

# HANSER



## Leseprobe

zu

## Methodik der Werkstoffauswahl

von Martin Reuter

Print-ISBN: 978-3-446-46853-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-46854-2

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446468535>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhalt

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Vorwort</b> .....  | <b>IX</b> |
| <b>1 Einleitung</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>2 Allgemeine Aspekte der Werkstoffauswahl</b> .....              | <b>5</b>  |
| 2.1 Warum neue oder geänderte Werkstoffe? .....                     | 5         |
| 2.1.1 Gesetze des Marktes .....                                     | 5         |
| 2.1.2 Neue Produkte .....   | 7         |
| 2.1.3 Qualitätsprobleme .....                                       | 8         |
| 2.1.4 Normen, Vorschriften, Bestimmungen .....                      | 9         |
| 2.1.5 Standardisierung .....  | 11        |
| 2.1.6 Weitere Motive für Werkstoffänderungen .....                  | 12        |
| 2.2 Komplexität von Werkstoffauswahlprozessen .....                 | 13        |
| 2.2.1 Bekanntheitsgrad eines Materials .....                        | 13        |
| 2.2.2 Produktmerkmale mit Wechselwirkungen zur Komplexität .....    | 16        |
| 2.3 Kontrollfragen .....  | 21        |
| <b>3 Vorgehensweisen zur Lösung von Werkstofffragen</b> .....       | <b>23</b> |
| 3.1 Verwandtschaft zu anderen Lösungsprozessen .....                | 23        |
| 3.2 Methodik eines systematischen Materialauswahlprozesses .....    | 30        |
| 3.3 Potenziale und Grenzen einer methodischen Materialauswahl ..... | 35        |
| 3.4 Kontrollfragen .....  | 38        |
| <b>4 Phase I – Ermittlung der Materialanforderungen</b> .....       | <b>41</b> |
| 4.1 Wechselwirkungen bei der Materialauswahl .....                  | 45        |
| 4.2 Werkstoffeigenschaften .....                                    | 55        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.3      | Vorgehen beim Erstellen einer Materialanforderungsliste .....       | 58         |
| 4.3.1    | Übersetzung der Produkt- in Materialanforderungen .....             | 59         |
| 4.3.2    | Ermittlung von Eigenschaftsgrenzen .....                            | 62         |
| 4.3.3    | Die Materialanforderungsliste .....                                 | 70         |
| 4.4      | Hilfreiche Quellen bei der Suche nach Materialanforderungen .....   | 73         |
| 4.4.1    | Fertigungstechnische Materialanforderungen .....                    | 73         |
| 4.4.2    | Schadensstatistiken und Schadensfälle .....                         | 79         |
| 4.4.3    | Materialanforderungen aus Kostensicht .....                         | 89         |
| 4.4.4    | Ableitung weiterer Materialanforderungen .....                      | 103        |
| 4.5      | Kontrollfragen .....  | 104        |
| <b>5</b> | <b>Phase II – Vorauswahl .....</b>                                  | <b>107</b> |
| 5.1      | Eigenschaften der Werkstoffhauptgruppen .....                       | 109        |
| 5.2      | Kriterien für die Vorauswahl .....                                  | 112        |
| 5.3      | Werkstoffschaubilder .....  | 115        |
| 5.3.1    | Mechanische Werkstoffkennwerte .....                                | 119        |
| 5.3.2    | Thermische Eigenschaftswerte .....                                  | 127        |
| 5.3.3    | Tribologische Werkstoffkennwerte .....                              | 136        |
| 5.3.4    | Werkstoffkosten .....   | 138        |
| 5.4      | Designparameter und Materialindizes .....                           | 141        |
| 5.4.1    | Funktionsindex, Geometrieindex, Materialindex .....                 | 141        |
| 5.4.2    | Vorauswahl über Materialindizes .....                               | 143        |
| 5.4.3    | Einbeziehung des Kostenaspekts .....                                | 144        |
| 5.5      | Liste möglicher Materiallösungen .....                              | 147        |
| 5.6      | Kontrollfragen .....  | 149        |
| <b>6</b> | <b>Phase III – Feinauswahl und Bewertung .....</b>                  | <b>151</b> |
| 6.1      | Beurteilungskriterien .....   | 152        |
| 6.2      | Anwendung klassischer Bewertungsverfahren .....                     | 154        |
| 6.2.1    | Komplexität von Bewertungsverfahren .....                           | 154        |
| 6.2.2    | Vorgehensweise bei der klassischen Bewertung .....                  | 156        |
| 6.2.3    | Methoden zur Ermittlung von Gewichtungsfaktoren .....               | 157        |
| 6.2.4    | Auswertemethoden für die Erstellung von Ranglisten .....            | 162        |
| 6.2.4.1  | Bewertungsverfahren ohne Gewichtung der<br>Bewertungsmerkmale ..... | 163        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 6.2.4.2  | Methode der gewichteten Punktebewertung .....  | 165        |
| 6.2.4.3  | Einbeziehung von Grenzwerten sowie Zielwerten<br>der Materialanforderungsliste ..... | 169        |
| 6.2.5    | Bewertungsverfahren im Überblick .....   | 171        |
| 6.3      | Ganzheitliche Auswahlmethode nach Ashby .....  | 172        |
| 6.3.1    | Materialindizes in Werkstoffschaubildern .....                                       | 172        |
| 6.3.2    | Vereinfachte Werkstoffauswahl mit Werkstoffschaubildern<br>und Materialindizes ..... | 178        |
| 6.3.3    | Einbeziehung der Form durch Formfaktor .....   | 180        |
| 6.3.4    | Einbeziehung des Fertigungsverfahrens .....  | 184        |
| 6.3.5    | Ziel- und Penaltyfunktion für die Materialauswahl .....                              | 185        |
| 6.3.5.1  | Mehrere Bedingungen, ein Ziel .....  | 186        |
| 6.3.5.2  | Mehrere Bedingungen bei zwei und mehr Zielen .....                                   | 189        |
| 6.3.6    | Ansys Granta Selector .....  | 194        |
| 6.4      | Liste der Versuchswerkstoffe .....   | 199        |
| 6.5      | Kontrollfragen .....   | 201        |
| <b>7</b> | <b>Phase IV – Evaluierung, Validierung und<br/>Werkstoffentscheidung .....</b>       | <b>205</b> |
| 7.1      | Ausgewählte Möglichkeiten der Evaluierung und Validierung .....                      | 207        |
| 7.1.1    | Grundlegende Bauteilberechnungen .....   | 207        |
| 7.1.2    | CAD-Systeme .....  | 208        |
| 7.1.3    | FEM-Systeme und Simulationen .....   | 209        |
| 7.1.4    | Design of Experiments (DOE) .....  | 212        |
| 7.1.5    | Prototypen und Rapid Prototyping .....   | 215        |
| 7.2      | Endgültige Materialwahl .....  | 218        |
| 7.3      | Anmerkungen zu den Kapiteln 8 und 9 .....  | 221        |
| 7.4      | Kontrollfragen .....   | 222        |
| <b>8</b> | <b>Informationsbeschaffung .....</b>   | <b>223</b> |
| 8.1      | Informationsbedarf und Datenqualität .....   | 223        |
| 8.2      | Beschaffungsquellen .....  | 227        |
| 8.3      | Zugang zu Printmedien .....  | 229        |
| 8.4      | Rechnergestützte Informationssysteme .....   | 234        |
| 8.4.1    | Einsatz in der Werkstoffwahl .....   | 234        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 8.4.2    | Werkstoffdatenbanken und -informationssysteme .....            | 239        |
| 8.4.2.1  | Über Werkstoffgruppen arbeitende Informationssysteme           | 243        |
| 8.4.2.2  | Informationssysteme zum Schwerpunkt Stahl .....                | 244        |
| 8.4.2.3  | Informationssysteme zum Schwerpunkt<br>Nichteisenmetalle ..... | 246        |
| 8.4.2.4  | Kunststoffe .....  | 247        |
| 8.4.2.5  | Verbundwerkstoffe .....  | 248        |
| 8.4.2.6  | Spezielle anwendungsspezifische Informationssysteme ..         | 249        |
| 8.4.2.7  | Werkstoffinformationssysteme im Überblick .....                | 251        |
| 8.5      | Kontrollfragen .....   | 251        |
| <b>9</b> | <b>Prozessbegleitende Methoden .....</b>                       | <b>253</b> |
| 9.1      | Generell einsetzbare Methoden und Werkzeuge .....              | 255        |
| 9.1.1    | Auswahl der Projektorganisation .....                          | 255        |
| 9.1.2    | Quality Function Deployment (QFD) .....                        | 258        |
| 9.1.3    | Checklisten .....  | 261        |
| 9.1.4    | Design Reviews und Qualitätsbewertungen .....                  | 262        |
| 9.2      | Werkzeuge zur Ermittlung von Entwicklungsschwerpunkten .....   | 263        |
| 9.2.1    | ABC-Analyse (Pareto-Analyse) .....                             | 263        |
| 9.2.2    | Kostenstrukturen .....   | 264        |
| 9.3      | Werkzeuge zur Aufgabenklärung .....                            | 266        |
| 9.3.1    | Funktionsanalyse .....   | 266        |
| 9.3.2    | Benchmark .....  | 266        |
| 9.3.3    | Analyse des Ausfallverhaltens .....                            | 267        |
| 9.4      | Risikoanalysen .....   | 270        |
| 9.4.1    | Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) .....           | 271        |
| 9.4.2    | Fehlzustandsbaumanalyse .....                                  | 274        |
| 9.5      | Kontrollfragen .....   | 276        |
|          | <b>Literaturverzeichnis .....</b>                              | <b>279</b> |
|          | <b>Index .....</b>   | <b>283</b> |

