



Leseprobe

Martin Reuter

Methodik der Werkstoffauswahl

Der systematische Weg zum richtigen Material

ISBN (Buch): 978-3-446-44144-6

ISBN (E-Book): 978-3-446-44174-3

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44144-6>

sowie im Buchhandel.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
2	Allgemeine Aspekte der Werkstoffauswahl.....	16
2.1	Warum neue oder geänderte Werkstoffe?	16
2.1.1	Gesetze des Marktes.....	16
2.1.2	Neue Produkte	18
2.1.3	Qualitätsprobleme	19
2.1.4	Normen, Vorschriften, Bestimmungen	20
2.1.5	Standardisierung	21
2.1.6	Weitere Motive für Werkstoffänderungen	21
2.2	Komplexität von Werkstoffauswahlprozessen	22
2.2.1	Bekanntheitsgrad eines Materials.....	23
2.2.2	Produktmerkmale mit Wechselwirkungen zur Komplexität	25
2.3	Kontrollfragen	29
3	Vorgehensweisen zur Lösung von Werkstofffragen	31
3.1	Verwandtschaft zu anderen Lösungsprozessen	31
3.2	Methodik eines systematischen Materialauswahlprozesses	36
3.3	Potenziale und Grenzen einer methodischen Materialauswahl	42
3.4	Kontrollfragen	44
4	Phase I – Ermittlung der Materialanforderungen.....	46
4.1	Wechselwirkungen mit dem Konstruktionswerkstoff	49
4.2	Werkstoffeigenschaften	57
4.3	Vorgehen beim Erstellen einer Materialanforderungsliste	60
4.3.1	Übersetzung der Produkt- in Materialanforderungen.....	61
4.3.2	Ermittlung von Eigenschaftsgrenzen	63
4.3.3	Die Materialanforderungsliste	71
4.4	Hilfreiche Quellen bei der Suche nach Materialanforderungen	73
4.4.1	Fertigungstechnische Materialanforderungen	73
4.4.2	Schadensstatistiken und Schadensfälle	78
4.4.3	Materialanforderungen aus Kostensicht.....	86

4.4.4	Ableitung weiterer Materialanforderungen	97
4.5	Kontrollfragen	97
5	Phase II – Vorauswahl.....	101
5.1	Eigenschaften der Werkstoffhauptgruppen	103
5.2	Kriterien für die Vorauswahl	104
5.3	Werkstoffschaubilder	107
5.3.1	Mechanische Werkstoffkennwerte	111
5.3.2	Thermische Eigenschaftswerte	118
5.3.3	Tribologische Werkstoffkennwerte	126
5.3.4	Werkstoffkosten	128
5.4	Designparameter und Materialindizes	131
5.4.1	Funktionsindex, Geometrieindex, Materialindex	131
5.4.2	Vorauswahl über Materialindizes	132
5.4.3	Einbeziehung des Kostenaspekts	133
5.5	Liste möglicher Materiallösungen	136
5.6	Kontrollfragen	138
6	Phase III – Feinauswahl und Bewertung	140
6.1	Beurteilungskriterien	141
6.2	Anwendung klassischer Bewertungsverfahren	142
6.2.1	Komplexität von Bewertungsverfahren	143
6.2.2	Vorgehensweise bei der klassischen Bewertung	144
6.2.3	Methoden zur Ermittlung von Gewichtungsfaktoren.....	145
6.2.4	Auswertemethoden für die Erstellung von Ranglisten	149
6.2.4.1	Bewertungsverfahren ohne Gewichtung der Bewertungsmerkmale	150
6.2.4.2	Methode der gewichteten Punktebewertung	152
6.2.4.3	Einbeziehung von Grenzwerten sowie Zielwerten der Materialanforderungsliste	155
6.2.5	Bewertungsverfahren im Überblick	157
6.3	Ganzheitliche Auswahlmethode nach Ashby	158
6.3.1	Materialindizes in Werkstoffschaubildern	158
6.3.2	Vereinfachte Werkstoffauswahl mit Werkstoffschaubildern und Materialindizes	161

6.3.3	Einbeziehung der Form durch Formfaktor	163
6.3.4	Einbeziehung des Fertigungsverfahrens	168
6.3.5	Ziel- und Penaltyfunktion für die Materialauswahl	169
6.3.5.1	Mehrere Bedingungen, ein Ziel	170
6.3.5.2	Mehrere Bedingungen bei zwei und mehr Zielen	173
6.3.6	Cambridge Engineering Selector (CES)	177
6.4	Liste der Versuchswerkstoffe	181
6.5	Kontrollfragen	183
7	Phase IV – Evaluierung, Validierung und Werkstoffentscheidung	187
7.1	Ausgewählte Möglichkeiten der Evaluierung und Validierung	188
7.1.1	Grundlegende Bauteilberechnungen	188
7.1.2	CAD-Systeme	190
7.1.3	FEM-Systeme und Simulationen	191
7.1.4	Design of Experiments (DOE)	193
7.1.5	Prototypen und Rapid Prototyping	195
7.2	Endgültige Materialwahl	198
7.3	Anmerkungen zu den Kapiteln 8 und 9	200
7.4	Kontrollfragen	201
8	Informationsbeschaffung	202
8.1	Informationsbedarf und Datenqualität	202
8.2	Beschaffungsquellen	205
8.3	Zugang zu Printmedien	207
8.4	Rechnergestützte Informationssysteme	211
8.4.1	Einsatz in der Werkstoffwahl	211
8.4.2	Werkstoffdatenbanken und -informationssysteme	215
8.4.2.1	Über Werkstoffgruppen arbeitende Informationssysteme	217
8.4.2.2	Informationssysteme zum Schwerpunkt Stahl	218
8.4.2.3	Informationssysteme zum Schwerpunkt Nichteisenmetalle	220
8.4.2.4	Kunststoffe	221
8.4.2.5	Verbundwerkstoffe	224

8.4.2.6	Spezielle anwendungsspezifische Informationssysteme ..	224
8.4.2.7	Werkstoffinformationssysteme im Überblick	228
8.5	Kontrollfragen	228
9	Prozessbegleitende Methoden	230
9.1	Generell einsetzbare Methoden und Werkzeuge	231
9.1.1	Auswahl der Projektorganisation	231
9.1.2	Quality Function Deployment (QFD)	234
9.1.3	Checklisten	237
9.1.4	Design Reviews und Qualitätsbewertungen	237
9.2	Werkzeuge zur Ermittlung von Entwicklungsschwerpunkten	239
9.2.1	ABC-Analyse (Pareto-Analyse)	239
9.2.2	Kostenstrukturen	240
9.3	Werkzeuge zur Aufgabenklärung	241
9.3.1	Funktionsanalyse	241
9.3.2	Benchmark	242
9.3.3	Analyse des Ausfallverhaltens	243
9.4	Risikoanalysen.....	245
9.4.1	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA).....	246
9.4.2	Fehlerbaumanalysen (FTA)	248
9.5	Kontrollfragen	249
	Literaturverzeichnis	251
	Sachwortverzeichnis	254

