

Handlungsleitfaden zur systemischen Entwicklung und der gezielten Hebung von Leichtbaupotenzialen

entwickelt im Technologietransfer-Programm Leichtbau



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Vorwort



Individualisierung und Nachhaltigkeit sind zwei entscheidende Konzepte, die in der modernen Gesellschaft immer stärker miteinander verwoben sind. In dem Maße, in dem der Einzelne einen nachhaltigeren Lebensstil anstrebt, sucht er auch nach Möglichkeiten, seine Entscheidungen und Handlungen zu personalisieren, um sie mit seinen einzigartigen Werten und Vorlieben in Einklang zu bringen. Diese Überschneidung von Individualisierung und Nachhaltigkeit tritt in gleicher Weise in den deutschen Unternehmen zu Tage und birgt ein großes Potenzial für positive Veränderungen sowohl auf individueller als auch auf gesellschaftlicher Ebene. Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung sind dabei eng mit dem CO₂-Fußabdruck verbunden. Mit dem Potential Emissionen zu reduzieren, hat sich Leichtbau als ein unterstützendes Werkzeug herausgestellt.

Der Mittelstand der deutschen Industrie bildet das Rückgrat der deutschen Wirtschaft. Er ist ein Garant für Wachstum und Wohlstand in unserer Gesellschaft. Besonders deutlich zeigen sich hier Leichtbau- und Nachhaltigkeits-Potentiale. Diese werden jedoch oftmals sehr zögerlich umgesetzt [1, 2]. Dies liegt vor allem daran, dass Leichtbau meist keinen direkt messbaren wirtschaftlichen Mehrwert darstellt. Dennoch werden durch Leichtbau Emissionseinsparungen möglich, die besonders im Angesicht des European Green Deals zu beachten sind.

Durch konsequenten Leichtbau bewegter Komponenten können die für die Bewegung benötigte Energie sowie der Materialaufwand reduziert werden. Eine genauere Kenntnis dieser Einsparungen stellt einen nicht zu vernachlässigenden Wettbewerbsvorteil dar. Jedoch sind weder die Berechnung des CO₂-Footprints, noch die aus den immer kürzeren Produkt- und Innovationszyklen und dem zunehmenden Verdrängungswettbewerb resultierenden Aufwände in der Entwicklung bislang durch systemische Leichtbauentwicklung ausreichend unterstützt.

Aus diesem Grund hat sich ein Projektkonsortium um Universitäten, Entwickler und Anwendungspartner zusammengetan, um einen systemischen Leichtbau-Prozess zu erproben und die Ergebnisse

in diesem Leitfaden als Hilfestellung zu veröffentlichen. Dieser soll den Mittelstand des verarbeitenden Gewerbes bei der zügigen Einführung von systemischen Entwicklungsprozessen mit besonderer Ressourceneffizienz durch Leichtbaufokus unterstützen. Der Leitfaden stellt dazu den Prozess und dessen digital durchgängige Umsetzung sowie einen Teil der applizierbaren Methoden vor, die den systemischen Entwicklungsprozess auf realisierbare Einzeleinheiten reduzieren. Die Anwendung dieser Einheiten im eigenen Unternehmen hilft bei der Ideenfindung für mehr Ressourceneffizienz, CO₂-Minderung, innovative Produkte und eine verbesserte Produktion. Entdeckung und Verwertung der Potentiale erfolgt in unternehmensinternen Workshops.

Der Leitfaden, angelehnt an [3], bietet damit eine Orientierungshilfe für den Mittelstand des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus und darüber hinaus, die Ressourcennutzung und systemische Entwicklung zu optimieren, den Nutzen für das eigene Unternehmen zu begreifen und auch quantifizieren zu können.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
wbk Institut für Produktionstechnik

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann
Universität des Saarlandes
Lehrstuhl für Leichtbausysteme

Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber
Universität des Saarlandes
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik

Dr. Sven Kleiner
:em engineering methods AG

Michael Runge
d.u.h.Group GmbH

Management Summary

Viele Unternehmen sehen Ressourceneffizienz und CO₂-Minderung eher als Herausforderung und nicht als Chance oder Befähiger. Konkrete Lösungsansätze liegen häufig ebenso im Dunkeln wie die Frage, inwiefern der Leichtbau hier einen Mehrwert generiert. Die Vielfalt in der Unternehmenslandschaft des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus bedingt letztlich, dass sich jedes Unternehmen eine eigene Sichtweise auf Leichtbau, Nachhaltigkeit, CO₂-Minderung und Ressourcenschonung erarbeiten, eigene Potentiale erkennen und eigene Ideen für die Nutzung der neuen Potentiale entwickeln muss. Dies gilt besonders im Hinblick auf legislative Verpflichtungen wie dem ESG-Reporting, sowie der sich mit der angestrebten Klimaneutralität bis 2045 [4] abzeichnenden Scope-Neutralität.

Der Leitfaden stellt damit keine vorgefertigte Strategie zur Umsetzung systemischer Entwicklungsprozesse im eigenen Unternehmen dar, sondern zeigt vielmehr Werkzeuge und Vorgehensweisen für die individuelle Implementierung des systemischen Entwicklungsprozesses auf und befähigt eine Weiterentwicklung der eigenen Stärken und Kompetenzen.

Der Leitfaden folgt nach einer Vorstellung des erarbeiteten Prozesses logisch dessen Struktur, bevor die digital durchgängige Umsetzung und die Implementierung in der Praxis und Beispiele aus dieser dargestellt werden.

Der Entwicklungsprozess wurde während der Laufzeit des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten und durch den Projektträger Jülich betreuten Projekts *SyProLei* zusammen mit den Firmen Liebherr-Verzahntechnik GmbH, Ottobock SE & Co. KGaA und Qeridoo GmbH erarbeitet und erprobt. Die dabei gesammelten Erfahrungen sind wiederum in den Leitfaden eingeflossen.

Zunächst wird der systemische Entwicklungsprozess vorgestellt und seine Herkunft, Hintergründe und Umsetzung erklärt. Die im Anschluss vorgestellten Phasen des Entwicklungsprozesses werden von einem Werkzeugkasten zur Unterstützung abgerundet.

Im Werkzeugkasten werden anschaulich die vorgestellten verschiedenen Anwendungsebenen von systemischen Entwicklungsprozessen anhand der verwendeten Methodiken dargestellt und in einzelne, realisierbare Einzeleinheiten zerlegt. Ziel ist hierbei eine schrittweise Implementierung des systemischen Entwicklungsprozesses in das Unternehmen und die Unterstützung des Unternehmens dabei.

Die digitale Umsetzung beschreibt die Umsetzung der Toollandschaft, die sich im Laufe des Projekts entwickelt hat, und nennt Softwarebausteine zu deren Umsetzung und Adaption auf das eigene bestehende System sowie die dafür notwendigen Schnittstellen. Abschließend berichten die Projektpartner über die Umsetzung im eigenen Unternehmen, die Key-Learnings und den während der Projektlaufzeit begegneten Herausforderungen und Chancen digital durchgängiger systemischer Entwicklung.

Die mit den drei Unternehmen durchlaufene Projektzeit förderte innovative Lösungen für leichtere und nachhaltigere Produkte zutage. Es konnte gezeigt werden, dass das Vorgehensmodell erfolgreich zur gezielten Hebung von Leichtbaupotentialen durch systemische Entwicklung eingesetzt werden kann. Der Leitfaden bietet damit eine geeignete Grundlage zur Entwicklung eigener Konzepte.

Inhaltsverzeichnis

Systemisches Entwickeln	6
Wie können die bestehenden Entwicklungsansätze genutzt und befähigt werden?	6
Wie kann mit Leichtbau Geld verdient werden?	7
Spielt die Digitalisierung in der systemischen Entwicklung eine Rolle?	7
Wie wird aus der Vision zur Klimaneutralität Realität?	7
Was steht in diesem Leitfaden?	8
Zielsetzung des Leitfadens	8
Was ist zur Umsetzung nötig?	8
Der Werkzeugkasten Systemische Entwicklung	8
Wie ist dieser Leitfaden aufgebaut?	8
Was bedeutet Leichtbau in diesem Leitfaden?	9
Vorbereitung und Analyse	11
Vorbereitung	11
Analysephase	11
Key Performance Indicators	13
V-Modell und Phasen im Entwicklungsprozess	14
Projektinitialisierung	16
Requirements Engineering	17
Funktionales Design	18
Logisches Design	19
Technisches Design	20
Physisches Design	21
Produkt	23
Fertigung	24
Werkstoff	25
Fügetechnologie	27
Prozess- und Systemintegration	29
Abnahmetest und Eigenschaftsabsicherung	31
Modellbildung, Simulation und Optimierung	33
Wissensspeicher	34
Transfer des V-Modells in Bezug auf klassische Entwicklungsphasen	38
Werkzeugkasten Systemische Entwicklung	40
Definition der Systemgrenze	42
Leichtbaufokussiertes Zielsystem	43
Leichtbau-Team	44
Kennzeichnen von Leichtbau-Anforderungen	45
Leichtbau-QFD	46

Funktionserhebung und Erstellung der Funktionshierarchie	47
Leichtbaupotenzialanalyse	48
Minimales Funktionales System	49
Funktions-Massen-Analyse	50
Funktionale Lebenszyklus Energie Analyse	51
PPWF-Korrelation	52
Gezielte Funktionsintegration	53
Parametrisiertes Layout	54
Struktur der Wirkprinzipien	55
Leichtbaukreativitätsmethoden	56
Leichtbauspezifischer Ideengeber	57
Leichtbau-TRIZ	58
Ökobilanzierung/CO ₂ -Fußabdruck	59
1D Simulation	60
Sekundäre Eigenschaftsänderungspotentiale	61
Topologieoptimierung	62
Mehrkörpersimulation	63
Strömungssimulation	64
Technologiekettenplanung und -auswahl	65
Multikriterielle Entscheidungsfindung (MCDM)	66
Digitale Toolkette	67
Allgemeine Informationen zur Notwendigkeit einer modernen Softwarelösungsplattform im Bereich Leichtbautwicklung	67
Veränderung der Geschäftsabläufe für Leichtbautwicklung notwendig	67
Aufbau der IT-Plattform für das <i>SyProLei</i> Projekt	69
Festlegung der Softwarelösungen und deren Aufgabe	69
Implementierung und Beispiele aus der Praxis	77
Liebherr	77
Ottobock	82
Qeridoo	85
Glossar	89
Projektpartner	91
Quellenverzeichnis	92

Systemisches Entwickeln

Leichtbau ist eine der Schlüsseltechnologien zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Durch die Reduktion von bewegten Massen können bei der Nutzung von Produkten Kosten gespart und CO₂-Emissionen gesenkt werden. Zudem kann der Materialeinsatz durch Leichtbaukonstruktionen reduziert werden. Oftmals sind Leichtbaukonstruktionen allerdings mit Mehrkosten verbunden, da die Fertigungsprozesse komplexer und die Werkstoffe teurer sind. Dies führt zu einem Zielgrößenkonflikt zwischen den Lebenszyklus-Kosten, CO₂-Reduktion und dem Gewicht des Produkts. Ein Ansatz zur Lösung des Zielgrößenkonflikts stellt die systemische Entwicklung dar, die das System als Ganzes betrachtet und Beziehungen, beispielsweise zwischen Produktfunktionen, dem Werkstoff und der Produktion, von Beginn an in die Entwicklung miteinbezieht. Zudem ist eine Methodik für eine systematische Zielerreichung von zentraler Bedeutung, um die Kosten, die CO₂-Emissionen sowie das Gewicht durchgehend nachverfolgen zu können. [5, 6]

Wie können die bestehenden Entwicklungsansätze genutzt und befähigt werden?

In der Literatur existieren verschiedene Entwicklungsansätze. Zwei klassische Entwicklungsansätze sind hier die VDI 2221 sowie die VDI 2206. Die VDI 2221 ist ein allgemeiner Ansatz zur Problemlösung. Sie unterteilt die Entwicklung in 9 Phasen, die im Wasserfallmodell durchlaufen werden und so Schritt für Schritt das Produkt verfeinert und abschließend hinsichtlich der Anforderungen abgesichert wird. Dabei werden die Produktion und der Werkstoff erst spät in die Entwicklung einbezogen. Zudem erfolgt eine frühe Unterteilung in Subsysteme, deren Vernetzung nicht eindeutig beschrieben wird, wodurch komponentenübergreifende Bewertungen erschwert werden.

Die Domänen Produktion, Werkstoff und Fügetechnologie werden aktuell erst spät in den Entwicklungsprozess einbezogen.

Die VDI 2206 fokussiert sich hingegen auf die Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Produkte. Sie durchläuft die Entwicklung in einem V-Modell. Auf dem linken Ast der V-Struktur erfolgt

die Spezifizierung des Produkts und dessen Zerlegung zu einer Modellstruktur. Nach der Implementierung folgt auf der rechten Seite des Asts erfolgt dann die Integration der spezifizierten Subsysteme und die Absicherung des Produkts. Der wechselseitige Einfluss zwischen Werkstoff und Produktion wird erst auf dem rechten Ast aufgelöst, wodurch noch spät im Prozess Änderungen am Produkt notwendig werden können.

Die in der Produktentwicklung verwendeten Methoden können anhand der Ziele, die sie unterstützen, kategorisiert werden. Pahl und Beitz [7] haben Methoden in allgemein anwendbare Lösungs- und Beurteilungsmethoden, Methoden zur Produktplanung und Aufgabeklä rung, Methoden für Konzeption, Entwurf, Ausarbeitung und zur Sicherung der Produktqualität untergliedert.

Die VDI 2221 wurde von Klein [8] und Krause [9] bereits um leichtbauspezifische Handlungsempfehlungen erweitert, indem spezielle Optimierungsansätze, wie die Topologieoptimierung und die Fokussierung auf bestimmte Anforderungen wie Kräfte integriert wurden. Allerdings ist das Zusammenspiel aus Produkt, Produktion und Werkstoff in diesem Ansatz nicht integriert.

Die Ansätze von Helms [10] und Hufenbach [11] setzen hingegen auf eine intensive Interaktion zwischen Produkt, Produktion und Werkstoff über den gesamten Entwicklungsprozess hinweg. Dies ermöglicht eine optimierte Auslegung von aus Faserverbundkunststoffen hergestellten Komponenten. Allerdings fehlt eine gesamtsystemische Betrachtung der Einflüsse auf andere Komponenten sowie eine multikriterielle Auswahl von Werkstoff und Produktionsverfahren zur Lösung des Zielgrößenkonflikts.

Laufer [12] und O'Reilly [13] adressieren mit ihren auf Energie basierenden Analysemethoden Nachhaltigkeitsaspekte in der Entwicklung neuer Produktgenerationen. Laufer fokussiert sich hierbei auf die Energieeinsparung durch Massenreduktion sowie die Verteilung von Massen im System. O'Reilly diskutiert vorrangig die Trade-Offs zwischen einzelnen Phasen im Produktlebenszyklus. Beide Methoden dienen insbesondere zur Analyse und weisen

folglich Lücken auf, wenn es um das Design neuer Funktionalitäten oder alternativer Wirkprinzipien geht.

Ein Ansatz für die komponenten- und systemübergreifende Betrachtung von Produkten, der auch in der Industrie vermehrt zum Einsatz kommt, ist das Model-Based Systems Engineering (MBSE). Bei dieser Methodik werden Anforderungen, Funktionen und Komponenten über ein Systemmodell vernetzt. Dieses Systemmodell kann durch Kosten- oder Gewichtsmodelle ergänzt und so bewertet werden. Der Aufbau eines für die systemische Entwicklung leichterer Produkte geeigneten Systemmodells mit integrierter Betrachtung von Werkstoff und Produktion wurde allerdings vor dem Projekt *SyProLei* noch nicht beschrieben.

Wie kann mit Leichtbau Geld verdient werden?

Bei der Analyse der Entwicklungsprozesse bei den Projektpartnern zeigte sich ebenfalls, dass der Fokus im Entwicklungsprozess oftmals stark auf den Kosten liegt und CO₂-Emissionen sowie Gewicht nur beiläufig betrachtet werden. Dies kann auf etablierte Entwicklungsprozesse zurückgeführt werden, in denen die Einbindung und systematische Optimierung von Leichtbaukenngößen nur bedingt vorgesehen ist.

Aus Sicht von Unternehmen ist es daher wichtig, Leichtbau gewinnbringend in die Prozesse zu integrieren. Dies muss auf der einen Seite methodisch geschehen, da für viele in der Wissenschaft diskutierte Methoden ein praktisches Anwendungskonzept fehlt, auf der anderen Seite aber auch systematisch, um im Rahmen von Handlungsempfehlungen an der bestmöglichen Stelle im Produktentstehungsprozess passende Methoden bereitzustellen. Ziel des *SyProLei* Projekts war es, Methoden bereitzustellen, um Leichtbau gesamtheitlich und systematisch in den Entwicklungsprozess zu integrieren. Damit können in der Konzeptphase sehr schnell verschiedene Konzeptvarianten einer ganzheitlichen Bewertung unterzogen und auf wenige Lösungen priorisiert werden, was den Entwicklungsaufwand und damit die Kosten minimiert.

Die Unternehmen sollen so befähigt werden, Leichtbau gewinnbringend in Entwicklungsprozesse zu integrieren. So können für Kunden produktseitig Vorteile in Bezug auf Funktion, aber auch

Nachhaltigkeit, generiert werden. Leichtere Produkte weisen zum einen in der Konzeptphase durch einen geringen Materialverbrauch Einspareffekte bei den Werkstoffkosten und zum anderen gerade bei intensiven Nutzungsphasen, eine deutlich erhöhte Ressourceneffizienz auf, was kostenintensiven Energieverbrauch verringert.

Spielt die Digitalisierung in der systemischen Entwicklung eine Rolle?

Prozesse in der Produktentstehung verschieben sich immer mehr in den virtuellen Raum. Die sukzessive Reduktion von physischen Prototypen steigert die Ressourceneffizienz und senkt Entwicklungskosten durch die Reduktion von Zeit und Material. Damit ein bestmöglicher Einsatz von Tools entlang des Produktentstehungsprozesses erfolgen kann, ist die digitale Bereitstellung über eine gemeinsame Plattform essenziell. Durch den entwicklungsphasenübergreifenden Einsatz digitaler Methodik im Sinne des MBSE wird eine Nachverfolgbarkeit gewährleistet. Änderungen lassen sich somit zeiteffizient umsetzen.

Durch die digitale Toolkette, wie diese im Rahmen des Projekts *SyProLei* aufgebaut wurde, werden die Entwickler befähigt, neue leichtbauspezifische Methoden einzusetzen, mit dem Ziel, Gewicht sowie CO₂-Emissionen einzusparen.

Systemische Entwicklung bietet den Vorteil kontinuierlicher Generierung der Daten im Entwicklungsprozess. Somit reduziert sich der nachgelagerte Analyse- und Validierungsaufwand.

Wie wird aus der Vision zur Klimaneutralität Realität?

Viele Technologien zur CO₂-Minderung sind heute bereits vorhanden. Der Nutzen entfaltet sich aber erst durch die geschickte Verknüpfung dieser Technologien. Aus diesem Grund wurde der vorliegende Leitfaden erarbeitet. Er soll den Unternehmen ein Vorgehensmodell an die Hand geben, mit welchem die durchgängige Implementierung und Entscheidungsfindung der Technologien ermöglicht wird.

Was steht in diesem Leitfaden?

Nachhaltigkeit kann auf mehrere Arten definiert werden. Zum einen beschreibt Nachhaltigkeit einen Vorgang mit länger andauernder positiver Wirkung. In einer zweiten Bedeutung ist sie ein Handlungsprinzip bei der Nutzung von Ressourcen [14]. Abgeleitet daraus stellt Nachhaltigkeit im industriellen Umfeld zwei Strategien dar: Zum einen wird der Bereich Kreislaufwirtschaft mit Demontage, Recycling, Weiter- und Wiederverwendung geschaffen. Zum anderen bedeutet Nachhaltigkeit auch die Vermeidung von Emissionen im ersten Schritt in eigener Produktion und im nächsten Schritt entlang der Wertschöpfungskette.

Zielsetzung des Leitfadens

Die Einführung systemischer Entwicklungsprozesse zur gezielten Hebung von Leichtbaupotentialen stellt das Primärziel des Leitfadens dar. Der Leitfaden beschreibt hierzu eine geeignete Vorgehensweise für die Anwendung in Unternehmen, um Emissionseinsparpotentiale durch Leichtbau in der frühen Phase der Produktentwicklung zu erkennen und zu realisieren. Zudem soll der Zielgrößenkonflikt zwischen Lebenszyklus-Kosten, CO₂-Emissionen und Gewicht aufgelöst werden.

Was ist zur Umsetzung nötig?

Systemische Entwicklung betrifft alle Geschäftsbereiche eines Unternehmens: Von der Entwicklung, über die Produktion bis zum Service und der Entsorgung. Daher muss zu Beginn das Bekenntnis der Führungsebene zur Umsetzung des im Leitfaden beschriebenen Vorgehens stehen.

Die Lösungsansätze von systemischer Entwicklung können grundlegende Änderungen in der eigenen Produktion oder der Gestaltung von Geschäftsmodellen bedeuten. Es ist daher eine notwendige Voraussetzung, dass die Entscheidung zur Umsetzung von systemischen Lösungsansätzen im Unternehmen von der Führungsebene initiiert und die Projekte entsprechend personell besetzt werden.

An erster Stelle der Umsetzung steht die Bildung eines geeigneten Projektteams. Das Projektteam sollte interdisziplinär aus Mitarbeitern aus dem produktionstechnischen Bereich, aus dem informationstechnischen Bereich und aus der Entwicklung zusammengestellt werden. Dies ist gerade bei der

Entwicklung von Ideen im Umfeld von Leichtbau, die eine enge Vernetzung der ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen erfordern, dringend erforderlich.

Der Werkzeugkasten Systemische Entwicklung

Ein zentrales Element des Leitfadens ist der Werkzeugkasten Systemische Leichtbau-Entwicklung. In diesem werden die Phasen des im Projekt entwickelten Prozesses mit Methodenbeispielen illustriert und so dem Leser nahegebracht. Die Voraussetzungen und Ergebnisse der einzelnen Phasen werden hier vorgestellt und eine Methodenauswahl zum Erreichen dieser aufgeführt.

Wie ist dieser Leitfaden aufgebaut?

Der Leitfaden ist als logisch aufgebautes Vorgehensmodell zu verstehen. Chronologisch kann der Entwicklungsprozess durchaus mehrfach iterativ, oder im Falle agiler Entwicklung vielfach iterativ, durch Rücksprünge auf vorhergehende Entwicklungsstufen gekennzeichnet sein.

Die beschriebene Vorgehensweise des Leitfadens wird in den nächsten Abschnitten detailliert dargestellt. In der Analyse- und Vorbereitungsphase werden die Kompetenzen des eigenen Unternehmens hinsichtlich systemischer Entwicklung untersucht. Nachfolgend wird das erweiterte V-Modell mit den adaptierten Phasen vorgestellt. Basierend darauf werden diese dann im Werkzeugkasten vorgestellt und um Methoden ergänzt, bevor die Digitale Toolkette vorgestellt wird. Diese dient der digitalen Durchgängigkeit und stellt den Vorschlag einer Softwarelandschaft dar, die systemische Entwicklung fördert. Die Praxistauglichkeit wird im Kapitel Implementierung und Beispiele erprobt. Die gesammelten Erfahrungen der Usecase-Partner werden hier vorgestellt. Angehängt wird ein Nachschlagewerk der Begrifflichkeiten sowie der Referenzen.

Was bedeutet Leichtbau in diesem Leitfaden?

Henning [15] definiert Leichtbau als „Umsetzung einer Entwicklungsstrategie, die darauf ausgerichtet ist, unter vorgegebenen technischen Randbedingungen die geforderte Funktion durch ein System minimaler Masse zu realisieren“. Zur Erreichung dieses Ziels existieren in der Literatur verschiedene Leichtbaustrategien, die im Folgenden aufgelistet sind.

Die Leichtbaustrategie „Bedingungsleichtbau“ analysiert externe Faktoren wie von außen auf System und Komponenten einwirkende Kräfte, und passt das Sicherheitskonzept auf Grundlage dieser Erkenntnisse an. Es werden die Pflichtenforderungen, die das Produkt erfüllen muss, definiert und Überdimensionierung vermindert, um so das Gewicht zu reduzieren [8, 15]. Dazu ist es notwendig, die wirkenden Lastkollektive mittels Simulation oder Sensorik zu kennen und das Bauteil während seiner Lebensdauer dahingehend zu überprüfen.

Im Konzeptleichtbau wird die beste Bauweise aus dem Verhältnis zwischen Gewicht und Funktion gewählt. Es werden entweder vollständige Systeme oder Teilsysteme analysiert. Dabei werden die einzelnen Komponenten auf ihr funktionales Zusammenspiel untersucht, um insgesamt das Gesamtgewicht zu verringern. Hier kann zwischen Integral- und Differenzialbauweise unterschieden werden. Ultraleichtbau fällt auch in die Kategorie Konzeptleichtbau, wobei stets die leichteste Variante unabhängig von Kosten bevorzugt wird [8, 15, 16].

Bei der Leichtbaustrategie „Stoff-“ bzw. „Werkstoffleichtbau“ wird das bisher verwendete Material

durch ein leichteres Material ausgetauscht. Es steht die Vergleichbarkeit im Fokus, wobei Kosten und Herstellverfahren beachtet werden müssen. Durch die Verwendung leichterer Werkstoffe müssen oft Bauteilgeometrie und Wandstärken adaptiert werden [8, 16, 17].

Beim Formleichtbau liegt der Schwerpunkt auf der optimalen Verteilung und Anordnung von Material im Bauteil für eine bestmögliche Kraftverteilung. Dabei werden stark beanspruchte Bereiche verstärkt, während weniger beanspruchte Bereiche, soweit es die Fertigung erlaubt, gezielt reduziert werden. Eine Profilierung oder das Einfügen von Rippenstrukturen sind einfache Verstärkungsmaßnahmen. Durch die genaue Auslegung und Optimierung der Kraftverteilung können Bauteile filigraner gestaltet und somit nach bionischem Vorbild Gewicht eingespart werden [8, 16].

Der Fertigungsleichtbau beinhaltet alle Gewichtsreduzierungsmaßnahmen, die in Herstellungs-, Montage und Fügeprozessen auftreten. Dabei werden die Prozesse analysiert und für die Funktion verzichtbare Materialansammlungen, beispielsweise durch Fügemitel und notwendige Überlappungen, eliminiert. Bei dieser Leichtbaustrategie wird versucht, das bestehende Konzept beizubehalten, um Kosten für neue Produktionsanlagen zu sparen. Dieses Konzept steht oft eng in Verbindung mit dem Stoff- und Formleichtbau [8, 16].



Abbildung 1: Auflistung der Leichtbaustrategien nach [8]

Zudem wird in der Literatur zwischen verschiedenen Leichtbauweisen unterschieden. Diese sind in Abbildung 1 aufgelistet. In der Differenzialbauweise wird jede Funktion in einem eigenen Bauteil umgesetzt. Diese Bauteile werden durch additives Zusammenfügen zu einer Gesamtstruktur verbunden. Dabei ist es möglich, verschiedene Materialien zu kombinieren, um für jede spezifische Funktion den geeigneten Werkstoff zu wählen. Bei Schäden können die einzelnen Elemente repariert oder ausgetauscht werden. Dies wird als Fail-Safe-Prinzip bezeichnet. Zudem ermöglicht diese Bauweise ein einfaches Recycling. [15].

Im Gegensatz dazu werden in der Integralbauweise mehrere Funktionen in einem Bauteil umgesetzt, um die Bauteilanzahl zu reduzieren. Es wird die Anzahl von Fügestellen reduziert, was sowohl die Montagezeit als auch das Risiko von Kontaktkorrosion minimiert [15].

Ziel der integrierten Bauweise ist die Kombination der positiven Merkmale der Differenzial- und der Integralbauweise. Es soll die Integration bewusst beschränkt werden, um sowohl Reparaturmöglichkeiten als auch Recycling zu erleichtern. Dieses wird auch als Teilintegration bezeichnet [8].

In der Hybridbauweise werden verschiedene Materialien in einem Bauteil kombiniert. Es wird mindestens ein Leichtmetallwerkstoff mit einer anderen Materialkomponente form- oder stoffschlüssig verbunden [15].

Laut Henning [15] ist ein Modul „eine Baugruppe eines größeren Zusammenbaus“. Innerhalb eines Moduls besteht eine starke Vernetzung, während eine schwächere Vernetzung zu den umliegenden Bauteilen vorliegt. Mehrere Module kombinieren sich in der Modulbauweise zu einem Produkt. Durch festgelegte Schnittstellen verbinden sich die Module zu einer Gesamtstruktur und tauschen Leistungen sowie Informationen aus.

Ein Bauteil in der Verbundbauweise kombiniert verschiedene Werkstoffe. Dies führt aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften zu einer leichteren Bauteilstruktur mit verbesserten Eigenschaften. Beispiele für die Verbundbauweise sind die Sandwich- und die Faserverbund-Konstruktionen [15].

Der vorliegende Leitfaden geht über die dargestellten Aspekte des Leichtbaus hinaus. In diesem Leitfaden sollen nicht die beschriebenen Leichtbaustrategien und Leichtbauweisen adressiert werden. Es werden Methoden vorgestellt, wie die in der Definition von Henning als technische Randbedingungen bezeichneten Produktanforderungen mit minimalem Aufwand von Kosten und CO₂ erfüllt werden können. Hierbei ist eine reduzierte Masse in vielen Aspekten hilfreich, aber der Fokus liegt auf der Befähigung des Anwenders, Kosten und CO₂-Emissionen über die Lebensphasen Produktion und Nutzung hinweg zu senken.

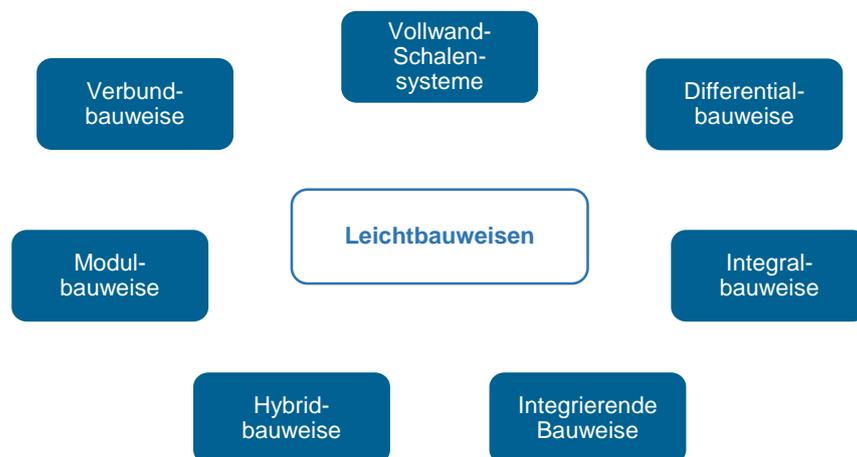


Abbildung 2: Auflistung der Leichtbauweisen nach [8]

Vorbereitung und Analyse

Wie im vorherigen Abschnitt bereits beschrieben, haben die erarbeiteten Lösungsansätze der systemischen Entwicklung Auswirkungen auf unterschiedliche Domänen innerhalb eines Unternehmens.

Diese Auswirkungen können dabei unterschiedlichen Kategorien zugeordnet werden. Neben Veränderungen innerhalb der IT-Landschaft, bspw. durch die Einführung neuer Softwarelösungen, werden unter Umständen auch bestehende Prozesse und Methoden durch die neuen Ansätze verändert bzw. ergänzt. Nicht zuletzt können auch Änderungen innerhalb der Organisation notwendig werden, dies betrifft unter anderem die Befähigung der bestehenden Mitarbeiter, aber auch das Einführen neuer Rollen innerhalb der Organisation.

Vorbereitung

Um einen Rollout der erarbeiteten Lösungsansätze erfolgreich durchzuführen, ist eine systematische Vorbereitung und Analyse innerhalb des Unternehmens notwendig.

Erfassung von Unternehmensinformationen

Im Rahmen der Vorbereitung ist es zunächst wichtig, den Ist-Stand des jeweiligen Unternehmens aus unterschiedlicher Perspektiven zu erfassen, dazu zählen unter anderem die bereits erwähnten Bereiche:

- IT-Landschaft
- Prozesse / Prozesslandkarte
- Methoden
- Organisation

Da die verschiedenen Ansätze innerhalb des Leitfadens neben der reinen Produktentwicklung auch sehr stark die Themen Produktion und Werkstoff in Betracht ziehen, gilt es dort ebenfalls den Ist-Stand zu erfassen. Dazu zählen unter anderem die Betrachtung von verfügbaren Produktionsverfahren und Werkstoffen. Dabei sollen sowohl interne als auch externe Ressourcen (z.B. Zulieferer) mit in Betracht gezogen werden.

In bestimmten Unternehmen gibt es zudem unterschiedliche regulatorische Bestimmungen bzw.

Einschränkungen, die ebenfalls in der nachfolgenden Analysephase mitberücksichtigt werden müssen.

Definition von Zielen

Neben der Erfassung von Unternehmensdaten, ist die Definition von Motivatoren bzw. Zielen ein weiterer wichtiger Aspekt im Rahmen der Vorbereitung.

Neben den klassischen Leichtbauzielen betrachten einzelne Methoden des Handlungsleitfadens auch spezielle Aspekte hinsichtlich Nachhaltigkeit. Ganzheitliche Nachhaltigkeit wird ein zunehmend wichtiges Kriterium im Rahmen der Produktentwicklung und Produktion. Nachhaltigkeit kann dabei durch viele individuelle Ziele dargestellt werden, die einem Projekt zugeordnet sind und von Projekt zu Projekt unterschiedlich ausfallen können.

Vor diesem Hintergrund ist es von Vorteil, die Motivation hinter dem geplanten Einsatz bestimmter Methoden zu kennen und in der nachfolgenden Analysephase zu berücksichtigen.

Analysephase

Auf Basis der vorbereiteten Unternehmensdaten lassen sich in der Analysephase mögliche Handlungsfelder bzw. Handlungsalternativen erarbeiten.

In der Praxis hat sich der Ansatz einer fallbezogenen Einführung von Methoden, Prozessen bzw. Tools bewährt. Dabei orientiert sich der Einführungsprozess an dedizierten Anwendungsfällen, die im jeweiligen Unternehmen vorliegen. Die Anwendungsfälle können dabei aus unterschiedlichen Bereichen, wie z.B. der Anforderungserhebung, dem Design oder eben auch aus der Produktion kommen. Eine schrittweise Einführung, bezogen auf entsprechende Anwendungsfälle, erhöht die Erfolgsaussichten eines entsprechenden Einführungsprojekts.

Zur Ableitung von entsprechenden Anwendungsfällen und darauf aufbauenden Handlungsempfehlungen, lohnt sich häufig der Blick auf aktuelle Problemstellungen bzw. sogenannte Pain-Points im jeweiligen Unternehmen. Gibt es Prozesse, die nicht gut laufen oder Lücken in der Toollandschaft,

welche in der täglichen Arbeit z.B. Mehrarbeit verursachen, so ist in der Regel auch die Bereitschaft und Motivation höher, neue Prozesse, Methoden oder Tools zu akzeptieren und anzuwenden. Bei der Analyse wird dabei gerne auf Methoden wie beispielsweise die SWOT-Analyse zurückgegriffen. Dabei werden zunächst die Stärken (**S**trengths) sowie die Schwächen (**W**eaknesses) zum betrachteten Anwendungsfall ermittelt und darauf basierend entsprechende Chancen (**O**pportunities) aber auch Risiken (**R**isks) ermittelt. Es empfiehlt sich, zu diesem Zweck entsprechende Workshops bzw. Interviews mit den relevanten Stakeholdern durchzuführen.

Ziel der Analysephase

Als Ergebnis der Analysephase sollten entsprechende Handlungsempfehlungen resultieren. Diese können sowohl die bestehenden Prozesse und Methoden als auch die Toollandschaft, bzw. die Organisation betreffen. Häufig ist auch eine Kombination aus mehreren Bereichen betroffen.

Auf Basis einer nachfolgenden Priorisierung der einzelnen Handlungsempfehlungen lässt sich eine entsprechende Roadmap für die Umsetzung definieren. Auch bei der Definition der Roadmap sind die individuellen Gegebenheiten des jeweiligen Unternehmens zu beachten, dazu zählen verfügbare Ressourcen, laufende Entwicklungsprojekte und Meilensteine.

Erfolgsfaktoren für den Roll-Out

Neben der zuvor beschriebenen Analysephase gibt es Faktoren, die den Erfolg eines Rollouts von

neuen Ansätzen in der Produktentwicklung bzw. Produktion beeinflussen.

Die Akzeptanz innerhalb einer Organisation ist einer dieser Faktoren. Nur wenn die Bereitschaft bei den von der Einführung betroffenen Personen vorhanden ist, die neuen Ansätze auch umzusetzen, wird ein Rollout erfolgreich sein. Die Akzeptanz kann dabei durch geeignete Rolloutkonzepte gefördert werden. Durch die frühe Einbindung in die Planung und durch eine entsprechende Befähigung, können Widerstände und Vorbehalte abgebaut werden.

Die Unterstützung durch das Management spielt eine zentrale Rolle. Durch das Schaffen von Rahmenbedingungen in Form von notwendigen Ressourcen, Zeit und strategischen Vorgaben, kann die Einführung positiv beeinflusst werden.

Ebenso zentral für die erfolgreiche Einführung die Auswahl geeigneter Tools, zugeschnitten auf die angestrebten Veränderungen. Nur wenn Tool, Methoden und Prozesse aufeinander abgestimmt sind, wird eine Einführung von neuen Arbeitsweisen nachhaltig erfolgreich sein.

Im Rahmen des *SyProLei* Forschungsprojekts wurden aus diesem Grund sowohl die Prozesse, Methoden als auch die Werkzeuge bei der Einführung von Leichtbauansätzen mit analysiert.

Key Performance Indicators



Leistungskennzahlen zur Messung und Bewertung des Fortschritts und Erfüllungsgrades der Projektziele

Dienen dazu, zu evaluieren, Muster zu erkennen, Probleme zu lösen und Anpassungen vorzunehmen

Kriterien für relevante KPIs

- **Specific** (verständlich und erklärbar)
- **Measurable** (definiertes, messbares Verhalten)
- **Achievable** (realistisch erreichbar)
- **Result-oriented** (wesentlich und zielgebunden)
- **Time-bound** (zeitlich angemessene Betrachtung)

Abbildung 3: Key Performance Indicators

Ein wichtiger Punkt in der Leichtbau-Produktentwicklung ist die Kenntnis des Marktes über die bei Zielerreichung erlaubten Leichtbaumehrkosten:

- Was motiviert den Kunden, leichtere Produkte einzusetzen?
- Wie viel mehr ist der Kunde bereit zu bezahlen, wenn das Produkt leichter wird?

Im Falle bewegter Massen sind diese Fragen über die Einsparung aufzuwendender Bewegungsenergie einfach zu beantworten, wenn ein Referenzmodell des Systems existiert. Darüber hinaus gibt es weitere Vorteile bei schwingenden Systemen (Verringerung der Amplitude, Verschiebung der Resonanz) und im statischen Fall (Reduktion der Stützelemente). Ihr Einfluss auf die erlaubten Leichtbaumehrkosten ist dem Kunden aufwendiger zu entlocken. In der englischsprachigen Literatur spricht man daher auch von einer Entdeckungsphase mit dem Kunden, der „requirements elicitation“. Dabei geht es in der Vorbereitung und Projektinitialisierung zunächst um die Definition messbarer Ziele – das Zielsystem – bevor später im Requirements Engineering die konkreten Umwelt- und Umsetzungsrandbedingungen definiert werden.

Man bedient sich zur Definition messbarer Ziele der Leistungskennzahlen, engl. Key-Performance-Indicator (KPI). Für einen Produktentwicklungsprozess können verschiedene KPIs ausgewählt werden, um den Erfolg und die Leistung des Prozesses zu messen.

