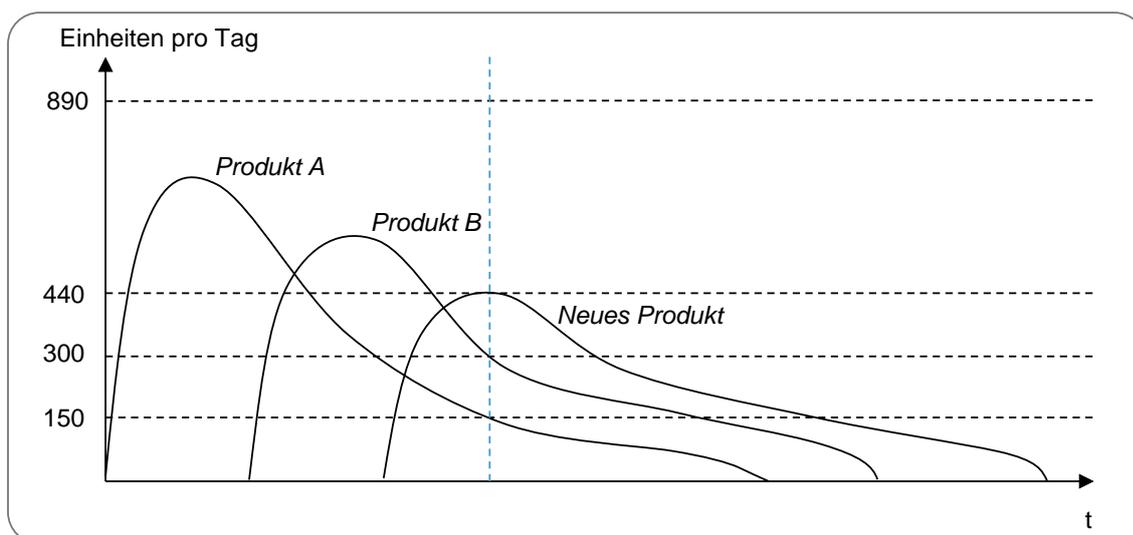


Bild 6.10: Prognostizierte Absatzzahlen der einzelnen Modelle für das Validierungsszenario

Die maximale freie Kapazität für das neue Produkt lässt sich nach der Formel 4.2 errechnen. Mit einer Betriebsnutzungszeit von 1152 min, einer Verfügbarkeit von 85 %, einer Ersatzteilquote von 10 % und einer Stückzahl von 450 Fahrzeugen pro Tag errechnet sich die maximale Stückzahl des neuen Produkts wie folgt:

$$S_{\text{neu Produkt}} = \frac{BNZ}{t_{\text{Taktzeit}} \cdot (1+e)} \cdot V - S_{\text{Summe Alt}} = \frac{1152 \text{ min}}{60s \cdot (1+0,1)} \cdot 0,85 - 450 = 440 \quad (6.1)$$

Unter den vorgegebenen Annahmen können somit maximal 440 Fahrzeuge pro Tag gefertigt werden. Diese Zahl ist ausreichend und somit kann das neue Produkt auf der Anlage gefertigt werden.

### **Vorkonfiguration der Produktionsanlage**

Im Gegensatz zu dem vorhergehenden Szenario ist bei einer Wiederverwendung einer Produktionsanlage keine Grob- beziehungsweise Blocklayout der Anlage als Ausgangspunkt für die erarbeitete Methode notwendig. Da die Produktionsanlage bereits existiert, kann zu Beginn des Konstruktionsprozesses auf ein detailliertes Fabriklayout zugegriffen werden. Hierzu können die Konstruktionsdaten der Anlage herangezogen werden.

Da die Produktionsanlage möglichst nicht umgebaut werden soll, sollten die Betriebsmittel weitgehend wiederverwendet werden. Für typungebundene Betriebsmittel ist das einfach zu realisieren. Sollen auch typgebundene Betriebsmittel wiederverwendet werden, so schränken diese die Produktgeometrie sehr stark ein. Da das neue Fahrzeug sich von den anderen Modellen abheben soll, erhält die neue Motorhaube ein eigenständiges Design, was zur Folge hat, dass die typgebundenen Betriebsmittel nicht wiederverwendet werden können. Im Sinne der geplanten Batch-Fertigung werden die typgebundenen Betriebsmittel für die Fertigung des jeweiligen Produkts ausgetauscht.

Im Rahmen des Validierungsszenarios wird das in Bild 6.11 dargestellte Produktionsmodul betrachtet. Es handelt sich um eine Durchsetzfügestelle, in der die Schloss- und Scharnierverstärkungen mit dem Innenteil der Motorhaube verbunden werden. Falls die Zelle nicht ausgelastet ist, können innerhalb des Takts weitere Durchsetzfügestellen, beispielsweise an der Gasdruckfederverstärkung, gefertigt werden.

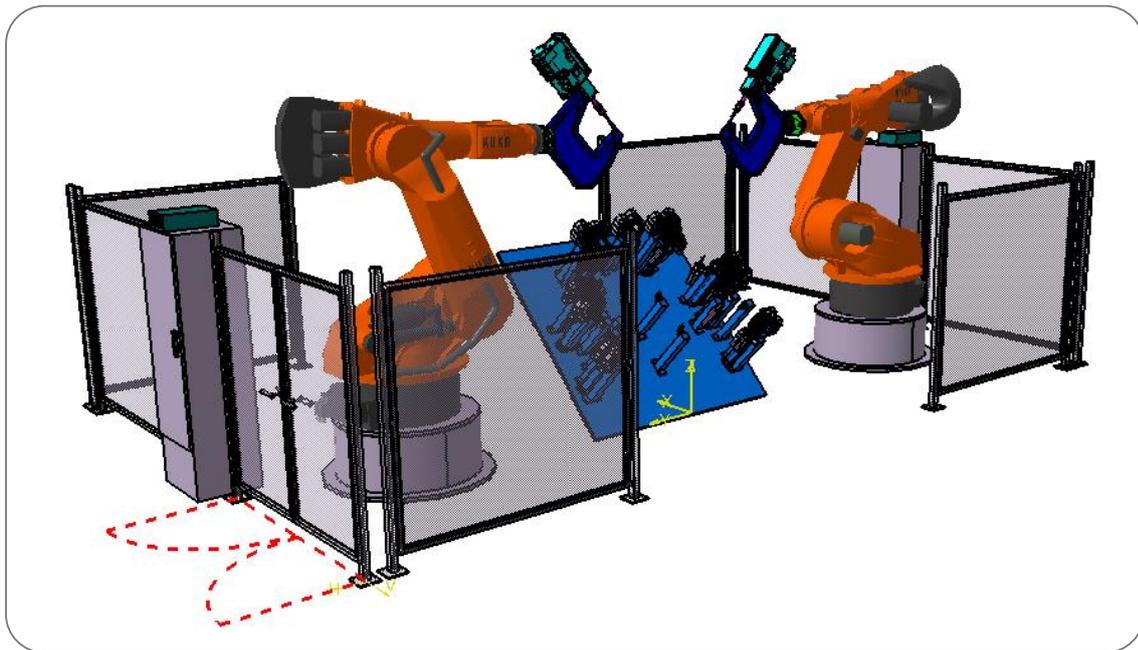


Bild 6.11: Aufbau des Produktionsmoduls

Die Spann- und Fixiervorrichtung steht nicht für die Produktbeeinflussung zur Verfügung, da diese erst spät im Produktentstehungsprozess in Abhängigkeit der Produktgeometrie konstruiert wird. Da bei der Konstruktion von Spann- und Fixiervorrichtungen viele standardisierte Spann- und Fixiereinheiten verwendet werden, können diese auch für die Produktbeeinflussung eingesetzt werden.

Im Rahmen der Validierung wird auf Grundlage des in Kapitel 2.3.3 vorgestellten Spann- und Fixierkonzepts eine vereinfachte Vorrichtung gestaltet. Die vereinfachte Vorrichtung wird mithilfe von Makros und parametrisierten Modellen automatisiert aufgebaut. Hierzu werden automatisch die Informationen über die Spann- beziehungsweise Fixierstelle aus dem CAD-Modell ausgelesen und analysiert. Anschließend werden Standardelemente aus einer Datenbank abgerufen und auf der Spann- beziehungsweise Fixierstelle eingefügt.

In Bild 6.12 auf der linken Seite ist die vereinfachte Spann- und Fixiervorrichtung abgebildet. Auf der rechten Seite in Bild 6.12 ist dagegen die finale Konstruktion der Vorrichtung dargestellt.

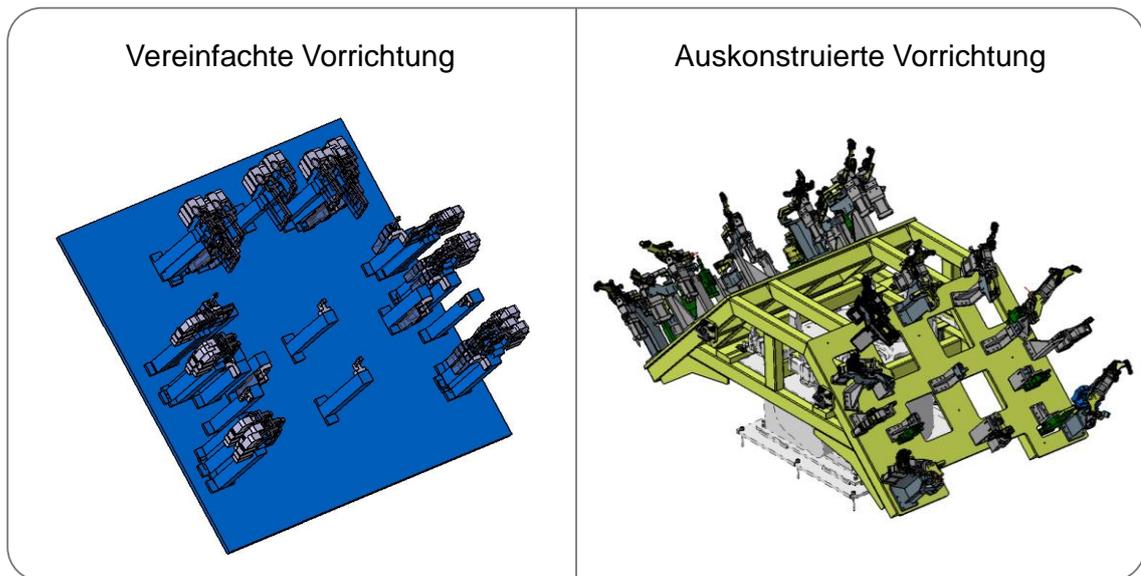


Bild 6.12: Die Spann- und Fixiervorrichtung

Die Geometrie der vereinfachten Vorrichtung weicht stark von der finalen Vorrichtung ab, allerdings kann diese als Störgeometrie für die Berechnung der Zugänglichkeit in der Produktionszelle genutzt werden. Auch wenn die vereinfachte Vorrichtung nicht die gleichen Spann- und Fixierelemente wie die fertige Vorrichtung enthält, kann die Einschränkung durch die Spann- und Fixiervorrichtung sehr gut abgeleitet werden.

### **Analyse der Produktionsanlage**

Auf Grundlage des digitalen Modells eines Fertigungsmoduls wird mit der erarbeiteten Methode die Produktionsumgebung abgeleitet. Dabei wird zunächst, wie in Kapitel 4.2.4 vorgestellt wurde, das digitale Modell der Anlage vereinfacht. Im Rahmen des Validierungsszenarios werden die beiden Durchsetzfügeroboter näher betrachtet.

Für den Fertigungsprozess unwichtige 3D-Modelle, wie beispielsweise die Schutzzäune und Steuerschränke, wurden aus dem Modell entfernt. Auch in diesem Szenario werden die Industrieroboter durch deren Arbeitsräume ersetzt. Die Geometrie der Durchsetzfügewerkzeuge und der Spann- und Fixiervorrichtung wurde dagegen beibehalten, da diese mit dem Produkt in Kontakt kommt (vgl. Bild 6.13).