Vorwort

Die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens hängt wesentlich davon ab, ob es mit innovativen, technisch überzeugenden und wirtschaftlich gestalteten Produkten auf den Weltmärkten bestehen kann. Neue Werkstoffe sind Impulsgeber für diese erforderlichen Produktinnovationen bzw. für innovativ weiterentwickelte Erzeugnisse. Fast kein Tag vergeht, an dem nicht ein neues Material auf den Markt drängt und nach seinen Anwendungen sucht. Vielversprechende neue Werkstoffeigenschaften, die von den Materialherstellern bewusst kreiert werden, bieten für Produkte erhebliche und teils überraschende Verbesserungspotenziale. Kunststoffe, Keramiken und Verbundwerkstoffe haben dabei die in der Vergangenheit fast ausnahmslos eingesetzten Metalle als anerkannte Konstruktionswerkstoffe aus vielen ihrer angestammten Plätze verdrängt. Dennoch dürfen die metallischen Werkstoffe nicht als Auslaufwerkstoffe angesehen werden. Hochwertige Stahl- und Gusseisensorten, Hochtemperaturlegierungen u. v. m. behaupten sich aufgrund verbesserter Eigenschaftswerte oder der Überwindung bisheriger Nachteile in vielen Anwendungen gegenüber der Konkurrenz aus den anderen Werkstoffgruppen. Die Ergebnisse dieser Entwicklungen sind beispielsweise die Zweiphasen-Stähle mit einer hohen Umformbarkeit für hochfeste Verbindungselemente, das Austempered Ductile Iron (ADI) mit hoher Verschleißfestigkeit und Härte, das Gusseisen mit Vermikulargrafit (GJV) für den Motorenbereich oder hochwarmfeste Gamma-Titan-Aluminide für den Einsatz in der Luftfahrtindustrie.

Wie aber wird der richtige Werkstoff für die Anwendung gefunden? In der Praxis wird häufig auf bewährte oder ähnliche Werkstofflösungen zurückgegriffen, um das Produktisiko möglichst gering zu halten. Man scheut sich vor einer Innovation durch ein neues Material, da Werkstoffgruppen wie die Keramiken, Gläser oder Polymere dem hauptsächlich metallisch geschulten Konstrukteur wenig bekannt sind. Es wachsen zwar zunehmend auch mit Kunststoffen arbeitende Konstruktionsabteilungen heran, aber deren Mitarbeiter gelten meist entweder als Metall- oder als Kunststoffexperten.

Der Anlass für dieses Lehrbuch über die methodische Werkstoffauswahl war die Erkenntnis, dass dem Konstrukteur nur wenige Hilfsmittel bei seiner Materialsuche über die Werkstoffgruppen hinweg zur Verfügung gestellt werden. Die daraufhin einsetzende Literaturrecherche bestätigte, dass kein ausgewiesenes Buch auf dem deutschsprachigen Markt vorhanden ist, welches die Grundzüge einer methodischen Werkstoffauswahl beschreibt.

Das Buch richtet sich daher an Studierende, insbesondere des zweiten Studienabschnitts (Diplom-, Bachelor- und Masterstudiengänge), denen nach den in der Regel auf die Gestaltung metallischer Bauteile ausgerichteten Konstruktionsvorlesungen und -übungen sowie den Vorlesungen der Werkstoffkunde die Potenziale einer innovativen Werkstoffauswahl nur wenig verdeutlicht wurden. Durch die vorgestellte Methodik wird versucht, die Befangenheit vor „neuen“ Werkstoffen abzubauen und den Einstieg in ein breiteres, „konstruktives“ Werkstoffwissen zu erleichtern. Insbesondere in den dargestellten Werkstoffschaubildern wird die notwendige Übersichtlichkeit in den Eigenschaftswerten aller Materialgruppen erreicht, sodass die Vorteile von Werkstoffen für den Anwendungsfall schnell erkennbar werden.

Darüber hinaus soll dieses Buch Konstrukteuren – gleichgültig, ob in Hoch- oder Technikerschulen ausgebildet – helfen, eingetretene Pfade bei der Werkstoffsuche zu verlassen, welche aufgrund der beschriebenen Vorliebe zu einer bestimmten Materialgruppe entstanden sind.

Schließlich soll das Lehrbuch auch Kollegen ansprechen, die mir im Grundsatz zustimmen und sich animiert fühlen, Übungen und Vorlesungen zur Materialauswahl aufzubauen.

Zuletzt sei denen gedankt, ohne die dieses Buch nicht zustande gekommen wäre. Ein besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Ashby vom Cambridge Engineering Design Centre der University of Cambridge (Großbritannien), der mit seinen englischsprachigen Publikationen die Grundlage für dieses Buch gelegt hat. Nur durch seine Bereitschaft zur Freigabe seiner Werkstoffschaubilder konnte unter der Mithilfe der Firma Granta Design (Großbritannien), einem der führenden Unternehmen für Werkstoffinformationstechnologie, diese grafische, vergleichende Darstellung von Materialkennwerten über die Werkstoffgruppen hinweg angeboten werden. Mein Dank gilt auch weiteren Firmen wie MC-Base (Aachen) und dem VDEh (Düsseldorf), die Abbildungen zur Verfügung gestellt haben.

Dem Fachbuchverlag Leipzig, im Speziellen Frau Christine Fritzsch, sei für die geduldige und vertrauensvolle Zusammenarbeit gedankt und die Möglichkeit, dieses Lehrbuch zu veröffentlichen.

Und da sind noch diejenigen, die mich in der langen Zeit der Manuskripterstellung häufig als Familienvater vermisst haben: Danke Andrea, Bjarne und Sverre – ohne Euch wäre dieses Buch nicht möglich gewesen.

Hannover, im Oktober 2006

Martin Reuter

Vorwort zur 2. Auflage

In dieser zweiten, aktualisierten Auflage werden zum einen die im Buch aufgeführten Informationsquellen des Internets auf den aktuellen Stand gebracht. Zum anderen wurde der Abschnitt 6.3.2 „Vereinfachte Werkstoffauswahl mit Werkstoffschaubildern und Materialindizes“ ergänzt, der die Möglichkeiten der vorgestellten Methodik anhand von kleineren Anwendungsbeispielen veranschaulicht. Mein Dank gilt wie bereits in der Erstauflage den im Vorwort benannten Personen, aber darüber hinaus nun den vielen Kommentaren und Hinweisen der Leser und Leserinnen zu den Inhalten dieses Buches.

Hannover, im Mai 2014

Martin Reuter

4 Phase I – Ermittlung der Materialanforderungen

Die Phase I des Werkstoffauswahlprozesses, die Ermittlung der *Materialanforderungen*, beinhaltet die drei Arbeitsschritte (*vergleiche Abb. 3-3*)

- *Analyse der Aufgabenstellung, Ermittlung der Produkt- und Bauteilanforderungen (Schritt 1.1),*
- *Analyse der Art der Entscheidungssituation und die daraus resultierende Wahl der Projektorganisation (Schritt 1.2),*
- *Übersetzung der Bauteilanforderungen in eine Materialanforderungsliste (Anforderungsprofil des gesuchten Werkstoffs, Schritt 1.3).*

Von der Produkt- zur Bauteilanforderungsliste

Der Schritt 1.1 des Werkstoffauswahlprozesses entspricht dem Schritt 1 des in *Abb. 3-2* dargestellten Ablaufs „Entwickeln und Konstruieren“ nach VDI-Richtlinie 2221 /6/. Aus diesem Arbeitsschritt „Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung“ geht das Dokument „Anforderungsliste“ für ein Produkt hervor, die als Maßgabe zu jedem Zeitpunkt des weiteren Produktentwicklungsprozesses zu beachten ist. Eine Pflege dieser Anforderungsliste über den Entwicklungszeitraum beinhaltet insbesondere das Einbeziehen neuer bzw. das Streichen nicht mehr relevanter Forderungen im Einvernehmen mit dem Entwicklungsteam und dem Kunden. Fast immer werden aus der Anforderungsliste detailliertere auftraggeberseitige Lasten- bzw. auftragnehmerseitige Pflichtenhefte angefertigt.

