

2 Stand der Forschung

Dieses Kapitel behandelt die *Grundlagen* zur Anforderungs-, Produkt- und Prozessmodellierung. Hierbei wird auf die eigenschaftsbasierte Beschreibung und Modellierung technischer Systeme eingegangen. Abschließend erfolgt die Untersuchung der Rolle von Anforderungen in der Modellierung von Entwicklungsprozessen. *Anwendungsbeispiele* aus dem SFB 666 dienen diesem Buch als Evaluierungsgrundlage. Im Folgenden werden die fertigungstechnologischen Grundlagen des Spaltprofilierens und -biegens angeführt.

2.1 Fertigungstechnologische Grundlagen des Spaltprofilierens und Spaltbiegens

Fertigungsverfahren sind nicht nur zur stofflich-geometrischen Realisierung der Produktgestalt geeignet. Vielmehr bergen sie Potenziale neue und innovative Produktlösungen aufgrund der veränderten Materialeigenschaften zu realisieren.³⁸ Fertigungsverfahren induzierte Lösungen und ihre Eigenschaften können frühzeitig in den Entwicklungsprozess integriert werden.³⁹

Das Fertigungsverfahren Spaltprofilieren stellt zahlreiche Möglichkeiten bereit, um *innovative Blechprodukte mit verzweigten Strukturen* zu realisieren. Die Gegenüberstellung von konventionellen Blechprodukten mit den Vorteilen von Blechprodukten mit verzweigten Strukturen zeigt, wie die fertigungstechnologischen Möglichkeiten systematisch zur Ausschöpfung von Produkt- und Prozessinnovationspotenzialen genutzt werden können.

2.1.1 Konventionelle Blechprodukte

Viele technische Produkte werden aus Blech hergestellt.⁴⁰ Bleche liegen als Halbzeuge vor. Sie können aus Eisen- oder Nichteisenwerkstoffen bestehen und weisen geringe Dickenabmessungen auf.⁴¹ Sie liegen entweder als Blechband, aufgewickelt in Rollenform, oder als flächige Blechtafeln vor.⁴² Bleche weisen große Variationsmöglichkeiten an verfügbaren Nennblechstärken auf. Diese reichen von

³⁸ Vgl. Tekkaya et al. (2015), S. 629.

³⁹ Vgl. ebd., S. 629-630.

⁴⁰ Vgl. Chahadi et al. (2007), S. 27.

⁴¹ Vgl. Pahl et al. (2013), S. 622.

⁴² Vgl. ebd., S. 622-623.

wenigen Mikrometern bei kaltgewalzten Blechen bis zu mehreren Zentimetern bei warmgewalzten Stahlblechen.⁴³ Bleche sind kostengünstig zu beschaffen, verhältnismäßig leicht mit vor- und nachgelagerten Fertigungsverfahren in ihrer Gestalt zu verändern, gut verformbar und weisen glatte Oberflächen auf.

Die nachteiligen Eigenschaften, wie das Ausbeulen und Knicken von druckbelasteten Blechen, können durch *verzweigte Strukturen* kompensiert werden. Entweder ist der Kraftfluss durch konstruktive Maßnahmen gezielt zu verändern oder die Blechbauteile sind in der Krafteinleitungsebene mit Längs- und Querverstrebungen zu verstärken.⁴⁴

2.1.2 Blechbauteile mit verzweigten Strukturen

Konventionelle Blechprodukte in der *Differentialbauweise* zeichnen sich häufig durch nachträglich aufgeschweißte Verzweigungen aus. Die Einflüsse von Schweißverfahren, wie Einbrand- und Endkraterzonen, wirken sich nachteilig auf die Material- und Oberflächeneigenschaften von verzweigten Blechprodukten aus. Die veränderten Eigenschaften führen zu einer erhöhten Korrosionsanfälligkeit des Blechprodukts.⁴⁵

Die *Integralbauweise* bewirkt die Funktionsverdichtung und reduziert die Anzahl an Schnittstellen. Sie bedingt zusätzliche Anforderungen aufgrund der integral zu fertigenden Strukturen. Höhere Fertigungs-, Entwicklungs- und Werkzeugkosten werden durch die großen Stückzahlen der Serienproduktion und den reduzierten Füge- und Montageaufwand kompensiert.⁴⁶

Das Blech kann in einer *kontinuierlichen Fließfertigung* mit (Spalt-)Profilierverfahren und weiteren vor- und nachgelagerten Umformprozessen in die endgültige Produktgestalt überführt werden. Als Ergebnis liegt das mehrfach kaltverformte Blechprodukt in integraler Blechbauweise vor. Hieraus resultiert ein vielfältiges Produktspektrum (siehe Abbildung 6):

- Blechprofile mit spaltprofilierten Flanschen und flächige Bauteile mit spaltprofilierten, versteifenden Stegstrukturen (siehe Abbildung 6, oben)
- Hohlkammerprofile und Verbindungselemente (siehe Abbildung 6, Mitte)
- Prozess- und funktionsintegrierte multifunktionale Blechprodukte, Linearführungen und -systeme (siehe Abbildung 6, unten)




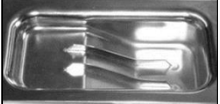
⁴³ Vgl. Pahl et al. (2013), S. 622-623.

⁴⁴ Vgl. ebd., S. 624.

⁴⁵ Vgl. Fügenschuh et al. (2007), S. 37; ebenso Krause (2012a), S. 469.

⁴⁶ Vgl. Krause (2012a), S. 468; ebenso Hoenow, Meißner (2014), S. 47.

Blechprofile mit spaltprofilierten Flanschen und flächige Bauteile mit spaltprofilierten Stegen

Spaltprofilierter Flansch	Blechprofil mit spaltprofilierten Flanschen	Gekrümmtes spaltprofiliertes Blechprofil	Tiefgezogenes Bauteil mit Stegen
			

Spaltprofilierte und -gebogene Hohlkammerprofile und Verbindungselemente

Einkammerprofil	Mehrkammerprofil	Einrenkverbindung	Schnappverbindung
			

Prozess- und funktionsintegrierte multifunktionale Blechprodukte und Linearsysteme





Spaltprofil mit gefügten Formelementen	Spaltprofilierte Linearführung	Multifunktionale Blechprodukte	Multifunktionale Linearsysteme
			

Abbildung 6: Produktspektrum verzweigter Blechprodukte des SFB 666⁴⁷

⁴⁷ Bildnachweise: (von oben links) Fachgebiet pmd (2016); ebd.; ebd.; Ringler, Groche (2008), S. 71; (von mitte links) Vgl. Groche, Schmitt (2010), S. 5; vgl. ebd.; Groche et al. (2012), S. 90; Fachgebiet pmd (2016); (von unten links) Fachgebiet pmd (2016); ebd.; ebd.; ebd.

2.1.3 Fertigung verzweigter Blechstrukturen durch Spaltprofilieren und -biegen

Die kontinuierlichen Blechmassivumformverfahren *Spaltprofilieren* und *Spaltbiegen* zählen zur Gruppe der Druckumformverfahren.⁴⁸ Sie ermöglichen die Herstellung von verzweigten Blechbauteilen in Integralbauweise in einer kontinuierlichen Fließfertigung. Herkömmliche Umformverfahren, wie die Walzprofilier- und Gesenkbiegeverfahren, erzeugen Materialdopplungen zur Erzielung einer Steifigkeitserhöhung des Bauteils.⁴⁹ Für die Herstellung verzweigter Blechstrukturen benötigen diese Umformverfahren weitere Füge- und Trennverfahren, die zu einer Schwächung des Blechprodukts an den Füge- und Trennstellen führen und einen zusätzlichen Montageaufwand bedingen.⁵⁰ Aluminiumbauteile mit Verzweigungen werden im Leichtbau häufig durch das Fertigungsverfahren Strangpressen erzeugt. Strangpressen eignet sich nicht für die Verarbeitung von Stählen.⁵¹

Die Nachteile von differenziell gefertigten Blechprodukten entfallen bei den Fertigungsverfahren Spaltprofilieren und -biegen. Das *Verfahrensprinzip* setzt sich aus einem ortsfesten Werkzeugsystem mit den verfahrensprinziprelevanten Größen zusammen. Das Werkzeugsystem besteht aus zwei stumpfwinkligen Spalt- und Hilfswalzen. Zu den *verfahrensprinziprelevanten Größen* zählen alle Wirk- und Prozessgrößen, die das Verfahrensprinzip im Verfahrensprinzipmodell realisieren, wie bspw. die Umformkraft des Werkzeugsystems und die Vorschubgeschwindigkeit des umzuformenden Blechs (siehe Abbildung 7).

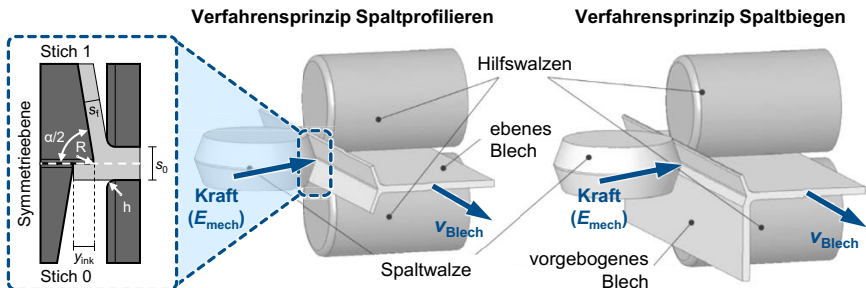


Abbildung 7: Verfahrensprinzip des Spaltprofilierens und -biegens⁵²

⁴⁸ Vgl. Vucic, Groche (2007), S. 68.

⁴⁹ Vgl. Birkhofer, Wäldele (2007), S. 65; ebenso Ringler, Groche (2007), S. 73 und Vucic, Groche (2007), S. 67.

⁵⁰ Vgl. ebd.

⁵¹ Vgl. Munirathnam et al. (2007), S. 85.

⁵² Bildnachweise: (links) Eigene Darstellung, in Anlehnung an Groche et al. (2012), S. 97; (rechts) Vgl. Ringler, Groche (2007), S. 75.

Das Blechhalbzeug wird mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit bearbeitet. Die Zustellung der Spaltwalze erfolgt gegenüber der Bandkante mit der inkrementellen Stichtiefe y_{ink} .⁵³ Freie Flansche werden über die gesamte Bearbeitungslänge an den Bandkanten des Blechhalbzeugs ausgeformt.⁵⁴ Das flexible Spaltprofilieren ermöglicht die freie Ausformung von formkontinuierlichen Flanschen in der Blechebene.

Die Breite der Hilfswalzen nimmt in der Produktionslinie mit sequenziell angeordneten Werkzeugsystemen stetig ab, sodass größere Flanschinnenwinkel erzeugt werden können. Die flexible Anordnung der Werkzeugsysteme mit umformenden, spanenden und fügenden Fertigungsverfahren ermöglicht die Herstellung vielfältiger Blechprodukte mit verzweigten Strukturen.⁵⁵

Aus der elasto- und kontinuumsmechanischen Sicht führt die Blechmassivumformung durch Spaltprofilieren zu einem *hydrostatischen Druckspannungszustand* in (2).⁵⁶

$$\underline{\underline{\sigma}} = \sigma_{ij} \vec{e}_i \otimes \vec{e}_j \quad \text{mit} \quad \sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{bmatrix} \sigma_0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{bmatrix} \quad \text{bzw.} \quad \sigma_{ij} = \sigma_0 \delta_{ij} \quad (2)$$

Beim hydrostatischen Spannungszustand sind die Normalspannungen zugleich die Hauptspannungen, da jedes beliebige, gedrehte Achsensystem mit den Transformationskoeffizienten α_{ki} und α_{lj} in (3) ein Hauptachsensystem darstellt.⁵⁷

$$\sigma'_{kl} = \sigma_{ij} \alpha_{ki} \alpha_{lj} = \sigma_0 \delta_{ij} \alpha_{ki} \alpha_{lj} = \sigma_0 \alpha_{kj} \alpha_{lj} = \sigma_0 \vec{e}'_k \cdot \vec{e}'_l = \sigma_0 \delta_{kl} \quad (3)$$

Das Fertigungsverfahren Spaltbiegen erzeugt Flansche an vorgebogenen Blechstrukturen. Hierzu erfolgen vorgelagerte Biegeverfahren, sodass analog zum Verfahrensprinzip des Spaltprofilierens die Flansche über zwei Hilfswalzen und Spaltwalzen an der vorgebogenen Blechseite ausgeformt werden. Die *Verfahrensgrenzen* des Spaltprofilierens liegen in der Ausformung zweier Flansche mit restringierten Abmessungen an der Blechkante. Erst das Fertigungsverfahren Spaltbiegen realisiert Flanschausformungen an der Blechoberfläche.⁵⁸

⁵³ Vgl. Groche et al. (2012), S. 87.

⁵⁴ Vgl. Ringler, Groche (2007), S. 74.

⁵⁵ Vgl. Munirathnam et al. (2007), S. 94.

⁵⁶ Vgl. Ringler, Groche (2007), S. 74.

⁵⁷ Vgl. Gross et al. (2014), S. 85.

⁵⁸ Vgl. Ringler, Groche (2007), S. 74.

2.1.4 Fertigungsverfahren induzierte Eigenschaften spaltprofilierter Blechprodukte

Die durch das Fertigungsverfahren Spaltprofilieren hergestellten Blechprodukte weisen charakteristische, *fertigungsverfahren induzierte Eigenschaften* auf (siehe Abbildung 8).⁵⁹ Diese beziehen sich sowohl auf die Form und die Abmessungen der Makrogeometrie als auch auf die Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften der Mikrogeometrie.⁶⁰

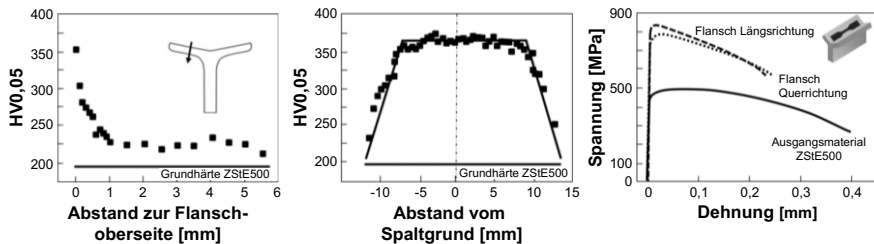


Abbildung 8: Verfahren induzierte Eigenschaften von spaltprofilierten Produkten⁶¹

Die durch *Spaltprofilieren* hergestellten Blechbauteile besitzen an einer Bandkante jeweils zwei Flansche als *verfahren induzierte Gestaltelemente*. Die Flansche zeichnen sich durch ein UFG-Gefüge⁶² aus. UFG-Gefüge weisen eine hohe Härte mit einer Härtesteigerung um bis zu 100 % auf. Des Weiteren verfügen sie über niedrige Rautiefen, die um bis zu 65 % reduziert sind.⁶³ Die spaltprofilierten Blechprodukte sind, aufgrund des UFG-Gefüges in den Flanschen, prädestiniert für den Einsatz als Linearführungen. Der Härtegradient von spaltprofilierten Blechkanten nimmt in Tiefenrichtung zu.

Die *fertigungsverfahren induzierten Eigenschaften* sind entlang der gesamten Blechlänge nahezu konstant. Die maximal erzeugbaren Flanschlängen betragen 30 mm.⁶⁴ Als bevorzugte Werkstoffe werden HSLA-Stähle⁶⁵ verarbeitet. Durch

⁵⁹ Die detaillierte Betrachtung von verfahrensprinziprelevanten und verfahren induzierten Eigenschaften erfolgt in Kapitel 5.

⁶⁰ Vgl. Groche et al. (2012), S. 86.

⁶¹ Müller et al. (2008), S. 72.

⁶² Das Akronym UFG bezeichnet ultrafeinkörnige Gefüge (engl. ultrafine-grained).

⁶³ Im Vergleich zum Werkstoff ZStE500, vgl. Groche et al. (2012), S. 87-88.

⁶⁴ Vgl. ebd., S. 87.

⁶⁵ HSLA steht als Akronym für High Strength Low Alloy (dt. hochfest, niedriglegiert).

ihre Duktilität besitzen sie ein ausreichendes Formänderungsvermögen im Werkzeugsystem bei einer gleichzeitig hohen Festigkeit.⁶⁶ Mehrfach verzweigte, spaltprofilierte Blechprodukte weisen eine hohe Steifigkeit und Betriebsfestigkeit aufgrund ihrer fertigungsverfahrensinduzierten Eigenschaften auf.⁶⁷ Die Herstellung von geschlossenen Hohlkammerprofilen erfordert mehrere Spaltprofilier- und -biegeverfahren in Kombination mit weiteren Füge- und Trennverfahren,⁶⁸ wodurch Fertigungsprozessketten entstehen.

2.1.5 Zwischenfazit

Die Fertigungsverfahren Spaltprofilieren und Spaltbiegen bieten vielfältige Möglichkeiten zur Produktion von integral verzweigten, komplexen Blechprodukten in einer *kontinuierlichen Fließfertigung*. Die Fertigungsverfahren ermöglichen die Produktion von multifunktionalen, funktionsintegrierten Blechprodukten. Die Integration von (dis-)kontinuierlich angeordneten Formelementen in ein spaltprofiliertes und -gebogenes Blechhalbzeug trägt zur Realisierung von zusätzlichen Funktionen bei. Bezogen auf die Realisierung einer Antriebsfunktion entsteht durch die prozessintegrierten Formelemente ein vollwertiges Linearsystem, das *Produkt- und Prozessinnovationspotenziale* ausschöpft.

2.2 Produkt- und Prozessinnovationen

2.2.1 Innovationsbegriff

Der Innovationsbegriff ist in der alltäglichen Unternehmenswelt allgegenwärtig. Innovationen gelten als Haupttreiber für den Unternehmenserfolg⁶⁹ durch ihre wirtschaftliche Verwertbarkeit.⁷⁰ Gemäß der lateinischen Sprache (lat. innovatio) stellen Innovationen maßgebende Erneuerungen und Veränderungen dar. Der Innovationsbegriff umfasst sowohl Produkt- als auch Prozessinnovationen.⁷¹ Unter einer *Produktinnovation* wird die Verbesserung und Neuerung von technischen Produkten verstanden, die neue Eigenschaften aufweisen.⁷² Die *Prozessinnovation*

⁶⁶ Vgl. Groche et al. (2012), S. 87.

⁶⁷ Vgl. Fügenschuh et al. (2007), S. 37.

⁶⁸ Vgl. Birkhofer, Wäldele (2007), S. 65.

⁶⁹ Vgl. Schuh, Bender (2012a), S. 1.

⁷⁰ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 95.

⁷¹ Vgl. Schumpeter (1939), S. 84-85; ebenso Gausemeier, Plass (2014), S. 176 und Gürtler, Lindemann (2016), S. 483.

⁷² Vgl. Schindler (2012), S. 398.

zielt auf Neuerungen von Prozessen ab.⁷³ Häufig handelt es sich bei Prozessinnovationen um Neuerungen in Fertigungsprozessen aufgrund neuer Fertigungsverfahren und -technologien.⁷⁴

Die genaue Untersuchung der verfügbaren Fertigungstechnologien spielt eine entscheidende Rolle, um die auftretende Unsicherheit in Innovationsprojekten zu reduzieren.⁷⁵ Produkt- und Prozessinnovation bedingen sich gegenseitig.⁷⁶ Prozessinnovationen können somit von Produktinnovationen induziert sein, wie das folgende Beispiel 1 zeigt.

Beispiel 1: Prozessinnovationspotenziale in der Fertigung

Das Fertigungsverfahren Spaltprofilieren bietet *Fertigungsprozessinnovationspotenziale*, die zur gezielten Ausschöpfung von *Produktinnovationspotenzialen* genutzt werden können.⁷⁷ Das Gleiche gilt auch umgekehrt.

Die Verwendung einer Zahnstange als Wirkelement zur Realisierung einer Antriebsfunktion führt zu der Frage, wie die Zahnstange in der Fertigungsprozesskette zu fügen ist. Das *prozessintegrierte mechanische Fügen* kann verwendet werden, um *funktionale Formelemente* in das Blechhalbzeug während der kontinuierlichen Fließfertigung zu fügen (siehe Abbildung 9).⁷⁸ Die Ausschöpfung der Fertigungsprozessinnovationspotenziale realisiert die prozessintegrierte Lösung.

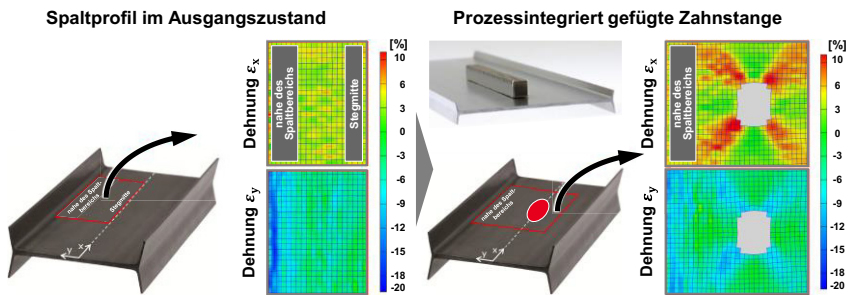


Abbildung 9: Prozessintegriert mechanisch gefügte Zahnstange⁷⁹

⁷³ Vgl. Gürtler, Lindemann (2016), S. 483.

⁷⁴ Vgl. Voß et al. (2003), S. 14; ebenso Gausemeier, Plass (2014), S. 172.

⁷⁵ Vgl. Albers et al. (2016c), S. 137.

⁷⁶ Vgl. Schuh, Bender (2012a), S. 2.

⁷⁷ Vgl. Wagner et al. (2015), S. 84.

⁷⁸ Vgl. ebd., S. 87.

⁷⁹ Eigene Darstellung, in Anlehnung ebd., S. 86; Bildnachweis (prozessintegriert gefügte Zahnstange): Meisenbach Verlag (2016).

ROPOHL definiert vier Phasen eines Innovationsprozesses für technische Produkte, wobei die letzten drei Phasen auf SCHUMPETER zurückgehen.⁸⁰ In der *Kognitionsphase* wird der wissenschaftliche Bedarf für ein neues Produkt oder einen neuen Prozess erkannt. Die Kognition ist nicht zwingend im Innovationsprozess erforderlich. Inventionen können auch ohne wissenschaftliche Kognition aufgrund ihrer Erfindungshöhe überzeugen.⁸¹

Die *Invention* überführt die Produkt- oder Prozessidee in ein zweckorientiertes, technisches Konzept. Die Innovation wird erst durch die erfolgreiche Einführung der Invention, d. h. des Produkts oder Prozesses, am Markt erreicht.⁸² Die *Diffusionsphase* beschreibt die Entwicklung der gesellschaftlichen Akzeptanz und des Durchsetzungsvermögens einer am Markt eingeführten Innovation. Der Innovationsprozess setzt somit immer die gesellschaftliche Akzeptanz und wirtschaftliche Verwertung einer Produkt-/Prozessinvention nach ihrer *erfolgreichen Vermarktung* voraus.⁸³

Definition 1: Innovation

Innovationen bezeichnen Produkt- und Prozessinventionen, die durch eine erfolgreiche Einführung am Markt technisch, wirtschaftlich und gesellschaftlich verwertet werden.

Die Art der zu erzielenden Neuerung bedingt die Unterscheidung von vier *Innovationsarten* in Zusammenhang mit der allgemeinen Systemtheorie.

Inkrementelle Innovationen resultieren aus kleinen Änderungen der Komponenten und ihrer Beziehungen. Es bestehen geringe technische und ökonomische Risiken. *Architekturelle Innovationen* entstehen durch die strukturelle Neuordnung von bekannten Komponenten. Der Austausch einzelner Komponenten führt zu *modularen Innovationen*. *Radikale Innovationen* stellen komplette Neuentwicklungen von unbekannten Systemen dar. Sie weisen die größte Informationsunsicherheit auf und bergen die größten technischen und ökonomischen Risiken.⁸⁴

Kritisch an dieser Unterteilung von Innovationsarten ist die *retrospektive Sicht* auf Innovationen hinsichtlich ihres Neuheitsgrades. Dadurch ist es kaum möglich, den Markterfolg eines Produkts auf die technische und wirtschaftliche Realisierung

⁸⁰ Vgl. Ropohl (2009), S. 258-261.

⁸¹ Vgl. ebd., S. 259-260.

⁸² Vgl. Sorli, Stogik (2009), S. 57; ebenso Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 371 und Gürtler, Lindemann (2016), S. 483.

⁸³ Vgl. Schuh, Bender (2012a), S. 2.

⁸⁴ Vgl. Ropohl (2009), S. 260.

einer Invention zurückzuführen.⁸⁵ ALBERS et al. führen alternativ ein universelles Kategorisierungsschema für Innovationsprojekte an, welches den unterschiedlichen Innovationsprojekten gerecht wird.⁸⁶ Das Kategorisierungsschema unterscheidet bei *Kundenbeziehungen* zwischen Business-to-Business (B2B) und Business-to-Customer (B2C) Innovationsprojekten. Darüber hinaus umfasst das Kategorisierungsschema die verwendeten *Kerntechnologien* des Innovationsprojekts, entsprechend ihrer Reifegrade in der Forschung, im Markt, in der Industrie und im Unternehmen.⁸⁷

2.2.2 Market Pull und Technology Push

Die wirtschaftswissenschaftliche Innovationsforschung unterscheidet zwei Impulse zur Auslösung von Innovationen: die *nachfragebedingte Induktion* (Market Pull) und die *autonome Induktion* (Technology Push). ABELL gliedert die beiden Innovationsarten in ein allgemeingültiges Ordnungsschema (siehe Abbildung 10).

Innovationsart	Geschäftsfeld-dimension		
	Mittel, Fähigkeit, Technologie	Zweck, Funktion, Kundenproblem	Markt, Segment, Kundengruppe
Technology Push	gegeben	gesucht	gesucht
Market Pull	gesucht	gegeben	gegeben

Abbildung 10: Technology Push und Market Pull im ABELL-Schema⁸⁸

Die *nachfragebedingte Induktion* führt zur Nachfrage nach neuen Produkten, Technologien oder Verfahren.⁸⁹ Sie bildet im Rahmen des *Market Pulls*⁹⁰ die Grundlage für Produkt- und Prozessinnovationen. Die Produkte oder Verfahren bedienen umfassend die Bedürfnisse des Marktes,⁹¹ erfüllen die marktseitigen Anforderungen und weisen die vom Kunden geforderten Eigenschaften auf.

⁸⁵ Vgl. Albers et al. (2016c), S. 136.

⁸⁶ Vgl. ebd., S. 137.

⁸⁷ Vgl. ebd.

⁸⁸ Vgl. Trommsdorff, Steinhoff (2013), S. 28 nach Abell (1980), S. 15.

⁸⁹ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 111.

⁹⁰ Auch bekannt als Demand Pull, vgl. Schuh, Bender (2012a), S. 2.

⁹¹ Vgl. ebd.

Technologien umfassen das Wissen über die generischen, naturwissenschaftlichen Zusammenhänge.⁹² Dieses Wissen kann für die Lösung technischer Probleme angewendet werden. Die Technik stellt die zweckmäßige, problemorientierte Anwendung der Technologie dar.⁹³ Die *autonome Induktion* des *Technology Push* bedingt die Identifikation von marktseitigen Bedürfnissen zur gezielten Etablierung des technologiebedingten Angebots im Markt.⁹⁴ Die initiale Entwicklung von neuen Produkten, Technologien und Verfahren erfolgt losgelöst von einer unmittelbaren Nachfrage am Markt. Die Lösung für ein unbekanntes Problem liegt bereits vor.⁹⁵ Aufgrund der Technologievorteile kann mittel- bis langfristig ein neuer Markt entstehen.⁹⁶ Sowohl der Market Pull als auch der Technology Push ermöglichen die gewinnbringende Vermarktung von innovativen Produkt- und Prozesslösungen, unter der Voraussetzung von antizipativen Analysen der Produktlebenslaufprozesse.⁹⁷

Die Verknüpfung von Inventionen mit Innovationen erfolgt über den *Technologie-Lebenszyklus*. Sobald die initiale Invention einen umsetzbaren Reifegrad erreicht hat, wird sie in einem vermarktaren Produkt verwertet.⁹⁸ Aus technologiegetriebenen Entwicklungsprojekten entstehen somit Produkt- und Prozessinnovationen. Diese Unterscheidung zeigt deutlich, dass der Innovationsgrad einer Lösung von einem angemessenen Reifegrad der entwickelten Technologie, d. h. einer entsprechenden Technologiereife, abhängig ist.

2.2.3 Zwischenfazit

Innovationen entstehen durch die gezielte Markteinführung und -akzeptanz neuer Produkte, Technologien oder Verfahren. *Produkt- und Prozessinnovationen* sichern den Erfolg von Unternehmen in den hochdynamischen, globalisierten Märkten unserer heutigen Zeit.

Die Ansätze des *Technology Push* und des *Market Pulls* vereint der Neuheitsgrad von Innovationen. Dieser ist durch die geeignete Kombination von Zweck und Mitteln bestimmt.⁹⁹ Die scheinbar höheren *Erfolgchancen* von Market-Pull-Inno-

⁹² Vgl. Trommsdorff, Steinhoff (2013), S. 11.

⁹³ Vgl. ebd.

⁹⁴ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 111; ebenso Schuh, Bender (2012a), S. 9-10.

⁹⁵ Vgl. Schuh, Bender (2012b), S. 30.

⁹⁶ Vgl. ebd.

⁹⁷ Vgl. Albers, Gausemeier (2012), S. 23.

⁹⁸ Vgl. Feldhusen et al. (2013b), S. 294.

⁹⁹ Vgl. Schuh et al. (2012b), S. 102.

vationen stehen einem erhöhten *Misserfolgsrisiko* von Technology-Push-Innovationen gegenüber.¹⁰⁰ Technologiegetriebene Innovationen weisen im Gegensatz zu Market-Pull-Innovationen größere Anwendungspotenziale auf, welche Misserfolgsrisiken abschwächen.¹⁰¹ Die im technologiegetriebenen Entwicklungsprozess auftretende Unsicherheit muss möglichst minimiert werden.

Integral verzweigte Blechprodukte, wie sie mit den Fertigungsverfahren Spaltprofilieren und Spaltbiegen sowie mit weiteren vor- und nachgelagerten Fertigungsverfahren hergestellt werden, weisen einen hohen technologischen Neuheitsgrad auf.¹⁰² Sie ermöglichen technologieinitiierte Produktinnovationen und schöpfen die Prozessinnovationspotenziale des Fertigungsprozesses aus.

2.3 Grundlagen zu Modellen und Methoden

Zur Untersuchung der Theorie technischer Systeme werden in der Konstruktionswissenschaft Modelle verwendet, um komplexe Systemzusammenhänge zu analysieren.¹⁰³ Aus diesen Untersuchungen ergeben sich Handlungsanweisungen, Methoden und allumfassende Methodiken. Die konstruktionsmethodische Unterstützung des Entwicklers dient der zielgerichteten und systematischen Entwicklung technischer Systeme.

2.3.1 Modelle

Modelle vereinfachen und abstrahieren¹⁰⁴ komplexe Sachverhalte der Realität zur simplifizierten Behandlung komplexer Probleme.¹⁰⁵ Erst eine maximale Simplizität bei minimaler Komplexität, ohne die Gesamtsystemkomplexität zu vernachlässigen, führt zum Anwendungserfolg eines Modells.¹⁰⁶

Basierend auf der Definition nach STACHOWIAK, verfügen Modelle über drei charakteristische Merkmale.¹⁰⁷ Modelle abstrahieren als Abbild, Vorbild oder Repräsentation eines Originals¹⁰⁸ stets den komplexen Aufbau eines realen Systems. Das *Abbildungsmerkmal* bezieht sich ebenfalls auf hierarchische Super- und Submo-

¹⁰⁰ Vgl. Trommsdorff, Steinhoff (2013), S. 28.

¹⁰¹ Vgl. ebd.

¹⁰² Vgl. Schuh et al. (2012b), S. 104.

¹⁰³ Vgl. Lindemann (2009), S. 11.

¹⁰⁴ Vgl. VDI 2221 (1993), S. 41.

¹⁰⁵ Vgl. Haberfellner et al. (2015), S. 237; ebenso Ebert (2014), S. 44.

¹⁰⁶ Vgl. Meboldt (2008), S. 2.

¹⁰⁷ Vgl. Stachowiak (1973), S. 131-133.

¹⁰⁸ Vgl. ebd., S. 129.

delle, sodass abstrahierte, modellbezogene Darstellungen weiterer Modelle möglich sind.¹⁰⁹ Modelle stellen die für das Modellverständnis relevanten Modellelemente dar. Aspekte der Realität, die für das Modellverständnis unwesentlich sind, werden hinsichtlich des *Verkürzungsmerkmals* nicht abgebildet.¹¹⁰ Damit sind Modelle stets Vereinfachungen komplexer Sachverhalte des realen Systems.¹¹¹ Ferner liegt Modellen ein bestimmter Zweck zugrunde, der über das *pragmatische Merkmal* mit einer begrenzten Gültigkeitsdauer verfolgt wird.¹¹²

Definition 2: Modell

Modelle sind allgemeine, partiell vereinfachte Abbilder realer Systeme, die einem bestimmten Zweck dienen.¹¹³

Das folgende Beispiel 2 zeigt die charakteristischen Aspekte der Modellbildung anhand eines mechanischen Problems.

Beispiel 2: Mechanische Modellbildung eines Blechs mit Durchgangsbohrung

Ein Blech mit einer Durchgangsbohrung (Radius a) wird unter einachsigem Zug σ_0 beansprucht (siehe Abbildung 11). Die im geschwächten Lochbereich resultierenden Spannungen können analytisch berechnet werden. Aufgrund der geringen Blechstärke gegenüber den Flächenmaßen wird das reale System als ebenes Problem der *Scheibe mit Kreisloch* verkürzt abgebildet.

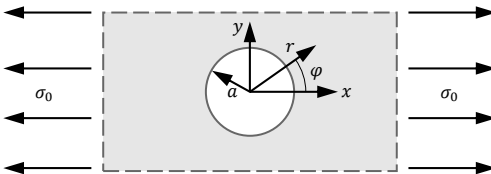


Abbildung 11: Mechanische Modellbildung eines Blechs mit Bohrung

Die im Umformprozess auftretende Anisotropie hat einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Blechs.¹¹⁴ Geometrische Imperfektionen und die Anisotropie des Blechs sind in der *mechanischen Modellbildung* nicht erfasst.

¹⁰⁹ Vgl. Stachowiak (1973), S. 131.

¹¹⁰ Vgl. ebd., S. 132.

¹¹¹ Vgl. Lindemann (2009), S. 11.

¹¹² Vgl. Stachowiak (1973), S. 132-133.

¹¹³ Vgl. Bungartz et al. (2013), S. 3-5.

¹¹⁴ Vgl. Tekkaya et al. (2015), S. 644.

Als Lösungsansatz für das mechanische Problem dient die *Bipotentialfunktion* $\Delta\Delta F = 0$ in (4) zur Berechnung der Spannungskomponenten σ_r , σ_φ und $\tau_{r\varphi}$.¹¹⁵

$$F(r, \varphi) = C_1 r^2 + C_2 \ln \frac{r}{a} + C_3 r^2 \ln \frac{r}{a} + f(r) \cos 2\varphi \quad (4)$$

Als Annahme zur eindeutigen Bestimmung der Randbedingungen am Kreisquerschnitt, gilt die Scheibe als unendlich in der Ebene ausgedehnt. Die Spannungskomponenten sind im Randbereich des Kreisquerschnitts identisch Null. Die *AIRYSche Spannungsfunktion* in (5) ergibt sich aus der Nutzung der allgemeinen Lösung der EULERSchen Differentialgleichung.¹¹⁶

$$F(r, \varphi) = \frac{\sigma_0}{4} \left[r^2 - 2a^2 \ln \frac{r}{a} - \frac{(r^2 - a^2)^2}{r^2} \cos 2\varphi \right] \quad (5)$$

Die Spannungskomponenten σ_{rr} , $\sigma_{\varphi\varphi}$ und $\sigma_{r\varphi}$ ergeben sich aus der zweifachen Ableitung der AIRYSchen Spannungsfunktion unter Einhaltung der Gleichgewichtsbedingungen, sodass die Kompatibilitätsbedingung für isotropes, linear elastisches Materialverhalten mit $\Delta\Delta F = 0$ erfüllt ist.

In den wissenschaftlichen Fachdisziplinen dienen Modelle unterschiedlichen Zwecken: zur Veranschaulichung komplexer Zusammenhänge als *Demonstrationsmodelle*, zur praxisnahen Validierung theoretischer Hypothesen als *Experimentalmodelle*, zur gebündelten Vermittlung gewonnener, wissenschaftlicher Erkenntnisse als *theoretische Modelle* und zur operationalisierten Planung und Entscheidungsfindung als *operative Modelle*.¹¹⁷ Modelle werden, dieser Systematik folgend, in vielfältiger Art und Weise in der Produktentwicklung angewendet. *Metamodelle* definieren die einzuhaltende Syntax für die Verwendung von Modellen, ohne hierbei einen zeitlichen Ablauf vorzugeben.¹¹⁸ Der Konstrukteur wechselt kontinuierlich zwischen unterschiedlichen Modellen. Erst die Verwendung von geeigneten Modellen ermöglicht konstruktive Festlegungen im Entwicklungsprozess.

Problemmodelle bilden die Abweichungen des problembehafteten Ist-Zustands vom angestrebten Soll-Zustand ab.¹¹⁹ Sie dienen der komplexitätsreduzierenden Dekomposition von komplexen Problemen in überschaubare Teilprobleme, um ein verbessertes Problemverständnis zu erlangen.¹²⁰

¹¹⁵ Becker, Gross (2002), S. 56-57.

¹¹⁶ Ebd., S. 57.

¹¹⁷ Vgl. Stachowiak (1973), S.138-139.

¹¹⁸ Vgl. Meboldt (2008), S. 203.

¹¹⁹ Vgl. Lindemann (2009), S. 22.

¹²⁰ Vgl. Ponn, Lindemann (2011), S. 20.

Ziel-/Anforderungsmodelle nützen der gezielten Klärung der Aufgabenstellung durch Anforderungen.¹²¹ Veränderte strategische Unternehmensziele führen, mit zunehmendem Konkretisierungsgrad der Produktmodelle, zur dynamischen Änderung des Anforderungs-/Zielmodells, sodass die Partialmodelle kontinuierlich miteinander abzugleichen sind.¹²²

Prinzipmodelle dienen der Abbildung der Wirkstruktur zur geometrisch-stofflichen Realisierung des Produktkonzepts.¹²³ Zu unterscheiden sind *Wirkprinzipmodelle*, welche die Funktionserfüllung des zu entwickelnden technischen Produkts konkretisieren, und *Verfahrensprinzipmodelle*, welche die stofflich-geometrische Änderung des entwickelten technischen Produkts im Fertigungsprozess induzieren. *Gestaltmodelle* bilden die Gesamtheit der geometrischen Eigenschaften¹²⁴ eines technischen Produkts in technischen Zeichnungen, virtuellen 3D-CAD-Modellen und Prototypen ab.¹²⁵

Entwicklungs-/Strukturmodelle dienen der zielgerichteten Abstraktion des Entwicklungsprozesses und der Entscheidungsfindung. Sie nutzen weitere Partialmodelle zur Spezifikation des zu entwickelnden technischen Produkts.¹²⁶ Zu ihnen zählen Prozess-¹²⁷ und Funktionsmodelle, Prinzip- und Handskizzen sowie technische Zeichnungen.¹²⁸

Verhaltensmodelle bilden die funktionalen Zusammenhänge technischer Produkte¹²⁹ zur Voraussage des Verhaltens ab. Hierzu können Simulationen dynamischer Systemzustände, basierend auf definierten Eingangsgrößen, durchgeführt werden.¹³⁰ *Verifikationsmodelle* befassen sich mit der Analyse von Produkteigenschaften¹³¹ zur theoretischen Beurteilung der haptischen Wahrnehmung eines Produkts und der Produktqualität. Des Weiteren umfassen sie Funktionstests mit Prototypen. *Validierungsmodelle* fokussieren hingegen den Funktionstest des physisch realisierten Produkts in realen Einsatzumgebungen und -bedingungen.

¹²¹ Vgl. Vajna et al. (2009), S. 148.

¹²² Vgl. Lindemann (2009), S. 22; ebenso Muschik (2011), S. 5.

¹²³ Vgl. Vajna et al. (2009), S. 148.

¹²⁴ Vgl. ebd., S. 149.

¹²⁵ Vgl. Albers, Wintergerst (2014), S. 153.

¹²⁶ Vgl. Ponn, Lindemann (2011), S. 20.

¹²⁷ Vgl. Hubka, Eder (1996), S. 118.

¹²⁸ Vgl. Lindemann (2009), S. 22.

¹²⁹ Vgl. VDI 2206 (2004), S. 46.

¹³⁰ Vgl. Hubka, Eder (1996), S. 118.

¹³¹ Vgl. Ponn, Lindemann (2011), S. 20.

ALBERS und LOHMEYER überführen die charakteristischen Merkmale eines Modells in die spezifische Sicht der Produktentwicklung. Modelle folgen einer globalen Durchgängigkeit im Entwicklungsprozess. Die *horizontale Durchgängigkeit* bezieht sich auf die Verwendung von Modellen in allen Phasen des Produktlebenslaufs. Die *vertikale Durchgängigkeit* charakterisiert die stufenlos skalierbare Detaillierung von Modellen. Erst die *Konsistenz* von Modellen gewährleistet ihre Widerspruchsfreiheit im Entwicklungsprozess.¹³²

2.3.2 Methode und Methodik

Methoden sind ein Teil von einer übergeordneten, holistischen Methodik.¹³³ Die *Methodik* impliziert eine „planmäßige Vorgehensweise zur Erreichung eines bestimmten Ziels nach einem Vorgehensplan unter Einschluss von Strategien, Methoden, Werkzeugen und Hilfsmitteln“¹³⁴. Die *Methodenanwendung* kann bewusst oder unbewusst erfolgen,¹³⁵ wodurch die zweckmäßige und zielorientierte Überführung eines problembehafteten Anfangszustands in einen lösungsspezifischen Endzustand gewährleistet wird.¹³⁶ Die Zustandsänderung erfolgt durch eine präskriptive, systematische, zielorientierte und regelbasierte Vorgehensweise.¹³⁷ Der *operative Einsatz* von Methoden ist infolge ihrer einsatzspezifischen Adaption erfolgreich,¹³⁸ um verhaltensbezogene, kognitive Aspekte des Anwenders zu unterstützen.¹³⁹

2.3.3 Zwischenfazit

Modelle ermöglichen die *komplexitätsreduzierte Abbildung* realer Sachverhalte. Erst die zweckmäßige Modellbildung ermöglicht den Zugang zur Analyse von komplexen Zusammenhängen realer Systeme. Sie bildet die Grundlage für eine zweckmäßige Synthese. Methoden werden häufig in Entwicklungsprozessen angewendet, weil sie positive Effekte auf die Risikominimierung und auf die Kreativitätssteigerung kognitiver Prozesse haben.

Im industriellen Einsatz unterliegt der Methodeneinsatz einer gewissen *Methodenskepsis*.¹⁴⁰ Die Skepsis ist begründet in der komplizierten Handhabung von

¹³² Vgl. Albers, Lohmeyer (2012), S. 411-412.

¹³³ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 146.

¹³⁴ Ebd.

¹³⁵ Vgl. ebd.

¹³⁶ Vgl. Ponn, Lindemann (2011), S. 22.

¹³⁷ Vgl. Lindemann (2009), S. 57; ebenso Ebert (2014), S. 42.

¹³⁸ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 146.

¹³⁹ Vgl. Haberfellner et al. (2015), S. 25.

¹⁴⁰ Vgl. Grabowski, Geiger (1997), S. 111.

vielen Methoden, die oftmals mit einem initialen Einführungsaufwand verbunden sind. Die positiven Effekte durch den Methodeneinsatz sind meist nicht direkt wahrnehmbar. Sie treten zeitverzögert ein.¹⁴¹

2.4 Modellierung technischer Systeme und Produkte

Technische Systeme dienen der Lösung technischer Aufgaben.¹⁴² Technische Systeme sind ein wesentlicher Bestandteil der Systemtechnik.¹⁴³ Sie erlaubt die Darstellung von technischen Systemen anhand ihrer *Eigenschaften*¹⁴⁴ und stellt die methodische Unterstützung für die *Analyse und Synthese* von technischen Systemen bereit.¹⁴⁵ Gleiches gilt für den Zusammenhang zwischen der Systemtheorie und der Theorie des Konstruktionsprozesses. Die äquivalente Berücksichtigung der beiden Theorien führt zu einer anwendbaren Konstruktionsmethodik in der Konstruktionspraxis.¹⁴⁶

Eine sorgfältige Betrachtung der Systemtechnik bedingt sich aus der stetig wachsenden *Komplexität* von technischen Produkten. Nur eine generische Betrachtung von technischen Produkten im systemtheoretischen Kontext eröffnet den Zugang zu einer ganzheitlichen und produktneutralen Sichtweise, um die vielfältigen, strukturellen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Produktelementen zu erfassen.¹⁴⁷

2.4.1 Systembegriff

Sowohl aus der altgriechischen Bezeichnung (gr. σύστημα: das aus mehreren Teilen zusammengesetzte und gegliederte Ganze¹⁴⁸) als auch aus der lateinischen Bezeichnung (lat. systema: Ordnung¹⁴⁹) leitet sich die Bedeutung des deutschen Systembegriffs ab. Bereits ARISTOTELES erkannte, dass eine geordnete, strukturierte Menge im absoluten Ganzen besteht – das „pan“ im „holos“.

¹⁴¹ Vgl. Lindemann (2009), S. 58-59.

¹⁴² Vgl. Pahl et al. (2007), S. 39.

¹⁴³ Die Systemtechnik stellt die technische Ausprägung der Systemtheorie dar. Die Systemtechnik verfolgt „als interdisziplinäre Wissenschaft [...] Methoden, Verfahren und Hilfsmittel zur Analyse, Planung, Auswahl und optimalen Gestaltung komplexer Systeme [bereit zu stellen].“ Pahl et al. (2007), S. 17.

¹⁴⁴ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 19.

¹⁴⁵ Vgl. ebd.

¹⁴⁶ Vgl. ebd.

¹⁴⁷ Vgl. ebd., S. 20-21.

¹⁴⁸ Duden (2016)

¹⁴⁹ Stowasser et al. (2006), S. 501.

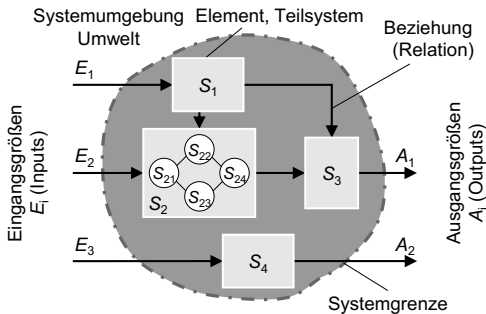


Abbildung 12: Allgemeiner Aufbau von Systemen¹⁵⁰

Entsprechend den etymologischen Zusammenhängen, stellen *Systeme* eine definierte Menge von Elementen dar,¹⁵¹ die aufgrund der Eigenschaften¹⁵² und Funktionen¹⁵³ untereinander, mit benachbarten Systemen oder mit der Umgebung durch vielfältige Beziehungen und Relationen¹⁵⁴ verknüpft sind (siehe Abbildung 12).¹⁵⁵ Hierdurch erfüllen sie einen definierten Zweck,¹⁵⁶ der nicht durch die Systemelemente alleine realisierbar wäre.¹⁵⁷ Die Relationen bilden in ihrer Gesamtheit die *Systemstruktur*.¹⁵⁸

Die *Systemeigenschaften* ergeben sich aus dem Zusammenwirken der Systemelemente – nicht nur aus den Eigenschaften der einzelnen Elemente und ihren Beziehungen.¹⁵⁹ Die Beziehungen bestimmen in ihrer Gesamtheit die *Systemkomplexität*. Die Abhängigkeiten zwischen den Systemelementen bedingen die Emergenz, sowohl von erwünschten als auch von unerwünschten Systemeigenschaften. Die Untergliederung eines Systems in unter- und übergeordnete Teilsysteme bildet die

¹⁵⁰ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 22; ebenso Pahl et al. (2007), S. 18.

¹⁵¹ Elemente können auch unter- und übergeordnete Teilsysteme darstellen, vgl. Haberfellner et al. (2015), S. 34.

¹⁵² Vgl. Fernandes, Machado (2016), S. 3.

¹⁵³ Vgl. Haberfellner et al. (2015), S. 32.

¹⁵⁴ Bei den Beziehungen kann es sich um Material, Informationsfluss-, Lagebeziehungen und Wirkzusammenhänge handeln, vgl. Haberfellner et al. (2015), S. 32.

¹⁵⁵ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 17; ebenso Eder, Hosnedl (2010), S. 61.

¹⁵⁶ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 21; ebenso Lindemann (2009), S. 10 und Fernandes, Machado (2016), S. 3.

¹⁵⁷ Vgl. National Aeronautics and Space Administration (2007), S. 3.

¹⁵⁸ Vgl. Lindemann (2009), S. 10; ebenso Eder, Hosnedl (2010), S. 61 und Haberfellner et al. (2015), S. 33.

¹⁵⁹ Vgl. Fernandes, Machado (2016), S. 3.