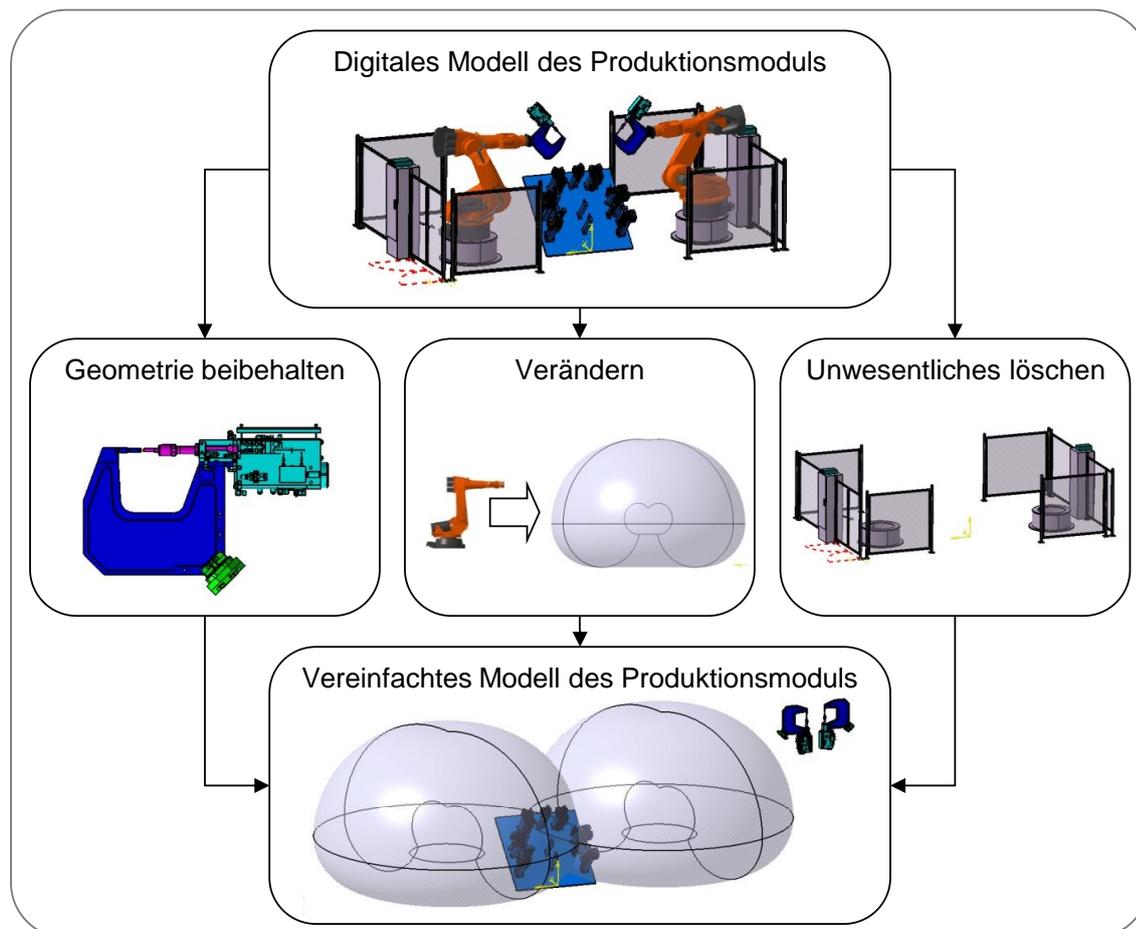


Bild 6.13: Aufbau der Produktionsumgebung

Für die Analyse der Taktzeit sind die Prozesszeiten wichtig. Aus Tabelle 4.3 kann entnommen werden, dass für das Setzen eines Durchsetzfügestpunkts etwa 5 s benötigt werden. In dem ausgewählten Produktionsmodul befindet sich ein Drehtisch. Für das Drehen des Tisches werden 5 s benötigt.

### Restriktionen und Möglichkeiten

Im nächsten Schritt der erarbeiteten Methode werden die Restriktionen und Möglichkeiten des Produktionsmoduls ermittelt. Ein wichtiger Bestandteil dabei ist die Ermittlung des Zugänglichkeitsraums einer Anlage. Dieser Schritt wurde prototypisch in CATIA V5 implementiert. Die Ergebnisse der Berechnungen werden im nächsten Schritt dem Konstrukteur zu verschiedenen Zeitpunkten (vgl. Bild 6.14) im Produktentstehungsprozess aufgezeigt.

Des Weiteren muss noch für das entsprechende Produktionsmodul die maximale Anzahl  $A$  an Verbindungselementen ermittelt werden. Nach Tabelle

4.4 lässt sich die maximale Anzahl an Durchsetzfügepunkten wie folgt er rechnen:

$$A = \frac{t_{\text{Taktzeit}} - \sum_j t_j}{5s} = \frac{60s - 5s}{5s} = 11 \quad (6.2)$$

Damit können in dem zuvor festgelegten Produktionsmodul und der Taktzeit von 60 s elf Stanzpunkte gefertigt werden. Dies muss dem Produktentwickler bei der Konstruktion des neuen Produkts bewusst sein. Sollte eine höhere Anzahl an Stanzpunkten erforderlich sein, so muss geprüft werden, ob sich einige Punkte in die Station 2 verlegen lassen können (vgl. Bild 6.9).

### Gestaltung des Produkts

In der Automobilindustrie wird im Sinne des Simultaneous Engineering mit der Planung der Produktionsanlagen angefangen, noch bevor die Detailkonstruktion des Produkts abgeschlossen ist. Die Produktdaten, auf welchen sich die Produktionsplanung stützt, verändern sich im Laufe des Produktentstehungszyklus. Dies ist auch der Fall in diesem Validierungsszenario. Deshalb wird die erarbeitete Methode zur Produktbeeinflussung zu definierten Meilensteinen im Produktentwicklungsprozess durchgeführt. Angelehnt sind diese Meilensteine an den im Kapitel 2.2.1 vorgestellten Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie. Eine Übersicht der Meilensteine ist in Bild 6.14 dargestellt.

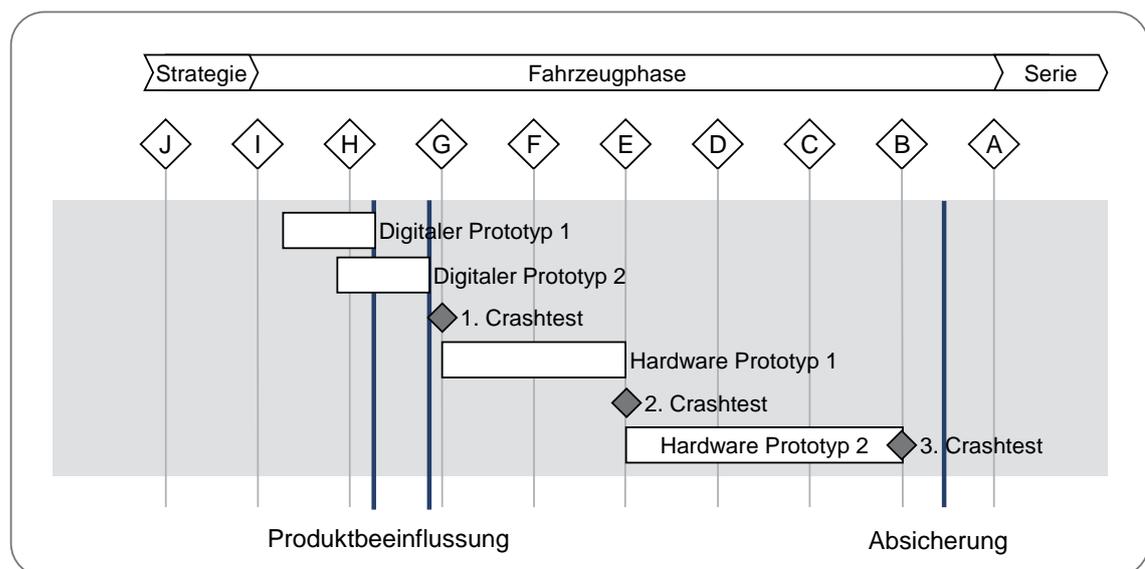


Bild 6.14: Meilensteinübersicht für die Validierung

Da direkt nach der Strategiephase die Konstruktion der Bauteile beginnt, ist es wichtig, die erarbeitete Methode zur Produktbeeinflussung möglichst früh im Produktentwicklungsprozess einzusetzen. Allerdings verändern sich die Geometrie und die Struktur der Produkte im Laufe des Produktentstehungsprozesses. In Bild 6.15 ist ein Vergleich der Geometrie des Motorhaubeninnenteils zum Meilenstein H und zum Stand bei der Anlagenvergabe zu sehen.

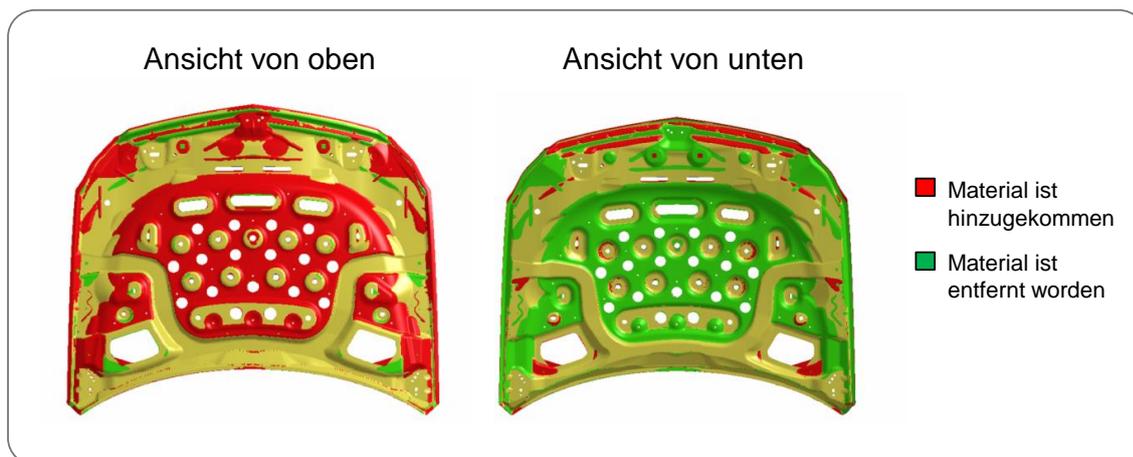


Bild 6.15: Vergleich der Bauteilgeometrie

In Bild 6.15 ist die Veränderung der Produktgeometrie im Laufe des Produktentstehungsprozesses sehr gut erkennbar. Gerade in der sehr frühen Phase ist die Geometrie noch nicht vollständig definiert. In diesem Beispiel ist die Motorhaube um 8,6 mm länger geworden und einige Versteifungen sind hinzugekommen. Geometrieänderungen müssen auch bei der Entwicklung des Spann- und Fixierkonzeptes berücksichtigt werden. Im Folgenden wird gezeigt, wie im Laufe des Produktentstehungsprozesses die erarbeitete Methode angewendet werden kann:

### **Meilenstein: Digitaler Prototyp 1**

Zu diesem sehr frühen Zeitpunkt im Produktentstehungsprozess ist der Reifegrad des Produkts noch sehr niedrig. Es ist erst die grobe Struktur des Produkts bekannt. Zwar kann mithilfe von CAD-Templates sehr schnell eine erste Produktgeometrie erzeugt werden, allerdings muss anschließend die Detailkonstruktion des Produkts durchgeführt werden. Oft werden zu diesem Zeitpunkt Geometrien aus Vorgängerbaureihen als Ausgangspunkt für die

weitere Entwicklung übernommen. Aus diesem Grund gibt es viele Kollisionen in der Produktgeometrie. In Bild 6.16 ist der Entwicklungsstand der in diesem Szenario verwendeten Motorhaube zu sehen.



Bild 6.16: Produkt zum Meilenstein DPT1

Auch die Anzahl an Durchsetzfügestellen wurde in Anlehnung an das Vorgängerprodukt festgelegt. Die Position der Durchsetzfügestellen ist allerdings noch nicht definiert. Obwohl sich die Struktur der Motorhaube an dem unternehmensinternen Standardrohbaukonzept orientieren sollte, verändert sich auch die Produktstruktur im Laufe des Produktentstehungsprozesses.

Aufbauend auf diesem Datenstand wird die Produktionsumgebung abgeleitet. Da aber das Spann- und Fixierkonzept noch nicht definiert ist, und dadurch sich auch die vereinfachte Vorrichtung nicht ableiten lässt, wird diese bei der Ermittlung des Zugänglichkeitsraums nicht berücksichtigt. Das Ergebnis der Zugänglichkeitsuntersuchung der einzelnen Roboter ist in Bild 6.17 abgebildet.

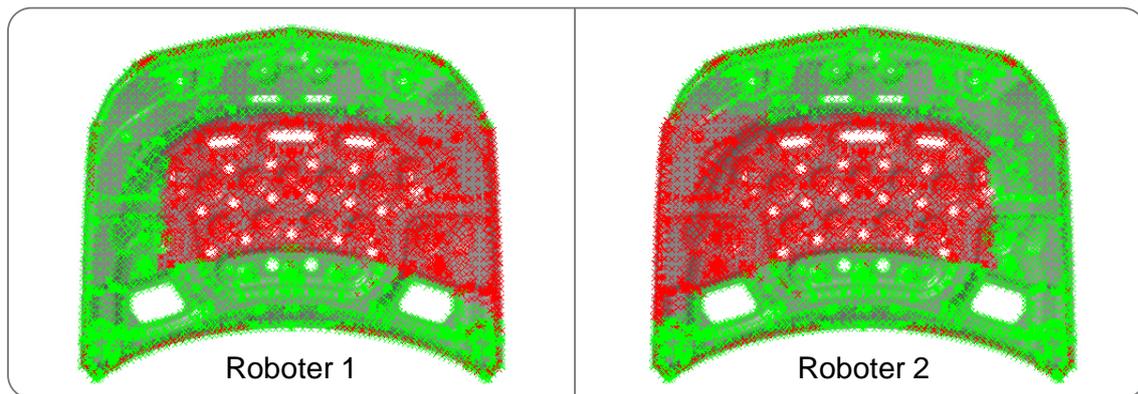


Bild 6.17: Zugänglichkeitsanalyse zum Meilenstein DPT1

Mit den Ergebnissen aus Bild 6.17 ergibt sich der in Bild 6.18 dargestellte Zugänglichkeitsraum. Die Information, welche Bereiche des Innenteils überhaupt von dem Produktionsmodul erreichbar sind, kann der Konstrukteur nutzen, um die Position der Verstärkungen festzulegen. Die roten Bereiche des Innenteils sind nicht durch die Durchsetzfugezangen des Produktionsmoduls erreichbar. Somit können die Verstärkungen nur auf die grünen Bereiche platziert werden.

