

Effiziente Produkt- und Prozessentwicklung durch wissensbasierte Simulation

Ein Leitfaden für Praktiker



Effiziente Produkt- und Prozessentwicklung durch wissensbasierte Simulation –
Ein Leitfaden für Praktiker

© 2017 Kammerl / Lindemann / Rieg / Schmidt

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann

Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg

Redaktion

Daniel Kammerl

Danilo Marcello Schmidt

Autoren (in alphabetischer Reihenfolge)

Cristina Carro Saavedra, Dr. Hugo D'Albert, Daniel Goller, Stefan Hautsch, Florian Heilmeier, Daniel Kammerl, Sebastian Katona, Philipp Kestel, Prof. Dr.-Ing. Michael Koch, Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann, Dennis Otten, Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg, Prof. Dr.-Ing. Michael Schmid, Danilo Marcello Schmidt, Sven Schreyer, Sebastian Schweigert, Tobias Sprügel, Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Umsetzung

Lehrstuhl für Produktentwicklung

Boltzmannstr. 15

D-85748 Garching

www.pe.mw.tum.de

Druck

ABCcolor Druck

Georgenstraße 85

80799 München

www.abcolordruck.de

Auflage: 300 Stück

Effiziente Produkt- und Prozessentwicklung durch wissensbasierte Simulation

Ein Leitfaden für Praktiker

Vorwort

Schnell wandelnde Marktanforderungen resultieren aus internationalen und vernetzten Märkten und verlangen von Unternehmen mehr und komplexe Produkte bei steigender Qualität zu entwickeln, zu konstruieren und zu fertigen. Dies hat auch Auswirkungen auf die Berechnungs- und Simulationsingenieure in den Unternehmen, die über immer mehr Wissen verfügen und dieses unter sich stetig wechselnden Randbedingungen anwenden.

Mit dem vorliegenden Leitfaden wollen die Autoren Unternehmen dazu befähigen, die Durchführung von Simulationen in Entwicklung, Konstruktion und Fertigung effizienter zu gestalten – basierend auf dem entwickelten Simulations-Framework. Dieses Framework ermöglicht dem Produktentwickler, wissens- und kontextbasiert die richtigen Werkzeuge im Bereich der Produkt- und Prozesssimulation zum optimalen Zeitpunkt und auf korrekte Weise einzusetzen. Dabei liegt der Fokus auf der verbesserten Integration von Wissen in den Simulationsprozess, um zu qualitativ hochwertigen Simulationsergebnissen zu gelangen.

Der vorliegende Leitfaden ist aus dem Forschungsverbund FORPRO² entstanden und soll eine Anleitung zur praktischen Umsetzung in Unternehmen bieten. Er soll daher nicht nur eine einmalige Lektüre, sondern ein bedarfsbezogenes Nachschlagewerk während der kontinuierlichen Anwendung bieten. Dafür sind neben den wissenschaftlichen Grundlagen sowohl ein stringenter Anleitungsteil als auch Details zu allen erwähnten Methoden und Werkzeugen Bestandteil des Leitfadens.

Die Autoren wünschen Ihnen eine erkenntnisreiche Lektüre und viel Erfolg bei der individuellen Umsetzung.



Garching, im Februar 2017

Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann

Danksagung

Wir danken der Bayerischen Forschungsstiftung für die Förderung unserer Forschung im Rahmen des Forschungsverbunds „FORPRO² – Effiziente Produkt- und Prozessentwicklung durch wissensbasierte Simulation“.



Bayerische
Forschungsstiftung

Inhaltsverzeichnis

1 Executive Summary.....	1
2 Einleitung.....	2
2.1 Ziele des Leitfadens.....	2
2.2 Nutzung des Leitfadens	3
2.3 Forschungsverbund FORPRO ²	4
3 Wissensbasiertes Framework: Vorgehen zur effizienten Produkt- und Prozessentwicklung.....	6
3.1 Einsatzgebiete und Anwendungsfälle	6
3.2 Prozessanalyse	9
3.3 Fertigungsspezifische Strukturoptimierung	14
3.4 FEA-Assistenzsystem.....	19
3.5 Patch-Optimizer	23
3.6 3D-Oberflächenerfassung.....	27
3.7 Qualitätssicherung von Simulationen.....	30
3.8 Situative Bereitstellung von Simulationswissen und –methoden ..	34
3.9 Umsetzung im Engineering Knowledge Manager	44
4 Methoden und Tools.....	48
5 Anwendungsbeispiel Querlenker.....	70
5.1 Ausgangssituation und Randbedingungen Demonstrator.....	70
5.2 Anwendung und Anpassung der Methoden und Tools	71
5.3 Zusammenfassung	95
6 Abkürzungsverzeichnis.....	97
7 Literatur	98

1 Executive Summary

Die Simulation von Produkteigenschaften und Fertigungsprozessen bietet, korrekt eingesetzt, aufgrund des frühzeitigen Erkenntnisgewinns und der Nutzung rein virtueller Prototypen ein erhebliches Potential für die Effizienz der Entwicklung. Der vorliegende Leitfaden schlägt ein Simulations-Framework vor, das dem Produktentwickler ermöglicht, situationsabhängig und schnell auf benötigtes Simulationswissen zurückzugreifen.

Im Rahmen des **Wissensmanagements** wurden innovative Methoden und Systeme für die Akquisition, situative Bereitstellung und strukturierte Sicherung des erforderlichen Berechnungswissens entwickelt und angewendet. In einem zentralen, wissensbasierten Framework wird das im Unternehmen vorhandene und benötigte Wissen über Produkt- und Prozesssimulationen konsistent und nachvollziehbar zusammengetragen und allen an der Entwicklung beteiligten Personen zugänglich gemacht. Der Bereich der **Produktsimulation** behandelt die Absicherung der funktionalen Produkteigenschaften. Im Vordergrund stehen dabei die automatische Fehlererkennung und -behebung bei der Ergebnisinterpretation von strukturmechanischen FE-Simulationen. Angefangen bei der Strukturoptimierung über die Finite-Elemente-Analyse gekoppelt mit der Rückführung von realen Bauteildaten in den Simulationsprozess wird das Verhalten von strukturmechanischen FE-Simulationen und deren Vergleich untersucht. Im Rahmen der **Prozesssimulation** gilt es, durch die frühzeitige Analyse und anschließende Bewertung der Fertigbarkeit Iterationsschleifen durch das Erkennen und Ausschließen von nicht-realizierbaren oder unwirtschaftlichen Geometrieansätzen zu reduzieren.

Zur Unterstützung dieser Aufgaben werden entsprechende **Werkzeuge und Methoden** vorgeschlagen:

- Prozessanalyse
- Fertigungsspezifische Strukturoptimierung
- FEA-Assistenzsystem
- Patch-Optimizer
- 3D-Oberflächenerfassung
- Qualitätssicherung
- Situative Bereitstellung des Simulationswissens

2 Einleitung

Der vorliegende Leitfaden dient als Anleitung zur Verbesserung der Produkt- und Prozesssimulation in Entwicklung, Konstruktion und Fertigung basierend auf einem Simulations-Framework. Dabei werden verschiedene Methoden, Tools und Werkzeuge vorgestellt, die bei unterschiedlichen Problemstellungen und Phasen des Produktentwicklungsprozesses (PEP) unterstützen können.

2.1 Ziele des Leitfadens

Dieser Leitfaden richtet sich an produzierende Unternehmen, deren Umfeld einem ständigen Wandel unterliegt. Zentrale Herausforderungen stellen dabei die durch Kundenanforderungen getriebene Derivatisierung und Steigerung der Produktkomplexität bei gleichzeitiger Reduzierung der Entwicklungszeiten dar. Diese Umstände zwingen Unternehmen, ihre Entwicklungsprozesse kontinuierlich zu verbessern, um die Effizienz der eingesetzten Methoden im PEP zu steigern und wettbewerbsfähig zu bleiben. Insbesondere der konsequente und durchgängige Einsatz virtueller Entwicklungsmethoden stellt eine Möglichkeit zur Effizienzsteigerung dar.

Der einzelne Produktentwickler hat in der Regel jedoch keinen vollständigen Überblick über die Leistungsfähigkeit von aktuell eingesetzten Simulations- und Berechnungswerkzeugen zur Absicherung von Produkt- und Fertigungsprozesseigenschaften. Da er in vielen Fällen nur unregelmäßig selbst Simulationen durchführt, ist er außerdem auf Expertenwissen bei der Anwendung angewiesen. Dieses ist zwar im eigenen Unternehmensumfeld häufig weitgehend vorhanden, jedoch besteht deutlicher Verbesserungsbedarf bei dessen Aufbereitung, Bereitstellung und Nutzung. In der Folge werden Simulationen häufig erst spät, zu selten, zu nicht idealen Zeitpunkten oder fehlerhaft eingesetzt und es treten unnötige Iterationen, Verschwendung von Ressourcen, verspätete Markteinführungen sowie Qualitätsprobleme in der Serienfertigung auf.

Die Zielsetzung des Leitfadens ist die Effizienzsteigerung der virtuellen Produkt- und Prozessentwicklung durch die Anwendung eines auf Expertenwissen basierenden Simulations-Frameworks zur Eigenschaftsoptimierung und Qualitätsverbesserung von neuen Produkten. Das zu erwartende Ergebnis ist die Bereitstellung des situativ benötigten Simulationswissens in Abhängigkeit von bestimmen-

den Faktoren wie der Phase im Entwicklungsprozess, den eingesetzten Fertigungsprozessen und den individuellen Rahmenbedingungen des Unternehmens.

Der unternehmerische Nutzen ergibt sich aus verkürzten Entwicklungszyklen durch gesteigerte Transparenz der Auswirkungen von Designfestlegungen auf Produkt- und Prozesseigenschaften, verbesserter Qualitäts- und Eigenschaftsbewertung von Produkten sowie dem situativen Aufzeigen von Handlungsoptionen zur Produkt- und Fertigungsprozessoptimierung.

2.2 Nutzung des Leitfadens

Der vorliegende Leitfaden richtet sich an Unternehmen, die Unterstützung bei Produkt- und Prozesssimulationen benötigen und ihr Management von Simulationswissen verbessern wollen. Eine genauere Beschreibung möglicher Anwendungsfälle und Anwender erfolgt im Abschnitt 3.1

Die Werkzeuge sind zunächst in sieben Bereiche unterteilt:

- Prozessanalyse (Abschnitt 3.2)
- Fertigungsspezifische Strukturoptimierung (Abschnitt 3.3)
- FEA-Assistenzsystem (Abschnitt 3.4)
- Patch-Optimizer (Abschnitt 3.5)
- 3D-Oberflächenerfassung (Abschnitt 3.6)
- Qualitätssicherung von Simulationen (Abschnitt 3.7)
- Situative Bereitstellung des Simulationswissens (Abschnitt 3.8)

Um zwischen den Werkzeugen leichter zu navigieren, sind die erwähnten sieben Bereiche beispielhaft im Produktentwicklungsprozess verortet. Je nachdem, welche Phase des PEP fokussiert wird, kann so leicht auf unterstützende Werkzeuge und Methoden zurückgegriffen werden. Abbildung 2-1 zeigt diese Verortung der Bereiche im PEP und veranschaulicht außerdem, in welchen Kapiteln diese abgehandelt werden. Das durchgängige Farbkonzept unterteilt den Leitfaden in die beschriebenen sieben Bereiche.

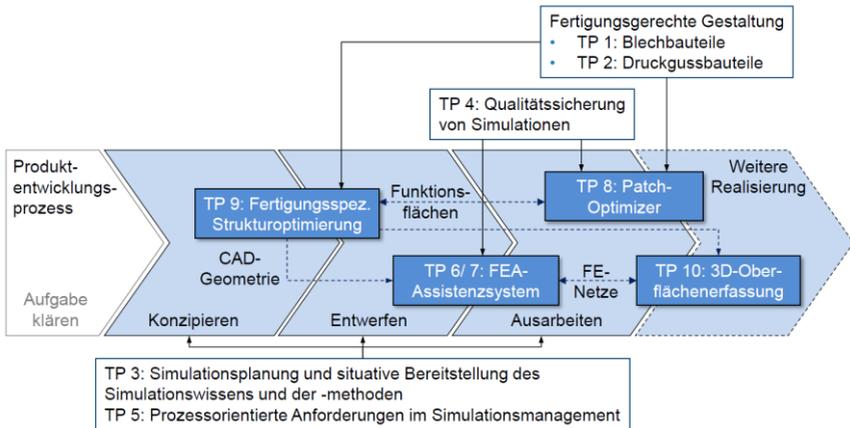


Abbildung 2-1: Verortung der FORPRO²-Werkzeuge im PEP

Neben der Vorstellung der Methoden, Werkzeuge und Tools ist eine beispielhafte Umsetzung im ANSYS Engineering Knowledge Manager (EKM, Abschnitt 3.9) gezeigt. Außerdem wird in Kapitel 5 ein durchgängiger Demonstrator beschrieben, um die Anwendung und Anpassung der Werkzeuge anhand eines Beispiels zu präsentieren. In den Beschreibungen sind Verweise auf Methoden (Methoden) angegeben, die in Form von Steckbriefen in Kapitel 4 zusammengefasst und alphabetisch sortiert sind. Kapitel 4 soll somit als alphabetisch sortiertes Nachschlagewerk für die eingesetzten Methoden und Werkzeuge dienen.

2.3 Forschungsverbund FORPRO²

FORPRO² ist ein von der Bayerischen Forschungsstiftung geförderter Forschungsverbund und besteht aus zehn Teilprojekten in drei Arbeitskreisen. FORPRO² hat zum Ziel, ein wissensbasiertes Framework für den Produktentwickler zu erarbeiten, welches diesem ermöglicht, wissens- und kontextbasiert die richtigen Werkzeuge im Bereich der Produkt- und Fertigungsprozesssimulation zum optimalen Zeitpunkt und auf korrekte Weise einzusetzen. Dabei liegt der Fokus auf der verbesserten Integration von Wissen in die Simulationswerkzeuge, um zu qualitativ hochwertigen Simulationsergebnissen zu gelangen. Aus dieser Zielsetzung leiten sich die drei thematischen Schwerpunkte von FORPRO² ab: die Felder Produktsimulation, Prozesssimulation und Wissensmanagement, welche in Form von Arbeitskreisen repräsentiert sind (Abbildung 2-2).

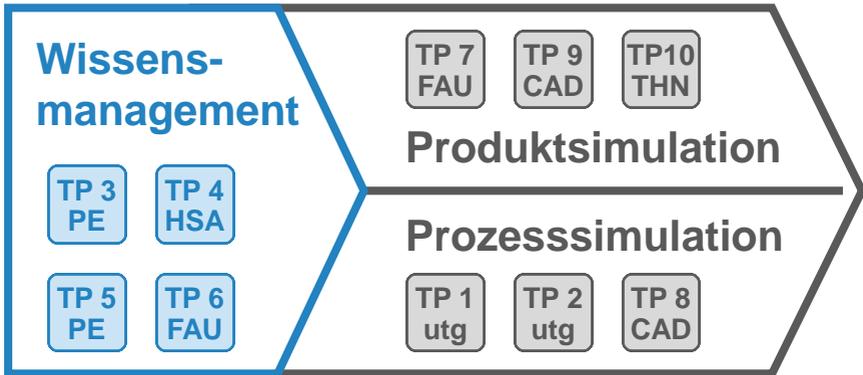


Abbildung 2-2: Verbundschaubild der Arbeitskreise

Innerhalb der Arbeitskreise werden zum einen teilprojektübergreifende Themen- und Problemstellungen adressiert. Zum anderen ergänzen sich die Teilprojektergebnisse und fließen in gemeinsamen Arbeiten zusammen, welche wiederum auf Gesamtverbundebene aggregiert werden. Abbildung 2-2 zeigt alle zehn Teilprojekte (TP) sowie ihre Zuteilung zu den Arbeitskreisen.

An dem Projekt sind folgende Forschungspartner beteiligt:

- **Technische Universität München:**
Lehrstuhl für Produktentwicklung (PE)
Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann,
Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg)
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk,
- **Universität Bayreuth:**
Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD (CAD)
Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg
- **Technische Hochschule Nürnberg (THN):**
Prof. Dr.-Ing. Michael Koch
- Hochschule Augsburg (HSA):
Prof. Dr.-Ing. Michael Schmid
- **FAU Erlangen-Nürnberg:**
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (FAU)
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

3 Wissensbasiertes Framework: Vorgehen zur effizienten Produkt- und Prozessentwicklung

3.1 Einsatzgebiete und Anwendungsfälle

Der PEP als Teil des Produktlebenszyklus dient der Planung, Entwicklung und Konstruktion eines Produkts, sowie der Absicherung der Produkteigenschaften und dessen Herstellungsprozess. Sowohl globale, wie auch branchenspezifische Trends prägen mehr denn je die Produktentwicklungsprozesse der Industrieunternehmen. Exemplarisch sei die Automobilindustrie genannt, welche laut BMWi 2015 der umsatzstärkste und damit bedeutendste Industriezweig in Deutschland war. Zentrale Herausforderungen dieser Branche stellen die durch Kundenanforderungen getriebene Derivatisierung und Steigerung der Produktkomplexität bei gleichzeitiger Reduzierung der Entwicklungszeiten dar. Zudem steigt der Kostendruck durch die Globalisierung, bei Einhaltung hoher Qualitätsstandards [10]. Diese Umstände zwingen Unternehmen, ihre Entwicklungsprozesse kontinuierlich zu verbessern, um die Effizienz der eingesetzten Methoden im PEP zu steigern und wettbewerbsfähig zu bleiben. Insbesondere der konsequente und durchgängige Einsatz virtueller Entwicklungsmethoden stellt eine Möglichkeit zur Effizienzsteigerung dar, wobei dabei die frühen Phasen des PEP zunehmend in den Fokus rücken. Hier besteht noch viel Spielraum im Produktdesign und gleichzeitig die Möglichkeit, die Kostenstruktur des Produkts aufwandsarm zu beeinflussen. Dies legt die Unterstützung des Produktentwicklers mit rechnergestützten Systemen wie beispielsweise Simulationstools nahe, damit er frühzeitig die Produkteigenschaften sowie den Herstellungsprozess bewerten kann.

Trotz dieser Erkenntnis belegt eine Studie der Staufan AG in Kooperation mit dem VDMA, dass ein Großteil der Maschinenbauer Probleme bei der Umsetzung dieses Frontloadings haben und daher Probleme am Produkt und Prozess meist erst spät erkannt werden [16]. Die Beobachtungen im Rahmen dieser Studie decken sich mit den im „Berliner Kreis“ identifizierten Innovationspotenzialen der Produktentwicklung. Hierin wird ein steigender Bedarf an Berechnungsingenieuren, aber auch ein vermehrter Einsatz von CAD-integrierten Berechnungsverfahren prognostiziert. Dadurch werden zukünftig auch vermehrt Produktentwickler mit der Nutzung von Simulationstools konfrontiert werden [8], wobei diese jedoch meist keinen vollständigen Überblick über die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Simula-

tions- und Berechnungswerkzeugen zur Absicherung von Produkt- und Fertigungsprozesseigenschaften haben und daher bei der Anwendung dieser Tools auf Expertenwissen angewiesen sind.

Exemplarisch für die genannten virtuellen Entwicklungsmethoden soll dieser Leitfaden den effizienten Einsatz von Simulationstools aufzeigen. Der Begriff Simulation ist dabei folgendermaßen definiert: „Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbarem Modell, um Erkenntnisse zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ [10]. Im konstruktiven Maschinenbau sind insbesondere die Finite Elemente Analyse (FEA), Mehr-Körper-Simulation (MKS) und Computational Fluid Dynamics (CFD) gängige Auslegungstools, wobei in diesem Leitfaden der Fokus auf die Anwendung der FEA liegt.

Der Leitfaden, welcher die Ergebnisse des Forschungsverbunds FORPRO² auf Anwenderebene herunterbrechen soll, verfolgt das Ziel, die virtuelle Produkt- und Prozessentwicklung in Unternehmen durch eine wissensbasierte Simulation zu unterstützen. Dies bedeutet, dass das benötigte Simulationswissen situativ, in Abhängigkeit von bestimmenden Faktoren wie der Phase im Entwicklungsprozess, den eingesetzten Fertigungsprozessen und den individuellen Rahmenbedingungen des Unternehmens bereitgestellt wird.

Dementsprechend richtet sich dieser Leitfaden in erster Linie an Unternehmen, welche ihre Produkt- und Prozessentwicklung mit Hilfe von Simulationstools unterstützen und deren Einsatz effizienter gestalten wollen. Dabei werden insbesondere Abteilungen und Anwender angesprochen, welche in einer frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses involviert sind, wie Produktdesigner und –entwickler, sowie Planer der Fertigungsmethoden.

Der Fokus liegt hier auf der Absicherung physischer Produkte und deren Herstellungsprozesse. Exemplarisch werden Produkte betrachtet, welche mit den Verfahren Druckguss oder Tiefziehen hergestellt werden. Die vorgestellte Methodik lässt sich aber auch auf andere Produkte und Entwicklungssituationen übertragen, welche den Einsatz von Simulationstools erfordern.

Mögliche Fragen, die der Leitfaden beantworten soll, sind zusammenfassend: Welche Simulationsmethoden stehen mir in der frühen Phase des PEP überhaupt zur Verfügung, wann und wie setze ich diese am sinnvollsten ein und welche Daten benötige ich dazu? Wie kann ich Simulationen, insbesondere bei Verwendung von wiederkehrenden Standardelementen, effizient erstellen und prüfen, ob das Ergebnis meiner Simulation plausibel ist? Welchen Einfluss haben geometrische

Fertigungsungenauigkeiten auf das Ergebnis meiner Simulation und wie berücksichtige ich dies in meinem Simulationsmodell? Wie kann ich Fertigungsrestriktionen bereits bei einer Strukturoptimierung berücksichtigen? Wie kann ich auch ohne den Einsatz einer Simulation die Herstellbarkeit beim Entwurf eines Produkts im CAD-Umfeld abschätzen?

3.2 Prozessanalyse

Die Prozessanalyse im Verbund wird mit Hilfe der erarbeiteten Assistenzsysteme durchgeführt. Hierbei handelt es sich um Methoden für die prozessgerechte Gestaltung von Druckguss- und Tiefziehbauteilen, die zu einem hohen Grad automatisiert ablaufen können. Der Fokus im Bereich Druckguss liegt auf der Analyse bestehender Geometrien und deren Eignung für den Prozess. Ergebnis der Analyse ist ein Vorschlag für ein Gießsystem als erster Konstruktionshinweis. Die Analyse folgt einem Workflow, wie in Abbildung 3-1 dargestellt. Zur Aufbereitung der Geometrie genügt die Vernetzung im Präprozessor einer gängigen Simulationssoftware nach der Finiten Differenzen Methode. Die resultierende Information umfasst die Bauteilpunktewolke mit den Koordinaten und dem dazugehörigen Teilvolumen pro Bauteilpunkt. Zudem wird ein vom Nutzer definierter Anschnittbereich vernetzt. Es können mehrere Bereiche gewählt und untereinander verglichen werden, sollte die Entscheidung auf einen Anschnittbereich nicht bereits feststehen. Diese können unterschiedliche Bauteilseiten sein, die bei Druckguss-Strukturbau-teilen üblicherweise klar voneinander unterscheidbar sind. Die Abgrenzung und Auswahl der Anschnittbereiche obliegt dabei dem Benutzer.

Die Punktwolken des Bauteils und des Anschnittbereichs dienen als Eingabedaten für die Analyse, die auf dem Shortest-Path-Algorithmus nach Dijkstra [4] beruht und von jedem Bauteilpunkt die kürzeste Verbindung zum Anschnittbereich identifiziert. Die kürzesten Weglängen, die geometriebedingt nötig sind, um die Bauteilpunkte vom Anschnitt aus zu erreichen, geben Aufschluss über die Eignung eines entsprechenden Anschnittbereichs für die Füllung des Bauteils im Prozess. Eine Gewichtung der Zielpunkte im Anschnittbereich mit den zugehörigen Teilvolumina der Startpunkte im Bauteil gibt zudem den Bedarf an Schmelzevolumen je Bauteilabschnitt wieder. Ist der richtige Anschnittbereich gewählt, werden auf Basis der Anschnittgewichtung Stellen identifiziert, die zur Platzierung diskreter, sogenannter Anschnittfinger geeignet sind. Der Bereich, der von jeweils einem Anschnittfinger eingenommen wird, gibt über die Gewichtung das Schmelzevolumen an, das während der Formfüllung benötigt wird. [Hei16]

Damit sind für eine bestehende Geometrie die Anschnittseite, Prozessparameter und ein Vorschlag für ein Anschnittsystem bekannt und können als Eingangswerte für eine Formfüllsimulation verwendet werden.

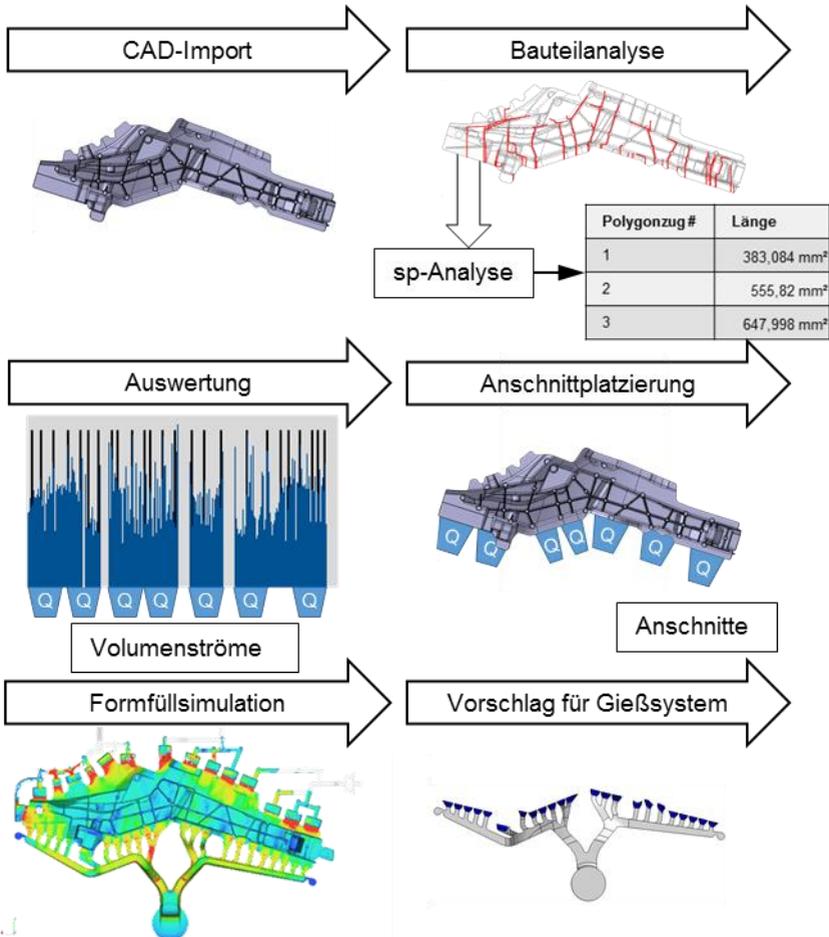


Abbildung 3-1: Workflow des Assistenzsystems zur Analyse von Druckgussbauteilen

Zur Unterstützung einer prozessgerechten Gestaltung von Tiefziehbauteilen dient ein weiteres Assistenzsystem, welches auf einer geometriebasierten Abschätzung der lokalen Faltengefahr beruht. Die Bewertungslogik (Abbildung 3-2) ergibt sich durch die Generierung und Bewertung von Teilflächen, sogenannten Patches. Als Input müssen die Bauteilgeometrie, die Blechdicke sowie das Material bekannt sein. Zunächst erfolgt die Ermittlung des Verlaufs eines Abwicklungsgradienten

(AG). Durch das Verschneiden des Bauteils mit parallelen Ebenen kann eine lokale Abwicklungslänge (AL) ermittelt werden, wobei der AG die Änderung der AL entlang des Bauteils darstellt. Die Bauteilbereiche zwischen diesen Ebenen stellen Patches dar, welchen mit Hilfe eines Metamodells (MM) eine Druckspannung (CS) zugewiesen werden kann. Im nächsten Schritt erfolgt eine weitere Unterteilung der Patches senkrecht zur Richtung der Verschneidungsebenen. Bei jedem signifikanten Wechsel des Krümmungsradius R und Blechdicke t wird eine neue Patchgrenze gesetzt, für die dann durch ein weiteres Metamodell (MM) die kritische Druckspannung (CS_{krit}) ermittelt werden kann. Durch den Vergleich von CS und CS_{krit} innerhalb eines jeden Patches erhält man als Output die lokale Bewertung der Faltengefahr und mögliche Gegenmaßnahmen.