Systemhierarchie.¹⁶⁰ Die Menge von Systemelementen und -strukturen ist durch eine (hypothetische) *Systemgrenze* von der Umgebung abgegrenzt.¹⁶¹ Die Systemgrenze trennt den definierbaren und veränderbaren Abbildungsbereich eines Systems von der Umgebung. Die Umgebung kann, im Gegensatz zum System, nicht durch den Entwicklungsprozess verändert werden.¹⁶² Die Wahl der Systemgrenze erfolgt zweckmäßig, in Abhängigkeit von der gewünschten *Granularität* der Systembetrachtung.¹⁶³ Die Wirkbeziehung zu angrenzenden Systemen erfolgt über Eingangswirkgrößen (Inputs) und Ausgangswirkgrößen (Outputs).

Das *Systemverhalten* wird aus der Überführung der Eingangswirkgrößen in die Ausgangswirkgrößen ersichtlich.¹⁶⁴ Es kann vorzugsweise statisch oder dynamisch ausgeprägt sein¹⁶⁵ und lässt sich durch die einzelnen Systemzustände annähern.¹⁶⁶ Dies erlaubt die Beschreibung des Systemverhaltens als eine zustandsbezogene Eigenschaftsänderung, die sich aus den wirkstrukturellen Zusammenhängen zwischen Ein- und Ausgangswirkgrößen ergibt.¹⁶⁷

Definition 3: System

Systeme bestehen aus einer Menge von Elementen, die miteinander in Beziehungen stehen. Die Elemente und Beziehungen können über Eigenschaften beschrieben werden. Subsysteme untergliedern das Gesamtsystem hierarchisch. Das System ist in eine Umgebung eingebettet und von dieser durch die Systemgrenze abgegrenzt.

2.4.1.1 Systemkonzepte

Die Systemtheorie unterscheidet drei *Systemkonzepte* (siehe Abbildung 13). Diese differenzieren sich entsprechend des zugrundeliegenden Betrachtungszwecks bei der Systemanalyse und fokussieren jeweils einen Systemaspekt.¹⁶⁸ Die Systemkonzepte sind nicht einander exkludierend, sondern entfalten ihr volles Potenzial durch ihre integrale Anwendung.¹⁶⁹

¹⁶⁰ Vgl. Lindemann (2009), S. 10.

¹⁶¹ Vgl. Feldhusen et al. (2013a), S. 238; ebenso Pahl et al. (2007), S. 17; Pohl (2008), S. 57; Feldhusen et al. (2014), F2 und Fernandes, Machado (2016), S. 3.

¹⁶² Vgl. Pohl, Rupp (2015b), S. 13.

¹⁶³ Vgl. Fernandes, Machado (2016), S. 3; ebenso Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 21 und Pahl et al. (2007), S. 17.

¹⁶⁴ Vgl. Lindemann (2009), S. 10; ebenso Pahl et al. (2007), S. 40.

¹⁶⁵ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 21.

¹⁶⁶ Vgl. Lindemann (2009), S. 10.

¹⁶⁷ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 17.

¹⁶⁸ Vgl. Ropohl (2009), S. 75.

¹⁶⁹ Vgl. ebd., S. 77.

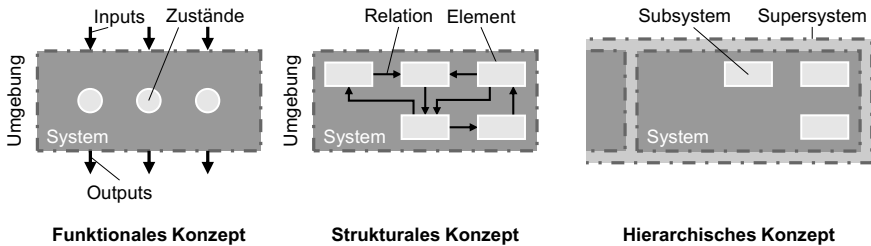


Abbildung 13: Systemkonzepte¹⁷⁰

Das *funktionale Systemkonzept* fokussiert das System als Black Box zwischen den wahrnehmbaren Eigenschaften der Ein- und Ausgangswirkgrößen. Der Fokus liegt auf dem Systemverhalten.¹⁷¹ Die Zustandsänderung kann durch die zeitdiskreten Systemzustände beschrieben werden.¹⁷² Das *strukturelle Systemkonzept* beleuchtet die Systemeigenschaften von Systemelementen und ihren strukturellen Relationen im integralen, ganzheitlichen Kontext des Gesamtsystems.¹⁷³ Für die dynamischen Wirkmechanismen ist die Systemstruktur von Interesse.¹⁷⁴ Das *hierarchische Systemkonzept* betont die granulare Gliederungstiefe von Systemen.¹⁷⁵ Systemelemente von komplexen Systemen fungieren nach dem hierarchischen Konzept als weitere Subsysteme.¹⁷⁶ Die Subsysteme können wiederum Supersysteme für untergeordnete Subsysteme darstellen. Diesen Kerngedanken greift die INCOSE¹⁷⁷ durch den Begriff des *Systems-of-Systems (SoS)* auf. Die gebündelten Systeme von SoS zeichnen sich über eine gesteigerte Funktionalität gegenüber isolierten Einzelsystemen aus.¹⁷⁸

2.4.1.2 Systemkomplexität

Neue, moderne Produkte zeichnen sich als komplexe Systeme durch eine Vielzahl von Merkmalen aus, die deutlich höhere Ansprüche an den Entwicklungsprozess stellen. Die Systemkomplexität bedingt sich einerseits aus der Wahl der Systemgrenze. Andererseits resultiert sie aus den zu erfüllenden Anforderungen an das zu

¹⁷⁰ Vgl. Ropohl (2009), S. 76.

¹⁷¹ Vgl. ebd., S. 75-76.

¹⁷² Vgl. ebd.

¹⁷³ Vgl. ebd., S. 75.

¹⁷⁴ Vgl. Haberfellner et al. (2015), S. 41.

¹⁷⁵ Vgl. Ropohl (2009), S. 77.

¹⁷⁶ Vgl. Schulze (2016), S. 161

¹⁷⁷ Akronym für International Council on Systems Engineering.

¹⁷⁸ Vgl. Kaffenberger et al. (2013), S. 351.

entwickelnde System.¹⁷⁹ Komplizierte und komplexe Systeme können nach UL-RICH und PROBST unterschieden werden.

Die *Komplexität*¹⁸⁰ von Systemen bedingt sich nicht nur aus einer großen Anzahl an Systemelementen, sondern auch durch ihre vielfältigen, zeitlich veränderlichen Beziehungen¹⁸¹ innerhalb stark ausgeprägter, heterogener Strukturen.¹⁸² Unterschiedliche Systemzustände begünstigen die Systemkomplexität durch ein possibilistisches Systemverhalten.

Die *Kompliziertheit*¹⁸³ richtet sich an das menschliche Erfassungsvermögen von undurchsichtigen und stark vernetzten Zusammenhängen. Komplizierte Systeme werden meist aufgrund eines mangelnden konstruktivistischen Verständnisses und der Informationsunsicherheit als Systemkomplexität wahrgenommen.¹⁸⁴ Im Vergleich zur Kompliziertheit, adressiert die Komplexität das gesamte System.

Basierend auf einem gemeinsamen Grundmodell zur Abbildung von komplexen und komplizierten Systemen, erfolgt die Unterscheidung von Systemtypen nach ihrer *Diversität* und *Dynamik/Veränderlichkeit* (siehe Abbildung 14).

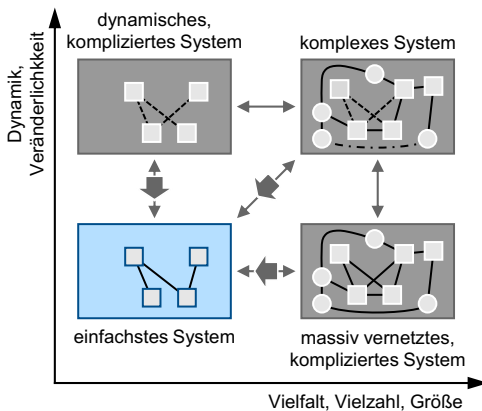


Abbildung 14: Systemtypen im Kontext der Systemkomplexität¹⁸⁵

¹⁷⁹ Vgl. Schindler (2012), S. 398.

¹⁸⁰ lat. complexus: umfassend, vgl. Stowasser et al. (2006), S. 102.

¹⁸¹ Vgl. Baumberger et al. (2007), S. 3.

¹⁸² Vgl. Schuh (2005), S. 5; ebenso Lindemann (2009), S. 8 und Fernandes, Machado (2016), S. 5.

¹⁸³ lat. complicare: zusammenfallen, vgl. Stowasser et al. (2006), S. 102.

¹⁸⁴ Vgl. Meboldt (2008), S. 79.

¹⁸⁵ Vgl. Haberfellner et al. (2015), S. 38.

Einfache Systeme bestehen aus einer geringen Anzahl an Elementen und Beziehungen. Ihr dynamisches Verhalten ist gering ausgeprägt,¹⁸⁶ wodurch das mögliche Systemverhalten eingeschränkt ist.¹⁸⁷ *Massiv vernetzte, komplizierte Systeme* weisen eine größere Anzahl und eine größere Vielfalt stark vernetzter Elemente auf. Die Voraussage des Systemverhaltens ist aufgrund des hohen Vernetzungs- und Diversitätsgrads durch Simulationen möglich.¹⁸⁸ *Dynamische, komplizierte Systeme* zeichnen sich durch ihre zeitliche Veränderbarkeit aus, welche die Systembeziehungen betreffen. Die hohe Systemdynamik erschwert die Voraussage des deterministischen Systemverhaltens.¹⁸⁹ *Komplexe Systeme* sind von großer Diversität geprägt und verhalten sich in ihrer Dynamik probabilistisch.¹⁹⁰ Die *Systemintegration* und die steigende Anzahl zu realisierender *Funktionen* sind die Treiber für die Systemkomplexität.¹⁹¹ Durch multiple, hochvernetzte Systemstrukturen können Anforderungen den Systemelementen nicht eindeutig zugeordnet werden. Dies bedingt hochgradig vernetzte Strukturen zwischen den Anforderungen und den Systemelementen.¹⁹² Die Clusterbildung ermöglicht die Identifikation von Systemelementen, die jeweils eine Anforderung erfüllen. Systemelemente sollen häufig mehrere Anforderungen zeitgleich erfüllen, sodass Kompromisse bei der Anforderungserfüllung und Lösungsfindung zu finden sind.

2.4.2 Technische Systeme

HUBKA begründet den Begriff des technischen Systems. Technische Gebilde sind unter systemtechnischen Betrachtungen als technische Systeme aufzufassen. Als materielles Objekt und Träger von Eigenschaften¹⁹³ dient das *technische System* der Problemlösung.¹⁹⁴ Technische Systeme sind „künstlich erzeugte geometrisch-stoffliche Gebilde, die einen bestimmten Zweck (Funktion) erfüllen, also Operationen (physikalische, chemische, biologische Prozesse) bewirken.“¹⁹⁵ Sie abstrahieren komplexe Zusammenhänge innerhalb der festgelegten Systemgrenze. Damit reduzieren sie die Komplexität.¹⁹⁶

¹⁸⁶ Vgl. Haberfellner et al. (2015), S. 38.

¹⁸⁷ Vgl. Schuh (2005), S. 5.

¹⁸⁸ Vgl. Haberfellner et al. (2015), S. 38-39.

¹⁸⁹ Vgl. ebd., S. 39; ebenso Schuh (2005), S. 5.

¹⁹⁰ Vgl. Haberfellner et al. (2015), S. 39.

¹⁹¹ Vgl. Deubzer et al. (2012), S. 681.

¹⁹² Vgl. ebd., S. 682.

¹⁹³ Vgl. Eder, Hosnedl (2010), S. 110-111.

¹⁹⁴ Vgl. ebd., S. 101.

¹⁹⁵ Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 27.

¹⁹⁶ Vgl. ebd., S. 28.

Definition 4: Technische Systeme

Technische Systeme sind künstlich erzeugte Gebilde. Ihre Eigenschaften werden stofflich-geometrisch realisiert. Technische Systeme dienen einem übergeordneten Zweck, indem sie aufgrund ihrer Funktionserfüllung zur Realisierung von Prozessen beitragen.

Bei der Erstellung von technischen Systemen sind Ingenieursleistungen beteiligt. Der Mensch nimmt an der Entstehung und Verwendung von technischen Systemen teil, obwohl die soziale Dimension technischer Systeme oftmals vernachlässigt wird.¹⁹⁷ *Anforderungen* bilden in der Systementwicklung die Grundlage für die Entwicklung eines optimalen Systems. Sie stellen die Bewertungsgrundlage dar, um zu eruieren, welche Lösung aufgrund ihrer Systemeigenschaften¹⁹⁸ die aus der Aufgabenstellung abgeleiteten Anforderungen am besten erfüllt.¹⁹⁹

2.4.3 Technische Produkte

Technische Produkte genügen der Definition von technischen Systemen. Technische Systeme vereinen gegenüber technischen Produkten die Prozess- und Verfahrenssicht. Wird überwiegend das geometrisch-stoffliche Gebilde eines technischen Systems betrachtet und die prozess- und verfahrenstechnische Sicht ausgeblendet, liegt die Definition des technischen Produkts vor.²⁰⁰ Technische Produkte können analog zu technischen Systemen über ihre Eigenschaften beschrieben und modelliert werden.²⁰¹

Definition 5: Technische Produkte

Technische Produkte sind künstlich erzeugte, stofflich-geometrische Systeme, die durch die Produktfunktion ihren Zweck erfüllen und einen Nutzen stiften. Ein technisches Produkt ist vollständig über die Angabe der Produkteigenschaften beschrieben.

Die *Produktstruktur*²⁰² setzt sich aus der strukturierten Anordnung der einzelnen Komponenten des technischen Produkts zusammen.²⁰³ Die *Produktarchitektur*

¹⁹⁷ Vgl. Ropohl (2009), S. 31.

¹⁹⁸ Die Systemeigenschaften werden aus der Systemanalyse gewonnen, vgl. Pahl et al. (2007), S. 18.

¹⁹⁹ Vgl. ebd.

²⁰⁰ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 27-28.

²⁰¹ Vgl. ebd.

²⁰² Der Begriff der Baustruktur ist ebenfalls gebräuchlich und wird in der konstruktionsmethodischen Literatur häufig synonym verwendet.

²⁰³ Vgl. Krause (2012b), S. 660; ebenso Schuh (2005), S. 119.

kann im Gegensatz zur Produktstruktur unternehmens- und projektspezifisch ausgeprägt sein.²⁰⁴

Die Produktarchitektur umfasst das *Mapping* zwischen funktionalen Merkmalen der Funktion und gestaltbestimmenden Merkmalen der Komponenten in der Produktstruktur.²⁰⁵ Bedingt durch die immer größer werdende Bedeutung von Dienstleistungen bei der Erzeugung des Kundennutzens zeigt sich ein anhaltender Wandel des Produktbegriffs.²⁰⁶ Der einst materiell geprägte Produktbegriff wandelt sich zunehmend in eine erweiterte Definition, welche die Integration von Dienstleistungen fokussiert. Sach- und Dienstleistungen stiften in hybriden Leistungsbündeln²⁰⁷ den Kundennutzen als sogenannte Produkt-Service-Systeme.²⁰⁸

In diesem Buch wird die Entwicklung *technischer Produkte* in der Form von stofflich-geometrischen Objekten fokussiert. Daher wird der Begriff des technischen Produkts innerhalb dieses Buchs konsequent verwendet.

2.4.4 Zwischenfazit

Die *Systemtheorie* ermöglicht die Untersuchung komplexer Sachverhalte in einer komplexitätsreduzierenden, abstrahierenden, zweckmäßigen und zielgerichteten Sichtweise. Erst die Systemtheorie ermöglicht die Analyse und Synthese technischer Systeme. Neue Trends des Systems Engineering fordern zunehmend das Bestreben einer modellbasierten, durchgängigen Systementwicklung in Form des *Model-Based Systems Engineering (MBSE)*.²⁰⁹

Die Wahl einer zweckmäßigen Systemgrenze ist essenziell für die *Komplexitätsreduktion* und die Abgrenzung des Untersuchungsrahmens bei der Analyse von komplexen Systemen. Die Kombination unterschiedlicher Systemkonzepte ermöglicht eine gezielte Systemanalyse und -synthese. Da technische Produkte der Definition technischer Systeme genügen, sind Analyse und Synthese bei der Entwicklung von technischen Produkten anwendbar.

²⁰⁴ Vgl. Förg et al. (2016), S. 100.

²⁰⁵ Vgl. ebd., S. 101.

²⁰⁶ Vgl. Spath, Dangelmaier (2016), S. 3.

²⁰⁷ Vgl. Gausemeier et al. (2016), S. 13.

²⁰⁸ Vgl. Spath, Dangelmaier (2016), S. 5.

²⁰⁹ Vgl. Beihoff et al. (2014), S. 38.

2.5 Eigenschaftsbasierte Beschreibung und Modellierung technischer Systeme und Produkte

Die Beschreibung und Modellierung technischer Systeme und Produkte erfolgt über die Angabe ihrer Eigenschaften. Selbst kleine Systeme weisen bereits eine große Anzahl an Eigenschaften auf. Ähnliche Systeme können anhand ihrer Eigenschaften unterschieden werden. Eine *Eigenschaft* besteht aus einem *Merkmal* mit einer entsprechenden *Ausprägung*.²¹⁰ Im folgenden Verlauf dieses Buchs werden Eigenschaften über die Angabe ihrer Merkmale modelliert, da definitionsgemäß jedem Merkmal eine entsprechende Ausprägung zugewiesen ist.

Die Verwendung von Eigenschaften, als zentraler Beschreibungsstandard von technischen Produkten, ist besonders geeignet für algorithmenbasierte Entwicklungsprozesse. Aufgrund des strikt formalen Aufbaus von Eigenschaften reduzieren sie die Produktbeschreibung auf die nötigsten Angaben und können formalisiert verarbeitet werden.

2.5.1 Klassifizierung von Eigenschaften

In der konstruktionswissenschaftlichen Fachliteratur existiert eine stark ausgeprägte Diversität bezüglich des Eigenschaftsbegriffs mit unterschiedlichen Klassifizierungsansätzen. Als gemeinsamer Kerngedanke werden Eigenschaften nach der *Festlegbar- und Beeinflussbarkeit* durch den Konstrukteur unterschieden.

HUBKA führt eine indifferente Klassifizierung von Eigenschaften an. Dabei unterscheidet er zwölf Eigenschaftsklassen (siehe Abbildung 15). Zu differenzieren sind Konstruktionseigenschaften, innere und äußere Eigenschaften.²¹¹ Diese Unterteilung erweist sich als zweckmäßig für die Konstruktionswissenschaft. Anforderungen fordern die Umsetzung von bestimmten äußeren, manchmal auch inneren Eigenschaften. *Äußere Eigenschaften* sind außerhalb des betrachteten Systems beobachtbar. Sie umfassen die Beziehungen der Systemelemente zur Systemumgebung. *Innere Eigenschaften* sind schwer zu identifizieren und festzulegen, um das geforderte Systemverhalten zu erzielen. *Konstruktionseigenschaften* stellen die elementaren Eigenschaften des zu entwickelnden technischen Systems dar. Der Konstrukteur kann die elementaren Konstruktionseigenschaften direkt festlegen. Alle Eigenschaften sind auf die elementaren Konstruktionseigenschaften zurückführbar. Die eigenschaftsbasierten Zusammenhänge von abstrakten zu konkreten Modellierungsebenen sind bei der Entwicklung technischer Systeme über das *Mapping* beschrieben. Das gleiche Systemverhalten kann beim Mapping über

²¹⁰ Vgl. Lindemann (2009), S. 160.

²¹¹ Nach HUBKA und EDER erfolgt die Präzisierung des Begriffsverständnisses hinsichtlich elementarer Konstruktionseigenschaften, vgl. Hubka, Eder (1996), S. 111.

unterschiedliche, strukturelle Anordnungen von gleichen oder von verschiedenen Systemelementen erzielt werden.²¹²

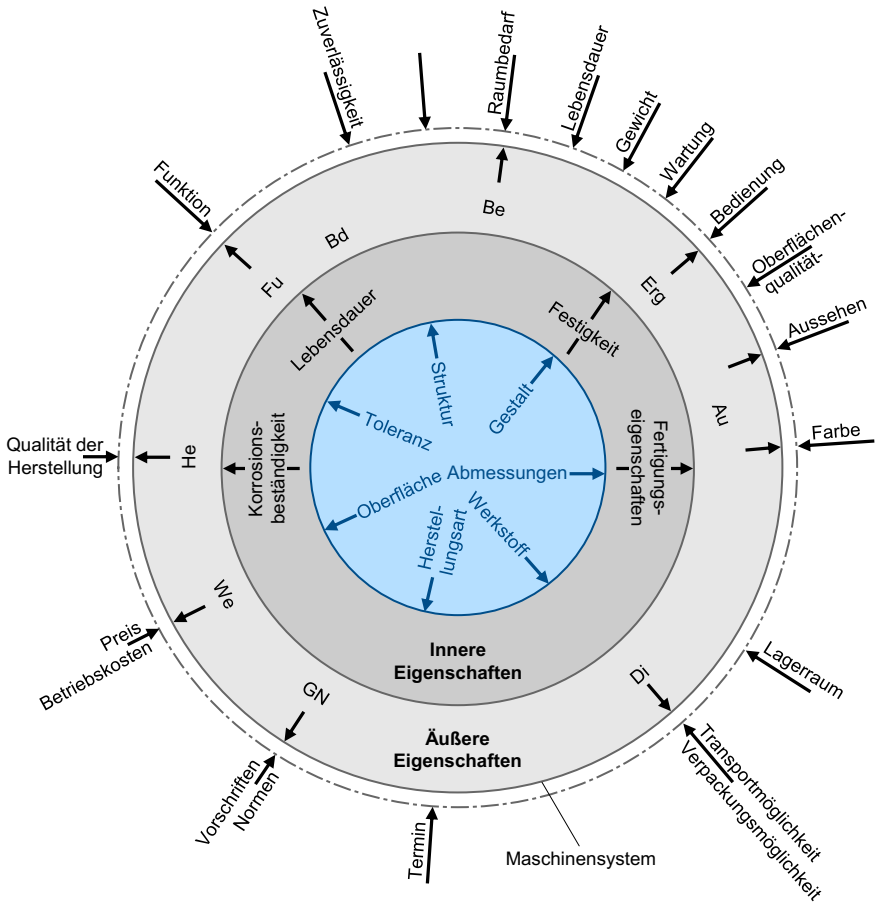


Abbildung 15: Eigenschaftsklassen²¹³

Die DIN 2330 unterscheidet zwischen Beschaffenheits-, Funktions- und Relationsmerkmalen (siehe Abbildung 16).²¹⁴ *Beschaffenheitsmerkmale*²¹⁵ bezeichnen

²¹² Vgl. Hubka, Eder (1996), S. 111.

²¹³ Vgl. ebd.

²¹⁴ Vgl. DIN 2330 (2013), S. 7-13.

²¹⁵ In diesem Zusammenhang entsprechen die Merkmale den Eigenschaften.

Eigenmerkmale eines Gegenstands.²¹⁶ Übertragen auf das technische Produkt, sind Beschaffenheitsmerkmale zum Beispiel Abmessungen und Werkstoffe, von denen alle anderen Merkmale abhängen. Sie werden als direkte Merkmale unmittelbar vom Konstrukteur festgelegt.²¹⁷ *Funktionsmerkmale* beschreiben den Zweck eines technischen Produkts aufgrund der Funktionserfüllung.²¹⁸ Damit definieren sie die inneren Eigenschaften eines technischen Systems.²¹⁹ *Relationsmerkmale* beschreiben die Relationen zwischen zwei Gegenständen.²²⁰ Sie entstehen aus dem Zusammenwirken von mehreren Objekten.

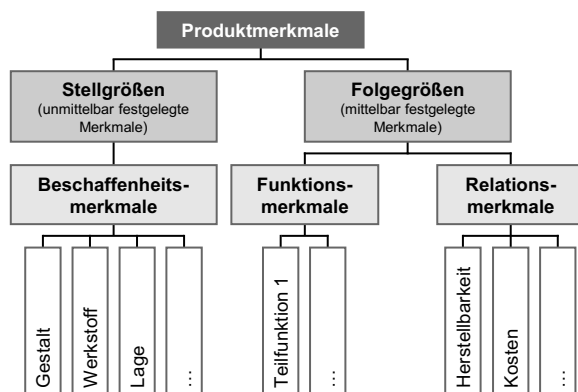


Abbildung 16: Unterschiedliche Merkmale²²¹

EHRENSPIEL und MEERKAMM betonen, dass Relationsmerkmale erst im Kontext anderer Systeme von Relevanz sind. Sie beziehen sich auf Verformungen, Passungen, Geräusche, Umweltauswirkungen und Kosten.²²² Indirekte Merkmale (Funktions- und Relationsmerkmale) folgen mittelbar den festgelegten Beschaffenheitsmerkmalen.²²³

SIMONEK unterscheidet Konstruktions- und Funktionsgrößen. Konstrukteure legen die *Konstruktionsgrößen* direkt fest. Diese Größen definieren das entwickelte

²¹⁶ Vgl. DIN 2330 (2013), S. 7.

²¹⁷ Vgl. Lindemann (2009), S. 160.

²¹⁸ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 30.

²¹⁹ Vgl. ebd., S. 422.

²²⁰ Vgl. DIN 2330 (2013), S. 8.

²²¹ Vgl. Hubka, Eder (1996), S. 111.

²²² Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 30.

²²³ Vgl. Lindemann (2009), S. 160.

System in seiner Topologie, Geometrie und stofflichen Realisierung.²²⁴ Veränderliche *Funktionsgrößen* ergeben sich aus der Festlegung von Konstruktionsgrößen.²²⁵ Damit folgt auch die Definition von SIMONEK der mittelbaren Eigenschaftsabhängigkeit.

TJALVE differenziert in Zusammenhang mit dem Produktlebenslauf zwischen erwünschten und unerwünschten Eigenschaften. Die *erwünschten Eigenschaften* sind geforderte Eigenschaften, die bereits bei der Entwicklung des technischen Produkts zur Funktionserfüllung berücksichtigt werden müssen. *Unerwünschte Eigenschaften* treten aufgrund von Interdependenzen zwischen erwünschten Eigenschaften auf.²²⁶ In Zusammenhang mit den direkt bestimmbar *Grundeigenschaften* nimmt TJALVE Bezug auf *Struktur- und Elementeigenschaften*. Die Struktur umfasst die Elemente des technischen Produkts und ihre Relationen. Die Elemente eines technischen Produkts sind über die Form, den Werkstoff, die Abmessungen und die Oberfläche bestimmt.²²⁷ Die *verwirklichten Eigenschaften* sind die realen Eigenschaften des technischen Produkts. Sie ergeben sich aus der fertigungstechnischen Realisierung von Grundeigenschaften. Die Aufgabe des Konstruktionsprozesses ist es, durch Manipulation der Grundeigenschaften die erwünschten Eigenschaften zu erfüllen.²²⁸

VAJNA unterscheidet in der Autogenetischen Konstruktionstheorie (AKT)²²⁹ drei Eigenschaftsklassen. *Geforderte Eigenschaften* resultieren aus Produkt- und Kundenanforderungen. Sie beschreiben den zu verwirklichenden Zielzustand des technischen Produkts. *Resultierende Eigenschaften* beziehen sich auf seinen aktuellen Zustand. Sie hängen von den *definierbaren Eigenschaften* ab, die direkt vom Konstrukteur festgelegt werden können. Die Gesamtheit der definierbaren Eigenschaften beschreibt das technische Produkt.

SUH grenzt im Rahmen des Axiomatic Designs²³⁰ Functional Requirements und Design Parameters ab. Die *Design Parameters* werden vom Konstrukteur direkt definiert, um die *Functional Requirements* bestmöglich zu erfüllen. Kritisch anzumerken ist, dass Functional Requirements nicht die funktionalen Anforderungen darstellen, sondern die voneinander unabhängigen Eigenschaften. Diese erfüllen die Functional Requirements.

²²⁴ Vgl. Simonek (1973), S. 10.

²²⁵ Vgl. ebd.

²²⁶ Vgl. Tjalve (1978), S. 18; ebenso Tjalve (1979), S. 7.

²²⁷ Vgl. ebd.

²²⁸ Vgl. ebd., S. 19.

²²⁹ Siehe Abschnitt 2.10.4.7.

²³⁰ Siehe Abschnitt 2.10.4.2.

WEBER unterscheidet im Entwicklungsansatz Characteristics Properties Modeling (CPM) und Property Driven Development (PDD)²³¹ strikt zwischen Merkmalen (engl. characteristics) und Eigenschaften (engl. properties). Die verwendete Terminologie weicht sinngemäß von der Eigenschaftsdefinition nach LINDEMANN ab. *Merkmale* sind direkt vom Konstrukteur beeinflussbar. Die *Eigenschaften* resultieren aus den festgelegten Merkmalen.

PONN und LINDEMANN nutzen die Klassifizierung in direkte und indirekte Eigenschaften nach der mittelbaren Beeinflussbarkeit durch den Entwickler. *Direkte Eigenschaften* können vom Entwickler unmittelbar festgelegt werden. *Indirekte Eigenschaften* sind von den festgelegten direkten Eigenschaften abhängig. Die Ausprägung einer Eigenschaft kann einer merkmalspezifischen Wertemenge entnommen werden.²³²

ZINGEL differenziert die wahrnehmbaren Eigenschaften in Verhaltens- und Struktureigenschaften. *Verhaltenseigenschaften* beziehen sich auf messbare Outputs, die im Systemverhalten auftreten, wie Geräuschemissionen und Vibrationen. *Struktureigenschaften* beziehen sich auf berechnete Strukturkennwerte wie Kosten oder das Gewicht des technischen Produkts.²³³

Nach BIRKHOFFER erfolgt die verbale Beschreibung technischer Objekte durch die Angabe ihrer *Objekteigenschaften*. Diese ermöglichen die Unterscheidung von anderen Produkten mit ähnlichen Eigenschaften.²³⁴ BIRKHOFFER nimmt eine begriffliche Präzisierung von HUBKAS Kategorisierung vor, indem *strukturelle und extensive Eigenschaften* unterschieden werden.²³⁵ Wertende Aussagen über wertfreie Eigenschaften erlauben die Zuordnung von merkmalspezifischen Werten.²³⁶ *Strukturelle Eigenschaften* beziehen sich auf geometrische Relationen (Anordnungen) und auf topologische Relationen (Kopplungen), welche die Produktgestalt exakt und vollständig bestimmen.²³⁷ Zusammen mit den Werkstoffeigenschaften der Komponenten definieren sie den gesamten inneren Aufbau des technischen Produkts.²³⁸ Sie können visuell oder messtechnisch erfasst und direkt festgelegt werden.²³⁹

²³¹ Siehe Abschnitt 2.10.4.1.

²³² Vgl. Ponn (2016b), S. 717.

²³³ Vgl. Zingel (2013), S. 138.

²³⁴ Vgl. Birkhofer (1980), S. 5.

²³⁵ Vgl. ebd., S. 10.

²³⁶ Vgl. ebd., S. 11.

²³⁷ Vgl. ebd., S. 12.

²³⁸ Vgl. ebd.

²³⁹ Vgl. ebd., S. 15.

BIRKHOFFER und WÄLDELE prägen die Unterscheidung von abhängigen und unabhängigen Eigenschaften. *Abhängige Eigenschaften* sind von den unabhängigen Eigenschaften abhängig. Nur die *unabhängigen Eigenschaften* können direkt vom Konstrukteur festgelegt werden. Dabei betonen sie die zentrale Bedeutung von Modellen und systematisieren *Produktmodelleigenschaften* in unabhängige und abhängige Produktmodelleigenschaften. Produktmodelleigenschaften dienen der formalisierten Beschreibung technischer Produkte in Modellen. Sie orientieren sich am Abstraktionsgrad des jeweiligen Modells.

WÄLDELE verweist bei der eigenschaftstheoretischen Produktbeschreibung auf mathematisierbare Potenziale in algorithmenbasierten Produktentwicklungen. Abhängige und unabhängige Produkteigenschaften müssen nicht zwangsläufig mit eindeutigen, mathematischen Formeln in Zusammenhang stehen. Erfahrungsgemäß interpolierte und angenäherte Zusammenhänge sind ebenfalls zulässig.²⁴⁰ Auf der Gestaltebene der Produktmodellierung unterscheidet WÄLDELE unabhängige Geometrie- und Werkstoffeigenschaften. Zu den *unabhängigen Geometrieigenschaften* zählen die Makrogeometrie und Topologie des technischen Produkts, wodurch die Anzahl und Anordnung von Elementen definiert sind.²⁴¹

Konstruktive Parameter bilden einen Ausschnitt der unabhängigen Eigenschaften ab. Dieser Ausschnitt ist für die Festlegung durch den Konstrukteur relevant, um ein bestimmtes Entwicklungsziel zu erreichen.²⁴² Fertigungsrestriktionen beschränken die Auswahl eines bestimmten Werkstoffs. Sie führen zu minimal erforderlichen Blechstärken als makrogeometrische, unabhängige Geometrieigenschaften aufgrund eines verwendeten Fertigungsverfahrens.²⁴³ *Unabhängige Werkstoffeigenschaften* stellen einen Sonderfall dar. Der Konstrukteur wählt in der Regel einen Werkstoff aus und berücksichtigt implizit die Verknüpfung des Werkstoffs mit den weiteren mechanischen Eigenschaften. Dies ist besonders wichtig für die Realisierung von Soll-Eigenschaften, da die diskrete Werkstoffauswahl auf die mechanischen Eigenschaften zurückgeführt werden muss.²⁴⁴

GROCHE et al. definieren für Produkteigenschaften, die durch Fertigungsverfahren erzeugt wurden, den Begriff der *technologieinduzierten Eigenschaft*.²⁴⁵ GRAMLICH greift diese Definition für das produktionsintegrierende Entwickeln auf und präzisiert den Begriff als *fertigungsverfahreninduzierte Eigenschaft*. Diese ent-

²⁴⁰ Vgl. Wäldele (2012), S. 57.

²⁴¹ Vgl. ebd., S. 58.

²⁴² Vgl. ebd., S. 62.

²⁴³ Vgl. ebd., S. 58-59.

²⁴⁴ Vgl. ebd.

²⁴⁵ Vgl. Groche et al. (2012), S. 86.

stehen, bedingt durch die Auswahl eines bestimmten Fertigungsverfahrens, während der stofflich-geometrischen Änderung der Gestalteigenschaften eines technischen Produkts im Fertigungsprozess.

Die literarische Analyse zeigt eine Vielzahl unterschiedlicher Klassifizierungsmöglichkeiten für Eigenschaften. Sie alle vereint die Unterscheidung nach ihrer Beeinflussbarkeit durch den Konstrukteur. Zur konsistenten Definition von Eigenschaften wird im Rahmen dieses Buchs die folgende Begriffsdefinition verwendet.

Definition 6: Produkteigenschaft

Produkteigenschaften setzen „sich aus einem Merkmal und dessen Ausprägung zusammen.“²⁴⁶ Die Ausprägungen können „sowohl qualitativer, quantitativer als auch komparativer [Natur sein] und [müssen] nicht zwangsläufig eine Einheit besitzen [...]“²⁴⁷ Produkteigenschaften können untergliedert werden in abhängige und unabhängige Produkteigenschaften.²⁴⁸ „Kennzeichnend für [...] Produkteigenschaften ist, dass sie rein den Zustand des technischen Produkts beschreiben und ihre Ausprägungen damit unabhängig von Wirkgrößen oder anderen Produkteigenschaften sind.“²⁴⁹

Das folgende Beispiel 3 illustriert die Unterscheidung von unabhängigen und abhängigen Produktmodelleigenschaften anhand eines spaltprofilierten Hohlkammerprofils.

Beispiel 3: Eigenschaftsbasierte Beschreibung eines Hohlkammerprofils

Die Beschreibung und Modellierung des folgenden spaltprofilierten Blechprodukts erfolgt anhand von abhängigen und unabhängigen *Produktmodelleigenschaften*²⁵⁰ (siehe Abbildung 17). Das Blechprofil weist die verfahrensinduzierten Gestaltelemente der spaltprofilierten Flansche mit ihren fertigungs-verfahrensinduzierten Gestalt- und Materialeigenschaften auf. Die abhängigen Produktmodelleigenschaften resultieren aus der geeigneten Festlegung der unabhängigen Produktmodelleigenschaften.

²⁴⁶ Lindemann (2009), S. 160.

²⁴⁷ Gramlich (2013), S. 18.

²⁴⁸ Vgl. Birkhofer, Wäldele (2008), S. 24.

²⁴⁹ Gramlich (2013), S. 73.

²⁵⁰ Bei den Eigenschaften des Blechprofils handelt es sich in diesem Beispiel um Produktmodelleigenschaften, da sie sich auf die modellgeschaffene Abbildung des spaltprofilierten Blechprofils im Profilquerschnitt beziehen.

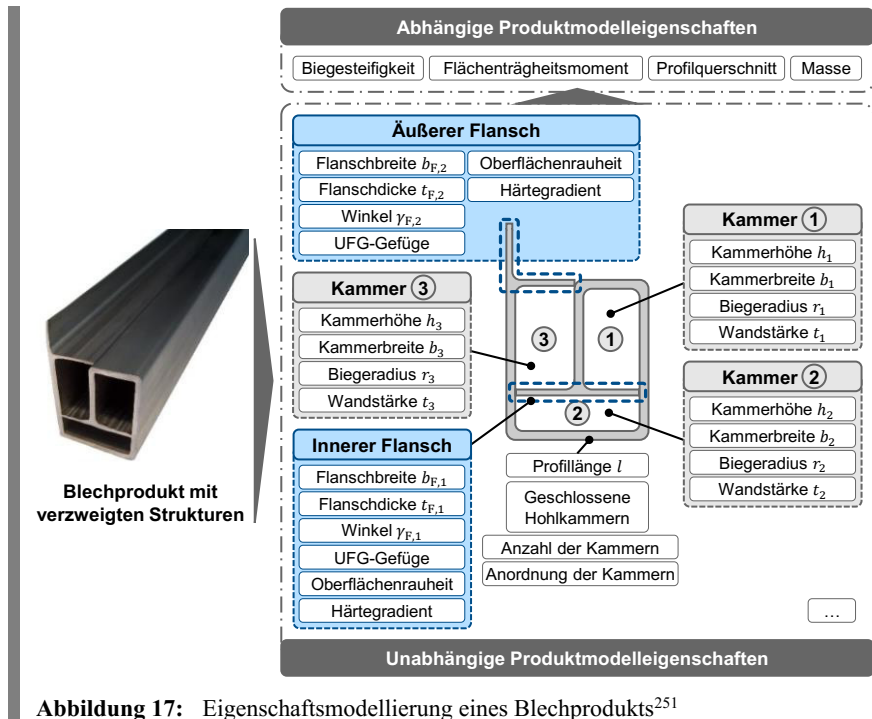


Abbildung 17: Eigenschaftsmodellierung eines Blechprodukts²⁵¹

2.5.2 Abbildung von Eigenschaftsrelationen

Die gegenseitigen Abhängigkeiten von Eigenschaften können netzwerkartig in *Eigenschaftsnetzwerken*²⁵², *mathematischen Formen* und *Verknüpfungsmatrizen*, als sogenannte *Design Structure Matrix (DSM)* in einer $n \times n$ -Matrix²⁵³ abgebildet werden (siehe Beispiel 4). Die DSM stellt nicht nur die Abhängigkeiten zweier Einträge fest, sondern kann sensitiv über die quantitative Angabe eine Gewichtung und über entsprechende Vorzeichen die Gegenläufigkeit von Abhängigkeiten darstellen.²⁵⁴ Gleiches gilt für die *Domain Mapping Matrix (DMM)*, die Einträge aus unterschiedlichen Domänen gegenüberstellt. Die *Multi Domain Mapping Matrix (MDM)* erlaubt eine durchgängige Modellierung von Abhängigkeiten in den einzelnen Phasen des Entwicklungsprozesses.

²⁵¹ Bildnachweis: (links) Groche, Schmitt (2010), S. 5.

²⁵² Vgl. Wäldele (2012), S. 83.

²⁵³ Im europäischen Raum hat sich die Interpretation der Beeinflussbarkeit von Spalteneinträgen aufgrund der Zeileneinträge durchgesetzt.

²⁵⁴ Vgl. Krehmer (2012), S. 108.

Beispiel 4: Eigenschaftsrelationen eines Hohlkammerprofils

Das *Eigenschaftsnetzwerk* (siehe Abbildung 18, links unten) und die inhaltlich äquivalente Darstellung in der *Design Structure Matrix (DSM)* (siehe Abbildung 18, rechts oben) zeigen die eigenschaftsbasierte Modellierung des Hohlkammerprofils aus dem Beispiel 3.

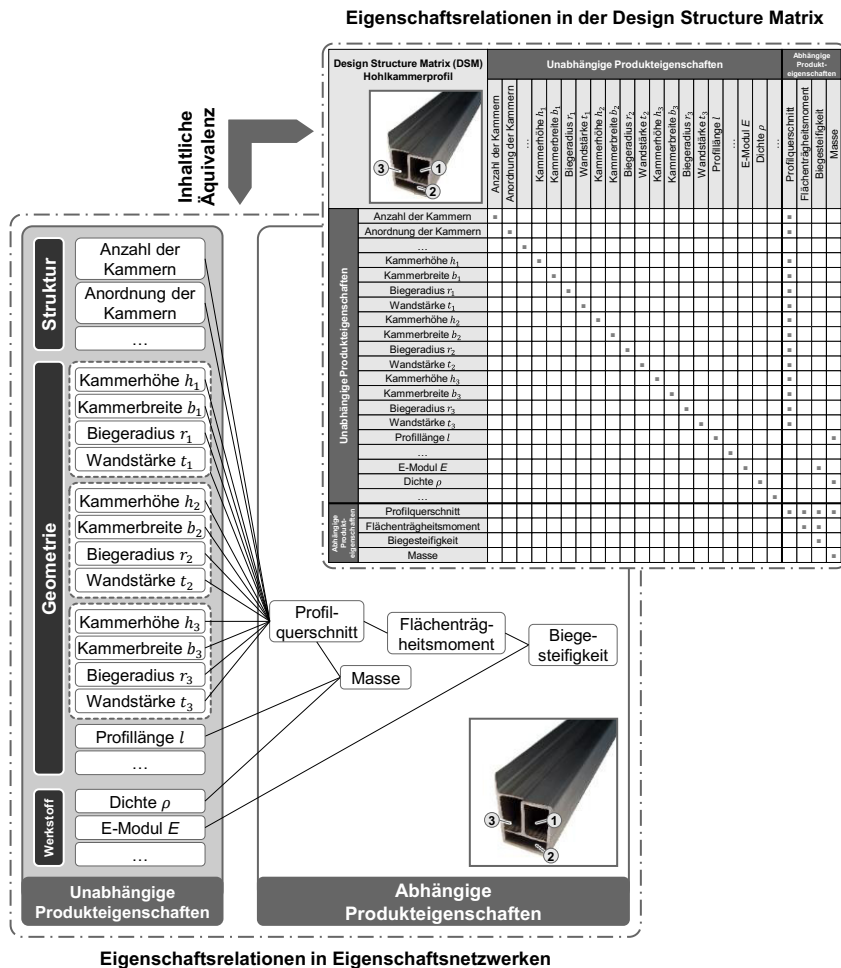


Abbildung 18: Eigenschaftsnetzwerk und Eigenschaftsrelationen in der DSM²⁵⁵

²⁵⁵ Bildnachweise: (Hohlkammerprofil: oben, unten) Groche, Schmitt (2010), S. 5.

Mathematische Formeln stellen den Wirkzusammenhang zwischen relevanten Eigenschaften und Größen her. So erfährt zum Beispiel ein Blechprofil als idealisiert angenommener Biegebalken unter der Belastung mit einer Kraft F die Absenkung w . Oftmals sind die exakten Eigenschaftsrelationen nicht bekannt. Erfahrungs- und modellbasierte Abschätzungen führen zu qualitativen Eigenschaftsrelationen.²⁵⁶

2.5.3 Soll-, Nenn- und Ist-Eigenschaften

Die Unterscheidung von Soll-, Nenn- und Ist-Eigenschaften nimmt im Entwicklungsprozess, in Bezug auf Verifikations- und Validierungsaktivitäten, eine entscheidende Rolle ein. Das Ziel eines jeden Entwicklungsprozesses ist es, eine bestmögliche Übereinstimmung der tatsächlichen Ist-Eigenschaften des stofflich-geometrisch realisierten technischen Produkts während seiner Nutzung mit den geforderten Soll-Eigenschaften zu erreichen, die aus Anforderungen und Erwartungen resultieren.

Soll-Eigenschaften sind qualitative oder quantitative Produkteigenschaften, die das hypothetische technische Produkt als stofflich noch nicht realisiertes System aufweisen soll. Soll-Eigenschaften und Soll-Größen können „definierte Mengen möglicher Ausprägungen“²⁵⁷ aufweisen. Soll-Eigenschaften unterscheiden sich hinsichtlich ihres Ausprägungsbereichs von Produkteigenschaften. Hierdurch erweitern sie den Eigenschaftsbegriff für das hypothetische technische Produkt.²⁵⁸

Nenn-Eigenschaften definieren das technische Produkt als Output des Entwicklungsprozesses. Das technische Produkt wird dabei über seine unabhängigen Gestalteigenschaften beschrieben.

Ist-Eigenschaften charakterisieren die tatsächlichen Eigenschaften des real existierenden technischen Produkts, nachdem es stofflich durch die Fertigung anhand seiner unabhängigen Nenn-Produkteigenschaften realisiert wurde.²⁵⁹ Damit dienen Ist-Eigenschaften als wesentliche Grundlage zur Validierung des technischen Produkts vor, in oder nach seiner Nutzung.

Nenn-, Soll- und Ist-Eigenschaften weisen enge Relationen auf. Im funktionalen Kontext werden beispielsweise aufgrund bekannter Eigenschaftsrelationen die Nenn-Wirkgrößen prognostiziert.²⁶⁰ Diese ermöglichen die Voraussage der Zu-

²⁵⁶ Vgl. Krehmer (2012), S. 72.

²⁵⁷ Gramlich (2013), S. 119.

²⁵⁸ Vgl. Birkhofer (1980), S. 8.

²⁵⁹ Vgl. ebd.

²⁶⁰ Vgl. Gramlich (2013), S. 120.

standsänderungen des/der Operanden. Die Abweichung von Nenn- zu Soll-Eigenschaften definiert die auszuführenden Konstruktionstätigkeiten im Konstruktionsprozess. Basierend auf den Nenn-Eigenschaften findet die geometrisch-stoffliche Realisierung zur Herstellung des technischen Produkts mit seinen Ist-Eigenschaften statt.²⁶¹

2.5.4 Zwischenfazit

Produkteigenschaften werden zur vollständigen Produktbeschreibung²⁶² in Produktmodellen²⁶³ über modellgeschaffene *Produktmodelleigenschaften* abgebildet (siehe Abbildung 19).

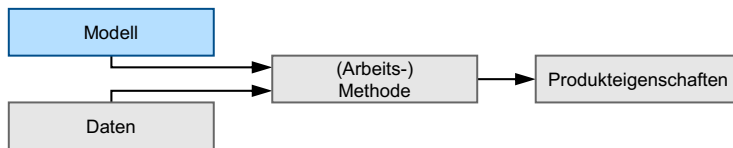


Abbildung 19: Zusammenhang zwischen Modellen und Produkteigenschaften²⁶⁴

Konstruieren überführt die abhängigen Produktmodelleigenschaften übergeordneter Konkretisierungsebenen in die unabhängigen Produktmodelleigenschaften untergeordneter Konkretisierungsebenen.

Durch die Verwendung von Modellen können systematisch anhand der Soll-Eigenschaften die Nenn-Eigenschaften festgelegt werden. Diese gilt es fertigungstechnisch in Form der Ist-Eigenschaften zu realisieren. Der Konstruktionserfolg hängt maßgeblich von der zweckmäßigen Wahl des richtigen Modells ab, um die Produkteigenschaften vorauszusagen,²⁶⁵ wie das folgende Beispiel 5 verdeutlicht.

Beispiel 5: Makro- und mikroskopische Modellbildung für Produkteigenschaften

Die Modellierung des zu entwickelnden technischen Produkts bestimmt sich maßgeblich durch den jeweiligen Zweck der Modellierung. Um sich auf *makroskopischer Ebene* den Produkteigenschaften anzunähern, ist es ausreichend die strukturellen Beziehungen zwischen den unabhängigen und abhängigen Produkteigenschaften aufzustellen (siehe Abbildung 20).

²⁶¹ Vgl. Gramlich (2013), S. 120.

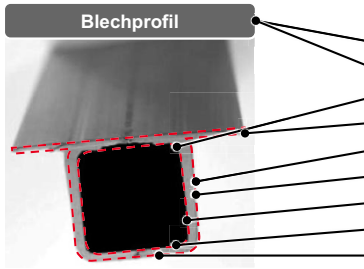
²⁶² Vgl. Feldhusen, Grote (2013), S. 13.

²⁶³ Vgl. ebd., S. 12.

²⁶⁴ Vgl. ebd.

²⁶⁵ Vgl. ebd.

Soll das *mikroskopische mechanische Verhalten* beurteilt werden, sind andere Modelle notwendig, welche das Verhalten im materiellen Deformationsprozess annähern.



Merkmal	Ausprägung
Anzahl der Flansche	2
Anzahl der Kammern	1
Kammerart	geschlossen
Flanschdicke	1 mm
Wandstärke	2 mm
Länge	800 mm
Kammerhöhe	20 mm
Kammerbreite	20 mm
Werkstoff	E20

Abbildung 20: Makroskopische Beschreibung eines Hohlkammerprofils durch Eigenschaften²⁶⁶

Die Modellierung und Voraussage des mikromechanischen Deformationsverhaltens führen zur Nutzung von *kontinuumsmechanischen Modellen*, welche die Deformation eines infinitesimalen Volumenelements von seiner Referenz- in die Momentankonfiguration verfolgen (siehe Abbildung 21).

