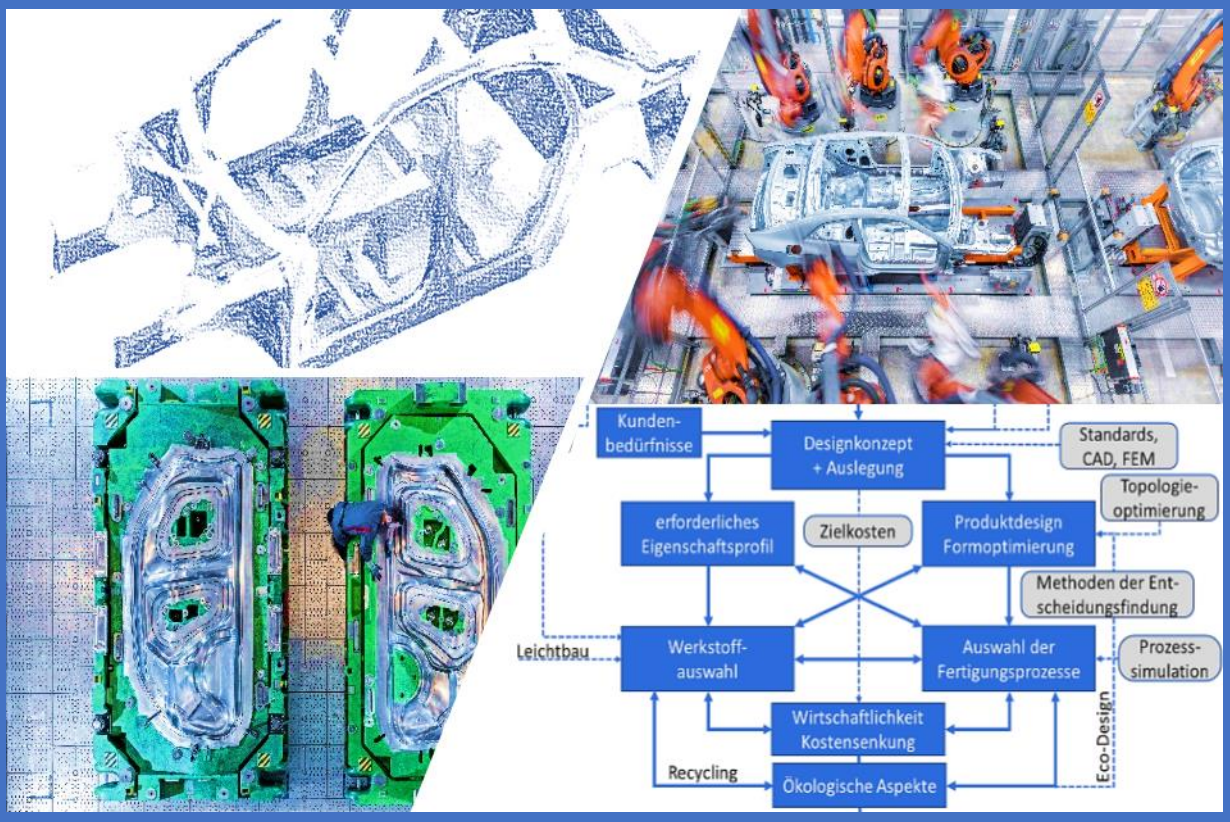
Prof. Dr. Bruno Buchmayr
(† 1954 - 2021)

Integrative Auswahl von Werkstoffen und wirtschaftlichen Fertigungsverfahren

für Konstrukteure, Maschinenbauer, Produktentwickler, Produktionsleiter und Wirtschaftsingenieure



Vorwort

Ein unfertiges Buch der Fertigungstechnik.

Dieses Buch wendet sich an Maschinenbauer und Werkstoffwissenschaftler, die sich mit dem Einsatz von Werkstoffen in Fertigungsprozessen beschäftigen.

Mein Vater Bruno wollte in diesem Buch sein über Jahrzehnte erworbenes Wissen strukturieren und Studenten und berufstätigen Ingenieuren einen Überblick über wesentliche Aspekte, aber auch über Zukunftsthemen der Fertigungstechnik geben. Es sollte sein letztes Buch sein.

Leider verstarb er kurz vor der Fertigstellung. Ich habe ihm aber versprochen, das Buch fertigzustellen und zu veröffentlichen. Er war ein berufener Lehrer und ich denke, es war ihm wichtig, sein Wissen noch einmal an den wissenschaftlichen Nachwuchs weiterzugeben.

Da ich das Buch nicht verfälschen wollte, habe ich nur kleinere Fehler und die Formatierung korrigiert. Auf Ergänzungen einzelner Textpassagen habe ich bewusst verzichtet. Lediglich das Kapitel 10 (Fallbeispiele) war noch nicht druckreif, weshalb ich mir erlaubt habe, unfertige Teile aus dem Buch zu entfernen. Einige Fallbeispiele habe ich aber auch in noch roher Form im Buch belassen.

So ist es ein unfertiges Buch der Fertigungstechnik geworden, aber ein Buch, das relevante Themen in leicht lesbarer Form darstellt, ohne in wissenschaftliche Tiefen abzutauchen.

Mir persönlich hat das Buch besonders gut gefallen, weil es mich an die vielen Gespräche mit meinem Vater am elterlichen Küchentisch erinnert hat. Ich hoffe, dass es Ihnen auch so geht und bitte um Verständnis, wenn das Buch in Teilen noch etwas roh daherkommt.

Ein letztes Glück Auf!

Michael Buchmayr

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 10
1.1 Motivation 10
1.2 Der rote Faden durch das Buch 11
1.3 Mögliche Ausgangspositionen vor dem Auswahlprozess 12
1.4 Literaturangaben zu Kapitel 1 14
2 Produktion – Einführung, Konzepte und Produktentwicklung 15
2.1 Marktwirtschaft – Angebot und Nachfrage 15
2.1.1 Angebot und Nachfrage 16
2.1.2 Bedeutung der Fertigungstechnik 17
2.2 Strategien der Produktionswirtschaft und der Wettbewerbsfähigkeit 20
2.2.1 Wettbewerbsanalyse 21
2.2.2 Blue Ocean Strategie 22
2.2.3 Faktoren der Wettbewerbsfähigkeit 23
2.3 Marketing und Kundenbedürfnisse 25
2.3.1 Die Conjoint-Analyse 25
2.4 Produktentwicklung und der Produktionsentwicklungsprozess 26
2.4.1 Von der Idee zum Konzept 26
2.4.2 Vom Konzept zur Gestalt / Entwerfen 27
2.4.3 Von der Gestalt zur Herstellung / Ausarbeiten 27
2.4.4 Umfassende Darstellungen zum Thema Produktentwicklung 27
2.4.5 Notwendige Kompetenzen für den Produktentwicklungsprozess 28
2.5 Produktionssysteme 29
2.5.1 Das Toyota Produktionssystem (TPS) 29
2.5.2 Schlanke Produktion und Ganzheitliche Produktionssysteme (GPS) 31
2.5.3 Produktionstypen 32
2.6 Produktfindung und der Weg zur Produktinnovation 32
2.6.1 Laterales Denken nach Edward de Bono 32
2.6.2 Theorie des erfinderischen Problemlösens (TRIZ) 33
2.6.3 Design Thinking 34
2.6.4 Weg zur Produktinnovation 34
2.7 Steigerung der Produktivität und der Wettbewerbsfähigkeit durch Digitalisierung 35
2.8 Konzepte der Problemanalyse und Entscheidungsfindung 36
2.8.1 Systemanalyse und Problemlösungskonzepte 36
2.8.2 Analyse und Bewertung von Alternativen bei mehreren Kriterien 40
2.8.3 Die Entscheidungsmatrix 44

2.8.4 Bewährte Methoden zur Entscheidungsfindung ... 45
2.9 Innovationsmanagement ... 52
2.9.1 Ideengenerierung, Kreativitätstechniken, Ideenmanagement und Bewertung ... 52
2.9.2 Technologiemonitoring ... 53
2.10 Wissensmanagement ... 55
2.10.1 Anforderungen an ein Wissensmanagementsystem ... 56
2.10.2 Die Vor- und Nachteile eines WIKI-basierten Systems ... 56
2.10.3 Entwicklung eines WIKI-basierten Systems für die Blechumformung ... 56
2.10.4 Ein WIKI-basiertes Systems für das Warm- und Kaltwalzen von Blechen ... 59
2.11 Literaturangaben zu Kapitel 2 ... 61
3 Gesamtsystem aus Design, Werkstoff und Fertigungsverfahren ... 66
3.1 Von den Bauteilanforderungen zum Produkt ... 66
3.2 Erstellung von Anforderungsprofilen (Pflichten- und Lastenheft) ... 68
3.3 Gegenseitige Beziehungen zwischen Design und Werkstoff ... 69
3.4 Interaktionen zwischen Design und Fertigungsverfahren ... 69
3.5 Wechselwirkungen zwischen Werkstoff und Fertigung ... 69
3.5.1 Einflüsse der Werkstoffe auf die Fertigung ... 69
3.5.2 Einflüsse der Fertigung auf die Werkstoffeigenschaften ... 71
3.6 Einflüsse der Fertigung auf das Betriebsverhalten ... 74
3.7 Einflüsse auf die Wirtschaftlichkeit ... 74
3.8 Ökologische Einflüsse ... 74
3.9 Trends in der Fertigungstechnik (die Plattform „Manufuture“) ... 75
3.10 Qualitätsmanagement ... 77
3.11 Literaturangaben zu Kapitel 3 ... 78
4 Funktions- und fertigungsorientierte Konstruktion ... 80
4.1 Produktdesign ... 80
4.2 Topologie- und Gestaltoptimierung ... 82
4.3 Fertigungsgerechte Konstruktion ... 84
4.3.1 Grundsätze für gießgerechte Gestaltung ... 85
4.3.2 Gestaltungsrichtlinien für einige wichtige Umformprozesse ... 85
4.3.3 Richtlinien für den metallischen 3D-Druck ... 87
4.3.4 Richtlinien für die Wärmebehandlung ... 87
4.3.5 Gestaltungshinweise für Kunststoffteile ... 87
4.3.6 Design for Assembly / Montage (DfMA) ... 89
4.3.7 Kriterien für umweltgerechtes Design ... 89
4.4 Überprüfung der Machbarkeit im frühen Entwicklungsstadium ... 89
4.4.1 Machbarkeitskontrolle bei der Blechumformung ... 91

4.4.2 Machbarkeitskontrolle bei der Massivumformung ... 92
4.4.3 Optimierung von Gussteilen durch Formfüllungs- und Erstarrungssimulation ... 92
4.4.4 Machbarkeitskontrolle in der Kunststoffverarbeitung ... 92
4.4.5 Überprüfung der Verfügbarkeit von Material und Verfahren ... 93
4.5 Formleichtbau ... 93
4.5.1 Herausforderungen bei sehr geringen Wandstärken ... 94
4.6 Eco-Design ... 96
4.7 Besondere Bestimmungen für Bereiche mit erhöhtem Gefahrenpotenzial ... 97
4.7.1 Ungeregelter Bereich ... 97
4.7.2 Geregelte Bereiche ... 98
4.8 Literaturangaben zu Kapitel 4 ... 98
5 Kriterien zur Werkstoffauswahl ... 102
5.1 Werkstoffklassen und ihre Eigenschaften ... 102
5.1.1 Besondere Stahlgruppen und Eisengusswerkstoffe ... 106
5.1.2 Gliederung der Aluminiumlegierungen samt Merkmalen und Anwendungen ... 118
5.1.3 Kupfer und Kupferlegierungen ... 121
5.1.4 Nickel und Nickellegierungen ... 122
5.1.5 Titan und Titanlegierungen ... 122
5.1.6 Kunststoffe ... 123
5.1.7 Biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe ... 126
5.1.8 Holzwerkstoffe ... 128
5.1.9 Technische Strukturkeramik und Gläser ... 128
5.1.10 Verbundwerkstoffe ... 129
5.2 Auswahlkonzept nach M.F. Ashby ... 130
5.2.1 Auswahlprozedur ... 131
5.2.2 Funktionsanforderungen, Zielsetzungen und Einschränkungen ... 131
5.2.3 Ausschlusskriterien und Werkstoffauswahlkarten ... 132
5.2.4 Belastungsspezifische Kennzahlen (Performance indices) ... 133
5.2.5 Formfaktor ... 137
5.2.6 Darstellung einiger metallkundlicher Zusammenhänge ... 137
5.2.7 Zusätzliche Werkzeuge in der Software CES ... 139
5.2.8 Darstellung von Verarbeitungsprozessen in CES ... 139
5.2.9 Wissenschaftliche Beiträge, die auf den Ashby-Ansatz beruhen ... 141
5.3 Auswahl nach Gebrauchseigenschaften ... 141
5.3.1 Erkennen der relevanten Werkstoffeigenschaft für einen gegebenen Fall ... 142
5.3.2 Stofflicher Leichtbau ... 143
5.3.3 Auswahl bei korrosiven Beanspruchungen ... 144

5.4 Werkstoffauswahl nach Materialkosten ... 148
5.4.1 Preisbildung und Preisschwankungen ... 150
5.4.2 Stahlpreisentwicklungen ... 152
5.4.3 Eigenschaften und Preise der Ingenieur-Kunststoffe ... 154
5.4.4 Informationsquellen für Materialpreise ... 154
5.4.5 Materialkostenanteile in High-Tech-Produkten ... 155
5.5 Werkstoffauswahl nach ihrer Verarbeitbarkeit ... 156
5.5.1 Bedeutung der Verarbeitbarkeit ... 156
5.5.2 Gießbarkeit (castability) ... 157
5.5.3 Umformbarkeit (deformability or workability) ... 158
5.5.4 Schweißbarkeit (weldability) ... 163
5.5.5 Zerspanbarkeit (machinability) ... 164
5.5.6 Härtbarkeit (hardenability) ... 166
5.6 Werkstoffauswahl unter Berücksichtigung der Ökologie ... 166
5.6.1 Energieverbrauch und CO_2-Emissionen bei der Herstellung ... 166
5.6.2 Werkstoffauswahl unter Berücksichtigung der CO_2-Emission ... 167
5.6.3 Recyclingfähigkeit ... 168
5.6.4 Biologische Abbaubarkeit ... 170
5.6.5 Biowerkstoffe ... 170
5.7 Andere Konzepte zur Werkstoffauswahl ... 171
5.7.1 Ansätze nach dem Prinzip des Problemlösungsansatzes ... 171
5.7.2 Werkstoffauswahl mit dem QFD-Ansatz ... 171
5.7.3 Werkstoffwahl unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Fertigung ... 172
5.7.4 Vergleichende und grafische Selektionsmöglichkeiten ... 172
5.8 Materialästhetik und Werkstoffe für die Kunst ... 174
5.8.1 Materialien mit emotionaler Funktion ... 175
5.8.2 Werkstoffe für die Kunst ... 176
5.9 Literaturangaben zu Kapitel 5 ... 177
6 Auswahl geeigneter Fertigungstechnologien ... 182
6.1 Grundlegende Prinzipien zur Auswahl von Fertigungsprozessen ... 182
6.1.1 Wann würde man dem Gießen den Vorrang geben und wie kommt man zum richtigen Gießverfahren? ... 184
6.1.2 Über die Bedeutung der Umformverfahren und primäre Selektionskriterien ... 186
6.1.3 Wie findet man das passende Trennverfahren? ... 187
6.1.4 Was ist bei der Auswahl von Fügeprozessen wichtig? ... 187
6.1.5 Unterscheidung innerhalb der Beschichtungsverfahren? ... 188
6.1.6 Auswahl innerhalb der Gruppe „Stoffeigenschaften ändern“ ... 188

6.2 Kriterien zur Auswahl von Fertigungsverfahren ... 189
6.3 Wahl der Fertigungsverfahren je nach Werkstoffklasse ... 189
6.3.1 Auswahl von Fertigungsverfahren für metallische Werkstoffe ... 191
6.3.2 Auswahl von Fertigungsverfahren für Kunststoffe ... 191
6.3.3 Auswahl von Fertigungsverfahren für Verbundwerkstoff ... 191
6.3.4 Auswahl von Fertigungsverfahren für keramische Werkstoffe ... 192
6.4 Einfluss der Bauteilform und -Größe auf die Verfahrensauswahl ... 194
6.4.1 Einfluss der Wandstärke ... 196
6.4.2 Einfluss der Bauteilsymmetrie ... 197
6.4.3 Einfluss der Toleranzanforderungen ... 198
6.4.4 Einfluss des Bauteilgewichtes auf die Auswahl geeigneter Fertigungsverfahren ... 200
6.4.5 Mikrofertigung ... 200
6.5 Materialeffizienz durch fertigungstechnischen Leichtbau ... 201
6.5.1 Gießtechnischer Leichtbau ... 201
6.5.2 Umformtechnischer Leichtbau ... 202
6.5.3 Multi-Material- oder Hybrid-Bauweise ... 204
6.6 Wirtschaftliche Aspekte der Auswahl von Fertigungsverfahren ... 207
6.6.1 Grobe Kostenübersicht für verschiedene Fertigungstechnologien ... 207
6.6.2 Einfluss der Stückzahlen auf die Herstellkosten ... 209
6.6.3 Größeneinfluss auf die Herstellkosten ... 211
6.7 Ökologische Einflüsse auf die Fertigung ... 211
6.7.1 Energieeffizienz ... 212
6.7.2 CO_2-Fußabdruck (carbon footprint) ... 215
6.7.3 Abfall- und Kreislaufwirtschaft ... 216
6.7.4 Praxisbeispiel für erfolgreiche Umsetzung einer nachhaltigen Produktion ... 218
6.7.5 Kreislaufwirtschaft und Life-Cycle-Management ... 219
6.8 Wahl geeigneter Fügetechnologien ... 220
6.8.1 Auswahlkriterien für die Auswahl von Fügetechnologien ... 220
6.8.2 Fügetechnologien im Automobilbau ... 221
6.8.3 Wirtschaftlichkeit in der Schweißtechnik ... 222
6.8.4 Montagesysteme ... 222
6.9 Nutzung von Oberflächentechnologien ... 224
6.9.1 Mechanische Randschichtmodifikation ... 225
6.9.2 Thermische Oberflächenhärteverfahren ... 225
6.9.3 Thermische Beschichtungsverfahren ... 225
6.9.4 Galvanische Abscheidung ... 226
6.9.5 Dünnschichttechnologien ... 227

6.10 Rapid Prototyping, Rapid Tooling und Additive Fertigung ... 228
6.10.1 Entwicklungsschritte beim Rapid Prototyping ... 228
6.10.2 Additive oder generative Fertigung ... 230
6.11 Werkzeugbau und Werkzeugmaschinen ... 236
6.11.1 Bedeutung des Werkzeugbaus ... 236
6.11.2 Werkzeugmaschinen ... 244
6.11.3 Der Laser als universelles Werkzeug in der Fertigung ... 250
6.12 Literaturangaben zu Kapitel 6 ... 253
7 Aspekte der Wirtschaftlichkeit ... 260
7.1 Kostenmanagement und Kostenrechnung ... 260
7.1.1 Kostenmanagement ... 260
7.1.2 Grundlagen der Kostenrechnung ... 262
7.1.3 Zuschlagskalkulation ... 262
7.1.4 Benchmarking ... 263
7.1.5 Prozesskostenrechnung ... 264
7.2 Kostenanteile in der Fertigung ... 264
7.2.1 Sichtweise: Kostenfestlegung und Kostenentstehung ... 264
7.2.2 Sichtweise: Wo einsparen? ... 264
7.2.3 Sichtweise: Relativkosten ... 265
7.2.4 Sichtweise: Kostengefühl ... 267
7.2.5 Sichtweise: Kostenabschätzung ... 268
7.3 Zielkosten (“Target Costing”) und „Design to Cost“ ... 268
7.3.1 Design-to-Cost ... 268
7.3.2 Die Methode der Wertanalyse ... 269
7.3.3 Kostenprognose über multiple Regressionsrechnung ... 269
7.4 Maßnahmen zur Kostensenkung ... 269
7.4.1 Senkung der Materialkosten ... 271
7.4.2 Kosteneinsparung von direkten Fertigungskosten ... 272
7.4.3 Kostenvergleich für unterschiedliche Kunststoff-Fertigungsvarianten ... 275
7.4.4 Industrielle Erfahrungen zur Kostenreduktion ... 277
7.4.5 Sekundäre Ansatzpunkte zur Kostensenkung ... 278
7.5 Kostensenkung durch modernen Einkauf ... 279
7.6 Kostenoptimierung bei verketteten Prozessen ... 280
7.7 Life-Cycle-Assessment (LCA), -Costing (LCC) und -Management (LCM) ... 283
7.7.1 Lebenszyklusanalyse (LCA) ... 283
7.7.2 Lebenszykluskosten (LCC) ... 284
7.7.3 Life-Cycle-Management (LCM) ... 284

7.8 Maßnahmen zur Bewältigung von Krisensituationen ... 284
7.9 Literaturangaben zu Kapitel 7 ... 286
8 Automation und Digitalisierung ... 290
8.1 Automatisierte Fertigungskonzepte ... 290
8.1.1 Maschinendatenerfassung ... 290
8.1.2 Fertigungsautomatisierung ... 293
8.1.3 Fertigungskonzepte ... 293
8.1.4 Einsatz von Industrierobotern ... 294
8.2 Die Automatisierungspyramide ... 296
8.2.1 Die klassische, industrielle Automatisierungspyramide ... 296
8.2.2 Die neue industrielle Automatisierungspyramide aufgrund von Industrie 4.0 ... 297
8.3 Mit Methodik aus Daten lernen oder „Data Mining“ ... 298
8.4 Modellierung und Simulation von Fertigungsprozessen ... 300
8.4.1 Physikalische Modellierung der Fertigungsprozesse ... 300
8.4.2 Wertstromanalyse – Wertstromdesign - Wertstrommanagement ... 305
8.4.3 Simulations-Software für Materialfluss, Logistik und Lean Manufacturing ... 306
8.5 Digitalisierung und Industrie 4.0 ... 306
8.5.1 Vernetzung - Internet of Things (IoT) ... 307
8.5.2 Industrielle Beispiele für die digitale Transformation in der Produktion ... 309
8.6 Der Digitale Zwilling und der Digitale Schatten ... 311
8.7 Cyber-Physical Systems ... 313
8.8 Die Digitale Fabrik ... 315
8.9 Auswirkungen von Industrie4.0 auf die Auswahl von Fertigungsverfahren ... 317
8.10 Literaturangaben zu Kapitel 8 ... 319
9 Zukünftige Entwicklungen und Herausforderungen ... 323
9.1 Gesellschaftliche Veränderungen und Megatrends ... 323
9.1.1 Gesellschaftliche Veränderungen und globale Megatrends ... 323
9.1.2 Megatrends in der Werkstofftechnik ... 325
9.1.3 Megatrends in der Produktion ... 326
9.2 Neue produktionstechnische Herausforderungen ... 326
9.2.1 Treiber und Bewertung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit ... 327
9.2.2 Länderspezifische Betrachtung ... 331
9.2.3 Empfehlungen für die produktionstechnische Zukunft ... 333
9.2.4 Prioritäre Forschungsfelder für die produzierende Industrie 2030 ... 334
9.3 Die wichtige Rolle der Kreativität und der Ausbildung ... 335
9.3.1 Die Rolle der Kreativität für die Generierung von Innovationen ... 335
9.3.2 Neue Anforderungen an die Ausbildung von Technikern ... 336

9.4 Fachkräftemangel – was ist zu tun? ... 337
9.5 Ethische Prinzipien - Werte nicht vergessen! ... 338
9.5.1 Unternehmerethik ... 338
9.5.2 Produktethik ... 338
9.5.3 Die Rolle der Werte ... 339
9.5.4 Sei ein wertvoller, kreativer Mensch ... 341
9.6 Literaturangaben zu Kapitel 9 ... 342
10 Ausgewählte Fallbeispiele ... 345
10.1 Beispiele aus dem Bereich Verkehrstechnik ... 347
10.1.1 Kurbelwelle aus AFP-Stahl oder Kugelgrafit-GGG ... 347
10.1.2 Pleuelfertigung ... 348
10.1.3 Nockenwellenfertigung ... 349
10.1.4 Stahlnockenwellen aus Vollmaterial ... 350
10.1.5 Hohlwelle für Verteilergetriebe ... 351
10.2 Weitere Bauteile im Automobilbau ... 352
10.2.1 Airbag-Fertigung ... 352
10.2.2 PKW-Kugelzapfen aus mikrolegiertem Stahl ... 355
10.2.3 Rahmenfertigung für ein Motorrad ... 357
10.2.4 Hinterradschwinge eines Motorrades ... 358
10.3 Möbelfertigung / Tischfuß ... 360
11 Die Erfindung der Glühlampe und die Auswahl der Werkstoffe ... 362
11.1 Technische Hindernisse bei der Erfindung der Kohlefadenlampe ... 363
11.2 Werkstoffe moderner Glühlampen ... 364
11.2.1 Metallgewinnung und Glühfadenproduktion ... 365
11.2.2 Stromzuführungen und Halterdrähte ... 366
11.2.3 Glasperle ... 367
11.2.4 Kolbenarten in Mikroglühlampen ... 367
11.2.5 Fertigungsablauf und Endkontrolle ... 368
11.3 Lebensdauer von Glühlampen ... 368
11.4 Anwendung von Glühlampen in der Automobilindustrie ... 370
11.4.1 Scheinwerferarten und Reflektortechnologien ... 371
11.4.2 Materialien bei der Herstellung von Schweinwerfern ... 372
11.4.3 Lichtquellen für Scheinwerfer ... 373
11.4.4 Ausblick – Intelligente Scheinwerfer – Neue Technologien ... 375
11.5 Literaturverzeichnis ... 378
12 Ein paar persönliche Schlussbemerkungen ... 379

1 Einleitung

Zusammenfassung: Die Herstellung eines Produktes erfordert ein gut abgestimmtes Zusammenwirken von Design, Werkstoffauswahl und Wahl einer wirtschaftlichen Fertigungsmethode. Erst durch die Betrachtung der Wertschöpfungskette als integriertes System können auf vielfältige Art und Weise neue Lösungen generiert werden. Im vorliegenden Buch werden zunächst die Prinzipien und Strategien der Marktwirtschaft und der Produktionssysteme, Methoden zur Entscheidungsfindung und zum Innovations- und Wissensmanagement behandelt, gefolgt von den drei Hauptthemen Design, Werkstoffe und Fertigung unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit und der Möglichkeiten zur Kostensenkung. Im ersten Kapitel wird ein roter Faden durch das Buch gezogen und Ausgangspositionen für den Auswahlprozess von Werkstoffen und Fertigungsverfahren skizziert.

1.1 Motivation

Wenn man sich entschließt ein Buch zu schreiben, dann wird dies meist damit begründet, dass man etwas weitergeben möchte, von dem man glaubt, dass es für den Leser wichtig ist, zu wissen. Das Wissen und die Erfahrungen, die man selbst gemacht oder erlebt hat, werden in einer wohl strukturierten Form wiedergegeben. Dies geschieht, um einerseits für das Fach zu werben, oder andererseits, um Erkenntnisse weiterzugeben, von denen man glaubt, dass sie es wert sind, noch besser, facettenreicher und wirkungsvoller weiter entwickelt zu werden.
Ob eigene Träume oder Vorstellungen über die Realität und über virtuelle Möglichkeiten an Jüngere transferiert werden können, ist sicherlich fraglich – man denke bspw. an die manchmal ungehörten Bemühungen in der Erziehung seiner eigenen Kinder.
Es drängt sich die Frage auf, warum man nicht selbst die Lösungen für erkannte Probleme geschaffen hat und jetzt nur darauf wartet, dass jemand mit frischem Geist und hoher Intelligenz das Potential mitbringt eine innovative Lösung für offene Fragen zu generieren. Ehrlich gesagt, ich glaube, dass dies so ist. Dabei denke ich an Leistungssportler, die nach Jahren des Erfolgs erkennen, dass es nun Zeit ist, sich aus dem aktiven Sportlerleben zurückzuziehen und die nun als anerkannte Mentoren für den Nachwuchs zur Verfügung stehen.
Was sind nun die wichtigsten Aspekte, die ich gerne vermitteln möchte? Vor Kurzem habe ich das empfehlenswerte Buch von Horst Czichos mit dem Titel „Die Welt ist dreieckig“ gelesen [Czi13] und bin dabei auch auf einen Hinweis auf einen Vortrag von Lawrence Burns [Bur11], ehemaliger R&D-Vice President von General Motors Corp. gestoßen, der ganz besonders darauf hinweist, dass Ingenieure die Fertigung als ein integriertes System sehen sollten.
Ich kann dies nur unterstreichen, denn meine Erfahrungen über Design, Werkstoffe und Bauteilfertigung haben mir gezeigt, dass es sehr viele Aspekte bzw. Betrachtungsweisen gibt, die zu neuen und möglicherweise auch besseren Lösungen führen. In diesem Sinne möchte ich den Versuch unternehmen, die vielfältige, aber logisch vernetzte Gedankenwelt bei der Produktion von Gütern zu durchleuchten und etwas zum Querdenken anzuregen, um Neues zu schaffen.
Demnach unterscheidet sich dieses Buch von den klassischen Lehrbüchern, weil es nicht davon lebt, verifiziertes Wissen in systematischer Form wiederzugeben, sondern vielmehr versucht wird, neue Gedankenräume zu schaffen, die als Basis für neue Ideen und Innovationen dienen können. Natürlich spielt dabei das kreative Element eine große Rolle, aber auch das Umgehen mit komplexen Systemen, verbunden mit dem ehrlichen Bemühen, sachlich korrekte und weitblickend richtige Entscheidungen zu treffen. Man erkennt dabei recht schnell, dass eine gute Entscheidungsfindung – und dies ist eine Kernaufgabe für Führungspersonen - nur mit qualitativ hochwertiger Information und fundiertem Grundwissen gefunden werden kann.
Das System Design, Werkstoffwahl und die wirtschaftlich entscheidende Auswahl geeigneter Fertigungsverfahren und -ketten bietet den Rahmen für die Gestaltung neuer Produkte. Zudem kommen einige übergreifende Querschnittstechnologien, die eine neue, notwendige Basis bilden und

auch die digitalen Möglichkeiten, die die geforderte Effizienz gewährleisten. Letztendlich bleibt aber der Mensch, der die Entscheidungen für zukünftige Entwicklungen trifft und ethisch zu verantworten hat - insgesamt eine sehr spannende und verantwortungsvolle Aufgabe. Ich wünsche viel Spaß beim Lesen und Stöbern und viel Freude an diesem Buch.

1.2 Der rote Faden durch das Buch

In grafischer Form sind in Abb. 1 der Inhalt und die Zusammenhänge der behandelten Themen übersichtlich dargestellt. Die Kapitelnummern sind ebenso angegeben.

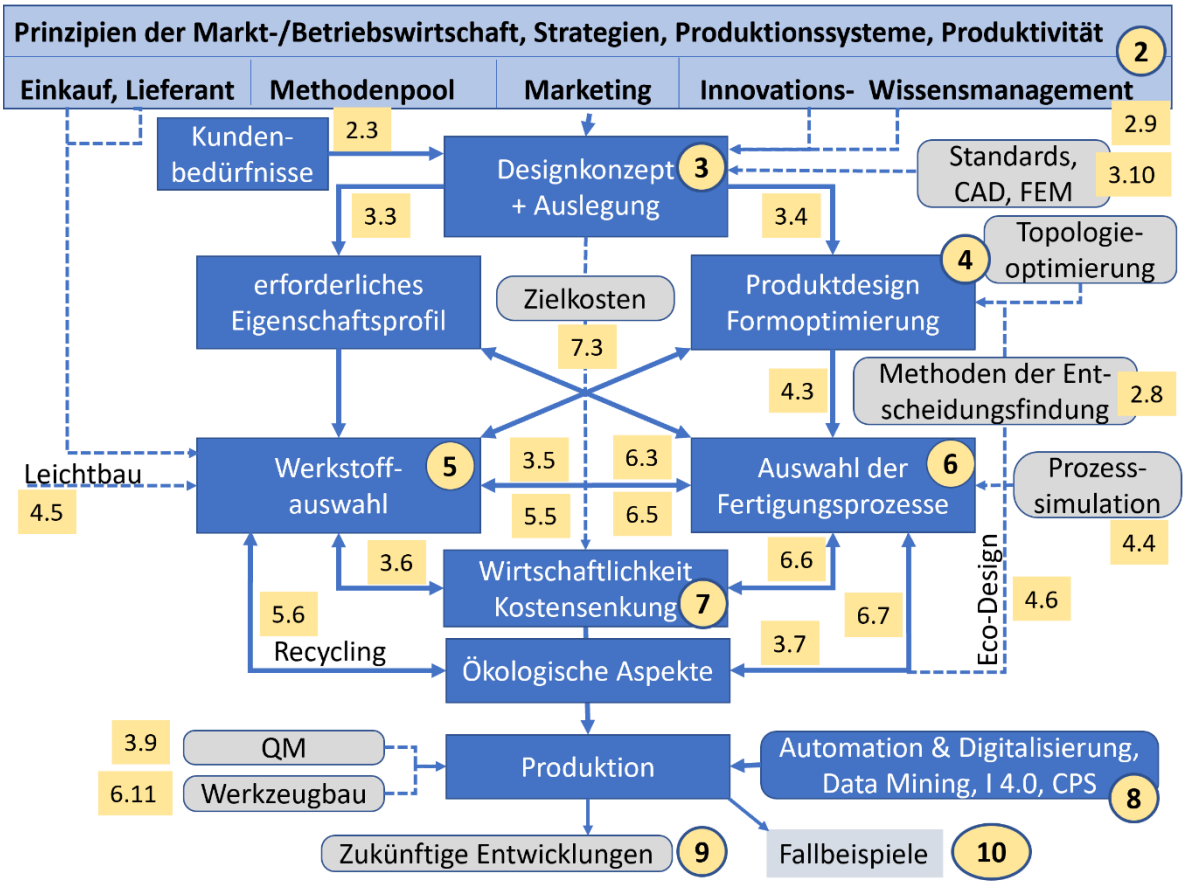


Abb. 1: Kapitelübersicht in graphischer Form

Die Sachgüterproduktion in industrialisierten Staaten trägt mit einem Viertel zum Gesamteinkommen einer Nation bei. Betriebswirtschaftliches Wissen, Strategien der Produktionswirtschaft, Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit und Innovationsbereitschaft bilden die Basis erfolgreicher Unternehmen. Im Kap.2 werden die Grundlagen der Produktionswirtschaft kurz behandelt. Die Produktentwicklung und ganzheitliche Produktionssysteme nehmen dabei eine vorrangige Stellung ein.
Für das Führungspersonal (Geschäftsführer, Betriebsleiter, F&E-Leiter u.a.) zählen Entscheidungen zu den alltäglichen Aufgaben, wozu systemanalytisches Wissen und ein Pool von Methoden, wie QFD, Nutzwertanalyse, TRIZ u.a.m. (siehe Kap.2.8) notwendig sind. Innovations- und Wissensmanagement gehören sind die Schatzkammer für Neuentwicklungen und Ausbildungsfundus für Jungingenieure. In

Kap.3 wird das Gesamtsystem aus Konstruktion und Fertigung im Zusammenwirken und mit den wesentlichen Wechselwirkungen beschrieben. Dabei wird der integrative Charakter dieses Systems offensichtlich.
Die entscheidenden Faktoren für das Produktdesign, für die belastungs- und fertigungsgerechte Gestaltsoptimierung, sowie die Überprüfung der Machbarkeit zum Zeitpunkt des Designs mithilfe von Prozesssimulationen, sowie der Formleichtbau und ökologisch orientiertes Design bilden den Inhalt des Kap.4.
Die Kriterien zur Werkstoffauswahl und die grundsätzliche Vorgehensweise nach dem Muster von emerit. Prof. Mike Ashby, University of Cambridge, sowie die Berücksichtigung der ökologischen und fertigungstechnischen Aspekte werden im Kapitel 5 ausführlich behandelt. Ein kurzes Unterkapitel beschreibt die Werkstoffe für den Bereich der Bildhauerei bzw. der Kunst.
Sehr umfassend wird im Kapitel 6 das Thema der Auswahl von Fertigungstechnologien analysiert. Auswahlkriterien, unterschiedliche Aspekte bei der Festlegung auf optimierte Prozesse werden im Detail behandelt. Die Themen Fertigungstechnischer Leichtbau, Füge- und Oberflächentechnologien, Rapid Prototyping, generative Fertigungsverfahren und der Werkzeugbau werden aufgrund ihrer hohen Wertigkeit angeführt.
Im Kap.7 werden die wichtigsten Aspekte des Kostenmanagements und insbesondere Maßnahmen zur Kostensenkung und das Themen Life-Cycle-Assessment in der notwendigen Tiefe beschrieben. Dem technologischen Trend der letzten Jahrzehnte folgend, werden im Kap.8 die Bereiche Automation und Digitalisierung behandelt. Dabei werden sowohl daten- als auch physikalisch basierte Konzepte zur Optimierung der Fertigung angeführt, die heute meist unter dem Namen Industrie 4.0 zusammengefasst werden. Das Konzept des digitalen Zwillings und Cyber-Physical Systems werden ebenso beschrieben.
Mit Blick in die Zukunft werden im Kap. 9 mögliche Veränderungen und die damit verbundenen Herausforderungen behandelt. Die Rolle der Kreativität, der Ausbildungsqualität und der ethischen Prinzipien werden besonders hervorgehoben. Im Kap.10 folgt eine persönliche Schlussbetrachtung.
Zur Vertiefung und zur Erprobung integrativer Auswahlkonzepte werden im Anhang A über 50 Fallbeispiele aus acht unterschiedlichen Bereichen als Übungsbeispiele skizziert. Darüber hinaus sind noch Informationen über Werkstoffdatenbanken und englische Fachbegriffe und Verständnisfragen beigefügt.

1.3 Mögliche Ausgangspositionen vor dem Auswahlprozess

Der wesentliche Faktor für ein erfolgreiches Wirtschaften ist es, die Kundenmotive genau zu kennen und zu wissen, warum sich ein Kunde für ein bestimmtes Produkt oder eine Marke entscheidet. Es gibt noch weitere Ziele in der Produktion, siehe Kap. 2, die für den Erfolg eines Unternehmens wichtig sind. Zunächst sollen aber die Kernthemen des integrierten Systems, die Auswahl von Werkstoffen und von Fertigungsverfahren unter wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten behandelt werden. Es gehört zum Grundprinzip eines integrierten Systems, dass die Hauptfaktoren stets gleichzeitig, gleichrangig und unter Berücksichtigung der vielfältigen Wechselwirkungen betrachtet werden. Es ist daher klar, dass es keine vorgegebenen Prozessrouten geben wird, sondern dass je nach Anlassfall und Ausgangsposition, bzw. aufgrund des gesellschaftlichen Wandels oder aufgrund von technologischen Trends optimale Lösungen gefunden werden.
Mögliche Startpunkte für die Auswahl eines optimalen Werkstoffs können sein:

- Hoher Materialkostenanteil, d.h. Senkung der Materialkosten durch günstigere Werkstoffe oder durch Leichtbau oder durch Wiederverwendung nach geplanter Lebensdauer
- Neue Werkstoffe aus Urban Mining (Abfall)
- Neue Werkstoffe für die Medizin
- Neue Werkstoffe für Klimaschutz
- Metastabile Werkstoffe (bewusste Veränderung im Gebrauch, Bsp. TRIP-Effekt)

- Werkstoffentwicklung in Richtung besserer Verarbeitbarkeit
- Änderung der Verfügbarkeit von Werkstoffen und Halbzeug (weltweiter Supply-Markt für kleine Mengen)
- Neue Werkstoffe aus der F&E-Tätigkeit (dies erfordert neue Herstellungsoptimierung)
- Anforderungen durch gesellschaftlich Druck, bspw. höhere Bedeutung der Umweltschonung
- Probleme mit Rohstoffverfügbarkeit (Suche nach Alternativwerkstoffen)
- Schnellere Verfügbarkeit der Prototypen (Entscheidung für andere Werkstoffgruppe)
- Wunsch nach besserer Verarbeitbarkeit
- Wiederverwendbarkeit nach Gebrauchszeit
- Luxusgüter
- Verwendung nachwachsender Werkstoffe (Polymer + Holzspäne, Polymer + Füllstoffe)
- Brauchen wir neue Werkstoffe, wenn es schon über 50.000 gibt?
- Werkstoffentwicklung aus Verfügbarkeit heraus (bspw. Si besser verarbeitbar machen)
- Werkstoffe der Kunst bzw. Hobby-Werkstoffe
- Verwendung nachhaltiger Biomaterialien
- Prinzipien des spannungsgesteuerten Wachstums nutzen (bspw. Natur, Bäume) für optimale Geometrien
- Nutzung von schadenstoleranten Werkstoffsystemen
- Neue Werkstoffe zur Energieumwandlung und -speicherung
- Anstöße durch Förderung von Start-ups
- Neue Ansätze aus der Arbeit von Think Tanks (freies, laterales Design-Denken)
- Neue Lösung durch besseres Lesen der menschlichen Bedürfnisse

Mögliche Startpunkte für die Wahl einer effizienten Fertigungsmethode bzw. -folge können sein:

- Verbesserung der Werkzeugauslegung
- Rasche Umsetzung von der Idee zum fertigen Produkt
- Höhere Flexibilität (Änderung der Maschinenfolge, Verwendung von Lasersystemen)
- „Lean Production“-Anforderungen
- Senkung der Herstellkosten
- Auswahl aufgrund der Produktgröße
- OT für Verschleiß und Korrosion
- Geometrie bestimmt die Fertigungsart
- Erweiterung des Produktportfolios für bestehenden Maschinenpark
- Digital gestützte Fertigung und Automation
- Anregung von anderen Branchen
- Miniaturisierung
- Neue Robotik-Systeme (Bsp. COBOT)
- Verwirklichung des „Smart Production“-Konzeptes
- Optimierte Fertigungsketten
- Modellierung und Simulation
- Digitaler Zwilling

1.4 Literaturangaben zu Kapitel 1

[Bur11] L.D.Burns: What Does the Next Generation Need to Know and Do in Manufacturing and Design? Vortrag beim NAE (National Academy of Engineers)-Annual Meeting, Making Things: 21st Century Manufacturing and Design Forum, Mariott Hotel, Washington, 17.10.2011, siehe https://www.nae.edu/53248/What-Does-the-Next-Generation-Need-to-Know-and-Do-in-Manufacturing-and-Design

[Czi13] H. Czichos: Die Welt ist dreieckig, Springer Verlag, 2013

2 Produktion – Einführung, Konzepte und Produktentwicklung

Zusammenfassung: Unternehmerisches Denken und Handeln und das grundlegende betriebs- und volkswirtschaftliche Wissen bilden auch für Ingenieure eine wesentliche Voraussetzung für das Verstehen vielfältiger Vorgänge. Es werden daher einige Grundprinzipien der Marktwirtschaft, Faktoren der Wettbewerbsfähigkeit, der Produktentwicklungsprozess und Produktionssysteme kurz umrissen. Mit Methoden zur Produktfindung, Systemanalyse und verschiedener Ansätze der Entscheidungsfindung, sowie des Innovations- und Wissensmanagements sollen die Grundlagen für die Auswahl geeigneter Werkstoffe und Fertigungstechnologien geschaffen werden.

2.1 Marktwirtschaft – Angebot und Nachfrage

In den meisten westlichen Ländern wird eine ökosoziale Marktwirtschaft verfolgt. Der Staat greift nur dann ein, wenn dies aus sozialen oder ökologischen Gründen notwendig ist. Ansonsten versucht man das freie Spiel der Kräfte zwischen Angebot und Nachfrage möglichst ungestört in Aktion zu halten. Die soziale Marktwirtschaft basiert auf einer marktwirtschaftlichen Ordnung und ist charakterisiert durch das Recht auf Eigentum an Produktionsmitteln, Gewerbe- und Vertragsfreiheit, freie Preisbildung, dezentrale wirtschaftliche Leitung und dynamischer Wettbewerb einerseits sowie sozialem Ausgleich und Gewährleistung sozialer Sicherheit und angestrebter sozialer Gerechtigkeit.
Große wie auch kleine Unternehmen unterliegen einem marktwirtschaftlichen Leistungs- und Preiswettbewerb und nutzen ihre Möglichkeiten und Ressourcen zur Erreichung folgender Ziele:

- Finanzielle Ziele (Umsatz, Gewinn, Liquidität u. a.),
- nicht-monetäre Ziele (Marktanteil, Image, Prestige),
- soziale Ziele (Mitarbeiterzufriedenheit, gutes Betriebsklima) und
- ökologische Ziele (geringe Umweltbelastungen, Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen).

Unter Produktionstechnik werden alle Maßnahmen und Einrichtungen zur industriellen Herstellung von Gütern zusammengefasst und gliedert sich in

- Verfahrenstechnik
- Energietechnik und
- Fertigungstechnik

Die hier betrachtete Fertigungstechnik hat als primäres Ziel die Herstellung materieller Güter (Werkstücke, Komponenten, Maschinen etc.) mit definierter Form und definierten Eigenschaften. Ausgehend von der Konstruktion werden durch menschliche Arbeitsleistung, Einsatz technischer Betriebsmittel und industriell anwendbarer Fertigungsverfahren Rohstoffe bzw. Vormaterial (Halbzeuge) in Fertigprodukte transferiert. Bei den erzeugten Produkten unterscheidet man zwischen Konsumgütern (Bedürfnisse der Bevölkerung) und Investitionsgütern (z.B. Brücken, Eisenbahn u.a.m.). Entsprechend dem ökonomischen Prinzip werden die Ressourcen so eingesetzt, dass
ein größtmöglicher Ausstoß an Ertragsgütern bei gegebenem Ressourceneinsatz und gegebenen Wirkungsgraden in der Leistungserstellung (Maximumprinzip), oder ein definierter, marktlich verwertbarer Ausstoß an Ertragsgütern bei minimalem Ressourceneinsatz und gegebenen Wirkungsgraden in der Leistungserstellung (Minimumprinzip) erreicht wird, siehe Abb. 2 aus [DAA20].

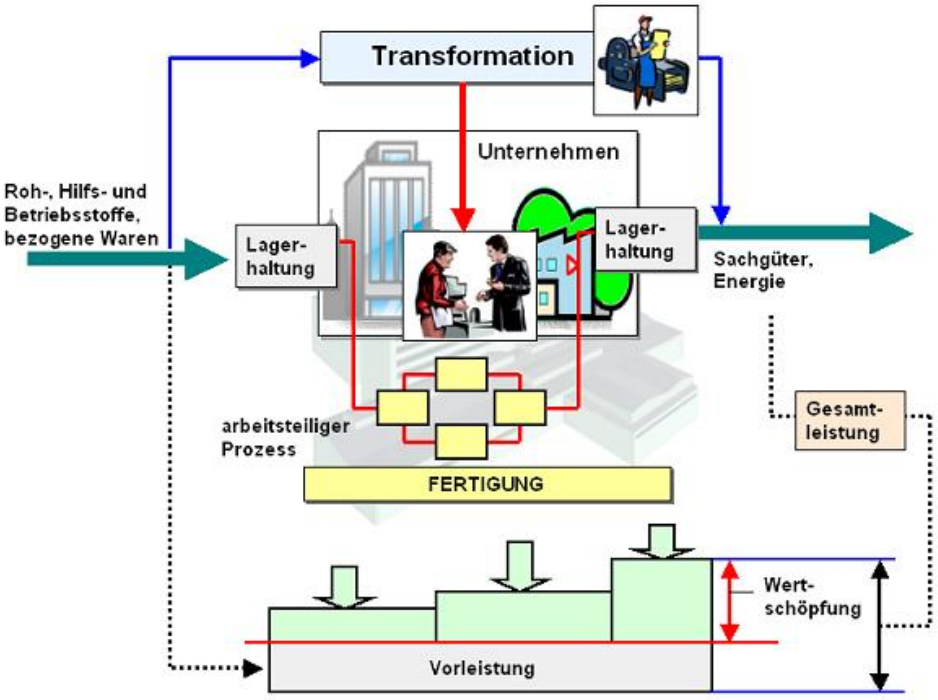


Abb. 2: Fertigung – Wertschöpfungsprozess vom Rohstoff zum Fertigprodukt nach [DAA20]

2.1.1 Angebot und Nachfrage

Der Markt ist der Ort an dem Angebot und Nachfrage aufeinandertreffen. Üblicherweise ist die am Markt nachgefragte Menge umso kleiner, je höher der Preis für dieses Produkt ist. Weitere Einflüsse sind die Bedürfnisintensität und das verfügbare Einkommen. Im Gegensatz dazu verhält sich das Güterangebot. Der Preis lenkt Produktion und Angebot. Wenn Preise steigen, wird signalisiert, dass eine Ware knapp wird. Anbieter sehen eine gute Change etwas zu verdienen und erhöhen die Produktionsmenge. Abb. 3 zeigt die Abhängigkeiten der Angebots- und der Nachfragekurve in Anhängigkeit von der nachgefragten bzw. produzierten Menge [Edl06]. Bei stabilen Verhältnissen bildet sich ein sog. Marktgleichgewicht. Nur in wenigen Fällen ist ein regulierendes Eingreifen des Staates notwendig.
Die freie Marktwirtschaft ist im Grunde genommen ein sich selbst regelndes System. Bei einem Überschuss in der Produktion, also bei einer Menge, die größer ist als die Gleichgewichtsmenge, würde sich der Preis nach unten bewegen. Bei einer sehr großen Nachfrage würde der Preis steigen.
Als Einflussfaktoren für Angebot und Nachfrage können genannt werden:

- Konkurrenz
- Erwartungen
- Qualität und Kapazität
- Preis anderer vergleichbarer Güter

Man sieht, dass der Preis auf Produktion und Angebot
Normalerweise wäre in diesem selbststabilisierenden System kein äußerer Eingriff notwendig, es gibt aber Sachverhalte, wo der Staat regulierend eingreifen muss, bspw. zum Schutz wirtschaftlich Schwacher, aus Sorge um Grund- und Kulturbedürfnisse, bei Steuererleichterungen u.a.m. Für diese Fälle definiert man den Begriff der sozialen Marktwirtschaft. Werden dazu noch ökologische Aspekte, die für die Gesellschaft wichtig sind, bspw. durch Gesetze für den Umweltschutz berücksichtigt, dann führt dies zu einer ökosozialen Marktwirtschaft.

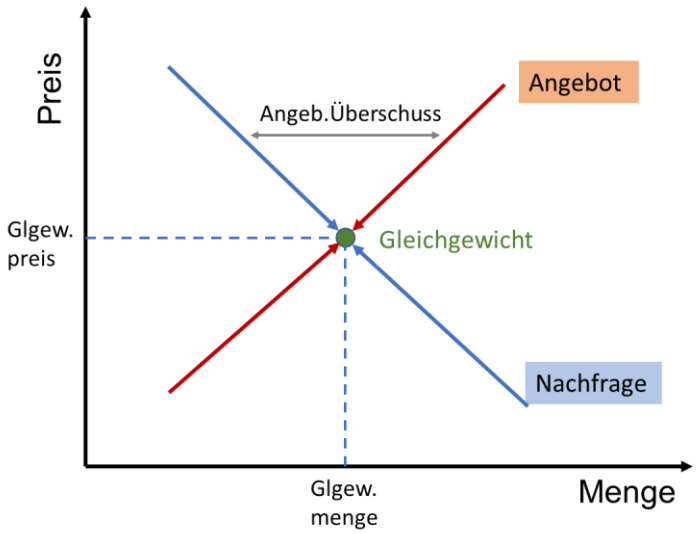


Abb. 3: Angebots- und Nachfragekurve ergeben im Schnittpunkt das Marktgleichgewicht

Nachdem die marktwirtschaftlichen Grundlagen nicht Kernthema dieses Buches sind, wird hier noch auf einige Studienbücher hingewiesen [Bof19, Kru17, Woe13, Men15, Tho16, Woe16].

2.1.2 Bedeutung der Fertigungstechnik

Ein vom Kunden gewünschtes Bauteil/Produkt bedarf eines geeigneten Werkstoffs und eines Fertigungsverfahrens, mit dem aus einem Rohzustand ein Fertigteil in der gewünschten Form innerhalb einer vorgegebenen Toleranz entsteht. Insofern ist die Fertigungstechnik so alt wie die Menschheit und fixer Bestandteil der gesellschaftlichen Entwicklung. Die Fertigungstechnik hat sich im Zuge der industriellen Revolution und der Entwicklung neuer Werkstoffe und der Antriebstechnik/Elektrizität, sowie in letzter Zeit durch Automation und Digitalisierung sehr stark verändert. Es sind neue Technologien entstanden und das Wissen über die Technologien wurde komplexer und grundlagenorientierter. Aus volkswirtschaftlicher Sicht trägt die Sachgütererzeugung zu ca. 25% am Bruttoinlandsprodukt bei, siehe Abb. 4, und ist somit Träger unseres Wohlstandes. In den letzten Jahrzehnten ist aber ein leichter Abfall des BIP-Anteils der Fertigungstechnik in den industrialisierten Ländern zu beobachten [Wes10].

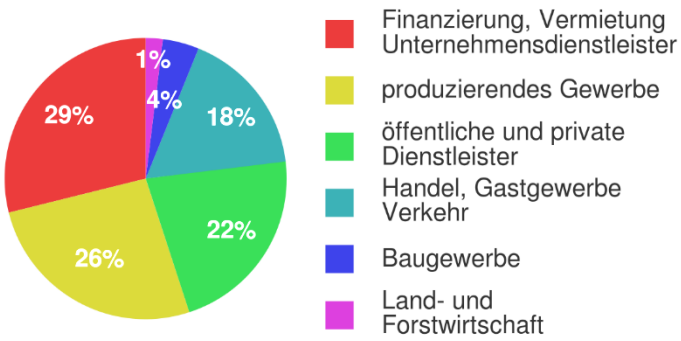


Abb. 4: Anteil des produzierenden Gewerbes am Bruttosozialprodukt. [de.wikipedia.org]

Innerhalb des produzierenden Gewerbes gibt es in Deutschland die in Abb. 5 gezeigte Verteilung der Branchen. Die Metallerzeugung und -weiterverarbeitung, die Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen, der Maschinenbau sind die primären Anwender der Fertigungstechnik.

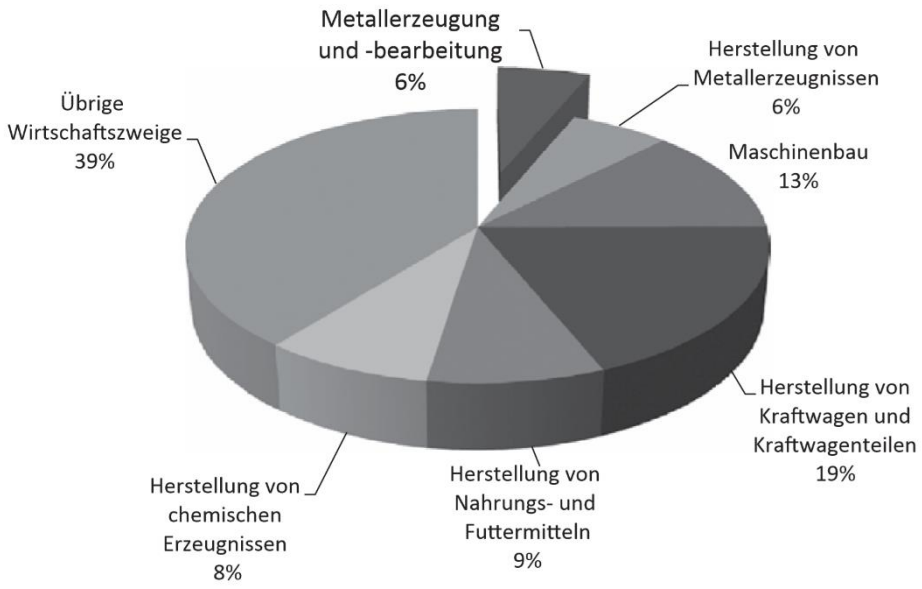


Abb. 5: Anteile der Branchen im Segment der produzierenden Industrie in Deutschland in 2010 (Quelle: dt. Statistisches Bundesamt 2013)

Das weltweite Marktvolumen des verarbeitenden Gewerbes zeigt Abb. 6. Im Jahr 2011 erreichte der globale Markt für Maschinenbauerzeugnisse ein Volumen von rund 3,4 Billionen Euro. In Deutschland liegt der Umsatz im Maschinenbaubereich bei über 200 Milliarden Euro und ca. 1 Million Personen werden beschäftigt. Innerhalb des Maschinenbaus ist der Werkzeugmaschinenbau der wichtigste Sektor. Weitere bedeutende Teilbereiche sind lt. Statistica die Antriebstechnik, der Landmaschinenbau, der Textilmaschinenbau, der Bergbau, - Bau- und Baustoffmaschinenbau oder die Fördertechnik. In der deutschen Metallindustrie wird im Vergleich ein Umsatz von rund 100 Milliarden Euro erzielt.

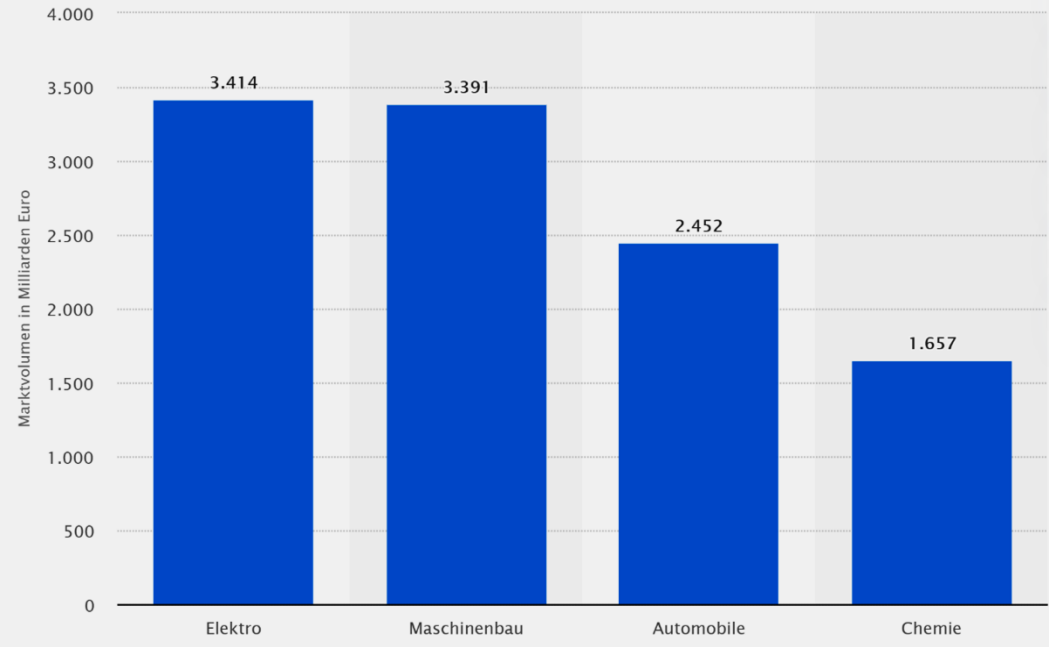


Abb. 6: Das Marktvolumen verschiedener Branchen des verarbeitenden Gewerbes weltweit im Jahr 2011 (Bildquelle: de.statista.com, 2020)

2.2 Strategien der Produktionswirtschaft und der Wettbewerbsfähigkeit

Für die Sicherung der Zukunftsfähigkeit eines Unternehmens ist es entscheidend, wie das nutzbare Erfolgspotenzial ausgeschöpft wird und wie all jene Faktoren gepflegt werden, die die Leistungsfähigkeit des Unternehmens beeinflussen, siehe [Cor09, Kel18, Neb11]. Als wichtige Erfolgspotenziale gelten: Marktanteile bei Produkten mit stabil hohen Erträgen, ausbaufähige Kundenbindung, Qualität der Produkte und Produktivitätsniveau der Herstellungsprozesse, Stärke des Managements und Effizienz der Unternehmensorganisation. Wichtige Grundlagen und Instrumente hierfür liefert das strategische Controlling (Potenzialanalysen, Stärken-Schwächen-Analysen, Portfolio-Analysen u. a.).
Generische Strategien zur Produktpolitik, die ein Unternehmen verfolgen kann, um sich im Zielmarkt einen Wettbewerbsvorteil zu verschaffen hat Michael Porter [Por80] in Form einer Wettbewerbsmatrix, siehe Abb**. 7**, eingeführt und dabei drei grundlegende Strategien vorgeschlagen:

1. Kostenführerschaft
   mit den Methoden Skalen- und Verbundeffekte, Prozesstechnik (Erfahrungskurve), Produkt- und Prozessdesign, sowie Kapazitätsausnutzung.
2. Differenzierung
   mit den Methoden Preisführerschaft, Image u. Produktdesign, Service, Design, Qualitätsführerschaft, hohe Wiedererkennbarkeit, Alleinstellungsmerkmal (USP = unique selling preposition).
3. Nischenstrategie (Fokussierung)
   Durch Konzentration auf Schwerpunkte, Kundengruppen oder geographische Märkte.

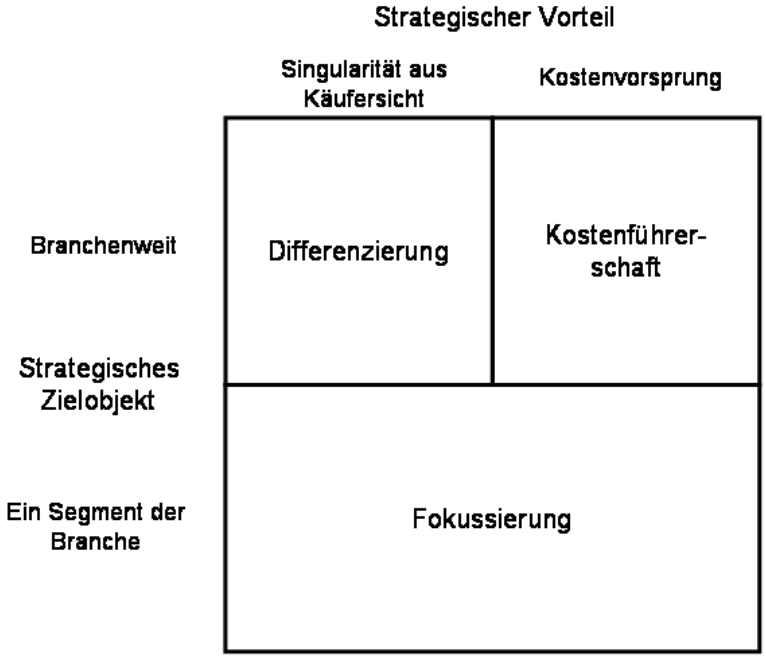


Abb. 7: Wettbewerbsmatrix nach M.E. Porter [Por80]

International tätige Firmen bzw. Konzerne verfolgen die Differenzierungsstrategie und komplementieren ihr Produktportfolio ständig und bauen auch den Bereich Service aus. Sie entwickeln

sich vom Produkt- zum Systemanbieter. Als Beispiel ist in Abb. 8 das breite Angebot der Fa. Hilti AG für den Bereich Befestigung/Bauwesen mit einheitlichem Design (roter Werkzeugkoffer) dargestellt. Ähnliche strategische Konzepte findet man bei der Fa. Kärcher (Reinigungssysteme), Siemens, Bosch, SAP, 3M, Samsung, Nestle u.a.m.

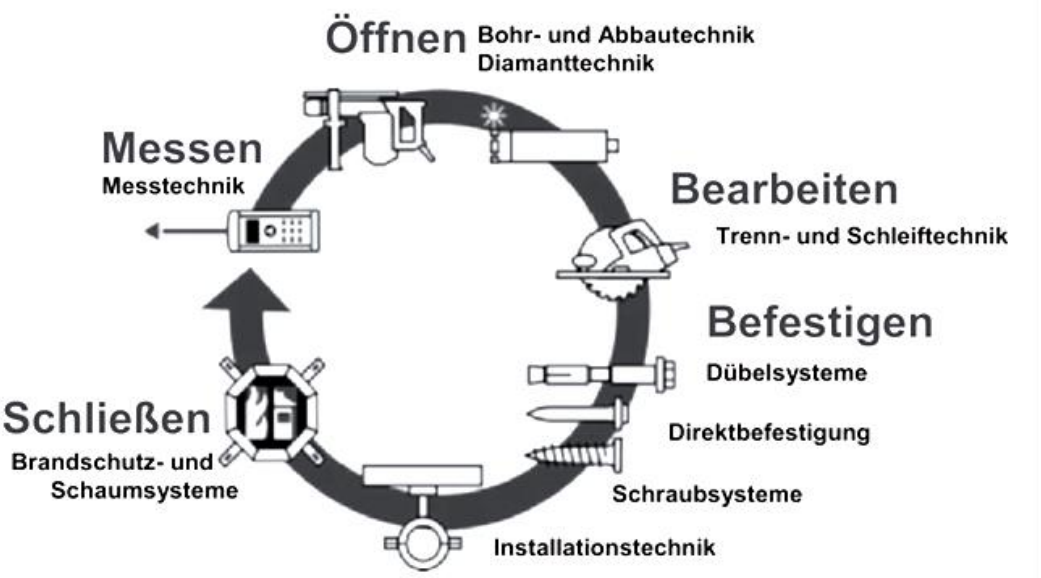


Abb. 8: Produktprogramm des Systemanbieters Hilti AG nach [Abe08]

2.2.1 Wettbewerbsanalyse

Um sich ein klares Bild über die Konkurrenten, den Markt und eigene Marktchancen zu erhalten, werden anlassbezogen oder regelmäßig Wettbewerbsanalysen durchgeführt. Dazu werden umfangreiche Informationen über die Mitbewerber und der zugehörigen Branche gesammelt und ausgewertet, damit die eigene Marktposition gesichert, verstärkt und ausgebaut werden kann [Gra00]. Die Informationen werden über Lieferanten, Händler, Verbände, Behörden, Pressemitteilungen, Web-sites u.a. eingeholt. Wichtige Kennzahlen, wie Umsatz, Gewinn, Marktanteil, Kapitalbindung, Qualität, Preisniveau, Entwicklungsschwerpunkte (F&E) werden in Tabellen ausgewertet. Als Ergebnis sollte ein umfassendes und gesichertes Bild über die Leistungsfähigkeit (Stärken/Schwächen), Ziele, USP und Strategien der Mitbewerber gezeichnet werden können.
Auf Basis dieser Analyse ist dann zu überlegen, welche Maßnahmen als Reaktion auf evtl. Herausforderungen bzw. zur Verbesserung der eigenen Wettbewerbsfähigkeit zu setzen sind. Mögliche Veränderungen können sein:

- Erweiterung des Produktportfolios
- Verbesserung der Produktqualität
- Ausbau des Serviceangebots
- Einführung neuer Produkttechnologien
- Preissenkung

Ganz allgemein bleibt je nach Lage bzw. Produkt eine der vier Optionen

- Ausweichen
- Konflikt
- Anpassung
- Kooperation

2.2.2 Blue Ocean Strategie

In vielen Bereichen, wie auch in der Güterproduktion, sind vielfach die Märkte gesättigt, d.h. es werden gleiche oder ziemlich ähnliche Produkte und auch Serviceleistungen von immer mehr Mitbewerbern angeboten, was zu einem enormen Konkurrenzdruck und zu niedrigen Margen führt.
Der Grundgedanke der Blue-Ocean-Strategie ist, dass nur durch die Entwicklung innovativer und neuer Märkte dauerhafte Erfolge erzielt werden können, sofern ein für den Kunden sichtbarer und relevanter Nutzen entsteht [Cha05]. Dabei sind psychologische, kreative, funktionale und ökonomische Wertbetrachtungen in Bezug auf den Kunden notwendig. Durch kreatives Denken und das Setzen von neuen Maßnahmen können neue, unberührte Märkte entstehen, die wenig bis gar keinen Wettbewerb spüren. Die Unterschiede der neuen Blue-Ocean-Strategie zur alten Red-Ocean-Strategie (basiert auf dem Bild von blutigen Kämpfen mit Raubfischen) zeigt Tabelle 1.

Red-Ocean-Strategie	Blue-Ocean-Strategie
Wettbewerb im vorhandenen Markt	Schaffung neuer Märkte
Die Konkurrenz schlagen	Der Konkurrenz ausweichen
Die existierende Nachfrage nutzen	Neue Nachfrage erschließen
Direkter Zusammenhang zwischen Nutzen und Kosten	Aushebeln des direkten Zusammenhangs zwischen Nutzen und Kosten
Ausrichtung des Gesamtsystems der Unternehmensaktivitäten an der strategischen Entscheidung für Differenzierung oder niedrige Kosten	Ausrichtung des Gesamtsystems der Unternehmensaktivität auf Differenzierung und niedrige Kosten

Tabelle 1: Vergleich der Geschäftsmodelle „alt“ und „neu“ (Blue-Ocean-Strategie). [Bildquelle: de.wikipedia.org/wiki/Blue-Ocean-Strategie]

Methodisch werden jene Kernattribute/Kernelemente in einer Wertekurve dargestellt, die für den Kunden wichtig sind. In einem kreativen Prozess werden danach Kernelemente verändert, wodurch neue Wertekurven bzw. neue Geschäftsmodelle entstehen. Tabelle 2 zeigt jene vier Maßnahmen, die zu Änderungen der Kernelemente führen können.

Eliminierung	**Reduzierung**
Jene Faktoren oder Elemente, die keinen Nutzen mehr für den Kunden haben werden weggelassen. Dies gilt auch für abweisende Faktoren.	Jene Attribute, die als überzogen in Bezug auf den Kundennutzen gelten und nur höhere Kosten verursachen, werden reduziert.
Steigerung	**Schaffung neuer Werte**
Jene Attribute, die einen hohen Kundennutzen versprechen, müssen über den Standard gehoben werden.	Entwicklung neuer Ansätze oder neue Komponenten eines Produkts, die ein neues Kundenbedürfnis wecken (auch für Nichtkunden).

Tabelle 2: Vier Möglichkeiten zur Veränderung der Werte/des Nutzens für den Kunden

Jüngste Beispiele für die erfolgreiche Anwendung der Blue-Ocean-Strategie finden sich bei

- Nintendo (Steuerkonsole mit Bewegungssensoren)
- Nespresso (Portionierung und edle Verpackung)
- Cirque du Soleil (Unterhaltung durch Künstler und nicht mehr mit Tieren)

- Ryanair (Billigflüge durch Serviceminimierung und Standardisierung)

Das Motto lautet also: Don’t beat them, make them irrelevant!

2.2.3 Faktoren der Wettbewerbsfähigkeit

Für die Wettbewerbsfähigkeit müssen sämtliche Einflussgrößen, wie sie in Abb. 9 dargestellt sind berücksichtigt werden. Die internationale Beratungsfirma Deloitte führt die nationalen Schlüsselfaktoren für den globalen Erfolg im Bereich der Produktionstechnik zu einem Wettbewerbsindex (GMCI-Global Manufacturing Competitiveness Index, [Del16]) zusammen. In diesem länderspezifischen Index werden die folgenden treibenden Elemente, gereiht nach ihrer Bedeutung, zusammengefasst:

- Talente
- Kostenkompetenz
- Produktivität der Mitarbeiter
- Netzwerk der Zulieferer
- Rechts- und Verwaltungssystem
- Ausbildungs-Infrastruktur
- Physische Infrastruktur
- Wirtschafts-. Handels-, Finanz- und Steuersystem
- Energiepolitik
- Lokale Marktattraktivität
- Gesundheitssystem.

Die Auswertung im Jahr 2016 ergab, dass die wettbewerbsfähigsten Nationen im Bereich der Produktionstechnik anführt wurden von China, gefolgt von USA, Deutschland, Japan, Südkorea, UK und Taiwan.