Ein KPI kann beispielsweise die Zeit sein, die benötigt wird, um ein neues Produkt auf den Markt zu bringen. Dies könnte als Indikator für die Effizienz des Entwicklungsprozesses dienen. Hier macht sich beispielsweise ein hoher digitaler Abdeckungsgrad zusammen mit einer Durchgängigkeit in der Implementierung positiv bemerkbar. Ein Prozess, dessen Methoden eine geringe Nutzungsquote bei den Entwicklern haben, deutet dagegen auf Verbesserungspotenzial hin.

Ein weiterer KPI kann die Kundenzufriedenheit sein, gemessen zum Beispiel durch Feedback oder Bewertungen der Kunden. Dies könnte Aufschluss darüber geben, wie gut das entwickelte Produkt den Bedürfnissen und Erwartungen der Kunden entspricht. Bei Auftragsarbeiten spielt dabei auch die Entwicklungszeit wieder eine Rolle.

Auch die Kosten können als KPI betrachtet werden. Hierbei kann die Entwicklung und Einführung eines Produktes mit den geplanten Budgets verglichen werden. Es ist zu beachten, dass als KPI nicht die reinen Messgrößen, sondern davon abgeleitete wichtige Zielsetzungen und kritische Erfolgsfaktoren festgesetzt werden. Es ist wichtig, KPIs auszuwählen, die den spezifischen Zielen und den Werten des Unternehmens entsprechen, um den Erfolg und Fortschritt in Bezug auf Materialeffizienz und Nachhaltigkeit zu bestimmen. So bietet es sich an, die finanziellen Aufwände auf die Leichtbau- und Nachhaltigkeitsindizes zu beziehen und so beispielsweise die Reduzierung des Materialeinsatzes in kg/Euro oder die Verringerung des ökologischen Fußabdrucks in CO₂/Euro zu erhalten.

V-Modell und Phasen im Entwicklungsprozess

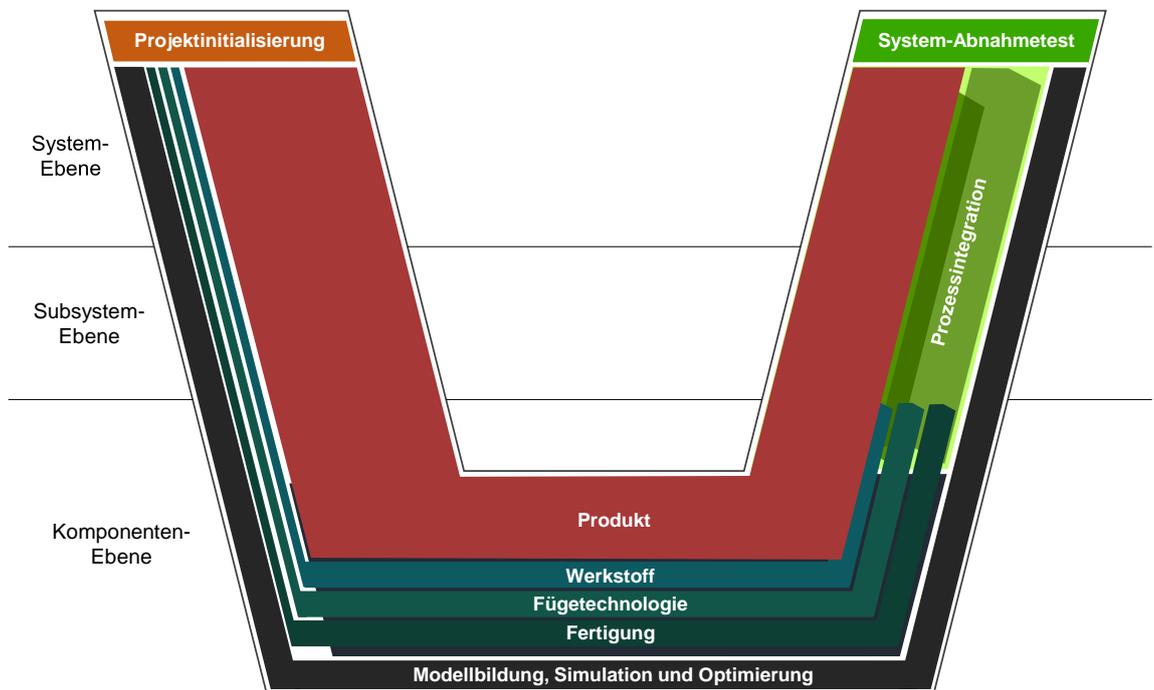


Abbildung 4: Durchgängige Betrachtung der Domänen

Der im Projekt *SyProLei* entwickelte Prozess stellt nach VDI 2221-2 einen Referenzprozess für die Entwicklung leichter Produkte dar und kann branchenspezifisch und projektspezifisch angepasst werden. Das Vorgehensmodell wird hier in Anlehnung an die VDI 2206 als V-Modell beschrieben und baut auf den Ansatz des MBSE auf [18]. In Abbildung 4 ist der grundlegende Aufbau dargestellt.

Ausgehend von einer Projektinitialisierung, in der die Zielgrößen für das Entwicklungsprojekt definiert werden, werden durchgehend die Domänen Produkt, Produktion, Fügetechnologie und Werkstoff betrachtet.

Der Detaillierungsgrad in der Entwicklung nimmt in der Darstellung von oben nach unten zu. Systeme können auch ohne Kenntnis der Komponenten eingesetzt werden. Die drei untereinander vernetzten Ebenen sind wie folgt definiert.

- Systemebene: Hier wird die Interaktion mehrerer Systeme innerhalb des Gesamt-

systems betrachtet und der übergeordnete Problem- und Lösungsraum beschrieben.

- Subsystemebene: Das Gesamtsystem wird in kleinere Systeme zur Funktionserfüllung unterteilt. Die Disziplinen arbeiten übergreifend.
- Komponentenebene: Hier erfolgt die Trennung in Software, Elektronik und Mechanik. Komponenten werden je nach Funktion in diesen Disziplinen umgesetzt.

Bei der Betrachtung von Produktion, Werkstoff und Fügetechnologie, speziell auf Systemebene und Subsystemebene, können die Bewertungen hauptsächlich auf Basis von Wissensdatenbanken und vorherigen Projekten erfolgen, da der Informationsgrad zum Produkt noch sehr gering ist.

Die Phasen des Prozesses basieren auf dem RFLP-Ansatz. Aufgrund der großen Informationslücke zwischen der Logischen (L)- und der Physischen (P)-Phase führen wir zu den bekannten Phasen eine Technische Phase (T) ein. Die Phasen werden iterativ durchlaufen, wodurch das Wissen

über das Produkt zunimmt und eine genauere Bewertung hinsichtlich Kosten, CO₂ und Gewicht aus Sicht der Produktion, Werkstoff und Fügetechnologie möglich wird. Die Definition der Phasen sind im Folgenden aufgelistet.

- **R:** In diesem Schritt werden die Anforderungen (*requirements*) aus Sicht der drei Domänen Produkt, Produktion, Werkstoff aufgenommen und eingeordnet. Auf Basis der Einordnung in Kategorien muss die Rückverfolgbarkeit der Anforderungen über den gesamten Prozess hinweg möglich sein.
- **F:** Aus den aufgenommenen Anforderungen werden erforderliche *Funktionen* des Produkts abgeleitet. Diese werden zudem in einer Funktionsstruktur modelliert, um den Problemraum für die Produktentwicklung zu beschreiben.
- **L:** Die Funktionen werden zu *logischen* Elementen allokiert. Ein logisches Element kann hier mehrere Funktionen erfüllen und eine Funktion kann von mehreren
- **T:** Den ausgewählten Wirkprinzipien werden *technische* Lösungskonzepte zugeordnet und physikalische Eigenschaften werden ergänzt. Basierend auf diesen Eigenschaften können Bauräume, Kraftverläufe sowie die Masse der Lösungen abgeschätzt werden und einzelne Lösungen können bewertet werden.
- **P:** Hier erfolgt die (*physische*) Ausgestaltung der einzelnen Komponenten des Produkts. Es erfolgt die Entwicklung innerhalb der drei Disziplinen Mechanik, Elektrik und Software. Speziell in der Disziplin Mechanik steht hier die Betrachtung der Domänen Produkt, Produktion, Werkstoff sowie der Fügetechnologie im Fokus, um bei der Auswahl der konkreten Umsetzung das Optimum zu bestimmen.

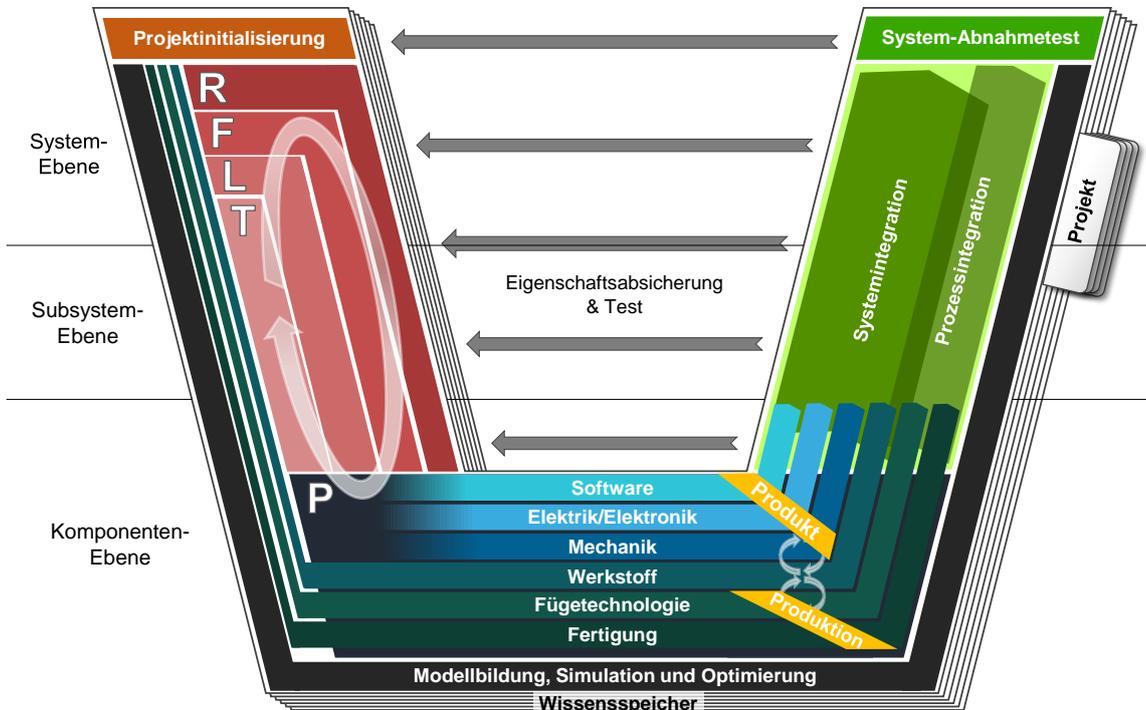


Abbildung 5: Das SyProLei-V-Modell

Projektinitialisierung

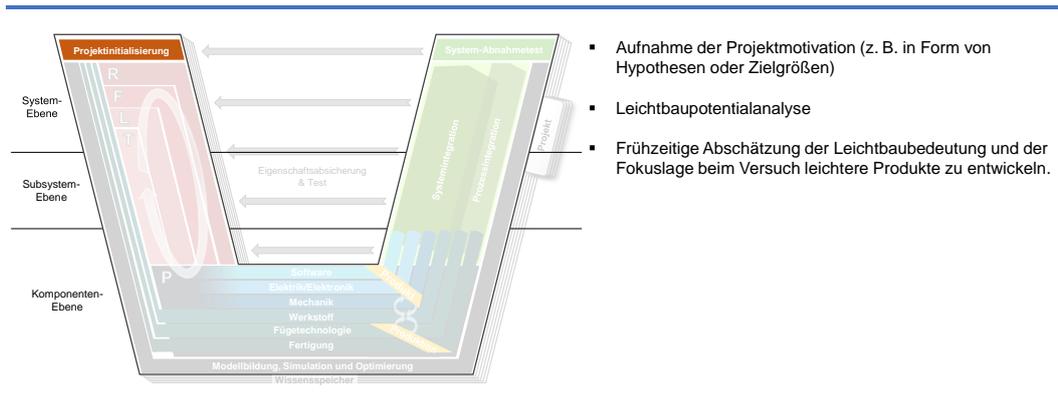


Abbildung 6: Die Projektinitialisierung mit ihren wesentlichen Merkmalen.

Jeder Produktentstehungsprozess ist individuell, insbesondere in Anbetracht individueller Leichtbauentwicklungsziele und Unternehmenskompetenzen. Daher ist die Projektinitialisierung zur Planung des Entwicklungsprojektes und der Definition sowie Abgrenzung von ersten Rahmenbedingungen essenziell. Die grundsätzliche Ausrichtung des Projektziels sowie der einzelnen Elemente des Handelns sollen in diesem Teilschritt der Produktentwicklung erfolgen.

Daneben weist jedes individuelle Produkt unterschiedliche Eigenschaften, Defizite oder Ziele zur Weiterentwicklung auf. Zwar stehen in den meisten Fällen Referenzprodukte für neue Produktgenerationen zur Verfügung, jedoch sind auch komplette Neukonstruktionen ohne fundierte Wissensbasis nicht auszuschließen. Dementsprechend ist es in jedem Fall zunächst von Nöten, kreativ nach neuen, möglichst innovativen Produktideen zu suchen, die herausragende Fortschritte in Einzelzielen (z.B. Gewicht, Kosten oder Nachhaltigkeit) oder systemisch mehrere, vielleicht gar alle Unternehmensziele realisierbar machen. Der daran anknüpfende Prozess von der ursprünglichen, kreativen Idee bis hin zum marktfähigen Produkt wird maßgeblich in der Phase der Projektinitialisierung gestalterisch festgelegt. [19]

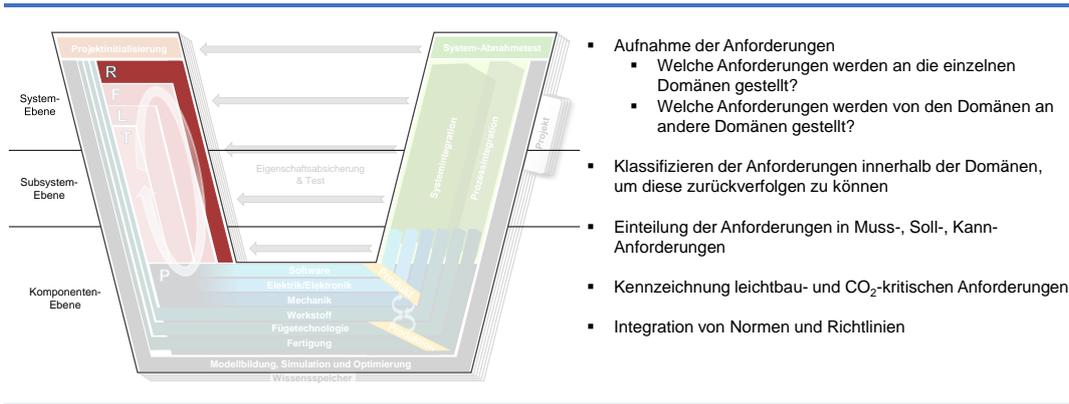
Als ein Baustein gehört hierzu die Definition des „System-of-Interest“ inklusive seiner Systemgren-

zen und Entwicklungsziele innerhalb des Produktentwicklungsprojektes. Die Entwicklungsziele können in einem Zielsystem, das systematisch mehrere, nicht nur leichtbaurelevante Parameter umfasst, festgehalten werden. Hierbei sind neben funktionalen bzw. technischen Gründen für die Leichtbaubestrebungen auch akzeptierbare Mehrkosten sowie immer stärker an Bedeutung gewinnende Nachhaltigkeitsaspekte zu betrachten.

Bei Schwierigkeiten der Definition von messbaren Größen (Zielgrößen, Schwellwerten, Mindestanforderungen) für Gewicht, Kosten und Nachhaltigkeit können Marktanalysen Abhilfe schaffen. Entweder werden hierbei existierende Konkurrenzprodukte bestmöglich analysiert oder in Umfragen die Voice-of-Customer erfasst und dediziert analysiert. Dies sollte immer im Einklang mit dem Leichtbau sein, der einerseits Kosten und Nachhaltigkeitsindikatoren optimieren kann, gleichzeitig aber auch bei einer ganzheitlichen Lebenszyklusanalyse technologische, ökonomische und ökologische Herausforderungen mit sich bringt.

In jedem Fall sollten die individuellen Unternehmenscharakteristiken wie exzellente Kompetenzen, Erfahrung und vorhandene Kapazitäten berücksichtigt werden. Innerhalb eines Unternehmens können so auch Mitarbeiter Ideen vorbringen, die den Erfolg langfristig und zukunftsfähig sicherstellen können, wenn sie adäquat integriert werden.

Requirements Engineering



- Aufnahme der Anforderungen
 - Welche Anforderungen werden an die einzelnen Domänen gestellt?
 - Welche Anforderungen werden von den Domänen an andere Domänen gestellt?
- Klassifizieren der Anforderungen innerhalb der Domänen, um diese zurückverfolgen zu können
- Einteilung der Anforderungen in Muss-, Soll-, Kann-Anforderungen
- Kennzeichnung leichtbau- und CO₂-kritischen Anforderungen
- Integration von Normen und Richtlinien

Abbildung 7: Das Requirements Engineering

Das Requirements Engineering stellt einen wesentlichen Prozessschritt zu Beginn jeder Produktentwicklung dar. Denn nur durch die konkrete Ausarbeitung von Anforderungen werden einerseits komplexe Entwicklungsvorhaben überschaubar und andererseits die Widersprüchlichkeit in Zielkonflikten zwischen Leichtbau, Kosten und Nachhaltigkeit entlang der Koevolution von Problem und Lösung nachverfolgbar. Die dabei resultierende Dynamik in Anforderungen stellt eine Herausforderung für die leichtbauaufokussierte Produktentwicklung dar, für die das MBSE einen Lösungsansatz in Form einer durchgängig modellierten Struktur zwischen Anforderungen (R) und physischen (P) und technischen Lösungen (T), über funktionale (F) und logische Elemente (L) darstellt.

Bei Leichtbau ist es im Sinne der Multidisziplinarität wichtiger denn je, alle Stakeholder bei der Anforderungsdefinition zu berücksichtigen, sodass entlang der Produktdetaillierung und -ausarbeitung die ganzheitlich beste Lösung etabliert werden kann. Zu berücksichtigende Stakeholder sind insbesondere Entwicklung, Produktion, Marketing, Umwelt inklusive Lieferkette, Kunde sowie Service etc.

Für den weiteren Prozess sollte eine Zuordnung der Anforderungen hinsichtlich Leichtbau-, Kosten- und Nachhaltigkeitsrelevanz sowie der Domänen „Produkt“, „Produktion“, „Werkstoff“ und „Fügetechnologie“ erfolgen. Dadurch können effizient die jeweils relevanten Leichtbaufelder gezielt adressiert werden, wodurch eine ganzheitlich beste Lösung resultiert. Gleichzeitig werden hierbei Rahmen- oder Randbedingungen an die Entwicklung offensichtlich. Diese können gesetzlicher Natur im Sinne

von Normen und Richtlinien sein, aber auch zurückführbar auf unternehmenseigene Kapazitäten und Kompetenzen.

Für die Definition quantifizierbarer Beobachtungsgrößen für einzelne Entwicklungsziele können für den Leichtbau beispielsweise Indikatoren wie Masse und deren Verteilung, (Lebenszyklus-)Kosten und CO₂-Emissionen in unterschiedlichen Betrachtungsrahmen dienen. Während die Masse bzw. das Gewicht einer Komponente einfacher zu bestimmen ist, zeigen sich bei Kosten und noch stärker bei ökologischen Indikatoren Schwierigkeiten. Einerseits aufgrund der Abhängigkeit vom Lebenszyklus aber auch aufgrund von Unsicherheiten in der Datenvalidität. Deshalb müssen Anforderungen bei steigendem Wissen über Produkteigenschaften stets hinterfragt und gegebenenfalls angepasst werden.

Insbesondere sollte basierend auf den tatsächlichen Produkteigenschaften und den definierten Anforderungen an das Produkt durch den Leichtbau entlang der Prozesskette der konkrete Mehrwert oder Nutzen gegenüber dem zu erbringenden Mehraufwand offensichtlich werden.

Zusätzlich werden hier bereits die notwendigen Tests für die Abnahme des entwickelten Systems definiert. Welche Tests durchgeführt werden, hängt hierbei stark von der Branche sowie den Einsatzszenarien ab. Dies führt zu einem ausgeprägteren Verständnis der Anforderungen und unterstützt dabei, gezielt auf die Anforderungen hinzuentwickeln. Hierdurch wird wiederum over-engineering reduziert und so Leichtbau effizient etabliert.

Funktionales Design

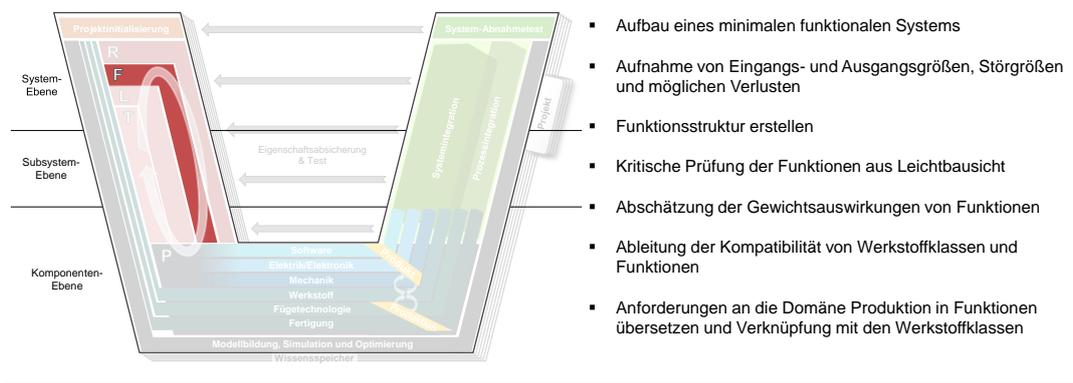


Abbildung 8: Das Funktionale Design

In diesem Abschnitt, der in Unternehmen manchmal auch als Systemarchitektur bezeichnet wird, sollen aus den ermittelten Anforderungen und Use-Cases im vorherigen Kapitel entsprechende Funktionen des Produkts abgeleitet werden, mit denen eine funktionale Struktur erstellt wird. Hierbei soll hinsichtlich des Leichtbaus beachtet werden, dass eine Konzentration auf die wesentlichen Elemente Masse reduziert. Es ist daher sinnvoll, ein minimales funktionales System (MFS) als Basis für das funktionale Design aufzusetzen. Das MFS stellt die einfachste Form des Systems dar, mit der die Hauptfunktion bzw. -anforderungen erfüllt werden.

Bei der Erhebung der Funktionen bzw. des MFS sollen sowohl Eingangs- und Ausgangsgrößen, Störgrößen und mögliche Verluste als auch Beziehungen und Schnittstellen zwischen Funktionen aufgenommen werden. Auf dieser Grundlage kann ein besseres Verständnis von Funktionenzusammenhängen bzw. -abhängigkeiten erreicht werden und somit können Funktionen gezielt aus Leichtbausicht kritisch geprüft werden. Hierzu sollen folgende Punkte ausgeführt und analysiert werden:

- Abschätzung der Gewichtsauswirkungen von Funktionen
- Ableitung der Kompatibilität von Werkstoffklassen und Funktionen
- Anforderungen an die Domäne Produktion in Funktionen übersetzen und verknüpfen mit den Werkstoffklassen

Somit können gewichtstreibende und CO₂-treibende Funktionen identifiziert und Werkstoff sowie Produktion bereits in dieser frühen Phase eingebunden werden, mit dem Ziel eine ressourceneffiziente Produktion zu unterstützen.

Die resultierende funktionale Architektur soll soweit wie möglich lösungsneutral bleiben, um eine optimale Entwicklung in den folgenden Designphasen des Vorgehensmodells zu ermöglichen.

Logisches Design

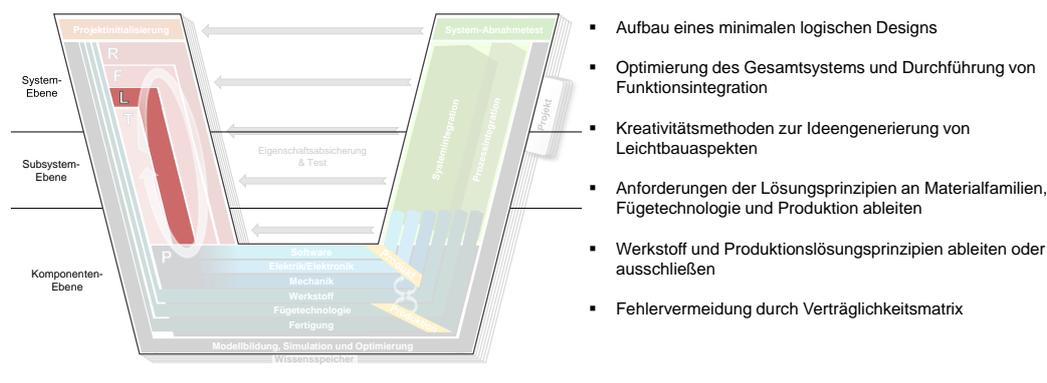


Abbildung 9: Das Logische Design

Das logische Design, im Unternehmen ebenfalls manchmal logische Architektur genannt, schafft ein klares und präzises Modell des Produkts, das die Funktionalität, die Anforderungen und die Beziehungen zwischen verschiedenen Teilen des Produkts architektonisch beschreibt. Dieser Ansatz ermöglicht es auf einer konzeptionellen Ebene und in der frühen Phase der Produktentstehung, Leichtbau und Nachhaltigkeitsaspekte direkt mit einfließen zu lassen sowie neu und ganzheitlich zu denken.

Ein zentraler Punkt des logischen Designs ist es, ein Mapping zwischen der funktionalen Architektur und entsprechenden logischen Elementen herzustellen, welche als „Platzhalter“, für die im weiteren Verlauf zu entwickelnden Komponenten dienen. Das Mapping ermöglicht es, funktionale Zusammenhänge zwischen einzelnen Komponenten abzuleiten. Neben der Zuordnung von Funktionen, wird das logische Design auch dazu genutzt, um systematisch Schnittstellen zwischen einzelnen Elementen zu spezifizieren und abzubilden. Dabei wird zwischen Signal, Energie- und Stofffluss differenziert. Im ersten Schritt eignet sich die Aufstellung eines minimalen logischen Designs, um die Mindestzahl an benötigten Lösungselementen zu definieren. Mittels der Lösungskorrelation sowie der systematischen Darstellung von Wirkprinzipien innerhalb eines zweidimensionalen Bauraummodells, das die Architektur des Produkts beschreibt, kann in den darauffolgenden Schritten eine Funktionsintegration durchgeführt werden. Generelles Ziel ist es, die Anzahl der logischen Elemente, mit

der die funktionale Architektur abgebildet wird, möglichst gering zu halten, wobei als zusätzliches Kriterium die Optimierung von Signal, Energie- und Stoffflüsse zu berücksichtigen ist.

Die logische Ebene eignet sich, neben der Möglichkeit Synergien in der Produktarchitektur systematisch zu nutzen, auch dafür Fehler frühzeitig zu erkennen und leistet damit einen direkten Beitrag zur Qualitätssicherung. Eine Möglichkeit hierfür ist der Einsatz von Verträglichkeitsmatrizen, um die Beziehungen zwischen den logischen Elementen darzustellen. Aufwändigen und kostspieligen Änderungen in späten Entwicklungsphasen wird damit vorgebeugt. Zur Entwicklung innovativer und effizienter Leichtbau-Produkte müssen, insbesondere auf der logischen Ebene, die Lösungsfindungsprozesse durch entsprechende Methodik unterstützt werden. Im Rahmen des *SyProLei*-Projekts wurde eine Methodik entwickelt, mit der diese kreativen Prozesse systematisiert werden. Interdisziplinären Teams werden entsprechend Werkzeuge an die Hand gegeben, kreative Prozesse produktiver zu gestalten. Basierend auf Layout und Bauraummodell sowie Signal, Energie- und Stoffflüssen lassen sich Anforderungen für Werkstoff, Fügetechnologie und Produktion bereits früh detaillieren. Die frühe Ableitung und die damit einhergehende Allokation relevanter Ressourcen ermöglicht die Hebung von Kostenpotenzialen.

Die logische Ebene weist damit signifikante Vorteile für die Lösungsfindung, Prozessagilität und Fehlervermeidung in der Entwicklung nachhaltiger Leichtbauprodukte auf.

Technisches Design

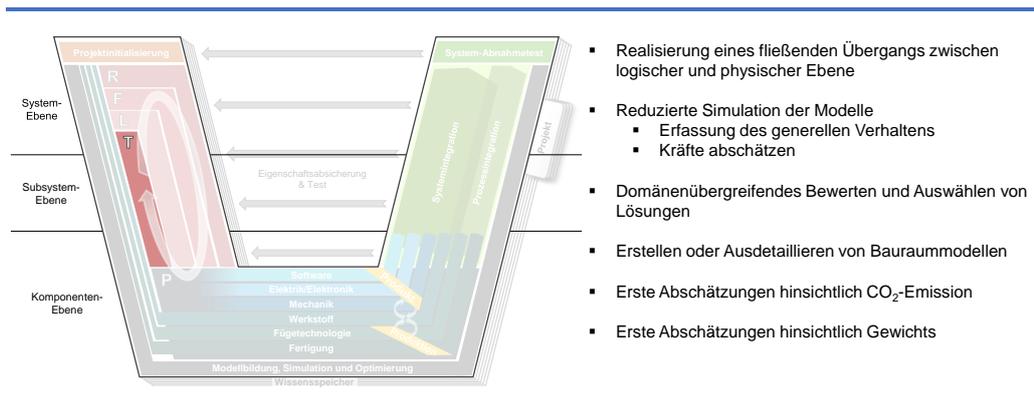


Abbildung 10: Das Technische Design

Die technische Ebene erweitert den bekannten RFLP-Ansatz um eine Zwischenebene, die sich zwischen logischer und physischer Ebene eingliedert. Technische und Physische Ebene wurden bislang meist gleichgesetzt. Hier wurde die technische Ebene aber bewusst als eigenständig definiert.

Ziel der technischen Ebene ist es, den Übergang zwischen abstrakter logischer Ebene und der physischen Ebene, in der die vollständige Realisierung der Komponenten erfolgt, fließender zu gestalten und die Ebenen möglichst schlank zu halten.

Während im logischen Design die Zuordnung zwischen Wirkprinzipien und Funktionen erfolgt, sowie die Beschreibung von Schnittstellen und Flüssen zwischen den logischen Elementen, zielt das technische Design auf die Zuordnung von technischen Lösungskonzepten zu logischen Elementen ab. Die Lösungselemente werden dabei nicht vollständig modelliert, dies findet wie auch im bekannten RFLP-Ansatz im physischen Design statt.

Dennoch werden im technischen Design erste physikalische Eigenschaften definiert, um verschiedene technische Lösungskonzepte miteinander zu vergleichen, und die Erkenntnisse möglichst früh in den Entwicklungsprozess einfließen zu lassen, bevor es in die eigentliche Komponentenentwicklung geht. Dies kann beispielsweise auf Basis von Wertebereichen für bestimmte physikalische Eigen-

schaften wie Leistung, Gewicht, Kosten, Produzierbarkeit, etc. erfolgen. Diese Informationen können u.a. aus Datenblättern, früheren Entwicklungen oder bestehendem Know-how abgeleitet werden. Im Rahmen des *SyProLei*-Forschungsprojekts spielen hier besonders Aussagen über das voraussichtliche Gewicht und die CO₂-Emissionen eine große Rolle.

Für den Vergleich der Lösungskonzepte können Ansätze der Systemsimulation (1D-Simulation) genutzt werden. Dabei stehen in der Regel Bibliotheken zur Verfügung, mit denen sich das Verhalten des Systems bzw. Subsystems auf Basis von physikalischen Parametern simulieren lässt. Ebenfalls können so bereits früh sekundäre Eigenschaftsänderungen abgeschätzt werden, mit denen sich nachhaltig Gewicht und CO₂-Emissionen einsparen lassen. Auf Basis der Ergebnisse lässt sich dann Handlungsbedarf ableiten, der die Grundlage für die weitere Umsetzung innerhalb der physischen Ebene bildet.

Als wichtig unter Leichtbaugesichtspunkten hat sich an dieser Stelle die Erstellung von Bauraummodellen erwiesen. Dabei werden die Bauräume von verschiedenen Teilsystemen im Rahmen eines Layouts dargestellt, angeordnet und entsprechend parametrisiert. Auf dieser Basis lassen sich dann verschiedene Anordnungen bewerten und systematisch vergleichen.

Physisches Design

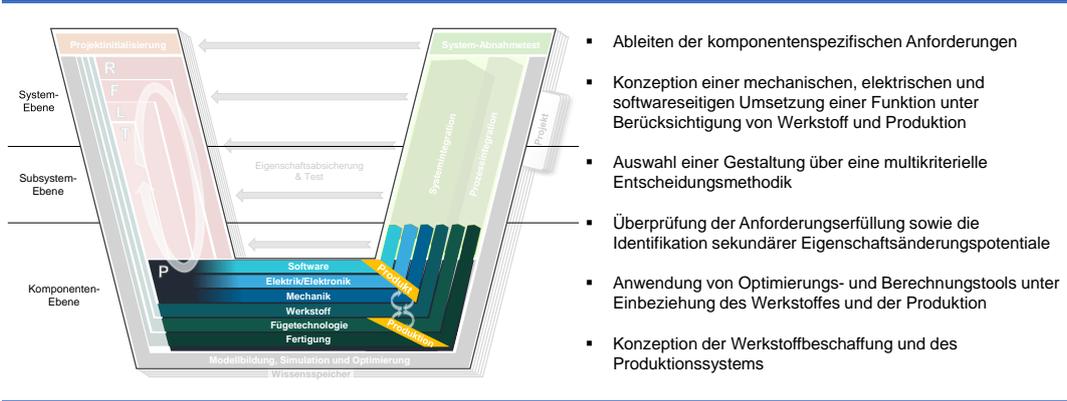


Abbildung 11: Das Physische Design

Beim Physischen Design wird ein Hauptkonzept auf Komponentenebene so weit entwickelt, dass der detaillierte Entwurf direkt in die Produktion übergehen könnte. Da dieser Übergang zwischen Entwicklung und Fertigung in vielen Unternehmen einen einschneidenden Meilenstein in der Betriebsorganisation darstellt, erfährt die Phase des Physischen Designs besondere Beachtung und ist mit zusätzlichen Quality Gates zum Abstellen von Fehlern und Sicherstellen der Wirtschaftlichkeit versehen. Der Änderungsaufwand ist in dieser Phase jedoch höher, weshalb möglichst viele grundlegende Produktentscheidungen in früheren Phasen nachvollziehbar begründet getroffen werden sollten.

Anzustrebende Produkteigenschaften werden erst über die Verkörperung durch Werkstoffe erreicht, welche wiederum mittels Produktionsverfahren in die gewünschte Form gebracht werden. Daher ist es auf Ebene des physischen Designs essentiell, nicht nur in den einzelnen Domänen nach bestmöglichen Lösungen zu suchen, sondern die Abhängigkeiten zu und Auswirkungen auf andere Domänen im gleichen Maße zu berücksichtigen. Hierbei stellt typischerweise die Produktdomäne evolutionär den Ausgangspunkt der Entwicklung dar, von dem basierend auf der gewünschten und zu realisierenden Funktion unter Berücksichtigung der initial formulierten Anforderungen geeignete Werkstoffe aus gesucht werden, welchen im letzten Schritt Produktions- und Fügeverfahren zugeordnet werden. Im Sinne einer ganzheitlichen und systemischen Leichtbauentwicklung ist es jedoch sinnvoll, auch andere Vorgehensweisen umzusetzen und basierend auf Werkstoff- oder Produktionsverfahren Produkteigenschaften auszulegen. Würden Werkstoffe

oder Produktionsverfahren im frühen Entwicklungsprozess nicht ausreichend betrachtet werden, führt dies dazu, dass zwar die Produkteigenschaften und -auswirkungen optimiert wären, diese jedoch durch Werkstoffe und Produktionsverfahren – im Sinne von Kosten und CO₂-Emissionen – nicht erfüllt werden könnten.

Die Auswahl der Fachbereiche ist als exemplarisch für den heutigen Stand in vom klassischen Maschinenbau geprägten Unternehmen zu sehen, soll jedoch nicht vorgeben, dass eine entsprechende Aufteilung sinnvoll ist. Vielmehr sollte die Fach- und Organisationsstruktur des Unternehmens den im gesamten Handlungsleitfaden verfolgten interdisziplinären Ansatz des Systems Engineering abbilden. Substantielle Entwicklungsbeiträge der Domänen Werkstoff und Fügetechnologie sind vor allem im Bereich der mechanischen Integration zu erwarten, betrachtet man die Verbindung von Elektrik und Elektronik als standardisierten Prozess.

Aufgrund der notwendigen Fachspezialisierungen zur Realisierung des Physischen Designs sind an dieser Stelle die meisten Personen mit ihrem jeweiligen Know-How involviert. Zudem ist der aufwändige Einsatz von fachspezifischen Software-Tools erforderlich. Der Handlungsleitfaden empfiehlt, einzelne, mit der vorangegangenen Entwicklungstätigkeit nicht direkt beauftragte Key-User bereits in früheren Phasen einzubinden, z. B. in Form eines Leichtbau-Teams.

Auf eine detaillierte Ausarbeitung des Projekt-Beispiels im physischen Design wird aufgrund des allgemeinen Charakters des Leitfadens und des notwendigen Beschreibungsaufwandes verzichtet. An

dieser Stelle sei auf die im Rahmen der Geheimhaltung möglichen Ausführungen der Usecase-Partner im Kapitel „Implementierung und Beispiele aus der Praxis“ verwiesen. Es wird jedoch deutlich, dass auch in der Physischen Ebene und dem Übergang zur System- und Prozessintegration ein iteratives Vorgehen vorteilhaft ist. Je nach Endprodukt sind dabei virtuelle Umsetzungen (3D-Simulation

von Bauteil und Fertigung) oder Methoden des „Rapid Prototyping“ und „Rapid Manufacturing“ vorteilhafter. Beides sind stark digitalisierte Vorgehensweisen, mit denen die Entwicklung der Hardware bis zur erfolgreichen Abnahme vergleichbar mit agiler Softwareentwicklung wird. Adäquat organisierten Unternehmen kann dies neuartige Herangehensweisen an den Entwicklungsprozess ermöglichen.

Produkt

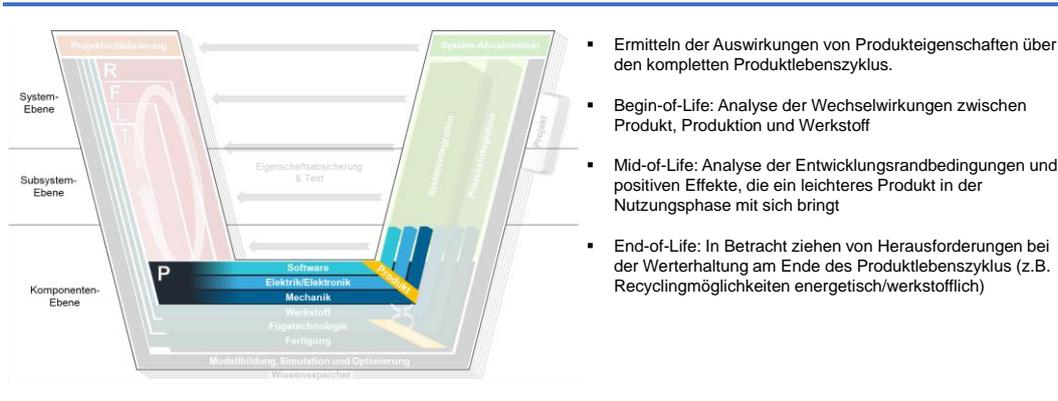


Abbildung 12: Die Produktdomäne.