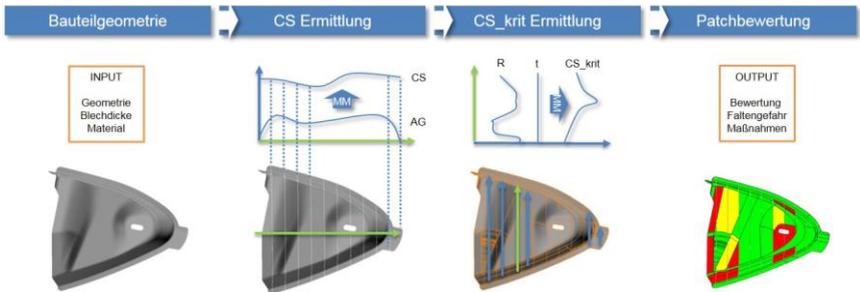


Abbildung 3-2: Workflow des Assistenzsystems zur Analyse von Tiefziehbauteilen

Die Metamodelle, welche eine Übersetzung der Bauteilgeometrie in die faltenbestimmenden Parameter CS und CS_{krit} ermöglichen, werden auf Basis von Parameterstudien vereinfachter Tiefziehgeometrien ermittelt. Diese Methodik wird im Abschlussbericht von FORPRO² genauer beschrieben und steht hier nicht im Vordergrund. Wesentlich für die Anwendung des Assistenzsystems ist die Ermittlung des AG-Verlaufs des zu bewertenden Bauteils durch den Nutzer. Hier stellt sich die Frage, wie der Nutzer die Verschneidungsebenen und deren Abstand definieren, sowie den damit ermittelten AG Verlauf interpretieren bzw. korrigieren kann, um eine sinnvolle Druckspannungsabschätzung durch das im Assistenzsystem implementierte MM gewährleisten zu können. Die Ermittlung der anderen Geometrieparameter R und t , welche für die Abschätzung der faltenkritischen Druckspannung benötigt werden, erfolgt durch den Patch-Optimizer ohne Interaktion mit dem Nutzer.

Für die Festlegung der Verschneidungsebenen muss zunächst eine Ziehrichtung festgelegt werden. In Anlehnung an die von [6] vorgestellte Methodik der ausgeglichenen Bauteillage, kann eine grobe Abschätzung der Ziehlage vorgenommen werden (Abbildung 3-3). Die der Methodik zugrunde liegende Idee ist das Ablegen des Bauteils auf einer ebenen Auflagefläche unter seinem Eigengewicht [1]. Die Normale zu dieser Ebene stellt eine erste sinnvolle Abschätzung der Ziehrichtung dar, und genügt hier zur Bestimmung der Verschneidungsebenen, auch wenn hiermit noch keine hinterschnittfreie Ziehlage garantiert werden kann.

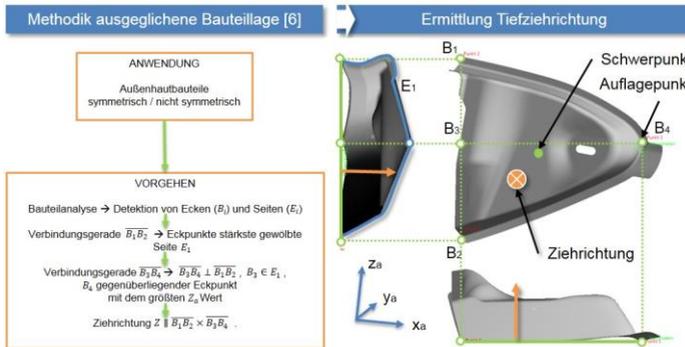


Abbildung 3-3: Vorgehen zur Ermittlung der Tiefziehrichtung

Durch die Festlegung der Tiefziehrichtung bleiben für die Verschneidungsebenen jedoch noch ein Freiheitsgrad, der Verschneidungswinkel (Abbildung 3-4). Wird das Bauteil ausgehend von einem beliebigen Nullpunkt (0 deg) in verschiedenen Richtungen verschnitten (-90 deg... +90 deg) und dabei die AL- und die korrigierten AG-Verläufe ermittelt, so kann bei Vorhandensein einer Vorzugsrichtung im Bauteil diese anhand der Verläufe erkannt werden. Dazu werden die AL- und AG-Verläufe je Verschneidungswinkel über das gesamte Bauteil gemittelt. Durch ein gewichtetes Aufsummieren der beiden gemittelten Werte, kann für jede Verschneidungsrichtung ein Entscheidungskriterium zur Festlegung einer Vorzugsrichtung definiert werden. Weist dieses ein lokales Minimum auf, so zeigt die Verschneidungsrichtung in Vorzugsrichtung und kann damit für die AG-Ermittlung und anschließende Druckspannungsabschätzung dienen. Der eben vorgestellten Methodik des ausgeglichenen AL- und AG-Verlaufs, liegt die Idee zugrunde, dass bei Vorhandensein einer Vorzugsrichtung diese im Mittel senkrecht zu den Materialtrajektorien am Matrizeinlauf steht, und damit die Verhältnisse der Parameterstudien bestmöglich abgebildet werden. Der somit ermittelte Vektor kann direkt im Patch-Optimizer eingegeben werden.

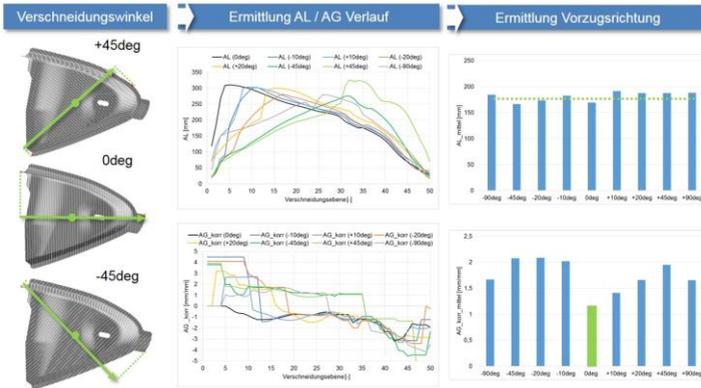


Abbildung 3-4: Vorgehen zur Ermittlung der Vorzugsrichtung

Nachdem die Ausrichtung der Verschneidungsebenen nun eindeutig festgelegt ist (hier: 0deg), soll der damit ermittelte AG Verlauf genauer betrachtet werden (Abbildung 3-5). Durch Bauteilbereiche wie einem offenen Kopf oder innere und äußere Beschnittkonturen, kommt es zu lokalen Peaks im AG Verlauf, welche bei der Druckspannungsabschätzung zu unrealistischen Ausschlägen führen. Je größer die Anzahl der Ebenen n (50...200), desto größer werden diese Peaks, was durchaus vorteilhaft ist, da sie leichter erkannt und anschließend korrigiert werden können. Eine Korrektur kann durch die Vorgabe max. zulässiger Absolutwerte für den AG sowie max. zulässiger inkrementeller Änderungen des AG erfolgen, welche empirisch anhand der Analyse von Realbauteilen ermittelt wurden.

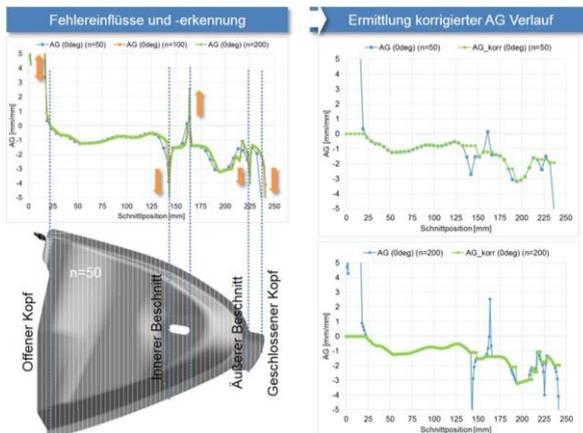


Abbildung 3-5: Ermittlung des korrigierten Abwicklungsgradientenverlaufs

3.3 Fertigungsspezifische Strukturoptimierung

Die fertigungsspezifische Strukturoptimierung ist im Rahmen des Forschungsverbundes für die Generierung von optimalen Bauteilentwürfen durch Einsatz von Strukturoptimierungsverfahren zuständig. Hierbei liegt der Fokus auf einer fertigungs- und prozessgerechten Optimierung mit Hilfe von wissensbasierten Simulationsmethoden. Durch die beiden Fertigungsverfahren – Aluminium-Druckguss und Stahlblech-Umformen – und deren unterschiedlichen Anforderungen an das Bauteildesign werden auch verschiedene Optimierungsmethoden angewandt.

Für die Erzeugung eines optimalen Druckgussbauteils soll eine prozessgerechte Topologieoptimierung auf Basis eines Bauraums genutzt werden. Im Gegensatz hierzu wird für das Blechumformen eine Dimensionierung der Blechstärke in Verbindung mit einer Formoptimierung eingesetzt, jeweils auf Basis eines ersten Designvorschlags. Hierbei wird die Umsetzung der Fertigungs- und Prozessgerechtigkeit durch Verwendung von passenden Optimierungsrestriktionen oder manuell mit selektiver Unterstützung durch die Wissensbasis sichergestellt.

Anschließend an die jeweilige Optimierung folgt eine Analyse der Fertigbarkeit (*Fertigbarkeitsanalyse*↗), um die erzeugten Bauteilgeometrien auf ihre Prozesseignung zu überprüfen.

3.3.1 Optimales Druckgussbauteil

Zu Beginn der Entwicklungsphase steht die Definition des Ausgangsmodells, also des Bauraums und der Randbedingungen (*Festlegung Randbedingungen*↗). Hierbei wird entweder auf Basis eines vorhandenen Bauteils oder aus Kollisionsbetrachtungen und der Einbausituation der größtmögliche Bauraum für das zu konstruierende Bauteil ermittelt. Weiterhin sind aus theoretischen Vorüberlegungen und Berechnungen oder aus der Analyse einer vorherigen Generation des gefragten Bauteils die Lasten und Randbedingungen im Betrieb sowie Missbrauchslasten zu erarbeiten. Ziel dieser Methode ist, alle nötigen Informationen zur Geometriedefinition und Finite-Elemente-Analyse zu erarbeiten.

Darauf aufbauend wird das Modell des Bauraums im CAD mit Hilfe möglichst einfacher Geometrien abgebildet (*Modellerstellung*↗). Für die weiteren Schritte – welche größtenteils in unterschiedlichen Softwaretools umgesetzt werden – ist die Übertragung der Geometrie in diese Programme notwendig. Um dies softwareunabhängig und flexibel zu ermöglichen, ist die Verwendung eines Austauschformats

wie STEP, JT oder IGES sinnvoll. Hierbei ist neben der Funktionalität des Formats selbst auch die Umsetzung in den zu verwendenden Applikationen zu untersuchen und ein geeignetes Format auszuwählen. Im Rahmen von FORPRO² und dem Arbeitskreis Produktsimulation wurden sehr gute Erfahrungen mit STEP in Verbindung mit PTC Creo[®], ANSYS Workbench[®] und SIMULIA Abaqus[®] gemacht.

Ist der Datenaustausch vom CAD- ins Simulationssystem (d. h. FE- oder Optimierungssystem) erfolgt, wird mit der Aufbereitung des Berechnungsmodells begonnen (*Berechnungsmodellaufbereitung*). Hierzu zählen die Vernetzung des Bau- raums mit den passenden finiten Elementen in der richtigen Netzfeinheit, das Auf- bringen von Lasten und Randbedingungen und das Festlegen der Berechnungs- parameter. Es ist zu beachten, dass viele Optimierungssysteme nicht mit dynamischen Berechnungen arbeiten und ebenso oft keine nichtlinearen Effekte berücksichtigen können. Zur Sicherstellung der Kompatibilität mit verschiedensten Soft- warelösungen beschränkt sich TP 9 auf eine linear-elastische, statische Analyse als Basis der Optimierung. Hierfür werden dynamische Belastungen entsprechend in statische Ersatzlasten umgerechnet. Weiterhin wird in dieser Phase das Mate- rial zugewiesen, d. h. der passende E-Modul und die Querkontraktionszahl defi- niert.

Sobald die vorbereitenden Maßnahmen abgeschlossen sind, wird eine Topologie- optimierung durchgeführt (*Strukturoptimierung*). Das aufbereitete Berechnungs- modell wird geladen, das Optimierungsziel (meist minimale Nachgiebigkeit) defi- niert und die Randbedingungen festgelegt. Letztere umfassen neben der Volu- menrestriktion – also dem angestrebten Zielvolumen nach der Optimierung – zum Beispiel Symmetrie- oder Fertigungsrestriktionen. Dort werden für die Verfahren Gießen, Stanzen oder Schmieden Aushebeschrägen angelegt, Hinterschnitte ver- mieden oder Werkzeugtrennebenen definiert. Nachdem die adäquaten Parameter für die Optimierung eingestellt wurden (z. B. Algorithmus, Penalty-Faktor, Schritt- weite, o. Ä.), kann der Optimierungslauf beginnen. Dieser schreitet iterativ fort, bis nach dem Erreichen eines Abbruchkriteriums die optimale Bauteilgeometrie ange- zeigt werden kann. Das Optimierungsergebnis ist immer ein Designvorschlag und keine finale Produktgeometrie. Dieser Designvorschlag muss vom Konstrukteur interpretiert und in ein neues Modell überführt werden. In der Theorie lässt sich das Ergebnis der Topologieoptimierung in verschiedenen Formaten exportieren, welche jedoch – abhängig davon, ob eine Glättung durchgeführt wurde – kaum sinnvoll einsetzbar sind. Für die weitere Verwendung des Optimierungsergebnis- ses in Simulation, Fertigung und Visualisierung ist ein parametrisches CAD-Modell im betrieblichen CAD-System unabdingbar und muss durch den Anwender nach

der Interpretation neu konstruiert werden (Neukonstruktion↗). Hierbei kann der Konstrukteur selektiv auf die fertigungs- und prozessspezifischen Gestaltungsregeln in der Wissensbasis zurückgreifen, um direkt ein prozessgerechtes Design zu gewährleisten. Abschließend ist das erzeugte, optimale Bauteil auf die Fertigbarkeit zu prüfen (Fertigbarkeitsanalyse↗), wofür verschiedene Werkzeuge zur Verfügung stehen. Im Rahmen des Forschungsverbunds wurde durch TP 2 und TP 8 für Druckgussbauteile die Shortest-Path (sp-) Analyse verwendet, um Bereiche schlechter Füllung zu identifizieren. Diese können dann in einer weiteren Iteration des Optimierungsprozesses vom Bauraum ausgeschlossen werden, um folglich ein besseres Ergebnis berechnen zu können. Dieser Prozess sollte nach ein bis zwei Durchläufen sehr gute Resultate erzielen und die maximalen Fließlängen im Optimierungsergebnis stark reduzieren.

3.3.2 Optimales Blechbauteil

Analog zum Fertigungsverfahren Druckguss steht beim Blechumformen zu Beginn die Definition des Ausgangsmodells. Statt einen Bauraum zu konstruieren, beginnt der Konstrukteur mit einem ersten Designentwurf und den Randbedingungen (Lasten und Randbedingungen im Betrieb sowie Missbrauchslasten), welche aus theoretischen Vorüberlegungen und Berechnungen oder aus der Analyse der Vorgängergeneration des zu generierenden Bauteils zu erarbeiten sind (Festlegung Randbedingungen↗). Ziel dieser Methode ist, alle nötigen Informationen für die Geometriedefinition und FE-Analyse zu erarbeiten.

Der erste Designvorschlag soll durch den Anwender im CAD mit Hilfe der Gestaltungs- und Konstruktionsregeln aus der Wissensbasis möglichst fertigungsgerecht ausgestaltet werden (Modellerstellung↗). Hierbei ist auf eine Konstruktion mit Flächen statt Volumen zu setzen, um sowohl eine gewisse Flexibilität als auch geringen Berechnungsaufwand für die kommenden Schritte zu ermöglichen.

Die Übertragung der Geometrie in die folgenden Simulationsprogramme bedarf eines softwareunabhängigen und flexiblen Austauschformats wie STEP, JT oder IGES. Es ist neben dem Funktionsumfang auch die programmtechnische Umsetzung des Formats zu untersuchen und ein geeignetes auszuwählen. Im Rahmen von FORPRO² und dem Arbeitskreis Produktsimulation konnten sehr gute Erfahrungen mit STEP in Verbindung mit PTC Creo[®], ANSYS Workbench[®] und SIMULIA Abaqus[®] erzielt werden.

Sobald der Datenaustausch vom CAD- ins Simulationssystem (d. h. FE- oder Optimierungssystem) erfolgt ist, wird mit der Berechnungsmodellauflbereitung begonnen. Der Ausgangsentwurf muss mit dem optimalen (Flächen-) Elementtyp in der passenden Netzfeinheit diskretisiert werden. Neben der Zuweisung einer Ausgangsdicke für die Berechnung sind das Aufbringen von Lasten und Randbedingungen sowie die Festlegung der Berechnungsparameter korrekt umzusetzen.

Es ist zu beachten, dass die meisten Optimierungssysteme nicht mit dynamischen Berechnungen arbeiten und oft keine nichtlinearen Effekte berücksichtigen können. Zur Sicherstellung der Kompatibilität mit verschiedensten Softwarelösungen beschränkt sich TP9 auf eine linear-elastische, statische Analyse als Basis der Optimierung. Hierfür werden dynamische Belastungen entsprechend in statische Ersatzlasten umgerechnet. Zur Berechnungsmodellauflbereitung zählt auch die Zuweisung der nötigen Materialkennwerte (E-Modul und Querkontraktionszahl).

Nach Abschluss der vorbereitenden Maßnahmen wird eine Dimensionierung der Blechstärke durchgeführt (Strukturoptimierung). Das Berechnungsmodell wird geladen, das Optimierungsziel (z. B. minimale Nachgiebigkeit, minimale lokale Verschiebung, maximale Festigkeit) definiert und die Randbedingungen festgelegt. Letztere umfassen zum Beispiel Symmetrien oder erlaubte Blechdickenstufen. Nachdem die adäquaten Parameter für die Optimierung eingestellt wurden (z. B. Algorithmus, Schrittweiten, o. Ä.), beginnt der Optimierungslauf. Dieser schreitet iterativ fort bis nach dem Erreichen eines Abbruchkriteriums die optimale Blechdicke ausgelesen werden kann.

Das Optimierungsergebnis ist zwar jeweils nur ein Designvorschlag und kein fertiges Produkt, kann im Fall der Dimensionierung – und wenn vorher alle Parameter korrekt eingestellt wurden – durch Zuweisen der optimalen Dicke auf das Ausgangsmodell direkt in das optimale parametrische Modell transferiert werden (Neukonstruktion). Sofern während der bis hier durchgeführten Simulationen Probleme wie z. B. Spannungsspitzen erkannt wurden, kann ggf. eine Formoptimierung mit den richtigen Einstellungen durchgeführt werden (Strukturoptimierung).

Anschließend muss das parametrische CAD-Modell entsprechend dem Designvorschlag durch die Gestaltoptimierung angepasst werden. Hierbei sind ebenso die Konstruktionsrichtlinien für fertigungs- und prozessgerechtes Design aus der Wissensbasis zu beachten.

Am Ende des Optimierungsprozesses ist das erzeugte Bauteildesign auf die Fertigbarkeit zu prüfen (Fertigbarkeitsanalyse), wofür verschiedene Werkzeuge zur Verfügung stehen. Im Rahmen des Forschungsverbunds wurde durch TP 1 und TP 8 für Druckgussbauteile der Patch Optimizer verwendet, um Bereiche mit wahrscheinlichen Prozessproblemen zu identifizieren. Diese Abschnitte können dann durch eine manuelle Anpassung des CAD-Modells unter Berücksichtigung der Hilfestellungen aus der Wissensbasis prozesssicherer gestaltet werden.

3.4 FEA-Assistenzsystem

Das FEA-Assistenzsystem soll Produktentwickler beim Aufbau und bei der Auswertung strukturmechanischer Finite-Elemente-Analysen (FEA) wissensbasiert unterstützen. Wie in Abbildung 3-6 dargestellt, besteht das Assistenzsystem aus den beiden Bereichen Simulationssynthese (wissensbasierter FEA-Aufbau) und Simulationsanalyse (wissensbasierter Ergebnisauswertung). Im Folgenden soll ein Einblick in die Anwendung dieser Module zur Unterstützung und Automatisierung des Pre- und Post-Processings sowie die Prozesse zur Akquisition des hierzu erforderlichen Berechnungswissens gegeben werden.

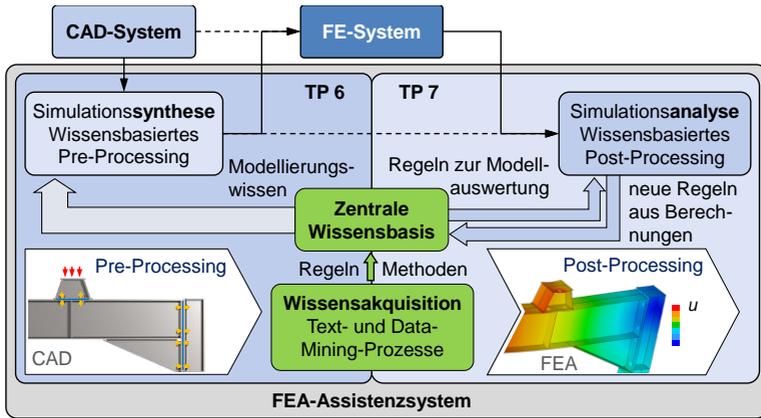


Abbildung 3-6: Prozesse des FEA-Assistenzsystems

3.4.1 Wissensbasierte Simulationssynthese

Durch den Syntheseteil des FEA-Assistenzsystems werden Konstruktionsingenieure bei der Erstellung aussagekräftiger Simulationen, ausgehend von deren gewohnten CAD-Arbeitsumgebung, unterstützt. Neben der Konstruktion und Zusammenstellung der Baugruppen erfolgt daher die Vorgabe der Berechnungsaufgabe (z. B. erforderliche Simulationsergebnisse und Lastfälle) bereits in der erweiterten CAD-Umgebung von PTC Creo Parametric. Eine Umsetzung in weiteren CAD-Systemen ist ebenfalls möglich. Ausgehend von den Geometrie- und Simulationseinstellungen werden im Hintergrund adäquate FEA-Modelle automatisiert erstellt. Im Anschluss an die Durchführung der Simulationen wird die Auswertung der Berechnungsergebnisse durch den Analyseteil des Assistenzsystems automatisiert [Spr16a] und für den Benutzer in einer GUI in MathWorks MATLAB bereitgestellt

(s. Abschnitt 3.4.2 „wissensbasierte Simulationsauswertung“). Zur Erweiterung oder Korrektur der generierten FEA lassen sich diese im CAE-System ANSYS Workbench aufrufen. Hierbei wird der Nutzer durch Modellierungsregeln und Anleitungen weiterhin unterstützt.

Das erforderliche Wissen für die Durchführung aussagekräftiger struktureller FEA wird strukturiert und rechnerverarbeitbar in einer zentralen Wissensbasis zusammengetragen. Für die manuelle Befüllung der Wissensbasis steht eine entsprechende Benutzerschnittstelle in ANSYS EKM zur Verfügung. Neben den manuellen Akquisitionsprozessen wird das Expertenwissen für den Simulationsaufbau und die -auswertung jedoch insbesondere durch automatisierte Prozesse aus dem Bereich des Text-Minings und Data-Minings anhand von Berechnungsberichten und -modellen bereits durchgeführter und validierter Simulationen zusammengetragen [Bre15],[Kes15c],[Kes16c]. Diese enthalten meist umfassendes Expertenwissen, z. B. über die erforderlichen Netz- und Kontakteinstellungen oder Vereinfachungen der Modellgeometrie für gegebene Berechnungsaufgaben. Für diese Akquisitionsprozesse wird eine entsprechende GUI in RapidMiner aufgerufen. Durch Data-Mining lassen sich aus den diskreten Datensätzen zu bereits durchgeführten Simulationen übergeordnete Zusammenhänge als Metamodelle ableiten, wie z. B. kontinuierliche Regressionsfunktionen und Regeln in Form von Klassifikationsbäumen für die Erstellung qualitativ hochwertiger FEA. Für die Anwendung von Data-Mining müssen die zu analysierenden Datenbestände jedoch strukturiert vorliegen. Während aus FEA-Modellen entsprechende Datensätze in relativ wenigen Schritten ausgeleitet werden können, müssen unstrukturierte textbasierte Berechnungsberichte zunächst durch Text-Mining-Prozesse (automatisierte Textklassifikation und Informationsextraktion) in geeignete Datensätze überführt werden [Kes15c],[Kes16c].