# 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 Produktrisiko 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 Material-

suche 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 Fritsch, 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 Werkstoff-schaubildern und Materialindizes“ ergänzt, der die Möglichkeiten der vorgestellten Methodik anhand von kleineren Anwendungsbeispielen veranschaulicht. Mein Dank gilt wie bereits in der Erstaufgabe 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*

**Vorwort zur 3. Auflage**

In dieser dritten, aktualisierten Auflage werden wieder die im Buch aufgeführten Informationsquellen des Internets auf den aktuellen Stand gebracht. Die häufig wechselnden Inhalte habe ich zum Anlass genommen, auf detailliertere Angaben in dieser Auflage zu verzichten.

Über die positiven Reaktionen wie auch über die kritischen Anmerkungen zum Inhalt des Buches habe ich mich gefreut – beides zeigt, dass eine Beschäftigung mit dem Thema stattfindet. Der anzutreffende Einwand, dass Unternehmen diese Systematik bei der Werkstoffsuche nicht anwenden, folge ich. Ein deckungsgleicher Auswahlprozess war und ist aber auch nicht Ziel meiner Ausführungen, es soll vielmehr Technikern und Ingenieuren mit Werkstofffragen eine Anleitung zur Vorgehensweise bei der Materialsuche geben. Ein Verständnis für Werkstoffeigenschaften im Hinblick auf Bauteil- und Produktanforderungen zu entwickeln, ist der Schlüssel zur Problemlösung und verlangt nach methodischen Denkansätzen.

Hannover, im August 2021

*Martin Reuter*



# 1

## Einleitung

Auf den Konstrukteur von heute strömt eine Unmenge an Informationen über neue Werkstoffe ein. Fachzeitschriften spezieller sowie allgemeiner Natur weisen dabei stets auf neue Eigenschaftsmerkmale hin, die für den einen oder anderen Fall Alternativen zu bisher eingesetzten Werkstoffen bieten oder sogar echte Werkstoffinnovationen mit erheblicher Marktattraktivität bedeuten können. Vornehmlich die Kombination von Werkstoffgruppen in Materialverbunden, die Entdeckung der Keramiken als Konstruktionswerkstoffe sowie die Kunststoffe mit einem schier unerschöpflichen Potenzial an Entwicklungsmöglichkeiten erlauben in strukturmehrischen Aufgabenstellungen und auf speziellen Anwendungsgebieten technische Produktfortschritte und Markt öffnende Kostenvorteile. Das nachfolgende Bild verdeutlicht diese Entwicklung nach dem Zweiten Weltkrieg und zeigt auch die Potenziale der „neuen“ Konstruktionswerkstoffe in der Zukunft auf.