Die Produktdomäne ist im unteren Teil des *SyProLei*-Modells zu finden und verbindet die Produktkonzeption auf dem linken Ast und die Systemintegration auf dem rechten Ast. Die Domäne umfasst die folgenden Disziplinen.

Die **Mechanik** bezieht sich auf die physische Struktur sowie die mechanischen Komponenten des Produkts. Diese umfasst Elemente wie Gehäuse, Rahmen, Lager, die eine mechanische Funktion erfüllen. Die mechanische Seite ist entscheidend für die Festigkeit, Haltbarkeit und Haptik eines Produkts.

Elektrik/Elektronik (E/E) bezieht sich auf die elektrischen und elektronischen Komponenten und umfasst Leiterplatten mit integrierten Schaltkreisen und Mikrocontrollern, Sensoren, Aktuatoren, Verkabelung und elektronische Steuerungen. Die E/E-Seite ist für die Erfassung und Verarbeitung von Daten sowie die Steuerung von Funktionen verantwortlich.

Die **Software** bezieht sich auf die programmierbaren Aspekte eines Produkts, die für die Steuerung, Überwachung und Kommunikation verantwortlich sind. Software kann eingebettet sein, um E/E-Komponenten zu steuern, oder als Benutzeroberfläche dienen, um mit dem Endanwender zu interagieren.

Alle drei Teile der Produktdomäne stehen bei modernen cyber-physischen Systemen in starker Abhängigkeit zueinander. *SyProLei* fokussiert sich in erster Linie auf die mechanischen Produktraspekte.

Weitere spezifisch umzusetzende Funktionalitäten wie etwa optisches Design und Oberflächeneigenschaften, Stoffaustauschvermögen und Wärmemanagement werden nicht mit eigenen Disziplinen dargestellt. Es wird insbesondere die spezifische Ausgestaltung des Lösungskonzepts und der Geometrie der Komponenten angestrebt. Damit Subsysteme und Systeme Gestalt annehmen können, ohne dass zunächst die Komponenten ausdetailliert sein müssen, sind Bauraummodelle in der vorangegangenen Technischen Designebene zu erstellen. Die ausdetaillierten Komponenten können sich dann in diese Bauräume einfügen, sodass der Weg der Systemintegration im rechten Ast des V-Modells beschriftet werden kann.

Leichtbau verstärkt die Notwendigkeit einer Lebenszyklusbetrachtung vom Begin-of-Life (BoL) über den Mid-of-Life (MoL) zum End-of-Life (EoL). Alle resultierenden Produkteigenschaften müssen hinsichtlich ganzheitlicher Umweltauswirkungen analysiert und bewertet werden.

Grundsätzlich können Leichtbaulösungen, welche ein sehr hohes Einsparpotential von Energie und infolgedessen CO₂-Emissionen in der Produktnutzungsphase innehaben, Probleme in der End-of-Life-Rückführung mit sich bringen oder einen erheblichen Mehraufwand in der Herstellungsphase bedeuten. Damit ganzheitlich optimierte Produkte entstehen, sind diese Aspekte im Entstehungsprozess zu berücksichtigen. [20]

Fertigung

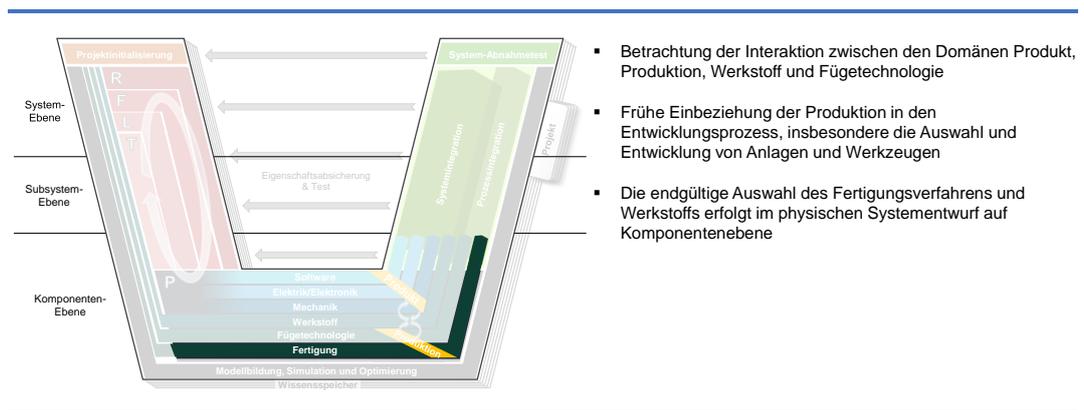


Abbildung 13: Die Fertigung

Insbesondere der Leichtbauentwicklungsprozess von Helms zeigt, dass für eine effiziente Entwicklung von Leichtbauprodukten eine Interaktion zwischen den Domänen Produkt und Produktion notwendig ist. Im Rahmen von *SyProLei* wird dies erweitert auf die Interaktion zwischen Produkt, Produktion, Werkstoff und Fügetechnologie. Die Domäne Fertigung umrahmt, wie im Bild dargestellt, die Schritte R, F, L, T, P. Die durchgängige Betrachtung der Fertigung hat zum einen zum Ziel, dass die Anlagen und Werkzeuge frühzeitig entwickelt werden und so die Entwicklungszeit verkürzt wird und zum anderen soll die Fertigung in Entscheidungen im Entwicklungsprozess mit einbezogen werden um das globale Optimum zu finden.

In den Phasen R, F, und L wird der Lösungsraum für das zu entwickelnde Produkt aufgespannt. In diesen Phasen existieren noch keine geometrischen Beschreibungen des Produkts. Durch eine konsequente Verwendung des Vorgehens und der Verknüpfung zwischen Produktgestalt und Funktion aus vorherigen Entwicklungsprojekten kann hier allerdings eine Datenbasis geschaffen werden, die es ermöglicht, bereits auf Basis der erforderlichen Produktfunktionen mögliche Fertigungskosten und -emissionen abzuschätzen. Zudem ermöglicht eine solche Datenbasis die Vorhersage von zu erwartenden notwendigen Fertigungsverfahren, wodurch in den folgenden Schritten der Entwicklung noch gezielter hinsichtlich bestimmter Fertigungsverfahren entwickelt werden kann. Dies führt zu einer Verkürzung der Entwicklungszeit und reduziert durch die gezielte Anwendung von Design

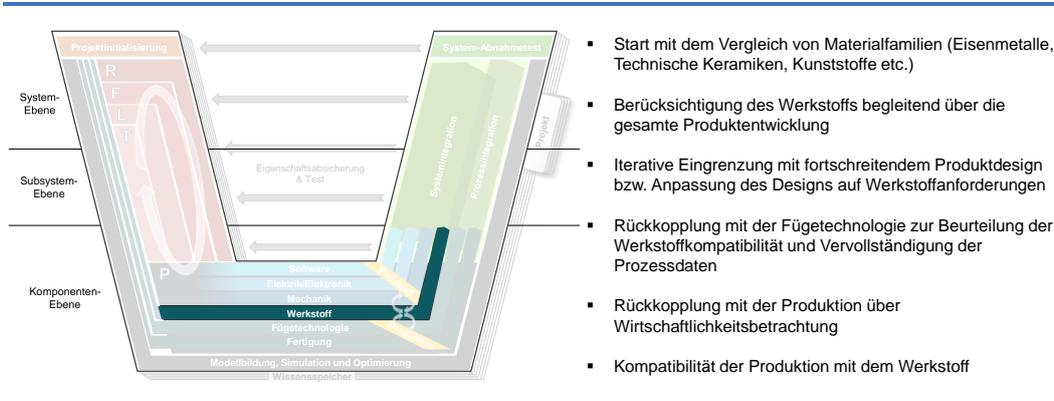
to Manufacturing-Ansätzen die Kosten in der Fertigung.

Nachdem im Entwicklungsschritt des logischen Designs ein Lösungskonzept ausgewählt wurde und im technischen Design mit der Auslegung der Komponentengeometrie begonnen wird, können die Anforderungen an die Fertigung konkreter formuliert werden. Wichtig für die Fertigungsverfahrenauswahl ist hier neben den geometrischen Anforderungen auch der verwendete Werkstoff, da dieser wiederum Fertigungsverfahren ausschließen kann. Bei der Bewertung von Fertigungskonzepten ist es daher wichtig, dass sowohl die Fertigbarkeit als auch die resultierenden Kosten und Emissionen einfließen. Zudem ist darauf zu achten, dass die Potenziale hinsichtlich Designfreiheit in die Bewertung miteinbezogen werden. Beispielsweise ist es nicht wirtschaftlich, ein für den Fräsprozess ausgelegtes Bauteil additiv zu fertigen, allerdings kann eine Optimierung des Bauteils unter Berücksichtigung der Designfreiheit zu einer wirtschaftlicheren Lösung führen.

Für die Bewertung der Fertigungsverfahren in der Produktentwicklung ist es von entscheidender Bedeutung die entsprechenden Daten in einer geeigneten Datenbank bereitzustellen. Diese sollte Daten zu den fertigen Werkstoffen und Geometrien sowie Fertigungszeiten und Energieverbräuchen enthalten. In der Datenbank sollten auch mögliche Zulieferer integriert sein, um diese mit in die Entscheidungsfindung zu integrieren. Nachdem in der Phase T das Fertigungsverfahren sowie der Werkstoff bestimmt wurden, werden in der Phase P vor

allem Details am Produkt für eine bessere Fertigbarkeit optimiert. Parallel ist es hier von Bedeutung, die finalen Maschinen und Werkzeuge zu wählen.

Werkstoff



- Start mit dem Vergleich von Materialfamilien (Eisenmetalle, Technische Keramiken, Kunststoffe etc.)
- Berücksichtigung des Werkstoffs begleitend über die gesamte Produktentwicklung
- Iterative Eingrenzung mit fortschreitendem Produktdesign bzw. Anpassung des Designs auf Werkstoffanforderungen
- Rückkopplung mit der Fügetechnologie zur Beurteilung der Werkstoffkompatibilität und Vervollständigung der Prozessdaten
- Rückkopplung mit der Produktion über Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
- Kompatibilität der Produktion mit dem Werkstoff

Abbildung 14: Werkstoff

Der Werkstoff stellt die tiefste, kleinteiligste Ebene des Systemdesigns dar. Zusammen mit seiner Formgebung sowie der Anbindung an seine Umgebung (siehe Fügetechnologie) sichert der Werkstoff die physikalische Funktionsfähigkeit einer Komponente. Es liegt in der Natur des physischen Designs, dass die lösungsorientierte Auswahl eines Einzelmaterials somit erst bei Ausdetaillierung des Produkts möglich ist. Ohne werkstoffliche Vorgaben hinsichtlich Formgebung und Anbindung im Produktdesign ist der Lösungsraum an dieser Stelle jedoch bereits so weit eingeschränkt, dass die Materialauswahl stärker von der Herangehensweise des Designers und Konstrukteurs abhängt als von den Anforderungen. Um sich nun dem richtigen Leichtbau an der zweckmäßig geeigneten Stelle unter funktionaler Berücksichtigung optimaler Kosten, Nachhaltigkeit (Lebensdauer und Ökologie) sowie Qualität anzunehmen, gilt es, die wechselseitige Abhängigkeit zwischen Produktanforderungen und -design, Eingangsmaterial und Fertigungsprozess iterativ aufzulösen. Die Berücksichtigung des Werkstoffes ist daher ein begleitender Prozess. Das Ziel muss dabei sein, die Zahl der Iterationschleifen und prototypischen Betrachtungen gering oder kosteneffizient zu halten. Das Requirements Engineering (Phase R) stellt den wichtigsten Punkt dar, indem die Ziele und Zwangsbedingungen für den Werkstoff aus den Produktanforderungen abgeleitet werden. Der einschlägigen Literatur folgend lässt sich ein allgemeines **Vorgehen** bei der Werkstoffauswahl beschreiben. [21]

1. Die Design-Anforderungen werden in Funktion, Beschränkungen und Ziele unterteilt. Für Konstruktionsmaterialien ergibt sich (notwendigerweise mit konkreten Zahlenwerten versehen):
 - Funktion: Strukturelle Stabilität
 - Beschränkungen: Umweltrandbedingungen u. a.
 - Ziele: Leichtbau als Optimierungsparameter u. a.
2. Materialien werden gefiltert basierend auf den Beschränkungen („Go“ / „No go“) und geordnet basierend auf dem Verhältnis von Funktion und Zielen.
3. Auf die Top Material-Kandidaten werden weichere Beschränkungen („soll“ / „kann“) angewendet.
4. Die Materialliste wird anhand von weiteren Informationen geordnet.

Der letzte Schritt erfordert Informationen, die häufig erst durch Recherche der Datenblätter und lokaler Bedingungen von Lieferanten ermittelt werden können. Das Vorgehen bei der Werkstoffauswahl lässt sich auf allen Ebenen des Systemdesigns prozessbegleitend anwenden. Analog zum Systems Design begibt man sich dazu auf verschiedene **Abstraktionsebenen** [21]. Die hierarchische Unterteilung des "material kingdom" in Familien und Klassen wird je nach Quelle unterschiedlich vorgenommen. Die Begriffe sind an dieser Stelle daher nicht als Definitionen zu verstehen, da sie auch in umgekehrter Bedeutung auftreten.

- Auf der höchsten Ebene steht die **Materialfamilie** zur Auswahl (Eisenmetalle, Technische Keramiken, Kunststoffen etc.).

Die Auswahl der Materialfamilie kann bezüglich der physikalischen Eigenschaften, insbesondere ihrer Beständigkeit gegenüber Umgebungsbedingungen (Korrosion, Lebensmittelkontakt, Einsatztemperatur etc.) und elektromagnetischen Eigenschaften durchgeführt werden. In den meisten Fällen sind jedoch die Überlappungen der Materialfamilien zu groß. Sinnvoll ist die Eingrenzung und der Ausschluss von Materialfamilien. Dies geschieht abseits der Anforderungen an die technische Mechanik, da für deren Vergleich Kenntnisse zur Bauteilform vorliegen müssten.

- Auf Systemebene und in den frühen Phasen (bis Phase L) wird die **Materialfamilie eingegrenzt**.

Beachte: Werkstoffverbunde und hybride Werkstoffe wie natürliche Materialien und Composite stellen sehr weite und vielfältige Materialfamilien dar und haben signifikantere Eigenschaftsunterschiede als nicht Verbund-Werkstoffe. Für belastbare Kennbereiche sind die neuesten und umfangreichsten Materialdatenbanken notwendig.

Bei genauerer Kenntnis von Lösungsprinzip und Bauraum ist es möglich, den Lösungsraum auf **Materialklassen** (Stahl, Al-Legierung, Thermoplaste, Oxidkeramik etc.) einzuschränken. Insbesondere ist an dieser Stelle die Betrachtung der mechanischen Eigenschaften – abhängig von der Bauteilgeometrie – in Form von Leistungsindizes möglich. So lassen sich Materialien bspw. hinsichtlich ihrer Belastbarkeit unter Biegung bei variabler Querschnittsfläche vergleichen. Von besonderem Interesse sind die mechanischen Eigenschaften bei Einsatztemperaturen abseits Raumtemperatur. Dies wird vorrangig über die maximale und minimale Einsatztemperatur abgefragt, da temperaturabhängige mechanische Eigenschaften nur in fortgeschrittenen Datenbanken hinterlegt sind. Ohne Kenntnis der zu erwartenden Komplexität der Geometrie und der Design-Features kann eine Auswahl des grundlegenden Fertigungsverfahrens an dieser Stelle noch nicht getroffen werden (Beispiel: Ur-/Umformen benötigt Guss-/Knetlegierungen).

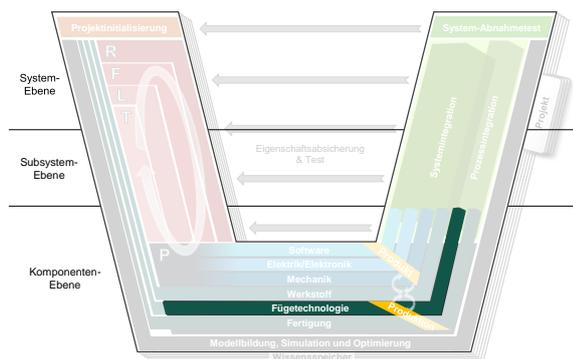
- Auf Sub-Systemebene und in der Phase T wird die **Materialklasse eingegrenzt**.

Im physischen Design werden in den ersten Iterationen die Details der äußeren Gestalt bekannt, so dass eine Auswahl der **Materialgruppen** (Knetlegierungen, Gusslegierungen) ermöglicht wird. Es ist wahrscheinlich, dass hinsichtlich der Produktanforderungen erst an dieser Stelle eine finale Entscheidung zwischen metall- oder polymerbasierten Werkstoffen getroffen werden kann. Die erste Konstruktionsskizze muss dies berücksichtigen. In weiteren Iterationen kann das Design auskonstruiert werden und auf der Grundlage von Belastungssimulationen die Auswahl von Einzelmaterialien und deren Vergütung erfolgen (Al-2036, Al-6061, Al-7075 etc.). Eine Änderung des Einzelmaterials in der gleichen Materialgruppe kann meist unkompliziert vorgenommen werden.

- Auf Komponentenebene und im weiteren Verlauf der Phase P wird die **Materialgruppe eingegrenzt** und schließlich das **Einzelmaterial festgelegt**. Auf System- und Subsystem-Ebene ergibt sich meist zwangsläufig ein Material-Mix, weshalb der Aspekt der Fügetechnologie wechselseitig zu betrachten ist.

An dieser Stelle ist festzuhalten, dass die aus den physikalischen Eigenschaften abgeleiteten Materialklassen und -familien aus reinen Leichtbau-Gesichtspunkten keinen positiven Effekt in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses bieten. Die struktur-mechanischen Anforderungen an ein Produkt lassen sich durch eine Vielzahl von Materialien und deren Kombinationen umsetzen. Stattdessen kann ein rigoroser Einsatz von Beschränkungen dazu führen, dass Leichtbaumaterialien frühzeitig ausgeschlossen werden. Auch Anforderungen und Vorgaben hinsichtlich der Produktion stellen starke Einschränkungen dar, da es naturgemäß mehr Variabilität beim Werkstoff als bei entsprechenden Fertigungsprozessen gibt. Um diesen Mangel beheben zu können, muss die Art und Auswirkung der Beschränkungen verfolgt werden. Es empfiehlt sich, einen produkt-zentrierten Designansatz zu verfolgen und unternehmerische und organisatorische Entscheidungen erst der ganzheitlichen Lebenszyklusbetrachtung nachgelagert in die Bewertung einfließen zu lassen.

Fügetechnologie



- Domänen-übergreifende Disziplin, die die Sicht auf das Produkt, den Werkstoff und die Produktion vereinen muss
- Komponenten-übergreifende Betrachtung der Werkstoffkompatibilität
- Steigert die Komplexität der Produktentwicklung erheblich und muss die Frage nach den Vorzügen integraler oder differenzieller Bauweisen beantworten
- Erfordert bei Multimaterial-Bauweise überproportionalen Einsatz von Know-how
- Kann sich negativ auf die Lebenszyklusbetrachtung auswirken

Abbildung 15: Fügetechnologie

Die in der vierten Hauptgruppe der Fertigungsverfahren zusammengefassten und eigens in DIN 8593 [22] weiter charakterisierten Fügeverfahren erfordern zwangsläufig einen komponenten-übergreifenden Betrachtungsrahmen. Sie stehen dabei im Gegensatz zur Auswahl herstellender (d. h. formschaffender bzw. ändernder) Verfahren, die auf die Evaluation einer in sich geschlossenen Komponentenebene zurückgreift. Durch die direkte Interaktion mit mehreren vorliegenden, ggf. unterschiedlichen Komponentenanforderungsprofilen kommen so neben den komponentenspezifischen Aspekten zusätzlich geometrische und werkstofftechnische sowie ganzheitlich prozessuale Fragestellungen auf Systemebene zum Tragen. Die technisch, wirtschaftlich und ökologisch bestmögliche, kombinierte Wahl

- der spezifischen Gestalt der Komponentenstruktur (d. h. generell und insbesondere an der Verbindungsstelle) sowie des Fügemittels,
- des zu fügenden als auch zum Fügen verwendeten Werkstoffes, sowie
- des zur komponentenspezifischen Herstellung und dem taktzeitspezifischen Zusammenbau entscheidenden Prozesses,

lässt somit eine systemische Entscheidungsfindung deutlich komplexer erscheinen. Es gilt, die multidimensionalen und multikriteriellen Wechselwirkungen von Produktgestalt, Werkstoff und Fertigung nicht nur auf individueller Komponentenebene zu beachten, sondern außerdem entsprechende Korrelationen zu benachbarten Bauteilen

und -gruppen einzubeziehen und diese ganzheitlich auszuloten. So entscheiden beispielsweise neben der grundsätzlichen Korrosionsverträglichkeit benachbarter Werkstoffe insbesondere die technologischen Grenzen eines Fügeprozesses angesichts praktikabler Wandstärken sowie sonstiger konstruktiver Randbedingungen (Stoßarten, Flanschgrößen etc.) über den individuellen Entwurf einer zuverlässig ausgelegten Fügestelle. In Folge dessen kommt der Auswahl einer geeigneten Fügetechnologie eine spezielle Rolle zu. Diese explizite Einbindung trägt nochmals erheblich zur Komplexitätssteigerung der vielfältigen Lösungsalternativen mit unterschiedlicher technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Wertigkeit im Leichtbau bei.

Als Beispiel müssen so unter Umständen – bei der ohnehin werkstoffabhängigen Anpassung der individuellen Komponentenwandstärken – Betrachtungen in Bezug zu den fügetechnologisch zulässigen Einzel- und Gesamtwandstärkenbereichen angestellt werden. Mit der Folge, dass im iterativen Gestaltfindungsprozess nochmals alle weiteren Fügeoptionen des vorliegenden Technologiespektrums auf ihre technisch, wirtschaftlich und ökologisch vielversprechende Anwendbarkeit in Kombination mit den jeweiligen Komponentenentwürfen geprüft werden. Dem nicht genug, liegen in einem Produktsystem allermeist nicht nur paarweise miteinander zu verbindende Einzelkomponenten vor.

Um nun systematisch eine Auswahl über die Fügetechnologie zu treffen, muss analog zur Werkstoff- und Fertigungsprozessauswahl ein mehrstufiger Prozess durchlaufen werden. Begonnen mit der

spezifischen Anforderungsaufnahme der via Baugruppengliederung initial ermittelten Fügestellen, folgt mit der Ermittlung des Fügeprinzips bzw. der Fügekonzeptdefinition eine erste Einschränkung brauchbarer **Fügehauptgruppen** (thermisches, mechanisches oder chemisches Fügen), **Fügeschichten** (bspw. Fügen durch Schweißen), **Fügeschichten** (bspw. Schmelzschweißen) und **Fügeverfahren** (bspw. Schutzgasschweißen). Diese Spezifizierung muss flexibel und in Einklang mit dem Fortschritt bei der Werkstoffauswahl und der Komponenten- bzw. Systembeschreibung erfolgen. In Hinblick auf die Ausarbeitung der System- und Prozessintegration und dem Übergang vom Fügezonentwurf zur finalen Fügestellendefinition wird die Wahl auf Ebene der Fügeverfahrensvarianten (bspw. Metallschutzgasschweißen) und Fügeverfahrenspezifikation (bspw. MIG-Schweißen) festgelegt. Die frühzeitige effektive und effiziente

Einbindung der Füge-technologie in den Produktentwicklungsprozess ist Gegenstand der Forschung. Detailliertere Informationen sind Kaspar [23, 24] zu entnehmen. Zur Beherrschung der Komplexität im Multi-Materialleichtbau und dessen Qualitätssicherung sind in jedem Fall die frühzeitige, entwicklungsbegleitende Einbindung entsprechender Fachkompetenzen notwendig. Auch eine umfassende Digitalisierung der Lösungsauswahl durch Simulation und multi-kriterielle Bewertung erscheint an dieser Stelle notwendig. Einen Ausweg kann die Anwendung von Werkstoffen mit gradierten Eigenschaften darstellen. So lassen sich Materialien durch gezielte lokale Wärmebehandlung, das Einfügen von Verstärkungen in Form von Partikeln oder Fasern, Oberflächenmodifikationen und Beschichtungen mit ortsabhängigen physikalischen Eigenschaften maßschneidern.

Prozess- und Systemintegration

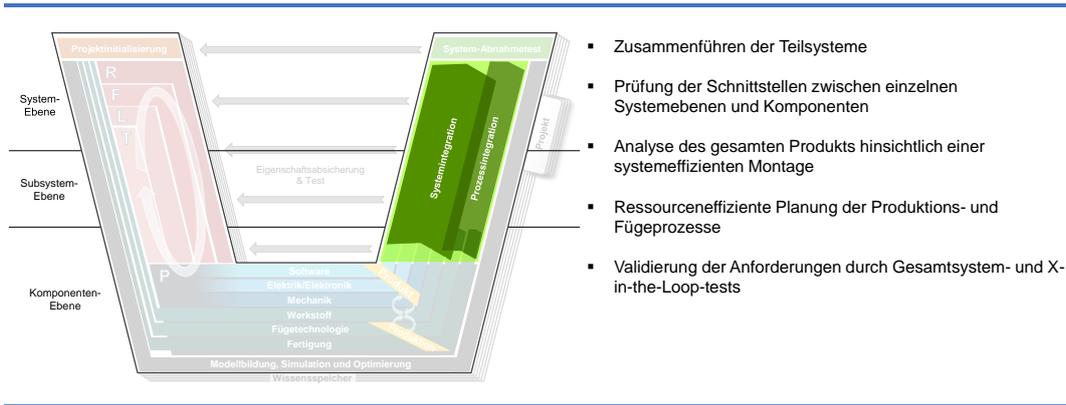


Abbildung 16: Prozess- und Systemintegration

Die primäre Aktivität in dieser Phase beinhaltet die Überleitung der Entwicklung in die Realisierung, sodass eine ganzheitliche Industrialisierung zwischen bereits bestehenden Prozessen und angepassten sowie neuartigen Leichtbauprozessen erfolgen kann (Prozessintegration). Hierbei erfolgt die Planung der Fertigungs- und Fügeanlagen sowie die Prozessplanung. Zusätzlich erfolgt die Beschaffung von Hilfsmitteln für die Produktion der Komponenten, sodass der Start-of-Production angestrebt werden kann.

Die Tätigkeiten in dieser Phase hängen stark vom Produkt und der jeweiligen Branche ab. Handelt es sich um ein Produkt, das in großer Stückzahl produziert werden soll, wird eine neue Fertigungslinie notwendig, die optimiert und in Betrieb genommen werden muss. Durch die frühzeitige Betrachtung der Produktion wurden Entscheidungen, wie bspw. die Auswahl der Fertigungsverfahren und Prozessparameter, bereits früher getroffen. Dennoch ist es erforderlich die benötigten Systeme und Prozesse zunächst digital in einem System zu vereinen und die gesamte Produktion des Produktes digital abzusichern. Dies ermöglicht die finale integrierte Optimierung der Produktion bevor die Fertigung physisch aufgebaut wurde. Anschließend wird das Equipment final beschafft, wobei auch hier noch durch die Auswahl von effizienten Maschinen und Anlagen die Nachhaltigkeit verbessert werden kann. Dies erfolgt in dieser Phase parallel.

Erfolgt die Produktion des Produktes auf einer bestehenden Produktion und es wurden ggf. nur neue Werkzeuge entwickelt, müssen diese in dieser

- Zusammenführen der Teilsysteme
- Prüfung der Schnittstellen zwischen einzelnen Systemebenen und Komponenten
- Analyse des gesamten Produkts hinsichtlich einer systemeffizienten Montage
- Ressourceneffiziente Planung der Produktions- und Fügeprozesse
- Validierung der Anforderungen durch Gesamtsystem- und X-in-the-Loop-tests

Phase final erprobt werden. Hier können dann auch noch finale Anpassungen vorgenommen werden.

Handelt es sich um eine engineer-to-order Entwicklung liegt der Fokus in dieser Phase auf der operativen Produktionsplanung. Der Fokus liegt hierbei darauf, wie das entwickelte Produkt mit den vorhandenen Fertigungsmitteln in der geforderten Zeit sowie Qualität hergestellt werden kann. Hierbei ist es auch entscheidend mögliche Zulieferer entsprechend in den Entscheidungsprozess einzubeziehen, um ggf. die Kapazitäten erhöhen zu können.

Etwaige Schulungen, notwendige Logistikmaßnahmen sowie eine absichernde Risikobetrachtung können hierbei Bestandteile darstellen.

Zudem wird eine Absicherung der Funktionalität auf System- und Subsystemebene angestrebt. Dies erfolgt über die Zusammenführung der drei Disziplinen Mechanik, Elektrik und Software (Systemintegration). Zudem erfolgt ein Analyseschritt hinsichtlich der übergeordneten Systemgrenzen, infolgedessen diese optimiert werden.

Daneben beinhaltet die Prozess- und Systemintegration die reibungslose Abstimmung verschiedener Phasen, Werkzeuge und Beteiligter im Produktentwicklungszyklus (Koordination verschiedene Abteilungen), um Effizienz, Qualität und Nachhaltigkeit sicherzustellen. Im Bereich des Leichtbaus, in dem Materialien und Fertigungsverfahren sorgfältig aufgrund ihrer strukturellen und gewichtssparenden Eigenschaften ausgewählt und optimiert werden, wird die Qualitätssicherung noch wichtiger. Sie erfordert die nahtlose Koordination

von Design, Analyse, Fertigung und Prüfprozessen. Zum Beispiel können CAD-Systeme mit Finite-Elemente-Analyse-Tools integriert werden, um die Performance leichter Strukturen zu simulieren und zu optimieren. Nachgelagerte Entwicklungsschritte können Hardware-in-the-Loop umfassen, in denen bereits vor der Gesamtrealisierung das Systemver-

halten geprüft werden kann. Dadurch wird sichergestellt, dass Leichtbaulösungen nicht nur die Leistungskriterien auf Komponentenebene erfüllen, sondern auch mit breiteren Umwelt- und Wirtschaftszielen auf Gesamtsystemebene in Einklang stehen.

sich in einer höheren Entwicklungsqualität und der Vermeidung von – bei Hardware im Vergleich zu Software noch teureren – Fehlentwicklungen niederschlagen. Hierzu sind weitere Studien und Forschungsprojekte notwendig, da die Automatisie-

rung von Testprozeduren im Vergleich zu Disziplinen wie der Software- aber auch der chemischen Entwicklung noch in den Anfängen steckt.

Modellbildung, Simulation und Optimierung

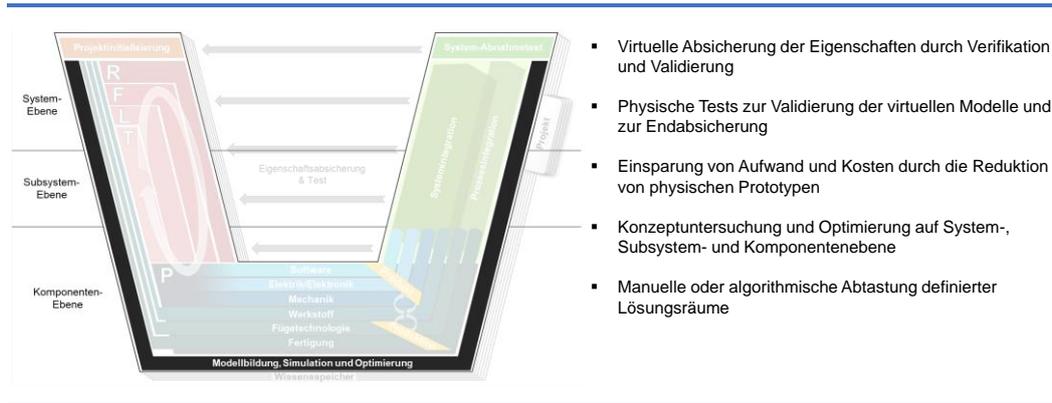


Abbildung 18: Modellbildung, Simulation und Optimierung

Dieser Abschnitt des Entwicklungsprozesses beschreibt die Methoden, die angewendet werden, um Eigenschaften des Produkts abzubilden und diese zu testen und zu bewerten. Dies ermöglicht einerseits die virtuelle Verifikation und Validierung zur Eigenschaftsabsicherung und andererseits die Generierung von wichtigen Informationen für die Bewertung von Lösungen. Beispielsweise kann so bereits frühzeitig der Effekt von Leichtbaulösungen auf den Energieverbrauch evaluiert werden. Durch kontinuierliche Detaillierung der Modelle entlang des Entwicklungszyklus wird die Genauigkeit der Modelle kontinuierlich erhöht.

Die Eigenschaftsabsicherung erfolgt innerhalb des Entwicklungsprozesses iterativ für verschiedene Konzepte. Relevante Informationen werden zusammengetragen und für Konzeptentscheide in der entsprechenden Organisationsebene bereitgestellt. Physische Tests während der Entwicklung dienen neben der realen Eigenschaftsabsicherung zusätzlich zur Validierung der virtuellen Modelle. Trotz der Verlagerung der Entwicklungsprozesse in die virtuelle Welt, wird das finale Endprodukt in aller Regel mittels physischer Tests abgesichert. Die Modellbildung bezieht sich auf die Erstellung von mathematischen Modellen, die das Verhalten des Produkts unter verschiedenen Bedingungen vorhersagen können. Diese Modelle können auf Basis von physikalischen Gesetzen, empirischen Daten oder Kombinationen von beidem erstellt werden. Ein detailliertes und genaues Simulationsmodell reduziert physische Tests signifikant und ist in der Lage elektrische, mechanische, chemische, thermische Eigenschaften abzubilden. Werden in einem Modell mehrere dieser Eigenschaften abgebildet, wird

dieses auch als multi-physics-modell bezeichnet. Bei der vollumfänglichen Abbildung der Produkteigenschaften im virtuellen Raum wird oft von digitalen Zwillingen gesprochen. Neben Kosten für Prototypen wird auch wertvolle Entwicklungszeit eingespart und damit früher einen höheren Reifegrad erreicht.

Die Optimierung von Leichtbauprodukten bezieht sich auf die Suche nach den besten Design-Parametern, um das Produkt unter Berücksichtigung der Anforderungen möglichst leicht und nachhaltig zu gestalten. Die Optimierung kann auf Basis von verschiedenen einzelnen oder mehreren Kriterien für das Gesamtsystem, Subsystem oder einzelne Komponenten durchgeführt werden. Gegenstand der Optimierung kann neben dem Gewicht und der Nachhaltigkeit auch das mechanische Versagen, die Steifigkeit oder Kosten sein. Die Abtastung der Lösungsräume zur Optimierung einer Zielfunktion kann entweder manuell oder automatisiert mithilfe von Algorithmen durchgeführt werden. Eine Differenzierung erfolgt aus mathematischer Sicht zwischen lokaler und globaler Optimierung.

Die Verwendung von Modellbildung, Simulation und Optimierung in der Leichtbau Produktentwicklung leistet einen relevanten Beitrag zur Entwicklung innovativer und wettbewerbsfähiger Produkte und befähigt Organisationen mit sich stetig verkürzenden Entwicklungszyklen bei steigender Anforderungszahl und -komplexität Schritt zu halten. Folglich bilden diese Aspekte das Grundgerüst für eine Vielzahl an Methoden, die im Rahmen des systemischen SyProLei Entwicklungsprozesses erarbeitet wurden.

Wissenspeicher

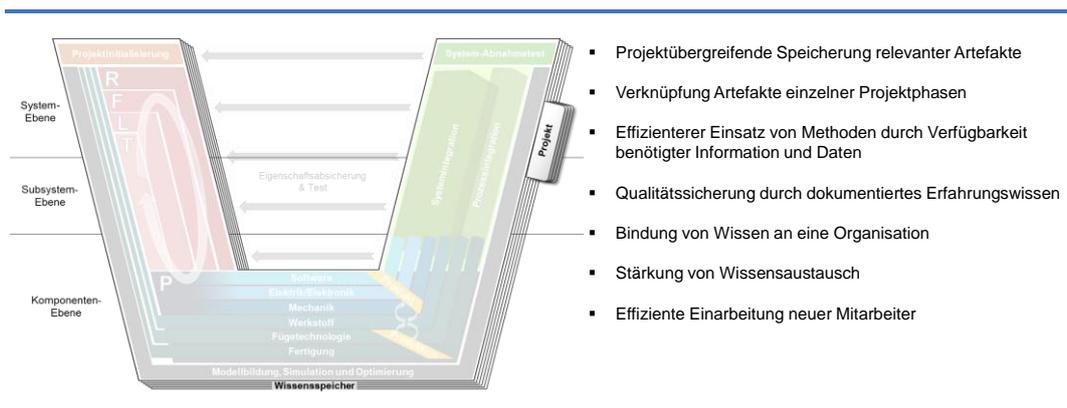


Abbildung 19: Wissensspeicher

Der Wissensspeicher soll als Rückgrat des Entwicklungsprozesses das im Verlauf der Produktentwicklung entstehende Wissen projektübergreifend dokumentieren, organisieren, speichern und bereitstellen, um es für zukünftige Projekte nutzbar zu machen. Das Wissen wird damit von einzelnen Personen entkoppelt und innerhalb der Organisation zur Verfügung gestellt.

Es gibt derzeit noch keine eigenständige technische Lösung für dieses Konzept. Die Realisierung eines solchen Wissensspeichers für die digitale Produktentwicklung kann durch eine Kombination verschiedener digitaler Werkzeuge erfolgen. Dabei werden die Daten in einem zentralisierten Repository gespeichert. Neben methodischem Wissen werden auch Artefakte wie CAD- und Simulationsmodelle, Materialdaten, Stücklisten, Gestaltungsvorschläge basierend auf Funktionsstrukturen und Erfahrungsberichten abgespeichert.

Neben dem Erhalt von Wissen sind auch die Wissensvernetzung und Wissensweitergabe wichtige Aufgaben des Wissensspeichers. Durch die Organisation des Wissens können Zusammenhänge und Synergien zwischen verschiedenen Wissensbereichen innerhalb und außerhalb einer Organisation hergestellt werden. Auf diese Weise wird eine ganzheitliche Betrachtung des Produkts realisiert.

Durch den Wissensspeicher kann die Effizienz der Produktentwicklung nachhaltig gesteigert werden, indem bereits vorhandenes Wissen genutzt und redundante Arbeit verhindert wird. Je mehr Wissen in Form von Artefakten verfügbar ist und je besser es aufbereitet und vernetzt ist, desto effizienter lassen

sich auch die im Rahmen von *SyProLei* entwickelten Methoden umsetzen, da die manuelle Aggregation relevanter Daten vermindert wird. Darüber hinaus trägt die Nutzung des Wissensspeichers dazu bei, Fehler zu vermeiden und die Qualität des Produkts zu verbessern. Basierend auf dem bereits vorhandenen Wissen können bestehende Lösungen im Entwicklungsprozess optimiert werden.

Für die Mitarbeiter bedeutet der Wissensspeicher eine Unterstützung sowohl auf fachlicher Ebene als auch für die persönliche Weiterentwicklung. Neben der Förderung des Wissensaustauschs und des Zusammenhalts im Team durch Transparenz ermöglichen Wissensspeicher den Mitarbeitern beispielsweise eine schnellere Einarbeitung in neue Projekte.

Zukünftige technische Umsetzungen von Wissensspeichern können stark von Entwicklungen auf dem Gebiet der künstlichen Intelligenz profitieren. Durch den Einsatz beispielsweise von Large Language Models kann der Aufwand zur Sammlung und Aufbereitung des Wissens stark reduziert werden. Die Systeme können mit komplexen Eingangsdaten umgehen und das Wissen auch in Form von Chat-Bots zur Verfügung stellen.

Inhalte eines Wissensspeichers

Der Wissensspeicher soll in der Produktentwicklung auftretende Fragen beantworten, basierend auf Erfahrungswissen und Fakten. Das erforderliche Wissen beziehungsweise die erforderlichen Informationen stammen aus verschiedenen unternehmensinternen und externen Quellen und sind verschiedener Art. Um systemischen Leichtbau zu unterstützen, enthält der Wissensspeicher Inhalte

zu Produkt, Produktion, Fügetechnologie und Werkstoff.