Die gezielte Anwendung des akquirierten Modellierungswissens und die Automatisierung entsprechender Simulationsprozesse erfolgt durch CAE-Features. Diese werden als integrierte Produktdatenmodelle nicht nur für die Konstruktion von Gestaltungselementen eingesetzt, wie z. B. CAD-Features für Gewindebohrungen, sondern auch für die Verknüpfung der CAD-Repräsentation eines Bauteils mit wiederkehrenden Berechnungsmodellen und -methoden [Kes15c]. Hierzu wird anhand semantischer Informationen die Lage von Bauteilen und simulationsrelevanten Bereichen, wie Kontaktflächen, definiert [Kes16a]. Die gekennzeichneten Bereiche werden im Modell automatisch durch das FEA-Assistenzsystem erkannt und gezielt für eine Simulation vorbereitet. Zudem wird die Funktionalität des CAD-

Systems für die Vorgabe von Lastfällen und erforderlichen Simulationsergebnissen erweitert und zusätzliche Geometrielemente wie Mittelflächen (für vereinfachte Simulationen mit Schalenelementen) in die Features integriert. Die CAE-Feature-Bibliothek wird für die strukturmechanische Analyse von verschraubten und geschweißten Blech- und Druckgussbauteilen umgesetzt. Hierzu werden etablierte CAD-Zusatzapplikationen von B&W Software erweitert: IFX für die Konstruktion von Schraubenverbindungen und AFX für die effiziente CAD-Modellierung von Profilkonstruktionen.

3.4.2 Wissensbasierte Simulationsauswertung

Der Analyseteil FEdeIM des FEA-Assistenzsystems dient der wissensbasierten Auswertung einer vorliegenden Simulation und ermöglicht so ein besseres Verständnis der Ergebnisse und das Auffinden von eventuell enthaltenen Fehlern. Hierfür wurde eine Matlab GUI entwickelt, welche entweder direkt über ein Plug-In aus dem FE-System heraus gestartet werden kann oder als ausführbares Windows-Programm direkt zur Verfügung steht. Somit muss ein weniger erfahrener Benutzer kein FE-System bedienen. Notwendige Änderungen können aber von einem Benutzer stets über das FE-System eingepflegt werden.

Für die wissensbasierte Simulationsauswertung kommen die folgenden Methoden zum Einsatz. Diese sind als Module innerhalb des Analyseteils des FEA-Assistenzsystems implementiert (Abbildung 3-7):

- Automatische Bauteilerkennung[↗](#)
- Plausibilitätsprüfung[↗](#)
- Wissensbasierter selbstlernender Fehlerassistent[↗](#)

Das Modul der Plausibilitätsprüfung greift auf, in der Wissensbasis hinterlegte, Vergleichs-Regressionsmodelle zurück. Diese können Antwortflächen (Response Surface Methodology, RSM) oder Künstliche Neuronale Netze (KNN) sein. Die passenden Modelle werden automatisiert ausgewählt und es werden stets die Prognosegüten der verwendeten Metamodelle angegeben. Die Prognosegüte beschreibt, wie gut das Modell den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Zielgrößen der Originaldaten abbildet. Je höher die Prognosegüte ist, desto besser ist das trainierte Modell, das für die Plausibilitätsprüfung verwendet wird. Metamodelle können auf Basis von bereits im Unternehmen vorhandenen Berechnungen trainiert werden und können sowohl für die Plausibilitätsprüfung als auch für schnelle Vorabschätzungen zu Rate gezogen werden.

Das Modul der Ergebnisvisualisierung und Simulationsbewertung ermöglicht den Vergleich zwischen einer Simulation mit idealer CAD-Geometrie und einer Simulation mit Real-Geometrie (z. B. Fertigungsabweichungen sind enthalten). Die Anpassung von FE-Netzen zur Integration von fertigungsbedingten Geometrieabweichungen erfolgt durch TP10 (**3D-Oberflächenerfassung**). Das Modul zur Ergebnisvisualisierung ermöglicht den Vergleich von unterschiedlichen Modellen. Hierbei können auch unterschiedliche Vernetzungen bei den beiden Bauteilen miteinander verglichen werden. Für eine geeignete Visualisierung können die Transparenz, Farbe, Linienstärke und Linienfarbe der FE-Netze unabhängig und frei angepasst werden.

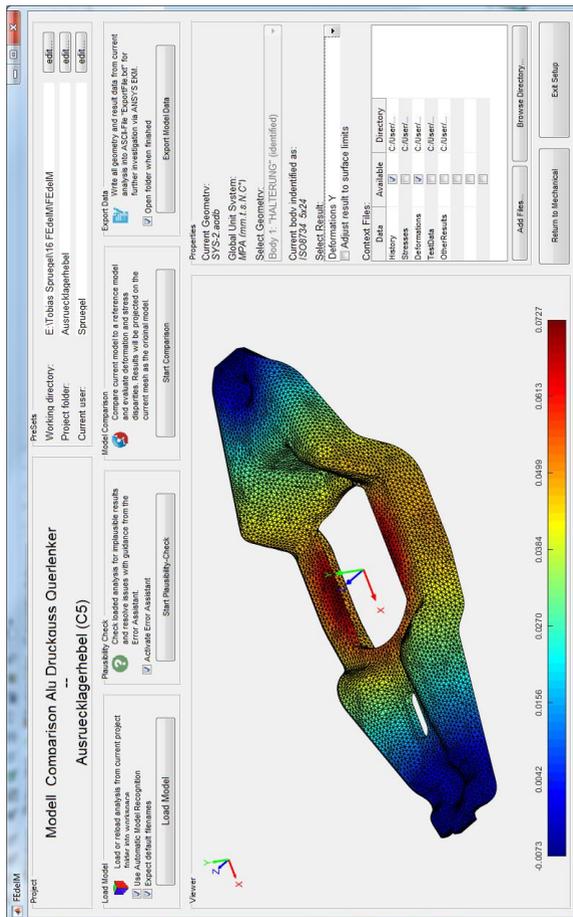


Abbildung 3-7: Analyseteil FEdem des FEA-Assistenzsystems

3.5 Patch-Optimizer

Der Patch-Optimizer ist ein Simulationsbaustein, der gemeinsam innerhalb des Arbeitskreises Prozesssimulation erstellt wurde. Er ermöglicht die Identifikation von fertigungstechnischen Herausforderungen bereits beim Entwurf und soll helfen entsprechende Handlungsalternativen zur Lösung dieser Probleme zu entwickeln. Dies wurde für die beiden Prozesse Tiefziehen und Druckgießen umgesetzt.

Die Idee, auf der dieses Tool basiert, ist die Struktur der Geometrie in Teilstrukturen zu unterteilen, die ähnliche Eigenschaften aufweisen und die so als Ganzes bewertet werden können. Dazu wurden für die entsprechenden Prozesse Fertigungsregeln entwickelt und in eine Form gebracht, die es erlaubt, automatisierte Auswertungen von Bauteilen durchzuführen. Schließlich wurden diese Regeln in Form von ausführbaren Programmen implementiert, um eine Möglichkeit zu schaffen die Analysen automatisiert ohne viel Vorwissen durchführen zu können. Dieses Vorgehen wurde unter der Methode Semantische Informationen generieren zusammengefasst. Da sich die untersuchten Prozesse grundsätzlich sehr stark unterscheiden, waren zur Umsetzung unterschiedliche Vorgehensweisen nötig. Dies reicht von den angewandten Regeln bis zur Art der Implementierung. Die folgenden Erklärungen zur Anwendung des Patch-Optimizers für Bauteilanalysen gliedert sich deshalb in zwei Teile, 3.5.1 für Tiefziehen und 3.5.2 für Druckgießen. Zusätzlich ist es möglich die durch die Geometrieanalysen erzeugten Informationen oder auch beliebige selbst generierte Informationen in Form von Zeichenketten oder Binärdateien an Geometrieelemente eines Bauteils zu binden. Das Vorgehen ist unter 3.5.3 beschrieben.

3.5.1 Patch-Optimizer für Tiefziehen

Für den Prozess Tiefziehen kann der Patch-Optimizer dazu verwendet werden, die Geometrie eines Bauteils frühzeitig und nahezu ohne Prozesswissen auf mögliche Fertigungshindernisse zu überprüfen. Im Gegensatz zur Prozesssimulation sind wenige Vorkenntnisse und eine geringe Vorbereitungszeit nötig. Zunächst wird die Methode Bauteilgeometrie importieren angewandt. Das Bauteil sollte im CAD-System vorbereitet werden, um die Ergebnisgüte zu erhöhen. Anschließend wird die Bauteilgeometrie wie beschrieben als STEP exportiert. Für die Analyse wurde ein Softwaredemonstrator mit grafischer Oberfläche für Windows (getestet auf Windows 7) erstellt (Abbildung 3-8).

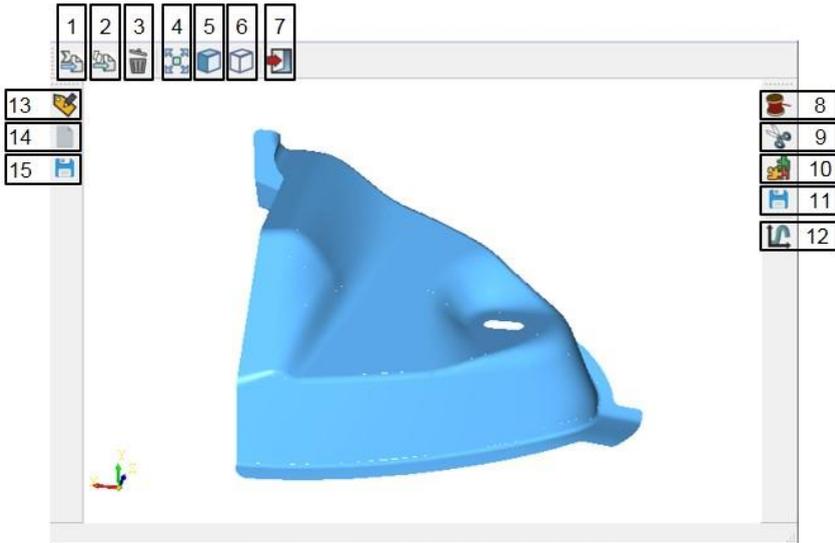


Abbildung 3-8: Grafische Benutzeroberfläche des Software demonstrators

Es existieren drei verschiebbare Tooleisten (zur besseren Übersicht hier je an einer Seite angeordnet). Die Buttons an der Oberseite sind für allgemeine Funktionen vorgesehen, links befinden sich die Funktionen zur Erzeugung von Funktionsflächen (siehe 3.5.3) und rechts befinden sich Funktionen zur Geometrieanalyse für Tiefziehgeometrien.

Zunächst wird das vorbereitete Modell als STEP-Datei über (1) in das Programm geladen. Das geladene Modell wird angezeigt und kann über die Maus bewegt werden. Über die Buttons stehen folgende Funktionen zur Verfügung: (3) Modell löschen, (4) Modell zentrieren, (5) schattierte Darstellung, (6) Drahtgittermodell Darstellung, (7) Programm verlassen.

Nach dem Import kann mit (8) die Abwicklungskurve und der Abwicklungsgradient erstellt werden. Dazu wird der Nutzer aufgefordert eine Schnittebenennormale anzugeben. Diese muss senkrecht zur Tiefziehrichtung und parallel zur Richtung der Bauteilausdehnung gewählt werden. Anschließend können mit (9) die Patches erstellt werden. Dazu werden die bereits vorhandenen Flächen, die aus der STEP-Datei importiert wurden, aufgeteilt. Die Patches können dann mit (10) bewertet werden. Die Werte werden durch Einfärben der Patches visuell dargestellt, rote Patches wurden schlecht bewertet, grüne Patches wurden gut bewertet. Der Maximalwert wird automatisch in der Konsole angezeigt, die Werte für die einzelnen

Flächen können durch Klicken auf die jeweilige Fläche abgefragt werden. Die erzeugten Informationen können über (11) in einem semantischen Modell gespeichert werden. Sie werden damit an die ursprüngliche STEP-Datei angehängt und mit dem Suffix „_forpro“ im Hauptverzeichnis gespeichert. Die Darstellung der Abwicklungskurve und des Abwicklungsgradienten über (12) ist optional.

3.5.2 Patch-Optimizer für Druckguss

Der Patch-Optimizer beim Druckguss wird nach der Prozesssimulation des Bauteils angewandt und soll wichtige fertigungsrelevante Informationen erzeugen, um den optimalen Anschnitt zu finden. Hierfür wurden zwei weitere Programme ohne grafische Oberfläche entwickelt. Einstellungen werden direkt über die Kommandozeile oder über Konfigurationsdateien vorgenommen.

Für ein besseres Verständnis der Füllsimulation und des Bauteilverhaltens während des Prozesses kann das Bauteil mit dem Programm „forpro_rr.exe“ in Patches unterteilt werden. Die Zellen aus der Simulation werden gefiltert und die Auswahl (die Zellen die den Patch bilden) wird in eine Datei geschrieben. Die Patches aus der entsprechenden Datei können mithilfe der freien Software „Cloud Compare“ grafisch dargestellt werden.

Zur Geometrieanalyse des Druckgussbauteils werden allerdings nicht die erstellten Patches herangezogen, es werden die einzelnen Zellen aus der Simulation als sog. „finite Patches“ verwendet. Diese dienen als Input für das Programm „forpro_sp.exe“. Dabei werden die Zellen, die zu potentiellen Anschnitten gehören und die restlichen Punkte je in einer Datei eingelesen. Die Pfade der Eingabe- und Ausgabedateien, sowie viele weitere Steuerparameter können über die Datei „forpro_sp.ini“ konfiguriert werden. Die einzelnen Funktionen sind direkt in dieser Datei in Form von Kommentaren beschrieben.

Das Format der Eingabe- und Ausgabedateien kann über die ini-Datei eingestellt werden. Nach Abschluss der Analyse liegen folgende Dateien vor:

Output-Points.csv

In dieser Datei liegen alle Punkte (entsprechen dem Zellmittelpunkt) der eingegebenen Struktur vor, die nicht zum Anschnitt gehören. Je nach Konfiguration finden sich für jeden Punkt folgende Werte (in gegebener Reihenfolge) in einer Zeile: x-Koordinate, y-Koordinate, z-Koordinate, Abstand zum Anschnitt, Anschnitt-Gewicht, Nummer des zugehörigen Anschnittpunkts.

Output-Gate.csv

Diese Datei enthält die gleichen Informationen wie "Output-Points.csv", allerdings nur für die Punkte, die zum Anschnitt gehören.

Output-Polygon.csv

In dieser Datei werden die Wege der kürzesten Pfade von den Punkten zum Anschnitt in Form von Polygonzügen gespeichert. Für jeden Punkt wird in dieser Datei eine Zeile erstellt, in der alle Punkte über die der kürzeste Pfad verläuft hintereinander aufgeführt sind. Da diese Datei sehr schnell einige GB groß werden kann und nur für detailliertere Untersuchungen interessant ist, wird sie nur herausgeschrieben, wenn dies explizit in der Steuerdatei eingestellt ist.

Näheres zur Verwendung und Interpretation dieser Dateien findet sich im Abschlussbericht zum TP 2 und TP 8.

3.5.3 Patch-Optimizer zur Erzeugung semantischer Modelle

Neben der Erzeugung fertigungsrelevanter Informationen ist es mit dem Software-demonstrator („forpro-softwaredemonstrator.bat“) ebenfalls möglich semantische Modelle zu exportieren⁷, d. h. Dateien, die neben der reinen Geometrieinformation auch noch weitere Daten enthalten. Diese Daten können entweder die Ergebnisse der Patch-Analyse sein (siehe 3.5.1) oder selbstdefinierte Daten, die der Konstrukteur den Kollegen, die später im PEP mit der Datei arbeiten, zur Verfügung stellen will. Die Art dieser Daten ist nicht näher eingegrenzt, für den Software-demonstrator wurden sie in lesbare Daten (in Form von Zeichenketten) und binäre Daten (z. B. Bilder, Dokumente) aufgeteilt. Ist ein Modell im Software-demonstrator geladen, können über (13) Zeichenketten gelesen und geschrieben werden und über (14) beliebige binäre Dateien ausgewählt und an das Modell geknüpft bzw. gelesen werden. Erst durch (14) wird das aktuelle Modell mit allen Informationen als Datei exportiert. Genau wie unter 3.5.1 wird der originale Dateiname mit dem Suffix „_forpro“ verwendet. Alle Informationen werden in dieser Beispielimplementierung an Flächen geknüpft. Prinzipiell ist dies allerdings mit allen Geometrie-/ Topologieelementen denkbar, die in der Datei gespeichert sind. Über die Funktionsweise der semantischen Modelle finden sich im Abschlussbericht zu TP 8 nähere Informationen.

3.6 3D-Oberflächenerfassung

In der weiteren Realisierung findet eine Validierung des erzeugten Simulationsmodelles mittels eines Geometrievergleichs statt. Hierbei wird mit hochgenauen optischen Messsystemen die Oberfläche der realen Objekte vermessen. Die dabei erzeugten Punktwolken lassen sich mittels Überlagerung zum CAD-Modell in Vergleichsdarstellungen bringen, um so die Abweichungen, welche aus der Fertigung resultieren zu detektieren. Zeigen sich hier Differenzen, wird mit Informationen aus der Wissensbasis der Einfluss auf die durchgeführten Simulationen bewertet. Ergibt sich hieraus die Wahrscheinlichkeit, dass die Simulationsergebnisse nicht mehr aussagekräftig genug sind, findet eine Aufbereitung des Modells statt, so dass eine erneute Analyse des Bauteils mit der tatsächlich gefertigten Kontur erfolgen kann. [Kat16]

Für die Erzeugung des Ist-Zustandes werden optische Messsysteme verwendet, welche die Oberflächen mittels eines Lasers oder eines projizierten Musters berührungslos erfassen. Diese Verfahren beruhen auf dem Grundprinzip der Triangulation (Abbildung 3-9). Das Messsystem ist dabei so aufgebaut, dass ein eine Matrix-Kamera in definiertem Abstand und Winkel zu dem aussendenden Linienlaser/Projektor steht. Durch die Kontur des Objektes wird die Linie deformiert und von der Kamera detektiert. Bei einem Linienlaser lässt sich über eine Relativbewegung des Messsystems zum Objekt die gesamte Oberfläche des Bauteils digitalisieren; bei Streifenprojektionsverfahren wird zeitlich codiert gleichzeitig eine große Fläche erfasst. Diese Techniken sind in der Industrie bereits etabliert. „[...]Grundsätzlich können Messgenauigkeiten bis zu 10 Mikrometer je Einzelpunkt erreicht werden, wobei die Genauigkeit jedoch maßgeblich von der verwendeten Projektionseinheit (Sensor), dem Messfeld, den Kameraauflösungen, der Geometrie des Objekts, dem Reflektionsgrad und der Textur der Oberfläche abhängig ist.[...]“ [17]

Für die Vermeidung von zufälligen Abweichungen, bzw. um diese auszuschließen, empfiehlt es sich, eine Reihe von Bauteilen zu scannen und eine flächenhafte Auswertung der Varianzen durchzuführen um auch nur die tatsächlichen, systematischen, fertigungstechnisch bedingten Fehler zu berücksichtigen.

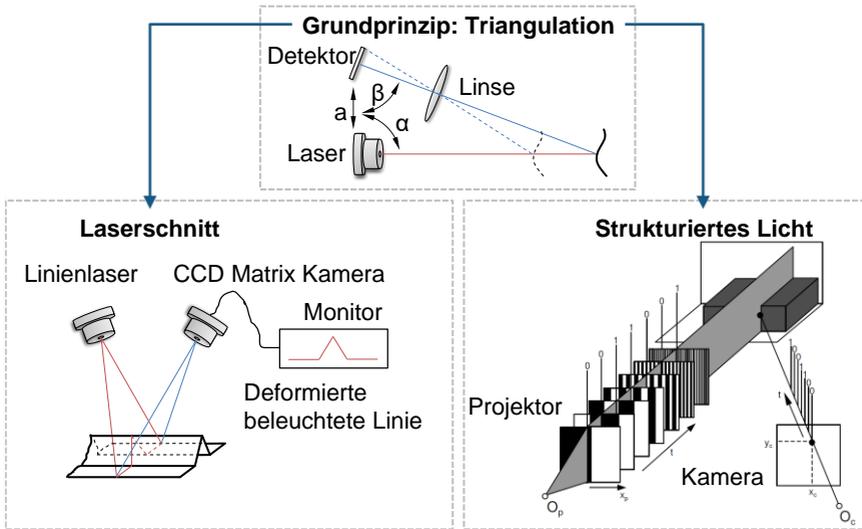


Abbildung 3-9: Grundprinzipien der 3D-Oberflächenerfassung

Eine weitere Möglichkeit der Digitalisierung bieten Tomographische Verfahren, welche das Objekt mit Röntgenstrahlung beleuchtet. Die dabei entstehenden 2D-Projektionsdaten können zu Voxelmodellen umgerechnet werden und daraus wiederum ein Oberflächenmodell in Form von Polygonmodellen erzeugt werden. Hierbei können grundsätzlich Genauigkeiten von wenigen Mikrometern erreicht werden und auch Baugruppen mit unterschiedlichen Dichtewerten der Einzelteile detektiert werden. Nachteilig der kommerziell verfügbaren Industrie-CT-Anlagen sind der beschränkte Scanraum, die Baugröße der Scaneinheit, die benötigte Abschirmung vor Strahlung und die hohen Anschaffungskosten zu nennen.

Für den Geometrievergleich ist zunächst eine Registrierung der CAD-Daten zu den Punktwolken elementar, um gezielte Aussagen treffen zu können. Hierbei stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung: 3-Punkt-Methode (anhand von mindestens drei Punkten, welche nicht auf einer Geraden liegen dürfen), mittels Standard-Geometrielemente (z.B. Kugel, Ebene, Zylinder), Best-fit-Ausrichtung oder der 3-2-1-Methode (Sequenzielle Transformation mit Ausrichtung an einer, einer Linie und eines einzelnen Punktes). [17]

Mittels der Inhalte der Wissensbasis, bestehend aus Expertenwissen, bereits vorhandenen Vergleichen und empirischen Versuchen, werden diese Abweichungen auf ihre Relevanz für die Aussagekraft der durchgeführten Produktsimulation evaluiert. Zeigt sich dabei, dass eine die vorhandenen Differenzen zwischen CAD-

Modell und realer Form Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse haben könnten, wird eine Aufbereitung vorgenommen, um diese in die Analyse mit einzubeziehen damit das tatsächliche Betriebsverhalten besser nachgestellt werden kann.

3.7 Qualitätssicherung von Simulationen

Zur Sicherung der Simulationsqualität hat der Produktentwickler mehrere Schritte zu beachten. Grundlegende Probleme können durch das Befolgen einer einfachen (Checkliste ) vermieden werden. Die Checkliste adressiert sowohl das Preprocessing, als auch das Postprocessing, wobei der Hauptfokus auf dem Preprocessing und damit dem Aufbau der Simulation liegt. Das reine Solving geschieht für den Anwender meist im Hintergrund und wird in der Checkliste deshalb nicht berücksichtigt.

3.7.1 Planen und Konkretisieren der Berechnung

Der erste und damit wichtigste Punkt ist das Verständnis des Problems, also welche Funktion bzw. welcher Lastfall betrachtet wird und zu welchen Problemen diese Belastung führen kann. Anschließend soll geprüft werden, ob bereits ähnliche dokumentierte und verifizierte Rechnungen existieren, an denen sich der Anwender hinsichtlich der Eingangsparameter, Modellierung und Ausgabeanforderungen orientieren kann. Nun folgt die Definition einer geeigneten Verifizierungsstrategie für die Simulation. Die Verifizierungsstrategie kann Experimente, analytische Vergleichsrechnungen und Konvergenzstudien enthalten.

Aus der Problemstellung müssen Eingabegrößen, Lagerung und Belastungen definiert und beschafft werden. Wenn alle benötigten Daten beschafft worden sind, müssen die Eingabeparameter in ein zuvor definiertes konsistentes Einheitensystem (beispielsweise to/mm/s, um Spannungen in der Einheit MPa bzw. N/mm² zu erhalten) umgewandelt werden, damit das einheitenlose FE-System korrekte Simulationen erst ermöglicht. Anschließend wird empfohlen zu prüfen, in welche Risikokategorie nach NAFEMS QSS die Simulation fällt und je nach Ergebnis zu entscheiden, welche Qualifikation der jeweilige Berechner haben sollte, um die Simulation durchführen zu dürfen. In Hinblick auf Ressourceneffizienz soll nun bedacht werden, ob eine Vereinfachung des Problems möglich ist. Bei dieser Prüfung spielen Aspekte wie Vereinfachungen hinsichtlich der Geometrie und physikalischer Effekte eine große Rolle. Liegen die zu erwartenden Spannungen im linear elastischen Bereich, sollten sogenannte 1 - Lastfälle mit Superposition im Postprocessing in Erwägung gezogen werden um den Simulationsaufwand bei mehreren Lastfällen zu reduzieren. Eine finale Entscheidung, ob dies möglich ist, kann nur soweit möglich nach einer Handrechnung, die nach dem Vier-Augen-Prinzip zu überprüfen ist, getroffen werden.

3.7.2 Preprocessing

Nun folgt das eigentliche Preprocessing. Nach dem Import der Geometrie ist zu prüfen, ob diese fehlerfrei vorhanden ist. Besonders muss geprüft werden, ob alle Flächen geschlossen sind und es nicht zu Überschneidungen kommt. Anhand der definierten Problemstellung soll die Geometrie vereinfacht werden. Ist nur eine grobe Aussage zur Durchbiegung oder dem generellen Spannungsverlauf gewünscht, können nun Radien, Bohrlöcher und andere Features entfernt werden.

Je nach Anforderungen an die Simulation und daraus getroffenen Vereinfachungen wird nun die Geometrie vernetzt. Bei einer Vernetzung mit Schalenelementen müssen ggf. Mittelflächen generiert werden. Die Vernetzung komplexer Bauteile erfolgt nach der einfachen Regel „von klein zu groß“, so dass zuerst kleine komplexe Bereiche vernetzt werden und anschließend die übrigen großen Flächen oder Volumina vernetzt werden. Bei automatischen Vernetzern sollte gerade bei komplexerer Geometrien die Möglichkeit der adaptiven Netzverfeinerung in Erwägung gezogen werden. Jedoch scheitert diese bei Singularitäten wie beispielsweise Lasteinleitungen, Lagerungen und scharfen Kanten, die durch den Benutzer von der adaptiven Vernetzung ausgeschlossen werden müssen.

Nach der Vernetzung ist zu überprüfen, ob doppelte Elemente und Knoten vorhanden sind, um diese ggf. zu entfernen. Nachdem alle offenen Kanten im Bauteil entfernt wurden, ist die Elementqualität zu prüfen und ggf. durch Neuvernetzung zu verbessern.

Vor dem Export des Netzes ist zu überprüfen, ob alle Elementeigenschaften wie Material oder Elementdicke zugewiesen wurden. Ein Vergleich des Netzvolumens mit dem des CAD-Teils sollte genutzt werden, um grobe Fehler durch Vereinfachung und Diskretisierung zu detektieren und zu vermeiden. Bevor die Simulation gestartet wird, sollten alle Lagerungen, Belastungen und Kontakte überprüft werden. Es sollte besonderes Augenmerk auf die korrekte Zuweisung gelegt werden, sodass die Kräfte und Lagerungen an den richtigen Knoten angreifen und der Realität entsprechen. Außerdem muss überprüft werden, ob die Ausgabeanforderungen korrekt gesetzt und irrelevante Daten zumindest auskommentiert wurden, damit die Simulation nicht gestört werden kann.