Die Erstellung der Anforderungsliste für ein Erzeugnis ist immer die Vorstufe der Ermittlung von Werkstoffanforderungen, da die Produkteigenschaften das erforderliche Eigenschaftsprofil des Materials in den wesentlichen Punkten festlegen. Ohne deren Wissen kann ein Material nicht systematisch ausgewählt werden.

Da die Materialsuche nicht für ein Erzeugnis, sondern für seine Bauteile erfolgt, müssen die Anforderungen für das Produkt auf seine Bestandteile heruntergebrochen werden. Dabei spielen die Funktionen dieser Komponenten eine maßgebende Rolle. Sie werden bei der Erstellung einer Funktionsstruktur deutlich. Für diese in der Konstruktion dazu eingesetzte Methodik der *Funktionsanalyse* finden sich ausführlichere Beschreibungen in Lehrbüchern (z. B. /8/, /4/; *siehe auch Abschnitt 9.3.1*). Zum Gesamtverständnis soll nur kurz auf die Vorgehensweise eingegangen werden.

Das Produkt wird in der Konstruktionsmethodik als *technisches System* bzw. als Teil eines technischen Systems angesehen. Es besteht (in der Regel) aus Baugruppen, die sich aus Bauteilen zusammensetzen. *Entscheidend für das erfolgreiche Konstruieren ist es, Klarheit über die Funktionen der Bauteile und Baugruppen eines Produkts zu gewinnen.* Diese Funktionen sind eng mit Anforderungen (und Wünschen) verknüpft. Dazu ist selbst für einfache technische Systeme die Erstellung der Funktionsstruktur anzuraten. Durch schrittweise Auflösung in die kleinstmöglichen sinnvollen funktionalen Elemente entsteht ein hierarchisches System miteinander verknüpfter Funk-

tionsbauelemente. Jedes dieser Elemente im Gesamtsystem setzt *Energie, Material oder Information (Signale)* entsprechend dem definierten Produkt-, Baugruppen- oder Bauteilzweck um und nimmt entscheidende *Teilfunktionen* der Gesamtfunktion wahr. Miteinander verknüpft beschreibt die Gesamtstruktur das Produkt in allen funktionalen Einzelheiten. Mit Hilfe der *Funktionsstruktur* lassen sich auch wesentliche Baugruppen und Bauteile eines Erzeugnisses und damit Entwicklungsschwerpunkte identifizieren.

Abb. 4-1 zeigt das Ergebnis der Funktionenanalyse für einen Reitstock einer Werkzeugmaschine. In *Teilbild a* wird die Gesamtfunktion dargestellt, welche in *Teilbild b* in unterschiedliche, dem Material-, Signal- und Energiefluss folgende Teilfunktionen zerfällt.

Die Produkthanforderungen führen zu Bauteilanforderungen; die Bauteilanforderungen führen zu Materialanforderungen. Um diese zu ermitteln, ist die Analyse der Funktion von Bauteilen ein unverzichtbarer Schritt, da die Funktionserfüllung wesentlich vom Werkstoff mitgetragen wird.

Produkt, Baugruppe, Bauteil und Material

Für alle Bauteile eines Produkts sind Werkstoffe zu wählen. Die getroffenen Materialentscheidungen müssen dazu beitragen, die *Teilfunktion* zuverlässig zu erfüllen. Analog der Anforderungsliste der Produktentwicklung sind nun für das Bauteil und seine Teilfunktion im Produkt die Anforderungen, Wünsche und Ziele zu definieren. Diese Aufgabe fällt dem Konstrukteur des Bauteils im Konsens mit allen Beteiligten zu.

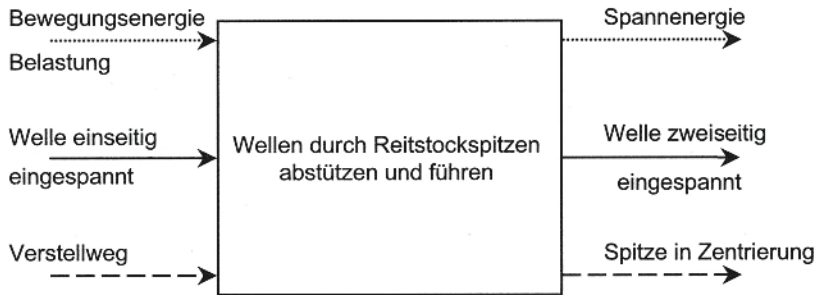
Die ganze Vielfalt der *Anforderungskriterien* (Wirtschaftlichkeit, technische sowie technologische Eigenschaften) resultiert – wie bereits eingangs erwähnt – in einer Festschreibung von Forderungen und Wünschen. Um eine Übersetzung der Bauteil- in Materialanforderungen zu erleichtern, sind leicht veränderte Gliederungsgesichtspunkte anzuwenden. Für die Werkstoffauswahl ist eine Einteilung in

- *Bauteilziele* (Produktziele),
- *Bauteilforderungen* (Produktforderungen) und *damit verbundene Bauteileinschränkungen* (Produkteinschränkungen) sowie
- *Bauteilwünsche* (Produktwünsche)

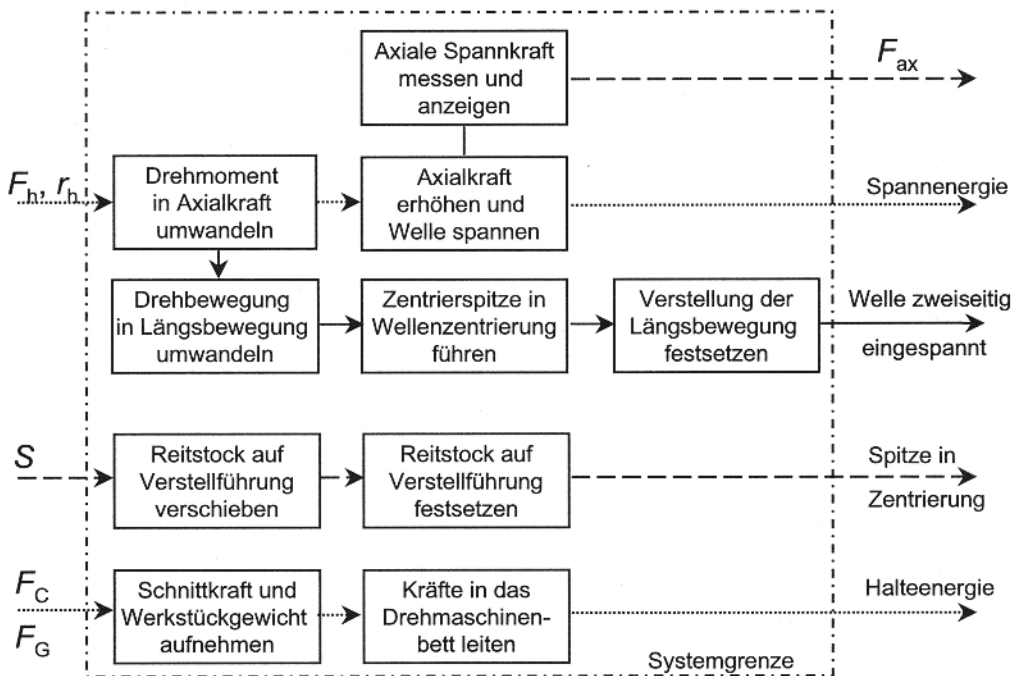
günstiger.