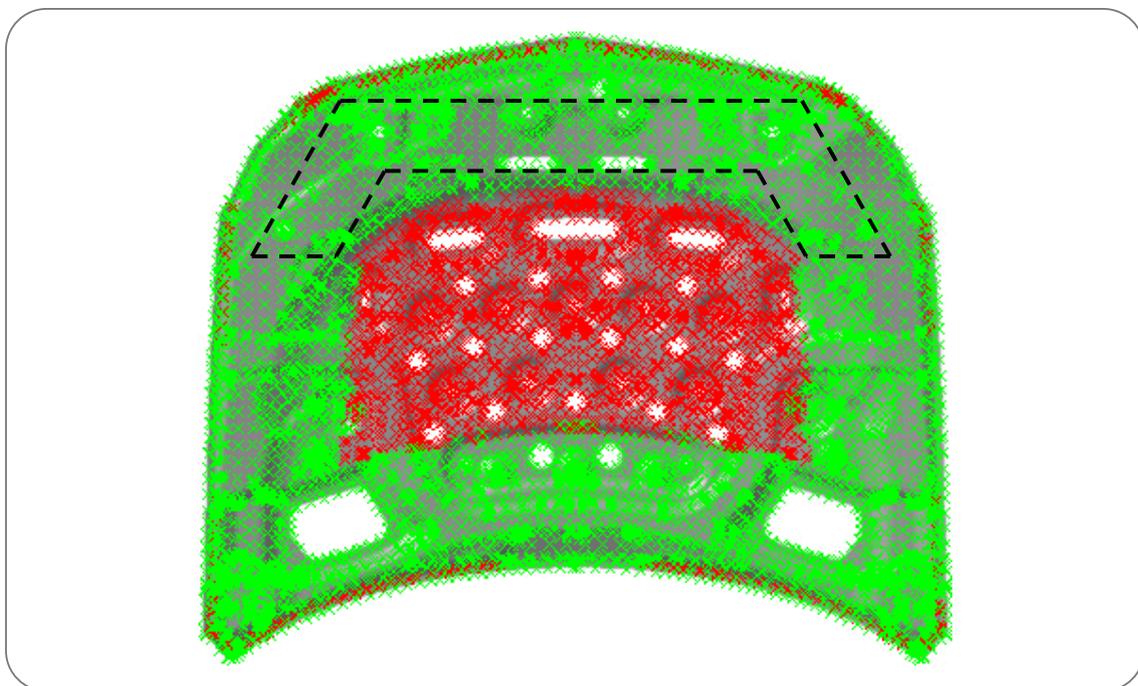


Bild 6.18: Zugänglichkeit der Motorhaube zum Meilenstein DPT1

Bei Durchsetzfügeverbindungen ist eine Überlappung der zu fügenden Bauteile erforderlich. Welchen Flächen der zu fügenden Bauteile sich berühren sollen und zur Definition von Durchsetzfügepunkten genutzt werden können, kann der Konstrukteur aus den zugänglichen Bereichen festlegen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Produktionsumgebung bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt im Produktentstehungsprozess das Produkt bezüglich Produktionsanforderungen beeinflussen kann.

### **Meilenstein: Digitaler Prototyp 2**

Zwar ist beim Digitalen Prototyp 2 die Detailkonstruktion des Produkts noch nicht abgeschlossen, der Reifegrad der Konstruktion ist allerdings deutlich höher. Alle Kollisionen zwischen den Bauteilen wurden entfernt und das Spann- und Fixierkonzept wurde angepasst. Somit kann jetzt auch die vereinfachte Spann- und Fixiervorrichtung in die Produktionsumgebung betrachtet werden.

Da in diesem Produktionsmodul die Schlossverstärkung mit dem Innenteil verbunden werden soll, werden im nächsten Schritt nur Oberflächen dieser Bauteile betrachtet. Das Ergebnis der erneuten Zugänglichkeitsanalyse ist in Bild 6.19 zusehen.

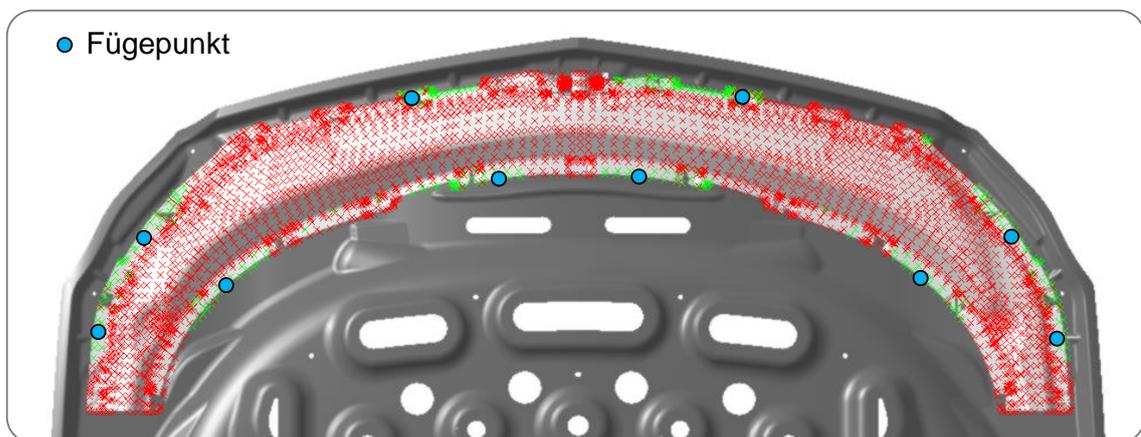


Bild 6.19: Zugänglichkeit DPT2

Wird die Spann- und Fixiervorrichtung als Störgeometrie in die Zugänglichkeitsanalyse miteinbezogen, so werden die zugänglichen Bereiche eingeschränkt. In dem Validierungsszenario schränkt die Spann- und Fixiervorrichtung auch die Zugänglichkeit des zu fügenden Flansches ein (vgl. Bild 6.19). In dem untersuchten Produktionsmodul können Fügepunkte an den

gekennzeichneten Bereichen definiert werden. Im Rahmen des Validierungsszenarios werden zehn Fügepunkte definiert. Somit ist die maximale Anzahl der elf Fügepunkte für dieses Produktionsmodul nicht überschritten. Da aus Festigkeitsgründen auch Durchsetzfügepunkte an in diesem Produktionsmodul nicht zugänglichen Stellen notwendig sind, müssen die weiteren Durchsetzfügepunkte in einem der folgenden Produktionsmodule gefertigt werden. Wie in Bild 6.9 dargestellt ist, kann hierfür die Station 2 verwendet werden.

### **Absicherung der Produktionsanforderungen**

Während des Produktentstehungsprozesses verändert sich die Produktgeometrie. Gleichzeitig steigt auch der Reifegrad einer Produktionsanlage. Zu Beginn des Produktionsplanungsprozesses ist die Spann- und Fixiervorrichtung nur als Konzept vorhanden. Wie in Kapitel 2.3 beschrieben wurde, wird die Produktionsanlage immer wieder bezüglich Produktionsanforderungen abgesichert. In Bild 6.20 ist das Absicherungsmodell der fertigen Anlage zu sehen. Für die in Bild 6.19 definierten zehn Fügepunkte sind bei der Absicherung keine Probleme aufgetreten. Alle Fügepunkte, die auf Grundlage der erarbeiteten Produktionsumgebung definiert wurden, sind zugänglich.

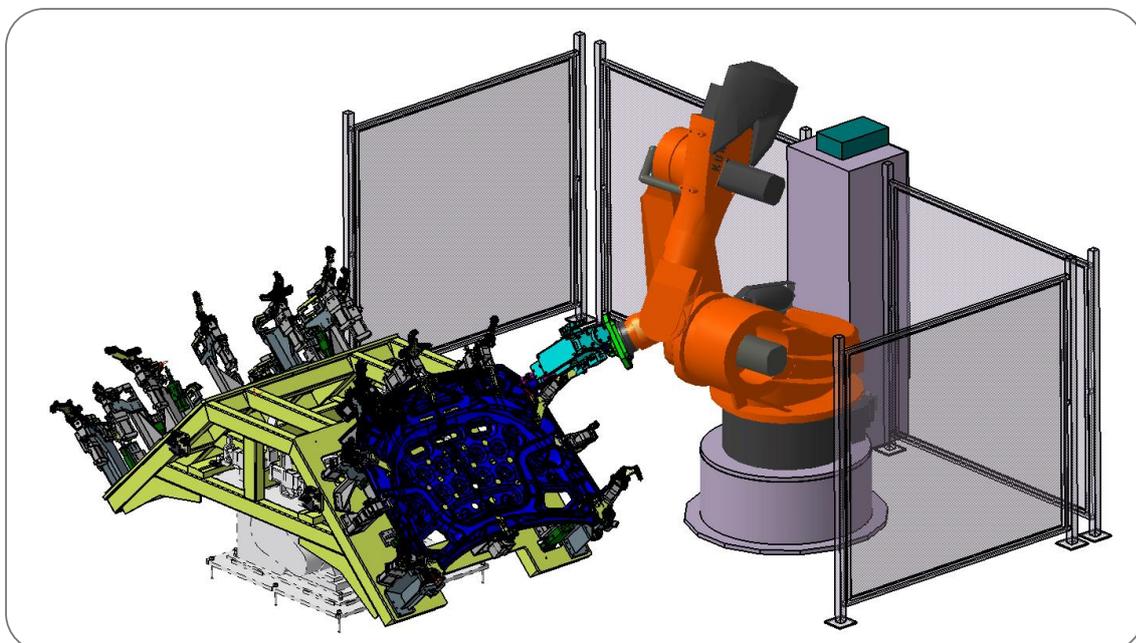


Bild 6.20: Absicherungsmodell der Anlage

### **6.3.3 Bewertung der Methode anhand des Anwendungsszenarios**

#### **Darstellung der Ergebnisse**

Ein großer Vorteil der erarbeiteten Methode ist die sehr einfache Darstellung der Ergebnisse. Die Zugänglichkeitsräume der einzelnen Produktionsmodule werden farblich als zugänglich markiert. Dadurch benötigt der Produktentwickler keine Produktions- beziehungsweise Planungskenntnisse. Er muss nicht einmal die Fertigungsanlage kennen und dennoch kann er die wichtigsten Anforderungen in seiner Konstruktion berücksichtigen. Durch die automatisierte Berechnung der Produktionsumgebung muss sich der Produktentwickler nicht mit den Einzelheiten der Anlage auseinandersetzen und kann beispielsweise die Zugänglichkeitsräume zu verschiedenen Zeitpunkten im Produktentstehungsprozess ermitteln. Falls die Produktionsumgebung den Konstrukteur zu stark einschränkt, kann er sich jederzeit an den Anlagenplaner wenden und nach alternativen Lösungen suchen. Dadurch muss vielleicht die Anlage angepasst, erweitert oder umgebaut werden, allerdings ist, im Gegensatz zur konventionellen Produktionsplanung, der zuständige Planer bereits sehr früh im Produktentstehungsprozess involviert. Er kann dann frühzeitig die entsprechenden Maßnahmen einleiten.

#### **Definition von Bauteillagen**

Die erarbeitete Methode unterstützt den Konstrukteur bei der Festlegung der Bauteilpositionen. Sollen zwei Bauteile miteinander verbunden werden, so muss der Konstrukteur festlegen, an welchen Flächen sich die beiden Bauteile berühren. Hierfür sollte der Produktentwickler Flächen wählen, die auch durch das Produktionsmodul zugänglich sind. Eine sehr einfache Möglichkeit bietet der Zugänglichkeitsraum der Produktionsumgebung, da auf einen Blick alle zugänglichen und nicht zugänglichen Bereiche auf dem Bauteil zu sehen sind.

#### **Definition von Fügepunkten**

Nicht nur bei der Positionierung der einzelnen Bauteile kann die Produktionsumgebung unterstützen, sondern auch bei der Definition von Fügepunkten. Setzt der Konstrukteur die Schweißpunkte, die Durchsetzfügepunkte oder die Kleberaube auf einen zugänglichen Bereich des Bauteils, so wird eine Anpassung der Produktionsanlage wahrscheinlich nicht erforderlich

sein. Setzt er einen Fügepunkt oder -linie auf einen nicht zugänglichen Bereich, so muss er sich mit dem zuständigen Produktionsplaner in Verbindung setzen. Gemeinsam können sie dann nach einer Alternative suchen. Dies kann entweder zu einer Anpassung des Produkts oder einer Erweiterung beziehungsweise eines Umbaus der Anlage führen. Bei der Festlegung der Fügepunkte darf die maximale Anzahl der Fügepunkte in einem Fertigungsmodul nicht überschritten werden.

### **Steigerung des Reifegrads**

Durch eine konsequente Anwendung der erarbeiteten Methode konnte der Reifegrad der Fertigungsanlagen und des Produkts zu einem frühen Zeitpunkt gesteigert werden. Bereits zum Meilenstein DPT1 konnten die Fügepunkte definiert werden und gleichzeitig die Anforderungen der bereits existierenden Produktionsanlage berücksichtigt werden. Eine zeitaufwendige Absicherung war zu diesem frühen Zeitpunkt nicht notwendig. Dadurch können Iterationsschleichen bei der Entwicklung der Anlagen vermieden und die Entwicklungszeit verkürzt werden.