Die nachfolgende Aufstellung enthält Beispiele für Informationen eines Wissensspeichers, die unter Leichtbau-Gesichtspunkten relevant sind, stellt aber keine vollständige Aufstellung dar.

Produktanforderungen und Spezifikationen

Bezogen auf eine konkrete Produktentwicklung ist eine klare Aufzeichnung der Anforderungen an das Produkt sowie der detaillierten Spezifikationen erforderlich. Sie dient den Entwicklern als Leitfaden. Zudem ermöglicht eine durchgehende Beschreibung die Identifikation von Ähnlichkeiten zwischen Projekten.

Vorherige Projekterfahrungen

Wissen aus vorherigen erfolgreichen oder nicht erfolgreichen Projekten kann die Produktentwicklung unterstützen. Durch die Nutzung dieses vorhandenen Wissens können Zeit und Ressourcen gespart werden, die sonst für die Identifizierung und Lösung von Problemen während der Entwicklungsphase aufgewendet würden. Darüber hinaus können Unternehmen damit die Entwicklungskosten senken, indem sie sicherstellen, dass neue Produkte von Anfang an robust und fehlerfrei sind.

Das Wissen aus früheren Projekten kann beispielsweise in Form von Lessons Learned erfasst werden. Sinnvolle Ergänzung ist die Dokumentation von Entscheidungen und Argumenten, auch Konzepte betreffend, nicht nur Ergebnisse. Zudem kann dieses Wissen für Methoden des Werkzeugkastens genutzt werden. Speziell wenn es um Bewertungen in den frühen Phasen der Entwicklung geht.

Weitere wichtige Hilfsmittel zur Verkürzung der Entwicklungszeit und Erhöhung der Qualität sind bestehende Funktionsmodelle und Umsetzungen. Bezogen auf Nachhaltigkeit und Leichtbau ist die Bereitstellung von vorgenommenen CO₂-Bilanzierungen sinnvoll.

Design-Richtlinien und Best Practices

Richtlinien, Standards und bewährte Methoden für das Produktdesign und die Benutzererfahrung sind essenziell, um konsistente und qualitativ hochwertige Ergebnisse sicherzustellen. Konstruktionsregeln aus früheren Entwicklungen können abgeleitet und Basismodelle für Simulationen verwendet werden. Bei wiederkehrenden und standardisierbaren

Artefakten ist die Entwicklung von Templates für die Methodendurchführung sinnvoll. Bei wiederholter Nutzung rechnen sich diese Templates trotz des initialen Aufwands.

Es ist wichtig, dass relevante Normen und Standards bekannt und verfügbar sind. Besonders Normen und Standards zur Erreichung leichter und nachhaltiger Produkte, wie die ISO DIS 59040 Circular Economy, sollten berücksichtigt werden. Diese Norm enthält Richtlinien für Produktdaten zur Kreislauffähigkeit und unterstützt damit nachhaltiges Produktdesign.

Produktionswissen

Beim hinterlegten Produktionswissen, kann es sich sowohl um allgemeines Wissen zu Produktionsprozessen und deren Fähigkeiten handeln als auch um unternehmensspezifisches Prozesswissen. Für einen groben Überblick in der frühen Phase der Produktentwicklung zu möglichen Fertigungsverfahren und deren Bewertung ist eine allgemeine Datenbank von einem externen Datenbankanbieter ausreichend. Durch den Aufbau von Erfahrungswissen, können auch Korrelationen zwischen Funktion und Fertigungsprozessen hergestellt werden. Durch die detaillierte Erfassung von unternehmensinternen Fertigungsprozessen sowie der zugehörigen Maschinen und auch externen Lieferanten durch durchgehende Datenschnittstellen kann die Genauigkeit der Bewertungen enorm verbessert werden. Wichtige Daten zur Fähigkeit von Fertigungsprozessen sind hier die fertigbaren Werkstoffe, fertigmögliche Geometrien sowie erreichbare Qualitätsmerkmale wie Oberflächenbeschaffenheit. Hierbei ist auch zu erfassen, dass Prozesse auf unterschiedlichen Maschinen mit verschiedener Qualität ausgeführt werden können. Für die Bewertung aus Leichtbausicht ist es zudem erforderlich den Energieverbrauch und Materialverbrauch sowie die zeitabhängigen Kostensätze für die Maschinen zu hinterlegen.

Werkstoffwissen

Das Erfahrungswissen zu Werkstoffen umfasst beispielsweise Auslegungskenngrößen, CO₂-Emissionen und Kosten. Es kann durch interne wie externe Werkstoffdatenbanken ergänzt werden. Diese können auch Informationen zur Umweltbilanz bezüglich Herstellung und Transportwegen beinhalten. Für den Austausch von Werkstoffdaten mit Lieferanten und Prüfeinrichtungen kann die DIN SPEC 9012 herangezogen werden.

Technische Dokumentation

Technische Handbücher, API-Dokumentationen, Protokolle und andere technische Informationen, die für die Entwicklung, Integration und Wartung des Produkts relevant sind, sind wichtige Artefakte für den Wissensspeicher.

Schulungsunterlagen und Tutorials

Diese Materialien können der Schulung neuer Mitarbeiter oder Teammitglieder dienen sowie der kontinuierlichen Weiterbildung aller Beteiligten im Bereich der Produktentwicklung.

Forschungsergebnisse und Marktanalysen

Um die Entwicklung von Produkten mit einem besseren Verständnis der Kundenbedürfnisse und Markttrends zu unterstützen, sollte der Wissensspeicher Erkenntnisse aus Marktanalysen, Benutzerforschung und Wettbewerbsanalysen enthalten.

Feedback aus Nutzungsphase

Das Erfassen von Wissen aus der Nutzungsphase hilft, die tatsächlichen Bedürfnisse und Anforderungen der Kunden besser zu verstehen. Eine wichtige Quelle stellt das Feedback aus dem Service-Bereich dar, insbesondere bei Endkundenprodukten. Durch die Analyse von Kundenfeedback, Serviceanfragen und Problemen, die während der Nutzung von Vorgängerprodukten aufgetreten sind, können Unternehmen wertvolle Erkenntnisse darüber gewinnen, welche Funktionen verbessert, welche Probleme behoben und welche neuen Funktionen hinzugefügt werden sollten.

Ansprechpartner und Experten

Ein Ziel des Wissensspeichers ist es, mehr Informationen digital zu erfassen und nutzbar zu machen. Es ist aber nicht möglich, das gesamte Wissen zu erfassen, das in den Köpfen der Mitarbeiter des Unternehmens steckt. Auch die menschliche Kreativität, das Wissen anzuwenden und Lösungen zu entwickeln, lässt sich nicht allumfassend digital abbilden. Daher ist es weiterhin in vielen Situationen sinnvoll, Experten zu Rate zu ziehen. Der Wissensspeicher kann hier unterstützen, indem Ansprechpartner zu bestimmten Themen und Aufgaben genannt werden.

Umsetzung eines Wissensspeichers

Die Implementierung eines Wissensspeichers ist keine triviale Aufgabe und es gibt aktuell keine fertige Softwarelösung, die das integriert umsetzt. Für

eine ganzheitliche Leichtbauentwicklung ist es entscheidend, Wissen zu bündeln und dieses strukturiert zur Verfügung zu stellen. Dies kann beispielsweise über Webtools ermöglicht werden. Um das Wissen verständlich zur Verfügung zu stellen, müssen einheitliche Richtlinien geschaffen werden, anhand derer dokumentiert und Wissen bereitgestellt wird. Zur Einordnung und Nachvollziehbarkeit von Wissen und Entscheidungen ist auch das Dokumentieren kausaler Zusammenhänge wichtig, beispielsweise warum ein bestimmtes Konzept ausgewählt oder verworfen wurde. Zudem ist eine konsequente Umsetzung des RFLTP-Ansatzes erforderlich um Beziehungen zwischen den Projekten und Produkten identifizieren zu können. Dies führt auf lange Sicht dazu, dass Bewertungen bereits in den frühen Phasen der Entwicklung erleichtert werden, da auf das Wissen von vorhergehenden Lösungen aufgebaut werden kann.

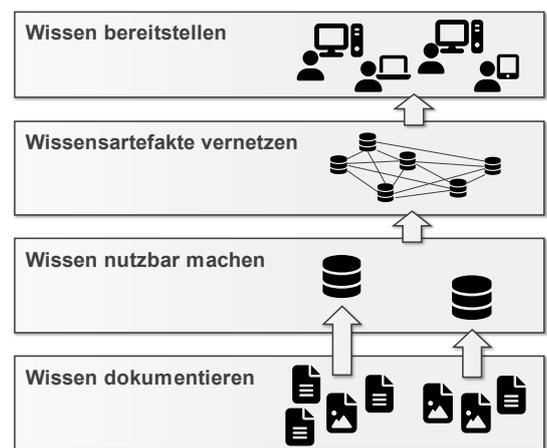


Abbildung 20: Wissensspeicher

Folgende Schritte sind zur technischen Umsetzung erforderlich:

- Wissen muss dokumentiert werden,
- Wissen muss nutzbar gemacht werden,
- Wissensartefakte müssen vernetzt werden,
- Wissen muss bereitgestellt werden.

Wissen dokumentieren

Voraussetzung für einen Wissensspeicher ist, dass das erforderliche beziehungsweise gewünschte Wissen überhaupt in passender Form vorliegt. Viele Informationen, die in Produktentwicklungsprozessen verwendet oder erzeugt werden, werden nicht digital erfasst. Als erster Schritt muss das Wissen daher digital erfasst und in Dokumenten abgelegt werden.

Wissen nutzbar machen

Um das digital erfasste Wissen nutzbar zu machen, sind folgende Schritte erforderlich:

- Wissen muss strukturiert abgelegt werden,
- Wissen muss klassifiziert werden,
- Wissen muss gepflegt werden.

Das Wissen wird strukturiert in Datenspeichern abgelegt, die online zugänglich sein sollten. Die Organisation und Strukturierung der Informationen ist entscheidend für die Effektivität eines Wissensspeichers. Dies kann durch die Verwendung von Taxonomien, Tags, Suchfunktionen und anderen Metadaten erfolgen, die es den Benutzern ermöglichen, relevante Inhalte schnell zu finden und zu nutzen. Eine zeitliche Information hilft, die Inhalte in einen Kontext zu setzen oder veraltete Daten zu erkennen. Zur Pflege des Wissens ist die Möglichkeit zur Aktualisierung vorzusehen.

Wissensartefakte vernetzen

Um aus den verschiedenen Datenspeichern, in denen die Informationen erfasst wurden, einen Wissensspeicher zu machen, müssen die Datenspeicher miteinander vernetzt werden. Zusätzlich können externe Wissensspeicher mit eingebunden werden. Dabei kann es sich beispielsweise um Werkstoffdatenbanken oder Fertigungsdatenbanken handeln.

Wissen bereitstellen

Das Wissen muss den Anwendern in geeigneter Form zur Verfügung gestellt werden. Wiki-Systeme sind häufig schon in den Unternehmen im Einsatz und bieten einen guten Ausgangspunkt. Für das integrierte Bereitstellen des gesamten Wissens in ei-

ner einzigen Schnittstelle ist ein sehr hoher Aufwand erforderlich. In der Regel wird es daher verschiedene Zugriffspunkte geben, beispielsweise kann auf Produktdaten wie Bauteilgeometrien, Stücklisten und Simulationsmodelle über das PDM-System zugegriffen werden.

Rechtliche Rahmenbedingungen

Das Erfassen und Speichern von Wissen unterliegt rechtlichen Rahmenbedingungen. Für die Einführung eines Wissensspeichers ist der DIN ISO 30401:2021 Wissensmanagementsysteme zu folgen.

Kritische Aspekte sind die anonymisierte Bereitstellung von Produktdaten für Forschungszwecke und Kooperationen über Unternehmensgrenzen hinweg.

Mit GAIA-X haben deutsche und französische Unternehmen gemeinsam mit einigen europäischen Regierungen eine Initiative zur Schaffung einer sicheren und vertrauenswürdigen Dateninfrastruktur für Europa ins Leben gerufen. GAIA-X zielt darauf ab, eine föderierte Dateninfrastruktur zu etablieren, die die Interoperabilität und den Datenaustausch zwischen verschiedenen Organisationen und Ländern erleichtert.

Werden KI-basierte Methoden und Technologien genutzt, sind auch weitere rechtliche Hürden zu beachten. Dabei muss auch berücksichtigt werden, dass das Wissen im Unternehmen an Berechtigungen gebunden sein kann, die zu beachten sind. Bei selbstlernenden Systemen darf kein Wissen nach außen gelangen und es dürfen keine vertraulichen Daten indirekt veröffentlicht werden.

Transfer des V-Modells in Bezug auf klassische Entwicklungsphasen

Im Rahmen von SyProLei wurde das V-Modell als Grundlage für einen systemischen Leichtbauentwicklungsprozess identifiziert, modelliert und konkretisiert. Da viele Entwicklungsprozesse, unter anderem auch die der im Projekt involvierten Partner, über spezifische phasenorientierte firmeneigene Methodiken verfügen, wird in diesem Abschnitt eine Übertragung klassischer und bereits etablierter Industrieprozesse [7] auf das V-Modell diskutiert.

Diese soll Anwendern das Verständnis erleichtern und als ein Impulsgeber für eine Umstrukturierung von internen Organisationsformen und Prozessstrukturen sein. Außerdem wird verifiziert, dass die im V-Modell abgebildeten Inhalte vollständig sind und sich daher sinnvoll auf konventionellen Prozessen abbilden lassen.

<p style="text-align: center;">Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung</p> <p><u>Beschreibung der Aktivität</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Sammeln aller Informationen • Prüfen der Vollständigkeit • Ergänzen durch unternehmensinterne Anforderungen <p><u>Typische Arbeitsergebnisse</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Anforderungsliste • Lasten-/Pflichtenheft 	<p style="text-align: center;">Leichtbauaspekte beim Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung</p> <p><u>Beschreibung der Leichtbauaktivitäten</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Definition von Leichtbauentwicklungszielen unter Berücksichtigung des gesamten Produktlebenszyklus • Definition lebenszyklusphasenübergreifender Anforderungen an das Produkt und seine Werkstoffe <p><u>Leichtbauspezifische Arbeitsergebnisse</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Definierte Systemgrenze • Leichtbaurelevanz hinsichtlich der Anforderungen
<p style="text-align: center;">Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen</p> <p><u>Beschreibung der Aktivität</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Identifikation der Gesamtfunktion • Strukturieren in Teilfunktionen <p><u>Typische Arbeitsergebnisse</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Funktionale und logische Architektur(en) 	<p style="text-align: center;">Leichtbauaspekte beim Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen</p> <p><u>Beschreibung der Leichtbauaktivitäten</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Bewertung der funktionellen Architekturen hinsichtlich Gewicht, Abmessungen, Kosten und CO₂-Emissionen • Wichtigkeit von Funktionalität zur Kundenbegeisterung (Simplifizierung, Multifunktionalität und Wertigkeit) <p><u>Leichtbauspezifische Arbeitsergebnisse</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Lebenszyklusanalyse von technischen Funktionen • Bewertung von Funktionalitäten hinsichtlich Leichtbau
<p style="text-align: center;">Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen</p> <p><u>Beschreibung der Aktivität</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung physikalischer Effekte sowie geometrisch-stofflicher Merkmale auf Teilfunktionsebene <p><u>Typische Arbeitsergebnisse</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Prinzipielle Lösungskonzepte 	<p style="text-align: center;">Leichtbauaspekte bei der Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen</p> <p><u>Beschreibung der Leichtbauaktivitäten</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Lösungsfindung mit Fokus auf leichte Produkte • Initiale Modellierung der Lösungskonzepte in 1D-Simulationen • Primäre Auswahl von Werkstoffen unter Berücksichtigung der Fertigung und der Fügetechnologie <p><u>Leichtbauspezifische Arbeitsergebnisse</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Prinzipielle leichtbauorientierte Lösungskonzepte • Initiale Konzeptbewertung mit Fokus auf Leichtbau (z.B. Energieverbrauch, Werkstoffauswahl, Bauraumoptimierung)
<p style="text-align: center;">Bewertung und Auswahl</p> <p><u>Beschreibung der Aktivität</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Kombination von Teillösungen zu Wirkstruktur(en), welche die prinzipielle Lösung beschreiben <p><u>Typische Arbeitsergebnisse</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Ausgewählte Lösungskonzepte 	<p style="text-align: center;">Leichtbauaspekte in der Bewertung und Auswahl</p> <p><u>Beschreibung der Leichtbauaktivitäten</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Abschätzung von mechanischen Größen (z.B. Kräfte und Momente) und Umweltauswirkungen (z.B. Energieverbrauch in der Nutzungsphase) entlang des gesamten Lebenszyklus • Erfolgt kontinuierlich im Produktentwicklungsprozess <p><u>Leichtbauspezifische Arbeitsergebnisse</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Ausgewählte leichtbauorientierte Lösungskonzepte • Lebenszyklusübergreifende Konzeptbewertung (technisch, wirtschaftlich und ökologisch)



Abbildung 21: Transfer klassischer Entwicklungsaufgaben auf das V-Modell

Werkzeugkasten Systemische Entwicklung

Der Werkzeugkasten Systemische Entwicklung stellt ein zentrales Element des Handlungsleitfadens dar und unterstützt die zuvor vorgestellten Phasen des Entwicklungsprozesses. Der Werkzeugkasten enthält als Werkzeuge eine Auswahl von Methoden, die den Entwicklungsprozess unterstützen, um mit systemischem Vorgehen leichte und nachhaltige Produkte zu entwickeln. Die Methoden nutzen die digitale Toolkette.

In der Regel ist die Anwendung einer Methode zu einem konkreten Zeitpunkt im Entwicklungsprozess sinnvoll. Die Einordnung der Methoden in den Prozess ist der Beschreibung der Entwicklungsphasen zu entnehmen.

Nachfolgend wird jede Methode kompakt auf einer Seite vorgestellt. Die Intention der Beschreibungen im Leitfaden ist, dem Leser einen Impuls zu geben. Für die Anwendung einer Methode sind in der Regel weitere Informationen notwendig, dazu sind die angegebenen Quellen zu beachten.

Die Beschreibungen der Methoden im Werkzeugkasten folgen einem einheitlichen Muster. Jede Methodenbeschreibung beginnt mit einer zusammenfassenden Erläuterung, gefolgt von verschiedenen Unterpunkten, die die Ziele der Methode, relevanten Artefakte und die benötigten Werkzeuge enthalten. Abschließend wird das Vorgehen in Form eines Prozessschaubilds beschrieben.

Ziele und Mehrwert

Hier wird beschrieben, welches Ziel mit der Methode verfolgt wird und welcher Mehrwert für Leichtbau und Ressourceneffizienz durch dieses Ziel erreicht wird.

Inputs

Die benötigten Inputs zur Anwendung der Methode umfassen Informationen und Dokumente, die auch aus anderen Methoden beziehungsweise aus bestimmten Phasen des Vorgehensmodells stammen können. In diesem Fall können sie unter ihrer Benennung im Leitfaden nachgeschlagen werden.

Werkzeuge / Tools

Dieser Abschnitt nennt Hilfsmittel und Software-Werkzeuge, die zur Umsetzung der Methode benötigt werden, beziehungsweise die Anwendung der Methode unterstützen. Bei Software-Werkzeugen wird in der Regel die Art des Programms, beispielsweise Tabellenkalkulation oder MBSE-Tool, angegeben. Teilweise werden auch konkrete Tools genannt, die innerhalb des Forschungsprojektes zum Einsatz kamen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden darüber hinaus auch eigene Tools innerhalb des Projektkonsortiums entwickelt.

Prozessschaubild

Ein Flussdiagramm am unteren Ende der Seite zeigt das Vorgehen zur Anwendung der Methode in einzelnen Schritten. Die Darstellung umfasst auch verschiedene Artefakte wie Methoden, Dokumente oder Tools und macht kenntlich, wo diese genutzt oder erzeugt werden.

Die Notation orientiert sich an Flussdiagrammen und dem UML-Aktivitätsdiagramm und ist unten erläuternd dargestellt.

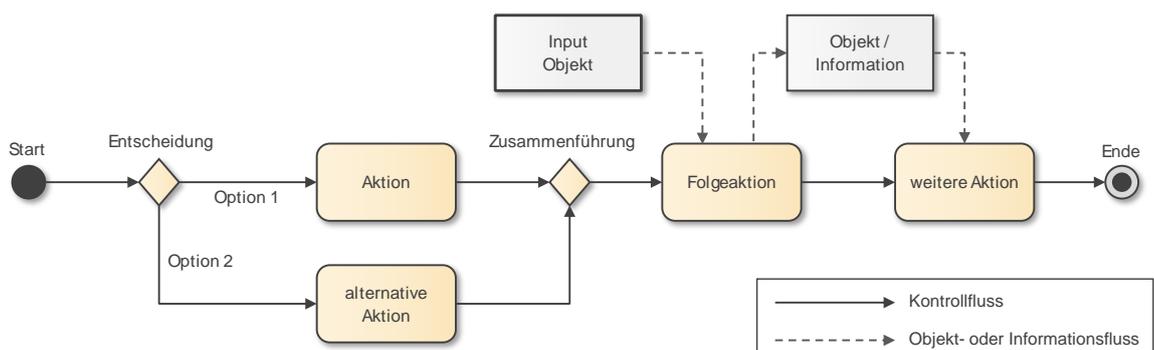


Abbildung 22: Beispiel der Flussdiagramme im Werkzeugkasten

Tabelle 1: Übersicht des Werkzeugkastens „Systeme Leichtbauentwicklung“ und Zuordnung zu den Phasen der Produktentwicklung (● zugehörige Entwicklungsphase; ○ kann für diese Phase transformiert werden)

	Projekttinitialisierung	Requirements Engineering (R)	Funktionales Design (F)	Logisches Design (L)	Technisches Design (T)	Physisches Design (P)	Prozess- und Systemintegration	Abnahmetest und Eigenschaftsabsicherung
Definition der Systemgrenze	●							
Leichtbaufokussiertes Zielsystem	●							
Leichtbau-Team	●							
Kennzeichnen von Leichtbau-Anforderungen		●						
Leichtbau-QFD	○	●						
Funktionserhebung und Erstellung der Funktionshierarchie			●					
Leichtbaupotenzialanalyse			●					
Minimales Funktionales System			●					
Funktions-Massen-Analyse (FMA)			●					
Funktionale Lebenszyklus Energie Analyse (FLCEA)			●	○	○	○		
PPWF-Korrelation			●	○	○			
Gezielte Funktionsintegration			●					
Parametrisiertes Layout				●	●			
Struktur der Wirkprinzipien				●				
Leichtbaukreativitätsmethoden(LWCM)	○			●	○			
Leichtbauspezifischer Ideengeber				●	●	●		
Leichtbau-TRIZ				●	○			
Ökobilanzierung/CO2-Fußabdruck				○	○	●		
1D Simulation			○	○	●	○		
Sekundäre Eigenschaftsänderungspotentiale					○	●		
Topologieoptimierung					●	●		
Mehrkörpersimulation					○	●		
Strömungssimulation					○	●		
Technologiekettenplanung und -auswahl					●	●	●	
Multikriterielle Entscheidungsfindung (MCDM)				○	○	●	○	

Definition der Systemgrenze

Die Systemgrenze definiert die Grenze zwischen dem betrachteten System und dem Systemumfeld.

Der Systembegriff basiert auf der Systemtheorie. Diese nutzt allgemeine Prinzipien zur Analyse und Modellierung dynamischer und interagierender Systeme, um die Struktur und das Verhalten komplexer Systeme in verschiedenen Disziplinen zu verstehen. Ein System stellt eine geordnete Gesamtheit von miteinander in Beziehung stehenden und interagierenden Elementen dar, die zusammen eine funktionale Einheit bilden, um spezifische Aufgaben zu erfüllen. Das System sowie die Elemente werden jeweils als Blöcke mit Ein- und Ausgangsgrößen modelliert. Jeder Block stellt abstrakt die funktionale Umwandlung der Eingangs- in die Ausgangsgröße dar.

Die Systemgrenze legt fest, welche Elemente und Interaktionen in die Betrachtung einbezogen werden und welche außerhalb bleiben. Diese klare Abgrenzung ermöglicht es, die Komplexität des Systems beherrschbar zu machen und gezielte Analysen durchzuführen.

Die Modellierung des Systems findet in der Produktentwicklung üblicherweise unter technischen Gesichtspunkten statt. Durch den interdisziplinären Ansatz sind daneben auch andere Betrachtungsweisen möglich: Für den Vergleich von Ökobilanz-Studien ist beispielsweise das Ziehen einer Systemgrenze unter geographischen und zeitlichen Gesichtspunkten sinnvoll.

Zur gezielten Bewertung von Leichtbaupotentialen oder Produktionsverfahren können verschiedene Systemgrenzen für die verschiedenen Domänen Produkt, Produktion und Werkstoff verwendet werden.

Voraussetzung / Inputs

- Unternehmensstrategie
- Projektbeschreibung
- Anforderungen, falls vorhanden
- Zielsystem, sofern schon definiert
- Kontext des Projekts / Produkts / Unternehmens etc.

Ziele und Mehrwert

- Transparente Dokumentation und Darstellung der Systemgrenze
- Kenntnis der System-Schnittstellen
- Vergleichbarkeit für verschiedene Bestandteile des Systems
- Systemübergreifende Leichtbaupotentiale identifizieren
- Definierte Basis für Bilanzierungen und Entscheidungen
- Systemmodell(e) als Grundlage für alle nachfolgenden Aktivitäten und Modelle

Werkzeuge / Tools

- MBSE-Tool

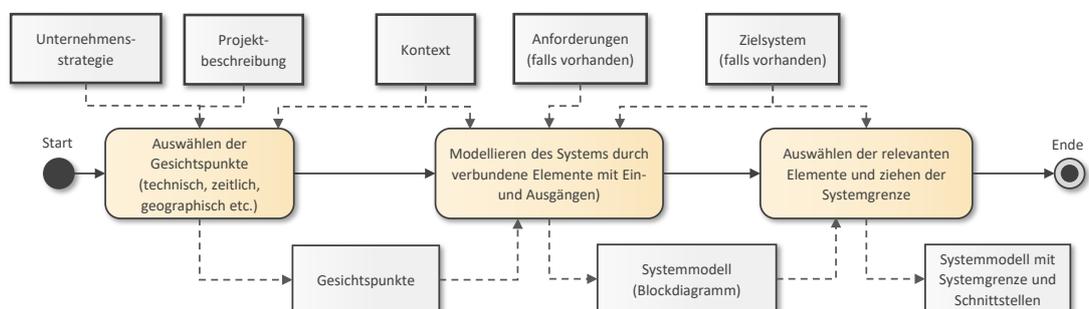


Abbildung 23: Definition der Systemgrenze

Leichtbaufokussiertes Zielsystem

Mit der Formulierung des Zielsystems soll ein Rahmen für die Anforderungen des Projektes beziehungsweise des zu entwickelnden Produkts gesteckt werden. Das Zielsystem bietet eine Grundlage für Entscheidungen und kann damit eine richtungweisende Rolle im Projekt ausfüllen. Aus den Zielvorgaben können bereits erste konkrete Anforderungen an Produkt, Produktion und Werkstoff abgeleitet werden.

Zur Formulierung des Zielsystems wird zunächst die Frage geklärt, was mit dem Produkt erreicht werden soll und was besonders wichtig am Produkt ist. Für ein leichtbaufokussiertes Zielsystem ist zu klären, welche Rolle Leichtbau konkret im Projekt einnimmt.

Aus diesen Schwer- und Eckpunkten des Projektes werden zwingende Ziele abgeleitet und Restriktionen für das Produkt definiert. Neben Zielen wie maximalen Kosten, Entwicklungszeit und Zielgewicht kann es sich dabei auch um eine Beschränkung des CO₂-Fußabdrucks handeln. Ebenso sind die akzeptierten Leichtbaumehrkosten zu ermitteln, also die vertretbaren Kosten pro Einheit Gewichtseinsparung. Dieser Wert ist branchen- und produktspezifisch.

Da für das leichtbaufokussierte Zielsystem eine Reihe von Fragen zu beantworten sind, bietet es sich an, zur Formulierung des Zielsystems einen Fragebogen zu verwenden. Dieser Fragebogen ist einmal projektunabhängig zu entwickeln und kann dann in allen Projekten verwendet werden. Durch

die Formulierung der Fragen kann bereits der Fokus auf Leichtbau gelegt werden.

Zur Erarbeitung eines Zielsystems für ein konkretes Projekt bietet sich als Format ein Workshop des Managements mit dem Projektleiter beziehungsweise den Produktverantwortlichen an, wobei der entwickelte Fragebogen zum Einsatz kommt. Der Fragebogen ist zu diesem Zweck als Template zur Verfügung zu stellen.

Voraussetzung / Inputs

- Unternehmensstrategie
- Rolle Leichtbau
- Projektkontext
- Fragenkatalog (muss entwickelt werden)

Ziele und Mehrwert

- Gesamtheitlicher Rahmen für das Projekt
- Zielvorgabe für das Gesamtsystem
- Grundlage für das Treffen von Entscheidungen im Projektverlauf
- Festlegung von ersten Anforderungen an Produkt, Produktion und Werkstoff auf grober Ebene
- Kenntnis des Spielraums für die Produktentwicklung
- Fokussierung der Ressourcen auf Leichtbauoptimierung und -entwicklung bezüglich der definierten Ziele

Werkzeug/Tools

- Template / Fragenkatalog (zu entwickeln)
- Workshop

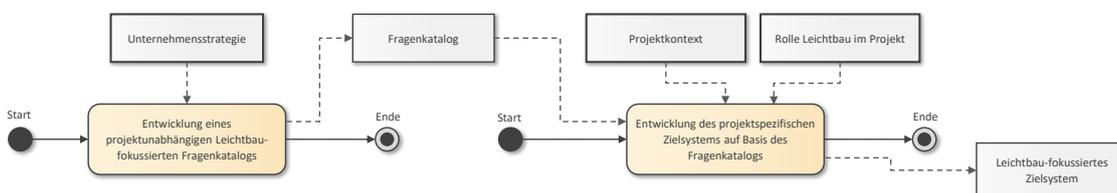


Abbildung 24: Leichtbaufokussiertes Zielsystem

Leichtbau-Team

Ein dediziertes Leichtbau-Team kann durch Analysen, Einbindung in die Produktentwicklung und Zusammenarbeit mit externen Partnern zur Optimierung und Innovation im Leichtbau beitragen. Das Schaffen einer eigenständigen Rolle und das Zuweisen von Ressourcen verleihen dem Aspekt Leichtbau ein größeres Gewicht. Ziel des Leichtbau-Teams ist es, organisationsweit das Leichtbau-Potential in Projekten auszuschöpfen.

Management und Projektleitung spielen eine entscheidende Rolle bei der Schaffung der notwendigen Rahmenbedingungen und der Integration des Teams. Um ein Leichtbau-Team aufzubauen, müssen Management und Projektleitung die Größe des Teams und die Kompetenzen festlegen. Die Leichtbau-Verantwortung kann auch von einer gut vernetzten Einzelperson wahrgenommen werden. Auch bei eingeschränkten Ressourcen kann das Team zur Hebung von Leichtbaupotentialen beitragen und unabhängige Konzeptvorschläge einbringen. Es ist vorteilhaft, aber nicht notwendig, dass alle Teammitglieder Leichtbau-Experten sind. Durch Kooperation mit externen Netzwerken wie Universitäten und Firmen kann zusätzliches Know-How eingebracht werden.

Das Leichtbau-Team soll die Produktentwicklung regelmäßig hinsichtlich Leichtbau überprüfen und den Fokus darauf setzen. Der Leichtbauaspekt muss im Zielsystem genügend Beachtung finden, wofür das Team an allen projektrelevanten Meetings teilnehmen sollte. Das Team unterstützt die Entwicklungsabteilungen mit Methoden und Ideen sowie bei der Toolanwendung und führt eigene Untersuchungen durch. Es ist wichtig, die bestehenden Entwicklungsmethoden zu analysieren und zu prüfen, ob „alte“ Wege das Leichtbaupotential einschränken und ob sich Abteilungen einer leichtbauorientierten Entwicklung widersetzen.

Voraussetzungen / Inputs

- Zielsystem
- Ressourcen (Personal, Budget, Zeit, Berechtigungen)
- Internes Netzwerk des Teams
- Externes Netzwerk des Teams (Berater, andere Unternehmen, Universitäten etc.)
- SyProLei-Methodik

Ziele und Mehrwert

- Mehr Gewicht für den Aspekt Leichtbau
- Wohlwollende Unterstützung der Entwicklung hinsichtlich Leichtbau über alle Entwicklungsphasen hinweg
- Heben von Leichtbaupotentialen für das finale Produkt
- Limitierungen hinsichtlich Leichtbau erkennen und bei der Abhilfe unterstützen

Werkzeug / Tools

- Management Tools zu Gruppenfindung /-bildung

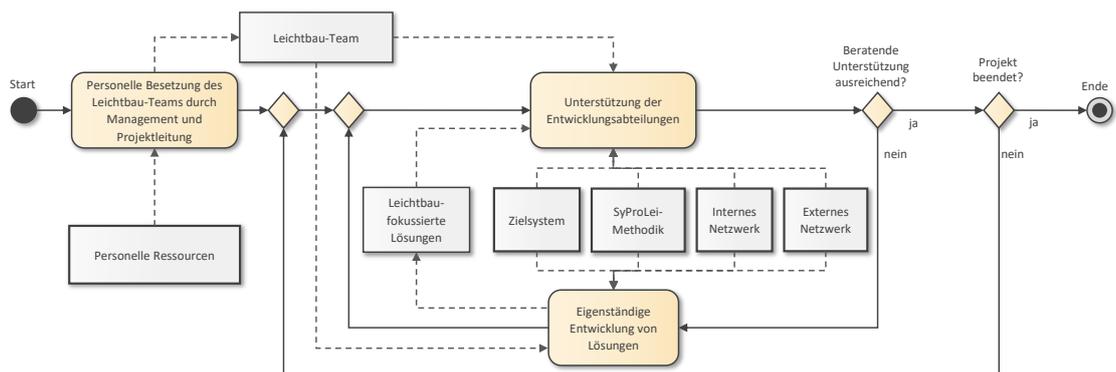


Abbildung 25: Leichtbau-Team

Kennzeichen von Leichtbau-Anforderungen

Durch eine Klassifizierung und Bewertung von Anforderungen ist es möglich, Anforderungen mit voraussichtlich großem Einfluss auf Leichtbaueigenschaften zu erkennen und Potentiale hinsichtlich Leichtbau, CO₂-Einsparung und Kosten aufzudecken. Ebenfalls können besonders gewichtskritische Anforderungen identifiziert und gegebenenfalls neu verhandelt werden.

Als Klassifizierung sollte neben den klassischen Muss-, Soll- und Kann-Merkmalen eine Zuordnung und ein Abgleich mit den Domänen Produkt, Werkstoff und Produktion vorgenommen werden.

Voraussetzung / Inputs

- Klassifizierung und Bewertung von Anforderungen im verwendeten RE-Tool möglich.
- Umfang der Anforderungen lässt eine Bewertung zu (Aufwand).
- Anforderungen in verarbeitbarer digitaler Form
- Anforderungen mit Zuordnungen zu Komponenten und Gewichten von Vorgängerprodukten

Ziele und Mehrwert

- Anforderungen im Sinne von Leichtbau, CO₂-Einsparung und Kosten analysieren.
- Erkennen und vormerken von Anforderungen, die voraussichtlich großen Einfluss auf Produktgewicht und CO₂-Emissionen haben und eine besondere Betrachtung erfordern.

Werkzeug/Tools

- Jeweils eingesetztes RE-Tool
- Sofern Tool die Methode nicht unterstützt: Tabellenkalkulation
- Wissensspeicher

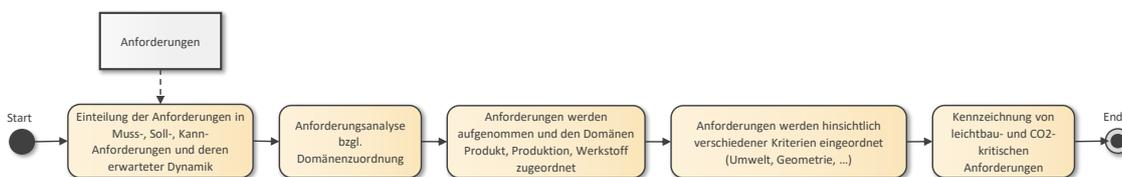


Abbildung 26: Kennzeichen von Leichtbau-Anforderungen

Leichtbau-QFD

In Anlehnung an die bekannte Methode des „Quality Function Deployment / House of Quality“ sollen die technischen Produktmerkmale, die die gewünschten Leichtbau-Ziele eines Produktes / Projektes stark beeinflussen können, herausgearbeitet werden. Anstatt den Fokus auf direkte Marktanforderungen zu legen, werden hier Leichtbau-Ziele/-Wünsche betrachtet. Der Leichtbau wird als Kunde betrachtet und somit sind die Leichtbau-Ziele / -Wünsche die Kundenwünsche im herkömmlichen Sinne des QFD. Zusätzlich müssen durch die Methode die Leichtbau-Zielsetzungen an das Produkt / Projekt gewichtet werden.

Im ersten Schritt sind die mit der Leichtbau Optimierung verbundenen Ziele und Wünsche herauszuarbeiten. Diese sind im Anschluss in die betreffenden Aspekte zu unterteilen. Die Ziele werden also den Kategorien Gewicht, Kosten und Nachhaltigkeit zugeordnet, sowie gewichtet und normiert, um sie quantifizierbar machen zu können. Anschließend werden die Produktmerkmale herausgearbeitet, die die definierten Ziele beeinflussen können. Schlussendlich kann anhand der vorgenommenen Bewertung und Einteilung bestimmt werden, welche Produktmerkmale die höchsten Leichtbaupotentiale haben

Voraussetzung / Inputs

- Zielsystem
- Technische Produktmerkmale
- Klar formulierte Anforderungen/ Ziele/ Wünsche an den Leichtbau

Ziele und Mehrwert

- Herausarbeiten von Produktmerkmalen, die einen starken positiven oder negativen Einfluss auf den Leichtbau haben

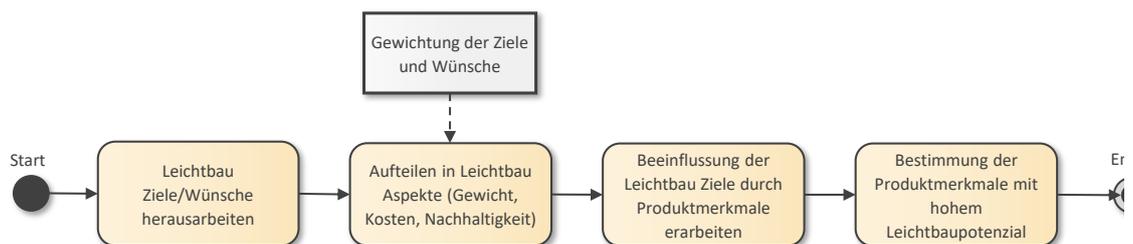


Abbildung 27: Leichtbau QFD

Funktionserhebung und Erstellung der Funktionshierarchie

In der Industrie findet Leichtbauoptimierung heutzutage in den meisten Fällen auf der physischen Ebene, durch bspw. Geometrieoptimierung oder Verwendung spezieller Materialien, statt. Das Forschungsprojekt *SyProLei* hat sich zum Ziel gesetzt Leichtbaupotentiale ganzheitlich zu betrachten. Daher ist die funktionale Betrachtung des Produkts bzw. Systems von zentraler Bedeutung. Dazu wurden verschiedene Methoden und Ansätze des Systems Engineering hinsichtlich ihrer Adaption für Leichtbauoptimierung analysiert.