3.7.3 Postprocessing

Nach der Durchführung der Simulation ist erst die Verformung auf Plausibilität zu überprüfen. Das Ergebnis sollte zumindest qualitativ den Erwartungen entsprechen. Anschließend ist die Plausibilitätskontrolle auch für die finalen Ausgabegrößen wie Spannungen oder Kräfte durchzuführen. Hier sollte ein Vergleich mit der zuvor definierten Verifizierungsstrategie angestellt werden.

Anschließend sollte nach genauer Beurteilung aller Unstetigkeiten die Simulation anhand der zuvor definierten Strategie verifiziert werden. Falls die geforderten Erkenntnisse aus der Simulation geliefert werden konnten, muss die Simulation nach dem Vier-Augen-Prinzip von einer unabhängigen Person bestätigt werden. Erst danach muss die Simulation und ihre Ergebnisse dokumentiert, gesichert und gegen unbefugten Zugang geschützt werden. Um Umformsimulationen durch Messwerte zu verifizieren, wurde eine spezielle (Schnittstelle ) entwickelt, welche aus Ergebnisdateien mit verformtem Netz und Dickeninformationen Punkte auf der Bauteiloberfläche erzeugt. Die Bedienung dieser Schnittstelle erfolgt mittels einer Excel Maske, die in Abbildung 3-10 dargestellt ist.

Tool to create points at both outer surfaces of LS-DYNA quad elements (at centre point) defined by thickness

Directory input file	D:\test\NODES\TestTool\XY-1\
Name of input file (dynain)	dynain_case1.txt
Directory output file (Elements,Thickness and Node coordinates)	D:\test\NODES\TestTool\XY-1\
Name of result file (Elements, Thickness and Node coordinates)	inter_resultC1.txt
Directory output file (Points 1. surface)	D:\test\NODES\TestTool\XY-1\
Name of result file (Points 1. surface)	C1_result_1s.txt
Directory output file (Points 2. surface)	D:\test\NODES\TestTool\XY-1\
Name of result file (Points 2. surface)	C1_result_2s.txt



Abbildung 3-10: Eingabemaske Schnittstelle

Der Nutzer muss in den ersten beiden Feldern den Ordner und den Dateinamen der Eingabedatei angeben. In der 3. und 4. Zeile wird der Speicherort einer Datei mit den Zwischenergebnissen zur Kontrolle angegeben. In der 5. und 6. bzw. 7. und 8. Zeile werden die Speicherorte der Punkte der Ober- und Unterseite definiert. Die Ordnerbezeichnungen müssen mit einem Backslash (\) abgeschlossen werden.

Bei fehlenden Dateinamen oder Ordnernamen der Ergebnisdateien werden diese nach einer Warnung mit Standardwerten befüllt. Bei identischen Einträgen von Ergebnisdateien oder Eingabe- und Ergebnisdateien werden diese auch nach einer Warnung mit Standardwerten überschrieben.

Wenn keine Knoten in der Eingabedatei gefunden wurden, wird das Programm nach einer Fehlermeldung abgebrochen. Falls alle Felder korrekt befüllt wurden, liefert die Zwischenergebnisdatei zur Kontrolle zeilenweise die Element-ID, die Elementdicke und die x-, y- und z-Koordinate aller Elementknoten in Reihenfolge ihrer Spezifizierung in der Eingabedatei. Die einzelnen Einträge sind mit einem Leerzeichen getrennt und ein Komma fungiert als Dezimaltrennzeichen.

Die Ergebnisdateien der Ober- und Unterseite enthalten zeilenweise die Punkte mit x-, y- und z-Koordinate getrennt durch ein Komma und mit einem Punkt als Dezimaltrennzeichen. Die Ergebnisdateien können nun in ein Vergleichsprogramm z.B. „PolyWorks“ importiert werden. Damit ist es möglich, die simulierte Geometrie mit den Messwerten zu vergleichen und Aussagen zur Ergebnisreicherung zu machen.

3.8 Situative Bereitstellung von Simulationswissen und –methoden

Neben den anwendungsorientierten Methoden der Abschnitte 3.2 bis 3.7 wurden die methodischen Grundlagen für den Einsatz von Simulationen im Produktentwicklungsprozess entwickelt. Ziel ist hier stets die situative Bereitstellung von Simulationswissen und –methoden. Dies beinhaltet einerseits die Strukturierung von Methoden, Prozessen und Wissen in Abschnitt 3.8.1 in Form eines Methodenbaukastens und einer Methodik zur Prozessstandardisierung mit Einbindung von Absicherungsmethoden. Andererseits fokussiert 3.8.2 die Kommunikation bezüglich der prozessorientierten Anforderungen zwischen Konstruktions- und Berechnungsabteilungen. Zentraler Bestandteil hierfür ist der modulare Simulationsauftrag mit inbegriffenem Wiederverwendungskonzept.

3.8.1 Methodenbaukasten zur systematischen Lösungsabsicherung

Die Ansätze in diesem Abschnitt haben das Ziel, die Anwendung von Simulationen im Unternehmen zu analysieren und ihre Integration im Produktentwicklungsprozess zu optimieren. Dies erfolgt in vier Phasen:

Phase 1: Baugruppen und Bauteile mit Optimierungspotential im Entwicklungsprozess identifizieren: Festlegung Fokus der Optimierung

Phase 2: Ist-Zustand aufnehmen: Erfassung des aktuellen Entwicklungsprozesses

Phase 3: Ist-Zustand analysieren: Analyse der Erfolgsfaktoren für die Simulationsanwendung

Phase 4: Standardprozess definieren: Definition eines neuen Entwicklungsprozesses, in dem angegeben wird, wann Simulationsmethoden in Frage kommen, welche Methoden in Frage kommen und wo Informationen darüber verfügbar sind. Da Simulationen als Absicherungsschritte in der Entwicklung angewendet werden, können sie nicht getrennt von anderen Absicherungsmethoden betrachtet werden. Deswegen werden in dieser Phase alle Absicherungen in der Entwicklung betrachtet wie z.B. Vier-Augen-Prinzip, internes Benchmarking oder analytische Berechnungen.

Methodenbaukasten

Um insbesondere weniger erfahrenen Mitarbeitern zum richtigen Zeitpunkt die richtigen Methoden zur Verfügung stellen zu können, ist ein systematisches Ordnungsschema nötig. Hierzu wurde ein Framework entwickelt, das aus drei zentralen Elementen besteht: einer Nutzerschnittstelle, dem Methodenbaukasten und einer Wissensbasis. Aus einem zuvor strukturierten Entwicklungsprozess (beispielsweise per SIPOC-Methode oder BPMN-Darstellung) wird der Nutzer situativ über die Nutzerschnittstelle in den Methodenbaukasten geleitet. Entsprechend des jeweiligen Ziels in der aktuellen Entwicklungssituation werden Methoden angeboten, deren zugeordnete Inhalte der Wissensbasis bereitgestellt werden (Abbildung 3-11).

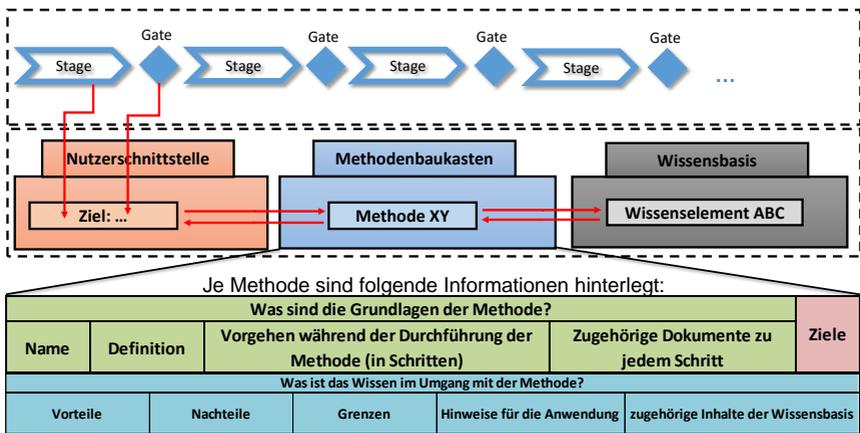


Abbildung 3-11: Framework zur systematischen Lösungsabsicherung

Zugehörig zu jeder Methode enthält der Methodenbaukasten Informationen zu den Grundlagen der Methoden, ihrem Ziel und dem vorhandenen Wissen im Umgang mit der Methode. Im Methodenbaukasten ist es möglich, sowohl die im Verbund entwickelten Methoden der einzelnen Teilprojekte und Arbeitskreise auszuwählen, als auch diesen zur Strukturierung und Dokumentation der in den Unternehmen vorhandenen Methoden zu nutzen. Hierfür können unternehmensinterne Methoden in die entwickelte Struktur eingepflegt und Unternehmensprozessen zugeordnet werden.

Neben der situativen Bereitstellung von Methoden und Wissens-elementen ermöglicht der Methodenbaukasten somit eine transparente Dokumentation von Simulationsprozessen und zugehörigem -wissen.

Die Strukturierung erfolgt dabei auf drei Ebenen: Auf der allgemeinen Ebene werden Methoden generisch beschrieben. Wurden diese bereits für einen konkreten Anwendungsfall wie beispielsweise ein Fertigungsverfahren spezifiziert, erfolgt die genauere Beschreibung der angepassten Methode auf der Anwendungsebene. Liegt darüber hinaus ein konkretes Beispiel vor, an dem die Methode erfolgreich angewendet wurde, so wird dieses auf der projektspezifischen Ebene inklusive der zugehörigen Vorlagen und Outputs als Best-Practice dokumentiert.

Zentraler Mehrwert liegt somit zum einen im Aufzeigen zur Verfügung stehender Methoden, zum anderen in der Ablage von Best-Practices.

Methode zur Prozessstandardisierung mit Absicherungsmethoden

Die Methode zur *Prozessstandardisierung mit Absicherungsmethoden*⁷ wird in der Phase 3 (Ist-Zustand analysieren) und 4 (Standardprozess definieren) des allgemeinen Vorgehens angewendet. Die Methode orientiert sich am Stage-Gates Ansatzes nach Cooper [3], um Absicherungen auf drei Ebenen umzusetzen: am Ende von Prozessphasen, an jedem Gate und nach jedem Prozessschritt [Sch16]. Eine Darstellung des Entwicklungsprozesses aus Phase 2 (Ist-Zustand aufnehmen) muss vorliegen. Die direkte Erfassung der Prozesse durch Mitarbeiter kann z.B. durch die Nutzung des SIPOC (Supplier-Input-Process-Output-Customer)-Modells stattfinden. Danach soll der gesamte Entwicklungsprozess als Workflow dargestellt werden, beispielsweise unter Anwendung von BPMN (Business Process Model and Notation).

Mit dem dargestellten Entwicklungsprozess als Ausgangssituation erfolgt die Methode zur Prozessstandardisierung in zwei Schritten:

Schritt 1: Ist-Zustand analysieren

Die Ausgangssituation bezüglich Absicherungen im Produktentwicklungsprozess (PEP) wird mithilfe einer Tabelle erfasst, in der Absicherungskriterien und Absicherungsmethoden für jeden Prozessschritt beschrieben werden (Tabelle 3-1). Abhängigkeiten zwischen den Schritten werden auch anhand der Kritikalitäten dokumentiert. Unter Kritikalität wird in diesem Zusammenhang die Abhängigkeit der Ergebnisse zwischen den einzelnen Prozessschritten verstanden. Eine hohe Kritikalität bedeutet dementsprechend, dass das Ergebnis eines Prozessschrittes für mehrere Nachfolge-Prozessschritte benötigt wird oder, dass viele Ergebnisse an einem Prozessschritt zusammengeführt werden. Andere Einflussfaktoren für die Positionierung von Gates werden basieren auf der BPMN- Darstellung des Ist-

Prozesses von Experten im Unternehmen abgeschätzt und in eine Bewertungstabelle (Tabelle 3-1) eingetragen.

Tabelle 3-1: beispielhaft ausgefüllter Ist-Entwicklungsprozess

Ist-Entwicklungsprozess						
Prozessschritt	Ziel	Output	Kritikalität für	%	Absicherungsmethode	Absicherungskriterium
Konzept detaillieren	Baugruppe um Verschraubung und Lager erweitern	erweiterte CAD-Geometrie	Digital Mock-Up	100	4-Augen-Prinzip	Erfahrungswert
					Digital Mock-Up (im nächsten Schritt)	keine Kollision der Bauteile
Digital Mock-Up	Bauraumüberprüfung		-	-	4-Augen-Prinzip	Erfahrungswert
...

Basierend auf den erfassten Informationen wird der Prozess in Stages und Gates eingeteilt. Ein Gate ist ein Entscheidungs- und Kontrollpunkt, an dem die Qualität anhand eindeutiger und messbarer Kriterien mit den Anforderungen verglichen wird. Die Bewertungstabelle dient als Basis für die Positionierung von Gates, in der die erfassten Faktoren verglichen werden. Als mögliche Gates werden Prozessschritte mit einem hohen Wert der Einflussfaktoren (in der Reihenfolge von Tabelle 3-2: ja, stark, lang, stark) betrachtet. Sobald einer der Faktoren hoch ist, kann die Positionierung eines Gates erwogen werden. Unternehmensexperten treffen mit der Tabelle als Diskussionsgrundlage und anhand ihrer Erfahrung die finale Entscheidung bezüglich der Positionierung der Gates.

Tabelle 3-2: Bewertungstabelle der Einflussfaktoren für die Positionierung von Gates

Prozessschritt	Faktoren				Entscheidung
	Wird Anforderung überprüft? [ja/nein]	Kritischer Prozessschritt [gering, mittel, stark]	Länge zum letzten Gate [kurz, mittel, lang]	Einflüsse von Prozessen anderer Bauteile [kein, mittel, stark]	
1					
2					

Schritt 2: Standardprozess mit Absicherungsmethoden definieren

Neue Absicherungskriterien und die demensprechenden Absicherungsmethoden werden für jeden Schritt und für jedes Gate des neuen Prozesses definiert. Die Absicherungsmethoden werden im Methodenbaukasten betrachtet und ausgewählt. Neue Entwicklungsmethoden mittels Simulationen werden auch aus dem Methodenbaukasten in Abgleich mit dem Ziel des Schrittes bestimmt. Damit wird die rechte Seite von Tabelle 3-3 befüllt.

Tabelle 3-3: Analyse Absicherungen und Ableitung Standardprozess

Ist-Entwicklungsprozess						Standardprozess			
Prozessschritt	Ziel	Output	Kritikalität für	%	Absicherungsmethode	Absicherungskriterium	Gate	Neues Absicherungskriterium	Neue Absicherungsmethode
...

Die Auswahl von Absicherungsmethoden aus dem Methodenbaukasten erfolgt mit der Bestimmung der Randbedingungen für die Durchführung der Methode. Die Randbedingungen sind die Art der Absicherung (des Konstruktionsmodells, des Simulationsmodells, der Ergebnisse, der Input), die vorhandene Erfahrung und Zeit für die Durchführung der Methode und die verfügbaren Personen im Team. Die Methoden des Methodenbaukastens werden charakterisiert (siehe Tabelle 3-4) und mit den passenden Randbedingungen verbunden. Durch die Randbedingungen und die Charakteristika der Methoden wird die Auswahl eingeschränkt und es werden Methoden aus dem Methodenbaukasten vorgeschlagen. Der Anwender wählt eine (oder mehrere) Methode aus den Vorschlägen aus. Die Anwendung von Absicherungsmethoden im Entwicklungsprozess kann fest oder flexibel sein.

Tabelle 3-4: Charakteristika der Absicherungsmethoden

Charakteristika der Absicherungsmethode								
Absicherungsmethode	Art der Absicherung	Ziel	Notwendige Erfahrung für die Durchführung	Aufwand	Notwendige Personen	Grad der Systematik	Komplexität	Grad der Subjektivität
Analytische Berechnung	Konstruktionsmodell	Validierung durch eine analytische Berechnung der Zielgröße	Gering	Gering	1	Mittel	Mittel	Gering
Fertigungsgerechte Strukturoptimierung	Konstruktionsmodell	Topologieoptimierung und Fertigbarkeitsanalyse	Mittel	Mittel	1	Hoch	Mittel	Gering
...

Die festen Methoden werden in den blauen Spalten von Tabelle 3-3 eingetragen. Für die Schritte mit Flexibilität bezüglich der Absicherung (z.B. nicht an Gates) werden die Absicherungskriterien in der Tabelle definiert und die Methodenauswahl kann im Entwicklungsprozess situationsabhängig stattfinden.

3.8.2 Prozessorientierte Anforderungen im Simulationsmanagement

Die Analyse der prozessorientierten Anforderungen ist einer der wichtigsten Aktivitäten bei der Durchführung von Simulationen. Der daraus resultierende Fokus dieses Abschnitts führt zur Erstellung eines Konzeptes zur Erfassung, Erhebung und Wiederverwendung von internen Anforderungen, die im Simulationsprozess der virtuellen Produktentwicklung formuliert und ausgetauscht werden. Die Effizienz im Simulationsprozess kann dabei durch eine umfassende Erfassung von simulationsorientierten Anforderungen aus der Konstruktionsabteilung sowie ihrer verlustarmen Übermittlung an die Berechnungsabteilung gesteigert werden.

Da diese Anforderungen eine Aussage über die zu erbringende Leistung eines Produktes, Systems oder Prozesses sowie über zu erfüllende Eigenschaften liefern, müssen sie vollständig erfasst und eindeutig übermittelt werden. Gleichzeitig soll der Aufwand sowohl für den Verfasser als auch für den Empfänger von Anforderungen möglichst gering gehalten werden. Grundsätzlich werden die Anforderungen in natürlicher Sprache verfasst. Sie ist die gemeinsame Sprache zwischen Konstruktions- und Berechnungsingenieur und dient als eine deklarative und anwendungsorientierte Spezifikationssprache, um die Anforderungen an das zu entwickelnde System zu ermitteln, zu strukturieren und zu prüfen. Aufgrund der Interpretationsfreiheit von Anforderungen, die in der natürlichen Sprache formuliert werden, kann es zu Missverständnissen zwischen dem Verfasser und Empfänger kommen. Um dieses Problem zu vermeiden, sollen Anforderungsschablonen den Verfasser bei der Formulierung von Anforderungen unterstützen. Die Anwendung von Anforderungsschablonen ist dabei mit dem Berechnungsauftrag als zentralem Dokument im Simulationsmanagement eng verbunden.

Modularisierter Berechnungsauftrag

Die Grundlage eines methodischen Umgangs mit Anforderungen bei der Durchführung von Simulation im Produktentwicklungsprozess bildet der Berechnungsauftrag. Die Anpassung der von Rupp et al. [10] vorgeschlagenen Vorgehensweise mündet in der prototypischen Umsetzung, die hier vorgestellt wird.

Der Berechnungsauftrag besteht aus mehreren vordefinierten Abschnitten wie Projektzuordnung, Art der Berechnung, Ersteller, Empfänger, Problembeschreibung oder einem Feld für Kommentare (Abbildung 3-12).

Berechnungsauftrag			
Die Festigkeitsrechnung sollte zeigen, ob der Querlenker einer extremen Bremsung standhält.			
Dokumentitel:	Querlenker-Stahlguss	Auftragsdatum:	03.11.2016
Stichwörter:	Festigkeitsrechnung	GS-60	Querlenker-Stahlguss-extr_Bremung
	FEM-Berechnung	Lastfall 1 - Extreme Bremsung	32
Projektname:	Querlenker-Stahlguss-extr_Bremung		
Projektnr.:	32		
Zuordnung Baugruppe:	Fahrwerk		
SAP Nr.:	10002204-32		
SAP Name:	Querlenker-Stahlguss		
Art der Berechnung:	Festigkeitsrechnung	Spezifikation:	Querlenker-Lager
Simulationstyp:	FEM-Berechnung	Zieldokument:	Entscheidungsunterlagen
Bearbeiter/in:	Mustermann	Zieltermin:	31.12.2016
Teamleiter/in:	Musterfrau	Empfänger:	Musterkollege
Abteilung Auftraggeber:	Konstruktion	beteiligte Bauteile:	Querlenker
CAD-Datei:	Querlenker_Stahl.cad	SH-Nummer:	62794-01
Einbausituation:		CAD-File:	
Anwendungsfall:	extreme Bremsung		
Verifikation:	Mustermann	Validierung	Dauertest
Kommentare:	NA		

Abbildung 3-12: Berechnungsauftrag (angewendet auf das Beispielbauteil aus Abschnitt 5)

Um aus dem Berechnungsauftrag die Anforderungen anhand von Anforderungsschablonen abzuleiten, werden „muss“- und „soll“-Felder definiert. Die „muss“-Felder sind obligatorisch vom Auftraggeber (Konstruktionsabteilung) auszufüllen, damit eine gültige Anforderung formuliert werden kann. Durch den Einsatz von

„muss“-Feldern soll gewährleistet werden, dass die Anforderungen bezüglich Eindeutigkeit, Korrektheit, Konsistenz und Vollständigkeit einwandfrei formuliert werden. Um die Zusammenhänge innerhalb des Projektes oder zwischen den Projekten besser zu erläutern, können weitere Felder („soll“-Felder) ausgefüllt werden. Dadurch kann der Auftragnehmer (Berechnungsabteilung) vor allem bei neuen Projekten einen besseren Überblick über konkrete projektspezifische Relationen und Erwartungen bezüglich der Ergebnisse der Simulation bekommen. Gleichzeitig können durch die Angabe der „soll“-Felder Verfolgbarkeit, Überprüfbarkeit sowie Modifizierbarkeit realisiert werden (siehe auch Abbildung 5-3 des Anwendungsbeispiels).

Einsatz von Anforderungsschablonen

In diesem Abschnitt werden die Prinzipien der Formulierung von Anforderungen anhand von Schablonen nach Rupp et al. [10] erläutert. Mit dem Einsatz von Anforderungsschablonen soll ein situationspezifischer Umgang mit Anforderungen möglich werden. Gleichzeitig sollen auch die Erwartungen bezüglich der Ergebnisse eindeutig beschrieben werden. Dabei liegt der Fokus sowohl auf der Korrektheit der syntaktischen Formulierung der Anforderungen als auch auf deren Vollständigkeit. Mithilfe von Anforderungsschablonen können vollständige, eindeutig interpretierbare Anforderungen konstruiert und die Nachteile der Formulierung in natürlicher Sprache behoben werden. Die Formulierung von Anforderungen mithilfe von Schablonen erfolgt in den unten beschriebenen Schritten (Abbildung 3-13).



Abbildung 3-13: Elemente einer Anforderungsschablone nach Rupp et al. [10]

- Identifizierung des Prozesses

Die Konstruktion einer Anforderung beginnt mit der Identifizierung des Systems, für das die Anforderung gelten soll. Für die Erstellung einer generischen Schablone kann für *<das System>* ein Platzhalter eingesetzt werden.

- Festlegen der Verbindlichkeiten/Wichtigkeit

Die Verbindlichkeit einer Anforderung wird durch Schlüsselwörter (muss, soll und wird) festgelegt. Diese Ausdrücke sollen helfen, den verpflichtenden Charakter einer Anforderung zu beschreiben. Dem Empfänger der Anforderung wird dadurch der Schwerpunkt seiner Tätigkeit vermittelt. In einem Dokument können mehrere Anforderungen mit unterschiedlichen Verbindlichkeiten aufgelistet werden.

- Charakterisierung der Funktionalität

Die Funktionalität steht im Mittelpunkt der formulierten Anforderungen und wird mit einem Prozesswort beschrieben, das konkrete Aktivitäten charakterisiert.

- Identifizierung des Objektes

Die gewünschte Funktionalität bezieht sich auf ein konkretes Berechnungsobjekt, das durch die Anforderung definiert wird.

- Formulierung von Bedingungen

Die bereits charakterisierte Funktionalität kann nur unter bestimmten Bedingungen ausgeführt werden. Die Bedingungen beschreiben die gewünschte Funktionalität.

Der modularisierte Berechnungsauftrag nutzt diese Form der Anforderungsformulierung, um den zentralen Arbeitsauftrag an eine Simulation zu verdeutlichen (erste Zeile in Abbildung 3-12).

Wiederverwendungskonzept

Im Wiederverwendungskonzept werden die Wissensartefakte sowohl aus den vorangegangenen Prozessen, als auch aus den laufenden oder abgeschlossenen Projekten berücksichtigt. Dies führt zu einer effizienten Handhabung von Prozess- und Produktdaten.

Im Fokus der Betrachtung liegt die Wiederverwendung von prozessorientierten Simulationsanforderungen. Dieser Prozess umfasst sowohl die Identifizierung von konkreten Anforderungen als auch von bestehenden Infrastrukturen, Stakeholdern und Schnittstellen zum firmeninternen Produktentwicklungsprozess.

Das an die simulationsorientierten Anforderungen angepasste Wiederverwendungskonzept soll die Effizienz bei der Durchführung von Simulationen basierend auf einem modularisierten Berechnungsauftrag steigern. Die Wiederverwendung soll darauf beruhen, dass die in Unternehmen bereits vorhandenen Wissensartefakte zum richtigen Zeitpunkt, in der richtigen Form und dem richtigen Wissensverbraucher bereitgestellt werden. Die Bereitstellung orientiert sich an der vorherigen Dokumentation und Auswertung von erfasstem Wissen. In diesem Kontext können die Simulationsprozesse mithilfe von Wissenswiederverwendung bereits in den früheren Phasen der virtuellen Produktentwicklung optimiert werden. Diesbezüglich soll das Wissen für die Wiederverwendung strukturiert und mithilfe von Zielvorgaben und Anforderungen attribuiert in der Wissensablage abgespeichert werden. Die attribuierten Wissensinhalte werden dann in einer abteilungsübergreifenden Ablage gespeichert, sodass diese mithilfe von Anforderungsspezifikationen, d.h. als Gesamtheit an relevanten Anforderungen für die Durchführung von Simulation, situationsbedingt abgerufen werden können. Der Wiederverwendungsmethodik liegt die Anforderungsschablone und der modularisierte Berechnungsauftrag zugrunde (Abbildung 3-14).

