

Methodisches Konstruieren

Prof. Dr.-Ing. Martin Bothen

Technische Hochschule Aschaffenburg
University of Applied Sciences

Einleitung und Lernziele

Das vorliegende Studienheft versteht sich als eine Einführung in die Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte nach der VDI-Richtlinie 2221. Es werden die vier Phasen des Konstruktionsprozesses vorgestellt und erläutert. Die Inhalte sind so gestaltet, dass das Skript mit den Vorkenntnissen aus den bisherigen Modulen bearbeitet werden kann.

In den Präsenzphasen werden Konstruktionsbeispiele aus dem Bereich Mechanik mit den Studierenden besprochen, um die Methodik nach der VDI-Richtlinie 2221 „*Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*“ zu vertiefen und die Zusammenhänge der interdisziplinären Ingenieurspraxis kennenzulernen. Darüber hinaus erlernen die Studierenden Fertigkeiten für die Bearbeitung von Aufgaben in der Forschung und Entwicklung, indem die Studierenden aufgefordert werden Konstruktionslösungen kritisch zu hinterfragen und alternative Lösungsansätze zu finden, die sie dann auch in einer Präsentation vorstellen.

Kompetenzen, die in diesem Modul von den Studierenden erworben werden:

Die Studierenden sind in der Lage, mit den erworbenen Kenntnissen und Fähigkeiten eine gestellte Konstruktionsaufgabe selbstständig und im Team unter Berücksichtigung der Methodik nach VDI-Richtlinie 2221 „*Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*“ zu lösen und verstehen technische und soziale Folgen dieser Lösung abschätzen zu können.

Die Studierenden verstehen die Zusammenhänge der interdisziplinären Ingenieurspraxis und können Konstruktionsaufgaben aus dem Bereich des Maschinenbaus bearbeiten. Darüber hinaus erlernen die Studierenden Fertigkeiten für die Bearbeitung von Aufgaben in der Forschung und Entwicklung, indem aktuelle Konstruktionsbeispiele aus der Praxis ausführlich diskutiert und die Studierenden aufgefordert werden, sich mit diesen Konstruktionsaufgaben auseinanderzusetzen.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung und Lernziele	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
1 Einführung in die Konstruktionsmethodik	1
2 Konstruktionsprozess nach VDI 2221	7
2.1 Phase I: Planen	7
2.2 Phase II: Konzipieren.....	13
2.2.1 Abstrahieren zum Erkennen der wesentlichen Probleme	14
2.2.2 Aufstellen von Funktionsstrukturen.....	15
2.2.3 Suchen von Wirkprinzipien zum Erfüllen der Teilfunktionen	17
2.2.4 Kombinieren der Wirkprinzipien zur Wirkstruktur	23
2.2.5 Auswählen geeigneter Kombinationen	24
2.2.6 Konkretisieren zu prinzipiellen Lösungen.....	24
2.2.7 Bewerten nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien und Festlegen der prinzipiellen Lösungen	24
2.3 Phase III: Entwerfen	28
2.4 Phase IV: Ausarbeiten.....	37
3 Gestaltungsrichtlinien	39
3.1 Ausdehnungsgerecht.....	42
3.2 Kriech- und relaxationsgerecht.....	42
3.3 Korrosionsgerecht.....	42
3.4 Ergonomiegerecht.....	43
3.5 Formgebungsgerecht	43
3.6 Fertigungsgerecht	44
3.7 Montagegerecht	44
3.8 Normgerecht	46

3.9 Recyclinggerecht.....	46
4 Qualitätssicherung beim Entwerfen	49
5 Literaturverzeichnis	54
5.1 Quellenverzeichnis.....	54
5.2 Literatur zur Vertiefung	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lebenszyklus eines Produktes.....	1
Abbildung 2:	Ablauf des Lösungsprozesses.....	2
Abbildung 3:	Kostenbeeinflussung und Kostenbeurteilung während des Konstruktionsprozesses	4
Abbildung 4:	Historie der Entwicklungs- und Konstruktionsmittel.....	5
Abbildung 5:	Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren	7
Abbildung 6:	Vorphasen zur Phase Planen mit dem Ergebnis der Anforderungsliste	8
Abbildung 7:	Auszug aus einer Anforderungsliste für einen Tafelwischautomaten	9
Abbildung 8:	Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren	13
Abbildung 9:	Gesamtfunktion mit den Ein- und Ausgangsgrößen Energie, Stoff und Signal.....	15
Abbildung 10:	Gesamtfunktion „Drehmoment vergrößern“ mit den Ein- und Ausgangsgrößen Drehmoment und Drehzahl	16
Abbildung 11:	Gesamtfunktion „Drehmoment in Axialkraft wandeln“ mit den Ein- und Ausgangsgrößen Drehmoment und Drehzahl... ..	16
Abbildung 12:	Gesamtfunktion „Werkstück zerspanen“ mit den Eingangsgrößen Energie, Rohteil, Werkzeug, Kühlmittel und NC-Programm. Die Ausgangsgrößen sind u.a. das bearbeitete Werkstück, Späne und Wärme	16
Abbildung 13:	Aufgliedern der Gesamtfunktion in Teilfunktionen und Verknüpfung der Teilfunktionen zu einer Funktionsstruktur	17
Abbildung 14:	Ablaufphasen bei Brainstorming und Brainwriting	20
Abbildung 15:	Methode des Vorwärtsschreitens am Beispiel einer Welle-Nabe-Verbindung zur Übertragung von Drehmomenten.....	21
Abbildung 16:	Möglichkeiten zum Beschichten von Teppichbahnen durch die Kombination von Bewegungen der Teppichbahn und der Auftragsvorrichtung	23
Abbildung 17:	Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren	28
Abbildung 18:	Doppelpassung bei einer Welle-Nabe-Verbindung mit Kegelsitz und aufgepresster Nabe (links) und verbesserte Lösung mit einer kraftschlüssigen Verbindung (rechts)	31

Abbildung 19: Kostengliederung für ein Erzeugnis	32
Abbildung 20: Kostenfaktor in Abhängigkeit von der Fertigungstoleranz und dem Fertigungsverfahren	32
Abbildung 21: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren	37
Abbildung 22: Recyclingmöglichkeiten	47
Abbildung 23: Qualitätsmanagement während des Produktlebenszyklusses	50
Abbildung 24: Einfluss auf die Qualität und auf die Kosten der Fehlerbehebung während des Konstruktionsprozesses	50
Abbildung 25: Qualitätssicherung beim Entwerfen.....	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich von Lastenheft, Pflichtenheft und Anforderungsliste...	10
Tabelle 2: Hauptmerkmale für die Erstellung der Anforderungsliste	11
Tabelle 3: Ein- und Ausgangsgrößen für eine Funktion	15
Tabelle 4: Morphologischer Kasten mit Wirkprinzipien zur Erfüllung der Funktion „Energie speichern“	22
Tabelle 5: Festlegung der Gewichtungsfaktoren für die Bewertung eines Sensors.....	25
Tabelle 6: Werteskala nach VDI-Richtlinie 2225	26
Tabelle 7: Beispiel für die Bewertung von Wirkprinzipien für die Funktion „Bremsmoment ermitteln“	26
Tabelle 8: Relativkosten einiger Werkstoffe für Rundmaterial	33
Tabelle 9: Drei-Stufen-Methode für die Sicherheit nach DIN 31 000	34
Tabelle 10: Häufig verwendete Konstruktionswerkstoffe.....	39
Tabelle 11: Stoffeigenschaften von Werkstoffen	40
Tabelle 12: Gestaltungsrichtlinien.....	41
Tabelle 13: Bewertungszahlen für FMEA.....	52

1 Einführung in die Konstruktionsmethodik

In diesem Kapitel erfahren Sie, welche Aufgaben vom Konstruktionsingenieur bzw. von der Konstruktionsingenieurin zu bewältigen sind und lernen die Grundlagen zum methodischen Konstruieren.

Ingenieure sind Problemlöser! Dieses gilt für den Konstrukteur im Besonderen. In der Regel soll mit dem zu entwickelnden Produkt ein neuer Markt erschlossen werden bzw. eine Aufgabe gelöst werden, für die es bisher noch keine Lösung gibt.

Die Aufgabe des Ingenieurs besteht somit darin, das Problem zu erkennen und umfassend mit den an die Lösung des Problems geknüpften Anforderungen zu beschreiben. Der Erfolg der Entwicklungsarbeit ist sehr von der Klarheit der Aufgabenformulierung abhängig, erkennbar ist der Erfolg jedoch leider meist erst viel später durch die Höhe des Umsatzes und des Gewinns. **Abbildung 1** zeigt die Umsatz- und Gewinnrate im zeitlichen Verlauf des Produktlebenszyklus, bestehend aus den Phasen Entwicklung, Einführung, Wachstum, Reife, Sättigung und Rückgang.

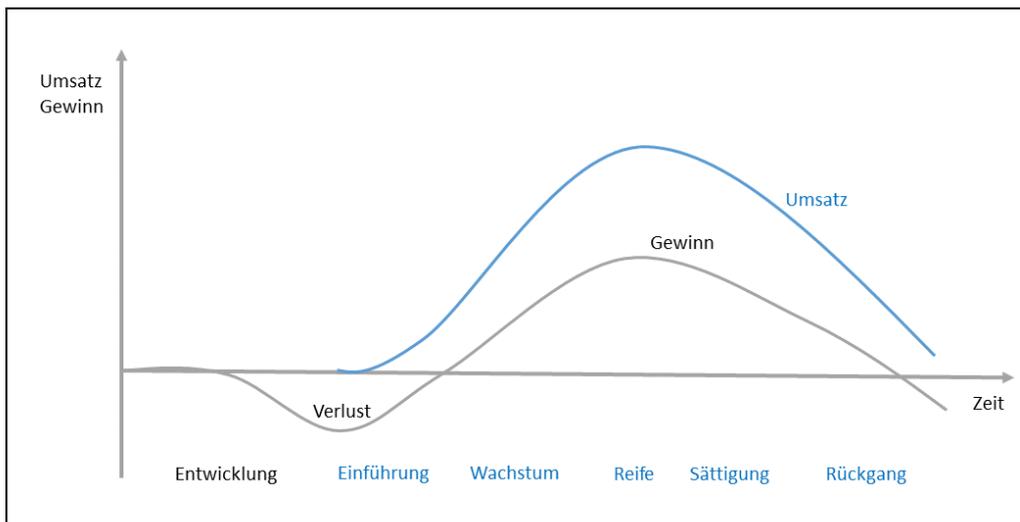


Abbildung 1: Lebenszyklus eines Produktes

Der Konstruktionsingenieur hat darüber hinaus das Produkt auch nicht vor Augen oder kann es anfassen. Die neue Idee entsteht, indem er das „leere Blatt Papier“ mit Linien füllt, die das technische Produkt in seinen Abmessungen beschreibt. Ein Großteil der Arbeitszeit besteht darin, sich Informationen zu beschaffen und diese zu verwerten. Darüber hinaus sind die Herstellungs- und

Montageverfahren, der Transport, der Gebrauch, die Umweltbeziehungen und die Kosten festzulegen. Ziel des Gestaltens ist es, eine technisch optimale und wirtschaftlich zu vertretende Lösung für die Aufgabenstellung zu erarbeiten. **Abbildung 2** zeigt die einzelnen Schritte von der Aufgabe bis zur Lösung.

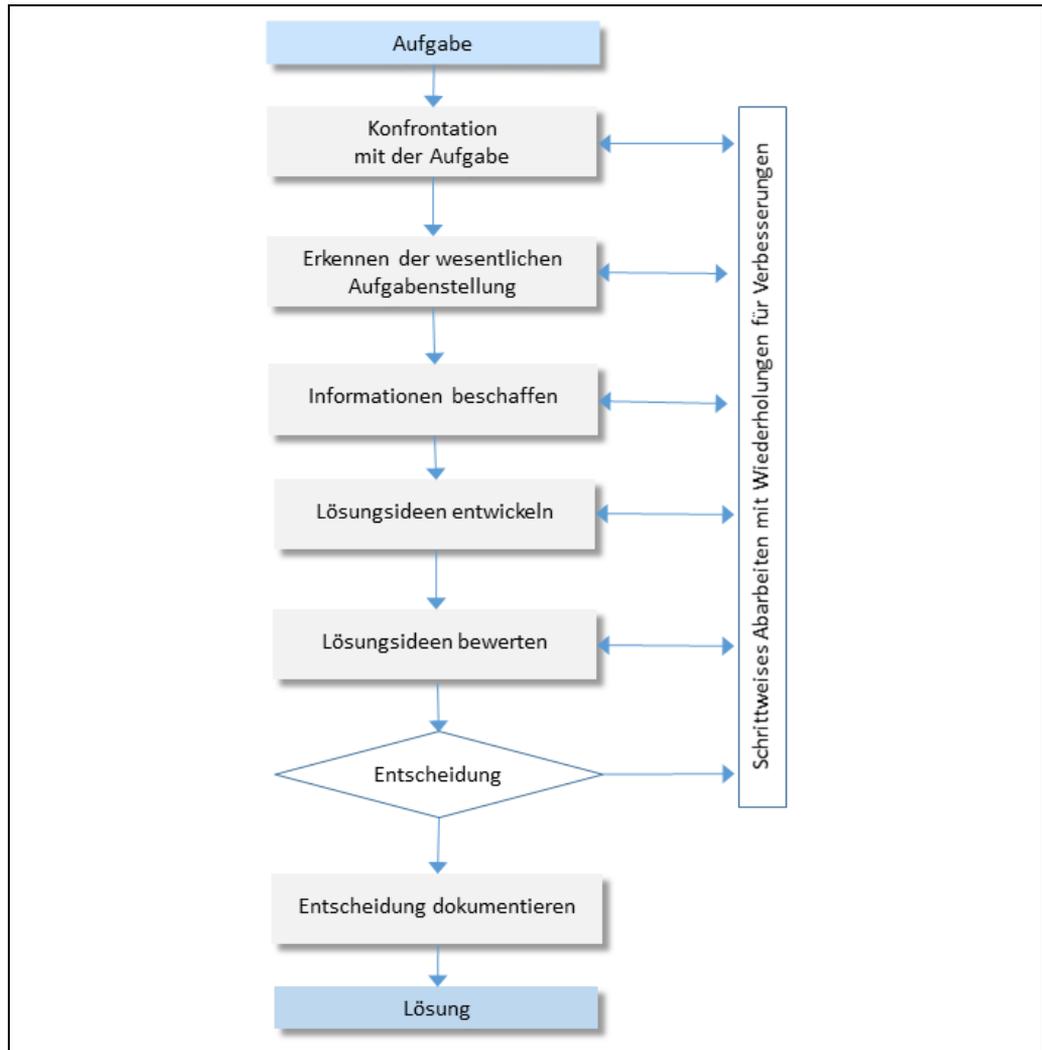


Abbildung 2: Ablauf des Lösungsprozesses (nach Conrad 2013)

Die Erarbeitung der Lösung kann durch ein intuitives oder iteratives Vorgehen erlangt werden, wenn hierfür ein umfassendes Wissen auf vielen technischen Gebieten und viel Erfahrung vorhanden ist. Angehende Konstrukteure können dieses Wissen jedoch noch nicht vorweisen, weshalb sie es beim Berufseinstieg schwer haben, sich gegen die erfahrenen Konstrukteure durchzusetzen. Ein weiterer Nachteil des intuitiven oder iterativen Vorgehens ist es, dass die „gute Idee“ selten zum gewünschten Zeitpunkt kommt und sehr von den persönlichen Erfahrungen und Kenntnissen des Konstrukteurs abhängt.

Das methodische Konstruieren ermöglicht es auch weniger erfahrenen Ingenieuren, sich gute Lösungen zu erarbeiten. Die systematische Vorgehensweise ist geeignet, eine komplexe Aufgabenstellung zu lösen, indem man die Aufgabe in kleinere Aufgabenpakete unterteilt und in zeitlich nacheinander ablaufenden Arbeitsschritten löst.

Arbeitsschritte, um eine komplexe Aufgabenstellung zu lösen:

- **Planen**: systematische Aufgabenanalyse
- **Konzipieren**: erkennen von Aufgabenpaketen und deren logischen Zusammenhängen
- **Lösungssuche**: erarbeiten von Lösungen
- **Bewerten und Auswählen**: auswählen der unter den aktuellen Rahmenbedingungen besten Variante
- **Vervollständigen bzw. Gestalten**: vervollständigen der ausgewählten Lösungsidee
- **Ausarbeiten**: beschreiben der ausgewählten Lösung



Mit dieser Vorgehensweise lässt sich so gut wie jede Aufgabenstellung lösen, sei es die Entwicklung einer technischen Lösung, die Bearbeitung der eigenen Abschlussarbeit oder die Berufswahl. Durch die bewusste Gliederung der Aufgabe in Arbeitspakete wird das Aufsuchen von Lösungen erleichtert.

Darüber hinaus erleichtert das planmäßig-schrittweise Vorgehen die Dokumentation des Ergebnisses und dessen Entstehung. Sollten sich im Nachgang an den Randbedingungen etwas ändern, so kann schnell nachvollzogen werden, welche Auswirkungen dieses für das Ergebnis hat. Auch für die Fehlersuche ist eine Dokumentation sehr wichtig.

Konstruieren ist somit eine kreative Tätigkeit unter Anwendung von Intuition, Methodik, fachlichem Grundlagenwissen, Rechnereinsatz und Erfahrung. Somit ist es von Vorteil für den Konstrukteur, wenn eine gewisse Portion Kreativität, räumliche Vorstellungskraft, beharrliche Lösungssuche, Zielstrebigkeit, systematische Arbeitsweise und natürlich Technikinteresse vorhanden ist.

Wichtig für die Bearbeitung der Aufgabenstellung ist es, dass auch mehrere alternative Lösungen erarbeitet werden, um sicherzustellen, dass die ausgewählte Lösung für die gestellte Aufgabe die optimale Lösung ist. Ein weiteres Ziel ist es, soweit wie möglich Fehler zu vermeiden. Besonders bei Produkten, welche für den Gebrauch oder für die Sicherheit von Menschen entwickelt

werden, ist eine systematische Produktentwicklung von großer Bedeutung.