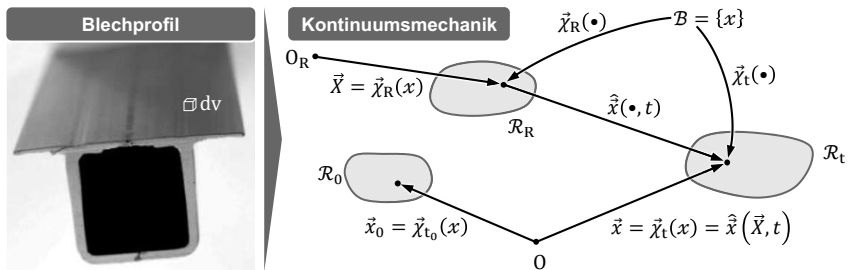


Abbildung 21: Kontinuumsmechanische Beschreibung der Materialeigenschaften²⁶⁷

Der Deformationsgradient \mathbf{F} in (6) überführt die Volumenelemente der Referenzkonfiguration \mathcal{R}_R in Volumenelemente der Momentankonfiguration \mathcal{R}_t .

$$dv = (\det \mathbf{F}) dV \quad (6)$$

²⁶⁶ Bildnachweis: (links) Taplick, Groche (2010), S. 127.

²⁶⁷ Bildnachweise: (links) ebd.; (rechts) Eigene Darstellung, in Anlehnung an Hutter, Jöhnk (2004), S. 20.

2.6 Anforderungen

Anforderungen dienen als Grundlage für sämtliche Entscheidungen im Entwicklungsprozess. Dabei ist die Anforderungsmodellierung ebenso vielfältig und indifferent ausgeprägt wie die eigenschaftstheoretische Produktbeschreibung und -modellierung.

2.6.1 Anforderungsquellen

Anforderungen resultieren aus verschiedenen *Quellen* (siehe Abbildung 22), sobald ein Produkt in eine Produktumgebung integriert werden soll.²⁶⁸ So müssen Anforderungen zum Beispiel aus unternehmensübergreifenden Quellen, wie gesetzlichen Richtlinien, technischen Normen, Zulieferern, Unternehmensstrategien, verfügbaren Technologien und Wettbewerbsprodukten, bei der Entwicklung berücksichtigt werden.



Abbildung 22: Quellen für Anforderungen²⁶⁹

Unterschiedliche Unternehmensbereiche, wie Fertigung, Marketing, Controlling und Vertrieb, haben unterschiedliche Sichtweisen auf den Entwicklungsprozess. Diese führen zu unterschiedlichen Anforderungen.²⁷⁰ Im Mittelpunkt aller Anforderungsquellen steht der Kunde/Markt, für den das Produkt entwickelt wird.²⁷¹

²⁶⁸ Vgl. Grande (2014), S. 46.

²⁶⁹ Vgl. Lindemann (2009), S. 97.

²⁷⁰ Vgl. Baumgart (2016), S. 425.

²⁷¹ Vgl. ebd.

Anforderungen werden immer in einem definierten Systemkontext ermittelt.²⁷² Der *Systemkontext* separiert die relevanten Elemente der Systemumgebung von den irrelevanten.²⁷³ Zu Beginn der Anforderungsermittlung ist die Systemabgrenzung unscharf. Die Grauzone kann erst in den späteren Phasen des Entwicklungsprozesses beseitigt werden. Sowohl die Systemgrenze als auch die Grauzone verschieben sich mit der Kontextgrenze.²⁷⁴

Nicht alle Anforderungen werden explizit geäußert. Vielmehr liegt die Herausforderung in der Identifikation von impliziten und häufig unscharf formulierten Anforderungen, die mit lösungsspezifischen Vorfixierungen behaftet sind.²⁷⁵ Die Vielzahl von Anforderungen führt aufgrund ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten zu Zielkonflikten und Widersprüchen, die frühzeitig identifiziert und gelöst werden müssen.²⁷⁶ Daher ist eine sorgfältige Anforderungsstrukturierung und -dokumentation über den gesamten Entwicklungsprozess erforderlich.²⁷⁷

2.6.2 Anforderungsarten

In den domänenspezifischen Fachgebieten der Softwareentwicklung, des Requirements Engineerings und der Konstruktionsmethodik ist eine indifferent ausgeprägte Unterscheidung von Anforderungsarten aufzufinden. Die nachfolgenden Abschnitte befassen sich mit der detaillierten Darstellung der fachspezifischen Systematisierungen.

2.6.2.1 Anforderungsarten im Kontext der Softwareentwicklung und des Requirements Engineerings

Das Requirements Engineering dient der Ermittlung, Analyse, Abstimmung, Dokumentation, Verwaltung, kontinuierlichen Anpassung, Validierung und Änderungsnachverfolgung von Anforderungen über den gesamten Entwicklungsprozess.²⁷⁸ Die zentrale Grundlage für den Umgang mit Anforderungen bildet die Unterscheidung von Anforderungsarten nach EBERT und POHL (siehe Abbildung 23).²⁷⁹

²⁷² Vgl. Pohl, Rupp (2015b), S. 11.

²⁷³ Vgl. ebd., S. 16.

²⁷⁴ Vgl. Pohl, Rupp (2015a), S. 17.

²⁷⁵ Vgl. Schuh et al. (2012a), S. 176; ebenso Lindemann (2009), S. 96.

²⁷⁶ Vgl. Lindemann (2009), S. 101-102.

²⁷⁷ Vgl. ebd., S. 96.

²⁷⁸ Vgl. Schuh et al. (2012a), S. 176-179; ebenso Ebert (2014), S. 33.

²⁷⁹ POHL referenziert bei Randbedingungen auf den inhaltlich äquivalenten Begriff der Rahmenbedingung, vgl. Pohl, Rupp (2015b), S. 8. ROBERTSON und ROBERTSON verweisen in diesem Zusammenhang auf den allgemeinen Begriff der Constraints, vgl. Robertson, Robertson (2013), S. 11.



Abbildung 23: Anforderungsarten in der Softwareentwicklung^{280, 281}

Funktionale Anforderungen definieren lösungsneutral²⁸² das erwartete bzw. gewünschte Systemverhalten²⁸³ auf äußere Stimuli in Bezug auf die Funktionserfüllung des Systems, eines Teilsystems, Moduls²⁸⁴ oder einer einzelnen Systemkomponente.²⁸⁵ Sie spezifizieren die intendierte Funktion des zu entwickelnden Systems,²⁸⁶ wodurch ein möglichst großer Lösungsraum eröffnet wird.²⁸⁷ Dies bedingt die Feingliederung in *Funktions-*, *Verhaltens-* und *Strukturanforderungen*.

Nicht-funktionale Anforderungen, die häufig als *Qualitätsanforderungen* bezeichnet werden,²⁸⁸ definieren Qualitätsmerkmale des zu entwickelnden Systems.²⁸⁹ Sie bestimmen die Güte des Systems durch die Angabe von qualitativen Eigenschaften²⁹⁰ und beeinflussen die Zufriedenheit des Nutzers. Sie können für einzelne Systemfunktionen, Funktionsgruppen und Systemkomponenten gelten.²⁹¹ Qualitätsanforderungen ergänzen die funktionalen Anforderungen durch die Vorgabe

²⁸⁰ In Anlehnung an Ebert (2014), S. 29.

²⁸¹ Die sinngemäß gleiche, dreiteilige Unterscheidung von Anforderungsarten findet sich auch in HRUSCHKA, ROBERTSON und ROBERTSON. RUPP UND DIE SOPHISTEN unterteilen Anforderungen ebenfalls in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen, vgl. Rupp, die SOPHISTen (2014), S. 17.

²⁸² Vgl. Fernandes, Machado (2016), S. 47.

²⁸³ Vgl. Pohl, Rupp (2015b), S. 8; ebenso Hruschka (2014), S. 12.

²⁸⁴ Vgl. Hruschka (2014), S. 13.

²⁸⁵ Vgl. Pohl (2008), S. 15; ebenso Alt (2012), S. 10-11 und Ebert (2014), S. 29.

²⁸⁶ Vgl. Robertson, Robertson (2013), S. 223; ebenso Grande (2014), S. 37.

²⁸⁷ Vgl. Fernandes, Machado (2016), S. 47.

²⁸⁸ Vgl. Pohl, Rupp (2015b), S. 8.

²⁸⁹ Vgl. Grande (2014), S. 37.

²⁹⁰ Vgl. Rupp, die SOPHISTen (2014), S. 280.

²⁹¹ Vgl. Pohl (2008), S. 15-16.

der Qualitätsmerkmale.²⁹² Damit dienen nicht-funktionale Anforderungen der *Konzeptbewertung*.²⁹³ Nicht-funktionale Anforderungen stehen in einem natürlichen Widerspruchsverhältnis, sodass sie nicht alle mit demselben Erfüllungsgrad erreicht werden können.²⁹⁴ Sie sind bezüglich ihrer definierten Komponenten validierbar und weisen Wechselwirkungen mit der zu entwickelnden Systemarchitektur und Systemumgebung auf.²⁹⁵ Nicht-funktionale Anforderungen subsumieren technologische Anforderungen, Anforderungen an die Wartbarkeit, Zuverlässigkeit, Sicherheit, Benutzeroberfläche, an sonstige Lieferbestandteile und an durchzuführende Tätigkeiten sowie rechtlich-vertragliche Anforderungen.²⁹⁶ Somit korrelieren sie mit den wahrnehmbaren, abhängigen Eigenschaften des Systems. Sie richten sich sowohl an das zu entwickelnde System als auch an Aspekte, die für dessen Produktion, Nutzung und Entwicklung relevant sind.

Nicht-funktionale Anforderungen umfassen darüber hinaus *Randbedingungen*,²⁹⁷ die sich auf das zu entwickelnde System auswirken. Häufig finden sich die synonymen Begriffe der *Rahmenbedingung* und *Restriktion* wieder.²⁹⁸ Randbedingungen sind unveränderlich, nicht beeinflussbar²⁹⁹ und wirken sich restriktiv auf die Lösungssuche,³⁰⁰ die Realisierungsmöglichkeiten des zu entwickelnden Produkts³⁰¹ und den Entwicklungsprozess aus.³⁰² Sie sind unternehmensintern oder unternehmensextern vorgegeben.³⁰³ Aus Randbedingungen können weitere funktionale Anforderungen und Qualitätsanforderungen resultieren.³⁰⁴ Randbedingungen entstehen, sobald das zu entwickelnde System in eine bestehende Systemumgebung integriert werden soll.³⁰⁵ BERGSMANN betont die Sonderstellung von Randbedingungen, da sie bereits zu Beginn des Entwicklungsprozesses fest vor-

²⁹² Vgl. Ebert (2014), S. 31.

²⁹³ Vgl. Feldhusen et al. (2013b), S. 323.

²⁹⁴ Vgl. Fernandes, Machado (2016), S. 49-50.

²⁹⁵ Vgl. Ebert (2014), S. 85.

²⁹⁶ Vgl. Rupp, die SOPHISTen (2014), S. 268; ebenso Ebert (2014), S. 31.

²⁹⁷ Vgl. Grande (2014), S. 39.

²⁹⁸ Nach POHL sind Rahmenbedingungen und Restriktionen synonym zu verwenden. POHL, RUPP und EBERT verweisen ebenfalls auf Randbedingungen als einen synonymen Begriff, vgl. Ebert (2014), S. 32. HRUSCHKA verwendet Randbedingungen (Constraints).

²⁹⁹ Vgl. Pohl (2008), S. 18.

³⁰⁰ Vgl. Ebert (2014), S. 94.

³⁰¹ Vgl. Grande (2014), S. 38; ebenso Hruschka (2014), S. 13 und Pohl (2008), S. 19.

³⁰² Vgl. Robertson, Robertson (2013), S. 11; ebenso Ebert (2014), S. 32. u. Pohl, Rupp (2015b), S. 8.

³⁰³ Vgl. Feldhusen et al. (2013b), S. 323.

³⁰⁴ Vgl. Ebert (2014), S. 32.

³⁰⁵ Vgl. Balzert (2009), S. 459-461.

gegeben sind.³⁰⁶ LOSSACK betont die Notwendigkeit von Randbedingungen im Rahmen der Anforderungsmodellierung.³⁰⁷

POHL leitet aus der literarischen Analyse ab, dass nicht-funktionale Anforderungen meist unterspezifiziert sind. Die *Unterspezifikation* von Anforderungen führt zur Unterscheidung von unterspezifizierten funktionalen Anforderungen und unterspezifizierten Qualitätsanforderungen.³⁰⁸ Die Spezifizierung von unterspezifizierten funktionalen Anforderungen führt zu funktionalen Anforderungen und Qualitätsanforderungen.³⁰⁹ Die unterbliebene Spezifizierung unterspezifizierter funktionaler Anforderungen birgt die Gefahr einer unterschiedlichen Interpretation derselben Anforderung. Es entsteht ein großer Interpretationsspielraum für Eigenschaften des zu entwickelnden Systems.³¹⁰ Unterspezifizierte Qualitätsanforderungen werden nur durch weitere Qualitätsanforderungen verfeinert.³¹¹

Als weitere Anforderungsarten führt POHL Ziele, Szenarien und lösungsorientierte Anforderungen an. *Ziele* beziehen sich auf die Intention von Stakeholdern in Bezug auf die Systemnutzung und -realisierung. Sie konkretisieren die zugrundeliegende Vision für die Entwicklung des Systems.³¹² *Szenarien* beschreiben die Auswirkungen der (Nicht-)Erfüllung von Zielen und Anforderungen. Fehlnutzungsszenarien³¹³ beschreiben die fehlerhafte Nutzung des Systems.³¹⁴ Ziele und Szenarien bedingen sich gegenseitig, sodass Ziele die Bildung von Szenarien erlauben und Szenarien zur Definition von neuen, gegebenenfalls konkretisierten, verfeinerten oder revidierten Zielen führen.³¹⁵ *Lösungsorientierte Anforderungen* legen die Struktur-, Funktions- und Verhaltenssicht des Systems fest. Konkrete Lösungen werden explizit vorausgesetzt, damit lösungsorientierte Anforderungen definiert werden können.³¹⁶ Die Interpretation einer Anforderung hängt maßgeblich von der Sichtweise ab, sodass Markt-, Produkt- und Komponentenanforderungen unterschieden werden (siehe Abbildung 24).³¹⁷

³⁰⁶ Vgl. Bergsmann (2014), S. 117-118.

³⁰⁷ Vgl. Lossack (1997), S. 89.

³⁰⁸ Vgl. Pohl (2008), S. 16-18.

³⁰⁹ Vgl. ebd., S. 16.

³¹⁰ Vgl. ebd., S. 16-17.

³¹¹ Vgl. ebd., S. 18.

³¹² Vgl. ebd., S. 48.

³¹³ POHL spricht in diesem Zusammenhang ursprünglich von Missbrauchsszenarien, die sich an anderer Stelle jedoch eindeutig auf die Fehlnutzung eines Systems beziehen – wortwörtlich: „nicht beabsichtigte Nutzung“ und „zu vermeidende Systemnutzung“, siehe Pohl (2008), S. 175.

³¹⁴ Vgl. ebd., S. 127-128.

³¹⁵ Vgl. ebd., S. 174-179.

³¹⁶ Vgl. ebd., S. 49.

³¹⁷ Vgl. Ebert (2014), S. 24.



Abbildung 24: Zusammenhang zwischen Anforderungen und Lösungen³¹⁸

Marktanforderungen stellen die kundenspezifische Repräsentation von Anforderungen dar. Sie sind in der Sprache des Kunden formuliert. Die Dokumentation von Marktanforderungen erfolgt im Lastenheft.³¹⁹ *Produktanforderungen* resultieren aus den Marktanforderungen und umfassen die Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt in der Sprache des Produktentwicklers. Sie werden im Pflichtenheft dokumentiert. *Komponentenanforderungen* richten sich aufgrund ihrer realisierungsspezifischen Vorgaben an Komponenten des zu entwickelnden Produkts.³²⁰ Produkt- und Komponentenanforderungen resultieren aus der Analyse von Marktanforderungen.³²¹

2.6.2.2 Anforderungsarten im Kontext der Konstruktionsmethodik

RIEG und STEINHILPER verweisen auf die Unterscheidung von Anforderungen und Randbedingungen. *Randbedingungen* haben im Gegensatz zu Anforderungen restriktive Auswirkungen auf das zu entwickelnde technische Produkt. Hierzu zählen terminliche Vorgaben, kostenrestriktive Bedingungen, beschränkte Ressourcen und normative Regelungen wie Gesetze, Normen und Richtlinien.³²²

EHRENSPIEL führt zur Klassifizierung von Anforderungen eine übergeordnete Unterscheidung in technisch-wirtschaftliche und organisatorische Anforderungen an (siehe Abbildung 25).

³¹⁸ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Ebert (2014), S. 23.

³¹⁹ Vgl. ebd., S. 24.

³²⁰ Vgl. ebd.

³²¹ Vgl. ebd., S. 40.

³²² Vgl. Schindler (2012), S. 403-404.

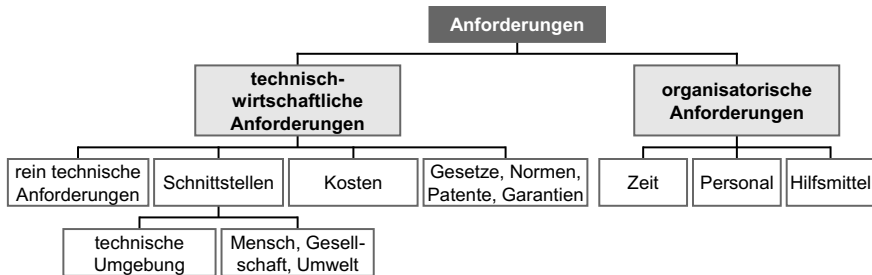


Abbildung 25: Technisch-wirtschaftliche und organisatorische Anforderungen³²³

Technisch-wirtschaftliche Anforderungen beziehen sich direkt auf das zu entwickelnde technische Produkt. *Organisatorische Anforderungen* adressieren den Entwicklungsprozess.

Auf übergeordneter Ebene führen PAHL et al., EDER und HOSNEDL ebenfalls die Unterscheidung zwischen Anforderungen und Bedingungen an. *Anforderungen* beziehen sich auf das Unternehmen, die Eigenschaften im Transformationsprozess und die Eigenschaften des Operators zur Realisierung des intendierten Prozesses.³²⁴ *Bedingungen* sind einschränkender Natur und können aus dem Stand der Technik, der Produktumgebung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen resultieren.³²⁵ Unter dem Gesichtspunkt der Optimierung von technischen Produkten nehmen FELDHUSEN et al. die Klassifizierung von Anforderungen in *funktionale* und *nicht-funktionale Anforderungen* vor.³²⁶ Unter dem Begriff der *gestaltungsbestimmenden Anforderungen*³²⁷ sind nach PAHL et al. abmessungs-, anordnungs- und werkstoffbestimmende Anforderungen subsumiert.³²⁸ Die Gestaltungsbestimmtheit leitet sich aus der Bedeutung dieser Anforderungen für die Feingestaltung des zu entwickelnden technischen Produkts ab. *Abmessungsbestimmende Anforderungen* definieren zum Beispiel Anschlussmaße, den Bauraum und die Leistung. *Anordnungsbestimmende Anforderungen* bezeichnen die Lage von Lösungselementen und die freien Bewegungsrichtungen. *Werkstoffbestimmende Anforderungen* umfassen zum Beispiel die Korrosionsbeständigkeit, die Lebensdauer und Werk- und Hilfsstoffe.³²⁹

³²³ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 400.

³²⁴ Vgl. Eder, Hosnedl (2010), S. 200.

³²⁵ Vgl. Feldhusen et al. (2014), F 4.

³²⁶ Vgl. Feldhusen et al. (2013), S. 137.

³²⁷ KLÄGER greift den Begriff der gestaltungsbestimmenden Anforderung als gestaltsrelevante Anforderung auf.

³²⁸ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 306.

³²⁹ Vgl. ebd.

Neben den gestaltungsbestimmenden Anforderungen sind *räumliche Bedingungen* zu unterscheiden, die einen restriktiven Charakter aufweisen. Sie betreffen zum Beispiel die geforderten Abstände von Lösungselementen und den begrenzten Bauraum.³³⁰ LOSSACK verweist in diesem Zusammenhang auf die Ableitung von gestaltungsrelevanten Anforderungen aus expliziten und impliziten Gestaltungsbereichen, um Einbaubedingungen durch die Produktgestalt zu erfüllen.³³¹ *Bedingungen* sind immer restriktiver Natur. Sie können beim Konstruieren nicht alle vollkommen erfüllt oder beachtet werden. Konstrukteure streben daher stets ein Optimum zwischen allen Forderungen und Wünschen an.³³²

ALBERS und MUSCHIK unterteilen Randbedingungen hinsichtlich ihres unternehmensinternen oder -externen Ursprungs. Dementsprechend sind endogene und exogene Randbedingungen zu unterscheiden. *Endogene Randbedingungen* sind unternehmensintern durch interne Normung, Unternehmensstrategien, beschränkte Ressourcen und Kostenrestriktionen vorgegeben. *Exogene Randbedingungen* entstehen außerhalb des Unternehmens. Zu ihnen zählen gesetzliche Vorschriften, der Stand der Technik und regulative Normenwerke.³³³

SCHINDLER differenziert zwischen funktionalen, eigenschaftlichen und lösungsbehafteten Anforderungen (siehe Abbildung 26).

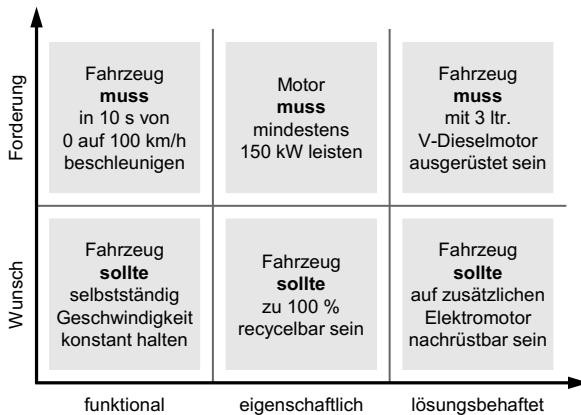


Abbildung 26: Funktionale, eigenschaftliche und lösungsbehaftete Anforderungen³³⁴

³³⁰ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 306.

³³¹ Vgl. Lossack (1997), S. 28.

³³² Vgl. Pahl et al. (2007), S. 328.

³³³ Vgl. Muschik (2011), S. 26.

³³⁴ Vgl. Steinhilper (2012), S. 406.

Funktionale Anforderungen charakterisieren die Funktion des zu entwickelnden technischen Produkts. *Eigenschaftliche Anforderungen* beziehen sich auf konkrete Eigenschaften, die vereinzelt nicht in funktionale Anforderungen überführt werden können. Sie sind zu anderen Zeitpunkten im Entwicklungsprozess relevant. *Lösungsbehaftete Anforderungen* schränken die Lösungsvielfalt stark ein und sollten in funktionale Anforderungen überführt werden.³³⁵

Anforderungen lassen sich des Weiteren nach der Art ihrer Herkunft in Kundenanforderungen und technische Anforderungen unterteilen. *Kundenanforderungen* resultieren direkt vom Kunden und bedingen die Informationsanreicherung und -übersetzung aus technischer Sicht, damit sie in *technische Anforderungen* transformiert werden können.³³⁶ Sie bedürfen einer weiteren Detaillierung und Quantifizierung. FERNANDES und MACHADO differenzieren Nutzer- und Systemanforderungen. *Nutzeranforderungen* repräsentieren die bereitzustellende Funktion des Systems und beinhalten weitere Randbedingungen, die während der Nutzung des Systems einzuhalten sind. Sie charakterisieren das Entwicklungsproblem. *Systemanforderungen* spezifizieren die entwicklerseitige Sicht auf die Systementwicklung. Sie sind in der technischen Sprache dokumentiert. Hierdurch bilden Systemanforderungen die Schnittstelle zwischen den Nutzeranforderungen und der Systementwicklung.³³⁷

ZINGEL unterscheidet im Rahmen der Zielsystemmodellierung des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM)³³⁸ fünf Anforderungsarten: Stakeholder Objectives (Interessenvertreterziele), Boundary Conditions (Randbedingungen), Property RQ (nicht-funktionale Anforderungen), Continuous und Discrete Function RQ (kontinuierlich- und diskret-funktionale Anforderungen).³³⁹ *Randbedingungen* sind aufgrund äußerer Gegebenheiten im Entwicklungsprozess weder veränder- noch beeinflussbar.³⁴⁰ *Nichtfunktionale Anforderungen* beziehen sich auf geforderte Merkmale und Eigenschaften der Systemstruktur, der Materialparameter oder der geometrischen Merkmale. *Diskret-funktionale Anforderungen* adressieren die Funktion des zu entwickelnden technischen Systems zur Realisierung einer Zustandsänderung mit definiertem Anfangs- und Endzustand. *Kontinuierlich-funktionale Anforderungen* fordern die Funktionserfüllung während der gesamten Zeit.³⁴¹

³³⁵ Vgl. Schindler (2012), S. 406-407.

³³⁶ Vgl. Schuh et al. (2012a), S. 178.

³³⁷ Vgl. Fernandes, Machado (2016), S. 57.

³³⁸ Siehe Abschnitt 2.10.5.4.

³³⁹ Vgl. Zingel (2013), S. 124.

³⁴⁰ Vgl. ebd., S. 130.

³⁴¹ Vgl. ebd., S. 132.

2.6.3 Klassifizierung von Anforderungen

Der Begriff der Anforderungsklassifizierung³⁴² ist in der konstruktionswissenschaftlichen Fachliteratur teils synonym mit dem Begriff der Anforderungsstrukturierung ausgeführt. Die *Anforderungsklassifizierung* erfolgt über die Einordnung von Anforderungen in eine Anforderungsklasse, die einer vordefinierten Gliederungsstruktur folgt.³⁴³

Anforderungsklassen unterscheiden sich mindestens durch ein gemeinsames Klassifizierungsmerkmal, das Anforderungen in anderen Anforderungsklassen nicht aufweisen. Klassifizierte Anforderungen besitzen in einer Anforderungsklasse keine Relationen.

Die *Anforderungsstruktur* bezieht sich auf die strukturellen Verknüpfungen von Anforderungen, die aus semantisch-inhaltlichen, teils wechselseitigen Beziehungen einzelner Anforderungen resultieren. Damit bildet die Anforderungsstruktur die Basis für die Analyse von relationalen Verknüpfungen zwischen Anforderungen, um Zielkonflikte frühzeitig zu identifizieren und widersprüchliche Anforderungen aufzulösen.

Eine sinnvolle und zweckmäßige Klassifizierung von Anforderungen ist im Entwicklungsprozess aufgrund der Vielzahl zu berücksichtigender Anforderungen unerlässlich, da sonst die Anforderungsmenge unübersichtlich und kaum handhabbar wird.³⁴⁴

Die Klassifizierung von Anforderungen folgt einer zweckmäßigen Einteilung. So existieren Klassifizierungsschemata, die Anforderungen, entsprechend ihrer ursprünglichen Quelle, nach technisch-wirtschaftlichen und organisatorischen Aspekten des Produktlebenslaufs klassifizieren.³⁴⁵ Diese Form der Klassifizierung unterstützt Konstrukteure während der Ermittlung von Anforderungen³⁴⁶ durch die gedankliche Vorwegnahme des Verhaltens technischer Produkte in den einzelnen Phasen des Produktlebenslaufs. Die Klassifizierung von Anforderungen zielt darüber hinaus auf eine eindeutige Priorisierung von Anforderungen ab,³⁴⁷ sodass ihre Bedeutung für den Kunden und der zu erfüllende Realisierungsgrad ersichtlich werden.

³⁴² Ebenso synonym sind die Begriffe Gliederung, Einteilung, Gruppierung, Kategorisierung und Unterteilung für die Klassifizierung von Anforderungen in der konstruktionswissenschaftlichen Fachliteratur aufzufinden.

³⁴³ Vgl. Kickermann (1995), S. 28.

³⁴⁴ Vgl. Stechert (2010), S. 50.

³⁴⁵ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 395

³⁴⁶ Vgl. ebd., S. 399.

³⁴⁷ Vgl. ebd., S. 395.

2.6.3.1 Explizite und implizite Anforderungen

Explizite Anforderungen werden direkt von Stakeholdern geäußert. Sie sind bereits zu Beginn des Entwicklungsprozesses bekannt³⁴⁸ und können direkt bei der Anforderungsermittlung verarbeitet werden.³⁴⁹ Sie beinhalten oftmals lösungsspezifische Vorfixierungen und konkrete Eigenschaften des zu entwickelnden Systems. FERNANDES und MACHADO betonen die Schwierigkeit, vermeintlich selbstverständliche Anforderungen zu identifizieren, die nicht explizit von Stakeholdern geäußert werden. *Implizite Anforderungen* werden durch domänenspezifisches Fachwissen ergänzt, um wesentliche Anforderungen nicht zu vergessen.³⁵⁰ Die Stakeholder artikulieren diese Anforderungen nicht.³⁵¹ Die Erfüllung von impliziten Anforderungen wird trotz der mangelnden Artikulation von Stakeholdern selbstverständlich erwartet.³⁵² Daher stellen implizite Anforderungen eine große Herausforderung für die Produktentwicklung dar.³⁵³

2.6.3.2 Einfluss auf die Kundenzufriedenheit

KANO differenziert drei Anforderungsarten, die eine Abhängigkeit zur Kundenzufriedenheit aufweisen: Grund-, Leistungs- und Begeisterungsanforderungen (siehe Abbildung 27). Der Kunde sieht die Umsetzung von *Grundanforderungen* als selbstverständlich an. Hierbei handelt es sich meist um implizite Anforderungen. Sie werden marktspezifisch von existenten Konkurrenzprodukten erfüllt und sind im Stand der Technik etabliert. Ihre Nicht-Erfüllung führt zu einer überproportional negativen Kundenzufriedenheit.³⁵⁴ Die Erfüllung von *Leistungsanforderungen* bedingt eine linear-zunehmende Steigerung der Kundenzufriedenheit. Sie werden explizit vom Kunden geäußert und korrelieren mit der wahrgenommenen Leistungsfähigkeit des zu entwickelnden Produkts.³⁵⁵ *Begeisterungsanforderungen* führen zu einer überproportional hohen Kundenzufriedenheit. Der Kunde kann Begeisterungsanforderungen weder explizit äußern, noch erwartet er deren Erfüllung, da sie über den Stand der Technik hinausgehen.³⁵⁶ Sie repräsentieren Anforderungen, die das marktübliche Angebotsspektrum übertreffen.

³⁴⁸ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 218.

³⁴⁹ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 395.

³⁵⁰ Vgl. Fernandes, Machado (2016), S. 47-48.

³⁵¹ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 395.

³⁵² Vgl. Pahl et al. (2007), S. 217-218; ebenso Schindler (2012), S. 404; Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 397-398 und Baumgart (2016), S. 432.

³⁵³ Vgl. Baumgart (2016), S. 432.

³⁵⁴ Vgl. Gürtler, Lindemann (2016), S. 495.

³⁵⁵ Vgl. ebd.

³⁵⁶ Vgl. ebd.

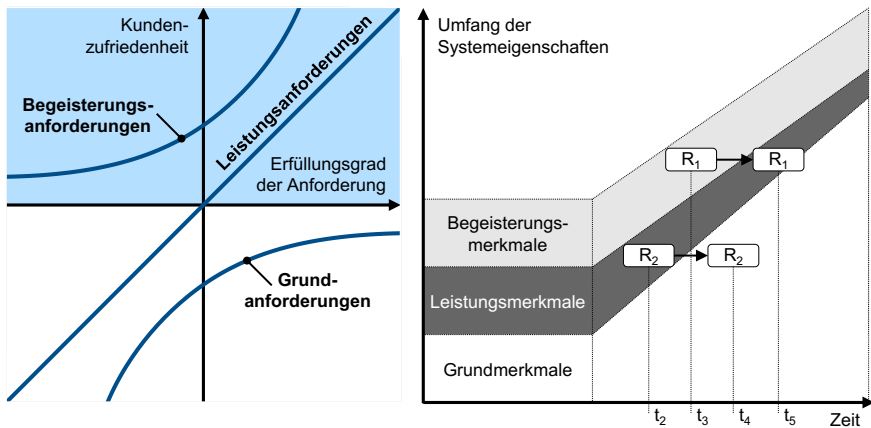


Abbildung 27: KANO-Modell der Kundenzufriedenheit³⁵⁷

PAHL et al. unterscheiden in Anlehnung an KANOS Kundenzufriedenheitstheorie grundlegende Anforderungen, technisch-kundenspezifische Anforderungen und Attraktivitätsanforderungen. *Grundlegende Anforderungen* sind als implizite Anforderungen meist nicht vom Kunden artikuliert. Ihre Erfüllung wird kundenseitig jedoch als selbstverständlich erwartet.³⁵⁸ *Technisch-kundenspezifische Anforderungen* sind explizit artikuliert und spezifisch quantifiziert.³⁵⁹ *Attraktivitätsanforderungen* sind im Unterbewusstsein des Kunden verborgen und können als implizite Anforderungen meist nicht artikuliert werden. Sie bewirken eine erhöhte Diversifizierung von Wettbewerbsprodukten.³⁶⁰ Aufgrund von dynamischen Marktänderungen werden Begeisterungsmerkmale zu Leistungsmerkmalen und später zu Grundmerkmalen, sodass sich auch die Anforderungen ändern.

2.6.3.3 Priorisierung und Gewichtung von Anforderungen

Anforderungen weisen eine unterschiedliche Wichtigkeit für die Erfüllung im Entwicklungsprozess auf. Aufgrund von zeitlichen und finanziellen Restriktionen können nicht alle Anforderungen gleichermaßen und in vollem Umfang erfüllt werden.³⁶¹ Dies bedingt eine notwendige Priorisierung von Anforderungen für die Beurteilung von Lösungen.³⁶²

³⁵⁷ (links) In Anlehnung an Gürtler, Lindemann (2016), S. 494; (rechts) Vgl. Pohl (2008), S. 535.

³⁵⁸ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 218.

³⁵⁹ Vgl. ebd., S. 219.

³⁶⁰ Vgl. ebd.

³⁶¹ Vgl. Pohl (2008), S. 527.

³⁶² Vgl. Baumgart (2016), S. 427.

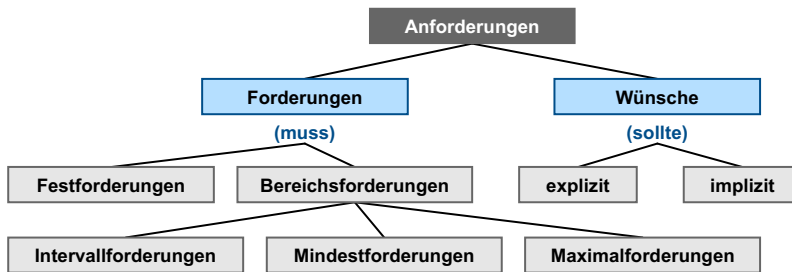


Abbildung 28: Anforderungsgliederung³⁶³

Nach ihrer Wichtigkeit sind Anforderungen als Forderungen oder Wünsche priorisiert (siehe Abbildung 28).³⁶⁴ *Forderungen* müssen unbedingt erfüllt werden.³⁶⁵ Erfüllt eine Variante die an sie gestellten Forderungen nicht, wird sie beim Auswählen im Beurteilungsprozess verworfen und kommt nicht als Lösung infrage. *Wünsche* müssen nicht erfüllt werden. Sie sollten jedoch berücksichtigt werden, falls ihre Umsetzung mit begrenztem Mehraufwand möglich ist.³⁶⁶ Die Erfüllung von Wünschen hat aufgrund ihrer optionalen Erfüllbarkeit keinen Einfluss auf die Lösungsauswahl. Die Erfüllung von Wünschen erhöht die Lösungsgüte bei der Lösungsbewertung. Betroffene Entscheidungen im Konstruktionsprozess führen zu weiteren Folgeforderungen und -wünschen.³⁶⁷

Forderungen differenzieren sich in Fest- und Bereichsforderungen. *Festforderungen* charakterisieren zwingend einzuhaltende Vorgaben, die unbedingt erfüllt werden müssen. Sie lassen keinen Toleranzbereich zu. *Bereichsforderungen* beziehen sich auf Intervall-, Mindest- und Maximalforderungen. Sie fordern die Erfüllung innerhalb eines beschränkten Kontinuums an Vorgaben. *Intervallforderungen* charakterisieren einen abgeschlossenen Wertebereich, in dem die Anforderung zu erfüllen ist. *Mindest- und Maximalforderungen* repräsentieren eingeschränkte Wertebereiche, in denen der anzustrebende Wert liegen muss.

BIRKHOFFER unterscheidet drei elementare Typen von Anforderungen: Festforderungen, Optimalitätsforderungen und Bereichsforderungen (siehe Tabelle 1).

³⁶³ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 396.





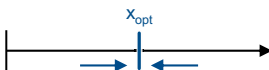
³⁶⁴ Vgl. ebd.

³⁶⁵ Vgl. ebd.

³⁶⁶ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 215; ebenso Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 397.

³⁶⁷ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 397.

Tabelle 1: Elementare Anforderungstypen³⁶⁸

Anforderungs- typ		Darstellung mit der Werteskala	Beschreibung	Beispiel
Festforderung			Merkmal und Festwert	Die Blechstärke muss x_{fest} [mm] be- tragen.
Bereichsforderung	Intervall- forderung			Die Blechstärke muss innerhalb von $x_{\text{grenz,unten}}$ [mm] bis $x_{\text{grenz,oben}}$ [mm] lie- gen.
	Mindest- forderung		Merkmal und zulässiger Wertebereich	Mindestens $x_{\text{grenz,un-}}$ ten [%] erhöhte Stei- figkeit gegenüber dem Vorgängerpro- dukt.
	Maximal- forderung			Maximale Herstell- kosten von $x_{\text{grenz,oben}}$ [€].
Optimalitäts- forderung ³⁶⁹			Merkmal und optimaler Wert	Es soll eine mög- lichst geringe Masse x_{opt} [kg] er- reicht werden.

Festforderungen bestehen aus einem Merkmal und einem Festwert, der zwingend einzuhalten ist. Alle anderen Werte sind unzulässig. *Bereichsforderungen* definieren untere und obere Schranken, in denen keine Werte liegen dürfen. *Optimalitätsforderungen* sind gekennzeichnet durch die Vorgabe eines zu erreichenden Optimums.³⁷⁰ Im Gegensatz zu Fest- und Bereichsforderungen definieren Optimalitätsforderungen keinen unzulässigen Wertebereich. Sie unterstützen die Definition von Zielwerten, welche die Lösung aufweisen soll.³⁷¹ Jeder Wert ist zulässig. Je weiter der Wert vom angestrebten Optimum entfernt ist, desto schlechter wird die Lösungsgüte bewertet. ROTH unterscheidet in ähnlicher Weise Punkt-, Grenz- und Bereichsforderungen.³⁷²

RUPP UND DIE SOPHISTEN priorisieren Anforderungen nach dem Grad ihrer rechtlichen Verbindlichkeit für die Stakeholder.³⁷³ Jede Anforderung verfügt über

³⁶⁸ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 397.

³⁶⁹ Auch als Zielforderung bezeichnet.

³⁷⁰ Vgl. Birkhofer (1980), S. 9.

³⁷¹ Vgl. Baumgart (2016), S. 439.

³⁷² Vgl. Roth (2000), S. 79.

³⁷³ Vgl. Rupp, die SOPHISTen (2014), S. 18.

eines von drei Schlüsselwörtern: *muss* für verbindlich zu erfüllende Anforderungen, *sollte* für nicht-verpflichtende Wünsche zur Zufriedenheitssteigerung der Stakeholder³⁷⁴ und *wird* für Hinweise auf zu verwirklichende Anforderungen, die in zukünftigen Projekten zu integrieren sind.³⁷⁵

2.6.3.4 Lösungsbestimmtheit von Anforderungen

KLÄGER betont die integrale Verknüpfung der Anforderungsmodellierung mit der Produktmodellierung. Der Einfluss einer Anforderung auf die angestrebte Lösung muss zur Konkretisierung der jeweiligen Lösung ermittelt werden.³⁷⁶ Dies führt zur Differenzierung von lösungsbestimmenden und lösungseinschränkenden Anforderungen während der divergierenden und konvergierenden Lösungssuche.

Lösungsbestimmende Anforderungen ermöglichen die direkte Lösungssuche in einem vorgegebenen Lösungsraum. Sie charakterisieren die Suchrichtung, ohne lösungsspezifische Vorfixierungen einzubringen.³⁷⁷ *Lösungseinschränkende Anforderungen* restringieren den Lösungsraum. Die Überprüfung ihrer Erfüllung erfordert das Vorliegen einer Lösung, sodass lösungseinschränkende Anforderungen primär für die Lösungsauswahl geeignet sind.³⁷⁸

In der Anforderungsmenge sind nicht alle Anforderungen gleichermaßen entscheidungsrelevant für den weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses. *Konstruktionsbestimmende Anforderungen* bilden einen Teil der Anforderungsmenge. Sie dienen als Grundlage für wegweisende Entscheidungen im Entwicklungsprozess. *Semantische Anforderungsnetze* bilden die strukturellen Verknüpfungen zwischen Anforderungen ab. Sie ermöglichen die Identifikation konstruktionsbestimmender Anforderungen zur Dokumentation der getroffenen Entscheidungen.³⁷⁹ Konstruktionsbestimmende Anforderungen leiten sich aufgrund ihrer hohen Gewichtung ab, wobei nur Festforderungen als konstruktionsbestimmende Anforderungen infrage kommen.³⁸⁰ FELDHUSEN et al. verweisen auf *Initialanforderungen* als richtungsweisende Anforderungen im Entwicklungsprozess.³⁸¹ Sie haben elementare Auswirkungen auf die frühen Phasen der Produktentwicklung, insbesondere auf die Konzeptphase, weswegen sie als *konzeptbestimmend* gelten.³⁸²

³⁷⁴ Vgl. Rupp, die SOPHISTen (2014), S. 18.

³⁷⁵ Vgl. ebd.

³⁷⁶ Vgl. Kläger (1993), S. 104.

³⁷⁷ Vgl. ebd.

³⁷⁸ Vgl. ebd., S. 105.

³⁷⁹ Vgl. Gebauer (2001), S. 42-43.

³⁸⁰ Vgl. ebd., S. 46-47.

³⁸¹ Vgl. Feldhusen et al. (2013b), S. 327.

³⁸² Vgl. ebd., S. 329.

2.6.4 Anforderungsdekomposition

Anforderungen verfeinern sich im Laufe des Entwicklungsprozesses. Anforderungen spalten sich in *Teilanforderungen* auf, die aus einer *Hauptanforderung* abgeleitet sind und diese verfeinern (siehe Abbildung 29).³⁸³

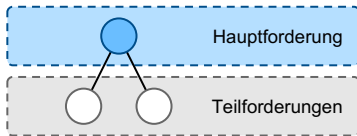


Abbildung 29: Dekomposition von Anforderungen³⁸⁴

Die abgeleiteten Anforderungen resultieren nicht nur aus der inhaltlichen Zergliederung von übergeordneten Anforderungen, sondern maßgeblich aus der Festlegung von Eigenschaften des zu entwickelnden Produkts im Entwicklungsprozess. Erst die entstehenden *Anforderungszyklen* beinhalten die Teilanforderungen der Hauptanforderung (siehe Abbildung 30).

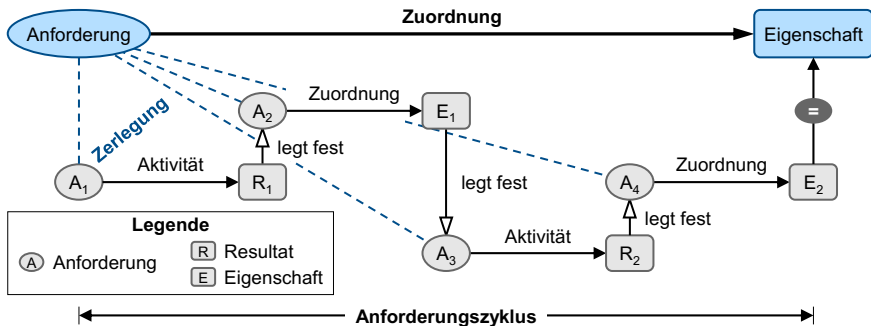


Abbildung 30: Anforderungszyklen bei der Dekomposition³⁸⁵

In Analogie zum Kerngedanken, Anforderungen aus anderen Anforderungen abzuleiten, unterscheiden AURUM und WOHLIN primäre und abgeleitete Anforderungen. *Primäre Anforderungen* resultieren direkt von Stakeholdern aus einer Primärquelle. *Abgeleitete Anforderungen* stehen durch eine inhaltliche Verfeinerung mit der primären Anforderung in Beziehung.³⁸⁶

³⁸³ Vgl. Kruse (1996), S. 13.

³⁸⁴ In Anlehnung an ebd., S. 107.

³⁸⁵ Eigene Darstellung, in Anlehnung an ebd., S. 14.

³⁸⁶ Vgl. Aurum, Wohlin (2005) in Fernandes, Machado (2016), S. 46.

Die Unterscheidung von Anforderungen nach ihrem Konkretisierungsgrad impliziert die Existenz zusammengesetzter und dekomponierter Anforderungen zur Gewährleistung ihrer Operationalität.³⁸⁷ Die Anforderungen sind über ihre Konkretisierungsbeziehung miteinander verknüpft. Die Dekomposition von *zusammengesetzten Anforderungen* führt zu *Zwischenanforderungen*. Auf der konkretesten Modellierungsebene liegen *Elementaranforderungen* vor,³⁸⁸ die nicht weiter dekomponierbar sind (siehe Abbildung 31).

Die Dekomposition von Zwischen- in Elementaranforderungen setzt die Kenntnis der Relationen zwischen den Anforderungen voraus.³⁸⁹ Zwischen- und Elementaranforderungen können über kausale Abhängigkeiten zusammenhängen. Eine nachfolgende Anforderung innerhalb dieser *Anforderungskette* ist nur erfüllt, wenn auch die vorherige Anforderung erfüllt ist.³⁹⁰

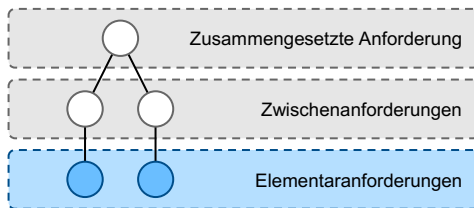


Abbildung 31: Untergliederung von Anforderungen³⁹¹

2.6.5 Anforderungsdokumentation

Wie auch für die Klassifizierung von Anforderungen existieren für die Dokumentation von Anforderungen vielfältige Möglichkeiten. Ihnen gemeinsam ist, dass sie unternehmensspezifisch an das reale Projekt- und Entwicklungsumfeld angepasst sein müssen, um eine gemeinsam verbindliche *Dokumentationsgrundlage* zu schaffen. EBERT definiert zur Dokumentation von Anforderungen platzhalterbasierte Satzstrukturen. Die folgenden Templates sind für Produkt- und Prozessanforderungen zu unterscheiden (siehe Tabelle 2). Nur die Produktanforderungen weisen eine funktionale Beschreibungskomponente auf. Prozessanforderungen sind immer nicht-funktionaler Art. Über die Beachtung von Schnittstellen und weiteren einschränkenden Bedingungen ist die Anforderungsformulierung auf die System- und Prozessmodellierung abgestimmt.

³⁸⁷ Vgl. Kläger (1993), S. 122.

³⁸⁸ Vgl. ebd., S. 165-167.

³⁸⁹ Vgl. Lossack (2006), S. 265.

³⁹⁰ Vgl. ebd.

³⁹¹ Vgl. Kläger (1993), S. 165-167.

Tabelle 2: Templates für verschiedene Anforderungstypen³⁹²

Anforderungstyp	funktional	nicht-funktional	Schnittstelle	Einschränkung	Projekttrandbedingung	Anforderungstemplate
Produktanforderung	Basis					Das <System> soll oder muss oder wird <Verhalten> <Verb>.
	■		■			Das <System> soll oder muss oder wird <Verhalten> <Verb>.
	■		■	■		Das <System> soll oder muss oder wird <Person> <Verhalten> <Einschränkung> <Verb>.
Prozessanforderung		■	■	■		Das <System> soll oder muss oder wird <Person> <Verhalten> <Einschränkung> <Verb>.
		■		■		Die <Interessengruppe> soll oder muss oder wird in der Lage sein <Eigenschaft> oder <Ziel> zu erreichen.
		■				Das <Prozessergebnis>/der <Prozess> soll oder muss oder wird <Fähigkeit> oder <Eigenschaft> haben.
		■			■	Das <Prozessergebnis>/der <Prozess> soll oder muss oder wird <Fähigkeit> oder <Eigenschaft> haben.

RUPP UND DIE SOPHISTEN definieren modellbasierte Anforderungsschablonen zum Ausschluss von Formulierungs- und Dokumentationsfehlern (siehe Abbildung 32).³⁹³ Anforderungsschablonen gewährleisten einen ähnlichen Aufbau von allen Anforderungssätzen.³⁹⁴

Die Beschreibung funktionaler Anforderungen kann mit oder ohne Bedingungen erfolgen. Auf funktionaler Ebene adressieren die *funktionalen Anforderungsschablonen* die Funktionalität des zu entwickelnden Systems. Das Prozesswort ist ein Vollverb zur Benennung der auszuführenden Systemfunktion.³⁹⁵

³⁹² Eigene Darstellung, in Anlehnung an Ebert (2014), S. 108.

³⁹³ Vgl. Rupp, die SOPHISTen (2014), S. 217.