Typische *Bauteilziele* sind ein niedriges Gewicht, ein geringes Bauvolumen oder möglichst niedrige Herstellkosten, wobei in der Regel die Konstruktion nicht nur einem Ziel folgt, sondern meist miteinander in Wechselwirkung stehende Ziele die Aufgabe erschweren.

Bauteilforderungen (-bedingungen) sind meist aus technischen Anforderungen des Produkts abgeleitet. Dazu zählen beispielsweise eine maximale Einsatztemperatur, denen das Bauteil ausgesetzt wird, oder maximal zulässige Formänderungen (Durchbiegung, Verdrillung) oder die Notwendigkeit, einen guten Wärmeübergang zu bewerkstelligen. Wünsche an eine Komponente sind an *technische, technologische, wirtschaftliche*, aber auch an *ästhetische Produktmerkmale* geknüpft (z. B. Fertigung durch Drehen, glänzende Oberfläche).



a) Gesamtfunktion Reitstock



b) Funktionsstruktur für die Gesamtfunktion Reitstock

Abb. 4-1: Funktionenanalyse für einen Reitstock /4/

Für die Materialauswahl sind viele dieser geforderten bauteil- und produktspezifischen Eigenschaften in werkstoffspezifische Forderungen und Bedingungen zu übersetzen. Für schwierigere Werkstoffauswahlprozesse sollte auf jeden Fall eine Anforderungsliste an den Werkstoff formuliert werden. Sie ist die Grundlage einer methodischen, systematischen Werkstoffauswahl; ihre Erstellung wird ausführlich in Abschnitt 4.3 behandelt.

Die Ableitung von Materialanforderungen gelingt leichter, wenn die Bauteilziele, die Bauteilbedingungen und die Bauteilwünsche erkannt werden.

Es sei daran erinnert, dass die Werkstoffauswahl nicht für jede Komponente eines Produkts einer ausführlichen Systematik und Dokumentation bedarf. Vielmehr sind über die Hauptaspekte wie Kosten, Funktion, Sicherheit, Zuverlässigkeit die *Entwicklungsschwerpunkte* zu erarbeiten (siehe Abschnitt 9.2).

Im Schritt 1.2 „Analyse der Art der *Entscheidungssituation* und *Wahl der Projektorganisation*“ (vergleiche Abb. 3-3) ist bauteilbezogen zu prüfen, in welcher Weise der Werkstoffauswahlprozess zu organisieren ist. Je nach *Komplexität* der Materialsuche (Bekanntheitsgrad des Werkstoffs, Konstruktions- und Produktart sowie wirtschaftliches Risiko z. B. aufgrund der Losgröße; vergleiche Abschnitt 2.2) ist der Prozess entsprechend zu gestalten. Hier entscheidet die richtige Wahl der Projektorganisation über den Erfolg des Prozesses mit (vergleiche Abschnitt 9.1.1).

In Schritt 1.3 steht die für den Erfolg einer Materialsuche entscheidende, sorgfältig durchzuführende Übersetzung der Bauteil- in Werkstoffanforderungen an. Die *Materialanforderungsliste* definiert das Anforderungsprofil, welches mit den Eigenschaftsprofilen von Materialien verglichen werden kann. Vor der Beschreibung, wie die Anforderungsliste für einen Bauteilwerkstoff erfolgreich erstellt wird, soll zunächst ein zentrales Problem der Werkstoffauswahl angesprochen werden. Die Materialsuche für ein Bauteil muss stets

- *Material*,
- *Funktion*,
- *Gestalt (Form) und*
- *Fertigungstechnologie*

und deren *Wechselwirkungen* berücksichtigen.

4.1 Wechselwirkungen mit dem Konstruktionswerkstoff

Die *Wechselwirkungen* zwischen *Konstruktion* (Funktion und Gestalt), *Technologie* und *Werkstoff* verhindern bei der Werkstoffauswahl eine in allen Punkten optimale Lösung. Technische Optimierungen konkurrieren vielfach mit wirtschaftlicher Fertigung oder dem Einsatz kostengünstiger Materialien. Abb. 4-2 versucht, die wesentlichen Verknüpfungen zwischen diesen unterschiedlichen Blickwinkeln der Konstruktion aufzuzeigen.

Funktion, Beanspruchung, Gestalt und Größe

In erster Linie hat die Konstruktion des Bauteils der *Funktion* zu folgen, die es im Zusammenwirken mit anderen, meist den umgebenden Konstruktionselementen erfüllt. Wird sie nicht zuverlässig verrichtet, sind dem Produkt nur geringe Marktchancen einzuräumen. Dazu sind die Beanspruchungen in Bezug auf die Dimensionierung des Bauteils als auch die *Gestalt (Form und Größe)* zu berücksichtigen.

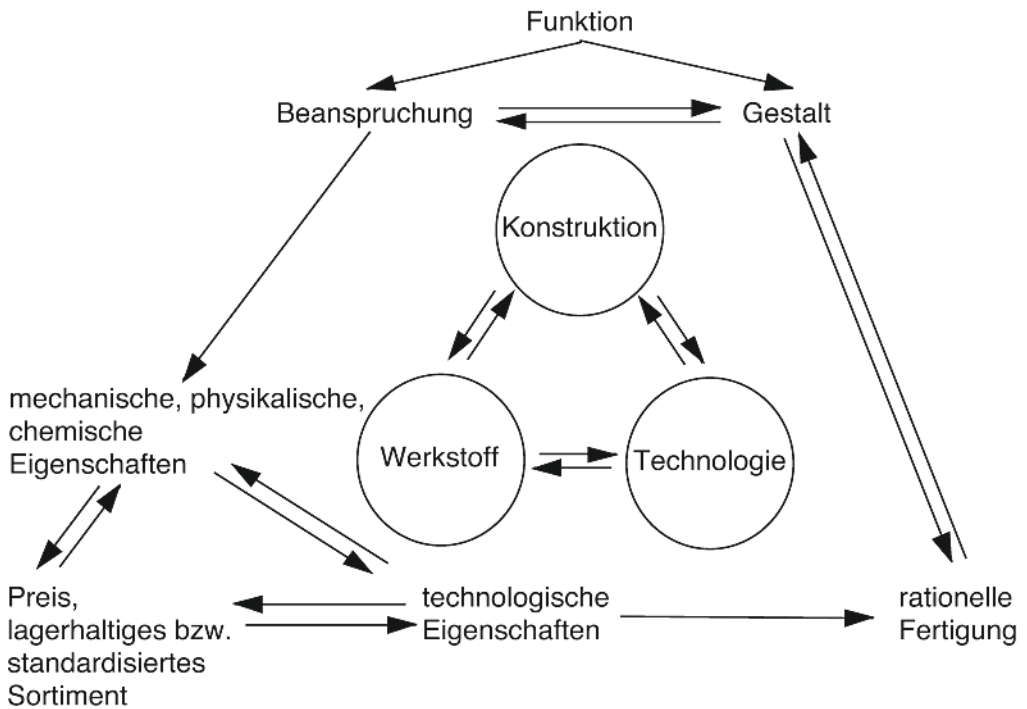


Abb. 4-2: Materialauswahl unter dem Gesichtspunkt der Einheit von Konstruktion, Werkstoff und Technologie /14/

Die *Festlegung von Abmessungen* (Dimensionierung) folgt in der Anfangsphase nach den grundlegenden Rechenweisen der Ingenieurwissenschaften. Im Laufe des Entwicklungsprozesses konkretisieren sich diese Maße entsprechend dem Fortschritt der Konstruktion vom Entwurf zur Ausarbeitung. Dabei werden je nach Produkthanforderung auch rechnergestützte Verfahren zur Dimensionierung und zur Sicherstellung von Funktionsanforderungen eingesetzt.