Die Konstruktionsmethodik nach VDI-Richtlinie 2221 „*Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*“ dient dazu, für eine gestellte Konstruktionsaufgabe unter den gegebenen Randbedingungen mit möglichst geringem Kosten- und Zeitaufwand die zum aktuellen Zeitpunkt bestmögliche Lösung zu finden. Dieses erfolgt in den vier Phasen: Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten.

In der Phase Planen wird die Anforderungsliste erarbeitet. In der Konzeptphase werden für die Anforderungen Lösungsprinzipien gesucht, Konzepte erarbeitet und bewertet sowie das bestgeeignete Lösungskonzept ausgewählt. Beim Entwerfen wird die Gestalt festgelegt, indem die maßstäblichen Entwürfe erstellt werden. Meist erfolgt dieses durch ein iteratives Vorgehen bzw. Optimieren und Verbessern und Festlegen des endgültigen Entwurfs. In der Ausarbeitungsphase erfolgen die Erstellung der Detailzeichnungen sowie der Stückliste.

Die Höhe der Kosten wird bereits in einer frühen Phase der Entwicklung durch die Wahl der Materialien und der Herstellungsverfahren festgelegt, siehe **Abbildung 3**.

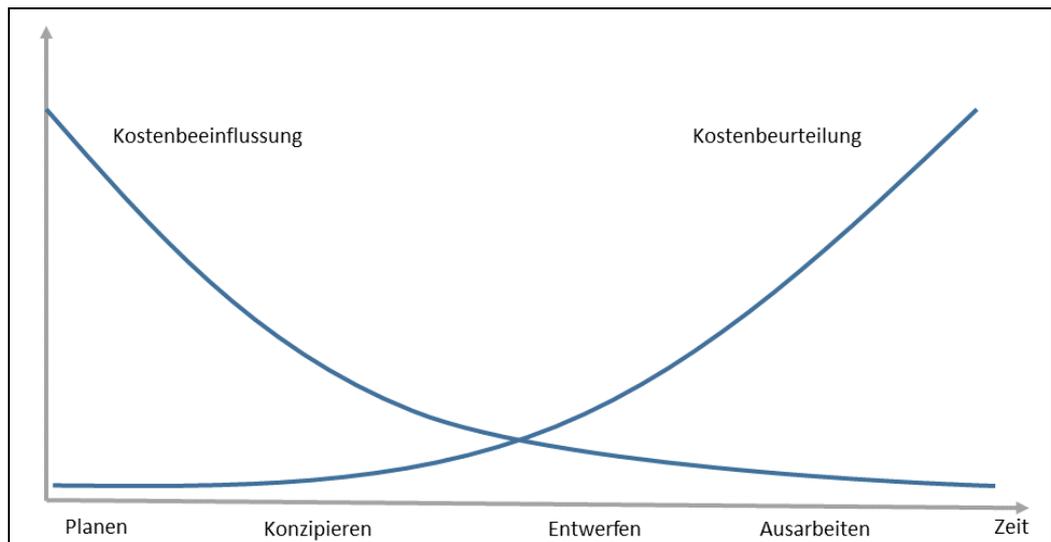


Abbildung 3: *Kostenbeeinflussung und Kostenbeurteilung während des Konstruktionsprozesses*

Neben Kreativität und Intuition werden auch technisches Verständnis sowie Erfahrung benötigt, um die eruierten Lösungen richtig bewerten zu können und von der Vielzahl von möglichen Lösungen die für die gestellte Aufgabe optimale auszuwählen. Um die optimale Lösung in der vorgegebenen Zeit und mit vertretbarem Aufwand zu finden, müssen die jeweils geeigneten Arbeitsmethoden und Berechnungen angewendet werden. Diese Arbeitsmethoden haben sich über die Jahre immer weiterentwickelt, wie der **Abbildung 4** zu entnehmen ist

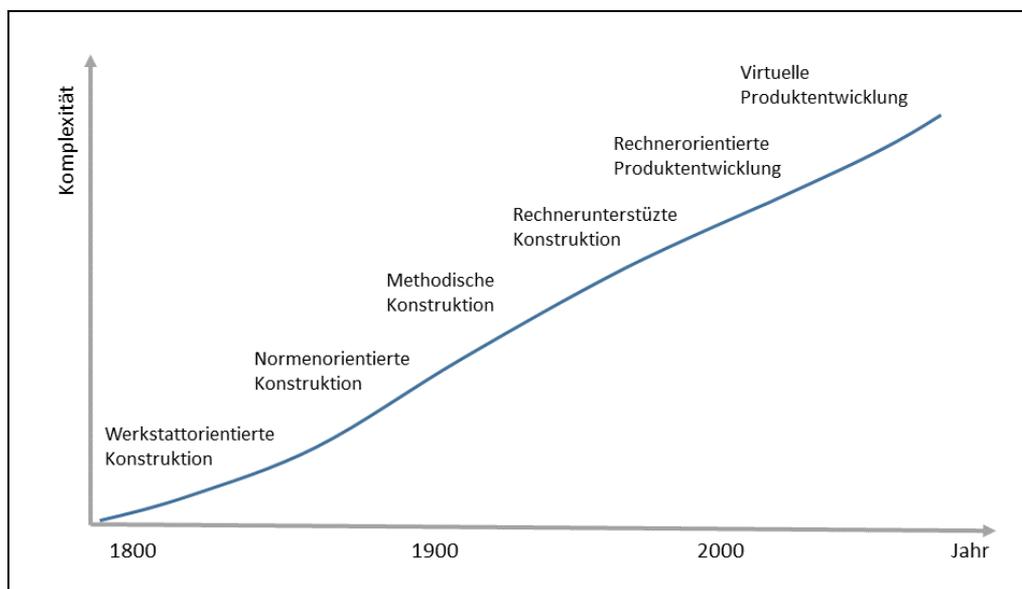


Abbildung 4: Historie der Entwicklungs- und Konstruktionsmittel (nach Feldhusen 2013)

Der Konstruktionsprozess nach VDI 2221 beschreibt einen Prozess, welcher mit einem „leeren Blatt Papier“ beginnt. Dieses ist in der Praxis jedoch nur selten der Fall. Ungefähr 80% der Konstruktionen sind Anpassungs- oder Variantenkonstruktionen. Impulse für die Anpassungs- und Variantenkonstruktionen können bedingt sein durch das Angebot der Mitbewerber, Qualitätsverbesserungen am eigenen Produkt, Kostenreduzierung, ausgelaufene Patente oder eine Verkürzung der Produktionszeiten.

Eine **Anpassungskonstruktion** wird vorgenommen, wenn vorhandene Bauteile an geänderte Anforderungen angepasst werden müssen. Sie setzt an die Ergebnisse der Konzeptphase an, nimmt Anpassungen vor und setzt diese in der Entwurfsphase um. Die ausgewählten und bewerteten Lösungsprinzipien werden somit beibehalten und die Gestaltung den veränderten Randbedingungen angepasst.

Die **Variantenkonstruktion** wird angewendet, wenn für vorhandene Bauteile einige Anforderungen abgeändert werden, die Hauptfunktionen aber unverändert bleiben. Varianten werden ohne Änderung der prinzipiellen Lösung durch geänderte Kombination oder Ergänzung neuer Bauelemente erzeugt. Die Variantenkonstruktion beginnt in der 3. Phase des Konstruktionsprozesses, dem Entwerfen.



Fragen zur Selbstkontrolle

1. Was versteht man unter einer Konstruktionsmethodik?
2. Welche Fähigkeiten sollte die Konstruktionsingenieurin bzw. der Konstruktionsingenieur mitbringen?
3. Wie lauten die Phasen der Konstruktionsmethodik nach VDI-Richtlinie 2221 „*Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*“?
4. Wann werden die Kosten eines Produktes festgelegt?
5. Was ist der Unterschied zwischen einer Anpassungskonstruktion und einer Variantenkonstruktion?



Übungsaufgaben

1. Recherchieren Sie die Möglichkeiten, mit welchen Geräten Informationen digital erfasst werden können. Orientieren Sie sich an die unterschiedlichen Eingabegeräte für einen PC.
2. Erarbeiten Sie eine Übersicht der verschiedenen Fahrradtypen auf dem Markt und überlegen, von wem welcher Fahrradtyp gekauft wird.
3. Wenn die Konstruktion eines Trekkingfahrrades aus einem City-Fahrrad abgeleitet wird, handelt es sich dann um eine Anpassungs- oder um eine Variantenkonstruktion?

2 Konstruktionsprozess nach VDI 2221

In diesem Kapitel lernen Sie den Konstruktionsprozess nach VDI-Richtlinie 2221 „*Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*“ kennen mit den vier Phasen **Planen**, **Konzipieren**, **Entwerfen** und **Ausarbeiten**.

2.1 Phase I: Planen

Zu Beginn des Produktentwicklungsprozesses, in der Phase Planen, werden die Aufgabenstellung geklärt und die Informationen beschafft, um die Anforderungsliste aufzustellen, siehe **Abbildung 5**.

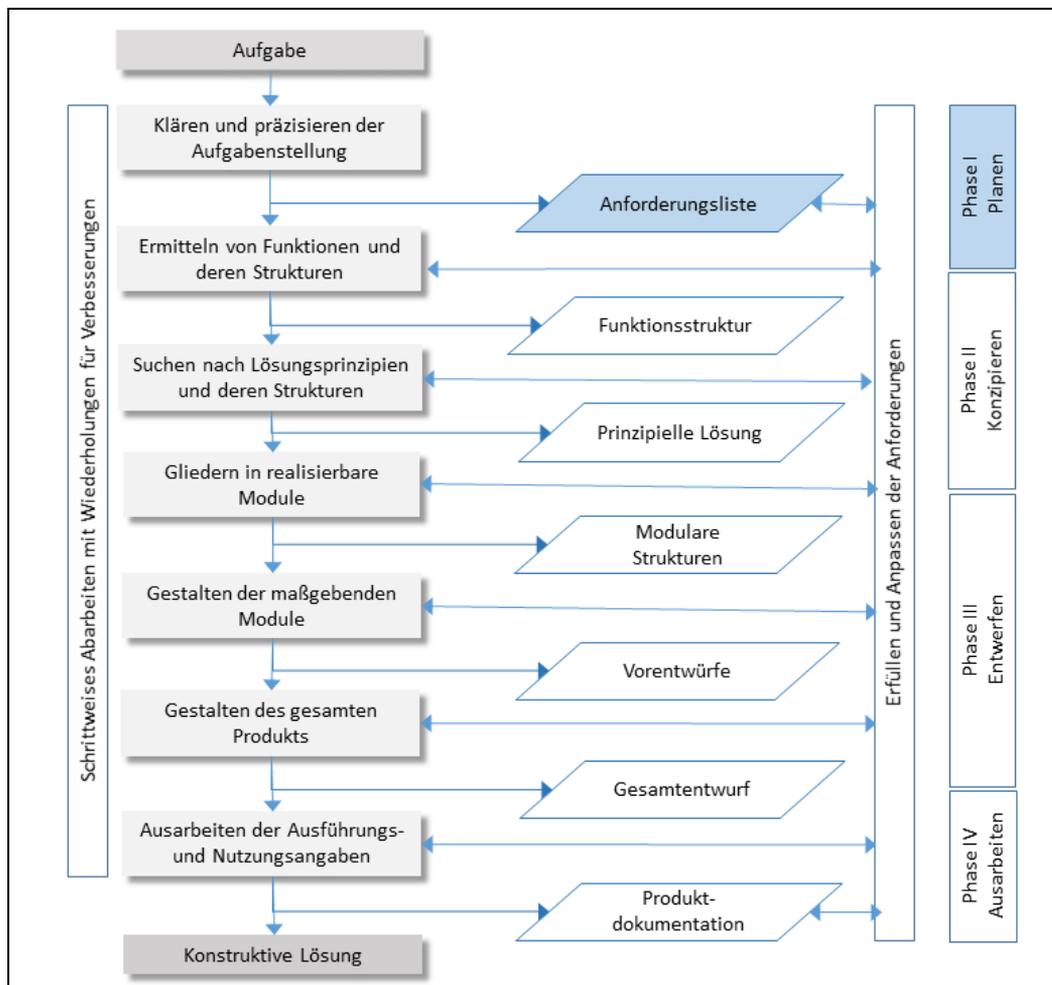


Abbildung 5: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (nach VDI 2221)

Die Aufgabe kann, bezogen auf die Abteilungen eines Unternehmens, sowohl von der Produktplanung als auch von der Entwicklungsabteilung oder vom Vertrieb kommen. Bei der Aufgabenstellung vom Vertrieb wird unterschieden zwischen einem spezifischen Kunden, mit dem man direkt die Aufgabenstellung besprechen kann, und einem anonymen Kundenkreis.

Die Anforderungsliste besteht aus Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt. Eine Anforderung ist eine „Vorgabe, deren Erfüllung den zielgerichteten Verlauf des jeweiligen Konstruktionsprozesses steuert und/oder Eigenschaften des betreffenden Produktes bestimmt“ (Feldhusen 2013, Seite 322). Die Anforderungen müssen verständlich und eindeutig formuliert werden, so dass bei der späteren Qualitätsprüfung keine Missverständnisse entstehen.

Die Aufgabe des Vertriebs ist es, in der Angebotsphase zusammen mit dem Kunden das sogenannte Lastenheft zu erstellen, siehe **Abbildung 6**. Dieses Dokument enthält die Anforderungen des Kunden an das Produkt. In der Praxis kann es auch möglich sein, dass der Auftragnehmer im Auftrag des Kunden das Lastenheft erstellt. Nachdem das Lastenheft erarbeitet wurde, befindet man sich in der Klärungsphase.

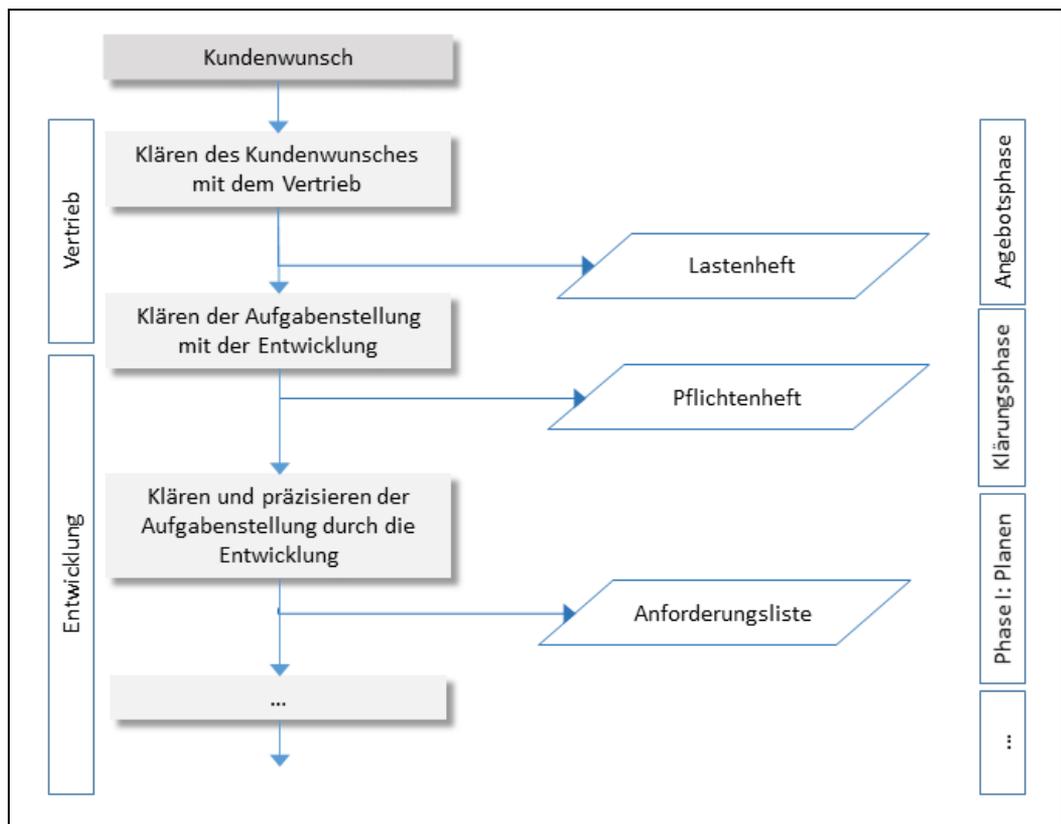


Abbildung 6: Vorphasen zur Phase Planen mit dem Ergebnis der Anforderungsliste (nach Feldhusen 2013)

In der Klärungsphase wird das Lastenheft von der Entwicklungsabteilung dazu verwendet, das Pflichtenheft zu erstellen. In dieser Phase ist es für die weitere Vorgehensweise wichtig, dass vom Kunden alle Anforderungen an das Produkt abgefragt werden, um spätere Änderungswünsche soweit wie möglich zu vermeiden. Ebenso wichtig ist es zu prüfen, ob die Anforderungen technisch und zu akzeptablen Kosten umgesetzt werden können. Die Ergebnisse werden im Pflichtenheft dokumentiert und mit dem Kunden abgeklärt bevor es in die Präzisionsphase geht.

Das Ziel der Präzisionsphase ist die Anforderungsliste, siehe **Abbildung 7**.