³⁹⁴ Vgl. ebd., S. 217-218.

³⁹⁵ Vgl. ebd., S. 227.

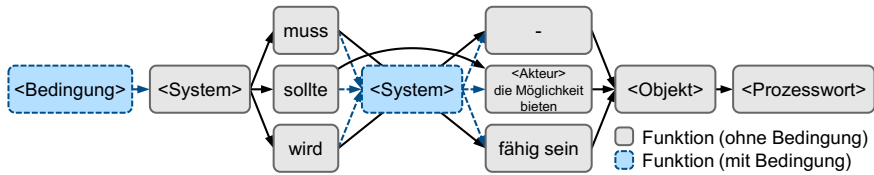


Abbildung 32: Funktionale Anforderungsschablonen³⁹⁶

Die Formulierung mit *Bedingungen* ist relevant, da Systemfunktionen von komplexen Systemen erst unter bestimmten Voraussetzungen zu erfüllen sind.³⁹⁷

In den nicht-funktionalen Anforderungsschablonen definiert ein *Eigenschaftsmaster* Anforderungen an die Eigenschaften des zu entwickelnden Systems.³⁹⁸ Technologische Anforderungen werden im *Umgebungsmaster* dokumentiert.³⁹⁹ *Prozessanforderungen* sind nicht an das zu entwickelnde System gerichtet, sondern an den Entwicklungsprozess.⁴⁰⁰

Im Entwicklungsprozess technischer Produkte sind Anforderungen überwiegend in der Form einer *Anforderungsliste* dokumentiert. Sie besteht aus einem Ordnungs- und einem Zugriffsteil.⁴⁰¹ Der *Ordnungsteil* enthält projektspezifische Informationen zur zweckmäßigen Anforderungsdokumentation, wie die Anforderungsbeschreibung, weitere inhaltliche Klassifikationsmerkmale (Gewichtung, Einfluss auf die Kundenzufriedenheit) und Attribute des Anforderungsmanagements (Identifikation, Datum, Autor, Quelle, Status).⁴⁰² Der *Zugriffsteil* beinhaltet die Anforderungen und zusätzliche Informationen, wie zum Beispiel die Kategorien der Hauptmerkmalliste.⁴⁰³ GRANDE führt zur qualitativ hochwertigen Dokumentation von Anforderungen fünf wesentliche *Qualitätskriterien* für das Anforderungsdokument an: klare Struktur, Eindeutigkeit hinsichtlich der Widerspruchsfreiheit von Anforderungen, Vollständigkeit, Erweiter-/Modifizierbarkeit und Verfolgbarkeit, um Anforderungen ihren Ursprüngen zuzuordnen.⁴⁰⁴

Das folgende Beispiel 6 zeigt den allgemeinen Aufbau einer Anforderungsliste mit exemplarischen Anforderungen.

³⁹⁶ In Anlehnung an Rupp, die SOPHISTen (2014), S. 220.

³⁹⁷ In Anlehnung an ebd., S. 229.

³⁹⁸ Vgl. ebd., S. 236.

³⁹⁹ Vgl. ebd., S. 237.

⁴⁰⁰ Vgl. ebd., S. 238.

⁴⁰¹ Vgl. Roth (2001), S. 177.

⁴⁰² Vgl. Baumgart (2016), S. 443.

⁴⁰³ Vgl. ebd., S. 444.

⁴⁰⁴ Vgl. Grande (2014), S. 64.

Beispiel 6: Anforderungsdokumentation in der Anforderungsliste

Die Anforderungsdokumentation erfolgt häufig mittels ihrer Bezeichnung und Werten bzw. Daten. Die Priorisierung erfolgt als Festforderung (FF), Bereichsforderung (BF), Zielforderung (ZF) oder Wunsch (W) (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Exemplarische Anforderungsliste

Nr.	Priorisierung	Bezeichnung	Werte/Daten
1	BF	Minimale Blechstärke	5 mm
2	BF	Maximale Abweichung (Maßtoleranz)	± 0.5 mm
3	FF	Durchmesser der Bohrung	10 mm
...

Für eine erste Dokumentation von Anforderungen eignen sich nach ALBERS et al. auch *Mind-Maps*. Diese helfen die komplexen Wechselwirkungen zwischen Anforderungen strukturiert über Abhängigkeiten aufzubauen. Querverweise beinhalten zusätzliche Informationen in der Anforderungsstruktur.⁴⁰⁵

2.6.6 Zielkonflikte

Bedingt durch die Vielzahl zu berücksichtigender Anforderungen entstehen *Zielkonflikte*.⁴⁰⁶ Diese entstehen, wenn verschiedenartig ausgeprägte Anforderungen ein und dasselbe Zielkriterium in unterschiedliche Richtungen beeinflussen.⁴⁰⁷ Eine *Zielunabhängigkeit* liegt vor, wenn voneinander unabhängige Eigenschaften durch die konfliktären Anforderungen betroffen sind.⁴⁰⁸ Die *Zielunterstützung* führt zu positiven oder negativen Synergieeffekten. Diese Anforderungen beziehen sich auf Eigenschaften mit ähnlichen Merkmalen.⁴⁰⁹ Die *dynamischen Änderungen* von Anforderungen müssen beachtet werden, um sowohl kostenintensive Verzögerungen als auch Qualitätsverluste zu vermeiden.⁴¹⁰ Die Herausforderungen für den Entwickler bestehen in der frühzeitigen Identifikation von Zielkonflikten und der Auflösung von Widersprüchen,⁴¹¹ um eine bestmögliche und effiziente Definition von Eigenschaften des zu entwickelnden technischen Produkts zu gewährleisten.

⁴⁰⁵ Vgl. Albers et al. (2013), S. 384-385.

⁴⁰⁶ Vgl. Wäldele (2012), S. 84.

⁴⁰⁷ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 398.

⁴⁰⁸ Vgl. ebd.

⁴⁰⁹ Vgl. ebd., S. 399.

⁴¹⁰ Vgl. Ebert (2014), S. 8.

⁴¹¹ Vgl. ebd., S. 85.

2.6.7 Standardisierte Anforderungscluster

RÖDER greift den Clustergedanken zur Gruppierung heterogener Objekte auf,⁴¹² um Anforderungen bereits im *Erfassungsprozess* in homogene Mengen mit einer größtmöglichen Ähnlichkeit zu gruppieren. Hieraus entsteht die *Clustermethodik*, um eine möglichst vollständige Anforderungserfassung in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses zu gewährleisten. Anforderungscluster werden auf Grundlage von logischen Zusammenhängen zwischen den Anforderungen gebildet.⁴¹³ Sie dienen der standardisierten Anforderungsdefinition im Rahmen einer algorithmenbasierten Produktentwicklung (siehe Abbildung 33).

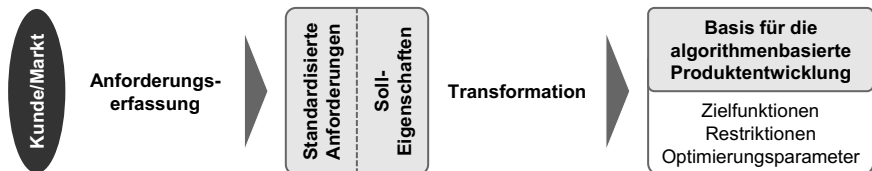


Abbildung 33: Standardisierte Anforderungserfassung⁴¹⁴

Anforderungscluster bilden, entgegen dem üblichen Clustergedanken, keine relationalen Strukturen von Anforderungen ab. Es handelt sich bei den Anforderungen in den Anforderungsclustern um gruppierte Anforderungen mit einer semantischen Zugehörigkeit.⁴¹⁵ Anforderungscluster setzen sich aus benennenden und beschreibenden Eigenschaften zusammen (siehe Abbildung 34).

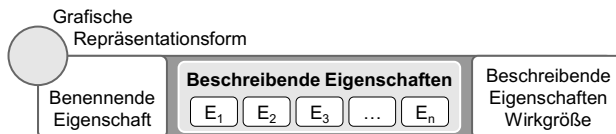


Abbildung 34: Instanz eines objektorientierten Anforderungsclusters⁴¹⁶

RÖDER führt einen Modellraum zur *Kategorisierung* von Anforderungen an. Der Modellraum greift die Produkt- und Prozessmodellierung auf. Der clusterbasierte Ansatz zur Anforderungserfassung unterscheidet verschiedene Clusterstrukturen. Die Anforderungsclustermethodik orientiert sich an vier Kernarbeitsschritten: Anforderungserfassung, -erstellung, -dokumentation und -validierung.

⁴¹² Vgl. Gausemeier, Plass (2014), S. 65.

⁴¹³ Vgl. Röder (2014), S. 83.

⁴¹⁴ In Anlehnung an Röder et al. (2013), S. 360.

⁴¹⁵ Vgl. Röder et al. (2011), S. 12.; ebenso Röder et al. (2013a), S. 361.

⁴¹⁶ Vgl. Röder (2014), S. 84.

Zur methodischen Unterstützung der *Clustererstellung* kommt ein Smart Requirement Configuration System (SRCS) zum Einsatz. Stakeholder können Anforderungen direkt auswählen oder selbst definieren. Vordefinierte Anforderungen und inhaltliche Verknüpfungen zu anderen Anforderungen gewährleisten eine vollständigere Anforderungsmenge im Vergleich zur intuitiven Anforderungserfassung. Der Einsatz von SRCS kompensiert teilweise das fehlende Expertenwissen.⁴¹⁷ Die Anforderungsdokumentation erfolgt in einer 84x30-Matrix.⁴¹⁸

Durch die Vielzahl von zu verwaltenden Attributen sind die erfassten Anforderungen der Clustermethodik manuell nicht handhabbar. Anforderungskuster müssen projekt- und unternehmensspezifisch vordefiniert werden. Dies bedingt das Vorausdenken aller möglichen Anforderungen, die bei der Entwicklung eines technischen Produkts auftreten können. Auf diese Weise können Anforderungen von Akteuren mit wenig Expertenwissen ausgewählt und spezifiziert werden.

Anforderungskuster beinhalten alle objektorientierten Anforderungen. In einem Anforderungskuster sind die Anforderungen und Wirkgrößen über beschreibende Eigenschaften abgebildet. Unterspezifizierte Anforderungskuster bestehen aus einem Soll-Merkmal ohne Soll-Wert. Sie werden als Anforderungskuster-Klasse bezeichnet. Die Anforderungskuster-Instanz ist voll spezifiziert, sodass die Soll-Merkmale und die entsprechenden Soll-Werte einer jeden Anforderung vollständig vorliegen.⁴¹⁹

Die Defizite der Anforderungskustermethodik liegen in der Anforderungsdefinition selbst. So bestehen Anforderungskuster aus Anforderungen mit Merkmalen und Ausprägungen. Diese basieren auf festgelegten Nenn-Merkmalen mit ihren Ausprägungen. Es müssen bereits vor der Anforderungserfassung detailliert ausgearbeitete und konkretisierte Lösungen mit ihren jeweiligen Eigenschaften vorliegen, um überhaupt eine Anforderung im Anforderungskuster definieren zu können. Darüber hinaus weist eine dokumentierte Anforderung in der 84x30-Matrix kaum beherrschbare Verknüpfungen zu anderen anforderungsmodellierenden Elementen auf, wodurch sich eine nicht handhabbare Form der Anforderungserfassung ergibt. Bereits bei kleinen Anforderungsmengen beansprucht die Dokumentation einer einzelnen Anforderung ein überdurchschnittliches Maß an verfügbarer Zeit im Entwicklungsprozess. Der Grundgedanke, Anforderungen als objektorientierte Gruppierungen korrelierend mit dem Lösungskonkretisierungsprozess innerhalb der Anforderungsmodellierung abzubilden, erscheint zweckmäßig und sinnvoll. Die Anforderungskuster könnten in dieser Verwendung zu einer deutlichen Komplexitätsreduktion im Entwicklungsprozess beitragen.

⁴¹⁷ Vgl. Röder (2014), S. 150.

⁴¹⁸ Vgl. ebd., S. 117.

⁴¹⁹ Vgl. ebd., S. 84-85.

2.6.8 Zwischenfazit

Die *Anforderungsmodellierung* gestaltet sich domänenübergreifend sehr heterogen. Als gemeinsamer Gliederungsansatz von Anforderungsarten ist die Differenzierung in funktionale Anforderungen, nicht-funktionale Anforderungen und Randbedingungen aufzufinden. Die Anforderungsformulierung benötigt immer eine modellbasierte Abbildung des zu entwickelnden Systems,⁴²⁰ da anderenfalls keine eindeutige Zuordnung von Anforderungen zu den lösungsspezifischen Elementen bei der Lösungsfindung und -konkretisierung möglich ist.

Die Feingliederung von Anforderungen erfolgt zweckmäßig und ist je nach Fachrichtung auf spezifische Charakteristika von Anforderungen abgestimmt. Hierzu zählen die Lösungsbestimmtheit als zweckmäßige Grundlage für die Lösungsfindung oder die Unterscheidung von expliziten und impliziten Anforderungen im Anforderungserfassungsprozess.

Eine zweckmäßige und sinnvolle *Klassifizierung* von Anforderungen ermöglicht dem Konstrukteur in vorklassifizierten Dokumenten, wie der Anforderungsliste, einen besseren Überblick über die Gesamtheit an Anforderungen zu gewinnen. Darüber hinaus legt die Klassifizierung von Anforderungen fest, wie sie während des gesamten Entwicklungsprozesses berücksichtigt werden. Die einheitliche Klassifizierung von Anforderungen ermöglicht es, unterschiedliche Entwicklungsprojekte miteinander zu vergleichen oder aus vorangegangenen Entwicklungsprojekten bereits definierte Anforderungen zu übernehmen.⁴²¹

Ein ähnliches Prinzip der Anforderungcluster findet sich im Kerngedanken von Requirement Patterns. *Requirement Patterns* bilden eine Sammlung von logisch gruppierten Anforderungen⁴²² durch die produkt- und projektspezifische Abstraktion von Anforderungen.⁴²³ Sie ermöglichen eine genaue und vollständige Dokumentation von Anforderungen durch die Wiederverwendung und projektspezifische Anpassung von verfügbaren Requirement Patterns.⁴²⁴ Hierdurch ist eine direkte Korrelation von Requirement Patterns mit Solution Patterns bei der Lösungskonkretisierung denkbar. Requirement Patterns aus vorangegangenen Entwicklungen können auf diese Weise mit etablierten Lösungselementen und -mustern, die in Solution Patterns abgebildet sind, verknüpft sein.

⁴²⁰ Vgl. Alt (2012), S. 11-12.

⁴²¹ Vgl. Chahadi (2010), S. 93.

⁴²² Vgl. Robertson, Robertson (2013), S. 342.

⁴²³ Vgl. ebd., S. 346-348.

⁴²⁴ Vgl. ebd., S. 342.

2.7 Produktmodellierung

Produktmodelle bilden die für ein technisches Produkt relevanten, produktdefinierenden Daten und Eigenschaften ab,⁴²⁵ die in den Arbeitsschritten der Produktentwicklung benötigt werden. Produktmodelle stellen die Repräsentation des zu entwickelnden technischen Produkts auf unterschiedlichen Konkretisierungsebenen zu einem bestimmten Zeitpunkt im Entwicklungsprozess dar. Neben geometrischen Informationen sind in Produktmodellen funktionale, fertigungstechnologische und strukturelle Informationen hinterlegt.⁴²⁶

Je konkreter das technische Produkt in den Partialmodellen der Produktmodelle beschrieben ist, desto komplexer gestaltet sich die Beschreibung. Dabei liegt diesem Buch das *konstruktionstheoretische Verständnis* des Produktmodells nach EHRENSPIEL, ANDREASEN und SAUER zugrunde, welches von der datentechnischen Sicht abweicht.⁴²⁷

2.7.1 Hierarchisches Produktmodell

EHRENSPIEL verfolgt mit dem *hierarchischen Produktmodell* die konstruktionsmethodische Modellierung technischer Systeme (siehe Abbildung 35).⁴²⁸ Das hierarchische Produktmodell folgt der strikten Unterteilung in die Bereiche Funktion, Physik, Gestalt.

In den Produktmodellebenen sind die funktionellen, prinzipiellen physikalischen, gestalterischen und stofflichen Lösungsmöglichkeiten eingeordnet.⁴²⁹ Sie führen auf konkretester Ebene, über die Auswahl von fertigungs- und montagetechnischen Lösungsmöglichkeiten, zur stofflichen Realisierung des technischen Produkts. Die Produktmodellierung erfolgt im Rahmen einer *durchgängigen, produktionsintegrierten Produkterstellung*. Das zu entwickelnde technische Produkt wird vom Abstrakten zum Konkreten abgebildet. Auf jeder horizontalen Ebene der Produktmodellpyramide finden Auswahl- und Bewertungsschritte statt. Diese führen zu einer systematischen Lösungsauswahl. Die jeweils abstrakte, übergeordnete Ebene beeinflusst deterministisch die Lösungsmöglichkeiten der konkreteren Ebene.⁴³⁰

⁴²⁵ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 86.

⁴²⁶ Vgl. ebd.

⁴²⁷ Aus datentechnischer Sicht repräsentieren Produktmodelle die formale Abbildung der rechnerinternen Daten und Datenstrukturen aus dem Produktdatenmodell, die das zu entwickelnde technische Produkt mit allen relevanten Eigenschaften als Resultat des Produktentwicklungsprozesses darstellen und dokumentieren, vgl. VDI 2221 (1993), S. 13.

⁴²⁸ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 39.

⁴²⁹ Vgl. ebd.

⁴³⁰ Vgl. ebd., S. 39-40.

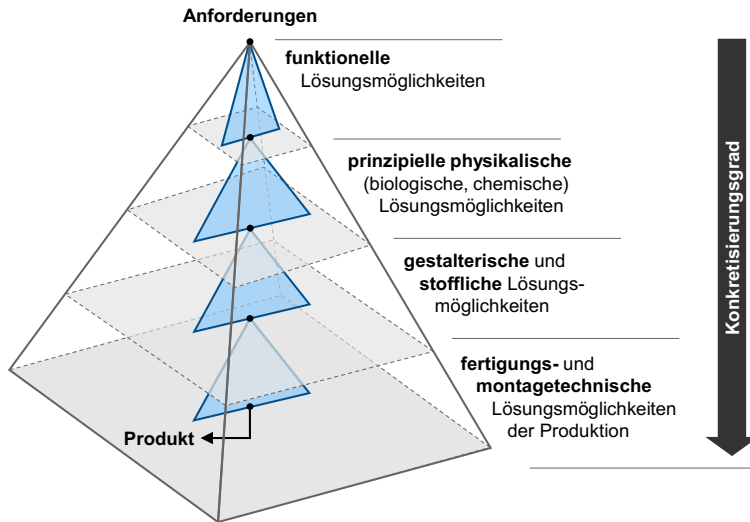


Abbildung 35: Hierarchisches Produktmodell⁴³¹

Die pyramidale Form des hierarchischen Produktmodells verdeutlicht den stetigen Informationszuwachs bei der Produktkonkretisierung.⁴³² Anforderungen bilden die initiale Grundlage zur Erarbeitung von funktionellen Lösungsmöglichkeiten. Damit schreibt das hierarchische Produktmodell Anforderungen die höchste, deterministische Bedeutung zu, da alle Lösungsmöglichkeiten die definierten Anforderungen erfüllen müssen.

Die Berücksichtigung von Fertigungs- und Montageprozessen erfolgt durch die Integration ihrer fertigungs- und montagetechnischen Lösungsmöglichkeiten spät im bereits weit vorangeschrittenen Konkretisierungsprozess.

Kritisch anzumerken ist, dass Anforderungen ausschließlich in Beziehung zu den funktionellen Lösungsmöglichkeiten stehen. Hierdurch wird eine konsequente Erfüllung der Anforderungen auf konkreteren Modellierungsebenen postuliert. Eine kontinuierliche Verifikation der entwickelten Lösungsmöglichkeiten mit den zugrundeliegenden Anforderungen ist auf diese Weise nicht möglich.

⁴³¹ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 39.

⁴³² Vgl. ebd., S. 40.

2.7.2 Pyramidenmodell

Das *Pyramidenmodell* von SAUER (siehe Abbildung 36) basiert auf den Darstellungen von EHRENSPIEL und ANDREASEN.⁴³³ Im Gegensatz zur hierarchischen Produktmodellierung grenzt das Pyramidenmodell die Produkt- und Prozessmodellierung strikt voneinander ab⁴³⁴ und vereint die Produkt- mit der Verfahrensentwicklung. *Verfahren* realisieren technische Prozesse.⁴³⁵ Die verfahrenstechnische Umsetzung des Prozesses bildet die wesentliche Grundlage für die Entwicklung des technischen Produkts. Erst die verfahrenstechnische Realisierung des Prozesses ermöglicht die Identifikation von *Wirkgrößen*, die von der Produktfunktion bereitgestellt werden müssen.⁴³⁶

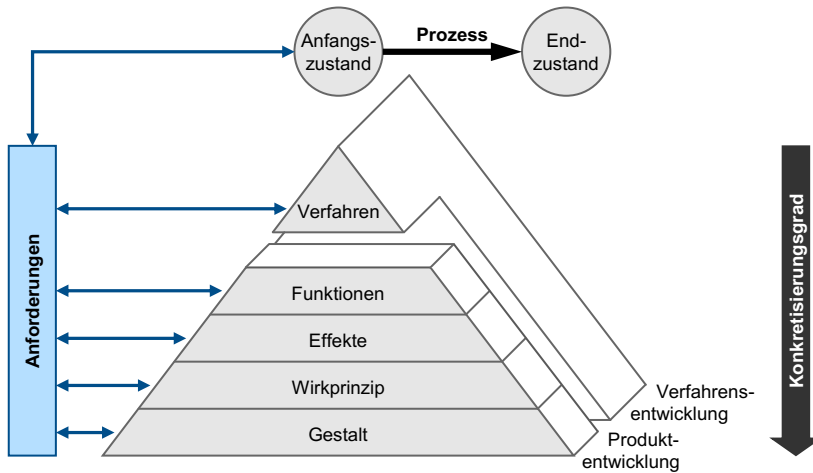


Abbildung 36: Pyramidenmodell⁴³⁷

Anforderungen nehmen eine zentrale Position im Pyramidenmodell ein. Die Produkt-, Prozess- und Verfahrensentwicklung sind über Anforderungen integral miteinander verknüpft. Alle drei Entwicklungsbereiche führen zu Anforderungen, die sich holistisch sowohl auf den technischen Prozess als auch auf die einzelnen Pyramidenmodellebenen im funktionalen und verfahrenstechnischen Kontext auswirken. Das *Antizipieren* von Merkmalen und Eigenschaften aus den Prozessen des Produktlebenslaufs ermöglicht die erfolgreiche Entwicklung des technischen

⁴³³ Vgl. Andreasen (1987)

⁴³⁴ Vgl. Sauer (2006), S. 67.

⁴³⁵ Vgl. ebd., S. 71; ebenso Heidemann (2001), S. 82 und Kruse (1996), S. 23.

⁴³⁶ Vgl. Sauer (2006), S. 71

⁴³⁷ Vgl. ebd., S. 68.

Produkts.⁴³⁸ Bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung gilt es, analysierend und antizipativ die Produkteigenschaften zu bestimmen, bevor diese in CAX-Modellen oder technischen Zeichnungen festgelegt werden.⁴³⁹ Die geforderten Funktionen leiten sich aus dem angedachten Nutzungsprozess ab,⁴⁴⁰ da dieser über ein entsprechendes Verfahren realisiert wird.

Die pyramidale Form zeigt das zunehmende Variantenspektrum und die zunehmende Anzahl von definierten Produkteigenschaften mit dem fortschreitenden Konkretisierungsgrad.⁴⁴¹ Dabei nimmt die Komplexität vom Abstrakten zum Konkreten zu. Auf jeder Konkretisierungsebene findet ein Abgleich der festgelegten Eigenschaften mit den Anforderungen statt. Dieser führt sowohl zur Verifikation von generierten Entwicklungsergebnissen als auch zu neuen Anforderungen, die im Anforderungsmodell ergänzt werden.⁴⁴² Somit betont SAUERS Pyramidenmodell die stetige Berücksichtigung und kontinuierliche Anpassung von Anforderungen bei der Produkt-, Prozess- und Verfahrensentwicklung.

SAUERS strikte Unterscheidung von Funktionen und Verfahren löst das ex ante etablierte Funktionsverständnis, basierend auf Stoff-, Signal- und Energieumsätzen, ab. *Verfahren* beinhalten lediglich die Wirkungsabläufe, die eine Zustandsänderung des stofflichen Operanden realisieren.⁴⁴³ Somit sind die stofflichen Umsätze nicht der funktionalen Modellierung, sondern der Verfahrensentwicklung zuzuordnen. GRAMLICH vervollständigt logischer- und konsequenterweise diese Differenzierung, sodass die verbleibenden Wirkgrößen der funktionalen Produktmodellierung zuzuordnen sind.⁴⁴⁴ *Wirkgrößen* bilden die zentrale Schnittstelle zur Konkretisierung von übergeordneten Modellebenen in die jeweils untergeordnete Modellebene.⁴⁴⁵ Es bedarf einer geklärten Aufgabenstellung mit der spezifischen Festlegung des Verfahrens, um die notwendigen Wirkgrößen zur Realisierung technischer Prozesse über die geforderte Produktfunktion zu definieren.⁴⁴⁶ Physikalische Effekte realisieren die Wirkzusammenhänge der Ein- und Ausgangswirkgrößen. Erst die Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge zwischen den physikalischen Größen ermöglicht die Identifikation geeigneter Wirkprinzipien.⁴⁴⁷

⁴³⁸ Vgl. Lossack (2006), S. 262.

⁴³⁹ Vgl. Sauer (2006), S. 69.

⁴⁴⁰ Vgl. ebd., S. 69-70.

⁴⁴¹ Vgl. ebd., S. 67.

⁴⁴² Vgl. ebd., S. 67-68.

⁴⁴³ Vgl. ebd., S. 74.

⁴⁴⁴ Vgl. Gramlich (2013), S. 75.

⁴⁴⁵ Vgl. Sauer (2006), S. 84.

⁴⁴⁶ Vgl. ebd.

⁴⁴⁷ Vgl. ebd.

2.7.2.1 Modellierung der Produktfunktion

Für eine gegebene Aufgabe gilt es geeignete Lösungen zu entwickeln. Die abstrakteste Ebene der Produktmodellierung stellt die *Funktionsebene* dar. Auf der Funktionsebene bildet die *Funktionsstruktur* die Gesamtfunktion durch die funktionalen Zusammenhänge der Teilfunktionen ab.⁴⁴⁸ Die Untergliederung der Gesamtfunktion in Teilfunktionen korreliert mit der Dekomposition der Gesamtaufgabe in Teilaufgaben.

Die *Produktfunktion* stellt den lösungsneutralen⁴⁴⁹, gewollten und reproduzierbaren⁴⁵⁰ Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangswirkgrößen des technischen Produkts her (siehe Abbildung 37). Als Ein- und Ausgangswirkgrößen kommen bei der Funktionsmodellierung ausschließlich *Energien* und *Informationen* in Betracht. Der geprägte Signalbegriff ist durch Informationen zu substituieren, da Signale im Gegensatz zu Informationen an ein signalgebendes und -empfangendes Medium geknüpft sind. Aus diesem Grund widersprechen Signale der lösungsneutralen Modellierung von Produktfunktionen.⁴⁵¹



Abbildung 37: Funktionsmodellierung

Die Funktion ist der gewollte Zweck des technischen Produkts⁴⁵² mit dem Ziel der Aufgabenerfüllung.⁴⁵³ Die Funktionsmodellierung trifft keine Aussagen über die konkrete Realisierung der Funktionsträger.⁴⁵⁴ Die Umsetzung der Produktfunktion durch die Definition einer physischen Produktstruktur stellt die Kernaufgabe der Produktentwicklung dar.⁴⁵⁵ Die *Gesamtfunktion* korreliert mit der Gesamtaufgabe, die das zu entwickelnde technische Produkt zu erfüllen hat. *Teilfunktionen* korrelieren analog mit den Teilaufgaben. Die Modellierung der Gesamtfunktion und

⁴⁴⁸ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 121.

⁴⁴⁹ Vgl. ebd., S. 121; ebenso Ponn, Lindemann (2011), S. 61.

⁴⁵⁰ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 783; ebenso Feldhusen (2016), S. 691.

⁴⁵¹ In der konstruktionswissenschaftlichen Fachwelt bestehen intensive Bestrebungen den im lösungsneutralen Wirkzusammenhang fälschlicherweise vorzufindenden Signalbegriff durch den Informationsbegriff zu substituieren. Daher referenziert dieses Buch konsequenterweise auf Information bei der Funktionsmodellierung.

⁴⁵² Vgl. Ponn, Lindemann (2011), S. 65.

⁴⁵³ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 255.

⁴⁵⁴ Vgl. Ponn, Lindemann (2011), S. 68.

⁴⁵⁵ Vgl. Albers, Wintergerst (2014), S. 156.

ihre Strukturierung in Teilfunktionen reduziert die Komplexität in der Konzeptphase. Die Funktionsmodellierung erleichtert die Lösungssuche durch die Vermeidung von Vorfixierungen.⁴⁵⁶ Die Funktionsdekomposition führt zu einer ersten Produktgliederung.⁴⁵⁷ Die präzise Beschreibung der Gesamtaufgabe mit den beteiligten Wirkgrößen und den geforderten Eigenschaften ermöglicht die Ableitung der Gesamtfunktion.⁴⁵⁸

Im Gegensatz zur Produktfunktion beinhaltet das *Produktverhalten* neben den gewollten Zusammenhängen auch die ungewollten Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangswirkgrößen. Es gilt ein stabiles Produktverhalten anzustreben, welches die erwünschte Wirkung des technischen Produkts, trotz auftretender Störungen, erzielt,⁴⁵⁹ um ein Fehlverhalten⁴⁶⁰ und eine daraus resultierende Schädigung zu vermeiden.

2.7.2.2 Realisierung der Produktfunktion durch Effekte

Die Realisierung von Teilfunktionen erfolgt über physikalische, biologische oder chemische Effekte.⁴⁶¹ *Physikalische Effekte* spielen die größte Rolle für technische Produkte. Erst die Kenntnis von physikalischen Effekten ermöglicht nach dem Funktions-Effekt-Gesetz die Realisierung von Funktionen.⁴⁶² Physikalische Effekte, wie zum Beispiel die COULOMBSche Reibung, der Hebel- und Keileffekt, lassen sich anhand ihrer Größen über elementare physikalische Gesetzmäßigkeiten in der Form von physikalischen Gleichungen $y = f(u, v, w)$ erfassen.⁴⁶³ Konstrukteure müssen aufgrund ihres Fachwissens einen geeigneten Effekt auswählen, um die Teilfunktionen zu realisieren.⁴⁶⁴ Der physikalische Effekt gewährleistet die inhärenten *physikalischen Zusammenhänge* zwischen den Effektgrößen. Unterschiedliche Lösungen mit anderen abhängigen Eigenschaften ergeben sich aus der systematischen Variation von unabhängigen Effektgrößen.⁴⁶⁵ Die Kombination von physikalischen Effekten führt zur Effektstruktur.⁴⁶⁶ Die Trennung zwischen

⁴⁵⁶ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 156; ebenso Ponn, Lindemann (2011), S. 61.

⁴⁵⁷ Vgl. Feldhusen (2016), S. 694.

⁴⁵⁸ Vgl. ebd., S. 693.

⁴⁵⁹ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 386.

⁴⁶⁰ PAHL et al. referenzieren für den ungewollten Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangswirkgrößen auf den Begriff des Fehlverhaltens, vgl. ebd., S. 693. Für den negativen Einfluss von Störgrößen prägen sie die Bezeichnung Störgrößeneinfluss/Störwirkung, vgl. ebd., S. 255.

⁴⁶¹ Vgl. ebd., S. 142-143.

⁴⁶² Vgl. Roth (2000), S. 107.

⁴⁶³ Vgl. Feldhusen et al. (2014), F 3; ebenso Pahl et al. (2007), S. 142-143.

⁴⁶⁴ Vgl. Wäldele (2012), S. 32.

⁴⁶⁵ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 142-143.

⁴⁶⁶ Vgl. Sauer (2006), S. 83.

der Effekt- und Wirkprinzipienebene verschwimmt häufig bei der Lösungssuche und -konkretisierung. Dieses Defizit begründet sich in der fokussierten Gestaltung von Funktionsträgern bei der Lösungssuche und -konkretisierung, weil physikalische Effekte kognitiv mit den geometrischen und stofflichen Eigenschaften der Funktionsträger gekoppelt sind.⁴⁶⁷ Die Modellierung des Wirkprinzips setzt somit die Bekanntheit der physikalischen Effekte voraus.⁴⁶⁸

2.7.2.3 Konkretisierung des technischen Produkts auf Wirkprinzipienebene

Das *Wirkprinzip*⁴⁶⁹ bringt die physikalischen Effekte zur Realisierung einer Funktion⁴⁷⁰ mit den geometrischen und den stofflichen Merkmalen des zu entwickelnden technischen Produkts in einen *Wirkzusammenhang*.^{471, 472} Der Wirkzusammenhang wird an einem Wirkort durch die wirkenden physikalischen Effekte erzeugt.⁴⁷³ Bedingt durch die gedanklich enge Verknüpfung von physikalischen Effekten mit geometrisch-stofflichen Merkmalen, werden meist erst Wirkprinzipien gesucht, welche die physikalischen Effekte mit den verknüpften geometrischen und stofflichen Merkmalen beinhalten.⁴⁷⁴ Die Herausforderung besteht im Erkennen physikalisch verträglicher Kombinationen.⁴⁷⁵ Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich aus der meist qualitativen Angabe von Wirkprinzipieneigenschaften. Die Weiterverfolgung von Wirkprinzipien kann in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses nur bedingt abgeschätzt werden,⁴⁷⁶ um die Anforderungen mit hinreichendem Aufwand zu erfüllen.⁴⁷⁷ Gleiches gilt für die quantitative Abschätzung von fertigungs- und kostenspezifischen Auswirkungen.⁴⁷⁸

Die *Wirkgeometrie* umfasst die Anordnung der *Wirkflächen* und die *Wirkbewegungen* im *Wirkraum* zur Realisierung der Produktfunktion.⁴⁷⁹ Zwei miteinander agierende Wirkflächen bilden ein *Wirkflächenpaar*. Wirkflächen bilden stets den

⁴⁶⁷ Vgl. Sauer (2006), S. 76.

⁴⁶⁸ Vgl. ebd.

⁴⁶⁹ Die Vorsilbe „Wirk-“ bezieht sich auf eine Wirkung, damit die Funktion erfüllt wird.

⁴⁷⁰ Vgl. Ponn, Lindemann (2011), S. 65.

⁴⁷¹ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 255.

⁴⁷² Hierfür muss eine erste Vorstellung von der werkstoffspezifischen Realisierung vorliegen, vgl. Feldhusen et al. (2014), F 3.

⁴⁷³ Vgl. Feldhusen et al. (2014), F 3.

⁴⁷⁴ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 255.

⁴⁷⁵ Als Hilfsmittel zur Beurteilung der Verträglichkeit von Wirkprinzipkombinationen steht die Verträglichkeitsmatrix zur Verfügung.

⁴⁷⁶ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 265.

⁴⁷⁷ Vgl. ebd., S. 259-260.

⁴⁷⁸ Vgl. ebd., S. 265.

⁴⁷⁹ Vgl. Feldhusen et al. (2014), F 3.

Ausgangspunkt für die Gestaltung eines Bauteils.⁴⁸⁰ Über Art, Form, Lage, Größe, Anzahl, Anordnung und Abmessungen werden die Wirkflächen systematisch variiert,⁴⁸¹ um Bauteile trotz gleicher Funktionserfüllung unterschiedlich zu gestalten. Die strukturelle Anordnung von einzelnen Wirkprinzipien führt zur *Wirkstruktur*.⁴⁸²

2.7.2.4 Gestaltebene

Auf der konkretesten Modellierungsebene wird das technische Produkt über seine Produktgestalt modelliert. Die Produktgestalt ergibt sich aus der Gesamtheit der strukturierten Anordnung von Baugruppen, Bauteilen und Komponenten mit ihren detaillierten Gestalt- und Werkstoffeigenschaften.⁴⁸³

2.7.3 *Contact & Channel-Ansatz (C&C²-A)*

Der *Contact & Channel-Ansatz (C&C²-A)* von ALBERS und MATTHIESEN, auch bekannt in seiner Basisdefinition als Elementmodell „Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen“⁴⁸⁴, eröffnet die Möglichkeit zur Modellierung des technischen Produkts im *Funktions-Gestalt-Zusammenhang*. Der C&C²-A setzt die Produktfunktion mit der physischen Wirkstruktur in Beziehung.⁴⁸⁵

Das Modell nach ALBERS und MATTHIESEN baut auf den kleinsten gemeinsamen Grundelementen von technischen Systemen auf: Wirkflächenpaare (engl. contacts) und Leitstützstrukturen (engl. channels). *Wirkflächenpaare (WFP)* entstehen durch Wirkflächen von benachbarten Wirkkörpern, die aufgrund ihres Wirkzusammenhangs ganz, teil- oder zeitweise in Kontakt stehen⁴⁸⁶ und zur Produktfunktion beitragen. Wirkelemente alleine können keine Funktion erfüllen. Die Realisierung der Funktion ist erst durch Wechselbeziehungen mit anderen Wirkelementen oder über *Connektoren (C)* mit der Systemumgebung möglich.⁴⁸⁷

Die *Leitstützstruktur (LSS)* verbindet zwei Wirkflächenpaare miteinander.⁴⁸⁸ Die *Tragstruktur* bildet die Summe aller Leitstützstrukturen.⁴⁸⁹ Damit ermöglicht der C&C²-A als konstruktionsmethodisches Modell eine durchgängige Modellierung

⁴⁸⁰ Vgl. Hoenow, Meißner (2014), S. 38.

⁴⁸¹ Vgl. Tjalve (1978), S. 68-70; ebenso Feldhusen et al. (2014), F 3.

⁴⁸² Vgl. Pahl et al. (2007), S. 231. und S. 259; ebenso Feldhusen et al. (2014), F 4.

⁴⁸³ Vgl. Sauer (2006), S. 79-80.

⁴⁸⁴ Vgl. Albers, Matthiesen (2002), S. 55; ebenso Matthiesen (2002), S. 49.

⁴⁸⁵ Vgl. Albers, Wintergerst (2014), S. 151.

⁴⁸⁶ Vgl. Albers, Matthiesen (2002), S. 56.

⁴⁸⁷ Vgl. Albers, Wintergerst (2014), S. 159.

⁴⁸⁸ Vgl. Albers, Matthiesen (2002), S. 57.

⁴⁸⁹ Vgl. ebd.; ebenso Matthiesen (2002), S. 51.

der Zusammenhänge zwischen der Produktfunktion und der Produktgestalt. Hierdurch verfolgt der C&C²-A das Ziel, die Funktionen von existierenden Produkten und von neuen Produktgenerationen zu verbessern.⁴⁹⁰ Die folgenden drei elementaren *Grundhypothesen* beschreiben den C&C²-A ganzheitlich. Sie adressieren die Wechselwirkungen zwischen Systemelementen und der Systemumgebung, die Funktionsrealisierung durch WFP und LSS und den fraktalen Charakter des C&C²-A.

Grundhypothese 1: Wechselwirkung

Die Grundelemente von technischen Systemen müssen zum Zweck ihrer Funktionserfüllung mindestens mit einem anderen Grundelement in Wechselwirkung stehen. Die Wechselwirkung entsteht über den Kontakt von Wirkflächen gemeinsamer Wirkflächenpaare (WFP).⁴⁹¹ Die Interaktion mit der Systemumgebung erfolgt über die Wirkflächen von Connectoren (C). Eine Funktionserfüllung ist erst in Wechselwirkung mit der Umgebung möglich.⁴⁹²

Grundhypothese 2: Funktion

Die minimale Modellierung einer Systemfunktion besteht immer aus mindestens zwei Wirkflächenpaaren und einer sie verbindenden Leitstützstruktur (LSS).⁴⁹³ Nur die Eigenschaften der Wirkflächenpaare und der Leitstützstrukturen sind funktionsbestimmend.⁴⁹⁴ Die Leitstützstruktur eines Feldes erfüllt in Interaktion mit zwei weiteren Leitstützstrukturen die Funktion bei der Modellierung von Feldern.⁴⁹⁵

Grundhypothese 3: Fraktaler Charakter

Jedes System und Teilsystem kann entsprechend des jeweiligen Abstraktionsgrades bei der Systembetrachtung über die Grundelemente der Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen in unterschiedlicher Anzahl, Anordnung und Form abgebildet werden.⁴⁹⁶ Exakt zwei Wirkflächen bilden zusammen ein Wirkflächenpaar.⁴⁹⁷

Fraktale Modelle ermöglichen die Modellierung des technischen Produkts auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen.⁴⁹⁸ Das Top-down-Vorgehen überführt Wirk-

⁴⁹⁰ Vgl. Albers, Wintergerst (2014), S. 152.

⁴⁹¹ Vgl. Albers, Matthiesen (2002), S. 58; ebenso Matthiesen (2002), S. 53.

⁴⁹² Vgl. Albers, Braun (2011), S. 18.

⁴⁹³ Vgl. Albers, Matthiesen (2002), S. 58.

⁴⁹⁴ Vgl. ebd.

⁴⁹⁵ Vgl. Matthiesen (2002), S. 54.

⁴⁹⁶ Vgl. ebd.

⁴⁹⁷ Vgl. Albers, Matthiesen (2002), S. 58.

⁴⁹⁸ Vgl. Albers, Wintergerst (2014), S. 162.

strukturen auf der Gesamtsystemebene in Wirkstrukturen auf den Subsystemebenen, um die Gesamtfunktion durch Teilfunktionen zu realisieren.⁴⁹⁹ Übergeordnete Funktionen und Eigenschaften des Gesamtsystems dienen als Vorgabe für die konstruktionsrelevanten Merkmale auf der Modellierungsebene der Wirkstruktur. Das folgende Beispiel 7 zeigt die Modellierung einer Ritzel-Zahnstange-Paarung mit einer prozessintegrierten, mechanisch gefügten Zahnstange.

Beispiel 7: C&C²-Modellierung einer Ritzel-Zahnstange-Paarung

Das mechanische Fügen durch Spaltprofilieren ermöglicht das prozessintegrierte Fügen von funktionsrelevanten Formelementen in einer kontinuierlichen Fließfertigung (siehe Beispiel 1). Die prozessintegriert gefügte Zahnstange kann über eine *Ritzel-Zahnstange-Paarung* zur Realisierung einer Antriebsfunktion für einen lineargeführten Schlitten beitragen. In der Gesamtheit bilden die spaltprofilierte Linearführung, der Schlitten mit seinem Antrieb und einer weiteren Getriebestufe zur Umformung des Motordrehmoments, und die Ritzel-Zahnstange-Paarung ein *Linearsystem*.

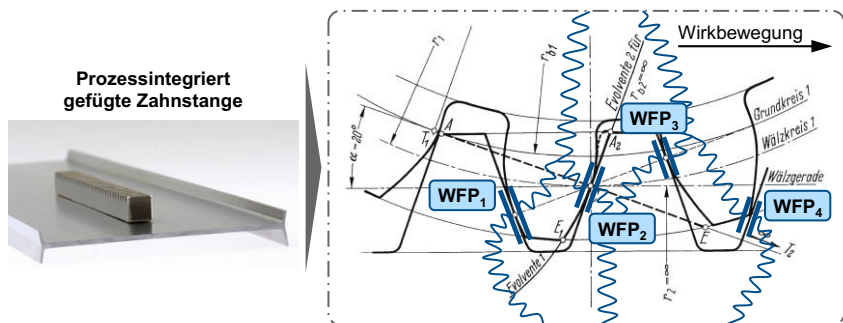


Abbildung 38: Modellierung der Ritzel-Zahnstange-Paarung mit dem C&C²-A^{500, 501}

Die Ritzel-Zahnstange-Paarung bewirkt eine translatorische Bewegung des lineargeführten Schlittens. Die rotatorische Energie $E_{\text{mech,rot}}$ wird in translatorische Energie $E_{\text{mech,trans}}$ umgeformt. Der C&C²-A ermöglicht die *fraktale Modellierung* des Linearsystems auf unterschiedlichen Modellierungsebenen der Ritzel-Zahnstange-Paarung im *Funktions-Gestalt-Zusammenhang* zur Realisierung der Produktfunktion (siehe Abbildung 38).

⁴⁹⁹ Vgl. Albers, Wintergerst (2014), S. 163.


⁵⁰⁰ Bildnachweise: (links) Meisenbach Verlag (2016); (rechts) Eigne Darstellung nach dem C&C²-A mit Ritzel-Zahnstange-Paarung nach Haberhauer, Bodenstein (2014), S. 470.

⁵⁰¹ Die Connectoren der modellierten Ritzel-Zahnstange-Paarung befinden sich außerhalb des dargestellten Systemausschnitts.

ben aus den wirkstrukturellen Festlegungen auf der Wirkprinzepebene in quantitative Angaben auf der Gestaltebene.⁵⁰⁶ Die realisierbare Lösung ergibt sich unter technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten durch die Auswahl von Werkstoffen und Fertigungsverfahren.⁵⁰⁷ Aus diesen Überlegungen lassen sich die abhängigen und unabhängigen Produkteigenschaften auf jeder Ebene der hierarchischen Produktmodellierung integrieren. Auf jeder Modellebene werden Struktur- und Elementeigenschaften unterschieden (siehe Abbildung 39).

Für jedes Partialmodell der Produktmodellebenen existieren abhängige, nicht direkt durch den Konstrukteur festlegbare Eigenschaften und unabhängige Eigenschaften, die direkt durch den Konstrukteur festgelegt werden können.

Tabelle 4: Unabhängige Modellstruktur- und Modellelementmerkmale⁵⁰⁸

 Konkretisierungsgrad	Modellebene	Strukturmerkmale	Elementmerkmale
	Produktfunktion	■ Art, Anzahl und Anordnung der Teilfunktionen	■ Funktionsoperationen ■ Art und Anzahl der Ein- und Ausgangsgrößen
	Physikalischer Effekt	■ Art, Anzahl und Anordnung der (Teil-)Effekte	■ Den jeweiligen Effekt beschreibende Merkmale ■ Art und Anzahl der Effektgrößen
	Wirkprinzip	■ Art, Anzahl und Anordnung der Wirkprinzipien und Wirkelemente (z. B. Wirkflächenpaare, Wirkkörper, Wirkbewegung)	■ Merkmale der einzelnen Wirkprinzipien und Wirkelemente (z. B. geometrische Merkmale)
	Produktgestalt	■ Art, Anzahl und Anordnung der Gestaltelemente	■ Gestaltmerkmale der Elemente (Geometrie, Werkstoff)

Jedes Produktpartialmodell kann über die Angabe der *unabhängigen Modellelement- und Modellstruktureigenschaften* beschrieben werden (siehe Tabelle 4).⁵⁰⁹ Im Gegensatz zu den unabhängigen Produktmodelleigenschaften sind die *abhängigen Produktmodelleigenschaften* (siehe Tabelle 5) nicht eindeutig einer Produktmodellebene zuzuordnen.⁵¹⁰ Vielmehr wirken sie sich auf die unterschiedlichen Produktmodellebenen aus.

⁵⁰⁶ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 195.

⁵⁰⁷ Vgl. ebd., S. 305.

⁵⁰⁸ Wäldele (2012), S. 94-95, mit inhaltlichen Änderungen nach Gramlich (2013), S. 81.

⁵⁰⁹ Vgl. Birkhofer, Wäldele (2008), S. 24.

⁵¹⁰ Vgl. Wäldele (2012), S. 96.

Tabelle 5: Abhängige Modellstruktur- und Modellelementmerkmale⁵¹¹


Modellebene	Strukturmerkmale	Elementmerkmale
Produktfunktion	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mechanisierung ■ Automatisierung ■ Gesamtwirkungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Realisierungsaufwand ■ Funktionsbedeutung ■ Funktionskosten
Physikalischer Effekt	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fehleranfälligkeit ■ Innovationshöhe ■ Realisierungsrisiko 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Zeitabhängigkeit ■ Effektdauer ■ Energieversorgung
Wirkprinzip	<ul style="list-style-type: none"> ■ Gesamtwirkungsgrad ■ Raumbedarf ■ Herstellungsaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Kinematik ■ Wirkungsgrad ■ Verschleißneigung
Produktgestalt	<ul style="list-style-type: none"> ■ Montierbarkeit ■ Design/Anmutung ■ Herstellkosten 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Handhabungsfreundlichkeit ■ Design/Anmutung ■ Herstellkosten ■ Lebensdauer

2.7.5 Zwischenfazit

Die *eigenschaftsbasierte Beschreibung und Modellierung* technischer Produkte bietet das Potenzial das technische Produkt durch einen strikten Formalismus, bestehend aus Merkmal und Ausprägung, einheitlich zu beschreiben.

Auf jeder Modellebene kann das zu entwickelnde technische Produkt über seine *Modellelemente* mit den *Elementeigenschaften* und über die *strukturellen Beziehungen* der Modellelemente mit den *Struktureigenschaften* beschrieben werden. Untergeordnete, konkretere Produktmodellebenen präzisieren die übergeordneten, abstrakten Produktmodellebenen.⁵¹² Eine erfolgreiche Konkretisierung des zu entwickelnden technischen Produkts ist somit erst durch die genaue Kenntnis der *Eigenschaftsrelationen* auf den unterschiedlichen Ebenen der Produktmodellierung möglich.