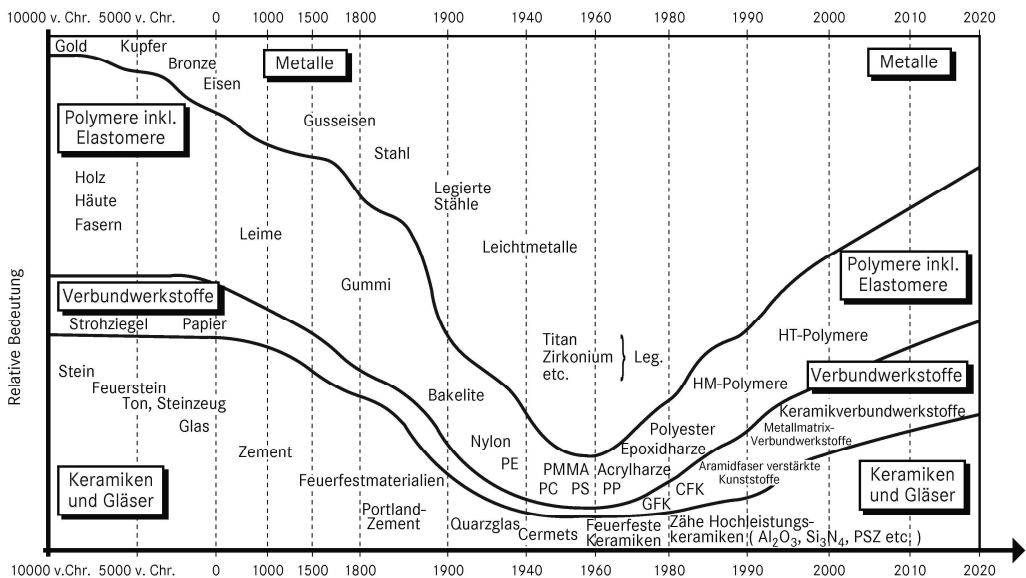


Bild 1.1 Werkstoffentwicklungen und ihre Bedeutung in der Geschichte /1/

Man schätzt, dass dem Konstrukteur derzeit eine Auswahl von ca. 40 000 metallischen und 40 000 nichtmetallischen Werkstoffen zur Verfügung steht. Darüber hinaus können diese Konstruktionswerkstoffe mit neuen Herstellverfahren bzw. neuen Möglichkeiten bisheriger Fertigungsverfahren, insbesondere Oberflächenbehandlungen, kombiniert werden. Durch neuartige Oberflächen werden die Eigenschaften der Grundmaterialien anforderungsspezifisch nachhaltig verändert.

In dieser Informationsfülle fällt es den traditionell gestalterischen und weniger materialspezifisch geschulten Konstrukteuren schwer, einen Werkstoff für die ihm gestellte Konstruktionsaufgabe auszuwählen. In den meisten Konstruktionsabteilungen werden daher Werkstoffe nur verändert, wenn maßgebliche Gründe dafür vorhanden sind. Ein neuer Werkstoff ist mit einem erhöhten Risiko verbunden, nicht nur für das Produkt, sondern auch für den Konstrukteur selbst. Dieses Risiko wird nicht selten gescheut. Traditionell wird ein Werkstoff gewählt, der bereits in Vorgängerprodukten seine Tauglichkeit bewiesen hat oder der vom Hersteller als Weiterentwicklung des Bestehenden angepriesen wird. Eine Werkstofffamilie oder gar eine Werkstoffgruppe wird nicht verlassen.

Dieses Buch wendet sich an die Studierenden von Hochschulen, Technikerschulen sowie an Ingenieure in Konstruktionsabteilungen, die in die Methodik des Projektwesens und der Konstruktionssystematik zwar früh eingeführt und geschult werden, in der Regel jedoch nicht den darin gleichwohl vorgezeichneten Weg einer systematischen Materialauswahl realisieren. Die Herangehensweise beim Lösen von Konstruktionsaufgaben ist in hohem Maße auf die Auswahl von Konstruktionswerkstoffen übertragbar. Für den bereits im Arbeitsleben stehenden „Praktiker“ sei ausdrücklich betont, dass Abläufe – und damit auch die in diesem Buch beschriebenen – in der Praxis verkürzt oder auch völlig eliminiert werden können. Dies sollte jedoch erst dann erfolgen, wenn das Grundverständnis für die Methode erworben ist.

Dieses Buch verfolgt außerhalb der methodischen Beschreibung der Werkstoffauswahl ein weiteres Ziel: Nach den akademischen und beruflichen Erfahrungen des Autors wird in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung von Konstrukteuren und Produktentwicklern meist der gestalterische Lösungsweg in den Mittelpunkt gerückt. Die Lösung auf der Werkstoffseite zu suchen, wird vielfach nur andiskutiert, sodass die in den werkstoffkundlichen Fächern vermittelten, nutzbaren Eigenschaften der Materialien selten in konstruktive Lösungen umgesetzt werden. Der Zusammenhang zwischen Gestaltung, Material und Fertigung beschränkt sich auf die bewährten Erfahrungen in den Konstruktionsabteilungen. Dies führt in der Praxis zu einer häufig zu beobachtenden Gruppierung in Kunststoff- und Metall-designer. Eine weitere Differenzierung erfolgt aufgrund der immer stärkeren Bedeutung in Keramik- und Verbundwerkstoffspezialisten.