Anforderungen	Forderung/ Wunsch	Merkmal	Beschreibung
Abmessung Reinigungsmaterial	F	1000 mm Höhe	Gesamte Tafelhöhe muss durch das Reinigungsmaterial abgedeckt werden
Gewicht	F	m ≤ 10 kg	Gesamtmasse des Konstrukts
Sicherheit	F	Eingriffsschutz IP 34	
Zustand Tafel	F	Vergleichsmaterial [1,2]	Im Anhang befindet sich Vergleichsmaterial
Abführung Schmutzwasser	F		Das Schmutzwasser muss nach der Reinigung abgeführt werden
Kosten	F	Gesamtbudget 500 € Budget Reinigung ca. 100€	
Instandhaltung	F	wartungsarm	
Spritzschutz	W		Optional Erweiterung durch Spritzschutz

Abbildung 7: Auszug aus einer Anforderungsliste für einen Tafelwischautomaten

Bei den Anforderungen wird zwischen **Forderungen** und **Wünschen** unterschieden. Forderungen müssen erfüllt werden, Wünsche sollten möglichst erfüllt werden, da sie die Kundenzufriedenheit fördern. In der Praxis wird jedoch meist aufgrund von Kosten- und Zeitdruck auf die Erfüllung der Wünsche verzichtet. Es ist somit von Vorteil, wenn gleich zu Beginn des Projektes geklärt wird, welche Anforderungen erfüllt werden müssen und wenn nur diese in die Dokumentation aufgenommen werden.



Die Hauptaufgabe der Entwickler ist es, lösungs- und gestaltbeeinflussende Produkthanforderungen für das Produkt zu erkennen. Soweit möglich, sollte die Anforderungsliste nur quantitative Angaben beinhalten. Die Anforderungsliste ist somit die Kombination aller Anforderungen aus Lasten- und Pflichtenheft. In der Praxis ist es allerdings meist nicht möglich, bereits zu Beginn des Ent-

wicklungsprozesses alle Anforderungen zu erfassen. Aus diesem Grund wird die Anforderungsliste während der Entwicklung immer wieder aktualisiert, um Mängel am Produkt zu vermeiden.

Die **Tabelle 1** zeigt die Gegenüberstellung von Lastenheft, Pflichtenheft und Anforderungsliste.

Tabelle 1: Vergleich von Lastenheft, Pflichtenheft und Anforderungsliste

	Lastenheft	Pflichtenheft	Anforderungsliste
<i>wann</i>	Angebotsphase	Klärungsphase	Präzisionsphase (Phase I: Planen)
<i>wofür</i>	Dokumentation des Kundenwunsches <i>was und wofür</i>	Beschreibung der Realisierung der Anforderungen <i>wie und womit</i>	Zusammenstellung aller Informationen für die Entwicklung <i>Dokumentation der Eigenschaften</i>

Die Anforderungsliste lässt sich sehr gut mit Hilfe von Hauptmerkmalen nach **Tabelle 2** erstellen. Die Hauptmerkmale dienen dazu, dass man keine wichtigen Punkte bei der Erstellung der Anforderungsliste übersieht. Die mit dem Kunden abgestimmten Anforderungen sollten möglichst quantifiziert werden. Qualitative Aussagen wie „kostengünstig“, „geräuscharm“, „umweltfreundlich“, „leicht bedienbar“ sollten vermieden werden, da sie nur schwer überprüfbar sind.

Tabelle 2: Hauptmerkmale für die Erstellung der Anforderungsliste

Hauptmerkmal	Erläuterung	Hinweise
Funktion	Gesamtfunktion, Teilfunktion	Aufgabe erfassen, lösungsneutrale Kurzfassung
Geometrie	Abmessungen, Raumbedarf, Anschlüsse, Erweiterung	Breite, Höhe, Länge, Durchmesser, Ausdehnung
Kinematik	Bewegungsart und -richtung, Geschwindigkeitsprofil	Art der Gleichförmigkeit: linear oder rotatorisch
Kräfte	Gewicht, Kraftwirkung, Steifigkeit, Resonanzen	Größe, Richtung, Häufigkeit, zulässige Werte, Maximalwerte
Energie	Leistung, (Wärme-)Verluste, Anschlussenergie, Speicherung	Reibung, Erwärmung, Abkühlung
Stoff	Eigenschaften des Werkstoffes, Werkstoffart, Materialfluss	Materialeigenschaften, Verschleißprodukte, Schmierstoffe
Signal	Ein- und Ausgangssignale, Signalform, Anschlüsse	Signale für Nutzer: Ton, Zeiger Signalform: analog, digital
Sicherheit	Sicherheitstechnik, Schutzsysteme, Betriebs- und Arbeitssicherheit, Umweltsicherheit	Maschinenrichtlinie, Produkthaftung, Sicherheit für Personal und Umwelt
Ergonomie	Nutzung durch den Menschen, Design	Bedienung, Formgestaltung und Funktionsführung
Fertigung	Produktionsverfahren, Fertigungsverfahren	Eigenfertigung, Fremdfertigung, Stückzahl
Qualität	Fertigungsgenauigkeit, Vorschriften, Mess- und Prüfmöglichkeiten	Normen, Toleranzen, Oberflächengenauigkeit, Funktionsmaße
Montage	Montageart, Bereitstellung, Aufstellung	Normteile, Montagehilfen und -vorrichtungen, Anschlüsse
Transport	Abmessungen und Gewicht, Versand	maximale Durchgangswege zum Aufstellungsort, Gewichtsbegrenzung, Transportmittel
Gebrauch	Einsatzorte, Umweltbelastung, Verschleiß	Umweltbelastung auf das Produkt, Umweltbelastung vom Produkt auf die Umwelt
Instandhaltung	Wartung, Inspektion, Reparatur	After Sale Modell klären, Verschleißteile austauschbar
Recycling	Verwendung, Verwertung, Entsorgung	Kosten für Recycling klären, aktuelle Vorschriften beachten
Kosten	Herstellkosten, Materialkosten, Werkzeugkosten, Betriebskosten, Investitionskosten, Kosten für Dokumentation, Entsorgungskosten	Kosten abhängig von der Stückzahl sowie Produktionsort
Termin	Ende der Konstruktionsarbeit, Start Nullserie, Start Serienproduktion	Lieferumfang klären

Die genaue Analyse der Aufgabenstellung soll dazu dienen, das Wesentliche vom Unwesentlichen zu trennen, um der eigentlichen Aufgabe so nahe wie möglich zu kommen. Wenn zum Beispiel vom Kunden der Wunsch an die Entwicklung herangetragen wird, eine PC-Maus zu entwickeln, so wünscht sich der Kunde vielleicht nur ein Eingabegerät für den Computer, mit dem er Elemente auf dem Bildschirm auswählen und verschieben kann. Die gleiche Aufgabe könnte auch mit einem Touch-Display erfüllt werden.



Fragen zur Selbstkontrolle

1. Erläutern Sie die Phase Planen.
2. Erläutern Sie den Unterschied zwischen einem Pflichtenheft, Lastenheft und einer Anforderungsliste.
3. Erläutern Sie den Unterschied zwischen Forderungen und Wünsche in einer Anforderungsliste.
4. Nennen Sie die Hauptmerkmale für die Erstellung einer Anforderungsliste.



Übungsaufgaben

1. Erstellen Sie eine Anforderungsliste für die Entwicklung eines Smartphones.
2. Auf dem Markt werden unterschiedliche Arten von Kaffeemaschinen angeboten. Warum ist das so und in welchen Punkten werden sich vermutlich die Anforderungen bzw. Kundenwünsche unterscheiden?

2.2 Phase II: Konzipieren

Die zweite Phase des Konstruktionsprozesses nach VDI 2221 ist die Konzeptionsphase. In dieser Phase werden Lösungskonzepte erarbeitet, um die gestellte Aufgabe lösen zu können bzw. Lösungen für die Aufgabenstellung gesucht, indem die Aufgabenstellung abstrahiert und eine lösungsneutrale Funktionsstruktur aufgestellt wird und für die Funktionen prinzipielle Lösungen (=Wirkprinzipien) gesucht werden, siehe **Abbildung 8**.

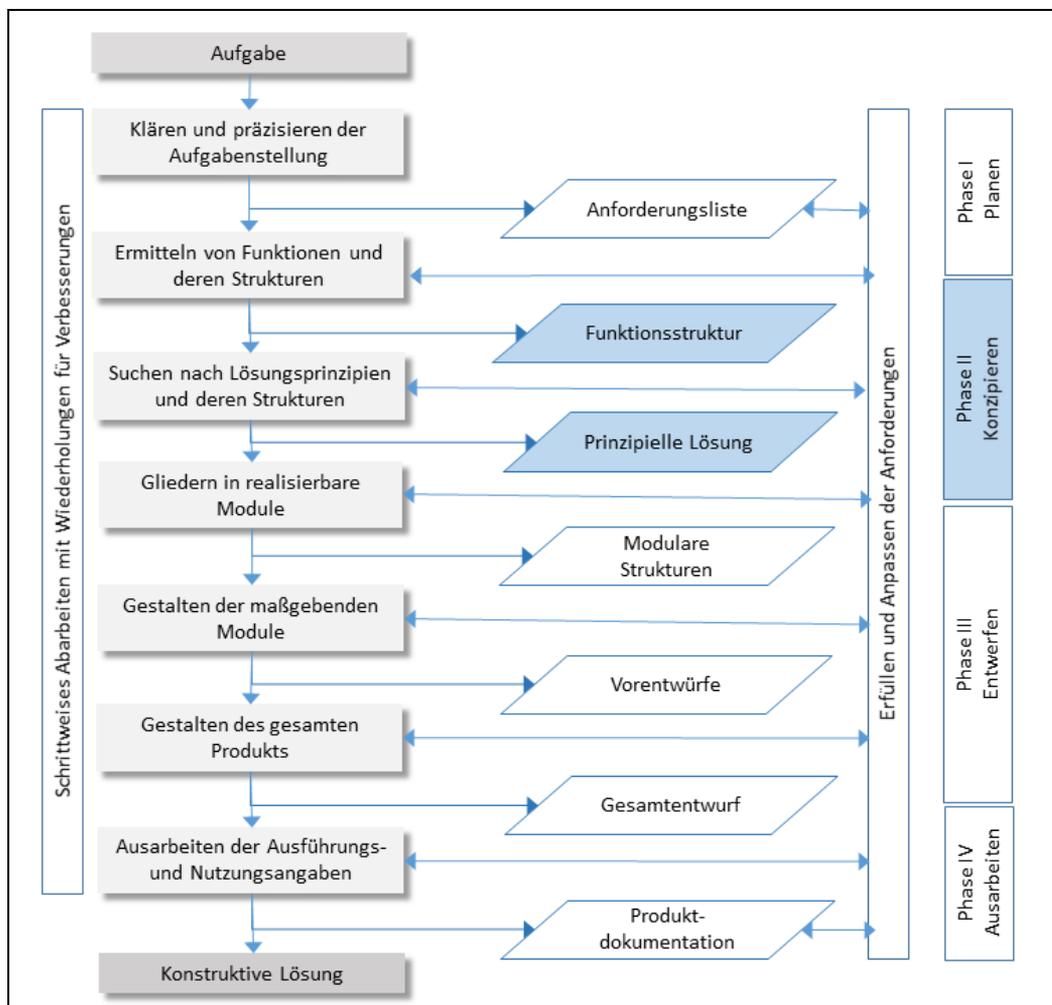


Abbildung 8: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (nach VDI 2221)



Konzipieren ist der Teil des Konstruierens, der nach Klären der Aufgabenstellung durch Abstrahieren, Aufstellen von Funktionsstrukturen und Suche nach geeigneten Lösungen (Wirkprinzipien) und deren Kombination die prinzipielle Lösung festlegt.

Die Arbeitsschritte beim Konzipieren sind:

1. Abstrahieren zum Erkennen der wesentlichen Probleme
2. Aufstellen von Funktionsstrukturen
3. Suchen von Wirkprinzipien zum Erfüllen der Teilfunktionen
4. Kombinieren der Wirkprinzipien zur Wirkstruktur
5. Auswählen geeigneter Kombinationen
6. Konkretisieren zu prinzipiellen Lösungsvarianten
7. Bewerten nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien und Festlegen der prinzipiellen Lösungen

2.2.1 Abstrahieren zum Erkennen der wesentlichen Probleme

Beim Abstrahieren sieht man vom Individuellen und vom Zufälligen ab und versucht das Allgemeingültige und Wesentliche hervorzuheben: Herausfinden des Wesenskerns der Aufgabe mit den funktionalen Zusammenhängen.

Beispiel:

Für die Entwicklung eines Prüfstandes für Elektromotoren ist der Wesenskern der Aufgabe Elektromotor zu prüfen. Die Hauptaufgabe lautet somit „*Elektromotoren prüfen*“. Diese Aufgabe lässt sich unterteilen in die Teilaufgaben:

- Motor fixieren
- Drehmoment und Drehzahl einstellen
- Drehmoment und Drehzahl messen, mit den Teilaufgaben
 - Drehmoment und Drehzahl zum Sensor übertragen
 - Drehmoment messen und Messsignal weiterleiten
 - Drehzahl messen und Messsignal weiterleiten

2.2.2 Aufstellen von Funktionsstrukturen

Die Aufgaben bzw. Teilaufgaben werden im Konstruktionsprozess nach VDI 2221 „*Funktionen*“ genannt. Die komplexe Gesamtfunktion wird in übersichtliche Teilfunktionen unterteilt. Ziel ist es, eine mögliche Gliederung und eine funktionale Beschreibung der Produktarchitektur zu erhalten, ohne eine spezielle Lösung zu beschreiben. Die Funktionsstruktur ist eine abstrahierte Form der Aufgabenstellung.

Eine **Funktion** beschreibt lösungsneutral den Wirkzusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems zum Erfüllen der Aufgabe. Die Eingangs- und Ausgangsgrößen können auf die drei Arten Stoff, Energie oder Signal zurückgeführt werden, siehe **Tabelle 3** und **Abbildung 9**.



Tabelle 3: Ein- und Ausgangsgrößen für eine Funktion

Stoff	materielle Gegenstände wie z. B. Halbzeuge, Flüssigkeiten, Gas, usw.
Energie	mechanische, thermische, elektrische, chemische, optische Energie, Wärme; Kraft, Moment, Strom, Drehzahl
Signal	Messsignale, Störungssignale, Programme

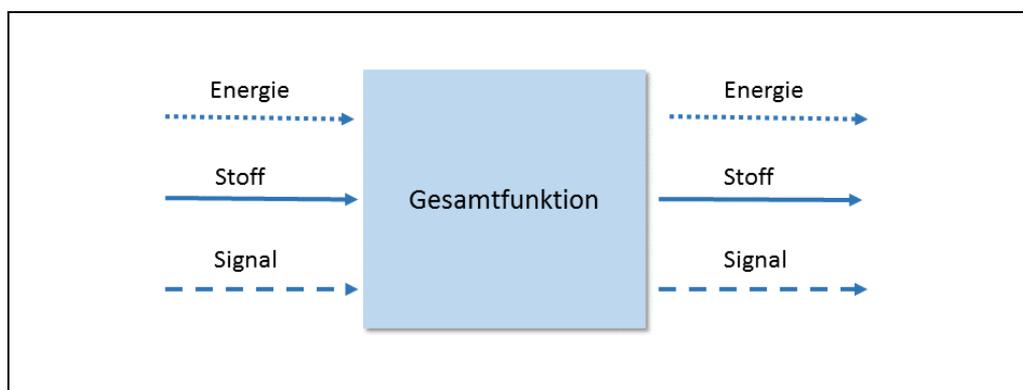


Abbildung 9: Gesamtfunktion mit den Ein- und Ausgangsgrößen Energie, Stoff und Signal (nach Feldhusen 2013)

Die Funktion soll durch ein Hauptwort und ein Tätigkeitswort beschrieben werden, wie z. B. Drehmoment vergrößern (Getriebe) oder Energie speichern (Batterie), siehe **folgende Abbildungen**. Immer wiederkehrende Aufgaben bzw. Funktionen sind *wandeln*, *verknüpfen*, *leiten*, *speichern* und *ändern*. Ändern kann sowohl *vergrößern* als auch *verkleinern* bedeuten.