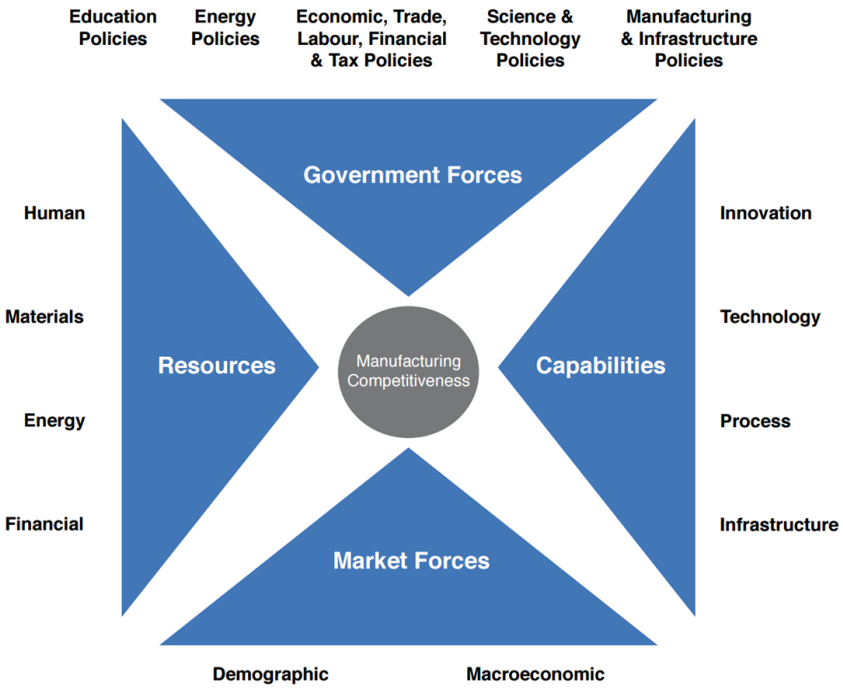
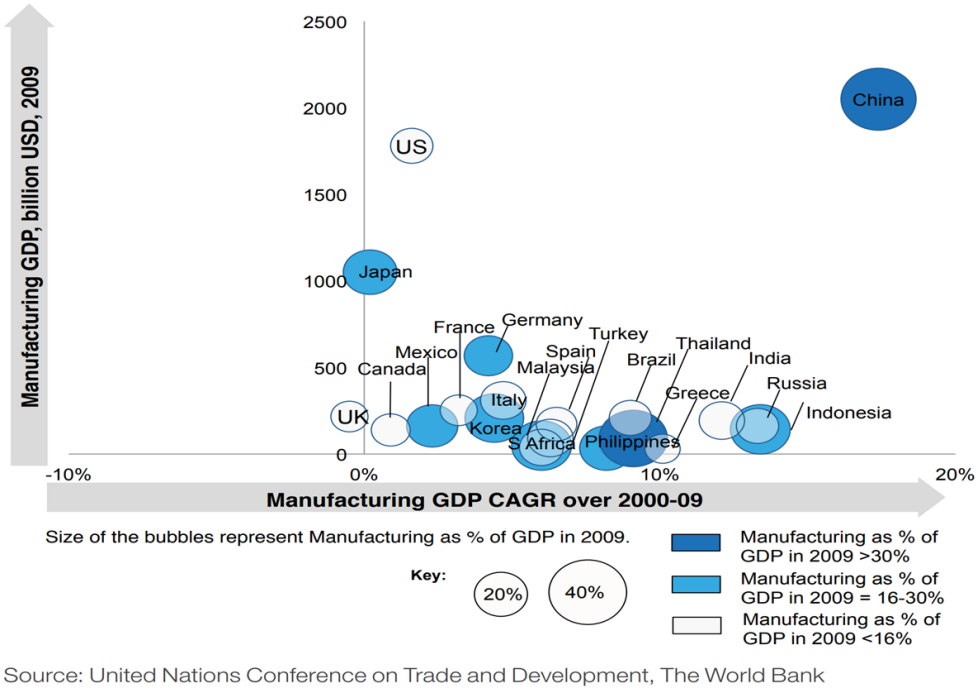


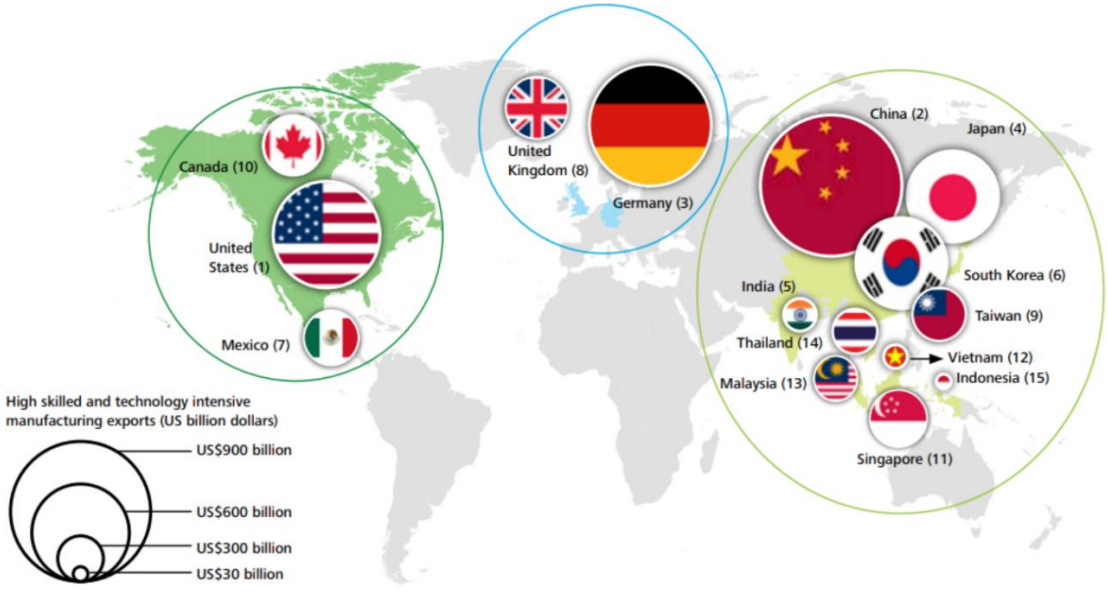
Abb. 9: Einflüsse auf die globale Wettbewerbsfähigkeit im Bereich der Sachgüterproduktion, Bildquelle: Deloitte [Del16]

Die genannten Faktoren werden auch in den folgenden Kapiteln immer wieder in den Vordergrund treten. Einen Überblick über die Verteilung der Produktionsleistungen und der Wachstumsraten im Zeitraum 2000 bis 2009 zeigt Abb. 10. und die globale Verteilung der Fertigungsstärken aller Länder der Erde ist in Abb. 11 dargestellt.



Source: United Nations Conference on Trade and Development, The World Bank

Abb. 10: Produktions-BIP absolut über der Wachstumsrate im Zeitraum 2000 bis 2009 [Del16]



Note: Figure in parenthesis represent the projected 2020 GMCI rank by CEOs

Source: Deloitte Touche Tohmatsu Limited and US Council on Competitiveness, 2016 Global Manufacturing Competitiveness Index, Deloitte analysis based on UNCTAD data[88]

Abb. 11: Regionale Verteilung und Fertigungskapazitäten der primär produktionstechnisch aktiven Länder der Erde [Del16]

2.3 Marketing und Kundenbedürfnisse

Unter Marketing versteht man alle Aktivitäten, die auf die Befriedigung von Bedürfnissen und Wünschen durch Austauschprozesse gerichtet sind [Cou05, Toe08, Beh18, Mef12]. Der wesentliche Faktor für ein erfolgreiches Wirtschaften ist es, die Kundenmotive genau zu kennen. Man muss verstehen, warum sich ein Kunde für ein bestimmtes Produkt oder eine Marke entscheidet. Dabei umfassen die menschlichen Bedürfnisse meist folgende Charakteristiken:

- das Motiv Status und Prestige (Bedürfnis nach Anerkennung),
- Kauf von Produkten mit hoher Kundenzufriedenheit (Verlässlichkeit, Genuss)
- Sicheres Kaufgefühl (Garantie, Echtheit, „Auf uns können Sie sich verlassen“)
- Suche nach neuen Produkten (zu den Ersten gehören)
- Einfaches, bequemes Erwerben (Zeitersparnis, Entlastung)
- Gesundheit und Schönheit ziehen immer (Bioprodukte)
- Bedürfnisse im Bereich Sicherheit (körperlich, finanziell, beruflich, Datenschutz)
- Kostenvorteil (Gewinner sein wollen, Rabatte nutzen)

Zur Analyse und Nutzung von Kundenbedürfnissen braucht man in vielen Fällen eine Zielgruppensegmentierung und eine Zielgruppenanalyse. Die Ermittlung der Kundenbedürfnisse geschieht durch Kundenbefragungen bzw. Interviews. Wichtige Bestandteile einer markt- und kundenorientierten Produkt- und Sortimentspolitik sind vor allem die konsequente Orientierung auf die Ausschöpfung von Erfolgspotenzialen.
Neben der Erfüllung der Basisbedürfnisse und der beschreibbaren Bedürfnisse gibt es noch die unbewussten Bedürfnisse, die, wenn sie erkannt werden, helfen, neue Kunden zu gewinnen und sich positiv vom Wettbewerb zu differenzieren. Die Entwicklung und Einführung neuer Produkte und auch die Modifikation bereits vorhandener Produkte und Produktlinien gehört zu den Aufgaben der Produktinnovation.

2.3.1 Die Conjoint-Analyse

Die Conjoint-Analyse ist eine multivariate Methode der Marktforschung, die sich seit den 1980er Jahren im Marketing etabliert hat, um Kundenwünsche genauer zu erfassen und Kaufverhalten zu prognostizieren [Fab05, Bai09]. Kunden erhalten im Rahmen einer Befragung Produkte zur Auswahl, die sich in einzelnen Merkmalen und im Preis unterscheiden. Sie sollen diese Produkte vergleichen und sagen, welches sie kaufen würden. Dabei wird der Umstand unterstützt, dass Kunden den Nutzen einzelner Produktmerkmale nicht direkt bewerten, sehr wohl aber im Vergleich Präferenzen nennen können. Nach der Befragung wird durch eine statistische Auswertung der Teilnutzen der einzelnen Produktmerkmale und des Preises berechnet.
Die Methode erlaubt dann bessere Antworten als die direkte Befragung auf Fragen wie:

- Welches Produktmerkmal ist für den Kunden am wichtigsten?
- Welche Bedeutung hat der Preis eines Produkts?
- Welchen zusätzlichen Preis würde der Kunde bezahlen, wenn er dafür ein spezielles Produktmerkmal bekäme?

Für das Marketing können noch weitere wichtige Parameter abgeleitet werden, wie

- Preiselastizität
- Preis-Absatzfunktion
- Marktanteil
- Unique Selling Proposition (USP)

Für den Produktentwickler können mithilfe dieser Methode folgende Fragen beantwortet werden:

- Soll ein Produktmerkmal, eine Funktion oder Eigenschaft, in das Produkt eingebaut und am Markt angeboten werden?
- Welcher höhere Preis könnte damit von der Zielgruppe akzeptiert werden?
- Welche Produktvarianten sollen am Markt angeboten werden?

Multivariate Software-Pakete unterstützen die Auswertung dieser Methode, siehe [Sar14].

2.4 Produktentwicklung und der Produktionsentwicklungsprozess

Erfolgreiche zukunftsorientierte Unternehmen werden daran gemessen, ob es ihnen dauerhaft gelingt neue Produkte mit entsprechendem Umsatzanteil zu entwickeln. So kann als Kenngröße der Umsatzanteil jener Produkte bestimmt werden, die in den letzten fünf Jahren entwickelt wurde. Bei stagnierenden Unternehmen kann dieser Anteil bei 10% liegen, bei erfolgreichen Unternehmen kann der Anteil bis zu 90% ausmachen.
Durch Analyse von Ideen, des Marktes, der Trends im Umfeld des Tätigkeitsbereichs einer Firma oder der Aktivitäten der Mitbewerber entstehen neue Produktideen. Bei diesem Prozess der Produktfindung werden meist im Bereich des Marketings Antworten auf folgende Fragen gesucht:

- Was wollen wir machen?
- Was können wir?
- Wo wollen wir neue Produkte platzieren?
- Was ist neu im Ansatz? Welchen Vorteil bieten wir?
- Kann dies erfolgreich werden?
- Welche Umsetzungsschritte sind notwendig?

Die grundsätzlichen Projektschritte bzw. Aktivitäten im Zuge der Produktentwicklung umfassen die folgenden Punkte:

- Klare Ziele setzen und Projektteam formieren
- Spezifikation der Kundenanforderungen
- Definition kritischer Leistungsparameter
- Produktspezifikation
- Auswahl der bestgeeigneten Umsetzungsmöglichkeit
- Betrachtung möglicher Fehlfunktionen und deren Vermeidung
- Detailentwürfe und Designoptimierung
- Verifikation gegenüber den Kundenanforderungen
- Festlegung der Prozesskontrolle

Betrachtet man die Fertigung eines Produktes als eine Phase seines Lebenszyklus, dann wird sofort klar, dass die Fertigung nur so gut sein kann, wie die Ergebnisse, die die vorgelagerten Prozesse liefern. Für die Gesamtheit dieser vorgelagerten Prozesse hat sich der Begriff Produktentstehungsprozess PEP etabliert.
Methodisch können diese Aktivitäten durch die QFD-Methode [Kle99, Saa11] bzw. nach dem Konzept „Design for Six Sigma (DFSS) [Gam09, Bac14] unterstützt werden. Das QFD-Ablaufschema umfasst vier Phasen:

- Kunden- und Produktplanung (Marketing/R&D – Performance and costs)
- Baugruppen- bzw. Teileplanung (Design und Engineering – Zuverlässigkeit, Machbarkeit)
- Prozessplanung (Manufacturing Engineering – Fertigungskosten-Minimierung)
- Planung der Arbeitsanweisungen (Produktion – statistische Prozesskontrolle, QM)

In jeder Phase werden qualitätsrelevante Faktoren ermittelt und dokumentiert.

2.4.1 Von der Idee zum Konzept

Die wesentliche Aufgabe des Konzipierens liegt in der Festlegung

- der Funktionen oder Funktionsstrukturen,
- der Wirkprinzipien und
- des Lösungsansatzes (Geometrie, Kinematik etc.).

Der Kern der Aufgabe muss dabei klar definiert und in angepasster Vereinfachung mit den wesentlichen Einflussfaktoren dargestellt werden. Die Gesamtfunktion wird dann in Teilfunktionen zerlegt, für die jeweils Wirkprinzipien und Lösungsvarianten gesucht und bewertet werden.

Bei der Formulierung der Grundaufgabe ist die Hauptfunktion möglichst grundlegend zu formulieren. Dabei helfen die Prinzipien des Systems Engineering bzw. der Betrachtung nach dem top-down-Prinzip und eine hierarchische Gliederung der Funktionsebenen. Das Zusammenwirken der Systemelemente und der Wechselwirkungen macht auf Alternativen aufmerksam. Über Abstraktion und Betrachtung der Hauptaufgabe aus verschiedenen Perspektiven können sich unterschiedliche Lösungskonzepte ergeben.
Für das Problemlösungsverhalten eines Entwicklers sind Kreativität, Methodik und Erfahrung erfolgsbestimmende Parameter. Neue Ideen oder Lösungen entstehen dabei meist unterbewusst durch Entfremdung, Neukombination von bereits vorhandenem Wissen oder aus Vorbildern aus der Natur (Bionik). In systematische Weise kann hier die TRIZ-Methode Unterstützung geben [Kol11]. Am Ende dieser Phase wird ein technisch und wirtschaftlich bewertetes Lösungskonzept ausgewählt.

2.4.2 Vom Konzept zur Gestalt / Entwerfen

Nach der Festlegung eines geeigneten Lösungskonzeptes gilt es dieses in der Entwurfsphase in eine passende Gestalt zu bringen. Der Gestaltungsprozess ist stark vom Arbeitsstil und von den Erfahrungen eines Konstrukteurs abhängig. In der Entwurfsphase werden auch Kompromisse zwischen dem technisch Machbaren und dem wirtschaftlich Vertretbaren eingegangen. Das Wissen über Gestaltungsgrundregeln, wie das Streben nach eindeutigen, einfachen und sicheren Lösungen und durch bewährte konstruktive Gestaltungsprinzipien lassen sich gebrauchs- und verkaufsfähige Produkte gestalten. In dieser kreativen Phase müssen aber sehr viele Aspekte simultan und iterativ betrachtet werden. Zu den Gestaltungsrichtlinien gehört auch die funktions-, sicherheits-, fertigungs- und montagegerechte Gestaltung des Fertigungsprozesses bzw. des Produktes. Vom VDI wurden dazu auch Richtlinien, wie

- VDI 2222 Konstruktionsmethodik – Bl.1: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, 1997
- VDI 2225 Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Bl.3 Wirtschaftliche Bewertung, 1998
- VDI 2235 Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren; Methoden und Hilfen, 1987

ausgearbeitet.

2.4.3 Von der Gestalt zur Herstellung / Ausarbeiten

An die Gestaltung reihen sich Planungsarbeiten zur Herstellung des Produktes an. Dazu gehören die Bauteildimensionierung, die Erstellung der Gesamtzeichnung mit den Einzelteilzeichnungen, die Stückliste, die Abschätzung der Herstellkosten und die Montagezeichnung, sowie andere Nebenaufgaben. In der Automobilindustrie hat sich dazu der Begriff Methodenplanung etabliert. Die Prüfung der Machbarkeit, die Festlegung der Arbeitsschritte, der geeigneten Fertigungsanlagen und evtl. Festlegung einer Vorserien- oder Prototypfertigung inklusive Prüfen der Eigenschaften des Prototyps sind nur einige Punkte in dieser Phase. Ziel ist die Produktionsplanung zur Herstellung eines Erzeugnisses, das aus mehreren Einzelteilen oder Baugruppen zusammengestellt wird. Am Ende der Produktentwicklung steht die Fertigungsfreigabe.

2.4.4 Umfassende Darstellungen zum Thema Produktentwicklung

Aufgrund der großen Bedeutung des Produktentwicklungsprozesses gibt es auch mehrere exzellente Lehr- bzw. Fachbücher, die hier nur aufgezählt und empfohlen werden können, siehe [Bul95, Lin07, Lin16, Pah07, Nie19, Sch05, Dam13, Wie12, Bri10].

2.4.5 Notwendige Kompetenzen für den Produktentwicklungsprozess

Ingenieure, die in diesem kreativen Bereich tätig sein wollen, brauchen neben dem Grundlagenwissen insbesondere Systemwissen (Fähigkeit zum Nachdenken über Systeme, Innovationen, Problemlösungen, Integrationsmöglichkeiten, Organisation, Zeitmanagement, Markt, Kundenbedürfnisse) und über diverse Entwicklungsmethoden (CAD, FEM, QFD, TRIZ etc.). Als Beispiel sei das Karlsruher Modell „Integrated Product Development“ [Alb99] genannt.

2.5 Produktionssysteme

Die Art und Weise der Produktion von Sachgütern hat sich über viele Jahrzehnte hinweg entwickelt und ist zurzeit auch nicht abgeschlossen. Über die Anfänge der industriellen Fertigung mit der Fließbandfertigung nach Henry Ford bis zur kundenorientierten, individuellen Fertigung unter Berücksichtigung der Schonung von Ressourcen gibt es viele Entwicklungsstufen, siehe Abb. 12.
Jedes Unternehmen muss sich ein gut funktionierendes Produktionssystem schaffen, das auch von den Mitarbeitern akzeptiert wird und an dem auch die Mitarbeiter mitgestalten dürfen. Nur dann folgen positive Effekte auf die Unternehmenskultur und –ziele, wie

- Weiterentwicklung und Einbindung der Mitarbeiter in die Unternehmensziele
- standardisierte Arbeitsweise
- einheitliche Methoden und Werkzeuge
- Verbesserung der Qualität
- Reduzierung der Kosten
- Reduzierung der Durchlaufzeiten
- Reduzierung der Rüstzeiten
- Verbesserung der Arbeitssicherheit

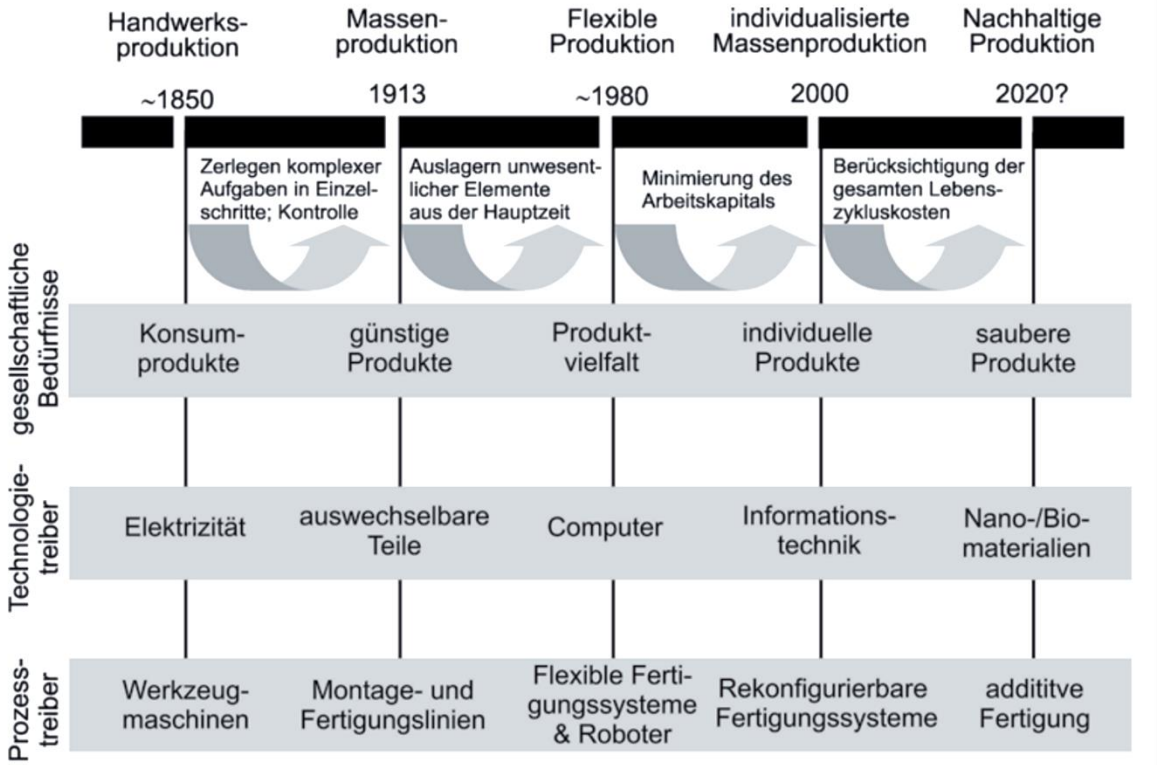


Abb. 12: Evolution der Komplexität von Produktionssystemen [Vaj14]

2.5.1 Das Toyota Produktionssystem (TPS)

Bereits nach dem Zweiten Weltkrieg wurde beim japanischen Automobilbauer Toyota ein System entwickelt, welches das Ziel verfolgt, höchste Produktivität bei hoher Qualität und pünktlicher Lieferung zu erreichen [Ohn13]. Die beiden tragenden Säulen dieses Systems sind das **Jidoka-Prinzip** und das **Just-in-time-Prinzip**. Ersteres umfasst die Elemente

- Produktionsstopp bei Abweichungen (z. B. Andon)
- Standardisierte Prozesse (über Arbeitsanweisung)
- Fehlervorbeugung und Fehlervermeidung (z. B. durch Poka Yoke, FMEA)

Das zweite Prinzip „just-in-time“ umfasst die Elemente

- Fertigung nur für den Kundenbedarf (build-to-order)
- ausbalancierte Produktion (Nivellierung und Heijunka – mengenmäßiger Ausgleich)
- Pull-Prinzip (z. B. Kanban-Produktionsprozesssteuerung)
- kontinuierlicher Materialfluss (Fließfertigung)
- getaktete Fertigung
- vielseitig qualifizierte/einsetzbare Mitarbeiter

Das Fundament dieses TPS-Gebäudes besteht aus den folgenden Elementen

- Beseitigung jeglicher Verschwendung (jap. muda)
- Ausdehnung und Weiterentwicklung des TPS
- Einbeziehung der Lieferanten (jap. kenbutsu)
- Kontinuierliche Verbesserung der Prozesse (jap. kaizen)

Ein wesentlicher Punkt im TPS-System ist, den Anteil der effektiven Wertschöpfung durch Eliminierung von Verschwendung (**Muda**) zu erhöhen, siehe Abb. 13.

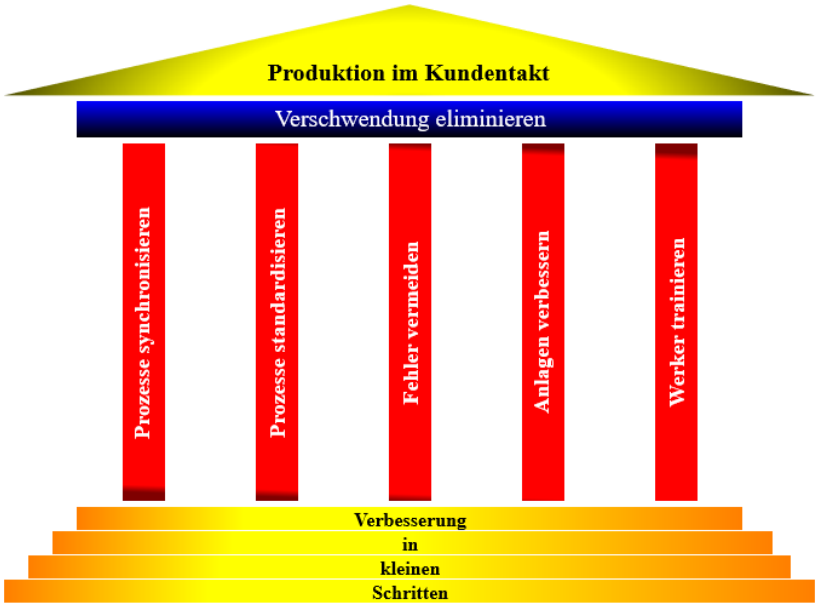


Abb. 13: Die wesentlichen Elemente im Toyota-Produktionssystem (Bildquelle: WIKI)

Je Art der Verschwendung wird durch sog. Andon-Tafeln sichtbar gemacht. Das TPS-System kennt sieben Verschwendungsarten:

1. Vermeidung von Überproduktion (unnötige Sicherheiten/Puffer)
2. Geringe Materialbestände (wenig gebundenes Kapital)
3. Transporte und Laufwege (Umstellung auf ein ziehendes Prinzip, **Kanban-Prinzip**)
4. umständliche Bearbeitung
5. umständliche Bewegungen
6. Wartezeiten
7. Nacharbeiten

Sehr wichtig ist auch die vorbeugende Fehlervermeidung, die durch ein sog. **TQM** (Total-Quality-Management)-System erreicht wird. Es ersetzt die Prüfung mittels Stichproben durch ein selbstkontrollierendes und automatisches System (= Jidoka), bei dem über Sensoren und Kontrolleinrichtungen im Falle von Toleranzabweichungen die Produktion sofort gestoppt wird. Erkennt ein Mitarbeiter einen Fehler, der nicht schnell behebbar ist, zieht er die Andon-Leine zum Stoppen der Produktionsstraße. Die Werker sind vor Ort auch selbst für Wartungsarbeiten zuständig und führen diese vorbeugend durch, man spricht von **TPM** (Total Productive Maintenance).
Im TPS-System wurde auch erkannt, dass der Arbeiter in der Produktion im Hinblick auf Qualität und Kosten ein sehr wesentliches Glied ist, was in einer sehr guten Ausbildung zum Ausdruck kommt.
Das System nutzt auch das Kreativpotential der Mitarbeiter und setzt auf viele kleine Schritte statt einer Anordnung von oben. In Form eines **KVP** (kontinuierlicher Verbesserungsprozess), den die Japaner **Kaizen** nennen, werden die mitdenkenden Mitarbeiter durch ein schnelles Belohnungssystem belohnt.
Das Toyota Produktionssystem (TPS) gilt weltweit als Benchmark für hocheffiziente Produktion in den verschiedensten Industriezweigen.

2.5.2 Schlanke Produktion und Ganzheitliche Produktionssysteme (GPS)

In der westlichen Welt wurde als Reaktion zum TPS-System zunächst die Schlanke Produktion mit einigen Rationalisierungsmaßnahmen eingeführt [VDI12]. Später wurde aber erkannt, dass der Kundennutzen doch sehr wichtig ist, weshalb man sich für sog. Ganzheitlichen Produktionssysteme entschied [Dom15]. Die acht Gestaltungsprinzipien nach VDI 2870 sind in Abb. 14 dargestellt und umfassen zum großen Teil die gut funktionierenden Aspekte des TPS-Systems.

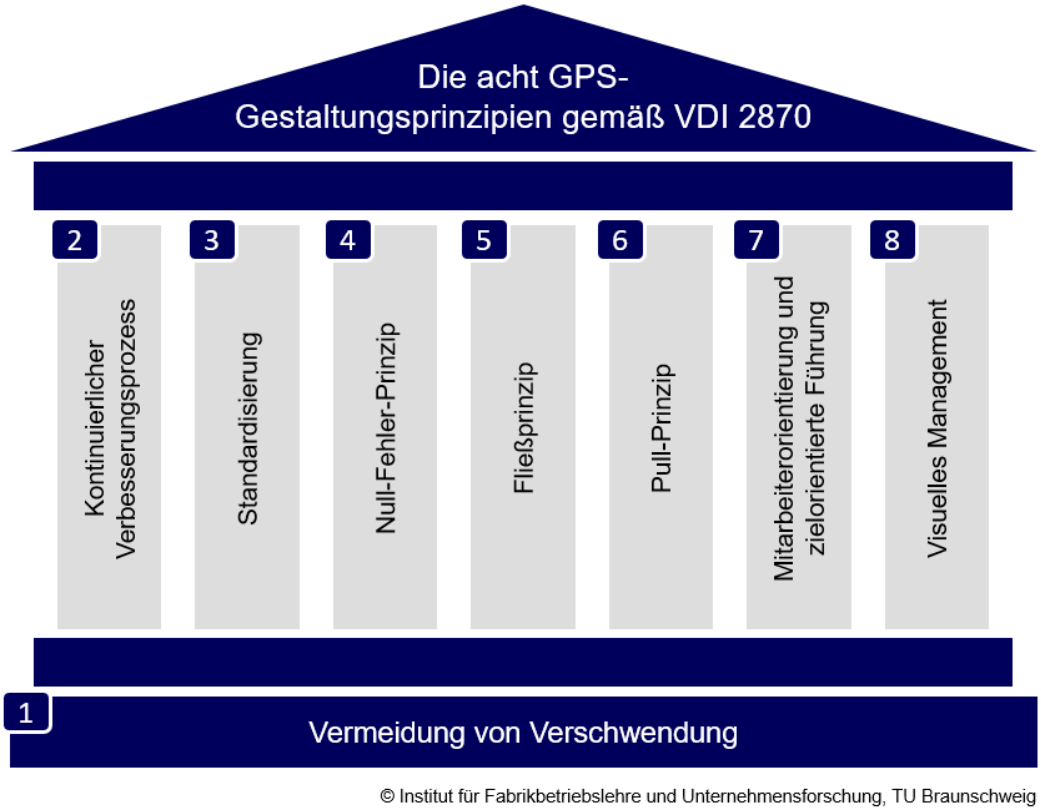


Abb. 14: Die Prinzipien ganzheitlicher Produktionssysteme

Neuere Ansätze verwenden EDV-gestützte Produktionsplanungssysteme (PPS), die den Ressourcenverbrauch bei optimaler Steuerung und kurzen Durchlaufzeiten minimieren. Hohe logistische Fähigkeiten bei hoher Ressourceneffizienz stehen im Fokus der Betrachtung [Hil19]. Agiles Vorgehen erfordert aber auch wandlungsfähige Produktionssysteme [Nyh13].

2.5.3 Produktionstypen

Unter Produktionstypen bzw. Fertigungsarten versteht man:

- die Einzelfertigung
  - (auftragsgebunden, wird nur ein Stück produziert, bspw. Schiffbau),
- die Serienfertigung
  - (Klein- und Großserienfertigung, sukzessive Fertigung für eine bestimmte Zeitperiode, bevor Maschinen wieder umgerüstet werden – in der Industrie am weitesten verbreitet, kritisch ist die Festlegung der optimalen Losgröße),
- die Massenfertigung
  - (wenn völlig gleichartige Produkte in großen Mengen hergestellt werden, wie bspw. Computer oder Mobiltelefone), sowie
- die Sortenfertigung
  - (mit Variation der Zusatzstoffe, Variation der Farbgebung oder Variation von Einbaukomponenten, wie bspw. im Automobilbau oder Partie- und Chargenfertigung)

Eine Sonderform stellt die Kuppelproduktion dar, wenn im Zuge der Herstellung eines Hauptprodukts - technologisch bedingt - zugleich ein Nebenprodukt anfällt, das seinerseits weiterverwendet oder verarbeitet werden kann.

2.6 Produktfindung und der Weg zur Produktinnovation

Um am Markt erfolgreich zu sein, ist es notwendig, immer wieder neue, innovative Produkte und Dienstleistungen zu generieren, die den Kundenwünschen entsprechen und dem Unternehmen Erfolg bringen. Bei der Produktfindung geht es in erster Linie darum, Erfolgspotenziale zu identifizieren und Ideen zu finden, wie man damit Produkte mit einem erhöhten Kundennutzen entwickeln kann [Gau01, Gau19]. Die Ideenfindung kann dabei auf zwei Arten erfolgen, durch intuitives, kreatives Denken oder durch diskursives Denken mit systematischen, analytischen Ansätzen. Die zahlreichen Kreativitätstechniken lassen sich nach ihren Anteilen von intuitivem und diskursivem Denken ordnen, siehe Abb. 15. Je nach Komplexität können auch mehrere Techniken zum Einsatz kommen. Man sieht im Bild auch, dass die Methoden Laterales Denken, TRIZ und Design Thinking besonders für die Ideenfindung eignen, weshalb sie noch im Folgenden näher beschrieben werden.
Viele jüngere Innovationen wurden durch den Einsatz neuer Materialien [Gra18] oder durch den Einsatz von Digitalisierungstechniken (bspw. Internet of things etc.) erreicht, siehe Kap.8.

2.6.1 Laterales Denken nach Edward de Bono

Bereits 1967 hat Edward de Bono den Begriff Laterales Denken geprägt [DeB96]. Das Grundprinzip beruht auf der Tatsache, dass der Mensch meist nach gewohnten Mustern denkt und handelt und es daher einen Anstoß braucht, damit neue Lösungsansätze entstehen. Dieser Anstoß kann durch Provokation oder Zufallswörter eingeleitet werden, bspw. durch Hinterfragung des Grundes für eine bekannte Lösung, um evtl. neue Alternative zu finden. Aus der Ernte der Nennung von vielen Lösung folgt eine Art Nutzwertanalyse zur Bewertung dieser neuen Alternativen.

2.6.2 Theorie des erfinderischen Problemlösens (TRIZ)

Genrich Altschuller (1926-1998) war selbst russischer Erfinder und fokussierte sich auf die Frage, wie Kreativität systematisch gefördert werden kann bzw. ob es eine allgemeingültige Vorgehensweise für das Finden von innovativen Lösungsansätzen gibt [Alt84]. Er analysierte 2,5 Millionen Patente und fand heraus, dass ein Großteil der Patente nur einen geringen Innovationsgrad aufweisen. Weiters konnte er feststellen, dass bei Lösungen mit hohem Innovationsgrad meist ein Widerspruch überwunden worden ist. Somit postulierte er die These, dass Innovationen immer durch das Beseitigen eines Widerspruches entstehen.

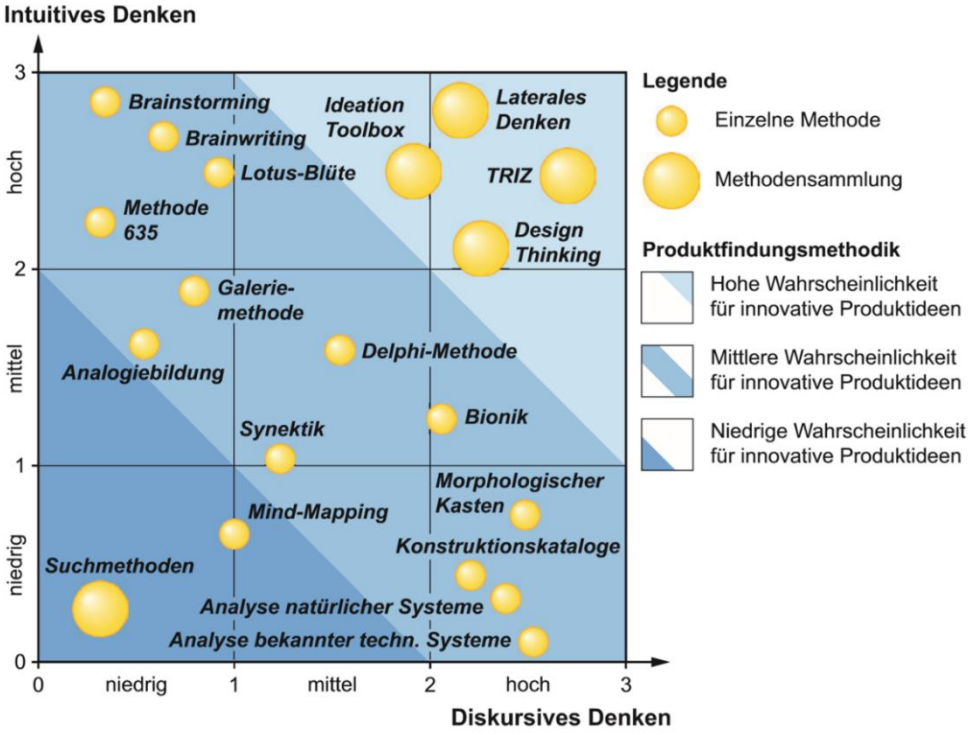


Abb. 15: Ordnungsschema von Kreativitätstechniken nach [Gau19]

Speziell auf Produkte bezogen gibt es zwei Arten von Widersprüchen: Widersprüche können technischer oder physikalischer Art sein. Grundlage für die Lösung vor allem technischer Widersprüche ist ein möglichst hoher Abstraktionsgrad, um die Problemsituation möglichst allgemein darzustellen. Ziel ist es, die vorliegenden Widersprüche möglichst ohne Kompromisse zu überwinden. Dazu wird in einer sog. Widerspruchsmatrix 39 technische Parameter, die immer wieder miteinander im Widerspruch stehen dargestellt. Die Matrixelemente enthalten dann geeignete Problemlösungsansätze. Insgesamt werden 40 Problemlösungsprinzipien verwendet.
Ausgangspunkt für ein zu lösendes Problem bildet eine Innovationscheckliste, mit der das Problem klar und detailliert beschrieben wird. Diese umfasst die folgenden Punkte:

- Informationen über ein zu verbesserndes System und dessen Umfeld
- Derzeitige Systemstruktur
- Arbeitsweise des Systems
- Verfügbare Ressourcen
- Detailinformationen zum Problem

- Grenzen der Systemänderung
- Analoge Lösungsansätze
- Auswahlkriterien für die Lösungskonzepte

Durch Funktions- und Prozessanalysen versucht man, Widersprüchen auf die Schliche zu kommen, Probleme zu abstrahieren und geeignet Lösungskonzepte zu finden.
Zu dieser Methode gibt es bereits online-Unterstützung, siehe Abb. 16.

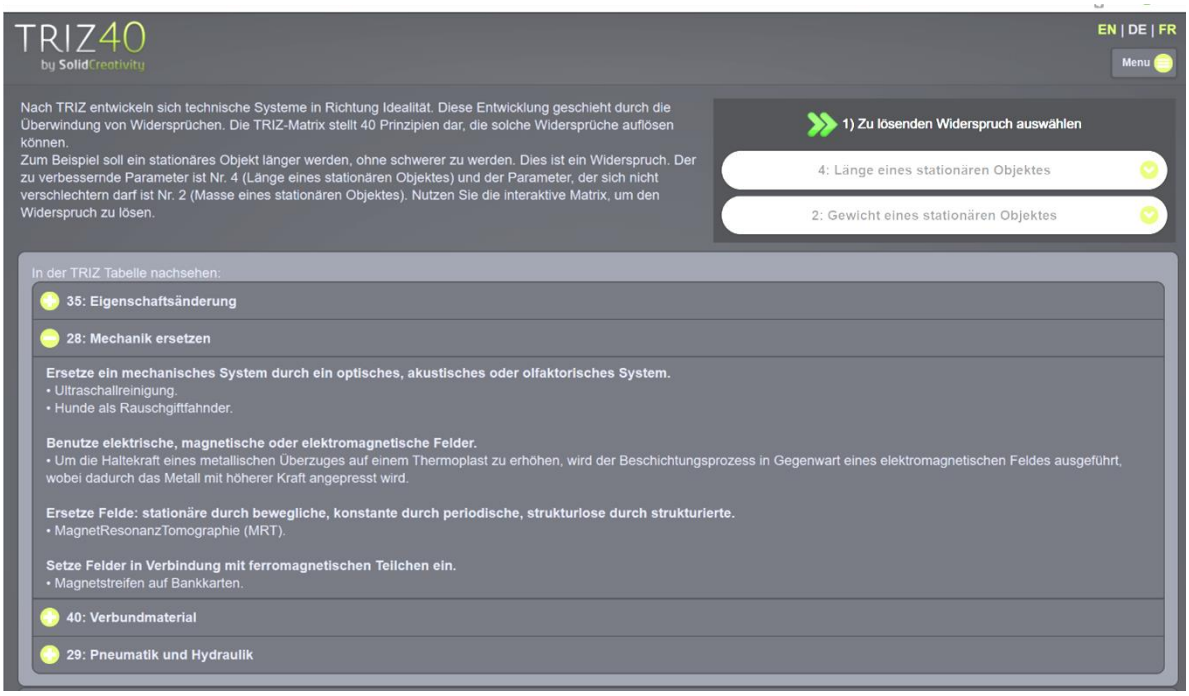


Abb. 16: Online-Unterstützung für TRIZ, siehe www.triz40.com

2.6.3 Design Thinking

Die Methode wurde 1969 an der Stanford University erstmals von H.A.Simon beschrieben [Bre16]. Nach dem Prinzip „Innovation is made by humans for humans“ werden kontextabhängig, menschliche Bedürfnisse in den Vordergrund gestellt. Die sechs Grundregeln sind:

- Fokus auf menschliche Werte richten
- Zeigen, nicht schwatzen
- Prozess berücksichtigen
- Radikale Kollaborationen praktizieren
- Aktion forcieren
- Experimente zulassen

Durch sequenzielle Anwendung von divergentem und konvergentem Denken sollen alte Denkmuster verlassen werden, um neue revolutionäre Ideen zu schaffen.
Weitere Details finden sich in Kapitel 2.9.1.

2.6.4 Weg zur Produktinnovation

Ist die Produktfindungsphase abgeschlossen, folgen noch die strategische Produktplanung mit Investitions- und Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Die Produktkonzipierung erfolgt nach den Grundsätzen der Produktentwicklung (siehe Kap.2.4) und danach erfolgt die Fertigungsplanung und

der Produktionsstart (SOP). Die weitere Verfolgung des Produkterfolges bzw. die Feststellung notwendiger Modifikationen erfolgt nach dem PDCA- (plan-do-control-act)-Zyklus.

2.7 Steigerung der Produktivität und der Wettbewerbsfähigkeit durch Digitalisierung

Produktivität ist eine wirtschaftswissenschaftliche Kennzahl, die das Verhältnis zwischen produzierten Gütern/Dienstleistungen und den dafür benötigten Produktionsfaktoren beschreibt.
Die Gesamtproduktivität eines Unternehmens wird als das Verhältnis Ausbringungsmenge zur Einsatzmenge festgelegt. Dies setzt sich zusammen aus der Produktivität der Arbeit, der Maschinen und der Materialproduktivität. Im Gegensatz zur Wirtschaftlichkeit bezieht sich die Produktivität immer auf die Menge, während sich das Maß der Wirtschaftlichkeit immer finanziellen Werten (Kosten, Erlös, Ertrag) bezieht.
Die allgemeinen Möglichkeiten zur Steigerung der Produktivität und der Wettbewerbsfähigkeit wurden bereits in den vorigen Kapiteln beschrieben. Zusätzliche Möglichkeiten der Modernisierung der Produktion und der Wettbewerbsfähigkeit ergeben durch den Einsatz digitaler Technologien. Laut einer jüngsten Erhebung des Fraunhofer Instituts für System und Innovationsforschung (ISI) im Auftrag des VDI durchgeführt hat, würden sich Produktivitätssteigerungen in Deutschland in der Höhe von etwa 8 Mrd. Euro erzielen lassen.
Der VDI spricht von sieben Digitalisierungstechnologien, die in drei Technologiefelder eingeteilt werden. Diese werden als Befähigungstechnologien zu einer vernetzten Produktion (Industrie 4.0) verstanden, siehe [Hau17]:

Feld I: Digitale Managementsysteme

1. PPS-System – Digitales Produktionsplanungs- und -steuerungssystem (System aus Computerprogrammen, das den Anwender bei der Produktionsplanung und -steuerung unterstützt und die damit verbundene Datenverwaltung übernimmt.)
2. PLM-Systeme – Product Lifecycle Management Systeme (Softwaregestütztes Management sämtlicher Informationen, die im Verlauf des Lebenszyklus eines Produktes anfallen.)

Feld II: Drahtlose Mensch-Maschine-Kommunikation

3. Mobile digitale Visualisierung am Arbeitsplatz (Passive Nutzung von mobilen Endgeräten zur Bereitstellung von Daten und Arbeitsunterlagen in der Fabrikhalle)
4. Mobile Bedienung und Programmierung von Maschinen und Anlagen (Aktive Nutzung von mobilen Endgeräten in der Fabrikhalle, um die Produktion direkt zu beeinflussen)

Feld III: Vernetzte Systeme, bzw. CPS-nahe Prozesse

5. Digitaler Austausch von Dispositionsdaten mit Zulieferern und Kunden (Supply Chain)
6. Techniken zur Automatisierung und Steuerung der Produktionslogistik
7. Echtzeitnahe Produktionsleitsysteme

Die Umfrageergebnisse wurden statistisch ausgewertet und zeigten folgenden interessanten Zusammenhang im Hinblick auf die Arbeitsproduktivität, gemessen als Wertschöpfung je Beschäftigten:

- Betriebe, die mindestens eine Digitalisierungstechnologie aus einem der drei Felder nutzen, haben eine um 15 % höhere Arbeitsproduktivität als diejenigen, die keine der Technologien nutzen.
- Betriebe, die mindestens eine Digitalisierungstechnologie aus zwei oder drei Feldern einsetzen, haben eine um 27 % höhere Arbeitsproduktivität als diejenigen, die keine der Technologien nutzen.

Diese wichtigen Erkenntnisse und Trends zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit durch Digitalisierung bzw. Industrie 4.0 werden im Kapitel 8 noch ausführlicher behandelt.

2.8 Konzepte der Problemanalyse und Entscheidungsfindung

In unserem Leben fällen wir ständig Entscheidungen, manche fallen eher leicht, manche aber sind schwer zu treffen (Wohnungs- oder Autokauf, Jobsuche etc.), wofür eine gewisse Grundhaltung, Vorbereitung, Ehrlichkeit, Mut und Weitsicht notwendig ist. Generell und vorangestellt gibt es dazu einige Ratschläge aus psychologischer Sicht, wie

- Konzentration auf das Wesentlichste (Erstellung einer Pro-&Contra-Liste und dabei primär die unverzichtbaren Aspekte betrachten oder die Argumente gewichten)
- Vor der endgültigen Entscheidung evtl. einen Test (z.B. Probefahrt) planen und durchführen
- Stets realistisch zu sich selbst sein und nicht träumen (Wunschvorstellungen hintanstellen)
- Mit Weitsicht entscheiden (Wird man in drei Jahren noch mit der Entscheidung zufrieden sein?)
- Solide schrittweise Vorbereitung der Entscheidung
- Was kann sich alles durch die Entscheidung positiv entwickeln?
- Bei der Entscheidungsfindung nicht drängen lassen.
- Münzwurf (je nach Ausgang reagiert man mit innerer Haltung, das Bauchgefühl kommt durch)

Bewertungen und Entscheidungen zählen auch zu den täglichen Hauptaufgaben von Führungskräften und Ingenieurinnen, wozu auch systematische Methoden zur Verfügung stehen, die im Folgenden kurz behandelt werden, weil sie auch für die Auswahl von geeigneten Werkstoffen und Fertigungsverfahren essenziell sind.
Die wichtigste Regel zum Treffen von Entscheidungen ist, dass die Entscheidung umso leichter fällt, je kleiner die Unsicherheit ist - jede Entscheidung fällt leichter, je mehr Informationen zum Entscheidungsbedarf vorliegen und je besser deren Qualität ist.

2.8.1 Systemanalyse und Problemlösungskonzepte

Für die Auswahl von Werkstoffen und Fertigungsverfahren ist neben einem soliden Fachwissen auch ein grundlegendes Verständnis über die Grundlagen und Methoden der Entscheidungsfindung notwendig. Damit soll insbesondere bei komplexen Situationen eine systematische, ausgewogene Entscheidungsunterstützung ermöglicht werden. Empirische Entscheidungen basieren zwar auf wichtigen Erfahrungswerten, bleiben aber Entscheidungen aus dem Bauch heraus. Die Qualität einer Entscheidung ist sicherlich sehr stark von der Qualität der vorhandenen Daten und von der fachlichen und sozialen Kompetenz des Entscheidungsträgers abhängig.
Der Entscheidungsprozess beschreibt, wie Entscheidungen zu Stande kommen und umfasst folgende Entscheidungsphasen:

- Problemformulierung
- Informationsbeschaffung
- Alternativensuche
- Bewertung
- Entscheidung (Entschluss)
- Handlung bzw. Umsetzung
- Kontrolle

2.8.1.1 Systems Engineering

Zur Analyse komplexer Systeme hat sich insbesondere die Methode des „Systems Engineering“ [Hab12] bewährt. Ein System wird als Menge von Elementen mit ihren Relationen mit klar definierten Systemgrenzen betrachtet. Die Ziele des Systemdenkens von komplexen Systemen sind:

- Erkennen der Zusammenhänge und der wichtigsten Einflussgrößen
- Abgrenzung von Teil- oder Subsystemen zwecks klarer Modellbildung
- Ableiten von Optimierungsmaßnahmen
- Aufdecken von Innovationsschwerpunkten
- Fehlerminimierung

2.8.1.2 Problemanalyse

Beim methodischen Vorgehen im Zuge der Produkt- oder Verfahrensentwicklung gilt es zunächst die Aufgabe/Zielsetzung genau zu analysieren (=Ist-Zustands-Analyse). Diese umfasst das System und die Umwelt, sowie deren Abgrenzung, die Analyse des bestehenden Systems, die Analyse des Umfeldes, Stärken-Schwächen-Analysen und Ursachenanalysen. Abb. 17 zeigt eine Zusammenstellung der zu diesem Zweck vorhandenen methodischen Werkzeuge. In einem weiteren Schritt ist es dann notwendig, das System zu strukturieren und Beziehungen/Funktionen festzulegen, sowie Teilgebiete zu klassifizieren.

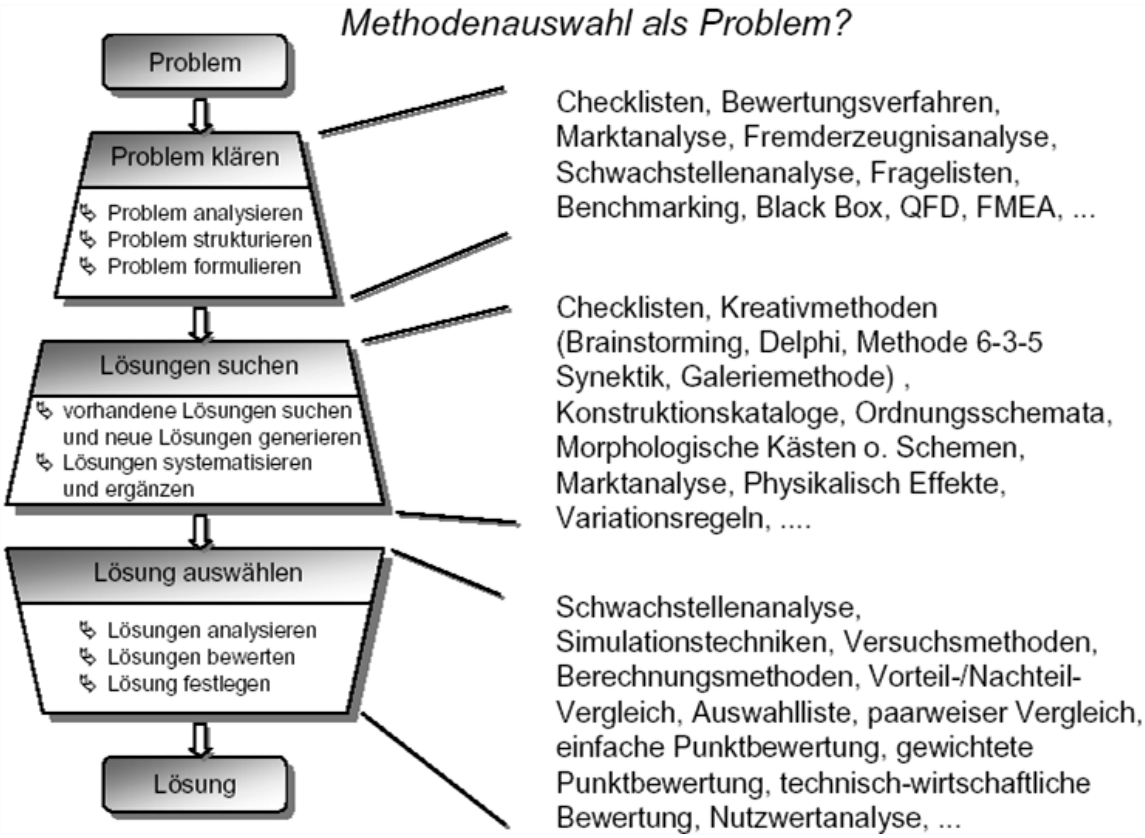


Abb. 17: Methodische Werkzeuge zur Problem- bzw. Systemanalyse [Dae97]

2.8.1.3 Problemlösungszyklus nach VDI 2221

Für das prinzipielle Vorgehen in technischen Fällen hat sich in der Praxis das Konzept des Allgemeinen Problemlösungszyklus nach VDI 2221 als sehr geeignet herausgestellt [VDI93, Ehr09, Nae19]. Das Dokument behandelt allgemeingültige, branchenunabhängige Grundlagen des methodischen Entwickelns und Konstruierens technischer Systeme und Produkte. Die einzelnen Phasen I bis IV (Planen, Konzipieren, Entwerfen, Ausarbeiten) und Arbeitsschritte des Konstruktionsprozesses sind in Abb. 18 dargestellt. In der Richtlinie werden Beispiele für Vorgehensabläufe für die Branchen Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Feinwerktechnik und Software-Entwicklung vorgestellt.

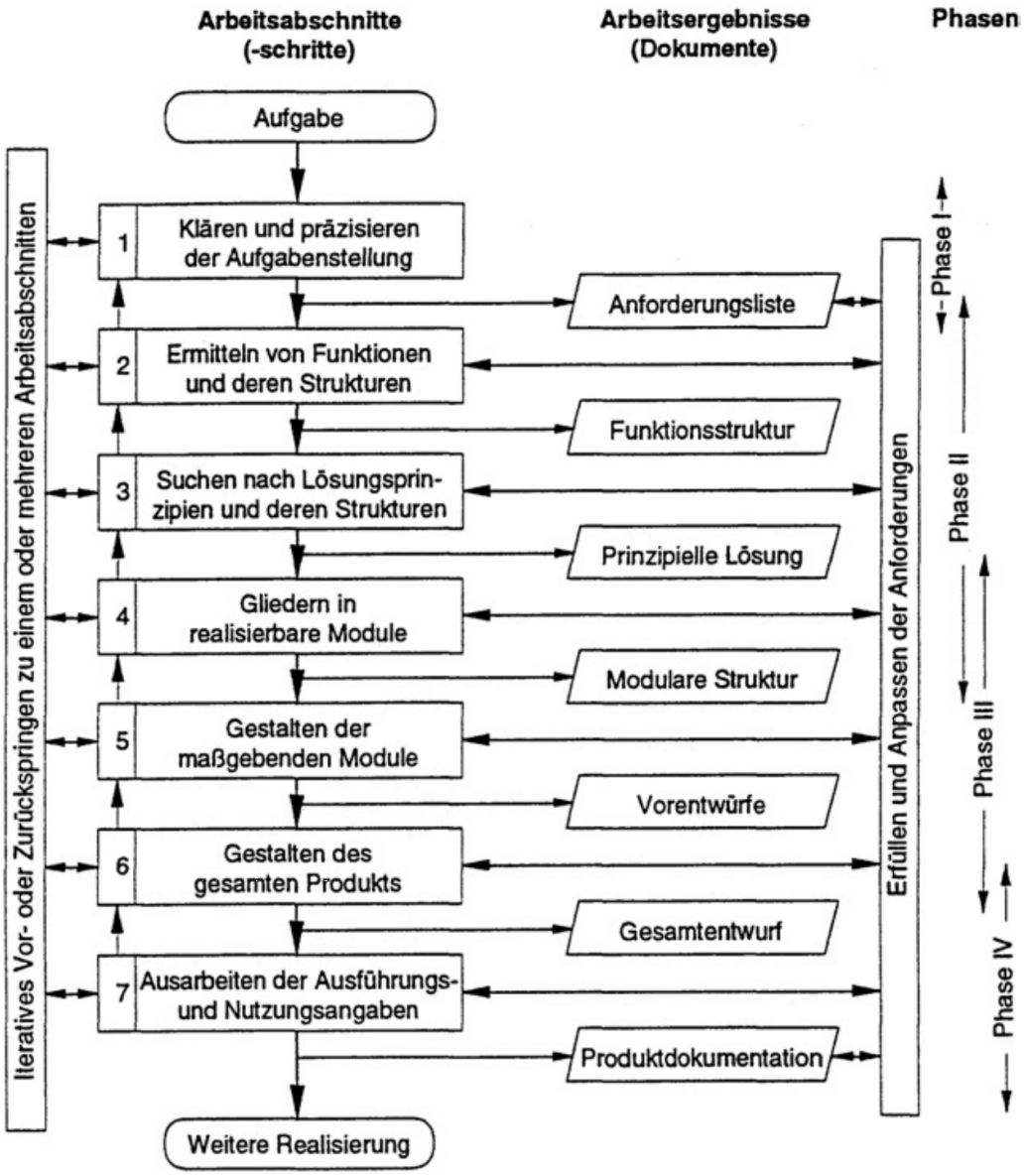


Abb. 18: Generelle Vorgehensweise beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221, Vers.1993

2.8.1.4 Methodische Problemlösungsansatz S.P.A.L.T.E.N. des KIT Karlsruhe

Ähnlich zum vorigen Ansatz wurde am Institut für Produktentwicklung (IPEK) des Karlsruher Instituts für Technologie ein methodischer Ansatz mit dem Akronym S.P.A.L.T.E.N. entwickelt [Alb05]. Die Einzelschritte sind:

- **S**ituationsanalyse
- **P**roblemeingrenzung
- **A**lternativen aufzeigen
- **L**ösungsauswahl
- **T**ragweite analysieren – Chancen und Risiken abschätzen
- **E**ntscheidung und Umsetzung – Maßnahmen und Prozesse
- **N**achbereitung und Lernen

2.8.2 Analyse und Bewertung von Alternativen bei mehreren Kriterien

Bei der Auswahl der besten Option aus mehreren Möglichkeiten müssen meist mehrere Kriterien (oder Einflussgrößen) in unterschiedlicher Wichtung beurteilt werden. Im englischen Sprachgebrauch spricht man von MCDM (multi-criteria-decision-making)-Problemen [Bel03, Zim91]. Entsprechend der zuvor genannten Vorgangsweise zur Auffindung optimaler Lösungen stellt sich nach Festlegung der wichtigsten Einflussgrößen die Frage, wie stark diese auf die Auswahl der Alternativen wirken (Gewichtung), welche Wechselwirkungen festzustellen sind und wie man unterschiedliche Datentypen (Kosten, Gewicht, Festigkeit etc.) in eine vergleichbare Form bringen kann.
Daraus ergeben sich folgende Kernpunkte:

a) Reihung der Kriterien bzgl. ihrer Bedeutung bzw. Gewichtung der Kriterien
   - „Punkte kleben“ auf Flip-Chart von einem Expertenteam
   - Methode des paarweisen Vergleichs
   - Erstellung einer Einflussmatrix
   - Relevanzanalyse (Wie relevant ist jeder Faktor?)
   - Herleitung von Zielfunktionen und Ableitung dieser nach den einzelnen Einflussgrößen (bspw. zur Massenminimierung nach dem Ashby-Konzept, siehe Kap.5)

b) Festlegung der Skalierung der Gewichte (0,1,2,3 oder 1 bis 10 oder 0 bis 100%)
   - Festlegung durch Mittelwertbildung der Nennungen eines Expertenteams oder
   - numerische Festlegung über statistische Methoden (z.B. Conjoint-Methode)
   - ACHTUNG bei direkter oder reziproker Wirkung, wie bspw. bei Kosten (je höher die Kosten, umso geringer muss die Bewertung sein)
   - Normalisierung oder Standardisierung der Gewichte (Summe der Gewichte jedes Kriteriums soll gleich 1 sein)

c) Umgang mit Unsicherheiten in der Bewertung bzw. in der Genauigkeit der Daten
   - Berechnung der Konsistenz der Lösung
   - Erkennung von möglichen Kipp-Effekten

d) Übersichtliche und nachvollziehbare Darstellung
   - Dokumentation aller Festlegungen und Entscheidungsschritte
   - Grafische Darstellung der Optionenlage in Form von Sterndiagrammen
   - Verwendung standardisierter Methoden, wie QFD, Nutzwertanalyse
   - Verwendung mathematisch anspruchsvollerer MCDM-Ansätze (AHP, TOPSIS etc.)

e) Unterstützung durch Software-Systeme
   - EXCEL-Schemata oder Statistik-Pakete
   - Spezielle Lösungen (mittels Matlab oder durch kommerzielle Produkte)

Den Kernpunkt bei der Ermittlung einer Alternative, die am besten für eine gegebene Situation geeignet ist, bildet die Gewichtung. Diese kann subjektiv/empirisch oder objektiviert/gemittelt in einer Gruppe oder mathematisch bzw. modellbasiert gefunden werden. Die Grundlagen dazu sind Teil der Entscheidungstheorie und umfassen die Betrachtung der Gesamtsystems, Wertigkeit der Anforderungen, Nutzen und Folgen, Vergleich mit Verfügbarkeit und Wirtschaftliche Aspekte.

Bislang wurden nur Ansätze bei Vorliegen mehreren Kriterien bzgl. eines Zieles diskutiert. Es gibt aber auch Probleme, die in der Lösungsfindung nicht nur mehrere Kriterien, sondern auch mehrere Ziele berücksichtigen müssen. Aus mathematischer Sicht sind die numerischen Methoden dem Bereich der Min-Max-Probleme zuzuordnen. In der englisch-sprachigen Literatur findet man auch öfters den Begriff „multi-objective decision making (MODM) [Ash00, Cha07].

Im Folgenden werden die essenziellen Aspekte einiger wichtiger Bewertungsansätze in kurzer Form dargestellt.

2.8.2.1 Der paarweise Vergleich von Kriterien

Mit dieser sehr einfachen Methode kann die Bedeutung jedes Kriteriums und damit eine Rangfolge und in weiterer Folge eine Gewichtung der Kriterien festgelegt werden. Vielfach wird diese Methode auch als Relevanzanalyse bezeichnet. Hierbei wird jedes Kriterium mit jedem verglichen. Mit dem Programm ECXEL wurde das in Tabelle 3 dargestellte Beispiel für die Gewichtung von Kaufkriterien für ein Auto erstellt. Die Methode berücksichtigt die individuellen Präferenzen des Erstellers, daher ist das Ergebnis in diesem Falle sicherlich je nach Alter unterschiedlich. Wie Abb. 19 zeigt das Ergebnis der persönlichen Wertung durch den Autor eine recht gute Übereinstimmung mit den durchschnittlichen Kaufpräferenzen von tausenden Befragten in Deutschland.
Diese Priorisierungsmethode ist Basis in vielen anderen Verfahren, wie bei der Nutzwertanalyse, bei AHP u.a.m., wie noch später gezeigt wird.

Paarweiser Vergleich

Fallbeispiel Autokauf

Anzahl der Kriterien N=8

Bewertung:

2: Zeilenkriterieum ist wichtiger als das Spaltenkriterium

1: Spalten- und Zeilenkriterium sind gleich wichtig

0: Spaltenkritierium ist wichtiger als das Zellenkriterium

Kriterium	Sicherheit	Image der Marke	Spritverbrauch	Zuverlässigkeit	Komfort	Anschaffungskosten	Service	Design	Summe	Summe in %	**Rang**
Sicherheit	1	2	2	2	2	2	2	2	15	23,4	1
Image der Marke	0	1	0	0	2	0	1	0	4	6,3	7
Spritverbrauch	0	2	1	0	2	0	2	0	7	10,9	5
Zuverlässigkeit	0	2	2	1	2	2	1	2	12	18,8	2
Komfort	0	0	0	0	1	0	1	0	2	3,1	8
Anschaffungskosten	0	2	2	0	2	1	2	1	10	15,6	3
Service	0	1	0	1	1	0	1	1	5	7,8	6
Design	0	2	2	0	2	1	1	1	9	14,1	4
								Sum	64		

Tabelle 3: Paarweiser Vergleich von Autokauf-Kriterien (=Relevanzmatrix) zur Festlegung der Rangfolge und damit der Gewichtung der einzelnen Kriterien

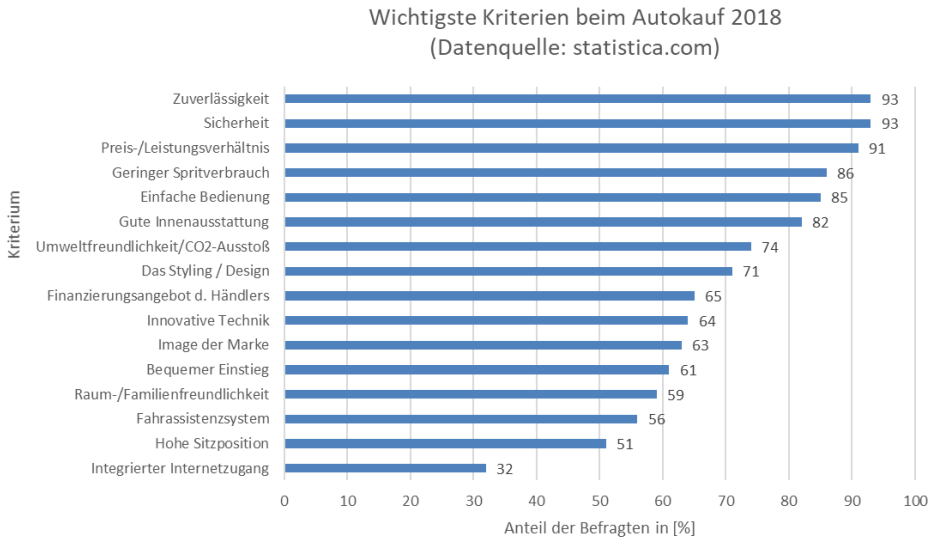


Abb. 19: Statistische Auswertung der wichtigsten Kaufkriterien nach de.statistica.com

2.8.2.2 Die Einflussmatrix

Eine einfache Methode, um komplexe Zusammenhänge visuell darzustellen ist die sog. Einflussmatrix [Lin05]. Sie ermöglicht die Einflussgrößen bezüglich ihrer Beeinflussbarkeit und auf ihre Auswirkungen auf das Gesamtsystem abzuschätzen. Je nach kumulierter Einflussstärke (Horizontalsumme) und je nach kumulierter Beeinflussbarkeit (Vertikalsumme) finden sich die Einflussgrößen in einem der vier Bereiche träge, passive, aktive und kritische Faktoren. Am Beispiel des Fertigungsprozesses Gesenkschmieden wird das Prinzip und die Aussagekraft von Einflussmatrizen dargestellt [Buc05]. Zunächst werden die wichtigen Einflussfaktoren in Form einer symmetrischen Matrix angeordnet und die Einflüsse des Faktors in der ersten Spalte auf die Einflussfaktoren in der jeweiligen Zeile mit einem Faktor 0,1,2 oder 3 je nach Stärke des Einflusses bewertet. Ist dies für eine Zeile abgeschlossen, dann wird eine Horizontalsumme (die kumulierte Einflussstärke) gebildet. Diese Betrachtung wird für alle Einflussgrößen durchgeführt. Zum Schluss werden dann auch noch die Vertikalsummen gebildet, woraus sich die Beeinflussbarkeit ergibt. Für das Beispiel Gesenkschmieden ergibt sich damit die Einflussmatrix in Tabelle 4. Werden die beiden Summen als Achsen in einem Diagramm mit der Lage jedes Einflussparameters gezeichnet (siehe Abb. 20), so kann man die o.g. vier Bereiche zuordnen und die kritischen Elemente deutlich machen. Die kritischen Elemente sind jene, die sowohl aktiv als auch passiv sind und damit maßgeblich auf das Systemverhalten einwirken. Sie müssen besonders beobachtet bzw. kontrolliert werden. Im Falle des Gesenkschmiedens ist dies in erster Linie die Formkomplexität.

		Werkstoff						Werkzeug					Grenzfläche				Prozessparam.				Maschine					Produkt						Aktivsumme	Passivsumme	P=AS*PS ~ Kritikalität	Q=AS/PS ~ Aktivität
		Ausgangsgefüge	Fließspannung	Umformbarkeit	thermophys.Eig.	Rexx/Korngröße	Vorformgeometrie	Härte	Gesenktemperatur	Gravur/Radien	Gratdicke	Lebensdauer	Schmierung	Reibung	Verschleiß	Wärmeübergang	Spannungszustand	Umformtemperatur	Umformgrad	Abkühlbed./WB	Durchsatz/Prod.	Umformkraft	Umformgeschw.	Automatisierungsgrad	Kontaktzeit	Formkomplexität	Gewicht	Maßhaltigkeit/Tol.	Oberfl.zustand	Festigkeit	Kosten				
Werkstoff	Ausgangsgefüge	0	2	2	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	12	5	60	2,400
	Fließspannung	0	0	3	0	2	0	0	0	0	1	2	0	2	3	0	1	3	2	1	2	3	2	0	1	2	0	1	1	2	2	36	19	684	1,895
	Umformbarkeit	0	2	0	0	0	3	1	0	2	1	1	0	0	1	0	0	0	3	0	2	1	0	0	1	2	0	0	1	1	1	23	25	575	0,920
	Thermophys. Eig.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	0	3	0	2	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	12	5	60	2,400
	Rexx/Korngröße	0	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	1	3	1	13	13	169	1,000
	Vorformgeometrie	0	0	0	0	1	0	0	0	1	3	2	0	1	3	1	2	1	3	0	2	3	2	0	1	3	2	3	2	2	2	40	26	1040	1,538
Werkzeug	Härte	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	3	1	3	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	17	23	391	0,739
	Gesenktemperatur	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	2	2	2	2	3	0	0	0	2	1	1	0	0	0	2	0	1	1	0	1	27	10	270	2,700
	Gravur / Radien	0	0	1	0	0	1	3	0	0	2	3	2	3	3	0	2	0	2	0	2	2	1	0	2	3	0	3	1	0	1	37	25	925	1,480
	Gratdicke	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	2	0	2	2	1	2	0	2	0	2	3	1	0	1	2	0	2	1	1	2	29	30	870	0,967
	Lebensdauer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	3	7	50	350	0,140
Grenzfl.	Schmierung	0	0	2	0	0	2	1	1	2	1	3	0	3	3	3	2	1	2	0	2	3	1	0	1	1	0	2	3	0	1	40	22	880	1,818
	Reibung	0	0	2	0	0	1	2	0	1	2	2	1	0	3	2	2	1	1	0	1	3	1	0	0	1	0	2	2	0	1	31	37	1147	0,838
	Verschleiß	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	3	2	3	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	3	3	0	2	24	55	1320	0,436
	Wärmeübergang	0	1	1	0	0	0	1	2	0	1	2	1	2	2	0	0	2	0	2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	19	23	437	0,826
Parameter	Spannungszustand	0	2	3	0	0	1	1	0	0	2	0	0	2	2	0	0	0	2	0	1	3	2	0	0	0	0	1	1	2	0	25	17	425	1,471
	Umformtemperatur	2	3	3	2	2	1	2	1	0	2	3	2	2	2	2	0	0	1	3	2	3	2	0	0	1	1	2	2	2	2	50	24	1200	2,083
	Umformgrad	0	3	2	1	3	2	1	0	2	2	1	0	1	2	0	2	2	0	2	2	3	2	0	2	3	0	1	2	3	1	45	25	1125	1,800
	Abkühlbed./WB	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	3	0	1	1	3	3	15	20	300	0,750
Maschine	Durchsatz/Prod.	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	3	0	0	3	1	0	0	0	0	0	1	2	2	3	2	2	1	1	0	3	28	43	1204	0,651
	Umformkraft	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	3	0	0	3	0	1	2	1	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	2	21	45	945	0,467
	Umformgeschw.	2	3	2	0	2	2	1	1	1	1	3	3	3	3	0	0	2	1	0	3	3	0	0	3	1	0	1	2	2	2	47	19	893	2,474
	Automat.grad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	3	0	0	0	2	0	0	1	0	0	3	12	3	36	4,000
	Kontaktzeit	0	0	0	0	0	1	2	2	2	0	3	0	3	3	2	0	3	0	0	3	2	0	0	0	0	0	1	2	1	1	31	22	682	1,409
Produkt	Formkomplexität	0	0	0	0	0	3	0	0	2	2	3	3	2	3	2	3	1	3	0	2	3	1	0	1	0	3	2	1	2	3	45	43	1935	1,047
	Gewicht	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	1	0	0	0	1	0	0	0	2	3	3	2	0	2	3	0	2	1	2	3	28	13	364	2,154
	Maßhaltigkeit/Tol	0	0	0	0	0	2	2	0	2	3	0	0	1	2	0	0	0	0	1	2	2	0	1	0	3	2	0	2	0	3	28	35	980	0,800
	Oberfl.zustand	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0	3	2	2	1	0	3	0	2	1	1	0	0	0	0	0	2	0	0	2	23	35	805	0,657
	Festigkeit	1	0	1	0	0	1	1	0	2	1	2	1	0	1	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	2	21	28	588	0,750
	Kosten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	48	96	0,042
Passivsumme		5	19	25	5	13	26	23	10	25	30	50	22	37	55	23	17	24	25	20	43	45	19	3	22	43	13	35	35	28	48				

Einfluss:	0…kein	1…gering	2…mittel	3…stark

Tabelle 4: Einflussmatrix für das System Gesenkschmieden

Zusätzlich kann die Einflussmatrix durch eine Relevanzanalyse ergänzt werden. Mit der Stärke des Einflusses eines Faktors auf das Systemverhalten kann in Abb. 20 die Größe des Symbols gekoppelt werden. Darüber hinaus ist auch eine Konsistenzprüfung möglich, bei der wiederum durch paarweisen Vergleich abgefragt wird, ob sich die Faktoren mit den anderen vertragen.