## **6.4 Kritische Betrachtung**

Einen großen störenden Einfluss auf die Zugänglichkeit eines Produktionsmoduls haben die das Produkt berührenden Produktionsressourcen. Deshalb ist es besonders wichtig, diese Geometrie bereits am Anfang des Produktentwicklungsprozesses zu kennen. Bei Roboter geführten Werkzeugen, wie Schweißzangen, Klebepistolen, oder Rollfalzköpfen, ist in der Praxis diese Geometrie bekannt, da es sich um standardisierte Produktionsmittel handelt. Vorrichtungen und Greifer können dagegen erst am Ende des Produktentstehungsprozesses entwickelt und konstruiert werden, da hierfür die Detailkonstruktion des Produkts erforderlich ist. Wird mit der Konstruktion beispielsweise zu früh begonnen, so kann eine Änderung des Produkts, seiner Struktur oder der Fertigungsreihenfolge zu umständlichen und kostspieligen Anpassungen der Vorrichtung führen. Dies muss in der Praxis möglichst vermieden werden. Aus diesem Grund stehen die Produktionsmittel, die direkt mit dem Produkt in Kontakt kommen, in aller Regel nicht am Anfang des Produktentstehungsprozesses zur Verfügung.

Zwar entspricht der Detaillierungsgrad einer vereinfachten Vorrichtung nicht dem einer fertigen Vorrichtung, aber für die frühzeitige Produktbeeinflussung kann dieser dennoch verwendet werden. Auf diese Weise werden die durch die Vorrichtung verursachten Einschränkungen dem Konstrukteur veranschaulicht. Nichtsdestotrotz kann das Ergebnis der Zugänglichkeitsuntersuchung auch falsch sein, da nicht die exakte Geometrie der Vorrichtung oder des Greifers berücksichtigt wurde. Die vereinfachten Vorrichtungen oder die vereinfachten Greifer können sowohl zu viel als auch zu wenige Einschränkungen dem Konstrukteur vermitteln.

Die Grundlage der erarbeiteten Methode ist ein digitales Modell der Produktionsmodule. Wie bereits beschrieben, können bei einer Neuplanung vorkonfigurierte Produktionsmodule oder bei einem Anlagen-Reuse bereits existierende Produktionsmodule herangezogen werden. In der Praxis werden oft aufgrund von Zeitdruck Änderungen der Anlage, die bei Umbau- bzw. Wartungsarbeiten auftreten können, nicht in den digitalen Anlagenmodellen nachgepflegt. Dies hat zur Folge, dass diese Änderungen bei der Integration von neuen Produkten auf dieser Anlage nur schwer berücksichtigt werden können. Damit die vorgestellte Methode in der Praxis erfolgreich eingesetzt werden kann, bedarf es einer konsequenten Dokumentation aller Umbaumaßnahmen [ZäPF-03].

Nicht nur bei der Wiederverwendung von Produktionsanlagen, sondern auch bei der Neuplanung von Anlagen, ist die Pflege der digitalen Modelle sehr wichtig. Werden beispielsweise neue Produktionstechnologien eingeführt, so müssen auch für diese digitalen Modelle und die entsprechenden Produktionsmodule aufgebaut und in der Datenbank nachgepflegt werden. Änderungen von Unternehmensstandards können auch eine Anpassung der Modelle nach sich ziehen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für den erfolgreichen Einsatz der erarbeiteten Methode eine sorgfältige Datenpflege erforderlich ist.

Einer der wichtigsten Ziele der frühzeitigen Produktbeeinflussung bezüglich Produktionsanforderungen ist die Verwendung von standardisierten Produktionsmitteln. Der Konstrukteur muss aber während des Produktentwicklungsprozesses eine Vielzahl an teilweise sich widersprechenden Anforderungen berücksichtigen [EhMe-13]. Festigkeits-, Sicherheits- oder

Gesetzesanforderungen sind nur einige der Anforderungen, die unbedingt erfüllt werden müssen. Zwar muss natürlich auch die Fertigbarkeit des Produkts gewährleistet sein, dennoch legt oftmals der Konstrukteur viel Wert auf andere Anforderungen und nimmt somit eine Nichtberücksichtigung der Produktionsanforderungen in Kauf. Dadurch können die Vorteile von Unternehmensstandards in der Produktion nicht erreicht werden. Damit die erarbeitete Methode in der Praxis erfolgreich angewendet werden kann, muss die Produktentwicklung offener für die Produktionsbelange sein. Ein richtiger Schritt in diese Richtung ist die erarbeitete Methode, da sie sehr anschaulich die Produktionsanforderungen dem Konstrukteur darstellt.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Im letzten Kapitel werden die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst. Hierfür werden die im Kapitel 1.2 formulierten Ziele herangezogen. Des Weiteren werden die Entwicklungsmöglichkeiten und Handlungsfelder aufgezeigt, um die erarbeitete Methode auch in anderen Bereichen der Automobilindustrie, wie beispielsweise das Presswerk oder die Montage, einzuführen.

### 7.1 Zusammenfassung

Globalisierung und die steigende Modell- und Variantenvielfalt, verbunden mit einem hohen Kostendruck, kürzeren Produktlebenszyklen, sowie hohen Stückzahlschwankungen stellen die Automobilindustrie vor große Herausforderungen. Um die Wettbewerbsfähigkeit zu verbessern, versuchen viele Automobilhersteller neue Produkte durch Modularisierung auf bereits bestehenden Produktionslinien zu integrieren. Dies erfordert aber eine standardisierte Produktion.

Da der automobiler Karosserierohbau im Mittelpunkt dieser Arbeit steht, wurde der Produktentwicklungsprozess für eine Karosserie näher erläutert. Bereits heute gibt es in der Automobilindustrie intensive Bemühungen, die Produkte, aber auch die Produktionsanlagen, zu standardisieren und zu modularisieren. In Wissenschaft und Technik existieren zahlreiche Methoden, die bei der Entwicklung von modularen Produkten und Produktionsanlagen unterstützen. Allerdings fehlt es an Methoden, die das Zusammenspiel von modularisierten Produkten und Produktionsanlagen näher beleuchten. Damit ein neues Produkt auf einer standardisierten Produktionsanlage gefertigt werden kann, beziehungsweise in eine bereits existierende Produktionslinie integriert werden kann, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine neue Methodik entwickelt. Konsistent zu den Zielen 1.1 bis 1.3 lassen sich die Ergebnisse dieser Arbeit wie folgt zusammenfassen:

***Ergebnis 7.1:*** *Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Methode entwickelt, mit deren Hilfe ein neues Produkt sehr früh im Produktentwicklungsprozess so beeinflusst werden kann, dass sich seine Komponenten in einer zuvor definierten und standardisierten Produktionsanlage fertigen lassen. Dabei muss*

*der Konstrukteur nicht die Einzelheiten der Produktionsanlage kennen und kann sich auf die Produktgestaltung konzentrieren. Die einzelnen Schritte der Methode lassen sich in den Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie verankern, dadurch ist die praktische Anwendbarkeit der Methode gezeigt. Die erarbeitete Gesamtmethode wurde an einem Praxisbeispiel aus dem automobilen Karosserierohbau validiert. Es konnte gezeigt werden, dass mithilfe der Methode der Produktentwickler frühzeitig bei der Berücksichtigung von Produktionsanforderungen unterstützt wird. Die Zugänglichkeitsräume der Produktionsanlage unterstützen den Entwickler bei der Festlegung der Produktgeometrie und der Verbindungselemente. Ein konsequentes Anwenden der Methode beeinflusste das Produktdesign, so dass bei einer späteren Absicherung der Produktion keine gravierenden Probleme auftreten sollten.*

Bild 4.17 visualisiert die Struktur der erarbeiteten Methode. Die Produktbeeinflussung lässt sich dabei in vier Schritte gliedern:

- Zunächst muss die Produktionsstrategie festgelegt werden. Dabei wird unterschieden, ob ein neues Produkt auf einer neuen oder einer bestehenden Anlage gefertigt werden soll.
- Im zweiten Schritt wird ein erstes Groblayout der Anlage erstellt. Grundlage hierfür sind die zuvor festgelegten Produktionsmodule, mit deren Hilfe sehr schnell eine auf Standards basierte Produktion geplant werden kann.
- Im nächsten Schritt müssen die Produktionsmodule analysiert werden, da nicht alle Informationen dieser Module für den Produktentwickler von Bedeutung sind. Beispielsweise ist die Robotergeometrie nicht wichtig für die Konstruktion der neuen Produkte. Der Arbeitsraum der Roboter ist aber sehr wichtig für die Festlegung der Verbindungselemente. Auf einige Betriebsmittel, wie beispielsweise Schutzzäune oder Steuerschränke, kann gänzlich verzichtet werden.
- Im letzten Schritt müssen die Möglichkeiten und Einschränkungen des Produktionsmoduls ermittelt werden. Neben der Berechnung der maximalen Anzahl an Fertigungsoperationen werden auch die Zugänglichkeitsräume der Produktionsanlage ermittelt. Alle Mög-

lichkeiten aber auch Einschränkungen werden dem Produktentwickler im Rahmen der Produktionsumgebung dargestellt. Auf dieser Grundlage kann der Produktentwickler das Produkt gestalten.

Um die Akzeptanz der erarbeiteten Methode in der Produktentwicklung sicherzustellen, wurde eine sehr einfache Darstellung der Anforderungen einer standardisierten und modularisierten Produktionsanlage ausgearbeitet.

**Ergebnis 7.2:** *Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Algorithmus entwickelt, der auf Grundlage eines vereinfachten Modells die Zugänglichkeitsräume auf einem Bauteil errechnet und diese dem Produktentwickler anschaulich darstellt. Zugängliche Flächen werden grün und nicht zugängliche Flächen rot markiert. Auf diese Weise kann er die Verbindungspunkte so definieren, dass sie von der Produktionsanlage gefertigt werden könne. Durch die Verifizierung des Berechnungsalgorithmus wurde gezeigt, dass trotz der angenommenen Vereinfachungen der errechnete Zugänglichkeitsraum zur frühzeitigen Produktbeeinflussung genutzt werden kann. Die aufgrund der Vereinfachung entstehenden Fehler sind vernachlässigbar. Die erarbeitete Methode berücksichtigt auch alphanumerische Anforderungen, wie beispielsweise die Taktzeit der standardisierten Produktionsmodule. Nicht nur die Zugänglichkeitsräume können mit dieser Methode ermittelt werden, sondern auch die maximale Anzahl an Fügepunkten, die in der vorgegebenen Taktzeit abgearbeitet werden könne.*

Durch die sehr einfache Darstellung der Anforderungen muss der Produktentwickler nicht alle Einzelheiten über das eingesetzte Fertigungsverfahren oder den dazugehörigen Standard kennen. Durch rote und grüne Flächen wird dem Produktentwickler signalisiert, wo er Verbindungselemente definieren kann und an welchen Stellen es Probleme geben kann. Sollte aus irgendwelchen Gründen ein Verbindungspunkt im nicht zugänglichen Bereich notwendig sein, so muss er sich mit dem Produktionsplaner in Verbindung setzen. Auf diese Weise werden mögliche Probleme sehr früh im Produktentwicklungsprozess erkannt.

**Ergebnis 7.3:** *Die erarbeitete Methode wurde in den Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie verankert. Da sich Unternehmensstandards aufgrund von sich ändernden Kundenwünschen, Gesetzesvorgaben oder Fertigungsverfahren im Laufe der Zeit ändern können, wurden im Rahmen*

*der Arbeit Maßnahmen abgeleitet, um auf Abweichungen vom Standard reagieren zu können. Die erarbeitete Produktionsumgebung dient dabei als Diskussionsgrundlage für den Produktentwickler und Produktionsplaner.*

Lässt sich eine Anforderung der standardisierten Produktion nicht umsetzen, so muss der Konstrukteur mit dem Produktionsplaner nach einer alternativen Lösung suchen. Dies kann eine Anpassung der Produktionsanlage, des Produkts oder des Produktionsstandards sein. Die erarbeitete Methode stellt sicher, dass solche Probleme sehr früh im Produktentstehungsprozess erkannt werden.

## **7.2 Ausblick**

Im Rahmen des Validierungsszenarios wurden die Vorteile der erarbeiteten Methode erfolgreich demonstriert. Damit die Methode flächendeckend in der Praxis eingesetzt werden kann, bedarf es einer standardisierten und modularisierten Produktion. Zwar gibt es in der Automobilindustrie bereits zahlreiche Ansätze zur Standardisierung von Produkten und Produktgruppen, im Bereich der Produktion ist die Standardisierung jedoch noch nicht in allen Bereichen verankert. Eine Standardisierung der Produktionsanlagen ist nicht nur die Grundlage für die erarbeitete Methode, sondern hat auch viele Vorteile für den gesamten Produktionsentwicklungsprozess.

Besonders bei der Wiederverwendung von Produktionsanlagen ist die Qualität der CAD-Daten besonders wichtig für die erfolgreiche Integration von neuen Produkten auf diesen Anlagen. Im Laufe des Anlagenlebenszyklus verändern sich die Anlagen durch Umbauten, Erweiterungen oder Reparaturen. Für den erfolgreichen Einsatz der erarbeiteten Methode müssen alle Anlagenänderungen in den CAD-Modellen nachgepflegt werden. Aufgrund des hohen Zeit- und Kostendrucks wird dies im industriellen Umfeld häufig vernachlässigt. An dieser Stelle bedarf es eines systematischen Änderungsmanagements für alle Umbauten von Produktionsanlagen im gesamten Anlagenlebenszyklus. In der industriellen Praxis werden besonders kleinere Umbauten nicht im CAD-System dokumentiert. Um dennoch eine aussagekräftige Grundlage für die Planung von neuen Produkten zu haben, kann eine Produktionsanlage, beispielsweise mithilfe von Laserscannern, digitalisiert

werden. Hierfür bedarf es einer Methode, die systematisch alle Änderungen an einer Anlage erfasst und in ein EDM-System speichert.