Im Entwicklungsprozess werden *heterogene Modelle* wie Anforderungslisten, Funktionsmodelle, Wirkprinzipmodelle, FEM-Modelle, CAx-Modelle und Stücklisten verwendet, um das zu entwickelnde technische Produkt abzubilden. Die Herausforderungen im Entwicklungsprozess bestehen in der konsistenten Verwendung dieser Modelle, ihrer projektspezifischen Anpassung und ihrem aufeinander abgestimmten Gebrauch. Dabei müssen die verwendeten Modelle auf ei-

⁵¹¹Wäldele (2012), S. 96-97.

⁵¹²Vgl. ebd.

nem angemessenen Abstraktionsniveau vorliegen, um erfolgreich den Funktions-Gestalt-Zusammenhang herzustellen.⁵¹³

Der C&C²-A stellt den Funktions-Gestalt-Zusammenhang über die zentralen Elemente der Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen her. Diese stehen zur Funktionserfüllung über die Connectoren mit der Produktumgebung in Beziehung. Jedes Modellelement des C&C²-A kann über seine Eigenschaften beschrieben werden. Gleiches gilt für die Wirkstruktur, die sich aus der Lage, Anzahl und strukturellen Anordnung der Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen zusammensetzt. Damit eignet sich der C&C²-A zur Modellierung von technischen Produkten auf unterschiedlichen Konkretisierungsebenen.

2.8 Prozessmodellierung

Technische Prozesse spielen in der industriellen Praxis eine entscheidende Rolle. So gilt es, in der Fertigungsprozessplanung durch die Modellierung und durch die Optimierung der Fertigungsprozesse eine möglichst hohe und prozessstabile Produktqualität zu erreichen. Dabei soll eine möglichst hohe Maschinenauslastung durch die optimierte Reihenfolge von Verarbeitungsschritten erzielt werden, um kostenintensive Stillstandzeiten zu vermeiden.⁵¹⁴

Für die modelltheoretische Darstellung von Prozessen existieren anwendungsspezifische Prozessmodelle. Ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK) bilden die Abfolge von Aktivitäten ab. Die Prozessmodellierung der Business Process Model and Notation (BPMN) dient der Geschäfts- und Unternehmensprozessmodellierung. Die Unified Modeling Language (UML) beinhaltet die hochformalisierte Darstellung von Prozessen. Darüber hinaus existieren weitere Modellierungsmöglichkeiten für Geschäftsprozesse wie ARIS⁵¹⁵ oder OMEGA⁵¹⁶.

Entgegen der oft vorzufindenden Definition von Prozessmodellen als vorgehensbezogene Modellierung von Entwicklungs- und Unternehmensprozessen,⁵¹⁷ fokussiert das vorliegende Buch die Modellierung von *technischen Prozessen* im Produktlebenslauf.

⁵¹³ Vgl. Eckert et al. (2010), S. 675.

⁵¹⁴ Vgl. Bungartz et al. (2013), S. 104-105.

⁵¹⁵ Das Akronym ARIS steht für Architektur integrierter Informationssysteme.

⁵¹⁶ Das Akronym OMEGA steht für Objektorientierte Methode zur Geschäftsprozessmodellierung und -analyse.

⁵¹⁷ Vgl. Braun (2014), S. 28.

2.8.1 Technische Prozesse

Technische Prozesse transformieren einen objektbezogenen Anfangszustand eines stofflichen Operanden in einen erstrebenswerten Endzustand. Prozesse laufen in einer gewissen Zeit ab.⁵¹⁸ Der Zweck eines technischen Prozesses liegt in der Zustandsänderung, die durch technische Systeme als Hilfsmittel realisiert wird. Nach der *Zweck-Mittel-Differenzierung* stellt ein Prozess die zweckdienliche und zeitliche Zustandsänderung eines Operanden dar, die über zeitdiskrete Teilzustände abgebildet wird.⁵¹⁹

Der Endzustand des Operanden befriedigt aufgrund der prozessualen Zustandsänderung die Kundenbedürfnisse.⁵²⁰ Somit bedingt eine geforderte Prozessoptimalität ebenfalls die Optimalität des Operators zur zweckdienlichen Realisierung des optimalen Endzustandes des Operanden.⁵²¹ Um die Besonderheiten technischer Systeme bei deren Zustandstransformation abzubilden, existieren *Prozessmodelle* zur expliziten Abbildung von technischen Prozessen. Exemplarisch sind PETRI-Netze, das Prozessmodell von HUBKA und das erweiterte Prozessmodell nach HEIDEMANN anzuführen.

2.8.2 Modellierung mit PETRI-Netzen

PETRI-Netze⁵²² modellieren Prozesse als zeitlich-diskrete Systeme über ihre Struktur. Sie bestehen aus Plätzen, Transitionen mit Kanten, Markierungen und Schritten.⁵²³ Die Zustände des Systems sind als passive Komponenten innerhalb von $\{P\}$ als *Plätze* p (\circ) modelliert. Sie können zustandsbedingt Objekte lagern, speichern oder darstellen.⁵²⁴ Aktive Komponenten der Menge $\{T\}$ sind über *Transitionen* t (\square) modelliert, die „Dinge erzeugen, verbrauchen, transportieren oder verändern.“⁵²⁵ Transitionen entsprechen den Prozessen bei der Modellierung von Prozessen in PETRI-Netzen, um den Zustand eines Platzes zu transformieren. *Kanten* aus $\{F\}$ stellen als gerichtete Komponenten (\rightarrow) die Beziehung zwischen Plätzen und Transitionen her,⁵²⁶ wodurch die *Flussrelation* entsteht.⁵²⁷

⁵¹⁸ Vgl. Eder, Hosnedl (2010), S. 10.

⁵¹⁹ Vgl. Heidemann (2001), S. 71.

⁵²⁰ Vgl. Eder, Hosnedl (2010), S. 81-83.

⁵²¹ Vgl. ebd., S. 95.

⁵²² Benannt nach CARL ADAM PETRI.

⁵²³ Vgl. Reisig (2010), S. 21.

⁵²⁴ Vgl. ebd., S. 22.

⁵²⁵ Ebd., S. 21.

⁵²⁶ Vgl. ebd.

⁵²⁷ Vgl. ebd., S. 23.

Aus diesen Komponenten des Systemtripels $\{P, T, F\}$ bilden PETRI-Netze die Netzstruktur $N = \{P, T, F\}$. *Markierungen* stellen Verteilungen von Marken (\bullet) auf Plätzen dar.⁵²⁸ Sie spezifizieren das zeitlich-dynamische Verhalten der Objekte im Prozess.⁵²⁹ Die Verteilung von Marken repräsentiert die Zustände von Plätzen und Transitionen im PETRI-Netz.⁵³⁰ Eine Transition schaltet nur, wenn die erforderliche Anzahl an Marken auf dem Platz vor der Transition bereitliegt.⁵³¹ Das folgende Beispiel 8 zeigt die exemplarische Modellierung eines Schweißprozesses mit PETRI-Netzen.

Beispiel 8: Zeitdiskrete Modellierung eines Schweißprozesses

Das abgebildete spaltprofilierte Blechbauteil (siehe Abbildung 40) weist nach den Umformprozessen unter Nutzung des Fertigungsverfahrens des Spaltprofilierens an den Längsflanschen einen Spalt auf. Dieser muss verschweißt werden, um ein geschlossenes Hohlkammerprofil zu erzielen.

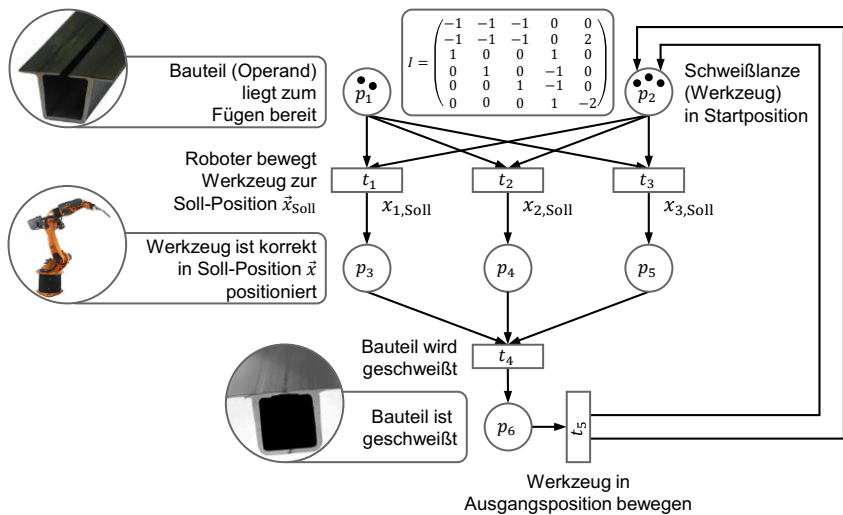


Abbildung 40: Zeitdiskrete PETRI-Modellierung für Schweißprozesse⁵³²

⁵²⁸ Vgl. Reisig (2010), S. 24.

⁵²⁹ Vgl. Gausemeier, Plass (2014), S. 248.

⁵³⁰ Vgl. Reisig (2010), S. 24.

⁵³¹ Vgl. Gausemeier, Plass (2014), S. 248.

⁵³² Bildnachweise: (Schweißroboter) Akon Robotics (2016); (Hohlkammerprofil, oben) Vucic, Groche (2007), S. 71; (Hohlkammerprofil, unten) Taplick, Groche (2010), S. 127.

Der Schweißprozess wird mittels eines Schweißroboters als *Werkzeug* ausgeführt, um mittels Lichtbogenschweißen als *Verfahren* die Längsflansche durch eine stoffschlüssige Verbindung zu fügen. Der Schweißprozess kann über die zeitdiskrete Modellierung mit einem PETRI-Netz abgebildet werden. Zu Beginn befindet sich das Werkzeug, die Schweißlanze des Schweißroboters, in der Ausgangsposition des dreidimensionalen Arbeitsraums. Nach einem Startsignal verfährt der Schweißroboter durch Ansteuerung der einzelnen Motoren die Schweißlanze in die geforderte Soll-Position $\vec{x}_{\text{Soll}} = (x_{1,\text{Soll}}, x_{2,\text{Soll}}, x_{3,\text{Soll}})^T$.

Erst wenn sich die Schweißlanze in der geforderten Soll-Position \vec{x}_{Soll} befindet, wird der Schweißprozess mittels Lichtbogenschweißen als Schweißverfahren ausgeführt. Nach dem Abschluss des Schweißprozesses verfährt der Schweißroboter die Schweißlanze wieder zurück in ihre Startposition. Die *Inzidenzmatrix* verknüpft die Plätze mit Transitionen.

2.8.3 Prozessmodell nach HUBKA

HUBKA modelliert in seiner Theorie technischer Systeme den technischen Prozess (TP) als *Zustandsänderung von Operanden* (siehe Abbildung 41).

Der technische Prozess verändert die Eigenschaften des Operanden.⁵³³ Als Operatoren wirken Menschen, technische Systeme und die Wirkumgebung durch Stoff- (S), Energie- (E) und Informationsflüsse (I). Nur durch das Wirken der Operatoren können Operanden von ihrem Eingangszustand in den Ausgangszustand über Zwischenzustände überführt werden.

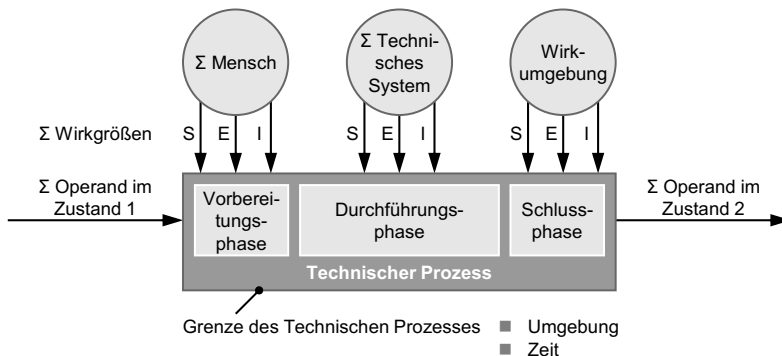


Abbildung 41: Modell technischer Prozesse (TP-Modell)⁵³⁴

⁵³³ Vgl. Hubka (1984), S. 32.

⁵³⁴ Vgl. ebd., S. 31.

2.8.4 Zustandsmodell nach BIRKHOFFER

BIRKHOFFER führt zur Beschreibung der Zustände eines technischen Prozesses ein ablaforientiertes und *eigenschaftsbasiertes Zustandsmodell* ein. Die Transformation eines oder mehrerer stofflicher Objekte definiert den technischen Prozess.⁵³⁵ Das Objekt wird im Ausgangs- und Zielzustand über seine Eigenschaften beschrieben.

Die Handlung bewirkt die Zustandsänderung des Objekts.⁵³⁶ Basierend auf der eigenschaftlichen Prozessdefinition lassen sich vier Fälle zur *Änderung von Objekteigenschaften* unterscheiden (siehe Abbildung 42). Die Objekteigenschaften können *neu erzeugt*, *aufgelöst*, *erhalten* oder *geändert* werden. Für informationsverarbeitende Prozesse verweist BIRKHOFFER auf die Analogie von Informationen zu Eigenschaften. Die unzutreffenden Zielhandlungen können durch Messen/Lesen, Löschen, Speichern oder Beschriften/Kennzeichnen auf eine informationstechnisch konsistente Zustandsmodellierung überführt werden.⁵³⁷

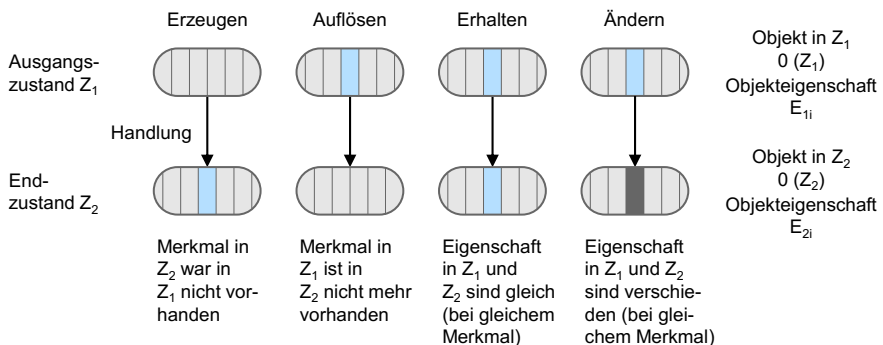


Abbildung 42: Zielhandlungen im Zustandsmodell⁵³⁸

2.8.5 Erweitertes Prozessmodell nach HEIDEMANN

Das *Prozessmodell* von HEIDEMANN (siehe Abbildung 43) basiert auf einer eindeutigen Zweck-Mittel-Differenzierung. Der technische Prozess bewirkt die „zweckdienliche Zustandsänderung eines Objekts in einem Zeitintervall, indem eine Menge von Objektzuständen in einer zeitlichen Abfolge betrachtet wird.“⁵³⁹

⁵³⁵ Vgl. Birkhofer (1980), S. 79.

⁵³⁶ Vgl. ebd., S. 77.

⁵³⁷ Vgl. ebd., S. 78.

⁵³⁸ Vgl. ebd., S. 77.

⁵³⁹ Heidemann (2001), S. 71.

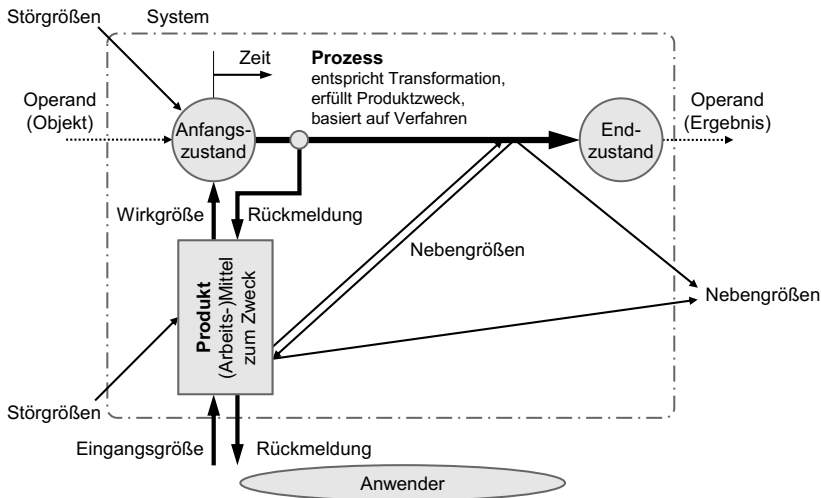


Abbildung 43: Prozessmodell^{540, 541}

Das *technische Produkt* fungiert im Nutzungsprozess als (Arbeits-)Mittel zur Realisierung des geforderten Prozesses durch Bereitstellung der Wirkgrößen. Als systemtechnisches Beschreibungsmodell separiert das erweiterte Prozessmodell die kundenrelevanten, technischen Prozesse und das technische Produkt.⁵⁴²

Die Beschreibung der Operanden und Wirkgrößen erfolgt über deren Eigenschaften.⁵⁴³ Damit das technische Produkt als Mittel zur zweckdienlichen Realisierung des Prozesses wirken kann, bedarf es geeigneter Eingangswirkgrößen aus der Umgebung. Das technische Produkt transformiert die Eingangswirkgröße(n) in die bereitzustellende(n) Ausgangswirkgröße(n). Die *Wirkgrößen* ermöglichen, als gewollte Ausgangswirkgrößen des technischen Produkts, die Zustandsänderung des Operanden vom Anfangs- in den Endzustand.⁵⁴⁴ Die Wirkgröße wird durch Konkretisierung der funktionalen Wirkzusammenhänge über Wirkelemente auf den Operanden übertragen.⁵⁴⁵ Das technische Produkt kann mehrere Wirkgrößen zu

⁵⁴⁰ Vgl. Heidemann (2001), S. 76.

⁵⁴¹ Die Darstellung gewollter Wirkgrößen erfolgt im Prozessmodell über horizontale und vertikale Pfeile. Schräg angeordnete Pfeile charakterisieren ungewollte Wirkgrößen, die es im Rahmen des Entwicklungsprozesses für die Produktkonkretisierung antizipativ zu berücksichtigen gilt.

⁵⁴² Vgl. Sauer (2006), S.70.

⁵⁴³ Vgl. Heidemann (2001), S. 77-78.

⁵⁴⁴ Vgl. ebd., S. 87.

⁵⁴⁵ Vgl. ebd., S. 86-88.

unterschiedlichen Zeitpunkten bereitstellen.⁵⁴⁶ Dies bedingt die Realisierung von Teilprozessen zu unterschiedlichen Zeitpunkten.⁵⁴⁷ Die Variation der Prozessstruktur variiert die Bereitstellung der geforderten Wirkgrößen hinsichtlich ihrer zeitlichen Abfolge, sodass eine optimierte Prozessstruktur als Grundlage für die Ermittlung der Funktionsstruktur des zu entwickelnden technischen Produkts dienen kann.⁵⁴⁸

Verfahren realisieren Prozesse.⁵⁴⁹ Die Festlegung eines geeigneten Verfahrens und der Verfahrensparameter ist eine essenzielle Grundvoraussetzung für die Produktsynthese, um geeignete Wirkgrößen zur Festlegung und potenziellen Verknüpfung von Teilfunktionen in der Funktionsstruktur zu definieren.⁵⁵⁰

Das Prozessmodell integriert die Modellierung von Stör- und Nebengrößen, die ungewollte stoffliche, energetische und informationelle Größen subsumieren.⁵⁵¹ *Störgrößen* wirken außerhalb der Systemgrenze auf das Transformationssystem ein. Sie beeinflussen sowohl den Prozess als auch das technische Produkt.

Um die Stabilität technischer Prozesse in reproduzierbarer Form zu gewährleisten und das geforderte Produktverhalten zu erzielen, müssen

- die Störgrößen identifiziert,
- ihr Einfluss auf den technischen Prozess und das technische Produkt analysiert und
- durch Anforderungen sowohl das Arbeitsmittel als auch der technische Prozess derart antizipativ entwickelt werden, damit der Störgrößeneinfluss zu keinen Schäden führt.⁵⁵²

Im Gegensatz zu Störgrößen entstehen *Nebengrößen* innerhalb des Prozesses oder im Produkt während der planmäßigen, vorausgedachten Nutzung.⁵⁵³ Nebengrößen bezeichnen unerwünschte Größen, die auf das Produkt, den Prozess oder die Systemumgebung wirken. Das technische Produkt und der Prozess können sich gegenseitig über Nebengrößen positiv oder negativ beeinflussen.⁵⁵⁴ Zur Nutzung von

⁵⁴⁶ Vgl. Heidemann (2001), S. 88.

⁵⁴⁷ Vgl. ebd., S. 89.

⁵⁴⁸ Vgl. Sauer (2006), S. 70-71.

⁵⁴⁹ Vgl. Heidemann (2001), S. 82; ebenso Kruse (1996), S. 23.

⁵⁵⁰ Vgl. Sauer (2006), S. 71-72.

⁵⁵¹ Vgl. Heidemann (2001), S. 102 und S. 106.

⁵⁵² Vgl. ebd., S. 102-103.

⁵⁵³ Vgl. ebd., S. 106.

⁵⁵⁴ Vgl. ebd., S. 77.

Synergieeffekten sollten Nebengrößen als gewollte Eingangsgrößen für weitere technische (Teil-)Prozesse und das Arbeitsmittel genutzt werden.⁵⁵⁵

Als Teil eines übergeordneten soziotechnischen Systems erfährt das technische Produkt in seiner Funktionserfüllung Einwirkungen durch den Anwender, der für sein weiteres Handeln Rückmeldungen des technischen Produkts erhält.⁵⁵⁶ Der Kunde/Nutzer kann in das Transformationssystem aktiv oder überwachend eingreifen. Dies geschieht als direkte *Einwirkung* auf den Prozess oder indirekt (mittelbar) über das Arbeitsmittel als Mittel zum Zweck. Darüber hinaus bewirken das Produkt und der Prozess *Rückmeldungen/Rückwirkungen* an den Kunden/Nutzer.⁵⁵⁷ Rückmeldungen beinhalten gewollte Informationen über die Zustände des Operanden im Prozess oder im Produkt.⁵⁵⁸ Die Zwischenzustände können als gewollte Informationen über sensorische Erfassung der detektierten Zustandsgröße an den Anwender als Rückwirkung gemeldet werden.⁵⁵⁹ Ebenso kann die detektierte Zustandsgröße direkt dem Arbeitsmittel zugeführt werden, sodass die Zustandsgröße als Regelgröße für den Regler des Arbeitsmittels fungiert.⁵⁶⁰

Das Prozessmodell nach HEIDEMANN kann der gezielten, antizipativen Ermittlung von Anforderungen⁵⁶¹ bzgl. der Nutzungsphase technischer Produkte dienen. Die systematische Analyse der einzelnen Elemente des Prozessmodells liefert essenzielle Anforderungen an das zu entwickelnde technische Produkt, um im Kontext des Nutzungsprozesses das geforderte Produktverhalten zu erzielen. Die Anforderungen aus der antizipativen Prozessanalyse stellen die verbale Kodierung der Soll-Eigenschaften des ideal angestrebten Produkts dar. Sie beziehen sich auf die äußeren, vom Kunden/Nutzer wahrnehmbaren Eigenschaften.⁵⁶² Die Anforderungsliste wird hinsichtlich der Zweck-Mittel-Differenzierung zum Mindestmodell für die Beschreibung des Kundennutzens.⁵⁶³ Darüber hinaus regt das Prozessmodell die Neu- und Variantenkonstruktion technischer Produkte an. Die Variation der Prozessstruktur bedingt eine zeitlich veränderte Abfolge der Wirkgrößen, die auf den Anfangszustand zur zweckdienlichen Zustandsänderung einwirken. Teilfunktionen können innerhalb der Funktionsstruktur unterschiedlich verknüpft werden, um das gleiche Produktverhalten im prozessualen Kontext zu erzeugen.

⁵⁵⁵ Vgl. Heidemann (2001), S. 107.

⁵⁵⁶ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 56.

⁵⁵⁷ Vgl. Heidemann (2001), S. 77.

⁵⁵⁸ Vgl. ebd., S. 95.

⁵⁵⁹ Vgl. ebd.

⁵⁶⁰ Vgl. ebd., S. 96.

⁵⁶¹ Vgl. ebd., S. 57.

⁵⁶² Vgl. ebd.

⁵⁶³ Vgl. ebd.

2.8.6 Realisierung von technischen Prozessen durch Verfahren

Der Zweck technischer Verfahren liegt in der Wandlung von Stoffen. Ausgangsstoffe gilt es, infolge physikalischer, biologischer oder chemischer Effekte, in Prozessen zu wandeln.⁵⁶⁴ Dies ermöglicht die Unterscheidung der mechanischen, thermischen, chemischen und biologischen Verfahrenstechnik mit ihren domänen-spezifischen Verfahren, die über die Fachdisziplin der Mehrphasenströmungen integral miteinander verknüpft sind.⁵⁶⁵

Nach HEIDEMANN dienen Verfahren zur Realisierung von Prozessen⁵⁶⁶ durch eine „geordnete Menge zweckentsprechend erforderlicher Operationen technischer, manueller oder gedanklicher Natur.“⁵⁶⁷ Technische Funktionen stellen hingegen den gewollten Zusammenhang zwischen energetischen und informationsspezifischen Wirkgrößen her. Die DIN EN ISO 9000 definiert Verfahren als „festgelegte Art und Weise, eine Tätigkeit oder einen Prozess [...] auszuführen.“⁵⁶⁸ Demnach konkretisieren Verfahren die abstrakte Prozessbeschreibung.^{569, 570}

Auch wenn Verfahren und Prozesse in der konstruktionswissenschaftlichen Literatur oft synonym behandelt werden,⁵⁷¹ so ist den Unterscheidungen gemein, dass sich Prozesse nur auf die Zustandsänderung des stofflichen Operanden beziehen. *Verfahren* umfassen die geordnete Abfolge von Wirkabläufen zur Realisierung des Prozesses, d. h. um die Zustandsänderung des Operanden zu bewirken.⁵⁷²

Das *Verfahrensprinzip* stellt analog zum Wirkprinzip den Wirkzusammenhang zwischen den stofflichen Systemen (Operanden/Operatoren) und den Wirkgrößen her. Hierdurch resultiert in der Verfahrensentwicklung ein komplexes Netzwerk an Verfahrensparametern, die gezielt geplant werden müssen, damit das technische Produkt zweckdienlich zur Realisierung des Verfahrens beitragen kann.⁵⁷³ Das folgende Beispiel 9 verdeutlicht die zentrale Stellung des Verfahrensprinzips für das Fertigungsverfahren Spaltprofilieren zur Realisierung eines Umformprozesses.

⁵⁶⁴ Vgl. Bohmet (2014), N 2.

⁵⁶⁵ Vgl. ebd.

⁵⁶⁶ Vgl. Heidemann (2001), S. 82.

⁵⁶⁷ Vgl. ebd., S. 145.

⁵⁶⁸ DIN EN ISO 9000 (2015), S. 35.

⁵⁶⁹ Vgl. Heidemann (2001), S. 83.

⁵⁷⁰ Eine detaillierte Übersicht der terminologischen Definitionen zum Verfahrensbegriff findet sich in Heidemann (2001), S. 82 und Sauer (2006), S. 73.

⁵⁷¹ Vgl. Sauer (2006), S. 72-74.

⁵⁷² Vgl. ebd., S. 74.

⁵⁷³ Vgl. Kruse (1996), S. 20-23.

Beispiel 9: Verfahrensprinzip des Fertigungsverfahrens Spaltprofilieren

Das Fertigungsverfahren *Spaltprofilieren* realisiert den geforderten *Umformprozess* des stofflichen Operanden. Das Blechhalbzeug liegt in seinem Ausgangszustand als Blechband vor. Der Umformprozess transformiert das Blechhalbzeug mit dem Fertigungsverfahren Spaltprofilieren in die Produktgestalt eines spaltprofilierten Blechs.

Das *Verfahrensprinzip* stellt den Wirkzusammenhang zwischen den Verfahrensparametern, der Spaltprofilieranlage mit ihrem Werkzeugsystem, bestehend aus Spalt- und Hilfswalzen, und den Wirkgrößen her, welche die Zustandsänderung des Operanden im Prozess realisieren (siehe Abbildung 44). Die verfahrensprinziprelevante Anordnung der Wirkelemente erzeugt die charakteristischen Flansche als Gestaltelemente des Spaltprofils.

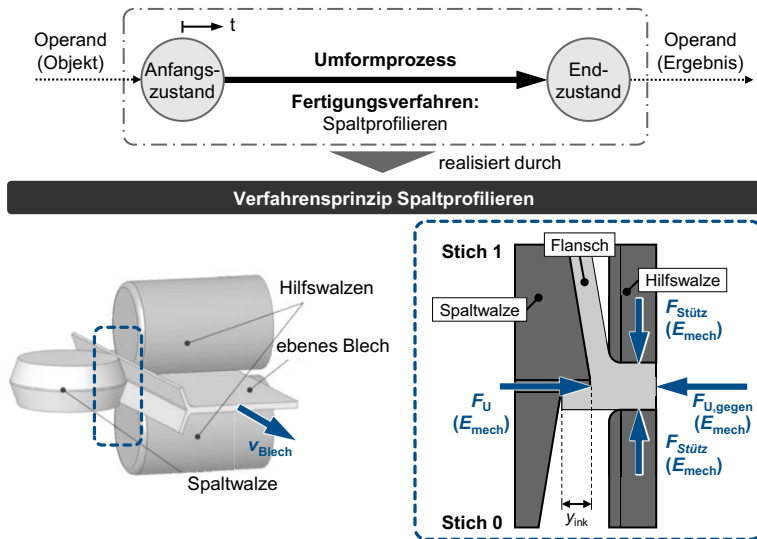


Abbildung 44: Realisierung des Umformprozesses durch Verfahren und Verfahrensprinzip⁵⁷⁴

2.8.7 Zwischenfazit

Die Prozessmodelle weisen eine konsistente Sicht auf die *Modellierung technischer Prozesse* als zweckdienliche Zustandsänderung eines stofflichen Operanden auf. Das *Verfahren* dient zur Realisierung technischer Prozesse.

⁵⁷⁴ Bildnachweise: (links) Vgl. Ringler, Groche (2007), S. 75.; (rechts) Eigene Darstellung, in Anlehnung an Groche et al. (2012), S. 97.

Die Aufgabe des Verfahrens liegt in der Bereitstellung geforderter Prozessgrößen, um die Prozesseingangsgrößen in die Prozessausgangsgrößen zu transformieren. Dabei vereint das Verfahren physikalische Effekte, die zur Gestaltung des Werkzeugs zwecks Realisierung des Verfahrensprinzips in verfahrensprinziprelevante Wirkelemente konkretisiert werden müssen.

2.9 Modellierung des Produktlebenslaufs und -zyklus

Das technische Produkt durchläuft während seiner gesamten Lebenszeit den Produktlebenslauf. Entsprechend der domänenspezifischen Sichtweise werden der *betriebswirtschaftliche, technologische und intrinsische Produktlebenslauf* unterschieden.⁵⁷⁵ Im Rahmen dieses Buchs wird die am häufigsten angewendete Sicht des intrinsischen Produktlebenslaufs mit den Lebenslaufphasen des technischen Produkts fokussiert.⁵⁷⁶

2.9.1 Prozessketten des Produktlebenslaufs

Das zu entwickelnde technische Produkt durchläuft in seinem Produktleben sowohl als Operand als auch als Operator eine Vielzahl von Prozessen. In jeder Lebenslaufphase weist das technische Produkt charakteristische Eigenschaften auf, die innerhalb der jeweiligen Phase relevant sind.⁵⁷⁷ Die Prozesskette des Produktlebenslaufs unterscheidet vier Lebenslaufphasen (siehe Abbildung 45): Werkstoffherstellung, Produktion, Nutzung und Recycling/Entsorgung.⁵⁷⁸ Innerhalb der *Werkstoffherstellung* stellen Gewinnungsprozesse die extrahierten Rohstoffe bereit, um in nachfolgenden Aufbereitungsprozessen Halbzeuge zu erzeugen.⁵⁷⁹

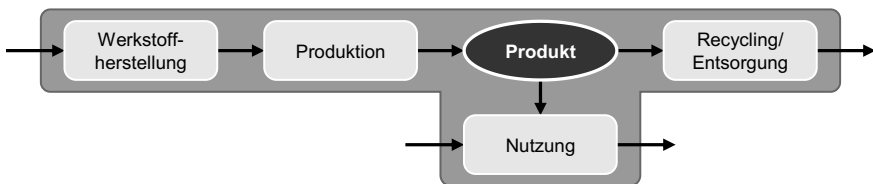


Abbildung 45: Prozesskette des Produktlebenslaufs⁵⁸⁰

⁵⁷⁵ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 97.

⁵⁷⁶ Vgl. ebd., S. 98-99.

⁵⁷⁷ Vgl. Lossack (2006), S. 23.

⁵⁷⁸ Vgl. Birkhofer et al. (2012), S. 564.

⁵⁷⁹ Vgl. ebd.

⁵⁸⁰ Vgl. ebd.; ebenso Birkhofer (2011), S. 7.

Durch Aggregation von Halbzeugen, Bauteilen und modularen Komponenten erfolgt die *Produktion* des technischen Produkts in Fertigungs- und Montageprozessen.⁵⁸¹

Die *Nutzung* nimmt eine Sonderposition ein. Das technische Produkt setzt in der Nutzungsphase aktiv Energien und Informationen um. Es wird nicht, wie in den anderen Phasen, er- bzw. verarbeitet.⁵⁸² Das technische Produkt erfüllt in der Nutzungsphase durch Bereitstellung seiner Produktfunktion seinen zugrundeliegenden Zweck, wodurch ein Nutzen für den Kunden/Nutzer entsteht.

Das operative Nutzungsverhalten des technischen Produkts bedingt sich maßgeblich durch den Umgang des Nutzers und dessen spezifische Nutzungsgewohnheiten.⁵⁸³ Jedes technische Produkt wird primär für seine Nutzung entwickelt, da die Nutzungsphase eine hohe Bedeutung für die erfolgreiche Vermarktung hat.⁵⁸⁴

DANNHEIM und OBERENDER untergliedern die Nutzungsphase aufgrund ihrer großen Bedeutung für die Entwicklung von technischen Produkten in Subprozesse (siehe Abbildung 46).⁵⁸⁵

Das technische Produkt erfüllt in den *Einsatzprozessen* seine Funktion.⁵⁸⁶ Fertigungstechnologische Möglichkeiten dienen der stofflichen Realisierung des entwickelten Produkts. Das Produktlebenslaufmodell schließt in der Lebenslaufphase *Recycling/Entsorgung* mit Recycling- und Entsorgungsprozessen ab.

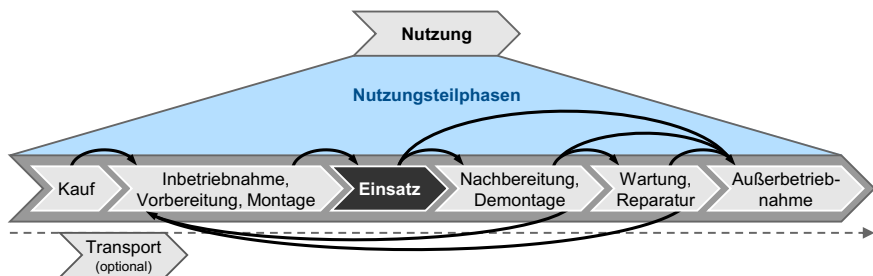


Abbildung 46: Nutzungsteilphasen⁵⁸⁷

⁵⁸¹ Vgl. Abele, Feickert (2005), S. 50.

⁵⁸² Vgl. Birkhofer et al. (2012), S. 564.

⁵⁸³ Vgl. ebd., S. 565.

⁵⁸⁴ Vgl. Heidemann (2001), S. 22.

⁵⁸⁵ Vgl. ebd., S. 93.

⁵⁸⁶ TJALVE bezeichnet den Einsatz auch als Gebrauch und verdeutlicht das aktive Wirken des Produkts zur Zustandstransformation anderer Objekte während seines Gebrauchs, vgl. Tjalve (1978), S. 16.

⁵⁸⁷ In Anlehnung an Dannheim (1999), S. 46.

2.9.2 Prozessketten des Produktlebenszyklus

Sowohl in der konstruktionswissenschaftlichen als auch in der betriebswirtschaftlichen Fachliteratur wird der Begriff des Produktlebenszyklus entsprechend der jeweiligen Sichtweise teils konträr ausgelegt. Im Gegensatz zum Produktlebenslauf umfasst das Modell des *Produktlebenszyklus* die zeitliche Abfolge der Produkt- und Prozessentwicklungstätigkeiten, um die Produktidee in das entwickelte technische Produkt zu überführen (siehe Abbildung 47).⁵⁸⁸

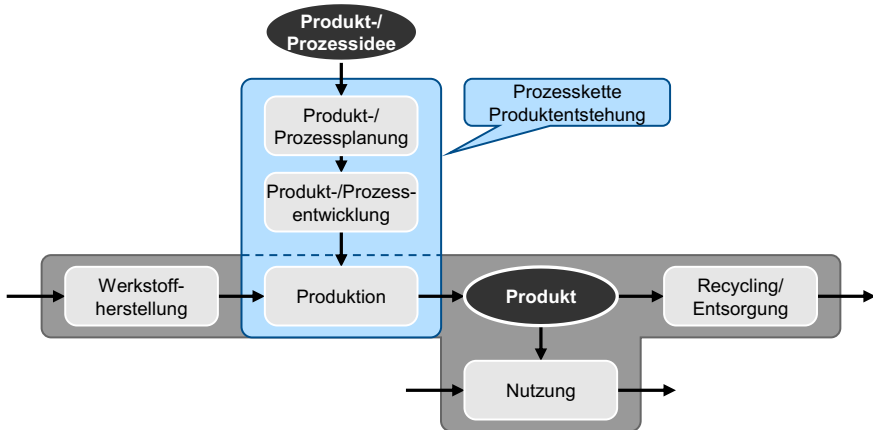


Abbildung 47: Modell des Produktlebenszyklus⁵⁸⁹

Die Produkt- und Prozessentwicklung bilden vereined mit der Produktion und Produktionsvorbereitung die sogenannte Produktentstehung.⁵⁹⁰ Der *Produktentstehungsprozess* beinhaltet alle Phasen zur Überführung der Aufgabe/Idee in die Realisierung des gefertigten Produkts.⁵⁹¹ Er umfasst sowohl die strategische Produktplanung als auch die Produkt- und Prozessentwicklung.⁵⁹² In der Prozesskette der Produktentwicklung werden alle relevanten Produkteigenschaften festgelegt, die entscheidende Auswirkungen auf die Prozesse des Produktlebenslaufs haben.⁵⁹³

⁵⁸⁸ Vgl. Anderl et al. (2007), S. 205; ebenso Fernandes, Machado (2016), S. 8.

⁵⁸⁹ In Anlehnung an Birkhofer (2011), S. 7.

⁵⁹⁰ Vgl. Albers, Braun (2011), S. 7.

⁵⁹¹ Vgl. Schindler (2012), S. 400; ebenso Birkhofer (2011), S. 7. und Bender, Gericke (2016), S. 402

⁵⁹² Vgl. Gausemeier, Plass (2014), S. 25.

⁵⁹³ Vgl. Grabowski, Geiger (1997), S. 16.

Die Entwicklung des Produktionssystems zur Fertigungsprozessplanung nimmt im Produktentstehungsprozess eine exponierte Rolle ein. Produkt- und Prozessentwicklung stehen unter produktionsintegrierenden Aspekten in enger, integrativer Wechselwirkung zueinander.⁵⁹⁴ Einerseits können neue Fertigungstechnologien mit ihren fertigungstechnischen Möglichkeiten das Produkt definieren. Andererseits bedingen innovative Produkte auch neue Fertigungstechnologien zur stofflichen Realisierung⁵⁹⁵ und Entfaltung der Nutzungspotenziale.

2.9.3 *Produkt-, Prozess- und Technologiereifegrad*

Der *Produktreifegrad* bezieht sich auf den aktuellen Konkretisierungsgrad des zu entwickelnden technischen Produkts. Als quantifiziertes Maß orientiert sich der Produktreifegrad am Erfüllungsgrad der Anforderungen durch den Abgleich des aufgespannten Zielsystems.⁵⁹⁶ Die Analogie bildet der Prozessreifegrad bei der Prozessentwicklung.⁵⁹⁷ Der Prozessreifegrad wird oftmals auf den Fortschritt im Entwicklungsprozess bezogen, sodass Ansätze wie die Capability Maturity Model Integration (CMMI), das Project Management Maturity Model (PMMM), die Software Process Improvement and Capability Determination (SPICE) oder auch Scrum zur Entwicklung reifer Produkte existieren. Der Fokus des vorliegenden Buchs liegt nicht auf der Entwicklungsprozessreife, sondern auf der Prozessreife von technischen Prozessen im Produktlebenslauf.

Der *Prozessreifegrad* bestimmt maßgeblich die Prozessqualität. Innerhalb der spezifizierten Toleranzen erfüllt das technische Produkt mit allen Komponenten die geforderte Funktion.⁵⁹⁸ Produkt- und Prozessreife sind integral miteinander verbunden. Erst durch eine gesteigerte Produktreife können (Teil-)Prozesse sinnvoll strukturiert werden.⁵⁹⁹ Ausgereifte Prozesse führen zur Prozessstabilität.⁶⁰⁰ Ausgereifte Fertigungsprozesse bilden die Basis für eine erfolgreiche Vermarktung des entwickelten Produkts. PAHL et al. postulieren, dass ein Produkt mit höchster Produktreife optimal ist und kein Verbesserungspotenzial besitzt.⁶⁰¹

⁵⁹⁴ Vgl. Bender, Gericke (2016), S. 402.

⁵⁹⁵ Vgl. Albers, Gausemeier (2012), S. 20.

⁵⁹⁶ Vgl. Feldhusen et al. (2013), S. 382.

⁵⁹⁷ Weitere synonyme Begriffe sind als Projektfortschritt, Projektreife, Prozessfortschritt und Prozessreife zu finden, vgl. Krehmer (2012), S. 34.

⁵⁹⁸ Vgl. Weckenmann, Bookjans (2012), S. 806.

⁵⁹⁹ Vgl. Paetzold (2012), S. 963.

⁶⁰⁰ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 95.

⁶⁰¹ Vgl. ebd., S. 297.

Die NASA⁶⁰² stellt mit dem Technology Readiness Level (TRL) ein levelbasiertes Maß für die Beurteilung der *Technologiereife* in der Technologieentwicklung bereit. Mit insgesamt neun Stufen (TRL1 bis TRL9) erfolgt die Beurteilung der Technologiereife. Sie richtet sich von der grundlagentheoretischen Technologieerforschung, über die Identifizierung von Anwendungspotenzialen einer Technologie, deren prototypische Erprobung bis hin zum realitätsnahen Einsatz auf Komponenten-, Sub- und Gesamtsystemebene. Die höchste Technologiereife wird im realen Produkteinsatz unter realen Einsatzbedingungen erreicht.⁶⁰³ Damit verdeutlicht der TRL, dass eine sorgfältige Technologieerforschung und -erprobung notwendig ist, um Innovationspotenziale für das technische Produkt im prozessualen Kontext seines realen Einsatzes auszuschöpfen.

Produkt- und Prozessreifegrade dienen der Beurteilung, wie genau die festgelegten Produkteigenschaften die an das Produkt und den Prozess gestellten *Anforderungen* erfüllen. Der Neuheitsgrad des technischen Produkts definiert die Festlegung der Produktfunktion (was ein Produkt können soll) und welchen Einsatzzweck es besitzt.

2.9.4 Zwischenfazit

Die Modellierung der einzelnen Prozesse, die das zu entwickelnde technische Produkt in seinem Produktleben durchläuft, erfolgt über den Produktlebenslauf. Der *Produktlebenslauf* stellt aus Entwicklungssicht die angedachten *Nennprozesse* dar, die idealisierend und bestmöglich angenommen sind. Das technische Produkt durchläuft den Produktlebenslauf in den Phasen der Werkstoffherstellung, Produktion und Recycling/Entsorgung als Operand. In der Nutzungsphase wird das technische Produkt vom Operanden zum Operator, da es aktiv operiert und genutzt wird.

Der *Produktlebenszyklus* vereint die Prozesskette der Produktentwicklung mit dem Produktlebenslauf. Ziel der Produkt-/Prozessentwicklung ist es, das technische Produkt und dessen Prozesse derart zu entwickeln, dass es wie angedacht in den Prozessen des Produktlebenslaufs als Operand oder Operator vorliegt. Die Unterscheidung von Produkt- und Prozessreifegraden bzgl. der Konkretisierung von Anforderungen technischer Produkte und Prozesse ermöglicht die Grundlage zur Beurteilung des Entwicklungsfortschritts.

⁶⁰² Das Akronym NASA steht für National Aeronautics and Space Administration.

⁶⁰³ Vgl. Krehmer (2012), S. 45-46.

2.10 Modellierung von Problemlösungs- und Entwicklungsprozessen

Entwicklungsprozesse sind von hoher Komplexität geprägt. Unter einer Vielzahl vernetzter Informationen, auftretender Unsicherheit und einem damit verbundenen hohen Risiko sind Entwicklungsprozesse möglichst effizient zu bewältigen.

Insbesondere kommt der Fehlervermeidung in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses eine entscheidende Bedeutung zu, da sich die Kosten einer Fehlerbehebung mit fortschreitendem Entwicklungsprozess in jeder Phase um den Faktor zehn⁶⁰⁴ erhöhen. Daher sind die kontinuierliche Verifikation im Entwicklungsprozess und die Validierung im realen Entwicklungsumfeld wichtig, um ein fehlerfreies Produkt zu entwickeln. Effiziente Entwicklungsprozesse sind die Grundlage für den Erfolg eines Unternehmens.⁶⁰⁵

2.10.1 Grundlagen des Problemlösens

Konstrukteure nutzen zur Lösung von Problemen ihr technisches Wissen.⁶⁰⁶ Sie analysieren das Problem und entwickeln in der Synthese eine Beschreibung neuer technischer Systeme oder technischer Prozesse,⁶⁰⁷ die das Problem lösen.⁶⁰⁸ Der Wissenserwerb und die Informationsbeschaffungen nehmen einen großen Anteil der konstruktiven Tätigkeiten ein.⁶⁰⁹

Probleme zeichnen sich durch einen unerwünschten Anfangszustand aus, der in einen erwünschten Endzustand zu überführen ist.⁶¹⁰ Sie werden erst durch kognitive Denkprozesse im Problemlösungsprozess überwunden (siehe Abbildung 48).⁶¹¹ Die auftretende Komplexität bei der Problemlösung ist aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher zu erfüllender Anforderungen innerhalb ihrer Synthese und Bewertung mental kaum zu bewältigen. Das daraus resultierende hohe Risiko für Fehlentscheidungen⁶¹² begründet sich in der Intransparenz, Polytelie, Vernetzung und intrinsischen Dynamik komplexer Probleme.⁶¹³

⁶⁰⁴ Vgl. Bertsche et al. (2009), S. 200.

⁶⁰⁵ Vgl. Braun (2014), S. 6.

⁶⁰⁶ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 1.

⁶⁰⁷ Vgl. Eder, Hosnedl (2010), S. 14.

⁶⁰⁸ Vgl. Fernandes, Machado (2016), S. 1.

⁶⁰⁹ Vgl. Grabowski, Geiger (1997), S. 65-73.

⁶¹⁰ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 56; ebenso Pahl et al. (2007), S. 60 und Habermann et al. (2015), S. 25.

⁶¹¹ Vgl. Lindemann (2009), S. 28; ebenso Pahl et al. (2007), S. 60.

⁶¹² Vgl. Breiing, Knosala (1997), S. 6-7.

⁶¹³ Vgl. Dörner (1987), S. 18.

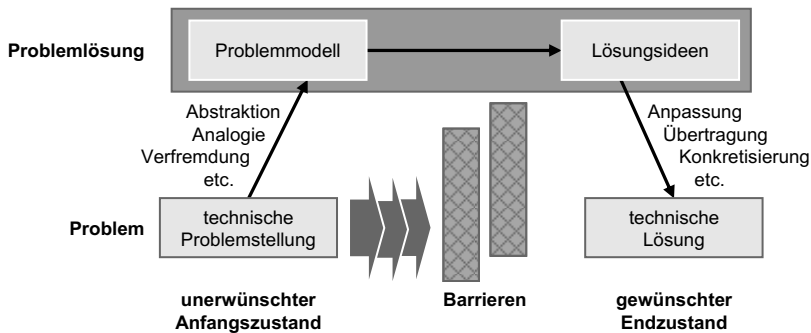


Abbildung 48: Barrieren zwischen Problem und Lösung⁶¹⁴

Der Problemlösungsprozess setzt sich aus Analyse- und Syntheseschritten zusammen.⁶¹⁵ Die *Problemanalyse* dient der detaillierten Untersuchung des Problems zur Gewinnung umfangreicher Informationen. Die *Lösungssynthese* verfolgt die Erarbeitung von Lösungen und Lösungsansätzen. Analysierende und beurteilende Zwischenschritte führen zu Entscheidungen, um die bestmögliche Problemlösung aus den generierten Lösungen zu filtern.⁶¹⁶ Das Konstruieren stellt einen Optimierungsprozess zwischen Zielen und teils widersprüchlichen Bedingungen dar.⁶¹⁷

Im Gegensatz zu anderen Problemlösungsansätzen, geht die *Theorie des erfinderischen Problemlösens (TRIZ)* von einer Problemsituation aus, die durch eine Vielzahl widersprüchlicher Anforderungen definiert ist. Unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten können über einen softwareseitig unterstützten Meta-Algorithmus erarbeitet werden.⁶¹⁸ Durch *Abstraktion* eines konkret formulierten Problems können neue, abstrakte Lösungen gefunden werden, die mittels Standardverfahren in konkrete Lösungen zu überführen sind (siehe Abbildung 49).⁶¹⁹ Es wird die Wahrscheinlichkeit zur Generierung innovativer Lösungen erhöht. Die *Strukturierung* von Problemen in Teilprobleme reduziert die Komplexität.⁶²⁰ Die Strukturierung des Problems erfolgt über die Angabe der Anfangs- und Endzustände (Ist- und Soll-Zustände) sowie der notwendigen Operationen (Elementarhandlungen), um die Zustände ineinander zu überführen.⁶²¹

⁶¹⁴ Vgl. Dörner (1987), S. 29.