Über die vorgestellten Methoden der Werkstoffauswahl sowie die Kenntnis, wie technische, technologische und wirtschaftliche Werkstoffdaten zu ermitteln und zu nutzen sind, möchte der Autor versuchen, das Bewusstsein des (zukünftigen) Konstrukteurs bereits in der Ausbildung auch auf werkstoffliche Lösungsansätze zu lenken und die Scheu vor dem Einsatz eines neuen Werkstoffs zu mindern.

Aufgrund fehlender Methodik sowie mangelnden Materialfachwissens scheuen es die Designer, ein umfangreiches Teilprojekt einer Werkstoffwahl zu beginnen sowie „neue“ Werkstoffe zu entdecken. Diese Situation ist angesichts der Chancen, die ein neuer Werkstoff bieten kann, nicht hinnehmbar. Der beschriebene Weg für eine methodische und systematische Werkstoffauswahl soll den Leser ermutigen, diesen Schritt zu wagen und innovative Lösungen für sein Produkt zu finden.

Ein dritter Aspekt der Werkstoffauswahl widmet sich dem Umgang mit einem Materialauswahlprozess. Ein umfangreiches Konstruktionsprojekt kann heute nur wirtschaftlich durchgeführt werden, wenn es im Rahmen des Simultaneous Engineering über ein Projekt- und Qualitätsmanagement den Erfolg der Produktentwicklung sichert. Gleiches gilt für eine komplexere Werkstoffsuche. Wie Produktentwicklungswerkzeuge im Bereich des Materialauswahlprozesses genutzt werden können, wird in Kapitel 9 anhand von Beispielen vorgestellt und erläutert.

Bevor eine Prozessbeschreibung für eine Materialwahl erfolgt, soll zunächst der Frage nachgegangen werden, wieso Werkstoffe bzw. eine Werkstoffwahl überhaupt zur Diskussion stehen. Die Motivation für die Suche nach einem anderen, gegebenenfalls völlig neuen Material ist dabei situativ völlig verschieden und führt im Hinblick auf die Initiierung des Auswahlprozesses und dessen Gestaltung zu unterschiedlichen Verfahrensweisen.

# 2

## Allgemeine Aspekte der Werkstoffauswahl

### ■ 2.1 Warum neue oder geänderte Werkstoffe?

Der Anlass, einen neuen Werkstoff einzusetzen oder ein verwendetes Material in einem Produkt zu ändern, hat Ursachen, die in der Hauptsache auf den folgenden Sachverhalten beruhen:

- Die *Marktgesetze* erfordern z.B. die technische Verbesserung eines Produkts oder eine Herstellkostenreduzierung, um im Wettbewerb von Angebot und Nachfrage mithalten zu können.
- Neue Produkte werden konstruiert, um *neue Märkte* oder *Kundenwünsche* zu befriedigen.
- *Qualitätsprobleme* an bestehenden Produkten zwingen zu Produktänderungen.
- *Normen, Vorschriften, gesetzliche Auflagen* (oder auch ein sich änderndes Umweltverständnis) erfordern den Einsatz neuer Werkstoffe.
- Das Unternehmen entschließt sich aus wirtschaftlichen Gründen zu einer *Standardisierung* der eingesetzten Materialien.

Darüber hinaus gehen sich sicherlich weitere Initialfaktoren für eine Materialsuche finden. Im Folgenden sollen jedoch diese Hauptursachen näher diskutiert und an Beispielen erläutert werden.

#### 2.1.1 Gesetze des Marktes

Eine der wesentlichen Motivationen, einen neuen Werkstoff einzusetzen, wird von dem *Gesetz des Marktes* „Angebot und Nachfrage“ bestimmt. Die konsequente Verbesserung eines Produkts dient der Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit und der Sicherung des Gewinns. Dies gilt sowohl für die Planung von neuen verbesserten Produkten als auch für jeden späteren Zeitpunkt eines Produktlebenszyklus.



Zwei Aspekte sind im Hinblick auf diese Wettbewerbsfähigkeit des Produkts zu beachten:

- die Erhöhung des technischen Gebrauchswerts (technische Performance) und
- die Reduzierung der Produktkosten (wirtschaftliche Performance).

Der *Gebrauchswert* eines Produkts bezeichnet in der klassischen Ökonomie den konkreten Nutzen, den eine Ware für ihren Besitzer hat. Er spielt jedoch keine Rolle bei der Preisbildung. Dem gegenüber steht der *Tauschwert* (und damit ein entsprechender Preis), den man für ein Produkt erzielen kann. Dies sei an einem Beispiel erläutert:

Der Gebrauchswert und damit der Nutzen einer Armbanduhr ist für ihren Benutzer in den unterschiedlichsten Ausführungen gleich zu bewerten: Ihr Ablesen informiert über die Zeit (gegebenenfalls noch über Datum und Mondphase). Dennoch variiert ihr Tauschwert. So werden mechanische Uhren, für die der Gebrauchsvorteil gegenüber elektrisch angetriebenen Quarz-Uhren nicht erkennbar ist, zu Preisen angeboten, die schwindelerregende Höhen erreichen können. Der immaterielle Wert dieser Uhren definiert den subjektiven Tauschwert und damit den Marktpreis des Produkts.

Als Tauschwert muss ein Unternehmen in jedem Fall den Preis erzielen, der die Kosten deckt; dies steht im Mittelpunkt der Wirtschaftlichkeit eines Produkts. Die *Produktkosten* sollten daher in jedem Fall unterhalb des erzielbaren Preises liegen. Die Stellgrößen „Gebrauchswert“ und „Produktkosten“ lassen sich je nach Art des Erzeugnisses zunächst unabhängig voneinander betrachten. Wird der Gebrauchswert eines Produktes vom potenziellen Käufer erkannt, so wird der Preis durch Angebot und Nachfrage festgelegt.

Hinsichtlich der eingesetzten Werkstoffe ist der Einfluss des Materialkostenanteils auf die Produktkosten und damit die Angebot-und-Nachfrage-Regulierung ausschlaggebend.