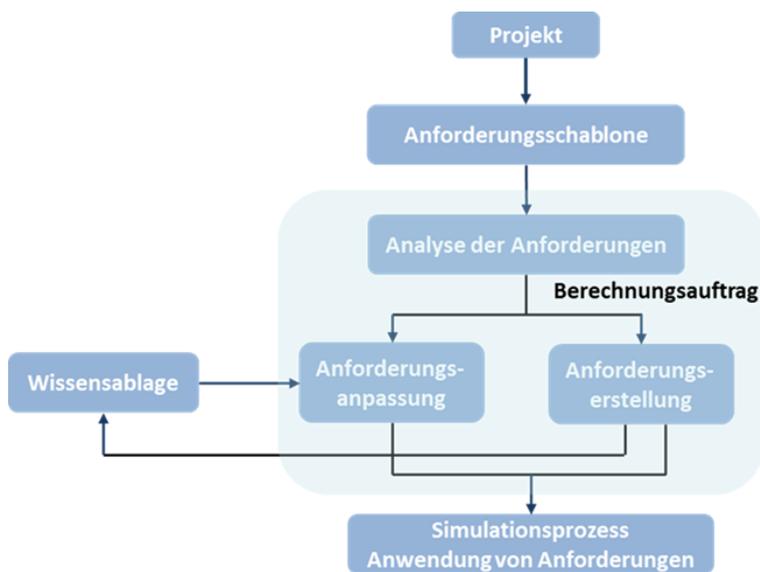


Abbildung 3-14: schematische Darstellung des Wiederverwendungskonzepts

3.9 Umsetzung im Engineering Knowledge Manager

Als Schnittstelle zwischen den Arbeitskreisen wird durch den AK Wissensmanagement ein zentrales, wissensbasiertes Framework für Produkt- und Prozesssimulationen entwickelt. Gemäß der Definitionen von Wissensmanagement nach [8],[10],[18] dient dieses Framework der effizienten Akquisition, strukturierten Sicherung und gezielten Bereitstellung des vorhandenen und benötigten Simulationswissens für den Verbund. Das Framework ist im webbasierten SPDM-System (Simulationsprozess- und Simulationsdatenmanagement) ANSYS EKM implementiert. Weitere mögliche Umgebungen für die Umsetzung des Frameworks sind z. B. MSC SimManager, DS Simulia, Siemens PLM Software oder PD Tec SimData Manager. Die Wissensbasis des Frameworks ist an die verteilten Entwicklungsumgebungen der Forschungs- und Industriepartner sowie an die Softwaredemonstratoren des Verbunds wie z. B. das FEA-Assistenzsystem angebunden. Zudem werden übergeordnete und durch FORPRO² unterstützte Konstruktions- und Berechnungsprozesse im Framework abgebildet, um eine situative Bereitstellung der im Verbund erarbeiteten Methoden und der zugehörigen Wissensinhalte (wie z. B. Regeln, Kurvenfunktionen oder Leitfäden für die Erstellung von strukturmechanischen Analysen) zu ermöglichen. Zudem werden für die Methoden und Inhalte in der Wissensbasis Referenzen zu Projekten und Bauteilen, die jeweiligen Anwendungsbereiche, Methodenbeschreibungen (z. B. Definitionen, Ziele, Grenzen, Vor- und Nachteile) und die zugehörigen Prozessschritte im PEP als spezifische Metadaten (Kennzeichnung der Dateien in der Wissensbasis durch Annotationen) angehängt. Die Befüllung des Frameworks erfolgt durch alle Teilprojekte des Verbunds. Dabei ist eine Betrachtung auf drei Abstraktionsebenen möglich [Car16],[Kes15b],[Kes16a],[7]: Die projektspezifische Ebene (Bezug der Methoden auf konkrete Projekte und Bauteildemonstratoren), die Anwendungsebene (Unterscheidung der Methoden bzgl. der Anwendungsbereiche, ohne Bezüge zu konkreten Projekten oder Bauteildemonstratoren) und die allgemeinen Methodenebene (übergeordnete Methoden, die nicht bzgl. festgelegter Anwendungsbereiche oder spezifischer Projekte zu untergliedern sind). Nähere Informationen zu der Strukturierung des Frameworks finden sich in Abschnitt 3.8. Außerdem werden die zugehörigen Softwaredemonstratoren und Konzepte der Teilprojekte (Simulationsbausteine) angegeben, in denen die Methoden zum Einsatz kommen. Beispiele sind das FEA-Assistenzsystem (siehe Abschnitt 3.4) oder der modularisierte Simulationsauftrag (siehe Abschnitt 3.8). Für die Simulationsbausteine werden ebenfalls die grundlegenden Ziele und Vorgehen definiert.

Um die in EKM abgebildeten Prozesse auszuführen, werden zunächst die Ziele vom Anwender aus der im Framework vorhandenen Übersicht ausgewählt und anhand der Angaben ein entsprechender Prozessschritt eines Simulationsbausteins auf der allgemeinen Ebene aufgerufen. In Abbildung 3-15 sind als Beispiel die Simulationsprozesse des FEA-Assistenzsystems in EKM dargestellt. Durch dieses Assistenzsystem werden der Aufbau und die Auswertung konstruktionsbegleitender, aussagekräftiger Finite-Elemente-Analysen (FEA) unterstützt und automatisiert [Car16],[Kes15c].

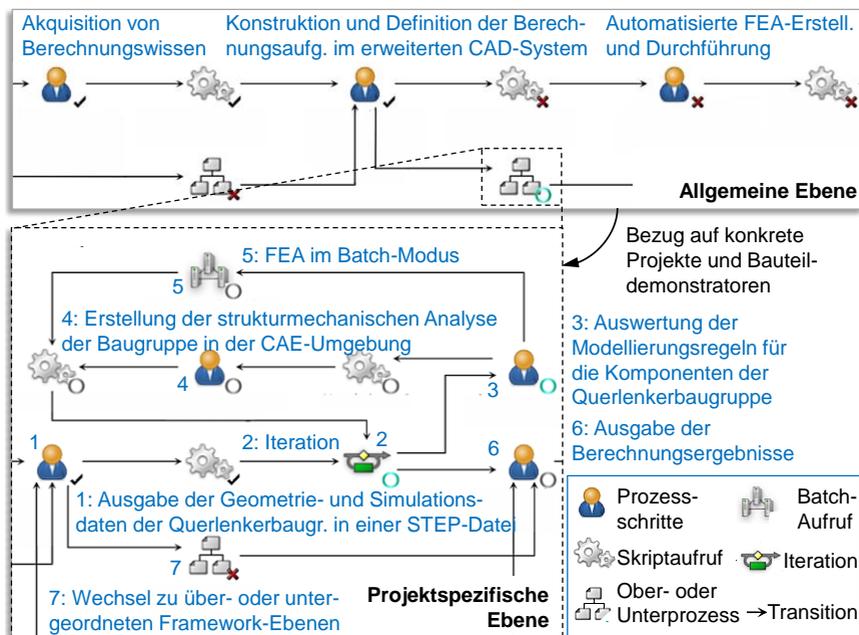


Abbildung 3-15: EKM-Prozesse des FEA-Assistenzsystems nach [Kes15a],[Kes15c]

Auf der allgemeinen Ebene ist der Aufbau strukturmechanischer FEA im Rahmen des Pre-Processings dargestellt (s. oben in Abbildung 3-15). Die mit einem Benutzericon gekennzeichneten Knoten entsprechen Prozessschritten einer Methode. Für jeden Prozessschritt werden Eingangs- und Ausgangsdaten definiert. Zudem können diesen Knoten unterschiedlichen Anwendern an verteilten Standorten zugewiesen werden, die über einen Internetbrowser an den Prozessen teilnehmen. Die Zwischenknoten (als Zahnräder dargestellt) entsprechen skriptbasierten Verarbeitungsschritten im Hintergrund (z. B. die Aktualisierung der Wissensbasis).

Außerdem ist der Wechsel der Framework-Ebenen während der Prozessdurchführung möglich (z. B. Knoten 7). Auf der projektspezifischen Ebene (s. Knoten 2 bis 5 in Abbildung 3-15) werden iterativ, strukturmechanische FEA für eine Querlenkerbaugruppe (auf einem Server im Batch-Modus oder in der CAE-Umgebung von ANSYS Workbench) erstellt und durchgeführt. [Kes15b],[Kes15a]

In Abbildung 3-16 ist die Dialogkomponente zur Navigation durch Prozessschritte für Schritt 3 (vgl. Abbildung 3-15) aufgezeigt. In diesem Schritt werden die übergeordneten Methoden, aktuellen Projekte und Bauteildemonstratoren angegeben. Zudem werden die entsprechende Methodenbeschreibungen (wie z. B. Ziele und Vorteile der Methode) aufgezeigt und die erforderlichen Wissensinhalte bereitgestellt. Des Weiteren lassen sich in diesem Schritt die erforderlichen Geometrie- und Simulationsdaten und resultierenden Skripte abrufen (z.B. CAD-Modelle und APDL-Simulationsskripte für die nachfolgende FEA-Erstellung). Falls auf einer Ebene mehrere Prozessschritte für eine Methode definiert sind, werden die Angaben in der Dialogkomponente entsprechend erweitert. Außerdem können für jeden Prozessschritt neue Wissensinhalte zugewiesen und zukünftig in diesen Schritten abgerufen werden (s. unten in Abbildung 3-16). Die entsprechenden Inhalte werden zuvor durch den Anwender auf den EKM-Server geladen und in der Wissensbasis abgelegt. Hierzu werden vom Anwender die zugehörigen Teilprojekte, Repräsentationsformen der Wissensinhalte (z. B. Abbildung als Regeln oder in Leitfäden) sowie deren Ein- und Ausgabeparameter als Eingaben abgefragt. Diese Inhalte werden zusammen mit den zugehörigen Methoden und Prozessschritten (automatisch bei der Zuweisung der Wissensinhalten in der Dialogkomponente Abbildung 3-16 ermittelt) über Metadaten hinterlegt. Diese Metadaten können auch als Kategorien in direkten Suchanfragen genutzt werden.

Zur Sicherung der sensiblen Inhalte des Verbunds werden Rollen für alle Anwender mit entsprechenden Zugriffsrechten vergeben. Außerdem ist festgelegt, welche Einstellmöglichkeiten für die Nutzer des Frameworks zur Verfügung stehen und welche die Entwickler des Frameworks haben. Bisher wurde das Vorgehen für Nutzer ohne erweiterte Zugriffsrechte dargestellt (vgl. Abbildung 3-16). Durch einen Anwender mit Administratorrechten für EKM lassen sich zusätzlich die Prozesse ändern, neue hinzufügen oder Eingangs- und Ausgangsdaten (nicht nur Wissensinhalte) für einen Prozessschritt festlegen oder einschränken. Darüber hinaus lassen sich einem Anwender weitere Zugriffsrechte zuweisen: Anwender mit Superuser-Rechten können z. B. Kategorien (bzw. Metadaten) bestimmen, die bei der Eingabe von Wissensinhalten zur Auswahl stehen bzw. als zusätzliche

Inhalte abgefragt werden oder neue Datentypen für EKM erstellen. Die letztgenannten Bereiche sollten jedoch nur während der Frameworkerstellung modifiziert werden, bevor das Framework befüllt und eingesetzt wird. Damit liegen alle Simulationsmethoden und die zu Ihrer Nutzung nötigen Hinweise in einer übersichtlichen und geordneten Form vor und stehen für die gezielte Bereitstellung des vorhandenen und benötigten Simulationswissens zur Verfügung.

Framework-Ebene:	Projektspezifische Ebene
Methode auf der allgemeinen Ebene:	Konstruktion und Definition der Berechnungsaufgabe im erweiterten CAD-System
Methode auf der Anwendungsebene:	Auswertung des Berechnungswissens
Ursprung - Projekt:	VW-Konzern – Querlenker PQ35 mit Schraubenverbindungen
Definition:	Anhand der in den CAE-Features hinterlegten semantischen Informationen werden die relevanten Bereiche in den CAD-Modellen der Querlenkerbaugruppe durch das FEA-Assistenzsystem identifiziert und gezielt für aussagekräftige Finite-Elemente-Analysen weiterverarbeitet
CAD-Modell:	/Data/Shared Data/Querlenkerdemonstrator.stp
APDL-Simulationsskript:	/Data/Shared Data/Simulationsskript.inp
Wissensinhalte:	/Data/Shared Data/Wissensbasis/Schraubenabbildung.m /Data/Shared Data/Wissensbasis/Ersatzelementesteifigkeit.m ...
Ziel:	Auswertung des akquirierten Berechnungswissens für die gegebenen Berechnungsaufgaben und CAD-Modelle und Generierung von APDL-Simulationsskripten für die Aufbereitung der CAD-Geometrie und die automatisierte Erstellung aussagekräftiger FEA
Vorteile:	Effiziente Konstruktion verschraubter und geschweißter Blech- und Druckgussbauteile sowie Qualitätssicherung und Beschleunigung wiederkehrende Arbeitsschritte für die FEA-Erstellung in standardisierten und automatisierten Simulationsprozessen ...
<input type="checkbox"/> Batch-Modus	
Wissen hinzufügen:	
<input type="text" value="/Data/Shared Data/Wissensbasis/Vernetzungsregeln.m"/>	
<input type="button" value="Durchsuchen"/>	
<input type="button" value="Vollständig"/> <input type="button" value="Zuweisen"/>	

Abbildung 3-16: Dialogkomponente für einen Prozessschritt in EKM nach [Car16],[Kes15b],[Kes15a],[Kes16a]

4 Methoden und Tools



Methodensteckbrief

Abweichungen bewerten

Definition	Bewertung geometrischer Abweichungen hinsichtlich des Einflusses auf durchgeführte Simulationen
Ziele	Aussage über Abweichungen treffen können, ob diese einen kritischen Einfluss auf die Bauteile/Simulation haben



Methodensteckbrief

Anschnittplatzierung

Definition	Vorschlag für die Platzierung von Anschnittfingern auf Basis der Shortest path-Analyse.
Vorgehen	Auswertung der Anschnittinformationen aus der Analyse mittels Peakfinder.
Ziele	Erster Vorschlag ohne die Notwendigkeit einer Formfüllsimulation.
Vorteile	Reduktion nötiger Simulations-, Interpretations- und Neukonstruktionsschleifen.
Nachteile	Absicherungssimulation und Feinkonstruktion nötig.
Grenzen	Nur für Druckguss-Strukturbauteile anwendbar.
Hinweise	Geometrievorschlag, der eine erste prozesssichere Abschätzung einer Konstruktion ermöglicht.



Methodensteckbrief

Automatische Bauteilerkennung

Vorgehen	Die Punktwolke des FE-Netzes eines zu untersuchenden Bauteils wird über eine Hauptkomponentenanalyse in eine fixe Orientierung gebracht. Anschließend werden die Knoten auf eine Kugeloberfläche mit fixer Anzahl an Detektorpixeln projiziert. Für jeden Pixel ergibt sich eine unterschiedliche Anzahl an projizierten Knoten. Da die Häufigkeiten für jedes Bauteil charakteristisch sind kann eine eindeutige Klassifikation/Bauteilerkennung erfolgen.
Ziele	Klassifikation von Bauteilen innerhalb der FE-Software Umgebung falls semantische Informationen fehlen.
Vorteile	Sehr schnelle Klassifikation von Bauteilen ausschließlich auf Basis eines FE-Netzes. Automatischer Ablauf für die Bauteilerkennung ohne Eingreifen des Nutzers.
Nachteile	Das Training des Künstlichen Neuronalen Netzes benötigt hohe Hardwareanforderungen und sollte von einem Data-Mining Experten durchgeführt werden.



Methodensteckbrief

Bauteilgeometrie importieren

Definition	3D-Geometrie, die in externen Anwendungen erzeugt wurde, wird in den Softwaredemonstrator importiert.
Vorgehen	Geometrie im CAD vorbereiten, exportieren, evtl. aufbereiten, in Demonstrator importieren
Ziele	Geometrie liegt im Softwaredemonstrator zur Analyse vor
Vorteile	externe Geometrie im Softwaredemonstrator verwenden
Nachteile	externe Software zur Geometrieerzeugung nötig
Grenzen	Beschränkung auf bestimmte Datenformate



Berechnungsmodellauflbereitung

Definition	FE-Vernetzung des Modells, Aufbringen von Lasten und Randbedingungen, Festlegen der Berechnungsparameter.
Vorgehen	Import des Modells; FE-Vernetzung mit optimaler Einstellung; Materialdefinition; Randbedingungsdefinition.
Ziele	Berechnungsmodell erstellen.
Vorteile	Optimale Vorbereitung reduziert Fehler und Rechenaufwand.
Nachteile	Großer Wissensbedarf zur optimalen Wahl der Parameter.
Grenzen	Begrenzung auf lineares Materialverhalten und statische Berechnung für Kompatibilität mit den Optimierungssystemen.
Hinweise	Berücksichtigung aller Lastfälle, sonst droht das Versagen des optimierten Bauteils im Betrieb.



Definition	Verknüpfung der CAD-Repräsentation eines Bauteils mit wiederkehrenden Berechnungsmethoden und –modellen.
Vorgehen	Anhand semantischer Informationen wird die Lage von Bauteilen und simulationsrelevanten Bereichen, wie z. B. Kontaktflächen, definiert und zusätzliche Geometrielemente wie Mittelflächen werden für vereinfachte Simulationen in den Features hinterlegt. Diese Bereiche werden durch das Assistenzsystem identifiziert und für lauffähige Simulationen vorbereitet.
Ziele	Gezielte Anwendung des akquirierten Berechnungswissens und automatisierter Aufbau entsprechender Simulationen.
Vorteile	Beschleunigung der Konstruktions- und Simulationsprozesse und Sicherung der Qualität der CAD- und FEA-Modelle.
Nachteile	Beim Aufbau der Modelle müssen die vorhandenen Elemente aus der CAE-Feature-Bibliothek eingesetzt werden.
Grenzen	Beschränkt auf wiederkehrende und standardisierbare Bauteile, Gestaltungselemente, die sich über eine begrenzte Anzahl an Geometrie- und Simulationsparametern definieren lassen.



Checkliste zum Aufbau und Durchführung von Simulationen

Definition	Checkliste zur Unterstützung des Simulationsaufbaus
Vorgehen	kritisches befolgen der Checkliste / evtl. Anpassen an die konkrete Simulation
Ziele	Vermeidung von groben Eingabe- und Auswertefehlern
Vorteile	Gedächtnisstütze zur Vermeidung von offensichtlichen Fehlern
Nachteile	allgemeine Methode, die angepasst werden muss / ersetzt nicht das Mitdenken des Anwenders!
Grenzen	Bietet nur Denkanstöße und keine direkte Lösungsstrategie!



Data-Mining

Definition	Identifikation von übergeordneten Zusammenhängen in Datenbeständen aus bereits durchgeführten und validierten FEA
Vorgehen	Die Geometrie-, Vernetzungs-, Kontakt- und Solvereinstellungen aus vorangegangenen FEA werden in Datensätzen zusammengetragen. Durch die Analyse dieser Datensätze mittels Klassifikation und Regression werden übergeordnete Zusammenhänge in Form von Modellierungsregeln und kontinuierliche Funktionskurven abgeleitet. Durch diese Metamodelle werden für neue Baugruppen und Berechnungsaufgaben geeignete Simulationseinstellungen oder die zu erwartenden Berechnungsergebnisse vorhergesagt.
Ziele	Akquisition von Berechnungswissen für den Simulationsaufbau und die Überprüfung der Ergebnisse auf Plausibilität.
Vorteile	Effiziente Akquisitionsprozesse für den Aufbau einer umfangreichen Wissensbasis als Alternative zu aufwendigen und zeitintensiven Experteninterviews.
Nachteile	Für den Aufbau verlässlicher Vorhersagemodelle müssen umfassende Datenbestände aus vorangegangenen Simulationen vorhanden sein.
Grenzen	Die zu analysierenden Datenbestände müssen in strukturierter Form vorliegen.



Methodensteckbrief

Digitalisierung & Visualisierung

Definition	Erfassung der realen Geometrie eines Bauteils durch einen optischen 3D-Scanner und farbliche Darstellung der Abweichungen zum idealen CAD-Modell
Vorgehen	Prototyp als Punktwolke erfassen und ggf. polygonisieren, Daten auf CAD-Modell registrieren
Ziele	Rückführung der tatsächlichen gefertigten Geometrie in digitale Daten und Ermittlung der Fertigungsabweichungen
Vorteile	Geometriemodelle mit realen Konturen
Nachteile	Prototyp muss vorhanden sein
Grenzen	Genauigkeiten der Digitalisier-Systeme



Methodensteckbrief

FE-Netzadaption

Definition	Adaption von vorhandenen FE-Netzen an die gescannten Daten (Punktwolke oder Polygonmodell)
Vorgehen	Ermittlung der Abweichungen der Oberflächenknoten, Vorlastschritt mit Abweichungen als Verschiebungen, Aufbau der Simulationsdatei mit adaptiertem FE-Netz
Ziele	Erzeugung eines simulationsfähigen Realgeometrie-Modells
Vorteile	Es muss keine FE-Simulation aufgesetzt werden
Grenzen	FE-Netz muss fein genug sein, um die Abweichungen auch abbilden zu können
Hinweise	Sinnvoll, wenn bereits eine FE-Simulation durchgeführt



Methodensteckbrief

Fertigbarkeitsanalyse

Definition	Prüfung der Fertigbarkeit der optimierten Geometrie.
Vorgehen	Einstellung der Programmparameter; Prüfung der Fertigbarkeit; ggf. Rückführung der Ergebnisse in die Konstruktion.
Ziele	Fertigbarkeit des optimalen Bauteils sicherstellen.
Vorteile	Abschätzung der Fertigbarkeit ohne Versuche möglich, direkt im CAD-System und ohne aufwändige Modellaufbereitung.
Nachteile	Nicht alle Prozessparameter und alle Verfahren können automatisiert geprüft werden; eher Abschätzung als Berechnung.
Grenzen	siehe Nachteile
Hinweise	Interpretation der Resultate und folgende Anpassungen der Konstruktion benötigen Erfahrung bzw. Iterationsschleifen.



Methodensteckbrief

Festlegung Randbedingungen

Definition	Definition des Ausgangsmodells und der Randbedingungen wie Lasten & Festhaltungen.
Vorgehen	Analyse der vorherigen Generation des Bauteils, der Anforderungen, des Bauraums sowie der Betriebs- sowie Missbrauchslasten. Daraus Ableitung von FE-Randbedingungen.
Ziele	Nötige Informationen für FE-Analyse erarbeiten.
Nachteile	(Missbrauchs-) Lasten müssen für valide Simulationsergebnisse bekannt sein.
Hinweise	Auf eine möglichst exakte Abbildung der Anforderungen und der Randbedingungen ist zu achten.



Methodensteckbrief

Geometrieanpassung

Definition	3D-Geometrie wissensbasiert ändern
Vorgehen	Geometrie- und Wissensimport, Geometrieanpassung
Ziele	3D-Geometrie wird auf Basis von Wissen fertigungsgerecht gestaltet
Vorteile	frühzeitige Unterstützung mit Fertigungswissen
Nachteile	keine finale Bewertung der Herstellbarkeit möglich
Grenzen	manuelle Anpassung



Methodensteckbrief

Geometrieaufbereitung

Definition	Diskretisierung der Druckgussgeometrie für die Anwendung der Shortest path-Analyse.
Vorgehen	Vernetzung nach der Finiten Differenzen Methode.
Ziele	Anwendung der Shortest path-Analyse.
Vorteile	Bei einer bestehenden Prozesssimulation ist die Bauteilvernetzung direkt nutzbar.
Nachteile	Hoher Aufwand für die Einrichtung einer geeigneten Schnittstelle.
Hinweise	Vernetzung mit 1 mm Elementgröße.



Methodensteckbrief

Hybridmodelle

Definition	Verwendung von flächenrückgeführten Scan-Inserts in den parametrischen Modellen an Stellen komplexer Abweichungen
Vorgehen	Bereiche identifizieren und entsprechende Flächenrückführung v nehmen, Entfernen dieser Bereiche im CAD, Stetige Verbindung von CAD-Geometrie mit Scan-Insert
Ziele	Erzeugung eines simulationsfähigen Realgeometrie-Modells
Vorteile	Modell bleibt weitestgehend parametrisch, Datenmengen bleiben handhabbar und komplexe Abweichungen sind dennoch abbildb
Hinweise	Es muss ggf. von den CAD-Modellen zunächst ein Flächenmode erzeugt werden und anschließend zum Volumenmodell aufbereitet werden.



Methodensteckbrief

Kraftflussanalyse

Definition	Ermittlung beanspruchter Bereiche von der Krafteinleitung hin zur Einspannstelle
Ziele	Identifikation kritischer Bereiche für die Simulation bezüglich geometrischer Abweichungen



Methodensteckbrief

Modellerstellung

Definition	Konstruktion eines CAD-Modells des Bauteils bzw. Bauraums.
Vorgehen	Konstruktion im 3D-CAD-System; Erzeugung von Dateien in gängigen Austauschformaten.
Ziele	Ausgangsmodell konstruieren und bereitstellen.
Vorteile	Optimale Konstruktion des Modells reduziert den Berechnungsaufwand der folgenden Simulationen.
Nachteile	Aufwand der Modellerstellung steigt mit Berücksichtigung der späteren Simulationen.
Hinweise	Unnötige Details zur Reduktion des Aufwands entfernen.



Methodensteckbrief

Neukonstruktion

Definition	(Neu-) Konstruktion des Bauteils auf Basis der Optimierung.
Vorgehen	Analyse der optimierten Geometrie; Aufbau eines parametrischen CAD-Modells; Export des optimierten Bauteils.
Ziele	Optimales Bauteil als parametrisches Modell bereitstellen.
Vorteile	Parametrisches Modell wird erzeugt (Export aus dem Optimierungssystem ermöglicht dies nicht).
Nachteile	Zusätzlicher Aufwand.
Grenzen	Interpretation des Ergebnisses abhängig vom Konstrukteur.
Hinweise	Eine möglichst detailgetreue Umsetzung des Optimierungsergebnisses ist anzustreben.



Methodensteckbrief

Parametrische Korrektur im CAD

Definition	Anpassen eines parametrischen Konstruktionsmodells an die gescannte Geometrie
Ziele	Erzeugung eines simulationsfähigen Realgeometrie-Modells
Vorteile	Modell bleibt parametrisch
Nachteile	Verknüpfung von Parametern aus CAD- und Messsystem
Grenzen	Nur einfache Abweichungen abbildbar, Parameter müssen bereits im CAD-Modell hinterlegt sein



Methodensteckbrief

Patch-Generator (Druckguss)

Definition	Unterteilung der Druckgussgeometrie in logische Untereinheiten gemäß der Fließpfade während der Formfüllung.
Vorgehen	Abschnittweises Einfärben der Schmelze bei Eintritt in die Kavität des Bauteils mit Hilfe von Formfüllsimulationen;
Ziele	Visualisierung von fehlerhaften Bauteilbereichen
Vorteile	Systematisches Vorgehen zur Bewertung der Formfüllung.
Nachteile	Rückschlüsse auf die Ursache von Defekten geometrieabhängig und somit nur intuitiv zu ziehen.
Grenzen	Keine automatische Korrektur von Bauteildefekten möglich.
Hinweise	Patchgenerierung muss bereits beim Simulationssetup vorgehen werden.



Plausibilitätsprüfung

Definition	Überprüfung einer strukturmechanischen FE-Simulation auf Plausibilität, d.h. ob erkennbar falsche Ergebnisse entstehen.
Vorgehen	Die Ergebnisse einer FE-Simulation werden mit der Prognose eines zuvor trainierten Regressionsmodells verglichen. Dieses Regressionsmodell wurde auf Basis von bereits bestehenden ähnlichen Simulationen erstellt. Wenn die Abweichungen zwischen dem Regressionsmodell und der zu untersuchenden Simulation klein sind wird das Ergebnis als plausibel eingestuft.
Ziele	Prüfung auf plausible Simulationsergebnisse.
Vorteile	Nutzung von bereits vorhandenem Wissen über validierte Simulationen zur Überprüfung einer neuen Simulation.
Nachteile	Es müssen bereits viele ähnliche Simulationen vorhanden sein um im Vorfeld ein entsprechendes Regressionsmodell mit hoher Prognosegüte zu trainieren.