Im Rahmen der Arbeit wurde gezeigt, dass die erarbeitete Methode erfolgreich bei der Konstruktion von Karosseriebauteilen eingesetzt werden kann. Die Berücksichtigung der Werkzeugzugänglichkeit ist aber nicht nur ein Problem des Karosserierohbaus, sondern auch anderer Gewerke, wie beispielsweise des Presswerks, der Lackierung oder der Montage. Gerade bei der Ermittlung von Roboterzugänglichkeitsräumen kann die erarbeitete Methode auch in anderen Gewerken unterstützen. Allerdings kommen in anderen Gewerken der Automobilindustrie viele Produktionstechnologien zum Einsatz, die im Rohbau nicht so häufig eingesetzt werden. Für diese Produktionstechnologien müssen, wie es im Rahmen dieser Arbeit für den Rohbau gemacht worden ist, die Anforderungen identifiziert werden. Als Beispiel kann das in der Montage sehr weit verbreitete Schrauben aufgeführt werden. Ähnlich wie bei Schweißzangen hat die Geometrie des Schraubwerkzeugs einen großen Einfluss auf die Zugänglichkeit der Schraubpunkte. Aber die erarbeitete Methode kann nicht nur in der Automobilindustrie zum Einsatz kommen, sondern auch in anderen Branchen, die eine standardisierte Produktion realisieren wollen. Wichtig ist an dieser Stelle auch hier, dass die Anforderungen an das Produktdesign abgeleitet werden.

## A Anhang

### A.1 Herleitung der Werkzeugpositionierung

#### Positionierung des Werkzeugs

Für die Herleitung der Transformationsmatrizen ist die Ausgangssituation in Bild 4.27 schematisch dargestellt. Der Ortsvektor  $\vec{s}_O$  beschreibt den Ort des zu untersuchenden Punktes im kartesischen Koordinatensystem x, y, z. Der Vektor  $\vec{s}$  steht senkrecht auf der zu untersuchenden Fläche.

$$\vec{s}_O = \begin{pmatrix} s_{O1} \\ s_{O2} \\ s_{O3} \end{pmatrix} \quad (A. 1)$$

$$\vec{s} = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} \quad (A. 2)$$

Der Ortsvektor  $\vec{t}_O$  beschreibt den Ort des zu untersuchenden Werkzeugs im kartesischen Koordinatensystem x, y, z. Der Vektor  $\vec{t}$  beschreibt die Orientierung des Werkzeugs im Raum (vgl. Bild 4.27).

$$\vec{t}_O = \begin{pmatrix} t_{O1} \\ t_{O2} \\ t_{O3} \end{pmatrix} \quad (A. 3)$$

$$\vec{t} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} \quad (A. 4)$$

Um das Werkzeug in Richtung des Vektors  $\vec{s}$  auszurichten, wird eine Drehung benötigt. Für eine Drehung um eine Ursprungsgerade, deren Richtung und Orientierung durch den beliebigen Einheitsvektor  $\vec{n}$  gegeben ist, kann folgende Matrix  $R_{\vec{n}}(\alpha)$  verwendet werden:

$$R_{\vec{n}}(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos\alpha + n_1^2(1 - \cos\alpha) & n_1n_2(1 - \cos\alpha) - n_3\sin\alpha & n_1n_3(1 - \cos\alpha) - n_2\sin\alpha \\ n_2n_1(1 - \cos\alpha) - n_3\sin\alpha & \cos\alpha + n_2^2(1 - \cos\alpha) & n_2n_3(1 - \cos\alpha) - n_1\sin\alpha \\ n_3n_1(1 - \cos\alpha) - n_2\sin\alpha & n_3n_2(1 - \cos\alpha) - n_1\sin\alpha & \cos\alpha + n_3^2(1 - \cos\alpha) \end{pmatrix} \quad (A. 5)$$

Wobei für den Einheitsvektor  $\vec{n}$  gilt:

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix} \quad (A. 6)$$

In dem Anwendungsfall aus Bild 4.27 muss zunächst der Drehvektor  $\vec{d}'$  und der Drehwinkel  $\alpha$  ermittelt werden. Der Drehvektor  $\vec{d}'$  errechnet sich aus dem Kreuzprodukt aus Vektor  $\vec{s}$  und Vektor  $\vec{t}$ :

$$\vec{d}' = \begin{pmatrix} d'_1 \\ d'_2 \\ d'_3 \end{pmatrix} = \vec{s} \times \vec{t} = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_2 t_3 - s_3 t_2 \\ s_3 t_1 - s_1 t_3 \\ s_1 t_2 - s_2 t_1 \end{pmatrix} \quad (A. 7)$$

Bevor die Koordinaten des Drehvektors  $\vec{d}$  in die Matrix  $R_{\vec{n}}(\alpha)$  eingesetzt werden können, muss der Drehvektor  $\vec{d}'$  normiert werden. Für die Berechnung des normierten Drehvektors  $\vec{d}$  gilt:

$$\vec{d} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{|\vec{d}'|} \vec{d}' = \frac{1}{\sqrt{d_1'^2 + d_2'^2 + d_3'^2}} \begin{pmatrix} d'_1 \\ d'_2 \\ d'_3 \end{pmatrix} \quad (A. 8)$$

Der Winkel  $\alpha$  errechnet sich wie folgt:

$$\alpha = \arccos \left( \left| \frac{\vec{s} \circ \vec{t}}{|\vec{s}| \cdot |\vec{t}|} \right| \right) = \arccos \left( \left| \frac{s_1 t_1 + s_2 t_2 + s_3 t_3}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} \cdot \sqrt{t_1^2 + t_2^2 + t_3^2}} \right| \right) \quad (A. 9)$$

Werden der normierte Drehvektor  $\vec{d}$  und Drehwinkel  $\alpha$  in die Matrix  $R_{\vec{n}}(\alpha)$  eingesetzt, so ergibt sich:

$$R_{\vec{d}}(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha + d_1^2 (1 - \cos \alpha) & d_1 d_2 (1 - \cos \alpha) - d_3 \sin \alpha & d_1 d_3 (1 - \cos \alpha) - d_2 \sin \alpha \\ d_2 d_1 (1 - \cos \alpha) - d_3 \sin \alpha & \cos \alpha + d_2^2 (1 - \cos \alpha) & d_2 d_3 (1 - \cos \alpha) - d_1 \sin \alpha \\ d_3 d_1 (1 - \cos \alpha) - d_2 \sin \alpha & d_3 d_2 (1 - \cos \alpha) - d_1 \sin \alpha & \cos \alpha + d_3^2 (1 - \cos \alpha) \end{pmatrix} \quad (A. 10)$$

Durch die Drehung des Werkzeugs um den Drehvektor  $\vec{d}$  wandert der Arbeitspunkt des Werkzeugs an eine neue Position, die durch den Ortsvektor  $\vec{t}'_0$  beschrieben wird (vgl. Bild 4.28):

$$\vec{t}'_O = \begin{pmatrix} t'_{O1} \\ t'_{O2} \\ t'_{O3} \end{pmatrix} = R_{\vec{d}}(\alpha) \cdot \vec{t}_O \quad (A.11)$$

Nachdem das Werkzeug im Raum ausgerichtet wurde, muss im nächsten Schritt das Werkzeug an den zu untersuchenden Punkt (Ortsvektor  $\vec{s}_O$ ) verschoben werden. Der Verschiebungsvektor  $\vec{v}$  ist die Differenz aus den Vektoren  $\vec{s}_O$  und  $\vec{t}'_O$ :

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = \vec{s}_O - \vec{t}'_O = \begin{pmatrix} s_{O1} \\ s_{O2} \\ s_{O3} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} t'_{O1} \\ t'_{O2} \\ t'_{O3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{O1} - t'_{O1} \\ s_{O2} - t'_{O2} \\ s_{O3} - t'_{O3} \end{pmatrix} \quad (A.12)$$

### Rotation um Hilfspunkt

Ist das Werkzeug auf dem Hilfspunkt positioniert und ausgerichtet, so wird im nächsten Schritt das Werkzeug um den normierten Vektor  $\vec{s}$  in  $10^\circ$  Schritten gedreht. Mit Drehwinkel  $\alpha = 10^\circ$  ergibt sich die Drehmatrix  $R_{\vec{s}}(10^\circ)$ :

$$R_{\vec{s}}(10^\circ) = \begin{pmatrix} \cos 10^\circ + s_1^2(1 - \cos 10^\circ) & s_1 s_2(1 - \cos 10^\circ) - s_3 \sin 10^\circ & s_1 s_3(1 - \cos 10^\circ) - s_2 \sin 10^\circ \\ s_2 s_1(1 - \cos 10^\circ) - s_3 \sin 10^\circ & \cos 10^\circ + s_2^2(1 - \cos 10^\circ) & s_2 s_3(1 - \cos 10^\circ) - s_1 \sin 10^\circ \\ s_3 s_1(1 - \cos 10^\circ) - s_2 \sin 10^\circ & s_3 s_2(1 - \cos 10^\circ) - s_1 \sin 10^\circ & \cos 10^\circ + s_3^2(1 - \cos 10^\circ) \end{pmatrix} \quad (A.13)$$

Da sich das Werkzeug schon am zu untersuchenden Ort befunden hat, ist eine zusätzliche Verschiebung nicht notwendig.

### Drehen des Werkzeugs um $180^\circ$

Wird beim Rotieren des Werkzeugs keine kollisionsfreie Position gefunden, so sieht der vorgestellte Berechnungsalgorithmus ein Drehen des Werkzeugs um  $180^\circ$  vor (vgl. Bild 4.29). Für diese Rotation kann wieder der normierte Drehvektor  $\vec{d}$  herangezogen werden. Wird dieser und der Drehwinkel  $\alpha = 180^\circ$  in die Matrix  $R_{\vec{d}}(\alpha)$  eingesetzt, so ergibt sich folgende Drehmatrix:

$$R_{\vec{d}}(180^\circ) = \begin{pmatrix} \cos 180^\circ + d_1^2(1 - \cos 180^\circ) & d_1 d_2(1 - \cos 180^\circ) - d_3 \sin 180^\circ & d_1 d_3(1 - \cos 180^\circ) - d_2 \sin 180^\circ \\ d_2 d_1(1 - \cos 180^\circ) - d_3 \sin 180^\circ & \cos 180^\circ + d_2^2(1 - \cos 180^\circ) & d_2 d_3(1 - \cos 180^\circ) - d_1 \sin 180^\circ \\ d_3 d_1(1 - \cos 180^\circ) - d_2 \sin 180^\circ & d_3 d_2(1 - \cos 180^\circ) - d_1 \sin 180^\circ & \cos 180^\circ + d_3^2(1 - \cos 180^\circ) \end{pmatrix} \quad (A.14)$$

Mit  $\sin 180^\circ = 0$  und  $\cos 180^\circ = -1$  vereinfacht sich die Matrix  $R_{\vec{d}}(180^\circ)$ :

$$R_{\vec{d}}(180^\circ) = \begin{pmatrix} -1 + 2d_1^2 & 2d_1d_2 & 2d_1d_3 \\ 2d_2d_1 & -1 + 2d_2^2 & 2d_2d_3 \\ 2d_3d_1 & 2d_3d_2 & -1 + 2d_3^2 \end{pmatrix} \quad (A. 15)$$

Da sich das Werkzeug schon am zu untersuchenden Ort befunden hat, ist eine zusätzliche Verschiebung nicht notwendig.

## A.2 Aufbau der Eingabedatei

Der Aufbau der Eingabedatei ist in Bild A.2 dargestellt. Die Koordinaten aller Punkte aus der Punktwolke werden in der Datei geschrieben.

```

!
! ASCII generated by Digitized Shape Editor/CATIA
!
! Without Scans
! Point Format      = 'X %f Y %f Z %f'
!
! Total number of points = 3773
!
X 842,975037 Y 27,705647 Z 1482,548096
X 843,575989 Y 27,343000 Z 1482,880127
X 842,311523 Y 24,000004 Z 1481,862305
X 843,142212 Y 25,796654 Z 1482,431885
X 842,977417 Y 24,000000 Z 1482,261597
X 852,764221 Y 23,999996 Z 1492,666016
...

```



X Koordinaten      Y Koordinaten      Z Koordinaten

Bild A.2 Aufbau der Eingabedatei

## A.3 Aufbau der Ergebnisdatei

Um die Ergebnisse der Zugänglichkeitsuntersuchungen zu dokumentieren, wird die Eingabedatei erweitert. Hinter die Koordinaten der einzelnen Punkte werden die Ergebnisse der einzelnen Zugänglichkeitsuntersuchungen geschrieben. Abhängig von der Anzahl der Roboter und der dazugehörigen Schweißzangen kann die Anzahl der Ergebnisse variieren. Roboter-Werkzeug-Kombinationen, die zugänglich sind, werden mit einem „G“ markiert.

Nicht zugängliche Kombinationen werden mit einem „R“ gekennzeichnet. Der Aufbau der Ergebnisdatei ist in Bild A.3 schematisch dargestellt.