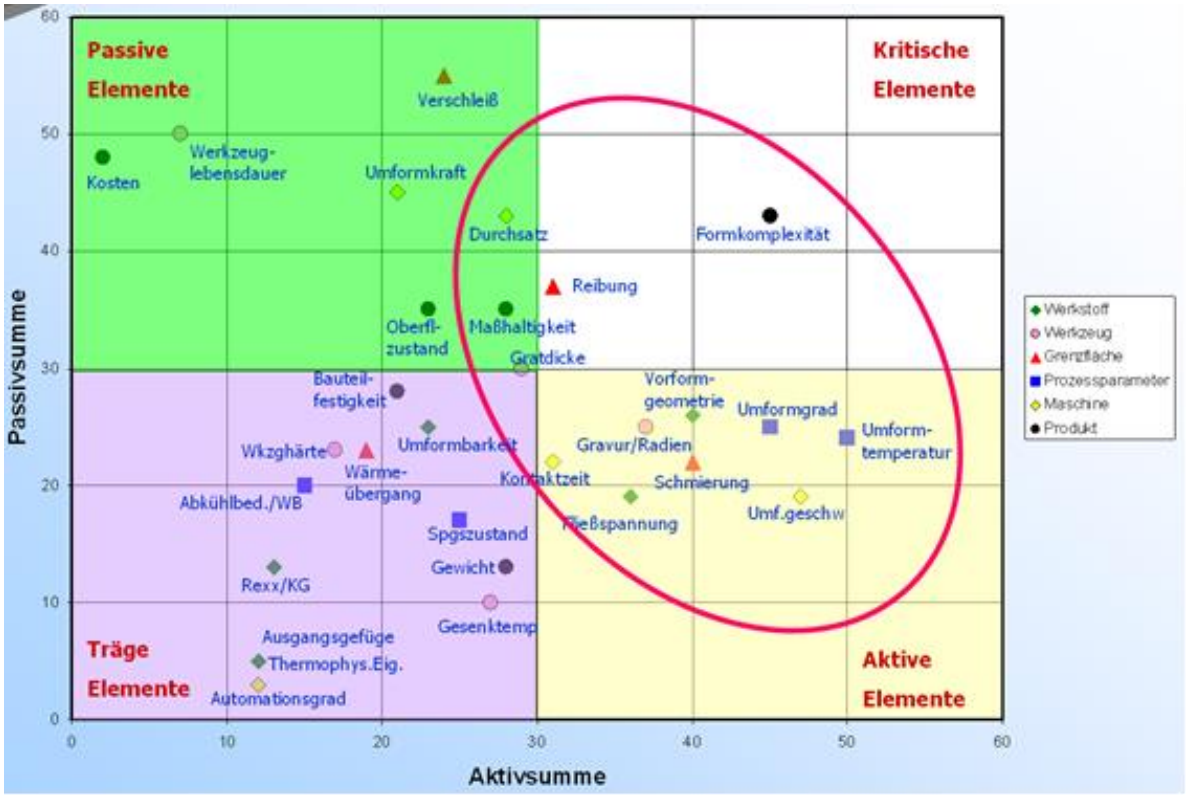


Abb. 20: Einflussmatrix des Gesenkschmiedens. Umrandet sind wichtige Systemelemente, die mit hoher Priorität zu betrachten sind, da sie einerseits starken Einfluss auf andere Systemgrößen ausüben bzw. von vielen Parametern beeinflusst werden.

2.8.3 Die Entscheidungsmatrix

Die Grundform für viele Entscheidungsstrategien ist die einfache Entscheidungsmatrix, in der die Anforderungskriterien für jede Option oder Alternative bewertet werden. Für die Bewertungen wird vielfach das Notensystem von 1 bis 5 verwendet. Es sind aber auch andere Skalierungen möglich. Durch Addition der Werte geht jene Option mit dem höchsten Summenwert als Gewinner und damit optimale Lösung hervor, siehe Tabelle 5.

	Optionen / Alternativen		
Kriterien	**Option 1**	**Option 2**	**Option 3**
Kriterium #1	3	5	2
Kriterium #2	3	3	5
Kriterium #3	5	4	4
Kriterium #4	2	3	5
Summe	13	15	16

Tabelle 5: Einfache Entscheidungstabelle mit Option 3 als beste Alternative

Der nächste Schritt ist dann die Berücksichtigung der Gewichtung der Kriterien, die in einfachster Form über die Skala von 1 bis 10 erfolgen kann, siehe Tabelle 6. Aufgrund der Gewichtung hat sich nun die Rangfolge gegenüber dem vorigen Fall verändert. In vielen Fällen erfolgt auch eine normierte Gewichtung mit der Summe der Gewichte gleich 1.
Als weitere Möglichkeit sei die Verwendung der Relevanzmatrix erwähnt, mit der die Stärke der Auswirkungen der Kriterien auf die Optionen bestimmt wird.

		Optionen / Alternativen					
		Option 1		**Option 2**		**Option 3**	
Kriterien	**Gew.**	**Bew.**	**total**	**Bew.**	**total**	**Bew.**	**total**
Kriterium #1	8	3	24	5	40	2	16
Kriterium #2	5	3	15	3	15	5	25
Kriterium #3	4	5	20	4	16	4	16
Kriterium #4	3	2	6	3	9	5	15
gewichtete Summe			65		80		72

Tabelle 6: Gewichtete Entscheidungstabelle, nun mit Option 2 als beste Alternative

2.8.4 Bewährte Methoden zur Entscheidungsfindung

Aus Sicht des Autors haben sich insbesondere folgende Methoden für die Entscheidungsfindung für die Auswahl von Werkstoffen und Fertigungstechnologien bewährt:

- QFD
- Kepner-Tröger
- Nutzwertanalyse
- AHP

Sie werden im Folgenden noch im Detail beschrieben und werden fallweise auch in andern Unterkapiteln dieses Buches verwendet.
Analogiebetrachtungen, Berücksichtigung von Alternativen, Best-Practice-Fälle, Kreativitätstechniken werden ebenso benutzt. Am Markt gibt es einige gute Bücher, die einen zusammenfassenden Überblick über Strategietools in der Praxis bzw. über Denkwerkzeuge geben [Ker11, Rus19].

2.8.4.1 Die Methode „Quality Function Deployment QFD"

Die QFD-Methode oder grafisch gesehen das „House of Quality" ist eine in der EU sehr breit angewandte Vorgehensweise bei der Auswahl von Werkstoffen, Verfahren, Lösungsansätzen etc. und versucht über eine Gewichtung der Anforderungen (Kundenwünsche) und Bewertung von Lösungsalternativen zu einem optimierten Ergebnis zu kommen.
Die Idee stammt vom Japaner Yoji Akao. QFD ist eine teamorientierte Methode zur systematischen und ganzheitlichen Produkt- und Qualitätsplanung. Dabei werden in interdisziplinären Teams die Kundenwünsche analysiert und in klar definierte Qualitäts-, Zuverlässigkeits- und Kostenziele umgewandelt. Ziel ist die wirtschaftliche Entwicklung und Herstellung eines Produktes, das genau die Bedürfnisse und Wünsche der Kunden erfüllt.

Die Arbeitsschritte bei der QFD-Analyse sind in Abb. **21**: Arbeitsschritte bei der QFD-Analyse Abb. 21 dargestellt.

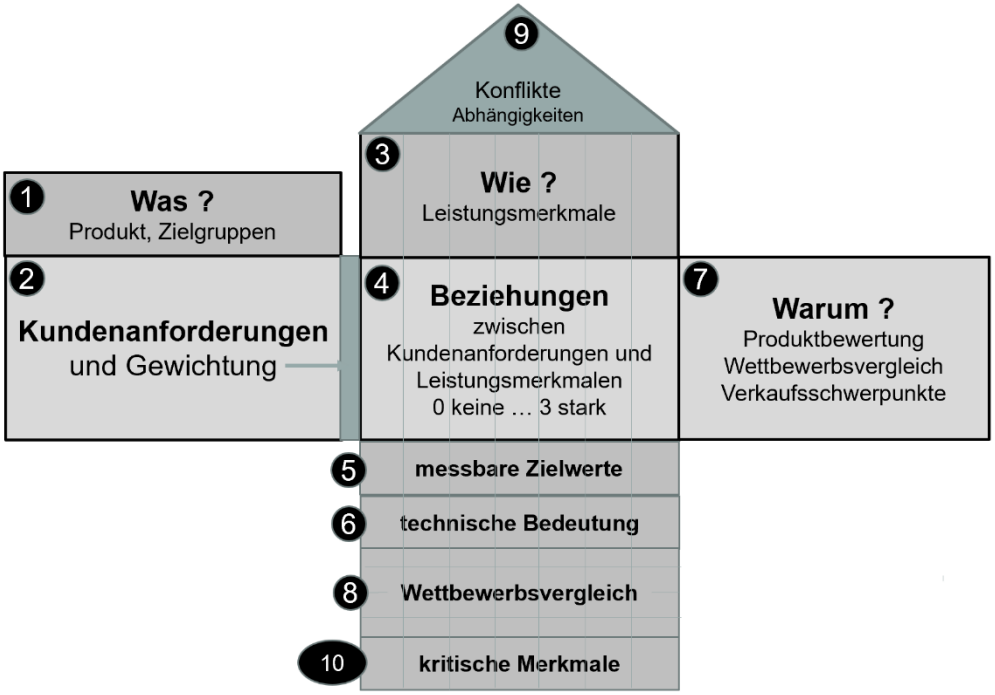


Abb. 21: Arbeitsschritte bei der QFD-Analyse

In Abb. 22 ist ein QFD-Beispiel für die Werkstoffauswahl für einen Auspuffwerkstoff im heißen Bereich (motornahe) wiedergegeben. Das Ergebnis deckt sich recht gut mit den Erfahrungen der Stahlhersteller, siehe Abb. 23.

		Werkstoffe						
Anforderungen	**Gew.**	1.4512 (X2CrTi12)	1.4513 (X1CrMoTi16-1)	1.4526 (X6CrMoNb17-1)	1.4509 (X2CrTiNb18)	1.4301 (X5CrNi18-10)	1.4541 (X6CrNoTi18-10)	1.4828 (X15CrNiSi20-12)
Zunderbeständigkeit	9	1	2	2	3	3	1	2
Zeitstandfestigkeit	8	1	1	2	3	3	3	3
geringe Versprödungsneigung	7	2	1	1	1	1	1	2
Ermüdungsfestigkeit	5	3	3	3	3	2	2	1
Nasskorrosionsbeständigkeit	2	1	2	3	2	3	2	3
Schweißeignung	7	1	1	1	2	1	1	1
Tiefziehbarkeit	5	2	3	3	2	2	2	1
Fertiungserfahrung	7	3	3	3	3	3	2	2
Preis	10	3	3	3	3	2	2	1
Technische Bedeutung = Σ(Gew.*EF)		116	125	135	152	132	105	103
relative Wertung [%]		13,4	14	15,6	17,5	15,2	12,1	11,9
Ranking		5	3	2	**1**	4	6	7

Abb. 22: QFD-Ansatz zur Auswahl eines Auspuffwerkstoffs

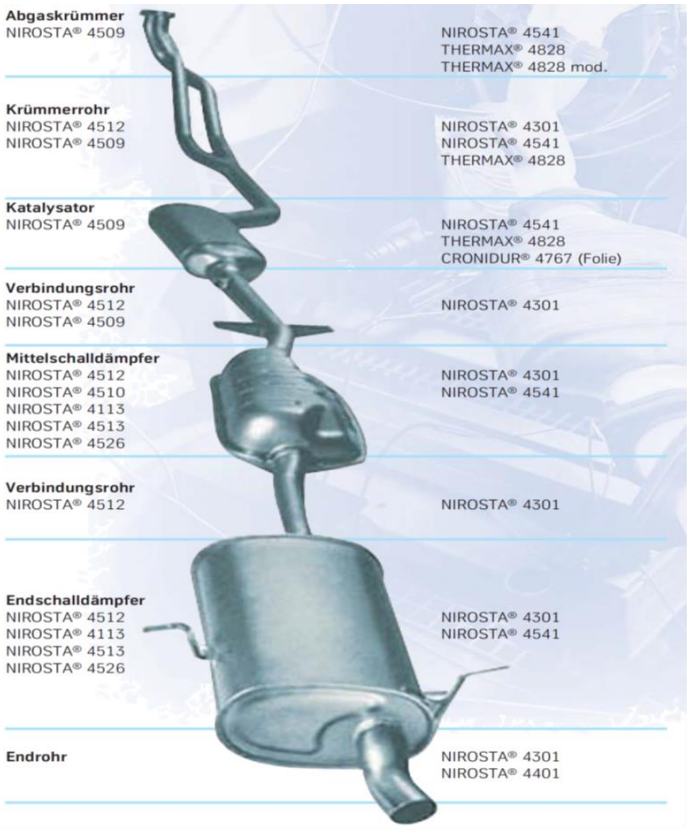


Abb. 23: Empfehlungen eines Stahlherstellers (ThyssenKrupp) für die Auspuff-Werkstoffauswahl

Abb. 24 zeigt ein QFD-Beispiel für die Auswahl einer geeigneten Fertigungstechnologie für die Herstellung einer Hohlwelle (Verteilergetriebe).

		Fertigungstechnologie						
Anforderungen	**Gew.**	Rundkneten	Rundschmieden	Innenhochdruckumformen	Fließpressen & Reibschweißen	**Fließpressen & Tieflochbohren**	CNC-Zerspanung	SLM - add. Fertigung
Ausgangsform (Rohr/Stange)	5	1	1	1	2	2	2	0
Umformtemp (RT/HW/Warm)	5	2	1	3	2	3	3	1
Umformstufen	4	1	1	2	1	1	2	3
günstiger Faserverlauf	7	3	3	2	2	2	0	0
Bearbeitungaufmaß	4	3	1	2	3	3	3	3
Fertigungstoleranzen	7	3	1	2	3	3	3	2
Oberflächengüte	7	3	1	2	3	3	3	1
Serieneignung	9	1	1	0	2	2	1	0
Taktzeit /Preis	10	2	2	0	3	3	2	0
Technische Bedeutung = Σ(Gew.*EF)		123	82	78	140	145	116	50
relative Wertung [%]		16,8	11	10,6	19,1	19,8	15,8	6,81
Ranking		3	5	6	2	**1**	4	7

Abb. 24: QFD-Beispiel für die Auswahl einer geeigneten Fertigungsmethode für eine Hohlwelle für ein Verteilergetriebe

Durch Hintereinanderschalten von QFD-Analysen für den gesamten Entwicklungsbereich bis zur Fertigung können optimale Ausprägungen für das Produkt (Produktmerkmale), die Konstruktion, den Fertigungsprozess und die Arbeits- und Prüfanweisungen ermittelt werden, siehe Abb. 25.

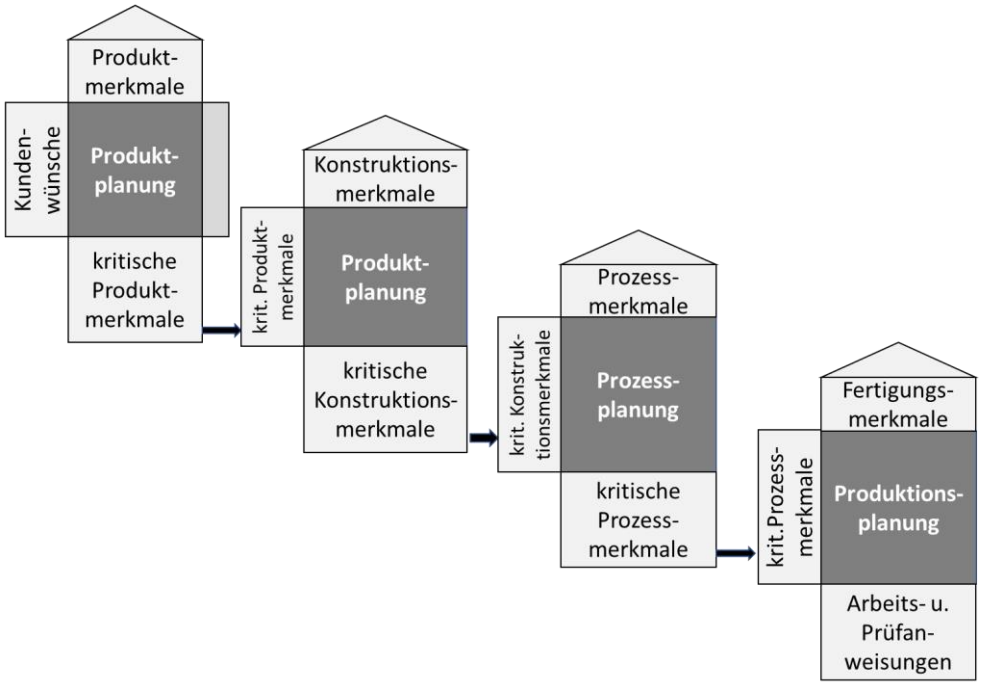


Abb. 25: Vierphasige, durchgängige Anwendung der QFD-Methode von den Kundenanforderungen bis zum kontrollierten Fertigungsprozess nach [The13]

2.8.4.2 Die Entscheidungsanalyse/Priorisierung nach Kepner und Tregoe

Die Methode basiert auf der Beobachtung, dass jedes Problem immer eine Folge von Veränderungen im System und/ oder Systemumfeld ist. Das Verfahren ähnelt der Vorgehensweise der Nutzwertanalyse von Zielformulierung bis hin zur Sensitivitätsbetrachtung. Um die Gewichtungskriterien der Beurteilungskriterien festzulegen, wird mit einem modifizierten paarweisen Vergleich gearbeitet. Unterschiedlich bei der KT-Methode ist, dass zusätzlich zwischen „Muss-Kriterien“ und „Kann-Kriterien“ unterschieden wird. Weiters wird eine Risikobetrachtung der Alternativen durchgeführt, solche mit hohem Risiko werden ausgesondert.
Der besondere Ansatz nach Kepner-Tregoe besteht darin, dem Problemsystem eine analog aufgebautes Vergleichssystem gegenüberzustellen, bei dem das Problem nicht auftritt – obwohl es eigentlich zu erwarten wäre. Man bestimmt dann die für die Unterschiede verantwortlichen Veränderungen (Ursachen) und daraus eine Versagenshypothese.

2.8.4.3 Die Nutzwertanalyse

Die Vorgangsweise bei der Nutzwertanalyse entspricht im Wesentlichen jenem der QFD-Methode und des paarweisen Vergleichs. Der einzige Unterschied liegt in der Skala der Gewichte für die Kriterien (1 bis 5) und jener der Eignungsbeurteilung (1 bis 10). Die Methode ist relativ einfach anzuwenden. Bezüglich ergänzender Informationen sei auf die Literatur verwiesen [Kue14, Kle18].

2.8.4.4 Die Selektionsmethode „Analytic Hierarchy Process (AHP)“

Die vom Mathematiker Thomas L. Saathy entwickelte Methode [Saa90, Saa12] ist prinzipiell der QFD-Methode und auch der Nutzwertanalyse ähnlich, aber mathematisch deutlich anspruchsvoller. Sie hat

sich vor allem in Nordamerika, in Skandinavien und in den fernöstlichen Ländern etabliert. Die Gewichtung der Kriterien (Einflussgrößen) erfolgt durch eine Reihung (= hierarchische Anordnung), die durch einen direkten, paarweisen Vergleich aller Kriterien gefunden wird. Auch die Lösungsalternativen werden paarweise verglichen.
Die Strukturierung für das Beispiel der Auswahl eines MP3-Players zeigt Abb. 26. Über die Homepage https://bpmsg.com/ ist neben einer ausführlichen Beschreibung auch ein Zugang zu einer AHP-online Software AHP-OS möglich. Als Beispiel für eine aktuelle Anwendung wird in [Pek18] die AHP-Methode und zwei andere Methoden zur Auswahl von additiven Fertigungsverfahren gezeigt, inklusive der Berechnungsschritte.

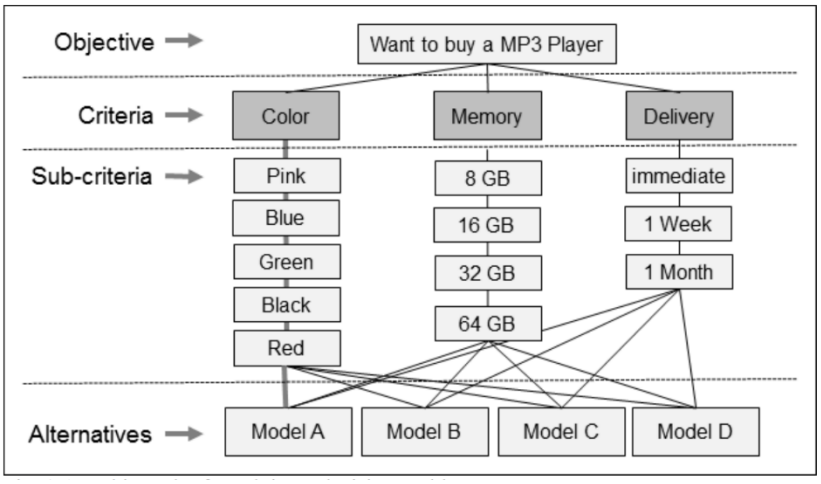


Abb. 26: AHP-Hierarchie für die Auswahl eines MP3-Players nach Klaus Goebel, Singapore 2018

Die Logik und Qualität der Entscheidung wird durch einen sog. Inkonsistenz-Faktor beschrieben, der sich aus offensichtlichen Widersprüchen im paarweisen Vergleich ergibt. Dieser ist somit ein Maß für die Stabilität des Rankings der Einflüsse.
Aufgrund der mathematischen Komplexität der Ermittlung optimaler Lösungsalternativen (es werden dazu Matrixoperationen durchgeführt), werden meist Software-Programme verwendet. Eine sehr detaillierte Darstellung und eine

2.8.4.5 TOPSIS

Die „Technique for order of preference by similarity to ideal solution" (TOPSIS) hat in der Gruppe der MCDM-Methoden einen fixen Stellenwert und basiert auf der Auswertung der geringsten Abstände (Euklidische Distanzen) der Raumpunkte von der Ideallösung. Die tatsächlichen Merkmale einer Alternative werden mit den min. und max. Idealwerten verglichen und die beiden Distanzen bestimmt. Aus dem Vergleich dieser Distanzen für alle Alternativen ergibt sich ein Ranking für die finale Entscheidung. Dieser Ansatz lässt sich auch mit Excel gut abbilden, siehe [Man19]. Der Ansatz stammt ursprünglich von Huang und Yoon aus dem Jahre 1981 [Hua81].

2.8.4.6 Weitere Methoden

Die sog. Conjoint-Analyse ist eine multivariate statistische Methode, mit der bspw. Konsumentenpräferenzen abgeschätzt werden können, die aus einer Menge von Alternativen mit den zugehörigen Eigenschaften/Merkmalen abgeleitet werden können. Insbesondere lassen sich damit einzelne Produktmerkmale mit einem quantitativen Nutzwert für den Kunden verknüpfen, es kann die

Preis-Absatz-Funktion für ein Produkt ermittelt sowie Zahlungsbereitschaft und Preiselastizität bestimmt werden. Die Methode wird für die Produktentwicklung, Preispolitik und Marktsegmentierung angewandt.

Die sog. **Outranking-Methoden,** wie **TOPSIS** (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), **(ELECTRE** (Elimination Et Choix Tradusaint la Realite) und **PROMETHEE** (Preerence Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations) werden eher in der EU verwendet und basieren auf paarweisen Vergleichen, um mittels vereinfachenden Präferenzfunktionen die individuellen Präferenzen des Entscheiders zu ermitteln. Aufgrund dieser paarweisen Vergleiche und der zugrundeliegenden Präferenzfunktionen wird es somit ermöglicht, auch schwache Präferenzen und sogar Unvergleichbarkeiten darzustellen.

2.8.4.7 Übersicht über die Anwendung von MCDM-Methoden

Tabelle 7 gibt einen Überblick zur Literatur über die Verwendung der MCDM-Methoden im Bereich der Auswahl von Werkstoff- und Fertigungstechnologien.

Autor/Jahr	Methodeneinsatz	Anwendungsbereich / Bemerkungen
Yur04	AHP	Auswahl von Werkzeugmaschinen
Jah10	TOPSIS, ELECTRE, AHP	Werkstoffauswahl
Loh11	Wertanalyse	Prozessoptimierung im Anlagenbau
Cav13	QFD, VIKOR	Werkstoffauswahl
Pra13	QFD	Werkstoffauswahl
Kas14	QFD	Werkstoffauswahl
Kum14	TOPSIS	Werkstoffauswahl
Jah15	MCDM Normalisierung	Werkstoffauswahl
Hog16	AHP, MARE, ELECTRE III	Geräteauswahl
Mou17	TOPSIS, COPRAS, DEA	Materialauswahl
Pak18	AHP, Fuzzy AHP, Promethee	Auswahl von additiven Fertigungsverfahren
Man19	TOPSIS, CODAS, EDAS	Auswahl flexibler Fertigungssysteme
Urn19	Wertstrommethode	Material- und Info-Fluss in der Produktion

Tabelle 7: Übersicht zu einigen Veröffentlichungen, die Methoden zur Multi-Kriterien-Entscheidungs-findung von Materialien und Fertigungssysteme verwenden

2.9 Innovationsmanagement

Innovationen sind für jedes Unternehmen für die erfolgreiche Einführung einer Idee in den Markt essenziell und bedarf daher einer systematischen Planung, Steuerung und Kontrolle aller dafür notwendigen Aktivitäten in Form des Innovationsmanagements.
Kreative Ideen oder neues Wissen (= Invention) sind noch keine Innovation. Nach Josef A. Schumpeter (österrr.-deutscher-amerikanischer Ökonom und Begründer der Innovationsforschung) resultiert eine echte Innovation erst dann, wenn aus den Ideen neue Produkte, Dienstleistungen oder Verfahren umgesetzt werden, die tatsächlich erfolgreiche Anwendung finden und den Markt durchdringen (= Diffusion) [Sch1911]. Während die Wissenschaft neue Erkenntnisse, also neues Wissen, produziert, stellen Innovationen dazu das Gegenstück dar, indem aus Wissen neue Anwendungen generiert werden [Mue09], d.h.

Innovation = Idee + Anwendung + Diffusion

Damit umfasst der Innovationsprozess alle Phasen von der Ideenentwicklung bis zur Produktumsetzung. Grundsätzlich lassen sich folgende Phasen unterscheiden [Mue09]:

- Ideengenerierung, -entwicklung, -bewertung und -auswahl
- Ideenauswahl und Kick-off zur Umsetzung eines Entwicklungsprojekts,
- Vor-/Technologieentwicklung, Machbarkeitsnachweis (Prototyp),
- Produktentwicklungsprozess,
- Produktion und Markteinführung.

Vielfach werden diese Phasen in Form eines Innovationstrichters dargestellt, der zeigt, dass stufenweise nur die besten Ideen überleben. Weiterführende und tiefergehende Informationen finden sich in [Gau01, Gau19, Eve09, Sch12].
Gerade für die im Kapitel 2.2.2 beschriebene Philosophie „Blue Ocean“ ist das Innovationsmanagement ein Kernelement und wird für die zukünftige Produkt-, Prozess- und Geschäftsmodellentwicklung immer wichtiger. Die Ursachen für eine Produktinnovation können sein:

- Gesättigte Märkte und der Verdrängungswettbewerb
- Ein rascher Technologiefortschritt
- Das Streben nach Innovationsführerschaft
- Der Markt fordert nach Neuheiten
- Umweltprobleme und Ressourcenschonung

2.9.1 Ideengenerierung, Kreativitätstechniken, Ideenmanagement und Bewertung

In der Impulsphase ist es vor allem wichtig aktuelle Trends bzw. Trendänderungen zu beobachten, aber auch Not macht erfinderisch. Des Weiteren ist es wichtig Innovationspotenziale zu erkennen. Sollen bestehende Produkte einen deutlichen höheren Nutzen für den Kunden bringen, so sind teilweise radikale Schritte notwendig. In dieser Phase ist ein hohes Maß an Kreativität notwendig. Sehr oft wird dabei ein System zur Gänze in die Einzelkomponenten zerlegt und der Nutzen jedes Teil hinterfragt, bzw. ganz bewusst eine Entfremdung herbeigeführt, um neue Möglichkeiten mit evtl. höherem Nutzen zu finden. Durch diesen gezielten Veränderungsprozess soll Neues/Einzigartiges entstehen, meist durch Kombination von Faktoren in einer neuartigen Art und Weise. Das Suchen nach neuen Erkenntnissen oder Lösungswegen setzt Neugier, Kreativität und Lust auf Erneuerung voraus.
Durch einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP) ist es recht einfach möglich, dass unternehmensinterne Ideen generiert, gesammelt, bewertet, honoriert und in weiterer Folge erfolgreich umgesetzt werden. Darüber hinaus können in separaten Innovations-Workshops meist mit Mentoren und speziellen Kreativitätstechniken (TRIZ, ARIZ, Mind-Mapping, Methode 635, 6-Hüte-Methode,

Progressive Abstraktion, Reizwortanalyse, Morphologischer Kasten u.a.m.) nützliche Ideen generiert werden. Diese Techniken sind in mehreren Büchern im Detail beschrieben, siehe [Noe15, Bac19].

Ein jüngerer, teambasierter Ansatz zur Entwicklung neuer Ideen ist „Design Thinking". Dabei arbeiten Menschen aus unterschiedlichen Disziplinen in einer kreativitätsfördernden Umgebung zusammen, um Lösungen zu finden, die aus Anwendersicht überzeugend sind. Die Arbeitsschritte sind ähnlich zu jenen von Designern und umfassen die grundlegenden Schritte: Verstehen, Beobachten, Standpunkt definieren, Ideen finden, Prototyp entwickeln und zuletzt das Testen. Diese Prinzipien werden seit 2005 am Hasso-Plattner-Institute of Design an der Stanford University in Palo Alto gelehrt und von SAP in der Zusammenarbeit mit Kunden verwendet [Pla09].

Sehr hilfreich ist auch das Konzept der „Open Innovation", bei dem auch externe Ideengeber (Plattformen, strategische Berater etc.) eingeladen werden. In ähnlicher Weise, aber problemorientierter funktioniert der Prozess „Crowdsourcing".
Eine sehr rasche Umsetzung frischer Ideen und auch eine Förderung der Nachwuchskräfte werden durch Hightech Inkubatoren von „Start-ups" erreicht. Das INiTS der Stadt Wien wurde bspw. im Jahr 2018 als weltweit sechsbester Inkubator gereiht.

Die Bewertung von Innovationen gibt es eine Reihe von Kriterien, die zu einem hohen Maße erfüllt werden müssen, wie

- Technische Beurteilung
  - Grad der Neuheit (inkrementell oder radikal, disruptiv oder revolutionär)?
  - Wie hoch ist der technologische Reifegrad (TRL) der Innovation?
  - Worin besteht die Neuheit (für den Kunden, für die Branche u.a.m,)?
  - Wie hoch ist das technische Risiko? Gibt es schon ähnliche Erfindungen?
  - Gibt es hinderliche Abhängigkeiten von Zulieferfirmen?
- Umsetzungsplanung
  - Sind die Arbeitspakete und Meilensteine schlüssig?
  - Kurzer Businessplan und Darstellung der Vision („the big picture")
  - Sind die Kunden bereit für den wahrscheinlichen Mehrwert auch mehr zu zahlen?
- Markteinführung
  - Kenntnis über Mitbewerber und Zielgruppe?
  - Finanzierungsbedarf, Zertifizierung, Vertriebsart?
- Nachhaltigkeit der Innovation
  - Ökologische, soziale und ökonomische Nachhaltigkeit

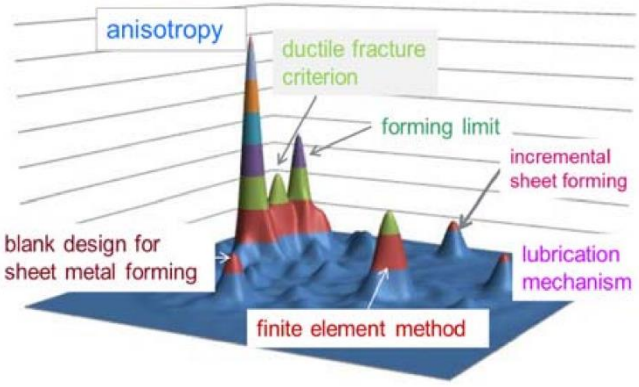
2.9.2 Technologiemonitoring

Technologien, technologisches Know-how, Entwicklungstrends und technologische Kompetenzen stellen in nahezu allen Industriebranchen einen entscheidenden Wettbewerbsfaktor dar.
Für das frühzeitige Erkennen neuer technologischer Trends gibt es mehrere Analysemöglichkeiten, siehe Tabelle 8 nach [Spa10], von denen sich insbesondere die Analyse der Patentanmeldungen bewährt hat. Patentanmeldungen passieren bereits kurz nachdem die ersten Forschungsergebnisse vorliegen und spiegeln auch ein kommerzielles Interesse des Anmelders in einem bestimmten Marktsegment wider.
Üblicherweise wird mit der Internationalen Patentklassifikation (IPC) im Europäischen Patentamt (EPA) mit Sitz in München recherchiert. Pro Monat fallen ca. 10.000 Patentanmeldungen an.

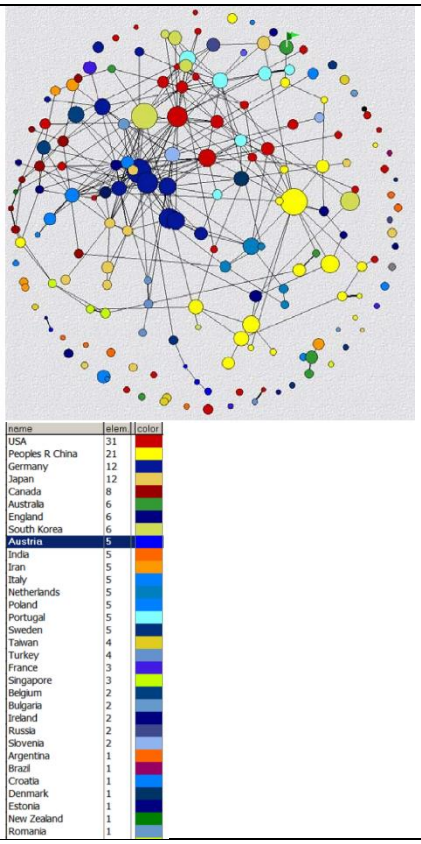
	Intuitiv-strukturiert	empirisch	Kausal/ systemisch	Intuitiv-Mathemat.
Conjoint Analyse		X		
Delphi Studie	X			
Entscheidungsbäume			X	
Expertenbefragung	X			
Kosten-Nutzen-Analyse			X	
Kreativitäts- und Problemlösungstechniken	X			
Nutzwertanalyse			X	
Patentanalyse		X		
Publikationsanalyse und Bibliometrie		X		
Roadmaps	X			
Quality Function Deployment		X		
Szenariotechnik	X		X	X
S-Kurvenanalyse				X
Simulationsmodelle				X
Trendextrapolation				X
Wirtschaftlichkeitsrechnung				X

Tabelle 8: Methoden zur Technologie- und Anwendungsbewertung nach [Spa10], [Lic08]

Die bibliometrische Analyse, bei der primär wissenschaftlichen Veröffentlichungen systematisch ausgewertet werden [Fro02, Bal05], dient in erster Linie dem Aufspüren von „hot spots“ und der Analyse der wissenschaftlichen Netzwerke bzw. der fachspezifischen Experten. Die Methode basiert auf der Analyse von zusammengehörigen Objekten und deren Entfernungen zueinander, ähnlich der strukturerkennenden Methode der Multidimensionalen Skalierung, wodurch eine Landkarte mit dem Beziehungsnetzwerk generiert werden kann. Am ARC in Seibersdorf wurde bereits im Jahre 1995 das System BibTechMon (Bibliometric Technology Monitoring) entwickelt. Dieses System wurde bspw. auch dazu verwendet, um für den Zeitraum 1995 bis 2015 die Highlights im Bereich der Umformtechnik aus nahezu 6000 Publikationen zu erkennen. Zwei Teilergebnisse sind in Abb. 27 dargestellt; das linke Teilbild zeigt die Häufigkeit der „heißen“ Themen und das rechte Bild zeigt das Netzwerk und die Forschungsstellen weltweit.



Thematische Highlights im betrachteten Zeitraum



name	elem	color
USA	31	
Peoples R China	21	
Germany	12	
Japan	12	
Canada	8	
Australia	6	
England	6	
South Korea	6	
Austria	5	
India	5	
Iran	5	
Italy	5	
Netherlands	5	
Poland	5	
Portugal	5	
Sweden	5	
Taiwan	4	
Turkey	4	
France	3	
Singapore	3	
Belgium	2	
Bulgaria	2	
Ireland	2	
Russia	2	
Slovenia	2	
Argentina	1	
Brazil	1	
Croatia	1	
Denmark	1	
Estonia	1	
New Zealand	1	
Romania	1	

Netzwerk der F&E-Stellen in der Umformtechnik

Abb. 27: Ergebnisse einer bibliometrischen Analyse im Bereich der Umformtechnik [Hoe16]

2.10 Wissensmanagement

Der richtige Umgang mit der Ressource Wissen gewinnt in unserer schnelllebigen Zeit immer mehr an Bedeutung und ist im globalen wirtschaftlichen Wettstreit enorm erfolgsentscheidend. Das Wissen eines Unternehmens ist meist personengebunden, in den Köpfen der Mitarbeiter verankert und liegt in einer unstrukturierten Form vor.

Aufgabe eines erfolgreichen Wissensmanagements in einem Unternehmen ist es daher, dieses unstrukturierte Wissen zu sammeln, in eine strukturierte Form zu bringen, Wissen zu bewerten und in geeigneter Form an die Mitarbeiter wieder zu transferieren. Der entscheidende Punkt liegt in der raschen Verfügbarkeit von spezifischem Wissen, wodurch ein allgemeiner Mehrwert erreicht werden kann.

Es gibt zahlreiche Bücher und Veröffentlichungen zu diesem wichtigen Thema, wie z.B. [Leh14, Pro06, Bin10].

2.10.1 Anforderungen an ein Wissensmanagementsystem

Das Einbringen, die spätere Nutzung von Fachwissen in ein Verwaltungssystem und dessen Akzeptanz ist für den Erfolg sehr entscheidend und erfordert auch die Einbindung der Entscheidungsträger und der potenziellen Nutzer in einer frühen Phase. Zur Erhöhung der Akzeptanz können zusätzliche Optionen angeboten werden, wie z.B. Links zur öffentlichen Literaturstellen, Zeichnungen, F&E-Berichte, Hinweise auf Normen und Patente, Auflistung von „best practice"-Fallbeispielen oder die Angabe von Fachexperten auf speziellen Gebieten. Sehr wesentlich ist auch die leichte Handhabbarkeit sowohl beim Erweitern oder Modifizieren der bestehenden Datensätze wie auch beim zielsicheren Auffinden von Informationen. Von den verschiedenen Ansätzen zur Wissensverwaltung zählen neben relationalen Datenbanken und Expertensystemen auch WIKI-basierte Systeme [Adl11, Ebe05, Teu07, Gro14, Mil09]. Nach einer Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile derartiger Software hat sich der Autor für ein WIKI-System entschieden, mit dem auch schon für den Bereich Umformsimulation gute Erfahrungen gemacht wurden.
Das berühmteste Beispiel ist sicherlich die freie Enzyklopädie Wikipedia, mit der mehr als 2 Mio. Artikel in deutscher Sprache (seit 2001) abgerufen werden können. Analog dazu gibt es „leere" Systeme mit ähnlichem Funktionsumfang, die kostenfrei zur Verfügung stehen. Ein derartiges System wurde auch für eigene Entwicklungen verwendet, siehe Kap.2.10.3 und 2.10.4.

2.10.2 Die Vor- und Nachteile eines WIKI-basierten Systems

Die Vorteile eines dem Wikipedia ähnlichen Wissensmanagement-Systems können wie folgt zusammengefasst werden:

- WIKI ist ein vielerorts akzeptierter Standard.
- Übertragung in mehreren Sprachen möglich
- Flexible Suchmöglichkeiten
- Zugriffsrechte können flexibel vergeben werden
- transparente und editierbare Informationen
- Erweiterungen sind mit geringem Aufwand möglich
- Verweise auf andere Quellen oder Bilder
- Im Intranet am Server bequem abrufbar
- Firmeninternes Know-how bleibt geheim
- Wartung durch firmeneigenes Personal möglich
- Durch Kategorien leichtere Handhabung
- Bücher/Lehrbehelfe über Subthemen können direkt gedruckt werden

Zu den Nachteilen zählen:

- Keine Möglichkeit für direkte Berechnungen
- Keine hierarchische Struktur (Überblick kann verloren gehen)
- Notwendige Aktualisierungen müssen selbst durchgeführt werden

2.10.3 Entwicklung eines WIKI-basierten Systems für die Blechumformung

Zur Unterstützung der Mitarbeiter in einem größeren Zulieferbetrieb für die Automobilindustrie wurde vom Autor ein umfangreiches WIKI-basiertes System für die Blechumformung entwickelt. Es umfasst grundlegendes Wissen der Blechumformung, prozessspezifisches Know-How, Daten über die wichtigsten Blechwerkstoffe, Prüfung der Umformbarkeit, Reibung, Umformmaschinen, Werkzeugbau, Umformsimulation und sekundäre Kategorien, wie Wartung, eine Literaturdatenbank, Unterstützung bei der Durchführung von Schadensanalysen, wirtschaftliche Aspekte und die

Fügetechnik für Bleche. Aufgrund des internationalen Netzwerks wurde das System in englischer Sprache verfasst. Das Hauptmenü ist in Abb. 28 dargestellt.
Querverweise zu anderen Artikeln und zu externen Files (Zeichnungen, pdf-files etc.) sind für jeden Eintrag möglich, siehe Abb. 29. Durch die direkte Einbindung von Veröffentlichungen im pdf-Format steht der originale Inhalt sofort auf Knopfdruck zur Verfügung. Damit ist auch ein übersichtlicher Aufbau einer eigenen Fachbibliothek möglich, die durch eigene, interne Berichte ergänzt werden kann. Für die Zuordnung, Klassifizierung und Wartung der Informationen muss zumindest eine Kontaktperson verantwortlich gemacht werden.
Das System eignet sich auch sehr gut für Ausbildungszwecke und eigenständiges Lernen mit kontrolliertem Zugriff.
Weitere Vorteile des Systems sind die flexible und einfache Erweiterung des Wissensumfangs und die leichte Modifizierbarkeit. Es kann sowohl in einem Intranet oder über ein Sharepoint-System dem Nutzer angeboten werden. Zurzeit umfasst das System ca. 200 Links mit Blogs und über 1000 direkt aufrufbare Dokumente im pdf-Format.

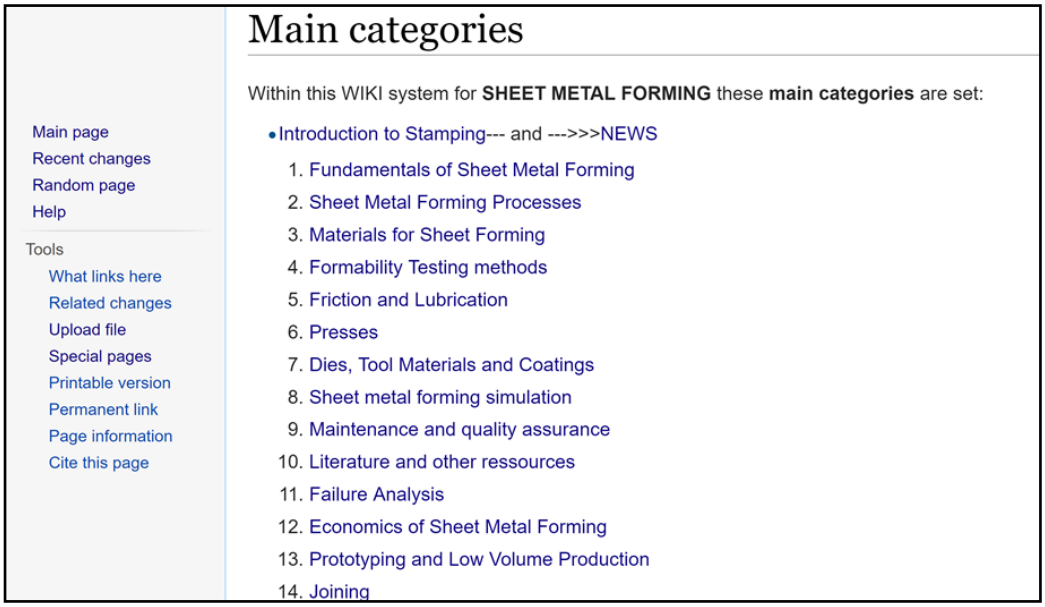


Abb. 28: Hauptmenü des Wiki-Systems für die Blechumformung

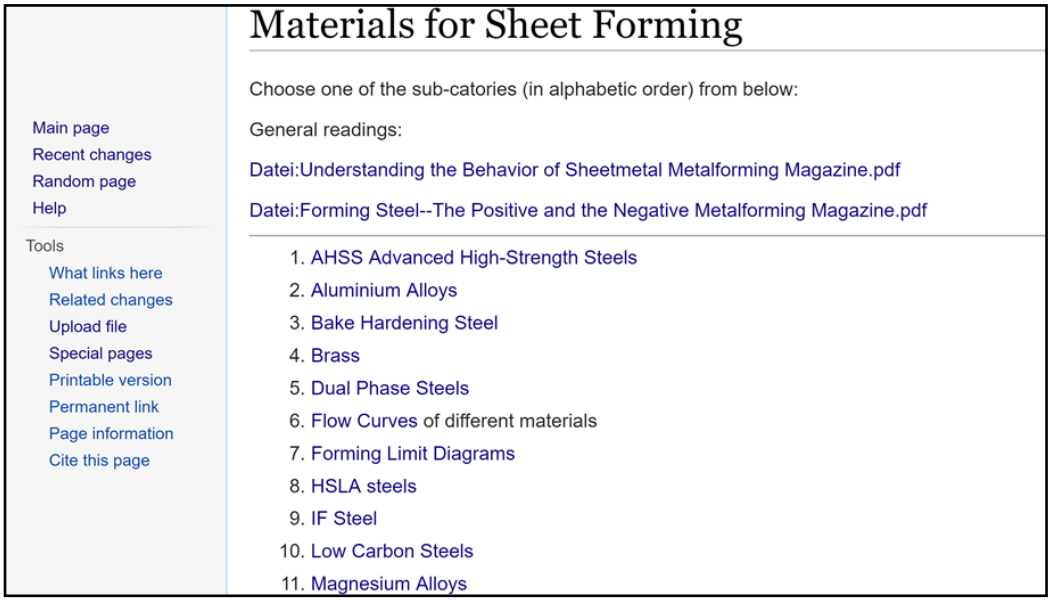


Abb. 29: Untermenü über Informationen zu den wichtigsten Blechwerkstoffen im Automobilbau

In Links der Blechwerkstoffe führt zu Informationen und Daten, die für den Anwender und für die Verwendung spezifisch sind. So finden sich Daten über Streckgrenze, Dehnung, n-Wert, r-Wert und andere.
Das in Abb. 30 gezeigte Untermenü zu den unterschiedlichen Blechprüfmethoden verlinkt die einzelnen Methoden mit den spezifischen Informationen bzw. Beschreibungen mit Bildern.

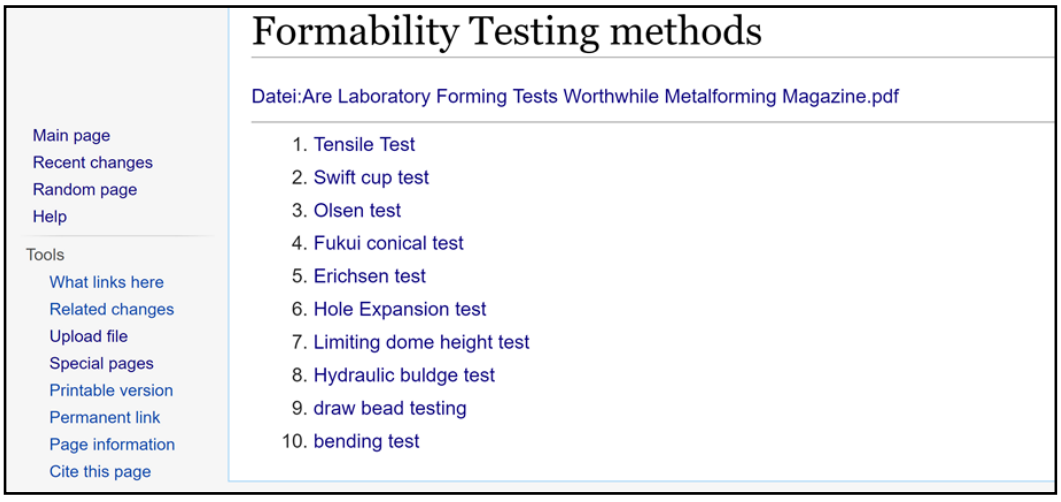


Abb. 30: Untermenü über die wichtigsten Prüfmethoden von metallischen Blechen

Praktiker nehmen auch gerne Einblick in die Grundlagen der Blechumformung mit spezifischen Informationen über die in Abb. 31 gezeigten Themen. Im Augenblick ist ein großes Angebot an Fachwissen aus Studienunterlagen, Fachbüchern, Vortragsunterlagen und wissenschaftliche Publikationen zu den Themen hinterlegt. Eigene Erfahrungen und interne Quellen sind jederzeit ergänzbar – auch die Nennung von Experten im eigenen Haus inkl. Erreichbarkeit oder Links zu den Fachlabors sind implementierbar.
Bei Auswahl des Menüpunktes Umformbarkeit/Formability folgt der in Abb. 32 dargestellte Bildschirminhalt. Nach einer kurzen Beschreibung werden die wesentlichen Einflussgrößen aufgezählt

und noch zusätzlich findet sich ein Link auf eine Veröffentlichung zu diesem Thema. Der Umfang ist aber nicht auf eine Bildschirmseite beschränkt, sondern kann durchaus länger sein.

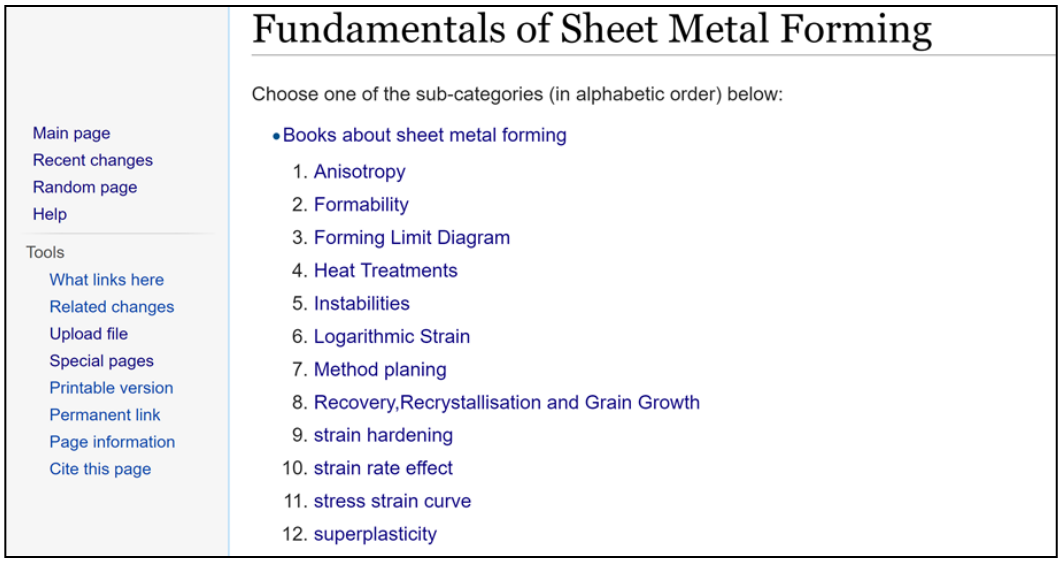


Abb. 31: Grundlageninformationen zu den wichtigsten Einflussgrößen bei der Blechumformung

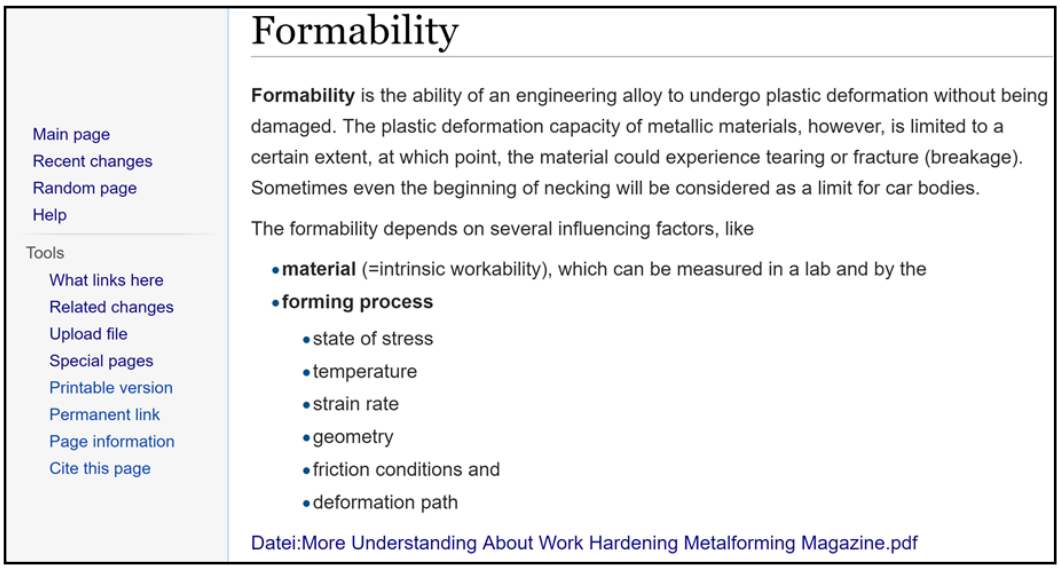


Abb. 32: Beschreibung des Begriffs der Umformbarkeit mit den wichtigsten Einflussgrößen und Querverweis auf eine verlinkte Literaturstelle im PDF-Format

2.10.4 Ein WIKI-basiertes Systems für das Warm- und Kaltwalzen von Blechen

Ergänzend zum vorigen System, das insbesondere für die Bauteilherstellung bspw. durch Tiefziehen konzipiert wurde, gibt es auch ein wissensbasiertes System zum Warm- und Kaltwalzen. Das Hauptmenü mit den Überschriften der Unterpunkte ist in Abb. 33 dargestellt. Neben der Fertigung von Flachprodukten ist auch die Fertigung von Langprodukten (Draht, Rohr) inkludiert. Die Art der

Informationstypen umfasst Fachbücher, Veröffentlichungen, Vorträge, interne Berichte und auch Broschüren zu den unterschiedlichsten Themen.

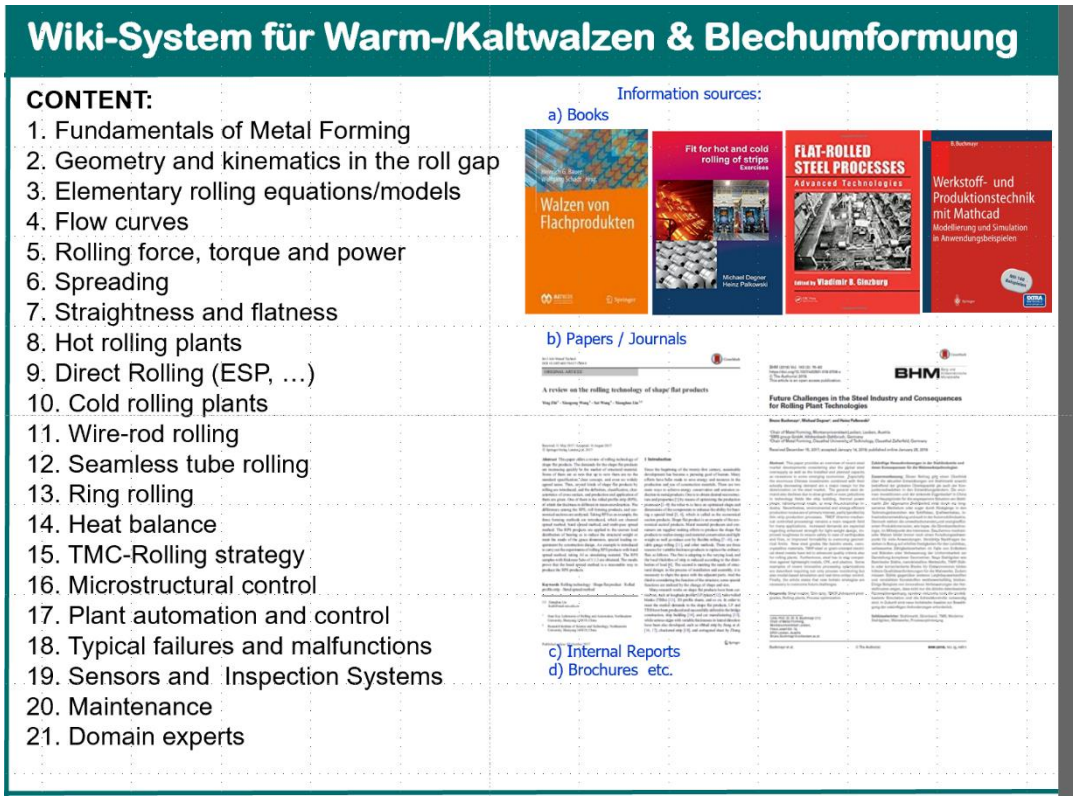


Abb. 33: Hauptmenü für ein wissensbasiertes System zum Thema Warm- und Kaltwalzen

2.11 Literaturangaben zu Kapitel 2

Kap. 2.1

[Bof19] P.Bofinger: Grundzüge der Volkswirtschaftslehre: Eine Einführung in die Wissenschaft von Märkten , Pearson Studium, 5.Aufl., 2019

[DAA20] DAA-Wirtschaftslexikon https://media.daa-pm.de/ufv_wirtschaftslexikon/Html/F/Fertigung.htm
Abgerufen am 7.4.2020

[Edl06] H.Edling: Volkswirtschaftslehre – schnell erfasst, Springer Berlin Heidelberg, 2006

[Kru17] P.Krugman, R.Wells: Volkswirtschaftslehre, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2017

[Men15] W.Mentzel: BWL Grundwissen, 6.Auflage, Haufe TaschenGuide, 2015

[Tho16] J.-P.Thommen u.a.: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 8.Auflage, Springer Gabler, 2016

[Wes10] E.Westkämper, H.-J.Warnecke: Einführung in die Fertigungstechnik, Springer Vieweg, 2010

[Woe13] B.Woeckener: Volkswirtschaftslehre – Eine Einführung, Springer Gabler, 2.Aufl. 2013

[Woe16] G.Wöhe, U.Döring, G.Brösel: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Vahlen, 2016

Kap. 2.2

[Abe08] E.Abele, R.Anderl, H.Birkhofer, B.Rütting (Hrsg.): EcoDesign – Von der Theorie in die Praxis, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2008

[Cha05] W.C.Kim, R. Mauborgne: Der Blaue Ozean als Strategie. Wie man neue Märkte schafft, wo es keine Konkurrenz gibt. Carl Hanser Verlag, München und Wien, 2005

[Cor09] H. Corsten, R. Gössinger: Produktionswirtschaft, Oldenbourg, München, 12. Aufl., 2009

[Del16] Deloitte Center for Industry Insights: 2016 Global Manufacturing Competitiveness Index, London, 2016, 89 pages

[Gra00] R.M.Grant: Contemporary Strategy Analysis, 3rd ed., Blackwell Business, Malden, MA,2000

[Kel18] F.Kellner, B.Lienland, M.Lukesch: Produktionswirtschaft: Planung, Steuerung und Industrie 4.0, Springer Gabler, 2018

[Neb11] T.Nebl: Produktionswirtschaft, Oldenbourg Verlag, 2011

[Por80] M.E. Porter: Competitive Strategy: Techniques for analyzing industries and competitors: with a new introduction/Michael E. Porter; The Free Press, New York, 1980

Kap. 2.3

[Bai09] D.Baier, M.Brusch: Conjointanalyse, Methoden-Anwendungen-Praxisbeispiele, Springer Verlag, 2009

[Beh18] U.Behrens: Quick Guide Effizientes Marketing für kleine und mittlere Unternehmen, Springer Gabler, 2.Aufl., 2018

[Cou05] C.Courage, K.Baxter: Understanding your users, Elsevier, 2005

[Fab05] S.Fabian: Wettbewerbsforschung und Conjoint-Analyse, Gabler Edition Wissenschaft, 2005

[Mef12] H.Meffert, C.Burmann, M.Kirchgeorg: Marketing – Grundlagen marktorientierter Unternehmensführung, 11.Auflage, Springer Gabler, 2012

[Sar14] M.Sarstedt, E.Mooi: A concise guide to market research, The process, data, and methods using IBM SPSS statistics, Springer Business, 2014

[Toe08] A.Töpfer: Handbuch Kundenmanagement: Anforderungen, Prozesse, Zufriedenheit, Bindung und Wert von Kunden, Springer Verlag, 3.Aufl., 2008

Kap. 2.4

[Alb99] A.Albers, S.Matthiesen: Maschinenbau im Informationszeitalter – Das Karlsruher Lehrmodell, 44. Int. Wissenschaftl. Kolloquium, Machinenbau im Informationszeitalter, 20.-23.9.1999, TU Ilmenau

[Bac14] S.Back, H.Weigel: Design for Six Sigma – Kompaktes Wissen, Konkrete Umsetzung, Praktische Arbeitshilfn, Carl Hanser Verlag, 2014
[Bri10] T. Brinkmann: Produktentwicklung mit Kunststoffen. Carl Hanser Verlag, München 2010
[Bul95] H.-J. Bullinger, R. Kugel, P. Ohlhausen, A. Stanke: Integrierte Produktentwicklung, Gabler Verlag, Wiesbaden, 1995
[Dam13] M. Dambacher, D.Schmid, H.Kaufmann, A.Kirchner, T.Koke, P.Konold, R.Kümmerer, A.Lohmann, A.Pflug, M.Schlüter, Produktion – Technologie und Management, Europa Lehrmittel Verlag, 2013
[Gam09] J.Gamweger, O.Jöbstl, M.Strohrmann, W.Suchowerskyj: Design for Six Sigma – Kundenorientierte Produkte und Prozesse fehlerfrei entwickeln, Hanser Fachbuchverlag, 2009
[Kol11] K.Koltze, V.Souchkov: Systematische Innovation – TRIZ-Anwendung in der Produkt- und Prozessentwicklun, Carl Hanser Verlag München, Wien, 2011
[Kle99] B.Klein: QFD – Quality Function Deployment – Konzept, Anwendung und Umsetzung für Produkte und Dienstleistungen, expert verlag, 1999
[Lin07] U. Lindemann: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Springer, Berlin, 2. Aufl. 2007
[Lin16] U.Lindemann (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung, Hanser Verlag, 2016
[Loh13] A.Lohmann: Produktion – Technologie und Management, Europa Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2013
[Nie19] G.Niemann et.al.: Maschinenelemente 1, Springer-Verlag Deutschland, 2019
[Pah07] G. Pahl: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. Springer, Berlin, 7. Aufl. 2007
[Saa11] J.Saatweber: QFD und Innovationen – Kundenorientierung durch Quality Function Deployment, 3.Aufl., symposion, Düsseldorf, 2011
[Sch05] B.Schäppi, F.-J.Radermacher, M.M.Andreasen, M.Kirchgeorg: Handbuch der Produktentwicklung, Hanser Verlag, München, 2005
[Wie12] F.Wieneke, J.Schmidt: Produktionsmanagement, Europa Lehrmittel, Haan-Gruiten, 4.Aufl., 2012

Kap. 2.5

[Dom15] U.Dombrowski, T.Mielke: Ganzheitliche Produktionssysteme: Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen, VDI, Springer Vieweg, 2015
[Hil19] T.Hiller, L.Härtel, P.Nyhuis: Gestaltung effizienter Produktionssysteme, ZWF 114, 2019, H.12, 802-806
[Nyh13] P.Nyhuis, J.Deuse, J.Rehwald: Wandlungsfähige Produktion – Heute für morgen gestalten, PZH Verlag, Garbsen, 2013
[Ohn13] T.Ohno, M.Rother, et.al.: Das Toyota-Produktionssystem, Campus, Frankfurt am Main, 3.Aufl., 2013
[Vaj14] S.Vajna: Integrated Design Engineering, Springer Vieweg 2014
[VDI12] VDI 2870-1: Ganzheitliche Produktionssysteme – Grundlagen, Einführung und Bewertung, VDI – Verein dt. Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin, 2012

Kap. 2.6

[Alt84] G.Altschuller: Erfinden. Wege zur Lösung technischer Probleme, VEB Verlag Technik, 1984
[Bre16] W.Brenner, F. Uebernickel, T. Abrell: Design Thinking for Innovation – Research and Practice, Springer Heidelberg, Dordrecht London, New York, 2016
[DeB96] E.de Bono: Serious Creativity – Die Entwicklung neuer Ideen durch die Kraft des Lateralen Denkens, Schäffer-Poeschel Verlag, 1996
[Gau01] J.Gausemeier, P.Ebbesmeyer, F.Kallmeyer: Produktinnovation, Carl Hanser Verlag München, 2001

[Gau19] J.Gausemeier, R.Dumitrescu, J.Echterfeld, T.Pfänder, D.Steffen, F.Thielemann: Innovationen für die Märkte von morgen, Carl Hanser Verlag München, 2019
[Gra18] S.Gramlich, E.Ionescu, E.Kirchner, K.Schäfer, S.Schork: Vom Material zur Produktinnovation – Eine kritische Betrachtung der Innovationskette, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018

Kap. 2.7

[Hau17] https://www.haufe.de/controlling/controllerpraxis/produktivitaetssteigerung-durch-industrie-40-technologie_112_402804.html abgefragt am 27.5.2020
[Gra18] S.Gramlich, E.Ionescu, E.Kirchner, K.Schäfer, S.Schork: Vom Material zur Produktinnovation – Eine kritische Betrachtung der Innovationskette, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018

Kap. 2.8

[Alb05] A.Albers, N.Burkardt, M.Meboldt, M.Saak: Spalten Probelm solving methodology in the product development, Int.Conf. on Engineering Design ICED05, Melbourne, Aug. 2005, 1-12
[Ash00] M.F.Ashby: Multi-objective optimization in material design and selection, Acta Materialia 48, (1), 2000, 359-369
[Bel03] V.Belton, T.Stewart: Multiple Criteria Decision Analysis, Kluwer Academic Publishers Boston, 2003
[Buc05] B.Buchmayr: Gesenkschmiedetechnik – eine systemanalytische Betrachtung, Tagungsband Sommerschule Teichalm, Hrsg. LS für Umformtechnik der Montanuniversität Leoben, 7-16
[Cav13] C.Cavallini, A.Giorgetti, P.Citti, F.Nicolaie: Integral aided method for material selection based on quality function deployment and comprehensive VIKOR algorithm, Materials and Design 47, 2013, 27-34
[Cha07] V.Chankong, Y.Y.Haimes: Multiobjective decision making – theory and methodology, Dover, 2007
[Dae97] W.F.Dänzer, F.Huber (Hrsg.): Systems Engineering – Methodik und Praxis, Industrielle Organisation, Zürich 1997
[Ehr09] K.Ehrlenspiel: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 4. Aufl. Carl Hanser Verlag, München 2009
[Gru13] R.Grünig, R.Kühn: Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme, Springer Gabler, 4.Aufl., 2013
[Hab12] R.Haberfellner, O.de Weck, E.Fricke, S.Vössner: Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung, orell füssli Verlag, Zürich, 12.Aufl., 2012
[Hod16] R.E.Hodgett: Comparison of multi-criteria decision-making methods for equipment selection, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 85, 2016, 1145-1157
[Hua81] C.-L.Hwang, K.Yoon: Multiple Attribute Decision Making – Methods and Applications. A State-of-the-Art Survey. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York, 1981
[Jah10] A.Jahan, M.Y.Ismail, S.M.Sapuan, F.Mustapha: Material screening and choosing methods – a review, Materials and Design 31, 2010, 696-705
[Jah15] A. Jahan, K.L. Edwards: A state-of-the-art survey on the influence of normalization techniques in ranking: Improving the materials selection process in engineering design, Materials and Design 65, 2015, 335-342
[Kas14] A. Kasaei, A.Abedian, A.S.Milani: An application of Quality Function Deployment method in engineering materials selection, Materials and Design 55 (2014) 912–920
[Ker11] K.Kerth, H.Asum, V.Stich: Die besten Strategietools in der Praxis, Hanser Verlag, 5.Aufl., 2011
[Kle99] B.Klein: QFD – Quality Function Deployment – Konzept, Anwendung und Umsetzung für Produkte und Dienstleistungen, expert verlag, 1999
[Kle18] B.Klein: Wertanalyse-Praxis für Konstrukteure: Ein effizientes Werkzeug für die Produktentwicklung, 2.Aufl., expert Verlag, 2018

[Kue14] J.B.Kühnapfel: Nutzwertanalyse in Marketing und Vertrieb, Springer Gabler essentials, 2014
[Kum14] R.Kumar et.al.: Selection of material for optimal design using multi-criteria decision making, Proc. Mat. Science 6, 2014, 590-596
[Lin05] U.Lindemann: Methodische Entwicklung technischer Produkte, Springer Verlag, 2005
[Loh11] M.Lohmann, S.Meindl: Wertanalyse im Anlagenbau, Tagungsband, Wertanalyse Praxis 2011, 11. Praxisorientierter Anwendertag zur Wertanalyse, Düsseldorf 2011
[Luf,9 T.Luft, J.Le Cardinal, S.Wartzack: Methoden der Entscheidungsfindung, Kap.24 in Handbuch Produktentwicklung, Hrsg. U.Lindemann, Hanser Verlag, 2016, 759-805
[Man19] M.Manoj, T.Joji: Interval valued multi criteria decision making methods for the selection of flexible manufacturing system, Int. J. of Data and Network Science 3, 2019, 349-358
[May11] A.Mayyas et.al.: Using Quality Function Deployment and Analytical Hierarchy Process for material selection of Body-In-White, Materials and Design 32, 2011, 2771-2782
[Mou17] S.H. Mousavi-Nasab, A. Sotoudeh-Anvari: A comprehensive MCDM-based approach using TOPSIS, COPRAS and DEA as an auxiliary tool for material selection problems, Materials and Design 121, 2017, 237-253
[Nae19] P.Naefe: Konstruktionsmethodik – kurz und bündig, Springer Vieweg, essentials, Wiesbaden, 2019
[Pek18] I.Peko, N.Gjeldum, B.Bilic: Application of AHP, Fuzzy AHP and PROMETHEE Method in Solving Additive Manufacturing Process Selection Problem, Tehnički vjesnik 25, 2, 2018, 453-461 https://doi.org/10.17559/TV-20170124092906
[Pra13] K.Prasad, S. Chakraborty: A quality function deployment-based model for materials selection, Materials and Design 49, 2013, 525-535
[Rus19] F.Rustler: Denkwerkzeuge, Midas Management Verlag, Zürich, 2019
[Saa90] T.L.Saaty: Multicriteria decision making - the analytic hierarchy process. Planning, priority setting, resource allocation. 2. Auflage. RWS Publishing, Pittsburgh 1990, ISBN 0- 9620317-2-0
[Saa11] J.Saatweber: QFD und Innovationen – Kundenorientierung durch Quality Function Deployment, 3.Aufl., symposion, Düsseldorf, 2011
[Saa12] T.L.Saaty, L.G.Vargas: Models, methods, concepts and applications of the analytic hierarchy process, Springer, New York, USA, 2012, https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6
[The13] P.Theden, H.Colsman: Qualitätstechniken, Hanser Pocket Power, 5.Aufl., 2013
[Urn19] C.Urnauer, J.Metternich: Die digitale Wertstrommethode, ZWF 114, 12, 2019, 855-858
[VDI93] VDI-Richtlinie 2221 Mai 1993. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.
[Yur04] M.Yurdakul: AHP as a strategic decision-making tool to justify machine tool selection, J. Mat. Proc. Technology 146, 2004, 365-376
[Zim91] H.J.Zimmermann, L.Gutsche: Multi-Criteria Analyse, Springer Berlin, 1991

Kap. 2.9

[Bac19] H.Backerra, C.Malorny, W.Schwarz: Kreativitätstechniken - Kreative Prozesse anstoßen, Innovationen fördern, 4.Aufl., Hanser Verlag, Pocket Power, 2019
[Bal05] R.Ball, D.Tunger: Bibliometrische Analysen – Daten, Fakten und Methoden, Hrsg. Forschungszentrum Jülich, Band 12, 2005
[Eve09] W.Eversheim: Innovation Management for Technical Products, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009
[Fro02] D.Fröhlich, E.Schiebel, M.Noll: Wissenslandkarten – Ein Ausweg aus dem Chaos? in: Wissensmanagement M.Borneman, M.Sammer (Hrsg.), 2002
[Gau01] J.Gausemeier, P.Ebbesmeyer, F.Kallmeyer: Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen, Carl Hanser Verlag, München, 2001
[Gau19] J.Gausemeier, R.Dumitrescu, J.Echterfeld, T.Pfänder, D.Steffen, F.Thielemann: Innovationen für die Märkte von morgen, Carl Hanser Verlag, München 2019

[Hoe16] M. Hörlesberger: Technology Monitoring for Metalforming, XXXV. Verformungskundl. Kolloquium, Hrsg. MUL/LUT, B. Buchmayr, Zauchensee, 5.3. bs 8.3.2016, S.99ff
[Lic08] E.Lichtenthaler: Methoden der Technologie-Früherkennung, in M.G.Möhrle, R.Isenmann (Hrsg.), Technologie-Roadmapping, Springer Berlin, 2008, 59-84
[Mue09] T.Müller-Prothmann, N.Dörr: Innovationsmanagement – Strategien, Methoden und Werkzeuge für systematische Innovationsprozesse, Carl Hanser Verlag München, 2009
[Noe15] M.Nöllke: Kreativitätstechniken, 7.Auflage, Haufe TaschenGuide, 2015
[Pla09] H.Plattner, C.Meinel, U.Weinberg: Design-Thinking. Innovation lernen – Ideenwelten öffnen. mi-Wirtschaftsbuch – FinanzBuch Verlag, München 2009, ISBN 978-3-86880-013-5.
[Sch11] J.Schumpeter: Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung, Duncker&Humblot, Berlin, Nachdruck, Erstauflage, 1911
[Sch12] G.Schuh (Hrsg.): Innovationsmanagement – Handbuch Produktion und Management 3, 2.Aufl., Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg2012
[Spa10] D.Spath, S.Schimpf, C. Lang-Koetz: Technologiemonitoring – Technologien identifizieren, beobachten und bewerten, Fraunhofer IAO, Stuttgart, 2010

Kap. 2.10

[Adl11]] F. Adler et.al.: Die Qual der Wiki-Wahl – Wikis für Wissensmanagement in Organisationen, Bericht Pumacy Technologies (www.pumacy.de), 2011.
[Bin10] H.Binz, D.Roth, A.Laukemann: 4 Wissensmanagement, in: U.Lindemann, Handbuch Produktentwicklung, Carl Hanser Verlag, München, 2016, 247-274
[Ebe05] A.Ebersbach, M.Glaser, R.Heigl: Wiki-Tools, Springer Verlag, 2005
[Gro14] N.Gronau, P.Heinze (Hrsg.): Handbuch prozessorientiertes Wissensmanagement: Methoden und Praxis, Gito Verlag, 2014
[Leh14] F.Lehner: Wissensmanagement – Grundlagen, Methoden und technische Unterstützung, Carl Hanser Verlag, München, 5.Aufl., 2014
[Mil09] F.S.Miller, T.Pfeiffer: Wie man ein Wiki zum Leben erweckt, in: Wissensmanagement. Das Magazin für Führungskräfte, H.1, 2009.
[Pro06] G. Probst, St. Raub, K. Romhardt: Wissen managen - Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource nutzen. Gabler, 2006
[Teu07] T.Teufer: Wissensmanagement und das Wiki-Konzept, Diplomarbeit WU Wien, 2007

3 Gesamtsystem aus Design, Werkstoff und Fertigungsverfahren

Zusammenfassung: Die vielfältigen Bauteilanforderungen erfordern eine gesamtheitliche Betrachtung der Systemelemente von Design/Auslegung, Werkstofftechnik und Fertigungstechnologie unter Berücksichtigung von ökonomischen und ökologischen Erfordernissen. Bei dieser Betrachtung erkennt man einige sehr wesentliche Wechselwirkungen, bspw. zwischen Auslegung und Werkstoffauswahl, zwischen Werkstoffeigenschaften und Fertigungstechnologie und zwischen Design und Fertigung. Es wird auch für einige wichtige Technologien gezeigt, wie sich die Fertigungsart auf die finalen Werkstoffeigenschaften auswirkt.