Die Methoden der nachfolgenden Kapitel setzen entsprechende Kenntnisse über die Systemfunktionen voraus. Daher muss vorab die Funktionserhebung sowie die Erstellung der Funktionshierarchie erfolgen. Dabei geht es zum einen um die Ermittlung der Funktionen, dies erfolgt typischerweise durch Analyse der funktionalen Anforderungen, aber auch um die Dekomposition der Funktionen über die verschiedenen Systemebenen hinweg. Systeme lassen sich typischerweise in kleinere Subsysteme zerlegen und dies iterativ über mehrere Ebenen hinweg. Man spricht bei diesem Vorgehen auch vom sogenannte Zig-Zagging, da man sich über die verschiedenen Systemebenen hinweg zwischen Anforderungen und Systemarchitektur hin und her bewegt.

Voraussetzung / Inputs

- Anforderungen an das Produkt sind bereits abgeleitet worden und liegen vor
- Systemgrenzen wurden klar definiert
- Bestehende Funktionshierarchien

Ziele und Mehrwert.

- Identifikation von Leichtbaupotentialen aus funktionaler Perspektive
- Ganzheitliche Betrachtung des Systems zur Ermittlung von übergreifenden Leichtbaupotentialen
- Berücksichtigung von Leichtbaufaktoren bereits in der frühen Phase der Produktentwicklung

Werkzeug/Tools

- MBSE Tool (z. B. System-Modelling-Workbench SMW)
- Anforderungsmanagementsystem

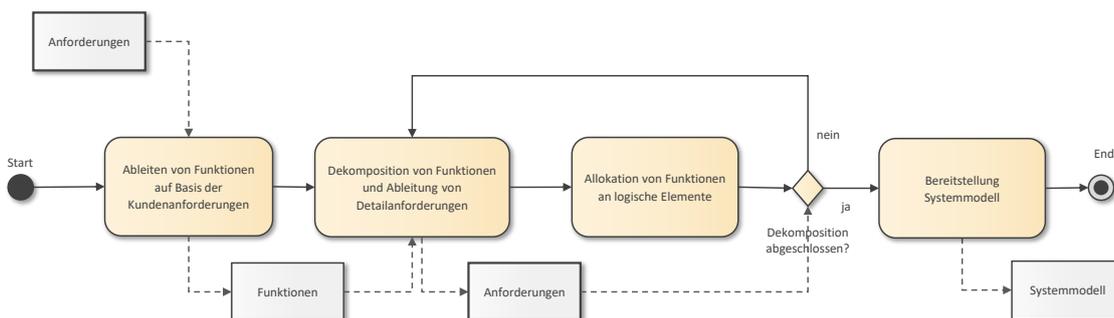


Abbildung 28: Funktionserhebung und Erstellung der Funktionshierarchie

Leichtbaupotenzialanalyse

Die zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren und die bei der Fertigung entstehenden Kosten stellen Randbedingungen bei der Gestaltungsfreiheit während der Produktentwicklung. Je früher diese Randbedingungen miteinbezogen werden, desto kostengünstiger können Änderungen an einem Produkt vorgenommen werden. Im Rahmen des Projektes wurde daher eine Leichtbaupotenzialanalyse entwickelt, die es ermöglicht basierend auf Produktanforderungen, der aktuellen Komponentengestalt und den zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren das Leichtbaupotenzial zu ermitteln. Basierend auf einer Literaturrecherche und Experteninterviews wurden 50 Einflussfaktoren aus den Bereichen Produktgestalt, -anforderungen und Fertigungsfaktoren identifiziert. Diese wurden mittels einer Vernetzungsanalyse auf deren Beziehungen untersucht. Als zentrale Kennzahl wird das Leichtbaupotenzial aus den 4 Hauptindikatoren geometrischer Leichtbau, Materialeichtbau, Rezyklierbarkeit und Kosten zusammengesetzt. Die Berechnung der Faktoren entlang des Baums erfolgt mittels dem gewichteten arithmetischen Mittel. Dies ermöglicht es dem Anwender die Potenzialfaktoren beliebig zu gewichten. Die Berechnung der Potenzialfaktoren erfolgt hierbei als Quotient zwischen bereitgestellter Fähigkeit und dem derzeitigen Wert des Bauteils.

Voraussetzung / Inputs

- Datenbank mit zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren
- Datenbank mit zur Verfügung stehenden Werkstoffen
- Geometrische Beschreibung der zu betrachtenden Komponenten

Ziele und Mehrwert

- Identifizierung von Optimierungspotenzialen basierend auf dem zur Verfügung stehenden Fertigungs- und Materialwissen
- Identifizierung des Leichtbaupotenzials durch die Implementierung neuer Fertigungsverfahren

Werkzeuge / Tools

- Internes Tool
- Wissensspeicher

Weitere Informationen

- Zeidler et al. [25]

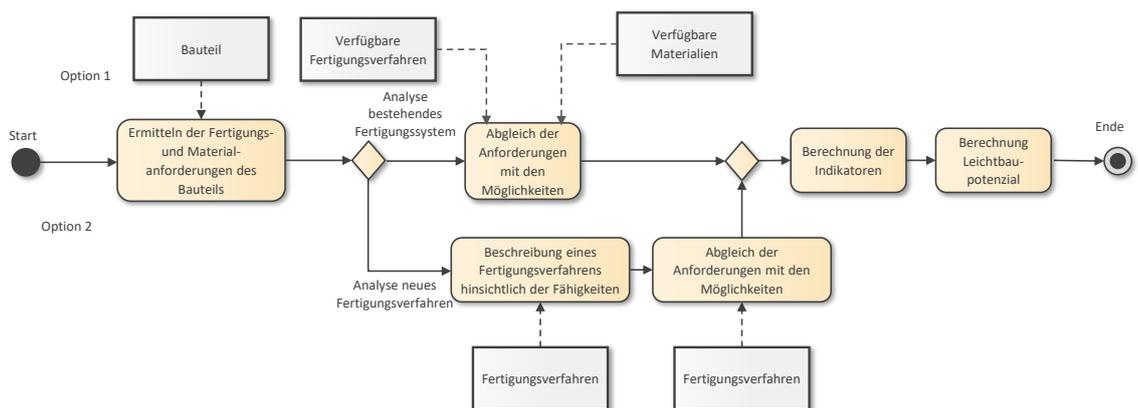


Abbildung 29: Leichtbaupotentialanalyse

Minimales Funktionales System

Bei der Methode minimales funktionales System geht es in erster Linie um die Priorisierung von Funktionen. Die Idee basiert auf der Klassifikation, der zuvor definierten Systemfunktionen hinsichtlich ihrer Wichtigkeit. Darauf aufbauend kann man im weiteren Verlauf zwischen „muss“ und „kann“ Funktionen unterscheiden kann.

„Muss“-Funktionen sind alle Funktionen, die für die Kernfunktionalität des Systems notwendig sind und ohne die das Produkt seine Hauptverwendungszwecke nicht erfüllen kann. „Kann“-Funktionen sind die Funktionen, welche die Kernfunktionalität erweitern aber nicht zwingend notwendig sind. Das minimale funktionale System besteht daher aus allen „Muss“-Funktionen. Alle übrigen „Kann“-Funktionen werden dann hinsichtlich ihrer Leichtbaupotentiale analysiert, um anschließend einen Trade-Off zwischen Funktionalität und Leichtbaupotential durchführen zu können. Das minimale funktionale System kann so auch die Funktionsmassenanalyse unterstützen.

Mithilfe des Modellierungstools und den bereits abgeleiteten Funktionen erfolgt der Aufbau einer Funktionsstruktur des Systems. Innerhalb dieser Struktur sind mithilfe der Funktionshierarchie sämtliche Kernfunktionen des Systems zu kennzeichnen. Anhand dieser Kernfunktionen sind alle nicht

notwendigen Nebenfunktionen zu kennzeichnen und es erfolgt eine Reduktion der Funktionsstruktur und eine Ausleitung des Minimalmodells. Anhand dieses Minimalmodells können Leichtbaupotentiale abgeleitet werden, da so bewertet werden kann, welche Funktionen aus Leichtbausicht hinterfragt werden können. Es muss an dieser Stelle immer ein Trade-Off zwischen Funktionalität und Leichtbaupotential getroffen werden.

Voraussetzung / Inputs

- Anforderungen
- Funktionen (bspw. aus Funktionsmodell)

Ziele und Mehrwert

- Identifikation von Leichtbaupotentialen aus funktionaler Perspektive
- Optimierte Kommunikation mit Stakeholdern, bzgl. Systemfunktionalität unter Berücksichtigung von Leichtbauaspekten
- Optimiertes Produktdesign unter Berücksichtigung von funktionalen und leichtbauspezifischen Gesichtspunkten

Werkzeug/Tools

- Systemmodellierer
- Variantenmanagement-Tool
- Wissensspeicher (Funktionsdatenbank)

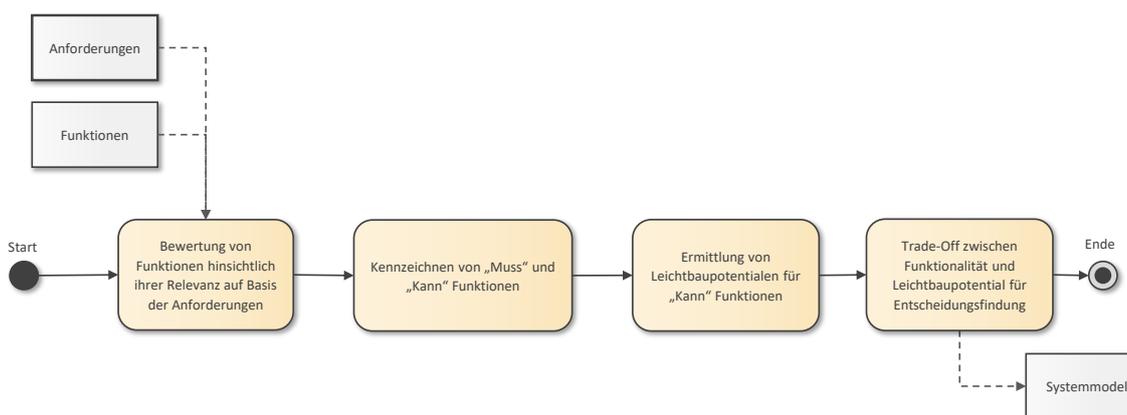


Abbildung 30: Minimales Funktionales System

Funktions-Massen-Analyse

Die Funktionsmassenanalyse ermöglicht die Identifikation des Gewichtsbeitrags einzelner Funktionen zum Gesamtgewicht des Produkts. Auf Basis der ermittelten Gewichtsbeiträge lassen sich Trade-Offs zwischen Funktionalität und Gewicht durchführen.

Die Methode kann auch analog zum Target-Costing eingesetzt werden. Dabei werden Funktionsmassenziele, mit den aus der Funktionsmassenanalyse ermittelten Funktionsmassen abgeglichen. Wird hierbei eine deutliche Überschreitung des Zielgewichts erkannt, weist dies auf eine zu erwartende Gewichtersparnis hin. Diese kann erreicht werden durch eine gewichtsoptimierte Umsetzung der Funktion oder durch Hinterfragen der Funktion an sich. Konstruktive Änderungen müssen unter Berücksichtigung der erlaubten Leichtbaumehrkosten umgesetzt werden.

Durch die Korrelation von Gewicht und CO₂ lassen sich durch die Funktionsmassenanalyse auch Rückschlüsse auf den CO₂ Beitrag einzelner Funktionen ziehen.

Voraussetzung / Inputs

- Grundsätzliche Vorstellungen über das Entwicklungsziel und die erlaubten Leichtbaumehrkosten
- Möglichkeit konstruktiver oder werkstoff-spezifischer Änderungen

Ziele und Mehrwert

- Identifizierung und besseres Verständnis von Zusammenhängen zwischen Funktion und Gewichtbeitrag
- Identifizierung gewichtskritischer Funktionen und Ableiten von Maßnahmen
- Optimiertes Produktdesign unter Berücksichtigung von funktionalen und leichtbauspezifischen Gesichtspunkten

Inputs

- Funktionen (bspw. aus Funktionsmodell)
- Funktionsmassenziele
- Elemente des technischen Designs (mit Mapping von funktionalen und technischen Elementen)

Werkzeug/Tools

- MBSE Tool (z.B. SMW)
- Excel
- Wissensspeicher

Weitere Informationen

- Posner et al. [26]
- Posner et al. [27]
- Albers et al. [28]

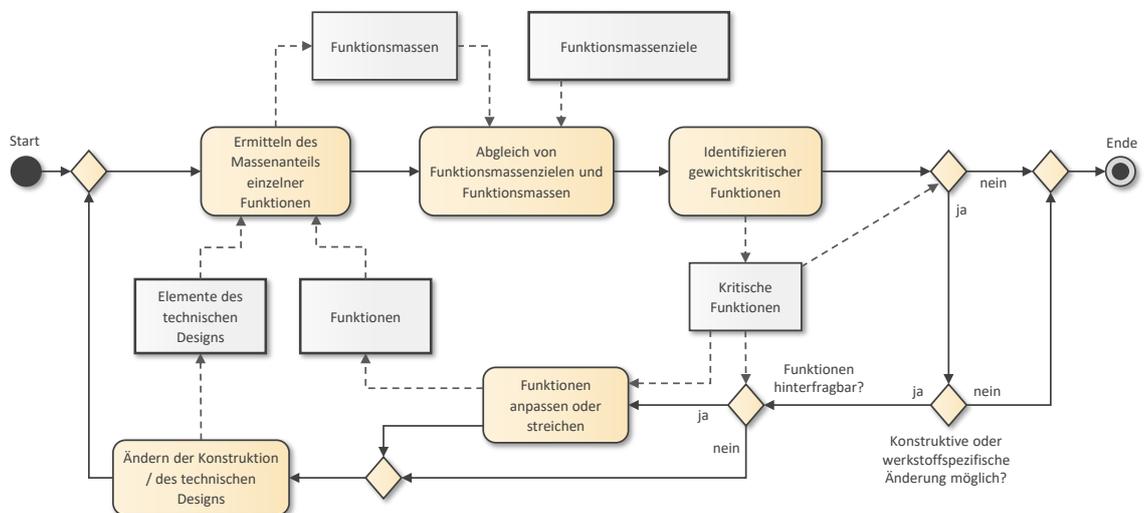


Abbildung 31: Funktions-Massen-Analyse

PPWF-Korrelation

Diese Methode dient zur Einbindung der Abhängigkeiten zwischen Produktdesign, Produktion, Werkstoff und notwendiger Fügetechnologie in die frühe Phase. Dabei stehen im Fokus die Kompatibilität von Funktionen und Werkstoffklassen. [29]

Durch diese Methode sollen Abhängigkeiten zwischen Produktdesign, Produktion, Werkstoff und notwendiger Fügetechnologie in der frühen Phase der Produktentwicklung analysiert werden. Hierfür werden zunächst die Komplexitäten der verschiedenen Funktionen abgeschätzt. Anschließend werden für Funktionen geringer Komplexität die Kompatibilität mit Werkstoffen ausgelesen und sortiert. Aus diesen Informationen werden die Folgen für die Produktion aus den wahrscheinlichsten verwendeten Werkstoffen abgeleitet und weitere Folgen auf Produktionsparameter und Produktionsprozess abgeleitet.

Voraussetzung / Inputs

- Vorwissen über typische Lösungen für Funktionen
- Funktionales ProduktdesignKompatibilität von Funktionen und Werkstoffklassen (Abschätzungen)
- Optional: Produktions- und Werkstoffbeschränkungen

Ziele und Mehrwert

- Späteren Zeit-/Kostendruck für neue Verfahren/Werkstoffe verringern
- Aufdeckung von Potentialen der Erschließung weiterer Werkstoffe, Fertigungs- und Fügeverfahren

Werkzeug/Tools

- Matrixdarstellung (Template)

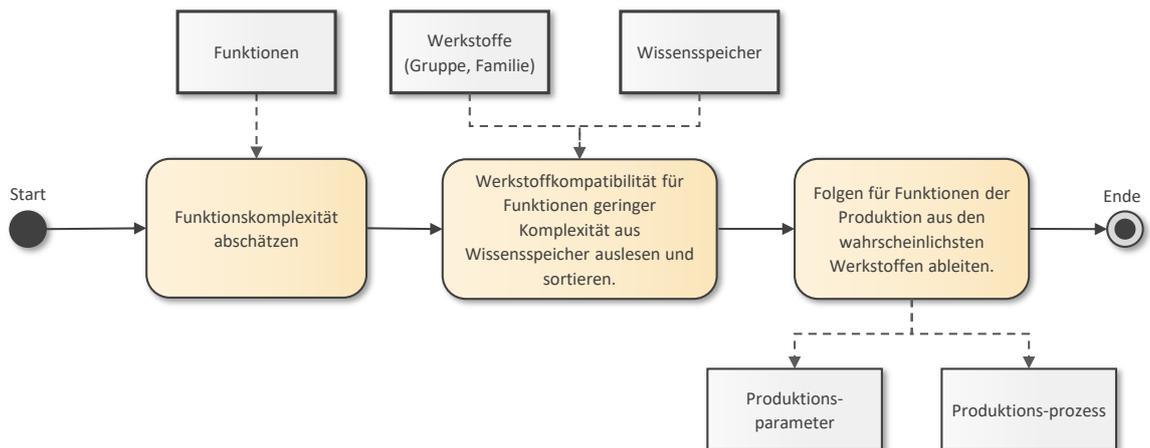


Abbildung 33: PPWF-Korrelation

Gezielte Funktionsintegration

Ein zentraler Punkt im Rahmen der Produktentwicklung auf Basis des V-Modells, ist die Definition von Systemfunktionen. Dabei geht es nicht nur um die Erfassung aller relevanter Funktionen, welche auf Basis der Anforderungen abgeleitet werden können, sondern auch um die Planung hinsichtlich ihrer Implementierung.

Dabei werden Funktionen in der Regel an logische Elemente allokiert. Auf Basis dieser Systemarchitektur lassen sich im weiteren Verlauf Spezifikationen für einzelne Komponenten ableiten. D.h. durch die Zuordnung von Funktionen zu logischen Elementen werden Designentscheidungen hinsichtlich der späteren Realisierung der Funktionen getroffen.

Genau an diesem Punkt setzt die gezielte Funktionsintegration an. Lässt sich beispielsweise eine Funktion durch verschiedene Komponenten realisieren, kann durch eine gezielte Allokation der Funktion (Architekturentscheidung) ggf. eine Komponente eingespart werden. Das Einsparen einer Komponente wird in dem meisten Fällen ein entsprechendes Leichtbaupotential darstellen.

Voraussetzung / Inputs

- Funktionsstruktur
- Ggf. bestehendes logisches Design
- Optimiertes logisches Design
- Bauraummodell

Ziele und Mehrwert

- Einsparung von Komponenten durch gezielte Allokation von Funktionen und dadurch Einsparung von Gewicht
- Identifikation von Leichtbaupotentialen aus funktionaler Perspektive
- Abstrakte, ganzheitliche Betrachtung der Systemarchitektur zur Identifikation von Leichtbaupotentialen

Werkzeug/Tools

- Systemmodellierer
- Wissensspeicher

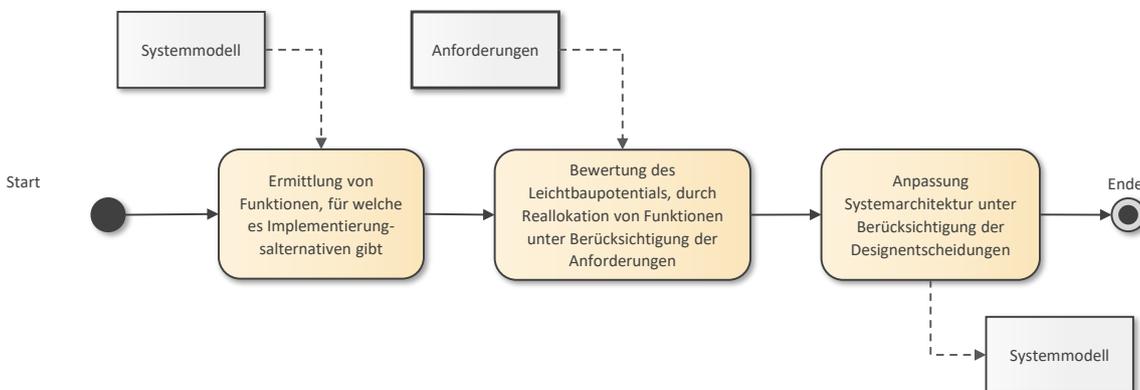


Abbildung 34: Gezielte Funktionsintegration

Parametrisiertes Layout

Durch Anordnung der logischen Elemente als technisches Lösungskonzept im Bauraum wird die Abschätzung und Visualisierung der Komponentengewichte sowie der Leichtbauzonen ermöglicht. Dabei sollen die kritischen Elemente für die Massenverteilung identifiziert werden. [29]

Um eine Abschätzung der Massenverteilung und Leichtbauzonen vornehmen zu können, werden zunächst die vorhandenen logischen Elemente in das Tool übertragen und mittels der definierten Interfaces verbunden. Die Interfaces stellen die Bauteile für Stoff- und Energieflüsse dar, also entsprechende Leitungen. Den Elementen und den Interfaces werden voraussichtliche Dichten oder Massen zugeordnet, wofür entsprechendes Vorwissen förderlich ist. Im Folgenden wird eine erste Anordnung bzw. Gruppierung der Elemente vorgenommen. Diese Anordnung wird nun einer Optimierung unterzogen, um ein erstes Bauraummodell zu erhalten, mit dem oben genannte Abschätzungen durchgeführt werden können. Die einfache Ansicht eignet sich für schnelle Parameterstudien zur Masseverteilung auch bei unvollständig vorhandenem Vorwissen.

Voraussetzung / Inputs

- Vorwissen über typische Lösungen für Funktionen
- Logisches Design
- Voraussichtliche Maße, Massen oder Materialdichte von Komponenten
- Optional: Bauraumbeschränkungen

Ziele und Mehrwert

- Länge der notwendigen Verbindungen für Stoff- / Energieflüsse minimieren
- Lage des Schwerpunkts optimieren
- Vorteilhafte Leichtbauzonen erkennen

Werkzeug/Tools

- Eigenes Tool, Konzept siehe [27]
- Entwurfsmodus in CAD-Software

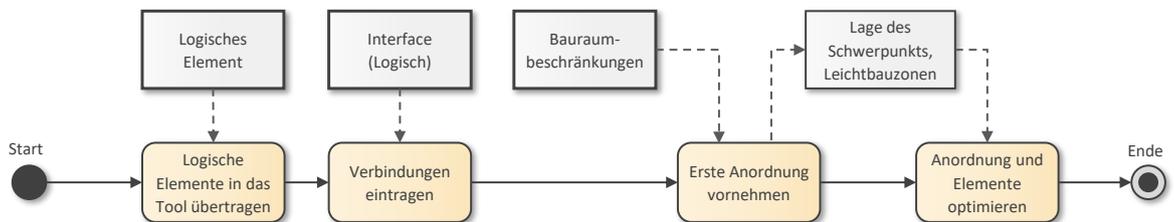


Abbildung 35: Parametrisiertes Layout

Struktur der Wirkprinzipien

Zur Realisierung von Funktionen stehen häufig verschiedene Wirkprinzipien zur Verfügung. Die Auswahl und Kombination von verschiedenen Wirkprinzipien führt zur Wirkstruktur. Die Masse des Produkts ist stark abhängig von der gewählten Wirkstruktur, weshalb der Leichtbauaspekt bei der Selektion von Wirkprinzipien mitberücksichtigt werden sollte.

Voraussetzung / Inputs

- Funktionale Struktur und ggf. bestehendes logisches Design des Systems vorhanden
- Funktionen lassen sich mit verschiedenen Wirkprinzipien umsetzen
- Auswirkungen von Wirkprinzipien auf die Masse sind bekannt

Ziele und Mehrwert

- Reduzierung der Masse durch optimale Selektion von Wirkprinzipien und Wirkstruktur

Werkzeug/Tools

- Systemmodellierer
- Wissensspeicher

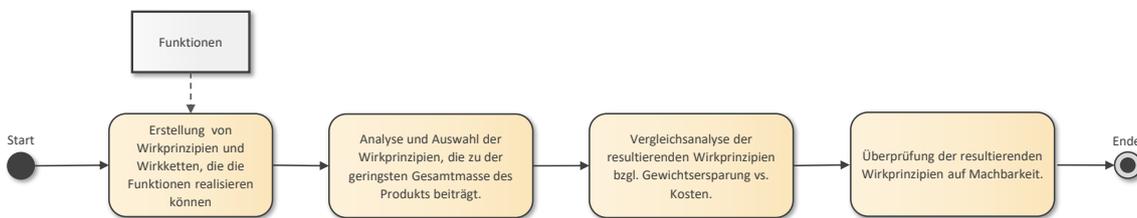


Abbildung 36: Struktur der Wirkprinzipien

Leichtbaukreativitätsmethoden

Der Mensch zählt aufgrund seiner kreativen Fähigkeiten als wichtiger Problemlöser in Entwicklungsprojekten. Die leichtbauorientierten Kreativitätsmethoden unterstützen Entwickler hierbei mit einem spezifischen Fokus darauf, leichte und nachhaltige Lösungen zu generieren.

Anhand des untenstehend abgebildeten Prozesses können mithilfe von Kreativitätsmethoden eine Vielzahl von Problemstellungen im Bereich Leichtbau gelöst werden. Hierbei handelt es sich um generisches Rahmenwerk zur Integration von Aspekten des Leichtbaus und der nachhaltigen Produktentwicklung in drei Hauptschritten des Problemlöseprozesses: Problemanalyse, die eigentliche kreative Lösungsfindung und Problembeseitigung durch Ideenintegration, Wissensmanagement und alternierendes Suchen und Bewerten von Ideen. Die Anwendung des Modells kann methodisch firmenspezifisch individuell erfolgen und in frühen Phasen der Produktentwicklung integriert werden.

Voraussetzung / Inputs

- Leichtbaurelevante Problemstellungen
- Freiheiten bei der Lösungsgestaltung
- Möglichst diversifizierte Teamzusammensetzung

Ziele und Mehrwert

- Neue Lösungen für bestehende Probleme
- Förderung des kreativen Denkens in leichtbauorientierten Lösungsräumen

Werkzeug/Tools

- Digital: Online-Kollaborationsplattform mit Möglichkeit zum parallelen Bearbeiten (z.B. Miroboard)
- Physisch: Raum mit Whiteboards

Weitere Informationen

- König et al.[19]
- „A generic framework for the creative generation of sustainable and lightweight products“
Journal of Cleaner Production (submitted)

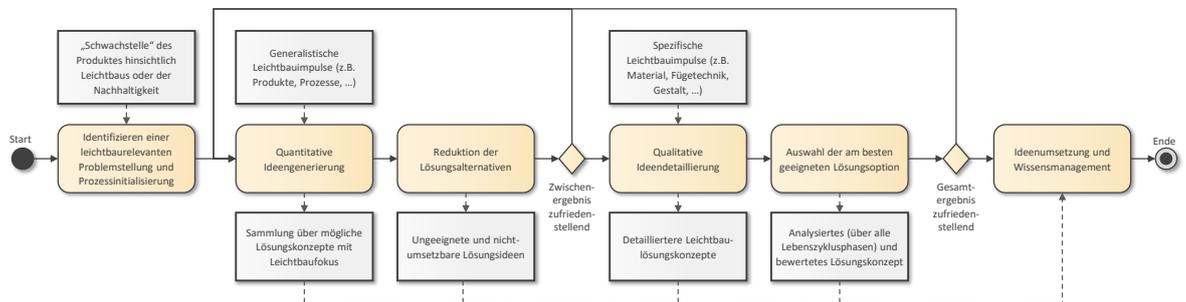


Abbildung 37: Leichtbaukreativitätsmethoden

Leichtbauspezifischer Ideengeber

Um die Potenziale von Leichtbau bereits in den frühen Phasen der Entwicklung voll auszuschöpfen, bedarf es kreativer Ideen und innovativer Ansätze. Ein speziell auf den Leichtbau fokussierter Ideengeber soll dabei helfen, das kreative Potential von Ingenieuren, Designer und Entwicklern zu entfalten.

Der Ideengeber enthält Grundgedanken der Leichtbaukonstruktion aus Klein [30], Tempelman [31] und Ashby [32] und weist auf bestehende Konzepte beispielhaft hin. Durch Aufhängen der Abbildung in Büroflächen kann so Aufmerksamkeit für relevante Prinzipien geschaffen werden.

Voraussetzung / Inputs

- Keine Voraussetzungen erforderlich

Ziele und Mehrwert

- Förderung des kreativen Denkens
- Frühe Beachtung relevanter Strategien
- Regelmäßige Erinnerung an Optimierungsmöglichkeiten für Entwickelnde

Werkzeug/Tools

- Ideengeber in Form eines Posters

Weitere Informationen

- Tempelman [31]
- Klein [30]

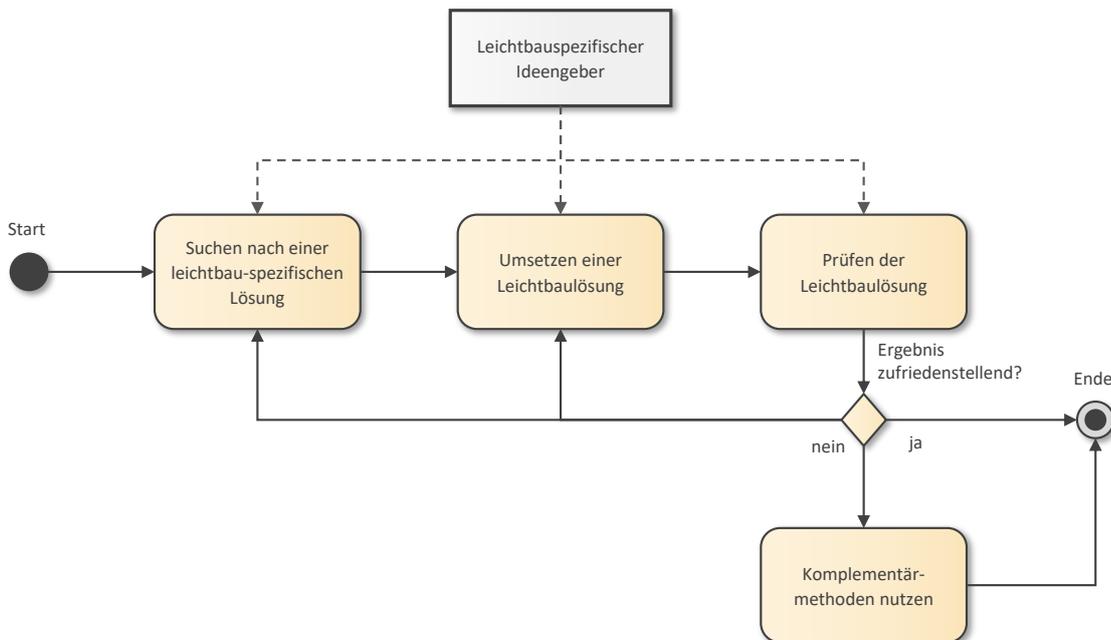


Abbildung 38: Leichtbauspezifischer Ideengeber

Leichtbau-TRIZ

Die TRIZ-Methode basiert auf der Idee, dass Designkonflikte durch Variation von bestehenden Innovationsprinzipien gelöst werden können. Dieses Konzept wurde unter Berücksichtigung des Leichtbau-Einflusses überarbeitet.

Die Anwendung des Leichtbau-TRIZ erfolgt in Analogie zur klassischen TRIZ-Vorgehensweise. Dabei werden zunächst zu verbessernde technische Parameter ausgewählt und z.B. mittels paarweisen Vergleichs gewichtet werden. Anschließend werden die technischen Parameter festgelegt, die nicht verschlechtert werden dürfen. Das implementierte Excel-Tool wird dann mit diesen Parametern ausgeführt, um die Zuweisungen für alle Innovationsprinzipien zu zählen und zu summieren. Hier sind basierend auf den Experteneinschätzungen des SyProLei-Konsortiums Gewichtungsfaktoren für technische Parameter und Innovationsprinzipien hinterlegt, welche den Leichtbau begünstigte Lösungen besser bewerten. Die Innovationsprinzipien werden unter Berücksichtigung der zu verbessern, nicht zu verschlechternden und den ermittelten Einflussfaktoren bewertet und eine Rangfolge ausgegeben. Die resultierenden Konzepte können im nächsten Schritt ausgearbeitet werden.

Voraussetzung / Inputs

- Eine logische oder technische Systemarchitektur
- Freiheiten bei der Lösungsgestaltung
- Technische Optimierungsziele (z.B. resultierend aus dem Leichtbau-Zielsystem)

Ziele und Mehrwert

- Systematische leichtbauorientierte Lösungsfindung
- Aufbrechen von technischen Zielkonflikten

Werkzeug/Tools

- Excel-Tool

Weitere Informationen

- Es ist eine Veröffentlichung mit einem Anwendungsbeispiel in Ausarbeitung

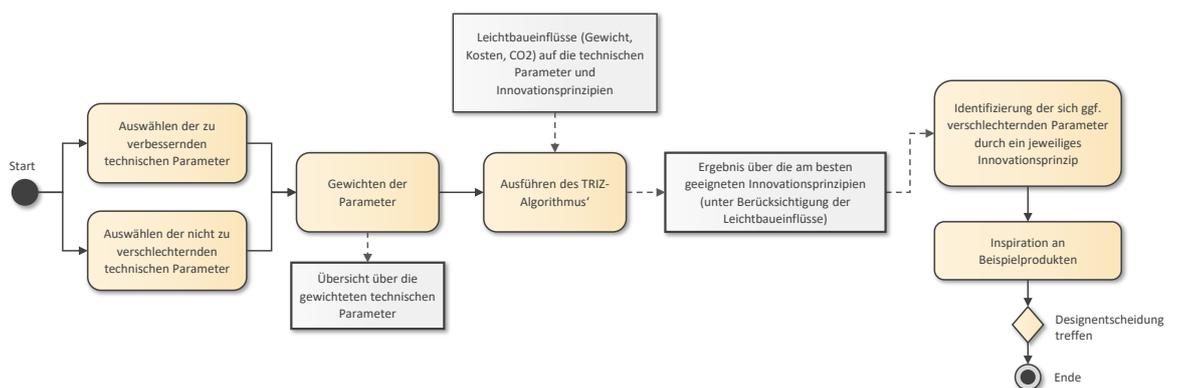


Abbildung 39: Leichtbau TRIZ

Ökobilanzierung/CO₂-Fußabdruck

Die Ökobilanz bzw. der CO₂-Fußabdruck sind etablierte Bewertungsmethoden für die Umweltwirkungen von Produkten. Hierzu gehören eine Vielzahl von Tools und Methoden mit unterschiedlichen Umfängen und Funktionalitäten.

Die Ökobilanzierung (engl. Life Cycle Assessment, LCA) gliedert sich in vier Hauptphasen: Ziel- und Umfangsdefinition, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Interpretation. Zuerst werden Ziele und Systemgrenzen festgelegt, dann werden alle Materialien, Energiequellen und Emissionen entlang des Lebenszyklus erfasst. Anschließend werden die Umweltauswirkungen bewertet, einschließlich Energieverbrauch, Ressourcenverbrauch und Umweltverschmutzung. Abschließend werden die Ergebnisse analysiert, um Handlungsoptionen zu identifizieren und Entscheidungen zu unterstützen, die die negativen Umweltwirkungen reduzieren.

Voraussetzung / Inputs

- Sachbilanzdaten eines Produktes entlang des gesamten Lebenszyklus (z.B. Kumulierter Rohstoffaufwand, kumulierter Energieaufwand, CO₂-Emissionen, ...)
- Nutzungsszenarien für den Produktgebrauch
- Wissen über das Produkthandling am Lebenszyklusende
- Definierte Systemgrenze (z.B. aus Leichtbau-Zielsystem hervorgehend)

Ziele und Mehrwert

- Analyse der Umweltwirkungen eines Produktes von Rohstoffgewinnung, Produktion, Nutzung, Transport und Entsorgung
- Identifizierung von Schwachstellen und Optimierungspotentialen aus Umweltsicht im gesamten Lebenszyklus

Werkzeug/Tools

- Dedizierte Tools zur Ökobilanzierung: z.B. SimaPro, OpenLCA, GaBi
- Carbon Footprint Tools, z.B. Siemens Product Costing
- Integrierte Lösungen im CAD (z.B. NX Sustainability, Solidworks Sustainability) oder der Werkstoffauswahl (z.B. Granta)
- Firmenspezifisch implementierte Lösungen im PDM/PLM-System

Weitere Informationen

- DIN EN ISO 14040 (02/2021): Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen [33]
- DIN EN ISO 14067 (08/2018): Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung [34]

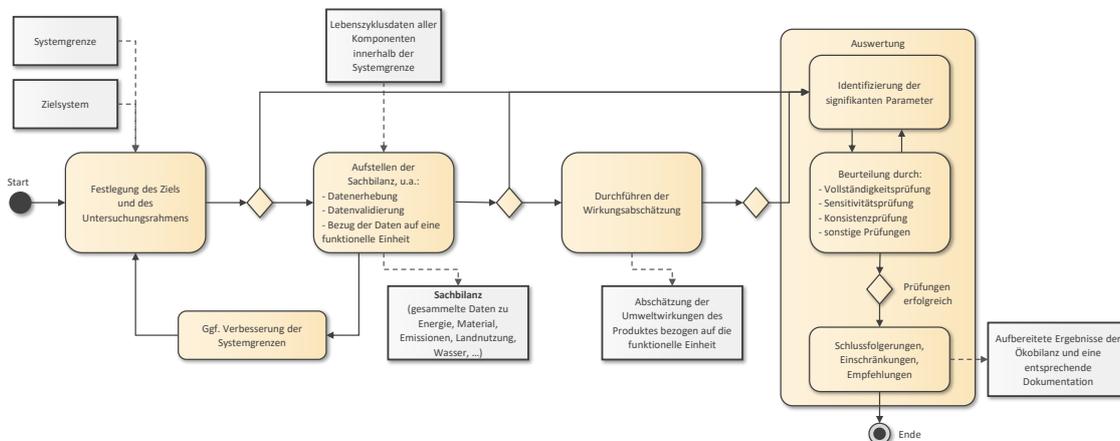


Abbildung 40: Ökobilanzierung / CO₂-Fußabdruck [33]

1D Simulation

Zur Analyse von Lösungsvarianten, die im logischen Design erarbeitet wurden, kann die 1D-Simulation eingesetzt werden. Basierend auf den notwendigen Funktionen und den gewählten logischen Elementen kann das Verhalten eines Konzepts modelliert werden. Da die entsprechenden Elemente hauptsächlich durch verschiedene Parameter beschrieben werden, sind keine detaillierten Geometrie- oder Verhaltensmodelle notwendig. Dies ermöglicht eine schnelle und effiziente Simulation von Komponenten und Systemen. Der Einsatz der Methode kann sowohl auf das mechanische Verhalten von Systemen angewendet werden als auch auf fluidisches und elektrisches Verhalten.