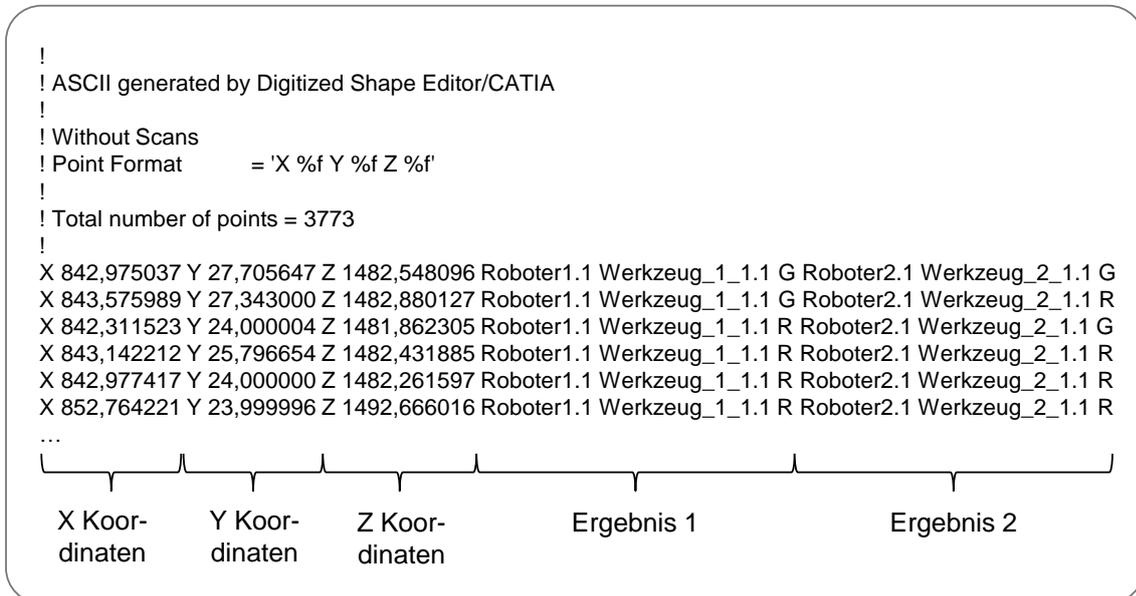


Bild A.3: Aufbau der Ergebnisdatei

#### A.4 Umrechnung in Roll-Pitch-Yaw-Winkeln

Die in DELMIA V5 verwendeten Tags entsprechen einem Achsenkreuz, deren Z-Achse der Rotationsachse des zu prüfenden Werkzeugs entspricht. Der Ursprung des Tags muss auf dem zu untersuchenden Punkt platziert werden wobei die Z-Achse  $\vec{z}$  in Richtung der Flächennormalen  $\vec{s}$  zeigt (vgl. Bild 4.27):

$$\vec{s} = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} \quad (A.16)$$

$$\vec{z} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (A.17)$$

Für die Transformation wird erneut mit der Drehmatrix  $R_{\vec{d}}(\alpha)$ . Der normierte Drehvektor  $\vec{d}$  errechnet sich analog zu der Formel (A.8) und der Winkel  $\alpha$  nach der Formel (A.9):

$$R_{\vec{a}}(\alpha) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{11} & r_{11} \\ r_{11} & r_{11} & r_{11} \\ r_{11} & r_{11} & r_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha + d_1^2(1 - \cos\alpha) & d_1 d_2(1 - \cos\alpha) - d_3 \sin\alpha & d_1 d_3(1 - \cos\alpha) - d_2 \sin\alpha \\ d_2 d_1(1 - \cos\alpha) - d_3 \sin\alpha & \cos\alpha + d_2^2(1 - \cos\alpha) & d_2 d_3(1 - \cos\alpha) - d_1 \sin\alpha \\ d_3 d_1(1 - \cos\alpha) - d_2 \sin\alpha & d_3 d_2(1 - \cos\alpha) - d_1 \sin\alpha & \cos\alpha + d_3^2(1 - \cos\alpha) \end{pmatrix} \quad (A. 18)$$

Nach der in DELMIA V5 verwendeten Konvention errechnen sich die Winkel Yan  $\Psi$ , Pich  $\Theta$  und Roll  $\Phi$  wie folgt:

$$\Psi = \operatorname{atan}(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}) \quad (A. 19)$$

Gilt  $\Psi = \operatorname{atan}(1)$  oder  $\Psi = -\operatorname{atan}(1)$ , so errechnen sich die beiden anderen Winkel wie folgt:

$$\Theta = \operatorname{atan}\left(\frac{r_{21}}{\cos(\Psi)}, \frac{r_{11}}{\cos(\Psi)}\right) \quad (A. 20)$$

$$\Phi = \operatorname{atan}\left(\frac{r_{32}}{\cos(\Psi)}, \frac{r_{33}}{\cos(\Psi)}\right) \quad (A. 21)$$



## **B Abkürzungsverzeichnis**

|        |  |
|--------|--|
| 2REUSE | Methodik zur produktionsorientierten Produktanalyse für die Wiederverwendung von Produktionssystemen |
| BNZ    | Betriebsnutzungszeit   |
| CAD    | Computer Aided Design  |
| CAE    | Computer Aided Engineering   |
| CE     | Concurrent Engineering   |
| DfM    | Design for Manufacturing   |
| DfX    | Design for X   |
| DIN    | Deutsches Institut für Normung   |
| DMU    | Digital Mock-Up  |
| DPT    | Digitaler Prototyp   |
| EDM    | Engineering Data Management  |
| ERP    | Enterprise Resource Planning   |
| FEM    | Finite Elemente Methode  |
| FI     | Funktionale Integrationsschnittstelle  |
| GI     | Geometrische Integrationsschnittstelle   |
| GU     | Generalunternehmer   |
| GUI    | Graphical User Interface   |
| ISO    | International Organization for Standardization   |
| KTL    | Kathodisches Tauchlackieren  |
| MyCar  | EU-Förderprojekt: Flexible assembly Processes for the Car of the 3 <sup>rd</sup> Millennium          |
| OEM    | Original Equipment Manufacturer  |

|     |   |
|-----|---|
| OLP | Offline programming                             |
| PDM | Product Data Management                         |
| PLM | Product Lifecycle Management                    |
| PTI | Produktionstechnische Integrationsschnittstelle |
| St. | Station   |
| TCP | Tool Center Point                               |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure                     |
| XML | Extensible Markup Language                      |
| ZB  | Zusammenbau                                     |

## **C Abbildungsverzeichnis**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Bild 1.1: Gliederung der Arbeit .....</b>   | <b>7</b>  |
| <b>Bild 2.1: Produktlebenszyklus in Anlehnung an [Naef-12] und [VDI-2221].....</b>                             | <b>10</b> |
| <b>Bild 2.2: Unterschiedliche Produktentwicklungsprozesse in Anlehnung an [Broc-10] und [Gess-01] .....</b>    | <b>11</b> |
| <b>Bild 2.3: Vorgehensmodell des Konstruktionsprozesses nach [VDI-2221] .....</b>                              | <b>12</b> |
| <b>Bild 2.4: Absicherung und Änderungsprozess nach [Meiß-10].....</b>  | <b>14</b> |
| <b>Bild 2.5: Produktentwicklungsprozess in der Automobilindustrie in Anlehnung an [Burr-08].....</b>           | <b>18</b> |
| <b>Bild 2.6: Übersicht Produktionsplanung in der Automobilindustrie .....</b>                                  | <b>24</b> |
| <b>Bild 2.7.: Produktentstehungsprozess.....</b>   | <b>32</b> |
| <b>Bild 2.8: Übersicht Fahrzeugfertigung .....</b>   | <b>35</b> |
| <b>Bild 2.9: Zusammenbaustufen im Karosserierohbau in Anlehnung an [Broc-10].....</b>                          | <b>36</b> |
| <b>Bild 3.1: Eigenschaften von modularen Produkten nach [KrEi-11].....</b>                                     | <b>43</b> |
| <b>Bild 3.2: Integrierter Ansatz des Variantenmanagements nach [JoKr-10] .....</b>                             | <b>44</b> |
| <b>Bild 3.3: Multidirektionale Ableitung von Plattformkonzepten .....</b>                                      | <b>47</b> |
| <b>Bild 3.4: Modularisierte Fahrzeugkarosserie .....</b>   | <b>48</b> |
| <b>Bild 3.5: Schnittstellenklassifikation innerhalb der Modul-Hierarchie [Brei-05].....</b>                    | <b>54</b> |
| <b>Bild 3.6: Schematische Darstellung eines Fabrikmoduls „Klebezelle“ in Anlehnung an [Brei-05].....</b>       | <b>54</b> |
| <b>Bild 3.7: Wandlungsbefähiger im Kontext einer modularen Fabrik in Anlehnung an [Nofe-06][Hern-03] .....</b> | <b>55</b> |
| <b>Bild 3.8: Fokus der Digitalen Fabrik im Strahlennetz der Unternehmensprozesse [VDI-4499].....</b>           | <b>60</b> |
| <b>Bild 3.9: Klassifikation digitaler Modelle in der Digitalen Fabrik nach [Kühn-06] .....</b>                 | <b>64</b> |
| <b>Bild 3.10: Einsatzgebiete der Digitalen Fabrik in der Rohbauplanung [VDI-4499].....</b>                     | <b>65</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Bild 3.11: Absicherung der Zugänglichkeit eines Schweißpunkts</b> .....  | <b>66</b>  |
| <b>Bild 3.12: Prozessablauf beim Design for Retooling nach [Burr-08]</b> .....  | <b>70</b>  |
| <b>Bild 3.13: Methodik zur produktionsorientierten Produktanalyse für die Wiederverwendung von Produktionssystemen nach [Stan-12]</b> ..... | <b>72</b>  |
| <b>Bild 3.14: Rechnergestützte Methoden im Pro<sup>2</sup>Kar im Produktentwicklungsprozess nach [Broc-10]</b> .....                        | <b>74</b>  |
| <b>Bild 3.15: Quellen für das erweiterte Startmodell nach [Broc-10]</b> .....   | <b>74</b>  |
| <br>  |            |
| <b>Bild 4.1: Anforderungen Fügefølge</b> .....  | <b>86</b>  |
| <b>Bild 4.2: Anforderungen Industrieroboter</b> .....   | <b>87</b>  |
| <b>Bild 4.3: Raumaufteilung eines Industrieroboters mit Werkzeug und Handhabungsobjekt nach [VDI-2861]</b> .....                            | <b>88</b>  |
| <b>Bild 4.4: Mengendarstellung der Raumaufteilung von Industrierobotern [VDI-2861]</b> 89   |            |
| <b>Bild 4.5: Anforderung Schweißen</b> .....  | <b>90</b>  |
| <b>Bild 4.6: Anforderungen Durchsetzfügen</b> .....   | <b>91</b>  |
| <b>Bild 4.7: Anforderungen Stanznieten</b> .....  | <b>92</b>  |
| <b>Bild 4.8: Anforderungen Kleben</b> .....   | <b>93</b>  |
| <b>Bild 4.9: Anforderungen Falzen</b> .....   | <b>94</b>  |
| <b>Bild 4.10: Beispiele für typungebundene und typgebundene Produktionsmittel</b> .....   | <b>95</b>  |
| <b>Bild 4.11: Anforderungen typgebundene Produktionsmittel</b> .....  | <b>96</b>  |
| <b>Bild 4.12: Anforderungen typungebundene Produktionsmittel</b> .....  | <b>96</b>  |
| <b>Bild 4.13: Anforderungen Layout</b> .....  | <b>97</b>  |
| <b>Bild 4.14: Anforderungen Taktzeit</b> .....  | <b>98</b>  |
| <b>Bild 4.15: Einfluss der Anforderungen auf die Produktentwicklung</b> .....   | <b>99</b>  |
| <b>Bild 4.16: Frühzeitige Produktbeeinflussung</b> .....  | <b>100</b> |
| <b>Bild 4.17: Gesamtüberblick der Methode</b> .....   | <b>101</b> |
| <b>Bild 4.18: Festlegung der Produktionsstrategie</b> .....   | <b>102</b> |
| <b>Bild 4.19: Produktionsstrategien</b> .....   | <b>103</b> |
| <b>Bild 4.20: Vorkonfiguration der Produktionsanlage</b> .....  | <b>106</b> |
| <b>Bild 4.21: Neue Produktionsstruktur</b> .....  | <b>107</b> |
| <b>Bild 4.22: Wiederverwendung einer Anlage</b> .....   | <b>108</b> |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>Bild 4.23: Analyse der Produktionsanlage .....</b>   | <b>109</b> |
| <b>Bild 4.24: Typungebundene Betriebsmittel.....</b>  | <b>111</b> |
| <b>Bild 4.25: Restriktionen und Möglichkeiten einer Produktionsanlage .....</b>                             | <b>113</b> |
| <b>Bild 4.26: Die einzelnen Schritte des Berechnungsalgorithmus .....</b>                                   | <b>114</b> |
| <b>Bild 4.27: Positionierung des Werkzeugs .....</b>  | <b>115</b> |
| <b>Bild 4.28: Verschiebung des Werkzeugs.....</b>   | <b>116</b> |
| <b>Bild 4.29: Drehen von Roboterwerkzeugen .....</b>  | <b>117</b> |
| <b>Bild 4.30: Prüfung der Erreichbarkeit eines Roboters .....</b>   | <b>118</b> |
| <b>Bild 4.31: Gestaltung des Produkts.....</b>  | <b>120</b> |
| <b>Bild 4.32: Struktur der Produktionsumgebung.....</b>   | <b>121</b> |
| <b>Bild 4.33: Absicherung der Produktionsanforderungen.....</b>   | <b>122</b> |
| <b>Bild 4.34: Absicherungsvorgang .....</b>   | <b>123</b> |
| <b>Bild 4.35: Anpassung der Produktionsanlage.....</b>  | <b>124</b> |
| <b>Bild 4.36: Eingliederung der Methode in den gesamten Produktentstehungsprozess</b>                       | <b>127</b> |
| <b>Bild 4.37: Datenverwaltung bei der vorgestellten Methode .....</b>                                       | <b>130</b> |
| <br>  |            |
| <b>Bild 5.1: Aufbau der CAD Struktur .....</b>  | <b>134</b> |
| <b>Bild 5.2: Benutzeroberfläche und Ablauf des Berechnungsskripts .....</b>                                 | <b>137</b> |
| <br>  |            |
| <b>Bild 6.1: Aufbau Fahrzeugtür .....</b>   | <b>143</b> |
| <b>Bild 6.2: Produktionsmodul.....</b>  | <b>144</b> |
| <b>Bild 6.3: Vereinfachung des digitalen Modells .....</b>  | <b>145</b> |
| <b>Bild 6.4: Verifizierungsergebnis.....</b>  | <b>146</b> |
| <b>Bild 6.5: Detaillierte Untersuchung .....</b>  | <b>147</b> |
| <b>Bild 6.6: Simulationsmodell.....</b>   | <b>148</b> |
| <b>Bild 6.7: Nicht berücksichtigte Kollisionen zwischen Roboter und Umgebung .....</b>                      | <b>150</b> |
| <b>Bild 6.8: Standardisierter Aufbau der Motorhaube.....</b>  | <b>151</b> |
| <b>Bild 6.9: Schematisches Layout der Motorhaubenfertigung.....</b>   | <b>152</b> |
| <b>Bild 6.10: Prognostizierte Absatzzahlen der einzelnen Modelle für das<br/>Validierungsszenario .....</b> | <b>154</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Bild 6.11: Aufbau des Produktionsmoduls.....</b>                       | <b>156</b> |
| <b>Bild 6.12: Die Spann- und Fixiervorrichtung .....</b>                  | <b>157</b> |
| <b>Bild 6.13: Aufbau der Produktionsumgebung.....</b>                     | <b>158</b> |
| <b>Bild 6.14: Meilensteinübersicht für die Validierung .....</b>          | <b>159</b> |
| <b>Bild 6.15: Vergleich der Bauteilgeometrie .....</b>                    | <b>160</b> |
| <b>Bild 6.16: Produkt zum Meilenstein DPT1 .....</b>                      | <b>161</b> |
| <b>Bild 6.17: Zugänglichkeitsanalyse zum Meilenstein DPT1 .....</b>       | <b>162</b> |
| <b>Bild 6.18: Zugänglichkeit der Motorhaube zum Meilenstein DPT1.....</b> | <b>162</b> |
| <b>Bild 6.19: Zugänglichkeit DPT2.....</b>                                | <b>163</b> |
| <b>Bild 6.20: Absicherungsmodell der Anlage .....</b>                     | <b>164</b> |