⁶¹⁵ Vgl. Schindler (2012), S. 400-401.

⁶¹⁶ Vgl. ebd.

⁶¹⁷ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 2.

⁶¹⁸ Vgl. Feldhusen et al. (2014), F 7.

⁶¹⁹ Vgl. VDI 4521 (2016), S. 11.

⁶²⁰ Vgl. Birkhofer (1980), S. 95.

⁶²¹ Vgl. ebd., S. 92.

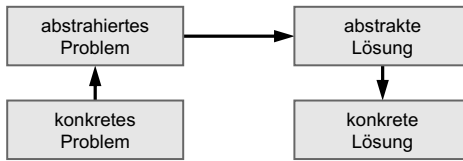


Abbildung 49: TRIZ-Problemlösungsprozess⁶²²

Durch die Auswahl von Elementaroperationen und ihrer zweckmäßigen Anordnung in einer Handlungsabfolge wird die *Problemlösungsstrategie* definiert. Es können Trial-and-Error-, heuristische und algorithmisierte Methoden unterschieden werden.⁶²³ Heuristische Lösungsmethoden sind in der Produktentwicklung am häufigsten vorzufinden.⁶²⁴ Der Nutzen von Problemlösungsprozessen liegt in der Generierung von Lösungen für komplexe Probleme, die ohne eine systematische Vorgehensweise nur ineffizient oder kaum lösbar wären. Der steigende Innovationsdruck heutiger Unternehmen bedingt eine systematische Unterstützung kognitiver Denkprozesse zur Problemlösung.

Problemlösungszyklen führen in der *Synthese*, ausgehend von den definierten Zielen der Problemstellung, durch verschiedene Denk- und Handlungsaktivitäten, zu Ergebnissen. Die *Analyse* führt zum kontinuierlichen Abgleich der Ergebnisse mit den definierten Zielen, um eine zufriedenstellende Lösungsgüte zu erreichen.

Der Problemlösungszyklus, aufbauend auf der DEYWESchen Problemlösungslogik, folgt einer strengen konsekutiven Reihenfolge der Handlungsschritte. Iterationen und Rücksprünge sind situationsgerecht möglich (siehe Abbildung 50).⁶²⁵

Die *Situationsanalyse* erfolgt im Ist-Zustand-orientierten Vorgehen zur Extraktion, Formulierung neuer Ziele⁶²⁶ und Ableitung von Entwicklungstendenzen aus gegenwärtigen und vergangenen Situationen.⁶²⁷ Im Soll-Zustand-orientierten Vorgehen sind die Ziele a priori durch die Vorgabe eines Idealkonzepts⁶²⁸ bekannt. Die Ziele werden analysiert, um Kompromisse mit der Ausgangssituation (Ist-Zustand) und den Realisierungsmöglichkeiten des Idealkonzepts anzustreben.⁶²⁹

⁶²² VDI 4521 (2016), S. 11.

⁶²³ Vgl. Birkhofer (1980), S. 93.

⁶²⁴ Vgl. ebd.

⁶²⁵ Vgl. Haberfellner et al. (2015), S. 72.

⁶²⁶ Vgl. Schuh et al. (2012a), S. 171.

⁶²⁷ Vgl. Haberfellner et al. (2015), S. 80.

⁶²⁸ Vgl. ebd.

⁶²⁹ Vgl. ebd., S. 73.

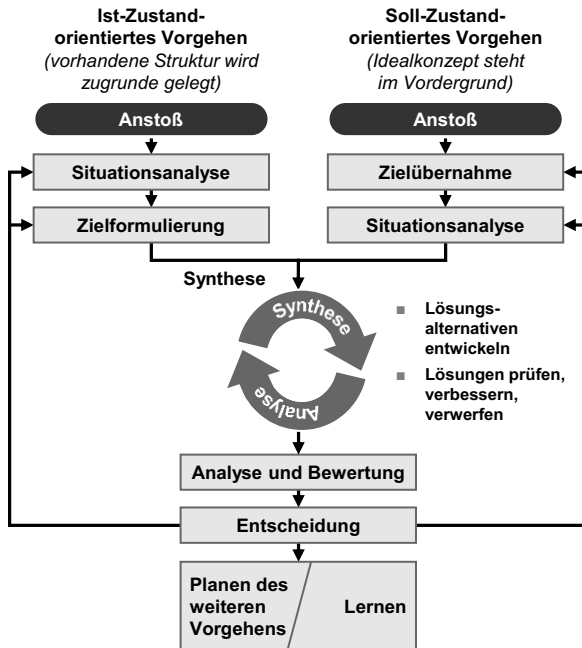


Abbildung 50: Problemlösungszyklus⁶³⁰

Die Entwicklungsaufgabe muss genau geklärt werden, um die vorherrschende, von Unsicherheit geprägte Situation mit qualitativen und quantitativen Informationen zu spezifizieren.⁶³¹ Dies dient der Klärung der Kernfrage, was entwickelt werden soll. Dieser Schritt erfolgt innerhalb der *Zielformulierung*, um die teils unsichere Informationsbasis schrittweise über lösungsneutrale, vollständige, operationale und realistische Anforderungen zu konkretisieren.⁶³²

Im Handlungszyklus erfolgt die Suche nach Lösungen durch *Synthese- und Analyseschritte*, die im stetigen Wechsel vom Entwickler durchgeführt werden.⁶³³ Dies führt zur synthetisch-konstruktiven Lösungsentwicklung und der analytisch-destruktiven Auswahl und Bewertung von Lösungen.⁶³⁴ Aktuelle Erkenntnisse aus den Analyse- und Syntheseschritten führen zur kontinuierlichen Anpassung der

⁶³⁰ Vgl. Haberfellner et al. (2015), S. 153 in der Darstellung von VDI 2206 (2004), S. 28.

⁶³¹ Vgl. ebd., S. 74.

⁶³² Vgl. ebd., S. 75.

⁶³³ Vgl. Schuh et al. (2012a), S. 172.

⁶³⁴ Vgl. Haberfellner et al. (2015), S. 76.

Situationsanalyse und Zielformulierung. Die *Analyse und Bewertung* dient der Evaluation der generierten Lösungen. Der Abgleich zwischen den aus Berechnungen, Simulationen oder Versuchen⁶³⁵ abgeleiteten Lösungseigenschaften und Anforderungen liefert die Grundlage für die *Entscheidung* über die Auswahl einer oder mehrerer Lösungen.⁶³⁶

Stehen zu Beginn des Entwicklungsprozesses vorwiegend problemorientierte Informationsbeschaffungsprozesse im Fokus, so wandelt sich der Problemlösungszyklus mit zunehmender Konkretisierung hin zu generierten Lösungen. Der Schritt *Nacharbeiten und Lernen* gewährleistet die reflexiven Aktivitäten zur Auswertung der gesammelten Informationen und Erfahrungen innerhalb kontinuierlicher Verbesserungsprozesse (KVP). Denkpsychologische Arbeiten verdeutlichen, dass sich der Problemlösungsprozess aus heuristischen Elementaroperationen definiert, die zu Makrooperationen innerhalb eines behavioristischen Modells zur Lösung komplexer Probleme kombiniert werden können.⁶³⁷ In der Systemtheorie definiert das *TOTE-Schema*⁶³⁸ eine Abfolge aus analytischen und synthetischen Aktivitäten. Basierend auf einer vorhandenen Problemsituation gilt es:

- die Kernproblematik analytisch zu erfassen (*Test*),
- Lösungen synthetisierend zu entwickeln (*Operate*),
- die generierten Lösungen mit den Anforderungen abzugleichen (*Test*) und
- reflexiv den Entscheidungsprozess mit einer zufriedenstellenden Lösung oder mit weiteren Verbesserungsmaßnahmen zu verlassen/neu zu initiieren (*Exit*).⁶³⁹

2.10.2 Systematisierung von Modellen des Entwicklungsprozesses

Der Konstrukteur unterliegt im Entwicklungsprozess häufig unklaren Anforderungen, dem Druck zur Entwicklung neuer, innovativer Lösungen und muss für die Einhaltung zeitlicher und finanzieller Ressourcen sorgen.⁶⁴⁰ Aus der detaillierten Analyse kognitiver Denkprozesse während des Konstruierens folgert DYLLA, dass im Konstruktionsprozess elementare Arbeitsschritte beim Problemlösen in häufig wechselnder Abfolge verwendet werden (siehe Abbildung 51). Dabei erfolgen die elementaren Arbeitsschritte innerhalb von Problemlösungsphasen.

⁶³⁵ Vgl. Schuh et al. (2012a), S. 172-173.

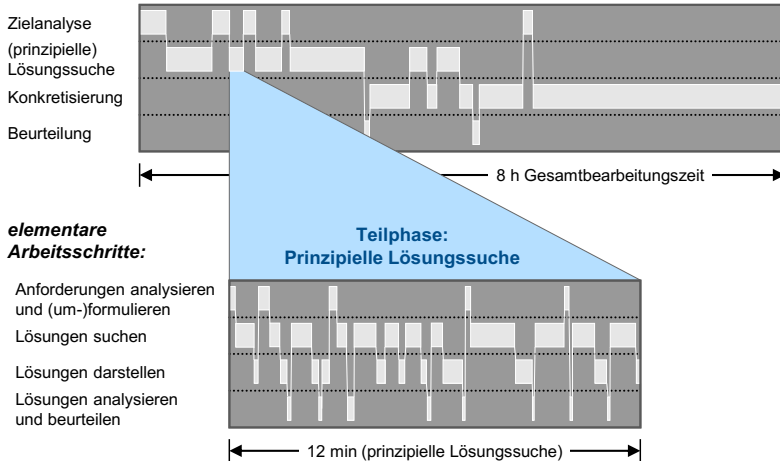
⁶³⁶ Vgl. Haberfellner et al. (2015), S. 78.

⁶³⁷ Vgl. Miller et al. (1960), S. 25-26; ebenso Kläger (1993), S. 25.

⁶³⁸ Das Akronym TOTE steht für Test Operate Test Exit.

⁶³⁹ Vgl. Miller et al. (1960), S. 30-31.

⁶⁴⁰ Vgl. Dylla (1991), S. 28; ebenso Bender, Gericke (2016), S. 409.

Problemlösephasen:**Abbildung 51:** Häufigkeit elementarer Arbeitsschritte beim Problemlösen⁶⁴¹

Die *Zielanalyse* korreliert mit dem ersten Arbeitsabschnitt der VDI-RICHTLINIE 2221. In dieser Phase soll ein Suchmodell des Geforderten durch Explikation der Ziele und Voraussetzungen aufgebaut werden. Das Suchmodell stellt die „ungefähre Vorstellung des zu konstruierenden Gegenstands [dar], die unvollständig ist [...]“. ⁶⁴² Die Generierung von Lösungen findet in der *Lösungssuche* statt. ⁶⁴³ Hier-nach folgt die *Lösungskonkretisierung*. ⁶⁴⁴ Die Analyse und *Beurteilung* der Lösungen erfolgt begleitend während der (*prinzipiellen*) *Lösungssuche* und *Konkretisierung*. ⁶⁴⁵ Über die Anforderungsanalyse, -formulierung und -umformulierung werden Informationen zur Klärung der Aufgabe gesammelt, Anforderungen dokumentiert und in eine operationalisierte Form transformiert. ⁶⁴⁶

Die Abfolge *elementarer Arbeitsschritte* beim Problemlösen zeigt, dass die Aufgabenklärung im Entwicklungsprozess keinen initial abgeschlossenen Schritt darstellt. Vielmehr werden mit unterschiedlicher Intensität während der gesamten Lösungssuche im Entwicklungsprozess Anforderungen weiter ergänzt und detail-

⁶⁴¹ Vgl. Dylla (1991), S. 52.

⁶⁴² Vgl. ebd., S. 51.

⁶⁴³ Vgl. ebd.

⁶⁴⁴ Vgl. ebd.

⁶⁴⁵ Vgl. ebd.

⁶⁴⁶ Vgl. ebd., S. 53.

liert.⁶⁴⁷ Ein spezifisches Entwicklungsprojekt bedingt mehrmalige Iterations-schleifen von Arbeitsschritten.

DYLLAS Untersuchungen widerlegen jegliche Annahmen zur strikt sequenziellen Abfolge von Arbeitsschritten im Entwicklungsprozess. Vorgehensmodelle zur modelltheoretischen Abbildung der praktischen Konstruktionsaktivitäten müssen diesem Umstand gerecht werden und eine flexible, situationsbedingte Unterstützung gewährleisten. LINDEMANN verdeutlicht, dass etablierte Grundprinzipien⁶⁴⁸ den Entwickler neben Vorgehensmodellen durch ihren präskriptiven Charakter und durch ihre Wirkungsweise in vielen Methoden unterstützen. Hierzu zählen das Systemdenken, die Problemzerlegung, Strategien „Vom Ganzen zum Detail“, „Vom Abstrakten zum Konkreten“, das diskursive Vorgehen, wiederkehrende Reflexion, das „Denken in Alternativen“ und der Modalitätenwechsel.⁶⁴⁹

Entwicklungsprozesse sind durch analysierende und synthetisierende Tätigkeiten geprägt, die i. d. R. qualitative Angaben quantifizieren.⁶⁵⁰ Der hohe Vernetzungs- und Komplexitätsgrad der Tätigkeiten in Entwicklungsprozessen bedingt die Verwendung von Entwicklungsmodellen. Sie ermöglichen Entwicklern die gezielte Orientierung zur Reflexion abgeschlossener Prozesse, Strukturierung aktueller Prozesse, die Planung zukünftiger Prozesse und den Einsatz angemessener Hilfsmittel und Methoden.⁶⁵¹ *Entwicklungsprozessmodelle* verfolgen aufgrund ihres generischen Aufbaus⁶⁵² eine branchen- und unternehmensunabhängige Anwendbarkeit.⁶⁵³ Damit sind Entwicklungsmodelle vom konkreten Anwendungsfall unabhängig.⁶⁵⁴ Da Entwicklungsprozesse immer in die strategische Ausrichtung eines Unternehmens eingebunden sind,⁶⁵⁵ bedürfen sie der spezifischen Adaption. Entwicklungsprozessmodelle dienen als *Referenzmodelle*,⁶⁵⁶ die als phasenorientierte/aktivitätenbasierte, problem-/lösungsorientierte, prä-/deskriptive oder integrierte Modelle abgebildet sind (siehe Abbildung 52). Integrierte und ganzheitliche Modelle umfassen mehrere Dimensionen zugleich.⁶⁵⁷

⁶⁴⁷ Vgl. Baumgart (2016), S. 425.

⁶⁴⁸ Die Grundprinzipien basieren auf den Arbeiten von HABERFELLNER et al., DÖRNER, PAHL et al. und LINDEMANN.

⁶⁴⁹ Lindemann (2009), S. 55-57.

⁶⁵⁰ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 189.

⁶⁵¹ Vgl. Fernandes, Machado (2016), S. 32.

⁶⁵² Vgl. Eckert, Clarkson (2005), S. 21.

⁶⁵³ Vgl. Bender, Gericke (2016), S. 412 und S. 415.

⁶⁵⁴ Vgl. ebd., S. 415.

⁶⁵⁵ Vgl. ebd., S. 403.

⁶⁵⁶ Vgl. Blessing et al. (2007), S. 89.

⁶⁵⁷ Vgl. Bender, Gericke (2016), S. 407.

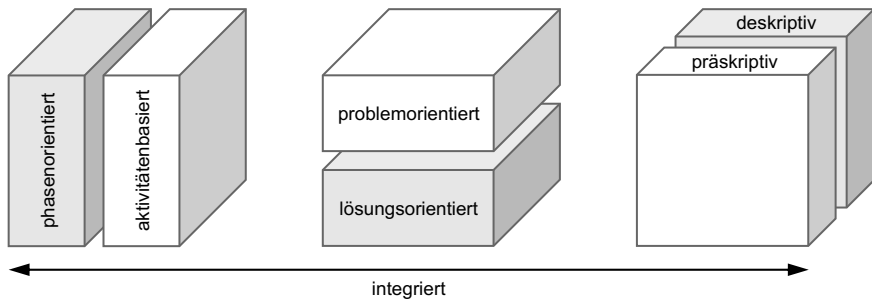


Abbildung 52: Klassifizierung von Entwicklungsmodellen⁶⁵⁸

Die in den Abschnitten 2.10.3 bis 2.10.5 folgenden Modelle von Entwicklungsprozessen verdeutlichen die jeweilige Bedeutung von Anforderungen im Entwicklungsprozess.

2.10.3 Phasen- und aktivitätenbasierte Entwicklungsmodelle

2.10.3.1 Hauptarbeitsschritte beim Planen und Konstruieren

Die Konstruktionslehre nach PAHL und BEITZ beschreibt den Entwicklungsprozess als phasenorientierten, iterativ ablaufenden Prozess mit *Hauptarbeitsschritten* (siehe Abbildung 53). Vom Planen und Klären der Aufgabe erfolgt die Definition prinzipieller Lösungen im Rahmen des Konzipierens. Während des Entwurfs wird die Produktgestalt festgelegt und durch weiteres Ausarbeiten in Ausführungs- und Nutzungsunterlagen vollständig dokumentiert.

Die *Anforderungsliste* muss als zentrales Dokument im Entwicklungsprozess stetig aufgrund neuer Informationen und getroffener Festlegungen angepasst werden. Das Vorgehensmodell verdeutlicht die wichtige Bedeutung von *Anforderungen* während der gesamten Entwicklung. Sie bilden die Grundlage für die kontinuierliche Verbesserung des zu entwickelnden Produkts. PAHL und BEITZ führen zur abgestimmten Aufbereitung der Anforderungen mit der Lösungsfindung und -konkretisierung das Abstrahieren zum Erkennen der Problemstellung zwecks Identifikation geforderter Funktionen an.⁶⁵⁹ Darüber hinaus findet die Verknüpfung von Anforderungen mit den Funktionsträgern durch das Erkennen von gestaltungsbestimmenden Anforderungen und durch das Klären der räumlichen Bedingungen zur Quantifizierung qualitativ definierter Wirkstrukturen statt.⁶⁶⁰

⁶⁵⁸ In Anlehnung an Wynn, Clarkson (2005), S. 37 mit Ergänzung integrierter Entwicklungsmodelle.

⁶⁵⁹ Vgl. Pahl, Beitz (2007), S. 237.

⁶⁶⁰ Vgl. ebd., S. 307.

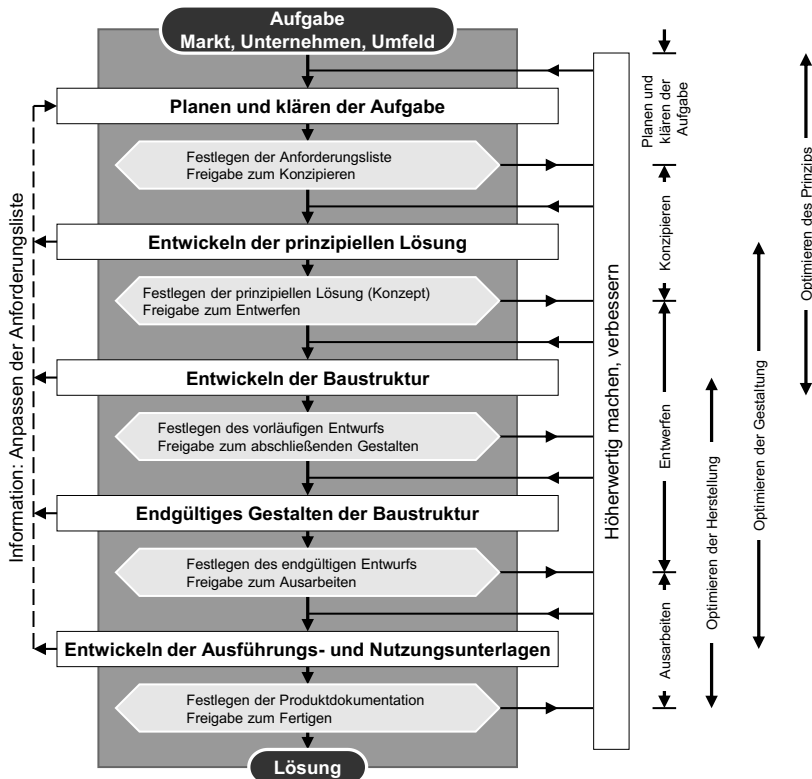


Abbildung 53: Hauptarbeitsschritte beim Planen und Konstruieren⁶⁶¹

2.10.3.2 Methodisches Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte – VDI-RICHTLINIE 2221

Die VDI-RICHTLINIE 2221 behandelt in Anlehnung an das konstruktionsmethodische Vorgehen von PAHL und BEITZ ein allgemeingültiges und branchenunabhängiges Entwicklungs- und Konstruktionsvorgehen als zweckmäßige und praxisnahe Leitlinie.⁶⁶² Sie untergliedert den Entwicklungsprozess technischer Systeme und Produkte⁶⁶³ in sieben *Arbeitsabschnitte und Arbeitsergebnisse* (siehe Abbildung 54).⁶⁶⁴

⁶⁶¹ In Anlehnung an Pahl, Beitz (1977), S. 52 mit Ergänzungen nach Pahl et al. (2007), S. 198.

⁶⁶² Vgl. VDI 2221 (1993), S. 2.

⁶⁶³ Vgl. ebd., S. 6.

⁶⁶⁴ Vgl. ebd., S. 9.

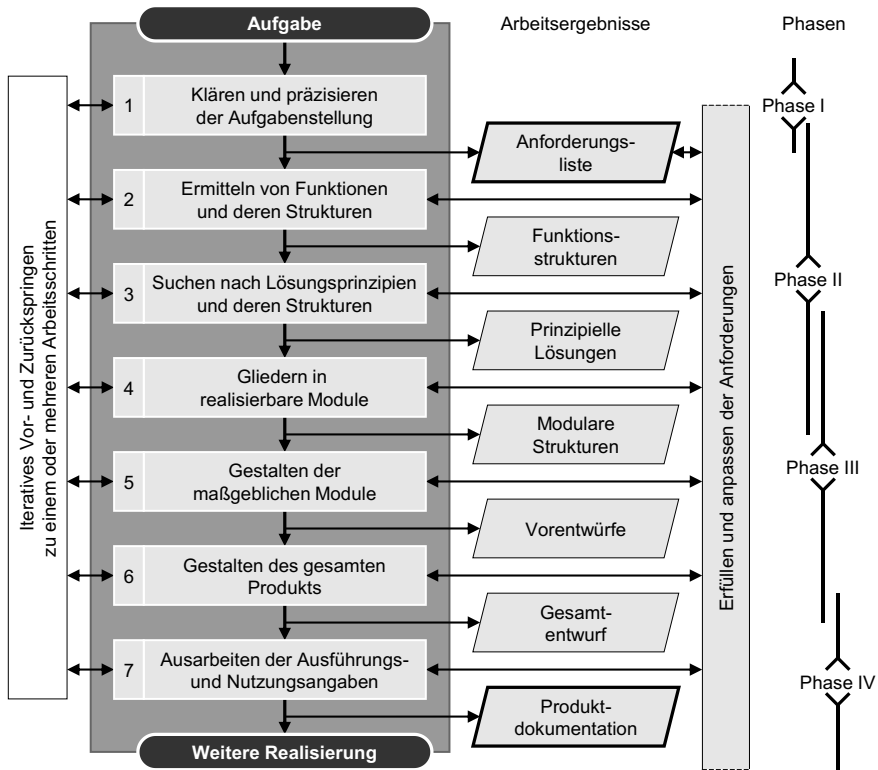


Abbildung 54: Generelles Vorgehensmodell nach VDI-RICHTLINIE 2221⁶⁶⁵

Branchenabhängig ist das Vorgehensmodell der VDI-RICHTLINIE 2221 anzupassen, da die Anforderungen in unterschiedlichen Branchen ebenso wie die Konstruktionsziele unterschiedlich sind.⁶⁶⁶ Die Arbeitsabschnitte sind entsprechend dem jeweiligen Entwicklungsprojekt teilweise, vollständig, mehrfach oder in einer anderen Reihenfolge zu durchlaufen.⁶⁶⁷

Auch wenn die VDI-RICHTLINIE oft als starres Rahmenwerk angesehen wird, so ermöglicht die *Informationsbrücke* unternehmens- und projektspezifische Flexibilität im Entwicklungsprozess.⁶⁶⁸ Arbeitsabschnitte können nach der VDI-RICHTLINIE 2221 zu insgesamt vier Entwicklungs- und Konstruktionsphasen subsumiert

⁶⁶⁵ Eigene Darstellung, in Anlehnung an VDI 2221 (1993), S. 9.

⁶⁶⁶ Vgl. ebd., S. 6-7.

⁶⁶⁷ Vgl. ebd., S. 9.

⁶⁶⁸ Vgl. ebd., S. 10.

werden.⁶⁶⁹ *Anforderungen* nehmen in der VDI-RICHTLINIE 2221 eine zentrale Position ein. Sie müssen über den gesamten Entwicklungsprozess erfüllt, angepasst und in jedem Arbeitsschritt beachtet werden, damit das technische Produkt stets auf einer aktuellen Anforderungsgrundlage entwickelt wird. Die mengenbezogene Darstellung nach GRABOWSKI und RUDE im VENN-Diagramm verdeutlicht die Sonderstellung von Anforderungen. Sie bilden die größte Menge im Entwicklungsprozess. Die in ihr enthaltenen Anforderungen sind zu unterschiedlichen Zeitpunkten für die Lösungskonkretisierung relevant (siehe Abbildung 55).

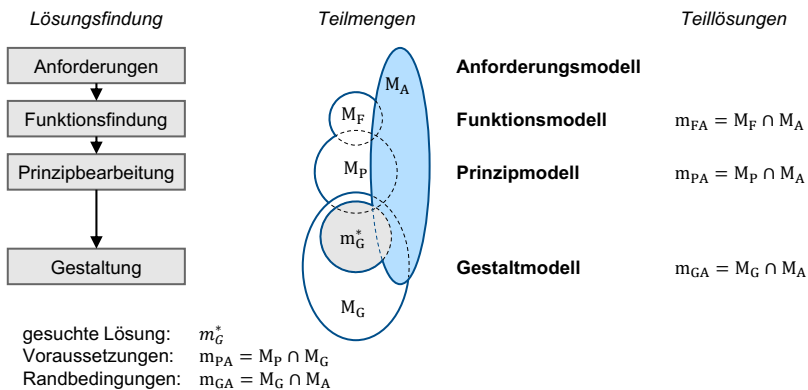


Abbildung 55: VENN-Diagramm der Teilmengen im Konstruktionsprozess⁶⁷⁰

Die Aufgabenklärung und Konzeptphase stellen die Grundlage für innovative und erfolgreiche Produkte dar. Die VDI-RICHTLINIE 2221 legt den Schwerpunkt auf die Produktfunktion, wie auch die Hauptarbeitsschritte von PAHL und BEITZ. Einflüsse der Fertigung und Fertigungsrestriktionen werden erst beim Gestalten berücksichtigt, wodurch iterative Anpassungen resultieren. Die *Klärung und Präzisierung der Aufgabenstellung* führt zu einer umfassend dokumentierten Aufgabenstellung in Form von Anforderungen.⁶⁷¹ Sie werden in der *Anforderungsliste* dokumentiert.⁶⁷² Die Anforderungsliste ist das einzige Arbeitsergebnis, das über alle Phasen hinweg stets modifiziert und aktuell sein muss.⁶⁷³ Alle Entscheidungen in den Arbeitsschritten basieren auf den Anforderungen innerhalb der Anforderungsliste.⁶⁷⁴

⁶⁶⁹ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 263.

⁶⁷⁰ In Anlehnung an Rude (1998), S. 179.

⁶⁷¹ Vgl. VDI 2221 (1993), S. 9-10.

⁶⁷² Vgl. ebd.

⁶⁷³ Vgl. ebd., S. 10.

⁶⁷⁴ Vgl. ebd.

Der funktionale Schwerpunkt der Fokussierung der VDI-RICHTLINIE 2221 wird im Ermitteln der Funktionen (Gesamt- und Teilfunktionen) und ihrer Strukturen ersichtlich. Die *Funktionsstruktur* bildet die Grundlage für die weitere Suche nach Lösungsprinzipien.⁶⁷⁵ Die werkstrukturelle Realisierung von Lösungsprinzipien führt zur *Wirkstruktur*.⁶⁷⁶

Prinzipielle Lösungen weisen geeignete Wirkstrukturen zur Funktionserfüllung auf. Die Gliederung von prinzipiellen Lösungen in realisierbare *Module* dient der Komplexitätsreduktion und Parallelisierung der aufwendigen Arbeitsschritte zum Gestalten des technischen Produkts. Der *Gesamtentwurf* beinhaltet die detaillierte Gestaltung aller Module, bestehend aus Gruppen, Elementen und Schnittstellen. Dies inkludiert ebenfalls die Festlegungen zur Produktrealisierung in der Fertigung.⁶⁷⁷

2.10.4 Problem- und lösungsorientierte Entwicklungsmodelle

2.10.4.1 Characteristics Properties Modelling (CPM) und Property Driven Development (PDD)

Das *Characteristics Properties Modelling (CPM)* zur Analyse technischer Systeme und *Property Driven Development (PDD)* zur Synthese technischer Systeme nach Weber unterscheidet strikt zwischen Merkmalen (engl. characteristics) und Eigenschaften (engl. properties).⁶⁷⁸ Basierend auf bekannten Merkmalen (C_i) werden bei der *Analyse* die Eigenschaften (P_j) eines Produkts ermittelt (siehe Abbildung 56).⁶⁷⁹

Die *Merkmale* des technischen Produkts stehen in wechselseitigen Abhängigkeiten (R_j). Merkmale beschreiben die Struktur, Gestalt und Beschaffenheit eines technischen Produkts. Sie können direkt vom Konstrukteur festgelegt und beeinflusst werden.⁶⁸⁰ *Eigenschaften* beschreiben hingegen das Verhalten des technischen Produkts, wie bspw. Funktion, Gewicht, Sicherheit, Ästhetik und Fertigbarkeit. Im Gegensatz zu Merkmalen können Eigenschaften nicht durch den Konstrukteur unmittelbar beeinflusst werden.⁶⁸¹

⁶⁷⁵ Vgl. VDI 2221 (1993), S. 10.

⁶⁷⁶ Vgl. ebd.

⁶⁷⁷ Vgl. ebd., S. 10-11.

⁶⁷⁸ Vgl. Weber (2011), S. 93; ebenso Weber (2012), S. 25.

⁶⁷⁹ Vgl. ebd., S. 94.

⁶⁸⁰ Vgl. ebd., S. 93; ebenso Weber, Husung (2016), S. 99.

⁶⁸¹ Vgl. ebd.; ebenso ebd.

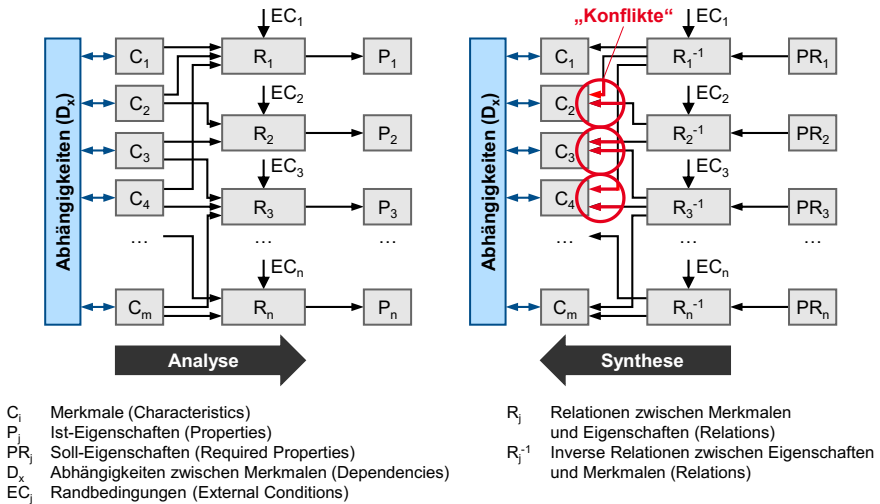


Abbildung 56: Analyse- und Synthesemodell im CPM⁶⁸²

Merkmale sind analog zu HUBKAs „internal properties“, SUHs „design parameters“ und BIRKHOFERS „unabhängigen Eigenschaften“. Eigenschaften sind inhaltlich äquivalent zu „external properties“ (HUBKA), „functional requirements“ (SUH) und „abhängigen Eigenschaften“ (BIRKHOFER).⁶⁸³

Für die *Synthese* technischer Produkte gilt es, aufgrund geforderter Eigenschaften (engl. required properties PR_i) Merkmale (C_i) und deren geeignete Kombinationen (R_j^{-1}) zu bestimmen. CPM/PDD behandelt Soll-Eigenschaften äquivalent zu Anforderungen. Ziel des Entwicklungsprozesses ist die bestmögliche Definition von Ist-Eigenschaften anhand der geforderten Soll-Eigenschaften durch wiederkehrende Analyse- und Syntheseschritte.⁶⁸⁴ Basierend auf den Abweichungen (ΔP_j) der geforderten Eigenschaften (PR_j) und den Eigenschaften des entwickelten technischen Produkts (P_j) erfolgt die Adaption von Merkmalen, bis die geforderten Eigenschaften erfüllt sind.

Die eindeutige Unterscheidung zwischen Merkmalen und Eigenschaften ermöglicht die Definition von wiederverwertbaren physischen oder virtuellen *Lösungselementen und -mustern*⁶⁸⁵ (siehe Abbildung 57).

⁶⁸² In Anlehnung an Weber (2012), S. 37.

⁶⁸³ Vgl. Weber, Husung (2016), S. 100.

⁶⁸⁴ Vgl. Weber (2011), S. 94-95.

⁶⁸⁵ Engl. solution patterns.

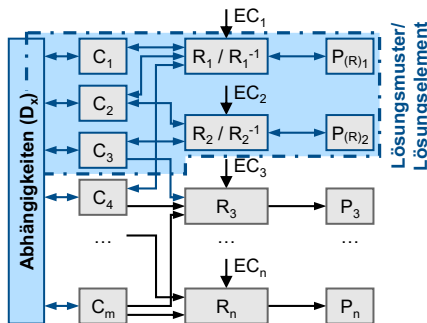


Abbildung 57: Lösungsmuster und -elemente⁶⁸⁶

Lösungselemente/-muster zeichnen sich über bekannte Merkmal-Eigenschafts-Relationen als Träger produktbezogenen Wissens aus (Aggregationen aus C_i , P_j und R_j bzw. R_j^{-1}).⁶⁸⁷ Sie sind in der Praxis detailliert untersuchte und bewährte Grundbausteine zur Wiederverwendung von Konstruktionswissen, wie bspw. Maschinenelemente als physikalische Lösungsmuster.⁶⁸⁸ Features in CAX-Systemen fungieren als virtuelle Lösungselemente.⁶⁸⁹ Aufgrund der bekannten Merkmals-Eigenschafts-Relationen können Lösungselemente und -muster sowohl bei der Analyse als auch bei der Synthese verwendet werden.⁶⁹⁰ Der Austausch und die Erschaffung neuer Lösungselemente/-muster sind zentrale Innovationsarten.⁶⁹¹

In Analogie zu den funktionalen Lösungselementen in Solution Pattern, bezeichnet WEBER Lösungselemente im prozessualen Kontext der Fertigung und Montage als *Activity Patterns*.⁶⁹² Basierend auf den geforderten Eigenschaften werden während der Synthese Lösungselemente vergangener Entwicklungsprojekte wiederverwendet.⁶⁹³ Die Relationen R_j repräsentieren Modelle, Methoden und Werkzeuge zur Vorhersage der Eigenschaften unter externen Randbedingungen.⁶⁹⁴

CPM/PDD kann über Eigenschaften des Produktlebenszyklus (PL_j) auf die Lebenszyklusbetrachtung erweitert werden. Abweichungen des Produktverhaltens

⁶⁸⁶ Vgl. Weber (2011), S. 96.

⁶⁸⁷ Vgl. Weber, Husung (2016), S. 103.

⁶⁸⁸ Vgl. Weber (2011), S. 106.

⁶⁸⁹ Vgl. ebd., S. 103.

⁶⁹⁰ Vgl. Vajna et al. (2009), S. 40.

⁶⁹¹ Vgl. Weber, Husung (2016), S. 99.

⁶⁹² Vgl. Weber (2011), S. 96.

⁶⁹³ Vgl. ebd.

⁶⁹⁴ Vgl. Weber, Husung (2016), S. 101.

im Lebenszyklus werden über die Abweichung von PL_j zu P_j festgestellt. Der Abgleich der PL_j mit PR_j führt zur systematischen Weiterentwicklung der Anforderungen für eine weitere Produktgeneration.⁶⁹⁵ DEUBEL erweitert CPM/PDD im *Value Driven Development (VDD)* um modulbezogene Sichten.⁶⁹⁶ Eigenschaften auf Systemebene sind von Merkmalen auf Subsystemebene abhängig. Merkmale auf Subsystemebene fungieren wiederum als Eigenschaften von Komponenten mit ihren Merkmalen.

Merkmale und Eigenschaften weisen unterschiedliche Relativitätsverhältnisse entsprechend der zugrunde gelegten Systemebene auf. Das vorgeschlagene Rahmenwerk der CPM/PDD-Theorie nach WEBER ermöglicht die flexible Anwendung von Produktmodellen. Es bleibt offen, zu welchem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess welche Produktmodelle genutzt werden sollen, um die Merkmale des zu entwickelnden technischen Produkts schrittweise festzulegen. CPM/PDD liegt eine fehlende Differenzierung von Anforderungen gegenüber Eigenschaften zugrunde. Hierdurch wird ein Großteil der realen Komplexität von Entwicklungsprojekten ausgeblendet, in denen Anforderungen deutlich vom Soll-Eigenschaftsformalismus abweichen.

2.10.4.2 Axiomatic Design

SUH beschreibt im Axiomatic Design den Entwicklungsprozess als formales, mathematisches *Mapping* innerhalb von vier abgegrenzten Domänen:⁶⁹⁷ *Customer Domain*, *Functional Domain*, *Physical Domain* und *Process Domain*⁶⁹⁸ (siehe Abbildung 58). Diese werden mit spezifischen Variablen und Attributen beschrieben. Wie auch viele andere Modelle des Entwicklungsprozesses liegt der Schwerpunkt des Axiomatic Designs auf der Erfüllung von Kundenbedürfnissen durch Produktfunktionen.⁶⁹⁹

Die *Customer Domain* ist durch die Menge an Customer Attributes $\{CAs\}$ charakterisiert.⁷⁰⁰ Sie beschreiben die Bedürfnisse/Attribute, die das zu entwickelnde Produkt, der Prozess, das System oder das Material erfüllen müssen, um den Kunden zufriedenzustellen.⁷⁰¹ Die Menge der Customer Attributes repräsentiert die kundenseitig geforderten Produkteigenschaften.

⁶⁹⁵ Vgl. Weber, Husung (2016), S. 101.

⁶⁹⁶ Vgl. Deubel (2007), S. 63-65.

⁶⁹⁷ Vgl. Suh (2001), S. 10.

⁶⁹⁸ Vgl. ebd.; ebenso Suh (2005), S. 20.

⁶⁹⁹ Vgl. Tekkaya et al. (2015), S. 647.

⁷⁰⁰ Vgl. Suh (1998), S. 191.

⁷⁰¹ Vgl. Suh (2001), S. 10; ebenso Suh (2005), S. 21.

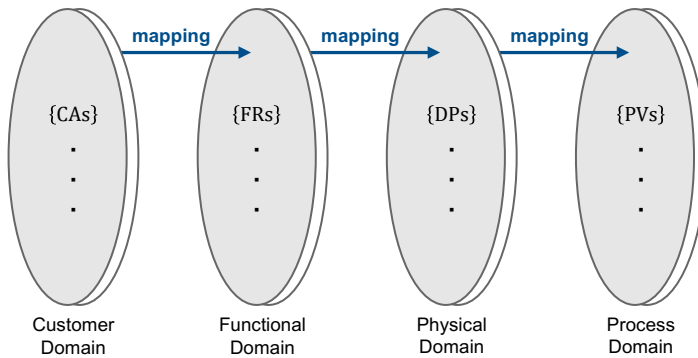


Abbildung 58: Domänen im Axiomatic Design⁷⁰²

Durch einen systematischen Abgleich, das *Mapping*, werden die Customer Attributes aus der Customer Domain in Functional Requirements $\{FRs\}$ und Constraints $\{Cs\}$ der *Functional Domain* überführt.⁷⁰³ FRs repräsentieren als minimale Menge voneinander unabhängiger Anforderungen die geforderten funktionalen Produkteigenschaften⁷⁰⁴ aus der Customer Domain in Form von Funktionsanforderungen und Randbedingungen. Diese sind in der Sprache der Konstruktion formuliert und erfüllen die Kundenbedürfnisse.⁷⁰⁵ FRs erfahren eine zeitabhängige Entwicklung von Abhängigkeiten, da sie per Definition nur zum Zeitpunkt ihrer Erstellung voneinander unabhängig sind.⁷⁰⁶

Constraints beschränken die zulässigen Lösungen. Im Rahmen der Anforderungsspezifikation ergeben sich *Input Constraints* aus allen generierten Lösungen.⁷⁰⁷ *System Constraints* resultieren aus restriktiven Bedingungen der intendierten Umgebung, in der das System funktionieren muss.⁷⁰⁸ Darüber hinaus resultieren sie aus den getroffenen Entscheidungen im Entwicklungsprozess.⁷⁰⁹

Kreative Lösungen können bedingt durch die lösungsneutrale Festlegung der Functional Requirements entstehen.⁷¹⁰ Abweichungen der FRs sind innerhalb von

⁷⁰² Vgl. Gebala, Suh (1992), S. 150.

⁷⁰³ Vgl. Suh (1998), S. 191.

⁷⁰⁴ Vgl. Suh (2005), S. 5.

⁷⁰⁵ Vgl. Suh (1998), S. 191.

⁷⁰⁶ Vgl. Suh (2005), S. 22.

⁷⁰⁷ Vgl. Ebd., S. 25.

⁷⁰⁸ Vgl. Ebd., S. 22.

⁷⁰⁹ Vgl. Ebd., S. 25.

⁷¹⁰ Vgl. Suh (1998), S. 191.

Design Ranges zulässig. Komplexität entsteht nach SUH nur in der Functional Domain.⁷¹¹ Die auftretende Unsicherheit bei der Erzielung der FRs dient als Komplexitätsmaß.⁷¹²

Design Parameters {DPs} der *Physical Domain* realisieren die Functional Requirements im Konzeptprozess,⁷¹³ ohne in Konflikt mit Randbedingungen zu stehen.⁷¹⁴ Die Realisierung der festgelegten Design Parameters aus der Physical Domain erfolgt durch die Identifikation und Festlegung neuer bzw. existenter und geeigneter Fertigungsverfahren mit spezifischen Process Variables {PVs} in der *Process Domain*.⁷¹⁵ Die Festlegung von Process Variables dient der physikalisch-stofflichen Realisierung des entwickelten Produkts.⁷¹⁶

Das Axiomatic Design basiert auf einem Postulat zweier grundlegender Axiome:⁷¹⁷ Independence Axiom und Information Axiom. Die Gültigkeit der konstruktionsbezogenen Axiome postuliert SUH mit der Erzielung besserer Konstruktionen, welche die Functional Requirements erfüllen und andererseits zuverlässiger und robuster bei gleichzeitig reduzierten Kosten sind.⁷¹⁸ Das *Independence Axiom* postuliert die unabhängige Festlegbarkeit der Design Parameters zur Erfüllung der Functional Requirements als minimale Menge der zu erfüllenden, unabhängigen Anforderungen innerhalb eines Entwurfs.⁷¹⁹ Durch die Umsetzung einer FR durch DPs dürfen keine anderen FRs beeinflusst werden.⁷²⁰ Es liegt ein Eins-zu-Eins-Mapping vor. Nach dem *Information Axiom* ist der beste Entwurf durch die wenigsten Informationen definiert.⁷²¹ Der Informationsgehalt vergleichbarer Entwürfe wird über deren Leistung beurteilbar.⁷²²

⁷¹¹ Vgl. Suh (2005), S. 7.

⁷¹² Vgl. ebd., S. 4.

⁷¹³ Vgl. ebd., S. 23.

⁷¹⁴ Vgl. Suh (1998), S. 191.

⁷¹⁵ Vgl. ebd.; ebenso Suh (2005), S. 21.

⁷¹⁶ Vgl. Suh (2001), S. 10.

⁷¹⁷ Axiome sind als grundlegende, aus anderen Gegebenheiten nicht ableitbare Wahrheiten anzusehen, für die es weder Widersprüche, Gegenbeispiele noch Ausnahmen gibt, vgl. Suh (2005), S. 21. Die Gültigkeit von Theoremen kann im Gegensatz zu Axiomen bewiesen werden, vgl. Suh (2005), S. 22. Korollare folgen aus Axiomen und anderen Feststellungen, die bewiesen wurden, vgl. Suh (2005), S. 22.

⁷¹⁸ Vgl. ebd., S. 20.

⁷¹⁹ Vgl. Suh (1998), S. 191.

⁷²⁰ Vgl. Suh (2001), S. 16-17.

⁷²¹ Vgl. Suh (1998), S. 192.

⁷²² Vgl. ebd.

Functional Requirements und Design Parameters sind über eine *produktspezifische* Design-Matrix [A] in (7) miteinander verknüpft.⁷²³ Die Matrizenform führt zum Coupled (FR_i, DP_j mit $j < i$), Decoupled und Uncoupled Design.⁷²⁴

$$\{\text{FR}\} = [\text{A}]\{\text{DP}\} \quad (7)$$

Eine analoge Beziehung findet sich auch in der Prozessentwicklung wieder, in der das Mapping über die *prozessspezifische* Design-Matrix [B] in (8) erfolgt.⁷²⁵

$$\{\text{DP}\} = [\text{B}]\{\text{PV}\} \quad (8)$$

Entkoppelte Entwürfe weisen diagonale/triangularäre Design-Matrizen in (9) auf.⁷²⁶

$$\begin{Bmatrix} \text{FR}_1 \\ \text{FR}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{X} & 0 \\ \text{X} & \text{X} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{DP}_1 \\ \text{DP}_2 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

Durch einen iterativen Dekompositionsprozess zwischen Functional Domain und Physical Domain findet auf jeder Ebene im Konzeptprozess die Zerlegung der FRs und DPs statt. Durch die Zuordnung von DPs zu FRs können neue FRs entstehen, die im Hin- und Herspringen zwischen den beiden Domänen berücksichtigt werden müssen (siehe Abbildung 59). Das Ziel des Axiomatic Designs ist die *Komplexitätsreduktion* im Entwicklungsprozess. Es soll die Entscheidungsfindung unterstützen,⁷²⁷ iterative Suchprozesse vermeiden und als Basis für optimale Konstruktionen durch Funktionserfüllung dienen.⁷²⁸

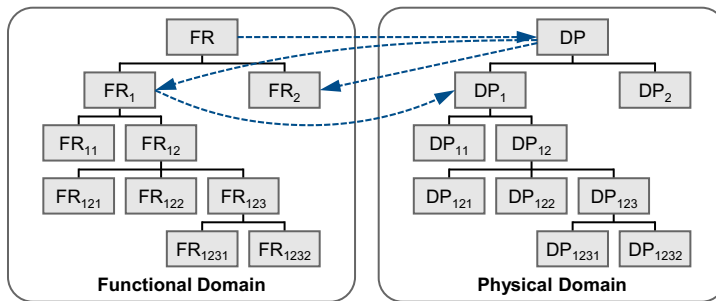


Abbildung 59: Dekompositionsprozess im Axiomatic Design⁷²⁹

⁷²³ Vgl. Suh (2005), S. 24.

⁷²⁴ Vgl. ebd., S. 25.

⁷²⁵ Vgl. ebd.

⁷²⁶ Vgl. Suh (2001), S. 19.

⁷²⁷ Vgl. Suh (1998), S. 190.

⁷²⁸ Vgl. Suh (2005), S. 18.

⁷²⁹ Ebd., S. 27.