Die Gestalt folgt im Allgemeinen Maschinenbau weniger ästhetischen Gesichtspunkten als eher der Wechselwirkung mit der Funktion. Daraus resultiert eine Formgebung, die den mechanischen, thermischen, chemischen oder gemischten Anforderungen so weit als möglich genügt. Die daraus in den letzten Jahrzehnten abgeleiteten Entwicklungsregeln werden heute als „Design for X“ bezeichnet (*vergleiche /13/*). Das „X“ steht dabei für unterschiedliche Zielrichtungen bei der Produktentwicklung, z. B. beanspruchungsgerechtes, montagegerechtes, fertigungsgerechtes, recyclinggerechtes oder umweltgerechtes Design.

Einige (allgemein gültige) konstruktive Regeln sollen dies erläutern:

- Ein oberstes Konstruktionsprinzip der Formgebung ist im Hinblick auf die mechanische Beanspruchung eine möglichst kerbwirkungsfreie Bauteilgestaltung. Bauteilabschnitte werden darüber hinaus über die Wahl optimierter Querschnittsformen den auftretenden Belastungsarten angepasst.

- Die Vermeidung von Sammelstellen für ein korrosives Medium verringert über die Formgebung der Schweißnähte und -teile die Korrosionsgefahr.
- Eine Überhitzung thermisch beanspruchter Teile wird durch eine entsprechende Gestaltung von Querschnittformen umgangen.
- Eine symmetrische Konstruktion von Bauteilen hilft bei automatischer Ausrichtung von Bauteilen. Falls die Symmetrie nicht erreicht werden kann, sollten konstruktive Merkmale das Erkennen von Bauteilasymmetrien erleichtern.

Drei dieser Beispiele zeigen die vielfach starken Einflüsse der Gestalt auf die Werkstoffwahl. Bei unvermeidlicher Kerbwirkung im Bauteil verbietet sich i. Allg. der Einsatz spröder Werkstoffe. Sammelstellen für korrosive Medien erfordern Korrosionsbeständigkeit gegen einwirkende Medien. Durch optimierte thermische Eigenschaften eines Werkstoffs kann einer Überhitzung vorgebeugt werden.

Bei der Suche nach einem Material sind die vielschichtigen Wechselwirkungen zwischen Konstruktion, Werkstoff und Technologie zu berücksichtigen. Sie zeichnen sich für die hohe Komplexität von Werkstoffauswahlprozessen verantwortlich.

Gestalterische Möglichkeiten dürfen vom Konstrukteur nur im Rahmen einer noch guten *Wirtschaftlichkeit* des Bauteils ausgeschöpft werden. Diese Wirtschaftlichkeit wird wesentlich von der *Wahl der Fertigungstechnologie* mitbestimmt; Fertigungszeiten, die Verfügbarkeit von Fertigungstechnologien usw. tragen einen wesentlichen Teil zu den Herstellkosten bei.

Technologie

Die Entscheidung für eine Technologie, mit der ein Bauteil erzeugt wird, folgt hauptsächlich der Bewertung der Kriterien:

- *Herstellkosten,*
- *Herstellbarkeit und*
- *umsetzbare Mikro- und Makrogeometrie.*

In Bezug auf die **Herstellkosten** ist zu berücksichtigen, dass eine Werkstoffwahl günstige Fertigungstechnologien von vornherein ausschließen kann. So ist nicht jeder Werkstoff – wie z. B. die technischen Keramiken – spanend bearbeitbar. Auch die „Montage“ von Bauteilen mittels Schweißens ist nicht für jeden metallischen Werkstoff durchführbar bzw. nur mit hohem Aufwand realisierbar. Spritzguss, ein Verfahren, welches der Bauteilgestaltung höchste Freiheiten einräumt, ist den Kunststoffen und unter diesen verstärkt den Thermoplasten zuzuordnen. Verfahrenstechnisch aufwendiger ist der Spritzguss von vernetzenden Polymeren (wie Elastomere und Duroplaste, *vergleiche /15/*).

Die kostengünstigen spanenden Verfahren werden am häufigsten zur Herstellung der Endkontur eines Bauteils eingesetzt, wobei vorab Massenteile geschmiedet, gegossen oder gesintert werden. Nachbearbeitungen zur Verbesserung der Oberflächenqualität und der Toleranzen erfolgen bei metallischen Werkstoffen meist durch Schleifprozesse. Alternativ zum Spanen bietet sich die Blechverarbeitung an: Blechteile können bei alternativer Gestaltung durchaus kostengünstige Lösungen darstellen, die in Festigkeit und Steifigkeit Massivteilen nicht nachstehen /16/. Die Umformverfahren sind nicht

auf die metallischen Werkstoffe beschränkt, sondern lassen sich mit den verfahrenstechnischen Abwandlungen auch für Kunststofftafeln nutzen.

In der Industrie gewinnen *endformnahe Formgebungsverfahren* (im Englischen: Near Net Shape Forming) immer stärker an Bedeutung, die mittels Urformen und Umformen die Endkontur in einem Bearbeitungsschritt herstellen. Mit der Reduzierung der Zahl notwendiger Fertigungsschritte werden auch die Herstellkosten geringer. Bereits etablierte Verfahren sind das Fließpressen (z. B. Verzahnungen, Keilwellen), der Feinguss (z. B. feinmechanische Bauteile von Nähmaschinen) oder das Rundkneten (z. B. Rohre mit Einstichen). Als neuere Entwicklungen seien das Präzisions schmieden, das Pulverschmieden, der Metallspritzguss oder superplastisches Formen (von Aluminiumlegierungen) genannt (*siehe /17/*).

Eine gewünschte rationelle Fertigung ist stets unter dem Aspekt der Verfügbarkeit zu sehen. Dabei steht ein Szenario häufig im Vordergrund: die „*Make or Buy*“-Frage. Es ist zu prüfen, ob ein Bauteil außerhalb des Unternehmens günstiger gefertigt werden kann als intern. Dieser Prüfung sind in den letzten zwei Jahrzehnten Eigenfertigungskapazitäten von vielen Unternehmen zum Opfer gefallen; vielfach wurde nur die Montage der Produkte aufrechterhalten. Die dazu notwendigen Teile werden in Niedriglohnländern fabriziert. Auch die Betriebsmittelentwicklung und der Betriebsmittelbau wurden – soweit nicht damit ein geschäftsschädigender Know-how-Verlust einherging – auf externe Lieferanten (Konstruktionsbüros, Teile- und Maschinenhersteller) übertragen.