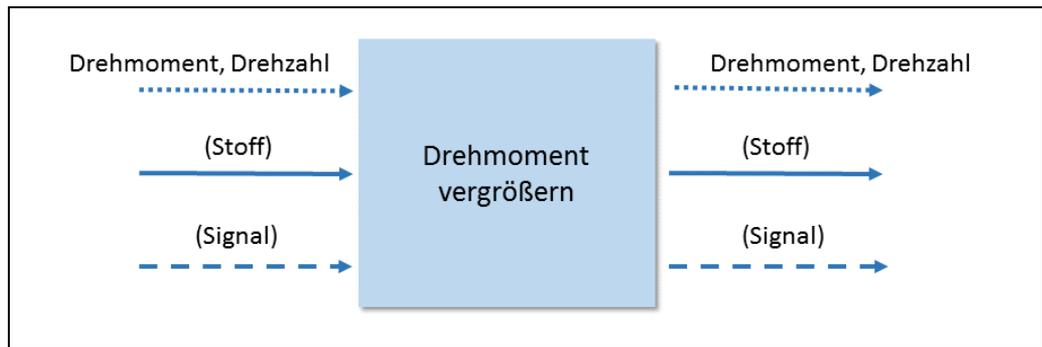


Abbildung 10: Gesamtfunktion „Drehmoment vergrößern“ mit den Ein- und Ausgangsgrößen Drehmoment und Drehzahl

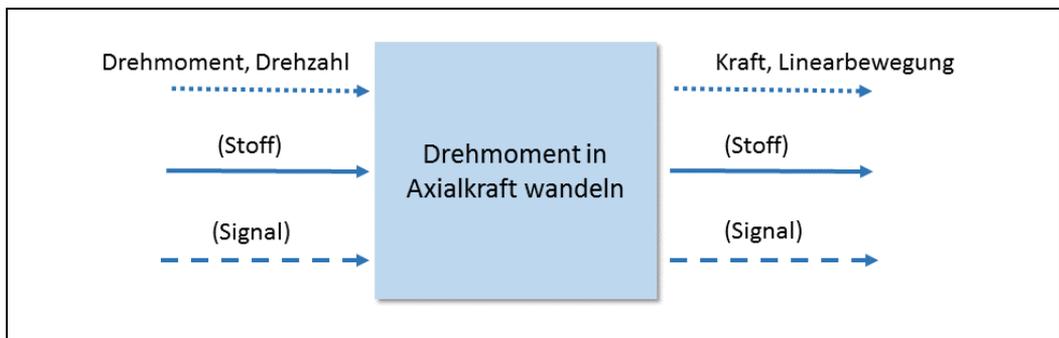


Abbildung 11: Gesamtfunktion „Drehmoment in Axialkraft wandeln“ mit den Ein- und Ausgangsgrößen Drehmoment und Drehzahl

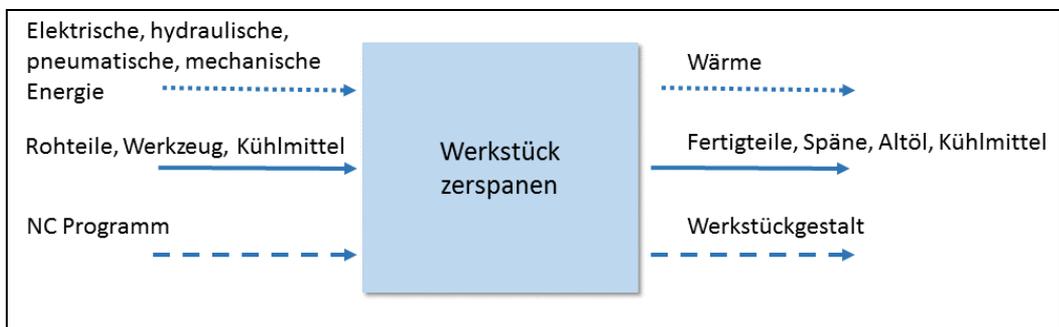


Abbildung 12: Gesamtfunktion „Werkstück zerspanen“ mit den Eingangsgrößen Energie, Rohteil, Werkzeug, Kühlmittel und NC-Programm. Die Ausgangsgrößen sind u.a. das bearbeitete Werkstück, Späne und Wärme

Die Gesamtfunktion wird in Teilfunktionen aufgegliedert mit der Folge, dass die Komplexität sinkt und die Teilsysteme abgegrenzt und getrennt bearbeitet werden können. Die Verknüpfung der Teilfunktionen ergibt die Funktionsstruktur, siehe **Abbildung 13**.

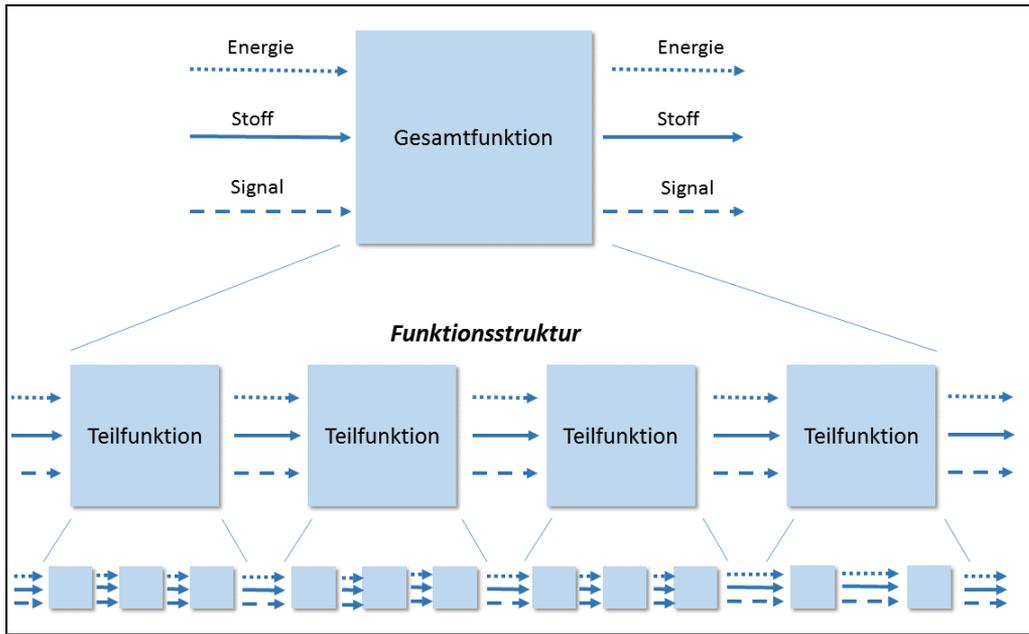


Abbildung 13: Aufgliedern der Gesamtfunktion in Teilfunktionen und Verknüpfung der Teilfunktionen zu einer Funktionsstruktur

2.2.3 Suchen von Wirkprinzipien zum Erfüllen der Teilfunktionen

Das Wirkprinzip enthält den für die Erfüllung einer Funktion erforderlichen physikalischen Effekt sowie die geometrischen und stofflichen Merkmale. Die Suche nach geeigneten Wirkprinzipien bzw. die Ideenfindungsphase ist eine der wichtigsten und spannendsten Phasen im Konstruktionsprozess. Der Konstrukteur bzw. die Konstrukteurin sollte alle zugänglichen Informationen nutzen. Neben dem fachlichen Grund- und Expertenwissen ist auch ein breites Allgemeinwissen sehr wertvoll, um Assoziationen zur Lösungsfindung zu fördern.

In der Konstruktion gibt es unterschiedliche Methoden, um prinzipielle Lösungsvorschläge zu erarbeiten. Bei den Lösungssuchmethoden unterscheidet man zwischen den *konventionellen Methoden*, den *intuitiv betonten Methoden* und den *diskursiv betonten Methoden*. Zur Steigerung der Kreativität und für ein zielgerichtetes Denken sollten bei der Anwendung



dieser Lösungssuchmethoden Kritik an neuen Ideen vermieden werden. Die Bewertung der Lösungsideen erfolgt erst im Anschluss. Bei der Lösungssuche gilt Quantität vor Qualität, um möglichst keine geeignete Lösung zu übersehen.

Konventionelle Methoden sind Literaturrecherche, Patentrecherche, Analyse bekannter technischer Systeme, Analyse natürlicher Systeme (Bionik: Vorbild Natur), Analyse von Modellversuchen und Messungen, Verwendung von Katalogen. Bei diesen Methoden versucht man auf bereits bestehende Lösungen zurückzugreifen, und sie lassen sich besonders gut von Einzelpersonen anwenden. Sie sind sinnvoll, wenn man auf die Lösungen in der eigenen Firma zurückgreifen möchte. Ideen für die Lösungsfindung können auch durch eine Literaturrecherche oder den Besuch von Messen oder Ausstellungen erlangt werden. Nachteil der konventionellen Methoden ist, dass die Lösungen, die man näher betrachtet, bereits erfunden wurden. Mit den konventionellen Lösungssuchmethoden ist es somit schwierig, eine vollkommen neue Idee zu entwickeln. Neue Erfindungen sind eher bei den intuitiven und diskursiven Methoden denkbar.

Zu den **intuitiven Methoden** zählen Brainstorming, Methode 635 (Brainwriting) und Galeriemethode. Man spricht von intuitivem Denken, wenn eine Erkenntnis spontan ins Bewusstsein fällt und keine Herleitung darüber gegeben werden kann. Bei den intuitiv betonten Methoden steht die Kreativität des Menschen im Mittelpunkt. Es wird versucht, möglichst viele neuartige Ideen zu entwickeln, die sich von aktuell auf dem Markt befindlichen Produktlösungen unterscheiden. Durch intuitiv betonte Methoden versucht man durch gezielte Denkanstöße eine neue Idee zu provozieren. Diese entsteht meist, wenn man unbewusst sein Fachwissen und die Erfahrung auf unterschiedlichen Gebieten kombiniert.

Der Denkprozess beim Menschen lässt sich nur schwer bewusst steuern und somit können neue Ideen auch nur schwer „erarbeitet“ werden. Es gibt Ideen bzw. Einfälle, die ins Bewusstsein geholt werden können, andere liegen tief im Unterbewusstsein verborgen. Weil ein ins Bewusstsein geholter Gedanke meist weitere gute Ideen mitzieht (Ideenassoziation), ist es möglich, durch gezielte Assoziationen auch an das verborgene Wissen heranzukommen. Methoden, um Assoziationen zu hervorzubringen und damit die Kreativität zu fördern, sind Gruppenarbeiten wie Brainstorming, Galeriemethode oder Methode 635.

In einer **Brainstorming-Sitzung** wird durch gegenseitiges Informieren der Gedankenfluss gefördert. Die Aufnahme der Informationen erfolgt über das Gehör und soll zum Nachdenken anregen. Durch Assoziationen wird somit das Unterbewusstsein direkt angesprochen, und es werden neue Ideen aus dem Unterbewusstsein „hervorgezogen“, so als wenn man nach längerer Zeit eine Schublade im Schrank öffnet und Verlorenges glaubtes wiederentdeckt.

Das Team einer Brainstorming-Sitzung sollte aus vier bis sieben Teilnehmern bestehen und wird von einem erfahrenen Sitzungsleiter geführt. Wichtig ist, dass die Teilnehmer freiwillig und hochmotiviert zur Sitzung erscheinen. Zwischen den Teilnehmern sollten keine großen hierarchischen Unterschiede bestehen. Von Vorteil ist, wenn die Teilnehmer aus unterschiedlichen Bereichen kommen, um somit ein möglichst breites Fachwissen und unterschiedliche Erfahrungen unter den Teilnehmern zu haben. Die Ideen werden vom Sitzungsleiter möglichst für alle Teilnehmer sichtbar dokumentiert. Die Bewertung und Auswahl der Lösungen erfolgt erst im Anschluss an die Sitzung.

Damit die Kreativität nicht leidet, müssen folgende Spielregeln eingehalten werden:

- Ideen können spontan und frei geäußert werden, auch wenn sie dem ersten Anschein nach sinnlos erscheinen.
- Ideen anderer Teilnehmer werden aufgegriffen und weitergeführt.
- Es gibt keine Einschränkung bei den Lösungsmöglichkeiten, auch nicht durch die Anforderungsliste.
- Es gibt keinen Anspruch auf Urheberrechte.
- Eine Bewertung der Lösungsvorschläge während der Sitzung soll vermieden werden. Killerphrasen, wie z. B. „geht nicht“, „zu teuer“ oder „Unsinn“, sind nicht erlaubt.

Die **Brainwriting-Methode** unterscheidet sich von der Brainstorming-Methode darin, dass der Ideenaustausch nunmehr nicht mündlich sondern schriftlich erfolgt. Während in der Brainstorming-Sitzung die Sprache und das Gehör des Menschen genutzt werden, werden nunmehr das Schreiben und das Lesen für die Ideenfindung eingesetzt. Die Brainwriting-Methode ist somit weniger spontan, dafür vereint Sie das intuitiv-kreative mit dem systematisch-logischen. Die Ablaufphasen beim Brainstorming und Brainwriting zeigt **Abbildung 14**.

Bei der **Methode 635** werden 6 Teilnehmer eingeladen, um jeweils 3 Ideen für das beschriebene Problem schriftlich zu dokumentieren. Diese 3 Lösungsvorschläge werden an den nächsten Teilnehmer weitergeleitet, der diese für die eigene Ideenfindung als Anregung nutzt und weiterentwickelt. Dieser Vorgang wiederholt sich fünfmal durch Weitergabe der Lösungsvorschläge. Nach dem Durchlauf sind theoretisch $6 \times 3 \times 5 = 108$ unterschiedliche

Vorschläge dokumentiert. Bedingt durch Doppelnennungen werden es vermutlich weniger sein. Auch müssen die Teilnehmer nicht zwingend im gleichen Raum sitzen, dieses beschleunigt jedoch den Gesamtprozess. Der Vorteil dieser Methode ist, dass eine Idee systematisch weiterentwickelt werden kann.



Abbildung 14: Ablaufphasen bei Brainstorming und Brainwriting (nach Kümmerer 2015)

Bei allen intuitiven Techniken wird die eigene Kreativität durch äußere Reize angeregt. Die Anregung der eigenen Kreativität ist umso erfolgreicher, je offener man für die Lösungsfindung ist. Leider ist nicht immer ein Erfolg gegeben und häufig lässt der richtige Einfall auf sich warten. Dieses ist besonders dann gegeben, wenn durch bestehende Konventionen oder vorfixierte Lösungen die Kreativität gehemmt wird oder wenn aufgrund von Informationsmangel über neue Technologien neue Ideen nicht entstehen können.

Diskursiv betonte Methoden verwenden Ordnungsschemata, z. B. Morphologischer Kasten, Methode des Vorwärtsschreitens, Verwendung von Katalogen, Systematische Untersuchung physikalischer Effekte und Wirkprinzipien.

Diskursives Denken liegt vor, wenn bewusst verschiedene Ideen analysiert und kombiniert werden und der Gedankengang schrittweise erfolgt und bewusst nachvollzogen werden kann. Dieses ist besonders gut bei der **Methode des Vorwärtsschreitens** zu erkennen. Ausgehend von einer Lösung wird diese schrittweise weiterentwickelt. Diese Vorgehensweise wird sehr gut am Beispiel der Entwicklung einer Wellen-Nabe-Verbindung gemäß **Abbildung 15** deutlich. Ausgehend von einer formschlüssigen Wellen-Nabe-Verbindung mit einer Passfeder wird durch Variation der Geometrie, der Anzahl und der Position der Elemente für die formschlüssigen Verbindung eine Vielzahl von möglichen Lösungen zum Übertragen des Drehmomentes von der Welle auf die Nabe gefunden.

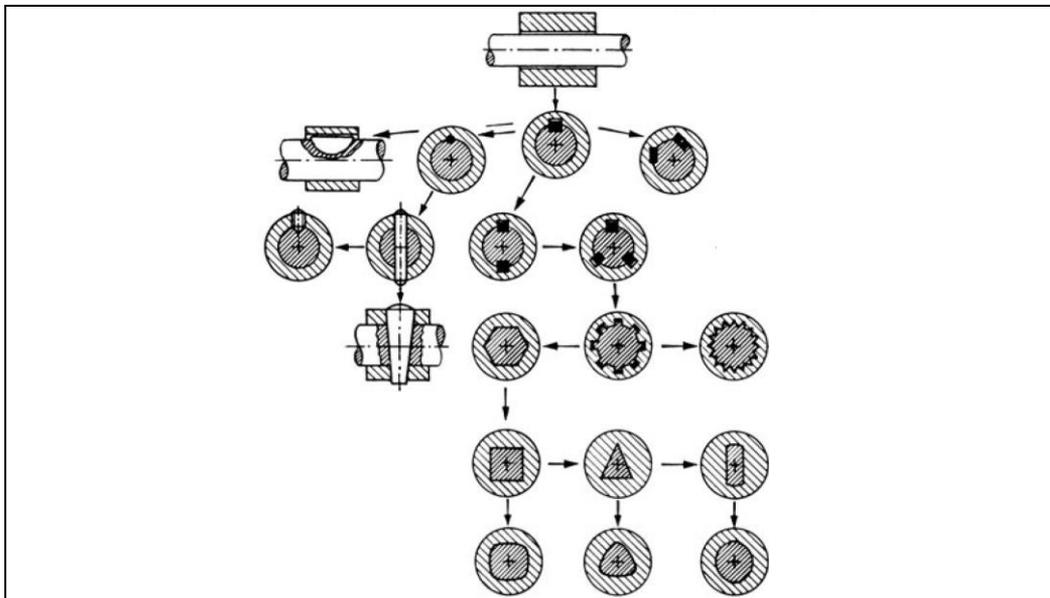


Abbildung 15: Methode des Vorwärtsschreitens am Beispiel einer Welle-Nabe-Verbindung zur Übertragung von Drehmomenten (nach Feldhusen 2013)

Die Vorteile des Diskursiven Denkens sind, dass diese Methode von einer Person alleine durchgeführt werden kann und leicht zu erlernen sind. Dieses gilt insbesondere bei der Methode des morphologischen Kastens. Bei dieser Methode wird versucht, ein Ordnungsschema für den gefundenen Lösungsvorschlag zu erstellen. Ziel dieses Ordnungsschemas ist zum einen, eventuelle Lücken aufzudecken, andererseits durch die Kombination von Ideen auch neue Lösungsvorschläge zu generieren. Für physikalische Größen, wie z. B. Energie, werden im Maschinenbau als ordnende Gesichtspunkte häufig die physi-

kalischen Merkmale mechanisch, hydraulisch / pneumatisch, elektrisch, thermisch und gelegentlich auch magnetisch, optisch, chemisch, nuklear und biologisch verwendet. **Tabelle 4** listet unterschiedlichen Lösungen zur Erfüllung der Funktion „Energie speichern“ auf, geordnet nach der Energieart bzw. den physikalischen Merkmalen mechanisch, hydraulisch / pneumatisch, elektrisch und thermisch.

Tabelle 4: Morphologischer Kasten mit Wirkprinzipien zur Erfüllung der Funktion „Energie speichern“ (nach Feldhusen 2013)

Energieart:	Mechanisch	Hydraulisch Pneumatisch	Elektrisch	Thermisch
<i>Potentielle Energie</i>	Masse auf höheres Niveau heben	Flüssigkeit auf höheres Niveau heben	Batterie laden	thermische Energie in einer Masse speichern
	Feder spannen	Flüssigkeiten und Gase komprimieren	Kondensator laden	thermische Energie in einer Flüssigkeit speichern
				thermische Energie in einem Gas speichern
<i>Kinetische Energie</i>	Schwungmasse translatorisch beschleunigen	Flüssigkeiten beschleunigen		
	Schwungmasse rotatorisch beschleunigen			



Ordnernde Gesichtspunkte können sich allgemein beziehen auf:

- Energiearten
- physikalische Effekte und Erscheinungsformen
- Wirkgeometrie (Art, Form, Lage, Größe, Zahl, ...)
- Wirkbewegung (Art, Form, Richtung, Betrag, Zahl, ...)
- prinzipielle Stoffeigenschaften (Zustand, Verhalten, Form, ...)