Komplexität definiert sich nach SUH über den Zusammenhang zwischen Systemkomponenten und den zu erfüllenden funktionalen Anforderungen, wodurch der Informationsgehalt des entwickelten Systems ansteigt.⁷³⁰ Komplexität entsteht somit in der Functional Domain und ist relativ zu den funktionalen Anforderungen zu sehen.⁷³¹ Je mehr Komponenten zur Erfüllung funktionaler Anforderungen benötigt werden, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit des Misserfolgs durch die Nichterfüllung einzelner funktionaler Anforderungen.⁷³²

Große Systeme mit einer Vielzahl an vernetzten Komponenten müssen nicht zwangsläufig komplex sein. Dies ist der Fall, wenn die Unsicherheit und der Informationsgehalt zur Erfüllung der Systemfunktion möglichst gering sind.⁷³³ Kleine Systeme können mit einer geringen Anzahl an Komponenten als komplex bezeichnet werden, falls die Beziehungen zur Erfüllung der Systemfunktion stark vernetzt sind. Hierdurch weisen kleine Systeme mit hoher Funktionsintegration einen hohen Informationsgehalt auf, wodurch die Komplexität größer wird.⁷³⁴

Die Anwendbarkeit des Axiomatic Designs beschränkt sich nicht auf technische Produkte, sondern umfasst ebenso die Software-, Fertigungsprozess-, System- und Organisationsentwicklung.⁷³⁵ Dies begründet sich in SUHs Feststellung, dass alle Entwicklungsprozesse durch interdisziplinäre Diversität, ähnliche Denkprozesse und Prinzipien geprägt sind,⁷³⁶ um spezifische Entwicklungsziele zu erreichen.⁷³⁷

2.10.4.3 FBS-Modell

Das *Function-Behaviour-Structure-Modell (FBS-Modell)* von GERO (siehe Abbildung 60) verdeutlicht die integrale Verknüpfung des erwarteten Produktverhaltens (engl. behaviour) aufgrund einer geforderten Funktion (engl. function). Nur durch eine geeignete strukturelle Anordnung der Lösungselemente (engl. structure) kann die geforderte Funktion erreicht werden. Function, Structure und Behaviour bilden jeweils eigene Zustandsräume (engl. design-state spaces).⁷³⁸ Die Struktur wird über physikalische, topologische/geometrische Eigenschaften (engl. properties) und Struktureigenschaften (engl. structural properties) beschrieben.⁷³⁹

⁷³⁰ Vgl. Suh (2001), S. 40.

⁷³¹ Vgl. Suh (2005), S. 55.

⁷³² Vgl. Suh (2001), S. 40.

⁷³³ Vgl. Suh (2005), S. 60.

⁷³⁴ Vgl. Suh (2001), S. 40.

⁷³⁵ Vgl. ebd., S. 11.

⁷³⁶ Vgl. Suh (2005), S. 21.

⁷³⁷ Vgl. Suh (2001), S. 11-12.

⁷³⁸ Vgl. Lossack (2006), S. 194.

⁷³⁹ Vgl. ebd., S. 188.

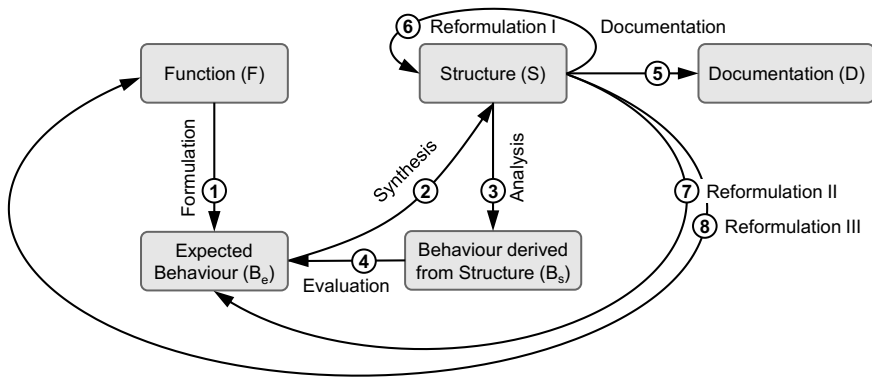


Abbildung 60: Function-Behaviour-Structure-Modell⁷⁴⁰

Der Zweck liegt in der kontinuierlichen Annäherung des tatsächlichen Verhaltens B_s (engl. behaviour derived from structure) an das erwartete Verhalten B_e (engl. expected behaviour). Analyse, Synthese und Evaluierung unterstützen diesen Prozess. Das *Produktverhalten* rückt in den Vordergrund der synthetischen Betrachtungen.⁷⁴¹ Die *Funktion* repräsentiert den intendierten Zweck des zu entwickelnden technischen Systems. Die Systemelemente und deren Relationen sind in der *Produktstruktur* abgebildet. Das Produktverhalten ergibt sich aus der Systemstruktur. Durch Synthese gilt es, das erwartete Produktverhalten durch die geeignete Festlegung der Systemstruktur anhand einer Anforderungstransformation zu erzielen. Die Analyse führt zum tatsächlichen Produktverhalten. Der Entwicklungsprozess adaptiert die Produktstruktur so lange, bis sich das tatsächliche an das erwartete Verhalten annähert. Rekursive Schleifen in Form von Elementarprozessen der Reformulierungen betonen die kontinuierliche Anpassung und Dokumentation aller drei Domänen: Funktion, Struktur und Verhalten.

Basierend auf den Anforderungen erfolgt die lösungsneutrale Definition der Funktion, während die Struktur lösungsspezifisch ausgestaltet ist. Das Verhalten ergibt sich demnach nur in Abhängigkeit von einer spezifischen Lösungsstruktur.⁷⁴² Das FBS-Modell stellt ein umfassendes Modell zur Definition der Produktstruktur dar, indem eine kontinuierliche Verifikation und Validierung anhand des erwarteten Produktverhaltens stattfindet. Dabei ist das FBS-Modell komplett an der Produktfunktion und dem Produktverhalten orientiert. Anforderungen sind nur implizit über die anforderungskonforme Definition der Funktion berücksichtigt.

⁷⁴⁰ Vgl. Krehmer (2012), S. 25.

⁷⁴¹ Vgl. Andreasen, Howard (2011), S. 24-25.

⁷⁴² Vgl. Krehmer et al. (2008), S. 1304.

2.10.4.4 Modellraum des Konstruierens

RUDE führt im *Modellraum des Konstruierens* (siehe Abbildung 61) neben dem Konkretisierungsgrad auch den Zerlegungs- und Variationsgrad eines zu entwickelnden Systems an.⁷⁴³

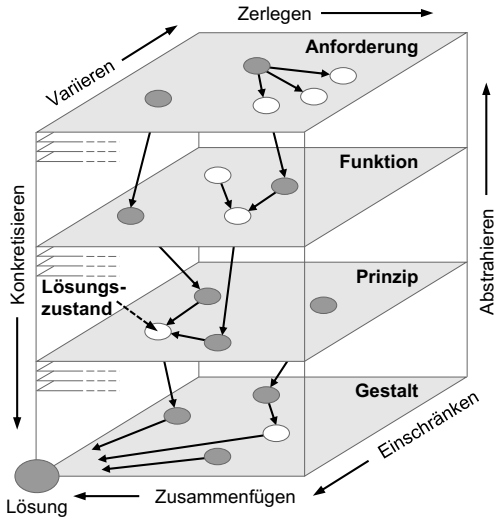


Abbildung 61: Modellraum des Konstruierens⁷⁴⁴

Die *elementaren Operationen* Abstrahieren/Konkretisieren, Aggregieren/Zerlegen und Variieren sind von KLÄGER erarbeitet, nach LOSSACK aufgegriffen, und können in jeder Ebene des Modellraums adaptiert werden.⁷⁴⁵ Im Vergleich zu LOSSACK, der die Aufgabenklärung als Abstraktion der Funktionsmodellierung betrachtet,⁷⁴⁶ erweitert RUDE das operationale Verständnis auf Anforderungen. Die Wirkprinzipmodellierung subsumiert die Effektmmodellierung innerhalb des anforderungsbasierten Modellraums.⁷⁴⁷ Anforderungen dienen als wesentliche Grundlage für die Erarbeitung von Lösungen.

Konkretisieren überführt den Zustand eines technischen Produkts $LZ_i(t_i)$ auf einen konkreteren Lösungszustand $LZ_{i+1}(t_{i+1})$ mit neuen Lösungseigenschaften, wie in (10) dargestellt.

⁷⁴³ Vgl. Rude (1998), S. 239.

⁷⁴⁴ Vgl. Ponn, Lindemann (2011), S. 26; ebenso in Anlehnung an Rude (1998), S. 239.

⁷⁴⁵ Vgl. Kläger (1993), S. 99-101; ebenso Lossack (1997), S. 24-25.

⁷⁴⁶ Vgl. Lossack (1997), S. 62.

⁷⁴⁷ Vgl. Rude (1998), S. 239.

$$LZ_{i+1}(E_k(t_{i+1})) \subseteq LZ_i(E_j(t_i)) : \Leftrightarrow \forall E_j \in LZ_i : E_j \in LZ_{i+1} \text{ mit } k > j \quad (10)$$

Abstrahieren vereinfacht durch das Weglassen von Lösungseigenschaften das Systemverständnis auf die wesentlichen Lösungseigenschaften. Abstrahierte Lösungseigenschaften bilden in (11) eine Teilmenge der gesamten Lösungseigenschaften.⁷⁴⁸

$$LZ_{i+1}(E_j(t_{i+1})) \subseteq LZ_i(E_j(t_i)) : \Leftrightarrow \forall E_j \in LZ_i : E_j \in LZ_{i+1} \quad (11)$$

Der *Zerlegungsgrad* führt zu einer Dekomposition des Gesamtsystems in Teilsysteme. Die Teilsysteme bilden Teilmengen mit ihren jeweiligen Eigenschaften. *Detaillieren/Zerlegen* findet unter anderem bei der Unterteilung der Gesamtfunktion in Teilfunktionen statt. Der Zerlegungsgrad kann während der Systemintegration reduziert werden, indem Teilprobleme *kombiniert/aggregiert* und Lösungseigenschaften zusammengefügt werden.⁷⁴⁹

Der *Variationsgrad* führt zu einer Variation innerhalb der Menge an Lösungsalternativen. Der Konkretisierungsgrad bleibt konstant. Die bestehenden Lösungseigenschaften werden hinsichtlich ihrer Ausprägungen merkmalsbezogen variiert.⁷⁵⁰ Festlegungen und Einschränkungen reduzieren den Variationsgrad.

Der Modellraum des Konstruierens fundamementiert durch den Zerlegungs- und Variationsgrad zwei wesentliche konstruktionsmethodische Grundprinzipien: einerseits die Zerlegung von Problemen in Teilprobleme, um diese beherrschbar zu gestalten und andererseits die systematische Variation, um einen möglichst großen Lösungsraum aufzuspannen.⁷⁵¹ Der Konkretisierungsgrad ermöglicht die Orientierung im Entwicklungsprozess, um durch Festlegen, Zerlegen und Variieren die konzeptrelevanten Lösungseigenschaften des technischen Produkts schrittweise zu definieren.

2.10.4.5 Münchener Produktkonkretisierungsmodell (MKM)

Das *Münchener Produktkonkretisierungsmodell (MKM)* von PONN und LINDEMANN orientiert sich am hierarchischen Produktmodell nach EHRENSPIEL. Der Lösungsraum folgt im Wesentlichen dem Modellraum des Konstruierens nach RUDE. Das MKM beschreibt den Entwicklungsprozess als Navigation durch den Anforderungs- und Lösungsraum (siehe Abbildung 62).

⁷⁴⁸ Vgl. Kläger (1993), S. 100.

⁷⁴⁹ Vgl. ebd., S. 101.

⁷⁵⁰ Vgl. Sauer (2006), S. 81.

⁷⁵¹ Vgl. Ponn, Lindemann (2011), S. 25.

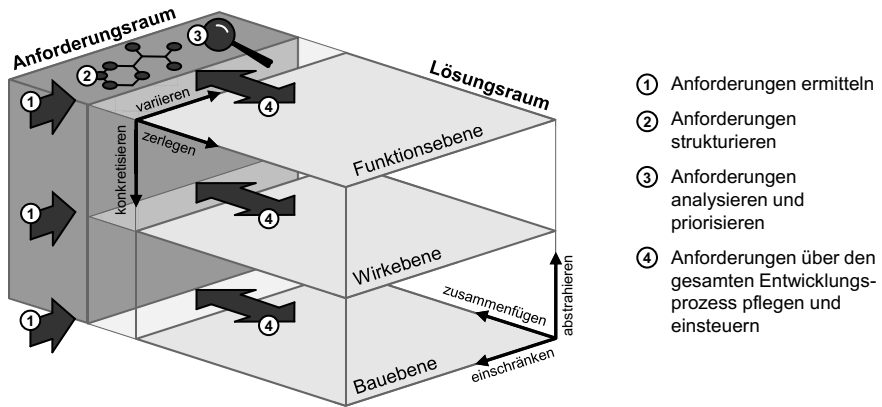


Abbildung 62: Münchener Produktkonkretisierungsmodell (MKM)⁷⁵²

Die Anforderungen nehmen im MKM eine gesonderte Stellung innerhalb des Anforderungsraums ein, wodurch ihre Wichtigkeit im Entwicklungsprozess betont wird. Der Anforderungsraum ist integral mit dem Lösungsraum verknüpft. Anforderungen werden mit der voranschreitenden Lösungskonkretisierung weiterentwickelt. Dies führt zu einem Wechselspiel zwischen Anforderungen und generierten Lösungen durch die elementaren, iterativ ablaufenden Aktivitäten der Definition, Synthese, Analyse und Bewertung.⁷⁵³

Zur *Verifikation* muss ein stetiger Abgleich der Lösungseigenschaften mit den Anforderungen erfolgen.⁷⁵⁴ Dabei setzen PONN und LINDEMANN Anforderungen mit den geforderten Eigenschaften eines technischen Produkts gleich.⁷⁵⁵

Der *Anforderungsraum* beinhaltet die Gesamtheit aller Anforderungen als Repräsentant technischer Entwicklungsziele und geforderter Produkteigenschaften.⁷⁵⁶ Diese Auffassung des Anforderungsraums steht in Konflikt zur Anforderungsdefinition. Ausgehend von der initialen Aufgabenklärung findet eine Detaillierung, Erweiterung und Anpassung der Anforderungen entsprechend der kontinuierlichen Lösungskonkretisierung statt.⁷⁵⁷ Dabei weist der Anforderungsraum Assozi-

⁷⁵² Vgl. Ponn, Lindemann (2011), S. 27.

⁷⁵³ Vgl. Ponn (2016a), S. 807; ebenso Ponn (2016b), S. 717-718.

⁷⁵⁴ Vgl. Ponn (2016b), S. 717.

⁷⁵⁵ Vgl. Ponn, Lindemann (2011), S. 35.

⁷⁵⁶ Vgl. ebd., S. 26; ebenso Ponn (2016b), S. 717.

⁷⁵⁷ Vgl. Ponn, Lindemann (2011), S. 26.

ationen mit indirekten Eigenschaften als Zielgrößen der Entwicklung auf. Im Lösungsraum erfolgt die Festlegung der direkten durch die indirekten Eigenschaften.⁷⁵⁸

Im Gegensatz zum Modellraum des Konstruierens nach RUDE verliert der Anforderungsraum im Münchener Konkretisierungsmodell die strukturelle Gliederung hinsichtlich Konkretisierungs-, Zerlegungs- und Variationsgrad.

Der *Lösungsraum* beinhaltet alle theoretisch denkbaren Lösungsmöglichkeiten,⁷⁵⁹ um die Anforderungen auf der jeweiligen Konkretisierungsebene zu erfüllen.⁷⁶⁰ Die Modellierung des zu entwickelnden Produkts erfolgt entsprechend seines Konkretisierungsgrads auf der Funktions-, Wirk- und Bauebene.⁷⁶¹ Funktionale Anforderungen aus dem Anforderungsraum bilden die Grundlage für die Funktionsmodellierung.⁷⁶² Eine eigenschafts- oder komponentenbasierte Systematik zur Ordnung/Strukturierung des Lösungsraums ermöglicht dem Entwickler die Orientierung in der Vielzahl unterschiedlicher Lösungsmöglichkeiten.⁷⁶³

In Analogie zum Modellraum des Konstruierens von RUDE erlaubt das MKM die Einordnung der zentralen Entwicklungsstrategien *Konkretisieren/Abstrahieren*, *Zerlegen/Zusammenfügen* und *Variieren/Einschränken*. Das MKM integriert umfangreich Methoden des Anforderungsmanagements innerhalb der Schritte:⁷⁶⁴

- Anforderungen ermitteln
- Anforderungen strukturieren
- Anforderungen analysieren und priorisieren
- Anforderungen über den gesamten Entwicklungsprozess pflegen und einsteuern

Der Aufbau des MKM verdeutlicht, dass im Entwicklungsprozess sowohl Anforderungen aus der initialen Aufgabenklärung als auch Anforderungen, die sich erst mit fortschreitender Lösungskonkretisierung ergänzen, detaillieren und konkretisieren, zu berücksichtigen sind.⁷⁶⁵

⁷⁵⁸ Vgl. Ponn (2016b), S. 717.

⁷⁵⁹ Vgl. ebd., S. 716.

⁷⁶⁰ Vgl. Ponn, Lindemann (2011), S. 26.

⁷⁶¹ Vgl. ebd., S. 26-27.

⁷⁶² Vgl. ebd., S. 69.

⁷⁶³ Vgl. Ponn (2016b), S. 717.

⁷⁶⁴ Vgl. Ponn, Lindemann (2011), S. 39.

⁷⁶⁵ Vgl. ebd., S. 27.

2.10.4.6 Münchner Vorgehensmodell (MVM)

Im Gegensatz zu vielen Vorgehensmodellen, die einen iterativen und sequenziellen Ablauf aufweisen, zeichnet sich das *Münchner Vorgehensmodell (MVM)* durch eine flexible Vernetzung einzelner Schritte im Entwicklungsprozess aus. Die Schritte können vom Entwickler situationsgerecht und problemspezifisch angewendet werden. Sie sind im Entwicklungsprozess nicht immer klar voneinander abzugrenzen, weswegen sich die Schritte im MVM partiell überschneiden (siehe Abbildung 63).⁷⁶⁶

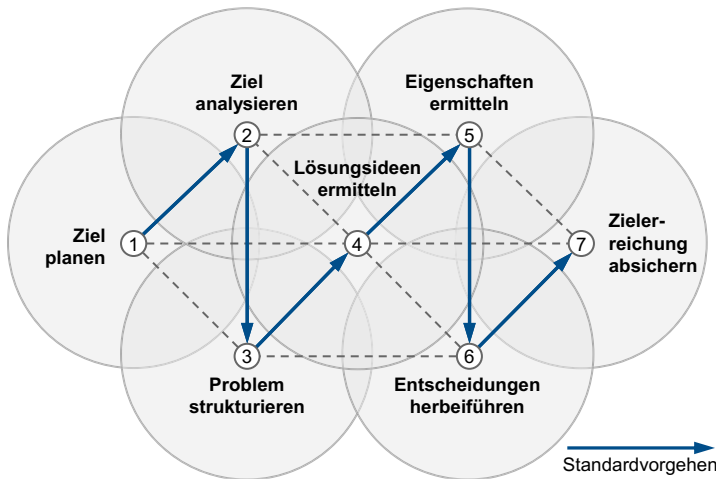


Abbildung 63: Münchner Vorgehensmodell (MVM)⁷⁶⁷

Das MVM besteht aus drei Hauptschritten: *Ziel bzw. Problem klären*, *Lösungsalternativen generieren* und *Entscheidungen herbeiführen*.⁷⁶⁸ In den drei Hauptschritten existieren sieben Elemente, die flexibel und situationsgerecht in der netzartigen Struktur des MVM angewendet werden können.⁷⁶⁹ Das Netzwerk folgt dem Grundgedanken der Konstruktionslandkarte nach SCHRODA.⁷⁷⁰

Für die frühen Phasen des Entwicklungsprozesses sind insbesondere die Elemente *Ziel planen*, *Ziel analysieren* und *Problem strukturieren* von großer Bedeutung.

⁷⁶⁶ Vgl. Lindemann (2009), S. 48.

⁷⁶⁷ Vgl. ebd., S. 47.

⁷⁶⁸ Vgl. ebd., S. 46.

⁷⁶⁹ Vgl. ebd., S. 46-47.

⁷⁷⁰ Vgl. Schroda (2000), S. 147-148.

Sie fokussieren die Ziel- und Problemstellung, führen zur Beschreibung des gewünschten Zielzustandes, um das zu entwickelnde technische Produkt anforderungsgerecht zu entwickeln. Ferner ermöglichen sie, über die Strukturierung des Entwicklungsproblems durch den Aufbau eines Problemmodells, die systematische Lösungssuche.⁷⁷¹ Die Zielanalyse liefert eine Vielzahl von Anforderungen, erfasst die Beziehungen zwischen den Anforderungen und dient der Anforderungsdokumentation.⁷⁷² Ebenso fokussiert das MVM durch die intensive Auseinandersetzung mit den frühen Phasen der Entwicklung eine kontinuierliche *Zielabsicherung und -definition*.⁷⁷³

Die Problemstrukturierung dient der Ableitung von Entwicklungsschwerpunkten. Die Unterteilung in Teilprobleme führt zur Komplexitätsreduktion, sodass im Rahmen der Lösungssuche Lösungen für die Teilprobleme ermittelt werden können. Eigenschaftsanalysen liefern Ausprägungen für die relevanten Merkmale. Sie sind damit ein wichtiges Element, um die Zielerreichung abzusichern.⁷⁷⁴ Trotz der flexiblen Anwendbarkeit einzelner Schritte stellt das MVM ein allgemeingültiges *Standardvorgehen* für die Problemlösung⁷⁷⁵ bereit (siehe Abbildung 63), das branchen- und domänenübergreifend angewendet werden kann.⁷⁷⁶

2.10.4.7 Autogenetische Konstruktionstheorie (AKT)

VAJNA begründet in Analogie zur biologischen Evolution die *autogenetische Konstruktionstheorie (AKT)* mit dem Ziel bestmögliche Lösungen sicherzustellen. Der Entwicklungsansatz begründet sich aus der Beobachtung, dass sich die generierten Lösungen häufig ändern und ähnlichen Kombinationsmechanismen der Evolutionstheorie unterworfen sind.

Dynamische Anforderungsänderungen, neue Randbedingungen und neu aufkommende Technologien können die Änderungen bedingen.⁷⁷⁷ Im höchst dynamischen Lösungsraum muss der Entwickler dennoch in der Lage sein, das volle Potenzial von Lösungen zu nutzen.⁷⁷⁸ Auswahl, Rekombination, Duplikation und Mutation führen zur Dynamik des Evolutionsprozesses.⁷⁷⁹ Die AKT basiert auf

⁷⁷¹ Vgl. Lindemann (2009), S. 48-49.

⁷⁷² Vgl. ebd., S. 48.

⁷⁷³ Vgl. Gürtler, Lindemann (2016), S. 489.

⁷⁷⁴ Vgl. Lindemann (2009), S. 49.

⁷⁷⁵ Vgl. ebd., S. 50.

⁷⁷⁶ Vgl. Gürtler, Lindemann (2016), S. 489.

⁷⁷⁷ Vgl. Vajna et al. (2011), S. 169.

⁷⁷⁸ Vgl. ebd.

⁷⁷⁹ Vgl. ebd., S. 173.

der fundamentalen Analogie, den Konstruktionsprozess als kontinuierliche Weiterentwicklung und Adaption der generierten Lösungen innerhalb dynamisch veränderlicher Randbedingungen zu beschreiben. Der Entwicklungsprozess ist unter minimalem Energie- und Ressourceneinsatz zu bewältigen.⁷⁸⁰

Generierte Lösungen zeichnen sich, wie auch in der evolutionären Biologie, durch ihre Einzigartigkeit trotz gleicher Güte aus, um in der Umgebung bestehen zu können. Nur die am besten an die Randbedingungen angepasste *evolutionäre Weiterentwicklung* hat Bestand.⁷⁸¹ Durch die biologische Rekombination von Patterns entsteht eine wesentlich größere Lösungsvielfalt als bei konventionellen Produktentwicklungsansätzen, die mit einer höheren Wahrscheinlichkeit die gestellten Anforderungen und Randbedingungen besser erfüllen.⁷⁸² Es findet eine gezielte Verbesserung und Modifizierung von Produkteigenschaften statt.

Der Lösungsraum beinhaltet alle Lösungselemente. Anfangs- und Randbedingungen definieren einen inversen Lösungsraum mit verbotenen Zonen, den sogenannten *Tabuzonen*. Diese Bereiche sind durch restriktive Bedingungen geprägt und erlauben keine Lösungselemente.

Im Gegensatz zu den vorgehensbetonten Entwicklungsmodellen zeichnet sich die AKT durch einen initial *unbegrenzten Lösungsraum* aus, der sukzessive über Tabuzonen eingeschränkt wird. Tabuzonen stellen Bereiche innerhalb des Lösungsraums dar, die durch Anfangs- und Randbedingungen restringiert sind. Diese Zonen beinhalten keine Lösungselemente.⁷⁸³ In den verbleibenden Freiräumen kann sich die Lösungsvielfalt ausbreiten, wodurch die Wahrscheinlichkeit neuartiger und ggf. optimaler Lösungen erhöht wird. Die kontinuierliche Bewertung, wie z. B. mit Simulationen (FEM, CFD), verifiziert die Übereinstimmung mit den initial definierten Optimierungsrichtungen.⁷⁸⁴

2.10.4.8 Twin Peaks

NUSEIBEH stellt mit dem *Twin-Peaks*-Modell (siehe Abbildung 64) ein Partialmodell zur zielgerichteten Festlegung der Systemarchitektur bereit. Das Twin-Peaks-Modell löst die iterative und inkrementelle Sichtweise auf die Systementwicklung ab. Es fokussiert synergetisch verknüpfte Aktivitäten zwischen Anforderungen und der Festlegung der Systemarchitektur.⁷⁸⁵

⁷⁸⁰ Vgl. Vajna et al. (2011), S. 170.

⁷⁸¹ Vgl. ebd.

⁷⁸² Vgl. ebd., S. 170-171.

⁷⁸³ Vgl. ebd., S. 174.

⁷⁸⁴ Vgl. ebd., S. 173.

⁷⁸⁵ Vgl. Nuseibeh (2001a), S. 1; ebenso Nuseibeh (2001b), S. 117.

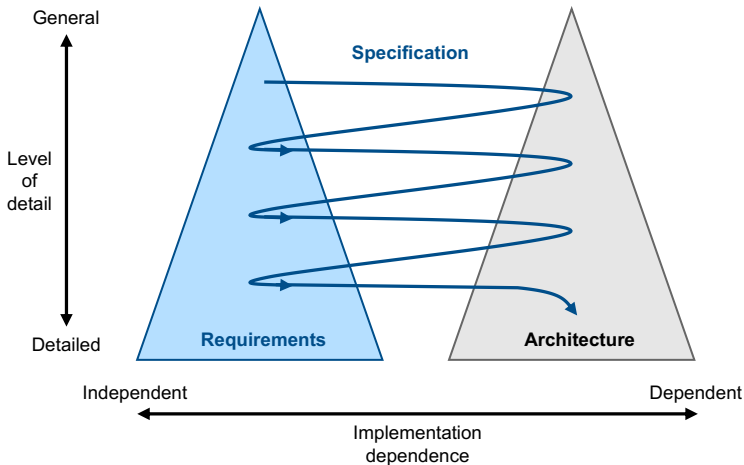


Abbildung 64: Twin-Peaks-Modell⁷⁸⁶

Anforderungen stehen mit konstruktiven Festlegungen in wechselseitigen Beziehungen.⁷⁸⁷ Anforderungen strukturieren und detaillieren das Entwicklungsproblem; die Systemarchitektur beinhaltet und strukturiert die Lösungen.⁷⁸⁸ Beide Domänen sind voneinander getrennt, stehen jedoch miteinander in enger Beziehung und werden kontinuierlich weiterentwickelt.⁷⁸⁹

Nach dem *IKIWISI-Prinzip*⁷⁹⁰ ist die Festlegung der Systemarchitektur der wesentliche Treiber für neue Anforderungen. Aus den modellbasierten Realisierungen können weitere Erkenntnisse in die Entwicklung einfließen.⁷⁹¹ Das Twin-Peaks-Modell löst den Entwicklungsprozess von einer strikt sequenziellen Sicht ab und überführt ihn in dynamische, zyklische Abläufe. Alternative Systemarchitekturen existieren für unterschiedliche Anforderungen und für das gleiche Set von Anforderungen.⁷⁹² Anforderungen charakterisieren die lösungsunspezifischen Elemente der Entwicklung.⁷⁹³ Die Systemarchitektur erfüllt die Anforderungen

⁷⁸⁶ Vgl. Nuseibeh (2001b), S. 116.

⁷⁸⁷ Vgl. Cleland-Huang et al. (2013), S. 26.

⁷⁸⁸ Vgl. Hall et al. (2002), S. 137.

⁷⁸⁹ Vgl. Nuseibeh (2001a), S. 2.

⁷⁹⁰ Das Akronym IKIWISI steht für I'll Know It When I See It und bezeichnet den Grundgedanken der Softwareentwicklung, erst auf Grundlage von modelltheoretischen Annahmen und Umsetzungen weitere Anforderungen an das zu entwickelnde System definieren zu können.

⁷⁹¹ Vgl. Nuseibeh (2001b), S. 115.

⁷⁹² Vgl. Cleland-Huang et al. (2013), S. 27.

⁷⁹³ Vgl. ebd., S. 24.

durch Bereitstellung spezifischer Lösungselemente⁷⁹⁴. Deren Detaillierung erfolgt durch die Gliederung in realisierbare Komponenten.⁷⁹⁵

Das Twin-Peaks-Modell ermöglicht eine *nachvollziehbare Anforderungsdynamik* zur Identifikation essenzieller Anforderungen, die den Systementwurf beeinflussen.⁷⁹⁶ Es ist auch eine frühzeitige Identifikation von Kostentreibern bei der Entwicklung komplexer Systeme möglich, die durch die Wiederverwendung bekannter Lösungen (Design Patterns) vermeidbar sind.⁷⁹⁷

2.10.5 Integrierte Entwicklungsmodelle

2.10.5.1 Entwicklungs- und Konstruktionsprozess – VDI-RICHTLINIE 2206

Die VDI-RICHTLINIE 2206 stellt mit dem *V-Modell* ein generisches Vorgehensmodell⁷⁹⁸ für die domänenübergreifende und interdisziplinäre Entwicklung mechatronischer Systeme bereit (siehe Abbildung 65).⁷⁹⁹ Dabei vereint die VDI-RICHTLINIE 2206 den Problemlösungszyklus auf Mikroebene nach HABERFELLNER et al.⁸⁰⁰ mit definierten Prozessbausteinen für sich wiederholende Arbeitsschritte innerhalb des mechatronischen Entwicklungsprozesses.⁸⁰¹

Das V-Modell stellt die *kontinuierliche Validierung* der entwickelten Lösung mit ihren Funktionen und Eigenschaften in den Vordergrund.⁸⁰² Während der Anforderungsdefinition gilt es, bereits geeignete Verifikationspläne für die *Eigenchaftsabsicherung* zu erstellen.⁸⁰³

Anforderungen bilden im V-Modell den Ausgangspunkt für die Entwicklung des Gesamtsystems. Im Top-down-Ansatz strebt das V-Modell die Dekomposition des Gesamtsystems in Subsysteme an.⁸⁰⁴ Dementsprechend sind System- und Subsystemanforderungen auf den unterschiedlichen Ebenen des Systementwurfs zu erfüllen und über Testfälle abzusichern.⁸⁰⁵

⁷⁹⁴ Vgl. Nuseibeh (2001a), S. 3; ebenso Nuseibeh (2001b), S. 116-117.

⁷⁹⁵ Vgl. Ebert (2014), S. 138.

⁷⁹⁶ Vgl. Hall et al. (2002), S. 137.

⁷⁹⁷ Vgl. Nuseibeh (2001a), S. 2-4.

⁷⁹⁸ Vgl. VDI 2206 (2004), S. 29.

⁷⁹⁹ Vgl. ebd., S. 2.

⁸⁰⁰ Siehe Abbildung 50, Abschnitt 2.10.1.

⁸⁰¹ Vgl. VDI 2206 (2004), S. 26.

⁸⁰² Vgl. Bender, Gericke (2016), S. 403; ebenso Baumgart (2016), S. 428.

⁸⁰³ Vgl. Kaffenberger et al. (2013), S. 26.

⁸⁰⁴ Vgl. Haberfellner et al. (2015), S. 87.

⁸⁰⁵ Vgl. Alt (2012), S. 85-86.

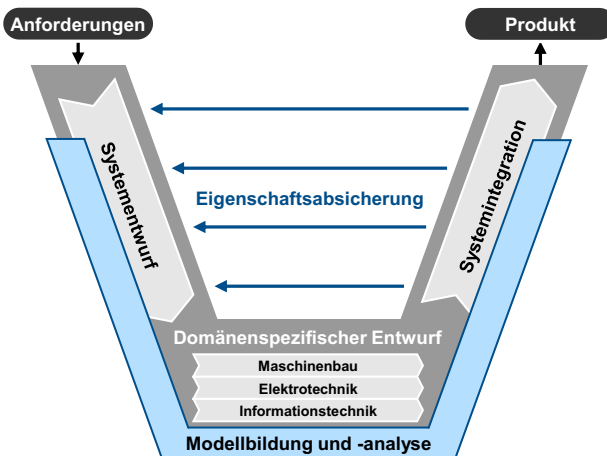


Abbildung 65: Makrozyklus des V-Modells für Entwicklungs-/Konstruktionsprozesse⁸⁰⁶

Die Kombination der Subsysteme im Bottom-up-Ansatz führt zur Integration und Verifikation des Gesamtsystems.⁸⁰⁷ Anforderungen sind ebenfalls die Grundlage für die Bewertung des entwickelten Produkts.⁸⁰⁸ Der *Systementwurf* erfolgt domänenspezifisch in den jeweiligen Fachdisziplinen des Maschinenbaus, der Elektro- und Informationstechnik. Die Gesamtfunktion des Systems wird in Teilfunktionen untergliedert. Geeignete Wirkprinzipien und Lösungselemente realisieren die Systemfunktionen.⁸⁰⁹ Durch die Untergliederung des Systems in Teilsysteme werden notwendige Schnittstellen offensichtlich, für die ebenfalls weitere Anforderungen definiert werden müssen.⁸¹⁰ Erst die *Systemintegration* führt die domänenspezifischen Entwürfe zu einem Gesamtentwurf zusammen.⁸¹¹ In der horizontalen Dimension des V-Modells erhöht sich mit Voranschreiten des Entwicklungsprozesses der Systemreifegrad.⁸¹²

Die *Eigenschaftsabsicherung* erfolgt kontinuierlich während des Entwicklungsprozesses. Sie betont den stetigen Abgleich der Systemeigenschaften mit den ursprünglich geforderten Eigenschaften. Modelle und rechnergestützte Werkzeuge dienen der *Modellbildung und -analyse* zur Abbildung und Absicherung der Sys-

⁸⁰⁶ Vgl. Kaffenberger et al. (2013), S. 29.

⁸⁰⁷ Vgl. Haberfellner et al. (2015), S. 87.

⁸⁰⁸ Vgl. VDI 2206 (2004), S. 29; ebenso Schuh et al. (2012a), S. 174.

⁸⁰⁹ Vgl. Schuh et al. (2012a), S. 174.

⁸¹⁰ Vgl. Baumgart (2016), S. 428.

⁸¹¹ Vgl. VDI 2206 (2004), S. 30.

⁸¹² Vgl. Kaffenberger et al. (2013), S. 27.

temeigenschaften bei der Verifikation und Validierung.⁸¹³ Die Modellbildung und -analyse dient der systematischen Auswahl von Lösungsvarianten zur Bewertung ihrer Eigenschaften im Abgleich mit den in der Anforderungsliste dokumentierten Anforderungen.⁸¹⁴

Die *Verifikation* beschreibt, ob das entwickelte System auf Grundlage der Anforderungen in der Anforderungsliste realisierbar ist.⁸¹⁵ Die *Validierung* greift hingegen deutlich weiter und befasst sich mit einer Gültigkeitsprüfung, „ob das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt.“⁸¹⁶ Während die Verifikation rein fachspezifisch erfolgen kann, bedarf die Validierung der Erwartungshaltung von Fachexperten und Anwendern in der tatsächlichen Produktnutzung.^{817, 818} Durch kontinuierliches Durchlaufen des Makrozyklus nimmt der *Produktreifegrad* zu. Dies bedingt eine zunehmende Konkretisierung des zu entwickelnden technischen Produkts in jedem Makrozyklus.⁸¹⁹

Neben der domänenübergreifenden Entwicklung mechatronischer Produkte betont die VDI-RICHTLINIE 2206 den *integrativen Entwurf* von Produkt und Produktionssystem.⁸²⁰ So muss einerseits das Produktionssystem mit den Produktionsprozessen integrativ entwickelt werden. Andererseits muss bereits in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses das Produktionssystem mit den verfügbaren Fertigungstechnologien für die Entwicklung des Produktkonzeptes betrachtet werden.⁸²¹ Darüber hinaus wird die schrittweise Konkretisierung von Entwicklungsmodellen fokussiert. Dies bedingt, dass Spezifikationen zur Funktionsbeschreibung von Systemen bereits in den frühen Phasen der Entwicklung genutzt werden können, um detaillierte Verhaltensmodelle aufzubauen, die Vorgaben für die geometrische Gestaltung liefern.⁸²² Durch die kontinuierliche *Eigenschaftsabsicherung* im Entwicklungsprozess gewährleistet das V-Modell die Rückverfolgbarkeit von Anforderungen, ihren Änderungen und die Anforderungserfüllung der generierten Lösungen mittels geeigneter Testverfahren. Das V-Modell stellt ein flexibles Vorgehen zur Verfügung, das in der Lage ist, interdisziplinäre Entwicklungsergebnisse unterschiedlicher Domänen zu vereinen und in eine Lösung zu integrie-

⁸¹³ Vgl. VDI 2206 (2004), S. 30.

⁸¹⁴ Vgl. ebd., S. 38.

⁸¹⁵ Vgl. ebd.

⁸¹⁶ Ebd., S. 39.

⁸¹⁷ Vgl. ebd.

⁸¹⁸ Die gleiche, sinngemäße Unterscheidung von Verifikation und Validierung wird auch nach DIN EN ISO 9000 angeführt, vgl. DIN EN ISO 9000 (2015), S. 49-50.

⁸¹⁹ Vgl. VDI 2206 (2004), S. 30.

⁸²⁰ Vgl. ebd., S. 41.

⁸²¹ Vgl. ebd.

⁸²² Vgl. ebd., S. 46.

ren.⁸²³ STRÖBER et al. führen die eigenschaftsbasierte Modellierung technischer Systeme im V-Modell zusammen. Die Anforderungsstruktur bildet die kundenseitige Sicht auf das zu entwickelnde technische Produkt ab. Über die Funktionsstruktur wird die Anforderungsstruktur in physikalisch realisierbare Module heruntergebrochen. Diese weisen zu erzielende Eigenschaften auf, die im weiteren Verlauf der Systementwicklung in Komponenten und Bauteile mit den zu erzielenden Eigenschaften konkretisiert werden.⁸²⁴

2.10.5.2 Link-Modell

ANDREASEN et al. stellen mit dem *Link-Modell* ein Modell zur Verknüpfung von Entwickler- und Nutzen-/Kundensicht bereit (siehe Abbildung 66).

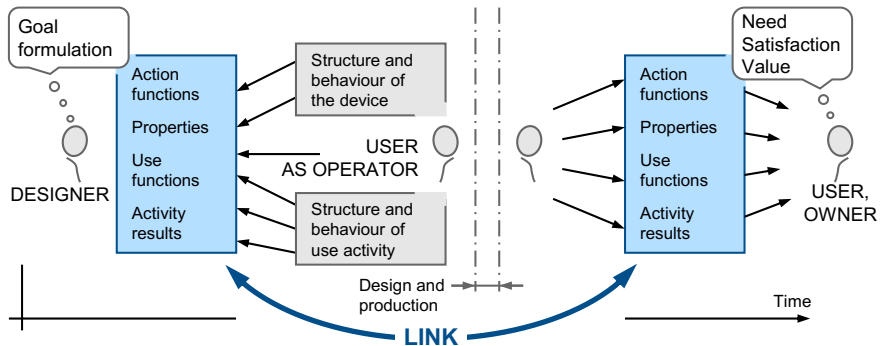


Abbildung 66: Link-Modell⁸²⁵

Beiden Sichtweisen liegt das zu entwickelnde technische Produkt zugrunde, das über seine Funktionen, Wirkprinzipien und Produkteigenschaften beschrieben ist. Entwickler gestalten das zu entwickelnde technische Produkt über die Festlegung der Produktstruktur. Dabei beeinflussen sie das Produktverhalten in der Nutzungsphase. Andererseits nehmen Kunden/Nutzer das entwickelte Produkt über seine Funktionen, Produkteigenschaften und Ausgangswirkgrößen wahr.

Das entwickelte technische Produkt muss die Bedürfnisse des Kunden/Nutzers befriedigen und den geeigneten Nutzen bereitstellen. Diese beiden Sichtweisen gilt es, nach dem Link-Modell miteinander abzustimmen, um die Erkenntnisse und Informationen aus der nutzer-/kundengetriebenen Sicht gezielt für die Entwicklung technischer Produkte zu verwerten. Die Zielformulierung stellt im Link-Modell den Ausgangspunkt der Produktentwicklung dar.

⁸²³ Vgl. Baumgart (2016), S. 429.

⁸²⁴ Vgl. Stöber et al. (2010), S. 455-456.

⁸²⁵ Vgl. Andreasen et al. (2015), S. 5.

mittelten, voraussichtlichen Wirkungen des technischen Produkts in seinen technischen Prozessen.⁸³⁰ Diese stringente Beziehung zwischen dem Produktlebenslauf und dem Entwicklungsprozess steht durch Antizipieren und Beeinflussen im Vordergrund, um zum Beispiel Umweltbeeinträchtigungen frühzeitig durch konstruktive Maßnahmen zu vermeiden.⁸³¹

2.10.5.4 Integriertes Produktentstehungs-Modell (iPeM)

Das *integrierte Produktentstehungs-Modell (iPeM)* vereint als generisches Metamodell die Management- und Entwicklersicht.⁸³² Es beinhaltet die grundsätzlichen Elemente der SPALTEN-Vorgehensweise nach ALBERS im Handlungsmodell innerhalb des dreigeteilten ZHO-Modells⁸³³ von ROPOHL. Flexibilisierte Aktivitäten strukturieren den Produktentstehungsprozess. Das *ZHO-Modell* untergliedert den Entwicklungsprozess in ein Systemtripel (siehe Abbildung 68), bestehend aus Ziel-, Handlungs- und Objektsystem (ZHO)⁸³⁴, die wechselseitig entsprechend des Drei-Welten-Modells von POPPER miteinander in Beziehung stehen.

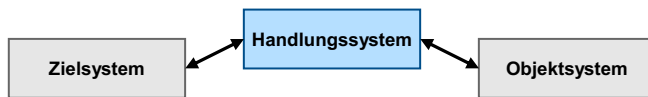


Abbildung 68: ZHO-Modell⁸³⁵

Das von ALBERS und LOHMEYER erweiterte ZHO-System ordnet die *Elementaraktivitäten* der *Analyse* und *Synthese* ein (siehe Abbildung 69).

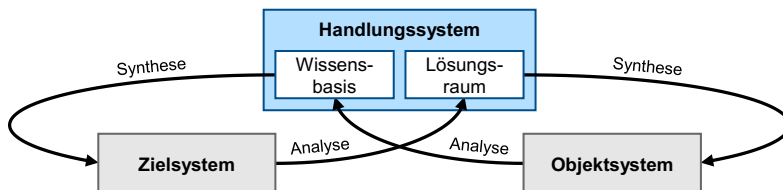


Abbildung 69: Erweitertes ZHO-Modell⁸³⁶

⁸³⁰ Vgl. Birkhofer et al. (2012), S. 566; ebenso Anderl, Melk (2005), S. 5 und Anderl et al. (2007), S. 206-207.

⁸³¹ Vgl. Anderl, Melk (2005), S. 4.

⁸³² Vgl. Albers et al. (2016f), S. 101.

⁸³³ Das Akronym ZHO steht für Ziel, Handlung, Objekt.

⁸³⁴ Vgl. Albers et al. (2011a), S. 256.

⁸³⁵ Albers, Meboldt (2007a), S. 611-612.

⁸³⁶ Ebd.

Es findet eine Erweiterung des Handlungssystems durch die Wissensbasis und den Lösungsraum statt. Anhand der entwicklungsspezifischen *Wissensbasis* beschreibt der *Lösungsraum* die Menge aller zulässigen Lösungen.⁸³⁷ Das *Zielsystem* lässt sich dynamisch basierend auf der generierten Wissensbasis synthetisieren. Die Analyse des Zielsystems führt zur Erweiterung des Lösungsraums um zulässige Lösungen, die im Rahmen der Synthese Ergebnisse im Objektsystem generieren.⁸³⁸ Die Beurteilung des Objektsystems führt zu einem Wissenszuwachs, sodass die Wissensbasis und das Zielsystem kontinuierlich angepasst und erweitert werden.⁸³⁹ Dabei betonen ALBERS et al., dass sowohl die synthetisch getroffenen Entscheidungen als auch die analytisch gewonnenen Informationen unsicherheitsbehaftet sind.⁸⁴⁰

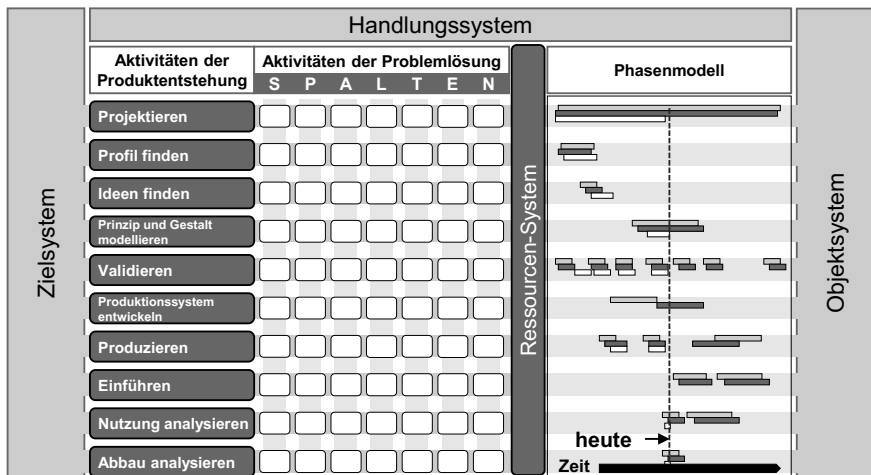


Abbildung 70: iPeM – Integriertes Produktentstehungsmodell⁸⁴¹

Die Elemente des ZHO-Modells folgen dem heuristischen Prinzip. Sie sind den Teilsystemen im Produktentstehungsprozess unter Gewährleistung der Zweckmäßigkeit zuzuordnen.⁸⁴² Der *Entwicklungsprozess* im iPeM (siehe Abbildung 70) ist

⁸³⁷ Vgl. Albers et al. (2011a), S. 257.

⁸³⁸ Vgl. ebd.

⁸³⁹ Vgl. ebd.

⁸⁴⁰ Vgl. ebd.

⁸⁴¹ In Anlehnung an Albers et al. (2016f), S. 104 mit deutscher Übersetzung nach Albers, Braun (2011), S. 18.

⁸⁴² Vgl. Meboldt (2008), S. 156.

durch die Transformation des anfangs vagen und dynamischen Zielsystems⁸⁴³ in das konkrete Objektsystem durch ein Handlungssystem modelliert.⁸⁴⁴ Erst die angemessene Reife des Zielsystems ermöglicht die Realisierung der Elemente des Zielsystems durch lösungsspezifische Elemente des Objektsystems.⁸⁴⁵ Die zeitliche Abfolge von dynamischen Entwicklungsphasen erfolgt im Phasenmodell.

Das *Zielsystem* umfasst alle notwendigen Ziele und Randbedingungen als Vorgaben an das zu entwickelnde Produkt und die Unternehmensorganisation,⁸⁴⁶ inklusive aller Abhängigkeiten.⁸⁴⁷ Nach EBEL besteht das *Zielsystem* aus unterschiedlichen Partialmodellen mit Elementtypen, Relationen und Attributen (siehe Abbildung 71). Dabei entsteht aufgrund des Zielsystems ein *mentales Modell* des gewünschten Produkts mit antizipativen und geplanten Eigenschaften.⁸⁴⁸ Anforderungen stellen einen Teil des Zielsystems dar.⁸⁴⁹

Partialmodelle	Ziele	Anforderungen	Anwendungsfälle
	Funktionen	Gestalt / Implementation	Phasen und PE-Aktivitäten
	Meilensteine und Deliverables	Stakeholder	Tests
Elementtypen	Ziel	Anforderung	Anwendungsfall
	Funktion	Gestalt / Implementation	Phasen / Aktivitäten
	Meilenstein	Deliverable	Stakeholder
	Test	Entscheidung	Begründung
	Dokument / Information	Schnittstelle	
Relationen	Dekomposition	Verfeinerung	Ungerichtete Relation
	Gerichtete Relation	Unterstützung	Konflikt
	Inkonsistenz	Ableitung	Erfüllung
	Verifizierung	Validierung	Verantwortlichkeit
	Treiber		
Attribute	Bezeichner	Status	Wichtigkeit
	Autorisation	Änderungsinformation	Freitext

Abbildung 71: Strukturierung des Zielmodells⁸⁵⁰

⁸⁴³ Vgl. Albers et al. (2011a), S. 256.

⁸⁴⁴ Vgl. Albers, Braun (2011), S. 16.

⁸⁴⁵ Vgl. Albers et al. (2011a), S. 263.

⁸⁴⁶ Vgl. Albers et al. (2016a), S. 543.

⁸⁴⁷ Vgl. Albers, Braun (2011), S. 9-10.

⁸⁴⁸ Vgl. ebd., S. 16; ebenso Albers, Meboldt (2007a), S. 611-612.

⁸⁴⁹ Vgl. Albers, Meboldt (2007a), S. 611-612.

⁸⁵⁰ Ebel (2015), S. 156.