Bei diesen „*Make or Buy*“-Überlegungen sind bauteilbezogene, konstruktive Aspekte mitentscheidend, auch ob ein Werkstoff im eigenen Unternehmen überhaupt verarbeitet werden kann. Wenn die Größe des Bauteils eine Eigenfertigung untergräbt, da die vorhandenen Werkzeugmaschinen über keine ausreichenden Spannmöglichkeiten oder Verfahrenswege verfügen, ist die Bauweise eines Teils zu hinterfragen. Ähnliches gilt, wenn dadurch hohe Transportkosten verursacht werden und so eine Fremdfertigung sehr teuer wird. Die *Differenzialbauweise*, die das Bauteil aus Einzelteilen zusammensetzt, konkurriert mit der *Integralbauweise* „aus einem Stück“ (Massivteil). Erstere Bauart führt zu kleineren Komponenten; möglicherweise erlaubt dies eine Fertigung im Haus, löst die Problematik hoher Transportkosten oder vermeidet den für ein großes Bauteil notwendigen Kauf teurer Fertigungsmittel.

Herstellkosten werden von der Wahl der Fertigungstechnologie wesentlich mitbestimmt. Endformnahe Herstellweisen werden gegenwärtig immer gebräuchlicher, da sie deutlich geringere Nacharbeitskosten erfordern. Auch eine „*Make or Buy*“-Entscheidung ist in die wirtschaftlichen Überlegungen einzubeziehen.

Hinsichtlich der Verbindungstechniken von Bauteilen lassen sich die Herstellkosten insbesondere durch geeignete Konstruktionsweisen reduzieren.

Bei all diesen Betrachtungen ist stets die Materialabhängigkeit des Herstell- oder Fügeprozesses zu beachten.

Ein zweites Entscheidungskriterium bei der Wahl einer Technologie ist im Hinblick auf den Werkstoff die grundlegende Beurteilung der **Herstellbarkeit**. Fertigungsverfahren stoßen je nach Rohmaterial und Halbzeugtyp an *Verfahrensgrenzen*. Beispielsweise kann die Größe eines Strangpressprofils nicht beliebig groß (oder klein) gewählt

werden. Beim Druckgießen können werkstoffabhängig für Aluminiumlegierungen Gussgewichte bis 50 kg, für Zinklegierungen bis 20 kg, für Magnesiumlegierungen bis 15 kg und für Kupferlegierungen bis etwa 5 kg realisiert werden. Der Feinguss erlaubt Grenzgewichte im Bereich von mehreren Kilogramm und nur in Sonderfällen bis 100 kg.

Die Herstellbarkeit umfasst dabei nicht nur die *Fabrikation* des Bauteils, sondern ebenso die Verfahren zur Einbindung eines Bauteils in seine konstruktive Umgebung. Auch bei dieser Wahl sind in Bezug auf die Herstellkosten kostenintensivere gegenüber günstigeren Verfahren abzuwägen. Der Fokus auf die Herstellbarkeit muss sich vor allem den Wechselwirkungen zwischen der Technologie und dem Material widmen: So ist die Eignung für eines der Wirkprinzipien der *Fügetechnologien*, Stoff-, Form- oder Kraftschluss, je nach Werkstoff (oder -familie oder -gruppe) unterschiedlich zu bewerten. Verbindungstechniken sind auf Werkstoffe abzustimmen und umgekehrt; dies ist bei der Ermittlung der Werkstoffanforderungen im Materialauswahlprozess unbedingt mit ins Kalkül zu ziehen.

Gleichermaßen muss dem Konstrukteur stets bewusst bleiben, dass die „Bearbeitung“ des Materials – sei es beim Fabrizieren, sei es beim Fügen des Bauteils – gravierende *Veränderungen der Werkstoff- und somit Bauteileigenschaften* bewirken kann. Wer dies übersieht, bereitet den Nährboden für das spätere Versagen. Insbesondere thermische Effekte spielen dabei maßgebende Rollen: Nicht ausreichende Kühlung bei der spanenden Bearbeitung einer Komponente, temperaturbeeinflusste Zonen beim Schweißen können die Festigkeiten oder das plastische Formänderungsvermögen eines Materials drastisch verändern und damit den Ausfall des Bauteils bewirken.

Technologiefragen können durchaus zum *frühzeitigen Ausschluss* von Werkstoffen durch die Konstrukteure der Entwicklungsabteilungen führen. Der Werkstoffsuchende benötigt außerhalb der Kenntnisse über die physikalischen, mechanischen und chemischen Eigenschaften des Materials spezielles *Fachwissen über Herstell- und Fügetechniken*. In der Praxis sind dem „Metaller“ einer Konstruktionsabteilung Kunststoffe noch weitgehend bekannt, Techniken zur Fabrikation einer alternativen Kunststoffkomponente sind für ihn jedoch häufig Neuland. Darüber hinaus wird zur Weiterverarbeitung des Teils ein fundiertes Wissen über Verbindungstechniken abgefordert. Diese Informationsdefizite lassen den Entwickler lieber bereits eingetretene Pfade beschreiten; er wird sich eher unter den Metallen innovative Werkstoffe suchen, die bekannte Fabrikations- und Fügeverfahren verwenden. Ein entsprechendes Szenario ist für den Kunststoffkonstrukteur hinsichtlich der Informationsmankos bei metallischen Materialien zu skizzieren. Noch einschneidender werden diese Know-how-Problematiken bei weniger weit verbreiteten Konstruktionswerkstoffen und Werkstoffneuentwicklungen. Der Leser möge sich selbst hinterfragen, welches Wissen über die Herstellung und das Verbinden von Bauteilen aus Materialien wie Metall- und Kunststoffschäumen, faserverstärkten Verbunden (wie GFK, CFK, MFK) oder Superlegierungen bei ihm verfügbar sind. Das bedeutet, dass man „fremden“ Werkstoffen oder gar Werkstoffgruppen gerne aus dem Wege geht, um unnötige Risiken für das Produkt zu vermeiden. Mangelndes Wissen wird zum Ausschlusskriterium, obwohl sich die Materialien für den Anwendungsfall bestens eignen würden.

Bei der Werkstoffauswahl für ein Bauteil ist die Herstellbarkeit von Halbzeugen (oder anderen Vorprodukten) zu prüfen, da unterschiedliche Materialien unterschiedliche Fertigungsweisen und -grenzen nachsichziehen. Ebenso müssen Fügeprozesse in Zusammenhang mit den Materialeigenschaften bewertet werden. Fehlende Kenntnisse über Fertigungstechnologien sind dabei häufig Ursache für den Ausschluss von durchaus möglichen Werkstofflösungen.

Die Anforderungen an die **Mikro- und Makrogeometrie** eines Bauteils (Fein- und Grobgestalt) schränkt ebenfalls die Wahl eines Fertigungsverfahrens ein und ist daher als ein drittes wesentliches Kriterium für die Technologieauswahl zu beachten. Die Qualität von *Toleranzen* (Toleranzgrade IT) und *Oberflächen* (gemittelte Rautiefe R_z , Mittenrauwert R_a usw.) sind dabei ebenso wie die *Makrogeometrie* (Form) des Bauteils in die Überlegungen einzubeziehen. Zudem sind materialspezifische *Gestaltungsregeln* des Fertigungsverfahrens zu beachten.

So bieten im Sandguss gefertigte Bauteile nur grobe Toleranzmaße und Oberflächen-güten; unter Beachtung der für das Gießen notwendigen Gussströgen zum Entformen ist die Formgestaltung des Bauteils gegenüber anderen Herstelltechniken aber quasi beliebig. Lediglich aus Kostengründen sind Hinterschneidungen in Gießformen zu vermeiden, um die Zahl notwendiger Gießkerne gering zu halten. Auch Regeln zur Festlegung der Trennebene sind zu beachten.