Abbildung 16 zeigt ein besonders gutes Beispiel für die Anwendung der Methode des morphologischen Kastens: Für das Beschichten von Teppichbahnen bzw. das Auftragen des Klebers auf die Teppichbahn ist eine Relativbewegung der Teppichbahn und der Auftragsvorrichtung notwendig. Auf der Suche nach der kostengünstigsten und schnellsten Lösung zum Beschichten der Teppichbahnen wurde als Ordnungsschema im morphologischen Kasten die Variation der Wirkbewegung gewählt. Die Kombination von Bewegungen der Teppichbahn und der Auftragsvorrichtung ergibt eine Vielzahl von Lösungsvarianten. Die ordnenden Gesichtspunkte für die Auftragsvorrichtung und die Teppichbahn sind die Bewegungsarten „ruhend“, „translatorisch“, „oszillierend“, „rotierend“ und deren Kombinationen. Durch die Kombination der unterschiedlichen Bewegungsmöglichkeiten von Auftragsvorrichtung und Teppichbahn entstehen somit 49 verschiedenartige Auftragsmuster, die nunmehr einzeln näher betrachtet werden müssen, um die beste Lösung für die gestellte Aufgabe zu finden.

Auftragsvorrichtung / Streifen	A ₁ ruhend	A ₂ translatorisch	A ₃ oszillierend	A ₄ rotierend	A ₅ rotier.+translat.	A ₆ rotier.+oszillier.	A ₇ oszillier.+translat.
B ₁ ruhend							
B ₂ translatorisch							
B ₃ oszillierend							
B ₄ rotierend							
B ₅ rotier.+translat.							
B ₆ rotier.+oszillier.							
B ₇ oszillier.+translat.							

Abbildung 16: Möglichkeiten zum Beschichten von Teppichbahnen durch die Kombination von Bewegungen der Teppichbahn und der Auftragsvorrichtung (Feldhusen 2013)

2.2.4 Kombinieren der Wirkprinzipien zur Wirkstruktur

Wirkprinzipien müssen durch Verknüpfen zu einer Wirkstruktur verarbeitet werden. Dazu muss die physikalische Verträglichkeit geprüft und eine Auswahl technischer und wirtschaftlich günstiger Kombinationen vorgenommen werden.

2.2.5 Auswählen geeigneter Kombinationen

Die Auswahl von oft nicht tragbaren Lösungen sollte so früh wie möglich eingeschränkt werden, indem nicht geeignete Lösungen frühzeitig ausscheiden und favorisierte Lösungen weiterverfolgt werden. Weiterverfolgt wird nur, was mit der Aufgabe und untereinander verträglich ist, die Forderungen der Anforderungsliste erfüllt, Realisierungsmöglichkeiten erkennen und zulässigen Aufwand erwarten lässt.

2.2.6 Konkretisieren zu prinzipiellen Lösungen

Die bisherigen Lösungsvorstellungen müssen noch weiter konkretisiert werden, da bisher nur auf die technische Funktion geachtet wurde, die Auslegung und Dimensionierung der Lösung jedoch noch aussteht. Für die Bewertung der Lösungsprinzipien müssen nunmehr Überschlagsrechnungen, grobmaßstäbliche Skizzen, Labormuster und/oder Simulationen durchgeführt werden. Mit neuen Infos werden die aussichtsreichen Wirkstrukturen soweit konkretisiert und kontinuierlich weiter bewertet, bis eine konkrete und abschließende Bewertung der Lösungen möglich ist.

2.2.7 Bewerten nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien und Festlegen der prinzipiellen Lösungen

Durch die Lösungssuchmethoden wurden viele Lösungsmöglichkeiten erarbeitet. Um nunmehr eine optimale Lösung bzw. Lösungskombination für die gestellte Aufgabe zu finden, müssen Bewertungskriterien aufgestellt werden. Da alle erarbeiteten Lösungen die Kriterien der Anforderungsliste erfüllen müssen, ist die Anforderungsliste allein für die Auswahl der besten Lösung nicht geeignet. Es müssen somit andere Bewertungskriterien gesucht werden, die die Entscheidung unterstützen und auf mögliche Risiken aufmerksam machen. Bei der Auswahl der Kriterien ist es wichtig, dass jedes Kriterium eindeutig formuliert ist und keine Widersprüche enthält. Eine Möglichkeit ist die Nutzwertanalyse.

Das Ziel einer Nutzwertanalyse ist es, den Wert oder die Stärken und Schwächen eines Lösungsvorschlages aufzuzeigen. Dazu werden Bewertungskriterien aufgestellt und gewichtet. Diese Bewertung ermittelt den „Wert“ einer Lösung in Bezug auf eine vorher aufgestellte Zielvorstellung. Die Summe der Wertigkeiten dient als Wertevergleich der jeweiligen Lösungen.



Zum Gewichten der einzelnen Bewertungskriterien kann das Rangfolgeverfahren angewendet werden. In **Tabelle 5** ist dieses Verfahren allgemein am Beispiel eines Messaufnehmers bzw. Sensors zu sehen. Die Bewertungskriterien Messbereich, Messgenauigkeit, Größe, Gewicht und Kosten werden paarweise verglichen und dazu alle Bewertungskriterien in der gleichen Reihenfolge in die Zeilen und Spalten eingetragen. Danach wird jede Zeile mit jeder Spalte verglichen und mit Punkten bewertet. Ist das Bewertungskriterium in der Zeile wichtiger als das Bewertungskriterium in der Spalte, so wird in das Feld die Punktzahl 2 eingetragen. Sind die Bewertungskriterien in Spalte und Zeile gleichbedeutend, so wird 1 Punkt eingetragen. 0 Punkte bedeutet, dass das Bewertungskriterium in der Spalte wichtiger ist als das Bewertungskriterium in der Zeile.

Tabelle 5: Festlegung der Gewichtungsfaktoren für die Bewertung eines Sensors

	Messbereich	Messgenauigkeit	Größe	Gewicht	Kosten	Summe	Rang
Messbereich	-	1	2	2	2	7 (35%)	1
Messgenauigkeit	1	-	1	2	2	6 (30%)	2
Größe	0	1	-	2	2	5 (25%)	3
Gewicht	0	0	0	-	1	1 (5%)	4
Kosten	0	0	0	1	-	1 (5%)	4

Wenn alles bewertet wurde, wird die Summe der Punkte je Zeile ermittelt und die Rangfolge der einzelnen Kriterien festgelegt. Das Kriterium mit den meisten Punkten hat die höchste Bedeutung für die Lösungsauswahl. Die Gewichtung errechnet sich, indem der prozentuale Wert des jeweiligen Ranges errechnet wird. Nach der Ermittlung der Bedeutung der Gewichtungsfaktoren für die Gesamtlösung werden die einzelnen Lösungsvorschläge nach ihren

Eigenschaften bewertet. Die VDI-Richtlinie 2225, die sich mit der technisch-wirtschaftlichen Bewertung von Produkten befasst, sieht eine Punkteskala von null bis vier vor, siehe **Tabelle 6**.

Tabelle 6: Werteskala nach VDI-Richtlinie 2225

Punkte	Bedeutung
0	unbefriedigend
1	gerade noch tragbar
2	befriedigend
3	gut
4	sehr gut bzw. ideal

Die Lösungsvorschläge werden entsprechend der Werteskala bewertet und gemäß den Gewichtungsfaktoren gewichtet. Die so errechneten Punkte werden addiert. Die Lösung mit der höchsten Punktzahl ist die favorisierte Lösung. **Tabelle 7** zeigt diesen Vorgang am Beispiel eines Messaufnehmers bzw. Sensors zur Ermittlung des Bremsmomentes.

Tabelle 7: Beispiel für die Bewertung von Wirkprinzipien für die Funktion „Bremsmoment ermitteln“ (G = Gewichtungsfaktor, W= Wert)

	G	Wirbelstrom		Hysterese		Magnetpulver		Bremsmotor	
		W	G·W	W	G·W	W	G·W	W	G·W
Messbereich	0,35	0	0,00	3	1,05	3	1,05	2	0,70
Messgenauigkeit	0,30	3	0,90	3	0,90	2	0,60	2	0,60
Größe	0,25	1	0,25	3	0,75	3	0,75	2	0,50
Gewicht	0,05	1	0,05	2	0,10	3	0,15	2	0,10
Kosten	0,05	1	0,05	3	0,15	3	0,15	3	0,15
Gesamt	1,00	6	1,25	14	2,95	14	2,70	11	2,05
Rang			4		1		2		3



Fragen zur Selbstkontrolle

1. Erläutern Sie die Begriffe *Funktion* und *Funktionsstruktur*.
2. Nennen Sie drei intuitiv betonte Methoden zur Lösungssuche.
3. Erläutern Sie die Methode der Lösungssuche durch Vorwärtsschreiten.
4. Was ist ein Wirkprinzip?
5. Skizzieren Sie drei unterschiedliche Wirkprinzipien für die Erfüllung der Funktion *Drehmoment leiten*.



Übungsaufgaben

1. Erstellen Sie eine Funktionsstruktur für die Aufgabe, ein Maschinenelement, z. B. eine Welle, mit Hilfe einer Drehmaschine zu fertigen. Welche Einzelschritte sind notwendig und wie lassen sich diese durch Hauptwort und Tätigkeitswort beschreiben?
2. Suchen Sie nach Wirkprinzipien für die Funktion „Werkstück fixieren“.
3. Erstellen Sie einen morphologischen Kasten für die Funktion *Drehmoment weiterleiten mit einer formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindung*. Wählen Sie als ordnendes Merkmal die Wirkgeometrie und variieren Art, Form, Lage, Größe und Zahl der Elemente. (Hinweis: Abbildung 15 zeigt einige Lösungsmöglichkeiten)

2.3 Phase III: Entwerfen

In der Phase Entwerfen findet die geometrische und materielle Festlegung statt. Entwerfen ist der Teil des Konstruierens, der für ein technisches Gebilde von der prinzipiellen Lösung ausgehend den Gesamtentwurf nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten eindeutig, sicher und vollständig erarbeitet, siehe **Abbildung 17**.

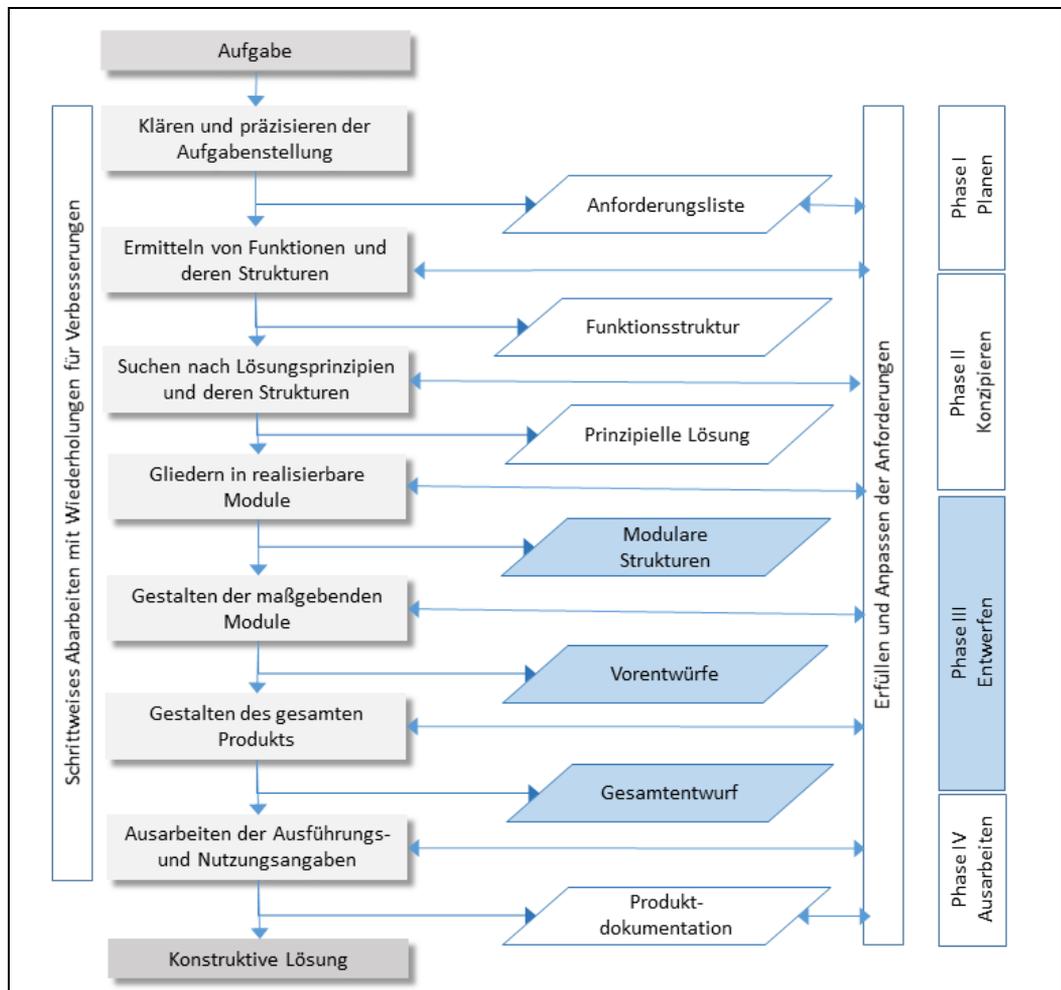


Abbildung 17: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (nach VDI 2221)

Unterstützt wird dieser Konstruktionsprozess durch allgemeine Gestaltungsregeln, Gestaltungsprinzipien und Gestaltungsrichtlinien.

Es ist zu empfehlen, sich vom Groben zum Feinen und von innen nach außen vorzuarbeiten. Für das Entwerfen müssen zuerst die geometriestimmenden Faktoren aus der Anforderungsliste ermittelt werden. Danach wird ein maßstabgerechter Vorentwurf erstellt, bei dem auch gleich die Fertigungsverfahren und Montageart festgelegt sowie die wichtigsten Festigkeitsberechnungen durchgeführt werden. Im Anschluss erfolgen die Feingestaltung unter Berücksichtigung der Gestaltungsrichtlinien, eine technisch-wirtschaftliche Bewertung inklusive Schwachstellenanalyse und schließlich die Festlegung des Gesamtentwurfs.

Das grundsätzliche Vorgehen beim Entwerfen ist vom Qualitativen zum Quantitativen, vom Abstrakten zum Konkreten und von der Grobgestaltung zur Feingestaltung

Arbeitsschritte beim Entwerfen

Grobgestalten

- Erarbeiten der gestaltungsbestimmenden Anforderungen
- Klären der räumlichen Bedingungen
- Grobgestalten der gestaltungsbestimmenden Hauptfunktionsträger
- Auswählen geeigneter Entwürfe
- Grobgestalten weiterer Hauptfunktionsträger

Feingestalten

- Suchen von Lösungen für Nebenfunktionen
- Feingestalten der Hauptfunktionsträger unter Beachten der Nebenfunktionsträger
- Feingestalten der Nebenfunktionsträger und Vervollständigen der vorläufigen Entwürfe
- Bewerten der Entwürfe nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien
- Festlegen des vorläufigen Gesamtentwurfs

Vervollständigen und Kontrollieren

- Optimieren des Gesamtentwurfs und abschließendes Gestalten
- Kontrollieren auf Fehler und Störgrößeneinflüsse
- Vervollständigen durch Stückliste, Fertigungs- und Montageanweisungen
- Festlegen des Gesamtentwurfs



Generelle Ziele bei der Entwicklung von technischen Produkten:

- eindeutige Erfüllung der technischen Funktion
- einfache wirtschaftliche Realisierung
- Sicherheit für Mensch und Umgebung

Grundregeln für die Gestaltung lauten: *eindeutig, einfach* und *sicher*.

Eindeutig bedeutet eine klare Zuordnung der Teilfunktionen mit den Ein- und Ausgangsgrößen zum gewählten Wirkprinzip und damit zur Gestaltung der Einzelbauteile. Es muss somit klar sein, welche Aufgabe die gewählte technische Lösung bzw. das gewählte Wirkprinzip hat.

Die Forderung nach Eindeutigkeit bedingt eine eindeutige Funktionsbeschreibung und ist nur zu erreichen, wenn die nicht zu vermeidenden Geometrieabweichungen bei der Herstellung (Fertigungs- und Montagetoleranzen) und während der Nutzung (Geometrieänderung aufgrund von Temperaturerhöhung oder Verschleiß) berücksichtigt werden.

Aus diesem Grund sind Doppelpassungen bzw. Überpositionierungen zu vermeiden. **Abbildung 18** zeigt eine typische Doppelpassung in Form einer Welle-Nabe-Verbindung mit Kegelsitz und aufgepresster Nabe. Die gleichzeitige axiale Anlage am Wellenbund und des Kegelsitzes an der Fläche der Nabe wird als Doppelpassung bezeichnet. Aufgrund von Fertigungstoleranzen ist es so gut wie ausgeschlossen, dass die Welle allseitig aufliegt. Entweder wird die Nabe axial oder radial nicht anliegen. Es muss somit nach einer Alternativlösung gesucht werden, die es ermöglicht die Fertigungstoleranzen auszugleichen, so wie sie in **Abbildung 18** rechts dargestellt wird.



Eindeutige Erfüllung der technischen Funktion

Wirkung und Verhalten muss klar und gut erkennbar vorausgesagt werden können. Dieses bedingt: klare Zuordnung der Teilfunktionen, geordnete Führung des Energie-, Stoff- und Signalfusses, definierte Dehnungsrichtungen und klar berechenbare Konstruktionen.