Prozessstandardisierung mit Absicherungsmethoden

Definition	Unterteilung eines (Entwicklungs-)Prozesses in einzelne Abschnitte (Stages), zwischen denen an definierten Punkten (Gates) die Zielerreichung abgesichert wird
Vorgehen	<ol style="list-style-type: none">1. Visualisierung der Prozesse (z.B. mit BPNM)2. Definition der Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Teilschritten3. darauf aufbauend Definition von Gates und den dazwischen liegenden Stages4. Definition der in Gates zu überprüfenden (Qualitäts-)Kriterien5. Definition von Absicherungsmethoden aus dem Methodenbaukasten zur Überprüfung dieser Kriterien Finalisierung des Soll-Prozesses durch Workshops mit allen Beteiligten
Ziele	Qualitätssicherung in der Produktentwicklung durch Absicherungsmethoden
Vorteile	Darstellung von Abhängigkeiten, nachvollziehbares Qualitätscontrolling
Nachteile	Abwägung zwischen hoher Qualitätskontrolle durch häufige Absicherung und vertretbarem Aufwand oft schwer
Grenzen	komplexe Prozesse mit Querverbindungen zu anderen Prozessen
Hinweise	Simulationen können geeignete Absicherungsmethoden sein



Methodensteckbrief

Prozesstechnische Bauteilbew.

Definition	Bewertung der Bauteileignung für eine günstige Formfüllung im Prozess Druckguss.
Vorgehen	Prozesssimulation, Shortest-path-Analyse und zellenweise Berechnung des Wertes dtbf/sp.
Ziele	Identifikation von Bauteilbereichen, die eine zu lange Fließlänge aufweisen, als geometriebedingt nötig.
Vorteile	Dient als Nebenkriterium für die prozessteschnische Topologieoptimierung.
Nachteile	Das Ergebnis nach dem Filter muss von Prozessingenieuren interpretiert werden.
Grenzen	Bis dato nur für den Prozess Druckguss anwendbar.



Methodensteckbrief

Reverse Engineering

Definition	Komplette Rückführung realer Komponenten mit NURBS-Flächen
Vorgehen	RE-Prozess: Digitalisierung, Datenaufbereitung, Segmentierung, Flächenrückführung
Ziele	Erzeugung eines simulationsfähigen Realgeometrie-Modells
Vorteile	Sämtliche Abweichungen können abgebildet werden
Nachteile	Sehr komplexe und zeitintensive Flächenrückführung, große Datenmenge



Methodensteckbrief

Schnittstelle zur Erstellung von Oberflächenpunkten aus verformten Netzen mit Dickeninformation

Definition	Schnittstelle zwischen FEA Ergebnissen und Messprogramm
Vorgehen	Spezifizierung der Eingabe- und Ausgabedateien und –ordner
Ziele	Oberflächenpunkte zum Vergleich mit Messwerten
Vorteile	Direkte Vergleichbarkeit von Simulations- und Messergebnissen
Nachteile	Keine kommerzielle Lösung
Grenzen	Bisher Beschränkt auf LS-DYNA Dateien Beschränkt auf Schalenelemente Maximal 150 000 Knoten
Hinweise	Anpassbar auf andere Inputdateien und Ausgabeformate. Oberflächenpunkte werden in der Mitte der einzelnen Elemente erstellt.



Methodensteckbrief

Semant. Informationen generieren

Definition	Auf Basis der importierten Informationen werden neue fertigungsrelevante Informationen generiert.
Vorgehen	Einstellungen treffen, Startbedingungen definieren, Analyse starten
Ziele	Informationen auf Grundlage der Geometrie generieren, die im weiteren Verlauf des PEP relevant sind
Vorteile	Zusätzliche fertigungsrelevante Informationen aus Geometrieinformation ohne Simulation verfügbar
Nachteile	Berechnung nimmt Zeit in Anspruch (hängt sehr stark von Anwendung bzw. Projekt ab).
Grenzen	Informationen unterliegen gewissen Einschränkungen bzw. Annahmen (Annäherung)



Methodensteckbrief

Semantisches Modell exportieren

Definition	zusätzliche Informationen in Geometriedatei speichern
Vorgehen	Informationen definieren, Geometriedatei auswählen, semantische Datei erzeugen
Ziele	Informationen direkt zu betreffenden Geometrieelementen speichern, um sie für spätere Phasen des PEPs zu sichern
Vorteile	Informationen gehen nicht verloren, sind genau dort gespeichert wo sie benötigt werden
Nachteile	mangelnde Unterstützung kommerzieller CAD Systeme
Grenzen	Informationen gehen nach Reimport in CAD trotzdem verloren



Shortest path-Analyse

Definition	Bauteilanalyse zur Anwendung auf Druckguss-Strukturbauteile zur prozesssicheren Auslegung von Gießsystemen.
Vorgehen	Start des Algorithmus mit der aufbereiteten Geometrie und Auswahl der geforderten Ausgabewerte.
Ziele	Entscheidungshilfe zur Auswahl von Anschnittbereichen und zur Platzierung von Fingeranschnitten.
Vorteile	Dient zur Reduktion unnötiger Simulationszyklen.
Nachteile	Hoher Rechenaufwand; Hoher manueller Aufwand;
Grenzen	Nur für eine uniforme, orthogonale und äquidistante Bauteilpunktewolke anwendbar.
Hinweise	Vernetzung mit 1 mm Elementgröße.



Standardisierter Berechnungsauftrag mit Anforderungsschablone

Definition	Der Berechnungsauftrag ist das zwischen Auftraggeber (meist Konstruktionsabteilung) und Simulationsabteilung ausgetauschte Dokument, das die Anforderungen an die Simulation definiert. Dieses Dokument stellt im übertragenen Sinne also die Fragen, die die Berechnung bzw. Simulation beantworten muss.
Vorgehen	<ol style="list-style-type: none">1. Analyse der aktuell verwendeten Dokumente2. Modularisierung des Berechnungsauftrags3. Definition relevanter Informationen für die Titelseite des Berechnungsauftrags4. Definition der relevanten Inhalte für die Anforderungsschablonen5. Erstellung eines neuen Templates bestehend aus Titelseite und Anforderungsschablonen6. Evaluierung des neuen Templates anhand vergangener Simulationen
Ziele	Verbesserung der Kommunikationen zwischen Simulationsabteilung und ihren Auftraggebern (meist Konstruktionsabteilung)
Vorteile	meist Grundlage in Form von Dokumenten und Templates vorhanden; verschiedene Varianten je nach möglichem Eingriff in IT-Infrastruktur möglich
Nachteile	aufwändige Analyse vergangener Simulationen; genaue Formulierung der Schablonen schwierig, da Allgemeingültigkeit gegeben sein muss
Grenzen	universelle Anwendbarkeit schwierig bei stark unterschiedlichen Methoden/Bauteilen/Lastfällen/Fluiden, etc.
Hinweise	Einbindung der Mitarbeiter entscheidend für Akzeptanz



Strukturoptimierung

Definition	Durchführung der Strukturoptimierung.
Vorgehen	Definition von: Optimierungsziel, -randbedingungen und -parametern; Durchführen der Optimierung; Auswertung.
Ziele	Optimale Struktur generieren.
Vorteile	Automatische Generierung einer optimalen Struktur.
Nachteile	Akzeptanz der Methode durch erfahrene Produktentwickler möglicherweise gering; Rückführung der Optimierungsergebnisse ins CAD nicht einfach automatisierbar.
Grenzen	Optimierungsparameter beeinflussen stark die Ergebnisgüte.
Hinweise	Siehe Grenzen. Passende Einstellung: siehe Wissensbasis.



Text-Mining

Definition	Computerlinguistische Analyse und Aufbereitung von Berechnungsberichten für nachfolgende Data-Mining-Prozesse.
Vorgehen	<p>Textklassifikation: Erste Berichte werden als Trainingsdaten manuell in Klassen unterteilt (z. B. bezüglich der jeweils vorliegenden Analysetypen oder Berechnungsergebnisse). Die Zuordnung weiterer unbekannter Berichte erfolgt anhand ihrer Ähnlichkeit zu bereits klassifizierten Berichten.</p> <p>Informationsextraktion: Wiederkehrende Satzstrukturen bzw. Muster in den Berechnungsberichten werden durch reguläre Ausdrücke allgemeingültig abgebildet. Aus den mit diesen Ausdrücke erfassten Textstellen werden gezielt die relevanten Informationen in strukturierten Datensätzen gegenübergestellt.</p>
Ziele	Aufbereitung unstrukturierter, textbasierter Berechnungsberichte in automatisierten Wissensakquisitionsprozessen.
Vorteile	Automatisierte Strukturierung umfangreicher Textbibliotheken.
Nachteile	Die regulären Ausdrücke müssen für die Berechnungsberichte erstellt und an deren Strukturen angepasst werden.
Grenzen	Die entwickelten Text-Mining-Prozesse sind für die Aufbereitung von Berichten aus strukturmechanischen FEA ausgelegt.



Wissensbasierter Fehlerassistent **selbstlernender**

Definition	Im Fall eines nicht plausiblen Simulationsergebnisses wird der wissensbasierte Fehlerassistent aktiviert und versucht die Ursache für die fehlerhafte Simulation zu finden.
Vorgehen	Im Hintergrund des Fehlerassistenten arbeitet ein Wahrscheinlichkeitsnetz, welches für gängige Fehler eine Auftretenswahrscheinlichkeit hinterlegt. Über die Möglichkeit der Anpassungen der Wahrscheinlichkeiten besitzt das Netz eine Selbstlernkomponente und kann sich auf das individuelle Benutzungsverhalten bestimmter Nutzer anpassen.
Ziele	Der Nutzer wird auf die wahrscheinlichste Ursache einer nicht plausiblen Simulation hingewiesen.
Vorteile	Bedingte Wahrscheinlichkeiten können berücksichtigt werden.
Nachteile	Es muss ein sinnvolles initiales Wahrscheinlichkeitsnetz vorliegen.

5 Anwendungsbeispiel Querlenker

5.1 Ausgangssituation und Randbedingungen Demonstrator

Die Entwicklungsabteilung eines Fahrzeugherstellers bekommt die Aufgabe, ein sportliches Derivat auf der konzerneigenen Kompaktwagen-Plattformbasis zu entwerfen. Um die Leistung des Fahrzeuges zu optimieren, soll mit Hilfe von Leichtbau Gewicht eingespart werden. Da gleichzeitig das Handling verbessert werden soll, bietet es sich an, am Fahrwerk Masse zu reduzieren. Nach Analyse der vorhandenen Komponenten im Baukasten wird entschieden, eine Alternative zum Stahlguss-Querlenker zu entwickeln, welcher mit rund 4,6 kg sehr schwer ausfällt. Um die im Unternehmen vorhandenen Fertigungsanlagen nutzen zu können, soll der zu konstruierende, leichte Querlenker entweder durch Umformen von Stahlblech oder per Aluminium-Druckguss hergestellt werden.

Die Aufgabe für die Entwickler besteht darin, auf Basis eines vorhandenen Bauteils zwei Leichtbau-Varianten zu erarbeiten, welche mit den gegebenen Fertigungsverfahren hergestellt werden können. Ziel ist eine effiziente Entwicklung unter Einsatz wissensbasierter Simulationsmethoden, wie sie im Forschungsverbund FORPRO² konzipiert wurden. Dies wird dadurch erreicht, dass auch simulationsunerfahrenen Anwendern dank der selektiven Unterstützung durch eine Wissensbasis ermöglicht wird, neuartige Simulationswerkzeuge zur Generierung optimaler Bauteilentwürfe einzusetzen. So können zum einen aufwändige, manuelle Iterationsschleifen zur Findung eines leichten Designs, welches zusätzlich den Ansprüchen an Steifigkeit und Festigkeit genügt, eingespart werden. Zum anderen werden ineffiziente iterative Prozesse zwischen den Abteilungen Konstruktion, Berechnung und Fertigung stark reduziert, da die ersten Ergebnisse aus dem neuen Entwicklungsprozess bereits mit Rücksicht auf die mechanischen Eigenschaften und den Fertigungsprozess optimal ausgelegt sind. Somit bleibt nur noch eine abschließende Kontrollschleife durch die Berechnungsabteilung zur Absicherung der funktionalen Eigenschaften und durch die Fertigungsspezialisten zur Prozessabsicherung. In der Theorie – falls der neue Prozess fehlerfrei durchgeführt wurde – sollten nun keine Korrekturen mehr notwendig sein und das Bauteil direkt die Freigabe erhalten.

Essentiell dabei ist die Betrachtung der relevanten Lastfälle, welche im Falle des Querlenkers wie folgt identifiziert wurden: maximale Betriebslastfälle wie extreme Beschleunigung in positive und negative Richtung (Anfahrt und Bremsen) sowie extreme Kurvenfahrt bei kurveninnerem Rad und kurvenäußerem Rad. Zusätzlich wird ein Missbrauchslastfall mit dem Durchfahren eines Schlaglochs berücksichtigt. Weitere Lastfälle wurden zur Reduktion des Aufwands nicht berechnet, da diese bei identischen Lastrichtungen geringere Lastbeträge im Vergleich zu den genannten Lastfällen aufwiesen. Obwohl bei dem zu entwickelnden sportlichen Fahrzeugderivat geringere Gesamtmassen zu erwarten sind, wurde zur Lastberechnung die zulässige Gesamtmasse des schwersten Plattformfahrzeugs herangezogen und somit eine zusätzliche Sicherheit geschaffen. Das Auslegungsziel soll für die Gebrauchslastfälle eine rein elastische Beanspruchung und für die Missbrauchslastfälle die Vermeidung eines Gewaltbruchs sein.

Im Folgenden wird der Ablauf der Entwicklung der beiden Leichtbau-Querlenker gegliedert nach den Teilprojekten des Forschungsverbunds aufgezeigt.

5.2 Anwendung und Anpassung der Methoden und Tools

Situative Bereitstellung von Simulationswissen und –methoden

Der Methodenbaukasten (vgl. Abschnitt 3.8) stellt ein übersichtliches und bedarfsgerechtes Ordnungsschema für Methoden im Entwicklungsprozess dar. Anhand der drei Ebenen (allgemeine Ebene, Anwendungsebene und projektspezifische Ebene) kann der Nutzer zielgerichtet die für ihn passenden Methoden auswählen. Im Baukasten befinden sich sowohl im Verbund erarbeitete Methoden, als auch Methoden, die im jeweiligen Unternehmen verwendet werden.

Der Methodenbaukasten mitsamt der davor geschalteten Nutzerschnittstelle und der dahinterliegenden Wissensbasis wird in diesem Anwendungsbeispiel konsequent genutzt, um je Schritt des Vorgehens die Methoden auszuwählen und aufzurufen. Alle Methoden sind konsistent im Methodenbaukasten hinterlegt und mit den entsprechenden Inhalten der Wissensbasis versehen.

Zunächst soll der bereits grob ausgelegte Querlenker, der hier als durchgängiges Anwendungsbeispiel dient, als Stahlgussbauteil analysiert werden. Das Ziel des Prozessschrittes lautet also: *Simulationsabteilung mit Berechnung beauftragen*. Anhand dieses Ziels wird dem Konstrukteur aus dem Methodenbaukasten der modularisierte Berechnungsauftrag mit Anforderungsschablone⁷ vorgeschlagen.

Nun kann er entscheiden, ob diese allgemeine Methode bereits ausreichend für sein Entwicklungsziel ist, oder eine weiter spezifizierte Methode hilfreich wäre. Da in dem hier vorliegenden Fall eine strukturelle Untersuchung geplant ist, kann die auf der Anwendungsebene spezifizierte Methode des *Berechnungsauftrags mit Anforderungsschablonen – FEM* genutzt werden (Abbildung 5-1).

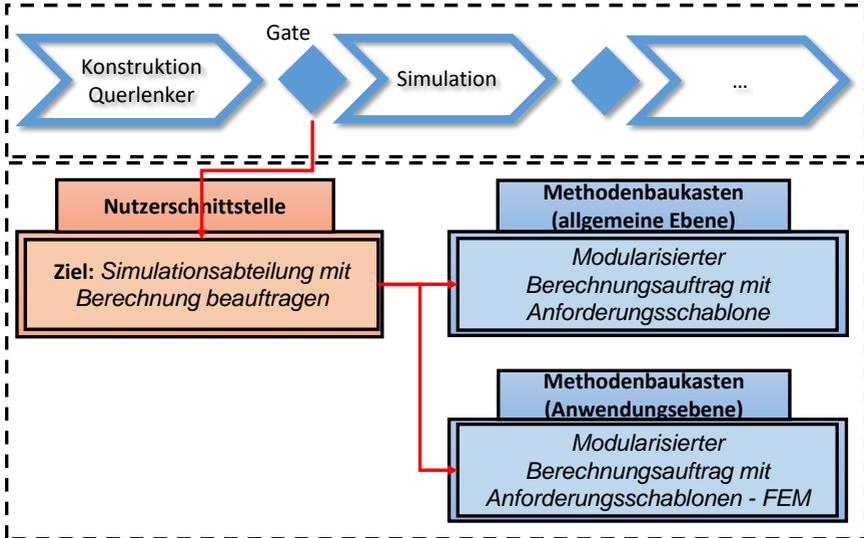
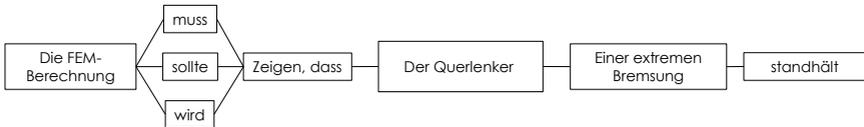


Abbildung 5-1: Auswahl von Methoden im Methodenbaukasten

Auf der projektspezifischen Ebene ist hierzu darüber hinaus ein für den Industriepartner *iwis motorensysteme* angepasster modularer Berechnungsauftrag vorhanden. Dieser kann als Anschauungsmaterial und Orientierung dienen. Da das Bauteil des Querlenkers sich jedoch deutlich von einer Motorkette unterscheidet und die Organisationsstruktur des fiktiven Unternehmens der von *iwis motorensysteme* nicht ähnelt, wählt der Konstrukteur nicht die projektspezifische, sondern die Anwendungsebene als geeignete Abstraktionsebene aus. Er passt den Berechnungsauftrag an seine Anforderungen an und sendet ihn ab. Der folgende Abschnitt beschreibt detailliert die hierfür nötige Vorgehensweise.

Modularisierter Berechnungsauftrag mit Anforderungsschablone

Zunächst wird der Querlenker als Stahlgussbauteil grob ausgelegt und konstruiert. Um sicherzustellen, dass die Anforderungen an Steifigkeit und Bruchbeständigkeit erfüllt werden können, soll der Querlenker nun mittels einer Finite-Elemente-Analyse simuliert werden. Da aus Vorgängerprojekten bekannt ist, dass dieser Fall kritisch ist, wird zunächst der Fall extremer Bremsung untersucht (vgl. Abschnitt 5.1). Dafür füllt der Konstrukteur einen modularisierten Berechnungsauftrag aus (vgl. Abschnitt 3.8) und sendet diesen an die Simulationsabteilung. Automatisch werden alle eingetragenen Daten des Auftrags in eine Datenbank übernommen. Über die Metadaten auf der ersten Seite des Auftrags ist dieser eindeutig einem Projekt und einem Bauteil zugeordnet. Die Anforderungsschablone des ersten Auftrags ist in Abbildung 5-2 dargestellt.



Anforderungsschablone			
System	Kritikalität	Prozesswort	Simulationsobjekt
Die FEM-Berechnung	muss	zeigen, dass	der Querlenker
Funktionalität			
einer extremen Bremsung standhält.			
Zielwerte			
max. Deformation			
max. Spannungen			

Abbildung 5-2: Anforderungsschablone des ersten Berechnungsauftrags

Basierend auf diesem Simulationsdurchlauf werden alle weiteren Lastfälle ebenfalls berechnet, indem jeweils nur die Anforderungsschablone und die Randbedingungen geändert werden. Durch die einfache Änderung der Anforderungsschablone wird dem Simulationsexperten sofort klar, warum erneut eine Berechnung desselben Bauteils nötig ist (Abbildung 5-3). Er kann schlicht die Randbedingungen anpassen und die weiteren Simulationen durchlaufen lassen. Somit sind alle Lastfälle für das Stahlgussbauteil berechnet und das Bauteil kann in technische Zeichnungen überführt werden.

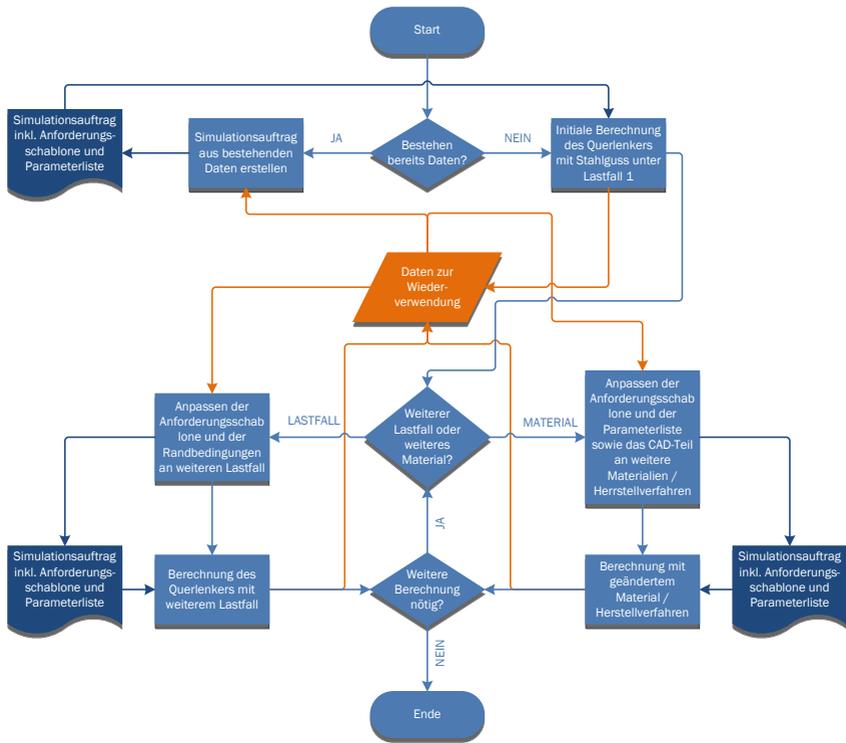


Abbildung 5-3: Vorgehen zur systematischen Wiederverwendung von Daten

Nach Abschluss dieses Projektabschnitts sollen nun andere Herstellverfahren untersucht werden, um Möglichkeiten der Gewichtseinsparung zu untersuchen. Hier sind nun größere Änderungen im Berechnungsauftrag nötig. Das CAD-Teil muss gemäß der veränderten Fertigungsrestriktionen überarbeitet werden. Außerdem sind völlig neue Parameter nötig. Während also die zweite Seite des Berechnungsauftrags stark abgeändert werden muss, können die meisten Daten der ersten Seite übernommen werden. Der Konstrukteur wählt also einfach die bereits in der Datenbank hinterlegten Metadaten aus und ergänzt anschließend die Parameterliste. Hierbei erfährt er Unterstützung durch im Unternehmen zu früheren Zeitpunkten durchgeführte Simulationen von Druckguss- und Tiefziehbauteilen, die ihm bei der Wiederverwendung von Wissen und der richtigen Formulierung der Anforderungen an die Simulationsabteilung helfen (siehe Abbildung 5-4).

Vorauswahl der Simulationsart und des Fertigungsverfahrens

FDAPAD[®]

Wählen Sie den Simulationstyp aus:

Wählen Sie das Fertigungsverfahren:

Metadaten des ersten Auftrags

Art der Berechnung FEM-Berechnung **FDAPAD[®]**

Fertigungsverfahren Stahlguß

Randbedingungen	Last	Art		Lastrichtung	Lastwert
		Extreme Bremsung		X	O N
		Y	17.400 N	-	
		Z	O N	-	
Sicherheitsfaktor					
Bauteil		Querlenker			
Material		-	-	-	-
Datenblatt hinzufügen					
Lagerung					
Lagerung öffnen					
Darstellung des Lastfalls					
Lastfall öffnen					
Zielwerte		1	2	3	4
		max. Spannung	max. Verformung	dyn. Verhalten	

Neue Parameterliste je Fertigungsverfahren

Projektname*: **FDAPAD[®]**

Projektnr.:

Zuordnung Baugruppe*:

SAP-Projektnr.*:

SAP Name*:

Art der Berechnung*: FEM-Berechnung Spezifikation*:

Simulationstyp*: Zieldokument*:

Bearbeiter/in*: Zielermin*:

Teamleiter/in*: Empfänger*:

Abteilung Auftraggeber*: Auftragsdatum*:

beteiligte Bauteile*:

Bauteil 1*	Bauteil 2	Bauteil 3
CAD-Datei*:	CAD-Datei:	CAD-Datei:
SH-Nummer*:	SH-Nummer:	SH-Nummer:

Abbildung 5-4: Wiederverwendung vergangener Berechnungsaufträge

Aufbauend auf dem so entstandenen neuen Berechnungsauftrag kann die Produktentwicklung fortgeführt werden.

Qualitätssicherung von Simulationen

Der Einsatz der (Checkliste 7) soll am Beispiel der funktionalen Absicherung des Querlenkers verdeutlicht werden.

Zuerst wird die zu erwartende Genauigkeit auf $\pm 10\%$ festgelegt. Im Rahmen dieser Arbeit ist aufgrund von Zeitgründen keine Absicherungsstrategie gewählt worden. Als Strategie böte sich entweder eine überschlägige Handrechnung mit der Idealisierung als Kragträger unter kombinierter Zug und Biegebeanspruchung an. Diese könnte aufgrund der Idealisierung nur grob den Spannungsbereich auf der konservativen Seite eingrenzen. Alternativ könnte ein Experiment mit den entsprechenden Belastungen durchgeführt werden, dessen Ergebnis aber zwangsläufig auch Messfehler beinhaltet.

Die Lagerung und Lasteneinleitung wurden von TP 6 und 7 definiert und die notwendigen Eingangsgrößen wie Geometrie und die Materialparameter wie der E-Modul und die Poissonzahl liegen vor und wurden in das to-mm-s System umgerechnet. Als NAFEMS QSS Kategorie wird „Advisory“ gewählt, die der unerfahrene Berechner durchführen darf.