Das Drehen lässt nur die Herstellung rotationssymmetrischer Bauteile zu, die (beliebigen) Querschnitte stranggepresster Teile erstrecken sich in eine Pressrichtung. Andere Fertigungstechniken wie das Schmieden, die Blechverarbeitung, das Schleifen usw. haben andere fertigungsspezifische Auswirkungen auf die Formgebung des Erzeugnisses, seine Oberflächeneigenschaften und seine geometrischen Toleranzen.

Die erzielbare Mikro- und Makrogeometrie sowie die Gestaltungsregeln eines Fertigungsverfahrens sind bei der Wahl der Herstellweise eines Bauteils zu prüfen, um Funktionsflächen mit einem gewählten Werkstoff in hinreichender Qualität zu fertigen.

Datsko /18/ hat zu den aus fertigungstechnischer Sicht entscheidenden Fragestellungen eine *Checkliste* erarbeitet, die das Zusammenwirken von Technologie, Gestalt, Funktion und Material analysieren und diesbezüglich Fehler im Konstruktionsprozess vermeiden helfen. Bei unserer Aufgabe, der Ermittlung der Materialanforderungen, hilft sie den Blick auf die materialspezifischen Wechselbeziehungen zu lenken. Aufgrund des Umfangs soll dieses Hilfsmittels in einem eigenen Abschnitt vorgestellt werden (*vergleiche Abschnitt 4.4*).

Werkstoff

Schließlich setzt die Aufgabe nicht nur bezüglich der mechanischen, physikalischen, chemischen sowie technologischen Anforderungen Randbedingungen in der Materialwahl. Hinsichtlich der Wechselwirkung mit der Technologie und der Konstruktion des Bauteils sind ebenso auf die *Wirtschaftlichkeit* des Produkts einwirkende Gesichtspunkte zu beachten. Direkten Einfluss auf die *Herstellkosten* haben in erster

Sachwortverzeichnis

A

- ABC-Analyse (Pareto-Analyse) 239
- Abfall senken 91, 93
- Analyse des Ausfallverhaltens 243 ff.
- Anforderungsprofil 46, 49, 60 ff., 101, 203
- Anpassungskonstruktion 26
- Arbeits-, Leitblätter 40 f.
- Aufgabenklärung 39, 241 ff.
- Ausarbeitungsphase 34 ff., 204
- Ausschlusskriterien 108
- Auswahlmethode nach Ashby 158 ff.
- , grafische Auswertung im Werkstoff-schaubild 173
- , mehrere Bedingungen, ein Ziel 170
- , mehrere Bedingungen, zwei und mehr Ziele 173
- mit Materialindizes 158 ff.
- , Rangliste 173
- , Vorauswertung der Zielwerte 172

B

- Bauteil
 - -anforderungen 46
 - -einschränkungen 48
 - -forderungen 48
 - -gewichte und -größen 74
 - -wünsche 48
 - -ziele 48
- Bekanntheitsgrad 23 ff.
- Benchmark 97, 242
- Berechnungen, grundlegende 188
- Beurteilungskriterien 38, 141 ff.
- Bewertung 38, 141 ff.
- , Einbeziehung von Grenzwerten 155
- , Ungleichbewertung 157
- Bewertungskriterien
 - siehe Beurteilungskriterien
- Bewertungsrichtung
 - 66 f., 71 f., 135, 141, 153 ff.
- Bewertungsverfahren 142 ff.
- im Überblick 157
- , klassische 142 ff.
- , Komplexität 143
- , mehrdimensionale 143 ff., 151
- ohne Gewichtung 150

- Bruchzähigkeit 114 f., 162
- Bruttowerkstoffkosten 88

C

- CAD-Systeme 190 ff.
- Cambridge Engineering Selector (CES)
 - 111, 136, 158, 169, 177 ff., 203, 217
- , Auswahlmethodik 180
- , Material Universe 177 f.
- , Process Universe 179 f.
- Checkliste 61, 237
- Chemische Beständigkeit 224
- CAE-Systeme (Daten) 213

D

- Datenqualität 202, 205
- Datensicherheit 214
- Datenstruktur, standardisierte 213
- Deming-Zyklus 188, 238
- Design for X 50
- Designlinie 159 ff.
- , Beispiele 162 ff.
- Design of Experiments (DOE) 194
- Designparameter 131 ff.
- Design Reviews 237 f.
- Dichte 109, 111 f.
- Differenzialbauweise 52, 78, 94
- Dimensionierung 50 ff.

E

- Eigenschaftsprofil
 - 46 f., 60 ff., 101 ff., 140 ff.
- Einschränkende Bedingungen
 - 64 ff., 105, 169 ff.
- Elastizitätsmodul
 - 109, 111 f., 113 f., 117, 124, 128
- Endgültige Materialwahl 198
- Entscheidung 38, 187, 193
- Entscheidungssituation 23 f., 49
- Entscheidungsvorlage
 - -präsentation, -papier 38, 187, 198
 - , Inhalt 198
- Entwicklungsschwerpunkte
 - , Ermittlung 239 ff.
- Entwurfsphase 33 ff., 202
- Evaluierung 38 f., 181 ff.
- Expertensysteme 215

F

- Fachbücher 207
- Fehler
 - bei der Herstellung 84
 - bei der Verwendung 82
- , Fehlerhafte Materialwahl 19, 80
- , Konstruktionsfehler 80
- Fehlerbaumanalysen (FTA) 248
- Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) 246
- Feinauswahl und Bewertung 38, 136, 140 ff., 203
- FEM-Systeme 191
- Fertigung
 - , Aufwand 74
 - , Auswahl der Technologie 51
 - , Einzel-, Serien-, Massen- 17, 75
 - , Kosten 55, 86, 89
 - , Regeln von Datsko 75
 - , Technologie 51
 - , Verfahren 168 f.
- Festigkeit 111, 113 f., 118, 128 f.
- Formfaktor 163 ff.
 - , Anwendung im Werkstoffschaubild 168
 - , Festigkeitsbegrenzte Auslegung 164
 - , Verformungsbegrenzte Auslegung 164
- Fragenkatalog 61 f.
- Freie Konstruktionsparameter 64, 67 f., 131 ff., 171
- Freiheitsgrade 67, 168
- Funktion(en) 35, 64
 - , Funktionsanalyse 46, 241
 - , Funktionsgleichung 65
 - , Funktionsstruktur 46, 241
- Funktionsindex 131 ff.

G

- Gebrauchseigenschaften 55
- Gebrauchswert 16
- Geometrieindex 131 ff.
- Gesamtnutzwert 144, 153 f.
- Gesetze des Marktes 16
- Gewichtete Bewertung 144 ff.
- Gewichtungsfaktoren 38, 145 ff.
 - , Absolute Gewichtung 147
 - , Direkte Gewichtung 146
 - , Paarvergleiche 148
 - , Zielsysteme 148 f.
- Grundaussage, Statement 71

H

- Härte 127
- Herstellbarkeit 51 f.
- Herstellkosten 51 ff., 86 ff.