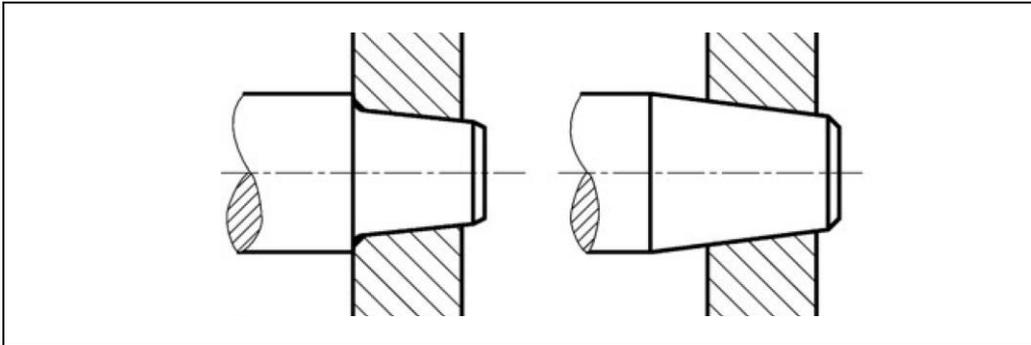


Abbildung 18: Doppelpassung bei einer Welle-Nabe-Verbindung mit Kegelsitz und aufgepresster Nabe (links) und verbesserte Lösung mit einer kraftschlüssigen Verbindung (rechts) (nach Feldhusen 2013)

Die Fest-Loslager-Anordnung (siehe Modul Technische Mechanik), ist ein gutes Beispiel für eine eindeutige Lösung: das Festlager übernimmt zusätzlich zu den Radialkräften noch die Axialkräfte, während das Loslager zusätzlich zu den Radialkräften eine Verschiebung aufgrund von Wärmeausdehnung ermöglicht.

Einfach ist eine technische Lösung, wenn mit wenigen Bauteilen die Funktion erfüllt werden kann. Wenige Bauteile bedeuten geringe Herstellkosten, geringe Montagekosten sowie kleiner Wartungsaufwand.

Die Grundregel *einfach* zielt darauf hin, dass die Kosten für das Produkt geringgehalten werden sollen. Um diese Ziel zu erreichen, sollen einfache Funktionsprinzipien ausgewählt und möglichst wenige Teile mit einfacher Gestaltung konzipiert werden. Durch die Verwendung einfacher geometrischer Formen werden die Festigkeitsberechnung für das Bauteil vereinfacht, die Fertigungszeiten reduziert und die Qualitätskontrolle vereinfacht.

Die Konstruktion hat entscheidenden Einfluss auf die Herstellkosten. Sie legt die Geometrie inklusive der Toleranzen und Oberflächenbeschaffenheit fest und damit auch die Fertigungsverfahren, die Fertigungsmittel, die Montageart und den Transport. Während die Kosten für die Entwicklung eines Produktes nur ca. 10 % der Produktionskosten betragen, werden in dieser Phase bis zu 70 % der Produktionskosten festgelegt. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass beim Entwerfen eine Kostenbeurteilung und Kostenkontrolle erfolgt. Die Selbstkosten setzen sich aus Herstellkosten und Gemeinkosten zusammen, siehe **Abbildung 19**. Die Herstellkosten sind Material- und Fertigungskosten, die Gemeinkosten setzen sich aus Verwaltungskosten und Einzelkosten der Konstruktion zusammen.

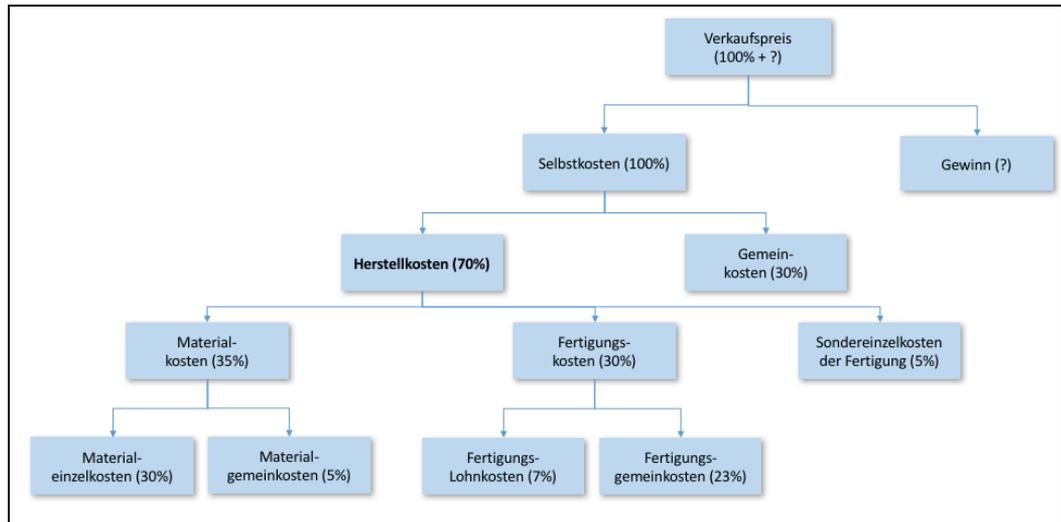


Abbildung 19: Kostengliederung für ein Erzeugnis (nach Kümmeler 2015)

Die Qualität der Kostenabschätzung steigt mit dem Fortschritt im Konstruktionsprozess, während gleichzeitig die Möglichkeit der Kostenbeeinflussung fällt, weil kostenentscheidende Faktoren wie Material und Herstellungsverfahren bereits frühzeitig festgelegt werden müssen. **Tabelle 8** zeigt die Kosten verschiedener Materialien bezogen auf den vielfach im Maschinenbau eingesetzten Stahl S235JR.

Je genauer die Fertigungsgenauigkeit sein muss, desto höher sind die Kosten für die Herstellung, siehe **Abbildung 20**.

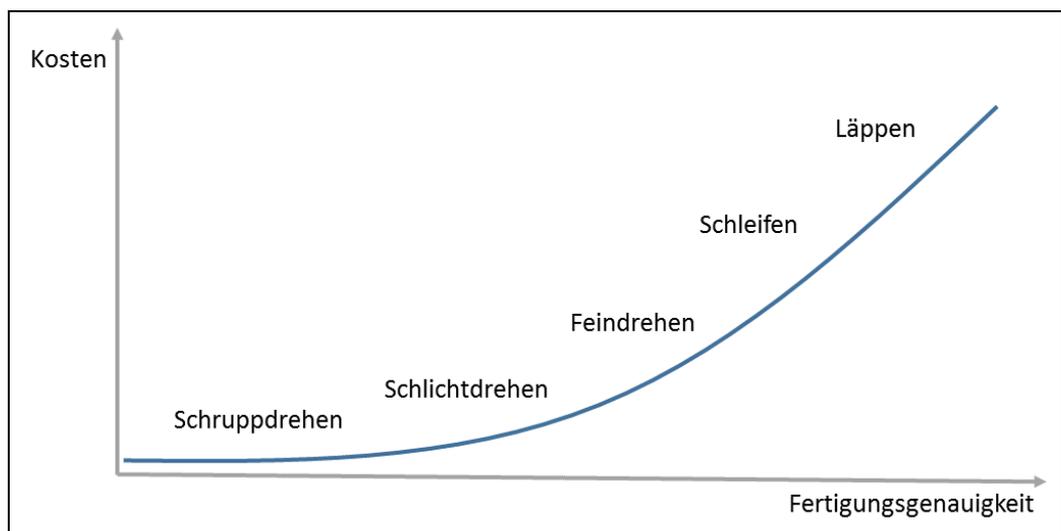


Abbildung 20: Kostenfaktor in Abhängigkeit von der Fertigungstoleranz und dem Fertigungsverfahren (nach Kümmeler 2015)

Tabelle 8: Relativkosten einiger Werkstoffe für Rundmaterial (nach VDI 2225)

Werkstoff		Relativkostenfaktor
Stähle	S235JR bzw. St 37	1
	Vergütungsstähle	2
	Warmfeste Stähle	2,5
	Nichtrostende Stähle	4,5
	Hochwarmfeste Stähle	7
Nichteisen-Metalle	Aluminium	2,5
	Messing	7,5
	Kupfer-Zinn Legierungen	17
	Titan	37
Kunststoffe	PVC	1
	Polyamid	3
	Plexiglas	4
	Hartgummi	4,5
	PTFE bzw. Teflon	15
Holz		0,1

Einfache wirtschaftliche Realisierung

Einfach und damit kostengünstig konstruieren, indem die Gestaltung des Produktes durch wenig zusammengesetzte, übersichtlich gestaltete Formen angestrebt und der Fertigungsaufwand klein gehalten wird.



Sicher ist eine technische Konstruktion, wenn die technische Funktion zuverlässig erfüllt werden kann und keine Gefahr für Menschen und Umgebung entsteht bzw. diese gering ist.

Bei der Sicherheitstechnik wird unterschieden zwischen (**Tabelle 9**):

- **Unmittelbare Sicherheitstechnik**: von der technischen Lösung geht keine Gefährdung aus
- **Mittelbare Sicherheitstechnik**: Schutzsysteme und Sicherheitssysteme verhindern den Zugang zum Gefahrenbereich
- **Hinweisende Sicherheitstechnik**: es wird auf den Gefahrenbereich lediglich hingewiesen

Tabelle 9: Drei-Stufen-Methode für die Sicherheit nach DIN 31 000

Stufe 1	unmittelbare Sicherheitstechnik	keine Gefahr z. B. durch konstruktive Maßnahmen
Stufe 2	mittelbare Sicherheitstechnik	vor Gefahr schützen z. B. durch Schutzvorrichtungen
Stufe 3	hinweisende Sicherheitstechnik	vor Gefahr warnen z. B. mit Hinweisschildern

Die hinweisende Sicherheitstechnik, die nur vor Gefahren warnt und auf gefährliche Bereiche hinweist, sollte nach Möglichkeit vom Konstrukteur nicht angewendet werden. Angestrebt werden sollte die unmittelbare Sicherheitstechnik. Konstruktionshinweise für unmittelbare Sicherheitstechnik sind beispielsweise:

- scharfe Kanten und Ecken verrunden oder mit einer Fase versehen
- konstruktive Lösungen entwerfen, die Fertigungs- und Montagefehler vermeiden
- Sicherungen, wie z. B. Überdruckventile oder FI-Schutzschalter, vorsehen

Im Geräte- und Produktsicherheitsgesetz heißt es in §4: „Ein Produkt darf nur in den Verkehr gebracht werden, wenn es so beschaffen ist, dass bei bestimmungsgemäßer Verwendung oder vorhersehbarer Fehlanwendung Sicherheit und Gesundheit von Verwendern oder Dritten nicht gefährdet werden.“

Die Richtlinie 2006/42/EG des europäischen Parlaments und des Rates, allgemein als Maschinenrichtlinie bezeichnet, die die Schutzmaßnahmen zur Unfallverhütung im Europäischen Wirtschaftsraum regelt, spricht in diesem Zusammenhang von einer „*gefährlosen Maschine*“, die angestrebt werden soll.

Sicherheit für Mensch und Umgebung

Maßnahmen zur Erzielung einer sicheren und gefährlosen Maschine:

- Gefahren so weit wie möglich minimieren
- Schutzmaßnahmen gegen nicht zu beseitigende Gefahren vorsehen
- Benutzer und Beteiligte über Restgefahren unterrichten



Sicher konstruieren bedeutet somit, dass keine Gefahr für den Benutzer und das Umfeld entstehen darf im Sinne der Arbeits-, Verkehrs-, Gebrauchs- und Umweltsicherheit. Sicherheit für Mensch und Umgebung lässt sich jedoch nur erzielen, wenn Bauteil- und Funktionszuverlässigkeit gewährleistet wird. Eine Umweltsicherheit kann nur erzielt werden, wenn zuvor die Bauteilzuverlässigkeit, die Funktionszuverlässigkeit, die Betriebssicherheit und die Arbeitssicherheit gewährleistet wurde.

Sicherheit in der Konstruktion bedeutet aber auch, sich vorstellen zu können, welche Fehler bei der Herstellung von technischen Produkten entstehen können und welche Folgen dieses haben könnte. So kann eine nicht korrekt angezogene Schraube, die sich im Gebrauch löst, zu schwerwiegenden Folgen führen, sollte diese Schraube zum Beispiel in ein schnell drehendes Getriebe fallen. Wenn an diese Fehlermöglichkeit frühzeitig gedacht wird, kann durch eine einfache Schraubensicherung dieses verhindert werden.

Beim Gestaltungsvorgang sollen somit Haltbarkeit, Zuverlässigkeit, Unfallfreiheit und Umweltschutz gemeinsam erfasst werden. Auf folgende Gefahren muss während der Konstruktion geachtet werden:

- mechanische Gefahrenstellen
- elektrische und elektronische Gefahrenstellen
- Gefahrstoffe
- Brand- und Explosionsgefährdung
- Gefahren durch Hitze- oder Kälteentwicklung
- Beleuchtung
- Lärm und Vibration
- Strahlung
- falsche Handhabung
- physisch schwere (statische) Belastung
- psychische Belastung durch die Bedienung des Gerätes

Mechanische Gefährdungen können entstehen durch

- Bauteilversagen
- Transport von Bauteilen
- Umstürzen von Bauteilen
- gefährliche Oberflächen

Gefährliche Oberflächen sind zum Beispiel scharfe Ecken und Kanten, scharfe Schneiden, verletzende Oberflächenrauigkeiten. Maßnahmen gegen diese Gefahren sind:

- Fasen oder Radien an Kanten
- Entgraten
- Kanten- und Schneidenschutz
- Abdeckungen



Fragen zur Selbstkontrolle

1. Was sind die generellen Ziele bei der Entwicklung von technischen Produkten?
2. Erläutern Sie den Begriff Doppelpassung.
3. Wie berechnen sich die Herstellkosten eines Produktes und warum sind diese für den Konstrukteur von Bedeutung?
4. Erläutern Sie die Drei-Stufen-Methode für die Sicherheit.



Übungsaufgaben

1. Suchen Sie in ihrem Umfeld nach Lösungen für die Konstruktionsziele eindeutig, einfach und sicher.
2. Skizzieren Sie eine Fest- und Loslageranordnung. Warum wird diese Lageranordnung häufig als Konstruktionslösung zur Lagerung von Wellen gewählt?
3. Recherchieren Sie die Fertigungsgenauigkeiten, die mit den Fertigungsverfahren Drehen, Schleifen und Läppen erzielt werden können.

2.4 Phase IV: Ausarbeiten

Ausarbeiten ist die vierte Phase des Konstruktionsprozesses, siehe **Abbildung 21**. Diese Phase hat das Ziel, den Konstruktionsprozess abzuschließen und das Ergebnis zusammen mit der Produktdokumentation dem Kunden oder der nachgeschalteten Abteilung, z. B. der Arbeitsvorbereitung, zu übergeben. Es werden für das in der Phase III entworfene Produkt alle Informationen so aufbereitet, dass das Produkt hergestellt und betrieben werden kann. Hierzu zählen unter anderem die Fertigungs- und Montagezeichnungen, die Stücklisten und die Betriebs- bzw. Bedienungsanleitungen.

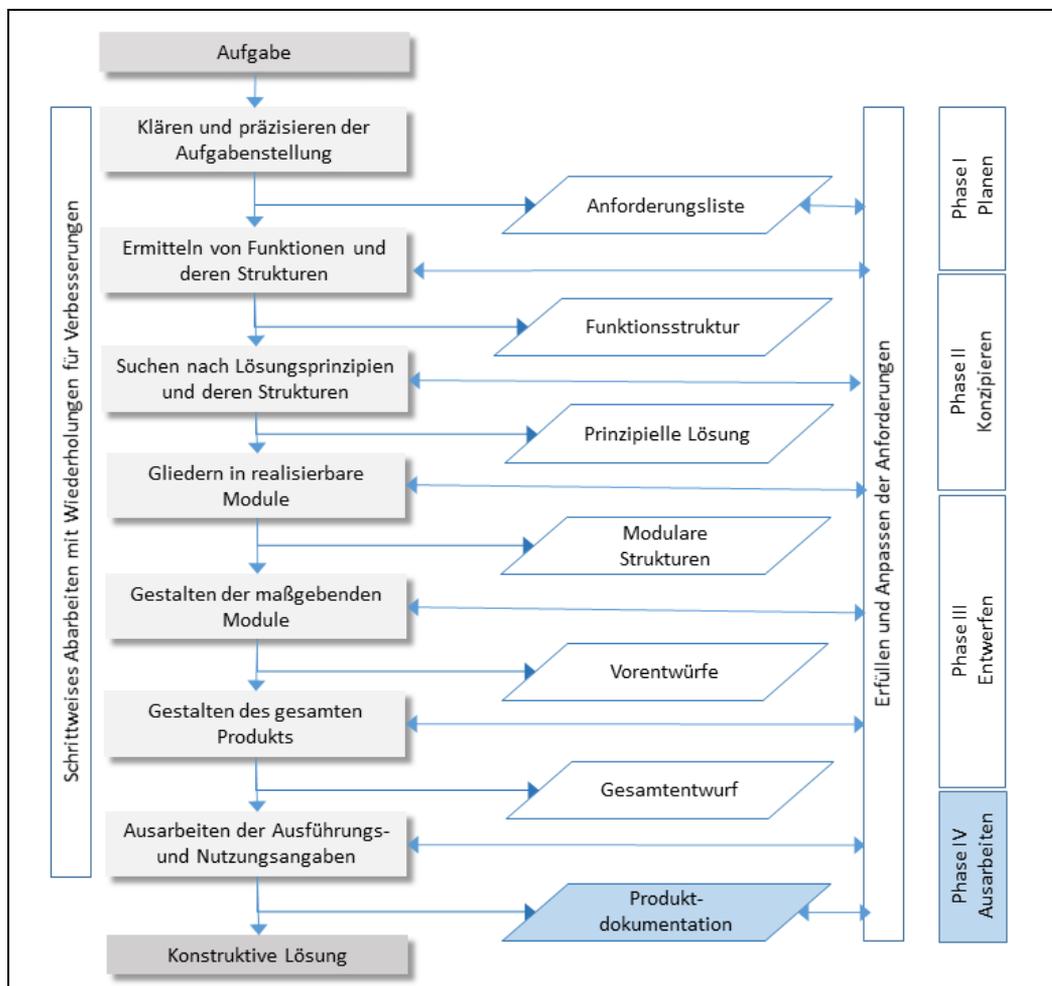


Abbildung 21: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (nach VDI 2221)

Die Phase Ausarbeiten inklusive der Qualitätssicherung beim Ausarbeiten wird im Rahmen der praktischen CAD-Ausbildung näher erläutert.