Voraussetzung / Inputs

- Logische Elemente des Systems und deren Anordnung
- Informationen zum mechanischen, elektrischen oder fluidischen Verhalten der logischen Elemente
- Abhängig vom Simulationsziel die beeinflussenden Beschreibungsparameter

Ziele und Mehrwert

- Schnelle Bewertung von Lösungskonzepten und Identifikation von Optimierungspotenzialen
- Steigerung des Systemverständnisses und Identifikation von Wirkbeziehungen innerhalb eines Systems

Werkzeug/Tools

- Siemens AMESIM
- Wissensspeicher

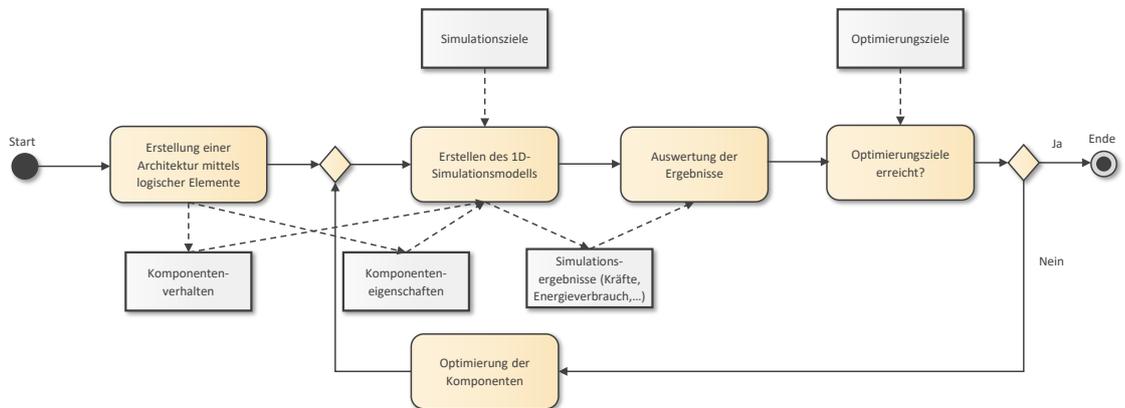


Abbildung 41: 1D-Simulation

Sekundäre Eigenschaftsänderungspotentiale

Die Anforderungserfüllung des Produktes soll überprüft und sekundäre Leichtbauänderungspotenziale ermittelt werden. Auf Systemebene werden einzelne Auswirkungen gewisser Leichtbaumaßnahmen visualisiert und überwacht.

Zunächst wird hier eine Systemhierarchie sowie eine Dimensionierungszahl erstellt. Zudem werden hier die jeweiligen Komponenteneigenschaften bestimmt und eingetragen. Anschließend werden die verschiedenen Systemeinflussfaktoren und deren komponentenspezifische Übertragungsrichtungen ermittelt. Es lassen sich hieraus primäre Maßnahmen via Absolut- und Relativwertvergabe eintragen. Im letzten Schritt erfolgt die Programmausführung und das Auslesen der Analysedaten in Abhängigkeit zum Stand der jeweiligen Iterationsschleife. Betrachtet werden bei der Analyse sekundärer Eigenschaftsänderungspotentiale neben Gewichtsreduktionsmöglichkeiten auch die Auswirkungen auf Nachhaltigkeit und Kosten mittels Lebenszyklusbeurteilung. [35, 36]

Voraussetzung / Inputs

- Anforderungen sind aus Zielgrößen abgeleitet

Ziele und Mehrwert

- Schnelle Bewertung von Lösungskonzepten und Identifikation von Optimierungspotenzialen
- Systemhierarchie (Untergliederung in Subsysteme und Komponenten)
- Gewichts-, Kosten- und Energieangaben pro Komponenten

Werkzeug/Tools

- Software-Tool entwickelt an der Universität des Saarlandes

Weitere Informationen

- Kaspar et al. [37]
- Kaspar et al. [35]

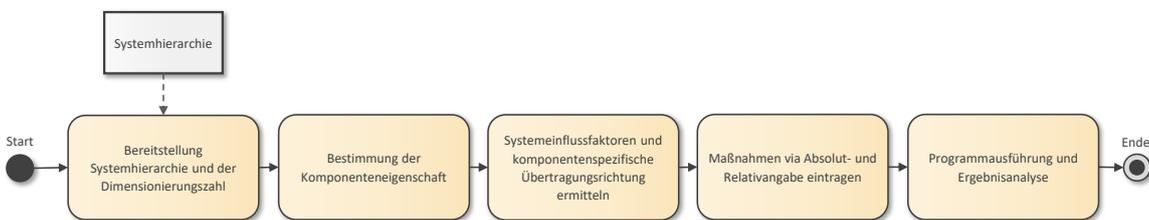


Abbildung 42: Sekundäre Eigenschaftsänderungspotentiale

Topologieoptimierung

Die Anforderungen an die Komponente ermöglichen eine Bauraumabschätzung sowie die Definition der Werkstoffanforderungen. Auf Basis der Funktionen und benachbarten Elemente können Bereiche und Features bestimmt werden, die im Designraum nicht verändert werden dürfen. Ausgehend von einem Bauraummodell kann über die Topologieoptimierung ein Bauteil generiert werden, dessen Gestalt und Lastpfade an den Spannungsverlauf angepasst sind.

Für die Topologieoptimierung wird zunächst ein Bauraum erstellt, in dem die zur Funktionserfüllung relevanten Features bereits modelliert sind. Diese können als Non-Design-Bereiche fixiert werden. Zusätzlich werden Randbedingungen, wie feste Einspannungen, gesetzt. Ebenso wird die Lastart und -einleitung festgelegt. Anschließend wird ein Finite-Elemente-Modell (FEM) erstellt und diesem ein Set an Werkstoffparametern zugewiesen. Lastpfade und Designkonzepte lassen sich mit beliebigen Parametern erforschen. Ein konkreter Werkstoff muss spätestens dann vorgegeben werden, wenn Festigkeitsnachweise in die Optimierung einfließen sollen. Durch Auswahl eines Ziels für Masse, Volumen oder Steifigkeit wird festgelegt, wie lange der Optimierungsalgorithmus iteriert. Wurde das Optimierungsziel erreicht, wird das erzeugte Design meist manuell in ein CAD-Modell zurücküberführt und dort angepasst werden.

Voraussetzung / Inputs

- Zur Verfügung stehender Bauraum
- Kräfte bzw. Momente und deren Einleitungspunkte
- Massen-, Volumen- oder Steifigkeitsziele
- Konstruktionsbeschränkungen durch Werkstoffe (Festigkeit, Wandstärken etc.)

Ziele und Mehrwert

- Verringerter Materialaufwand, Optimierung der Materialverteilung
- Erforschen innovativer Designkonzepte

Werkzeug/Tools

- Erweiterungen von CAD-Software (SolidWorks Simulation Premium, NX Topology Optimizer, Fusion 360 Shape Optimization study u. a.) oder FEM-Tools (Altair OptiStruct, Abaqus Topology Optimization Module u. a.)

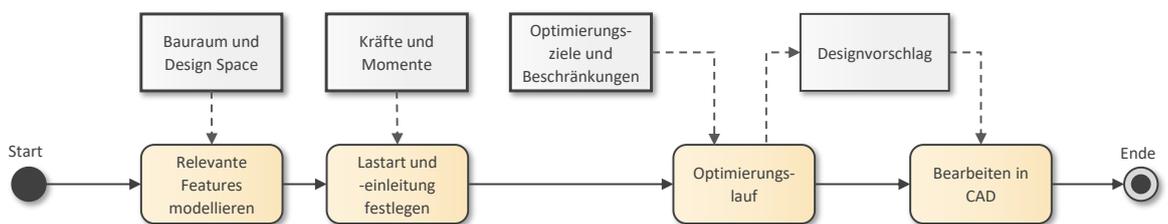


Abbildung 43: Topologieoptimierung

Mehrkörpersimulation

Die Mehrkörpersimulation ist ein Verfahren, bei dem das dynamische Verhalten von Mehrkörpersystemen analysiert wird. Mehrkörpersysteme beschreiben die Bewegung technischer Systeme (Kinematik) und die dafür notwendigen bzw. dabei auftretenden Kräfte (Kinetik). Zunächst erfolgt die Modellierung des Systems, wobei jedes Körpersegment durch geometrische und physikalische Parameter definiert wird. Anschließend werden die Bewegungsgleichungen formuliert, die die Bewegungen und Kräfte innerhalb des Systems beschreiben. Diese Gleichungen werden numerisch gelöst, um die Bewegungen und Reaktionen des Systems im Zeitverlauf zu simulieren. Die Simulationsergebnisse werden dann analysiert, um Leistungsindikatoren wie Belastungen, Geschwindigkeiten und Positionen zu bewerten. Basierend auf diesen Ergebnissen können Ingenieure das System optimieren, indem sie Designänderungen vornehmen und die Leistung verbessern. Die Simulation kann iterativ durchgeführt werden, um verschiedene Szenarien zu untersuchen und das endgültige Design zu validieren.

Voraussetzung / Inputs

- Geometriemodell eines Systems mit Masseigenschaften
- Bewegungsablauf eines Systems im Sinne eines Nutzungsszenarios

Ziele und Mehrwert

- Vorhersage von Bewegungen und Reaktionen in komplexen mechanischen Systemen
- Optimierung von Design und Leistung vor der Herstellung physischer Prototypen
- Identifikation von Leichtbaupotenzialen durch Variation von Massen

Werkzeug/Tools

- Dedizierte Softwarelösungen für die Mehrkörpersimulation: z.B. MSC Adams, Simpack, ANSYS Motion und Siemenslösungen wie Mechatronics Concept Designer und Motionanwendung in NX

Weitere Informationen

- Bücher von Georg Rill, z.B. [38]

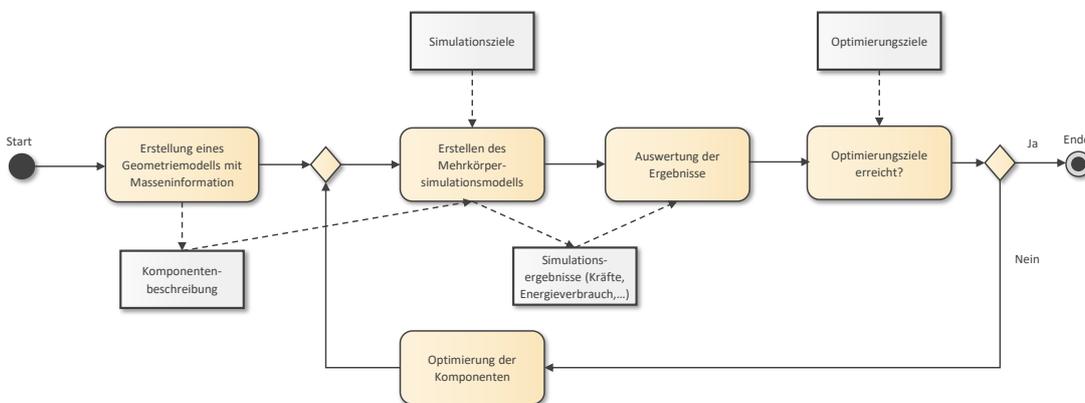


Abbildung 44: Mehrkörpersimulation

Strömungssimulation

Die Strömungssimulation (engl. Computational Fluid Dynamics, CFD) ist ein Verfahren zur numerischen Berechnung von Strömungsvorgängen.

Die Strömungssimulation beginnt mit dem Preprocessing, bei dem das CAD-Modell vorbereitet wird, oft unter Verwendung von Vereinfachungen zur Reduzierung der Rechenzeit. Hier werden der Kontrollraum und die Randbedingungen definiert und die Diskretisierung durchgeführt. Beim Processing löst ein entsprechender Solver wie StarCCM+ das Gleichungssystem. Im Anschluss erfolgt das Post-processing, bei dem die Simulationsergebnisse durch Visualisierungstechniken wie 2D/3D-Graphen, Graphiken und 3D-Animationen dargestellt werden. Die Ergebnisse werden interpretiert, um fundierte Erkenntnisse über das Strömungsverhalten zu gewinnen.

Voraussetzung / Inputs

- Mehrdimensionales Geometriemodell des zu untersuchenden Körpers

Ziele und Mehrwert

- Optimierung der aerodynamischen Energieeffizienz von Leichtbaustrukturen
- Vorhersage von Strukturverhalten und Optimierung der Strukturgeometrie als Folge von mehr Wissen über Strömungsbelastungen
- Verbesserte Kühlung und Wärmeableitung durch Simulation und Optimierung.

Werkzeug/Tools

- Dedizierte Softwarelösungen für die Strömungssimulation: z.B. ANSYS Fluent, COMSOL Multiphysics
- Siemenssoftware: FlowEFD

Weitere Informationen

- Grundlagen Strömungsmechanik in [39]

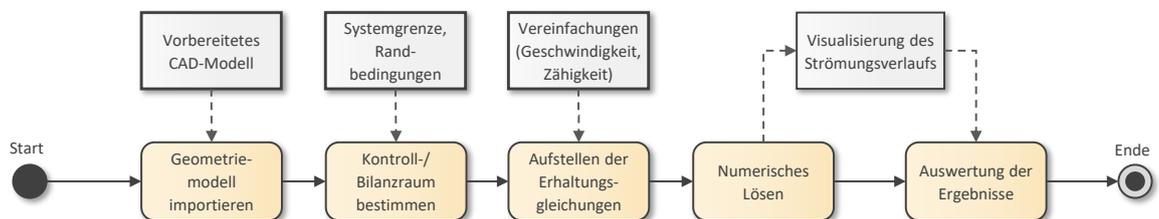


Abbildung 45: Strömungssimulation

Technologiekettenplanung und -auswahl

Die Technologiekettenplanung und Auswahl soll als Ideengeber neuer Fertigungstechnologien dienen, um das Produkt hinsichtlich Leichtbau zu optimieren. So sollen neue Fertigungstechnologien besser genutzt werden und vorhandene Potenziale aufgezeigt werden. Nachdem die notwendigen Funktionen einer Komponente in geometrische Feature umgesetzt wurden, wird auch eine konkrete Analyse der Fertigungsprozesse möglich. Die Technologiekettenplanung- und -auswahl kann auf unterschiedlichen Detaillierungsgraden eingesetzt werden. Die Genauigkeit des Ergebnisses hängt auch vom Detaillevel der Bauteilbeschreibung ab. Durch die Integration der Werkstoffauswahl in die Technologiekettenplanung kann die Wechselwirkung zwischen Material und Fertigungsverfahren aufgezeigt werden. Stehen mehrere Fertigungsoptionen zur Verfügung werden die Ketten hinsichtlich der resultierenden Kosten und CO₂-Emissionen bewertet. Zudem kann das zur Verfügung stehende Leichtbaupotenzial bewertet werden. Die Anwendung der Methode sollte iterativ erfolgen, da so auch neue Konzepte schnell evaluiert werden können.

Voraussetzung / Inputs

- Datenbank mit zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren
 - Fähigkeiten
 - Energieverbräuche
 - Fertigungszeitmodell
- Datenbank mit zur Verfügung stehenden Werkstoffen
 - Festigkeitskennwerte
 - Kosten
 - Fertigbarkeit
 - Kosten- und CO₂-Kennwerte
- Erstes 3D-Modell der Komponente

Ziele und Mehrwert

- Auswahl von Fertigungsoptionen auf Basis von Kosten und CO₂ sowie dem Leichtbaupotenzial
- Analyse von Designvarianten hinsichtlich ihrer Fertigbarkeit und deren Auswirkungen auf die Kosten und CO₂-Emissionen

Werkzeug/Tools

- Internes Tool
- Wissensspeicher

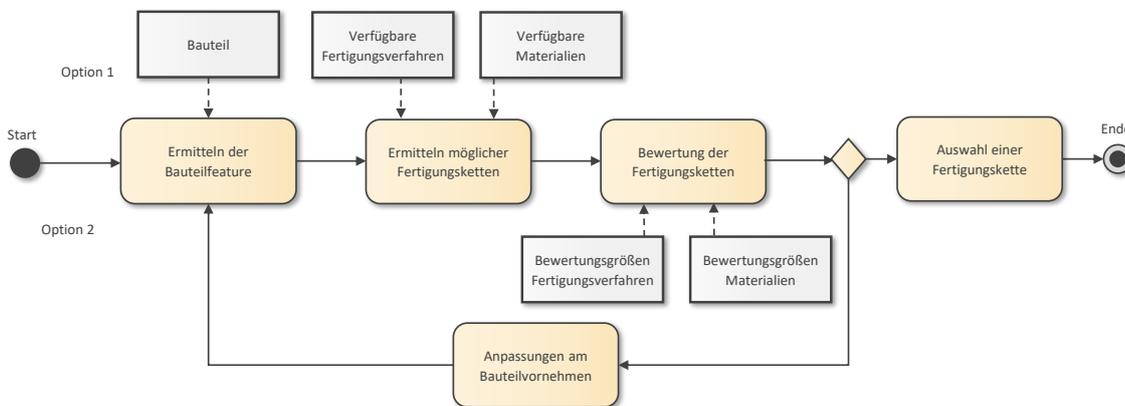


Abbildung 46: Technologiekettenplanung

Multikriterielle Entscheidungsfindung (MCDM)

Die grundlegenden Produkteigenschaften werden durch Entscheidungen in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses festgelegt. Aus konstruktiven, technologischen, ökonomischen und ökologischen Eigenschaften ergeben sich Zielkonflikte, aus denen ein Kompromiss gefunden werden muss. Um den verschiedenen Zielkriterien gerecht zu werden, stehen Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsfindung (engl. multi-criteria decision-making, MCDM) zur Verfügung. Diese nutzen eine Vielzahl unterschiedlicher Kriterien an Stelle eines einzelnen übergeordneten Kriteriums und eignen sich auch aufgrund ihrer Vielzahl unterschiedlicher Verfahren ideal, um Alternativen gleichzeitig anhand vielfältiger Gesichtspunkte zu evaluieren. Konkret in Bezug auf Leichtbau kann MCDM frühe Auswahl von Werkstoffen und Fügetechnologien bei gleichzeitiger Betrachtung mehrerer Komponenten unterstützen. [40] Zudem kann MCDM bei der Auswahl der geeigneten Fertigungsverfahren sowie der geeigneten Zulieferer eingesetzt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Technologiekettenplanung.

Voraussetzung / Inputs

- Anforderungen
- System of Interest: Betrachtete Komponenten
- konstruktive, werkstoffspezifische oder fertigungstechnische Lösungsalternativen

Ziele und Mehrwert

- Frühzeitige Bewertung von Lösungsalternativen, insbesondere hinsichtlich der Auswahl von Werkstoffen und Fertigungsverfahren

Werkzeug/Tools

- Tabellenkalkulation
- Intern beispielhaft implementiert in Microsoft Excel

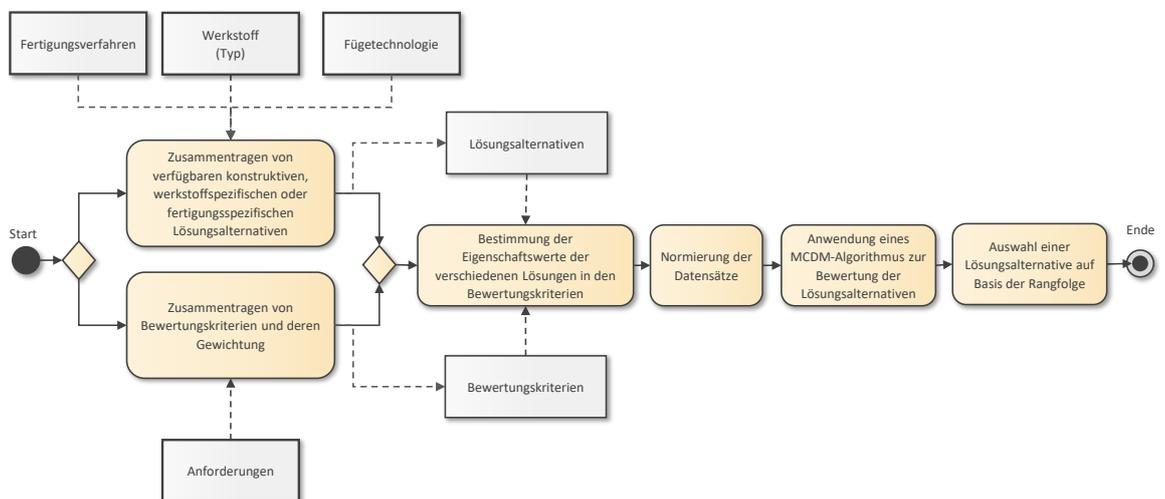


Abbildung 47: MCDM

Digitale Toolkette

Dieser Abschnitt befasst sich mit der digitalen Toolkette und deren verwendeten Softwarelösungen inkl. der IT-Plattform im *SyProLei* Projekt.

Allgemeine Informationen zur Notwendigkeit einer modernen Softwarelösungsplattform im Bereich Leichtbauentwicklung

Die komplexen Anforderungen in der Leichtbauentwicklung von Produkten erfordern eine systematische Vorgehensweise, um alle multidisziplinären Teams in einem Unternehmen miteinander zu vernetzen, und um eine gemeinsame zielgerichtete und nachhaltige Produktentwicklung zu realisieren. Hier liegt der Fokus auf transparenten und durchgängigen Information- und Datenfluss, damit in jeder Entwicklungslage präzise und aussagekräftige Aussagen getroffen werden können. Ziel ist am Ende ein nachhaltiges Produkt zum fairen Verkaufspreis auf dem Markt anzubieten.

Um dies sicherzustellen, wird auf eine digitale Produktentwicklungskette von dem Unternehmen Siemens Industry Software GmbH gesetzt. Damit lassen sich interne Kosten im Unternehmen signifikant reduzieren, da die Kommunikation und Aufgabensteuerung über digitale Geschäftsprozesse realisiert werden.

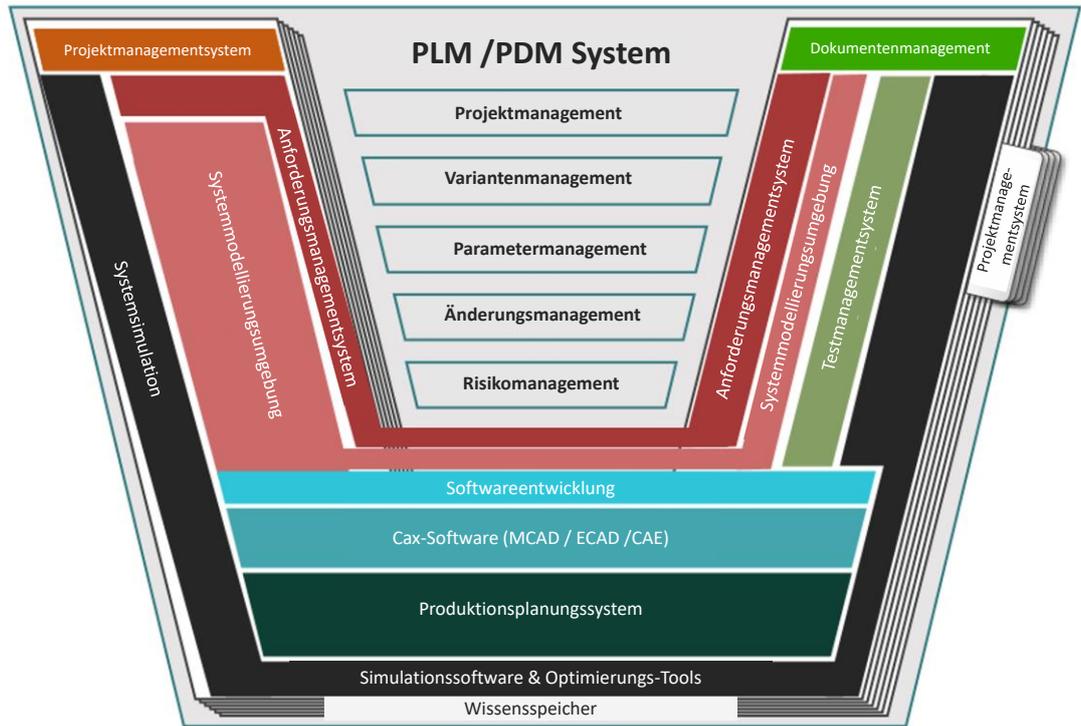
Veränderung der Geschäftsabläufe für Leichtbauentwicklung notwendig

Viele Unternehmen haben ihre Geschäftsprozesse und Arbeitsabläufe auf sequenzielle Arbeitsweise aus historischen Gründen ausgelegt. Zusätzlich zu der Arbeitsweise entstehen in der Projektrealisierung in den multidisziplinären Teams Projekt- bzw. Produktdaten und Informationen, die in der Regel nicht zentral verwaltet werden und ein zusätzlicher Medienbruch zwischen den IT-Softwarelösungen entsteht. Die Problematik ist, dass bei komplexeren Vorgehensweisen, wie bei der Leichtbauentwicklung, die herkömmliche und bewährte Arbeitsweise unwirtschaftlich und nicht zielführend ist.

Folgende Nachteile sind häufig vorzufinden:

- Erhöhter Kommunikationsaufwand
- Lange Projekt Durchlaufzeiten mit minimaler Flexibilität
- Notwendige Änderungsprozesse nicht direkt erkennbar
- Lange Suchlaufzeiten

Durch die erweiterten Anforderungen an das Produkt, um einen reduzierten CO₂-Fußabdruck und Gewichtersparnis in den Vordergrund zu stellen, müssen Unternehmen umdenken. Die Basis muss eine durchgängige PLM-Plattform sein, wo notwendige Autorensysteme angebunden und die Daten vernetzt werden. (*Abbildung 48*)



Vernetzung aller Informationen

Unternehmenswissen wird zentral archiviert und logisch vernetzt. Mit den Erkenntnissen lassen sich zuverlässige Aussagen mit deren Tragweite und Auswirkung tätigen.

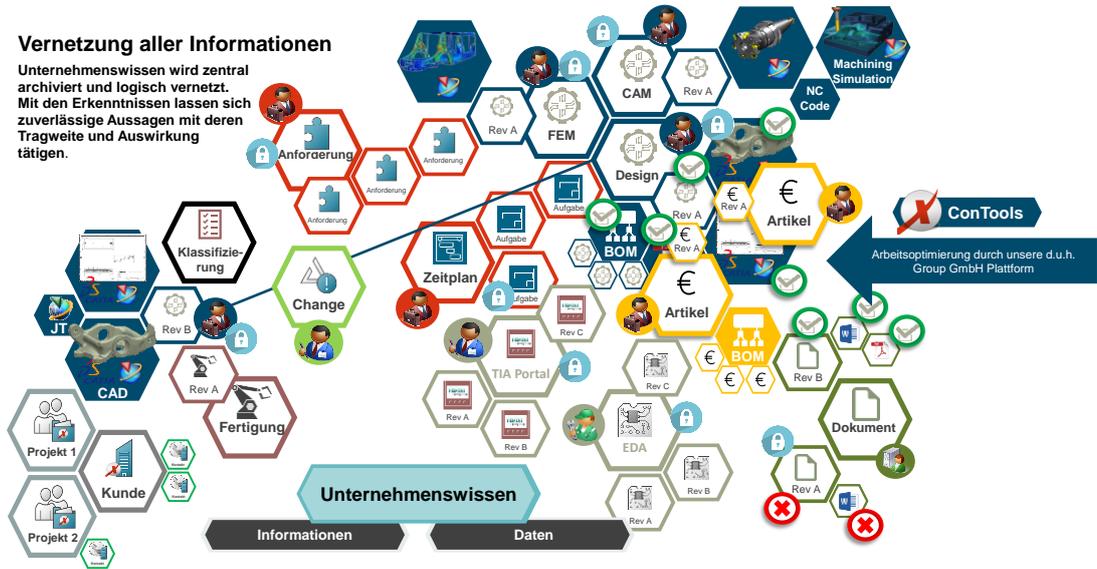


Abbildung 48: Durchgängige PLM-Plattform

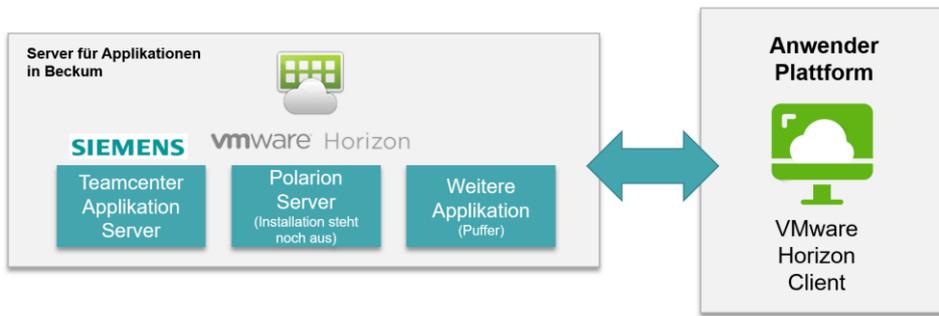


Abbildung 49: VMware Horizon Lösung

Aufbau der IT-Plattform für das SyProLei Projekt

Für das SyProLei Projekt wurde für alle Beteiligten bewusst auf eine Cloud-Lösung gesetzt. So sind alle notwendigen Applikationen auf dem VMware Horizon Server (Abbildung 49) in der Geschäftsstelle der d.u.h.Group GmbH in Beckum installiert. Der Zugriff der Anwender erfolgt über einen VMware Horizon Client, wo allen die gesamte PLM-Plattform zur Verfügung steht.

Ein Mehrwert der zur Verfügung gestellten IT-Lösungsplattform ist, dass eine minimale Installation auf der Anwenderseite notwendig war und die gesamte Rechnerleistung über den Server abgedeckt war

Festlegung der Softwarelösungen und deren Aufgabe

Durch die Schaffung von Prozessabläufen bezogen auf Leichtbauentwicklung entstand eine Matrix für die benötigten Softwarelösungen (Abbildung 50). Ein Großteil der notwendigen Softwarelösungen konnten durch Siemens Software abgedeckt werden und stellen eine wichtige Säule im Projekt dar. Die notwendigen Lizenzen wurden kostenfrei zur Verfügung gestellt.

Folgende Siemens Softwarelösungen stehen zur Verfügung:

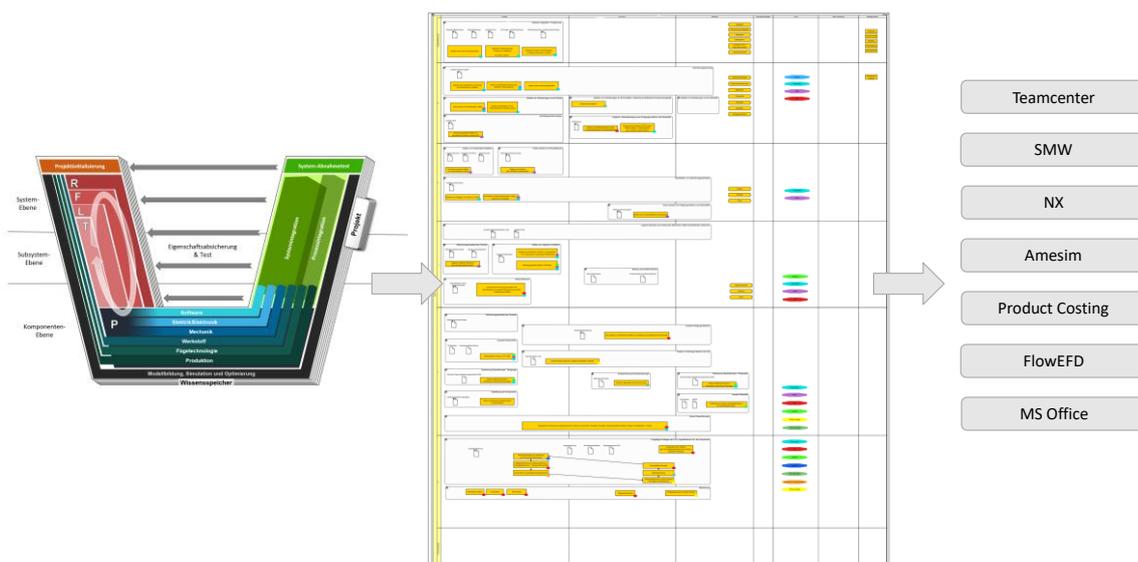


Abbildung 50: Die eingesetzten Softwarelösungen aus dem Hause Siemens Industry Software GmbH

Teamcenter® von Siemens Industry Software

Die Product Lifecycle Management (PLM) Software *Teamcenter* von Siemens Digital Industries Software unterstützt branchenübergreifend Unternehmen dabei, komplexe Produktentwicklungsprozesse zu steuern, die Produktqualität und Zusammenarbeit zu verbessern, und die Markteinführungszeit zu verkürzen. Die Verwaltung und Vernetzung von allen Produktdaten über den gesamten Lebenszyklus stehen im Fokus. Angefangen von der Produktidee bis zu den anfallenden Aufgaben in der Entwicklung und Fertigung bis hin zu Wartung und Entsorgung. Hierbei wird der Geschäftsprozess des jeweiligen Unternehmens im Fokus gestellt und über die Teamcenter Plattform digital abgebildet.

Auch im *SyProLei* Projekt wird das Teamcenter als zentrale Informationsplattform für alle relevanten Projekt- und Produktdaten verwendet. Neben der Verwaltung der Daten und deren Vernetzung, werden auch Geschäftsprozesse in Form von Workflows zur Verfügung gestellt. Damit lässt sich die Qualität und Wiederholbarkeit in der Leichtbauentwicklung sicherstellen und standardisieren. Über

die Teamcenter Datenverwaltung wird zusätzlich ein Änderungsprozess sichergestellt, in dem alle notwendigen Änderungen an Daten mit dem dazu gehörigen Autorensystem umgesetzt werden.

Leichtbaumehrwert

- Zentrale reversionssichere Verwaltung von *SyProLei* Projektdaten:
 - CAD Modelle von Qeridoo, Ottobock und Liebherr
 - Dokumente
- Zentrale Plattform für die Zusammenarbeit im Projekt
- Erstellung und deren reversionssichere Verwaltung von Anforderungen

Relevante Entwicklungsphasen

- In allen relevanten Entwicklungsphasen erfolgte der Zugriff auf die PLM Teamcenter Plattform, um die Komplexität in der CO₂ Reduzierung transparent abzubilden

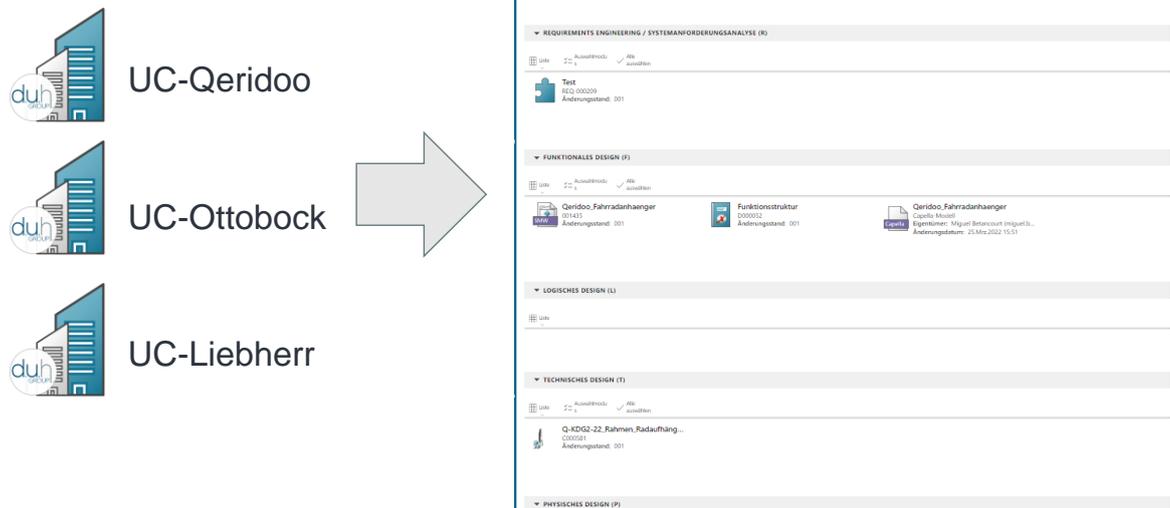


Abbildung 51: Digitale Ablage im Teamcenter auf Basis des V-Modells

Systems Modeling Workbench (MBSE-Tool)

Systemmodelle gewinnen in der Produktentwicklung zunehmend an Bedeutung. Sie leisten einen wertvollen Beitrag insbesondere zur Beherrschung der steigenden Komplexität von Systemen.

Auch für die Umsetzung der im Werkzeugkasten beschriebenen Methoden spielen das Systemmodell und das entsprechende Modellierungswerkzeug eine zentrale Rolle. Neben Werkzeugen, die auf die standardisierte Systemmodellierungssprache SysML setzen, gibt es Werkzeuge, die Ihre eigene Sprache bzw. Methode verwenden. Dazu zählt auch die im Forschungsprojekt SyProLei verwendete Systems Modeling Workbench (SMW) von Siemens. Diese nutzt die von der Thales Group entwickelte Arcadia-Methode samt der zugehörigen Notation.

Die SMW wurde primär eingesetzt, um Funktionen sowie logische Architekturen modellbasiert abzubilden. Damit liefert das Systemmodell einen wichtigen Beitrag zur Verknüpfung verschiedener Informationsartefakte über die Entwicklungsphasen hinweg. Die dabei entstehende „Traceability“ beziehungsweise Rückverfolgbarkeit zwischen Anforderungen, Systemmodell und technischer/physischer Ebene, hilft dabei Abhängigkeiten innerhalb des Systems zu verstehen und zu visualisieren.

Leichtbaumehrwert

- Zielgerichtete Umsetzung der Anforderungen und Vermeidung von Gewichtstreibern ohne funktionalen Mehrwert
- Ermittlung von Leichtbaupotentialen aus funktionaler Perspektive
- Nachvollziehbarkeit von Abhängigkeiten/ Wechselwirkungen innerhalb des Systems zur Bewertung von Leichtbaupotentialen
- Unterstützung von Designentscheidungen auf Basis einer ganzheitlichen Systembetrachtung

Methoden

- Funktionserhebung und Erstellung der Funktionshierarchie
- Minimales Funktionales System
- Funktionsmassenanalyse
- Gezielte Funktionsintegration
- Wirkprinzipien Struktur

Relevante Entwicklungsphasen

- Funktionales Design
- Logisches Design

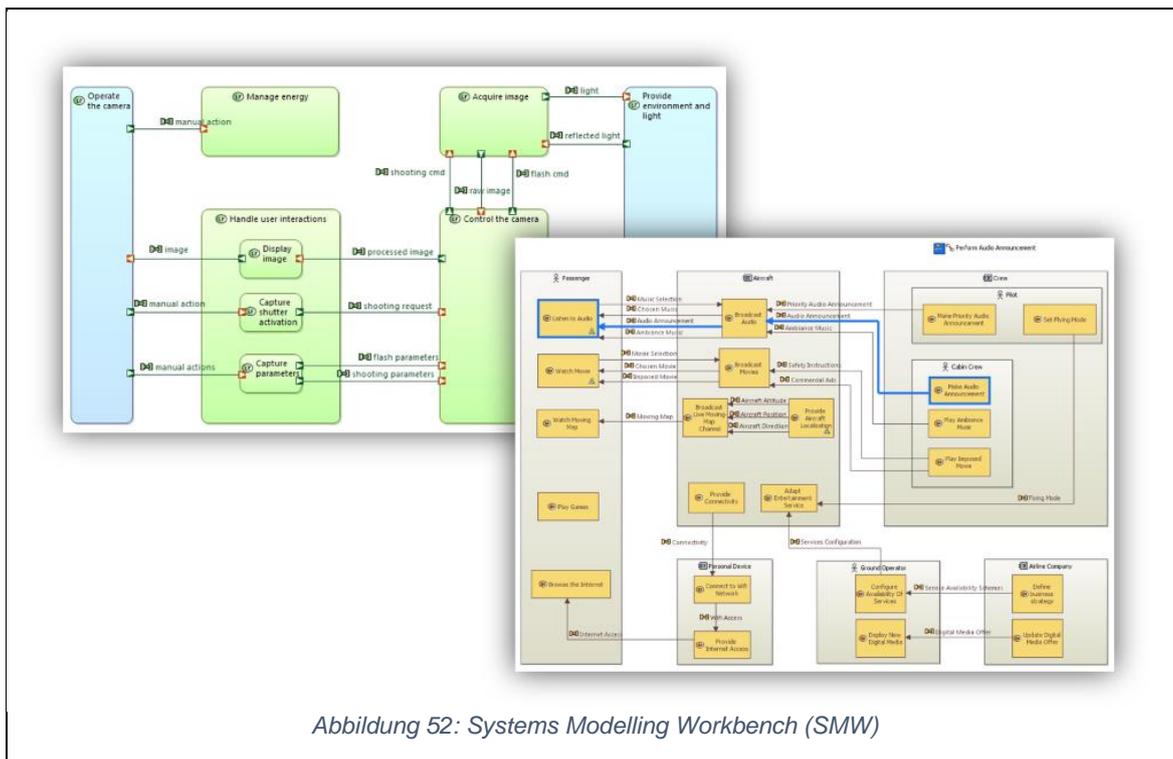


Abbildung 52: Systems Modeling Workbench (SMW)

Siemens NX® von Siemens Industry Software (CAD-Tool)

Mit der durchgängigen CAx-Softwarelösung von Siemens lassen sich Konstruktionstätigkeiten, sowie simulative Optimierungen und Absicherungen zentral in einer Software realisieren. Zusätzlich können auch Fertigungsabläufe direkt analysiert werden. Neben der Erstellung von 3D-CAD-Modellen ermöglicht NX die Anwendung von Finite-Elemente Methoden (FEM) und Topologieoptimierung in einem Tool, wodurch keine Datenbrüche zwischen den Softwaretools entstehen. Zudem kann durch Computer Aided Manufacturing (CAM)-Integration die Fertigungsstrategie am Ende der Konstruktion abgeleitet werden. Dies ermöglicht eine Bestimmung der Fertigungszeit im physischen Design.