## **D Tabellenverzeichnis**

|  |            |
|--|------------|
| <b>Tabelle 2.1: Planungsfälle nach [VDI-4499][Bran-96].....</b>  | <b>16</b>  |
| <b>Tabelle 3.1: Definition von Modularisierung nach [Tesc-10] und [Nill-01] .....</b>                            | <b>43</b>  |
| <b>Tabelle 3.2: Potenziale und Gefahren von modularen Produkten in Anlehnung an [Corn-02] und [Göpf-98].....</b> | <b>46</b>  |
| <b>Tabelle 3.3: Gestaltungsbereiche und Elemente einer Fabrik [NoKL-05].....</b>                                 | <b>52</b>  |
| <b>Tabelle 3.4: Bewertung der Ansätze und Methoden aus der Wissenschaft und Industrie .....</b>                  | <b>79</b>  |
| <b>Tabelle 4.1: Zusammenfassung der drei Szenarien.....</b>  | <b>106</b> |
| <b>Tabelle 4.2: Vorgehen bei typgebundenen Betriebsmitteln.....</b>  | <b>110</b> |
| <b>Tabelle 4.3: Prozesszeiten im Karosserierohbau .....</b>  | <b>112</b> |
| <b>Tabelle 4.4: Übersicht Prozesszeiten.....</b>   | <b>119</b> |
| <b>Tabelle 4.5: Zusammenfassung der Anpassungsmöglichkeiten .....</b>  | <b>126</b> |
| <b>Tabelle 6.1: Ergebnisse der Produktionsumgebung.....</b>  | <b>146</b> |
| <b>Tabelle 6.2: Ergebnisse der konventionellen Absicherung.....</b>  | <b>148</b> |
| <b>Tabelle 6.3: Zusammenfassung der Abweichungen .....</b>   | <b>149</b> |

## E Literaturverzeichnis

- [Abul-08] Abulawi, J.: Automatisierungsansätze in der Vorrichtungskonstruktion. In: Tecklenburg, G. (Hrsg.): Die digitale Produktentwicklung – Parametrisch assoziative Entwicklung von Baugruppen der Fahrzeugkarosserie: Visionen und Erfahrungen für zukünftige Entwicklungsprozesse. Expert Verlag, Essen, 2008
- [AnHe-87] Andreasen, M. M.; Hein, L.: Integrated Product Development, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1987
- [Anse-97] Anselm, D.: Die Pkw-Karosserie – Konstruktion, Deformationsverhalten, Unfallinstandsetzung. Vogel Verlag, Würzburg, 1997
- [Arno-97] Arnold, U.: Modular Sourcing. In: Bloech, J.; Jhide, G. (Hrsg.): Vahlens Großes Logistikleikon, Verlag Franz Vahlen, München, 1997
- [Baum-10] Baumann, T.: Produktentstehungsprozesse. In: Gusig, L.-O.; Kruse, A.: Fahrzeugentwicklung im Automobilbau – Aktuelle Werkzeuge für den Praxiseinsatz. Carl Hanser Verlag, München, 2010
- [Beer-08] Beer, S.: Verbesserung der Anlaufperformance durch den Einsatz von Frontloading-Maßnahmen. In: Schuh, G.; Stölzle, W.; Straube, F. (Hrsg.): Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen – Ein Leitfaden für die Praxis. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008
- [BiBK-08] Binder, T.; Bock, T.; Kriegel, T.: Einsatz virtueller Techniken in der Produktentwicklung. In: Seiffert, U.; Rainer, G. (Hrsg.): Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz – Prozesse, Komponenten,

- Beispiele aus der Praxis. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008
- [BKWM-05] Brecher C.; Klocke, F.; Weck, M.; Wegner, H.: Bewertung von Fertigungsfolgen. In: Eversheim, W.; Schuh, G.: Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005
- [BIJK-10] Blee, C.; Jonas, H.; Krause, D.: Perspective-Based Development of Modular Product Architectures. In: Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design (ICED), S. 4-95-4-106, Stanford, USA, 2009
- [Bran-96] Brankamp, K.: Zielplanung. In: Eversheim W.; Schuh, G.: Betriebshütte – Produktion und Management. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1996
- [Braß-09] Braß, E.: Konstruieren mit CATIA V5 – Methodik der parametrisch-assoziativen Flächenkonstruktion. Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [BrBi-03] Bracht, U.; Bierwerth, T.: Virtuelle Logistikplanung – Methoden und Modelle zur Abbildung und Bewertung logistischer Prozesse im Rahmen der Digitalen Fabrik. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 98, S. 219-223, Carl Hanser Verlag, München, 2003
- [Brei-05] Breitenbach, F.: Schnittstellensystematik von Fabrikmodulen. In: Wiendahl, H.-P.; Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Breitenbach F.: Planung modularer Fabriken – Vorgehen und Beispiele aus der Praxis, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2005
- [BrGW-11] Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: Digitale Fabrik – Methoden und Praxisbeispiele. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011

- [BrLM-08] Brockmeyer, H.; Lucko, A.; Mantwill, F.: Erweiterte Startmodelle zur Produktbeeinflussung der Karosserie aus Sicht der Produktionsplanung. In: Brökel, K.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Rieg, F.; Stelzer, R. (Hrsg.): 6. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2008. Shaker Verlag, Aachen, 2008
- [Broc-10] Brockmeyer, H.: Rechnergestützte Methoden zur frühzeitigen Produktbeeinflussung und Produktabsicherung im Karosseriebau. Dissertation, Helmut Schmidt Universität, Shaker Verlag, Aachen, 2010
- [BrSe-13] Braess H.-H.; Seifert, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2013
- [BrSp-09] Bracht, U.; Spillner, A.: Die Digitale Fabrik ist Realität-Ergebnisse einer Umfrage zum Umsetzungsstand und zu weiteren Entwicklungen der digitalen Fabrikplanung bei deutschen OEM. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 104, S. 648-653, Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [Burr-08] Burr, H.: Informationsmanagement an der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Produktionsplanung im Karosserierohbau. Dissertation, Universität des Saarlandes, Schriftenreihe Produktionstechnik, Saarbrücken, 2008
- [BuVW-06] Burr, H.; Vielhaber, M.; Weber, C.: Information Management for the Digital Factory – Bridging the Gap Between Engineering Design and Digital Planning. In: Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Design Conference, S.463-470, Dubrovnik, Croatia, 2006
- [Corn-02] Cornet, A.: Plattformkonzepte in der Automobilentwicklung. Dissertation, Otto-Beisheim Hochschule, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 2002

- [Dang-01] Dangelmaier, W.: Dertigungsplanung – Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung; Grundlagen, Algorithmen und Beispiele. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2001
- [Denc-95] Dencker, B.: Durch kontinuierliche Verbesserung vom Teile- zum Modullieferanten. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 90, Carl Hanser Verlag, München, 1995
- [Dilt-06] Dilthey, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1 – Schweiß- und Schneidetechnologien. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [DoTB-01] Dombrowski, U.; Tiedemann, H.; Bothe, T.: Visionen für die Digitale Fabrik. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 96, S. 96-100, Carl Hanser Verlag, München, 1995
- [EhMe-13] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2013
- [Ehrl-07] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung – Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion. Carl Hanser Verlag, München, 2007
- [EKLM-14] Ehrlenspiel, W.; Kiewert, A.; Lindemann, U.; Mörtl, M.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren – Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014
- [FaST-14] Fahrenwaldt, H.; Schuler, V.; Twrdek, J.: Praxiswissen Schweißtechnik – Werkstoffe, Prozesse, Fertigung. Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2014
- [Ford-35] Ford, H.: Mein Leben und Werk. Paul List Verlag, Leipzig, 1935

- [Frei-06] Freibichler, W.: Competitive Manufacturing Intelligence. Dissertation, Universität Hohenheim, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2006
- [Gaus-00] Gausemeier, J.: Herausforderung integrativer Maschinenbau. In: Gausemeier, J.; Lückel, J.: Entwicklungsumgebungen Mechatronik – Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme. Bonifatius, Paderborn, 2000
- [Gess-01] Gessner, K.: Package-Features für die Kommunikation in den frühen Phasen der Automobilentwicklung. Dissertation, Technische Universität Berlin, Druckhaus Berlin-Mitte, Berlin, 2001
- [Göpf-98] Göpfert, J.: Modulare Produktentwicklung: Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation. Dissertation, Universität München, Deutscher Universitätsverlag, Gabler, Wiesbaden, 1998
- [Gras-02] Grasse, J.: Beitrag zur Gestaltung eines Qualitätsmethodenverbundes in der Karosserieentwicklung und -planung. Dissertation, TU Berlin, 2002
- [GrNo-06] Graber, J.; Nothaft, R.: Konstruieren von Pkw-Karosserien – Grundlagen, Elemente und Baugruppen, Vorschriftenübersicht, Beispiele mit CATIA V4 und V5. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [Grun-15] Grundig, C.-G.: Fabrikplanung – Planungssystematik – Methoden – Anwendungen. Carl Hanser Verlag, München, 2015
- [Güli-08] Gülich, S.: Das Technikmodell in der Prozesskette einer modernen Karosserieauslegung. In: Tagungsband 14. Internationaler Kongress und Fachausstellung Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Baden-Baden, 2008

- [Hans-09] Hansen, J.: Kochbuch CATIA V5 automatisieren – Vom Powercopy bis zur C#-Programmierung. Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [Hasl-05] Haslauer, R.: CATIA V5 – Konstruktionsprozesse in der Praxis. Carl Hanser Verlag, München, 2005
- [Heft-01] Heftrich, F.: Moderne F&E-Zusammenarbeit in der Automobilindustrie – Organisation und Instrumente. Dissertation, Universität-Gesamthochschule Siegen, 2001
- [Hern-03] Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Dissertation, Universität Hannover, Fortschritts-Berichte Reihe 16 Nr. 149, VDI Verlag, Düsseldorf, 2003
- [HoMe-14] Hoenow, G.; Meißner, T.: Konstruktionspraxis im Maschinenbau – Vom Einzelteil zum Maschinendesign. Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [Hone-91] Honeck, H.-M.: Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Schnelldruck Ernst Grässer, Karlsruhe, 1991
- [HüGr-09] Hügel, H.; Graf, T.: Laser in der Fertigung – Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
- [Jesc-97] Jeschke, K.: Beitrag zur wirtschaftlichen Bewertung von Standardisierungsmaßnahmen in der Einzel- und Kleinserienfertigung durch die Konstruktion. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Institut für Konstruktionslehre (Hrsg.), Braunschweig, 1997
- [JoKr-10] Jonas, H.; Krause, D.: Produktfamilienentwicklung im Rahmen des Variantenmanagements. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 21. DfX-Symposium, TuTech Verlag, Hamburg, 2010