3 Gestaltungsrichtlinien

In diesem Kapitel erfahren Sie, welche Gestaltungsrichtlinien beim Entwerfen eines Produktes zu berücksichtigen sind.

Die Gestaltung der Bauteile in der Phase III „Entwerfen“ wird beeinflusst durch die möglichen Fertigungsverfahren, die verwendeten Werkzeugmaschinen, den Fertigungsort und die Verwendung von Normteilen und Halbzeugen. Gestaltungsrichtlinien sind besonders genannte Konstruktionshinweise, die bei der Gestaltung und damit der Festlegung von Geometrie und Material zur Erlangung der Produkteigenschaften im Besonderen zu beachten sind. Die im Maschinenbau häufig verwendeten Materialien sind Metalle, Kunststoffe und Keramiken, siehe **Tabelle 10**. In **Tabelle 11** sind die für die Konstruktion wichtigen Stoffeigenschaften von Werkstoffen aufgelistet.

Tabelle 10: Häufig verwendete Konstruktionswerkstoffe

Metalle	Stähle	Baustähle Vergütungsstähle Automatenstähle
	Eisengusswerkstoffe	Grauguss Temperguss
	Nichteisenmetalle	Leichtmetalle Buntmetalle Edelmetalle
Kunststoffe (Polymere)	Thermoplaste	Polyamid (PA) Polyethylen (PE) Polypropylen (PP) Polystyrol (PS)
	Duromere	Epoxidharz (EP) Phenolharz
	Elastomere	Acrylkautschuk (ACM) Isoprenkautschuk
Keramiken	Oxidkeramik	
	Nichtoxidkeramik	
	Silikate	
	Gläser	

Tabelle 11: Stoffeigenschaften von Werkstoffen

mechanische Eigenschaften	statische Festigkeit
	dynamische Festigkeit
	Elastizitätsmodul als Funktion der Temperatur
	Härte
	Dichte
	Verschleißfestigkeit
	Gleitverhalten
	Dämpfung
	Viskosität
	Ausdehnungskoeffizient
thermische Eigenschaften	Umwelteinflüsse und ausgesetztes Klima
	UV-Strahlung
	Ozonbelastung
	Wärmeleitfähigkeit
	Wärmeausdehnung
technologische Eigenschaften	Eignung für das gewählte Fertigungsverfahren
	Schwindung, Verzug
chemische Eigenschaften	Beständigkeit gegen Säuren, Laugen, Öle, Benzin,
	Korrosion
physikalische Eigenschaften	elektrische Leitfähigkeit
	magnetisches Verhalten
	optisches Verhalten

Die wichtigste Produkteigenschaft ist die funktionsgerechte Gestaltung. Diese umfasst die vollständige Erfüllung der Anforderungen aus der Anforderungsliste, die für den Gebrauch des Produktes erforderlich sind. In **Tabelle 12** werden weitere wichtige Gestaltungsrichtlinien, die der Konstrukteur bedenken sollte, aufgelistet. Die Erläuterung der Gestaltungsrichtlinien erfolgt mit Hilfe von konkreten Konstruktionsbeispielen im Moodle-Kurs.

Tabelle 12: Gestaltungsrichtlinien (nach Conrad 2013)



Kategorie	Gestaltungsrichtlinie	Bemerkung
Berücksichtigung der Eigenschaften des eingesetzten Materials	Ausdehnungsgerecht	$\Delta l = \beta \cdot l \cdot \Delta \vartheta_m$
	Kriech- und Relaxationsgerecht	Druckkräfte führen zu Materialveränderungen
	Korrosionsgerecht	Feuchte
	Verschleißgerecht	Abrieb
Kunden- und Bedienerwünsche	Ergonomiegerecht	Bedienung durch den Menschen erleichtern
	Formgebungsgerecht	formgerechte und funktionale Gestaltung, die zum Kauf anregt
Tragfähigkeit	Beanspruchungsgerecht	minimaler Werkstoffeinsatz
	Festigkeitsgerecht (ausreichende Tragfähigkeit)	äußere Belastungen führen zu folgenden inneren Beanspruchungen: Zugkräfte führen zu Normalspannungen, Druckkräfte zu Flächenpressung bzw. Hertzsche Pressung sowie zur Knickung, Querkräfte zu Schubspannungen, Momente zu Biege- und Torsionsspannungen
Herstellung	Fertigungsgerecht	kostengünstige Herstellung in guter Qualität
	Montagegerecht	eindeutige Montage bei minimalem wirtschaftlichen Aufwand
	Transportgerecht	Geometrie und Gewicht beachten
	Instandhaltungsgerecht	Wartung erleichtern
Gesetzliche Vorschriften	Normgerecht	bewährte Lösungen wiederverwenden
	Recyclinggerecht	kostengünstige Verwendung oder Verwertung der Materialien nach Produktgebrauch anstreben
	Sicherheitsgerecht	keine Gefahr für Mensch und Umwelt
	Qualitätsgerecht	Prüfmöglichkeiten vorsehen
Termin und Kosten	Termingerecht	Zeitmanagement
	Kostengerecht	Herstellkosten minimieren

3.1 Ausdehnungsgerecht

Jedes Bauteil muss in seiner Lage eindeutig festgelegt werden und darf nur so viele Freiheitsgrade erhalten, wie es zur ordnungsgemäßen Funktionserfüllung benötigt. Dieses bedingt, dass mechanische und *thermische Ausdehnungen* in der Konstruktion berücksichtigt werden müssen.

3.2 Kriech- und relaxationsgerecht

Mit *Kriechen* ist die Verformung von Bauteilen aufgrund von äußeren Kräften gemeint. Sie ist abhängig von der Beanspruchungshöhe, der Temperatur sowie der Dauer der Krafteinwirkung. Mit *Relaxation* ist die elastische Dehnungsabnahme bzw. Reduzierung der Vorspannkraft bei konstanter Gesamtdehnung gemeint. Beides kann zur Einschränkung des Funktionsumfangs einer Konstruktion führen. Konstruktive Maßnahmen können sein, dass eine hohe elastische Dehnungsreserve vorgesehen wird oder die für das Kriechen notwendige Wärme durch eine Bauteilkühlung reduziert wird.

3.3 Korrosionsgerecht

Korrosion entsteht verstärkt bei Taupunktunterschreitung und bei Feuchtigkeit. Maßnahmen zur Reduzierung des Problems können Wanddickenzuschläge, glatte Oberflächen und Vermeidung von Feuchtigkeitssammelstellen sein.

Besonders gefährlich ist *lokal angreifende Korrosion*, da dadurch große Kerbwirkungen entstehen. Aus diesem Grund sollen enge Spalte vermieden werden, wie sie zum Beispiel beim Schweißen entstehen. Korrosion entsteht außerdem, wenn Metallkombinationen mit geringen elektrochemischen Potentialunterschieden gewählt werden oder das Material durch Zug- und Schwingungsbeanspruchungen besonders beansprucht wird.

3.4 Ergonomiegerecht

Ergonomie ist die Anpassung der Arbeitsumgebung und somit auch die Bedienung eines Produktes an den Menschen. Beim Entwerfen sollte auf die körpergerechte Bedienung und *Handhabung* des Produktes geachtet werden. Für den Menschen sind z. B. dynamische Muskelarbeiten besser erträglich als statische Muskelarbeit. Eine gezielte Aufmerksamkeitsführung kann durch Anordnung von Anzeigen und Kennzeichnungen an technischen Erzeugnissen erzielt werden

3.5 Formgebungsgerecht

Ein wichtiges Ziel jeder Produktentwicklung ist, dass das Produkt vom Kunden angenommen wird bzw. auf dem Markt Bestand hat. Zielrichtung des Designers ist es, ein Erzeugnis zu schaffen, das den Menschen anspricht und zum Kauf anregt. Die *Formgebung* bzw. das *Design* eines Produktes hat diesbezüglich maßgeblichen Einfluss und zwar sowohl bei Gebrauchsgegenständen als auch bei Industrieprodukten. Die Formgebung wird als angenehm empfunden, wenn die äußere Form kompakt, übersichtlich, einfach, einheitlich und funktionsgerecht gestaltet wird. Richtige Bedienung und zweckmäßiger Gebrauch sollten durch Kennzeichen unterstützt werden, indem die Bedienelemente sinnvoll und ergonomisch angeordnet werden und für gefährliche Elemente eine Sicherheitskennzeichnung und Sicherheitsfarben verwendet werden.

3.6 Fertigungsgerecht

Fertigungsverfahren werden eingeteilt in die sechs Hauptgruppen:

- Urformen: Erzeugen eines Funktionsteils aus dem gasförmigen, flüssigen, pulverförmigen Zustand
- Umformen: Ändern der Gestalt durch mechanische Kräfte, z. B. Walzen oder Tiefziehen
- Trennen: Abnahme von Material durch Drehen, Schleifen, Fräsen, Schneiden, usw.
- Fügen: Zusammenbringen von mehreren Bauteilen durch Schweißen, Kleben oder Löten
- Beschichten: Aufbringen einer Schutzschicht
- Stoffeigenschaften ändern: Verändern der Materialeigenschaften durch Einwirkung von Druck oder Wärme

Eine *fertigungsgerechte Werkstückgestaltung* bedeutet, den Fertigungsaufwand gering zu halten und gleichzeitig die Qualität zu optimieren. Die Gestaltungshinweise lauten: Urformgerecht, Umformgerecht, Trenngerecht, Werkzeuggerecht, Spanngerecht und Fügerecht. Erläuterungen und Hinweise zu den Fertigungsverfahren siehe Modul „Fertigungs- und Produktionstechnik“.

3.7 Montagegerecht

Unter dem Begriff Montage wird das Zusammenfügen von fertigen Einzelteilen und Komponenten zu Baugruppen verstanden. Die Baugruppe kann das fertige Produkt oder eine Komponente davon sein.

Montagegerecht bedeutet, das Produkt so zu gestalten, dass die Montage einfach und damit wirtschaftlich erfolgen kann. Ebenso wichtig ist es, dass die Montage sicher möglich ist. Fehler bei der Montage können zur Funktionsbeeinträchtigung des Produktes und damit zur Unzufriedenheit des Kunden führen.

Die Montage besteht aus den Schritten Speichern, Handhaben, Greifen, Positionieren, Fügen, Einstellen, Sichern und Kontrollieren.

Die Konstruktionshinweise zu diesen Punkten lauten:

- Speichern: stapelbare Werkstücke mit ausreichenden Auflageflächen gestalten
- Handhaben: Verwechslungen bei der Montagerichtung ausschließen durch eindeutige Gestaltung der Bauteile
- Greifen: einwandfreies sicheres Greifen der Bauteile ermöglichen
- Positionieren: Symmetrie anstreben, wenn keine Vorzugslage gefordert ist
- Fügen: oft zu lösende Fügstellen sollten leicht zu lösen sein, das Einfügen sollte so einfach wie möglich erfolgen
- Einstellen: feinfühliges, reproduzierbares Einstellen ermöglichen
- Sichern: selbstsichernde Verbindungen oder form- bzw. stoffschlüssige Zusatzsicherungen vorsehen
- Kontrollieren: Messen der funktionsbedingten Forderungen ermöglichen

Folgende Gestaltungsrichtlinien sollten eingehalten werden:

- Eine einmal gewählte Montagerichtung (horizontal oder vertikal) sollte nach Möglichkeit beibehalten werden. Dieses erleichtert die Kontrollmöglichkeit während der Montage.
- Die Einbaulage des Bauteils sollte schnell erfasst werden können. Aus diesem Grund möglichst eindeutige Gestaltmerkmale vorsehen und fast symmetrische Bauteile vermeiden. Das Bauteil entweder völlig symmetrisch oder deutlich asymmetrisch gestalten.
- Die Bauteile müssen bevorratet bzw. gespeichert und zum Montageort gefördert werden. Aus diesen Gründen sollten die Bauteile so gestaltet werden, dass sie sich nicht verhaken, wenig Platz in Anspruch nehmen, indem sie stapelbar sind, und auch durch ausreichende Anlageflächen zum schnellen Greifen geeignet sind.
- Um die Fehlerquote gering zu halten, sollte so viel wie möglich bei der Montage vereinheitlicht werden. Dieses gilt sowohl für die Fügerichtung und für die Verbindungselemente als auch für die Werkzeuge, die für die Montage benötigt werden. Auch sollte auf die Zugänglichkeit der Fügestelle geachtet werden.
- Alternativ kann auch auf die Montage ganz oder teilweise verzichtet werden bzw. können Teile durch Integralbauweise zu einer größeren Einheit zusammengefasst werden. Durch die Integralbauweise entfallen Montageschritte und damit auch mögliche Montagefehler.
- Die Losgröße bei den Baugruppen sollte möglichst groß gewählt werden, indem die Variantenbildung erst bei der Endmontage erfolgt und gleiche Baugruppen für verschiedene Produkte verwendet werden. Durch die große Losgröße ist es möglich, die Montage zu automatisieren und zu perfektionieren.

3.8 Normgerecht

Zielsetzung der Normung ist, dass bewährte Lösungen für weitere Aufgabenstellungen verwendet werden und der Konstruktionsprozess dadurch verkürzt werden kann. *Normung* ist der Oberbegriff für das *Vereinheitlichen* und Festlegen von Lösungen in allgemein zugänglichen Vorschriften, wie z. B. in Normen des Deutschen Instituts für Normung (DIN), in Normen der International Organization for Standardization (ISO) sowie in Werksnormen.

3.9 Recyclinggerecht

Zielsetzung des Recyclings ist die Einsparung von Rohstoffen. Dieses kann durch einen verringerten Stoffeinsatz, Substitution von Werkstoffen und Altstoff-Recycling erfolgen. Bei den *Recycling-Möglichkeiten* wird unterschieden zwischen Recycling bei der Produktion (Produktionsabfall-Aufbereitung), Recycling während des Produktgebrauchs durch Wiederaufbereitung von Produkten (Beispiele: Flugzeugturbinenschaufeln, Motoren, ...) und Recycling nach Produktgebrauch (Altstoffrecycling), siehe **Abbildung 22**. Innerhalb der Recycling-Kreisläufe sind verschiedene Recyclingformen möglich:

- Wiederverwendung: das Produkt wird für die gleiche Aufgabe nochmals verwendet, z. B. das nochmalige Befüllen einer Gasflasche
- Wiederverwertung: das Produkt wird in seiner Form aufgelöst und für das gleiche Produkt nochmals als Rohstoff verwendet, z. B. Autoschrottverwertung
- Weiterverwendung: das Produkt wird für eine andere Aufgabe genutzt, z. B. die Nutzung eines ausrangierten Autoreifens für eine Schaukel
- Weiterverwertung: das Produkt wird in seinem Verbund aufgelöst und für eine andere Aufgabe genutzt, z. B. die Verwertung von eingeschmolzenen Kunststoff für Kosmetika

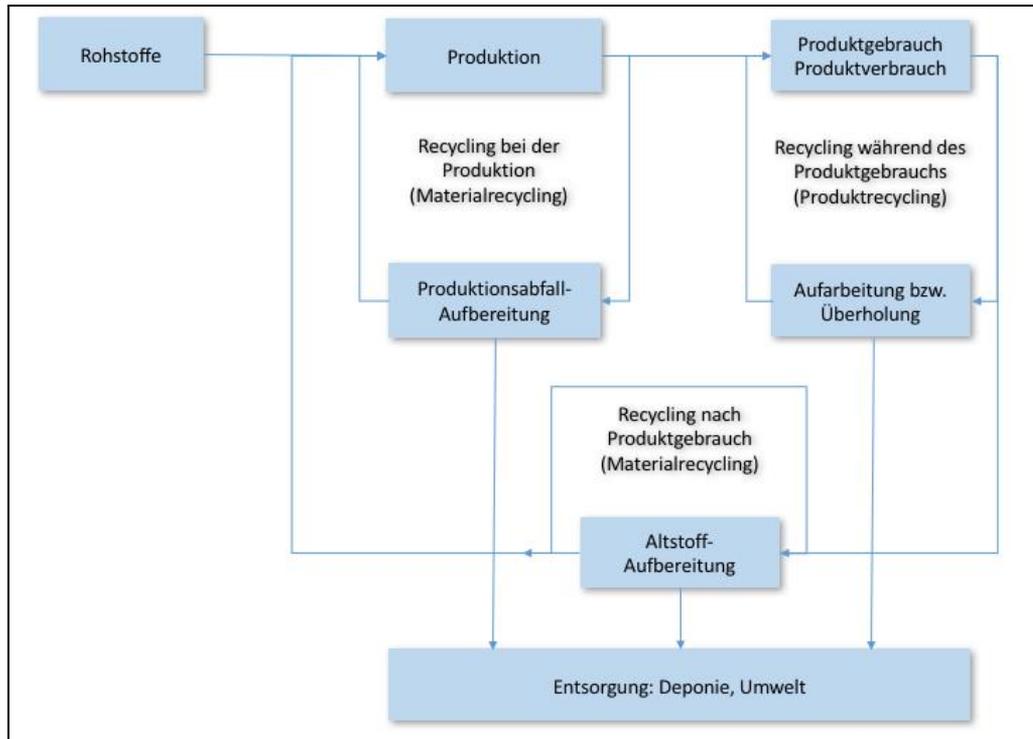


Abbildung 22: Recyclingmöglichkeiten (nach VDI 2243)

Die Recycling-Möglichkeit eines Produktes hängt von der Konstruktion (Geometrie), der Herstellung (Fertigung, Montage, Demontage) und dem Material ab. Voraussetzung zum Recycling ist eine demontagegerechte, reinigungsgerechte und prüfgerechte Konstruktion. Die Verschleißlenkung sollte auf wenige, entscheidende Teile erfolgen. Hochwertige Werkstoffe und gefährliche Stoffe müssen besonders zerlegungsgerecht angeordnet werden.