3.1 Von den Bauteilanforderungen zum Produkt

In jedem maschinenbaulich tätigen Unternehmen übernimmt neben dem Geschäftsführer insbesondere der für die Auslegung und Fertigung verantwortliche Ingenieur die Hauptverantwortung für den langfristigen Erfolg des Unternehmens. Er zeichnet verantwortlich für die wirtschaftliche Fertigung und für die Erfüllung der Kundenwünsche nach dem Prinzip „*So gut wie nötig und nicht so gut wie möglich*“. Ein Diagramm, das die wesentlichen Elemente bei erfolgreichen Produktentwicklungen skizziert zeigt Abb. 34. Der Konstrukteur entscheidet den Gebrauchswert eines Produktes, über Design und Dimensionierung, Werkstoffauswahl, Festlegung der Fertigungsmethode und damit auch ca. 70 bis 80% der Bauteilkosten. Aufgrund dieser besonderen Bedeutung des Konstrukteurs erscheint es sinnvoll, die Entscheidungskriterien für die zuvor genannten Aktivitäten bestmöglich aufzubereiten und die wesentlichen Aspekte zu beleuchten.

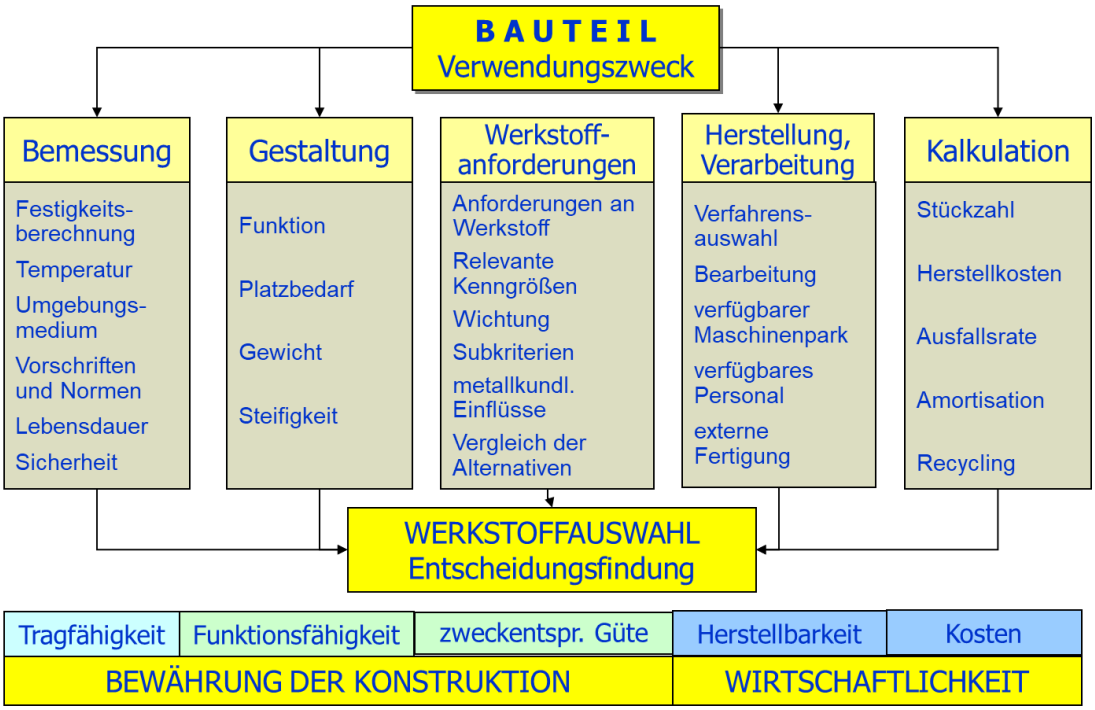


Abb. 34: Basisaktivitäten im Zuge der Herstellung eines Bauteils

Die Hauptelemente der Produktentwicklung umfassen die Konstruktion inkl. Auslegung, die Werkstoffauswahl, die Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens bzw. einer Fertigungsfolge und die daraus resultierenden Herstellkosten. Diese Systemelemente weisen einige Wechselwirkungen auf, die in Abb. 35 dargestellt sind. Dazu gehören insbesondere die belastungsabhängige Auswahl

geeigneter Werkstoffe, die fertigungsgerechte Konstruktion, die Auswahl einer wirtschaftlich optimierten Fertigungsart, die Beeinflussung des Werkstoffverhaltens durch den Fertigungsprozess und auch die Eignung der Werkstoffe für bestimmte Fertigungsverfahren.

Abb. 35: Die Säulen der Produktentwicklung und wichtige Wechselwirkungen

Seitens der industriellen Praxis stehen sicherlich die Gebrauchseigenschaften, die Kosten, die Lebensdauer und die Verarbeitbarkeit im Vordergrund des Interesses, wobei sich die Werkstoffeigenschaften entsprechend Abb. 36 kategorisieren lassen.
Die Festlegung welche Werkstoffeigenschaft bestimmend für das Gebrauchs- und Verarbeitungsverhalten ist, erfordert bereits einiger Erfahrung und systemanalytisches Vorgehen, wozu im nächsten Abschnitt einige unterstützende Auswahlhilfen und Methoden behandelt werden.
Während es für die Auswahl von Werkstoffen bereits recht gute geeignete Werkstoffdatenbanken und auch Auswahlsysteme gibt, ist es bei der Auswahl geeigneter Fertigungsprozesse bzw. Prozessketten wesentlich schwieriger. Auch die Beurteilung der Machbarkeit und der Fertigungskosten im Zeitpunkt der Planungsphase bereitet meist einige Schwierigkeiten.
Nicht unwesentlich ist auch die Tatsache, dass durch das Wechselspiel zwischen Design, Werkstoff und Fertigung auch das Versagensverhalten stark beeinflusst wird, wie in [Jam05] an einigen Beispiel dargestellt wird.

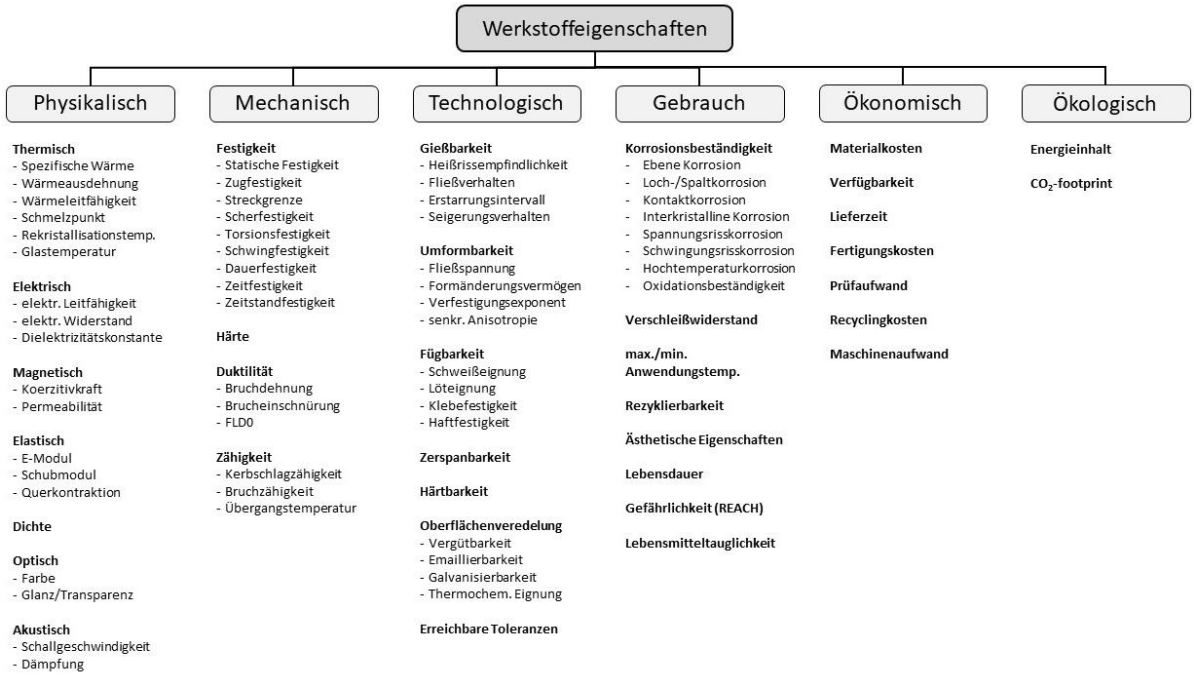


Abb. 36: Klassifizierung der Werkstoffeigenschaften

3.2 Erstellung von Anforderungsprofilen (Pflichten- und Lastenheft)

Nach Abklärung der Kundenanforderungen, Analyse des Marktes und des Wettbewerbs, sowie der Patentsituation werden die Anforderungen an ein Produkt im sog. Lastenheft vom Auftraggeber festgehalten. Darin wird die Funktion, die Produktanforderungen (was er entwickelt und produziert haben möchte) und andere Dinge der Abwicklung (Gesprächspartner, Termine etc.) zusammengestellt. Über die Lieferantenauswahl werden verlässliche, kompetente Partner ausgewählt und für ein Angebot eingeladen. Der Auftragnehmer übermittelt sodann ein Pflichtenheft, in dem er aufzeigt, wie und womit er die gewünschten Anforderungen konkret erfüllen möchte. Erst wenn der Auftraggeber das Pflichtenheft akzeptiert, sollte die eigentliche Arbeit beim Auftragnehmer beginnen. Möglicherweise werden noch Null- und Vorserien verlangt, bevor es zum Serienanlauf kommt.
Die Vorgehensweise bei der Erstellung von Lasten- und Pflichtenheften ist in VDI 2519 Blatt 1 im Detail festgehalten. Für Automatisierungssysteme gilt VDI/VDE 3694.
Im Automobilbau sind die Anforderungen je nach Bauteil sehr unterschiedlich. Übergeordnete Aspekte betreffen die statische und dynamische Steifigkeit, die passive Sicherheit, die Lebensdauer bei dynamischer Wechselbelastung, den Leichtbau und das Akustikverhalten. Die Anforderungen sind vielfältig und ergeben sich aus der Funktionalität des Fahrzeugts und der Proesskette vom Presswerk bis zur Lackierung mit den Verarbeitungstechnologien Umformen, Fügen und Oberflächenbehandlung [Lue05]. Diese Komplexität der Anforderungen muss bei der Auswahl von Blechwerkstoffen detailliert beachtet werden. Dies erklärt auch das Faktum der Vielfalt an Karosseriewerkstoffen mit Streckgrenzen von 200 bis 1200 MPa, d.h. von AlSiMg-Blechen bis zu pressgehärteten hochfesten Stahlblechen.

3.3 Gegenseitige Beziehungen zwischen Design und Werkstoff

Wie im Bild 3.1.2 dargestellt, wählt der Konstrukteur entsprechend den Beanspruchungen einen geeigneten Werkstoff oder ein Werkstoffsystem. Dazu stehen ihm Erfahrungswerte, Datenbanken, Auswahlsysteme oder Werkstofffachleute zur Verfügung, siehe Kapitel 4. Zusätzlich ist dabei darauf zu achten, dass der Werkstoff auch für eine angedachte Fertigungsart geeignet sein muss. Anwendungsspezifische Normen sind ebenso zu berücksichtigen, wie der Umstand, dass sich durch die Verarbeitung die Werkstoffeigenschaften verändern und nicht mehr den spezifizierten Werten entsprechen. Man spricht von Gebrauchseigenschaften, die auch für die Auslegung entscheidend sein können. Auf die Bedeutung der integrativen Vorgangsweise bei der Werkstoffauswahl wurde auch in [Lju03] hingewiesen. Eigenspannungseinflüsse oder evtl. vorhandene Porosität müssen zusätzlich in die Betrachtung einfließen.

3.4 Interaktionen zwischen Design und Fertigungsverfahren

Je nach Bauteilform, Stückzahl, Toleranzvorgaben, Produktivität u.a.m. wählt der Konstrukteur ein geeignetes Fertigungsverfahren oder eine Abfolge von Prozessschritten. Die für die Verfahrensauswahl entscheidenden Kriterien werden im Kap. 5 ausführlich behandelt. Zum Zeitpunkt des Designs ist es auch essenziell, die Machbarkeit eines Bauteils zu überprüfen. Dazu werden spezielle numerische Simulationsprogramme verwendet (s. Kap. 8.4). Ist das primäre Fertigungsverfahren festgelegt, so muss in einem nächsten Schritt eventuell das Design nochmals nach den Gesichtspunkten des fertigungsgerechten Designs (Kap.4.3) verändert werden. Weitere Erläuterungen zum Wechselspiel zwischen Design und Fertigungstechnik finden sich in [Tem14].

3.5 Wechselwirkungen zwischen Werkstoff und Fertigung

3.5.1 Einflüsse der Werkstoffe auf die Fertigung

Ist ein Werkstofftyp festgelegt, so sind damit auch schon Vorentscheidungen für die Auswahl möglicher Fertigungsverfahren getroffen. Werkstoffhauptgruppen sind speziellen Verarbeitungsmöglichkeiten zugeordnet. Dies ist dadurch begründet, dass die für das Verfahren notwendige Eigenschaftsprofil zweckentsprechend ausgerichtet ist.
Als Beispiel sei die Rohrfertigung erwähnt: Soll ein Rohr aus einer Al-Legierung gefertigt werden, so würde dies am besten mit dem Strangpressen verwirklichbar sein. Demgegenüber würde ein Stahlrohr eher durch den Prozess der Walzprofilierung kostengünstig in mehreren Biegeumformschritten hergestellt werden können. Al-Legierungen könnten jedoch nur schwierig mit dem Walzprofilieren hergestellt werden, da die Bruchdehnung deutlich geringer ist als bei Baustählen. Es wäre auch unüblich, wenn man Stahlrohre durch Extrusion herstellen würde, weil dazu eine Erwärmung auf ca. 900 bis 1000°C notwendig wäre, was jedoch extreme Herausforderungen für die Strangpresswerkzeuge bedeuten würde.
Über die Verarbeitungseigenschaften (Gießbarkeit, Umformvermögen, Schweißeignung etc.) besteht auch ein enger Zusammenhang zwischen dem Fertigungsverfahren und einem „gut verarbeitbaren Werkstoff“, siehe Tabelle 9, wobei eine eindeutige, quantitative Beurteilung der Verarbeitungseigenschaften nicht immer möglich ist. Die Unterscheidung zwischen Guss- und Knetwerkstoffen oder die Entwicklung metallischer Werkstoffe für einen bestimmten, vorgegebenen Fertigungsprozess, wie Stähle zum Kaltfließpressen, Nitrierstähle, Automatenstähle, Tiefziehstähle,

AFP-Schmiedestähle u.v.a.m., sind typisch für das Wechselspiel zwischen der Werkstoffentwicklung und der Fertigungstechnik.
Eine umfangreichere Beschreibung über die Verarbeitungseigenschaften von Werkstoffen wird im Kapitel 5.5 gegeben.

Fertigungsverfahren	**Prozessbeispiel**	**Anforderungen an Verarbeitungseigen-schaften**	**Kennzahl/ Prüfung/ Einflussfaktoren**
Spanende Fertigung	Drehen, Fräsen, Bohren Schleifen	Zerspanbarkeit, Oberflächengüte, Kosten	Taylor-Gerade Spanform Spanbrechung
Blechbearbeitung	Stanzen, Bördeln, Falzen, Biegen	Stanzbarkeit Bruchdehnung	High Speed Stanzen Weichglühen
Kaltumformung	Tiefziehen Fließpressen	Grenzformänderung Umformbarkeit	FLD-Diagramm Brucheinschnürung
Warmumformung	Gesenkschmieden Strangpressen	Schmiedbarkeit Extrudierbarkeit	Fließspannung Brucheinschnürung
Fügen	Schutzgasschweißen	Schweißeignung	Kohlenstoffäquivalent
Wärmebehandlung	Vergüten Einsatz-, Nitrierhärten	Härtbarkeit, Durchhärtung	C-Gehalt, Leg.elemente
Beschichten	Verzinken Emaillieren	Zn-Haftung Emaillierbarkeit	vorher Phosphatieren Si-Gehalt

Tabelle 9: Anforderungen an die Verarbeitungseigenschaften von Werkstoffen bei Vorgabe des Fertigungsverfahrens

Betrachtet man aber die Auswahl von Werkzeugwerkstoffen für die in Tabelle 9 dargestellten Fertigungsverfahren, so ergeben sich andere Anforderungsprofile, siehe Tabelle 10.

Fertigungsverfahren	**Werkzeug**	**Anforderungen**	**Umsetzung**
Spanende Fertigung	Drehmesser Fräser Säge	Verschleißwiderstand Warmfestigkeit Wärmeleitfähigkeit	HM, AlN-Beschichtung
Blechbearbeitung	Tiefziehstempel Stanzstempel	Verschleißbeständigkeit Härte	Oberflächenhärten
Kaltumformung	Pressstempel	Verschleiß, Härte	HM, Oberflächenhärten
Warmumformung	Schmiedegesenk Walze	Warmfestigkeit, Zähigkeit, Oxidationsbest.	CrMoV-legiert

Kunststoffextrusion	Matrize	Verschleißwiderstand	Cr-leg. Vergütungsstähle
Spritzguss	Gussform	Warmfestigkeit, Korr.best.	Cr-leg. Vergütungsstähle
Kokillenguss	Gussform	Warmfestigkeit	Schlichte

Tabelle 10: Anforderung an die Eigenschaften von Werkzeugwerkstoffen bei Vorgabe des Fertigungsverfahrens

3.5.2 Einflüsse der Fertigung auf die Werkstoffeigenschaften

Im Gegenzug besteht aber auch die Möglichkeit die geforderten Werkstoffeigenschaften durch den Verarbeitungsprozess selbst positiv zu beeinflussen. Sehr wichtige Beispiele dazu sind die thermomechanische Behandlung von Feinkornbaustählen und das gezielte Einstellen der Korngrößenverteilung in Turbinenscheiben durch gezielte Ausnützung der statischen, dynamischen und metadynamischen Rekristallisation und der Wirkung feinster Ausscheidungen in Verbindung mit der numerischen Simulation dieser Vorgänge [Buc02]

Bei Festlegung eines Fertigungsverfahrens wird je nach Beanspruchung (Temperatur, Umformung etc.) das Gefüge des Werkstoffs verändert, wodurch auch die Gebrauchseigenschaften verändert werden, siehe Abb. 37, was sich dann auf die Auslegung des Bauteils auswirkt. Außerdem können im Zuge der Herstellung bewusst oder ungewollt Eigenspannungen aufgebaut oder umgelagert werden, die ganz wesentlich die Belastbarkeit einer Komponente beeinflussen.

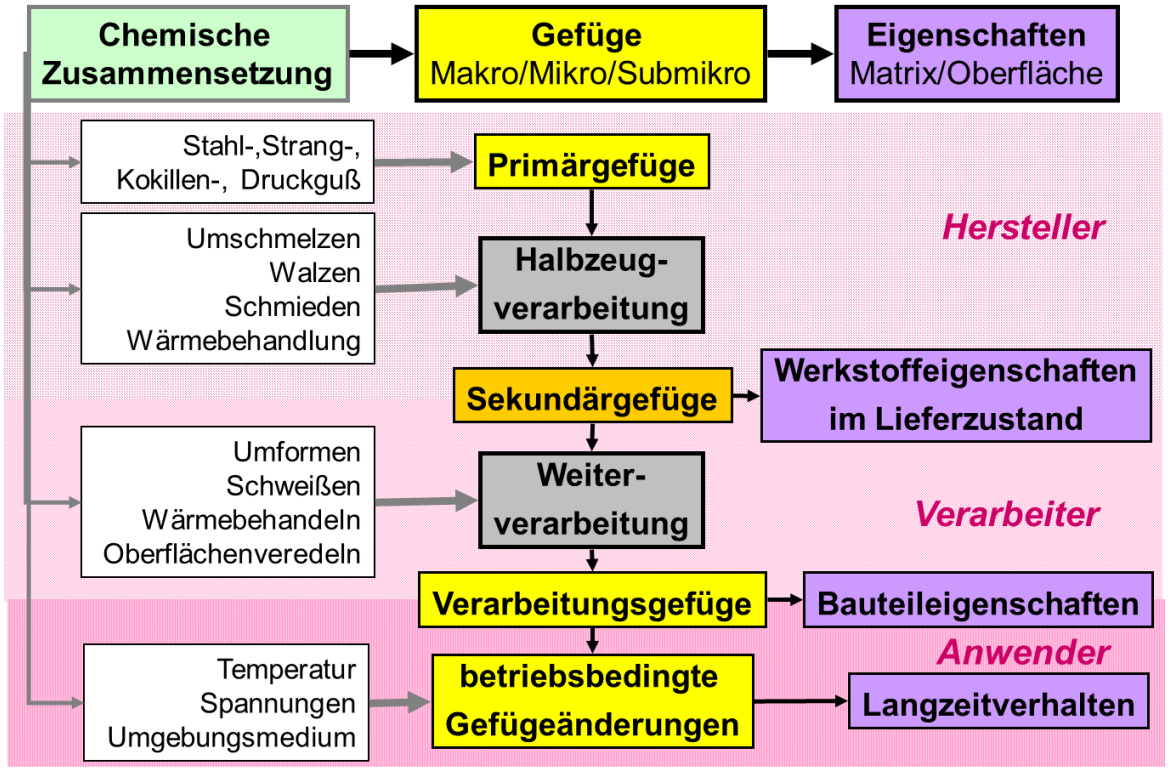


Abb. 37: Gefügeänderungen im Zuge der gesamten Fertigung [Buc02]

Ganz allgemein können durch die Fertigung auch Eigenschaftsverbesserungen einhergehen, wie

- Kornfeinung → Steigerung der Festigkeit und der Zähigkeit
- Reduktion von Poren → höhere Zähigkeit, homogenes Verhalten
- Reduktion der Seigerungen → ESU, bessere Homogenität und Reinheit
- Reduktion von Eigenspannungen → duktileres Bauteilverhalten
- Abbau von Eigenspannungen → geringerer Verzug, geringe Sprödigkeit
- Oberflächenbeschichtung → Erhöhung des Korrosionswiderstandes
- Verbunde → Kombination mehrerer günstiger Eigenschaften
- u.a.m

Es gibt auch Fälle (bspw. beim Sintern oder beim metallischen 3D-Druck), wo sogar eigene Prozesse zur Verbesserung der finalen Eigenschaften herangezogen werden. Ein solches Verfahren ist das Heiß-Isostatische Pressen (HIP), bei dem die innere Porosität von Werkstücken aus Metall oder anderen Materialien abgebaut wird. Mit HIP lassen sich pulverförmige Metall-, Keramik-, Verbund- und Polymerwerkstoffe ohne den Umweg über ein Schmelzverfahren zu einem festen Körper verdichten.
Die resultierenden Vorteile sind:

- Eliminierung von Hohlräumen in gegossenen oder additiv gefertigten Bauteilen
- Verringerte Ausschussrate bei der Inspektion von Gussteilen
- gleichmäßiges Verhalten des Gesamtloses
- Verbesserung der mechanischen Eigenschaften (Ermüdungswiderstand, Duktilität, Schlagfestigkeit) von Gussteilen, dadurch schlankeres Design möglich
- Herstellung fester Körper aus Metall-, Keramik, Polymer- oder Verbundwerkstoffen ohne Umweg über Schmelzverfahren
- Pulvermetallurgische Herstellung von Werkstücken mit einzigartigen Eigenschaften und einer feinen, homogenen Korngröße und isotropischen Struktur
- Pulvermetallurgische Kombination von Werkstoffen mit speziellen Eigenschaften, die auf konventionelle Weise nicht hergestellt werden könnten
- Pulvermetallurgische Herstellung von kompliziert geformten Werkstücken
- Verbesserung von Zähigkeit, Ermüdungswiderstand und Festigkeit bei MIM-Teilen
- Fügen unterschiedlicher Metalle für hochtemperaturfeste Anwendungen

Am Beispiel der Fertigung hochfester Getriebeteile aus dem Einsatzstahl 18CrNiMo7-6 soll auch einmal gezeigt werden, wie vielfältig die Fertigungsschritte auf das finale Bauteilverhalten Einfluss nehmen. Ein optimales Betriebsverhalten ist nur dann zu erwarten, wenn auch die relevanten Parameter in jedem Schritt kontrolliert werden, d.h. für die Fertigungsfolge eines Hochleistungszahnrades sind die folgenden Punkte zu beachten:

- Erschmelzung (Reinheit, Gehalt an P, S, NME, H-Gehalt)
- Warmformung (mehrmalige Umkörnung und Kornfeinung, Homogenität)
- Gefügeeinstellung (möglichst feinkörnig → Vergüten)
- Oberflächenvergütung (Einsatzhärten→ höhere Härte, Druckeigenspannung an
- der Oberfläche von Zahnflanken)
- Mechanisches Einbringen von Druckeigenspannungen (Rollen, Kugelstrahlen), siehe [Reg18]
- Aufwändige zfP zur Sicherstellung der Qualitätsanforderungen

Hervorzuheben sind die Gefügeveränderungen in der sog. Wärmeeinflusszone beim Schweißen von Baustählen oder die Absenkung der Duktilität durch erhöhte plastische Verformung im Zuge einer Kaltumformung.
Je nach Fertigungsverfahren sind deshalb auch qualitätssichernde Maßnahmen bzw. spezielle Prüfmethoden und -umfänge erforderlich.
Für dynamisch wechselbelastete Bauteile und deren Lebensdauer sind auch noch jene Verarbeitungstechnologien von Bedeutung, die im Bauteil oberflächlich Druckeigenspannungen generieren, wie z.B. Einsatzhärten, Kugelstrahlen, Laserhärten u.a.m.

3.5.2.1 Einfluss der Kaltumformung auf das Werkstoffverhalten

Durch das Umformen kann nicht nur die geometrische Form, sondern auch das Gefüge und damit die mechanischen Eigenschaften eines Bauteils gezielt verändert werden. Durch eine Kaltverformung kann die statische Festigkeit aber auch die Dauerfestigkeit erhöht werden, während durch eine Warmumformung infolge mehrmaliger Rekristallisation ein feinkörniges Gefüge mit einer besseren Kombination von Festigkeit und Zähigkeit erreicht werden kann. Ein typisches Beispiel ist das thermo-mechanische Walzen von mikrolegierten Feinkornbaustählen, das zu einer Verbesserung der Festigkeit und der Zähigkeit ermöglicht.

3.5.2.2 Einfluss des Schweißens auf das Werkstoffverhalten

Infolge der thermischen Einwirkung kommt es in der Wärmeeinflusszone in Abhängigkeit vom Abstand von der Schmelzlinie und der Streckenenergie zu unterschiedlichen Ausbildungen der Mikrostruktur. Die Spitzentemperatur und die Abkühlzeit zwischen 800 und 500°C sind dabei die wesentlichen Kenngrößen. Bild 3.5.2.2.1 zeigt den Einfluss der Abkühlzeit auf die Härterissneigung und auf die Verschiebung der Übergangstemperatur im Kerbschlagzähigkeitsverhalten.

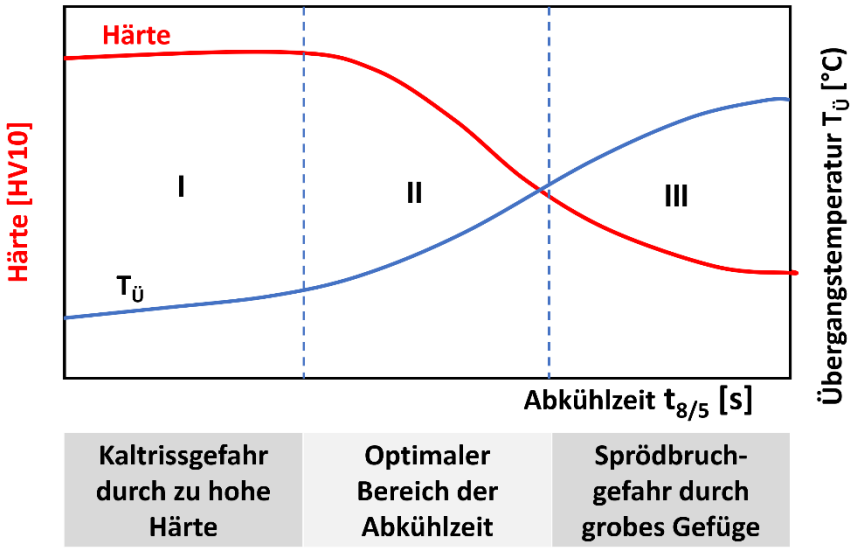


Bild 3.5.2.2.1. Einfluss der Abkühlzeit $t_{8/5}$ auf das mechanische Verhalten von Schweißverbindungen aus einem Baustahl

3.5.2.3 Einfluss lokaler Wärmebehandlungen

Bei lokalen Wärmebehandlungen, wie bspw. durch Laserhärten, Induktionshärten u.a.m. wird in einem begrenzten Volumenbereich vergütbare Stahlgüten kurzzeitig austenitisiert und dann erfolgt eine rasche Abkühlung, die zur Martensitbildung führt. Damit verbunden ist eine höhere Härte und Druckeigenspannungen werden induziert, was insgesamt zu einer erhöhten Dauerfestigkeit führt.

3.6 Einflüsse der Fertigung auf das Betriebsverhalten

Im vorigen Kapitel wurde gezeigt, wie sich unterschiedliche Fertigungstechnologien auf die Gefügeausbildung und damit auf das mechanisch-technologische Eigenschaftsprofil auswirken. Damit ergeben sich auch messbare Einflüsse auf das Betriebsverhalten, sowohl im positiven, aber auch im negativen Sinn. Ein paar Beispiele sind in Tabelle 3.6.1 angeführt.
Zahlreiche Beispiele für den Bereich der Leichtbau-Fahrzeuge finden sich in [Mal10].

Positive Beeinflussung des Betriebsverhaltens	
Kornfeinung beim Schmieden	Höhere Festigkeit und Zähigkeit
Kalthämmern von metallischen Komponenten	Höhere Dauerfestigkeit durch Druckeigenspannungen
Einsatzhärten oder Nitrieren	Höhere Dauerfestigkeit durch Druckeigenspannungen
Kristallisation durch Verstrecken von Polymer	Modul, Dichte, Abrasionswiderstand nehmen zu
Negative Beeinflussung des Betriebsverhaltens	
Gussporen nahe der Oberfläche	Reduktion der Dauerfestigkeit
Seigerungsbereiche/Hot-Spots beim Gießen	Reduktion der Bruchzähigkeit
Artverschiedene metallische Verbindungen	Lokaler Korrosionsangriff an der Grenzfläche
Sauerstoffaufnahme beim Ti-Schweißen	Stark reduziertes Umformverhalten

Tabelle 3.6.1: Fertigungseinflüsse auf das Betriebsverhalten, li: technologische Maßnahme, re: Auswirkungen auf das Betriebsverhalten

3.7 Einflüsse auf die Wirtschaftlichkeit

Die drei Faktoren Design, Werkstoff und Fertigungsverfahren beeinflussen ganz wesentlich auch die Herstellkosten [Wie88]. Eigentlich müsste das Dreieck Design-Werkstoff-Fertigungsprozess durch einen Tetraeder mit dem Eckpunkt Herstellkosten ersetzt werden.
Geht man davon aus, dass der Anteil der Materialkosten und jener der Fertigungskosten inkl. Personalkosten und Maschinenkosten den Großteil der Gesamtherstellkosten ausmachen, so wird sofort ersichtlich, dass für die Fertigung kostengünstiger Komponenten das optimierte Zusammenspiel aller drei Grundfaktoren (Design, Werkstoff und Fertigung) für die Wirtschaftlichkeit und damit für die Wettbewerbsfähigkeit entscheidend sind. Zur Kostenabschätzung gibt es einige gute Ansätze [Wan03]. Weitere Details sind im Kapitel 6 dargestellt.

3.8 Ökologische Einflüsse

Umweltschutz, Ressourcenschonung, Kreislaufwirtschaft und andere ökologische Wertigkeiten haben in der Gesellschaft Gehör gefunden und sind für das Design (ECO-Design), für die Werkstoffauswahl und auch für die Auswahl der Fertigungsverfahren relevant. An der TU Wien hat sich dazu eine Forschungsgruppe ECODESIGN, siehe www.ecodesign.at, formiert
Die Basis für eine Ökobilanzierung bilden die DIN EN ISO 14040 [DIN09]. Diese Ökobilanzierung betrachtet Massen- und Energiebilanzen von Produkten und Prozessen in definierten Systemgrenzen.

Eine Ökobilanz berücksichtigt den gesamten Lebenszyklus eines Produktes – von der Rohstoffherstellung über die Produktfertigung und -nutzung bis hin zu seiner Entsorgung. Die Ökobilanzierung von Fertigungsverfahren wird in [Sch17] behandelt. Bezüglich des Abfallmanagements wird in erster Linie die Vermeidung, Minimierung, dann die Wiederverwendung und die Rezyklierung gesehen. Die thermische Entsorgung und die Deponie stehen am Ende dieser Reihung.
Das Prinzip „from cradle to cradle" – von der Wiege bis zur Wiege – geht von der Idee aus, dass Abfälle Wertstoffe sind und daher wiederverwertet werden sollen. Als Strategie für einen ökologischen Kreislauf werden die sieben goldenen Regeln (engl. 7Rules) des Cradle-to-Cradle gesehen [nach Sko18]:

- Reduzierung (reduction),
- Wiedergewinnung (recovering),
- Wiederverwendung (reusing),
- Erneuerung (renovation),
- Wieder- und Weiterverwertung (recycling),
- Regulierung (regulation),
- Umdenken (rethinking).

Für die Werkstoffauswahl sind daher jene Werkstoffe nachhaltig, die bzgl. der Ökobilanzierung vorne sind und einen hohe Rezyklierquote aufweisen. Dazu zählen die Stähle, Al- und Cu-Legierungen, wenn sie sortenrein gesammelt werden, sowie Weiß- und Buntglas. Die geringe Rezyklierquote für Kunststoffe von ca.12% ist verbesserungsfähig. Fast alle Kunststoffe können thermisch verwertet werden, wobei 20–60% der bei der Herstellung hineingesteckten Energie zurückgewonnen werden können.

3.9 Trends in der Fertigungstechnik (die Plattform „Manufuture")

Die EU-weite Plattform „Manufuture" wurde unter Führung von Prof.E.Westkämper, ehemals Leiter des Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik in Stuttgart, sowie zahlreichen Entscheidungsträgern aus der Industrie gegründet. Ziel dieser Arbeitsgruppe ist es, den Bereich der Fertigungstechnik zu stärken und F&E-Aktivitäten und die Ausbildung in allen Teilgebieten mit EU-Unterstützung zu fördern. Ein Statusbericht wurde mit der Vision 2030 publiziert [Man18]. Themen der letzten Jahre waren unter anderem:

- Verkürzung der Prozesskette
- Verlängerung der Wertschöpfungskette
- Erhöhung der Produktqualität
- Flexibilisierung der Produktion
    - Trend zu kleineren Chargen und selbstlernende Produktionsprozesse
    - Weiter zunehmender Einsatz von IT
- Stärkere Verknüpfung der Prozesse, Prozessintegration, auch betriebsübergreifend
    - Durchgängige Fertigungsprozesse durchgeschlossene Regelkreise und Prozessintegration
    - Komplexe, werksübergreifende Steuerung, Führung und Überwachung der gesamte Herstellungskette von Stahl

Die TOP-Themen von Manufuture-D sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

1.) Intelligente Produkte	Realisierung von selbstoptimierten Systemen, Integration von Diagnosesystemen, Verbesserte Mensch-Maschinen-Schnitt-stelle
2.) High Performance	Neue Bearbeitungsverfahren, Wirtschaftliche Hochleistungsmaschinen, Höhere Prozesszuverlässigkeit

3.) Energieeffizienz	Wirkgradsteigerung und Energierückgewinnung, Neue Erzeugungstechnologien und energieautarke Systeme
4.) Produktkonzeption und -konfiguration	Spezifische Produkte, Plagiatsschutz, Modulare, konfigurierbare Systeme
5.) Adaptive Produktion	Adaptierbare Maschinen und Anlagen, Adaptive Prozesse und selbstadaptierende Systeme, Echtzeitfähige Systeme, Standardisierung (der Schnittstellen)
6.) Verbrauch von Betriebs- und Gefahrstoffen	Reduktion von Betriebs- und Gefahrstoffen, Substitution/Recycling, Emissionsreduktion
7.) Digitale Produktentwicklung und Konstruktion	Durchgängigkeit/Standardisierung/Interoperabilität, Neue Anwendungen
8.) Werkstoffeffizienz	Neue Fertigungsverfahren für neue/bekannte Werkstoffe, Neue Oberflächen- und Fertigungsverfahren zur Oberflächenveredlung
9.) Maximierung der Wertschöpfung über den Lebenszyklus	Neue technische Systeme und Konzepte für Dienstleistungen, Life-Cycle-Kostenmodelle
10.) Innovationstransfer zum Markt	Neue Konzepte zur Verbesserung des Innovationstransfers

Tabelle 11: Top-Themen von Manufuture-D (Quelle: Gemeinsame Strategien für die Produktionsforschung, VDI-Nachrichten, Berlin, 21.9.07, ciu bzw. Fraunhofer IPA, Stuttgart)

3.10 Qualitätsmanagement

Das Qualitätsmanagement strebt die Optimierung von Geschäftsprozessen und Arbeitsabläufen und die Sicherstellung der Qualitätsmerkmale von Erzeugnissen an. Zu den wesentlichen QM-Zielen gehören die Kundenzufriedenheit, die Motivation der Mitarbeiter, Standardisierung von Abläufen, weniger Ausschuss, weniger Nacharbeit und damit insgesamt eine höhere Prozess- und Produktqualität [Kam05]. Dieses Unterkapitel wurde auch deshalb aufgenommen, weil damit unterstrichen werden soll, dass ein qualitativ hochwertiges Arbeiten in den Bereichen Produkt- und Prozessplanung, inkl. Werkstoff- und Technologieauswahl, sowie Fertigung die Wettbewerbsfähigkeit garantieren. Der Wert der Qualität muss in den Köpfen der Mitarbeiter existieren und nicht, wie noch vielfach praktiziert, ein Teil der abschließenden Produktprüfung. Das Qualitätsbewusstsein lässt sich insbesondere durch Schulungen und das Lernen von QM-Methoden steigern.
Werden diese Ziele in allen Bereichen des Unternehmens angewandt, so spricht man vom „Total Quality Management (TQM)“. Im Vergleich zur einfachen Qualitätssicherung wird beim TQM vor allem folgende Punkte verfolgt [Her99]:

- Die Mitarbeiter tragen selbstverantwortlich zur Qualitätssicherung bei.
- QM beginnt schon bei der Produkt- bzw. Prozessplanung und nicht erst am Ende des Produktionsprozesses.
- Zur Qualität zählen auch Wertschöpfungsprozesses, Arbeitsbedingungen und Umwelt.
- QM soll zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit beitragen.

Die Methoden im Qualitätsmanagement sind größtenteils bereits im Kapitel 2 behandelt worden und umfassen den gesamten Lebenszyklus, siehe Abb. 38.

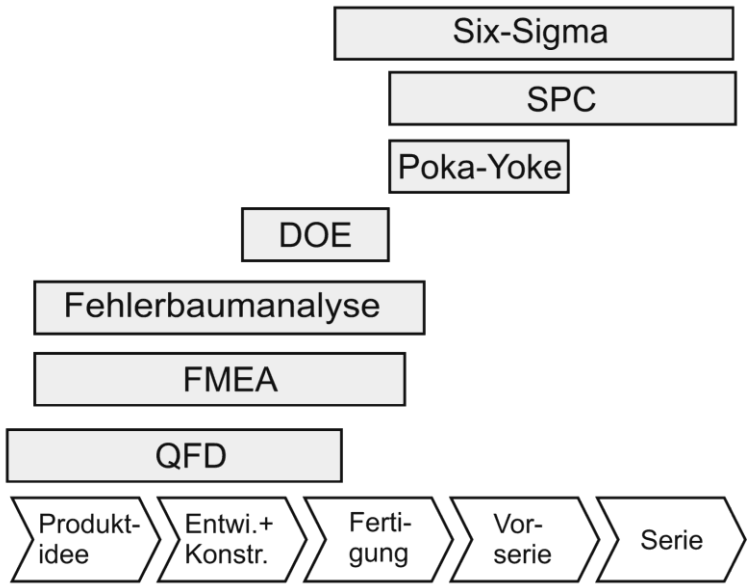


Abb. 38: Methoden in der Qualitätssicherung nach [Her99]

Für die Umsetzung der QM-Ziele ist die Führungsebene verantwortlich. Eine gute, nachhaltige und qualitätsbewusste Unternehmenskultur bildet die Basis für eine erfolgreiche Zusammenarbeit und insgesamt für gute Betriebsergebnisse. Als Aufsichtsrat in mehreren Unternehmen in der produzierenden Industrie konnte ich über die letzten zehn Jahre sehr eindeutig den Zusammenhang zwischen einer guten Unternehmenskultur und dem damit verbundenen Unternehmenserfolg beobachten.
Weiterführende Literaturquellen sind [Bru20, Her11, Jak19, Pfe14].

3.11 Literaturangaben zu Kapitel 3

Kap. 3.1
[Buc08] B. Buchmayr: „Über das Wechselspiel zwischen Design, Werkstoffeigenschaften und Fertigungstechnik“
10. Werkstofftagung "Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften von Werkstoffen - Heute und Morgen, IWS, TU Graz, 28.3.2008
[Her19] P.Hernandez-Castellano, M.D.Martinez-Rivero, M.D.Marrero-Aleman, L.Suarez-Garcia: Manufacturing Process Selection integrated in the design process: University and Industry, Procedia Manufacturing 41, 2019, 1079-1086
[Jam05] M.N.James: Design, manufacture and materials; their interaction and role in engineering failures, Eng. Failure Analysis 12, 2005, 662-678
[Zam17] U.K.uz Zaman, A.Siadat, M.Rivette, A.A.Baqai, L.Qiao: Integrated product-process design to suggest appropriate manufacturing technology: a review, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 91, 2017, 1409-1430

Kap. 3.2
[Lue05] B.Lüdke, M.Pfestorf: Von den Anforderungen an die Rohkarosserie zu den Anforderungen an den Werkstoff, Materialprüfung 47, 2005, H.11-12, 650-656

Kap. 3.3
[Lju03] L.Y.Ljungberg, K.L.Edwards: Design, materials selection and marketing of sucessful products, Materials and Design 24, 2003, 519-529

Kap. 3.4
[Tem14] E.Tempelman, H.Shercliff, B.Ninaber van Eyben: Manufacturing and Design – understanding the principles of how things are made, Butterworth-Heinemann/Elsevier, Oxford, 2014

Kap. 3.5
[Reg18] R.Rego, C.Löpenhaus, J.Gomes, F.Klocke: Residual stress interaction on gear manufacturing, J. of Mat. Proc. Techn. 252, 2018, 249-258

Kap. 3.6
[Mal10] P.K.Malik (ed.): Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles, CRC Woodhead Publ. Oxford, 2010

Kap. 3.7
[Wie88] L.S.Wierda: Product cost – estimation by the designer, Eng. Costs and Production Economics 13, 1988, 189-198
[Wan03] H.Wang, X.H.Zhou, Y.-Y.Ruan: Research on Injection mould intelligent cost estimation system and key technologies, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 3, 003, 215-222

Kap. 3.8
[DIN09] DIN EN ISO 14040, Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen, Beuth Verlag, 2009
[Sch17] E.Schiefer, S.Eisenträger, I.Steinberg, J.Kutschmann: EcoScreen – Ökobilanzierung von Fertigungsverfahren, ZWF 112, H.11, 2017, 727-730
[Sko18] W. Skolaut (Hrsg.): Maschinenbau, Kap.33, Springer Verlag Deutschland, 2018

Kap. 3.9

[Man18] Manufuture High-Level Group: Manufuture Vision 2030. Competitive, Sustainable and resilient European Manufacturing, Dec. 2018, PRINT ISBN: 978-989-95853-8-6

Kap. 3.10

[Bru20] H.Brüggemann, P.Bremer: Grundlagen Qualitätsmanagement – Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM, Springer Vieweg, Wiesbaden, 3.Auflage 2020
[Her99] E.Hering, J.Triemel, H.-P.Blank: Qualitätsmanagement für Ingenieure, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1999
[Her11] J.Hermann, H.Fritz: Qualitätsmanagement – Lehrbuch für Studium und Praxis, Carl Hanser Verlag, München, 2011
[Jak19] W.Jakoby: Qualitätsmanagement für Ingenieure – Ein praxisnahes Lehrbuch für die Planung und Steuerung von Qualitätsprozessen, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2019
[Kam05] G.F.Kamiske, J.-P.Brauer: Qualitätsmanagement von A bis Z, 5. Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2005.
[Pfe14] T.Pfeifer, R.Schmitt: Masing Handbuch Qualitätsmanagement, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 6.Auflage, 2014

4 Funktions- und fertigungsorientierte Konstruktion

Zusammenfassung: Die übliche Konstruktionsmethodik, die Topologie- und Gestaltsoptimierung, die fertigungsgerechte Konstruktion werden kurz beschrieben. Die Überprüfung der Machbarkeit durch die FEM-Simulation der Fertigungstechnologien Gießen, Umformen und Schweißen liefert bereits in der Designphase wichtige Erkenntnisse, die sehr früh noch konstruktiv berücksichtigt werden können. Eine wichtige Rolle nimmt der Formleichtbau ein, weshalb die Konstruktionsprinzipien und die Sicherstellung der Stabilität bei dünnwandigen Konstruktionen erläutert werden. Ansätze zum Thema Öko-Design und zwingende Vorschriften in den geregelten Bereichen runden die moderne Konstruktionskonzepte ab.

4.1 Produktdesign

Vladimir Hubka (1924-2006) gilt als Pionier der modernen Konstruktionswissenschaften. Er verstand den Konstruktionsprozess als Prozess der Informationsverarbeitung, bei dem die gestellten Anforderungen durch bestimmte Eigenschaften und Wirkungen erfüllt werden. Das allgemeine Vorgehensmodell nach Hubka umfasst bereits die Hauptschritte Aufgabenstellung erarbeiten, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten [Hub80]. Im deutschsprachigen Raum hat sich nach dem Zweiten Weltkrieg die Konstruktionsmethodik nach der VDI-Richtlinie VDI-2221 und VDI-2222 Bl.1 (Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien) weitgehend durchgesetzt. Das Vorgehensmodell nach VDI 2221 umfasst vier Konstruktionsphasen: Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten und ist mit den Unterprozessen in Abb. 39 dargestellt.
Erst Mitte der 80er Jahre wurde von Olsson [Ols81] und seinem Schüler Andreasen [And87] ein neues Modell der Produktentwicklung mit dem Namen „Integrated Product Development IPE“ eingeführt. An der TU München griff Prof. Ehrlenspiel diese Idee auf und führte mit seinem Buch [Ehr13] die IPE-Entwicklungsmethode sehr erfolgreich in der Ingenieurausbildung ein. Aber auch andere Design-orientierte Universitäten nahmen dieses Konzept an [Vaj14]. Die IPE-Methode ist ein ganzheitliches Vorgehensmodell mit zahlreichen Aktivitäten und Methoden unter Berücksichtigung auch der Machbarkeit in der Fertigung und der Auswahl von Werkstoffen. Das in Kap.3 beschriebene Zusammenwirkungen von Design, Material und Fertigung ist auch in [Lju03, Edw03, Hin00, Rae07, Pah07, Kal12, Rie12 Bue19] zu finden.
Die Vielfalt und Schönheit des Designer-Produkte können in [God03, Fie17, Wil19] bewundert werden. Damit ergibt sich auch die Frage „Was macht ein gutes Design aus?“. Dazu 10 Thesen vom Star-Designer Dieter Rams [Ram02]: Gutes Design ist innovativ, macht ein Produkt brauchbar, ist ästhetisch, macht ein Produkt verständlich, ist ehrlich, ist unaufdringlich, ist langlebig, ist konsequent bis ins letzte Detail, ist umweltfreundlich und ist so wenig Design wie möglich.
Industrie- oder Produktdesign unterscheidet zwischen dem Gestalten von Konsumgütern, also Produkte des persönlichen Gebrauchs (Haushaltsgeräte, Fahrzeuge, Möbel, Leuchten, Spielzeug etc.) und dem Gestalten von Investitionsgütern, wie Produktionsmaschinen, Großgeräte, Medizintechnik, Fahrzeugbau u.a.m.
Der Konstrukteur konzentriert sich dabei auf die Funktion des technischen Produkts und gestaltet die Form je nach Art des Produkts. Neben den praktischen Funktionen (Funktionsweise, Ergonomie, Sicherheit, Gebrauchstauglichkeit, Wartbarkeit) werden noch sinnliche Funktionen bzw. Wahrnehmungsfunktionen (Ästhetik, Semantik, Haptik und Symbolik) angesprochen, siehe Abb. 40. Weiters wird erwartet, dass auch ökonomische Aspekte (Herstellbarkeit, Materialvielfalt, Fertigungsschritte) und ökologische Aspekte (Haltbarkeit, Entsorgung) im Auge behalten.

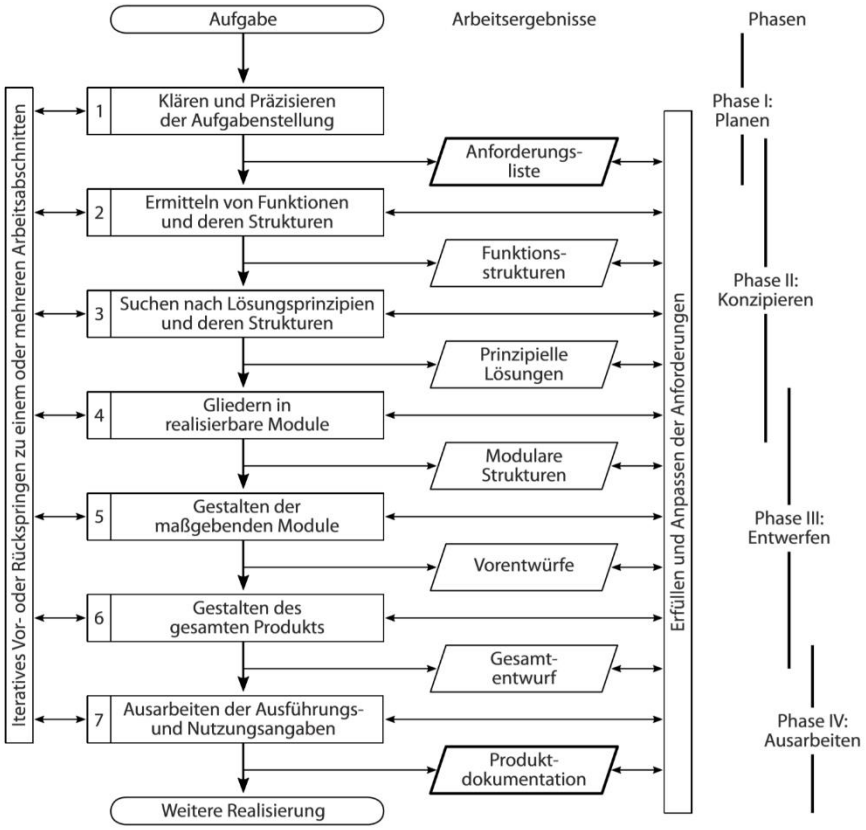


Abb. 39: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 [VDI93]

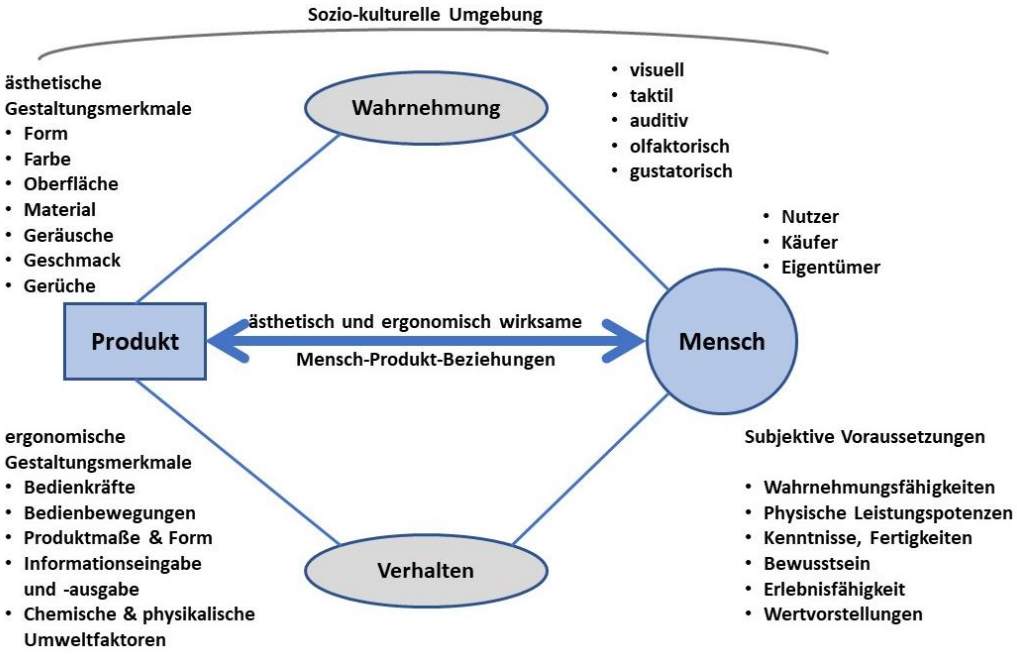
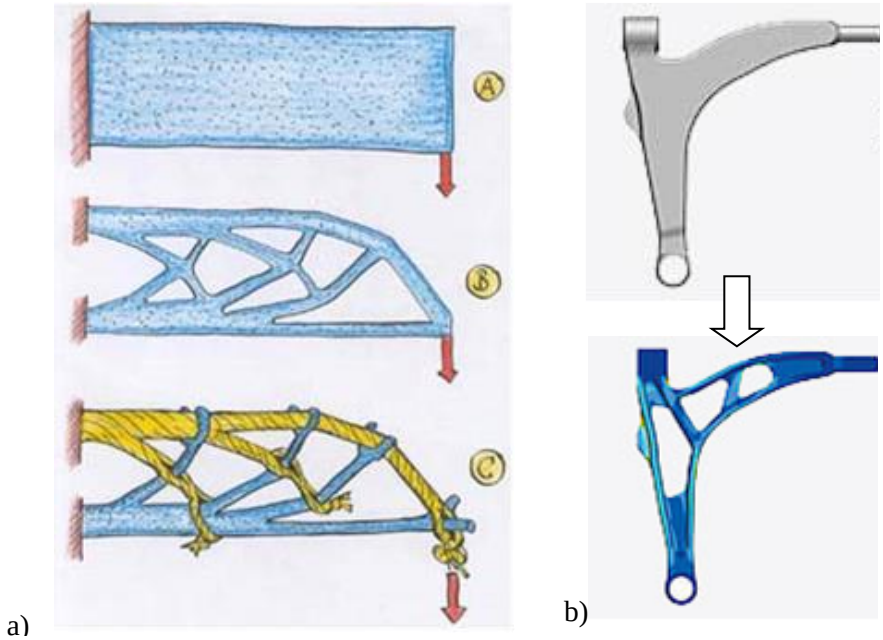


Abb. 40: Ästhetisch und ergonomisch wirksame Mensch-Produkt-Beziehungen [Gat13]

4.2 Topologie- und Gestaltoptimierung

Über die Beobachtung von Baumgestalten, Baumschäden und Wurzeln hat Prof. Claus Mattheck (TU Dresden und KIT) die Grundprinzipien des Wachstums in der Natur so weit verstanden, dass daraus auch erste Bionik-basierte Methoden für den Leichtbau entstanden ist [Mat03, Mat06, Mat10]. Die Formoptimierung in der Natur basiert in erster Linie auf dem Prinzip, dass die Wachstumsgeschwindigkeit belastungsabhängig ist, um eine mögliche homogene Spannungsverteilung und einen möglichst elastischen Energieinhalt zu erzielen oder um geschädigte Bereiche hinsichtlich ihrer Kerbwirkung zu heilen, wie bei der Kallusbildung im Falle eines Knochenbruchs. Mattheck hat an unzähligen biologischen Objekten vergleichende FEM-Analysen durchgeführt und damit zeigen können, dass die Natur ein wunderbarer Lehrmeister für die Statik ist. Die von ihm entwickelte Methode der „soft kill option (SKO)“ in der in mehreren Schritten jene Volumenbereiche eliminiert werden, die die niedrigsten Spannungen aufweisen, ist ein Vorreiter für kommerzielle Softwaresysteme für die Topologie-Optimierung.
Ausgehend von einem einfachen, selbstgewählten Bauraum und nach Definition der Kraftangriffspunkte und der Auflagersituation entsteht meist eine für den Belastungsfall optimierte, meist fachwerkartige Geometrie, siehe Abb. 41.



a) b)

Abb. 41: Topologie-Optimierung a) mit SKO-Ansatz b) mit kommerzieller Software

Damit können extreme Leichtbaukonstruktionen automatisiert erzeugt werden [Har99]. In einem zweiten Schritt werden mit dem CAO (computer aided optimization) -Verfahren Spannungsspitzen an Übergängen bzw. Verzweigungen abgebaut, damit die Oberfläche geglättet, wodurch eine erhöhte Dauerfestigkeit erreicht wird. Das CAO-Verfahren verwendet ein lokal, an der Berandung wirksames Wachstumsgesetz, d.h. in Abhängigkeit von der lokalen Spannungshöhe wird mehr oder weniger Material aufgetragen, wodurch es zu einer Gestaltsoptimierung kommt. Maximale Spannungen werden reduziert und insgesamt wird ein homogener Spannungszustand erreicht. Durch die Kombination des SKO-Verfahrens und des CAO-Verfahrens lassen sich hochbelastbare, form- und gewichtsoptimierte Bauteile umsetzen. Weitere Aspekte des Formleichtbaus folgen im Kapitel 4.5.

Aufgrund der resultierenden, komplexen Gestalt eignen sich nur mehr wenige Fertigungstechnologien, wie bspw. Druckguss [Fra17], Pulvermetallurgie, Spritzguss [Ste08] oder additive Fertigungsverfahren [Bro16, Chu18] für die Herstellung der Bauteile. Dieses Konzept ist sehr gut für die Luft- und Raumfahrt, schnell bewegte Bauteile, aber auch für Hochleistungssportgeräte geeignet. Ein eigenes Beispiel [Wal17], eine topologieoptimierte Konsole mit mehreren Restriktionen für den Automobilbau zeigt Abb. 42.
Weiterführende Literatur zu den Grundlagen und Anwendung der Topologie- und Gestaltoptimierungsmethode finden sich in [Sch13, Sau18, Hir18]

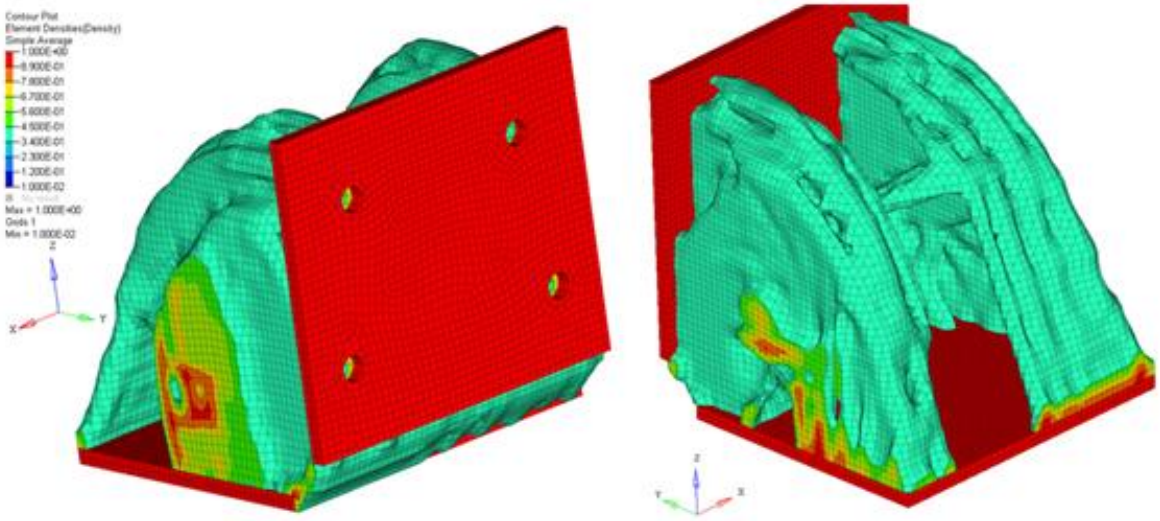


Abb. 42: Topologieoptimierte Konsole mit Strebendurchmesser- und Spannungsrestriktion. Die Belastung erfolgt über die vier Befestigungsbohrungen an der vertikalen Platte [Wal17]

In den letzten Jahren wurden die Softwarepakete auch mit sog. Fertigungsrestriktionen erweitert, um bereits auf die Machbarkeit der Konstruktion Rücksicht zu nehmen. Durch Vorgabe einer Auszugsrichtung kann ein fertigungsgerechter Designvorschlag (Guss oder gefrästes Bauteil) erzwungen werden.
Mithilfe dieser softwareseitigen Möglichkeiten lassen sich nahezu uneingeschränkt Geometrien hinsichtlich Gewichtsreduktion oder Steifigkeitserhöhung optimieren. Ein weiterer Punkt der computergestützten Simulation ist die Implementierung verschiedener Funktionen in ein Bauteil und die anschließende gemeinsame Gestaltoptimierung. Im Zuge einer solchen Entwicklungsstudie kann eine weitreichende Funktionsintegration zielführend realisiert werden. So lassen sich im heute immer kürzer werdenden Entwicklungsprozess wesentlich mehrere Kundenwünsche realisieren.

Abaqus, TOSCA Structure, Hyperworks oder ANSYS sind in der Wissenschaft bekannte Vertreter für Struktursimulationen aller Art. Für eine Topologieoptimierung bietet Dassault Systems im Zuge des Abaqus Paketes die Option einer integrierten Topologieoptimierung mittels Abaqus ATOM. Abaqus ATOM entspricht hierbei weitgehend der stand-alone Version mit der Bezeichnung TOSCA Structure. Altair implementiert in seinem Vorzeigeprodukt HyperWorks ebenfalls die Möglichkeit, zuvor simulierte Modelle hinsichtlich Topologieoptimierung zu bearbeiten [Doc19]. Implementiert wird

diese Funktionalität mittels OptiStruct [Alt18]. Ansys implementiert die Funktionalität über „GENESIS topology for ANSYS mechanical (GTAM)“. Mithilfe dieses Optimierers lassen sich analog zu den bereits beschriebenen Softwarepaketen beliebige Strukturen hinsichtlich Steifigkeit oder Leichtbau optimieren.

4.3 Fertigungsgerechte Konstruktion

Ganz wesentlich für die Bauteilqualität und für die wirtschaftliche Fertigung ist die Berücksichtigung der fertigungsspezifischen Eigenheiten bereits im Zuge der Konstruktion. Um den Fertigungsablauf bestmöglich zu unterstützen, um die resultierenden Bauteileigenschaften zu verbessern oder um fertigungsbedingte Fehlererscheinungen zu vermeiden ist auch ein vertieftes Wissen dazu notwendig. Nach Pahl/Beitz [Pal13] wird das fertigungsgerechte Konstruieren unterstützt durch eine geeignete Baustruktur (Differential-, Integral-, Verbundbauweise), Werkstückgestaltung, Werkstoffauswahl, Einsatz von Standard- und Fremdteilen und gute Fertigungsunterlagen. Dennoch sind die Aspekte des fertigungsgerechten Designs sehr vielfältig, wie auch aus Abb. 43 ersichtlich ist. Das fundierte Wissen über diese Prinzipien unterscheidet gute von weniger guten Konstrukteuren.

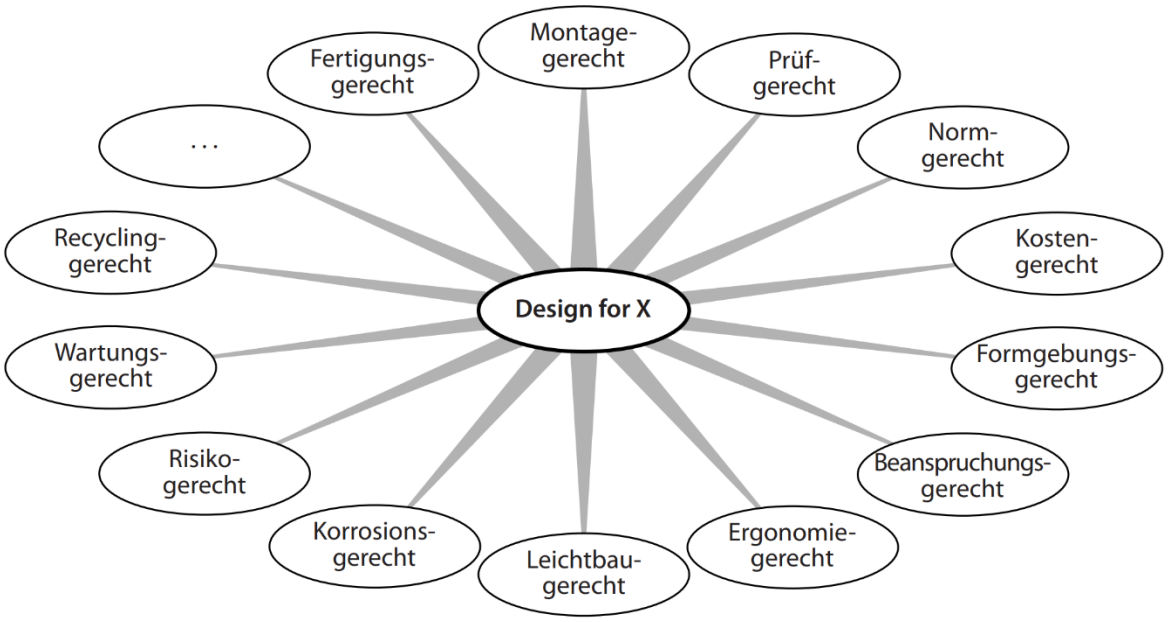


Abb. 43: Die vielfältigen Aspekte des Designs for X, [Ehr13, Pah13]

Nach Prof. Dr.-Ing. Lucienne Blessing [Ble09] sollten folgende neue Ziele für die fertigungsgerechte Konstruktion verfolgt werden:

- Senkung der Fertigungskosten um etwa 30%
- Erhöhung der Bauteilqualität (wenig Kontrolle, wenig Nacharbeit, wenig Ausschuss)
- Erhöhung der Flexibilität und Bearbeitung kleiner Losgrößen
- Reduktion von Fertigungsrisiken
- Verkürzung der Durchlaufzeiten
- Erhöhte Effizienz durch keine Überarbeitung und automatische Montage
- Erhöhte Produktivität bei Halbierung der Produktionsfläche

- Umweltbewusste Produktion

Im Folgenden werden einige Richtlinien zu den unterschiedlichen Fertigungsverfahren dargestellt, die zum selbstverständlichen Repertoire eines Konstrukteurs gehören sollte. Aspekte mit Bezug auf Leichtbau, Formgebung, Kosten, Recycling folgen in anderen Kapiteln. Als Fachbücher zu diesem umfangreichen Wissensgebiet sind zu nennen: [Bra99, Pol01, Boo02, And08, Hoe10].