### **Art der Fertigung**

Materialkosten haben für *Einzel-, Kleinserien-, Großserien- und Massenfertigung* stark unterschiedliche Auswirkungen. Produkte der Einzel- und Kleinserienfertigung verkaufen sich meist über den technischen Gebrauchswert (z. B. Produktions- und Werkzeugmaschinen). Der Käufer erkennt den hohen Nutzen des Produkts für seine Belange, sodass der Hersteller über eine entsprechende Preisgestaltung die notwendigen Gewinne bzw. Umsatzsteigerungen erzielen kann. Dies trifft beispielsweise auf die Hersteller von Produktionsmaschinen zu, deren Produkte eine hohe Zuverlässigkeit und somit geringe Stillstandszeiten in der Produktion versprechen. Diese Gebrauchswertorientierung des Kunden hat zur Folge, dass der Materialkostenanteil bei der Konstruktion einer Produktionsmaschine eine mehr

untergeordnete Rolle spielt. Bewirkt die Veränderung von Materialien einen gesteigerten Nutzwert (z. B. eine verbesserte Zuverlässigkeit oder eine Verringerung von Fertigungszeiten), so besteht beim Hersteller meist eine große Bereitschaft, signifikante Materialänderungen durchzuführen und beim Kunden ein gesteigertes Interesse am verbesserten Nutzen hervorzurufen.

*Bei großen Stückzahlen sind hingegen die Materialkosten als ein wesentliches Instrument der Gewinn- und Umsatzsteuerung anzusehen.* Für Massen- oder Großserienprodukte machen sie meist den größten Teil der Herstellkosten aus. Für die Herstellung von Töpfen, Bestecken, Maulschlüsseln, Batterien und den meisten Kunststoffprodukten wie Aufbewahrungsbehälter liegen die aufzuwendenden Kosten deutlich unterhalb des Materialaufwands. Diese Produkte sind nicht nur materialsparend zu konstruieren; es stellt sich die Aufgabe, das „wirtschaftlichste“ Material zu finden, welches noch einen ausreichend wettbewerbsfähigen Gebrauchswert des Produkts erbringt. Die Wirtschaftlichkeit wird nicht alleine vom eingesetzten Gewicht, sondern auch von seiner Verarbeitbarkeit, seiner „Prüfbarkeit“ u. a. bestimmt. So führen kleine Materialänderungen bei diesen Produkten, die die Wirtschaftlichkeit z. B. nur durch eine günstigere Verarbeitbarkeit des Materials (geringere Fertigungskosten) verbessern, zu beträchtlichen Auswirkungen auf den Gewinn.



Zusammenfassend ist es das Ziel der Materialänderung oder der Werkstoffneuwahl, im Hinblick auf die Gesetze des Marktes ein wirtschaftlich erfolgreiches Produkt am Markt zu platzieren oder den Erfolg im Markt zu sichern. Der Gebrauchswert sowie die Produktkosten sind Stellgrößen, die über die Materialauswahl mitentscheiden. Je nach Produktart (Unikat, Kleinserien-, Großserien oder Massenprodukt) hat der Anteil der Materialkosten an den Herstellkosten ein unterschiedliches Gewicht bei der Werkstoffentscheidung.

## 2.1.2 Neue Produkte

Sicherlich unterliegen *neue Produkte* ebenfalls den bereits diskutierten Gesetzen des Marktes. Sie nehmen aber im Falle der Werkstoffwahl eine Sonderstellung ein. Für neue Produkte sind meist „neue“ Werkstoffe zu suchen. In der Regel stellt ein neues Produkt keine Neuerfindung dar, sondern die Weiterentwicklung bestehender Erzeugnisse des Unternehmens. Die Motivation, andere Werkstoffe als bisher einzusetzen, ist vielfältig. Eine maßgebende Rolle spielt die *Produktstrategie*: Die Materialentscheidungen sind von der gewünschten Marktposition (Produkt als Nischenprodukt, als markt- oder technologieführendes Produkt) abhängig. Die bereits ausgeführten Regeln des Marktes sind entsprechend zu beachten.

Da bei neuen Erzeugnissen ohnehin ein Produktentwicklungsprozess eingeleitet werden muss, fallen die Vorbehalte für einen zusätzlichen Teilprozess der Werkstoffwahl deutlich geringer aus. Neue Produkte sind vor der Markteinführung zu testen – mit oder ohne neue Materialien!

Bei der Entwicklung von *Produktvarianten* entstehen ebenfalls neue Erzeugnisse. Die Möglichkeiten, die Werkstoffe aus kleineren oder größeren Produkttypen einfach zu übernehmen, stoßen dabei nicht selten an Grenzen. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen:

Beim Bau von Zahnradgetrieben erhalten bei kleineren Abmessungen die Flanken der Zahnräder durch Flammhärten oder einfache Wärmebehandlungsverfahren die notwendige Verschleißfestigkeit. Steigt die Getriebegröße und folglich die Zahnradgröße an, so sind diese Härteverfahren nicht mehr wirtschaftlich. Die daraus resultierenden Formabweichungen wären zu groß. Nitrierhärten führt zu geringerem Härteverzug, hat aber unausweichlich eine Werkstoffänderung, den Einsatz von Nitrierstählen, zur Folge.



Für neue Produkte finden unausweichlich Materialauswahlprozesse statt. Eine innovative Werkstoffauswahl kann dazu beitragen, neue Märkte zu erschließen. Bei Neukonstruktionen ist daher stets zu prüfen, inwieweit eine systematische Werkstoffauswahl für die Bauteile eines Produkts sinnvoll erscheint, deren Eigenschaften den Gebrauchswert bzw. wesentliche Funktionen sichern.