Da keine Handrechnung existiert kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Bauteile den linear elastische Bereich verlassen. Deshalb kann nicht auf 1- Lastfälle zurückgegriffen werden. Zudem würden aufgrund der geringen Zahl von Lastfällen (4) im Rahmen dieses Anwendungsfalles durch die Simulation von 1 Lastfällen deutlich mehr Simulationen erforderlich sein als durch die direkte Methode. Bei der funktionalen Absicherung kann außerdem eine Empfehlung zum Einsatz der Elemente und eine grobe Abschätzung zur Ergebnisbeeinflussung durch diese gemacht werden. Die Lastfälle stellen eine Kombination aus Zug- und Biegebeanspruchung dar. Ferner ist die Geometrie beim Tiefziehbauteil dünn, so dass die Dimension durch die Verwendung von Schalenelemente verringert werden kann, während das Gussbauteil etwas größere Wandstärken besitzt und demzufolge eher mit Kontinuumselementen zu modellieren ist. Da die Geometrie auch stark gekrümmte Bereiche aufweist, ist eine aus Gründen der Ergebniserreichung zu bevorzugende Vernetzung mit reinen Viereckselementen nicht möglich. Deshalb wird empfohlen quadratische Dreiecks und Viereckselemente zu benutzen, die einen guten Kompromiss zwischen Geometrie- und Ergebnisgüte darstellen.

Als Konservatismus werden hier die Dreieckselemente zur Abschätzung des Fehlers herangezogen. Bei Annahme eines Seitenverhältnisses von ca. 2 und richtiger Idealisierung der Lasteneinleitung kann hier lokal ein großes Fehlerband von ca. $+10$ bis -32% in der Schubspannung und ein zu vernachlässigender Fehler von unter

0,1% bei der Normalspannung sowohl in der Querkraftbiegung als beim reinen Zug erwartet werden. Da die Schubspannung aber meist wesentlich geringer als die Normalspannung ist, wird der Fehler in der Vergleichsspannung durch die Normalspannung bestimmt. Außerdem ist zu bedenken, dass das Modell aus vielen Viereckselementen besteht, die den Fehler weiter verringern werden.

Beim 3D Modell muss aufgrund der schwierigen Vernetzung mit Hexaederelementen auf Tetraederelemente zurückgegriffen werden. Bei Annahme eines Seitenverhältnisses von ca. 2 und richtiger Idealisierung der Lasteinleitung kann hier mit einem Fehlerband von ca. $+2 - + 0,2$ % in der Schubspannung und einem zu vernachlässigenden Fehler von unter 0,1% bei der Normalspannung sowohl in der Querkraftbiegung als beim reinen Zug erwartet werden.

Nachdem die Punkte 13 -21 überprüft wurden kann die Berechnung durchgeführt werden. Anschließend müssen die Verformungen und Spannungen auf Plausibilität überprüft werden.

Nun ist die Ergebniserreichung zu prüfen und bei Erreichung des definierten Ziels von ± 10 % und Verifizierung durch das Vieraugen-Prinzip muss die Rechnung dokumentiert und zusammen mit dem Bericht archiviert und gegen unberechtigten Zugriff gesichert werden.

Fertigungstechnische Strukturoptimierung

Eine fertigungsspezifische Strukturoptimierung umfasst mehrere sequentiell durchzuführende Schritte, welche in diesem Anwenderleitfaden als Methoden hinterlegt sind. Hierbei ist allerdings ein zweistufiges Vorgehen notwendig, welches die beschriebenen Methoden weiter untergliedert (sog. Anwendungsebene). Begründet liegt diese Aufspaltung im als Anwendungsbeispiel verwendeten Querlenker – dieser soll in zwei Leichtbauvarianten mit vorgegebenen Fertigungsverfahren entwickelt werden. Somit ergibt sich für das Alu-Druckgussverfahren eine Topologieoptimierung ausgehend von einem Bauraum und im Gegensatz dazu für das Blechumformen eine Dimensionierung und Formoptimierung ausgehend von einem ersten Designentwurf. Bei beiden Varianten wird der Anwender selektiv durch die Wissensbasis unterstützt und kann dadurch eine schnelle und effiziente Produktentwicklung ohne unnötige Kommunikationsschleifen mit anderen Abteilungen durchführen.

Im Folgenden werden die beiden Bauteilvarianten getrennt entwickelt und am Ende mit dem Ausgangsbau teil verglichen.

Aluminium-Druckguss

Die Definition des Ausgangsmodells, also beim Aluminium-Druckguss des Bau- raums und der Randbedingungen (*Festlegung Randbedingungen*), beginnt mit dem vorhandenen Bauteil inkl. Betrachtung der Einbausituation. So kann der größtmögliche Bauraum für das zu konstruierende Bauteil ermittelt werden. Die Lasten und Randbedingungen im Betrieb sowie Missbrauchslasten sind aus der Entwicklung des Ausgangsbauteils bekannt.

Dieses Basis-Bauteil ist die Stahlguss-Variante des Querlenkers mit einem Ge- wicht von knapp über 4,6 kg. Abbildung 5-5 zeigt den Stahlguss-Querlenker als reales Bauteil und als CAD-Modell. Die Analyse der Einbausituation ist in Abbil- dung 5-6 dargestellt. Hierzu wurden Messungen am Fahrzeug durchgeführt und mit einer Kollisionsuntersuchung im CAD kombiniert.



Abbildung 5-5: Ausgangsbauteil Stahlguss (reales Bauteil und CAD-Modell)

Die Randbedingungen (extremes Bremsen, extremes Anfahren, extreme Kurven- fahrt inneres Rad/äußeres Rad und Schlagloch) sind in Betrag und Richtung er- rechnet worden und somit bekannt, werden aus Platzgründen hier aber nicht ab- gebildet. Das Ziel dieser Methode, alle nötigen Informationen zur Geometriedefi- nition und Finite-Elemente-Analyse zu erarbeiten, ist nun abgeschlossen.



Abbildung 5-6: Analyse der Einbausituation am Fahrzeug (Montage)

Nun wird das Modell des Bauraums im CAD-Programm PTC Creo 3.0 mit Hilfe möglichst einfacher Geometrien abgebildet (*Modellerstellung*), vgl. Abbildung 5-7. Für die weiteren Schritte – welche im Softwaretool SIMULIA Abaqus 2016 umgesetzt werden – ist die Übertragung der Geometrie notwendig.

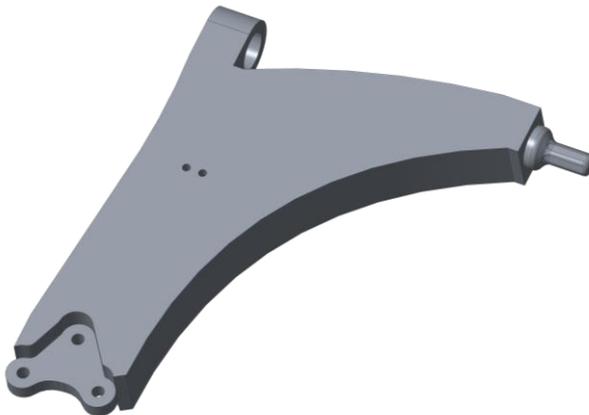


Abbildung 5-7: Querlenker-Bauraum für Topologieoptimierung

Hierfür wurde im Hinblick auf die Funktionalitäten der verwendeten Applikationen das Geometrie-Austauschformat STEP gewählt, welches auch im Arbeitskreis Produktsimulation sehr gute Ergebnisse in Verbindung mit PTC Creo®, ANSYS Workbench® und SIMULIA Abaqus® geliefert hat. Natürlich sind je nach den verwendeten Programmen auch andere Formate wie IGES, JT oder ein proprietäres Format denkbar.

Nach dem Import der Bauraumgeometrie in Abaqus 2016 (über die STEP-Schnittstelle) wird mit der Aufbereitung des Berechnungsmodells begonnen (Berechnungsmodellaufbereitung⁷). Hierzu wird der Bauraum mit linearen Tetraederelementen und einer mittleren Netzfeinheit (Einstellung AGS = 3 und lokaler Verfeinerung an den Festhaltungen und am Lastangriff) vernetzt. Die Lasten und Randbedingungen werden appliziert und die Berechnungsparameter festgelegt. Es wird eine linear-elastische, statische Analyse mit fünf Lastfällen als Basis der Optimierung verwendet. Die Materialdaten E-Modul (70.000 N/mm²), Querkontraktionszahl (0,34) und Dichte (2,7E-9 t/mm³) sind für die Alu-Druckgusslegierung passend definiert.

Anschließend wird die Topologieoptimierung durchgeführt (Strukturoptimierung⁷), wozu das aufbereitete Berechnungsmodell direkt in Abaqus 2016 weiter bearbeitet wird. Es sind das Optimierungsziel (minimale Nachgiebigkeit) und die Randbedingungen festzulegen. Letztere umfassen die Volumenrestriktion (hier: 50 %) und Fertigungsrestriktionen (hier wurden gewählt: „demold control / forging“ ohne Aushebeschrägen, zusätzlich „maximum member size“ und eine „frozen area“ um den Lastangriff).

Nachdem die adäquaten Parameter für die Optimierung eingestellt wurden (z. B. Sensitivity-Algorithmus, Penalty-Faktor und Schrittweite auf Standard), kann der Optimierungslauf beginnen. Dieser schreitet iterativ bis zum Abbruchkriterium fort und liefert anschließend die optimale Bauteilgeometrie als Designvorschlag.

Für die weitere Verwendung des Optimierungsergebnisses in Simulation, Fertigung und Visualisierung ist ein parametrisches CAD-Modell gewünscht, welches auf Basis des Bauraums neu konstruiert wurde (Neukonstruktion⁷). Hierbei konnte durch selektive Bereitstellung von Fertigungs- und Prozesswissen und den passenden Gestaltungsregeln aus der Wissensbasis direkt ein prozessgerechtes Design umgesetzt werden. Die Neukonstruktion nach dem ersten Optimierungsdurchlauf ist in Abbildung 5-8 zu sehen.

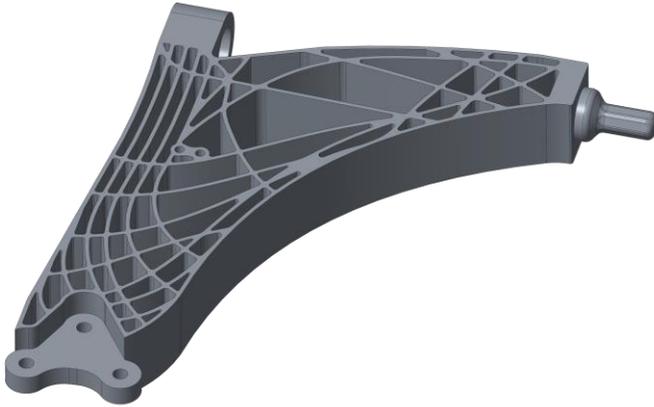


Abbildung 5-8: Neukonstruktion nach erstem Optimierungslauf

Abschließend wurde das erzeugte, optimale Bauteil auf Fertigbarkeit mit Hilfe der sp-Analyse geprüft (Fertigbarkeitsanalyse⁷). Dieses Werkzeug aus der Kooperation von TP 2 und TP 8 analysiert das Bauteilvolumen und identifiziert Bereiche schlechter Füllung. Diese werden in einer weiteren Iteration des Optimierungsprozesses vom Bauraum ausgeschlossen, siehe Abbildung 5-9.



Abbildung 5-9: Angepasster Bauraum nach Fertigbarkeitsanalyse

Das Resultat der zweiten Optimierung (hierfür wurden erneut die Methoden Modellerstellung, Berechnungsmodellauflbereitung und Strukturoptimierung durchgeführt) ist in Abbildung 5-10 dargestellt, zeigt bedeutend geringere maximale Fließlängen und kann mit höherer Qualität und geringer Fehlerwahrscheinlichkeit gefertigt werden. Ein Vergleich der beiden Analysen ist im Abschnitt „Prozessanalyse (TP 1 und TP 2)“ nachzulesen. Das prozess- und fertigungsgerechte, steifigkeits- und gewichtsoptimale Druckgussbauteil ist in Abbildung 5-11 zu sehen.

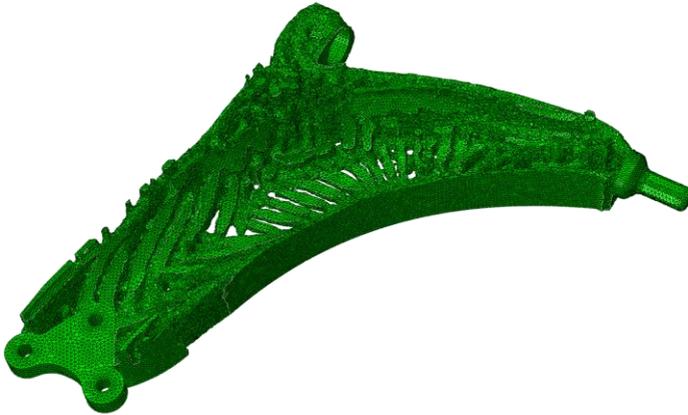


Abbildung 5-10: Ergebnis des zweiten Optimierungslaufs



Abbildung 5-11: Finale Neukonstruktion nach zweitem Optimierungslauf

Stahlblech-Umformen

Analog zum Druckguss steht beim Blechumformen zu Beginn die Definition des Ausgangsmodells. Statt mit dem Bauraum des Querlenkers beginnt dieser Entwicklungszweig mit einem ersten Designentwurf des Blechbauteils. Zusätzlich sind auch hier die Randbedingungen (Lasten und Randbedingungen im Betrieb sowie Missbrauchslasten) gefragt, welche jedoch aus der Aufgabenstellung abgeleitet wurden (Festlegung Randbedingungen⁷). Der erste Designvorschlag des Blech-Querlenkers wird mit Hilfe der Wissensbasis und der Analyse des Ausgangsbauteils erstellt und im Rahmen der folgenden Methode in ein 3D-CAD-Modell umgesetzt (Modellerstellung⁷). Hierbei ist auf ein Flächenmodell zu setzen, um sowohl eine gewisse Flexibilität als auch geringen Berechnungsaufwand für die kommenden Schritte zu ermöglichen. Das fertige Flächenmodell des ersten Designentwurfs kann in Abbildung 5-12 eingesehen werden. Zur Übertragung der Geometrie wird wie beim Druckgussbauteil vorgegangen, indem STEP als Austauschformat gewählt wird. Als Besonderheit ist nun darauf zu achten, dass statt einem Volumenbauteil nur Flächen übertragen werden.

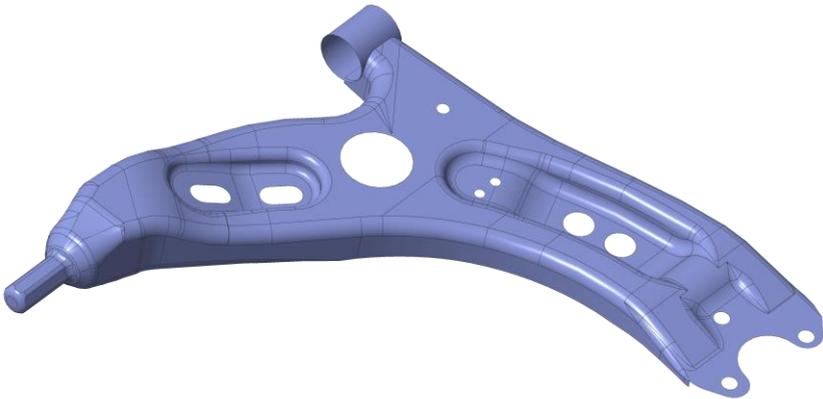


Abbildung 5-12: Flächenmodell des Querlenkers

Sobald der Datenaustausch in das Simulationssystem Abaqus 2016 erfolgt ist, wird mit der Aufbereitung des Berechnungsmodells begonnen (Berechnungsmodell-aufbereitung⁷). Der Ausgangsentwurf wird mit linearen Dreiecksschalen und einer mittleren Netzfeinheit (Einstellung AGS = 3,0 mit lokaler Verfeinerung an den Festhaltungen und Lastangriffspunkten) diskretisiert. Neben dem Zuweisen einer

Ausgangsdicke von 3 mm für die Berechnung wurden die Lasten und Randbedingungen aufgebracht sowie die Berechnungsparameter korrekt festgelegt. Die Berechnung soll im linear-elastischen Bereich und rein statisch durchgeführt werden. Mit der Zuweisung der nötigen Materialkennwerte (E-Modul = 210.000 N/mm², Querkontraktionszahl = 0,3 und Dichte = 7,85E-9 t/mm³) ist die Berechnungsmo- dellaufbereitung abgeschlossen.

Nun wird eine Dimensionierung der Blechstärke durchgeführt (Strukturoptimierung), wofür das Berechnungsmodell in Abaqus 2016 um das Optimierungsziel (hier: maximale Festigkeit) und die Randbedingungen ergänzt wird. Letztere umfassen die erlaubten Blechdicken (Minimum = 1 mm und Maximum = 11 mm), eine Verschiebungsrestriktion (maximale Verschiebung am Lastangriff) und die Koppelung der Optimierungsbereiche („cluster areas“). Diese Verbindung der durch den Algorithmus zu verändernden Bereiche ist nötig, da sonst jedes finite Element eine eigene Dicke zugewiesen bekäme – dies ist jedoch nicht fertigbar. So können Bereiche zusammengefasst werden, um Tailored Blanks einzusetzen oder auch das ganze Bauteil zu einem Set kombiniert werden, um dieses aus einem einheitlich dicken Blechzuschnitt zu fertigen. Das letztgenannte Vorgehen wird in diesem Fall präferiert, weshalb der Designraum gekoppelt wird und der Algorithmus nur die globale Blechdicke für alle finiten Elemente optimiert. Nachdem weitere Parameter für die Optimierung eingestellt wurden (z. B. Algorithmus, Schrittweite), beginnt der Optimierungslauf. Dieser schreitet iterativ fort bis nach dem Erreichen des Abbruchkriteriums die optimale Blechdicke ausgelesen werden kann – hier sind das 4,5 mm. Natürlich steigt durch die Erhöhung der Blechdicke vom Ausgangswert 3,0 mm das Gewicht des Bauteils, jedoch nur in dem Maße, um einen schadensfreien Betrieb sicherzustellen. Somit stellt der optimierte Stahlblech-Querlenker den besten Kompromiss aus leichtem Gewicht und Funktionserfüllung dar.

Für die weitere Verwendung der berechneten Dicke wird die Information entweder dem Flächenmodell z. B. per Textkommentar zugewiesen (welches wiederum mit den Methoden aus TP 8 dem Austauschformat für systemübergreifende Kompatibilität angefügt wird) oder es wird ein Volumenmodell über das Auf-dicken des Flächenmodells erstellt (Neukonstruktion). Da bei den bis hier durchgeführten Simulationen keine weiteren Probleme wie z. B. Spannungsspitzen erkannt wurden, wird eine Formoptimierung als unnötig eingestuft und nicht durchgeführt. Am Ende des Optimierungsprozesses wird das erzeugte Bauteildesign mit optimaler Dicke auf die Fertigbarkeit geprüft (Fertigbarkeitsanalyse), wofür entweder One-Step-Solver verwendet werden können oder der Patch-Optimizer aus TP 1 / TP 8

zum Einsatz kommt. Dieser identifiziert kritische Bauteilabschnitte, welche dann durch eine manuelle Anpassung des CAD-Modells unter Berücksichtigung der Hilfestellungen aus der Wissensbasis prozesssicherer gestaltet werden.



Abbildung 5-13: Dimensionierung des Querlenkers

Vergleich der Ergebnisse

Der optimierte Stahlblech-Querlenker bringt ein Gesamtgewicht von ca. 3,5 kg auf die Waage und erzielt damit eine Gewichtsersparnis von 24 %. Im Vergleich hierzu zeigt die Aluminium-Druckguss-Variante eine Reduktion von rund 48 % auf unter 2,4 kg. Für das Umform-Bauteil werden die Materialgrenzwerte (Streckgrenze DD-11 von 340 N/mm² bzw. Zugfestigkeit DD-11 von 440 N/mm²) eingehalten. Da die Sicherheiten bei dynamischer Belastung bereits bei der Umrechnung in statische Ersatzlasten berücksichtigt wurden und die Lastberechnung bei höherem Fahrzeuggewicht ebenso eine Sicherheit darstellt, müssen keine weiteren Sicherheiten berücksichtigt werden. Alle Lastfälle zeigen für das Tiefziehbauteil maximale Spannungen von 260 bis 300 N/mm² (Gebrauchslastfälle) bzw. 425 N/mm² (Missbrauchslastfall) und werden als unkritisch bewertet. Das Druckguss-Bauteil kann mit Spannungen unter 140 N/mm² (Gebrauch) bzw. 220 N/mm² (Missbrauch) als ebenso unkritisch eingestuft werden (Materialgrenzwerte Aluminium EN AC-46000: Streckgrenze von 140 N/mm² bzw. Zugfestigkeit von 240 N/mm²).

Beide Varianten werden im Rahmen des Arbeitskreises Produktsimulation dem FEA-Assistenzsystem zur Absicherung der funktionalen Eigenschaften und der 3D-Oberflächenerfassung zur Kontrolle der Fertigungsabweichungen übergeben

Prozessanalyse

Zu Beginn der Bauteilanalyse mittels Shortest-path-Analyse steht die Neukonstruktion des Querlenkers nach dem ersten Optimierungslauf, gezeigt in Abbildung 5-14.

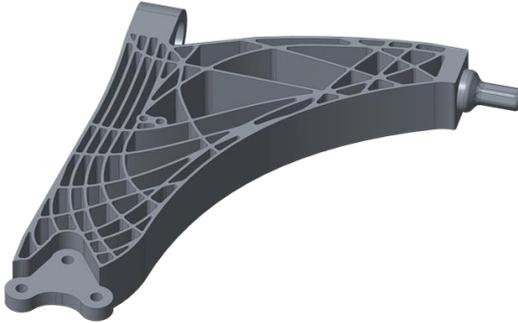


Abbildung 5-14: Konstruktion des Querlenkers nach dem ersten Optimierungslauf.

Eine Identifikation möglicher Anschnittbereiche bzw. –seiten hat durch den Benutzer zu erfolgen und kann wie in Abbildung 5-15 gezeigt erfolgen. In Rot skizziert sind die drei möglichen Anschnittflächen, durch die Schmelze in das Bauteil gelangen kann. Zur Entscheidung, welche der drei Flächen gewählt werden soll, dient die Shortest-path-Analyse.

Mit einer durchschnittlichen Weglänge von 98 mm pro Bauteilpunkt bietet Anschnittseite 1 die beste Alternative und wird für die weiteren Betrachtungen herangezogen. Als nächster Schritt folgt eine Formfüllsimulation mit Hilfe von Fingeranschnitten, die mit Hilfe der Anschnittplatzierung an Anschnittseite 1 ankonstruiert werden. Einen entsprechenden Vorschlag zeigt Abbildung 5-16 mit den nötigen Randbedingungen zum Einströmen von Schmelze in Rot und zur Formentlüftung in Blau. Es ist direkt ersichtlich, dass die Seiten 2 und 3, die konstruktions-technisch anschneidbar wären, nun der Entlüftung dienen, da die Kriterien für die Platzierung von Überläufen jenen für die Platzierung von Anschnitten entsprechen.

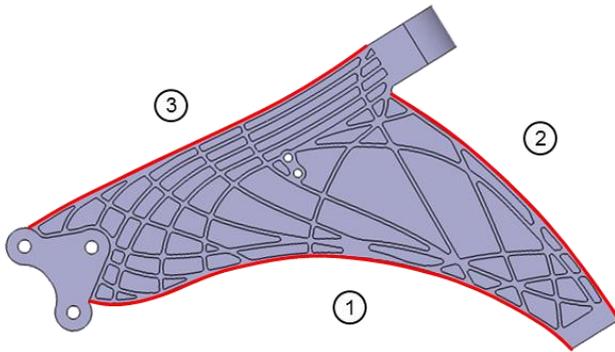


Abbildung 5-15: Drei mögliche Anschnittseiten des Bauteils Querlenker

Die Grundlage für eine Prozesstechnische Bauteilbewertung hinsichtlich Formfüllung liegt in der Vermeidung von Rückströmungen. Beim Druckguss gilt es grundsätzlich, überhöhte Fließlängen zu vermeiden, da sie zu Kaltläufen (vorzeitig erstarre Schmelze) und zu vermehrter Lufteinwirbelung führen. Diese überhöhten Fließlängen gehen einher mit Rückströmungen in anschnittnahe Bereiche, die nicht mehr entlüftet werden können. Dort bleibt die kältere, mit Gasen und Oxiden angereicherte Schmelze bis zur Erstarrung und damit bis zur Bearbeitung und den Betrieb im Bauteil.

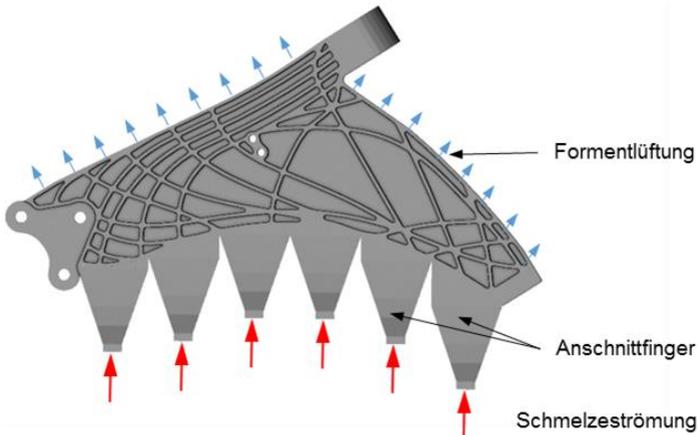


Abbildung 5-16: Simulationssetup mit Anschnittfingern und Randbedingungen für Schmelzeströmung (Rot) und Formentlüftung (blau)

Das Assistenzsystem macht sich die aus der Simulation bekannten der der Fließlänge (*distance travelled by fluid, dtbf*) und die geometrisch bedingte Entfernung zum Anschnitt aus der Shortest-path-Analyse (*shortest path-Wert, sp*) zu Nutze. Das Verhältnis von *dtbf/sp* gibt an, ob ein Fluidelement einen zu hohen Weg zurückgelegt hat, als rein geometrisch nötig gewesen wäre. Damit ist es möglich, Zellen, die für eine Formfüllung nicht optimal sind, zu filtern. Übrig bleiben Hinweise auf Bauteilbereiche, die aus dem Bauraum für eine erneute Strukturoptimierung nicht mehr in Betracht gezogen werden sollten. Die Auswertung nach diesem Vorgehen ist in Abbildung 5-17 in Falschfarben gezeigt.

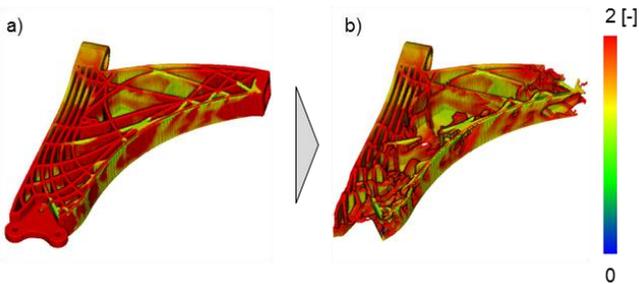


Abbildung 5-17: a) Das Bauteil Querlenker mit dem Quotienten *dtbf/sp*;
b) Gefilterte Punktwolke mit Werten *dtbf/sp* < 2

Der für den Querlenker prozesstechnisch ungünstige Bereich ist in Abbildung 5-18 dargestellt. Bei der Konstruktion des neuen Bauraums ist zu berücksichtigen, dass notwendige Elemente wie die Flansche und Anschraubdome nicht weggeschnitten werden dürfen. Für diese ist keine prozesstechnische Verbesserung zu erwarten.