Zu Beginn des Entwicklungsprozesses findet eine initiale Definition des Zielsystems statt.⁸⁵¹ Durch Ableitung aus dem initialen Zielsystem und der Systemarchitektur entstehen technische Anforderungen an zu erfüllende Funktionen und Strukturelemente des zu entwickelnden technischen Produkts.⁸⁵²

Das *Objektsystem* beinhaltet im Gegensatz zum Zielsystem keine reinen Informationen, sondern entspricht nach Abschluss des Produktentstehungsprozesses dem technischen Produkt als realisierter Lösung des Zielsystems.⁸⁵³ Es umfasst alle Teillösungen inkl. der Produktionsanlagen und alle generierten Zwischenergebnisse.⁸⁵⁴ Es beinhaltet alle Dokumente, Teillösungen, Prototypen usw. zum Zweck der vollständigen Nachvollziehbarkeit getroffener Entscheidungen.⁸⁵⁵ Darüber hinaus bildet es die Grundlage für eine stetige Analyse und Synthese des Zielsystems.

Das *Handlungssystem* bildet als sozio-technisches System das Bindeglied zwischen Ziel- und Objektsystem. Es beinhaltet neben den Aktivitäten, Methoden und Prozessen zur Transformation des Zielsystems in das Objektsystem die verfügbaren Ressourcen. Über die Transformation im Handlungssystem werden die Vorgaben des Zielsystems durch operationalisierte Aktivitäten, anwendbare Methoden und zweckmäßige Prozesse, unter Einhaltung der verfügbaren Ressourcen, in die Ergebnisse des Objektsystems überführt.⁸⁵⁶ Aus den Ergebnissen im Objektsystem können weitere Ziele abgeleitet werden.⁸⁵⁷ Das Handlungssystem umfasst alle Aktivitäten zur Unterstützung der Transformation.

Jeder Entwicklungsprozess setzt sich aus den Dimensionen der Produktentstehung und Problemlösung zusammen.⁸⁵⁸ Makroaktivitäten beziehen sich auf den Produktlebenszyklus nach ALBERS. Das Handlungssystem umfasst die iterativen Mikroaktivitäten⁸⁵⁹ des iPeM in Form der *SPALTEN-Aktivitätsmatrix*, in der basierend auf der Methoden- und Wissensbasis der Problemlösungsprozess situationsgerecht durch einzelne Aktivitäten unterstützt wird. Virtuelle Systeme unterstützen die Auswahl geeigneter Methoden im Rahmen der Aktivitäten der Problemlösung im Entwicklungsprozess.⁸⁶⁰

⁸⁵¹ Vgl. Albers et al. (2016a), S. 543.

⁸⁵² Vgl. Zingel (2013), S. 129.

⁸⁵³ Vgl. Albers, Meboldt (2007a), S. 611-612.

⁸⁵⁴ Vgl. Albers et al. (2016a), S. 543.

⁸⁵⁵ Vgl. Albers, Braun (2011), S. 16-17.

⁸⁵⁶ Vgl. ebd., S. 16.

⁸⁵⁷ Vgl. Meboldt (2008), S. 155.

⁸⁵⁸ Vgl. Albers, Meboldt (2007a), S. 611-612

⁸⁵⁹ Vgl. Albers et al. (2016f), S. 101.

⁸⁶⁰ Vgl. Reiß et al. (2016), S. 406-409.

SPALTEN verfolgt als dekomponierender Problemlösungsprozess⁸⁶¹ das Ziel, in den einzelnen Aktivitäten der Produktentstehung⁸⁶² teamorientiert, unter projekt- und unternehmensspezifischen Randbedingungen, komplexe Probleme effizient zu lösen.⁸⁶³ Das Akronym *SPALTEN* steht für:⁸⁶⁴

- Situationsanalyse
- Problemeingrenzung
- Alternative Lösungssuche
- Lösungsauswahl
- Tragweitenanalyse
- Entscheiden und Umsetzen
- Nacharbeiten und Lernen

Jedes der sieben *SPALTEN*-Module kann aufgrund der Universalität situationsgerecht und flexibel auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen angewandt werden.⁸⁶⁵ Die *Situationsanalyse* dient der Eingrenzung des zu lösenden Problems.⁸⁶⁶ Die *Problemeingrenzung* führt durch Informationsverdichtung auf die wesentlichen Aspekte des zu lösenden Problems⁸⁶⁷ und auf die detaillierte Problembeschreibung.⁸⁶⁸ Die *alternative Lösungssuche* generiert eine Vielzahl alternativer Lösungen, um den Lösungsraum möglichst umfassend unter Ausnutzung von größtmöglichen Kreativitätspotenzialen⁸⁶⁹ abzudecken. Die *Lösungsauswahl* selektiert erfolgreiche Lösungen für das zugrundeliegende Problem.⁸⁷⁰ Chancen und Risiken werden durch die *Tragweitenanalyse* identifiziert, sodass eine fundierte und in den Aktivitäten des *Entscheidens und Umsetzens* reflektierte Entscheidung getroffen und die Lösung umgesetzt werden kann.⁸⁷¹ *Nachbereiten und Lernen*

⁸⁶¹ Vgl. Albers et al. (2005), S. 553-554; ebenso Albers, Meboldt (2007a), S. 611-612 und Albers et al. (2016a), S. 550.

⁸⁶² Vgl. Albers, Braun (2011), S. 18-19.

⁸⁶³ Vgl. Albers et al. (2005), S. 553-554; ebenso Albers, Meboldt (2007b), S. 49-50.

⁸⁶⁴ Albers et al. (2005), S. 553-554; ebenso Albers, Braun (2011), S. 21 und mit geringfügiger Adaption Albers et al. (2016e), S. 415.

⁸⁶⁵ Vgl. Albers et al. (2016e), S. 414.

⁸⁶⁶ Vgl. ebd., S. 415.

⁸⁶⁷ Vgl. ebd.

⁸⁶⁸ Vgl. Albers et al. (2005), S. 553-554.

⁸⁶⁹ Vgl. ebd.

⁸⁷⁰ Vgl. ebd.

⁸⁷¹ Vgl. Albers et al. (2016e), S. 414.

dienen dem kontinuierlichen Verbesserungsprozess⁸⁷² zur Dokumentation⁸⁷³ und Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse in zukünftigen Problemlösungsprozessen.⁸⁷⁴

Das *Phasenmodell* dient der zeitbezogenen Abbildung der Entwicklungsaktivitäten. Innerhalb des Phasenmodells können Implementierungs-, Anwendungs- und Referenzmodelle unterschieden werden. *Referenzmodelle* dienen der Soll-Planung in einem definierten Anwendungsbereich aufgrund bekannter, erfahrungsbasierter oder ähnlicher Prozessmuster von bereits absolvierten Entwicklungsprozessen.⁸⁷⁵ *Anwendungsmodelle* dokumentieren den exakten Ist-Verlauf des Entwicklungsprozesses, um Soll-Ist-Abweichungen zu erfassen und kontinuierlich zu verbessern. Erst das *Implementierungsmodell* bezieht sich als projektspezifischer Plan zur operativen, unternehmensspezifischen Planung auf ein konkretes Projekt.⁸⁷⁶

Die *Validierung* führt als zentrale Aktivität zu einer kontinuierlichen synthetischen Erweiterung und Anpassung des Zielsystems im gesamten Entwicklungsprozess.⁸⁷⁷ Dabei erfolgt die Analyse des Objektsystems anhand von zukünftig zu erwartenden Anwendungsszenarios.⁸⁷⁸ Die Validierungsziele sind zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Produktlebenszyklus klar definiert.⁸⁷⁹ Um den Validierungsaufwand im Entwicklungsprozess zu begrenzen, kann die Eigenschafts- und Funktionserfüllung neuer Teilsysteme, insbesondere aufgrund ihres unterschiedlichen Reifegrades in den frühen Phasen der Produktentwicklung,⁸⁸⁰ als Teil eines übergeordneten Gesamtsystems fokussiert werden.⁸⁸¹ Die modellbasierte Validierung von (Sub-)Systemen kann hierbei über Koppelsysteme erfolgen, die reale Systeme mit weiteren Validierungsmodellen schnittstellenbezogen koppeln.⁸⁸²

Die *Verifikation* verfolgt den Abgleich der Elemente des Objektsystems mit den Elementen des Zielsystems zur Gewährleistung der Konformität.⁸⁸³ Die *Analyse*

⁸⁷² Vgl. Albers et al. (2005), S. 553-554.

⁸⁷³ Vgl. Albers et al. (2016e), S. 415-416.

⁸⁷⁴ Vgl. Albers, Braun (2011), S. 21-22.

⁸⁷⁵ Vgl. Meboldt (2008), S. 205.

⁸⁷⁶ Vgl. Albers, Braun (2011), S. 24.

⁸⁷⁷ Vgl. Albers et al. (2016a), S. 543-544.

⁸⁷⁸ Ein Anwendungsszenario setzt sich aus spezifischen Anforderungen und Randbedingungen zusammen, vgl. Albers et al. (2016a), S. 552.

⁸⁷⁹ Vgl. ebd., S. 547.

⁸⁸⁰ Vgl. ebd., S. 559.

⁸⁸¹ Vgl. ebd., S. 551.

⁸⁸² Vgl. Albers et al. (2016d), S. 112-113.

⁸⁸³ Vgl. Albers et al. (2016a), S. 545.

bezieht sich hierbei überwiegend auf konkrete Zahlenwerte (bspw. Beschleunigung, Kraftstoffverbrauch), während die *Bewertung* die subjektive Wahrnehmung der Stakeholder inkludiert (z. B. Fahrdynamik, Effizienz). Damit bedingt die Formulierung des Zielsystems größtmögliche Objektivierung, um die Zusammenhänge zwischen quantitativen Analysekriterien und den subjektiv wahrgenommenen Bewertungskriterien der Stakeholder zu erfassen.⁸⁸⁴

Gegenüber der Validierung ist der *Test* abgegrenzt. Er dient der Ermittlung von „Systemeigenschaften eines Systems [...] und liefert Erkenntnisse über das System, insbesondere ob das System zuvor definierte Ziele, Anforderungen oder Hypothesen ganz, teilweise oder nicht erfüllt. Ein Test umfasst stets einen Testfall, eine Testumgebung und eine Testinterpretation.“⁸⁸⁵ Der Testfall beschreibt hierbei die „Randbedingungen, Eingangsgrößen und das erwartete Systemverhalten“⁸⁸⁶ innerhalb der Testumgebung, die aus einer Kombination von physischen und virtuellen Modellen bestehen kann, um das Systemverhalten zu detektieren.⁸⁸⁷ Dieser Ansatz wird über den generischen IPEK-X-in-the-Loop (IPEK-XiL) verfolgt.

Im Rahmen der *Produktgenerationsentwicklung* (PGE) findet eine Erweiterung des iPeM statt, ohne den fundamentalen Grundaufbau zu verändern (siehe Abbildung 72). Die Erweiterung resultiert aus der Beobachtung realer Entwicklungsprozesse. Diese basieren oftmals auf Referenzprodukten (Vorgänger- und Wettbewerbsprodukten⁸⁸⁸) und streben die Verbesserung von Funktionen und Eigenschaften durch Modifikationen an, anstatt komplette Neuentwicklungen zu betreiben.⁸⁸⁹ Somit entstehen Produktgenerationen \mathbf{G}_{n+1} durch geringfügige Anpassungen des Teilsystems (TS) aus der Übernahmevariation (ÜV) und Neuentwicklungen (GS bzw. PS) durch Gestaltvariation (GV) oder Prinzipvariation (PV), wie das mathematische Modell der PGE in (12) verdeutlicht.⁸⁹⁰

$$\mathbf{\ddot{U}} \mathbf{S}_{n+1} \{ \text{TS} | \mathbf{\ddot{U}} \mathbf{V}_{(\text{TS})} \}; \mathbf{GS}_{n+1} \{ \text{TS} | \text{GV}_{(\text{TS})} \}; \mathbf{PS}_{n+1} \{ \text{TS} | \text{PV}_{(\text{TS})} \} \quad (12)$$

Die Produktgeneration \mathbf{G}_{n+1} ergibt sich somit in (13) als vereinigte Teilmenge von unverändert übernommenen Subsystemen und veränderten Subsystemen aus der Gestalt- und Prinzipvariation.⁸⁹¹

$$\mathbf{G}_{n+1} = \mathbf{\ddot{U}} \mathbf{S}_{n+1} \cup \mathbf{GS}_{n+1} \cup \mathbf{PS}_{n+1} \quad (13)$$

⁸⁸⁴ Vgl. Albers et al. (2015b), S. 77.

⁸⁸⁵ Ebel (2015), S. 136.

⁸⁸⁶ Ebd.

⁸⁸⁷ Vgl. Ebel (2015), S. 136; ebenso Albers et al. (2016a), S. 554.

⁸⁸⁸ Vgl. Albers et al. (2015a), S. 1.

⁸⁸⁹ Vgl. ebd., S. 2; ebenso Albers et al. (2016b), S. 791.

⁸⁹⁰ Vgl. Albers et al. (2015a), S. 4-5.

⁸⁹¹ Vgl. ebd., S. 5-7.

Produktgeneration, das *Validierungs-*, *Produktions-* und *Strategiesystem* sind ebenenweise im dreidimensionalen Raum angeordnet.⁸⁹⁶ Die Entwicklung des technischen Produkts und des Produktionssystems findet in separaten Ebenen statt, wobei sich Produkt und Produktionssystem gegenseitig über das dynamische *Zielsystem* bedingen.⁸⁹⁷ Die einzelnen Aktivitäten bilden zwei zentrale Cluster: spezifische Aktivitäten im Produktentwicklungsprozess⁸⁹⁸ und grundlegende Aktivitäten,⁸⁹⁹ die regelmäßig zur Unterstützung und Verbesserung des Entwicklungsprozesses angewendet werden.⁹⁰⁰

Im Gegensatz zu sequenziellen Vorgehensweisen der Produktentwicklung, beschreibt iPeM den Produktentstehungsprozess als adaptives komplexes System⁹⁰¹ durch eine flexible Abfolge situationsgerecht ausgewählter Aktivitäten. Sowohl das Ziel- als auch das Objektsystem können theoretisch separat voneinander weiterentwickelt werden. Jedoch bedarf eine erfolgreiche Produktentwicklung der beidseitigen Definition, Ab- und Bestimmung von Objekt- und Zielsystem.⁹⁰² Die wechselseitigen Beziehungen von Ziel- und Objektsystem bedingen, dass die Eigenschaften des Objektsystems mit den Eigenschaften des Zielsystems zueinander passen müssen.⁹⁰³ Das iPeM ist sowohl für marktgetriebene (Market-Pull-Strategie) als auch technologiegetriebene (Technology-Push-Strategie) Innovationsprozesse anwendbar.⁹⁰⁴

2.10.5.5 Validierungsframework X-in-the-Loop (XiL)

Das Validierungsframework X-in-the-Loop fokussiert die *prozessbegleitende, kontinuierliche Validierung* komplexer Systeme,⁹⁰⁵ um ein sich in der Entwicklung befindendes physisches, virtuelles oder physisch-virtuelles Teilsystem X⁹⁰⁶ modulbasiert⁹⁰⁷ über die Kopplung mit einem Supersystem zu validieren (X-in-

⁸⁹⁶ Vgl. Albers et al. (2016f), S. 104.

⁸⁹⁷ Vgl. ebd., S. 105.

⁸⁹⁸ Als neue Aktivität ist die Erstellung von Prototypen zu verzeichnen, vgl. ebd.

⁸⁹⁹ Als grundlegende Aktivitäten werden neue verwaltende Aktivitäten aus Managementsicht eingeführt, die sich auf das Wissensmanagement, Änderungsmanagement und Projektmanagement beziehen, vgl. ebd.

⁹⁰⁰ Vgl. ebd.

⁹⁰¹ Vgl. Meboldt (2008), S. 156.

⁹⁰² Vgl. ebd.

⁹⁰³ Vgl. ebd.

⁹⁰⁴ Vgl. ebd., S. 173.

⁹⁰⁵ Vgl. Albers et al. (2015b), S. 74.

⁹⁰⁶ Vgl. ebd., S. 77; ebenso Albers et al. (2016a), S. 560.

⁹⁰⁷ Vgl. Albers et al. (2008), S. 4.

the-Loop)⁹⁰⁸ und Erkenntnisse für den weiteren Entwicklungsprozess zu gewinnen.⁹⁰⁹ Das X bezeichnet das zu entwickelnde System.^{910, 911}

Aufgrund der hohen Komplexität mechatronischer Gesamtsysteme und der systemischen Wechselwirkungen⁹¹² können Subsysteme nicht separiert entwickelt werden, um ungewollte Auswirkungen auf das Gesamtsystem zu vermeiden.⁹¹³ XiL ermöglicht die Validierung einzelner Komponenten und Subsysteme, obwohl das Gesamtsystem in seiner detaillierten physischen Form fehlt bzw. teils unbekannt ist.⁹¹⁴ So können zum Zweck der Validierung bspw. *fraktale Modelle* (Model-in-the-Loop, MiL), *Software* (Software-in-the-Loop, SiL) oder auch zusätzliche *Hardware*, z. B. in Form von Steuergeräten oder anderen physischen Komponenten (Hardware-in-the-Loop, HiL), mit dem zu validierenden physischen System in einer Validierungsumgebung gekoppelt sein.⁹¹⁵ Diese sind in realitätsnahe virtuelle, modellbasierte oder reale *Validierungsumgebungen* integriert,⁹¹⁶ die entsprechend der jeweiligen Entwicklungsphase variieren.⁹¹⁷

Die entstehenden Koppelsysteme liefern im Rahmen der sogenannten entwicklungsbegleitenden Pull-Validierung wertvolle Erkenntnisse zur Reduzierung von Unsicherheit und zur Erhöhung der Entscheidungsqualität.⁹¹⁸ Das gesamte Produkt mit ausgearbeiteten Wirkprinzipien und seiner Produktgestalt muss nicht vollständig vorliegen, um durch *Push-Validierung* Erkenntnisse zu generieren und Änderungen vorzunehmen. Vielmehr findet *Pull-Validierung* in enger kontinuierlicher Abfolge mit Syntheseaktivitäten statt.⁹¹⁹ So existieren Prüfstandsaufbauten mit Vehicle-in-the-Loop (ViL),⁹²⁰ die in Bezug zu Fahrversuchen auf der Straße eine höhere Reproduzierbarkeit, Sicherheit⁹²¹ und Zeitreduktion der Messungen

⁹⁰⁸ Vgl. Albers et al. (2015b), S. 75.

⁹⁰⁹ Vgl. Albers et al. (2016a), S. 559; ebenso Albers et al. (2011b), S. 206.

⁹¹⁰ Das zu entwickelnde System wird als SUD (engl.: system under development) abgekürzt, vgl. Albers et al. (2015b), S. 77; ebenso Matros et al. (2015), S. 65.

⁹¹¹ Das SUD wird in der ursprünglichen Form des XiL-Ansatzes auf zu untersuchende Komponenten bezogen, wodurch die Unit Under Test (UUT) als Bezeichnung wiederzufinden ist, vgl. Albers et al. (2008), S. 3.

⁹¹² Vgl. Albers et al. (2015b), S. 74.

⁹¹³ Vgl. Braun (2014), S. 84.

⁹¹⁴ Vgl. Albers et al. (2008), S. 2.

⁹¹⁵ Vgl. Albers et al. (2015b), S. 75.

⁹¹⁶ Vgl. Albers et al. (2008), S. 2.

⁹¹⁷ Vgl. Albers et al. (2015b), S. 77.; ebenso Matros et al. (2015), S. 65.

⁹¹⁸ Vgl. Albers et al. (2015b), S. 77-78.

⁹¹⁹ Vgl. ebd., S. 78-79.

⁹²⁰ Vgl. Rom (2015), S. 81.

⁹²¹ Vgl. Albers et al. (2008), S. 2.

aufweisen.⁹²² Dabei sollte eine kontinuierliche Validierung durch parallelisierte Entwicklung des technischen Produkts und der Validierungsumgebung vorangetrieben werden, um nach dem Pull-Prinzip valide Erkenntnisse ebenfalls in den frühen Phasen der Produktentwicklung über unterschiedliche Produktgenerationen hinweg zu nutzen. Die Push-Validierung findet sich in klassischen, phasenorientierten Entwicklungsansätzen wieder, in denen die Validierung als abschließende Phase nach der Gestaltung des technischen Produkts stattfindet.⁹²³ Das Risiko eines Over-Engineerings, das beim Push-Prinzip auftreten kann, wird durch die Pull-Validierung deutlich reduziert.⁹²⁴

2.10.5.6 Design for X (DfX)

Die Entwicklungsansätze *Design for X (DfX)* vereinen unterschiedliche Sichtweisen auf den Entwicklungsprozess mit dem Ziel, einen bestmöglichen Kompromiss zwischen widersprüchlichen Anforderungen unter einer Vielzahl einzuhaltender Gerechtheiten zu finden (siehe Abbildung 73).⁹²⁵ Oftmals wird das fertigungs- und montagegerechte Konstruieren im DfX-Ansatz fokussiert. DfX-Ansätze verfolgen das Ziel, die aus (Fertigungs-)Prozessen gewonnenen Informationen gezielt im Entwicklungsprozess zu nutzen.

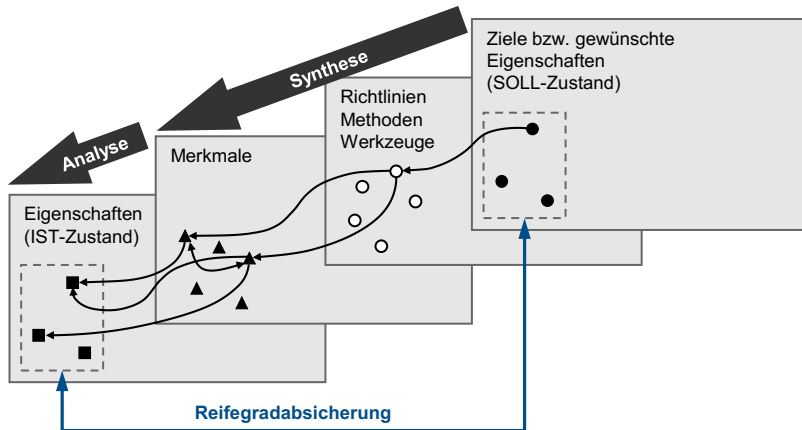


Abbildung 73: Ziele, Richtlinien, Merkmale und Eigenschaften in DfX-Ansätzen⁹²⁶

⁹²² Vgl. Matros et al. (2015), S. 65.

⁹²³ Vgl. Albers et al. (2015b), S. 78.

⁹²⁴ Vgl. Albers et al. (2016a), S. 556-558.

⁹²⁵ Vgl. Stöber et al. (2009), S. 101.

⁹²⁶ Vgl. ebd., S. 107.

Ziele und gewünschte Eigenschaften sind in allen Phasen des Produktlebenslaufs über geeignete Merkmale zu definieren, um die Ist-Eigenschaften zu erreichen. Richtlinien, Methoden und Werkzeuge unterstützen den Entwicklungsprozess methodisch.

Die *Reifegradabsicherung* rückt in den Vordergrund. Ein Soll-Ist-Abgleich dient zur Erzielung einer bestmöglichen Übereinstimmung der Ist- mit den Soll-Eigenschaften. Aufgrund der vielfältigen Verknüpfungen von Merkmalen ermöglichen CAx-Simulationen die iterative Analyse, um die Gestaltmerkmale kontinuierlich festzulegen, bis der Ist-Zustand erreicht und die Produktfunktion erzielt sind.⁹²⁷

2.10.5.7 Methodik der integrierten Produktentstehung (IPE-Methodik)

Die *Methodik der integrierten Produktentstehung (IPE-Methodik)* vereint als holistische Metamethodik die Konstruktions- und Produktionssicht auf das zu entwickelnde technische Produkt.⁹²⁸ Sie weist große Flexibilität bzgl. ihres Einsatzbereichs auf und kann projekt- und bereichsspezifisch auf den gesamten Produktlebenslauf angewendet werden.⁹²⁹

Die integrierte Produktentstehungsmethodik vereint die Sachsysteme von Produkt und Produktion, wodurch eine produktionsintegrierende Produktentwicklung entsteht. Das *Sachsystem Produkt* beinhaltet die physikalisch-technischen Eigenschaften des technischen Produkts und dessen Lösungsmöglichkeiten für die Produktkonkretisierung.⁹³⁰ Der produktionsintegrierende Charakter der IPE-Methodik kommt im Sachsystem Produktion zum Tragen. Das *Sachsystem Produktion* bildet die Grundlage für die Integration der Fertigungstechnologie in die Produktentwicklung. Über Bereitstellung der Eigenschaften und Lösungsmöglichkeiten für das zu entwickelnde technische Produkt, welche die Produktionstechnik erzeugen kann,⁹³¹ vereint das Gesamtsystem der integrierten Produkterstellung die beiden Sichtweisen der Sachsysteme.

Die *Ziel- und Handlungssysteme* berücksichtigen die restriktiven Rahmenbedingungen auf den Entwicklungsprozess. Darunter fallen bspw. die menschliche Arbeitskraft, Fähig- und Fertigkeiten, motivationale Intentionen und Problemlösungskompetenzen von Konstrukteuren⁹³² sowie Methoden zur Entwicklung und Konstruktion des technischen Produkts.⁹³³

⁹²⁷ Vgl. Stöber et al. (2009), S. 109.

⁹²⁸ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 325.

⁹²⁹ Vgl. ebd., S. 326.

⁹³⁰ Vgl. ebd., S. 327.

⁹³¹ Vgl. ebd.

⁹³² Vgl. ebd.

⁹³³ Vgl. ebd.

Sach-, Handlungs- und Zielsysteme sind im *Gesamtsystem der integrierten Produkterstellung* vereint, welches durch die integrierte Produktentstehungsmethodik unterstützt wird.⁹³⁴ Die IPE-Methodik stellt darüber hinaus einen *funktionsorientierten Vorgehensplan* mit fünf Arbeitsschritten für die Neukonstruktion technischer Produkte des Maschinenbaus bereit: *Ziele definieren, Aufgabe klären, Vorgehen planen, Konzipieren, Entwerfen vorbereiten, Ausarbeiten und Fertigen*. Den Arbeitsabschnitten sind Arbeitsschritte und -ergebnisse zugeordnet. Arbeitsabschnitte sind situationsgerecht und flexibel zu überspringen, insofern Arbeitsergebnisse bereits in vorangegangenen Arbeitsschritten erarbeitet wurden.⁹³⁵

Die Anforderungsliste ist als zentrales Dokument der Aufgabenklärung über den gesamten Entwicklungsprozess hinweg zu aktualisieren.⁹³⁶ Dabei gilt es, zuerst maßgebende und abhängige Funktionsträger⁹³⁷ festzulegen, die andere Funktionsträger beeinflussen, um den iterativen Mehraufwand im Entwicklungsprozess gering zu halten.⁹³⁸ Die Gesamtfunktion wird zur Komplexitätsreduktion in Teilfunktionen untergliedert. Jeder Teilfunktion ist ein geeignetes Lösungsprinzip zugeordnet. Die Festlegung von Wirkflächen, -körper, -räumen und -bewegungen definiert die Wirkstruktur. Die Silbe „Wirk-“ impliziert die Funktionsrelevanz des entsprechenden Elements.⁹³⁹

2.10.5.8 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung

Das *3-Zyklen-Modell* der Produktentstehung nach GAUSEMEIER vereint die Produkt- und Produktionssystementwicklung mit der strategischen Produktplanung (siehe Abbildung 74). Die Zyklen betonen die iterativen Aktivitäten, um erfolgversprechende Ergebnisse zu erzielen.

Basierend auf identifizierten Anwendungspotenzialen werden innerhalb des ersten strategischen Zyklus die Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt definiert. Die *Produktkonzipierung* stellt die Schnittstelle mit der strategischen Produktplanung dar, sodass auf Grundlage von definierten Anforderungen prinzipielle Lösungen erarbeitet werden. Hierbei ist der Funktionsnachweis zu erbringen. In dieser integrierten Betrachtung findet parallel mit der Produktkonzeption die Konzipierung des *Produktionssystems* statt.

⁹³⁴ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 328.

⁹³⁵ Vgl. ebd., S. 348.

⁹³⁶ Vgl. ebd., S. 348-350.

⁹³⁷ Unter Funktionsträgern wird in Zusammenhang mit der IPE-Methodik „ein Lösungsprinzip, eine prinzipielle Lösung, ein Teil, eine Baugruppe oder auch ein (einzubringendes) Produkt“ verstanden, vgl. ebd., S. 350.

⁹³⁸ Vgl. ebd.

⁹³⁹ Vgl. ebd., S. 353.

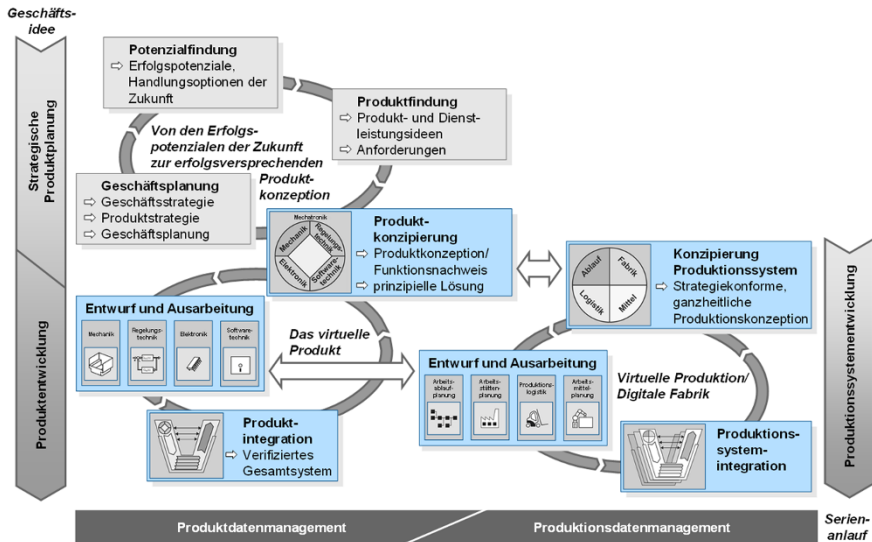


Abbildung 74: 3-Zyklus-Modell der Produktentstehung⁹⁴⁰

Einerseits ist das Produktionssystem anhand des entwickelten Produkts zu konzipieren. Andererseits muss das entwickelte Produkt den Möglichkeiten des konzipierten Produktionssystems folgen. Die virtuelle Produktentwicklung und die digitale Fabrik unterstützen den vernetzten Konzept- und Integrationsprozess von Produkt- und Produktionssystementwicklung.

2.10.5.9 Produktionsintegriertes Entwickeln

GRAMLICH führt mit den erarbeiteten produktionsintegrierenden Produktsynthesestrategien einen holistischen Ansatz zur frühzeitigen Nutzung *fertigungstechnologischer Potenziale* im Entwicklungsprozess an (siehe Abbildung 75). Dieser auf WÄLDELES Arbeit basierende Kerngedanke, festzulegende (relevante) Eigenschaften im Entwicklungsprozess mit den fertigungstechnisch realisierbaren, möglichen (induzierten) Eigenschaften abzugleichen, führt zur gezielten Rückführung fertigungstechnisch erzeugbarer Eigenschaften in den Entwicklungsprozess.⁹⁴¹ Hierbei wird das Ziel verfolgt, neuartige und innovative Produkte im Rahmen eines Technology-Push-Ansatzes zu entwickeln.⁹⁴² Entwicklung und Produktion werden somit im holistischen Zusammenhang verknüpft.

⁹⁴⁰ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Gausemeier et al. (2012), S. 16.

⁹⁴¹ Vgl. Wäldele (2012), S. 106-107.

⁹⁴² Vgl. ebd., S. 106.

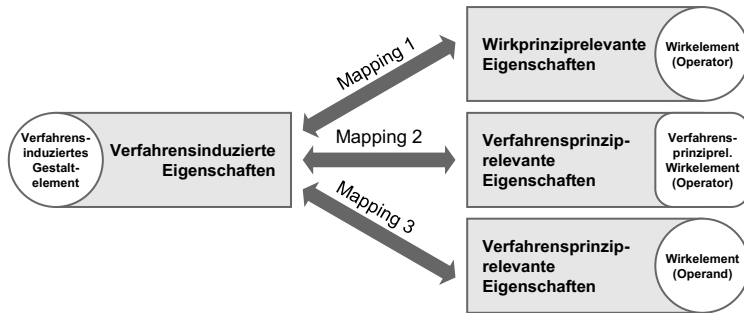


Abbildung 75: Eigenschaftsmapping⁹⁴³

Es werden insgesamt sechs markt- und technologiegetriebene Produktsynthesestrategien unterschieden. Das Produkt wird im Fertigungsprozess und fertigungsanalogen Nutzungsprozessen in seinem Prozesszusammenhang auf der Verfahrensebene anhand von verfahrensprinziprelevanten und verfahrensinduzierten Eigenschaften abgebildet.

Die *produktionsintegrierenden Produktsynthesestrategien* basieren auf dem Abgleich (Mapping) von verfahrensinduzierten Eigenschaften mit verfahrensprinziprelevanten bzw. wirkprinziprelevanten Eigenschaften von Wirkelementen des Operanden oder verfahrensprinziprelevanten Wirkelementen des Operators.⁹⁴⁴ Es kann sowohl technologie- als auch marktgetrieben initiiert sein.

Die *marktgetriebenen Produktsynthesestrategien* verfolgen die Identifikation der verfahrensinduzierten Eigenschaften zur Realisierung der geforderten Funktion bzw. des Prozesses. Die technologiegetriebenen Produktsynthesestrategien gehen hingegen in umgekehrter Richtung von bekannten verfahrensinduzierten Eigenschaften aus. Die *erste Strategie* basiert auf der Identifikation der benötigten verfahrensinduzierten Eigenschaften eines Produkts, um den Einsatzprozess durch Funktionserfüllung zu realisieren. Die *zweite Strategie* führt zur Identifikation notwendiger verfahrensinduzierter Eigenschaften, damit das technische Produkt in den, dem Einsatzprozess vor- und nachgelagerten, Prozessen als Operator fungieren kann. Die *dritte Strategie* fokussiert verfahrensinduzierte Eigenschaften, die das gefertigte technische Produkt aufweisen muss, um in den fertigungsanalogen Nutzungsprozessen als Operand zu fungieren.

⁹⁴³ Gramlich (2013), S. 124.

⁹⁴⁴ Bei dem von GRAMLICH beschriebenen Mapping handelt es sich korrekterweise um ein Matching, da das Mapping dem schrittweisen Konkretisieren eines technischen Produkts dient, das Matching hingegen einen Eigenschaftsabgleich vollzieht.

2.10.5.10 Integrierte algorithmenbasierte Produkt- und Prozessentwicklung

Die *integrierte algorithmenbasierte Produkt- und Prozessentwicklung* verfolgt die Ausschöpfung von Fertigungs- und Nutzungspotenzialen durch die *Integration fertigungsverfahrensinduzierter Eigenschaften* in den Entwicklungsprozess (siehe Abbildung 76). Die Charakterisierung von Fertigungsverfahren erfolgt über ihre fertigungsverfahrensinduzierten Eigenschaften. Die formalisierte Klärung der Aufgabenstellung bildet die Grundlage für die Integration mathematischer Optimierungsverfahren und der verfahrensinduzierten Eigenschaften.⁹⁴⁵

Die Verwendung mathematischer Optimierungsverfahren reduziert bereits in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses die auftretende Komplexität des Lösungsfindungsprozesses und ermöglicht die Erzielung verbesserter konstruktiver Lösungen.⁹⁴⁶ Die erzielbaren Produkteigenschaften werden verbessert.⁹⁴⁷ Darüber hinaus stellt die algorithmenbasierte Lösungsgenerierung die bestmögliche Erfüllung von Anforderungen sicher.⁹⁴⁸ Mathematische Optimierungsverfahren dienen der gleichwertigen Generierung *mathematisch optimaler Produkt- und Prozesslösungen* innerhalb des von hoher Komplexität geprägten Entwicklungsprozesses.⁹⁴⁹

Zur *Effizienzsteigerung* der mathematischen Optimierungsverfahren werden nur konzeptrelevante, unabhängige Eigenschaften als Optimierungsvariablen verwendet, um die abhängigen Eigenschaften im mathematischen Zusammenhang bestmöglich zu erzielen.⁹⁵⁰ Da sich nicht alle Eigenschaftsrelationen mathematisiert eindeutig beschreiben lassen, können die Zusammenhänge auch erfahrungsbasiert und interpoliert referenziert werden.⁹⁵¹ Die Integration mathematischer Optimierungsverfahren ermöglicht die gezielte Suche nach den optimierungsrelevanten Parametern, um, basierend auf den komplexen Eigenschaftsrelationen, abhängige Eigenschaften hinsichtlich Leichtbaupotenzialen, Robustheit und Zuverlässigkeit bei der Funktionserfüllung bestmöglich zu erzielen.

Im Gegensatz zur konventionellen, heuristischen Lösungssuche wird der Lösungsraum sukzessive durch Nebenbedingungen eingeschränkt.⁹⁵² Der Entwicklungsprozess kann sowohl über einen *Market-Pull*- als auch *Technology-Push-Ansatz* initiiert sein.

⁹⁴⁵ Vgl. Tekkaya et al. (2015), S. 648.

⁹⁴⁶ Vgl. Roy et al. (2008), S. 697.

⁹⁴⁷ Vgl. Monnerjahn et al. (2017), S. 20.

⁹⁴⁸ Vgl. Roy et al. (2008), S. 703.

⁹⁴⁹ Vgl. ebd., S. 697.

⁹⁵⁰ Vgl. Wäldele (2012), S. 57.

⁹⁵¹ Vgl. ebd.

⁹⁵² Vgl. Monnerjahn et al. (2017), S. 20.

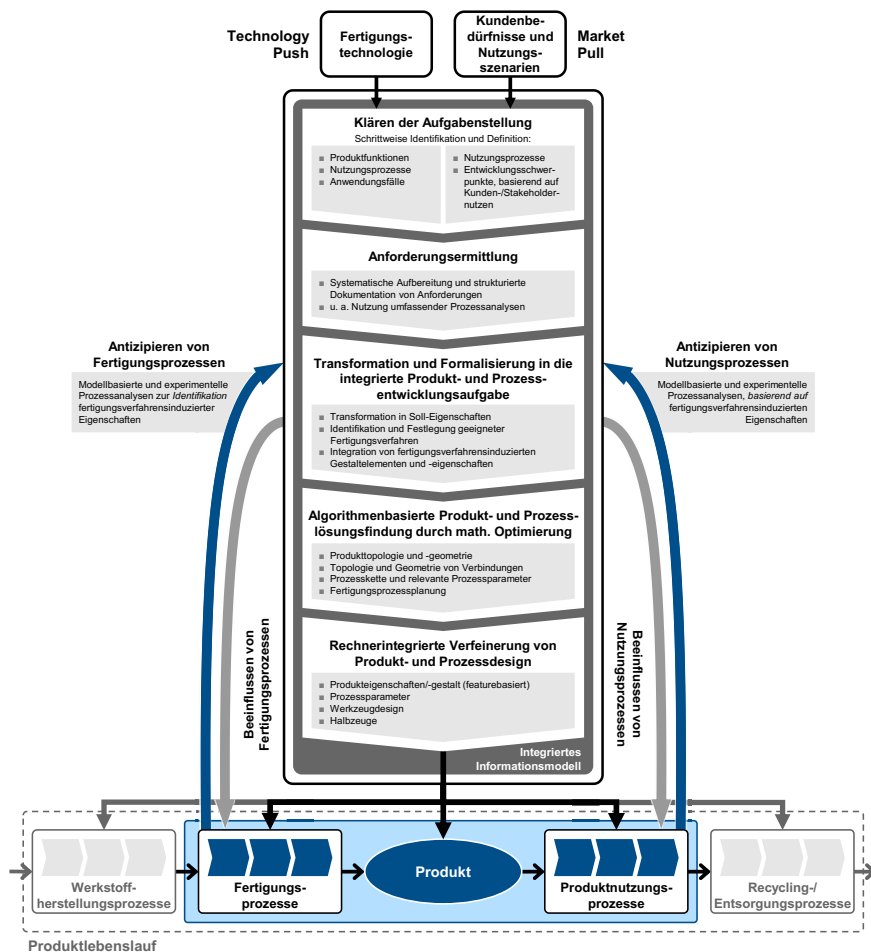


Abbildung 76: Integrierte algorithmenbasierte Produkt- und Prozessentwicklung⁹⁵³

Modellbasierte und experimentelle Prozessanalysen dienen dem Antizipieren von technischen Prozessen, um sowohl Erkenntnisse bzgl. der Fertigungsprozesse als auch über das Produktverhalten in den Nutzungsprozessen zu erlangen.⁹⁵⁴ Zur umfangreichen Ausschöpfung der *fertigungstechnologischen Potenziale*, erfolgt die

⁹⁵³ Eigene Darstellung mit Erweiterung der Werkstoffherstellungs- und Recycling-/Entsorgungsprozesse, in Anlehnung an Roos et al. (2017b), S. 304.

⁹⁵⁴ Vgl. Roos et al. (2017b), S. 303.

Integration von fertigungsverfahrensinduzierten Lösungselementen mit ihren fertigungsverfahrensinduzierten geometrischen und stofflichen Eigenschaften. Produktanforderungen und Anforderungen aus den Fertigungs- und Nutzungsprozessen müssen formalisiert aufbereitet werden, um die Lösungsfindung über mathematische Optimierungsverfahren zu ermöglichen. Hierfür dienen ein standardisiertes Begriffssystem⁹⁵⁵ und der Einsatz standardisierter Anforderungskuster.

Zusätzliche Produkteigenschaften und Prozessparameter aus den antizipativen Prozessanalysen werden über rechnergestützte *CAX-Modelle, -Methoden und -Werkzeuge* im Anschluss an die algorithmenbasierte Lösungsfindung im Rahmen der computerintegrierten Verfeinerung der Produkt- und Prozesslösungen integriert.⁹⁵⁶ Über ein Informationsmodell sind die digitalen Daten innerhalb der integrierten algorithmenbasierten Produkt- und Prozessentwicklung gespeichert und miteinander verknüpft. Dies gewährleistet einen kontinuierlichen und durchgängigen Datenaustausch.

Ziel der integrierten algorithmenbasierten Produkt- und Prozessentwicklung ist es, durch die Strukturierung und Formalisierung der Entwicklungsaufgabe, erfolgversprechende Lösungen mithilfe mathematischer Optimierungsverfahren und neuer CAX-Methoden algorithmisiert zu generieren.⁹⁵⁷ FRANKE zeigte bereits in umfangreichen Arbeiten, dass eine vollständig automatisierte Lösung von Konstruktionsaufgaben nicht umsetzbar ist.⁹⁵⁸ Derzeitige Ansätze beschränken sich auf eine partielle algorithmenbasierte Lösungsgenerierung bei der konstruktionsmethodischen Anwendung.⁹⁵⁹ Als Voraussetzung müssen die konstruktionsrelevanten Eigenschaften⁹⁶⁰ des zu entwickelnden Produkts semantisch geklärt und systematisiert sein,⁹⁶¹ damit eine algorithmenbasierte Entwicklung, unter bestimmten formalisierten Voraussetzungen, realisierbar ist. Dazu muss die *Entwicklungsaufgabe* in eine formalisierte Darstellung transformiert werden. Für die methodische Unterstützung der Anforderungserfassung, -priorisierung und -strukturierung stehen Checklisten, Produktfragelisten, Analyse der Produktumgebung, Hauptmerkmallisten, KANO-Modell, Conjoint-Analyse und Clusteranalyse zur Verfügung.⁹⁶²

⁹⁵⁵ Vgl. Wäldele (2012), S. 56.

⁹⁵⁶ Vgl. Roos et al. (2017b), S. 305.

⁹⁵⁷ Vgl. Chahadi et al. (2007), S. 27.

⁹⁵⁸ Vgl. Franke (1976), S. 1-5.

⁹⁵⁹ Vgl. Chahadi et al. (2007), S. 28.

⁹⁶⁰ Dies wird durch die Trennung in innere und äußere Eigenschaften bzw. abhängige und unabhängige Produkteigenschaften erreicht, vgl. ebd., S. 27.

⁹⁶¹ Dies bedingt die Formalisierung der Entwicklungsaufgabe als Voraussetzung für eine Algorithmisierbarkeit im Entwicklungsprozess.

⁹⁶² Vgl. ebd., S. 28.

Die Anforderungspriorisierung wirkt sich auf die Formulierung des *Optimierungsproblems* aus. Das Optimierungsproblem besteht aus der Zielfunktion $\varphi(\vec{p})$ in (14) mit den Optimierungsvariablen \vec{p} und Beschränkungen an \vec{p} in (15) und (16) zur Suche der optimalen Lösung $\varphi(\vec{p}^*)$.

$$\min \varphi(\vec{p}) \quad (14)$$

$$\text{s.t. } g(\vec{p}) = 0 \quad (15)$$

$$h(\vec{p}) \geq 0 \quad (16)$$

Die Zielfunktion resultiert aus Zielforderungen. Fest- und Bereichsforderungen führen aufgrund ihres restringierenden und zwingend einzuhaltenden Charakters zu Nebenbedingungen. Die Optimierungsvariablen stellen die unabhängigen Produkteigenschaften dar, die vom Konstrukteur direkt festgelegt werden können.

Der Konstrukteur legt die konstruktiven Parameter aus der Menge von unabhängigen Produkteigenschaften direkt fest. Dies führt zu einer deutlichen Reduktion von Freiheitsgraden im Optimierungsproblem.⁹⁶³ Die Verwendung von diskreten und von nichtlinearen mathematischen Optimierungsverfahren liefert die optimale Produkt- und Prozesslösung für das entwickelte Produkt.

Zur *Komplexitätsreduktion* der entstehenden Produktvarianten erfolgt die mathematisch algorithmenbasierte Lösungsgenerierung zuerst auf Basis aussichtsreicher, diskret optimierter Topologien und der anschließenden nichtlinearen Optimierung der Feingeometrie.⁹⁶⁴ Verfrühte Lösungsfixierungen der Produktentwicklung werden aufgehoben.

Durch den Optimalitätsgedanken resultieren neue und anwendungsspezifisch optimierte Produkte für den zugrundeliegenden Lastfall. Neben der Produktgestalt werden im Konzeptprozess ebenfalls Eigenschaften des Produkts festgelegt, die in Bezug zu den Prozessen des Produktlebenslaufs stehen oder diese beeinflussen. Quellen für die relationalen Beziehungen zwischen Eigenschaften können bekanntes Wissen, Erfahrungen des Konstrukteurs, Konstruktions- und Gestaltungsregeln, Formeln, Diagramme, Tabellen und physikalische Modelle sein.⁹⁶⁵

⁹⁶³ Vgl. Roy et al. (2008), S. 698.

⁹⁶⁴ Vgl. Chahadi et al. (2007), S. 28.

⁹⁶⁵ Vgl. ebd., S. 34; ebenso Wäldele (2012), S. 73.

2.10.6 Zwischenfazit

Viele Entwicklungsvorgehen beschreiben den Entwicklungsprozess als *schrittweise Suche* nach Lösungen und Lösungselementen auf unterschiedlichen Konkretisierungsebenen. Die Lösungskonkretisierung kann somit als *schrittweises Festlegen von Eigenschaften* beschrieben werden.

Die unterschiedlichen Entwicklungsansätze betonen die zentrale Stellung von *Anforderungen* als wesentliche Grundlage eines jeden Produkt- und Prozessentwicklungsprozesses. Diese dienen der Festlegung von konzeptbestimmenden Eigenschaften, aus denen sich eine Vielzahl neuer Anforderungen ergeben. Die Entwicklungsmodelle berücksichtigen die *Fertigung* erst sehr spät im Entwicklungsprozess.⁹⁶⁶ Die Auswahl eines Fertigungsverfahrens bedingt zu berücksichtigende fertigungsspezifische Restriktionen.⁹⁶⁷

Die konstruktionsmethodischen Vorgehensmodelle beinhalten, entsprechend ihrem angedachten Verwendungszweck, unterschiedliche Inhalte und abstrahierte Darstellungsformen. Viele Vorgehensmodelle implizieren durch ihre Darstellungsform ein *sequenzielles Vorgehen*. Dieses wird weder der flexibilisierten Abfolge von Arbeitsschritten noch den situationsbedingten Iterationsschleifen gerecht. *Netzwerkartige Darstellungen* betonen den hohen Vernetzungsgrad bei komplexen Entwicklungsprozessen und verdeutlichen die Ganzheitlichkeit im Entwicklungsprozess.

Das *algorithmenbasierte Entwicklungsmodell* des SFB 666 bietet einen umfassenden Ansatz, über computergestützte Methoden und mathematische Unterstützung optimale Produkt- und Prozesslösungen zu entwickeln. Die konventionelle Lösungssuche wird durch die algorithmenbasierte Lösungssuche innerhalb eines offenen Lösungsraums abgelöst, der schrittweise zu restringieren ist.⁹⁶⁸ Die Integration von mathematischen Optimierungsverfahren in den Entwicklungsprozess führt zu einem tieferen Verständnis der Entwicklungsaufgabe.⁹⁶⁹ Die optimale Lösungsgenerierung für die Produktgestalt erfolgt somit im komplexen Beziehungsgeflecht zwischen Produkt- und Prozessanforderungen im Vergleich zu iterativen Suchprozessen effizienter.⁹⁷⁰

⁹⁶⁶ Vgl. Mattmann et al. (2016b), S. 34.

⁹⁶⁷ Vgl. ebd.

⁹⁶⁸ Vgl. Chahadi et al. (2007), S. 28.

⁹⁶⁹ Vgl. Monnerjahn et al. (2017), S. 21.

⁹⁷⁰ Vgl. ebd., S. 27.

Modellintegrierte Produkt- und Prozessentwicklung

Mattmann, I.

2017, XXXII, 376 S. 154 Abb., 40 Abb. in Farbe.,

Hardcover

ISBN: 978-3-658-19408-6