### 2.1.3 Qualitätsprobleme

Der berufserfahrene Konstrukteur wird heute zwangsläufig mit den Methoden der modernen Qualitätssicherung konfrontiert. Die *Qualitätsmanagementsysteme* vieler Unternehmen sind nach DIN EN ISO 9001 zertifiziert. Dem Studierenden sei an dieser Stelle bereits angekündigt, dass *Produktfehler* je nach ihrer Bedeutung gewaltige Unternehmensanstrengungen zur Folge haben können. Der Ausfall von Erzeugnissen bei Produkten im Markt wiegt äußerst schwer und führt zu Umsatzrückgängen, Gewinneinbußen und einem möglicherweise langfristig anhaltenden Imageverlust. Dieses Versagen bereits im Markt platzierter Produkte ist sicherlich der „worst case“ (schlechtester Fall). Darüber hinaus deckt die Qualitätssicherung (aber auch andere Abteilungen) Mängel im Herstellprozess, bei den Prüfverfahren, bei der Auslieferung (z. B. Einfluss von Verpackungen auf das Produkt) usw. auf. An der Verbesserung der Qualität von Produkten werden alle Mitarbeiter beteiligt. *Ohne ausreichende Qualität kann letztlich ein Produkt im Markt nicht erfolgreich bestehen.*

Worauf können *Qualitätsprobleme* eines Produkts beruhen? Für den Ausfall eines Bauteils oder für Qualitätsmängel lassen sich unterschiedlichste Ursachen benennen:

- *konstruktive Mängel* z.B. aufgrund fehlerhafter Analyse der Einsatzbedingungen oder aufgrund von Berechnungsfehlern,
- *Überlast oder anderweitige Überbeanspruchung* gegenüber einem festgeschriebenen Anforderungsprofil (äußere Bedingungen, Betriebstemperatur etc.),
- *fehlerhafte Reparatur oder Wartung*,
- *falsche Verwendung* (Missbrauch),
- *fehlerhafte Bearbeitung* (Fertigung),
- *fehlerhafte Materialwahl*.

Bei dieser Aufzählung wird bereits deutlich, dass das Versagen eines Erzeugnisses in aller Regel nicht vorrangig auf das Material zurückzuführen ist. Für alle aufgeführten Ursachen muss es aber als möglicherweise mitverantwortlich eingestuft werden. Nur eine genaue Analyse der *Schadensfälle* zeigt auf, ob tatsächlich das eingesetzte Material das Versagen ausgelöst hat oder ob andere Gründe (beispielsweise eine fehlerhafte Prozesseinstellung bei der Herstellung) Ursache des Schadens sind. Dessen ungeachtet kann eine Werkstoffänderung stets zur Vermeidung eines Produktversagens beitragen.

Der auf den Beteiligten lastende Druck, eine Lösung für den Produktfehler zu finden, ist bei Qualitätsproblemen häufig extrem hoch. Dem Kunden muss schnellstmöglich eine Lösung angeboten werden. Lässt sich der Produktfehler durch einen veränderten oder neuen Werkstoff lösen, werden die dafür notwendigen Qualifizierungsprozesse für eine Freigabe unter Aufbietung aller Kräfte vorangetrieben. Bei laufender Produktion wird diese Problematik organisatorisch in einem kurzfristig zusammengestellten Expertenteam („Task Force“) gelöst.



Zusammenfassend bleibt auch aus der Praxis heraus festzustellen, dass im Falle von Qualitätsproblemen das Materialverhalten immer in die Schadensanalyse miteinbezogen wird. Qualitätsprobleme sind häufig Triebfeder einer Materialneuwahl für Bauteile bereits im Markt befindlicher Produkte.

## 2.1.4 Normen, Vorschriften, Bestimmungen

Viele Produkte unterliegen *Normen*, *Vorschriften* oder anderen *Bestimmungen*, die den Stand der Technik wiedergeben und deren Einhaltung gesetzlich vorgeschrieben ist. Sie können Gestaltungsregeln für ein Erzeugnis, dessen Abnahme, die Verfahrensweise bei seiner Entwicklung oder auch die Verwendung von Werkstoffen



beinhalten. Materialspezifische Änderungen z.B. aufgrund neuer Erkenntnisse über das Materialverhalten sind vom Hersteller in der Regel unter Einhaltung einer Übergangsfrist zu übernehmen. Beispiele sind das seit 2001 geltende Verbot der Verwendung von Quecksilber in Batterien oder das seit 1993 gemäß § 15 der Gefahrstoffverordnung bestehende Herstellungs- und Verwendungsverbot von Asbest. Bei Kinderspielzeug sind seit 2013 Materialien zu wählen, die u. a. für die Elemente Arsen, Quecksilber und Antimon bestimmte Grenzwerte der europäischen Spielzeugrichtlinie nicht überschreiten.

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass nicht nur gesetzliche Auflagen einen Hersteller vom Einsatz „gefährdender“ Materialien abhalten. Es ist zu beobachten, dass heute immer stärker auch das ökologische Renommee eines Herstellers sowie ein gestiegenes Bewusstsein für Gesundheitsgefährdungen im Kaufverhalten Beachtung finden. Im Konsumgüterbereich treten andere Marketingeinflüsse (z. B. Erscheinungsform eines Werkstoffs, gesellschaftliche Wertvorstellung von einem Material) in den Vordergrund. Trotz fehlender Muss-Kriterien kann dies zu einer innerbetrieblich veränderten Haltung gegenüber Werkstoffen und damit zu einer Korrektur der Außenwirkung eines Unternehmens führen.

### **Normen**

Nationale und internationale Normen werden für unterschiedliche Geltungsbereiche (Deutschland, Europa, weltweit) von *Normungsinstituten* (z. B. DIN, CEN, ISO) herausgegeben. Darüber hinaus existieren überbetriebliche Vorschriften und Richtlinien, die von *Interessen- und Berufsverbänden, Vereinen, Arbeitsgemeinschaften* usw. erstellt werden und als *Stand der Technik* die Vorgehensweise sowie die Ausführung bei der Konstruktion spezieller Produkte beschreiben (z. B. Richtlinien des VDI, Vorschriften des TÜV, Merkblätter der Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter). Auch die gesetzlich vorgeschriebene CE-Zertifizierung nimmt Einfluss auf die Materialwahl.