Als generelle Grundsätze zum fertigungsgerechten Gestalten gelten:
- Möglichst geringe Abfallmengen, d.h. gute Werkstoffausnutzung
- Möglichst Fertigungsarten wählen, die mit wenigen Fertigungsstufen auskommen
- Möglichst mit wenig Rüstarbeiten und wenigen Aufspannungen anstreben
- Wenige Einzelteile anstreben

4.3.1 Grundsätze für gießgerechte Gestaltung

Wichtige Prinzipien für die Gussteilgestaltung sind:
- Kostengünstige Fertigung (z.B. durch Wiederverwendung der Gussmodelle)
- Positive Beeinflussung der Bauteileigenschaften durch optimierte Kühlbedingungen
- Vermeidung von Spannungen, Verzug und Fehler
- Einhaltung geringer Toleranzbreiten (wenig Übermaß und dadurch Materialeinsparung)
- Vermeidung von Hinterschneidungen
- Gestaltung unter Berücksichtigung der Nachbearbeitung (Entfernung von Anguss und Steiger, Beseitigung von Oberflächenfehlern, Korrekturen von Abweichungen u.a.m.)
- Abrunden von Kanten
- Aushebeschrägen (je nach Material zwischen 0,5 und 5°)
- Vermeidung der Lunkerbildung (Anwendung des Prinzips der Heuvers'schen Kreise),
    - bzw. Vermeidung von Materialanhäufungen oder durch Gießsimulation
- Toleranzgerechtes Gestalten der Gussteile
- Temperaturkontrolliertes Gießen ermöglichen – gleichmäßige Abkühlbedingungen schaffen

4.3.2 Gestaltungsrichtlinien für einige wichtige Umformprozesse

4.3.2.1 Gestaltung fertigungsgerechter Schmiedeteile

Ausgehend von der Konstruktionszeichnung des Kunden entsteht unter Beachtung der schmiedetechnischen Besonderheiten eine Rohteilkonstruktion für das Schmiedestück. Bedingt durch den Werkstoffffluss beim Schmieden entstehen Gesenkverschleiß und evtl. Schmiedefehler (Falten u.a.). Wesentliche Einflussgrößen sind Seitenschrägen, Kantenrundungen, Hohlkehlen, Bodendicke, Wanddicke und Rippen in Abstimmung auf die Größe des Bauteils. Zusätzlich muss auch auf die nachfolgende Weiterbearbeitung durch Zerspanung durch Festlegung der Aufnahmen, Anschlag- und Spannflächen Rücksicht genommen werden. Weitere Angaben finden sich in den angeführten Veröffentlichungen [Bre91].

4.3.2.2 Gestaltungsrichtlinien für Strangpressprofile

Die folgenden Richtlinien sollen den Konstrukteur unterstützen, die Pressbarkeit zu steigern, die Produktionskosten zu senken und die Belastbarkeit zu erhöhen:

- möglichst gleiche Wanddicke und abgerundete Ecken
- möglichst symmetrische Querschnitte
- möglichst wenige geschlossene Kammern (Vermeidung von teuren Spinnenwerkzeugen)
- kleiner umschreibender Kreisdurchmesser (dadurch geringere Werkzeugkosten)

angepasste Wanddicken im Vergleich zum umschreibenden Kreisdurchmesser
Weiter Design-Richtlinien für die Al-Extrusion finden sich in: www.powerofaluminium.com

4.3.2.3 Gestaltungsrichtlinien für das Walzprofilieren

Aufgrund des Umstandes, dass während des Prozesses eine mehrstufige, gestützte Biegung stattfindet, können alle duktilen Werkstoffe mittlerer Festigkeit durch das Walzprofilieren in eine Endform gebracht werden. In [Ram06] sind einige Richtlinien für diesen Prozess zusammengestellt.

4.3.2.4 Gestaltungsrichtlinien für das Biegen

Beim Biegen von Blechen können Probleme, wie Rückfederung, Bildung von Quetschfalten und Haarrissen auftreten. Schwankungen im Rückfederungswinkel entstehen durch Blechdickenunterschiede und Zugfestigkeitsunterschiede zwischen den Halbzeugen.
Eine Verringerung der Rückfederung wird erzielt durch:

- größere Biegewinkel
- größere Blechdicke und
- geringere Festigkeit (Steifigkeit)
- Verwendung von Werkstoffen mit höherem E-Modul

Um Quetschfalten und Haarrisse in der Biegezone zu vermeiden, sind werkstoffabhängige Mindestbiegeradien r_{min} einzuhalten.

$$r_{min} = c \cdot s \quad \text{mit} \quad c_{Stahl} = 0.5$$
$$c_{Cu} = 0.25$$
$$c_{Sn} = 0.5$$
$$c_{Al} = 0.6\,(\text{weich})$$
$$c_{Al} = 2.0\,(\text{hart})$$

Wenn die Walzrichtung parallel zur Biegekante verläuft, ist r_{min} um $0{,}5 \cdot s$ zu erhöhen.

4.3.2.5 Gestaltungsrichtlinien für trennende Fertigungsprozesse

4.3.2.5.1 Gestaltungsrichtlinien für die zerspanende Bearbeitung

- Beachten des erforderlichen Werkzeugauslaufs
- Vorsehen ausreichender Spannmöglichkeiten
- Vermeiden großer Zerspanungsarbeit
- Anpassen der Bearbeitungslängen

4.3.2.5.2 Gestaltungsrichtlinien für das Schneiden

Der Schneidspalt beträgt etwa 10% der Blechdicke. Für diesen Fall wird das Blech bis zu 1/3 geschnitten und der Rest gebrochen. Der Glattschnittanteil kann durch Verringerung des Schneidspaltes vergrößert werden (=Präzisionsschnitt). Allgemeine Richtlinien für das Gestalten von Schnittteilen, unabhängig von der Funktion, des Einsatzfalles und des Herstellungsverfahrens, sind:

- Abschneiden statt Ausschneiden
- Einschneiden statt schmal Ausschneiden
- Ausschnitte möglichst groß gestalten
- Rundungen nicht tangential auslaufend gestalten
- Große Bohrungsdurchmesser
- Nutzung großflächiger Bereiche für weitere Teile
- Teile platzsparend bzw. abfallfrei gestalten und anordnen

4.3.3 Richtlinien für den metallischen 3D-Druck

Grundlegende Gestaltungsrichtlinien für die laseradditive Fertigung nach [Kra14]:

- Durch angepasste Energieeinbringung und Vermeidung von scharfen Kanten Verzug und Brüche verhindern
- Vermeidung von Supportstrukturen durch materialabhängige Neigungswinkel
- Sicherstellung eines einfachen Entfernens der Supportstrukturen
- Wandstärken < 0,4 mm sollten vermieden werden
- Bohrungen > 2mm, da ansonsten Pulveranhaftung in den Bohrungen auftreten
- Horizontale Bohrungen mit einem Durchmesser > 6 mm vermeiden (Materialeinfall)

4.3.4 Richtlinien für die Wärmebehandlung

4.3.4.1 Vorgehen beim Härten

Vorsehen von Prüfproben, die ähnliche Vorgeschichte aufweisen wie der Hauptkörper des Bauteils.

- Schroffe Querschnittsübergänge vermeiden
- Symmetrische Bauteilgeometrie anstreben
- Gehärtete Teile umgehend einem Anlassen unterziehen
- Anpassen der Anlasstemperatur an die Formkomplexität und Zähigkeitsanforderungen

4.3.5 Gestaltungshinweise für Kunststoffteile

Formteile aus Kunststoff erhalten ihre endgültige Gestalt und die dazugehörigen Maße i.a. im Urformprozess (Spritzen, Extrusion, Pressen u.a.) ohne weitere Nachbearbeitung. Bei Kunststoffen sind folgende werkstoffbedingte und verfahrensbedingte Arten der Schwindung zu berücksichtigen:

- Thermische Schwindung durch Volumenkontraktion bei Temperaturänderungen während des Abkühlens.
- Druckabhängige Schwindung durch Volumenänderung bei Druckänderungen des Verarbeitungsprozesses
- Umwandlungsschwindung durch Kristallisation während des Abkühlens
- Reaktionsschwindung durch chemische Reaktionen während des Formgebungsprozesses
- Schrumpfung als Relaxationsschwindung verarbeitungsbedingter Molekülorientierungen

4.3.5.1 Fertigungsgerechtes Konstruieren von Spritzgussteilen

G.Steinbichler [Ste08] empfiehlt aus Sicht eines Maschinenherstellers:

- Wanddicken so dünn wie möglich, so dick wie nötig (die erreichbaren Fließwege sind von der Wanddicke abhängig)
- Möglichst gleiche Wanddicken anstreben
- Vermeiden von Masseanhäufungen
- Keine scharfen Ecken und Kanten
- Rippen so gestalten, dass Versteifung ohne Verzug und Einfallstellen erreicht wird
- Rippenersatz durch abgestufte Zonen
- Spanungsausgleichendes Design
- Vermeidung von Hinterschneidungen
- Einsparen von Polierkosten durch matte oder erosionsraue Oberfläche

4.3.6 Design for Assembly / Montage (DfMA)

Grundlegende DfMA (design for manufacturing and assembly) - Richtlinien sind:

- Reduktion der Anzahl der Einzelteile
- Vermeidung von Montagefehlern durch poka-yoke-Ansätze
- Erleichterung von Einsetzarbeiten (Einführkonus, Spiel etc.)
- Formgebung zur Sicherstellung einer späteren Bauteil-Prüfbarkeit
- Gestaltung unter Berücksichtigung der Automation
- Vermeidung übertriebener Toleranzanforderungen
- Robustes Design zur Kompensation von Fertigungsungenauigkeiten
- Bauteilgestaltung zur eindeutigen Montage auch ohne Manual
- Design für rasches und einfaches Assembly
- Standardteile verwenden → weniger Werkzeuge, einfacheres Handling
- Modulare Produktgestaltung erleichtert den Zusammenbau
- Bauteilgestaltung für einfache Bedienbarkeit / Reparatur

4.3.7 Kriterien für umweltgerechtes Design

Für die Werkstoffauswahl unter dem Umwelt- und Recyclingaspekt sind eine Reihe von Faktoren entscheidend:

- recyclingfähige Werkstoffe verwenden
- Reduzierung der Werkstoffvielfalt
- Konsequente Herstellung von Teilen gleicher Funktion aus denselben Werkstoffen
- Vermeidung von Spezialwerkstoffen mit besonderen Additiven
- Vermeidung von umweltproblematischen Additiven und Substanzen
- Vermeidung von Oberflächenveredelungen und nicht lösbaren Werkstoffverbunden bzw. Verwendung kompatibler Oberflächentechnologien
- Kompatible Werkstoffe einsetzen

4.4 Überprüfung der Machbarkeit im frühen Entwicklungsstadium

Der weit fortgeschrittene Stand der Modellierung und Simulation und die hohe Vorhersagequalität der FE-Programme ermöglicht den simultanen Einsatz dieser mit dem Entwurf und der Auslegung von Komponenten [Buc02, Fur10]. Abb. 44 gibt einen groben Überblick über die Leistungsfähigkeit derartiger Modelle.

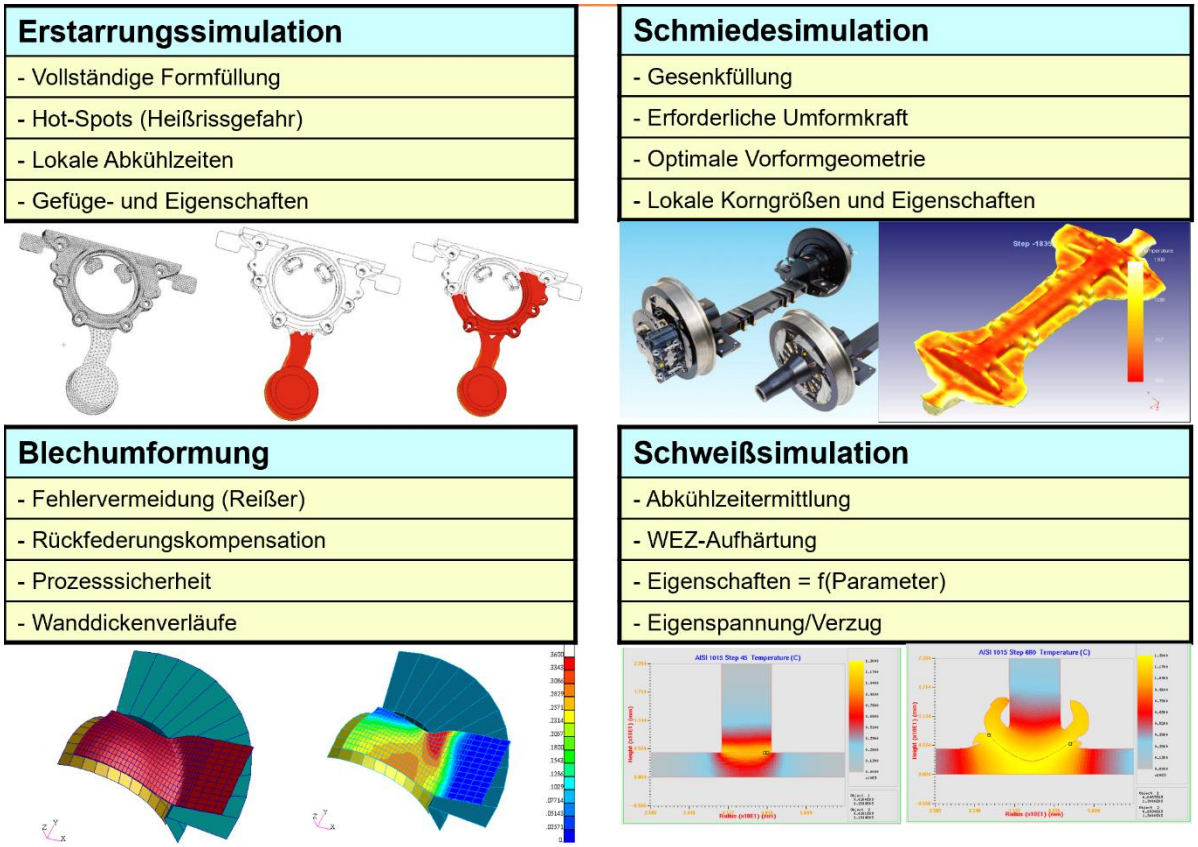


Abb. 44: Simulation von Fertigungsprozessen mit prozessrelevanten Kennzahlen zur Bewertung

Aufgrund der Verfügbarkeit der Prozess-Software und primär aufgrund der Notwendigkeit der Abschätzung möglicher Fehlerquellen und damit zur Vermeidung unnötig hoher Kosten ist dieses Vorgehen bereits sehr weit verbreitet, insbesondere in den Abteilungen zur Methodenplanung der Automobilindustrie.
Zu den Vorreitern auf diesem Gebiet zählt auch die Wirtschaftsregion Ostwestfalen-Lippe OWL. Dort wird versucht, die Zeit von der Produktidee bis zum Markteintritt (time to market) durch Virtual Prototyping & Simulation (VPS) entlang der Prozesskette zu verkürzen, siehe Abb. 45.

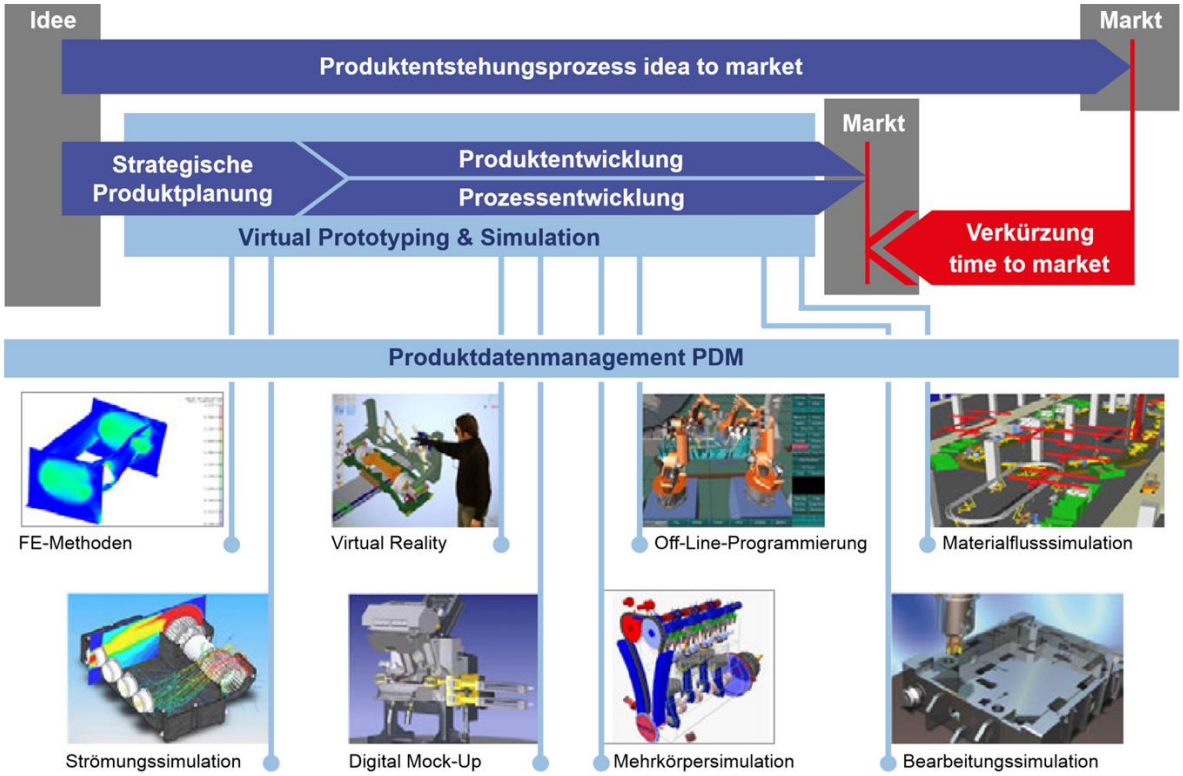


Abb. 45: ViProSim – Virtuelle Prozess-Simulation in der Fertigung (Bildquelle: www.owl-viprosim.de)

4.4.1 Machbarkeitskontrolle bei der Blechumformung

Bereits in der Designphase muss die betriebliche Machbarkeit einer Komponente überprüft werden, weil etwaige spätere Änderungen, die aus Fertigungsgründen notwendig sein könnten, sich empfindlich auf die Kosten auswirken würden. Diese gilt insbesondere für die Automobilindustrie mit sehr engen Zeitplänen, nach dem Meilenstein „Design-freeze“ sind Design-Änderungen nahezu ausgeschlossen. Wenn man beispielsweise an die Fertigung von Blechteilen der Karosserie denkt, so werden nach dem „Design-freeze“ bereits kostspiele Großwerkzeuge für das Tiefziehen bestellt. Sollte die Teile dann nicht wie geplant herstellbar sein, wäre dies desaströs. Aus diesem Grund werden parallel zum Design bereits numerische Umformsimulationen durchgeführt, die etwaige Problembereiche sofort erkennt, die durch geringfügige Design-Änderungen entschärft werden.
Als Ziele werden bei der Blechumform- oder Tiefziehsimulation folgende Punkte verfolgt:

- Lokale Dehnungen im Vergleich zur Grenzformänderungsdiagramm
- Blechdickenverlauf
- Rückfederungsverhalten
- Fehlererscheinungen (Falten, Reißer etc.)
- Optimierung des Zuschnitts
- Flexible Niederhalterstrategien
- Vorhersage des Crash-Verhaltens

Bei komplexeren Blechumformprozessen stehen erweiterte Konzepte für die Berücksichtigung der, vom Dehnungspfad abhängigen Grenzformänderung zur Verfügung [Ofe05].

4.4.2 Machbarkeitskontrolle bei der Massivumformung

Ein entscheidender Faktor für die Machbarkeit eines massiv geformten (geschmiedeten oder fließgepressten) Bauteils ist auch die Frage einer evtl. Vorschädigung einer Legierung im Zuge der Herstellung. Empirische Schädigungsindikatoren, wie bspw. der Ansatz nach Cockroft & Latham und physikalisch basierte Schädigungsmodelle für Massivumformungen [Rüf07] helfen im Zuge der Fertigungsplanung optimale Fertigungsfolgen zu finden. Abb. 46 zeigt am Beispiel eines fließgepressten Bauteils den Vergleich zweier Fertigungsvarianten hinsichtlich der auftretenden Schädigungsentwicklung [Beh02]. Während das Bauteil bei der im oberen Teilbild dargestellten Variante einmal zwischengeglüht werden muss, ist dieser teure Zwischenschritt bei einer Fertigungsfolge, wie im unteren Teilbild dargestellt, nicht notwendig.

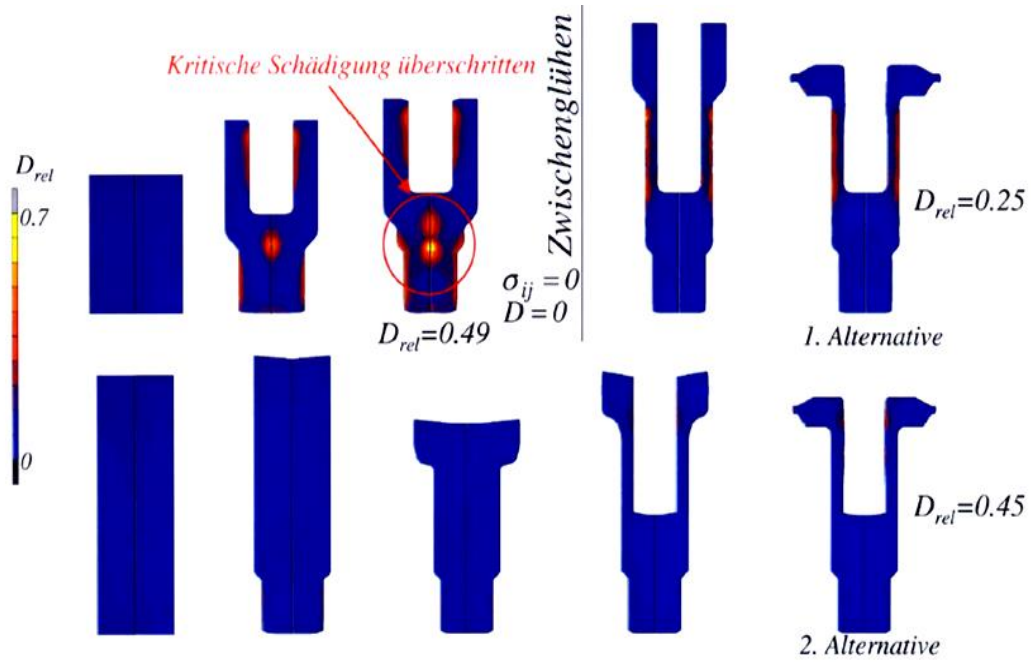


Abb. 46: Vergleich der Schädigungsentwicklung zweier Fertigungsvarianten eines KFP-Teils [Beh02]

4.4.3 Optimierung von Gussteilen durch Formfüllungs- und Erstarrungssimulation

Die Simulation des Formfüllungs- und Erstarrungsvorgangs kann ebenso numerisch während der Designphase vollzogen werden und unterstützt derart die Konstruktion gießgerechter Teile. Damit können Fehler und Schwachstellen, wie „hot spots“ vermieden werden. Auch hier gilt, dass eine frühzeitige direkte konstruktive Korrektur wesentlich günstiger ist als spätere Änderungen.

4.4.4 Machbarkeitskontrolle in der Kunststoffverarbeitung

Wie in zuvor genannten Fällen bei Metallen wird auch in der Kunststoffverarbeitung die numerische Prozesssimulation frühzeitig zur Erkennung möglicher Fertigungsschwierigkeiten eingesetzt. So gibt es bspw. für das Spritzgießen mehrere Software-Pakete am Markt, die eine Optimierung der Fertigungsparameter und eine Vorhersage der zu erwartenden Eigenschaften des Bauteils ermöglichen. Einen Einblick in diese Art der Simulation gibt [Ste08, Wir09].

Neben der Produkt- und Prozessoptimierung wird auch die Werkzeugentwicklung mit der Festlegung optimaler Kühlstrategien unterstützt, wodurch Entformungszeiten reduziert werden können. Auch Faserverbunde können mit diesen Tools optimiert werden.

4.4.5 Überprüfung der Verfügbarkeit von Material und Verfahren

Insbesondere bei geringen Stückzahlen ist die Wahl des Werkstoffs- und der Fertigungsverfahren sehr stark von der Verfügbarkeit beider abhängig. Obwohl bspw. die Stahleisenliste nahezu 2000 Stahlgüten auflistet, sind bei regionalen Stahlhändlern nicht einmal 50 unterschiedliche Stahlgüten auf Lager. Erst bei Bestellmengen von mindestens fünf Tonnen bei Standardgüten bzw. 30 Tonnen bei kundenspezifizierten Legierungen können Lieferungen erfüllt werden.

4.5 Formleichtbau

Ressourcenschonung und Effizienzsteigerung zwingen in allen Bereichen der Verkehrstechnik (Pkw, Lkw, Bahn, Flugzeug) zur Gewichtsreduktion, umgesetzt durch die drei Säulen, den konstruktiven, den werkstofftechnischen und den fertigungstechnischen Leichtbau. In diesem Kapitel werden primär der konstruktive oder Formleitbau behandelt, die beiden anderen Möglichkeiten folgen im Kapitel 5 und 6. Allerdings wird darauf hingewiesen, dass bei Design-Festlegungen stets auch Anforderungen bzgl. Werkstoff und Fertigungsverfahren und in weiterer Folge bzgl. der Kosten berücksichtigt werden müssen [Buc07, Kle06, Deg09], siehe Abb. 47.

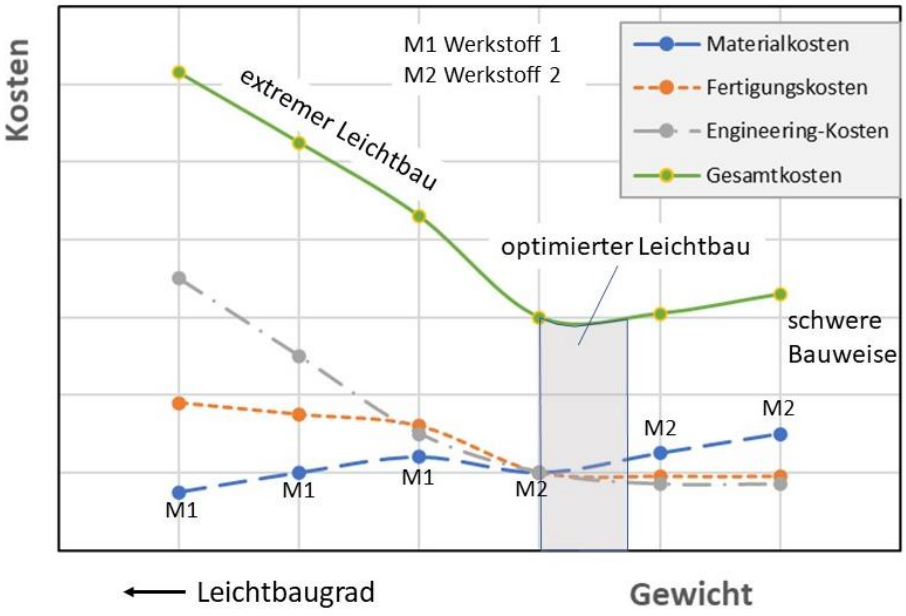


Abb. 47: Kosten in Abhängigkeit vom Leichtbaugrad

Die Auslegung von Bauteilen nach den Gesichtspunkten der Mechanik ist eigentlich schon die Basis des Leichtbaus, weil versucht wird das Bauteil bis an die Elastizitätsgrenze zu belasten. Je nach Belastungsart und Geometrie des Bauteils sind jedoch die lokalen Spannungen sehr unterschiedlich

und erst durch die Anwendung der Finite-Elemente-Rechnung können noch weitere Gewichtseinsparungen erzielt werden.
Prinzipien des Leichtbaus sind:

- Material nur dort vorsehen, wo es wirklich gebraucht wird
- Dünnwandige Strukturen verwenden
- Material gleichmäßig beanspruchen
- Elemente zur Aussteifung und zum Formerhalt (Spanten, Rippen) vorsehen
- Instabilitäten (Knicken, Beulen, Kippen) vermeiden bzw. durch geeignete Maßnahmen verhindern

Wirksame Konstruktionsprinzipien für den Formleichtbau sind:

- Verteilung der Kräfte in ebenen oder räumlichen Fachwerken (spaceframe-Konzept)
- Dreieckslösungen sind wesentlicher formstabiler als Rechtecke
- Verwendung von Querschnitten mit hohem Widerstandsmoment (Rohr, Profile, I-Träger) (siehe dazu noch die Ausführungen zum Shape-Faktor im Kapitel 5)
- Sandwich-Strukturen mit dünner Deckschicht aus steifem Material und schubfeste, leichte Kernschicht
- Bei Sandwich Kernausführung als Steg, Wellblech, Wabe, gelochte Ausführung
- Bei dünnen Teilen sollten gekrümmte Blech verwendet werden.
- Einbringen von Sicken, um die Biegesteifigkeit zu erhöhen
- Versteifung freier Ränder und Kanten
- Feingliederung von Strukturen (Verrippung, Spanten)
- Lokale Verstärkungen (Patch Work)

Bezüglich der Details und weiterer Möglichkeiten sei auf [Kle07, Hen11, Wie86, Oe18] verwiesen.
Interessante Anregungen finden man auch aus dem Möbelbau. Auch dort hat der Leichtbau bei DIY-Möbeln seit längerer Zeit Eingang gefunden.
Für Hochleistungsbauteile, wie sie bspw. im Motorsport Verwendung finden, wird die kostenintensive Gestalts- und Topologie-Optimierung angewandt. Die Darstellung der sehr komplexen Formen wird dann direkt mit der additiven Fertigung erreicht.
In manchen Fällen kann es auch Sinn machen, unterschiedliche Werkstoffe zu kombinieren (sog. Hybridlösungen). Dieser Ansatz findet im Automobilbau häufig Anwendung.

4.5.1 Herausforderungen bei sehr geringen Wandstärken

Materialeffizienz bzw. Leichtbau erfordern dünnwandige Bauteile. Dabei stellt sich die Frage mit welchen Fertigungsverfahren dünnwandige Teile prozesssicher hergestellt werden können und welche minimalen Wandstärken erreichbar sind. Aufgrund der Problematik der Instabilität spielt die Möglichkeit von Verstärkungsmaßnahmen eine besondere Rolle. Auch hier soll aufgezeigt werden, welche Fertigungsverfahren diesen Sachverhalt am besten berücksichtigen können.

4.5.1.1 Minimale Wandstärke beim Gießen

Die minimale Wandstärke bei Gießtechnologien hängt in erster Linie vom Fließvermögen der Legierung ab, welches von folgenden Faktoren bestimmt wird:

- Wärmeübergang Schmelze – Form
- Oberflächenrauigkeit der Form
- Oberflächenspannung der Schmelze
- Temperatur der Schmelze
- Füllgeschwindigkeit

Einen Überblick über Mindestwandstärken für verschiedene Gießprozesse gibt Tabelle 12.

Verfahren	Sandguss	Kokillenguss	Feinguss	Druckguss	Spritzguss
Werkstofftyp	Eisenguss, NE-Metalle	NE-Metalle	NE-Metalle	NE-Metalle	Kunststoffe
Min. Wand-dicke [mm]	s> 3 -5	s>3mm	S>1,5mm	s>0,5 bis 3,0 mm	s>0,5mm

Tabelle 12: Mindestwandstärken in Abhängigkeit des Verfahrens

4.5.1.2 Möglichkeiten zur Erhöhung der Stabilität bei dünnen Blechen

Bleche mit Wandstärken unter einem Millimeter sind meist nicht mehr ausreichend stabil. Erst durch Krümmungen, Sicken oder dem Versteifen durch Fügen mit anderen Blechteilen erfährt die Blechkonstruktion eine ausreichende Steifigkeit und Stabilität.
Insbesondere bei größeren Flächen sind Maßnahmen zur Vermeidung von Beulungen unerlässlich. Wölbstrukturierte Bleche oder auch Sicken helfen sehr, die Steifigkeit zu erhöhen. Des Weiteren können Biegekanten durch Sicken deutlich an Steifigkeit gewinnen. Es gibt aber kaum Literatur über die grundsätzlichen Prinzipien. Die einzige Ausnahme bildet das ältere Buch von Oehler [Oeh72].
Ein jüngerer Beitrag stammt von der Fa.4Ming [Rei13], mit über 50 Richtlinien zur Sicken-Gestaltung und zahlreichen Beispielen inklusive FE-Berechnungen.

4.5.1.3 Fließlochbohren bei dünnen Blechen

Stabile Schraubverbindungen herzustellen, ist vor allem bei dünnwandigen Materialien eine große Herausforderung. Überall dort, wo die vorhandene Materialdicke nicht ausreicht, wurden bisher traditionell Schweiß-, Niet- oder Pressmuttern eingesetzt. Das kostet Zeit und Geld.
Mit dem Fließlochbohren können spanlos Durchzüge insbesondere in dünne Bleche eingebracht werden, siehe Abb. 48. Durch die Reibwärme fließt das Material sehr leicht und bildet einen ausreichend tiefen Durchzug, der als Funktionsfläche für Schraubverbindungen dient.

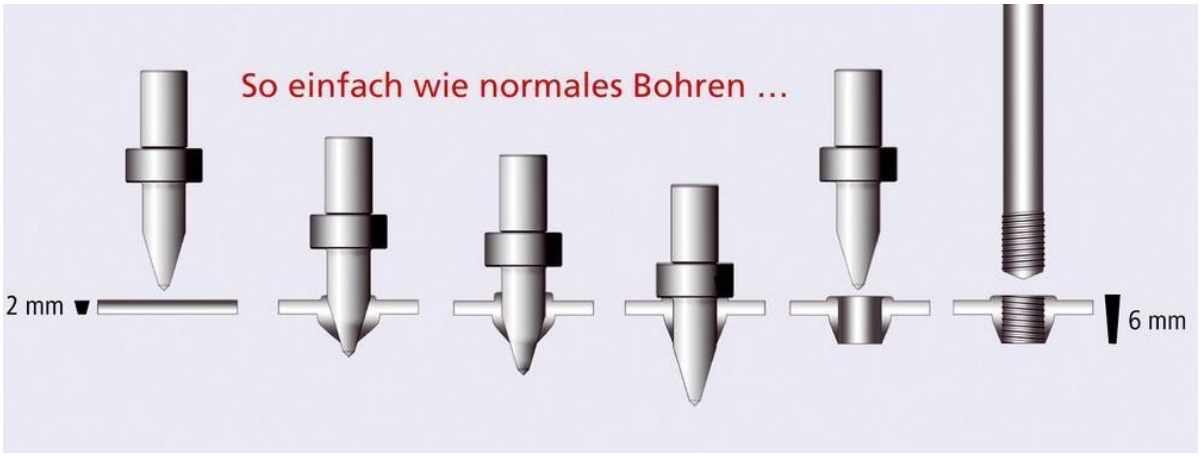


Abb. 48: Fließlochbohren, ein Verfahren zur Schaffung von Schraubverbindungen an dünnen Blechen (Bildquelle: Thermdrill)

4.6 Eco-Design

Die wahrnehmbaren Veränderungen unserer Umwelt haben dazu geführt, dass die Frage der Ökologie nun auch beim Produktdesign Einzug findet. Ökologische Material- und Fertigungsaspekte folgen in den beiden nächsten Kapiteln (Kap.5 und 6), aber der Startpunkt liegt, wie in vielen anderen Themen, beim Design bzw. der umweltbewussten Gestaltung. Die Umweltziele umfassen dabei

Umweltziele

1. Verringerung des Energieverbrauchs durch
   - minimale Reibungsverluste
   - optimierten Motor
   - Arbeitspunkt
2. Keine Verwendung von unerlaubten Substanzen (gemäß Stoffverbotsliste) und Verringerung der nur eingeschränkt erlaubten Substanzen sowie der energieintensiven Materialien
3. Reduktion des Komponentenverschleißes
4. Verminderung des Wasserverbrauchs
5. Senkung der Lärmemission
6. Reduktion von Vibrationen
7. Recycling:
   - hohe Recyclingfähigkeit der verwendeten Materialien
   - Verwendung von Rezyklaten
   - einfache Demontagefähigkeit (Demontagekonzepte)
   - verringerte Materialvielfalt und Designkomplexität
   - Markierung der Nichtmetalle
8. Verwendung nachwachsender Rohstoffe
9. Umweltinnovationen
10. Verbesserung der Transporteigenschaften
11. Senkung der Staubemission

Abb. 49: Abgeleitete Umweltziele

Eco-Design berücksichtigt nicht nur die Energieeffizienz und recycling-gerechte Produkte, sondern betrachtet den gesamten Lebenszyklus eines Produkts. Dazu gehört auch die Betrachtung der Möglichkeiten defekte Teile auszutauschen oder zu reparieren und die Haltbarkeit eines Produkts zu verlängern. So gesehen, verfolgt Eco-Design eine Design-Philosophie, die auch eine identitätsstiftende Wirkung ausüben soll. Durch die angestrebte Kreislaufwirtschaft und einen Vergleich der Ökobilanzen

unterschiedlicher Varianten kann ein zusätzlicher Beitrag zur Reduktion negativer Umweltauswirkungen erreicht werden.
Zu den primären Zielen des Eco-Designs zählen laut BMUB:

- Langlebigkeit
- Reparierbarkeit
- Materialeffizienz
- Energieeffizienz
- Problemstoffarmut
- Nachwachsende Rohstoffe
- Kreislauffähigkeit

Weitere Themen zu den Grundlagen, Methoden und zur Praxis des Eco-Designs wurden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) in Berlin herausgegeben und können unter der Internet-Adresse „https://www.ecodesignkit.de/home-willkommen/ studiert werden. Weitere interessante Literaturquellen sind untenstehend angeführt.
Das Thema Materialeffizienz wird in den Abschnitten über Topologie-Optimierung, Leichtbau (Stoff-, Form- und fertigungstechnischer Leichtbau), additive Fertigung, sowie in der Kostenbetrachtung noch im Detail betrachtet. Insgesamt wird hier abermals die hohe Bedeutung der Materialauswahl und die Senkung des Werkstoffgewichts für die Produktentwicklung offensichtlich.

4.7 Besondere Bestimmungen für Bereiche mit erhöhtem Gefahrenpotenzial

Die Auslegung von Komponenten und Maschinen folgt im Allgemeinen den Grundsätzen der Mechanik, Festigkeitslehre, Physik u.a. auf Basis anerkannter Grundlagen und nach entsprechender Ausbildung. In einigen Fällen, bei denen insbesondere Menschenleben gefährdet werden könnten, gelten Sonderregelungen. Für die Auslegung von Schweißverbindungen werden die beiden Bereiche Ungeregelter und Geregelter Bereich unterschieden, da natürlich zum Schutz von Menschenleben erhöhter Sicherheitsmaßnahmen notwendig sind [Neu03]. Die Einhaltung der Vorgaben in den spezifischen Regelungen ist zwingend vorgeschrieben und wird auch entsprechend kontrolliert.

4.7.1 Ungeregelter Bereich

In diesem Bereich werden die Sicherheitsanforderungen zum Beispiel durch die Maschinenrichtlinie und den daraus abgeleiteten Gesetzen (Produktsicherheitsgesetz) geregelt [Han20]. Es ist jedoch nicht vorgeschrieben, nach welchen Normen oder Regeln Nachweis, Ausführung und Kontrolle von Konstruktionen zu erfolgen haben.
Im Schadensfall wird aber üblicherweise geprüft, ob die Schweißnahtauslegung den anerkannten Regeln der Technik entspricht.
Branchen aus diesem Bereich sind zum Beispiel:

- Maschinenbau
- Straßenfahrzeugbau

allgemeiner Gerätebau (Konsumgüterproduktion).
Je nach Nutzung und Schadensfolgen besteht auch die wirtschaftliche Notwendigkeit (Versicherung, Haftung) ein nach anerkannten Normen zertifiziertes Produkt anzubieten.
Im Maschinenbau hält man sich je nach Einsatzbereich der Konstruktion an Normen, die dem jeweiligen Einsatzzweck entsprechen. Ein großer Teil der Nachweise wird ebenfalls nach Eurocode 3 beziehungsweise in Anlehnung daran durchgeführt. Ansonsten orientiert man sich an speziellen Richtlinien (z.B. FKM, VDI usw.).

4.7.2 Geregelte Bereiche

Im geregelten Bereich existieren direkt auf die Branche und den Einsatz bezogene Normen und Regeln, deren Einhaltung gesetzlich verpflichtend ist. Hier sind beispielhaft zu nennen:

- Bauaufsichtlicher Bereich (Eurocodes)
- Schienenfahrzeugbau (z.B. DIN 27201)
- Kranbau (EN 13001)
- Eisenbahnbrücken (Eurocode 1)
- Schiffbau
- Behälter- und Rohrleitungsbau (z.B. AD2000)
- Luft- und Raumfahrzeuge
- Offshore-Bereich
- Chemieanlagenbau
- Kraftwerksbau
- Wehrtechnik

Die Notwendigkeit des Nachweises der Anlagen, Bauteile oder Produkte ergibt sich durch die Anwendungspflicht des jeweils zuständigen Normen- oder Regelwerkes. Hierbei wird der Nachweis rechnerisch oder gegebenenfalls auch experimentell erbracht. Im Stahlbau beispielsweise wird der Nachweis von Schweißnähten über den Eurocode 3 geregelt [Han20].

4.8 Literaturangaben zu Kapitel 4

Kap. 4.1

[And87] N,N,Andreasen, L.Hein: Integrated Product Development, Springer Heidelberg, 1987
[Bue19] P.Bühler, P.Schlaich, D.Sinner, A.Stauss, T.Stauss: Produktdesign, Springer Berlin Heidelberg, 2019
[Edw03] K.L.Edwards: Designing of engineering components for optimal materials and manufacturing process utilisation, Materials and Design 24, 2003, 355-366
[Ehr13] K.Ehrlenspiel, H.Meerkamm: Integrierte Produktentwicklung, 5.Aufl., Carl Hanser Verlag, München, 2013
[Fie17] C.Fiel, P.Fiel: Industrie-Design A-Z, Taschen Bibliotheca Universalis, Köln, 2017
[Gat14] T.Gatz: Industriedesign, Kap.4 in [Vaj14], S.133ff
[God03] M.Godau: Produktdesign. Eine Einführung mit Beispielen aus der Praxis, Birkhäuser Basel, 2003
[Hin00] H.Hintzen, H.Laufenberg, U.Kurz: Konstruieren, Gestalten, Entwerfen, Vieweg+Teubner Verlag, 2000
[Hub80] V.Hubka: Allgemeines Vorgehensmodell des Konstruierens, Schriftenreihe WDK, Heurista Zürich, 1980
[Kal12] A.Kalweit, C.Paul, S.Peters, R.Wallbaum: Handbuch für Technisches Produktdesign – Material und Fertigung, Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure, VDI-Buch, Springer, 2012
[Lju03] L.Y.Ljungberg, K.L.Edwards: Design, materials selection and marketing of successful products, Materials and Design 24, 2003, 519-529
[Ols81] F.Olsson: Machine design procedure related to product development procedure. In V.Hubka (Hrsg.) Review of Design Methodology, ICED 81 Rom, Schriftenreihe WDK Bd.5, 1981, 229-238
[Pah07] G.Pahl, W.Beitz, J.Feldhusen, K.-H.Grote: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung – Methoden und Anwendungen, 7.Aufl., Springer Berlin Heidelberg, 2007
[Ram02] D.Rams: 10 Thesen über gutes Produktdesign, designwissen.net, Feb.2002
[Rae07] W.Rähse: Produktdesign in der chemischen Industrie, Springer Berlin Heidelberg, 2007
[Rie12] F.Rieg, R.Steinhilper: Handbuch Konstruktion, Carl Hanser Verlag München Wien, 2012

[Vaj14] S.Vajna (Hrsg.): Integrated Design Engineering, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2014
[Wil19] P.Wilkinson: Design-Klassiker, Dorling Kindersley Ltd., London, 2019

Kap. 4.2

[Alt18] Altair University: Practical aspects of structural optimization – a study guide, 3rd ed., 08/2018
[Bro16] M.Bromberger: Symbiose aus Topologieoptimierung und additiver Fertigung, lightweight design extra, Nov. 2016, 16-20
[Chu18] C.-H.Chuang, S.Chen, R.J. Yang, P.Vogiatzis: Topology optimization with additive manufacturing consideration for verhicle load path development, Int. J. for Numerical Methods in Engineering 113, 2018, 1434-1445
[DOC19] Docplayer: Selbstlernkurs zur Anwendung der FEM mit SolidWorks, http://docplayer.org/164534562-2019-20-selbstlernkurs-zur-anwendung-der-fem-mit-solidworks.html
[Fra17] T.Franke, S.Fiebig, T.Vietor: Fertigungsgerechte Bauteilgestaltung in der Topologieoptimierung auf Grundlage einer integrierten Gießsimulation, in: T.Schmall et.al.(Hrsg.): Wissenschaftssymposium Komponente, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017
[Har99] L.Harzheim, G.Graf, S.Klug, J.Liebers: Topologieoptimierung im praktischen Einsatz, ATZ Automobiltechn. Zeitschrift 101,1999, H.7/8, 530-539
[Hir18] P.Hiremath: Topology optimization and casting feasibility of a robot arm, CAASE18 NAFEMS Conf., Cleveland, Ohio, June 2018
[Mat03] C.Mattheck: Warum alles kaput geht – Form und Versagen in Natur und Technik, Verlag KIT Karlsruhe, 2003
[Mat06] C.Mattheck: Design in der Natur, Rombach, Freiburg im Breisgau, 2006, ISBN 3-7930-9150-3
[Mat10] C.Mattheck: Denkwerkzeuge nach der Natur, Verlag KIT Karlsruhe, 2010
[Sau18] A.Sauer: Bionik in der Strukturoptimierung – Praxishandbuch für ressourceneffizienten Leichtbau, Vogel Verlag Würzburg, 2018
[Sch13] A.Schumacher: Optimierung mechanischer Strukturen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013
[Ste08] G.Steinbichler: Methoden und Verfahren zur Optimierung der Bauteilentwicklung für die Spritzgießfertigung, Dissertation, Uni Erlangen-Nürnberg, 2008
[Wal17] A.Walzl, B.Buchmayr: Topologieoptimierung – Entwicklungswerkzeug für die additive Fertigung, Berg- und hüttenmännische Monatshefte, BHM 162, Nr.3, 2017, 110-116

Kap. 4.3

[And08] D.M.Anderson: Design for Manufacturability & Concurrent Engineering, CIM Press, 2008
[Ble09] L.Blessing, A.Chakrabarti: DRM, a design research methodology, Springer, 2009
[Boo02] G.Boothroyd, P.Dewhurst, W.Knight: Product design for manufacture and assembly, Marcel Dekker, New York, 2002
[Bra99] J.G.Bralla: Design for Manufacturability Handbook, McGraw-Hill Handbooks, 2nd edition, 1999
[Bre91] H.-W. Breuer: Gestaltung beanspruchungs- und fertigungsgerechter Schmiedeteile. Konstruktion 43, 1991, 285–291
[Ehr13] K.Ehrlenspiel, H.Meerkamm: Integrierte Produktentwicklung, 5.Aufl., Carl Hanser Verlag, München, 2013
[Hoe10] G.Hoenow, T.Meißner: Entwerfen und Gestalten im Maschinenbau, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 3.Aufl., 2010
[Kra14] J.Kranz, D.Herzog, C.Emmelmann: Grundlegende Gestaltungsrichtlinien für die laseradditive Fertigung, AM Design&Engineering Symposium, Frankfurt, 26.11.2014
[Pah13] J.Feldhusen, K.-H.Grote (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre, Springer Vieweg, 2013
[Pol01] C.Poli: Design for Manufacturing, Butterworth-Heinemann, Boston, 2001
[Ram06] K.V. Ramana, M.Singh, A.Gupta, R.Dey, A.Kapoor, P.V.M. Rao: A manufacturability advisor for spun and rollformed sheet metal components. Int J Adv. Manuf. Technology 28, 2006, 249–254
[Ste08] G.Steinbichler: Methoden und Verfahren zur Optimierung der Bauteilentwicklung für die Spritzgießfertigung, Dissertation, Uni Erlangen-Nürnberg, 2008

[Zha05] Z.Zhao, J.J.Shah: Domain independent shell for DfM and ist application to sheet metal forming and injection molding, Computer-Aided Design 37, 2005, 881-898

Kap. 4.4

[Beh02] A. Behrens, H. Just, "Extension of the forming limits in cold and warm forging by the FE based fracture analysis with the integrated damage model of effective stresses", Journal of Materials Processing Technology 125-126, 2002, 235-241
[Buc02] B. Buchmayr, „Werkstoff- und Produktionstechnik mit Mathcad – Modellierung und Simulation in Anwendungsbeispielen", Springer Verlag Heidelberg-Berlin, 2002
[Fur10] D.U.Furrer, S.L.Semiatin: Metals Process Simulation, ASM Handbook Vol.22B, ASM International Ohio, 2010
[Ofe05] A. Ofenheimer, „Grenzen der Umformbarkeit -Numerische Ermittlung von Werkstoffversagen in Blechumformprozessen", Dissertation, TU Graz, 2005.
[Rüf07] G. Rüf, C. Sommitsch, B. Buchmayr: On the interaction of ductile damage and materials softening of a Ni-base alloy during hot deformation", Int. Journal of Material Research 98, (2007), 1146-1155.
[Wir09] D.Wirth: Von der Idee bis zum Bauteil, Plastverarbeiter Nov.2009, 15-18

Kap. 4.5

[Buc07] B. Buchmayr: Innovative Beiträge der Umformtechnik zum Leichtbau von Kraftfahrzeugen, BHM 152, Nr.5, 2007, 136-141.
[Buc15] B.Buchmayr, A.Walzl: Neue Leichtbaumöglichkeiten durch Selektives Laser Schmelzen, XXXIV. Verformungskundliches Kolloquium 2015, Leoben, Eigenverlag, S.13-17
[Deg09] H.P.Degischer, S.Lüftl: Leichtbau – Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten, Wiley-VCH Weinheim, 2009
[Fri13] H.E.Friedrich (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Springer Vieweg Heidelberg, 2013
[Hen 11] F.Henning, E.Möller (Hrsg.): Handbuch Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Fertigung, Carl Hanser Verlag München, Wien, 2011, ISBN: 978-3-446-42267-4
[Kle07] B. Klein: Leichtbau – Konstruktion. Vieweg-Verlag, 7. Auflage, 2007
[Kle06] M. Kleiner, S. Chatti, A. Klaus: Metal forming techniques for lightweight construction, Journal of Materials Processing Technology 177, 2006, 2 – 7
[Oec18] A.Öchsner: Leichtbaukonzepte – Eine Einführung anhand einfacher Strukturelemente für Studierende, Springer Vieweg, 2018
[Oeh72] G.Oehler, A.Weber: Steife Blech- und Kunststoffkonstruktionen, Springer Heidelberg, 1972
[Rei13] G.K.Reitter: Leichtbau durch Sicken, https://4ming.de/leichtbau-durch-sicken-fachbuch, abgefragt am 16.Okt.2020
[Wal18] A.Walzl: Potentiale und Restriktionen von Gitterstrukturen für die additive Fertigung, Dissertation, Montanuniversität Leoben, 2018
[Wie86] J.Wiedemann: Leichtbau Band 1. Elemente, Springer Verlag, Berlin, 1986

Kap.4.6

[Abe07] E.Abele, R.Anderl, H.Birkhofer, B.Rüttinger: EcoDesign: Von der Theorie in die Praxis, Springer, 2007
[Fua10] A.Fuad-Luke: EcoDesign: The Sourcebook, 3rd ed., Chronicle Books, 2010
[Gar20] M.A.Gardetti: Sustainability: Is it redefining the notion of luxury?, Springer, 2020
[Lie13] C.Liedtke, N.Ameli, J.Buhl, P.Oettershagen, T.Pears, P.Abbis: Wuppertal Institute Designguide & Tools, Wuppertal Inst. für Klima, Umwelt und Energie GmbH, WS46, Wuppertal, 2013
[Tis02] U.Tischner, E.Schmincke, F.Rubik, M.Prösler: Was ist EcoDesign? Ein Handbuch für ökologische und ökonomische Gestaltung, Hrsg. Umweltbundesamt Berlin, Birkhäuser Verlag, Frankfurt, 2002

Kap.4.7

[Han20] https://www.ing-hanke.de/know-how/schweissen-im-geregelten-und-ungeregelten-bereich/ aufgerufen am 14.8.2020

[Neu03] A. Neumann, R. Neuhoff: Schweißnahtberechnung im geregelten und ungeregelten Bereich Grundlagen mit Berechnungsbeispielen, DVS-Fachbücher, Band 132, 2003

5 Kriterien zur Werkstoffauswahl

Zusammenfassung: Die Auswahl geeigneter Werkstoffe gehört zu den wesentlichen Aufgaben des Konstrukteurs und bestimmt ganz entscheidend die Tragfähigkeit und Lebensdauer von Bauteilen, sowie deren wirtschaftliche Herstellung. Es werden die Werkstoffhauptgruppen verglichen und einige wichtige Konstruktionswerkstoffe mit ihren typischen Eigenschaften behandelt. Im Vordergrund steht das Auswahlkonzept nach M.F.Ashby bzw. die Software CES. Es folgen Betrachtungen zur Auswahl von Werkstoffen nach Materialkosten, Verarbeitung und Ökologie. Werkstoffe, die primär für Kunstobjekte Verwendung finden wird auch ein Subkapitel gewidmet.

5.1 Werkstoffklassen und ihre Eigenschaften

Grundsätzlich gibt es mehrere Möglichkeiten Werkstoffe zu klassifizieren. Die von Werkstoffwissenschaftlern bevorzugte Einteilung ist jene, entsprechend dem atomistischen/molekularen Aufbau und der Art der atomaren Bindungskräfte. Allein schon daraus gliedern sich die Werkstoffe in Metalle, nichtmetallisch-organische Werkstoffe wie Kunststoff und Gummi und in nichtmetallische anorganische Werkstoffe wie Keramiken und Gläser. Werden Werkstoffe unterschiedlicher Werkstoffgruppen miteinander kombiniert, so spricht man von Verbundwerkstoffen oder Hybridwerkstoffen. Diese Einteilung der Werkstoffe in Werkstoffhauptgruppen ist in Abb. 50 dargestellt und gilt im Allgemeinen. Metalle sind nach wie vor die wichtigsten Werkstoffe der Technik, die gerne auch nach ihrer Dichte in Leicht- und Schwermetalle gegliedert werden.

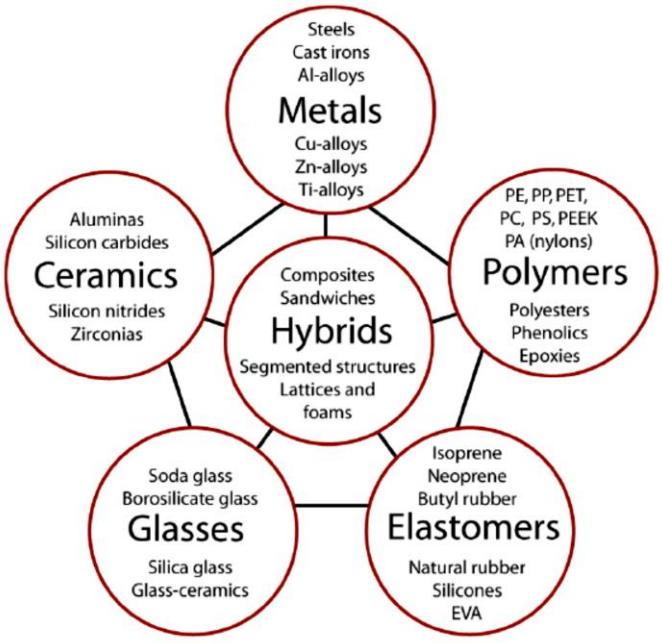


Abb. 50: Werkstoffhauptgruppen nach M.F.Ashby

Darüber hinaus gibt es eine Einteilung in Struktur- und Funktionswerkstoffe. Strukturwerkstoffe oder auch Konstruktionswerkstoffe werden zum Bau von Komponenten verwendet, die je nach Belastung und Design meist mechanischen Spannungen ausgesetzt sind. Diese Werkstoffe werden für

Anwendungen im Maschinen- und Anlagenbau, Brückenbau, Hochbau, in der Energietechnik, im Automobilbau u.a.m. eingesetzt und erfüllen dabei eine „tragende“ Rolle.
Funktionswerkstoffe hingegen besitzen besondere chemisch-physikalische Eigenschaften (elektrische, magnetische, akustische, optische, biologisch-chemische), wodurch bestimmte Funktionen erfüllt werden können. Beispiele dafür sind piezoelektrische Werkstoffe, Formgedächtnislegierungen, elektrische Leitwerkstoffe, Magnetwerkstoffe u.a.m.
Aufgrund der für jede Hauptgruppe spezifischen, atomaren Bindungsverhältnisse hat jede Werkstoffhauptgruppe gruppenspezifische Eigenschaften, die sie ganz deutlich von den anderen unterscheiden. Diese charakteristischen Eigenschaftsmerkmale sind in Tabelle 13 als Überblick dargestellt. Für die Auswahl von Werkstoffen sollten diese Eigenschaftsprofile jederzeit geistig abrufbar sein. Die Gegenüberstellung erlaubt es auch, im Zuge des Auswahlprozesses möglichst rasch Werkstoffhauptgruppen auszuschließen, wie bspw. bei Fragen nach Leitfähigkeit, Duktilität, Dichte u.a.m.
Die Eigenschaftsunterschiede in den drei Hauptgruppen Metall, Polymere und Keramiken können in Form von Verbundwerkstoffe je nach Wunsch und ganz gezielt vereint werden. Je nach Geometrie eines Hybrid- oder Verbundwerkstoffs unterteilt man in:

- Teilchenverbunde,
- Faserverbunde,
- Schichtverbunde,
- Durchdringungsverbunde und
- Strukturverbunde.

Betrachtet man den Aufbau eines PKWs, dann besteht ein Auto aus ca. 12.000 Teilen mit etwa 1000 unterschiedlichen Materialien aller Werkstoffhauptgruppen. Der Grund für diese Werkstoffvielfalt liegt vermutlich in der Materialoptimierung für jede Komponente inkl. Fertigungstechnologie. Dieses Maßschneidern ist wegen der hohen Stückzahlen (>10.000 Stück) auch wirtschaftlich vertretbar. Für Trainingszwecke zum Prozessverständnis der Werkstoffauswahl bieten sich sehr viele, auch gut dokumentierte Beispiele in der Fachliteratur über den Fahrzeugbau.
Innerhalb der Werkstoffhauptgruppen lassen sich Werkstoffklassen, Subklassen und Einzelwerkstoffe kategorisieren, siehe Abb. 51, für aushärtbare Al-Legierungen.

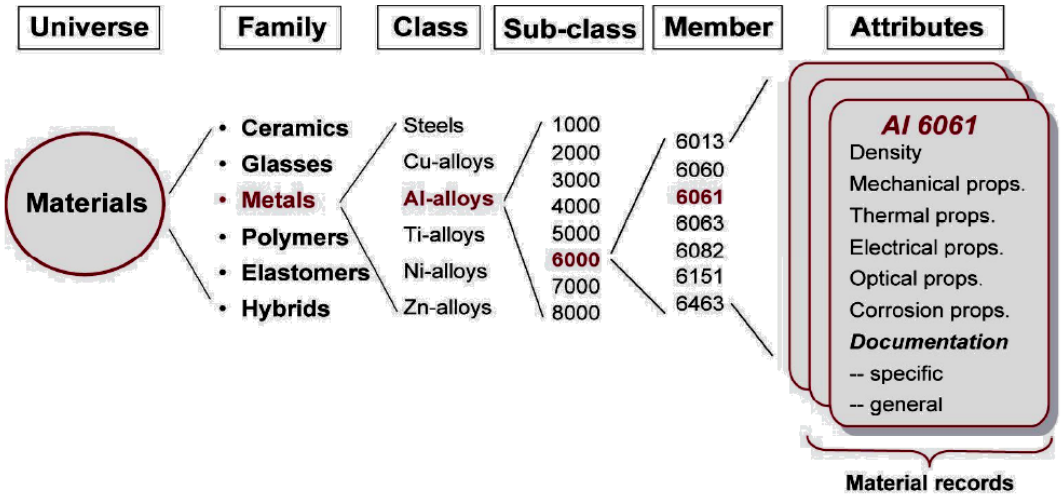


Abb. 51: Hierachische Darstellung der Werkstoffklassen nach Mike Ashby

Werkstoff-gruppe	Vorteile	Nachteile
Metalle	• hohe Zähigkeit • hoher E-Modul • hohe Festigkeit • hohe Verschleißfestigkeit • gute thermische und elektrische Leitfähigkeit • gute Gieß-, Umform-, Schweißbarkeit • unkompliziertes Konstruieren	• teilweise hohe Dichte • teilweise anfällig gegen Korrosion • schlechte Dämpfungseigenschaften • max. Betriebstemperatur unter 1000°C
Polymere	• geringe Dichte • geringe E-Module • relativ gute Korrosionsbeständigkeit • gute Temperaturwechselbeständigkeit • gute elektrische Isolationseigenschaften • gute Dämpfungseigenschaften • gute Einfärbbarkeit • mögliche Transparenz • große konstruktive Gestaltungsfreiheit • einfache und wirtschaftliche Fertigung komplizierter Massenteile	• geringe Festigkeit • geringe Warmfestigkeit • geringe Bauteilsteifigkeit • zum Teil niedrige Verschleißfestigkeiten • max. Betriebstemperatur unter 200°C • Brennbarkeit
Keramik	• hohe Verschleißfestigkeit • hohe Warmfestigkeit • gute Korrosionsbeständigkeit • gute elektrische Isolationseigenschaften • geringe thermische Ausdehnung • hohe max. Betriebstemperatur >1000°C möglich • zum Teil gute Gleiteigenschaften • relativ niedrige Dichte	• geringe Zähigkeit • Probleme bei der Fertigung • hohes Know-How bei der konstruktiven Gestaltung notwendig
Verbund-werkstoffe	• hohe Festigkeit • hohe Steifigkeit • geringes spezifisches Gewicht • gute chemische Beständigkeit • hohe Verschleißfestigkeit möglich • belastungsgerechte Optimierung von Bauteilen möglich • hohe Flexibilität in den Eigenschaften durch Wahl der Komponenten	• relativ geringe Zähigkeit • in der Regel Anisotropie der Werkstoff-eigenschaften • hohe Fertigungskosten bei großen und komplizieren Bauteilen • Probleme beim Herstellen, Fügen u. Recycling • hohes Know-How bei der konstruktiven Gestaltung notwendig

Tabelle 13: Typische Eigenschaften der Werkstoffhauptgruppen

Im Folgenden werden einige Werkstoffklassen vorgestellt, die mengenmäßig eine hervorragende Rolle spielen und dadurch auch eine hohe Bedeutung als Strukturwerkstoff für technische Branchen haben. Als Überblick zeigt Abb. 52 die jährlichen Produktionsmengen technische bedeutsamer Werkstoffe. Entsprechend dieser Bedeutungslage werden in den folgenden Kapiteln nur die wichtigsten Werkstoffklassen herausgegriffen und bedeutsame Subklassen inklusive ihrer besonderen Merkmale hervorgehoben. Damit ergeben sich automatisch auch wesentliche Kriterien für die Werkstoffauswahl. Auf eine detaillierte Beschreibung der Werkstoffe wird hier bewusst verzichtet, weil es im Prinzip ausreichende Werkstoffkunde-Lehrbücher gibt. Auf ergänzende Informationen, lehrreiche publizierte Fallbeispiele, sowie vergleichende Darstellungen von Alternativen für vorgegebene Anwendungsfälle,

wird im Text verwiesen. In diesem Zusammenhang sei auch auf die 50 Fallbeispiele im Kapitel 10 hingewiesen.

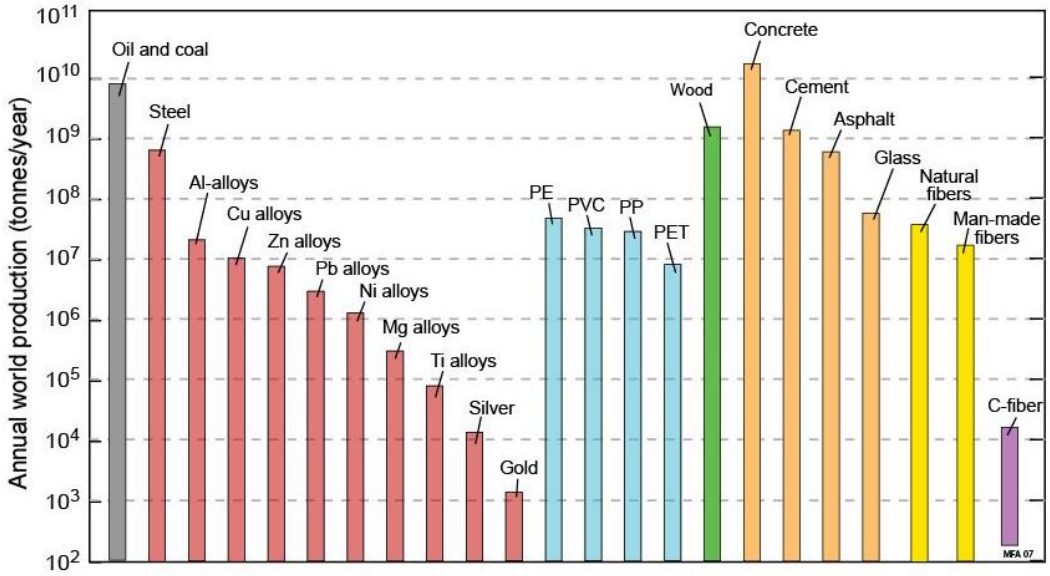


Abb. 52: Jährliche Produktionsmenge wichtiger Strukturwerkstoffe (Rohdaten nach Asby, aktualisiert 2020)

Anlässe für die Durchführung einer Werkstoffauswahl können sein:

- Entwicklung eines neuen Produktes,
- Verbesserung eines bestehenden Produktes,
- Maßnahme nach einem Schadensfall,
- Änderung der Konstruktion oder der Betriebsbedingungen,
- Änderung der Herstell- bzw. Fertigungsverfahren oder
- Änderung der Kostenstruktur.

Im Zuge des Auswahl- bzw. Entscheidungsprozesses sind vielfältige Gesichtspunkte zu beachten. Insgesamt stehen dem Konstrukteur bzw. dem Anwender ca. 50.000 Werkstoffe zur Verfügung. Die wichtigsten Aspekte für die Werkstoffauswahl werden in diesem Kapitel behandelt.
Als effiziente Suchstrategie hat sich bewährt, zunächst zwischen Pflicht- und Wunschanforderungen zu unterscheiden und sehr selektive Kennzahlen zu verwenden, die sehr schnell die Zahl der möglichen Werkstoffkandidaten reduzieren. Beispiele für einfache und zusammengesetzte Kennzahlen können sein:

- **Min./max. Anwendungstemperatur**
- **belastungsabhängige Kenngrößen** (Leichtbaukennzahlen für Biegung, Torsion, Innendruck etc., sowie Kennzahlen für Energiespeicherung, Sicherheit gegen spröden Bruch oder Leck vor Bruch, Härte für Verschleißbeständigkeit etc.)
- **Kenngrößen für Korrosion** (z.B. PRE(N) für Widerstand gegen Lochfraß)
- **Formfaktoren von Querschnitten** (z.B. Vollstab vs. Rohr auf Biegung/Torsion im Hinblick auch auf mögliche erhöhte Steifigkeit)
- **verarbeitungstechnische Kennzahlen** (z.B. Schweißeignung mittels Kohlenstoffäquivalent, Biegeradien/Kohlenstoffgehalt für Umformung, Schmelztemperatur für Gießbarkeit, Härte für Zerspanbarkeit etc.)

- **Umweltrelevante Kennzahlen** (Energieaufwand, CO_2-Emission, Recyclingquote, Toxizität etc.)

5.1.1 Besondere Stahlgruppen und Eisengusswerkstoffe

Stähle sind unbestritten die wichtigsten Strukturwerkstoffe. Seit mehr als 3000 Jahren ist der Werkstoff Stahl Grundlage für den technischen Fortschritt und die Verbesserung der Lebensqualität. Der ständige Fortschritt der Werkstoffentwicklung führte zu einer Vielfalt von Stahlsorten (ca. 2000), die in vielen Endprodukten eine dominante Rolle spielen. Die Einteilung der Stähle kann nach unterschiedlichen Kriterien (Güteklasse, Verwendungszweck, WB-Zustand, Gefügeausbildung, Herstellverfahren u.a.m.) erfolgen.
Die wesentlichsten Leistungsmerkale des Werkstoffs Stahl sind:

1. Vielfalt der Lieferformen und Bauteilgrößen (einige Zehntel mm bis einige Meter)
2. Vielfalt der Eigenschaften
3. große Variations- und Anpassungsmöglichkeit an die jeweilige Anwendung
4. großer Anwendungstemperaturbereich (von -200°C bis 1000“C)
5. starke Eigenschaftsänderung allein durch unterschiedliche Wärmebehandlungsparameter
6. günstige Kombination von Festigkeit und Zähigkeit (damit hohe Fehlerunempfindlichkeit)
7. vielfältige Verarbeitbarkeit und damit wirtschaftliche Fertigungsmöglichkeiten
8. Günstiges Preis-Leistungs-Verhältnis
9. Problemloses Recycling (nahezu 100%)
10. Umweltfreundlichkeit
11. Gesicherte Rohstoffversorgung

Von dieser Liste ist insbesondere Punkt 6 hervorzuheben. Im Vergleich zu allen anderen Werkstoffgruppen haben Stähle bei hohen Festigkeiten auch hohe Bruchzähigkeiten, siehe Abb. 53. Dieser Umstand macht feinkörnige oder vergütete Stähle zu den bestgeeigneten Werkstoffen für Sicherheitsbauteile oder bei Bauteilen mit hoher stoßartiger Belastung (Fahrwerk von Flugzeugen, Kanonenrohre u.v.a.m.). Darüber hinaus ergeben sich Vorteile für die Fehlertoleranz, weil die kritische Rissgröße deutlich über denen anderer Werkstoffe liegt. Dadurch wird auch die Prüfbarkeit bei der zerstörungsfreien Prüfung (bspw. von Schweißverbindungen) erleichtert. Bei innendruckbelasteten Komponenten tritt eher ein Leck vor einem spontanen Bruch auf. Des Weiteren zeigen Stähle im Allgemeinen eine geringere Kerbempfindlichkeit.

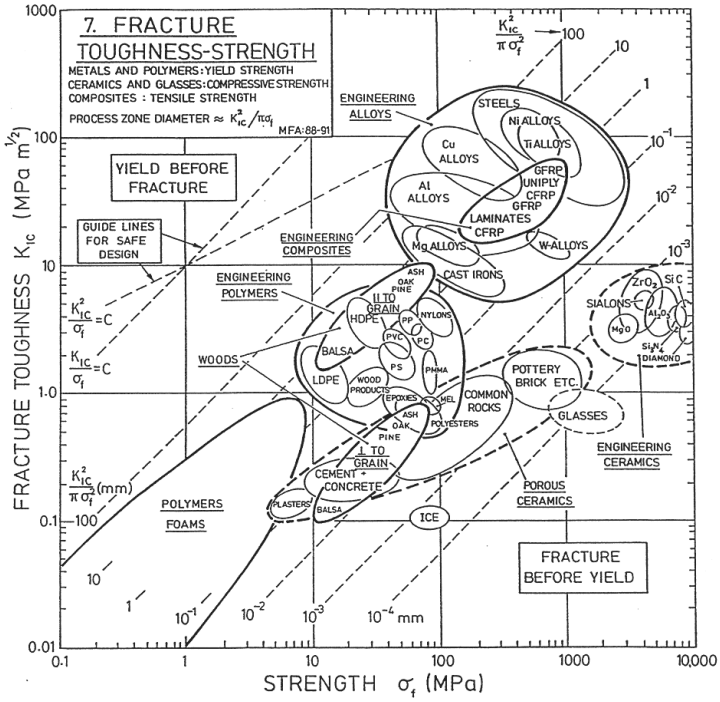


Abb. 53: Ashby-Karte Bruchzähigkeit über Festigkeit zeigt optimale Werkstoffe rechts oben im Diagramm

5.1.1.1 Baustähle

Diese Stähle erfahren üblicherweise keine Wärmebehandlung beim Verarbeiter/Anwender und die geforderten Gebrauchseigenschaften sind auf die Streckgrenze, Schweißeignung und Kaltumformbarkeit gerichtet.
Für die Auswahl entscheidend kann die Schweißeignung oder die Notwendigkeit zur Vorwärmung sein, wofür als Kenngröße das Kohlenstoffäquivalent CEV, das sich aus der chemischen Zusammensetzung nach IIW mit

$$CEV = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$$

berechnen lässt.
Steht die spanende Bearbeitung im Vordergrund, so werden sog. Automatenstähle verwendet.
Mit Ende der 80er-Jahre und der Einführung der Feinkornbaustähle wurden die konventionellen Baustähle zurückgedrängt. Durch die Feinkornhärtung kann sowohl die Festigkeit wie auch die Zähigkeit erhöht werden. Damit ist es möglich den C-Gehalt zu senken, wodurch die Schweißeignung und Umformbarkeit deutlich verbessert wird. Die Einstellung des feinkörnigen Gefüges geschieht durch ein thermo-mechanisches Walzen und durch die Zugabe von Mikrolegierungselementen, wie Ti, Nb und V [Tam88, Hub93, Buc17]. Durch Absenkung schädlicher Elemente (P, S) stehen Baustähle zur Verfügung, die eine Streckgrenze bis 1000 MPa erreichen. Damit können Anwendungen, wie Pipelines, Mobilkräne, Brücken wesentlich leichter gebaut werden.
Zur Herstellung von Schrauben, Bolzen, Nieten, Hülsen etc. werden bevorzugt Kaltstauch- und Kaltfließpress-(KFP)-Stähle verwendet. Diese zeichnen sich durch einen niedrigen C-Gehalt und Bor im ppm-Bereich aus. Zur Einformung des plattenförmigen Zementits/Perlits in Kugelform und damit besseren Pressbarkeit wird eine GKZ-Glühung bei Temperaturen von etwa 700°C durchgeführt.
Ausscheidungshärtende ferritisch-perlitische (AFP)-Stähle sind als Alternativen für Vergütungsstähle entwickelt worden. Sie werden durch eine kontrollierte Abkühlung (BY-Behandlung) mit einer

Haltephase bei ca. 600°C eingestellt, wobei sich Vanadinkarbide ausscheiden und dadurch eine höhere Festigkeit erreicht wird.