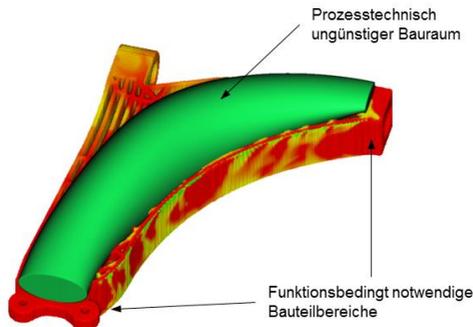


Abbildung 5-18: Prozesstechnisch ungünstiger Bauraum

Nach weiteren Iterationen zur Topologieoptimierung (*Strukturoptimierung*) und einer Auskonstruktion liegt die finale Geometrie mit Berücksichtigung der Formfüllung im Druckguss vor (Abbildung 5-11). Eine abschließende Simulation der Formfüllung mit den in Abbildung 5-16 gezeigten Randbedingungen liefert nach einer erneuten *Shortest-path-Analyse* Hinweise auf eine verbesserte Formfüllung. In Abbildung 5-19 ist die Verteilung der Werte $dtbf/sp$ vor und nach der prozesstechnischen Optimierung gezeigt. Die Anzahl der Bauteilpunkte, die den gleichen Wert besitzen, sind über dem nach rechts aufsteigenden Wert aufgetragen. Es zeigt sich eine deutliche Verlagerung der Fließlängen hin zu kleineren Werten und eine Annäherung der berechneten Werte hin zum Optimum $\frac{dtbf}{sp} = 1$.

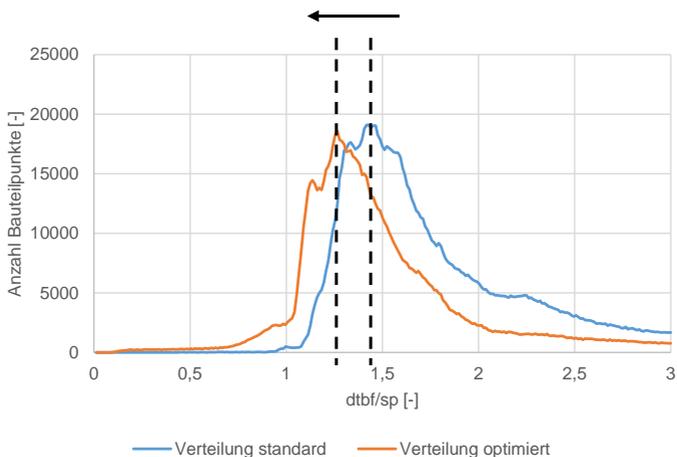


Abbildung 5-19: Verlagerung der Werte aus $dtbf/sp$ hin zum Optimum bei einem Wert von 1 nach der prozesstechnischen Bauteilbewertung und Optimierung

Für die Prozessanalyse des Querlenkers als Tiefziehbauteil sei hier auf das Kapitel „Patch-Optimizer“ (TP8) verwiesen. Die Bestimmung der Verschneidungsrichtung mit der in Kapitel 2.2 vorgestellten Methodik ist bei dem Querlenker nicht zielführend, da keine globale Vorzugsrichtung vorhanden ist. Deswegen wurden Bauteilbereiche mit lokalen Vorzugsrichtungen identifiziert und mit dem Patch-Optimizer getrennt analysiert. Die vorgestellte Korrektur des AGVerlaufs ist derzeit noch nicht implementiert und damit vom Nutzer - wie in Kapitel 2.2 beschrieben - entweder selbst durchzuführen oder bei der Interpretation der Ergebnisse der

Patchanalyse zu berücksichtigen. Eine weitere Möglichkeit ist die Vermeidung des Einfluss innerer Beschnittkonturen auf den AGVerlauf durch das Schließen von Löchern vor der Patchanalyse. Letzteres wurde im Kapitel „Patch-Optimizer“ (TP8) bei der Anwendung auf den Querlenker umgesetzt.

Patch-Optimizer

Der Patch-Optimizer soll zum einen auf der Basis von Simulationsdaten und Geometrieinformationen für das Druckgussbauteil die optimale Anschnittseite bestimmen und zum anderen die Fertigbarkeit für das Tiefziehbauteil ohne Prozesswissen abschätzen, um dem Konstrukteur schon vor der Prozesssimulation die Identifikation von Fertigungshindernissen zu ermöglichen, um diese frühzeitig zu beseitigen. Das Vorgehen bzgl. Druckgussgeometrien basiert auf dem Shortest-Path-Algorithmus nach Dijkstra und ist im Abschnitt Prozessanalyse (Kapitel 3.2) näher erläutert.



Abbildung 5-20: Modellvorbereitung zur Anwendung des Patch-Optimizers auf die Tiefziehgeometrie

Für die Fertigbarkeitsbewertung muss das Modell zunächst vorbereitet werden. Da das Metamodell aufgrund zu komplexer Abhängigkeiten nicht allgemeingültig erstellt werden kann, sondern jeweils nur für bestimmte Bauteilklassen gilt, werden nur bestimmte Bereiche des Tiefziehbauteils untersucht. Im folgenden Beispiel

kommt das Metamodell „Hutprofil PH“ zum Einsatz, das nur für geradlinige Bauteile bzw. Bauteilabschnitte gilt. Dazu wird das Modell in drei Teile unterteilt die näherungsweise als linear angenommen werden können. Im Folgenden wird exemplarisch nur der mittlere Teil berücksichtigt, da dieser am stärksten durch Falten gefährdet ist. Vor der Durchführung der Analyse werden alle verbleibenden Löcher gefüllt. Abbildung 5-20 stellt das Originalbauteil (links) dem mittleren Teil (rechts) gegenüber, das zur Analyse herangezogen wird.

In dem früheren Stadium, in dem der Patch-Optimizer normalerweise Anwendung findet, sind diese Details oft noch nicht vorhanden. Ist dies doch der Fall können diese manuell oder automatisiert entfernt werden. Anschließend wird die Geometrie im CAD als STEP exportiert, um sie durch den Patch-Optimizer zu bewerten. Nach der Erstellung des Abwicklungsgradienten und der Bewertung der Patches (siehe Abschnitt 3.5) wird das jeweilige Modell hinsichtlich der Tendenz zur Faltenbildung visuell dargestellt. In Abbildung 5-21 ist das Ergebnis der Analyse durch den Patch-Optimizer (rechts) dargestellt. Hier ist zu beachten, dass die Randbereiche (an den Stellen der Schnitte) durch Randeffekte bei der Berechnung des Abwicklungsgradienten keine verlässlichen Ergebnisse darstellen und somit bei der Interpretation der Ergebnisse nicht berücksichtigt werden dürfen.

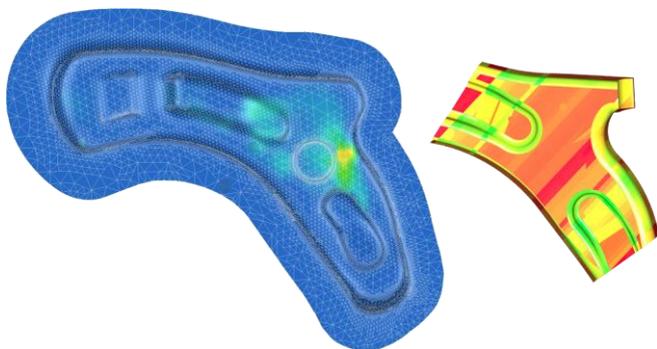


Abbildung 5-21: Vergleich der Ergebnisse des Patch-Optimizers mit kommerziellen Tools

Verglichen mit dem Ergebnis eines kommerziellen Tools, z. B. einem Bewertungskriterium von AutoForm (Abbildung 5-21 links), ist eine deutliche Ähnlichkeit erkennbar. Das qualitativ dargestellte Faltenrisiko ist im Fall von AutoForm an den hellblauen bis gelben Stellen am höchsten. Diese Bereiche sind im Ergebnis des

Patch-Optimizers ebenfalls als risikoreich identifiziert. Eine Prozesssimulation bestätigt diese Ergebnisse und zeigt, dass eben diese Bereiche zu Falten neigen.

Die Analysen liefern somit ähnliche Ergebnisse, wobei das Bewertungskriterium von AutoForm auf Prozessgrößen wie z. B. dem Werkzeug basiert, wohingegen die Analyse des Patch-Optimizers allein auf der Geometrie basiert. Der Aufwand zur Anwendung beschränkt sich lediglich auf die Modellvorbereitung, der Nutzen der Analyse hängt stark von der Geometrie und dem dazugehörigen Metamodell ab.

FEA-Assistenzsystem

Die Absicherung der beiden neuen Querlenker-Varianten erfolgt zunächst im Syntheseteil des FEA-Assistenzsystems. Neben den bekannten Lastfällen des Stahlgussquerlenkers können ebenso erweiterte Simulationen inklusive der Anschlussbauteile automatisiert über CAE-Features aufgebaut werden. Abbildung 5-22 zeigt dies für eine Baugruppe, die sich aus einem Alu-Querlenker, drei Schraubenverbindungen und einem Tragelenk zusammensetzt.

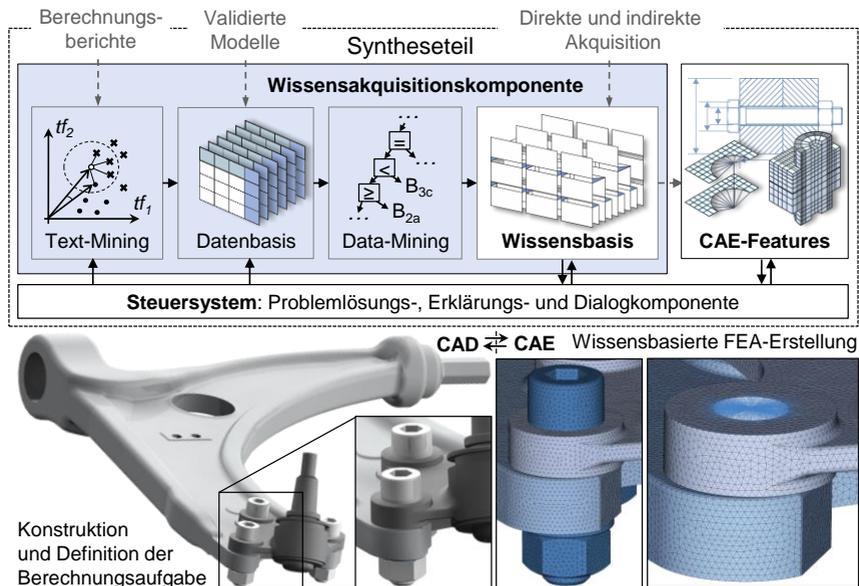


Abbildung 5-22: Syntheseteil nach [10],[13],[Kes15c]

Darüber hinaus sind die Module des Syntheseteils dargestellt: Die durch Text-Mining und Data-Mining unterstützten Wissensakquisitionsprozesse (insbesondere zur Akquisition des erforderlichen Wissens aus Berechnungsberichten und validierten Modellen), die zentrale Wissensbasis, die CAE-Feature-Bibliothek (zur Anwendung des akquirierten Wissens und Automatisierung des Simulationsaufbaus) sowie das Steuersystem.

Neben einer gleichmäßigen Vernetzung der gesamten Baugruppe mit geringen Elementverzerrungen sowie einer ausreichend hohen Netzfeinheit in Bereichen mit hohen Spannungsgradienten, werden die Schraubenverbindungen automatisiert durch geeignete Modellklassen abgebildet (z. B. als Volumenmodell mit Reib- und Gewindekontakt zur Berechnung der lokalen Kerbspannungen oder einem vereinfachten Balkenmodell zur Berechnung der Schnittgrößen nach dem Nennspannungskonzept). Zudem lässt sich z. B. die tiefgezogene Variante des Querlenkers mit einem Mittelflächenmodell vereinfachen und mit Schalenelementen vernetzen. [14],[Kes15c]

Nach dem Simulationsaufbau und dem Processing wird der Analyseteil FEdeIM des FEA-Assistenzsystems aktiviert. Die Hauptaufgabe liegt in der Interpretation und Bewertung der Simulation mittels Plausibilitätsprüfung. Hierfür kommen Künstliche Neuronale Netze zum Einsatz welche auf Basis des Stahlguss-Querlenkers erzeugt wurden. Dies ermöglicht das Erkennen von offensichtlich falschen Simulationen durch das rechnergestützte FEA-Assistenzsystem. Abbildung 5-23 oben zeigt die Benutzeroberfläche des Assistenzsystems mit dem eingeladenen Alu-Druckguss-Bauteil.

Das Assistenzsystem stellt darüber hinaus ein Modul für den Modellvergleich zur Verfügung. Innerhalb dieses Moduls können zwei Simulationen eines ähnlichen Bauteils miteinander verglichen werden. Abbildung 5-23 unten zeigt den Vergleich einer idealen Simulation (ideale CAD-Geometrie) und einer Simulation mit abweichungsbehafteter Geometrie, wie sie beispielsweise durch die 3D-Oberflächenenerfassung durch TP 10 generiert wird.

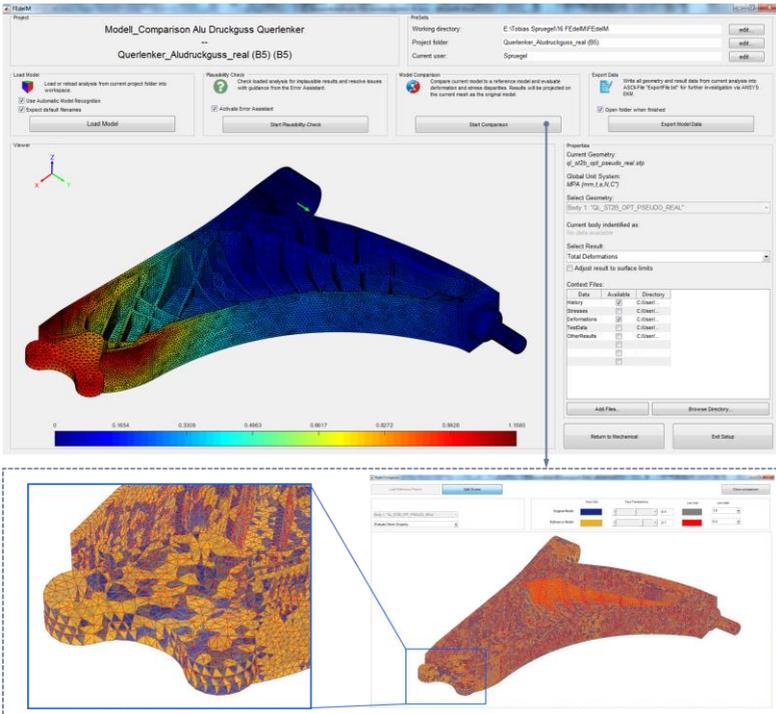


Abbildung 5-23: Analyseteil FEDEM des FEA-Assistenzsystems mit Alu-Druckguss-Querlenker

3D-Oberflächenerfassung

Zur Validierung der Simulation und Erzeugung der Geometriedaten wird der vorhandene Prototyp mit einem ScanArm erfasst. Die Daten sind entsprechend aufbereitet und über Best-Fit-Algorithmen mit dem CAD-Modell überlagert. Damit lässt sich eine Vergleichsdarstellung erzeugen, wie die Abweichungen am realen Bauteil vorliegen (Abbildung 5-24).

Nach diesem Vergleich, können die Abweichungen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die durchgeführten Simulationsergebnisse bewertet werden. Da bereits FE-Simulationen am CAD-Modell durchgeführt sind, bietet sich hier die im weiteren Verlauf eine Modellaufbereitung mittels der FE-Netzadaption an, da dabei die erzeugten Informationen aus dem Preprocessing erhalten bleiben.

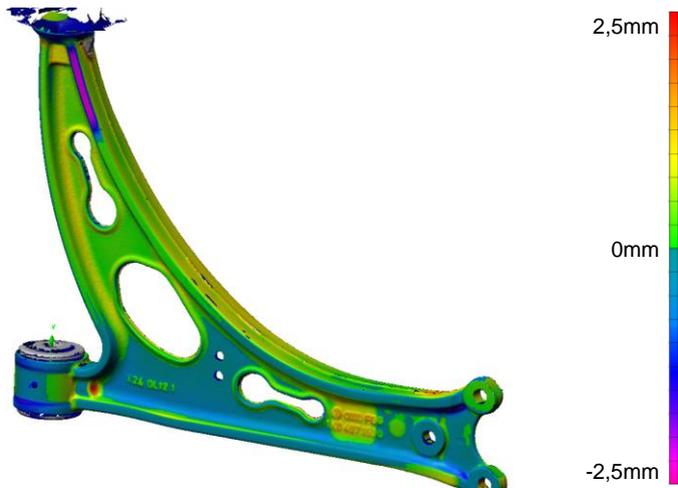


Abbildung 5-24: Vergleich der Geometrie von Real- zu Idealmodell

5.3 Zusammenfassung

Die im Leitfaden präsentierten Methoden aus dem Forschungsverbund FORPRO² ermöglichen den industriellen Einsatz von wissensbasierten Simulationstechniken. Damit lässt sich ein effizienter Entwicklungsprozess darstellen, welcher neben der Effizienzsteigerung auch Vorteile bei der Produkt- und der Prozessauslegung mit sich bringt. So konnte das Anwendungsbeispiel „Querlenker“ in kurzer Zeit zu einem optimalen Druckgussbauteil und einem optimalen Stahlblech-Bauteil entwickelt werden, wobei die Entwürfe der beiden Varianten direkt fertigungs- und prozessgerecht ausgelegt werden konnten. Das resultierende Gewicht der beiden Varianten wurde im Vergleich zum Stahl-guss-Bauteil ohne Einbußen bei den funktionellen und mechanischen Eigenschaften erheblich reduziert. Dank der Erfassung und Rückführung von Fertigungsabweichungen in die Simulation konnten auch die potentiell negativen Auswirkungen des Fertigungsprozesses auf die Produktauslegung minimiert werden. Weitere Möglichkeiten zur Fehlervermeidung bringen der wissensbasierte Simulationsaufbau und das FEA-Assistenzsystem mit sich, wobei letzteres den Anwender bei Auswertung von Simulationsergebnissen durch Plausibilitätsprüfung und Fehlerassistent unterstützt. Positiv ist hervorzuheben, dass unter Anwendung der Wissensbasis und deren angeschlossener Methoden simulationsunerfahrene Anwender befähigt werden,

die komplexen Methoden und Simulationsverfahren anzuwenden und damit die Iterationen und Schnittstellen zu anderen Abteilungen zu reduzieren. In Summe ermöglichen die Ergebnisse aus dem Forschungsverbund FORPRO² eine effiziente Produkt- und Prozessentwicklung durch wissensbasierte Simulation für bayerische Unternehmen.

6 Abkürzungsverzeichnis

AG	Abwicklungsgradient
AL	Abwicklungslänge
BPMN	Business Process Model and Notation
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CFD	Computational Fluid Dynamics
CS	Druckspannung
CS_krit	kritische Druckspannung
EKM	Engineering Knowledge Manager
FEA	Finite Elemente Analyse
MBK	Methodenbaukasten
MKS	Mehr-Körper-Simulation
MM	Metamodell
PEP	Produktentwicklungsprozess
SIPOC	Supplier-Input-Process-Output-Customer
TP	Teilprojekt

7 Literatur

Im Projekt entstandene Literatur

- [Bre15] **BREITSPRECHER, T.; KESTEL, P.; KÜSTNER, C.; SPRÜGEL, T.; WARTZACK, S.** (2015): Einsatz von Data-Mining in modernen Produktentstehungsprozessen. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 110, Nr. 11, S. 744–750.
- [Car16] **CARRO SAAVEDRA, C.; JORGE MARAHRENS, N.; SCHWEIGERT, S.; KESTEL, P.; KREMER, S.; WARTZACK, S.; LINDEMANN, U.** (2016): Development of a Toolkit of Methods for Simulations in Product Development. In: 2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Bali, Indonesien.
- [Hei16] **Heilmeier, F.; Goller, D.; Opritescu, D.; Thoma, C.; Rieg, F.; Volk, W.** (2016): Support for Ingate Design by Analysing the Geometry of High Pressure Die Cast Geometries Using Dijkstra's Shortest Path Algorithm. Advanced Materials Research 1140, Pfaffikon: Trans Tech Publication, S 400-407.
- [Kat16] **Katona, S.; Koch, M.; Wartzack, S.** (2016): An approach of a knowledge-based process to integrate real geometry models in product simulations. In: Procedia CIRP, Vol. 50, 2016, P. 813-818, 26th CIRP Design Conference, Stockholm, Sweden, 15.-17.06.2016
- [Kes15a] **KESTEL, P.; SPRUEGEL, T. C.; KATONA, S.; LEHNHAEUSER, T.; WARTZACK, S.** (2015): Concept and Implementation of a Central Knowledge Framework for Simulation Knowledge. In: NAFEMS European Conference: Simulation Process and Data Management, Munich.
- [Kes15b] **KESTEL, P.; SPRUEGEL, T. C.; KATONA S.; WARTZACK, S.** (2015): Konzept zur Umsetzung einer zentralen Wissensbasis für Simulationswissen im ANSYS Engineering Knowledge Manager. In: ANSYS Conference & 33th CADFEM Users' Meeting, Bremen.
- [Kes15c] **KESTEL, P.; WARTZACK, S.** (2015): Konzept für ein wissensbasiertes FEA-Assistenzsystem zur Unterstützung konstruktionsbegleitender Simulationen. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X - Beiträge zum 26. DfX-Symposium, Herrsching.
- [Kes16a] **KESTEL, P.; SCHNEYER, T.; WARTZACK, S.** (2016): Feature-based approach for the automated setup of accurate, design-accompanying Finite Element Analyses. In: Marjanovic, D.; Culley, S.; Lindemann, U.; McAlloone, T.; Weber, C. (Hrsg.): Proceedings of the 14th International Design Conference, Dubrovnik, Kroatien.
- [Kes16c] **KESTEL, P.; SPRUEGEL, T.; WARTZACK, S.** (2016): Feature-basierte Modellierung und Bauteilerkennung in automatisierten, konstruktionsbegleitenden Finite-Elemente-Analysen. 34. CADFEM ANSYS Simulation Conference 2016, Nürnberg.
- [Sch16] **SCHWEIGERT S., CARRO SAAVEDRA, C., MARAHRENS, N.-J., LINDEMANN, U.** (2016): A Process Standardization Approach to Enhance Design Verification. In: Proc. R&D Management Conference, 03.-06. Juli 2016, Cambridge, Großbritannien, S. 1-12.
- [Spr16a] **SPRUEGEL, T. C.; WARTZACK, S.** (2016): Das FEA-Assistenzsystem – Analyseteil FEdelM. In: Stelzer, R. (Hrsg.): Entwerfen Entwickeln Erleben – Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Dresden: TUDPress.

Externe Literatur

- [1] **BIRKERT, A.; HAAGE, S.; STRAUB, M.** (2013). Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile, Berlin Heidelberg: Springer-Vieweg.
- [2] **BMW - BRANCHENSKIZZE AUTOMOBILBAU** (2015). URL: <https://www.bmw.de/DE/Themen/Wirtschaft/branchenfokus,did=195924.html>, Zugriff: 11.11.2016
- [3] **COOPER R. D.** (1990): Stage-Gate Systems: A New Tool for Managing New Products. Business Horizons 1990 33 (3), S. 44-54.
- [4] **DIJKSTRA, E.** (1959). A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. Numerische Mechanik 1, S. 269-271.
- [5] **DUBBEL, H.; GROTE, K.H.** (2014). Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau, Berlin Heidelberg: Springer-Vieweg.
- [6] **HARTHUN, S.** (1999). Beitrag zur Entwicklung der Geometrie von Ziehwerkzeugen für PKW-Außenhautteile, Dissertation, Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart
- [7] **KOHN, A.; LINDEMANN, U.; MAURER, M.** (2013): Knowledge Base for supporting the handling of Product Models in Engineering Design. In: Lindemann, U.; et al. (Hrsg.): Proceedings of the 19th International Conference on Engineering, Seoul.
- [8] **KRAUSE, F.L.; FRANKE, H.J.; GAUSEMEIER, J.** (2007). Innovationspotenziale in der Produktentwicklung, München Wien: Carl Hanser Verlag
- [9] **NONAKA, I.; TAKEUCHI, H.** (1997): Die Organisation des Wissens. Frankfurt/Main: Campus Verlag.
- [10] **RUDE, S.** (1998): Wissensbasiertes Konstruieren. Aachen: Shaker-Verlag.
- [11] **RUPP C., DIE SOPHISTEN** (2009): Requirements-Engineering und -Management. München: Hanser, 5 Aufl., 2009.
- [12] **Seiffert, U.; Rainer, G.** (2008). Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz – Prozesse, Komponenten, Beispiele aus der Praxis, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2008.
- [13] **VDI-GESELLSCHAFT ENTWICKLUNG KONSTRUKTION VERTRIEB (VDI-EKV), GESELLSCHAFT FÜR INFORMATIK** (1992): Wissensbasierte Systeme für Konstruktion und Arbeitsplanung. Düsseldorf: VDI Verlag.
- [14] **VDI-RICHTLINIE 2230 BLATT 2** (2014): Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen - Mehrschraubenverbindungen. Berlin: Beuth.
- [15] **VDI-RICHTLINIE 3633** (2013). Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Begriffe. Berlin: Beuth
- [16] **VDMA E.V.; STAUFEN AG** (2015). Lean Development im deutschen Maschinenbau 2015 – Effizient entwickeln, schnell und erfolgreich am Markt, URL: http://www.staufen.ag/fileadmin/hq/survey/STAUFEN_Studie_Lean_Development_VDMA_2015.pdf, Zugriff: 11.11.2016
- [17] **VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE** (2015): VDI 5620 – Blatt 1, Entwurf. Reverse Engineering von Geometriedaten, Beuth, Berlin.
- [18] **WARTZACK, S.** (2001): Predictive Engineering – Assistenzsystem zur multikriteriellen Analyse alternativer Produktkonzepte. Düsseldorf: VDI Verlag.

Mit dem vorliegenden Leitfaden wollen die Autoren Unternehmen dazu befähigen, die Durchführung von Simulationen in Entwicklung, Konstruktion und Fertigung effizienter zu gestalten – basierend auf dem entwickelten Simulations-Framework. Dieses Framework ermöglicht dem Produktentwickler, wissens- und kontextbasiert die richtigen Werkzeuge im Bereich der Produkt- und Prozesssimulation zum optimalen Zeitpunkt und auf korrekte Weise einzusetzen. Dabei liegt der Fokus auf der verbesserten Integration von Wissen in den Simulationsprozess, um zu qualitativ hochwertigen Simulationsergebnissen zu gelangen.

Gefördert durch:



Bayerische
Forschungsförderung