Weiterhin schreibt die Gesetzgebung heute Produktmerkmale vor, die sich erheblich auf die Werkstoffwahl auswirken. Dazu gehören z. B. die Wiederverwertbarkeit oder die Recyclbarkeit der verwendeten Materialien (z. B. im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, in der Altfahrzeugverordnung). Für den Fall der Neuregelung von Vorschriften sind die Werkstoffe unter Berücksichtigung von Übergangsfristen zu ändern (z. B. Quecksilber und Cadmium in Batterien, Asbest).

Eine Verbindlichkeit in Bezug auf die Einhaltung von Normen gibt es juristisch selten; werden sie jedoch nicht eingehalten, so ist im Falle eines Rechtsstreits der dann schwierige Nachweis zu führen, dass nach dem Stand der Technik konstruiert wurde.

# Index

## A

- ABC-Analyse (Pareto-Analyse) 263
- Abfall senken 98
- Analyse des Ausfallverhaltens 267
- Anforderungsprofil 41, 45, 57, 107, 224
- Anpassungskonstruktion 17
- Ansys Granta Selector 119, 147, 172, 185, 194
  - Auswahlmethodik 198
  - Material Universe 194
  - Process Universe 194
- Arbeits-, Leitblätter 34
- Aufgabenklärung 33, 266
- Ausarbeitungsphase 26, 226
- Ausschlusskriterien 116
- Auswahlmethode nach Ashby 172
  - grafische Auswertung im Werkstoff-schaubild 189
  - mehrere Bedingungen, ein Ziel 186
  - mehrere Bedingungen, zwei und mehr Ziele 189
  - mit Materialindizes 172
  - Vorauswertung der Zielwerte 188

## B

- Bauteil
  - anforderungen 41
  - einschränkungen 44
  - forderungen 44
  - gewichte und -größen 74
  - wünsche 44
  - ziele 44

- Bekanntheitsgrad 13
- Benchmark 103, 266
- Berechnungen, grundlegende 207
- Beurteilungskriterien 35, 152
- Bewertung 32, 152
  - Einbeziehung von Grenzwerten 169
  - Ungleichbewertung 170
- Bewertungsrichtung 65, 70, 146, 153, 167
- Bewertungsverfahren 154
  - im Überblick 171
  - klassische 154
  - Komplexität 154
  - mehrdimensionale 155, 164
  - ohne Gewichtung 163
- Bruchzähigkeit 123, 178
- Bruttowerkstoffkosten 92

## C

- CAD-Systeme 208
- CAE-Systeme 236
- Checkliste 59, 261
- Chemische Beständigkeit 249

## D

- Datenqualität 223, 227
- Datensicherheit 237
- Datenstruktur, standardisierte 237
- Deming-Zyklus 206, 263
- Design for X 46
- Designlinie 172
  - Beispiele 178

Design of Experiments (DOE) 213  
 Designparameter 141  
 Design Reviews 261  
 Dichte 117, 119  
 Differenzialbauweise 49, 78, 100  
 Dimensionierung 46

## E

Eigenschaftsprofil 41, 57, 107, 151  
 Einschränkende Bedingungen 63, 112, 185  
 Elastizitätsmodul 117, 119, 122, 124, 133, 136  
 Endgültige Materialwahl 218  
 Entscheidung 33, 205, 213  
 Entscheidungssituation 14, 45  
 Entscheidungsvorlage  
 – Inhalt 219  
 Entwicklungsschwerpunkte  
 – Ermittlung 264  
 Entwurfsphase 26, 224  
 Evaluierung 33, 199  
 Expertensysteme 239

## F

Fachbücher 229  
 Fehler  
 – bei der Herstellung 87  
 – Fehlerhafte Materialwahl 9, 81  
 – Konstruktionsfehler 80  
 Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) 271  
 Fehlzustandsbaumanalyse 274  
 Feinauswahl und Bewertung 32, 148, 151, 225  
 FEM-Systeme 209  
 Fertigung  
 – Aufwand 74  
 – Auswahl der Technologie 47  
 – Kosten 51, 89, 97  
 – Regeln von Datsko 74  
 – Technologie 47  
 – Verfahren 184

Festigkeit 120, 122, 128, 138  
 Formfaktor 180  
 – Anwendung im Werkstoffschaubild 183  
 – Festigkeitsbegrenzte Auslegung 176  
 Fragenkatalog 59  
 Freie Konstruktionsparameter 63, 66, 142, 187  
 Freiheitsgrade 66, 183  
 Funktion(en) 27  
 – Funktionsgleichung 63  
 – Funktionsstruktur 41  
 Funktionsindex 141

## G

Gebrauchseigenschaften 53  
 Gebrauchswert 6  
 Geometrieindex 141  
 Gesamtnutzwert 156, 167  
 Gesetze des Marktes 5  
 Gewichtete Bewertung 156  
 Gewichtungsfaktoren 32, 157  
 – Absolute Gewichtung 159  
 – Direkte Gewichtung 158  
 – Paarvergleiche 160  
 – Zielsysteme 161  
 Grundaussage, Statement 71

## H

Härte 137  
 Herstellbarkeit 47  
 Herstellkosten 47, 90

## I

Ideallösung 167  
 Immaterielle Aspekte 36  
 Informationsbeschaffung 114, 151, 223  
 – Beschaffungsquellen 227  
 – im Überblick 251  
 – Informationsbedarf 223  
 – Informationssysteme 234  
 – Kunststoffe 247

- Nichteisenmetalle 246
  - spezielle Themen 249
  - Stahl 244
  - über Werkstoffgruppen hinweg 243
  - Verbundwerkstoffe 248
- Integralbauweise 49, 78

## K

- Kerbwirkung 80
- Klärung der Aufgabenstellung 26
- Klassifizierung von Prototypen 216
- Kleinbau 98
- Komplexität 13, 155
- Kompromisslinie 190
- Konstruktion 45
- Grundprinzipien 63
- Konstruktionsart 17
- Konstruktionssystematik 26
- Konstruktive Mängel 9
- Konzeptphase 26
- Kostenstruktur 97, 264
- Kriterien für die Vorauswahl 112
- Kundenwunsch 5