Mengenmäßig dominieren kaltgewalzte Feinbleche den gesamten Stahlbereich. Sie werden im Automobilbau für die Karosserie, für Maschinengehäuse (Kühlschränke, Waschmaschinen, Computer u.a.) und vielen anderen Anwendungen benötigt. Neben dem Abkanten und Stanzbiegen werden diese Stähle auch durch das Tief- und Streckziehen in die gewünschte Form verarbeitet. Die wichtigsten Kenngrößen sind die Bruchdehnung, die senkrechte Anisotropie (r-Wert) als Maß für die Tiefziehbarkeit und der Verfestigungskoeffizient (n-Wert) für die Streckziehbarkeit.
Für die Vielfalt an unterschiedlichen Anforderungen im Karosseriebau wurden in den letzten Jahrzehnten besondere Feinblechgüten, wie IF-Stähle, Dualphasenstähle, TRIP-Stähle und pressgehärtete Stähle entwickelt. Abb. 54 zeigt in Form der sog. „Bananenkurve“ die Lage der verschiedenen Feinbleche.
Aufgrund der spezifischen Anforderungen im Automobilbau mit gewünschten Lebensdauern um zehn Jahre hat die Oberflächenveredelung der Feinbleche ebenso eine breite Anwendung gefunden.
Schmelztauchverzinken und elektrolytisches Verzinken sind die gängigsten Korrosionsschutzmethoden. In jüngster Zeit haben sich Zn-Al-Mg-Systeme als best-geeignete Oberflächenschutzsysteme etabliert.
Völlig andere Anwendungsbereiche werden durch Stahldrähte von weich bis hochfest abgedeckt.
Üblicherweise haben Stahldrähte für Spanndraht, Seile, Reifencord und Sägedrähte für Si-Wafer einen C-Gehalt um 0,8% und Cr-Zusatz, während Drähte für Kaltfließpressteile einen C-Gehalt von 0,2 bis 0,4% aufweisen.

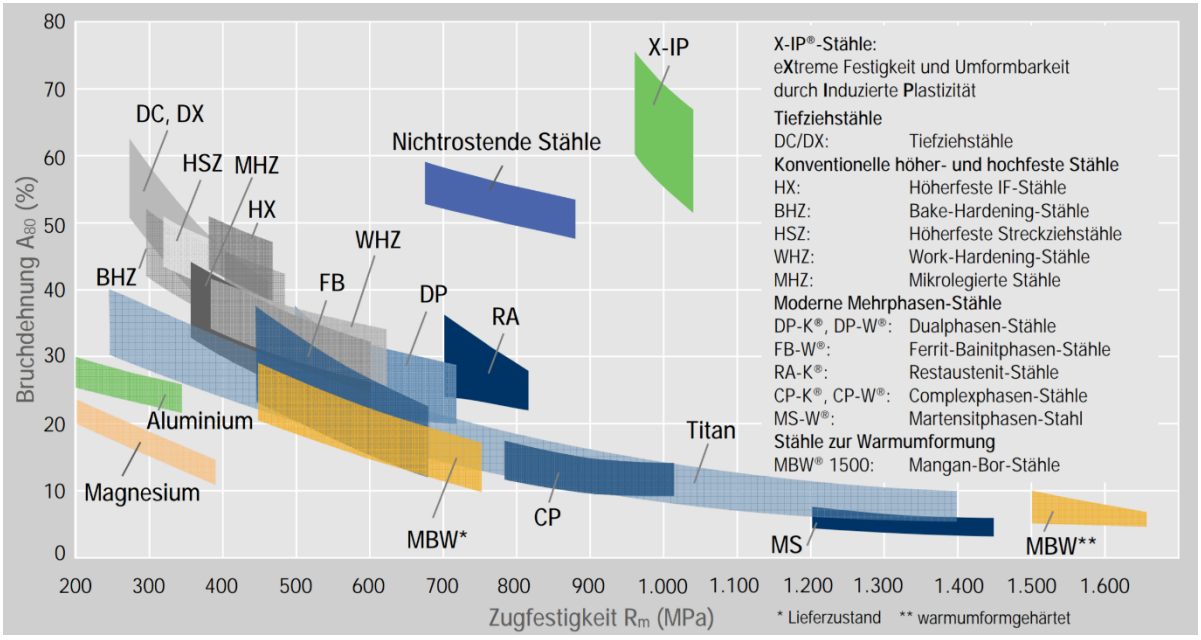


Abb. 54: Diagramm Bruchdehnung über Zugfestigkeit mit der Lage verschiedener Feinblechwerkstoffe (Bildquelle: ThyssenKrupp)

5.1.1.2 Vergütungsstähle

Durch das Vergüten (Härten und Anlassen) von Stählen stellt sich ein sehr feines, homogenes Gefüge ein, das eine hohe Festigkeit und eine hohe Zähigkeit aufweist. Eine charakteristische Größe ist die Härtbarkeit, die sowohl die Aufhärtung und die Einhärtung umfasst. Während die Aufhärtung, also die max. Härte an der Oberfläche, primär vom Kohlenstoffgehalt abhängt, wird die Einhärtetiefe vom Legierungsgehalt an Cr, Mo, B u.a. bestimmt. Grundlage für die Optimierung und Auswahl der Vergütungsstähle ist das sogenannte Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild, indem die Umwandlungskinetik als Funktion der Abkühlgeschwindigkeit dargestellt ist. Prinzipiell sollte beim Abschrecken von der Austenitisierungstemperatur eine vollständig martensitische Mikrostruktur entstehen. Bei unlegierten Stählen erfolgt die Umwandlung sehr rasch, wodurch nur etwa 5mm 100% martensitisch werden (Schalenhärtung). Daher ist bei Teilen, die einen größeren Querschnitt haben, ein niedriglegierter Stahl zu wählen, um auch im Kern noch eine ausreichend hohe Härte zu erreichen. Ausgründen der Verzugs- und Härterissgefahr ist auch eine möglichst langsame Abkühlung anzustreben, wozu ebenfalls Legierungselemente notwendig sind. Neben der mechanischen Prüfung ist insbesondere die Überprüfung der Härtbarkeit sinnvoll, die mit dem Stirnabschreck- oder Jominy-Versuch durchgeführt wird.
Bei der Auswahl eines geeigneten Vergütungsstahles aus der langen Liste der in EN10083 genormten Vergütungsstähle sind folgende Auswahlkriterien entscheidend:

- Anforderungen an den Mindestwert der Streckgrenze
- Äquivalenter Bauteildurchmesser
- Erforderliche Kerbschlagzähigkeit
- Höhe der Dauerfestigkeit
- Verfügbarkeit und Stahlpreis

Das Diagramm Streckgrenze im vergüteten Zustand über dem Durchmesserbereich in Abb. 55 ist für eine grobe Auswahl recht nützlich.
Häufig verwendete Vergütungsstähle sind Ck45, 25CrMo4 und 42CrMo4 – allein aufgrund der breiten Verfügbarkeit, was insbesondere für Kleinstmengenabnehmer wichtig ist.

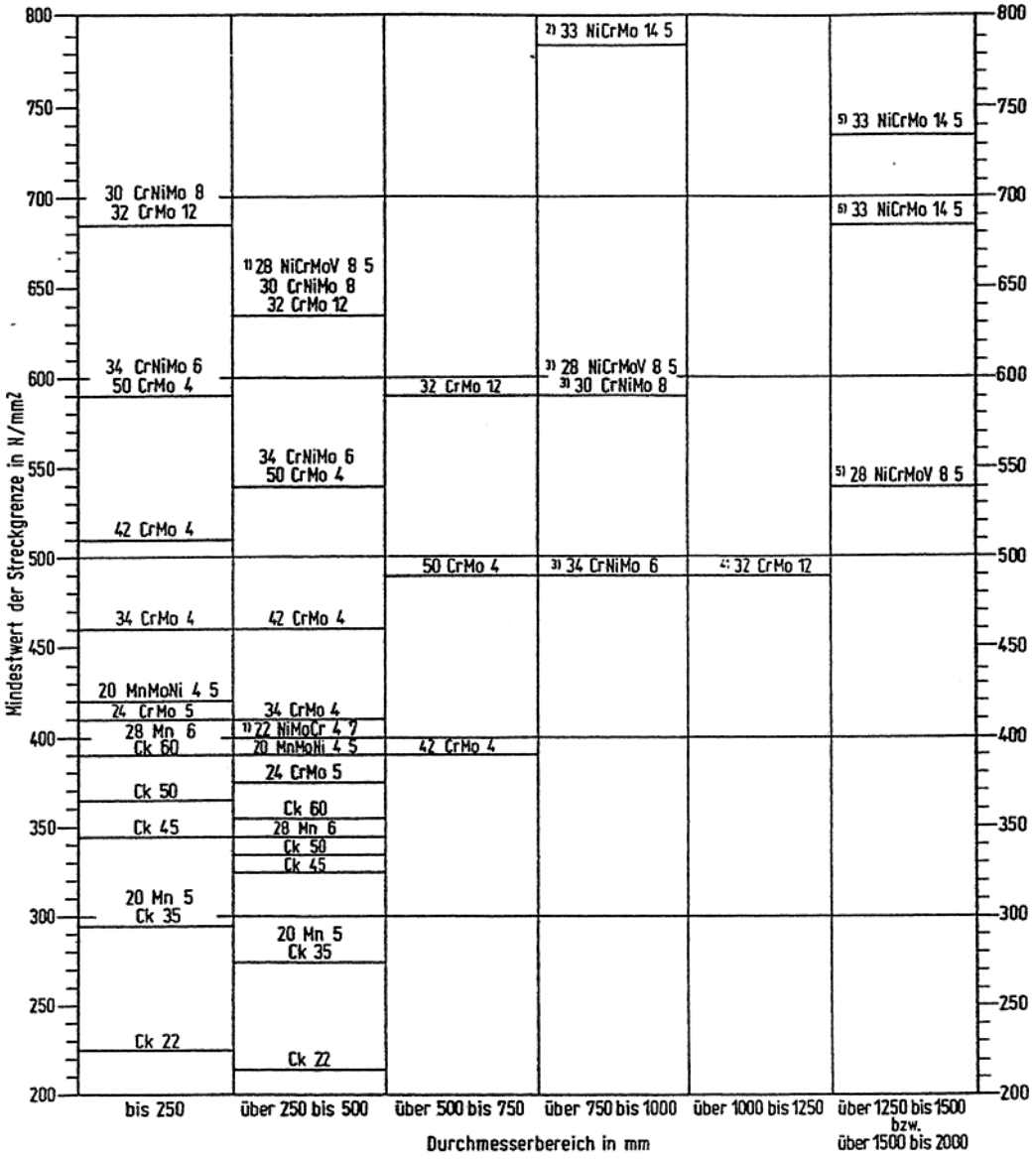


Abb. 55: Erreichbare Mindeststreckgrenzen in Abhängigkeit vom Bauteildurchmesser für verschiedene Typen von Vergütungsstählen

Vergütungsstähle erreichen teilweise sehr hohe Festigkeiten (um 1500MPa). Dazu ist wichtig zu wissen, dass mit zunehmender Festigkeit die Zähigkeit ebenso bedeutend ist und ganz besonders auf die Reinheit der Stähle zu achten ist.

5.1.1.3 Kaltzähe Stähle

Da die Kerbschlagzähigkeit von ferritischen Baustählen bei Temperaturen im Bereich von -20 bis -50 Grad Celsius sehr rasch abfällt und das duktile Werkstoffverhalten dann zu einem spröden Verhalten wechselt, sind bei Anwendungen im Tieftemperaturbereich Maßnahmen notwendig, damit bei der Gebrauchstemperatur auch ein ausreichendes Zähigkeitsniveau vorliegt. Dazu gehören die Absenkung des Kohlenstoffgehaltes, die Kornfeinung oder eine Vergütung und das Zulegieren von Nickel.
Bis -200°C können Stähle mit 9% Ni verwendet werden, darunter bis zum absoluten Nullpunkt sind nur mehr austenitische CrNi-Stähle einsetzbar.

Typische Anwendungsgebiete für kaltzähe Stähle sind Pipelines, kältetechnische Anlagen, Flüssiggas-(LNG)-Behälter, Treibstofftanks für Raketen und die Supraleiter-Technologie.

5.1.1.4 Stähle für große Schmiedestücke

Große Wellen für Dampf- und Gasturbinen haben nicht selten einen Durchmesser von einem Meter und erreichen Umdrehungszahlen von 1500 U/min. Aus diesem Grunde werden höchste Anforderungen an die Durchhärtbarkeit, Gefügehomogenität und Stahlreinheit gestellt. Die Durchhärtbarkeit wird mit Ni-Cr-Mo-V-Vergütungsstähle erreicht. Zur Vermeidung einer Anlassversprödung werden möglichst geringe Gehalte an P, Sb, Sn, As angestrebt und ca. 0,5%Mo zulegiert. Metallurgische Maßnahmen sind zusätzlich eine Vakuumbehandlung, Tiefentschwefelung und das ESU-Umschmelzen, wodurch ein sehr homogener Gefügezustand erreicht wird. Bezüglich eines Kaltstarts einer Turbine sollte der temperaturabhängige Bruchzähigkeitswert bei Raumtemperatur schon ausreichend hoch sein. Außerdem erfordert die zerstörungsfreie Prüfung großer Wellen besonderer Kompetenz, um noch Fehler mit einem Millimeter im Zentrum der Welle zu finden.

5.1.1.5 Maraging-Stähle

Der englische Begriff „maraging“ inkludiert martensite und aging, was übersetzt martensitaushärtend heißt. Wegen seiner exzellenten mechanischen Eigenschaften wird dieser Stahltyp auch als „König der Stähle“ bezeichnet. Mit niedrigen C-Gehalt, 18%Ni, 9%Co, 5%Mo und ca.1%Ti erreicht dieser Stahl Zugfestigkeitswerte um 2000MPa. Dazu ist ein Lösungsglühen bei ca. 850°C und ein Auslagern bei ca. 480°C notwendig, wodurch Bauteile auch sehr verzugsarm produziert werden können. Es gibt keinen anderen Werkstofftyp der in der Kombination Festigkeit und hoher Zähigkeit dem Maraging-Stahl überlegen wäre. Die Fahrwerke großer Passagierflugzeuge, Armierungen für Kaltfließpresswerkzeuge, hochbelastete Druckgießformen oder schnelllaufende Zentrifugen würden ohne diesem Stahltyp nicht realisierbar sein. Nichtmetallische Einschlüsse (NME) werden, wie bei im vorigen Kapitel beschrieben, durch eine ESU-Behandlung eliminiert [Wue04].

5.1.1.6 Oberflächenhärtbare Stähle

Belastungen durch Reibung, Verschleiß, Korrosion und Ermüdung wirken an der Oberfläche von Bauteilen, wozu spezielle Oberflächenbehandlungen herangezogen werden. Zur Verlängerung der Lebensdauer von Werkstücken werden entweder die Randschichten gehärtet oder thermochemische Diffusionsbehandlungen durchgeführt. Zum Randschichthärten werden flamm- und induktionshärtbare Stähle mit C-Gehalten zwischen 0,35 und 0,7% und evtl. Cr- und Mo-legiert eingesetzt. Es entsteht eine mm-breite Martensitschicht mit einer vom C-Gehalt abhängigen Härte und positiv wirkende Druckeigenspannungen.
Zu den wichtigsten thermomechanischen Methoden zur Oberflächenhärtung zählen das Einsatzhärten, das Nitrieren und zu geringerem Anteil das Borieren. Einsatzstähle, wie der häufig verwendete Stahl 16MnCr5, werden zunächst durch Fließpressen in Form gebracht und werden dann meist mit gasförmigen Medien aufgekohlt. Auswahlkriterien innerhalb der Gruppe der Einsatzstähle umfassen die Härtbarkeit, insbesondere bei größeren Werkstückabmessungen und bei höheren Zähigkeitsanforderungen sind Ni-Zusätze sinnvoll.
Nitrierstähle haben einen C-Gehalt von etwa 0,3% und bilden beim Nitrieren an der Oberfläche eine ca. 20µm dicke durchgehende Nitridschicht (Fe_4N und Fe_2N) und eine darunterliegende Diffusionszone mit einzelnen Nitridausscheidungen. Zusätzlich werden nitridbildende Elemente, wie Cr, Al, Ti und V zulegiert. Die schwarz glänzende Nitridschicht hat typische Eigenschaften einer Keramikschicht, wie eine hohe Härte und einen erhöhten Korrosionswiderstand. Die Auswahl der Nitrierstähle ist abhängig von der Kernfestigkeit, Anlassbeständigkeit oder von der gewünschten Randhärte. Die Nitriertemperatur liegt bei ca. 550°C, weshalb lange Glühdauern erforderlich sind. Aufgrund des Umstandes, dass keine Phasenumwandlung stattfindet, ist die Gefahr eines Verzuges sehr gering.

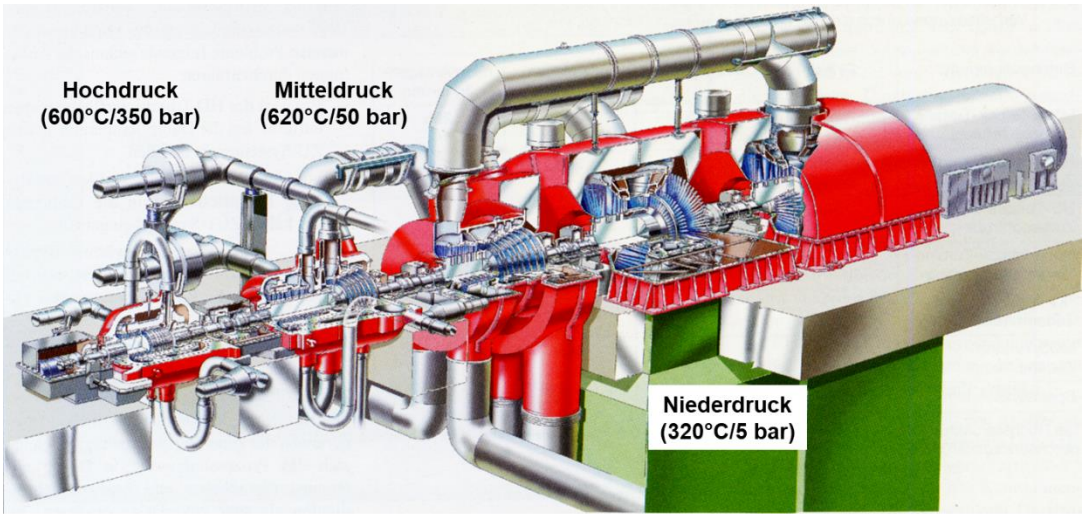
Wird eine erhöhte Säurebeständigkeit verlangt, dann bietet sich das Borieren an. Einen Vergleich der Eigenschaften der drei Verfahren Einsatzhärten, Nitrieren und Borieren zeigt Tabelle 14, die als Auswahlhilfe verwendet werden kann.

Verfahren / Eigenschaft	Einsatzhärten Karbonitrieren	Nitrieren Nitrocarburieren	Borieren
Anlaßbeständigkeit	200°C	400°C	700°C
Schlag- und Punktbelastbarkeit	gut	mäßig bis gering	mäßig bis gering
Umlaufbiegewechselfestigkeit	gut	gut	mäßig bis gering
Lauf- und Verschleißeigenschaften	mittel	gut	gut
Korrosionswiderstand	schlecht	gut	mäßig
Säurebeständigkeit	schlecht	schlecht	mäßig bis gut

Tabelle 14: Eigenschaftsvergleich thermochemischer Oberflächenbehandlungen

5.1.1.7 Warmfeste Stähle

Für den Einsatz von Stählen in Wärmekraftanlagen sind vor allem Warmfestigkeit, Zeitstandfestigkeit für Auslegungszeiten von 10 bis 15 Jahren, Korrosionsverhalten, Zähigkeit und Schweißeignung wichtig. Die Beanspruchungen einer Dampfturbine sind jedoch sehr verschieden, wie Abb. 56 zeigt.



- Kriechbeanspruchung
- thermische Ermüdung
- Ermüdung/Kriechermüdung LCF
- Oxidation
- Schwingungsrisskorrosion
- Spannungsrisskorrosion
- Tropfenschlagerosion
- HCF-Beanspruchung

Abb. 56: Beanspruchungsunterschiede im Hochdruck-, Mitteldruck und Niederdruckteil einer Dampfturbine mit den zugehörigen relevanten Werkstoffkenngrößen

Hohe Warmfestigkeit und Zeitstandfestigkeit wird durch das Zulegieren der Karbidbildner Cr, Mo und V erreicht. Ab einer bestimmten Grenztemperatur werden die inelastischen Dehnungen zeitabhängig – man spricht vom Kriechen. Dadurch ist ein Übergang in der Auslegung von Warmstreckgrenze auf Zeitstandfestigkeit notwendig. Start-/Stop- und Lastwechsel führen zu eine zyklischen Dehnwechselbelastung (LCF … low cycle fatigue). Das LCF-Ermüdungsverhalten wird in doppellogarithmischen Manson-Coffin-Diagrammen (Dehnschwingbreite über Lastspielzahl) dargestellt. Die Auswahl geeigneter Stähle erfolgt nach der Zeitstandfestigkeit und Schwingfestigkeit. Bis ca. 580°C wird üblicherweise der martensitische Stahltyp X20CrMoV12-1 verwendet. Seit etwa 10 Jahren ist der 9%-Chromstahl (P91(USA) oder E911(EU) oder Nf616(JP)) mit Nb- und V-Zusatz bis zu 620°C im Einsatz. Für höhere Dampftemperaturen würden noch hochlegierte austenitische Stähle zur Verfügung stehen. Aufgrund der schlechteren Wärmeleitfähigkeit und des höheren Wärmeausdehnungskoeffizient haben die austenitische Stähle jedoch entscheidende Nachteile.

5.1.1.8 Hochlegierte rostfreie Stähle

Stähle mit einem Chromgehalt über 12% gelten als nichtrostend. Sie werden je nach chemischer Zusammensetzung und Gefügeausbildung in vier Gruppen unterteilt. Abb. 57 zeigt die Lage der ferritischen, austentitischen, martensitischen und Duplexstähle im sog. Schäffler-Diagramm.

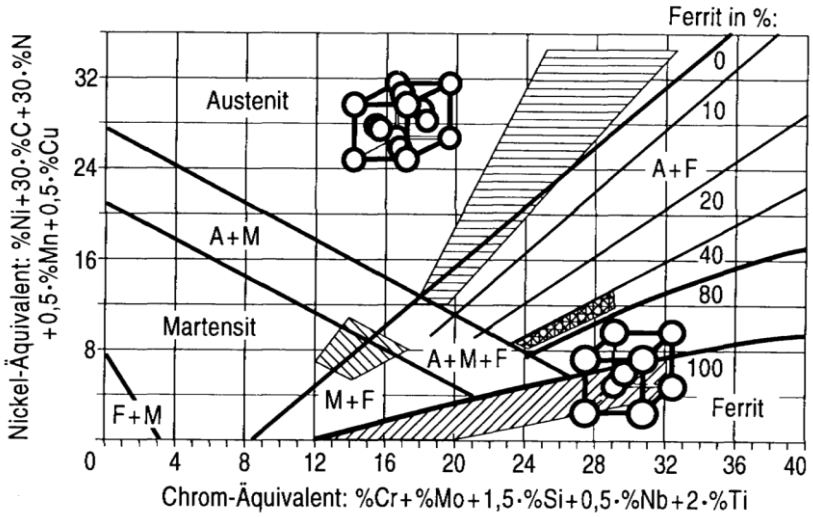


Abb. 57: Das Schäffler-Diagramm mit der Lage der vier nichtrostenden Stahlgruppen

5.1.1.8.1 Ferritische rostfreie Stähle

Ferritische rostfreie Stähle werden teilen sich in zwei Gruppen. Bei der Stahlgruppe mit 11 bis 13% Chrom ist der Korrosionswiderstand unter atmosphärischen Bedingungen oder in wässrigen Medien begrenzt. Die zweite Gruppe hat einen Cr-Gehalt von etwa 17%, wodurch eine bessere Korrosionsbeständigkeit erzielt wird. Verstärkt wird dieser Effekt durch die Zugabe von ca. 1%Mo und den karbidbildenden Elementen Ti und Nb, die den Kohlenstoff abbinden.
Die typischen Eigenschaften der ferritischen rostfreien Stähle sind:

- gute Warm- und Kaltumformbarkeit,
- magnetisch,
- nicht härt- und nicht vergütbar,
- hohe Beständigkeit gegen chlorid-induzierte Spannungsrisskorrosion
- bedingte Schweißeignung

5.1.1.8.2 Martensitische rostfreie Stähle

Die martensitischen rostfreien Stähle mit 12 bis 18% Cr werden aus dem austenitischen Bereich abgeschreckt, d.h. gehärtet, so erhalten die Stähle ein martensitisches Gefüge. Die Vergütungsbehandlung umfasst das Härten und anschließende Anlassen auf Temperaturen von 500-750°C, dadurch nimmt die Festigkeit ab und die Zähigkeit zu.
Diese Stahlgruppe besitzt folgende Eigenschaften:

- Hohe Verschleißfestigkeit und Schneidhaltigkeit
- Gute Umformbarkeit

Stähle mit einem C-Gehalt bis 0,05%, 13%Cr und 4% Ni werden als weichmartensitische Stähle bezeichnet. Sie sind besonders kavitations- und erosionsbeständig, zäh und gut schweißbar. Ihr primäres Einsatzgebiet sind Turbinenteile (Laufräder, Schaufeln, Ablenk- und Absperreinrichtungen) in Wasserkraftwerken und in Pumpen.
Für Teile der Flugzeugindustrie, des Pumpenbaus und für Hydraulikantriebe mit hohen Anforderungen an Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Zähigkeit werden aushärtbare, nichtrostende Stähle verwendet. Beispielsweise erreicht ein Stahl 15-5PH durch Lösungsglühen bei ca. 1030°C und Auslagern bei 480 bis 550°C Streckgrenzenwerte über 1000 MPa.

5.1.1.8.3 Austenitische rostfreie Stähle

Die Gefügeausbildung der austenitischen Stähle wird im überwiegenden Maße von den beiden Hauptlegierungselementen Chrom und Nickel bestimmt. Chrom schnürt ab Gehalten von rd. 13 % das Austenitgebiet des Eisens ein und bewirkt in Verbindung mit oxidierenden Medien eine Passivschichtbildung, die zur Korrosionsbeständigkeit der Stähle beiträgt. Durch Zulegieren von rd. 10 % Nickel bei rd. 18 % Chrom bleibt bei Abkühlung bis auf Raumtemperatur und tiefer das austenitische Gefüge (γ-Mischkristall) erhalten, je höher der Ni-Gehalt, desto stabiler der γ-Mischkristall und umso geringer die Martensitbildung.
Die austenitischen CrNi-Stähle haben folgende Eigenschaften:

- sehr gute Korrosionsbeständigkeit mit zunehmendem Legierungsgehalt, insbesondere
- Cr und Mo, jedoch anfällig für Spannungsrisskorrosion,
- sehr gute Schweißbarkeit,
- nicht magnetisierbar,
- sehr gute Warm- und Kaltumformbarkeit bedingt durch das hohe Dehnungsvermögen,
- nicht härtbar, jedoch Steigerung der Festigkeitswerte durch Kaltverfestigung,
- hoher Wärmeausdehnungskoeffizient,
- niedrige Wärmeleitfähigkeit
- hohe Kerbschlagarbeitswerte auch bei tiefen Temperaturen.

5.1.1.8.4 Austenitisch-ferritische Stähle oder Duplexstähle

Diese Stahlgruppe mit etwa gleichen Gefügeanteilen von Austenit und Ferrit sind deutlich fester als austenitische nichtrostende Stähle und werden aufgrund ihrer hohen Wirksumme PRE (pitting resistance equivalent)

$$\text{PRE-Wert (Wirksumme)} = \%Cr + 3{,}3\%Mo + 16\%N$$

und der damit direkt verbundenen Lochfraßbeständigkeit, gerne im Öl/Gas-Bereich und mit PRE-Werten über 32 bis 35 bei Meerwasseranwendungen angewandt. Allen Duplexstählen ist gemeinsam, dass ihre Beständigkeit gegen chloridinduzierter Spannungsrisskorrosion deutlich höher ist als im Falle der Austenite bei gleichzeitig guter Duktilität und Zähigkeit. Die Duplexstähle sind auch gut durch Umformen, Schweißen und Zerspanen verarbeitbar [IMOA11]. Noch höher legierte Duplexstähle mit einem PRE-Wert von 40-45 werden als Super-Duplex-Qualitäten bezeichnet.
Typische Anwendungsgebiete für diese Stahlgüte sind Rauchgasentschwefelung, Meerwasserentsalzung, Öl- und Gasförderung, Brückenbau und Nahrungsmittelindustrie.

5.1.1.9 Werkzeugstähle

Werkstoffe für die Kalt- und Halbwarmumformung müssen hohe Festigkeit, hohe Zähigkeit und hohe Härte aufweisen. Für wirtschaftlich sinnvolle Standmengen wird eine sehr gute Verschleiß- und Anlassbeständigkeit gefordert. Je nach Werkzeugbelastung (Temperatur, Verschleiß, Stoß, mechanische Belastung etc.) werden folgende Werkzeugstähle bzw. -werkstoffe verwendet:

- Kaltarbeitsstähle
- Warmarbeitsstähle
- Schnellarbeitsstähle
- PM-Stähle
- Hartmetalle
- Keramische Werkstoffe

Eine Ausnahme bilden die Werkzeuge für die großflächigen Pressteile für die Automobilindustrie, die meist aus Kugelgraphit- oder Stahlguss hergestellt werden.

Die Härte ist eine wichtige kennzeichnende Eigenschaft der Werkzeugstähle, wobei die Härtebeständigkeit sehr stark von der Arbeitstemperatur abhängt.

Aus diesem Grund unterscheidet man die drei Hauptgruppen:

- Kaltarbeitsstähle – Sie haben hohe RT-Härte, die Härte fällt aber mit zunehmender Temperatur rasch ab,
- Warmarbeitsstähle - Sie haben wesentlich geringere Härte aber höhere Zähigkeit, Einsatz bis 600°C und
- Schnellarbeitsstähle – Sie haben in allen Temperaturen höchste Härtewerte.

Kennzeichnend für die hohe Anlassbeständigkeit bei den Warm- und Schnellarbeitsstählen ist das Sekundärhärtemaximum durch Ausscheiden von Sonderkarbiden bei etwa 550°C, siehe Abb. 58.

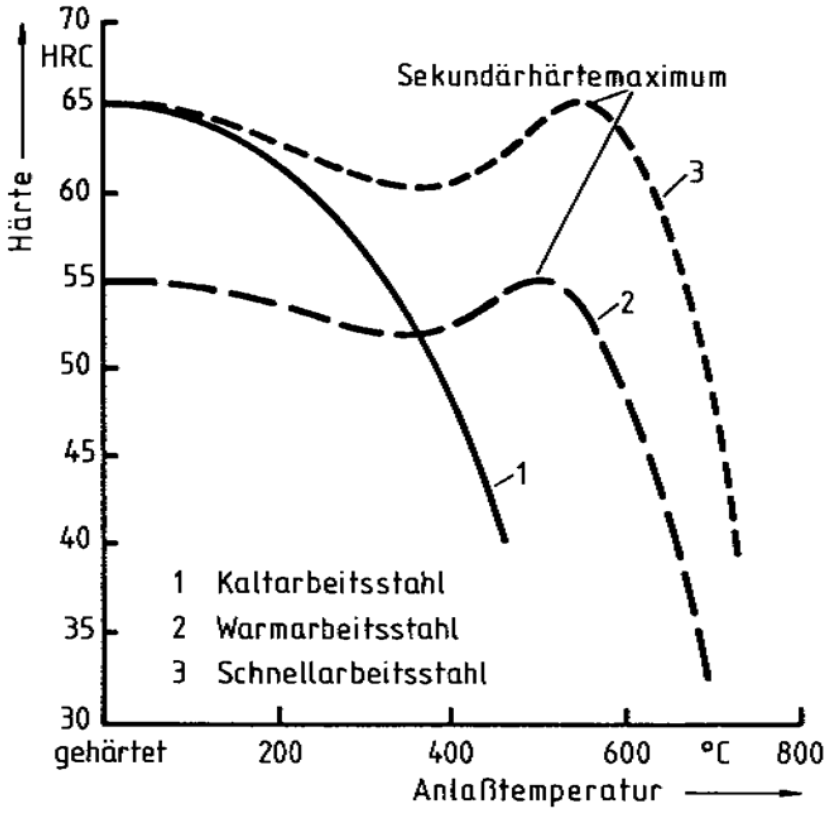


Abb. 58: Härteverlauf als Funktion der Anlasstemperatur der drei Typen von Arbeitsstählen

Eine Zusammenstellung der Anwendungsbereiche für legierte Kaltarbeitstähle zeigt Tabelle 15.

Stahlsorte	Wkst.Nr.	Verwendung
X210CrW 12	1.2436	Schnittwerkzeuge, Stahlscheren, Räumnadeln, Holzbearbeitungswerkzeuge, Gewindewalzen, Tiefziehwerkzeuge, Preßwerkzeuge, Sandstrahldüsen
X155CrVMo 12-1	1.2379	Metallsägen, Scherenmesser, Gewindewalzwerkzeuge, Holzbearbeitung, höhere Zähigkeit als 1.2436
115CrV3	1.2210	Gewindebohrer, Stempel, Auswerfer
100Cr6	1.2067	Dorne, Stempel, Lehren
21MnCr5	1.2162	Werkzeuge für Kunststoffverarb. Im einsatzgehärteten Zustand
90MnCrV9	1.2842	Tiefziehwerkzeuge, Schneidwerkzeuge, Kunststofformen, Stempel, Meßwerkz.
105WCr6	1.2419	Fräser, Reibahlne, Stempel, Schnittplatten, Prüfdorne,Papierschneidmesser
60WCrV7	1.2550	Schneidmesser für dickers Metall, Kaltlochstempel, Kettensägezähne,
X45NiCrMo4	1.2767	Prägewerkzeuge höchster Zähigkeit, Stanzwerkzeuge, Schermesser
X40CrMnMoS 8-6	1.2312	Werkzeuge für die Kunststoffverarbeitung

Tabelle 15: Typische Anwendungen für legierte Kaltarbeitsstähle

Ständiges Entwicklungsziel für diese hochfesten, schlagartig beanspruchten Werkstoffe ist die Reduktion der Fehlergrößen, was zu einer deutlichen Erhöhung der Biegebruchfestigkeit beiträgt. Diese Anforderung kann insbesondere durch eine pulvermetallurgische Herstellung erfüllt werden. Durch das damit verbundene homogenere Gefüge und durch die gleichmäßige Karbidverteilung ergeben sich höhere Verschleißwiderstände, höhere Korrosionsbeständigkeit, höhere Zähigkeit und geringere Maßänderung.

Werkzeuge für Schmiedegesenke und für Strangpressmatrizen werden meist aus Warmarbeitsstählen hergestellt. Diese werden thermo-mechanisch extrem beansprucht und unterliegen einem hohen Verschleiß, thermischer Ermüdung (Brandrissigkeit) und Stoßbelastung. Ein typischer Vertreter in dieser Stahlgruppe ist der Warmarbeitsstahl X40CrMoV5-1.

Im Bereich der Zerspanung werden mit zunehmender Leistungsanforderungen Schnellarbeitsstähle (HS 6-5-2), Hartmetalle (WC+Co) und keramische Werkzeuge verwendet. Auswahlkriterien für Hartmetalle sind der Verschleißwiderstand, die Biegebruchfestigkeit und die Risszähigkeit. Diese Eigenschaften sind durch die Parameter Co-Gehalt, Karbidgröße gezielt einstellbar.

5.1.1.10 Eisengusswerkstoffe

Die direkte, kostengünstige Herstellung von komplex geformten Bauteilen erfolgt durch das Gießen. Der wichtigste Gusswerkstoff ist Gusseisen mit einem Anteil von etwa 75% von allen Gusswerkstoffen, siehe Abb. 59. Die wichtigste Gusseisensorte ist der Grauguss, hier vor allem das Gusseisen mit Lamellengrafit. Durch den hohen C-Gehalt von 2,6 bis 3,6% und höherem Si-Gehalt erstarrt Gusseisen bei relativ niedrigen Temperaturen. Die gute Gießbarkeit, Gleiteigenschaften, Zerspanbarkeit und Schwingungsdämpfung, sowie die geringen Kosten begründen die hohe Bedeutung des Graugusses. Grauguss mit Lamellengrafit hat eine geringe Festigkeit bei geringer Zähigkeit und

ist nicht schmiedbar. Diese Schwachpunkte werden durch den Sphäroguss, der höherfest und zäher ist abgefangen.

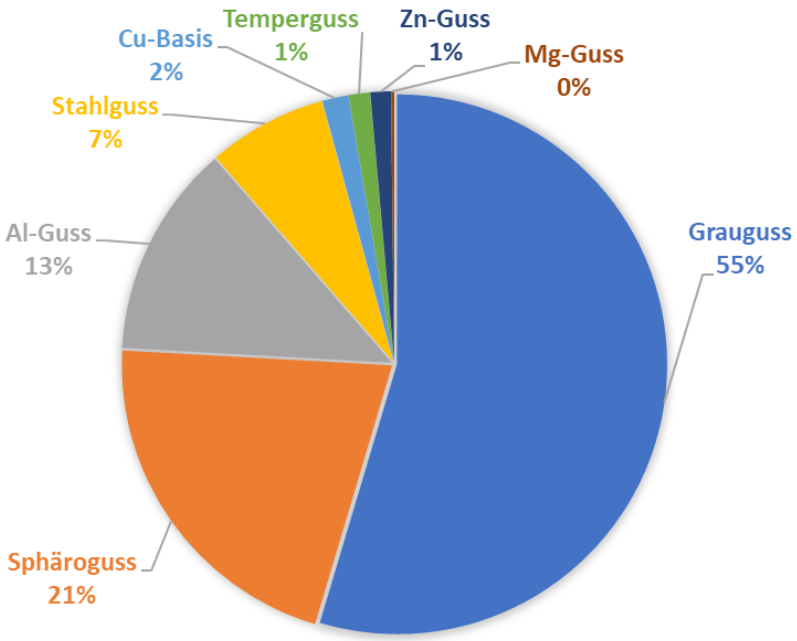


Abb. 59: Weltweite Gussproduktion (Anteile der Gusswerkstoffe aus dem Jahre 2003 Gesamt-Gussproduktion gleich 73,5 Mio to (Datenquelle: Giesserei-Rundschau 52, 2005, H.3/4, S.112)

Generell werden die Eisengusswerkstoffe wie folgt eingeteilt:

- Stahlguss (GS) mit C-Gehalt < 1,2%
- Grauguss
  - Gusseisen mit Lamellengrafit (GJL)
  - Gusseisen mit Vermiculargrafit (GJV)
  - Gusseisen mit Kugelgrafit oder Sphäroguss (GJS)
- Temperguss

Aufgrund ihrer Merkmale und typischen Eigenschaften sind die Eisengusswerkstoffe für bestimmte Anwendungsbereiche geeignet. GJL wird für Ständer und Schlitten für Werkzeugmaschinen, Getriebe- und Kurbelgehäuse verwendet. Gusseisen mit Vermiculargrafit besitzt wurmförmige Grafitausscheidungen und wird für wärmebeanspruchte Teile wie Zylinderblöcke, Zylinderköpfe und Fahrzeugbremsen eingesetzt. Sphäroguss ist mechanisch höher belastbar und wird für Zahnräder, Kurbelwellen, Radträger, Pumpen- und Turbinengehäuse verwendet. Temperguss ist wesentlich zäher als Gusseisen mit Lamellengrafit und wird vor allem im Fahrzeugbau in Form von Schaltgabeln, Lenksäulen und Hebeln aller Art eingesetzt.

5.1.2 Gliederung der Aluminiumlegierungen samt Merkmalen und Anwendungen

Aluminiumlegierungen bilden innerhalb der Gruppe der Nichteisenmetalle (NEM) die wichtigste Werkstoffgruppe. Al-Legierungen zeichnen sich gegenüber anderen Werkstoffgruppen durch einige besondere Eigenschaften aus, die in Tabelle 16 aufgelistet sind.
Aluminium und seine Legierungen werden nach den Stählen am häufigsten verwendet. Obwohl die Legierungsgruppe erst 100 Jahre alt ist, konnte durch die Luftfahrt und durch andere Leichtbauanwendungen enorme Zuwächse in der Produktionsmenge erzielt werden. Das zeitliche Wachstum und die regionale Verteilung des Aluminiummarktes zeigt Abb. 60. Der enorme Anstieg ab der Jahrtausendwende begründet sich mit dem riesigen Produktionszuwachs in China. Insgesamt werden weltweit ca. 65 Mio to/a produziert.

Geringe Dichte (2,7 g/cm³)	ca. 1/3 von Stahl
Niedriger Schmelzpunkt (660°C)	ergibt Vorteile beim Gießen
Hohe Korrosionsbeständigkeit	lässt sich durch Anodisieren noch weiter verbessern
Gute Warmumformbarkeit durch geringe Fließspannung bei T=550°C	Strangpressen, Schmieden, Fließpressen, Walzen haltbare Warmarbeitsstähle kostengünstig verfügbar
Gute Kaltumformbarkeit	Stanzbiegen, Blechumformung
Breites Festigkeitsspektrum	je nach Typ, von 70 bis 700 MPa
Gute elektrische Leitfähigkeit	gewichtsbezogen sogar doppelt so hoch wie bei Kupfer
Gute Wärmeleitfähigkeit	3-mal so hoch wie bei Stahl, ca. ½ von Kupfer
durch Oxidschicht ungiftig	lebensmittelgeeignet und primäres Verpackungsmaterial

Tabelle 16: Typische Eigenschaften der Al-Legierungen

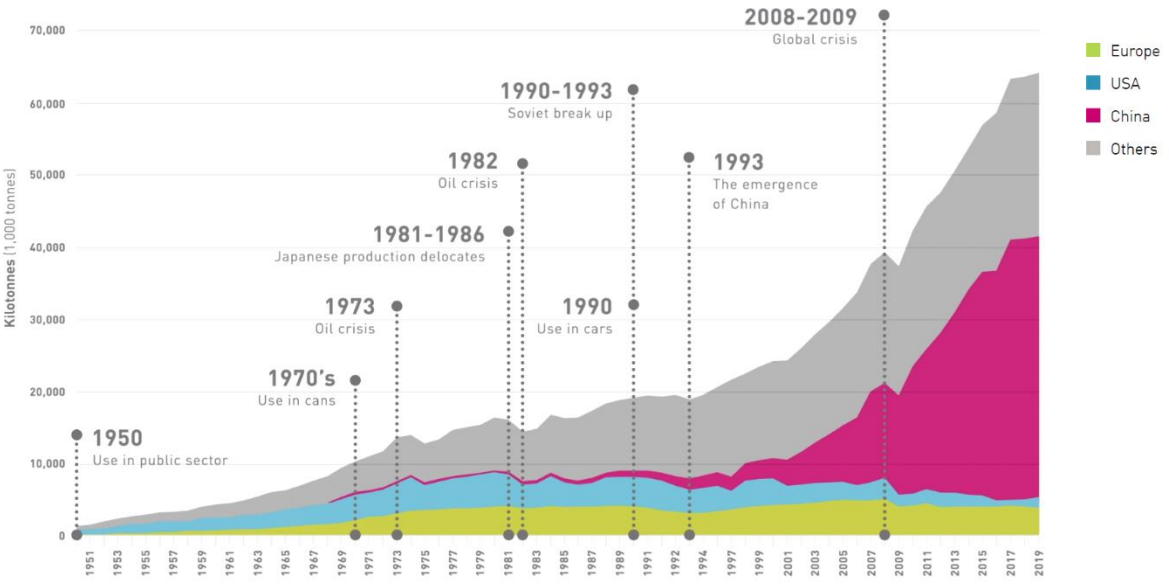


Abb. 60: Zeitliche Entwicklung der primären Al-Produktion (Bildquelle: european-aluminium.eu)

Eine erste Unterteilung der Aluminiumlegierung erfolgt in Knet- und Gusslegierungen. Al-Gusslegierungen sind meist mit Silizium von bis zu 12% legiert, also Nahe dem Eutektikum mit niedriger Schmelztemperatur und sehr Gießbarkeit, d.h. auch für dünnwandige Werkstücke geeignet. Bei den Knetlegierungen wird unterteilt in aushärtebare und nichtaushärtebare Legierungen. Das Aushärten erfolgt durch eine gekoppelte Wärmebehandlung mit einem Lösungsglühen bei etwa 500°C, Abschrecken in Wasser und einem Aushärten bei ca. 160 bis 200°C, wodurch sich sehr feine Ausscheidungen mit einer Größe von 10 bis 100nm bilden und Festigkeiten bis 700MPa erreicht werden. Zu den aushärtbaren Legierungsgruppen zählen AlCu (2xxx), AlMgSi (6xxx) und AlZnMg (7xxx), die Bezeichnung in Klammer entsprechend der amerikanischen/weltweiten Klassifikation.
Einige Vertreter in den sieben Al-Legierungsgruppen, ihre Festigkeitswerte und Anwendungen sind in Tabelle 17 dargestellt.
Bei den nichtaushärtenden Al-Legierungen werden die Zustände H (Herstellungszustand ohne Grenzwerte für die mechanische Eigenschaften), O für weichgeglüht, H für kaltverfestigt als angehängte Symbole gekennzeichnet.
Die aushärtbaren Legierungen sind mit T-1 bis T-9 gekennzeichnet, z.B. T4 (lösungsgeglüht und kaltausgehärtet), T6 (voll warmausgehärtet). Für nähere Angaben siehe GDA Merkblatt W7 [GDA08].

Leg.-Gruppe EN AW	Chem. Zusammen-setzung	Zugfestig-keit [MPa]	Charakteristische Eigenschaften	Anwendungen
1000	Reinaluminium Al > 99,0%	80	sehr gute elektrische und Wärmeleitfähig-keit	Elektrische Leitungen Verpackungsmittel/-folien Lager- und Transportfässer
2000 aushärt-bar	AlCu2,5Mg-T4 AlCu4Mg1-T42 AlCu4Mg1-T42 AlCu4Si1Mg-T6 AlCuMgPb-T4	310 390 420 420 340	Hohe Festigkeit bei guter Dehnung, schlechte Korr.-beständigkeit, schwer warmumformbar, bedingt schweißbar	Drähte, Niete, Schrauben Platten und Vorrichtungen, Werkzeuge Blech: Flugzeuge, Sicherheitsteile Bahnachslagergehäuse Automatenlegierungen, Drehteile
3000	AlMn1-F AlMn1-H28 AlMn1Mg1-O AlMn1Mg1-H28	90 185 155 260	gut umformbar, gut schweißbar, gut lötbar, geeignet im Lebensmittelbereich	Dächer Fassadenverkleidung Niete, Kühler, Klimaanlagen Getränkedosen, Bänder für Verpackung
4000	AlSi10Mg AlSi7Mg	240 140	Gusslegierungen	Motorkolben geringe Wärmedehnung Lotplattierung auf AlMn1 für Wärme-tauscherbleche
5000	AlMg1-O AlMg2Mn0,8-O AlMg4,5Mn0,7-O	100-145 190-305 275-420	Starke Verfestigung bei Kaltumformung, seewasserbeständig	Fließpressteile, Metallwaren Bleche für Fahrzeuge u. Schiffe Formen, Schmiedeteile, Gestelle
6000 aushärt-bar	AlMgSi-T4 AlMg0,7Si-T6 AlMgSi1MgMn-T6 AlMgSiPb-T6	130 280 310 275	Hervorragende Pressbarkeit, gute Anodisierbarkeit, gute Korrosionsbeständigkeit	Strangpressfolien, Fließpressteile Pkw-Räder, Pkw-Fahrwerksteile Schmiedeteile Automatenlegierung, Steuerkolben
7000 aushärt-bar	AlZn4,5Mg1-O/T6 AlZn5Mg4Cu-T6 AlZn5,5MgCu-T6	220/350 450 545	schweißbar SRK-anfällig höchste Festigkeit	Nach Schweißen selbstaushärtend Flugzeugbau Sportgeräte

Tabelle 17: Übersicht über einige wichtige Vertreter der Al-Legierungen

Die Absatzmärkte gliedern sich in den Verkehrssektor (47%), Bauwesen (14%), Verpackung (12%), Maschinenbau (7%), Elektrotechnik (7%) und in geringerem Umfang nach andere, siehe http://www.aluinfo.de/absatzmaerkte.html. Im Automobilbau findet man durchschnittlich ca. 180 kg Al-Legierungen in einem Pkw.
Beim Recyceln von Aluminium muss nur 5% der Energie im Vergleich zur Primärerzeugung eingesetzt werden.

5.1.3 Kupfer und Kupferlegierungen

Die allgemeinen Eigenschaften dieser Werkstoffgruppe sind:

- Hohe Leitfähigkeit für Elektrizität und Wärme
- Sehr gute Umform- und Bearbeitbarkeit
- UV- und Korrosionsbeständigkeit
- Keine Gefügeänderungen durch Druck, Hitze oder Kälte
- Hygienisch einwandfrei (Trinkwasser-geeignet)
- Günstiges Preis-Leistungsverhältnis durch lange Lebensdauer
- Umweltfreundlichkeit, da zu 100% rezyklierbar

Typische Kupferlegierungen und deren Verwendung zeigt Tabelle 18.

CuNi	CuNi10Fe1Mn, CuNi30Fe2Mn2	Rohre für Meerwasserbeständigkeit Heizleiterlegierung CuNi44 CuNi25 dient als Münzlegierung
CuZn **(Messing)**	CuZn10-30 CuZn33-37 CuZn40	Rohre für Manometer etc. Elektrotechn. In Hauptleg. für Kaltumformung Warmpresslegierung, gut spanend bearbeitbar
CuSn	CuSn4 bis CuSn8	Stromführende Federn, Rohre, Gleitlagerbuchsen
CuAl	CuAl8 CuAl10Ni5Fe4	Kondensatorböden, Ventilsitze Mehrstoffbronze mit hoher Erosions- und Kavitationsbeständigkeit
CuNiZn **(Neusilber)**	CuNi12-18 CuNi25Zn	Feinmechanik, Optik, Federn, Bestecke Münzen, Blasinstrumente
CuBe	CuBe1,7	Hochfeste, aushärtbare, funkensichere Federn
CuCrZr		Kontaktteile, Widerstands-Schweißelektroden

Tabelle 18: Einige Kupferlegierungen mit typischen Anwendungen

Das Umformverhalten von Messing (Cu-Zn) ist sehr stark vom Zn-Gehalt abhängig, siehe Abb. 61. Cu-Zn-Legierungen bis 40% haben ein duktilen kubisch-flächenzentriertes Gitter und sind daher gut kaltumformbar (insbesondere CuZn37). Die krz-zentrierte Beta-Phase (Zn-Gehalt > 40%) ist hingegen schlecht kalt-, aber gut warmumformbar und gut zerspanbar.

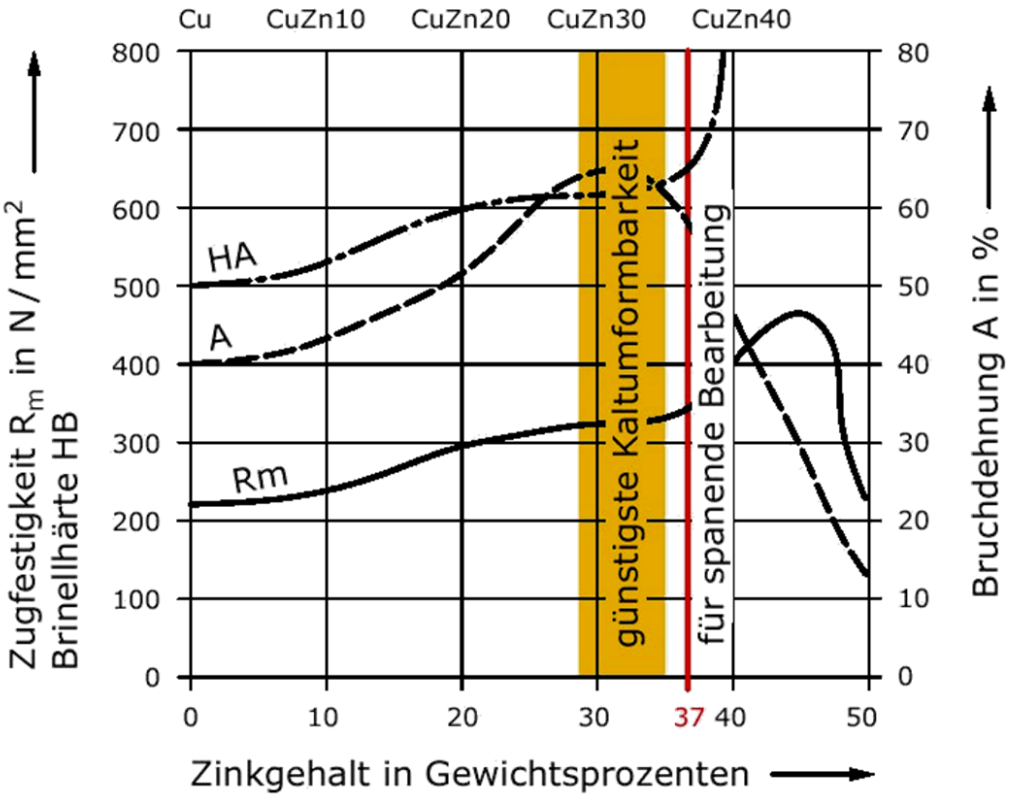


Abb. 61: Mechanische Eigenschaften von Messing in Abhängigkeit vom Zn-Gehalt

5.1.4 Nickel und Nickellegierungen

Reinnickel ist sehr gut umformbar, in etwa vergleichbar mit austenitischem nichtrostenden Stahl. Größere Bedeutung haben Legierungen mit Fe, Cr und Co, entweder aufgrund der Korrosionsbeständigkeit oder ausscheidungsgehärtet als Nickelbasis-Superlegierungen für Hochtemperaturanwendungen, wie dem Gasturbinenbau.

5.1.5 Titan und Titanlegierungen

Herausragende Eigenschaften:

- niedrige Dichte
- hohe statische und dynamische Festigkeit
- hohe Korrosionsbeständigkeit
- gute Warmfestigkeit
- hohe Zähigkeit

Vor allem die hochfeste Legierung Ti-6Al-4V ist geeignet für Anwendungen mit außergewöhnlichen Anforderungen, wie

- Flugzeugbau: Aufhängungsteile der Flügel, Fahrwerk und Triebwerksaufhängung, ca. 15% Gewichtsanteil
- Triebwerksbau: Verdichterräder und -scheiben mit optimierten Festigkeits-, Kriech- und Ermüdungseigenschaften
- Maschinen- und Anlagenbau: Kompressoren, Turbomaschinen, Flansche, Ventile mit hoher Festigkeit und guter Korrosionsbeständigkeit

- Motorenbau: Pleuel mit geringem Gewicht bei hoher Festigkeit, Ventile mit hoher Warmfestigkeit, Turbolader
- Medizintechnik: Implantate mit sehr guter Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität bei hoher Festigkeit und Zähigkeit

Aufgrund der raschen Gasaufnahme bei erhöhter Temperatur (O, N, H) und dem damit verbundenen Verlust an Verformbarkeit ist insbesondere beim Schweißen besondere Sorgfalt geboten (Vakuum, Schleppdüsen).

5.1.6 Kunststoffe

Kunststoffe sind makromolekulare organische Verbindungen, die aus Molekülketten bestehen, die sowohl linear als auch verzweigt und vernetzt sein können. Je nach Vernetzung unterscheidet man

- *Thermoplaste* (linear oder schwach verzweigte Polymerketten – reversibel verformbar),
- *Duroplaste* (engmaschig vernetzte Makromoleküle, sind spröde und nicht schmelzbar) und
- *Elastomere* (sind elastisch verformbare weitmaschig vernetzte Ketten, Bsp. Kautschuk).

Im Vergleich zu den Metallen haben Kunststoffe spezielle Eigenschaften, wie geringe Dichte (0,8 bis 2 g/cm³), geringen E-Modul, niedrige Verarbeitungstemperaturen, leichte Formgebung und damit beste Eignung für die Fertigung von Massenartikeln, geringe thermische und elektrische Leitfähigkeit und Beständigkeit gegen fast alle Säuren. Sie sind durch umfangreiche physikalische und chemische Modifizierungsmöglichkeiten durch Mischung, Weichmachung, streckende, verstärkende und leitfähige Füllstoffe, Pigmente, Eigenverstärkung und Copolymerisation adaptierbar.
Thermoplastische Kunststoffe durchlaufen unterschiedliche Zustandsbereiche, bei tiefen Temperaturen sind sie hart und kristallin, danach folgt ein thermoelastischer oder ein zähharter teilkristalliner Bereich und ab der Fließtemperatur werden Kunststoffe thermoplastisch und schließlich zersetzt sich der Kunststoff. Man unterscheidet bei den Thermoplasten noch zwischen amorphen, transparenten und teilkristallinen, zähen Arten. Duromere hingegen gibt es nur im festen Zustand bis zur Zersetzungstemperatur. Die typischen Eigenschaften und Anwendungen sind in Tabelle 19 zusammengestellt.

Gruppe der Kunst-stoffe	Kurzzeichen Benennung	Eigenschaften	Allgemeine Verwendung	Anwendungen im Automobilbau
Thermoplaste	**PE Polyethen (Polyethylen)**	kostengünstig, alterungsbeständig, chemisch beständig, gute Festigkeit	Plastikbeutel, Eimer, Frischhaltefolien, Bierkästen, Schläuche, Flaschen von Reinigungsmitteln	Kraftstofftank, Waschwasserbehälter
	PP Polypropen (Polypropylen)	kostengünstig, gute Festigkeit, chemische Beständigkeit	Einwegbecher, Joghurtbecher, Batteriekästen, Schuhabsätze	Stoßfänger, Radhausschale, Luftfiltergehäuse, Führungskanäle, Behälter, Seitenblenden
	PS Polystyrol	beständig gegen Laugen und Mineralsäuren, glasklar, schlagempfindlich, eingeschränkt temperaturbeständig	Einwegbecher, Joghurtbecher, Kugelschreiber, Dia-Rahmen, Tonbandkassetten, Beschichtung von Blumendraht, Styropor®, Schaumstoff	Verkleidungsteile
	PVC Polyvinylchlorid	witterungsbeständig, kostengünstig, schwer entflammbar, gute Haptik	Fußbodenbeläge, Kabelummantelungen, Abflussrohre, Schallplatten, Duschvorhänge, Lüsterklemmen, Schläuche	Unterbodenschutz, Stoßleisten, Kabelisolierungen, Innenraumverkleidung (Deckhaut)
	PA Polyamid	temperaturstabil, geringe Gasdurchlässigkeit, Dauerfestigkeit, Steifigkeit, alterungsbeständig	Dübel, Angelschnur, Brillengestelle, Nylon, Perlon	Motorabdeckung, Ansaugkrümmer, Radblenden, Stecker
	PMMA Polymethylmethacrylat	transparent, kratzfest, UV-beständig, spannungsriss-beständig	Autoblinklichter, Lineale, bruchfeste Verglasungen, Plexiglas	Streuscheiben von Blink- und Heckleuchten
	POM Polyoxymethylen (Homopolymer und Copolymer)	hohe Festigkeit, Steifigkeit, Härte, chemisch beständig, abriebfest, schlagzäh, geringe Kriechneigung, thermisch stabil	technischer Kunststoff, Zahnräder, Reißverschluss, Beschläge, Isolatoren	Clipse, Steckverbinder, Lagerkomponenten
	PET Polyethylenterephthalat	Zugfestigkeit, Steifigkeit, gute Sperrwirkung	Flaschen, Folien, Textilfasern	Textilien, Abdeckungen, Gurte, Airbag
	ABS Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer	galvanisierbar, dimensionsstabil, Festigkeit, hohe Oberflächenhärte,	Helme, Platten, Folien, Gehäuse, Spielzeug	Innenverkleidungen, Randblenden, Kühlergrill
	PC Polycarbonat (Polymer)	normalerweise teuer, hohe Festigkeit, Schlagzähigkeit, Steifigkeit und Härte, schlagzäh, transparent, UV-beständig	CDs, DVDs, Kameragehäuse, Ausweisdokumente, Flugzeugfenster, Kofferhüllen, Makrolon®	Streuscheiben von Scheinwerfern, Stoßfängerverkleidungen und Karosserieaußenteilen
	PES Polyethersulfon	transparent, chem beständig, schlagzäh, thermisch hochbelastbar	Flugzeugbau, Babyartikel	
	PEEK Polyetheretherketon	Hochtemperatur-beständig	Isolatoren, Flugzeugbau, Medizintechnik, Chemische Industrie	Automobilbau allgemein
	PI Polyimid (Thermoplast aber auch Duroplast)	Hochleistungskunststoff, chem. beständig, hitzebeständig, Beschichtungsmittel, thermostabil	Buchsen, Lager, Festschmierstoff. Isolierung, Laminate	Automobilbau allgemein
Duroplaste	**MF Melami-Formaldehyd-Harz (Phenoplaste)**	Isoliermaterial,	Kochlöffel, Oberfläche von Küchenmöbeln, elektr. Isoliermaterial, Bakelit®	
	UF Aminoplaste	elektr. Isoliermaterial,	Steckdosen, Eierbecher, Tabletts, Lichtschalter, Becher	

Elastomere	PBT Polybutylen-terephthalat	Steifigkeit, Wärmebeständigkeit, gutes elektrisches Isolierverhalten, Maßhaltigkeit, gute chem. Beständigkeit	Crastin®, Bügeleisen, Duschbrausekopf, Zahnbürsten, Flugzeugbau, Kaffeemaschinen	Elektronikgehäuse, Stoßfänger-verkleidungen und Karosserieaußenteile, Stecker
	PUR Polyurethan	dämpfend, gute Elastizität, geringe Wärmeleitfähigkeit	Matratzen, Fugendichtung, Wärmedämmung, Schaumstoffe, Moltopren®	Sitzpolster, Armaturentafel-polsterung und Dachhimmel, Außenelemente
	Vulkaniserter Kautschuk (Gummi)	elastisch,	Gummistiefel, Autoreifen, Latexhandschuhe, Gummibänder, Schnuller, Präservative	Autoreifen

Tabelle 19: Typische Eigenschaften und Anwendungen der Thermoplaste, Duromere und Elastomere

Aufgrund dieser sehr starken Temperaturabhängigkeit der Eigenschaften ergibt sich schon ein erstes, wichtiges Auswahlkriterium, die Anwendungs- bzw. auch die Verarbeitungstemperatur.
Abb. 62 zeigt eine Einteilung wichtiger Thermoplaste bezogen auf Produktionsvolumen, Preis, Eigenschaften und Gebrauchstemperatur.

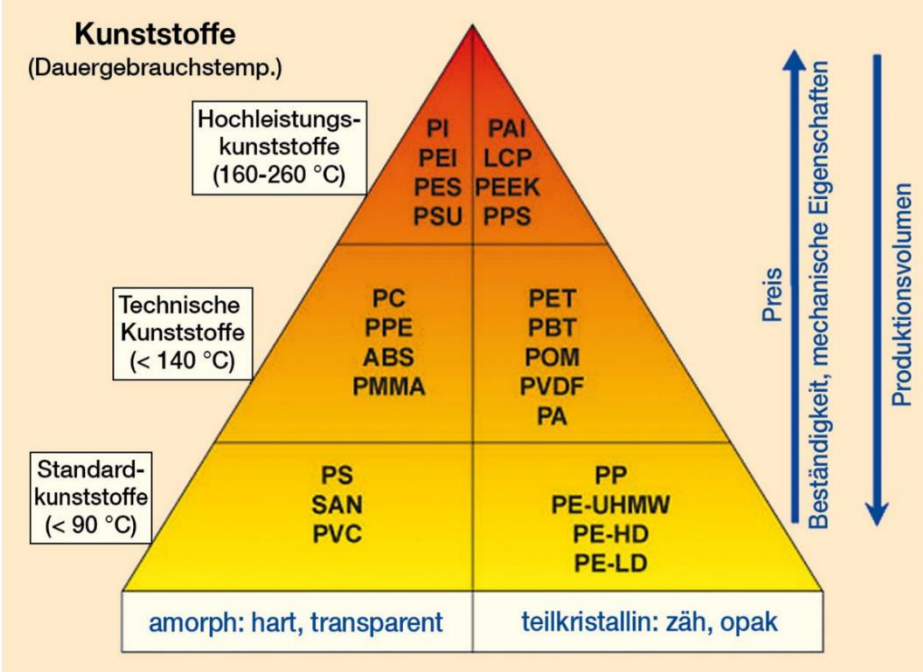


Abb. 62: Einteilung der Thermoplaste nach Eigenschaften, Produktionsvolumen und Gebrauchstemperatur nach [Woe19]

Wie das Bild zeigt, werden thermoplastische Kunststoffe wie folgt weiter unterteilt in:

- Standardkunststoffe:
  - Polyethylen (PE-LLD, PE-LD bzw. PE-HD sehr geringer, geringer bzw. hoher Dichte), Polypropylen (PP), Polyvinylchlorid (PVC) und Polystyrol (PS) mit einem Einsatzbereich bis ca. 90 °C. (BSP:. PE als Einweg-Tragetasche)
- Technische Kunststoffe:
  - Beispiele sind Polyethylenterephthalat (PET) und Polycarbonat (PC) mit einem erweiterten Einsatzbereich von 100 – 150 °C und besseren mechanischen Eigenschaften. (Bsp. PET-Trinkflaschen)

- Hochleistungskunststoffe:
    - Beispiele sind Polyimide (PI) und Fluorkunststoffe mit einem Einsatzbereich von 160 – 260 °C, hoher Wärmeformbeständigkeit und Festigkeit.

5.1.6.1 Kriterien zur Kunststoffauswahl

Wesentliche Auswahlkriterien sind:

- Gebrauchstemperatur (siehe Abb. 62)
- Mechanische Beanspruchung (Festigkeit, Steifigkeit, Zähigkeit)
- Chemische Beanspruchung (siehe Tabelle 20)
- Tribologische Beanspruchung (besonders geeignet sind PI und PTFE)
- Elektrotechnische Anforderungen
- Wetterbeständigkeit (bspw. UV-Beständigkeit)
- Verarbeitbarkeit (Schweißbarkeit, Klebeverhalten)

	PEEK	PPS	PPSU	PEI	PPE	POM-C	PP	PC
Schwache Säuren	+	+	+	+	+	+	+	(+)
Starke Säuren	(+)	+	(+)	(+)		(+)	(+)	-
Schwache Laugen	+	+	+	-	+	+	+	-
Starke Laugen	+	+		-		-	+	-
Alkohol	+	+	+	+		+	+	(+)
Ester	+	+				(+)	(+)	-
Ether	+	+				(+)	(+)	-
Ketone	+	+	-	-		(+)	(+)	-
Wasser – kalt	+	+	+	+	+	+	+	+
Wasser - warm	+	+	+	+	+	+	+	(+)

Tabelle 20: Chemikalienbeständigkeit einiger Kunststoffe nach www.ensingerplastics.com

5.1.7 Biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe

Aus Gründen der Nachhaltigkeit kommen zunehmend Bio-Kunststoffe zum Einsatz. Dies sind einerseits Kunststoffe, die aus nachwachsenden Rohstoffen produziert werden und andererseits biologisch abbaubare Kunststoffe, siehe Abb. 63. Diese Kunststoffgruppen schonen unsere Ressourcen und reduzieren die CO2-Emission. Die Absatzmengen in den verschiedenen Marktsegmenten zeigt Abb. 64.

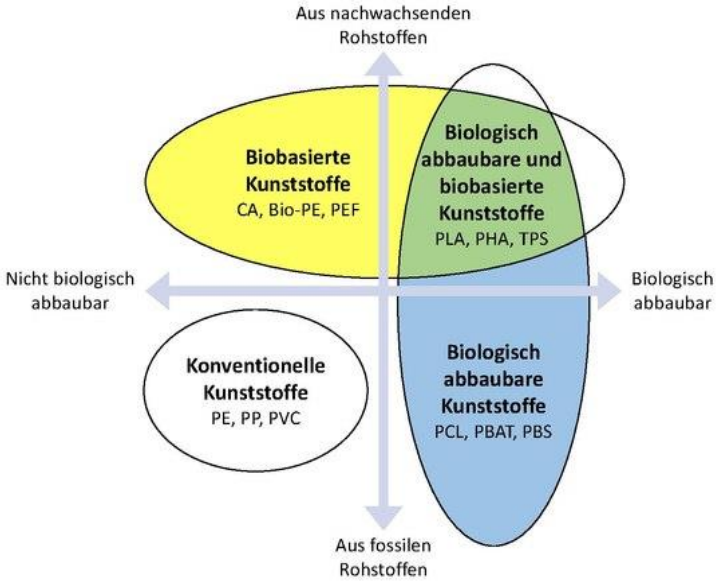


Abb. 63: Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen und biologisch abbaubare Kunststofftypen

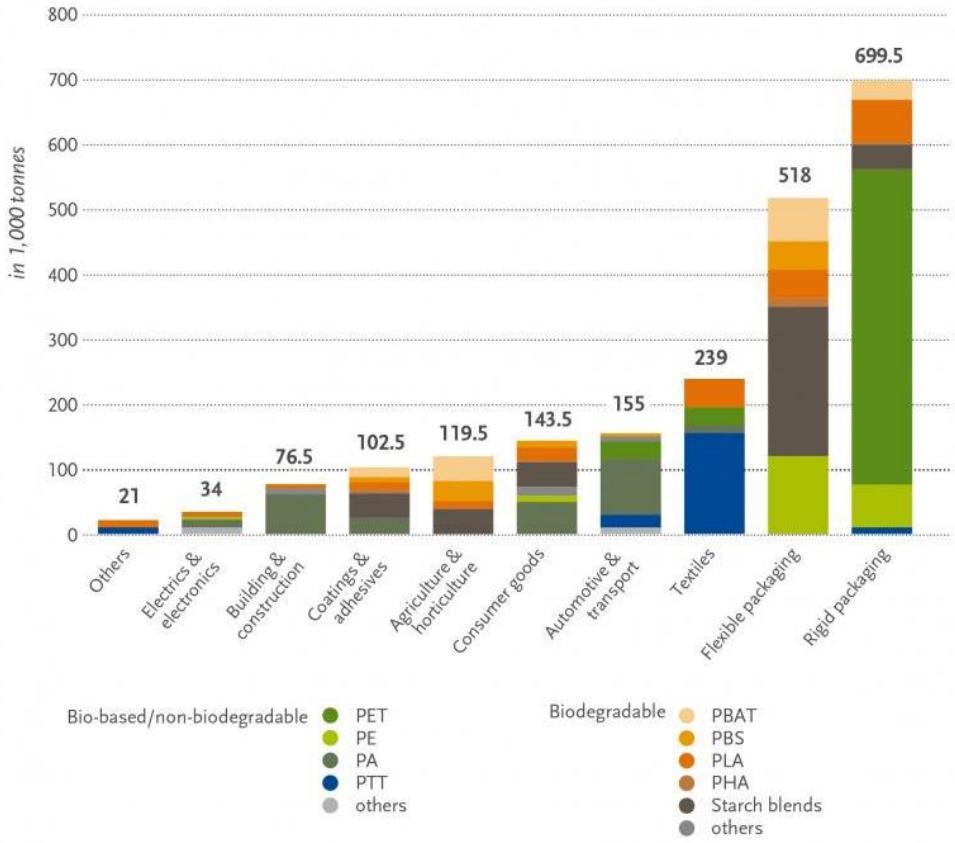


Abb. 64: Globale Produktionsmengen (2018) und Anwendungsbereiche für bio-basierte und biologisch abbaubare Kunststoffe. Bildquelle: www.european-bioplastics.org

5.1.8 Holzwerkstoffe

Holzwerkstoffe werden aus zerkleinertem Holz und anschließendem Zusammenfügen mit Binde-, Hydrophobierungs- und Holzschutzmittel erzeugt. Dadurch nehmen die Homogenität, das Dämmverhalten und die Oberflächengüte zu, hingegen nimmt die Festigkeit im Vergleich zum Vollholz ab. Je nach verwendeten Strukturelementen unterscheidet man zwischen

- Vollholz-,
- Furnier- (Furniersperrholz),
- Span- (flachgepresste Spanplatten mit Melaminbeschichtung, OSB … Grobspanplatte),
- Faser- (MDF … Mitteldichte Faserplatte, HDF … hochverdichte, LDF … leichte Platten) und
- Verbundwerkstoffen (WPC … Wood Plastic Composites).