Im Rahmen des Projekts wurde Siemens NX vor allem zur 3D-Konstruktion in Kombination mit FEM und Topologieoptimierung eingesetzt. Zudem konnte auch durch Nutzung der NXOpen-Schnittstelle eine Verknüpfung zur Technologiekettenplanung geschaffen werden, wodurch vor allem zu Beginn der Konstruktion schnell Fertigungsalternativen generiert und bewertet werden können.

Mit dem integrierten Modul **Topologie Optimierung** lassen sich ultraleichte organisch geformte Produkte konstruieren und anschließend mit einem Modul Namens **AM** für einen 3D Drucker vorbereiten (Abbildung 53).

Abbildung 54 zeigt ein weiteres Beispiel einer Siemens internen Fallstudie.

Leichtbaumehrwert

- Erstellung von spannungsgerechten Konstruktionen mit reduziertem Materialaufwand durch Topologieoptimierung
- Absicherung der CAD-Modelle durch FEM-Simulationen
- Ergänzende Auswertungen durch NXOpen

Methoden

- Topologieoptimierung
- Technologiekettenplanung

Relevante Entwicklungsphasen

- *Technisches Design*
- *Physisches Design*

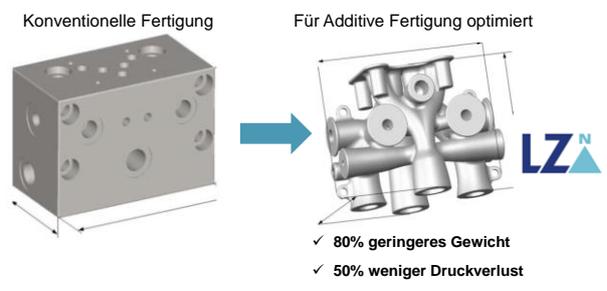
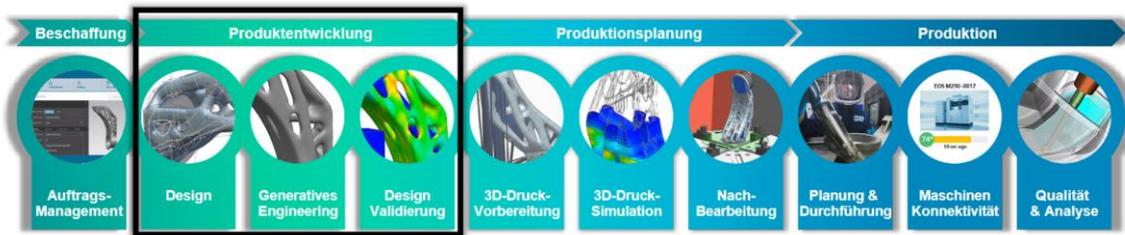


Abbildung 53: Topologie Optimierung (Quelle: Siemens Industry Software GmbH)

Optimized AM-Robot Grippers – Options for different Printing Technologies & Needs
The Results & Business Cases

Original Design	Standard FDM	Topology optimized FDM	Topology optimized Aluminum	FDM „extreme“ for PRUSA MK3S+
Weight: 4,3 kg	Weight: 3,6	Weight: 2,6 kg	Weight: 0,742 kg	Weight: 0,166 kg
Costs: Reference Price	Costs: -80 %	Costs: -85 %	Costs: -25 %	Costs: -99 %
Lead Time: 21 Days	Lead Time: 3-4 Days	Lead Time: 3-4 Days	Lead Time: 10 Days	Lead Time: 3-4 Days
Nr. of Parts: 20 +	Nr. of Parts: 8	Nr. of Parts: 8	Nr. of Parts: 1	Nr. of Parts: 1
Safety Factor: 26	Safety Factor: 19	Safety Factor: 21	Safety Factor: 25	Safety Factor: 12
Energy Demand:	Energy Demand:	Energy Demand:	Energy Demand:	Energy Demand:

Abbildung 54: Siemens-interne Fallstudie (Quelle: Siemens Industry Software GmbH)

NX® Modul - FlowEFD

Das integrierte Modul **FlowEFD** ermöglicht dem Konstrukteur ein „Frontloading“, um z.B. eine frühzeitige Strömungssimulation (CFD) und Wärmeübertragungsanalyse im Designprozess durchführen zu können. Durch die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich Konstruktionsänderungen am Modell direkt in der NX CAD-Umgebung vornehmen, ohne die eingesetzte CAD-Software zu verlassen. (Abbildung 55). Ferner lassen sich auch unterschiedliche Simulationsstudien unter der Berücksichtigung der Leichtbau-Kriterien zu berechnen, um am Ende die optimale Lösung für das Produkt auszuwählen.

Dies ist insbesondere dann von Interesse, wenn die Kopplung zwischen Strömungskanälen, Temperatureinfluss und strukturellem Leichtbau berechnet werden soll.

In erster Linie wurde die FlowEFD Lösung im *SyProLei* Projekt von dem Unternehmen Ottobock eingesetzt. Hier wurden Designstudien auf Strömungsverhalten analysiert. Die Erkenntnisse sind zurück in die Produktoptimierung eingeflossen.

Leichtbaumehrwert

- Ermittlung von Leichtbaupotentialen aus funktionaler Perspektive
- Überprüfung von Designstudien auf Ihre Strömungssimulation (CFD) und Wärmeübertragung
- Ermittlung von weiteren Optimierungsmöglichkeiten bezogen auf Gewichtersparnis

Methoden

- Konstruktionsoptimierung inkl. Frontloading

Relevante Entwicklungsphasen

- *Funktionales Design*

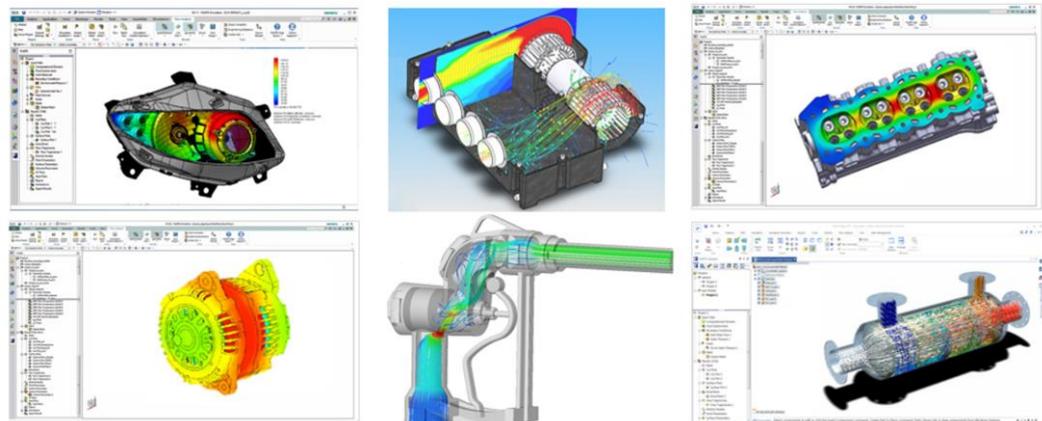


Abbildung 55: FlowEFD (Quelle: Siemens Industry Software GmbH)

Simcenter Amesim® von Siemens Industry Software (Systemsimulation-Tool)

Die Software Simcenter Amesim ist eine skalierbare Simulationsplattform für Bewertungen von mechatronischen Systemen. Die Modellierung erfolgt über 1D-Modelle. Dies ermöglicht eine effiziente Bewertung von Konzepten in der frühen Entwicklungsphase. Zudem können Einflüsse zwischen Systemen aufeinander evaluiert werden.

Mögliche Bewertungskenngrößen anhand des Simulationstools sind das Dämpfungsverhalten von Komponenten, Energieverbräuche sowie resultierende Belastungen auf verschiedene Komponenten. Diese generierte Information kann auch genutzt werden um beispielsweise Finite-Element-Simulationen auf Basis von Nutzungsszenarien durchzuführen.

AMESIM wurde primär eingesetzt um 1D- und Multi-Physikalische Simulationen durchzuführen und den Einfluss von Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich Energieverbrauch zu evaluieren. Zudem wurden resultierende Drehmomente und Be-

lastungen analysiert um Anforderungen an Komponenten zu definieren und deren Lebensdauer zu bewerten.

Methoden

- Funktionale Lebenszyklus Energie Analyse (FLCEA)
- Ökobilanzierung
- Multikriterielle Entscheidungsfindung
- 1D-Simulation
- Mehrkörpersimulation

Leichtbaumehrwert

- Identifikation von Optimierungspotenzialen durch Gewichtsreduktion
- Quantifizierung des Einflusses von Gewichtsoptimierung hinsichtlich Energieverbrauch und Verschleißverhalten
- Identifikation von Sekundären Eigenschaftsänderungspotenzialen

Relevante Entwicklungsphasen

- Funktionales Design
- Technisches Design
- Physisches Design

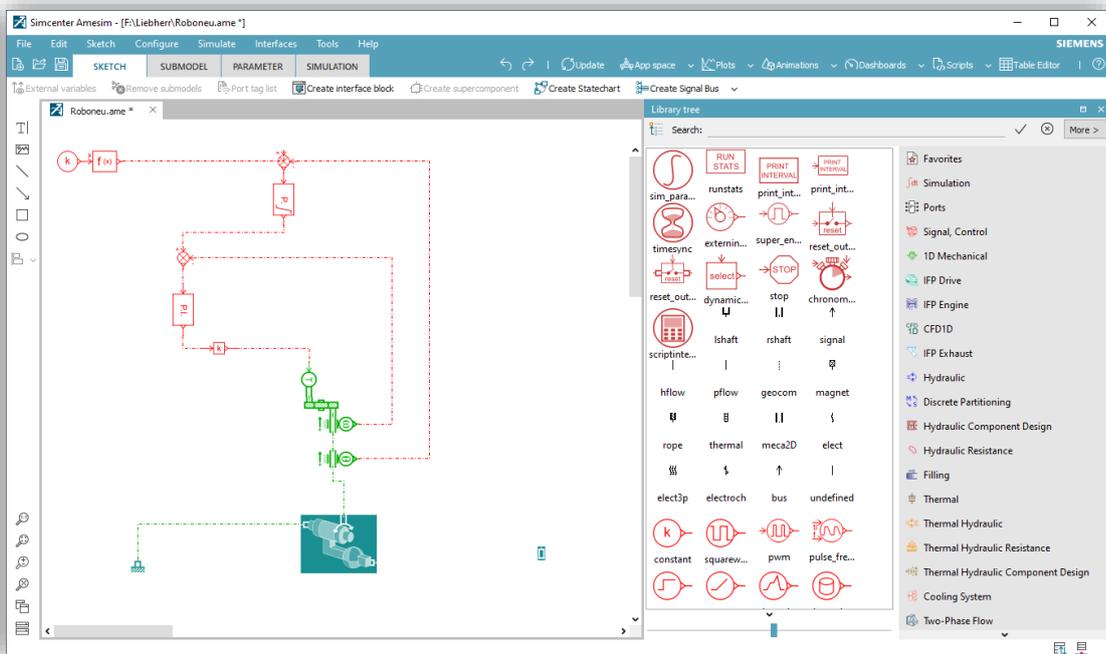


Abbildung 56: Simcenter Amesim (Quelle: Siemens Industry Software GmbH)

Product Costing® von Siemens Industry Software (MBSE-Tool)

Mit der Lösung Product Costing ist es möglich Produkte aus verschiedenen Sichten, wie dem Einkauf oder Fertigungsplanung, auf Basis der Konstruktionsdaten und der Fertigungsstrategie zu kalkulieren. Zusätzlich können CO₂-Bilanzen für die Herstellung von Komponenten erstellt werden. Hierzu wird allerdings eine externe CO₂-Datenbank benötigt oder es muss eine unternehmensinterne Datenbank angelegt werden. Zudem kann die Ermittlung von Bearbeitungszeiten aufwendig sein und viel Expertenwissen erfordern.

Durch die Möglichkeit verschiedene Fertigungsalternativen aus Kosten und CO₂-Sicht zu bewerten wird die Möglichkeit einer transparenten und nachhaltigen Entscheidungsfindung geschaffen. Zudem können Kosten- und CO₂-Treiber identifiziert werden und so gezielt Optimierungen bei folgenden Entwicklungen angegangen werden.

Das Product Costing wurde im Rahmen des Projektes dazu eingesetzt Fertigungsketten hinsichtlich Kosten und Energie zu analysieren. Dies erfolgte sowohl im Rahmen der Auswahl von Fertigungsfolgen als auch zur Analyse von bestehenden Entwicklungen.

Leichtbaumehrwert

- Identifikation von Kosten und CO₂-Treibern
- Transparente Entscheidungsfindung bei verschiedenen Lösungsalternativen

Methoden

- Funktionale Lebenszyklus Energie Analyse (FLCEA)
- Multikriterielle Entscheidungsfindung
- Ökobilanzierung
- Technologiekettenplanung

Relevante Entwicklungsphasen

- Funktionales Design
- Technisches Design
- Physikalisches Design



Abbildung 57: Product Costing (Quelle: Siemens Industry Software GmbH)

Implementierung und Beispiele aus der Praxis

LIEBHERR



Liebherr-Verzahntechnik GmbH
87437 Kempten

- Über 1400 Mitarbeiter
- Branche: Maschinenbau
- Teil der Liebherr-Unternehmensgruppe, stellt CNC-Verzahnmaschinen und Automationssysteme her
- Historie:
 - Seit 1952 fertigt Liebherr Verzahnmaschinen in Kirchdorf an der Iller
 - 1962 Umzug der Produktion an den Standort Kempten
 - Seit 1969 firmiert die Gesellschaft als Liebherr-Verzahntechnik GmbH

Abbildung 58: Liebherr

Liebherr

Allgemeine Einleitung

Die im Jahre 1969 gegründete Liebherr Verzahntechnik GmbH ist mit mehr als 6 Jahrzehnten Erfahrung einer der führenden Hersteller von Verzahnmaschinen, Verzahnwerkzeugen und Automationssystemen und ist als selbstständig operierende Sparte in der Firmengruppe Liebherr integriert. Aktuell beschäftigt die Liebherr-Verzahntechnik

GmbH weltweit über 1400 Mitarbeiter bei einem Umsatz von 205 Mio. € im Jahr 2022. Der Hauptstandort befindet sich in Kempten (Deutschland), von wo aus die Aktivitäten der Sparte koordiniert werden. Im Produktbereich Automationssysteme liegt die Kernkompetenz in der Lieferung von schlüsselfertigen Systemlösungen für flexible Fertigungszellen und Fertigungssysteme. Als Komplettanbieter werden sämtliche vor-, zwischen und nachgelagerten Prozesse nach

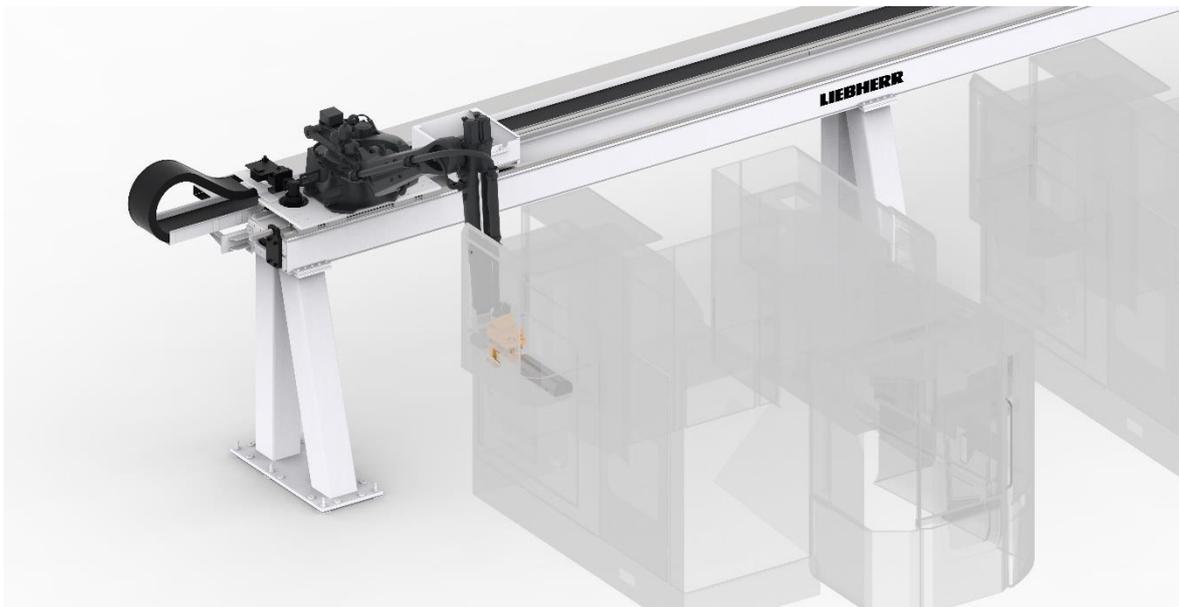


Abbildung 59: Portalroboter

Kundenwunsch in das Gesamtkonzept integriert. Das Produktspektrum umfasst unter anderem Linearportale, Flächenportale, Palettenhandhabungssysteme, Förder- und Speicheranlagen und Roboterapplikationen.

Beschreibung Use-Case Portalroboter

Für komplexe Bearbeitungs-, Montage oder Handlingsprozesse in großen Bauräumen werden oftmals Roboter auf Fahrschienen verwendet. Beispiele hierfür sind z.B. das Reinigen von Bauteiloberflächen, das Auftragen von Dichtmassen oder Klebern, das Verschrauben von Komponenten oder das Handling von Bauteilen bzw. Werkzeugen. Aus Platz- und Zugänglichkeitsgründen, werden die Roboter auch hängend an einem Laufwagen montiert, welcher wiederum auf einem erhöhten Portalträger verfahren wird (sog. Flying Robots, s. Abbildung 59).

Die hierfür eingesetzten Standardindustrieroberer sind vergleichsweise teuer und besitzen zugleich hohe Eigenmassen, was wiederum zu einem schlechten Verhältnis von Nutzlast zu tatsächlich bewegter Masse führt. Darüber hinaus hat die hohe Masse des Roboters zur Folge, dass auch alle angrenzenden Bauteile des Tragsystems entsprechend massiv dimensioniert sein müssen. Ziel war es daher, ein ganzheitliches und durchgängiges Vorgehen zu generieren, um unterschiedliche Achssysteme, bzw. Optimierungen daran, einheitlich über deren kompletten Lebenszyklus mit Fokus auf Leichtbau und Nachhaltigkeit bewerten zu können.

Analysephase

Zu Beginn des *SyProLei*-Projektes erfolgte eine ausführliche Analyse der aktuellen Vorgehensweise bei Neuentwicklungen, sowie der hierfür verwendeten Systemlandschaft.

Als wesentliche Ergebnisse konnten hier festgehalten werden, dass bei den Entwicklungen ein klassischer Produktentwicklungsprozess aus dem Bereich des Maschinenbaus verwendet wird, in welchem kein spezieller Fokus auf die Themen Leichtbau, Energiebetrachtung und CO₂-Fußabdruck gerichtet war und folglich zu diesen Themen auch ein einheitliches Vorgehen fehlte. Ebenfalls noch wenig Anwendung fand der Ansatz der Modellbasierten Systementwicklung.

Im Bereich der Systemlandschaft konnten außerdem teilweise Brüche zwischen den unterschiedlichen Anwendungen identifiziert werden.

Umsetzung *SyProLei*-Prozess anhand des Use-Cases Portalroboter

Projektinitialisierung

Bei der Projektinitialisierung ging es um die Festlegung des Zielsystems und dessen Systemgrenzen. Mit Ausarbeitung der gewählten Methoden z.B. System of Interest oder Black Box Darstellung, konnte erstmals ein einheitliches Grundverständnis für den Use-Case geschaffen werden. Dies war vor allem auf Grund der teilweise branchenfernen Mitglieder des *SyProLei*-Projektes sehr wichtig, empfiehlt sich aber auch generell zu Beginn eines Projektes.

Im Laufe der ersten Iteration zeigte sich, dass es bei einem sehr umfangreichen Zielsystem schwierig sein kann, die einzelnen Methoden durchzuführen, vor allem wenn diese noch unbekannt sind. Deshalb wurde entschieden, teilweise zunächst das kleinere, abgeschlossene System des Greifers zu verwenden. Dadurch konnten schneller erste Ergebnisse zu den Methoden generiert und später auf das Gesamtsystem übertragen werden. Möglich war dies durch die iterative Vorgehensweise im *SyProLei*-Prozess.

Requirements Engineering

Nach der Projektinitialisierung erfolgte die genaue Definition der Anforderungen an das Zielsystem. Hierzu zählen unter anderem die Massen des Handlingobjektes, die erforderlichen Orientierungen von diesem, oder die abzufahrenden Bahnen bzw. Punkte im Raum. Neu war hierbei, dass neben den bisherigen Anforderungen konkrete Zielgrößen zu Gewicht und CO₂-Einsparungen gemacht wurden.

Um hier eine Entscheidungsgrundlage zu bekommen, wurde z.B. für die Greiferbaugruppe die Methode des leichtbaufokussierten House of Quality angewandt. Hier konnte herausgearbeitet werden, welche Produktmerkmale einen starken positiven oder negativen Einfluss auf den Leichtbau haben und an welchen Bauteilen eine Optimierung sinnvollerweise durchgeführt werden sollte. Generell wurde das aktuelle System nochmals detailliert analysiert um Vergleichswerte als Basis für das weitere Vorgehen zu erhalten. Durch

angelegte Attribute im Siemens Teamcenter konnte eine direkte Zuordnung der Anforderungen zu den Domänen vorgenommen, sowie leichtbaurelevante Anforderungen für die weitere Entwicklung gekennzeichnet werden.

Funktionales Design

Im Prozessschritt Funktionales Design wurde eine ganzheitliche Funktionsstruktur für den Use-Case erstellt. Es erfolgte hierbei ein umfassender Aufbau für den Roboter, die Aufnahme, das Werkzeug und den Speicher, inklusive der Darstellung von Signal und Energieflüssen. Verwendet wurde hierfür die im Projekt zur Verfügung stehende Software System Modelling Workbench (SMW), welche nach einer kurzen Schulung selbstständig verwendet werden konnte. Ziel dieser Funktionsstruktur ist die Darstellung aller Funktionen und deren Zusammenhänge für das anfangs definierte Zielsystem. Darüber hinaus wurde die Funktionsstruktur im weiteren Prozessverlauf noch um logische Elemente erweitert.

Auf Basis der aktuellen Greiferausführung wurde außerdem eine Funktionsmassenanalyse durchgeführt. Die hierbei erstellte Zuordnung von Massenanteilen zu den Funktionen und deren Einordnung nach Wichtigkeit brachte nochmals interessante Erkenntnisse für sinnvolle Ansätze von Optimierungsmöglichkeiten. Außerdem konnten Komponenten identifiziert werden, welche nur auf Grund der Funktionsweise anderer Komponenten notwendig sind, allerdings keine eigentliche Funktion der Gesamtbaugruppe erfüllen.

Logisches Design

Wie bereits im Absatz zuvor erwähnt, wurde in dieser Projektphase die Funktionsstruktur erweitert und den Funktionen logische Elemente zugeordnet.

Durch die übersichtliche Abbildung der Systemarchitektur konnten mögliche Synergien festgestellt und teilweise mehrere Funktionen einem geeigneten logischen Element zugeordnet werden. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass nur notwendige Elemente abgebildet werden und gleich Synergien für eine möglichst nachhaltige und leichte Lösung genutzt werden.

Als herausfordernd stellte sich teilweise die genaue Abgrenzung eines logischen Elementes und einer bereits technischen Realisierung dar. Es wurde

festgestellt, dass man sehr schnell in eine technische Umsetzung rutscht, vor allem wenn aus der Erfahrung heraus bereits konkrete Lösungen bekannt sind. Für die Offenheit von neuen Lösungsansätzen ist es allerdings essentiell wichtig in dieser Projektphase genau zu differenzieren.

Für die Generierung von möglichst vielen neuen Lösungsansätzen wurden ausgewählte Kreativitätsmethoden wie beispielsweise verschiedene Brainstorming Varianten oder die 7-Hüte Methode durchgeführt. Diese grundsätzlich bekannten Vorgehensweisen wurden im Rahmen des Projektes dahingehend variiert, dass der Fokus auf Kosten, Leichtbau und Nachhaltigkeit gelegt wurde. Die Vorgehensweisen erwiesen sich als sehr effektiv und es konnten innerhalb von kurzer Zeit eine Vielzahl an Ideen generiert werden. Auch das hierbei verwendete Online-Whiteboard stellte sich als sehr positiv heraus, da hier alle Teilnehmer parallel zu ihren Ideen auch gleich die Lösungen der anderen Teilnehmer sehen konnten. Dies wiederum diente dann immer wieder als Anreiz für weitere eigene Ideen.

Als Denkanstoß gibt es hier in der Literatur noch zahlreiche weitere Methoden wie beispielsweise die TRIZ-Prinzipien, oder generelle Leichtbauprinzipien wie Struktur- oder Stoffleichtbau. Diese wurden zum Teil ebenfalls im Projekt betrachtet und versucht deren Potentiale zu bewerten.

Technisches Design

In dieser Projektphase wurden ganzheitliche Ansätze für die Bewertung und Optimierung von Mehrachssystemen entwickelt und diese konkret an Beispielen in den Software-Tools der im Projekt vorhandenen Systemumgebung aufgebaut und berechnet. Wie in Abbildung 60 schematisch dargestellt, wurde hierbei sowohl die Herstellungs- als auch die Nutzungsphase in die Betrachtung mit einbezogen.

Für die Ermittlung von Energieverbrauch, CO₂ und Kosten während der Herstellungsphase wurden Referenzbaugruppen in Siemens Product Costing abgebildet. Dies war für bereits bestehende Baugruppen generell gut möglich, da hier die Fertigungsschritte und deren Bearbeitungszeiten bekannt sind. Für die genauen Werte müssen aber die tatsächlich in der Produktion verwendeten

Maschinen in der Datenbank mit deren spezifischen Verbräuchen angelegt sein. Ansonsten konnte keine Aussage über die Genauigkeit bzw. deren möglichen Abweichungen getroffen werden.

Bei noch nicht gänzlich ausgearbeiteten Konzepten oder Entwürfen gestaltete sich die detaillierte Abbildung im System als schwieriger, da die genauen Prozessdaten noch nicht verfügbar sind.

Für das Beispielbauteil des Roboterflansches wurde hierzu eine Optimierung der Technologiekettenplanung erprobt. Hierfür wurde ein Tool verwendet, in welchem definierte Bauteilanforderungen eingetragen und dann auf Basis dessen, aus einer hinterlegten Datenbank optimierte Technologieketten zur leichtbauoptimierten Herstellung des Flansches ausgegeben werden. Generell funktionierte das Berechnungstool für das Beispielbauteil und es konnten verschiedene Toolketten zueinander verglichen werden. Die Schwierigkeiten bei diesem Tool ist im Folgenden die Übertragung auf weitere Bauteile, bzw. die Generalisierung an sich, da sich die Eingabeparameter mit ändern werden. Ein weiterer Punkt ist, dass die Datenbank möglichst umfangreich und aktuell sein muss, um optimale Ergebnisse zu erhalten. Hier ist zu überlegen, ob nicht am Markt verfügbare Datenbanken wie beispielsweise Granta Selector (für die Werkstoffauswahl) einbezogen werden sollten.

Für eine detailliertere Bewertung der Fertigungsmöglichkeiten können parameterbasierte Modelle der Produkte verwendet werden.

Insgesamt zeigte sich, dass bei der Ermittlung von Energieverbrauch und CO₂-Emission während der Herstellung nicht die Berechnung selbst, sondern vielmehr die Verfügbarkeit der Daten die Herausforderung darstellt. Diese können für die eigene Fertigung mit geeigneten Monitoring Systemen noch relativ gut erfasst und bewertet werden, bei Zukaufbauteilen und -baugruppen zeigte sich allerdings dass es hier aktuell kaum möglich ist Daten zu bekommen und sich hier auch noch kein Standard etabliert hat. In solchen Fällen wird in der Praxis momentan meist noch mit gemittelten Werten gerechnet.

Parallel dazu wurde im Simulationsprogramm Amesim das durch die Anforderungen definierte Achssystem und dessen Bewegungsablauf abgebildet.

Durch die Simulation des gesamten Achssystems, sowie des tatsächlichen Ablaufs konnten die Auswirkungen der einzelnen Achsen auf den Gesamtenergiebedarf der Anlage während der Nutzungsphase detailliert ermittelt werden. Ebenfalls konnten mögliche Potentiale durch Masseneinsparungen an den Einzelachsen gerechnet und bewertet werden. Amesim stellte sich hierbei als sehr umfangreiches Tool dar, dessen Verwendung zunächst etwas Einarbeitungszeit erforderte. Vergleichsrechnungen mit anderen Antriebsauslegungstools zeigten hier, dass eine reine Energiebetrachtung teilweise einfacher umzusetzen ist und dort auch weitere Verbraucher der Leistungselektronik (z.B. Einspeisung oder Motormodule) inkludiert sind. Der große Vorteil von Amesim liegt allerdings in den automatisch

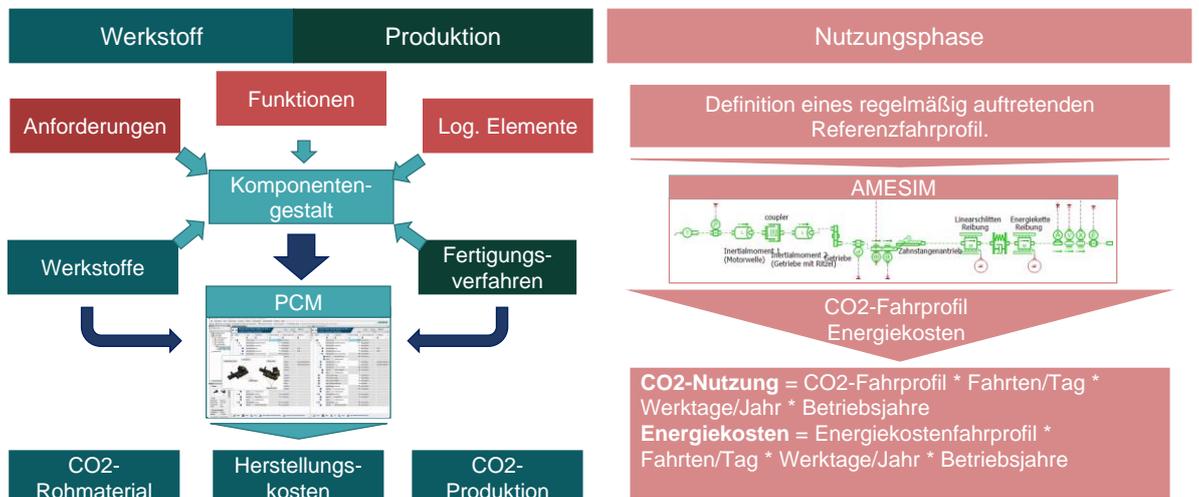


Abbildung 60: Zusammenspiel der Phasen und Kosten

berücksichtigten Auswirkungen auf angrenzende Achsen, sowie auf den Möglichkeiten der Modelleinbindung und -erweiterung, was für den grundsätzlichen *SyProLei*-Gedanken einer durchgängigen Toolkette entscheidend ist. Es können so beispielsweise auch Kraftverläufe auf einzelne Bauteile über den gesamten Zyklus ermittelt und daraus dann Lastkollektive für die Lebensdaueranalyse definiert werden.

Zusammengefasst zeigte sich, dass die möglichen Energieeinsparungen durch Massenreduzierung stark vom Anwendungsfall abhängen und bei manchen Achsen auch sehr klein ausfallen können. Bewährt hat sich bei dieser Vorgehensweise der Vergleich der Energieeinsparung pro gespartem Kilogramm. Bei sehr kleinen Einsparungen gilt es dann gesamtheitlich, auch unter Berücksichtigung der Herstellung zu bewerten.

Ergänzend zu dem Simulationsmodell wurde für den Use-Case außerdem eine Systemhierarchie erstellt, um sekundäre Eigenschaftsänderungspotentiale zu ermitteln. Der Aufbau und der Eintrag der Wechselwirkungen konnten schnell und problemlos umgesetzt werden, die Bestimmung der Systemeinflussfaktoren zwischen den Komponenten hingegen gestaltete sich erstmal als nicht vernünftig definierbar. Deshalb wurden hier die Einflussfaktoren nur als Relativangabe eingetragen. Dies war allerdings zunächst ausreichend für einen Gesamtüberblick der Wechselwirkungen der Systemkomponenten.

Zusammenfassung / Fazit

Im beschriebenen Use-Case wurde der *SyProLei*-Prozess nicht ganz bis zum Ende durchgeführt und endete im Bereich des Physischen Designs. Grund hierfür ist, dass der Fokus auf der ganzheitlichen Bewertungsmethode für zukünftige Entwicklungen und noch nicht auf der Ausdetaillierung lag.

Der im Projekt *SyProLei* entwickelte Prozess und auch die dazugehörigen Einzelmethodiken zeigen, wie eine gesamtheitliche, durchgängige Produktentwicklung mit Fokus auf Leichtbau und Nachhaltigkeit aufgebaut werden kann. Durch das aus unterschiedlichen Branchen zusammengestellte Projektkonsortium, konnten verschiedenste Sichtweisen in den Prozess eingearbeitet werden und es ergaben sich daraus auch oftmals neue Bewertungs- und Lösungsansätze. Diese gilt es im Folgenden in den

bestehenden Prozess und die vorhandene Systemlandschaft zu integrieren und für Folgeprojekte zu nutzen.



Otto Bock SE & Co. KGaA
37115 Duderstadt

- Über 9000 Mitarbeiter weltweit
- Branche: Medizintechnik
- Orthopädietechnische Lösungen
- Historie:
 - Gründung 1919 in Berlin
 - 1997 C-Leg
 - 2010 Genium
 - 2014 C-Brace

Abbildung 61: Ottobock

Ottobock

Allgemeine Einleitung

Gegründet im Jahre 1919 in Berlin mit Fokus auf prothetische Versorgungen der unteren und der oberen Extremitäten hat sich die Ottobock SE & Co. KGaA mit Hauptsitz im niedersächsischen Duderstadt zu einem globalen Anbieter von orthopädietechnischen Lösungen entwickelt.

Ein bedeutender Meilenstein in der Entwicklung des Unternehmens ist die Markteinführung des weltweit ersten mikroprozessorgesteuerten Prothesenkniegelenks namens „C-Leg“ im Jahre 1997. 2014 folgte die Einführung der Beinorthese „C-Brace“, die es Menschen mit neurologischen Indikationen ermöglicht, die Vorteile einer mikroprozessorgesteuerten Stand- und Schwungphase zu nutzen und ein großes Maß an Bewegungsfreiheit zu erlangen bzw. zurückzugewinnen.

Ottobock ist ein familiengeführtes Unternehmen, das weltweit über 9.000 MitarbeiterInnen beschäftigt.

Hintergrund

Leichtbauprinzipien sind überall dort besonders vorteilhaft, wo es sich um mobile Anwendungen handelt, also Massen bewegt werden. Nutzer von orthopädietechnischen Produkten stehen vor der Herausforderung, dass das genutzte Hilfsmittel, sei es ein Rollstuhl, eine Prothese oder eine Orthese, mit dem Körper bewegt wird. Das Hilfsmittel stellt somit eine träge Masse dar, unabhängig davon, ob

gespeicherte Energie mitgeführt und beim Fortbewegen nutzbar gemacht wird oder nicht.

Besondere Bedeutung kommt hierbei der Anordnung von Massen zu. Ein zu schwerer Prothesenfuß wird vom Anwender weniger gut akzeptiert als ein zu schweres Kniegelenk, dessen Masse sich um den Kniedrehpunkt konzentriert bzw. möglichst nahe am Oberschenkelstumpf angeordnet ist. Die sogenannten Rotationshydrauliken schneiden in diesem Punkt besonders gut ab.

Der Beitrag von Ottobock zu SyProLei besteht darin, ein Anwendungsbeispiel zur Verfügung zu stellen und an der Erprobung von Leichtbauprinzipien mitzuwirken.

Beschreibung Use-Case

Als Use-Case wurde eine Rotationshydraulik ausgewählt, deren Aufgabe es ist, Schwung- und Standphase des Anwenders zu steuern. Während der Standphase hat das Bein Bodenkontakt und ist durch das Körpergewicht belastet, wohingegen es sich während der Schwungphase in der Luft befindet und lediglich Trägheitskräfte bzw. Trägheitsmomente wirksam sind.

Hydraulische Steuerungen

Hydrauliken sind zur Steuerung der Schwung- und Standphase besonders gut geeignet, weil das Medium, ein Hydrauliköl auf Silikonbasis, mineralischer Basis oder pflanzlicher Basis, nahezu inkompressibel ist und hohe Dämpfungen, sprich Kniemomente ermöglicht. Die Mobilitätsgrade 3

und 4, welche aktive bis sehr aktive Anwender erreichen, sind damit problemlos versorgbar. Ein weiterer wesentlicher Vorteil von hydraulischen Steuerungen ist, dass sie, anders als pneumatische Steuerungen, keinen atmosphärischen Ausgleich benötigen und daher weniger Geräusche erzeugen.

Rotationshydrauliken

Bei Ottobock wird prinzipiell zwischen Linearhydrauliken und Rotationshydrauliken unterschieden. Beide Technologien eignen sich gleichermaßen zur Steuerung der Schwung- und Standphase von prothetischen und orthetischen Gelenken. Gemeinsam ist beiden Konstruktionsprinzipien, dass sie ein oszillierendes Verdrängerelement aufweisen. Bei einer Linearhydraulik ist dies meist ein rotations-symmetrischer Kolben, dessen Kolbendichtung den Hubraum vollumfänglich abdichtet.

Sind hingegen kleine Leckagen zulässig, weil eine hydraulische Sperrfunktion nicht gefordert ist, kann bei hinreichend engem radialem Spalt und hinreichend großer Ölviskosität auf ein zusätzliches Dichtelement am Kolben verzichtet werden. Der Vorteil einer solchen Ausführung ist, dass in das Gehäuse Steuerkonturen wie Nuten oder Bohrungen eingearbeitet werden können, die eine wegabhängige Dämpfung ermöglichen, ohne dass die Gefahr besteht, eine Kolbendichtung zu beschädigen.

Rotationshydrauliken haben nicht den Vorteil einer umlaufenden, geschlossenen Dichtung um den Schwenkflügel, wodurch sie zur Verwendung in Gelenken mit hydraulischer Sperrfunktion nicht in Frage kommen. Vorteilhaft ist jedoch, dass sie keine Kolbenstange besitzen, die aus dem Druckraum ausfährt und in diesen wieder eintaucht. Insbesondere bei nächtlicher Stillstandszeit wird ein Teil des Ölfilms auf der ausgefahrenen Kolbenstange verdunsten und muss beim ersten Hub am nächsten Morgen erneut mit Öl benetzt werden. Die Ölmenge, die auf diese Weise verlorengeht, muss durch den integrierten Volumenausgleich ersetzt werden. Dieser kann bei einer Rotationshydraulik deutlich kleiner dimensioniert werden als bei einer Linearhydraulik mit einseitiger Kolbenstange, da das Gesamtvolumen der beiden Kammern, die durch den Schwenkflügel voneinander getrennt werden, konstant ist.