## L

- Langzeitverhalten 55
- Lebenslaufkosten, -zykluskosten 89
- Leichtbau 98
- Liefermengen 102
- Liste der Versuchswerkstoffe 32, 151, 199, 205, 218
- Eignungsprüfung 199
- Liste möglicher Materiallösungen 32, 147, 199
- Literaturrecherchen 232
- Lösungsfindung 25

## M

- Marketinganforderungen 103
- Materialanforderungen 27
- aus Kostensicht 89

- fertigungstechnische 73
  - Quellen 73
- Materialanforderungsliste 32, 45, 58, 152, 223
- Materialindex 141, 163, 172, 186
- anwendungstypische Indizes 175
  - Beispiele 178
  - in Werkstoffschaubildern 172
- Materialkosten 6, 89
- Materialkostenanteil 97
  - Rohmaterialkosten 99
  - Rohmaterialpreis 51
- Maximale Einsatztemperatur 128
- Mehrfachziele 185, 189
- Mehrpunkttabellen 57
- Methode der gewichteten Punktebewertung 156, 165
- Mikro- und Makrogeometrie 47, 50, 73
- Missbrauch 9, 80
- Modellbildung 63, 207
- Montagefehler 80, 88

## N

- Nachvollziehbarkeit 24, 154
- Neue Produkte 7
- Neukonstruktion 17
- Normen 5, 9
- Normierungsfaktoren, Ermittlung 192

## O

- Ober- und Untergrenzen 62, 169

## P

- Paarvergleiche 160
- Patentrecherchen, Patentrecht 103, 233
- Penaltyfunktion 185, 191
- Perceived value 193
- Printmedien, Zugang 229
- Problemlösungszyklus 23
- Produkt
- anforderungen 27, 42
  - art 17f.

- kosten 6
- risiko 20
- strategie 7
- varianten 8
- Projektmanagement 29
  - agiles 258
- Projektorganisation 16, 45, 255
- Prototypen 215

## Q

- Qualitätsbewertungen 261
- Qualitätskosten 51
- Qualitätsmanagementwerkzeuge 29
- Qualitätsprobleme 5, 8
- Quality Function Deployment (QFD) 258
- Quantifizierbarkeit 35

## R

- Randbedingungen 63, 144
- Rangliste, -folge 154
  - Auswertemethoden für die Erstellung 162
  - der Materiallösungen 199
- Rankingfaktor 170
- Rapid Prototyping 215
- Rapid Tooling 217
- Regeln von Datsko 74
- Relativkosten 92, 138
- Reparable Produkte 269
- Reparatur 9
- Risiken 219
  - unternehmerische 219
- Risikoanalysen 28, 79, 270
- Robustheit 88, 214

## S

- Schäden, Schadensfälle 9, 79
- Schweißtechnik 250
- Schwerpunktbildung 37, 98, 263
- Simulation 207, 209
  - Werkstoffvergleich 212
  - Werkstoffverhalten 210

- Situationsanalyse 24, 81
- Sparbau 98
- Spezifische Festigkeit 122
- Spezifischer Elastizitätsmodul 122
- Spezifischer elektrischer Widerstand 129
- Standardisierung, Werkstoffe 5, 11
- Standards für Werkstoffauswahl 34
- Strukturindex 146
- Stückzahl 17, 20
- Suchkriterien, -merkmale 59, 112, 147
- Suchmaschinen 229

## T

- Tauschwert 6
- Technische Aspekte 36
- Technologie 47
- Temperaturleitfähigkeit 130
- Temperaturleitzahl 131
- Temperaturschockbeständigkeit 134
- Temperaturwechselbeständigkeit 134
- Thermischer Ausdehnungskoeffizient 133
- Top-Down-Methode 33
- Tribologische Daten 136

## U

- Überbeanspruchung 9
- Übersetzung in Materialanforderungen 41, 61
- Untergrenze 62, 170

## V

- Validierung 33, 205
- Variantenkonstruktion 17
- VDI-Richtlinie 138
  - 2221 25
  - 2225 90
- Verbundwerkstoffe 111
- Verfahrensgrenzen 49, 70, 182
- Verfügbarkeit 48, 74
- Vergleichsfaktor 169

Vergleichsliste 166  
Verlustfaktor 126  
Verschleißwiderstand 136  
Versuche, Versuchsplanung 213  
Virtual Product Development 206  
Vorauswahl 32, 107, 142, 224  
Vorkalkulation 90  
Vorschriften 5, 9

## W

Wärmeleitfähigkeit 116, 129, 133  
Wartung 9  
Werkstoff 45, 172  
Werkstoffalternative 13, 108  
Werkstoffauswahl  
– Ansys Granta Selector 194  
– Gesamtprozess 31  
– Stärken und Schwächen 36  
– systematische 30  
Werkstoffeigenschaften 54  
– Eigenschaftsgrenzen 67  
– Eigenschaftsgrößen 55  
– Eigenschaftsintervalle 68  
– Klassifizierung 57  
– Normierung 167  
– quantitative, qualitative, attributive  
58

Werkstoffinnovation 108  
Werkstoffkennwerte  
– aus Kostensicht 138  
– mechanische 119  
– thermische 127  
– tribologische 136  
Werkstoffkosten 138  
Werkstoffmodell 210  
Werkstoffneueinführung 13  
Werkstoffschaubilder  
– logarithmische Skalierung 116  
– zweidimensionale 116  
Werkstoffsubstitution 13, 108  
Werkzeuge, prozessbegleitende 253  
Wertempfindung 193  
Wirtschaftliche Aspekte 36

## Z

Zehnerregel 253  
Zielfunktion 65, 141, 163, 186  
Zielgröße 65, 153, 169, 192  
Zielkonflikt 37, 185  
Zielsysteme 161  
Zielvorgaben 63, 65, 190  
Zielwert 62, 66, 144, 169, 188  
Zuverlässigkeit 253