- [KiBK-10] Kipp, T.; Bles, C.; Krause, D.: Anwendungen einer integrierten Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 21. DfX-Symposium, TuTech Verlag, Hamburg, 2010
- [Kief-07] Kiefer, J.: Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau. Dissertation, Universität des Saarlandes, Schriftenreihe Produktionstechnik, Saarbrücken, 2007
- [Klee-98] Kleedörfer, R.: Prozeß- und Änderungsmanagement der Integrierten Produktentwicklung. Dissertation, Technische Universität München, Shaker Verlag, München, 1998
- [Klep-04] Klepsch, B.: Komplementäre Produkt- und Fabrikmodularisierung am Beispiel der Automobilindustrie. Dissertation, Universität Hannover, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004
- [Koll-98] Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau – Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998
- [Krau-01] Krause, F.-L.: Digitale Fabrik. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 96, S.84; Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [KrEi-11] Krause, D.; Eilmus, S.: Methodical Support for the Development of Modular Product Families. In: Birkhofer, H.: The Future of Design Methodology, Springer-Verlag, London, 2011
- [Krok-06] Kroker, J.: Schnittstellensystematik für modulare Fahrzeugkarosserien. Dissertation, TU Braunschweig, Logos Verlag, Berlin, 2006

- [Kühn-06] Kühn, W.: Digitale Fabrik – Fabriksimulation für Produktionsplaner, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2006
- [Lamp-07] Lampl, L.: Operatives Performance-Management in der Automobilindustrie. Dissertation, Universität St. Gallen, Difo-Druck, Bamberg 2007
- [Lets-12] Letsch, H.: Schweißen mit Strahlen. In: Matthes, K.-J.; Schneider, W. (Hrsg.): Schweißtechnik – Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [MaLB-06] Mantwill, F.; Lucko, A.; Brockmeyer, H.: Conception and Implementation of a Knowledge-Based Software for Feasibility Checks of Spot Welds within a CAD System. In: Proceedings of Virtual Concepts, Playa Del Carmen, Mexico, 2006
- [MaMe-09] Matyszok, C.; Meyer, D.: Erfolgsfaktoren bei der strategischen Einführung der Digitalen Fabrik. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 104, S. 27, Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [Maya-93] Mayas, L.: Wettbewerbsfähigkeit durch Modularisierung. In: VDI-Z integrierte Produktion, Band 135, Nr. 3, S.64-66, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1993
- [Mban-08] Mbang, S. A.: Durchgängige Integration von Produktmodellierung, Prozessplanung und Produktion am Beispiel Karosserie. In: Tagungsband 1. Fachkonferenz CAD-Produktion „top secret“, München, 2008
- [Meer-94] Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung im Spannungsfeld von Kosten-, Zeit- und Qualitätsmanagement. In: Wettbewerbsvorteile durch Integrierte Produktentwicklung, VDI-bericht 1136, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994

- [Meic-07] Meichsner, T.: Migrationskonzept für einen modell- und variantenflexiblen Automobilkarosseriebau. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, PZH Produktionstechnisches Zentrum, Garbsen, 2007
- [Meiß-10] Meißner, R.: Digitale Absicherung der Montageauglichkeit – Ein Beitrag zur Integration von Produktentwicklung und Montageplanung. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Integrierte Produktentwicklung Band 15, Magdeburg, 2010
- [Milb-00] Milberg, J.: Unternehmenspolitik im Wandel. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Münchener Kolloquium, ... nur der Wandel bleibt – Wege jenseits der Flexibilität, S. 311-331, Herbert Utz Verlag, München, 2000
- [Naef-12] Naefe, P.: Einführung in das Methodische Konstruieren – Für Studium und Praxis. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2012
- [Nill-01] Nilles, V.: Effiziente Gestaltung von Produktordnungssystemen - Eine theoretische und empirische Untersuchung. Dissertation, Technische Universität München, TCW Transfer-Centrum, München, 2001
- [Nofe-06] Nofen, D.: Regelkreisbasierte Wandlungsprozesse der modularen Fabrik. Dissertation, Universität Hannover, PZH Produktionstechnisches Zentrum, Garbsen, 2006
- [NoKL-05] Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Löllmann, F.: Komponenten und Aufbau einer wandlungsfähigen modularen Fabrik. In: Wiendahl, H.-P.; Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Breitenbach, F.: Planung modularer Fabriken – Vorgehen und Beispiele aus der Praxis, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2005

- [Ovtc-97] Ovtcharova, J.: A Framework for Feature-Based Product Design – Fundamental Principles, System concepts, Applications. Dissertation, Universität Darmstadt, VDI Verlag, Düsseldorf, 1997
- [Pawe-14] Pawellek, G.: Ganzheitliche Fabrikplanung - Grundlagen, Vorgehensweisen, EDV-Unterstützung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014
- [PBFG-07] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007
- [Pens-04] Pensky, D. H.: Parallele und verteilte Simulation industrieller Produktionsprozesse. Dissertation, Universität Dortmund, VDI Verlag, Düsseldorf, 2004
- [PiWa-99] Piller, F.; Waringer, D.: Modularisierung in der Automobilindustrie – Neue Formen und Prinzipien. Shaker Verlag, Aachen, 1999
- [Pref-14] Prefi, T.: Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung. In: Pfeifer, T.; Schmitt, R. (Hrsg.): Masing Handbuch Qualitätsmanagement. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2014
- [Reic-10] Reichhuber, A.: Strategie und Struktur in der Automobilindustrie – Strategische und organisatorische Programme zur Handhabung automobilwirtschaftlicher Herausforderungen. Dissertation, Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt, Gabler, Wiesbaden, 2010
- [Sale-99] Salein, M.: Methodik zum situationsspezifischen Planen marktgerechter technischer Produkte. Dissertation, Technische Universität Berlin, VDI Verlag, Düsseldorf, 1999
- [Salv-07] Salvador, F.: Toward a Product System Modularity Construct: Literature Review and Reconceptualization. In:

- IEEE Transactions on Engineering Management, Volume 54:219-240, 2007
- [SAPW-09] Stanev, S.; Awad, R.; Prieur, M.; Walla, W.; Pölzl, S., Ovtcharova, J.: Production-oriented Product Validation Method as Support for the Reuse of Production Lines in the Automotive Industry. In: 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009). München, 2009
- [Saue-05] Sauer, O.: Trends bei Manufacturing Execution Systemen (MES) am Beispiel der Automobilindustrie. PPS Management 10 (2005) 3, S. 21-24, Gito Verlag, 2005
- [Scha-07] Schack, R. J.: Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik. Dissertation, Technische Universität München, Herbert Utz Verlag, München, 2007
- [ScWi-04] Scheck, M.; Wirth, S.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb – Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2004
- [SKSR-02] G. Schuh, F. Klocke, A. M. Straube, S. Ripp, J. Hollreiser: Integration als Grundlage der digitalen Fabrikplanung. In: VDI-Z integrierte Produktion, Band 144, Nr. 11/12, S. 48-51, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2002
- [SpKr-97] Spur, G.; Krause, F.-L.: Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1997
- [Stan-12] Stanev, S.: Methodik zur produktionsorientierten Produktanalyse für die Wiederverwendung von Produktionssystemen – 2REUSE – Konzept, Informationsmodell und Validierung am besonderen Beispiel des Karosserie-rohbaus in der Automobilindustrie. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2012

- [StWO-09] Stanev, S.; Walla, W.; Ovtcharova, J.: Formal Method for Validaiton of Product Design through Knowledge Modelling. In: International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development (KEOD 2009), Madeira, Portugal, 2009
- [SWAB-10] Stanev, S.; Walla, W.; Awad, R.; Bittel, V.; Ovtcharova, J.: Lifecycle oriented Information Model to Support the Produktion Driven Productvalidation. In: Huang, G.; Mak, K.L.; Maropoulos, P.: Proceedings of the 6<sup>th</sup> CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010
- [Tami-05] Taminé, O.: Entwurf einer interdisziplinären Konstruktionsmethodik zur Wiederverwendung von Roboterkomponenten. Dissertation, Universität Karlsruhe, Logos Verlag, Berlin, 2005
- [TePF-08] Teske, L.; Perez-Freije, J. L.: Simulationsbasierte Fahrzeugentwicklung am Beispiel des neuen Opel Corsa. In: Tagungsband Karosseriebautage Hamburg 2008, Vieweg Technology Forum, 2008
- [Tesc-10] Tesch, L.: Bewertung der Strukturvariabilität von Pkw-Karosseriederivaten, Dissertation, Technische Universität München, Verlag Dr. Hut, München, 2010
- [VaBu-14] Vajna, S.; Burchardt, C.: Modelle und Vorgehensweisen der Integrierten Produktentwicklung. In: Vajna, S.: Integrated Design Engineering – Eine interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014
- [Viel-05] Vielhaber, M.: Assembly Oriented Design – Zusammenbauorientiertes Konstruieren im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie am besonderen Beispiel des

- Karosserierohbaus. Dissertation, Universität des Saarlandes, Schriftenreihe Produktionstechnik, Saarbrücken, 2005
- [VWBZ-09] Vajna, S.; Weber, C.; Bley, H.; Zeman, K.: CAx für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009
- [WaBO-11] Walla, W.; Bär, T.; Ovtcharova, J.: Impact of modularised Production on Product Design in automotive Industry. In: Culley, S.J.; Hicks, B.J.; McAloone, T.C.; Howard, T.J.; Malmqvist, J.(Hrsg.): Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11), Impacting Society through Engineering Design, Vol. 5: Design for X / Design to X, Copenhagen, 2011
- [WaKi-11] Walla, W.; Kiefer, J.: Life Cycle Engineering – Integration of New Products on Existing Production Systems in Automotive Industry. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Proceedings of the 18<sup>th</sup> CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011
- [Wall-10] Walla, W.: Design for Reuse of Production Equipment; In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 21. DfX-Symposium, Tu-Tech Verlag, Hamburg, 2010
- [Webe-09] Weber, J.: Automotive Development Processes – Processes for Successful Customer Oriented Vehicle Development. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009
- [WeBK-03] Westkämper, E.; Bierschenk, S.; Kuhlmann, T.: Digitale Fabrik – nur was für die Großen? In: wt Werkstattstechnik Jahrgang 93, H. 1/2, S.22-26, Springer-VDI-Verlag, 2003
- [Wemh-05] Wemhöner, N.: Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau. Dissertation,

- Technische Hochschule Aachen, Shaker Verlag, Aachen, 2005
- [West-06] Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [WiHH-02] Wiendahl, H.-P.; Harms, T.; Heger, C.: Kontextsensitiver Einsatz von Virtual Reality im Rahmen der Digitalen Fabrik. In: Gausemeier, J.; Grafe, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 1. Paderborner Workshop Augmented Reality und Virtual Reality in der Produktentwicklung, HNI-Verlagsschriftreihe, Bd. 107, Paderborn, 2002
- [Wils-96] Wilson, R.: A Framework for Geometric Reasoning About Tools in Assembly. In: Proceedings 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation - Volume 4, S1837-1844, 1996
- [Zafi-14] Zafirov, R.: Produktionsmodelle und Simulation (DiFa). In: Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R. (Hrsg.): Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014
- [ZäPF-03] Zäh, M.; Patron, C.; Fusch, T.: Die Digitale Fabrik – Definition und Handlungsfelder. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 98, S. 75-77, Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [ZaSc-96] Zahn, E.; Schmid, U.: Produktionswirtschaft 1: Grundlagen und operatives Produktionsmanagement. Lucius & Lucius, Stuttgart, 1996
- [ZäSR-03] Zäh, M.; Sudhoff, W.; Rosenberg, H.: Bewertung mobile Produktionsszenarien mit Hilfe des Realoptionsansatzes. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 98, S.646, Carl Hanser Verlag, München, 2003
- [Ziet-11] Ziethen, D.: CATIA V5 – Makroprogrammierung mit Visual Basic Script, Carl Hanser Verlag, München, 2011

- [Zürn-10] Zürich, M.: Referenzmodell für die Fabrikplanung auf Basis von Quality Gates. Dissertation, Universität Stuttgart, Jost Jetter Verlag, Heimsheim, 2010

### **Normen und Richtlinien**

- [DIN-8373] Industrieroboter Wörterbuch. DIN EN ISO 8373:1996-08, Beuth-Verlag, Berlin, 1996
- [DIN-14610] Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe für Metallschweißprozesse. DIN EN 14610, Beuth-Verlag, Berlin, 2005
- [DIN-8580] Fertigungsverfahren – Begriffe, Einleitung. DIN 8580, Beuth-Verlag, Berlin, 2003
- [DIN-8593-5] Fertigungsverfahren Fügen – Teil 5: Fügen durch Umformen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. DIN 8993-5, Beuth-Verlag, Berlin, 2003
- [DIN-8593-8] Fertigungsverfahren Fügen – Teil 8: Kleben; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. DIN 8993-5, Beuth-Verlag, Berlin, 2003
- [ISO-9000] Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe. EN ISO 9000:2005, Beuth Verlag, Berlin, 2005
- [VDI-2221] Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Richtlinie 2221, Beuth-Verlag, Berlin, 1993
- [VDI-2223] Methodisches Entwerfen technischer Produkte. VDI-Richtlinie 2223, Beuth-Verlag, Berlin, 2004
- [VDI-2861] Montage- und Handhabungstechnik – Kenngrößen für Industrieroboter; Einsatzspezifische Kenngrößen. VDI-Richtlinie 2861 Blatt 2, Beuth-Verlag, Berlin, 1988

- [VDI-4499] Digitale Fabrik – Grundlagen. VDI-Richtlinie 4499 Blatt 1, Beuth-Verlag, Berlin, 2008