Holzwerkstoffe werden vor allem in der Bau- und Möbelindustrie eingesetzt. Darüber hinaus finden sie im Fahrzeugbau, als Verpackungsmaterial und für den Hausbau Anwendung. Im Passivhausbau wird Holz oft als tragender Baustoff verwendet, meist in Leichtbauweise.
Weltweit werden Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) immer stärker nachgefragt. Sie lassen sich mit einem breiten Spektrum an Eigenschaften ausstatten und sind vielseitig einsetzbar. In Österreich befasst sich das Kompetenzzentrum Holz GmbH mit diesem modernen Werkstoff und dessen vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten, siehe https://wood-kplus.at .
Bezüglich weiterer Details und Daten sei auf die Fachliteratur [Neu17, Wag18] und auf den Verband der deutschen Holzwerkstoffindustrie e.V. (VHI) verwiesen.

5.1.9 Technische Strukturkeramik und Gläser

Die wichtigsten Hochleistungskeramiken für den Strukturbereich (exkl. Funktionskeramiken) sind mit ihren typischen Eigenschaften in Tabelle 21 dargestellt. Als positive Eigenschaften sind hervorzuheben: die niedrige Dichte, große Härte, hohe mechanische Festigkeit, Verschleißbeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit, hohe Einsatztemperatur und das elektrische Isoliervermögen. Detaillierte Informationen finden sich in [Sal82, Lin15]

	Stoffe	Biege-festigkeit [MPa]	Bruch-zähigkeit [$MPam^{1/2}$]	max. Temp. [°C]	Typische Eigen-schaften	Anwendungen
Silikate	SiO_2-MgO	110-180	-	1000	Hohe Isolierfähigkeit Geringe Wärmeleitfähigkeit	Glas, Küchengeschirr,
Al-Oxid	Al_2O_3	500	4,3	1500	Hohe Härte, gute Verschleißfestigkeit, kostengünstig	Verschleiß- und Korrosionsschutz, Hochdrucklampen
Zr-Oxid	ZrO_2-Y_2O_3	1000	10	1000	Ähnlicher E-Modul und Ausdehnungskoeffizient. wie Stahl, daher als Verbund gut geeignet	Ziehwalzen beim Stahldrahtzug, Sensoren, Lambdasonde, Messer
Si-Karbid	SiC	350	3,8	1800	Äußerst hart, gut wärmeleitend, thermo-schockbeständig	Gleitringdichtung, Gleitlager,
Si-Nitrid	Si_3N_4	750	7,0	1600	Hochfest, bruchzäh, hohe Härte, thermo-schockbeständig	Wendeschneidplatte, Wälzkörper,

Tabelle 21: Technische Strukturkeramiken und ihre Eigenschaften und Anwendungen nach [Lin15]

Zu den Gläsern zählt Borosilikatglas, Glaskeramik, Quarzglas, Saphirglas. Auswahlkriterien sind die Betriebstemperatur, die chemische Beständigkeit und die Temperaturwechselbeständigkeit.

5.1.10 Verbundwerkstoffe

Verbund- oder Kompositwerkstoffe bestehen aus zwei oder mehreren Materialien und besitzen damit eigene technische Eigenschaften. Die Nach dem Aufbau unterscheidet man [Wei12, Nei14]:

- Faserverbunde
- Teilchenverbunde
- Schichtverbunde (Laminate)
- Durchdringungsverbunde

Die volumenbezogen überwiegende Matrix verleiht dem Verbund insbesondere das thermische und mechanische Verhalten. Je nach Matrix unterscheidet man daher MMCs (metal matrix composites) [Kai03], CMC (ceramic matric composites) und verstärkte Polymere. Die Eigenschaften hängen von mehreren Einflussgrößen, wie Matrix- und Fasereigenschaften, Faseranteil und -anordnung, sowie von Faserlänge und -durchmesser ab.

Zu den Schichtverbundwerkstoffen zählen:

- Sandwich-Platten, wie bspw. Al-Deckschichten mit Schaumkern, verzinkter Stahl, Stahl/Kunststoff/Stahl, GLARE (Alu- und Glasfaserverstärkte Schichten, dadurch höhere Schlagzähigkeit und Rissstopverhalten) u.a.m.
- Plattierungen (lötfähige Schichten auf schlecht lötbarem Grundmaterial, Baustahl mit korrosionsbeständiger Nibas-Schicht), wobei die Schichten durch Walzen, Sprengen, Galvanische Abscheidung, Co-Extrusion oder Schweißen aufgebracht werden.

Technisch am bedeutungsvollsten sind die Kunststofffaserverbundwerkstoffe, wobei Glas-, Kohlenstoff-, Aramid-, Bor- oder Naturfasern zum Einsatz kommen [Sch07]. Die höchsten Steifigkeiten und Festigkeiten können mit C-Fasern erreicht werden. Je nach Ausrichtung der Fasern tritt Anisotropie auf, wobei Fasergelege entweder uni- und bidirektional sein können. Für die Optimierung des Verbundaufbaus von CFK-Teilen werden spezielle Software-Pakete verwendet. Als Kennwerte für die Auswahl werden meist die spezifische Festigkeit oder Reißlänge Rm/ρ oder der spezifische E-Modul E/ρ herangezogen. Die Herstellung werden Prepregs im Press- oder Autoklavverfahren, Faserwickeln, Infusions- oder RTM-Verfahren eingesetzt.

Diese Leichtbauwerkstoffe werden insbesondere für die Luft- und Raumfahrt, sowie im Sportbereich (Fahrräder, Angelruten, Tennisschläger u.a.) eingesetzt. Der CFK-Anteil erreicht bei neueren Verkehrsflugzeugen (Boeing 787) bereits 50%, siehe Abb. 65. Die Auswahl erfolgt auf Basis gewichtsbezogener mechanischer Eigenschaften.

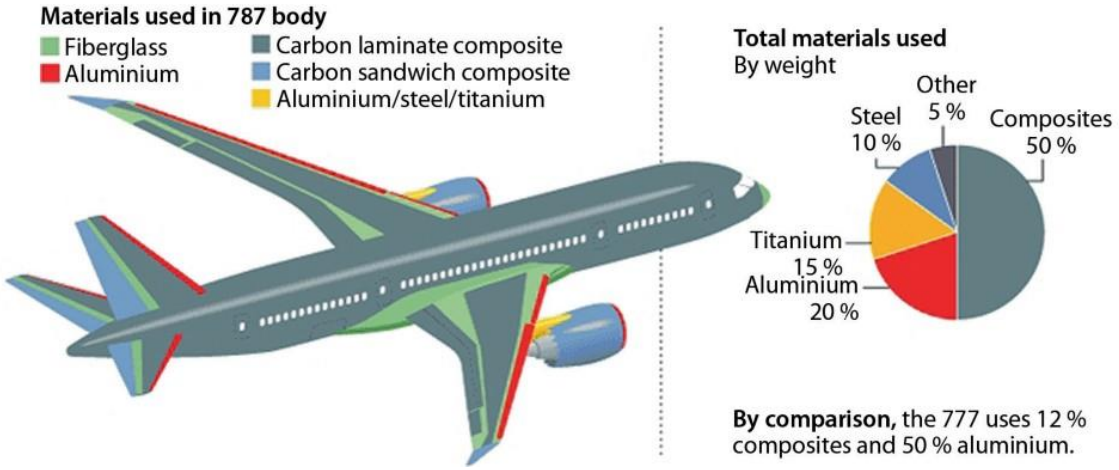


Abb. 65: Verbundwerkstoffe im Flugzeugbau

5.2 Auswahlkonzept nach M.F. Ashby

Prof. Mike Ashby hat in den letzten Jahrzehnten wohl das beste Auswahlkonzept für Werkstoffe entwickelt, das in vielen Studiengängen an den Fachhochschulen und Universitäten (weltweit über 1000 Unis) bereits fixer Bestandteil im Bereich Maschinenbau geworden ist. Es unterstützt die Auswahl von Werkstoffkandidaten über sog. „Performance Indices“, „materials selection charts“ und „shape factors“, was im Folgenden noch erläutert werden wird.

Das Konzept wurde in mehreren Büchern publiziert [Ash16] und liegt auch als Software CES vor, welche von Granta Design UK entwickelt und von ANSYS im Feber 2019 übernommen wurde. Die relationale Materialdatenbank „MaterialUnivers“ verfügt über mehr als 4000 Datensätze (Werkstoffe) mit folgenden Kategorien:

- Allgemeine Daten, wie Handelsname, Preis und Dichte
- Chemische Zusammensetzung
- Mechanische Eigenschaften (Festigkeit, Bruchdehnung, E-Modul, Härte, Bruchzähigkeit)
- Thermische und elektrische Eigenschaften
- Verarbeitungseigenschaften
- Biologische daten (Lebensmittelzulassung, Medizin. Daten)
- Nachhaltigkeitsdaten (Energieaufwand, CO_2-Emission)
- Optische Eigenschaften
- Haltbarkeit
- Angaben zur Verwendung

Von Granta Design werden angeboten:

- Ein System für die Lehre/Ausbildung namens CES EduPack mit vielen Unterlagen und Fallbeispielen auf 3 Levels
- Ein System für die Forschung CES SELECTOR und CES Constructor
- Ein System für die Industrie GRANTA Mi mit der Möglichkeit die Materialdatenbank selbst zu verwalten und mit eigenen Daten zu füttern und somit ein zentreales Materialdatenverwaltungssystem für größere Unternehmen aufzubauen.

5.2.1 Auswahlprozedur

Die Auswahl verfolgt das Prinzip vom Groben ins Detail, wie Abb. 66 zeigt.

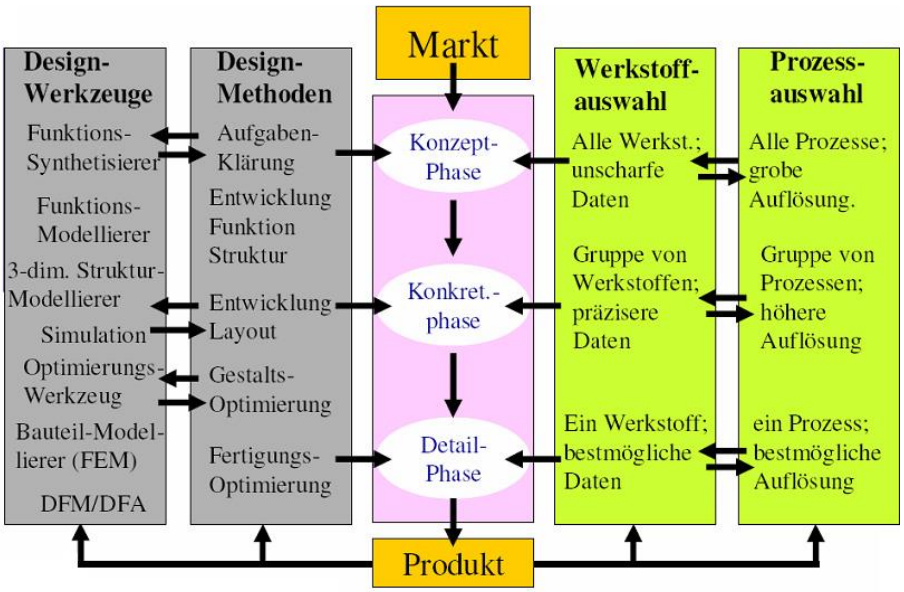


Abb. 66: Auswahlprozedur nach dem Prinzip vom Groben ins Detail

5.2.2 Funktionsanforderungen, Zielsetzungen und Einschränkungen

Üblicherweise erfüllt eine technische Komponente ein oder mehrere Funktionen (bspw. Beanspruchung auf Druck und Temperatur bei Behältern), wobei bereits in der Designphase ein oder auch mehrere Ziele (Minimierung des Gewichts, der Kosten etc.) verfolgt werden und natürlich auch Einschränkungen (bspw. spezielle Umgebungsbedingungen) berücksichtigt werden müssen. Die drei Faktoren Funktion, Ziele und Einschränkungen bilden ein System mit seinen Randbedingungen, siehe Tabelle 22.
In manchen Fällen ist es hilfreich bei den Einschränkungen noch zwischen harten und weichen Bedingungen zu unterscheiden.

Funktion(en)	"Was muss die Komponente können?“
Ziel(e)	"Was soll maximiert oder minimiert werden"
Einschränkung(en)	"Welche Pflichtbedingungen müssen erfüllt werden?" "Welche verhandelbaren Wünsche gibt es?"

Tabelle 22: Systemdefinition mit Funktionen, Zielem und Einschränkungen

Nach dieser Definitionsphase werden zunächst jene Kriterien angewandt, die zu einem schnellen Ausschluss möglicher Werkstoffkandidaten in großer Zahl führen. Danach werden Optimierungskritieren abgeleitet und optimale Bereiche eingegrenzt.

5.2.3 Ausschlusskriterien und Werkstoffauswahlkarten

Um möglichst rasch zu einer überschaubaren Anzahl an möglichen Werkstoffen zu kommen, werden zunächst Ausschlusskriterien, die z.B. die Gebrauchstemperatur definiert. Andere Ausschlusskriterien könnten sein: magnetisch/unmagnetisch, leitend/isolierend, Guss- oder Knetlegierung, Obergrenze für Werkstoffpreis u.a.m.

Wenn es nur um die vergleichende Betrachtung einer Werkstoffkenngröße über alle Werkstoffhauptgruppen geht, so kann dafür ein Balkendiagramm herangezogen werden. Nachdem die Kennwerte aller Gruppen über mehrere Zehnerpotenzen gehen, ist eine logarithmische Darstellung der Daten empfehlenswert, siehe Abb. 67.

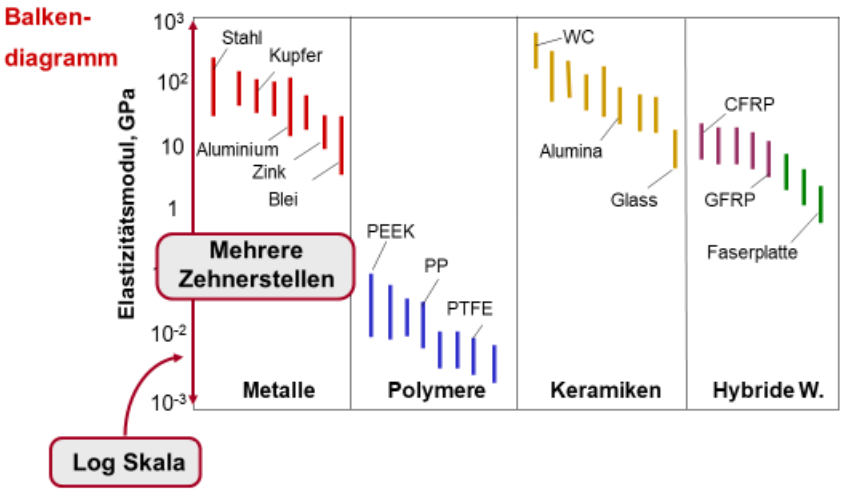


Abb. 67: Balkendiagramm zum direkten Vergleich der Werkstoffe unterschiedlicher Hauptgruppen (Bildquelle: GRANTA, teaching ressources, 2011)

In Auswahlkarten mit zwei Werkstoffkenngrößen als x- und y-Achsen können die Positionen unterschiedlicher Werkstoffgruppen relativ zu einander dargestellt werden. Nachdem die Werkstoffdaten in der Datenbank mit einem Wertebereich angegeben sind, ergeben sich Ellipsen/Blasen, wobei sich zeigt, dass sich einzelne Werkstoffe in einer Einhüllenden einer Werkstoffhauptgruppe clustern. Je nach Optimierungskriterien ergibt sich die Position optimaler Auswahlkandidaten, siehe Abb. 68.

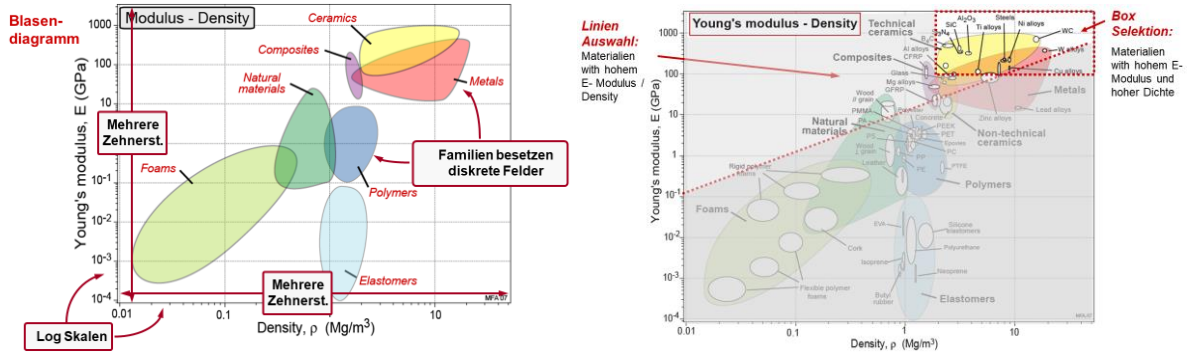


Abb. 68: Blasen- oder Werkstoffkenndatendiagramm E-Modul über Dichte (li: Position der Werkstoffhauptgruppen, re: Auswahl mit Linien- oder Boxauswahl) Bildquelle: GRANTA, UK, teaching ressources

In vielen Fällen ist es auch möglich, spezifische Eigenschaftskennzahlen („Performance Indizes“) zu definieren, die die Suche erst objektiv bewertbar machen. Beispielsweise ist die Schallausbreitungsgeschwindigkeit v gleich der Wurzel aus E-Modul dividiert durch die Dichte. In doppellogarithmischer ergibt dies eine Steigung von 1, siehe Linienwahl in Abb. 68 rechts. Je höher die Linie liegt, desto größer ist die Schallgeschwindigkeit, d.h. dazu gehören die Keramiken und Metalle. Ein anderes Beispiel ist die Darstellung Festigkeit über Dichte, siehe Abb. 69, die als Basis für den Leichtbau dienen kann. Weitere Auswahldiagramme für andere Eigenschaftskombinationen finden sich in [Ash89, Ash16].

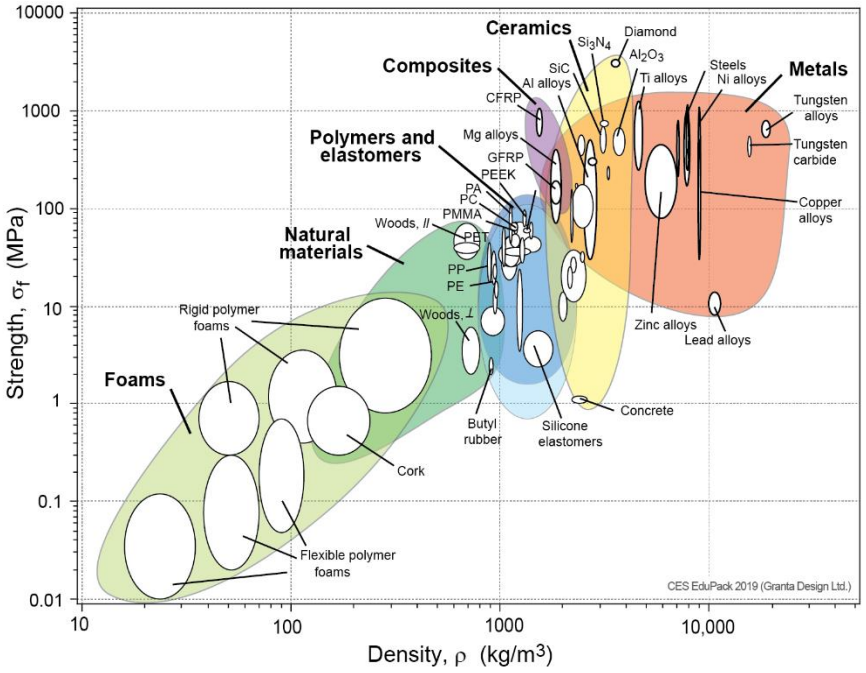
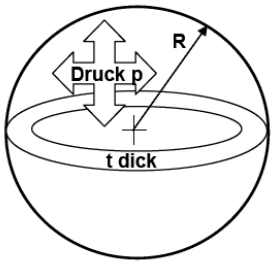


Abb. 69: Ashby-Map Festigkeit über Dichte. Optimierungsrichtung für Leichtbau von re unten nach li oben, d.h. optimale Werkstoffe wären CFK, GFK, Al- und Ti-Legierungen

5.2.4 Belastungsspezifische Kennzahlen (Performance indices)

Am Beispiel eines Druckbehälters soll der Ansatz zur Findung von materialabhängigen spezifischen Kennwerten erläutert werden, siehe Abb. 70. Gesucht wird ein Werkstoff, der bei gegebenem Innendruck, Kugeldurchmesser ein möglichst geringes Gesamtgewicht ergibt. Dazu wird zunächst die Formel so umgeformt, dass die Wandstärke separiert ist, und die Spannung wird durch die zulässige Spannung (Streckgrenze/Sicherheitsbeiwert) ersetzt. Dieser Term wird dann in die Gleichung für die Massenberechnung eingesetzt. Wird der Faktor der werkstoffabhängigen Werte extra als zusammengefasst, so hat man jene spezifische Kennzahl gefunden, die sich mit Daten aus Tabellenwerken berechnen und der Größe nach reihen lässt. Werkstoffe mit dem niedrigsten Wert für Dichte/Streckgrenze sollten verwendet werden, wenn geringen Gewicht gefragt ist. Die für diese Beanspruchung bestgeeigneten Werkstoffe sind faserverstärkte Verbundwerkstoffe (GFK oder CFK). Typische Anwendungen findet man im Flugzeugbau (Rumpf) und in der Raumfahrt (Treibstofftanks für Satelliten). Will man hingegen den Preis minimieren, so ist die Masse mit dem Kilopreis zu multiplizieren (P.rho/Rp) und diese Kennzahlen zu reihen. Der niedrigste Wert findet sich für Beton, was auch durch Bauwerke, wie Wassertürme, Kühltürme etc. in der Praxis bestätigt wird. Als Kompromiss und evlt. Bei Forderungen nach Fügbarkeit oder Montageaufwand eignen sich auch Kesselblech aus Stahl sehr gut für dieses Anforderungsprofil.

Bauteil: Druckbehälter
Anforderung: bei gegebenen Volumen ist das Gewicht zu minimieren



Randspannung: $\sigma = \frac{p \cdot R}{2 \cdot t}$

Masse: $m = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot t \cdot \rho$

$m = S \cdot 2 \cdot \pi \cdot p \cdot R^3 \cdot \frac{\rho}{\sigma_y}$

m	*Masse*
S	*Sicherheit*
σ	*Spannung*
σ_y	*Fließspannung*
P	*Preis/kg Werkstoff*
p	*Druck*
ρ	*spez. Masse*

Werkstoff	ρ/σ_y	$P\rho/\sigma_y$
Beton	13	***5***
Kesselstahl	7,8	12
unlegierter Stahl	25	22
Al-Legierung	6,8	20
GFK	2,9	700

Stahlbeton: sehr preisgünstig; Wassertürme, Kühltürme
GFK: am Besten geeignet; sehr teuer; Treibstofftanks, Flugzeugrumpf
Kesselblech: Kompromiss

Abb. 70: Herleitung einer spezifischen Kennzahl für die Auswahl von Druckbehälter-Werkstoffen

Sehr häufig sind die werkstoffabhängigen Eignungskennzahlen (performance indices) Kombinationen aus mehreren Kenngrößen.
Eine Zusammenstellung typischer werkstoffabhängiger Werkstoffindizes zeigt Tabelle 24 für die Festigkeitsauslegung mit dem Ziel der Gewichtsminimierung.

Bestimmende Materialindizes für verformungsbegrenzte Auslegung von Bauteilen Ziel: „Geringstes Gewicht“			
Funktion	**Bedingung (vorgegebene Größen)**	**Freie Konstruktionsparameter**	**Maximum für Materialindex**
Zug aufnehmen (Zugstab)	▪ Verformung, Länge	Fläche (Form)	E/ρ
Torsion aufnehmen (Vollwelle)	▪ Verformung, Länge und Form	Fläche	$G^{0,5}/\rho$
Torsion aufnehmen (Hohlwelle)	▪ Verformung, Außendurchmesser	Innendurchmesser	G/ρ
	▪ Verformung, Wanddicke	Außendurchmesser	$G^{1/3}/\rho$
Biegung aufnehmen (Balken)	▪ Verformung, Länge und Form	Fläche	$E^{0,5}/\rho$
	▪ Verformung, Länge und Höhe	Breite	E/ρ
	▪ Verformung, Länge und Breite	Höhe	$E^{1/3}/\rho$
Druck aufnehmen (Drucksäule)	▪ Knicklast, Länge und Form	Fläche	$E^{0,5}/\rho$
Biegung aufnehmen (ebene Platte)	▪ Durchbiegung, Länge, Breite	Dicke	$E^{1/3}/\rho$
Innendruck aufnehmen (Zylinder)	▪ Elastische Verformung, Druck und Außendurchmesser	Dicke	E/ρ

Tabelle 23: Materialindizes für verformungsbegrenzte Auslegung von Bauteilen mit geringem Gewicht

Funktion und Einschränkungen		Maximum für
Schadenstoleranz (für Stäbe, Säulen, Wellen, Balken, Platten, Federn etc.)	Max. Fehlertoleranz und Festigkeit, kraftkontrolliertes Design	K_{1c} / ρ und σ_y / ρ
	Max. Fehlertoleranz und Festigkeit, dehnungskontrolliertes Design	$E\rho$ / K_{1c} and $\sigma_{y/\rho}$
	Max. Fehlertoleranz und Festigkeit, Energiekontrolliertes Design	K_{1c}^2 / E and $\sigma_{y/\rho}$
Druckkessel	Leck-vor-Bruch begrenzt	K_{1c} / σ_y
	Leck-vor-Bruch begrenzt	K_{1c}^2 / σ_y
Rotierende Schaufeln/Blätter	Widerstand gegen spontanen Bruch; Schaufellänge, Fehlergröße vorgegeben	K_{1c} / ρ
	Widerstand gegen Zentrifugalkräfte, Schaufellänge, Fehlergröße vorgegeben	σ_y / ρ

Tabelle 24: Kennzahlen für schadenstolerante Auslegung

Funktion und Einschränkungen		Maximum für
Zugstab	Länge fix, Querschnitt variabel	E / ρ
Column in compression	Lnge und Querschnittsfläche gegeben, Form flexibel	E / ρ
	Länge fixiert, Querschnittsfläche und Form variabel	$(E\phi) / \rho$
	Länge u. Querschnittsform gegeben, Querschnittsfläche variabel, Beulsteifigkeit begrenzt	$E^{1/2} / \rho$
Shaft in torsion	Länge und Querschnittsform gegeben, Fläche variabel	$G^{1/2} / \rho$
	Länge und Wandstärke gegeben, Außenradius variabel	$G^{1/3} / \rho$
	Länge und Außenradius gegeben, Wandstärke variabel	G / ρ
Beam in bending	Länge und Form gegeben, Querschnittsfläche variabel	$E_f^{1/2} / \rho$
	Länge gegeben; Querschnittsfläche und Form variabel	$(\phi E_f)^{1/2} / \rho$
	Länge, Dicke, Form gegeben, Breite variabel	E_f / ρ
	Länge und Dicke gegeben, Breite und Form variabel	$(\phi E_f) / \rho$
	Länge, Breite, Form gegeben, Dicke variabel	$E_f^{1/3} / \rho$
	Länge, Breite u. Form gegeben, Dicke variabel	$(\phi E_f)^{1/3} / \rho$
Plattenbiegung	Länge und Breite gegeben, Dicke variabel	$E_f^{1/3} / \rho$
Platte unter Druck	Kollapslast, Länge u. Breite gegeben, Dicke variabel	E_f / ρ
Schale mit Linearlast	Radius vorgegeben, Wandstärke variabel	$E_f^{1/3} / \rho$
Dom mit Zentralkraft	Radius vorgegeben, Wandstärke variabel	$E_f^{1/2} / \rho$
Zylinder unter Innendruck	Radius vorgegeben, Wandstärke variabel	E / ρ
Kugel unter Außendruck	Radius gegeben, Wandstärke variabel, Beulsteifigkeit begrenzt	$E^{1/2} / \rho$
	Radius gegeben, wall-thickness free; Auftrieb begrenzt	E / ρ
Kugel mit Innnendruck	Radius gegeben, Wandstärke variabel	$E / (1-\nu) \rho$

Tabelle 25: Steifigkeitskontrolliertes Design bei minimierter Masse

5.2.5 Formfaktor

In vielen Fällen kann das Bauteilverhalten nicht nur durch Optimierung der werkstoffabhängigen Indizes allein verbessert werden, sondern auch durch eine begünstigende Gestaltung. Am Beispiel eines Biegeträgers wird sofort klar, dass die Durchbiegung durch Erhöhung des Widerstandsmomentes stark reduziert werden kann. Dies bedeutet, dass ein I-Träger oder ein Rohr wesentlich besser geeignet ist als ein Vollquerschnitt. Dieser Umstand wird nun durch einen Formfaktor ϕ berücksichtigt. Der Formfaktor berechnet sich aus dem Verhältnis eines optimierten Querschnitts zu einem quadratischen Vollquerschnitt.
Dennoch besteht ein Zusammenhang mit dem Werkstoff, da ja nicht ein jeder Werkstoff ohne weiteres komplexere Querschnittsformen oder extreme Wanddicken annehmen kann. Die Formfaktoren sind auch von der Belastungsart (Biegung, Torsion) abhängig.
Formfaktoren für gebräuchliche Bauteilquerschnitte sind in Tabelle 26 angegeben.

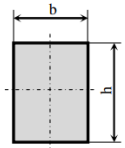
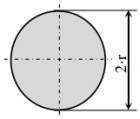
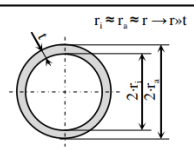
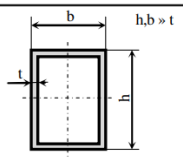
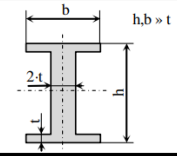
Form	Formfaktor ϕ_B^e für Biegung an einer Verformungsgrenze	Formfaktor ϕ_T^e für Torsion an einer Verformungsgrenze	Formfaktor ϕ_B^f für Biegung an einer Fließ- bzw. Bruchgrenze	Formfaktor ϕ_T^f für Torsion an der Fließ- bzw. Bruchgrenze
	$\frac{h}{b}$	$2{,}38\cdot\frac{h}{b}\cdot\left(1-0{,}58\cdot\frac{b}{h}\right)$	$\sqrt{\frac{h}{b}}$	$1{,}6\cdot\sqrt{\frac{h}{b}}\cdot\frac{1}{1+0{,}6\cdot b/h}$
	$\frac{3}{\pi}=0{,}955$	1,14	$\frac{3}{2\cdot\sqrt{\pi}}=0{,}846$	1,35
	$\frac{3}{\pi}\cdot\left(\frac{r}{t}\right)$	$1{,}14\cdot\left(\frac{r}{t}\right)$	$\frac{3}{\sqrt{2\cdot\pi}}\cdot\sqrt{\frac{r}{t}}$	$1{,}91\cdot\sqrt{\frac{r}{t}}$
	$\frac{1}{2}\cdot\frac{h}{t}\cdot\frac{1+3\cdot b/h}{(1+b/h)^2}$	$\frac{3{,}57\cdot b^2\cdot(1-t/h)^4}{h\cdot t\cdot(1+b/h)^3}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}\cdot\sqrt{\frac{h}{t}}\cdot\frac{1+3\cdot b/h}{(1+b/h)^{3/2}}$	$3{,}39\cdot\sqrt{\frac{h^2}{b\cdot t}}\cdot\frac{1}{(1+h/b)^{3/2}}$
	$\frac{1}{2}\cdot\frac{h}{t}\cdot\frac{1+3\cdot b/h}{(1+b/h)^2}$	$1{,}19\cdot\frac{t}{b}\cdot\frac{1+4\cdot h/b}{(1+h/b)^2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}\cdot\sqrt{\frac{h}{t}}\cdot\frac{1+3\cdot b/h}{(1+b/h)^{3/2}}$	$1{,}13\cdot\sqrt{\frac{t}{b}}\cdot\frac{1+4\cdot h/b}{(1+h/b)^{3/2}}$

Tabelle 26: Formfaktoren für unterschiedliche Querschnitte und Belastungsarten

5.2.6 Darstellung einiger metallkundlicher Zusammenhänge

Sehr lehrreich sind auch die von Hugh Shercliff [She09] mittels Ashby-Maps dargestellten Einflüsse von Wärmebehandlungen und Mikrostruktur auf die Eigenschaften von Legierungen. Abb. 71 zeigt den sehr starken Einfluss der Aushärtung bei Al-Knetlegierungen und die deutlich niedrigere Bruchzähigkeit der Al-Gusslegierungen. Abb. 72 zeigt hingegen wie sich festigkeitssteigernde Mechanismen, wie Kaltverformung, Aushärtung und Mischkristallverfestigung auf die Festigkeitswerte und Werte des elektrischen Widerstandes auswirken. Dieses Diagramm hat besondere

Bedeutung für die Auswahl von hochfesten Al-Freileitungsseilen, d.h. für höherfeste Leitungen sind Mischkristall-Legierungssysteme nicht gut geeignet.

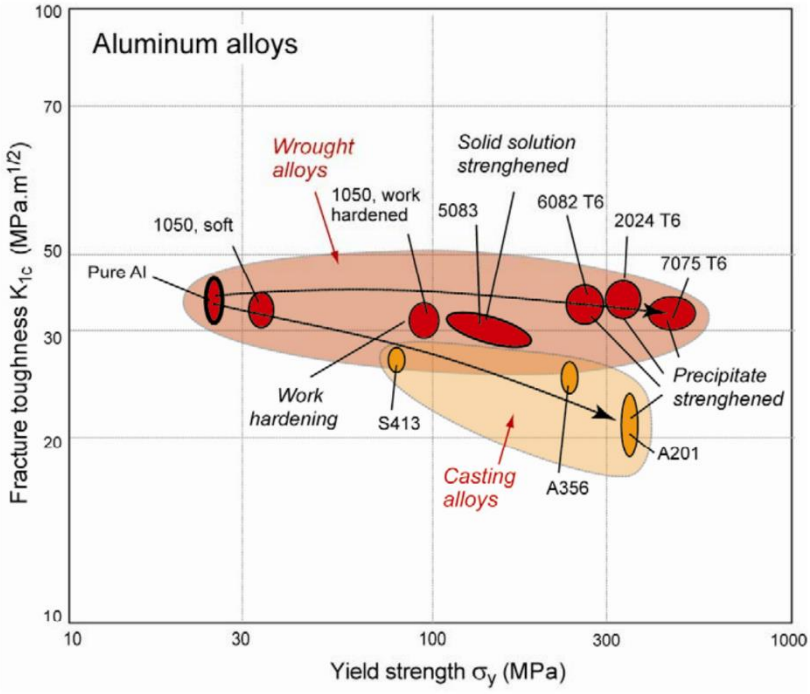


Abb. 71: Einfluss der Ausscheidungshärtung auf Al-Knetlegierungen im Vergleich zu Gusslegierungen und zu kaltverformten und mischkristallverfestigten Legierungen

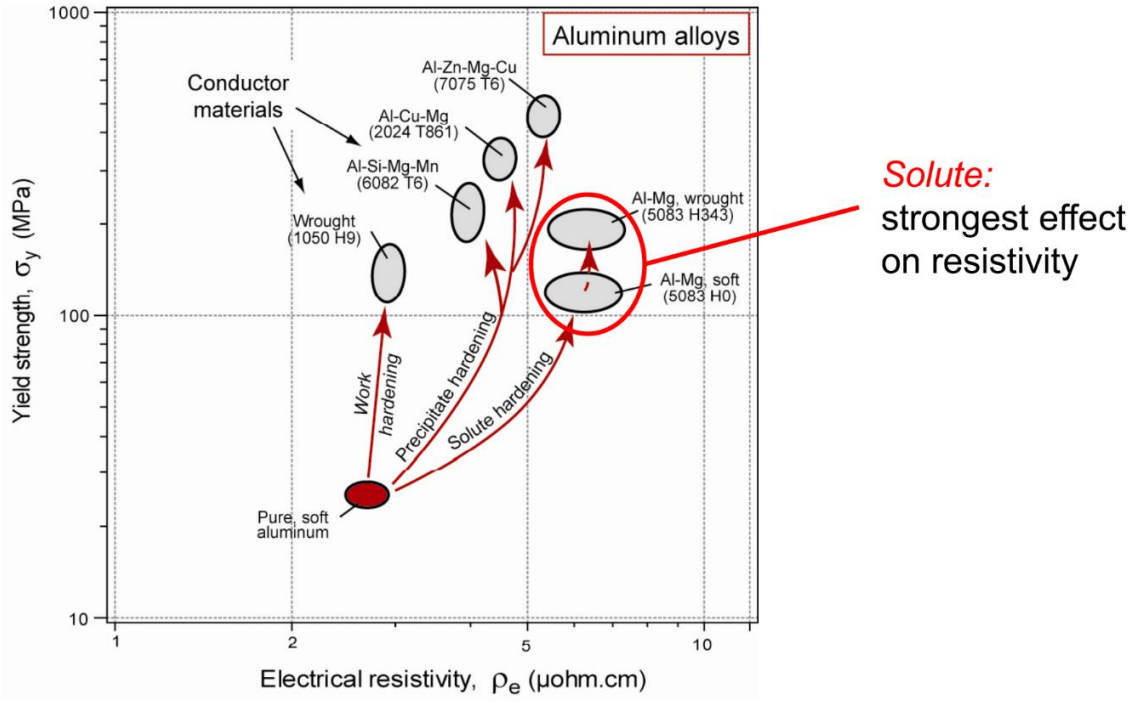


Abb. 72: Einfluss von Kaltverfestigung, Ausscheidungshärtung und Mischkristallverfestigung auf Streckgrenze und elektrischen Widerstand

5.2.7 Zusätzliche Werkzeuge in der Software CES

In der CES-Software sind noch weitere unterstützende Module enthalten, wie

- Eco-Audit Tool: erläutert die Konzepte des Öko-Designs und Lebenszyklusdenken
- Hybrid Synthesizer: schätzt die Eigenschaften von Verbundwerkstoffen ab (für Sandwich, zelluläre Strukturen, Multischichten und Mischungen)
- Cost Estimator: rasches Abschätzen der Herstellkosten eines Bauteils

Zusätzlich sind im CES Level 3 inkludiert:

- MMPDS & CMH-17 (früher MIL-HDBK-5) US-Luftfahrtwerkstoff-DB und Composites
- Modul für kohlenstoffarme Stromerzeugung und Energiespeichersysteme
- Nachhaltigkeitsdaten Gesetze und Vorschriften, kritische Materialien
- CAMPUS Datenbank für Kunststoffe (ca. 6000 Kunststoffe von etwa 20 Herstellern)
- Prospector Plastics (IDES Plastics) 88000 Datensätze von 400 Harz-Anbietern
- Bio-Engineering Edition (soft tissue, mineralized tissue, natural fibers, wood, bio-derived materials, bio-medical materials)

5.2.8 Darstellung von Verarbeitungsprozessen in CES

Zur Auswahl geeigneter Fertigungsverfahren sind in der Software CES auch die wichtigsten Prozesse mit ihren charakteristischen Merkmalen, wie Formeignung, Wandstärken, Materialtauglichkeit, Toleranzen und ökonomische Losgrößen enthalten, siehe Abb. 73 bis Abb. 75. Einige werden später noch eingehender besprochen.

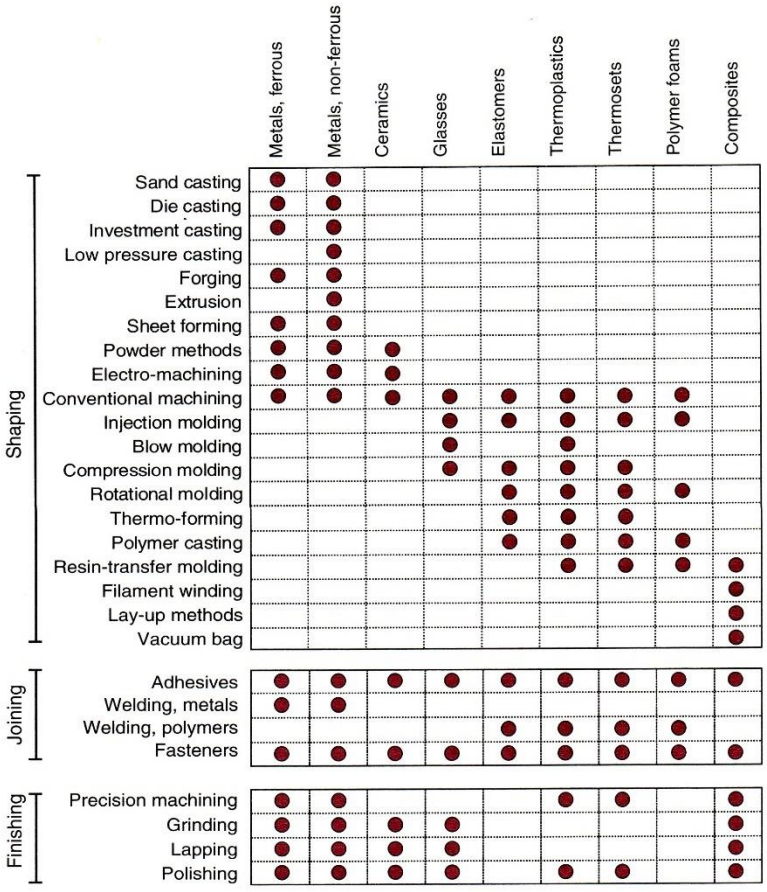


Abb. 73: Zuordnung der Werkstoffe zu kompatiblen Fertigungsprozessen

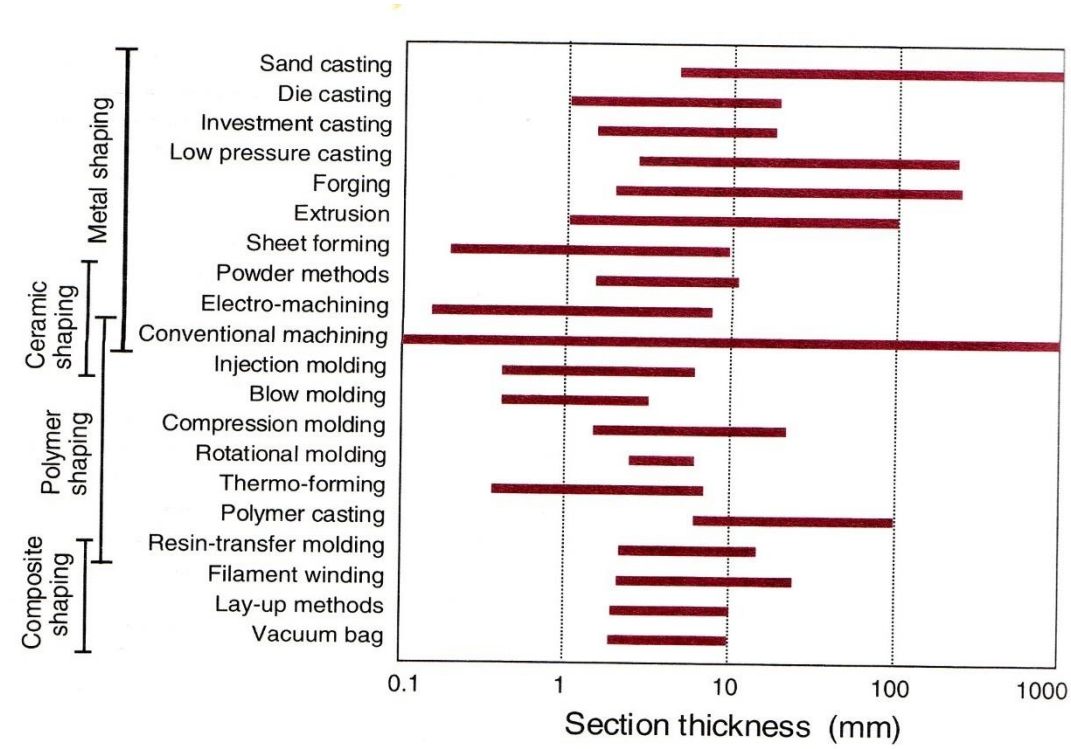


Abb. 74: Typische Wanddicken unterschiedlicher Fertigungsverfahren

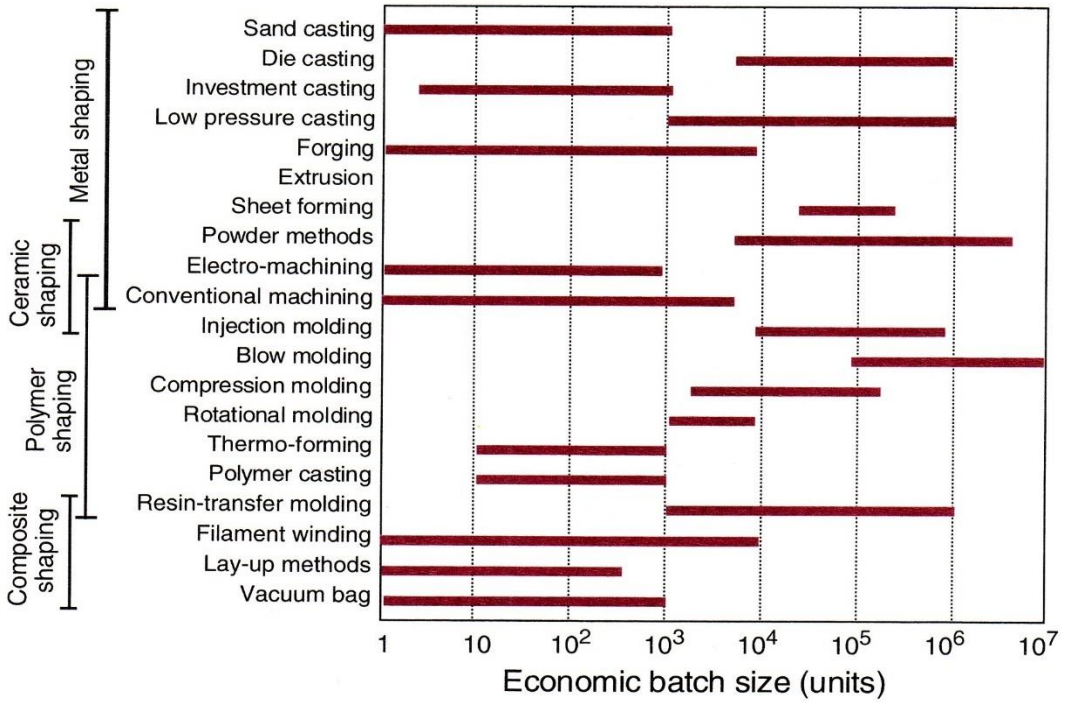


Abb. 75: Ökonomische Losgrößen für unterschiedliche Fertigungsprozesse

5.2.9 Wissenschaftliche Beiträge, die auf den Ashby-Ansatz beruhen

In den beiden Büchern von Farag und Charles et.al. [Far97, Cha97] zum Thema Werkstoffauswahl finden sich meist Auswahltabellen für spezielle Gebrauchs- und Verarbeitungseigenschaften mit zahlreichen Fallstudien zu bestimmten Anwendungen. Hinsichtlich einer Systematik des Auswahlprozesses wird aber schon damals auf das Ashby-Konzept zurückgegriffen.
Reuter [Reu07] beschreibt in seinem Buch erstmalig das Ashby-Konzept in deutscher Sprache mit Ergänzungen zu den Beurteilungskriterien und zur Informationsbeschaffung. Es werden auch die Werkzeuge und Methoden des Produktentwicklungsprozesses ausführlich behandelt. Aspekte der Fertigungseinflüsse sind nur kurzgehalten.
Prof. Heine [Hei16] benutzt den Ashby-Ansatz zur Auswahl von Werkstoffen aus Sicht der Konstruktion, der Festigkeitsberechnung für unterschiedliche mechanische Beanspruchungen und zur Energiespeicherung. Der Lösungsweg und die Herleitung der materialabhängigen Suchkriterien sind für Studenten gut nachvollzieh abgeleitet.
Sehr spannend und mit Designer-Interviews versehen, ist das Buch Materials Experience [Kar13], welches die vielseitige Welt der Werkstoffe aus einer fast künstlerischen Weise mit einem Vorwort von Mike Ashby und mehreren Gastautoren beschreibt.
Im Anhang werden noch unzählige Publikationen, die den Ashby-Ansatz in erster Linie für Anwendungen verfolgen zitiert.
Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es zurzeit keinen besseren Ansatz zur systematischen Werkstoffauswahl gibt.
Es gibt aber immer noch Beispiele, die durch tiefes werkstoffkundliches Know-how, gepaart mit langjähriger Erfahrung elegante Lösungen ermöglichen. Gerade hier kann der Mensch mit seiner Kreativität neue Innovationen schaffen. Man denke an die Entwicklung neuer Werkstoffe über atomistische Modellierung oder die vielfältigen Möglichkeiten der Oberflächentechnologien.

5.3 Auswahl nach Gebrauchseigenschaften

Jeder Werkstoff besitzt individuelle Eigenschaften, die für den Gebrauch nützlich sind. Abb. 76 fasst die Werkstoffeigenschaften in sechs Kategorien zusammen. Einige Eigenschaftskategorien haben noch Untergruppen, die auf ähnliches charakteristisches Verhalten verweisen. Die meisten Werkstoffeigenschaften sind quantitativer Art, d.h. es gibt spezifische Werkstoffkennwerte, die meist standardisiert gemessen werden und als Kennwert für die Reihung von Werkstoffalternativen oder zur Auslegung von Komponenten verwendet werden. Zur Bestimmung der Werkstoffkennwerte gibt es eine große Fülle von genormten, aber auch dem Anwendungsfall angepasste Prüfmethoden.
Physikalisch betrachtet sind viele Eigenschaften dem atomaren Aufbau bzw. den Bindungskräften geschuldet, weshalb das werkstoffkundliche Grundwissen eine gute Voraussetzung für die Werkstoffauswahl bildet.

Abb. 76: Unterteilung der Werkstoffeigenschaften in Subkategorien

Sind die geforderten Werkstoffeigenschaften für einen Anwendungsfall eindeutig erkannt, so kann mit der im vorigen Kapitel beschriebenen Art und Weise, und auch für multiple Anforderungen, eine übersichtliche und vergleichbare Grundlage für die Auswahl von Werkstoffen geschaffen werden.
In der Praxis kann der Auswahlprozess auch sehr rasch durch Erfahrungswissen in einem gewissen Anwendungsbereich bzw. für eine bestimmte Werkstoffgruppe stattfinden. Man spricht dann von den „best practice“ -Erfahrungen. Ein möglicher Nachteil kann aber dann sein, dass echte Alternativen und Neuentwicklungen übersehen werden.

5.3.1 Erkennen der relevanten Werkstoffeigenschaft für einen gegebenen Fall

Es gibt Anwendungsfälle, wo die Zuordnung von klar definierten Werkstoffeigenschaften nicht immer möglich ist, weil das Bauteilverhalten von vielen Faktoren abhängt und man daher eher von einem Systemverhalten spricht. Als Beispiel seien hier das Verschleiß-, das Korrosions- oder das Schweißverhalten von Werkstoffen genannt. Auch ein instabiles Systemverhalten, wie das Beulen und Knicken sind nicht leicht „greifbar“. Auch die Frage, welcher Werkstoff besser rezyklierbar und wiederverwendbar ist, kann nicht sofort beantwortet werden.
Es gibt auch Beispiele, bei denen das Zusammenwirken mehrerer Kenngrößen maßgebend ist. Man denke bspw. an das Tastempfinden von Oberflächen, wo man mit der bloßen Hand bei gleicher Temperatur verschiedene Werkstoffe als kalt oder warm empfindet. Kenner wissen diesen Zusammenhang, der als Wärmeeindringkoeffizient b bekannt ist. Der b-Wert wird berechnet aus der Quadratwurzel von Wärmeleitfähigkeit mal Dichte mal spezifischer Wärmekapazität. Stoffe mit hohem b-Wert, wie z.B. Metalle, werden als kalt empfunden, während Dämmstoffe oder Holz als warm empfunden werden.

Es kommt auch vor, dass es für eine bestimmte Eigenschaft keine brauchbaren Messdaten gibt und das Werkstoffverhalten erst in aufwendigen, anwendungsnahen Versuchen bestimmt werden muss, wie bspw. das Kavitationsverhalten. In diesem Zusammenhang soll auch erwähnt werden, dass Laborversuche nicht immer direkt und erfolgreich auf reale Anwendungen übertragbar sind.
Physiologische Stoffeigenschaften, wie Geruch, Geschmack, Umweltschädlichkeit u.a. sind in der Ingenieurwelt eher unbekannte Eigenschaften.
Nicht unbedeutend ist auch der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit. Bei schlagartiger Belastung ist ein sicheres Bauteilverhalten nur dann gewährleistet, wenn der Werkstoff eine ausreichend hohe Bruchzähigkeit aufweist. Daher muss bei explosionsgefährdeten Anlagen neben der Festigkeitsauslegung auch eine bruchmechanische Betrachtung angeschlossen werden. Wenn Strukturwerkstoffe unter solchen Bedingungen versagen, gilt als letzte Hoffnung der Einsatz von Maraging-Stählen, die sich durch eine exzellente Kopplung von Festigkeit und Zähigkeit auszeichnen.
Schließlich sei noch erwähnt, dass manche Werkstoffeigenschaften sich mit der Zeit, mit der Temperatur oder in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen verändern. Dies erfordert zusätzliche Betrachtungen, die insbesondere beim Alterungsverhalten von Kunststoffen eine wichtige Rolle spielen.

5.3.2 Stofflicher Leichtbau

Beim stofflichen Leichtbau wird versucht, möglichst Werkstoffe mit geringer Dichte zu verwenden, um die Gesamtmasse zu reduzieren. Im Automobilbau werden daher Teile aus Stahl durch Titan-, Aluminium-, Magnesium-Legierungen oder sogar Kunststoff substituiert.
Diese Betrachtung ist jedoch etwas zu einfach, weil eine Komponente aus höchstfestem Stahl leichter sein kann als eine mit einer Al-Legierung gefertigte gleiche Komponente. Aus diesem Grund spricht man auch von gewichtsspezifischen Eigenschaften. In jüngster Zeit haben sich deshalb auch press- oder formgehärtete, hochfeste Bleche im Karosseriebau durchgesetzt, siehe Abb. 77. Eine umfangreiche Zusammenstellung der Leichtbauwerkstoffe für den Fahrzeugbau findet sich in [Fri17].
Wird die leichte Kunststoffmatrix mit Glas- oder Kohlefasern verstärkt, so ergeben sich durchaus interessante Alternativen/Verbunde für den Flugzeugbau.
Die Materialeinsparung durch Hohlräume ist ebenso wirkungsvoll. Dies wird erreicht durch zellulare Materialien, Zellulosefaserbunde oder durch metallische Schäume. Letztere haben sich aber leider in der Praxis nicht bewährt.

In der Umsetzung ist es aber erforderlich, auch die Fertigungsart und die Kosten zu berücksichtigen, siehe dazu Kapitel 6.5.

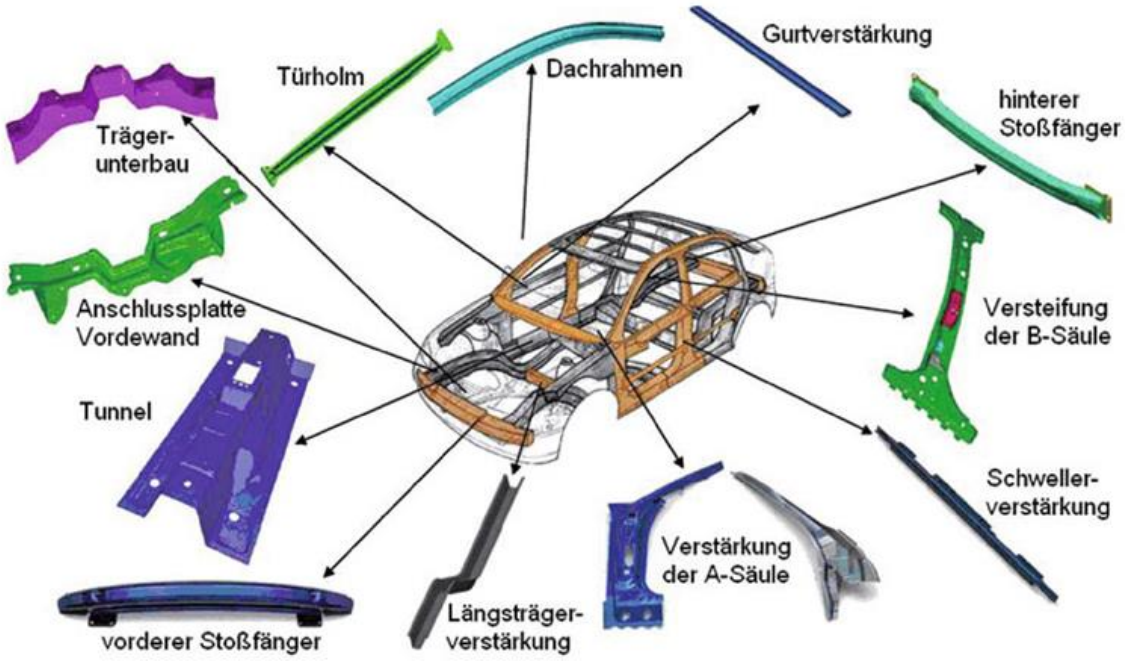


Abb. 77: Einsatzbereiche formgehärteter, hochfester Bleche im Karosseriebau (Bildquelle: Benteler Automotive)

5.3.3 Auswahl bei korrosiven Beanspruchungen

Das korrosive Werkstoffversagen in verschiedenen Medien ist in komplexer Weise abhängig vom Medium, Konzentration, pH-Wert, Temperatur, Sauerstoffkonzentration, Strömungsbedingungen und noch weiteren Faktoren. Eine gute Voraussetzung zur Auswahl geeigneter Werkstoffe ist das Wissen über die wahrscheinliche Art der Korrosion. In der DIN EN ISO 8044 (früher DIN 50900) werden 37 verschiedene Korrosionsarten unterschieden. Die wichtigsten Arten sind:

- Flächig abtragende Korrosion
- Kontaktkorrosion oder galvanische Korrosion
- Lochfraß- und Spaltkorrosion
- Spannungsrisskorrosion
- Interkristalline Korrosion
- Schwingungsrisskorrosion
- Hochtemperaturkorrosion
- Wasserstoffversprödung
- Sauergaskorrosion
- Bakterielle anaerobe Korrosion

In [Lan05] werden für die o.g. Korrosionsarten Faustregeln für die Werkstoffauswahl angegeben. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Aussagen bzgl. beständiger und unbeständiger Werkstoffe für die genannten Korrosionsarten ist als Tabelle 27 wiedergegeben.

Als Korrosionsschutz wird beim passiven Schutz der Kontakt zwischen dem Material und dem Korrosionsmedium unterbunden. Dies geschieht durch Feuerverzinken, Schutzanstriche, Glasüberzüge, Verchromung, organische Beschichtungen u.a.m.

Beim aktiven Schutz durch Opferanoden, thermisches Spritzen, Verzinken ist eine Trennung von Material und korrosiven Medium nicht erforderlich.

Korrosionsart	Metallurgische Merkmale	Unbeständige/anfällige Legierungen	Beständige Legierungen
Flächige Korrosion	Chem. Zusammensetzung	Mg-Legierungen Unlegierte Stähle	Rostfreie Stähle Kupferlegierungen Nickellegierungen Ti-Legierungen
Lochfraß / Pitting	Legierungsgehalt, Schicht	Rostfreie Stähle Aluminiumbronzen Si,C,Ti,Nb in Stählen Alle passivierten Metalle	Ti-Legierungen Stähle mit hohem Ni-Gehalt Mo, Cr, N-legierte Stähle
Erosion	Härte	Niedriglegierte Stähle Al-Legierungen	Martensit. Rostfreie St. Nickellegierungen Ti-Legierungen
Galvanische Korrosion	Elektrochemische Potentialdifferenz der Partner	Al, Mg, Zn, Cd, artverschiedene Werkstoffe	Artgleiche Werkstoffe Metalle, die undurchlässige Schichten bilden
Interkristalline Korrosion	Wärmebehandlung, Abkühlrate beim Schweißen	Geschweißte rostfreie austenitische Stähle einige Al-Legierungen einige Ni-Legierungen	Abgeschreckte Al-Legierungen Ni-Legierungen mit Cr und Mo
Spanungsriss-korrosion		C-Stähle, HSLA-Stähle, austenit. Rostfeie Stähle, Ti-Legierungen 2000 und 700er Al-Leg. Mg-Leg. Cu-Leg. Zr-Leg	AlMg-Legierungen mit Mg<4%
Schwingungs-risskorrosion	WB, chem. Zusammensetzung	Wie bei SRK Beschichtungstechniken, bei denen Wasserstoff eindiffundieren kann	Es gibt kein Metall, das nicht anfällig ist
Filiform-Korrosion	Beschichtungsdicke	Legierungen mit durchlässigen, spröden, hydrophilen organischen Schichten	Legierungen mit dicken, undurchlässigen Schichten Nicht-organ. Schichten

Tabelle 27: Grobe Übersicht anfälliger und beständiger Werkstoffe bei unterschiedlichen Korrosionsarten, zusammengestellt nach Angaben in [Lan05]

Die Beständigkeit der Werkstoffe in bestimmten Medien wird normalerweise in elektrochemischen Testreihen bestimmt und in Form von Stromdichte-Potential-Kurven dargestellt.
In Beständigkeitstabellen wird die Beeinträchtigung eines Werkstoffs gegenüber Chemikalien oder korrosiven Medien grob klassifiziert (beständig – bedingt beständig – unbeständig). Das umfangreichste Nachschlagewerk zur Korrosion und chemischen Beständigkeit von Werkstoffen mit Empfehlungen zur Werkstoffauswahl in verschiedenen angreifenden Medien stellen die DECHEMA-Werkstofftabellen (siehe www.dechema.de) mit Beständigkeitsdaten für metallische Werkstoffe, Kunststoffe und nichtmetallische anorganische Werkstoffe dar. Dazu gibt es noch Angaben von den Werkstoffherstellern (DEW), Fachverbänden (EFC, fkks), Normungsstellen/Klassifikationsstellen (NACE, NORSOK, Det Norske Veritas, Lloyd's register) und Versuchsabteilungen.
Sehr zielführend sind Auswahlrichtlinien zu wichtigen Werkstoffgruppen:

- Korrosionsbeständige Stähle (ferritische, austenitische, martensitische und Duplexstähle) finden sich in DIN EN 10088-3, [ISER-MB821, ISER-MB828] und Hinweise der Stahlhersteller, siehe bspw. www.dew-stahl.com
- Cu-Legierungen [DKI19]
- Nickellegierungen, siehe www.vdm-metals.com
- Kunststoffe, siehe www.buerkle.de, www.buerkert.de, www.vega.com u.a.

Meist ist man aber auf der Suche nach korrosionsbeständigen Werkstoffen in einem bestimmten Anwendungsbereich. Die Auswahlempfehlungen sind in diesen Fällen wesentlich spezifischer und auch durch praktische Erkenntnisse abgesichert. Korrosionsfragen sind bedeutend für die Bereiche Luftfahrt, Automobilbau, Öl und Gas, Chemie und Anlagenbau, Energie- und Umwelttechnik, Meerwassertechnik, Medizintechnik und Elektronik/Elektrotechnik.
Als Beispiel wird der Bereich Öl und Gas etwas näher betrachtet. Auswahlempfehlung finden sich in [Sri18, Ued06, Swa20]. Die eingesetzten Werkstoffe sind hohen Drücken und Temperaturen mit erhöhten Gehalten an Chloriden, CO_2 und H_2S ausgesetzt. Die Korrosionsart wird als Sauergaskorrosion bezeichnet. Ein grobes Schema für die Werkstoffauswahl in Abhängigkeit der Einflussparameter zeigt Abb. 78.

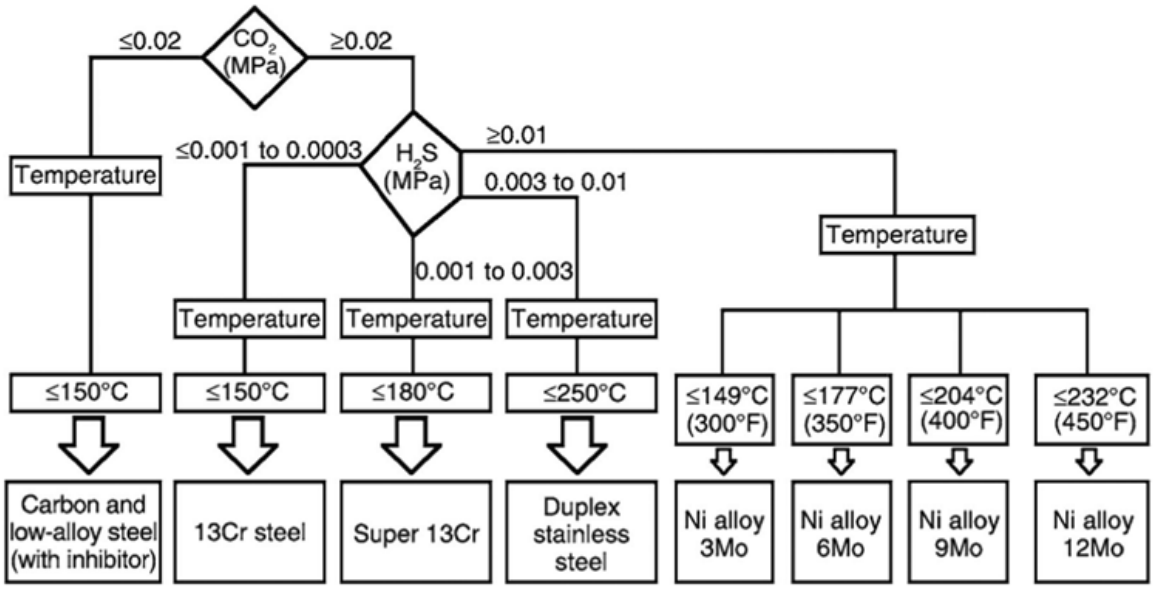


Abb. 78: Auswahl von Sauergas-korrosionsbeständigen Legierungen im Bereich Öl und Gas nach [Ued06]

Im Pumpenbau wird eine gute Kombination aus Korrosions- und Verschleißbeständigkeit gefordert. Als weitere Kriterien für die Werkstoffauswahl zählen Verfügbarkeit und Preis. Gebräuchliche Pumpenwerkstoffe sind in Tabelle 28 zusammengefasst. Abb. 79 zeigt die Lage verschiedener Werkstoffgruppen.

Metallische Guss-werkstoffe	Reinmetalle	Kunststoffe	Keramik
Un- und niedrig legierte Werkstoffe	Titan	Epoxidharze	Steinzeug (silicatkeramisch)
Verschleißlegierung	Titan-Palladium	PP	
Sonderlegierung	Zirkonium	UHMW-PE (ultra-hochmolekulares PE)	Thermoschockbe-ständiges Steinzeug
Martensitische und Ferritische Werkstoffe	Nickel	Polyurethane	SiSiC (Silicium in-filtriertes Silicium-carbid)
Austenite		PVDF	Kohle/Graphit
Halb-Austenite		ETFE	
Nickelbasiswerkstoffe		PFA/PTFE	

Tabelle 28: Übersicht gängiger Pumpenwerkstoffe aus [Zil08]

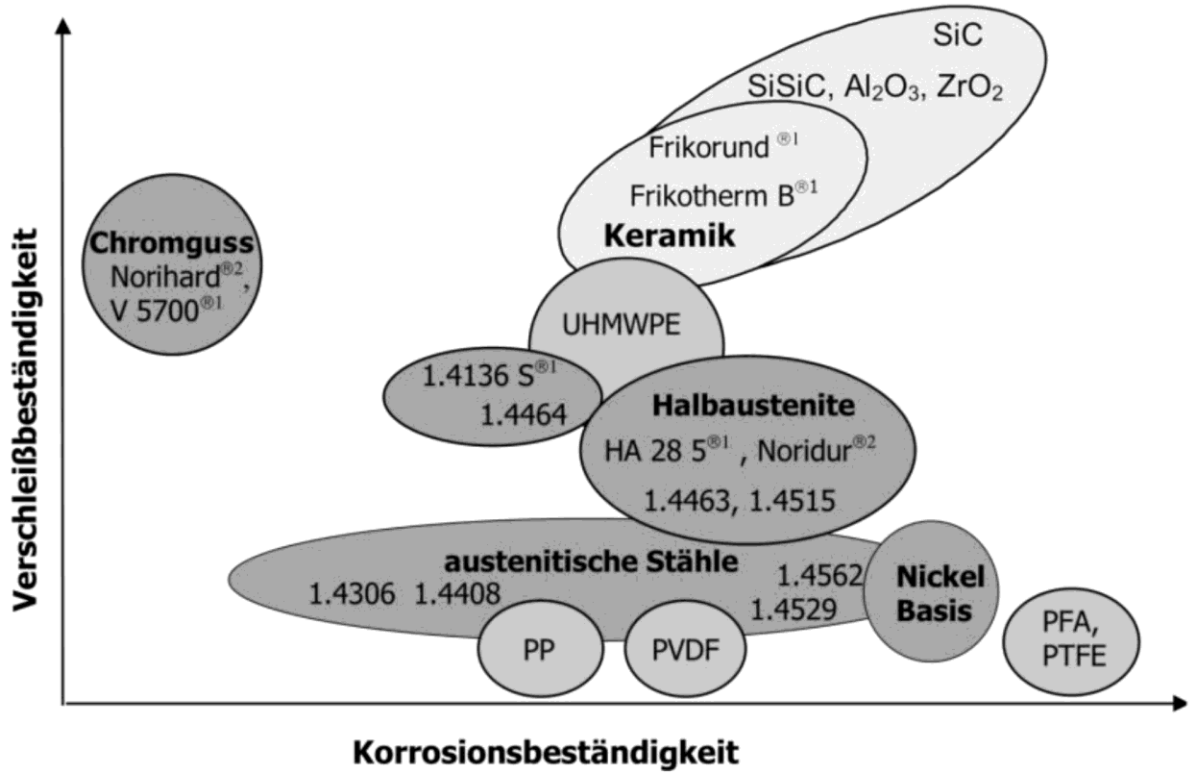


Abb. 79: Korrosions- und Verschleißbeständigkeit verschiedener Pumpenwerkstoffe nach [Zil08]

5.4 Werkstoffauswahl nach Materialkosten

Materialkosten haben aufgrund des hohen Anteils an den Gesamtkosten einen durchschlagenden Einfluss auf das Betriebsergebnis. Die Gliederung der Kostenstruktur im verarbeitenden Gewerbe ist in Abb. 80 dargestellt und zeigt einen durchschnittlichen Materialkostenanteil von ca. 40% . Aufgrund dieses hohen Anteils werden unterschiedliche Ansätze zur Verbesserung der Materialeffizienz genutzt. Seitens der öffentlichen Hand wird ein Einsparungspotenzial von 8 bis 10% angenommen. Eine Übersicht der Einsparungsmaßnahmen gibt Abb. 81 für den Bereich Produktentwicklung und Produktherstellung. Viele dieser Maßnahmen werden auch in diesem Buch noch ausführlich behandelt. In diesem Kapitel geht es aber primär um die Frage, wie sich die wichtigsten Konstruktionswerkstoffe bezüglich ihres Kilopreises unterscheiden.