Kinematik

Die Übersetzung der Pendelbewegung des Beins in die oszillierende Bewegung einer Linearhydraulik geschieht nach dem Schubkurbelprinzip. Bei einer Rotationshydraulik hingegen wird die Pendelbewegung des Beins direkt auf einen um die Knieachse oszillierenden Schwenkkolben übertragen. Der Druckraum ist halbmondförmig und wird auch als Schwenkraum bezeichnet. Die Beugung des Beins wird Flexion genannt, die Streckung des Beins Extension.

Default Modus

Hydraulische Gelenke arbeiten nach den beiden Schaltprinzipien „Default Stance“ oder „Default Swing“. Default Stance Gelenke sind im Normalzustand im Standphasenmodus, d.h. sie haben einen hohen Bewegungswiderstand. Zum Auslösen der Schwungphase müssen sie freigeschaltet werden. Dies geschieht nach Detektion einer Vorfußlast entweder mechanisch über eine Schaltkette mit mechanischem Schaltventil oder über ein mechatronisch angesteuertes Ventil. Solange das Bein in der Luft ist, muss das Schaltventil durch konstruktive Maßnahmen offengehalten werden. Bei den mechatronischen Lösungen sind Ventile mit proportionalem Verhalten und 2/2-Wege-Magnetventile in der Ausführung „Normally closed“ bekannt.

Default Stance Gelenke sind besonders sicher in der Anwendung, da sie bei drohender Sturzgefahr automatisch in den Standphasenmodus zurückkehren. Wird ein Normally-Closed-Ventil eingebaut oder ein Proportionalventil, welches nur zum Ändern des Drosselquerschnitts bestromt werden muss, ist zudem ein energieeffizienter Betrieb des Gelenks möglich.

Default Swing Gelenke hingegen sind im Normalzustand im Schwungphasenmodus. Bei Fersenkontakt schalten sie in den Standphasenmodus und verlassen diesen erst wieder bei Entlastung des Standphasenventils.

Der Produktentwicklungsprozess bei Ottobock

Produktentwicklungen durchlaufen bei Ottobock das V-Modell. Aus Stakeholder-Anforderungen z.B. mit der Formulierung „Das Kniegelenk muss zum Gehen in der Ebene geeignet sein“ werden Systemanforderungen abgeleitet. Diese wiederum werden auf die jeweiligen Komponentenebenen heruntergebrochen. An den Schnittstellen wird der

Output der höheren Ebene als Input an die darunterliegende Ebene übergeben, um für die jeweilige Komponentenentwicklung klare Zielvorgaben zu erhalten.

Auf dem rechten Ast des V-Modells erfolgt die Verifizierung der entwickelten Komponenten anhand der Komponentenanforderungen sowie die Verifizierung der obersten Ebene in Form von Systemtests. Eine Designvalidierung mit Probanden stellt sicher, dass Produkteigenschaften, die nicht mit verifizierbaren Anforderungen beschrieben sind, hinreichend abgesichert werden.

In den Produktentwicklungsprozess maßgeblich eingebunden sind die Bereiche Produktmanagement, Orthopaedic Technology, Engineering, Verification, Operations, Clinical Research und Regulatory Affairs.

Vorgehensweise im SyProLei-Projekt

Während der kompletten Projektlaufzeit wurde bei Ottobock durch das SyProLei-Konsortium ein Technologieprojekt begleitet, welches organisatorisch durch die Abteilung Research gesteuert und operativ gemeinsam von Research Engineers und Development Engineers vorangetrieben wurde.

Zu Beginn des Projekts wurden digitale Werkzeuge wie Capella zur Darstellung der Funktionsstruktur des Use-Cases und Siemens Teamcenter als Entwicklungsumgebung bereitgestellt. Eine Kurzschulung durch Mitarbeitende der d.u.h.Group GmbH erleichterte den Einstieg in die Bedienung dieser Tools.

Leichtbaumethoden

Folgende Leichtbaumethoden wurden im Verlauf des Projekts untersucht:

- Analyse des Ist-Standes anhand einer Stückliste mit Gegenüberstellung der Massen und der Herstellkosten der Einzelteile
- Priorisierung von Anforderungen nach Leichtbaurelevanz
- Paarweiser Vergleich von Anforderungen hinsichtlich ihrer Wichtigkeit
- Durchführung einer Funktionsmassenanalyse
- Anwendung von Kreativitätstechniken

- Untersuchung der Strukturfestigkeit und der Topologie mittels Finite-Elemente-Methoden
- Strömungssimulation mit Simcenter FloEFD, unterstützt durch eine Schulung durch Mitarbeitende der d.u.h.Group GmbH
- Aufzeigen der Möglichkeiten additiver Verfahren von Metall und Carbon durch Mitarbeitende des Instituts für Produktionstechnik (WBK)
- Untersuchung des Leichtbaupotenzials von Schwenkkolben aus Titan

Fazit

Durch die Einbettung des vorliegenden Use-Cases in das Projekt SyProLei konnte ein wichtiger Beitrag geleistet werden zur Auslotung der technologischen Grenzen von Rotationshydrauliken. Leichtbaumethoden wurden systematisch auf ihren Nutzen hin untersucht und werden bei zukünftigen Entwicklungsvorhaben bei Ottobock Berücksichtigung finden.



Qeridoo GmbH
53567 Buchholz (Rheinland-Pfalz)

- Über 50 Mitarbeiter
- Branche: Kinder- und Sportgeräte
- Produktentwicklung, Produktkonstruktion und -gestaltung von Fahrrädern, Fahrradanhängern und Babyausstattungsprodukten
- Historie:
 - Seit 2006 Vertrieb von Babyartikeln
 - 2008 Erste Fahrradanhänger
 - 2010 wurde die Marke Qeridoo geschaffen, mit Fokus auf Kinderfahradanhänger

Abbildung 62: Qeridoo

Qeridoo

Allgemeine Einleitung

Wie kann ich joggen gehen, auch wenn mein Baby mal nicht schläft? Wie bleibe ich aktiv und genieße meinen sportlichen Lebensstil – mit meinem Kind? Gibt es eine sichere und zuverlässige Methode, mein Kind einfach mitzunehmen?

Diese Gedanken waren die Initialzündung der Marke Qeridoo, denn der Markt gab das gewünschte nicht her. Die Qeridoo GmbH in Buchholz (Rheinland-Pfalz) begann 2006 mit dem Vertrieb von Babyartikeln aus dem heimischen Wohnzimmer hinaus und ist bis heute Herzensangelegenheit von über 50 Menschen. Schon 2008 wurde der erste Fahrradanhänger entwickelt, was in 2010 zur Schaffung der Marke Qeridoo, mit Fokus auf Kinderfahradanhänger, führte.

Beschreibung Use-Case

Der Fahrradanhänger hat durch den Einsatz von Aluminium für die Rahmenstruktur und Kunststoff für die meisten Verbindungselemente, schon ein sehr gutes Verhältnis von Nutzlast und Leergewicht des Anhängers. Trotzdem werden belastete Teile noch aus Aluminiumdruckguss hergestellt. Hier besteht unter anderem noch weiteres Potential für eine Gewichtsreduktion.

Aktuelle Vorgehensweise / Entwicklungsprozess

Aktuell findet ein klassischer Entwicklungsprozess mit Fokus auf Leichtbau und Nachhaltigkeit Anwendung.

Bei einem Fahrradanhänger ist das Gewicht im hohen Maße wichtig, da so wenig wie möglich Gewicht mit Fahrrad gezogen werden soll. Gerade bei Nutzung von Fahrrädern ohne Elektroantrieb ist unnötiges Mehrgewicht zu vermeiden. Aber auch bei Nutzung bei Fahrrädern mit Elektrounterstützung führt ein höheres Gewicht zu einer Reduktion der Reichweite.

Auch die gesetzliche Beschränkung des Anhänger-gewichts auf 60 kg führt dazu, dass bei Reduktion des Anhängergewichts, die Nutzlast erhöht werden kann, was für den Nutzer ein erheblicher Vorteil sein kann.

Die Reduktion des Anhängergewichts erfordert den Einsatz von Leichtbaumaterialien und innovativen Designtechniken. Dies stellt die Hersteller vor technische Herausforderungen, da die Stabilität und Sicherheit des Anhängers trotz der Gewichtsreduktion gewährleistet werden müssen.

Deshalb erfordert die Einhaltung der gesetzlichen Beschränkungen eine ständige Überprüfung und Anpassung der Anhängerdesigns, um sicherzustellen, dass sie den Vorschriften entsprechen.

Schwierig ist die Bewertung von CO₂-Einsparungen. Da der Umgang mit Produzenten in Fernost komplexe Herausforderungen mit sich bringen. Diese erfordern sorgfältige Planungen, eine transparente Kommunikation und zusätzliche Investition.

nen in Personal, welche die Informationsbeschaffung und Kommunikation mit den Lieferanten sicherstellen.

Die Vorteile des Leichtbaus, insbesondere in Bezug auf die CO₂-Reduktion, sind oft trotzdem schwer zu quantifizieren. Es erfordert umfassende Daten und Modelle, um die genauen Effekte auf den Energieverbrauch und die Emissionen zu berechnen. Die Bewertung ist komplex und hängt von vielen Faktoren ab, einschließlich der spezifischen Materialien, des Designs und der Nutzung des Anhängers.

Umsetzung SyProLei-Prozess anhand des Use-Case

Analysephase

Zu Beginn des Projekts wurde der Produktentwicklungsprozess analysiert und die Software der Partnerunternehmen bewertet. Leichtbaupotentiale wurden identifiziert, und Anforderungen an den Entwicklungsprozess wurden gesammelt. Eine Methodik, basierend auf dem V-Modell, wurde entwickelt und um die Themen Leichtbau, Energiebetrachtung und CO₂-Fußabdruck erweitert.

Templates, darunter eine Checkliste für Leichtbauanforderungen, wurden erstellt, um Leichtbaupotentiale frühzeitig in der Produktentwicklung zu berücksichtigen.

Projektinitialisierung

Bei Projektbeginn wurde das Ziel festgelegt und die Systemgrenzen definiert. Während der ersten Phase stellte sich heraus, dass die Bearbeitung umfangreicher Zielsysteme herausfordernd sein kann, insbesondere wenn die angewandten Methoden neu sind. Daher wurde entschieden, sich auf einzelne Teilsysteme zu konzentrieren. Zunächst wurde das Fahrwerk ausgewählt, bestehend aus den Komponenten Achse, Räder, Feder-Dämpfer-System und Rahmenanbindung. Dieser Fokus ermöglichte es, schnell erste Ergebnisse zu erzielen, die später auf das Gesamtsystem übertragen werden können.

Methodenverfeinerung und Werkzeugnutzung

Die Methodik wurde weiter ausgearbeitet und von den Use-Case-Partnern angewendet.

Digitale Werkzeuge wie Capella und Teamcenter wurden bereitgestellt und geschult. Capella wurde verwendet, um die Funktionsstruktur des Use-

Cases darzustellen. Eine detaillierte Stückliste wurde erstellt, um den Ist-Zustand zu analysieren. Anforderungen wurden in Bezug auf Leichtbaurelevanz priorisiert und im Leichtbau-QFD gewichtet.

Eine Funktionsmassenanalyse des Fahrwerks wurde durchgeführt, um das größte Leichtbaupotential zu identifizieren. Ein Gesamtprojekttreffen diente der Standbestimmung und Lösungsansatzfindung.

Kreativmethoden und Ideenfindung

Kreativmethoden wurden entwickelt und angewendet, um innovative Ideen zu generieren. Diese Methoden wurden um den Leichtbauaspekt erweitert und auf die Funktionen angewendet. Gezielte Fragestellungen halfen bei der Identifizierung von Leichtbaupotentialen.

Die Ergebnisse wurden in Ideen und Anforderungen/Randbedingungen aufgeteilt und priorisiert. Die besten Ideen wurden in ein Portfolio aufgenommen.

Im Rahmen des Projekts wurden Methoden überarbeitet und auf die spezifischen Use Cases ausgerichtet. Eine iterative Vorgehensweise wurde angewendet, um die Methodik zu verbessern und den Anforderungen der verschiedenen Use Cases gerecht zu werden. Digitale Tools spielten eine wesentliche Rolle in diesem Prozess, indem sie Unterstützung bei der Umsetzung der Methoden boten und den Input der Use Case-Partner integrierten.

Systemgrenzen und Analyse

Systemgrenzen wurden im Verlauf des Projekts festgelegt, und eine detaillierte Analyse der Radanbindung wurde durchgeführt. Dies umfasste die Spezifikation von Schnittstellen und Kraftflüssen innerhalb und außerhalb des Systems. Diese Phase ermöglichte uns, eine umfassende Übersicht über das zu untersuchende System zu erhalten.

Funktionelles und Logisches Design

Nach dem Aufbau einer Funktionsstruktur und anschließender Überführung in ein logisches Design in der Softwareumgebung AMESIM stellte sich aber heraus, dass das System Radanbindung an den Fahrradanhänger-Grundrahmen relativ komplex ist und verschiedene Materialkombinationen eine Untersuchung in der AMESIM Umgebung sehr aufwändig und aufgrund der vielen unbekannt Parameter nur unsichere Ergebnisse liefern würde.

Daher entschieden wir die Komplexität zu Beginn etwas zu reduzieren und eine einfachere Baugruppe mit weniger Freiheitsgraden und Materialien zu betrachten. Daher haben wir uns für das Kopfprotectorsystem entschieden und dieses genauer betrachtet, welches eine entscheidende Rolle in Bezug auf die Sicherheit und Funktionalität des Gesamtsystems spielt. Dieses Sicherheitssystem soll im Falle einer Unfallsituation, wie das Umkippen des Fahrradanhängers sicherstellen, dass der dringend benötigte Sicherheitsabstand zwischen Kopf und Boden gewährleistet ist. Mit diesem System können schwere Verletzungen verhindert werden. Weiterhin ist das Design so gewählt, dass dieser Kopfprotector, wenn unten am Rahmen vor den Laufrädern montiert, ebenso als Radabweiser fungieren kann. Somit können bei optimalem Materialeinsatz zwei wichtige Funktionen mit einem Bauteil abgedeckt werden.

3D-Simulation und FEM-Analyse

Im Rahmen des Projekts wurde die Anwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM) zur detaillierten Analyse eines Kopfprotectorsystems untersucht. Das Ziel bestand darin, das System genauer zu verstehen und die Form zu optimieren und dabei möglichst wenig Material einzusetzen.

Zunächst wurde das Kopfprotectorsystem als Fallbeispiel betrachtet. Durch die Anwendung von FEM-Simulationen konnte eine Optimierung des Systems erreicht werden. Die Ergebnisse dieser Analysen wurden anschließend verwendet, um sowohl die Sicherheit als auch den Materialeinsatz des Systems zu verbessern.

Die Simulationsergebnisse lieferten wertvolle Erkenntnisse, die als Grundlage für den Bau von Prototypen dienten. Durch die Integration der Simulationsergebnisse in den Prototypenbau konnte eine effiziente Weiterentwicklung des Kopfprotectorsystems erreicht werden.

Insgesamt haben die Nutzung der 3D-Umgebung und der FEM-Werkzeuge sowie die darauf basierenden Analysen und Optimierungen einen bedeutenden Beitrag zur Verbesserung der Sicherheit des Kopfprotectorsystems geleistet und dabei den Materialeinsatz minimiert.

Ausblick und Prototypenbau

Der Prototypenbau steht als unmittelbar bevorstehender Schritt in unserem Entwicklungsprozess,

wobei die Simulationsergebnisse eine entscheidende Rolle spielen. Es werden physische Prototypen erstellt, die anschließend umfangreichen Tests unterzogen werden.

Diese Tests sind von entscheidender Bedeutung, da sie dazu dienen, die Simulationsergebnisse zu validieren und den gesamten Entwicklungsprozess abzuschließen. Durch die Vergleichsanalyse der Ergebnisse aus den Tests mit den vorhergesagten Ergebnissen der Simulation können etwaige Diskrepanzen identifiziert und behoben werden.

Der Prototypenbau und die nachfolgenden Tests bilden somit einen integralen Bestandteil unseres iterativen Entwicklungsansatzes. Sie stellen sicher, dass die entwickelten Lösungen nicht nur auf dem Papier, sondern auch in der Praxis funktionieren und den Anforderungen entsprechen.

Die Ergebnisse dieser Testphase werden dazu beitragen, das Vertrauen in die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse zu stärken. Auf dieser Grundlage können weitere Optimierungen vorgenommen und letztendlich ein erfolgreiches Endprodukt entwickelt werden.

3D-Umgebung und Realitätssteigerung

Der nächste geplante Schritt war die Übertragung des zu untersuchenden Systems in eine komplexere 3D Umgebung. Dieser Schritt sollte dazu dienen, den Realitätsgrad der Simulation zu erhöhen. Durch die 3D-Simulation erwarteten wir weitere Erkenntnisse und die Möglichkeit, verschiedene Designs und Materialien zu simulieren. Dies sollte es uns ermöglichen, fundierte Entscheidungen zu treffen, bevor wir mit dem Prototypenbau beginnen.

Um das Kopfprotectorsystem zu optimieren, wurde eine FEM (Finite-Elemente-Methode) Simulation durchgeführt. Diese Simulationen dienten dazu, die Struktur des Kopfprotectors hinsichtlich ihres Gewichts und ihrer Funktion zu stabilisieren. Die FEM-Analyse ermöglichte es, die strukturellen Belastungen und Verformungen des Kopfprotectors unter verschiedenen Bedingungen zu modellieren und zu verstehen.

Durch die FEM-Simulationen konnte gezielt an Verbesserungen gearbeitet werden, um die Sicherheit und Leistung des Kopfprotectorsystems zu optimieren, ohne dabei unnötiges Gewicht hinzuzufügen.

Dies ist von entscheidender Bedeutung, da ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Gewicht und Funktionalität für den Fahrradanhänger von großer Relevanz ist.

Die Ergebnisse dieser FEM-Simulationen werden in weitere Optimierungsarbeiten einfließen und sicherstellen, dass das Kopfprotectorsystem den höchsten Sicherheitsstandards entspricht und gleichzeitig effizient und leicht ist.

Das Projekt verfolgt weiterhin einen multidisziplinären Ansatz, um sowohl die Radanbindung als auch spezifische Komponenten wie das Kopfprotectorsystem umfassend zu analysieren und zu verbessern.

Ausblick: Prototypenbau

Der Prototypenbau ist der nächste Schritt in unserem Vorgehen. Bevor wir jedoch physische Prototypen erstellen, wollen wir sicherstellen, dass wir umfassende Erkenntnisse durch Simulationen an unserem digitalen Zwilling gewonnen haben. Dies

spart Zeit und Ressourcen und ermöglicht es uns, den Prototypenbau gezielter und effizienter durchzuführen. Daher werden wir noch einige Iterationen durchlaufen, bevor wir dann die durch Simulationen optimierten Bauteile fertigen und in erste Prototypen überführen. Diese sind dann weitreichenden Tests zu unterziehen. Diese sollen dann zeigen, inwieweit sich die Resultate der Softwareumgebung in der Realität widerspiegeln und wie aussagekräftig die Simulationsergebnisse schlussendlich sind.

Fazit

Dieser Handlungsleitfaden zeigt, wie durch die iterative Natur des Prozesses und die Integration digitaler Werkzeuge und Simulationen effiziente und leichte Fahrradanhänger entwickelt werden können. Die gewonnenen Erkenntnisse tragen dazu bei, die Produkte von Qeridoo weiter zu verbessern und den steigenden Marktanforderungen gerecht zu werden.

Glossar

Disziplin

Der grundlegenden Sichtweise aus Verl und Müller [41] folgend, wird – auch gemäß der englischsprachigen Literatur und den diversen Definitionen um den Mechatronik-Begriff [42–44] – unter einer (Fach-)Disziplin klassisch die Mechanik, die Elektrotechnik/Elektronik sowie die Informations-/Softwaretechnik als spezifische Ausrichtung innerhalb des „Physischen Design“ im Systems Engineering verstanden.

Domäne

Hierarchisch betrachtet steht eine Ebene über dem Disziplin-Begriff die Domäne, die Sicht auf das Produkt, die Produktion und den Werkstoff gibt und ihre eigenen prozessualen Abläufe über den gesamten Produktentstehungsprozess aufweist.

Dimension

Unter einer Dimension wird entweder die technisch, wirtschaftlich oder ökologisch ausgerichtete Sichtweise auf eine Problemstellung verstanden, die im Zuge einer Entscheidungsfindung bewertend zu Rate gezogen werden kann.

Produktentstehung

Unter der Produktentstehung als Teil des Produktlebenszyklus versteht man den „grundsätzlichen Ablauf von der Produkt- bzw. Geschäftsidee bis zum Serienanlauf“ [45] und umfasst damit neben der organisatorischen und gestalterischen Produktplanung, -konstruktion und -erprobung (Produktentwicklung) ebenso die Serienentwicklung.

Produktentwicklungsprozess

Der Produktentwicklungsprozess als Teil einer holistischen Entwicklungsmethodik stellt einen Vorgehensplan, d. h. eine systematisch-logische Abfolge von Tätigkeiten [46] bzw. notwendige „Abläufe der Entwicklungsarbeit [...] [mit geregelter] Vorgehen der involvierten Individuen und Teams“ [47] sowie inkludierten Methoden vor, um eine systematische Produktentwicklung von der Aufgabenklärung über die Konzeption und den Entwurf bis zur finalen Ausarbeitung zu fördern.

Konstruktion

Die Konstruktion bzw. das Konstruieren wird definiert als „Gesamtheit aller [gestalterischer (bzw. konstruktiver)] Tätigkeiten, mit denen – ausgehend von einer Aufgabenstellung – die zur Herstellung und Nutzung eines Produktes notwendigen Informationen erarbeitet werden und in der Festlegung der Produktdokumentation enden“ [48].

Prozess-/ Vorgehensmodell

Unter einem Prozess- bzw. Vorgehensmodell wird die Beschreibung wichtiger Elemente einer Handlungsfolge für bestimmte Situationen oder Zielsetzungen verstanden. [48]

Modell

„Ein Modell ist eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild“ [49] und kann somit auch als „physikalisch-mathematisches Abbild eines technischen Bauelements, einer Baugruppe oder eines komplexen Systems“ [50] angesehen werden.

Modellierung

Die sprach-, grafik- oder parameterorientierte Modellierung umfasst bei der Simulation das „Umsetzen eines existierenden oder geplanten Systems in ein experimentierbares Modell“ [49], wobei vor der softwaretechnischen Implementierung in einer ersten Modellierungsstufe aus einem gedanklichen ein symbolisches, noch nicht ablauffähiges Modell erarbeitet wird.

Methode

Die (Entwicklungs-)Methode (abstammend vom griechischen μέθοδος [méthodos] – „Weg“, „Gang einer Untersuchung“ oder eigentlich „Weg zu etwas hin“) zielt konkret auf ein „im Vorfeld der Problemlösung gewähltes und bewusst eingesetztes oder unreflektiertes, aber post festum als regelgeleitet beschreibbares Verfahren“ zur Produktmodellierung ab.

Methodik

Die Entwicklungsmethodik (abgeleitet von griechisch μεθοδική [methodiké] – der „Kunst des planmäßigen Vorgehens“) ist eine „planmäßige Verfahrensweise zur Erreichung eines bestimmten Ziels nach einem Vorgehensplan unter Einschluss von Strategien, Methoden, Werkzeugen und Hilfsmitteln“ [51].

Material vs. Werkstoff

Material als ein in der Fertigungstechnik anerkannter Sammelbegriff für diejenigen Stoffe und Stoffgemische, die abgesehen von Halb- und Fertigerzeugnissen als feste, flüssige oder gasförmige Ausgangs- und Grundstoffe in Form von Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen in die Produktion eingehen, ohne hierbei zwingend technisch verwertbare Eigenschaften aufzuweisen. Im Vergleich zur angel-

sächsisch alleinstehenden Definition „material“ kann hiermit zwischen dem allgemeingültigen Oberbegriff des Materials bzw. der Materialien und der darunter untergeordneten Terminologie des Werkstoffes als Menge aller festen Materialien mit (konstruktions-) technisch explizit verwertbaren Eigenschaften unterschieden werden.

Fertigung

Die Fertigung (bzw. Herstellung) als qualitäts- und quantitätsgerechter Teilprozess der Produktion versteht sich ausschließlich als industrielle Leistungserstellung materieller, absatzreifer Güter und Eigenerzeugnisse und umfasst so lediglich den „unmittelbaren Herstellprozess mit Teilefertigung und Montage“, wenngleich Konstruktion und Werkstoff gleichermaßen einen gewissen Einfluss auf die technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit nehmen.

Fügen

Fügen ist „das auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff“ [22], wobei der Zusammenhalt hierbei örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt wird. Damit ist der „Vorgang des Fügens nicht identisch mit dem des Verbindens, da zu Letzterem noch die Formgebung der Verbindung gehört, die den Zweck hat, dass alle zwölf Richtungssinne gesichert sind und nicht nur welche, die durch den Fügevorgang gesichert werden“ [52].

Montage

Nach VDI 2860 bezeichnet man in der industriellen Fertigung unter dem Begriff der Montage „die Gesamtheit aller Vorgänge für den Zusammenbau von

Körpern mit geometrisch bestimmter Form (Längen, Winkel)“ wobei als wesentliche Teiloperationen eines Montageprozesses neben dem Fügen (Primär- montage) auch das Handhaben, Prüfen, Justieren und sonstige Hilfsoperationen (z. B. das Reinigen, Erwärmen oder Kühlen) (Sekundär- montage) aufgeführt werden.

Multi-Material-Design

Im Unterschied zur klassisch monolithischen Bauweise wird unter einem Multi-Material-Design (Abkürzung: MMD) die auf Systemebene ansetzende, technisch, wirtschaftlich und ökologisch optimierte Kombination von artfremden, artverschiedenen oder auch artgleichen Werkstoffen im Zusammenbau mehrerer Einzelbauteile bzw. Komponenten verstanden, die sich wiederum auf Bauteilebene weiter in eine extrinsische (füge- und prozesskettenintensive) Mischbauweise und eine intrinsische (fügeelementlose und funktionsintegrierende) Hybridbauweise aufteilen lässt.

Technisches System

(Technische) Systeme (altgriechisch σύστημα [sýstēma] – das „aus mehreren Teilen zusammengesetzte und gegliederte Ganze“) werden definiert als „künstlich erzeugte geometrisch-stoffliche Gebilde, die einen bestimmten Zweck (Funktion) erfüllen, also Operationen (physikalische, chemische, biologische Prozesse) bewirken“ [51] und dazu innerhalb ihrer Systemgrenze zwischen den geordneten und verknüpften Systemelementen ein Wandeln, Transportieren und/oder Speichern von Stoff (Masse), Energie und/oder Information stattfindet.

Projektpartner

Förderung

**Bundesministerium für
Wirtschaft und Klimaschutz**

Projektträger

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH
Wilhelm-Johnen-Straße
52428 Jülich

Kontakt: ptj@fz-juelich.de

Inhaltliche Beiträge

**Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
wbk Institut für Produktionstechnik**
Kaiserstraße 12
76131 Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Johannes Scholz
Simon Zeidler

Kontakt: juergen.fleischer@kit.edu

**Universität des Saarlandes
Lehrstuhl für Leichtbausysteme**

Campus E3 1
66123 Saarbrücken

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann
Dr.-Ing. Steven Quirin

Kontakt: hans-georg.herrmann@uni-saarland.de

**Universität des Saarlandes
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik**

Campus E2 9
66123 Saarbrücken

Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber
Kristian König
Janis Mathieu

Kontakt: vielhaber@lkt.uni-saarland.de

:em engineering methods AG

Rheinstraße 97
64295 Darmstadt

Dr. Sven Kleiner
Klaus Mai
Benedikt Kneidl

Miguel Betancourt
Tim Arnold

Kontakt: sven.kleiner@em.ag

d.u.h.Group GmbH

Welle 15
33602 Bielefeld

Michael Runge
Markus Gwosdek

Kontakt: michael.runge@duh-group.com

Emm! Solutions GmbH

Alte Renninger Straße 3
71263 Weil der Stadt

Armin Müller
Lukas Auch

Kontakt: armin.mueller@emm-solutions.de

Liebherr Verzahntechnik GmbH

Kaufbeurer Straße 141
87437 Kempten (Allgäu)

Thomas Mattern
Konrad Bechteler

Kontakt: thomas.mattern@liebherr.com

Ottobock SE & Co. KGaA

Max-Näder-Straße 15
37115 Duderstadt

Olaf Kroll-Orywahl
Heiko Glindemann
Andreas Schuh

Kontakt: andreas.schuh@ottobock.de

Qeridoo GmbH

Industriepark Nord 100
53567 Buchholz

Nikolai Boldt
Wilhelm Wenzel

Kontakt: entwicklung@qeridoo.de

Quellenverzeichnis

- [1] A. Hansmersmann, C. Dr. Birenbaum, J. Burkhardt, M. Dr. Schneider, and M. Stroka, "Leichtbau im Maschinen-, Anlagen- und Gerätebau: Herausforderungen - Potenziale - Mehrwerte - Beispiele," Handbuch für den praktischen Gebrauch, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, 2016. Accessed: May 9 2023.
- [2] U. Marx, "Nachhaltigkeit im Maschinenbau: Der Mittelstand ist Teil des Problems," *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 19 Jan., 2022. <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/klimanachhaltigkeit/nachhaltigkeit-im-maschinenbau-mittelstand-ist-teil-des-problems-17720956.html> (accessed: May 9 2023).
- [3] R. Anderl, *Leitfaden Industrie 4.0: Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand*. Frankfurt am Main: VDMA-Verl., 2015.
- [4] *Climate Change Act: climate neutrality by 2045*: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 2021. Accessed: May 9 2023. [Online]. Available: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/climate-change-act-2021-1936846>
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Ed., "Leichtbaustrategie für den Industriestandort Deutschland," Berlin, 2021. Accessed: Jun. 13 2024. [Online]. Available: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/J-L/leichtbaustrategie-der-bundesregierung.html>
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Ed., "Wirtschaft nachhaltig gestalten: Zweiter Ressortbericht Nachhaltigkeit des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie," Berlin, 2021. [Online]. Available: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bmwi-Ressortbericht-Nachhaltigkeit%202020.html>
- [7] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K.-H. Grote, *Konstruktionslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [8] B. Klein and T. Gänsicke, *Leichtbau-Konstruktion: Dimensionierung, Strukturen, Werkstoffe und Gestaltung*, 11th ed. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [9] D. Krause, "Leichtbau," in *Handbuch Konstruktion*, F. Rieg and R. Steinhilper, Eds., München: Hanser, 2012, pp. 463–484.
- [10] O. Helms, "Konstruktion und technologische Umsetzung von hochbeanspruchten Lastenleitungssystemen für neuartige Leichtbaustrukturen in Faserverbundbauweise," Dissertation, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), Technische Universität Dresden, Dresden, 2006.
- [11] W. Hufenbach and O. Helms, "Zum methodischen Konstruieren von Leichtbaustrukturen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen," *Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur - Werkstoffe*, vol. 62, no. 10, pp. 68–74, 2010.
- [12] F. Laufer, D. Roth, and H. Binz, "SUPPORTING ENGINEERS IN LIGHTWEIGHT DESIGN: THE ENERGY DISTRIBUTION ANALYSIS (EDA)," in *Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*, 2018, pp. 829–840.
- [13] C. J. O'Reilly *et al.*, "Life cycle energy optimization: A proposed methodology for integrating environmental considerations early in the vehicle engineering design process," *Journal of Cleaner Production*, vol. 135, pp. 750–759, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.163.
- [14] Dudenredaktion, *Nachhaltigkeit*. [Online]. Available: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Nachhaltigkeit> (accessed: May 9 2023).
- [15] F. Henning and E. Moeller, *Handbuch Leichtbau*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011.
- [16] G. Kopp, N. Burkardt, and N. Majić, "Leichtbaustrategien und Bauweisen," in *Handbuch Leichtbau*, F. Henning and E. Moeller, Eds., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2020, pp. 53–72.
- [17] G. Ellenrieder, T. Gänsicke, M. Goede, and H. G. Herrmann, "Die Leichtbaustrategien," in *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*, H. E. Friedrich, Ed., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, pp. 43–118.
- [18] J. Scholz *et al.*, "Konzept eines systemischen Entwicklungsprozesses zur Hebung von Leichtbaupotenzialen," *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, vol. 116, no. 11, pp. 797–800, 2021, doi: 10.1515/zwf-2021-0182.

- [19] K. König, S. Zeidler, R. Walter, M. Friedmann, J. Fleischer, and M. Vielhaber, "Lightweight creativity methods for idea generation and evaluation in the conceptual phase of lightweight and sustainable design," *Procedia CIRP*, vol. 119, pp. 1170–1175, 2023, doi: 10.1016/j.procir.2023.05.008.
- [20] K. König, J. Mathieu, and M. Vielhaber, "Resource conservation by means of lightweight design and design for circularity—A concept for decision making in the early phase of product development," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 201, p. 107331, 2024, doi: 10.1016/j.resconrec.2023.107331.
- [21] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 4th ed.: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [22] *DIN 8593-0:2003-09, Fertigungsverfahren Fügen_ - Teil_0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- [23] J. Kaspar, S. A. Choudry, and M. Vielhaber, "Concurrent Selection of Material and Joining Technology – Holistically Relevant Aspects and Its Mutual Interrelations in Lightweight Engineering," *Procedia CIRP*, vol. 72, pp. 780–785, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.093.
- [24] J. Kaspar, S. A. Choudry, and M. Vielhaber, "Optimized Decision-Making in Joining Selection by Alternative-Based Material and Design-Oriented Changes," *Procedia CIRP*, vol. 80, pp. 4–9, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.01.057.
- [25] S. Zeidler, J. Scholz, M. Friedmann, and J. Fleischer, "Approach to Develop a Lightweight Potential Analysis at the Interface Between Product, Production and Material," in *Lecture Notes in Production Engineering, Production at the Leading Edge of Technology*, M. Liewald, A. Verl, T. Bauernhansl, and H.-C. Möhring, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 696–704.
- [26] B. Posner, A. Keller, H. Binz, and D. Roth, "HOLISTIC LIGHTWEIGHT DESIGN FOR FUNCTION AND MASS: A FRAMEWORK FOR THE FUNCTION MASS ANALYSIS," *DS 70: Proceedings of DESIGN 2012, the 12th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia*, pp. 1071–1080, 2012. [Online]. Available: <https://www.designsociety.org/publication/32075/HOLIS-TIC+LIGHTWEIGHT+DESIGN+FOR+FUNCTION+AND+MASS%3A+A+FRAMEWORK+FOR+THE+FUNCTION+MASS+ANALYSIS>
- [27] B. Posner, H. Binz, and D. Roth, "Operationalisation of the value analysis for design for lightweight: The function mass analysis," *DS 75-5: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13) Design For Harmonies, Vol. 5: Design for X, Design to X, Seoul, Korea 19-22.08.2013*, pp. 271–280, 2013. [Online]. Available: <https://www.designsociety.org/publication/35004/Operationalisation+of+the+value+analysis+for+design+for+lightweight%3A+The+function+mass+analysis>
- [28] A. Albers, S. Revfi, and M. Spadinger, "Extended target weighing approach - Identification of lightweight design potential for new product generations," *DS 87-4 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17) Vol 4: Design Methods and Tools, Vancouver, Canada, 21-25.08.2017*, pp. 367–376, 2017. [Online]. Available: <https://www.designsociety.org/publication/39685/Extended+target+weighing+approach+--+Identification+of+lightweight+design+potential+for+new+product+generations>
- [29] J. Kaspar *et al.*, "SyProLei - A systematic product development process to exploit lightweight potentials while considering costs and CO2 emissions," *Procedia CIRP*, vol. 109, pp. 520–525, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.05.288.
- [30] B. Klein, *Leichtbau-Konstruktion*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [31] E. Tempelman, "Lightweight Materials, Lightweight Design?," in *Materials Experience*: Elsevier, 2014, pp. 247–258.
- [32] M. F. Ashby, *Materials and the Environment*, 3rd ed.: Butterworth-Heinemann, 2021.
- [33] *DIN EN ISO 14040:2021-02, Umweltmanagement_ - Ökobilanz_ - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO_14040:2006_+ Amd_1:2020); Deutsche Fassung EN_ISO_14040:2006_+ A1:2020*, Berlin.
- [34] *DIN EN ISO 14067:2019-02, Treibhausgase_ - Carbon Footprint von Produkten_ - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung (ISO_14067:2018); Deutsche und*

- Englische Fassung EN_ISO_14067:2018*, Berlin.
- [35] J. Kaspar, T. Luedeke, P. Meiser, and M. Vielhaber, "Sustainable Aspects Regarding a Multi-Criteria & Cross-Component Prediction of Property Change Potentials Within the Pre-Development Phase of Technical Product Systems," *Procedia Manufacturing*, vol. 21, pp. 725–732, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.02.177.
- [36] T. Luedeke and M. Vielhaber, "Holistic Approach for Secondary Weight Improvements," *Procedia CIRP*, vol. 21, pp. 218–223, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.03.139.
- [37] J. Kaspar, T. Luedeke, and M. Vielhaber, "Matrixbasierte Beschreibung von Eigenschaftsänderungen – Ein multikriterieller Ansatz," *DFX 2017: Proceedings of the 28th Symposium Design for X, 4-5 October 2017, Bamberg, Germany*, pp. 111–124, 2017. [Online]. Available: <https://www.designsociety.org/publication/39986/Matrixbasierte+Beschreibung+von+Eigenschafts%C3%A4nderungen+%E2%80%93+Ein+multikriterieller+Ansatz>
- [38] G. Rill, T. Schaeffer, and F. Borchsenius, *Grundlagen und computergerechte Methodik der Mehrkörpersimulation*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023.
- [39] J. H. Ferziger, M. Perić, and R. L. Street, *Numerische Strömungsmechanik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020.
- [40] J. Scholz, L. J. Dilger, M. Friedmann, and J. Fleischer, "A Methodology for Sustainability Assessment and Decision Support for Sustainable Handling Systems," *Procedia CIRP*, vol. 116, pp. 47–52, 2023, doi: 10.1016/j.procir.2023.02.009.
- [41] A. Reuter, V. Müller, and A. Verl, "Disziplinübergreifendes Engineering *," *wt*, vol. 100, no. 5, pp. 399–406, 2010, doi: 10.37544/1436-4980-2010-5-399.
- [42] G. Schweitzer in *VDI-Berichte*. [Online]. Available: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6676082>
- [43] H. van Brussel, "Mechatronics-a powerful concurrent engineering framework," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 1, no. 2, pp. 127–136, 1996, doi: 10.1109/3516.506149.
- [44] R. Isermann, *Mechatronische Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [45] A. Albers and J. Gausemeier, "Von der fachdisziplinorientierten Produktentwicklung zur Vorausschauenden und Systemorientierten Produktentstehung," in *acatech DISKUSSION, Smart Engineering*, R. Anderl, M. Eigener, U. Sandler, and R. Stark, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 17–29.
- [46] K. Ehrlenspiel and H. Meerkamm, *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*, 6th ed. München, Wien: Hanser, 2017. [Online]. Available: <http://www.hanser-fachbuch.de/buch/Integrierte+Produktentwicklung/9783446440890>
- [47] J. Ponn and U. Lindemann, *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [48] *Entwicklung technischer Produkte und Systeme: Modell der Produktentwicklung*, VDI 2221, Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2019.
- [49] *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Grundlagen*, VDI 3633, Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2014.
- [50] *Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme*, VDI/VDE 2206, Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2021. [Online]. Available: <https://www.dinmedia.de/de/technische-regel/vdi-vde-2206/342674320>
- [51] K. Ehrlenspiel, *Integrierte Produktentwicklung: Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion*. München, Wien: Hanser, 1995.
- [52] *Methodische Auswahl fester Verbindungen: Systematik, Konstruktionskataloge, Arbeitshilfen*, VDI 2232, Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2004.