Fragen zur Selbstkontrolle

1. Nennen und erläutern Sie die Gestaltungsrichtlinien für die Konstruktion technischer Systeme und Produkte.
2. Nennen Sie die vier verschiedenen Recyclingformen, die während des Material- und Produktrecyclings möglich sind, und erläutern Sie diese am Beispiel einer PKW-Stahlfelge.



Übungsaufgaben

1. Recherchieren Sie, warum bei der Konstruktion von Schnappverbindungen aus Kunststoff diese im eingebauten Zustand unbelastet sein sollen.
2. Fertigungsverfahren werden nach DIN 8580 in sechs Hauptgruppen unterteilt. Nennen Sie die vier Hauptgruppen, die für die Gestaltung bzw. Konstruktion von besonderer Bedeutung sind und erläutern jeweils zwei dazugehörige Fertigungsverfahren.

4 Qualitätssicherung beim Entwerfen

In diesem Kapitel erfahren Sie, wie mögliche Konstruktionsfehler frühzeitig erkannt und korrigiert werden können.

Die Entwicklungszeiten für neue Produkte werden immer kürzer bei gleichzeitiger Steigerung des Komplexitätsgrades und damit des Funktionsumfangs der Produkte. Der zunehmende Kosten- und Zeitdruck bei der Entwicklung moderner Produkte begünstigt leider auch die Wahrscheinlichkeit, dass Fehler bei der Entwicklung oder Produktion entstehen und zum Risiko für die Sicherheit und Zufriedenheit des Kunden werden.

Fehler und Störgrößen müssen frühzeitig erkannt werden! Auch bei prinzipiell richtiger Funktionserfüllung muss der Einfluss von Störgrößen durch verschiedene Maßnahmen aufgespürt und gegebenenfalls reduziert werden.

Hohe Kosten können durch die notwendigen Fehlerbehebungen und durch Produktionszeitverluste entstehen, aber auch durch Garantie- und Schadensersatzleistungen. Je früher mögliche Fehler in der Produktentstehungskette erkannt werden, siehe **Abbildung 23**, desto geringer sind die Kosten für die Beseitigung der Fehler, siehe **Abbildung 24**. Werden Konstruktionsfehler öffentlich bekannt, weil z. B. eine Rückrufaktion gestartet werden muss, so ist dieses häufig mit einem Imageverlust des betroffenen Unternehmens verbunden. Für das Aufspüren von Konstruktionsfehlern haben sich unter anderem die Methoden Fehlerbaumanalyse und FMEA bewährt.



Bei der **Fehlerbaumanalyse** werden sämtliche erkannte Funktionen nacheinander negiert und die dafür möglichen Ursachen eines solchen Fehlverhaltens oder Störgrößeneinflüsse gesucht.

Die **FMEA** (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse) ist eine bewährte Methode zur systematischen Aufdeckung und zur objektiven Bewertung von Fehlern und zur Vorbeugung vor möglichen Fehlern in der Konstruktion oder im Herstellungsprozess. Es wird unterschieden zwischen einer Konstruktions-FMEA, einer Prozess-FMEA und einer System-FMEA.

In der **Konstruktions-FMEA** prüft ein Team, bestehend aus Experten aus der Konstruktion, der Arbeitsvorbereitung und der Qualitätssicherung, den Gesamtentwurf sowie die einzelnen Komponenten auf mögliche Funktionsfehler, Herstellbarkeit und Zuverlässigkeit. Die aus dieser Analyse gewonnenen Erkenntnisse werden in die Anforderungsliste aufgenommen.

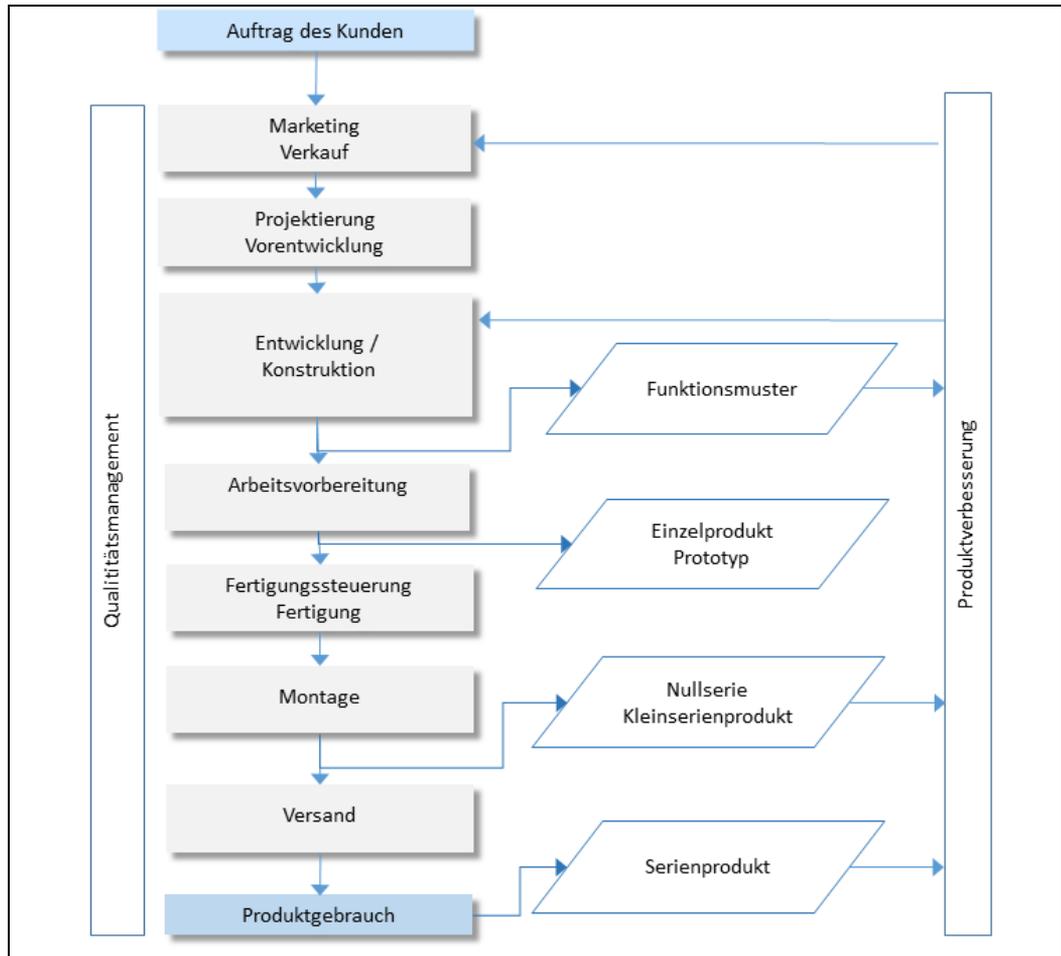


Abbildung 23: Qualitätsmanagement während des Produktlebenszyklusses

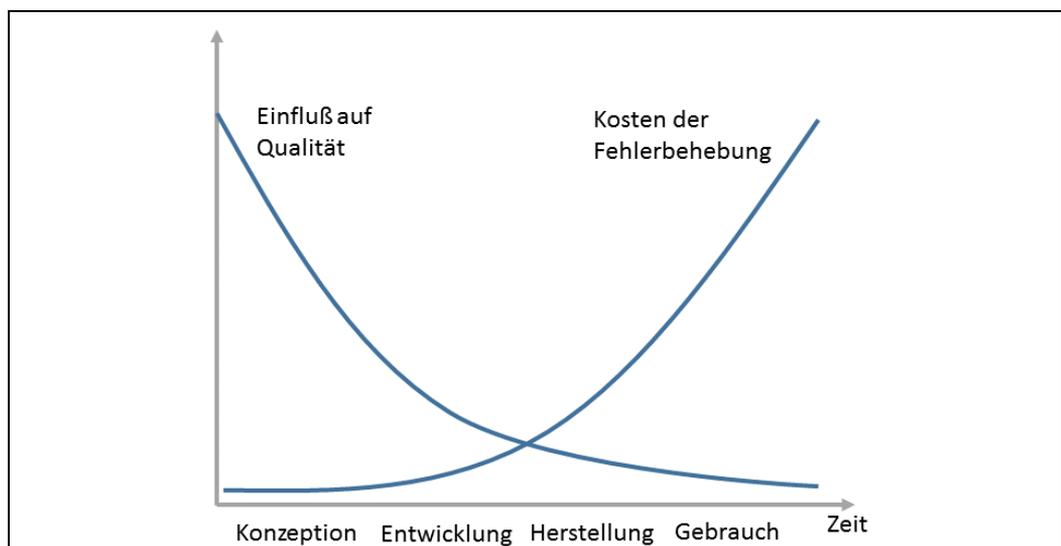


Abbildung 24: Einfluss auf die Qualität und auf die Kosten der Fehlerbehebung während des Konstruktionsprozesses

Die **Prozess-FMEA** hat das Ziel, mögliche Schwachstellen bei der Fertigung, Montage und Inbetriebnahme noch vor Serienanlauf aufzudecken und die Prozesssicherheit zu erhöhen

Die **System-FMEA** ist eine Kombination aus Konstruktions- und Prozess-FMEA und untersucht darüber hinaus die Schnittstellen zur Umgebung. Diese FMEA betrachtet somit das Produkt als ein System mit weitreichenden Systemgrenzen.

Der Ablauf einer FMEA erfolgt in der Regel in den folgenden fünf aufeinanderfolgenden Schritten, siehe **Abbildung 25**:

1. Strukturanalyse
2. Funktionsanalyse
3. Fehleranalyse
4. Risikobewertung
5. Optimierung

In der **Strukturanalyse** werden die Produktstruktur und die dazugehörigen Systemelemente definiert und in einem hierarchischen Baumdiagramm dargestellt.

In der **Funktionsanalyse** werden den Systemelementen Funktionen und Spezifikationen laut Anforderungsliste zugeordnet. Ähnlich wie bei der Funktionsstruktur entsteht eine Ursache-Wirkungskette.

In der **Fehleranalyse** ermittelt das Team, bestehend aus ca. 5 Experten der beteiligten Fachbereiche, die kritischen Komponenten und die kritischen Funktionen und führt eine Fehleranalyse durch.

Die ermittelten Fehler werden einer **Risikobewertung** unterzogen. Bewertet wird die Fehlerbedeutung (B), die Auftrittswahrscheinlichkeit für den Fehler (A) und die Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers (E). Die Bewertungszahlen liegen zwischen 1 und 10, siehe **Tabelle 13**. Durch die Multiplikation dieser Werte errechnet sich die **Risikoprioritätszahl** ($RPZ = B \cdot A \cdot E$), die zwischen 1 und 1000 liegen kann.

Ist der Wert für RPZ größer als 100, so müssen Verbesserungen am Produkt vorgenommen werden. Die Änderungen bzw. **Optimierungen** können im konstruktiven Bereich sein oder es können Änderungen an den Randbedingungen vorgenommen werden.

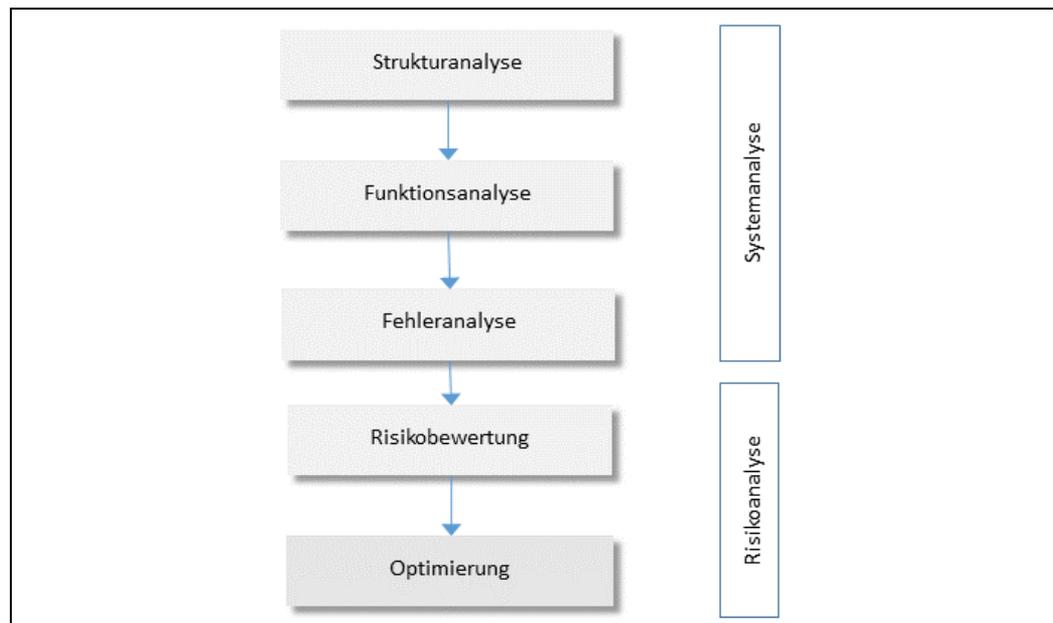


Abbildung 25: Qualitätssicherung beim Entwerfen (nach Kümmerer 2015)

Tabelle 13: Bewertungszahlen für FMEA

B: Bedeutung der Fehlerwirkung		A: Auftretswahrscheinlichkeit		E: Entdeckungswahrscheinlichkeit	
keine	1	nie	1	immer, funktioneller Fehler	1
vernachlässigbar	2	sehr selten	2	fast immer	2
gering	3	selten	3	sehr oft	3
erkennbar	4	manchmal	4	oft, bei systematischen Tests	4
beträchtlich	5	wiederholt	5	regelmäßig, wird bemerkt	5
bedeutend	6	regelmäßig	6	wiederholt bemerkbar	6
schwerwiegende Störung	7	oft	7	gelegentlich feststellbar	7
gravierend, Reparatur notwendig	8	sehr oft	8	selten, bemerkbar	8
kritisch, Systemausfall	9	fast immer	9	sehr selten, kaum bemerkbar	9
gefährlich, gesetzeswidrig	10	immer	10	nie, verdeckter Fehler	10

Trotz Fehler- und Störgrößenbeseitigung verbleibt jedoch ein Rest von Unsicherheit. Mit dieser Risikobegegnung muss der Konstrukteur und die Konstrukteurin umgehen können. Die Person muss aufgrund der Fehler-, Störgrößen- und auch Schwachstellenanalyse mit Ersatzlösungen für den Fall vorsorgen, dass die realisierte Lösung in einem mit Unsicherheiten behafteten Punkt nicht befriedigen sollte und Maßnahmen vorplanen, so dass eventuelle Mängel durch geringen Mehraufwand behoben werden können. Es besteht die Möglichkeit, nachträgliche Umrüstungen vorzusehen und Teile einstellbar zu gestalten, um somit technisches und wirtschaftliches Risiko in Einklang zu bringen.



Fragen zur Selbstkontrolle

1. Erläutern Sie die Methoden der Fehlerbaumanalyse und der FMEA.
2. Was bedeutet die Risikoprioritätszahl und wie wird diese ermittelt?



Übungsaufgaben

1. Erstellen Sie eine Funktionsstruktur für eine Fahrradbremse und führen anschließend eine Fehlerbaumanalyse durch.
2. Überlegen Sie mögliche Fehler, die bei der Konstruktion einer Fahrradbremse entstehen können, und führen eine Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (Konstruktions-FMEA) durch.

5 Literaturverzeichnis

5.1 Quellenverzeichnis

- Conrad, Klaus-Jörg: Grundlagen der Konstruktionslehre. 6. Auflage.
München: Hanser 2013.
- Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre -
Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung.
8. Auflage. Berlin: Springer 2013.
- Kümmerer, Rolf; Schmid, Dietmar (Hrsg.): Konstruktionslehre. 4. Auflage.
Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel 2015.
- VDI-Richtlinie 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer
Systeme und Produkte“. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993.
- VDI-Richtlinie 2223 „Methodisches Entwerfen technischer Produkte“.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2004.
- VDI-Richtlinie 2225 „Konstruktionsmethodik“. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998.
- VDI-Richtlinie 2243 „Recyclingorientierte Produktentwicklung“. Düsseldorf:
VDI-Verlag 2002.

5.2 Literatur zur Vertiefung

- Ehrlenspiel, Klaus: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsätze, Zusammenarbeit. 4. Auflage. München: Hanser 2009.
- Gerhard, Edmund: Entwickeln und Konstruieren mit System. 3. Auflage. Renningen: Expert-Verlag 1998.
- Koller, Rudolf: Konstruktionsmethode für den Maschinen-, Geräte- und Anlagenbau. 1. Auflage. Berlin: Springer 1976.
- Koller, Rudolf: Konstruktionslehre für den Maschinenbau – Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen. 3. Auflage. Berlin: Springer 1994.
- Muhs, Dieter; Wittel, Herbert; Jannasch, Dieter; Voßiek, Joachim: Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung. 20. Auflage. Berlin: Springer 2011.
- Naefe, Paul: Einführung in das Methodische Konstruieren. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2012.
- Naefe, Paul; Luderich, Jörg: Konstruktionsmethodik für die Praxis. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2016.
- Rodenacker, Wolf G.: Methodisches Konstruieren. 2. Auflage. Berlin: Springer 1976.
- Roth, Karlheinz: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1: Konstruktionslehre. 3. Auflage. Berlin: Springer 2000.
- Roth, Karlheinz: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 2: Konstruktionskataloge. 3. Auflage. Berlin: Springer 2001.
- Schlottmann, Dietrich (et al.): Allgemeine Grundlagen der Konstruktionslehre. 2. Auflage. Berlin: Springer 2013.