I

- Ideallösung 154
- Immaterielle Aspekte 42
- Informationsbeschaffung 107, 140, 202 ff.
 - , Beschaffungsquellen 205
 - im Überblick 228
 - , Informationsbedarf 202 f.
 - , Informationssysteme 211 ff.
 - , Kunststoffe 221
 - , Nichteisenmetalle 220
 - , spezielle Themen 224
 - , Stahl 218
 - über Werkstoffgruppen hinweg 217
 - , Verbundwerkstoffe 224
- Integralbauweise 52, 78

K

- Kerbwirkung 80
- Klärung der Aufgabenstellung 34
- Klassifizierung von Prototypen 197
- Kleinbau 91 f.
- Komplexität 22 ff., 46, 143
- Kompromisslinie 174
- Konstruktion 49
 - , Grundprinzipien 65
- Konstruktionsart 26
- Konstruktionssystematik 33
- Konstruktive Mängel 19
- Konzeptphase 34
- Kostenaspekte 134
- Kostenstruktur 90, 240
- Kriterien für die Vorauswahl 104
- Kundenwunsch 16

L

- Langzeitverhalten 59
- Lebenslaufkosten, -zykluskosten 86
- Leichtbau 91 f.
- Liefermengen 96
- Liste der Versuchswerkstoffe 38, 140, 181 f., 187, 198
 - , Eignungsprüfung 182
- Liste möglicher Materiallösungen 38, 136 ff., 181

Literaturrecherchen 208

Lösungsfindung 32 f.

M

Marketinganforderungen 97

Materialanforderungen 35 f., 44 ff.

- aus Kostensicht 86

-, fertigungstechnische 73

-, Quellen 73

Materialanforderungsliste

38 ff., 49, 60 ff., 140 ff., 202

Materialindex

131 ff., 150 f., 158 ff., 171 f.

-, Beispiele 162 ff.

-, anwendungstypische Indizes 160

-, in Werkstoffschabildern 158 ff.

Materialkosten 17, 86 ff.

-, Materialkostenanteil 91 f.

-, Rohmaterialkosten 93

-, Rohmaterialpreis 55

Maximale Einsatztemperatur 118

Mehrfachziele 169, 173 f.

Mehrpunktstabellen 60

Methode der gewichteten Punkte-
bewertung 145, 152 ff.

Mikro- und Makrogeometrie 51, 54, 74

Missbrauch 19, 79

Modellbildung 65, 188

Montagefehler 79, 85

N

Nachvollziehbarkeit 31 ff., 142 ff.

Neue Produkte 18

Neukonstruktion 26

Normen 16, 20

Normierungsfaktoren, Ermittlung 175 ff.

O

Ober- und Untergrenzen 63 ff., 156 ff.

P

Paarvergleiche 147

Patentrecherchen, Patentrecht 97, 210

Penaltyfunktion 169, 175 ff.

Perceived value 176

Printmedien, Zugang 207

Problemlösungszyklus 31 f.

Produkt

- -art 25, 27

- -kosten 16 f.

- -risiko 29

- -strategie 18

- -varianten 18

Produktanforderungen 35, 47

Projektmanagement 36

Projektorganisation 25, 49, 231 ff.

Prototypen 195

Q

Qualitätsbewertungen 237 f.

Qualitätskosten 55

Qualitätsmanagementwerkzeuge 36

Qualitätsprobleme 16, 19

Quality Function Deployment (QFD) 234

Quantifizierbarkeit 42

R

Randbedingungen 64 ff., 133

Rangliste, -folge 143 ff.

-, Auswertemethoden für die
Erstellung 149 ff.

- der Materiallösungen 181

Rankingfaktor 156 ff.

Rapid Prototyping 195 ff.

Rapid Tooling 197

Regeln von Datsko 75

Reibungskoeffizient, Reibwiderstand
126 ff.

Relativkosten 88, 128 ff.

Reparable Produkte 244 f.

Reparatur 19

Risiken 198

-, unternehmerische 199

Risikoanalysen 36, 79 ff., 245 ff.

Robustheit 85, 194

S

Schäden, Schadensfälle 19, 78 ff.

Schweißtechnik 225

Schwerpunktbildung 43, 91, 239 ff.

Simulation 188 f., 191 ff.

-, Werkstoffvergleich 193

-, Werkstoffverhalten 191

Situationsanalyse 31 f., 80

Sparbau 91 ff.

Spezifische Festigkeit 113 f.

Spezifischer Elastizitätsmodul 113 f.

Spezifischer elektrischer Wider-
stand 119 f.

Standardisierung, Werkstoffe 16, 21
 Standards für Werkstoffauswahl 40 f.
 Statistische Versuchsmethodik 193
 Strukturindex 135
 Stückzahl 25, 28
 Suchkriterien, -merkmale 61 ff., 105 ff.,
 136, 202
 Suchmaschinen 207

T

Tauschwert 16
 Technische Aspekte 42
 Technologie 51 ff.
 Temperaturleitfähigkeit 121
 Temperaturleitzahl 122
 Temperaturschockbeständigkeit 124 f.
 Temperaturwechselbeständigkeit 124 f.
 Thermischer Ausdehnungs-
 koeffizient 123 ff.
 Top-Down-Methode 40
 Tribologische Daten 126 ff., 225 f.

U

Überbeanspruchung 19
 Übersetzung in Materialanfor-
 derungen 46, 63
 Untergrenze 63 ff., 156 ff.

V

Validierung 38ff., 187 ff.
 Variantenkonstruktion 26
 VDI-Richtlinie 2221 33 ff.
 VDI-Richtlinie 2225 87 ff., 128
 Verbundwerkstoffe 103
 Verfahrensgrenzen 52, 70, 167
 Verfügbarkeit 52, 74
 Vergleichsfaktor 156
 Vergleichsliste 152 f.
 Verlustfaktor 117
 Verschleißwiderstand 126
 Versuche, Versuchsplanung 193 ff.
 Virtual Product Development 188
 Vorauswahl 38, 101 ff., 132 ff., 202
 Vorkalkulation 86
 Vorschriften 16, 20

W

Wärmeleitfähigkeit 108, 119 ff., 123
 Wartung 19

Wechselwirkungen mit dem
 Werkstoff 49 ff., 158
 Werkstoffalternative 23 ff., 102
 Werkstoffauswahl
 -, Cambridge Engineering Selector 177 ff.
 -, Gesamtprozess 37
 -, Stärken und Schwächen 42
 -, systematische 36 ff.
 Werkstoffeigenschaften 57
 -, Eigenschaftsgrenzen 68
 -, Eigenschaftsgrößen 58
 -, Eigenschaftsintervalle 69
 -, Klassifizierung 59
 -, Normierung 153
 -, quantitative, qualitative,
 attributive 59, 105
 -, vergleichende Darstellung 107 ff.
 Werkstoffinnovation 102
 Werkstoffklassifizierung 103
 Werkstoffkennwerte
 - aus Kostensicht 128
 -, mechanische 111
 -, thermische 118
 -, tribologische 126
 Werkstoffkosten 128 ff.
 Werkstoffmodell 191
 Werkstoffneueinführung 23 ff., 102
 Werkstoffschaubilder 107 ff.
 -, logarithmische Skalierung 109
 -, zweidimensionale 108
 Werkstoffsubstitution 23 ff., 102
 Werkzeuge, prozessbegleitende 230
 Wertempfindung 176
 Wirtschaftliche Aspekte 42

Z

Zehnerregel 230
 Zielfunktion 66 f., 131 ff., 150, 170 ff.
 Zielgröße 66 ff., 141 f., 156 f., 175
 Zielkonflikt 43, 169
 Zielsysteme 148
 Zielvorgaben 64, 66 ff., 173 ff.
 Zielwert 63, 67 ff., 132 ff., 155 ff., 172 ff.
 Zuverlässigkeit 230