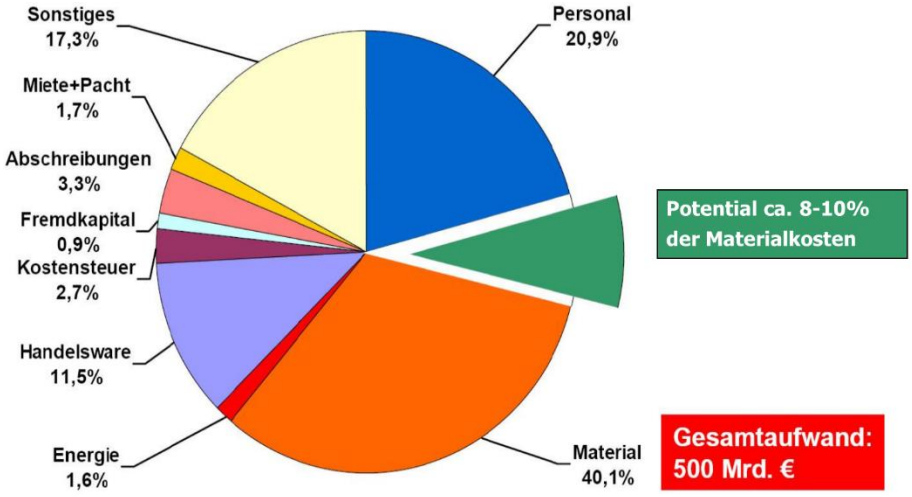


Abb. 80: Kostenstruktur im verarbeitenden Gewerbe (Quelle: Dt. statistischen Bundesamt)

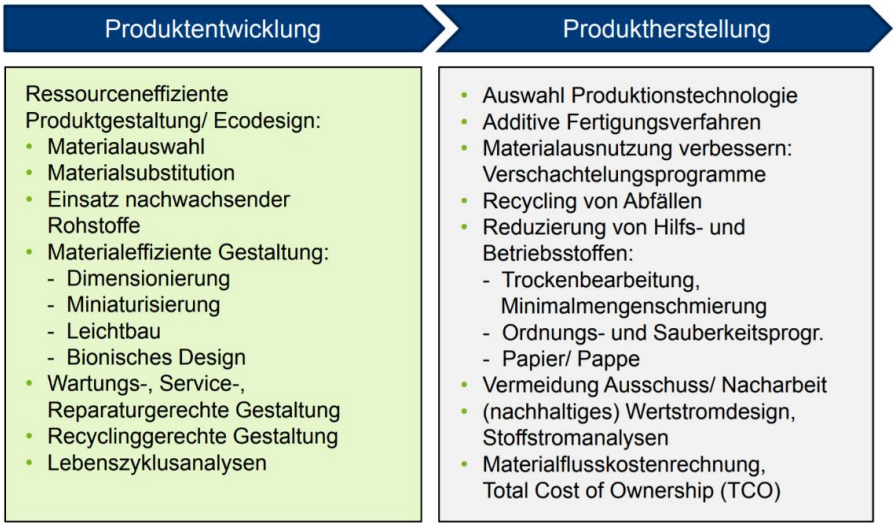


Abb. 81: Ansätze zur Verbesserung der Materialeffizienz (Quelle: NiFaR, Niedersächsische Lernfabrik für Ressourceneffizienz)

Eine erste grobe Übersicht über die Werkstoffkosten für unterschiedliche Werkstoffgruppen geben die Abb. 82 und Abb. 83, einmal bezogen auf die Masse und zum anderen bezogen auf das Einheitsvolumen.

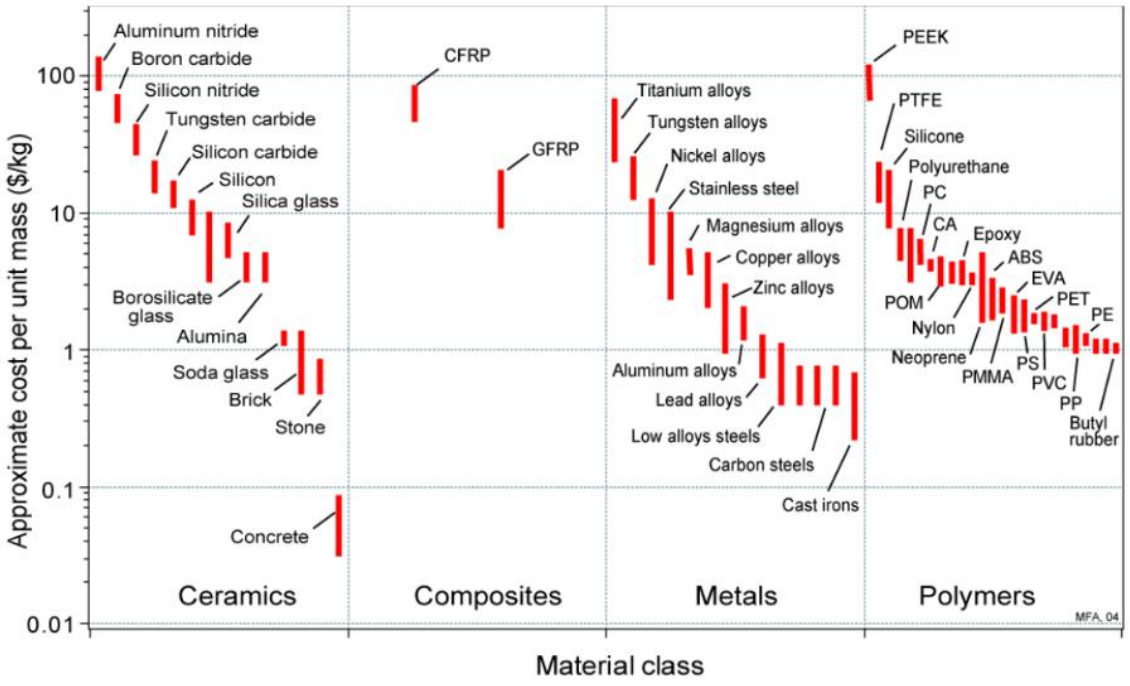


Abb. 82: Gewichtsbezogene Werkstoffkosten in USD/kg

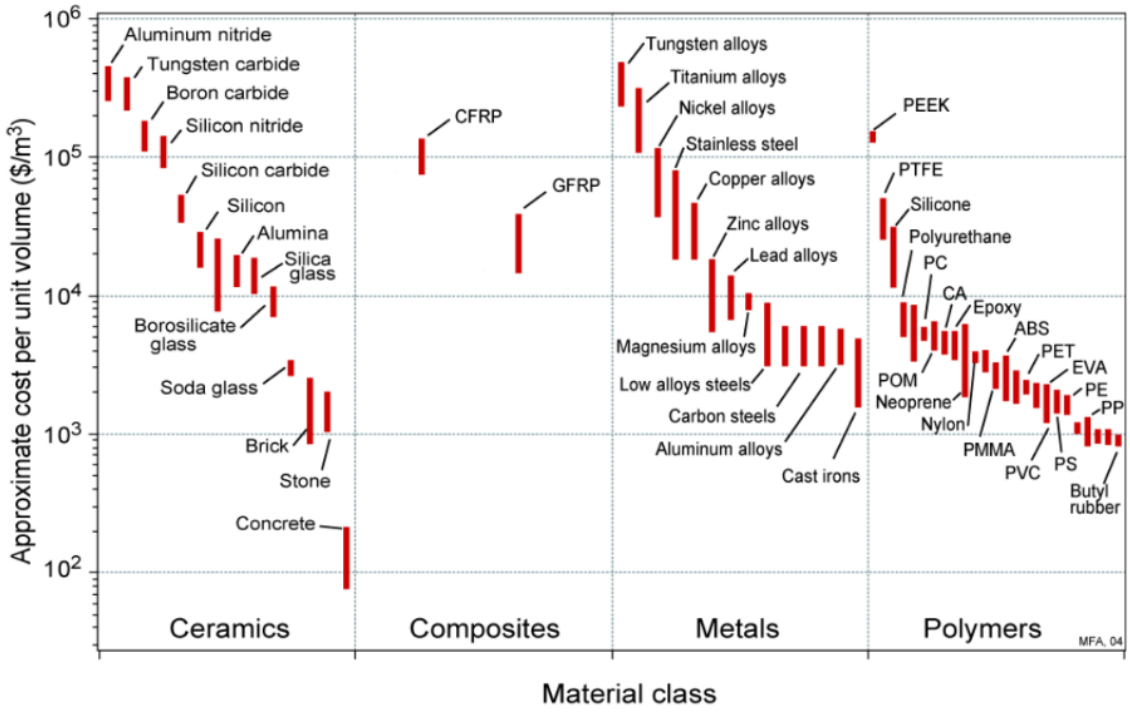


Abb. 83: Volumenbezogene Werkstoffkosten in USD/m³

Abb. 84 zeigt den deutlichen Unterschied zwischen den Rohstoffpreisen und den Preisen der Fertigprodukte, der dadurch begründet ist, dass insbesondere bei den High-Tech-Produkten der Materialanteil deutlich niedriger ist, während die Kosten für das Engineering-Know-How und ggfs. auch für das Fertigungs-Know-How deutlich zunehmen. Nur bei einfachen Produkten (Brücken, Kräne, Rohrleitungen, Tankschiffen u.a.m.) dominieren die Materialkosten.

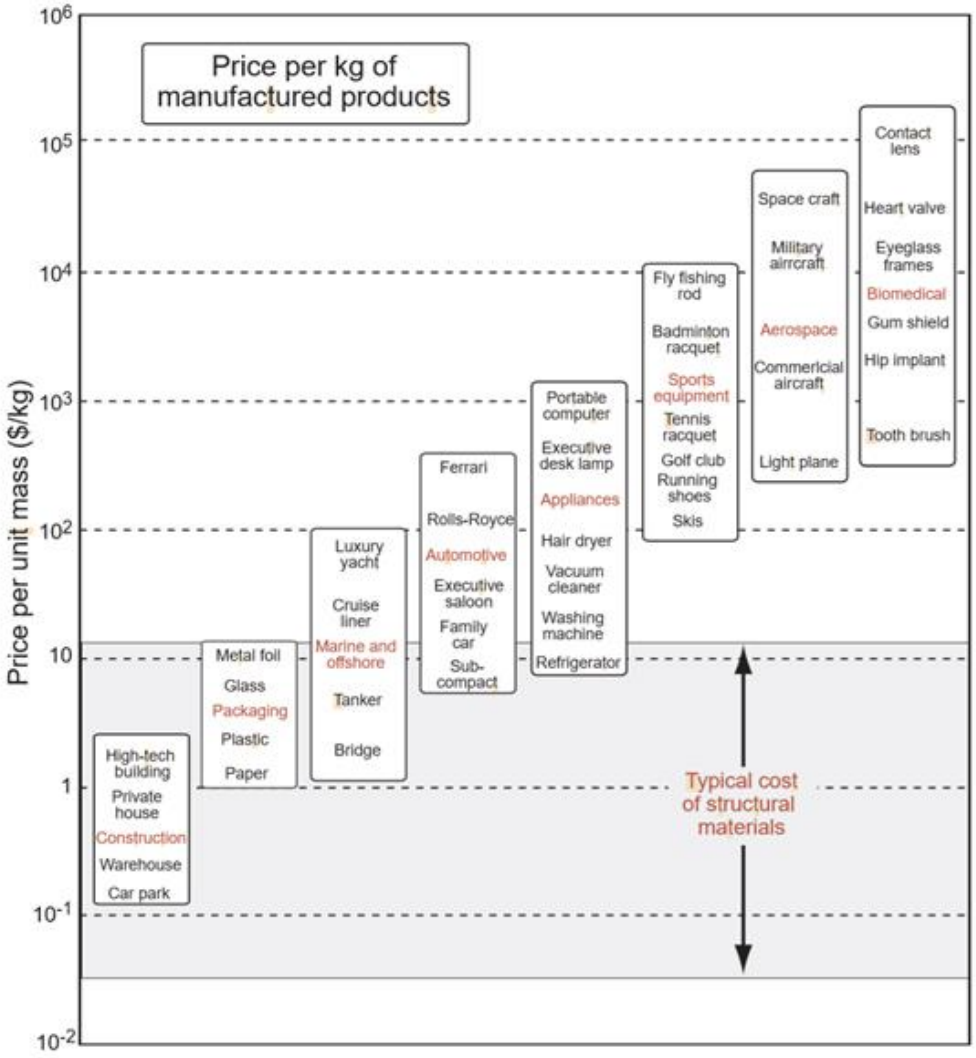


Abb. 84: Preis des Endproduktes bezogen auf das Gewicht [Ash17]

5.4.1 Preisbildung und Preisschwankungen

Die Preisbildung der Konstruktionswerkstoffe unterliegen im Wesentlichen dem Gleichgewichtsprinzip zwischen Angebot und Nachfrage, wie es im Kapitel 2.1 beschrieben ist. Einige wichtige Rohstoffe, wie Gold, Silber, Palladium u.a. werden direkt an der Börse gehandelt. Da sie einen realen Wert besitzen ist ein „Totalausfall“ eher unwahrscheinlich, aber. Wenn es zu Engpässen in der Herstellung kommt oder im gegenteiligen Fall zu Überkapazitäten, so können die Marktwerte schnell und teils enorm variieren. Vielen Menschen haben sehr wohl die Schwankungen des Ölpreises im Kopf, die durch politische Krisen, Embargos oder auch die willentliche Drosselung der Fördermengen entstehen.

Bei den Industriemetallen, wie Kupfer, Zink, Nickel und Aluminium übernimmt die London Metal Exchange (LME) die zentrale Funktion einer Metallbörse. Sie wurde im Jahr 2012 von der Hong Kong Exchanges and Clearing übernommen. Weiters zählen die Metallbörsen in Singapur (SIMEX) und New York (COMEX) zu den weltgrößten Metallhandelsplätzen. Edelmetalle wie etwa Gold oder Silber nicht an der LME, sondern eher am London Bullion Market oder an der New York Mercantile Exchange (NYMEX) gehandelt. Die Preisfeststellung für Platin und Palladium findet dagegen am London Platinum and Palladium Market statt.
Die Schwankungen der Marktpreise für einige Metalle in den letzten 10 Jahren sind in Abb. 85 zusammengestellt. Abb. 86 zeigt Vergleich dazu die Entwicklung der Kunststoffpreise.

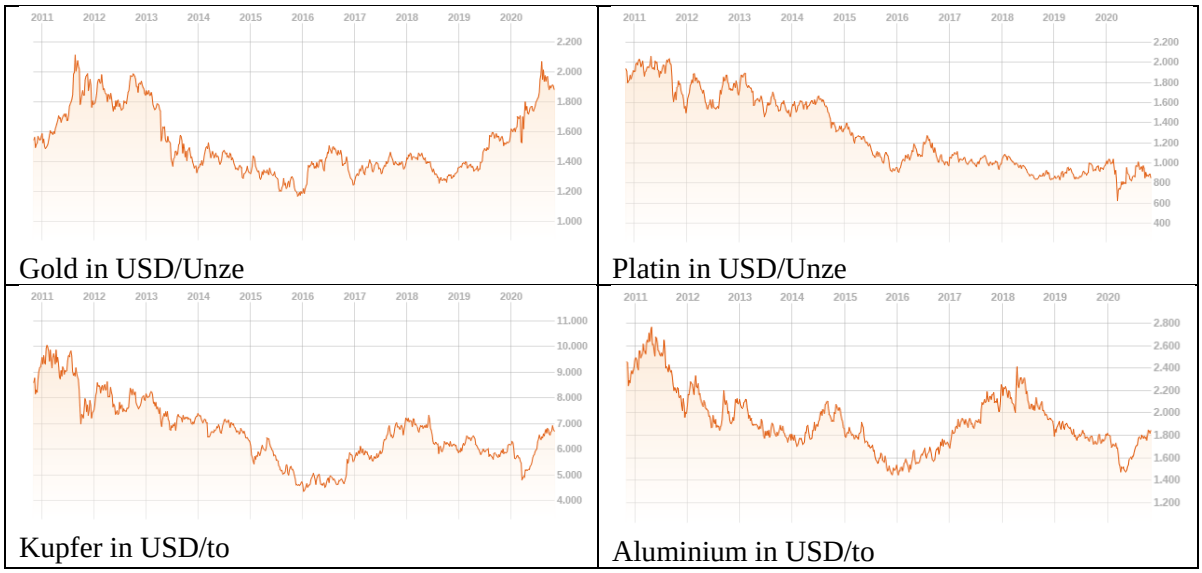


Abb. 85: Schwankungen im Marktwert der Industriemetalle Gold, Platin, Kupfer und Aluminium in den letzten zehn Jahren (Datenquelle: LME London)

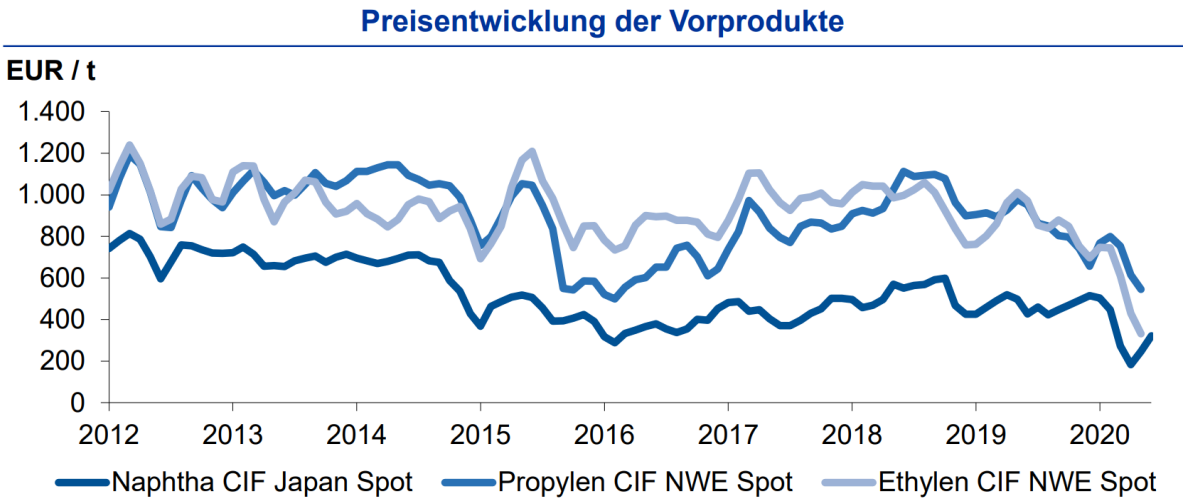


Abb. 86: Entwicklung der Kunststoffpreise (Datenquelle: Bloomberg, IKD)

Sehr wichtig für höherlegierte, korrosionsbeständige Stähle sind die Entwicklungen der Preise für Chrom und Nickel. Zn-Preisentwicklungen sind für die verzinkten Autobleche aus unlegierten Stählen preisbestimmend.

Die Einflüsse durch die Legierungszusammensetzung auf den Kilopreis zeigt Abb. 87 für Kupferlegierungen

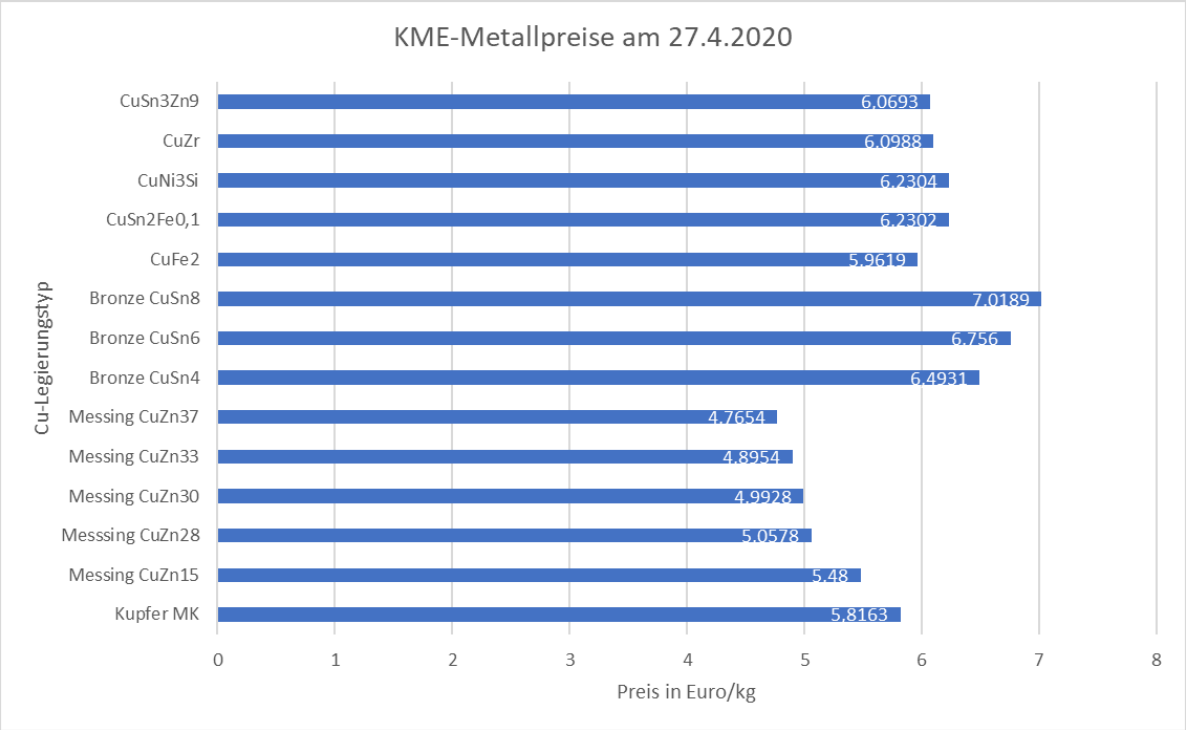


Abb. 87: Kilopreise für verschiedene Cu-Legierungen (Quelle: KME)

5.4.2 Stahlpreisentwicklungen

Weil Stahl mit einer jährlich produzierten Menge von ca. 1800 Mio. Tonnen zu den am häufigsten verwendeten Konstruktionswerkstoffen zählt, werden noch detaillierte Daten anführt. Die Stahlpreisentwicklung von 2013 bis 2020 für drei ausgewählte Stahlgüten zeigt Abb. 88 aus [Bue20]

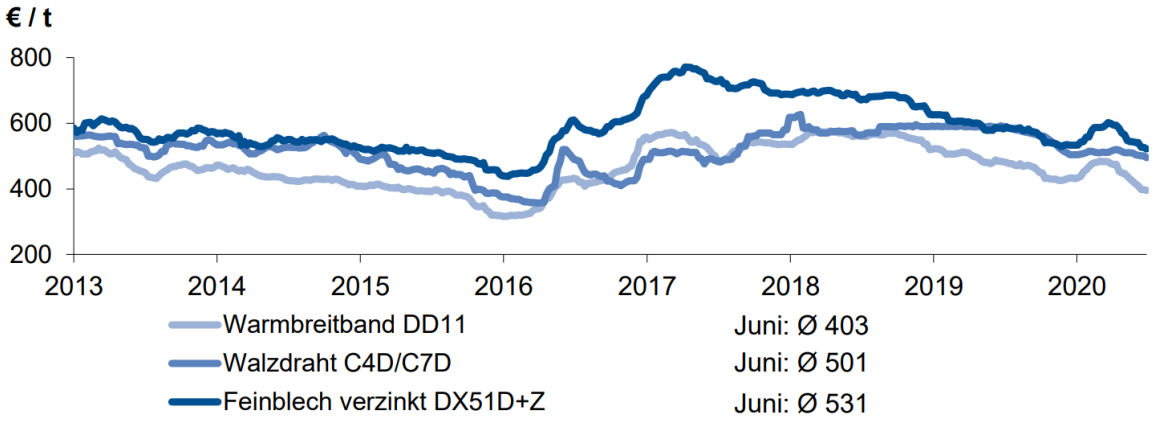


Abb. 88: Stahlpreise typischer Stahlgüten für Warmbreitband, Walzdraht und Feinblech (Datenquelle: IISI, IKB, MBI)

Die regionalen Preisunterschiede (China, USA, Europa) für vier wichtige Stahlerzeugnisse zeigt Abb. 89 Die kontinuierlich sinkende Schrottpreisentwicklung – wichtig für die Elektrostahlerzeugung – ist in Abb. 90 wiedergegeben.

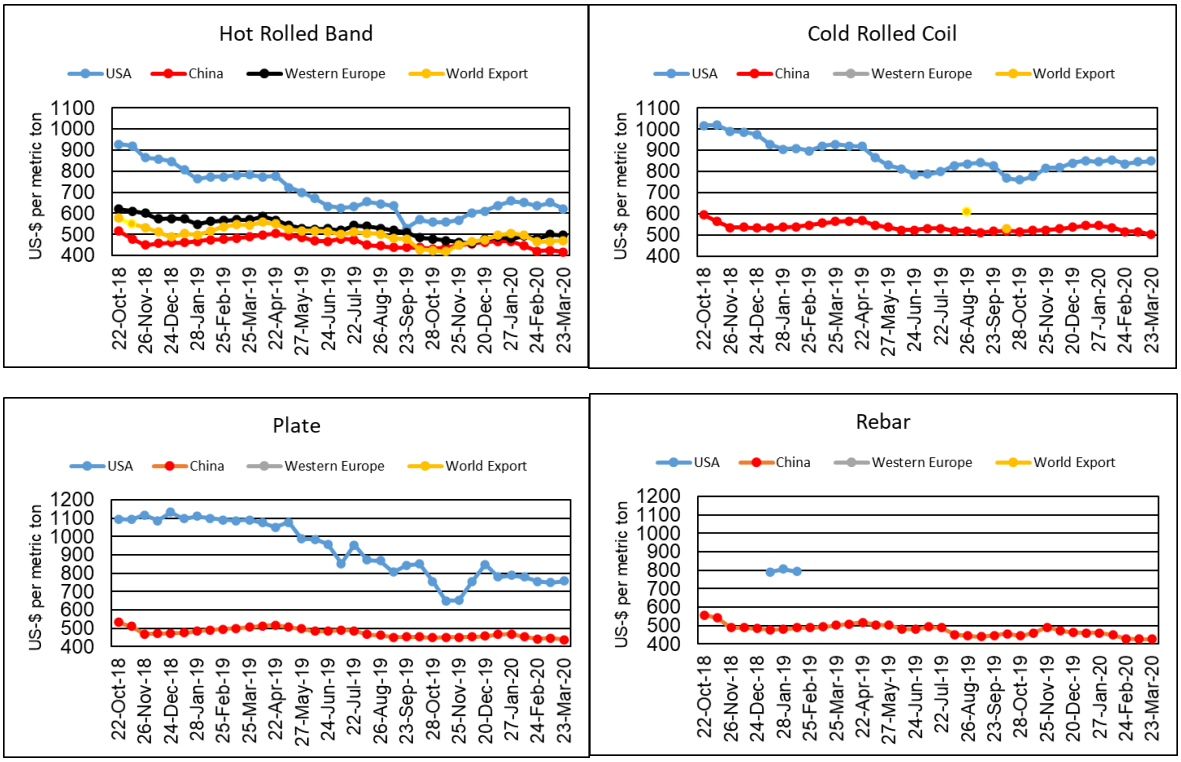


Abb. 89: Regionale Stahlpreisentwicklungen in China, USA und Europa (Quelle: M.Degner, persönlich)

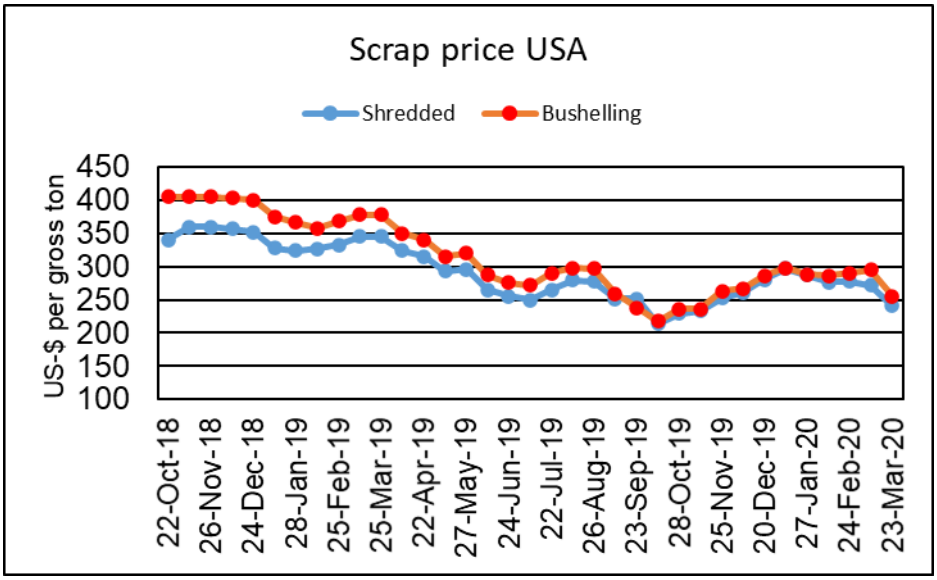


Abb. 90: Entwicklung der Stahlschrottpreise (Quelle: M.Degner, persönliche Mitteilung)

5.4.3 Eigenschaften und Preise der Ingenieur-Kunststoffe

Es mag auch interessant sein, technisch bedeutungsvolle Kunststoffe im direkten Vergleich ihrer Gebrauchseigenschaften und ihres Preises zu betrachten, siehe Abb. 91.

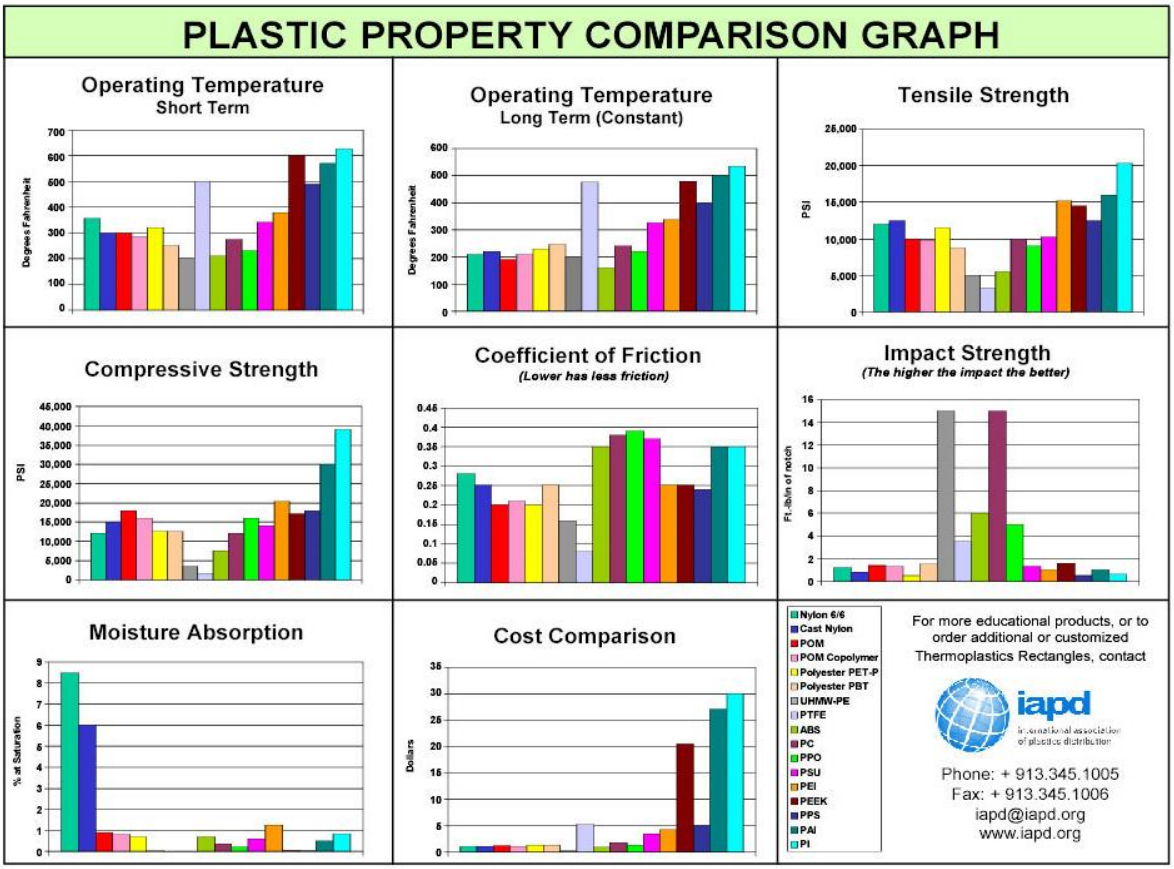


Abb. 91: Vergleich wichtiger Polymer-Werkstoffe bzgl. ihrer Eigenschaften und re unten bzgl. des Kilopreises. (Quelle: www.iapd.org)

5.4.4 Informationsquellen für Materialpreise

Im Zuge der Recherchen für diese Kapitel hat sich sehr schnell gezeigt, dass es nur sehr wenige vertrauenswürdige Quellen zu Werkstoffpreisen gibt. Einige nützliche Quellen sind: www.lme.com, www.worldsteel.org (IISI), www.ikb.de, www.stahlpreise.eu)

Aus Sicht einer umfassenden Werkstoffauswahl sind wohl die von Granta Design (UK) und dem Team um Prof. Mike Ashby durchgeführten jährlichen Erhebungen, die auch in der Software CES implementiert sind, am besten geeignet.

Darüber hinaus muss auch erwähnt werden, dass die Preise von Vormaterialien (Band, Rohr, Winkel, Profil etc.) je nach Fertigungsaufwand andere Kilopreise bei gleichem Werkstofftyp haben. Diesbezüglich finden sich detaillierte Angaben in den zahlreichen Firmenbroschüren.

Für die endgültige Auswahl sollte der Einkauf gezielte Anfragen durchführen, denn ein professionelles Einkaufmanagement kann die Unternehmensgewinne signifikant beeinflussen [RKW20].

5.4.5 Materialkostenanteile in High-Tech-Produkten

Die Kostenanteile eines Neuwagens zählen wohl zu den bestgehüteten Geheimnissen der Automobilbauer. Laut [Bil19] mit Auskunft von Prof. Diez vom Institut für Automobilwirtschaft (IFA) ergeben sich bei einem durchschnittlichen Kaufpreis von 26.780 EURO die in Tabelle 29 dargestellten Kostenanteile. Bezieht man die Materialkosten auf den Listenpreis abzüglich Händlermarge, dann ergibt sich ein Materialkostenanteil von 52% - ein, für den Maschinenbau durchaus üblicher Wert.

LISTENPREIS (BRUTTO)	**26 780 EURO**
- MwSt. (19%)	4 275 Euro
Listenpreis (netto)	**22 504,20 Euro**
- Händlermarge (16,5%)	3 713,19 Euro
- Materialkosten	9 789,33 Euro
- Personalkosten	2 250,42 Euro
- Abschreibungen	1 012,69 Euro
- Forschung und Entwicklung	1 350,25 Euro
- Werbung	562,61 Euro
- Garantiekosten	450,08 Euro
- Verwaltungs u. Vertriebskosten	2 137,90 Euro
GEWINN (5,5 %)	**1 237,73 Euro**
Quelle: Institut für Automobilwirtschaft (IFA)	

Tabelle 29: Kostenanteile beim Kauf eines Neuwagens. Quelle: https://www.bild.de/auto/auto-news/neuwagen/studie-autopreise-31691828.bild.html

Als zweites Beispiel zeigt Tabelle 30 die Kostenanteile bei einem iPhone 5 Modell mit den wichtigsten Kostentreibern. BOM steht für „bill of materials“.

		iPhone 5 Model		
Components / Hardware Elements	**iPhone 5 Hardware Comments**	**16GByte**	**32GByte**	**64GByte**
Pricing without Contract		**$649**	**$749**	**$849**
Total BOM Cost		**$199**	**$209**	**$230**
Manufacturing Cost		**$8.00**	**$8.00**	**$8.00**
BOM + Manufacturing		**$207**	**$217**	**$238**
Major Cost Drivers				
Memory				
NAND Flash		$10.40	$20.80	$41.60
DRAM	1GByte LPDDR2	$10.45	$10.45	$10.45
Display & Touchscreen		$44.00	$44.00	$44.00
Processor	A6 Processor	$17.50	$17.50	$17.50
Camera(s)	8 Megapixel + 1. 2 Megapixel	$18.00	$18.00	$18.00
Wireless Section - BB/RF/PA	Qualcomm MDM9615+RTR8600+Front End*	$34.00	$34.00	$34.00
User Interface & Sensors		$6.50	$6.50	$6.50
BT / WLAN	BTv4.0 + Dual-Band Wireless-N	$5.00	$5.00	$5.00
Power Management		$8.50	$8.50	$8.50
Battery	Assumed 1800mAh	$4.50	$4.50	$4.50
Mechanical / Electro-Mechanical		$33.00	$33.00	$33.00
Box Contents		$7.00	$7.00	$7.00

* - Assumed

Source: IHS iSuppli Research, September 2012

Tabelle 30: Schätzung der Materialkosten des iPhone 5 (d.h. Materialkostenanteil ca. 30%) Quelle: https://www.techspot.com/news/50224-16gb-iphone-5-has-bill-of-materials-of-199-207-after-manufacturing.html

5.5 Werkstoffauswahl nach ihrer Verarbeitbarkeit

5.5.1 Bedeutung der Verarbeitbarkeit

Um eine wirtschaftliche Fertigung zu ermöglichen, werden je nach Herstellverfahren gut verarbeitbare Werkstoffe gefordert. In einigen Fällen kann diese Anforderung für die Werkstoffauswahl wichtiger sein als die eigentlichen Gebrauchseigenschaften, wie bspw. bei den Automatenstählen. Die wichtigen Verarbeitungseigenschaften entsprechend der Fertigungsverfahren sind:

- Gießbarkeit,
- Umformbarkeit,
- Schweißeignung,
- Zerspanbarkeit,
- Härtbarkeit u.a.m.

Nachdem diese Eigenschaften meist systemspezifisch sind, ist es nicht immer möglich eine eindeutige, quantitative Beurteilung der Verarbeitungseigenschaften abzugeben. Der Systemcharakter resultiert dabei aus den zahlreichen Einflussgrößen, die in ihrer Gesamtheit und in ihrem Wechselspiel nicht mehr mit einer Größe beschreibbar sind. Dennoch gibt es einige wesentliche Kennzahlen oder Indikatoren, die eine Reihung bzgl. der Verarbeitungseigenschaften erleichtern. Im Folgenden werden die wichtigen Verarbeitungseigenschaften mit ihren Einflussfaktoren, spezifischen Kennzahlen und werkstoffkundlichen Aspekten näher betrachtet. In einigen Fällen spiegelt sich die Verarbeitbarkeit im Namen der Werkstoffe wider, wie bei den Stählen zum Kaltfließpressen, Nitrierstähle, Automatenstähle, Tiefziehstähle, ausscheidungshärtende ferritisch-perlitische AFP-Schmiedestähle u.a.m.

Werkstoffentwicklungen, primär aus Gründen der Verarbeitung:
Ein beliebter Maschinenbauwerkstoff ist der Einsatzstahl 16MnCr5. Der Grund für die breite Anwendung liegt in der Tatsache, dass der Stahl mit dem geringen C-Gehalt (dadurch geringe Fließspannung und hohes Umformvermögen, sowie gute Schweißeignung) auch durch Kaltumformprozesse in die finale Form gebracht, oder auch gut geschweißt oder zerspant werden kann und dann durch ein Einsatzhärten eine hohe Festigkeit, aber auch Dauerfestigkeit, erreicht. Die sog. AFP-Stähle wurde als Sparvariante für Vergütungsstähle entwickelt, weil sie im Zuge der Abkühlung nach dem Schmieden mit einem Halten im Temperaturbereich um 600°C und mit Vanadin als Legierungselement eine Festigkeitssteigerung erfahren, die nahe an das Eigenschaftsprofil von Vergütungsstählen herankommen. Man erspart sich ein nachträgliches Vergüten (zweifache Glühbehandlung).

5.5.2 Gießbarkeit (castability)

Der Begriff Gießbarkeit beschreibt die spezifischen Verarbeitungseigenschaften, wie

- das Fließvermögen (gekennzeichnet durch die sog. Auslauf- oder Fließlänge/Gießspirale)
- das Formfüllungsvermögen (abhängig von Schmelzpunkt und Viskosität)
- das Speisungsvermögen (Kennwert = Speisezeit/Erstarrungszeit),
- das Erstarrungsverhalten (Erstarrungsmorphologie, Gefügefeinheit) und
- die Fehlerfreiheit (Heißrissanfälligkeit, Porosität, Neigung zur Lunkerbildung u.a.m.)

Da diese Eigenschaften kaum in üblichen Nachschlagewerken für Konstrukteure enthalten sind, so kann folgendes Vorgehen angeraten werden:

- sich Wissen aus der gießtechnischen Literatur aneignen,
- einen Werkstoffexperten oder eine Gießerei konsultieren, oder
- einfache Entscheidungsregeln oder Analogien verwenden (s. Hinweis).

Ein praktischer Hinweis:
Gusslegierungen zeichnen sich durch einen niedrigen Schmelzpunkt aus, weshalb in vielen Fällen gerne von einem Legierungssystem mit einer eutektischen Erstarrung ausgegangen wird. Das eutektische Gefüge ist meist wesentlich homogener und feiner als andere und besitzt daher gute mechanisch-technologische Gebrauchseigenschaften. Beispiele: Gusseisen, AlSi-Legierungen

Gut gießbare Legierungen sind:

- Gusseisen mit Lamellengrafit (z.B.GJL-300), Gusseisen mit Kugelgrafit (z.B.EN-GJS-500-7), Gusseisen mit Vermiculargrafit (bspw. für Abgaskrümmer)
- Al-Si-Legierungen mit eutektischer Zusammensetzung (ca. 10 bis 12 % Si)
- Al-Mg-Legierungen
- Messing (GK-CuZn39Pb für Druckgussteile im Maschinenbau)
- Zinklegierungen (ZnAl4Cu1 für Druckgussteile)

In einigen Tabellenbüchern werden die Verarbeitungseigenschaften gerne nach dem üblichen Notensystem bewertet, siehe Tabelle 31.

Guss der Legierungs-typen	Typische Anwendungen	Gieß-bar-keit	Span-bar-keit	Schweiß-Barkeit
Aluminium	Kolben, Kupplungsgehäuse, Auspuffverteiler	1-2	1-2	3
Kupfer	Pumpen, Ventile, Schiffsschrauben	1-3	1-2	3
Graues Gusseisen	Motorblöcke, Getriebe, Bremsscheiben und Bremstrommeln, Maschinenbett	1	2	5
Magnesium	Kurbelgehäuse, Getriebegehäuse	1-2	1	2
Duktiles Guss-eisen, Temperguss	Land und Baumaschinen, Schwerlastlager, Schienenfahrzeuge	2	2	5
Nickel	Gasturbinenschaufeln, Pumpen und Ventile für Chemieanlagen	3	3	3
Sphäroguss	Kurbelwellen, schwere Getriebe	2	2	5
Stahlguss (un- und niedriglegiert)	Werkzeugblöcke, Rohteile für schwere Getriebe, Eisenbahnachsen, Lasthaken	3	2-3	1
Stahlguss (hochlegiert)	Gasturbinengehäuse, Pumpen und Ventilkomponenten, Backenplatten für Steinbrecher	3	3	1
Weißes Gusseisen	Kugelmühlenauskleidungen, Düsen für Kugelstrahlen, Eisenbahnbremsschuhe, Brecher	2	4	4
Zink	Türgriffe, Kühlergrill, Vergasergehäuse	1	1	5

1…exzellent; 2…gut; 3…mittelmäßig; 4…schlecht; 5…sehr schwierig bis unmöglich.

Tabelle 31: Notensystem zur Bewertung der Gieß-, Zerspan- und Schweißbarkeit von Gusswerkstoffen (nach ASM Handbook, desk edition, Chapter Fabricability)

5.5.3 Umformbarkeit (deformability or workability)

Ganz allgemein sind jene Werkstoffe gut umformbar, die sich mit geringem Kraftbedarf bis zu sehr hohen Umformgraden umformen lassen, siehe Abb. 92. Daraus ist klar ersichtlich, dass die Gruppe der Baustähle besonders gut abschneiden. Demnach spielen die beiden Kenngrößen Fließspannung k_f und die Brucheinschnürung Z eine große Rolle. Das Umformvermögen ist aber noch stark vom hydrostatischen Druckspannungsanteil abhängig, was auch der Grund ist, warum die Umformverfahren nach dem Spannungszustand klassifiziert sind.
Weiters macht es Sinn, zwischen Blech- und Massivumformung zu unterscheiden.

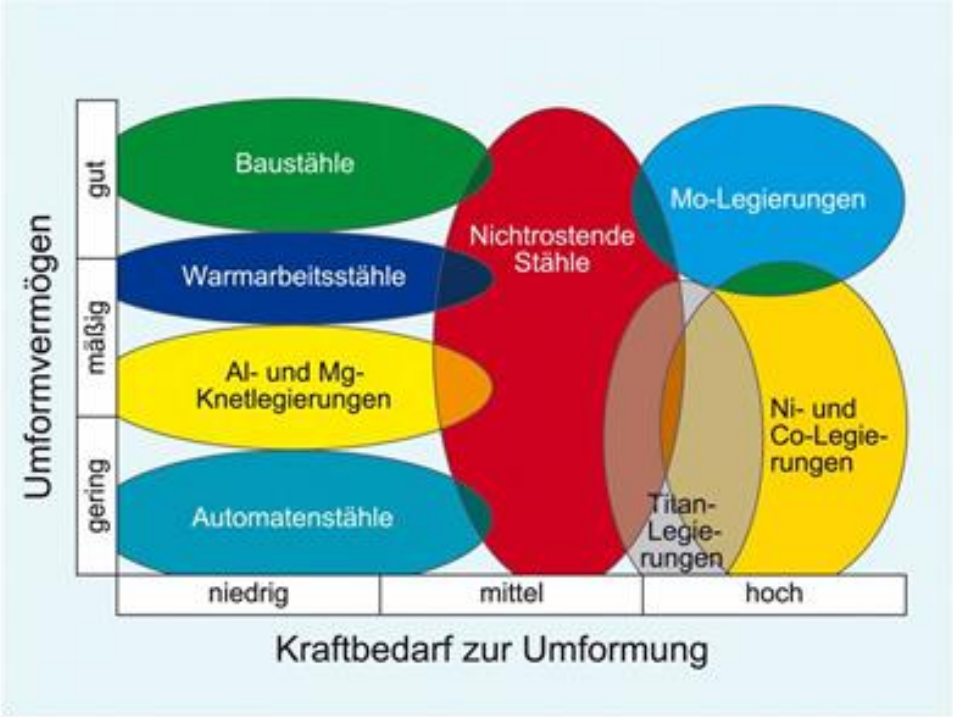


Abb. 92: Positionierung unterschiedlicher Legierungssysteme in Bezug auf die Umformbarkeit (Bildquelle: IMU Hagen)

5.5.3.1 Formänderungsvermögen bei Massivumformprozessen (workability)

Das Umformvermögen ist nicht nur von der Duktilität eines Werkstoffs abhängig, sondern auch vom Spannungszustand (Mehrachsigkeit), von der Werkzeuggeometrie und auch von der Schmierung. Je nach Umformtemperatur wird auch zwischen Kalt-, Halbwarm- und Warmumformung unterschieden, wobei bei höherer Temperatur zusätzlich die Umformgeschwindigkeit bedeutsam wird.

Einfluss der Mehrachsigkeit:

Bereits seit den Versuchen nach Karman im Jahre 1911 ist bekannt, dass bei einem „Umschlingungsdruck“, heute würde man hydrostatischer Druck sagen, eine deutliche Erhöhung der Umformbarkeit auftritt.

Als Kenngröße für die Mehrachsigkeit wird das Verhältnis der Mittelspannung $\sigma_m = (\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3$ zur Fließspannung k_f bzw. zur Vergleichsspannung σ_v betrachtet. Im sog. Stenger-Diagramm wird dann die Wirkung der Mehrachsigkeit dargestellt, siehe Abb. 93.

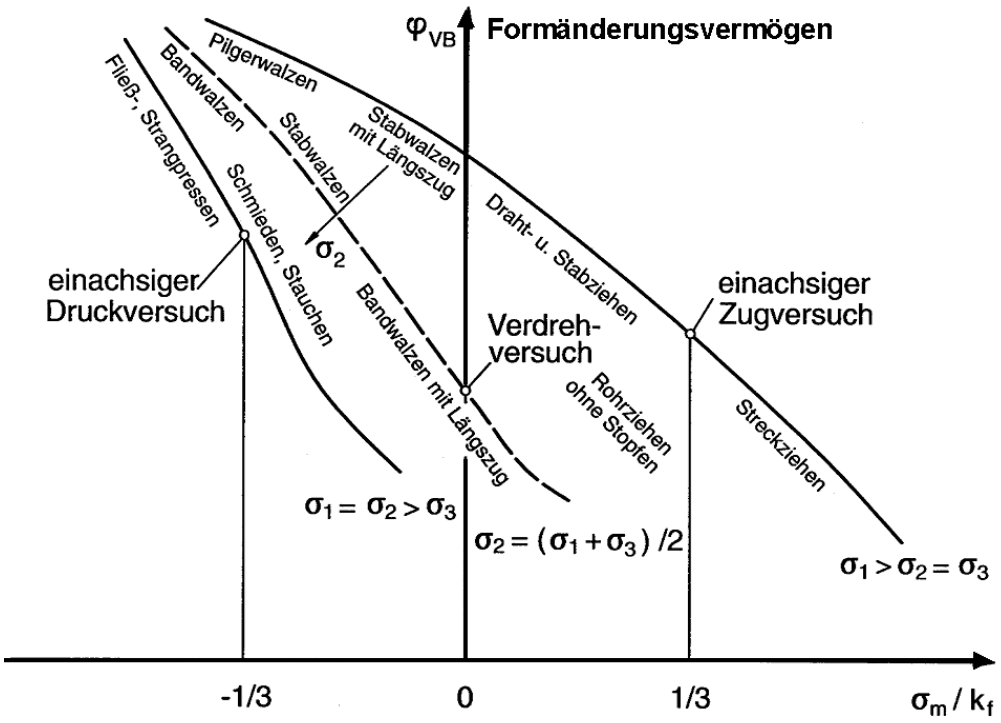


Abb. 93: Stenger-Diagramm zur Beschreibung des Einflusses der Mehrachsigkeit auf das Umformvermögen

In Abb. 93 ist auch zu sehen, welche Umformprozesse a priori ein hohes Formänderungsvermögen aufgrund des hydrostatischen Druckes aufweisen. Damit kann die dominante Rolle der Druckumformverfahren, wie Walzen, Gesenkschmieden, Fließ- und Strangpressen erklärt werden. Diese Verfahren weisen auch eine hohe Produktivität auf, weshalb sich für den Bereich der Massiv umformung wohl am wichtigsten sind.

Gut umformbare Werkstoffe für das Fließpressen sind [Lan08]:

- un- und niedriglegierte Stähle mit niedrigem C-Gehalt, wie z.B. Ck15
- Einsatzstähle (z.B. 16MnCr5)
- Vergütungsstähle mit niedrigem C-Gehalt
- Al-Legierungen (naturhart, wie AlMg3 oder aushärtend, wie z.B. AlSiMg1)
- Einphasiges Messing, wie z.B. CuZn28

Schlechter umformbar sind ferritische, austenitische und martensitische rostfreie Stähle.

Gerade für das Fließpressen komplex geforderter Teile haben sich Al-Legierungen weit etabliert. Aufgrund des hohen hydrostatischen Druckes können im Vergleich zu den Bedingungen im Zugversuch wesentlich höhere Dehnungswerte ertragen werden. Tabelle 32 zeigt die Fließpressbarkeit unterschiedlicher Al-Legierungen und deren typische Anwendungsbereiche [Ost07].

Legierungsbezeichnung EN AW-		Aushärtbarkeit	Fließpreßbarkeit [1)]	Verwendungsmerkmale
Numerisch	Chem. Symbol			
1098	Al99,98	naturhart	1	Glänzqualität
1050A	Al99,5	naturhart	1	
1200	Al99,0	naturhart	1	
3103	AlMn1	naturhart	1,8	
5310	Al99,98Mg0,5	naturhart	1,5	Glänzqualität
5754	AlMg3	naturhart	2,6	
5049	AlMg2Mn0,8	naturhart	2,5	
6060	AlMgSi	aushärtbar	1,4	
6061	AlMg1SiCu	aushärtbar	1,7	
6082	AlSi1MgMn	aushärtbar	1,8	
2017A	AlCu4MgSi(A)	aushärtbar	2,6	nur T4 Zustand verwenden
7020	AlZn4,5Mg1	aushärtbar	1,9	nur T6 Zustand verwenden
7075	AlZn5,5MgCu	aushärtbar	2,8	nur T6/T7 Zustd. verwenden
6012	AlMgSiPb	aushärtbar	1,8	Pb-Zusatz für Kurzspäne
2007	AlCu4PbMgMn	aushärtbar	2,0	Pb-Zusatz für Kurzspäne
2011	AlCu6BiPb	aushärtbar	2,6	Pb-Zusatz für Kurzspäne

[1)] Vielfaches von k_f bei $\varphi = 1{,}0$ für EN AW-1050A im Ausgangszustand weich

Tabelle 32: Fließpressbarkeit und Verwendbarkeit von Al-Legierungen (nach DIN EN 573) für das Kaltfließpressen [Ost07]

5.5.3.2 Formänderungsvermögen bei Blechumformprozessen (formability, drawability)

Das Formänderungsvermögen eines Bleches wird meist aufgrund der geringen Wanddicke durch Instabilitäten, wie Scherung, Beulen, Faltenbildung oder übermäßige Ausdünnung, begrenzt. Ein idealer Werkstoff für Blechumformung sollte daher folgende Eigenschaften aufweisen:

- keine Einschnürung oder kein Bruch selbst bei sehr hohen Umformgraden (dies erfordret einen hohen Verfestigungsexponent n)
- gute Tiefziehbarkeit (→ hoher senkrechte Anisotropie r-Wert)
- homogene Dehnungsverteilung (→ hoher Dehnratenexponent m)
- geringes Rückfedern nach dem Umformprozess (→ hoher E-Modul, geringe Festigkeit)
- keine Fließfigurenbildung
- glatte Oberflächen (Vermeidung von Orangenhaut)

Für die Charakterisierung der Umformbarkeit von Blechwerkstoffen beim Tiefziehen oder auch beim Streckziehen hat sich das Grenzformänderungsdiagramm bewährt. Aufgrund des dreidimensionalen Verformungszustandes ist die Betrachtung der minimalen und der maximalen Dehnung (Hauptformänderung) notwendig. Die Dickenänderung ergibt sich aufgrund der Volumenkonstanz aus der Beziehung (Summe der Umformgrade (log.Formänderung) = 0)
In Abb. 94 sind die Grenzformänderungen für unterschiedliche Blechwerkstoffgruppen dargestellt. Die schwierigsten Tiefziehteile sind nur mehr mit IF (interstitial free)-Stählen herstellbar.

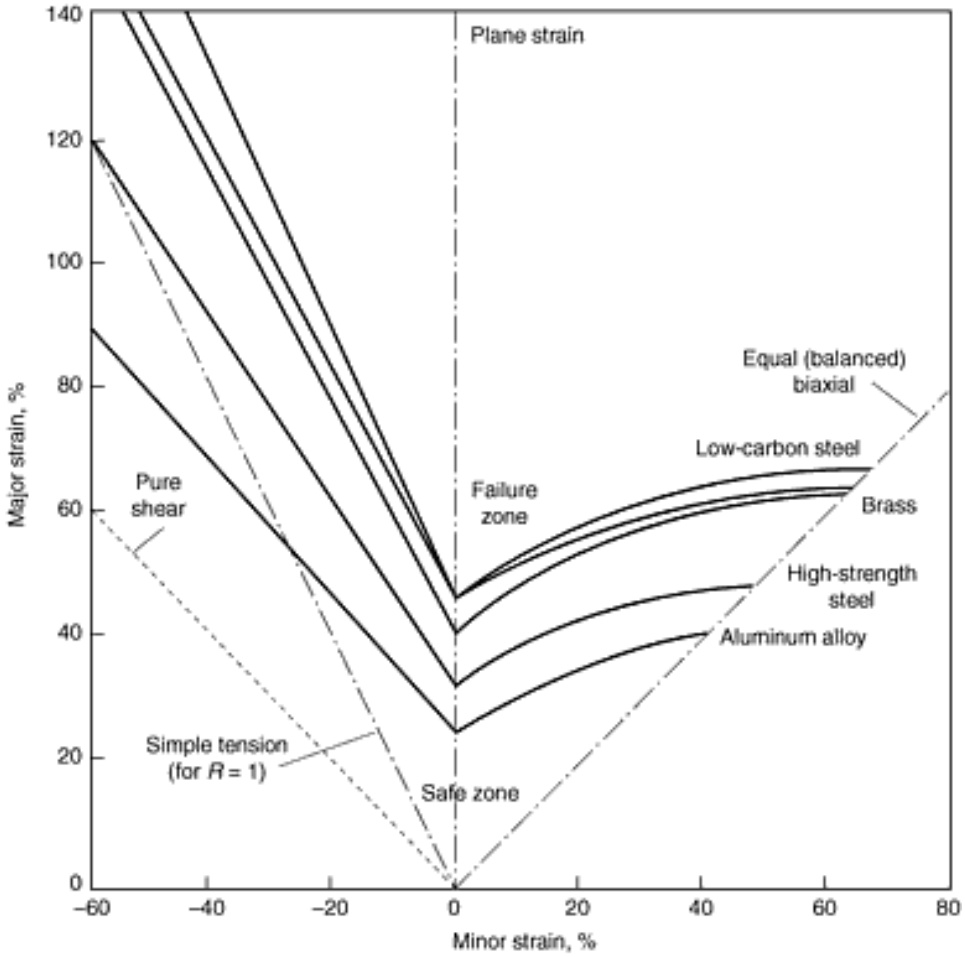


Abb. 94: Grenzformänderungsschaubild für unterschiedliche Blechwerkstoffgruppen. Bildquelle: ASM Handbook Desk edition.

5.5.3.3 Formänderungsvermögen bei Blechbiegeprozessen (bendability)

Bei Biege- oder Abkantprozessen ist das Umformvermögen durch die Randfaserdehnung bestimmt, deren Grenze direkt aus der Bruchdehnung über die Beziehung

Dehnung der Außenfaser = Wandstärke/(2*Radius der neutralen Faser) < A (Bruchdehnung)

Daraus ergibt sich ein kritischer, auf die Wandstärke bezogener Biegeradius (r/s) der in erster Linie nur von der Bruchdehnung abhängig ist. Weiche Stähle können scharf gebogen werden, weniger duktile brauchen einen Mindestradius von 2*s oder mehr.
Zu beachten ist auch die Lage der Biegekante, die möglichst quer zur Walzrichtung sein soll, weil sich sonst Seigerungen oder nichtmetallische Einschlüsse (z.B. MnS) zu einer vorzeitigen Rissbildung und zum Bruch führen.
Werkstoffe mit besonders niedriger Duktilität, wie z.B. Mg-Bleche, müssen bei engen Biegungen unbedingt auf mind. 200°C vorgewärmt werden.

5.5.4 Schweißbarkeit (weldability)

Der Begriff Schweißbarkeit umfasst eigentlich das Zusammenwirken der drei Themenbereiche

- Schweißeignung (= werkstoffspezifisch)
- Schweißsicherheit (= konstruktions- und beanspruchungsspezifisch und
- Schweißmöglichkeit (= fertigungsspezifisch).

Nur die Schweißeignung beschreibt den Werkstoffeinfluss.
Üblicherweise gelten Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt kleiner als 0,2% als schweißbar.
Für genauere Betrachtungen (Berücksichtigung anderer Legierungselemente) und auch zur Festlegung einer notwendigen Vorwärmtemperatur wird das Kohlenstoffäquivalent CE nach IIW verwendet:

$$CE_{IIW} = \%C + \%Mn/6 + \%Ni/15 + \%Cu/15 + \%Cr/5 + \%Mo/5 + \%V/5$$

Bei Kohlenstoffäquivalenten kleiner als 0,45% kann man davon ausgehen, dass es keiner Probleme beim Schweißen gibt. Mit zunehmendem CE steigt die Härte und Neigung zur Kaltrissbildung.

Beim Schweißen von Al-Legierungen gibt es die Problembereiche

- hohe Wärmeleitung (Ar/He-Schutzgas, größere Wärmeeinbringung notwendig)
- hohe elektrische Leitfähigkeit (Probleme beim Punktschweißen)
- hohe Wärmedehnung (spezielle Nahtvorbereitung, Verzugsprobleme)
- hohe Heißrissneigung (aufgrund großer Erstarrungsintervall, bei AlMg-, AlCu- u. AlZnMgCu-Legierungen)
- Anfangs- und Endkraterrisse (hot start/down slope-Steuerungen)
- hoher Al_2O_3-Schmelzpunkt (Oxidhauteinschlüsse, Elektrode DC+ für kathod. Reinigung)
- geringe Wasserstofflöslichkeit (Poren, Vermeidung durch gr. Wärmeinput)
- keine Temp-abhänige Farben (schwierige Schweißbadkontrolle)
- hoher Reflexionsgrad (problematisch beim Laserschweißen)

Aus diesen Gründen ist eine Kontaktaufnahme mit einem Spezialisten zu empfehlen.
Einen groben Überblick über die Schweißeignung von Al-Legierungen gibt Tabelle 33, inklusive der Angabe geeigneter Schweißzusatzwerkstoffe.

Legierung	Schweisseignung	Schweisszusatz-Werkstoff
Al99.0 ... 99.98	gut	SG-Al99.5, SG-Al99.5Ti, SG-Al99.8
AlMn0.2 ... AlMn1	sehr gut	SG-AlMn, SG-AlMg3 ... 5
AlMg1 ... AlMg5	gut	SG-AlMg3, SG-AlMg5, SG-AlMg4.5Mn
AlMg4.5Mn	sehr gut	SG-AlMg5, SG-AlMg4.5Mn
AlMgSi, AlSiMg, AlSiMgMn	gut	SG-AlMg3 ... 5, SG-AlSi5
AlCuMg	Neigung zu Heissrissen	
AlZnMg Beispiel: AlZn4.5Mg1	nur Legierung AlZn4.5Mg1 gut	SG-AlMg5, SG-AlMg4.5Mn
AlSi5 ... AlSi12	bei Kupfergehalt unter 1 % gut	Al-Si5, SG-Alsi12

Tabelle 33: Schweißeignung verschiedener Aluminiumwerkstoffe nach Pangas (CH)

5.5.5 Zerspanbarkeit (machinability)

Die Zerspanbarkeit eines Werkstoffs ist so, wie die zuvor genannten Fertigungseigenschaften nicht durch eine einzige Kenngröße beschreibbar, sondern von vielen Systemelementen abhängig.
Zur Beurteilung der Zerspanbarkeit werden die Faktoren

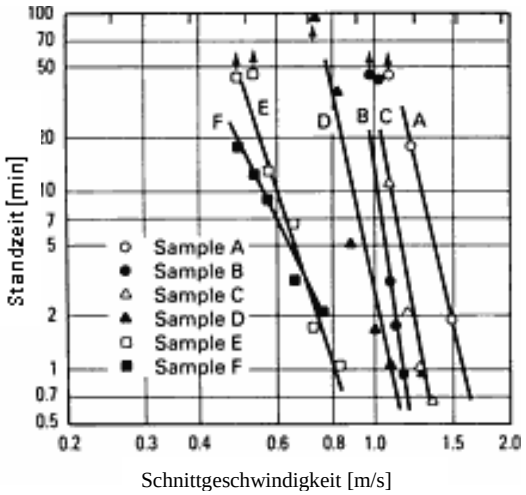
- Spanform,
- Oberflächengüte,
- Standzeit und
- Schnittkraft

herangezogen. Als primäre werkstoffabhängige Einflussgrößen können die Festigkeit, der Gefügeaufbau (Karbide, Einschlüsse, Korngröße, Kristallstruktur u.a.m.), die Duktilität und die Wärmeleitfähigkeit genannt werden.
Zur Quantifizierung und Prüfung wird in Laborversuchen die Standzeit über der Schnittgeschwindigkeit betrachtet, wobei im Allgemeinen die Taylor-Gleichung gilt:

$$v.T^n = C$$

Darin bedeutet v die Vorschubgeschwindigkeit und T die Werkzeugstandzeit.

Abb. 95 zeigt den Einfluss unterschiedlicher Festigkeiten bzw. Gefügeausbildungen in Form des Standzeitdiagramms (Taylor-Plots).



Probe	Härte [HB]	Wärmebehand-lungszustand
A	146	weichgeglüht
B	153	weichgeglüht
C	150	geglüht
D	187	normalgeglüht
E	238	vergütet
F	308	vergütet

Abb. 95: Standzeitdiagramm (log t versus log v) für unterschiedliche Werkstoffe (Bildquelle: ASM Handbook, desk edition)

Eine Zuordnung der Schneidstoffe für unterschiedliche Werkstoffe erfolgt über die ISO-Materialgruppen, wie in Abb. 96 dargestellt.

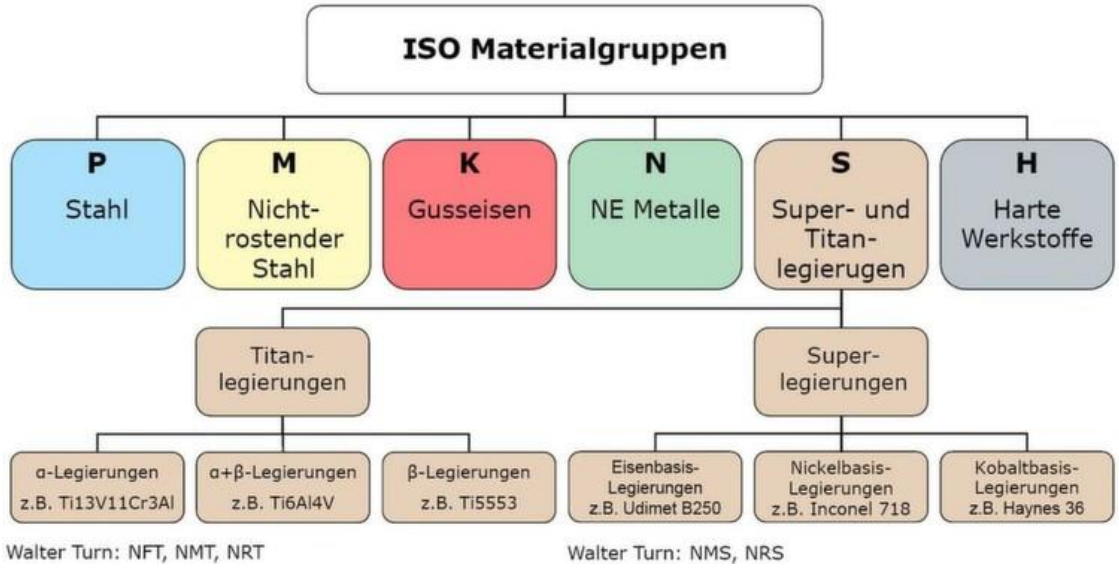


Abb. 96: Einteilung der Werkstoffe in Gruppen bzgl. ihrer Zerspanbarkeit und auch Zuordnung zu den Schneidwerkzeugen

Eine Übersicht der Spanbarkeit für einige ausgewählte Werkstoffe gibt Abb. 97, in dem die spezifische Schnittkraft bei einer Spandicke von 0,5mm aufgetragen ist.

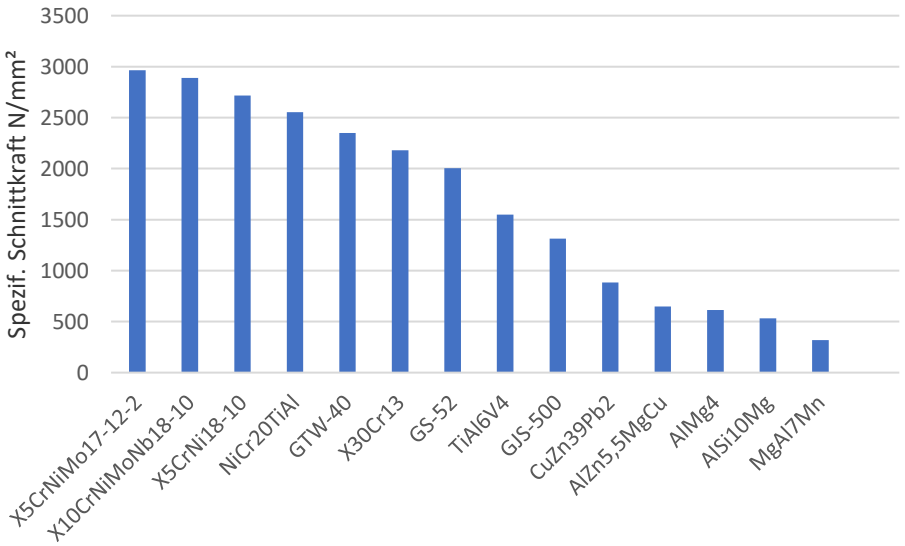


Abb. 97: Spezifische Schnittkraft für diverse Materialien und einer Spandicke von 0,5mm

Die Gefügeausbildung eines Werkstoffs kann ganz wesentlich die Zerspanbarkeit beeinflussen. Während bei Stählen bei einem mittleren Kohlenstoffgehalt (ca. 0,25%) ein Optimum bzgl. der Zerspanbarkeit zu finden ist, wird bei höheren C-Gehalten gerne weichgeglüht, um den plattenförmig eingebauten Zementit in eine kugelige Form zu bringen (GKZ-Glühung). Die Einschlusskontrolle ist ebenfalls entscheidend, also die Gehalte an Schwefel, Phosphor und Kalzium.
Aluminium und Al-Legierungen gelten als gut zerspanbar. Bei AlSi-Gusslegierungen führt Druckguss im Vergleich zum Sandguss zu einer besseren Zerspanbarkeit.

Titan und Ti-Legierungen sind schwer zerspanend zu bearbeiten, weil sie üblicherweise eine hohe Festigkeit und eine geringe Leitfähigkeit haben. Die Wärmeabfuhr muss zu ca. 4/5 über das Werkzeug erfolgen.
Reinkupfer und einphasige Kupferlegierungen haben ein hohes Umformvermögen, sind dadurch aber eher schlechter zerspanbar. Zweiphasige Legierungen (α+β-Messing oder Neusilber) verhalten sich bzgl. Zerspanbarkeit wesentlich besser.

5.5.6 Härtbarkeit (hardenability)

Für die Auswahl von Vergütungsstählen und für die Eindringtiefe der Härteschicht ist die Eigenschaft Härtbarkeit maßgebend. Sie umfasst sowohl die maximale Härteannahme (Aufhärtung), die primär vom Kohlenstoff abhängt, als auch die Durchhärtung (Einhärtung), die von der Menge an Legierungselementen, wie Cr, Mo, B u.a. bestimmt wird.
Unlegierte C-Stähle härten nur bis zu einem Durchmesser von 10mm durch, darüber hinaus gehende größere Teile erfahren einen Härteeinbruch im Zentrum. Um dies zu vermeiden, müssen niedriglegierte CrMoV-Vergütungsstähle verwendet werden, die auch bei niedrigeren Kühlraten noch martensitisch umwandeln und einen starken Festigkeitsverlust bei großen Querschnitten verhindern.
Mit dem sog. Jominy- bzw. Stirnabschreckversuch kann sowohl Auf- als auch Einhärtung ermittelt werden. In früheren Arbeiten wird auch ein sog. Kritischer Durchmesser angegeben

5.6 Werkstoffauswahl unter Berücksichtigung der Ökologie

Neben den Gebrauchs- und Fertigungseigenschaften werden die ökologischen Eigenschaften der Werkstoffe immer wichtiger. Dazu zählen

- Rohstoff- und Energieverbrauch bei der Herstellung und Verarbeitung
- CO_2-Emissionen bei der Herstellung und Verarbeitung
- Umweltverträglichkeit bzw. Toxizität
- Recyclingfähigkeit
- Reparierfähigkeit
- Biologische Abbaubarkeit
- Lange Lebens- und Nutzungsdauer

5.6.1 Energieverbrauch und CO_2-Emissionen bei der Herstellung

Viele Produkte werden über den schmelzflüssigen Zustand (Gießen) hergestellt. Die minimale Energie, die zum Schmelzen eines Kilogramms notwendig ist, errechnet sich aus der Energie zum Aufwärmen zur Schmelztemperatur plus der latenten Schmelzwärme H_m, d.h.

$$Q_{min} = c_p*(T_m-T_0) + H_m \text{ , wobei } H_m \sim 0{,}4*c_p*T_m$$

Darin bedeutet c_p die spezifische Wärme, T_m die Schmelztemperatur und T_0 die Raumtemperatur.
Wenn $T_m >> T_0$ ist, dann ergibt sich der einfache Ansatz für die Energie $Q \sim 1{,}4*c_p*T_m$,
Berücksichtigt man noch einen thermischen Wirkungsgrad von 30 bis 40%, dann
errechnet sich der Energieverbrauch beim Schmelzen mit

$$Q_{min} \sim 5*c_p*T_m$$

Bei Metallen liegt dieser Wert zwischen 0,4 und 4 MJ/kg.

Ähnliche Abschätzungen für die Umformenergie ergeben werden zwischen 0,01 und 1 MJ/kg.

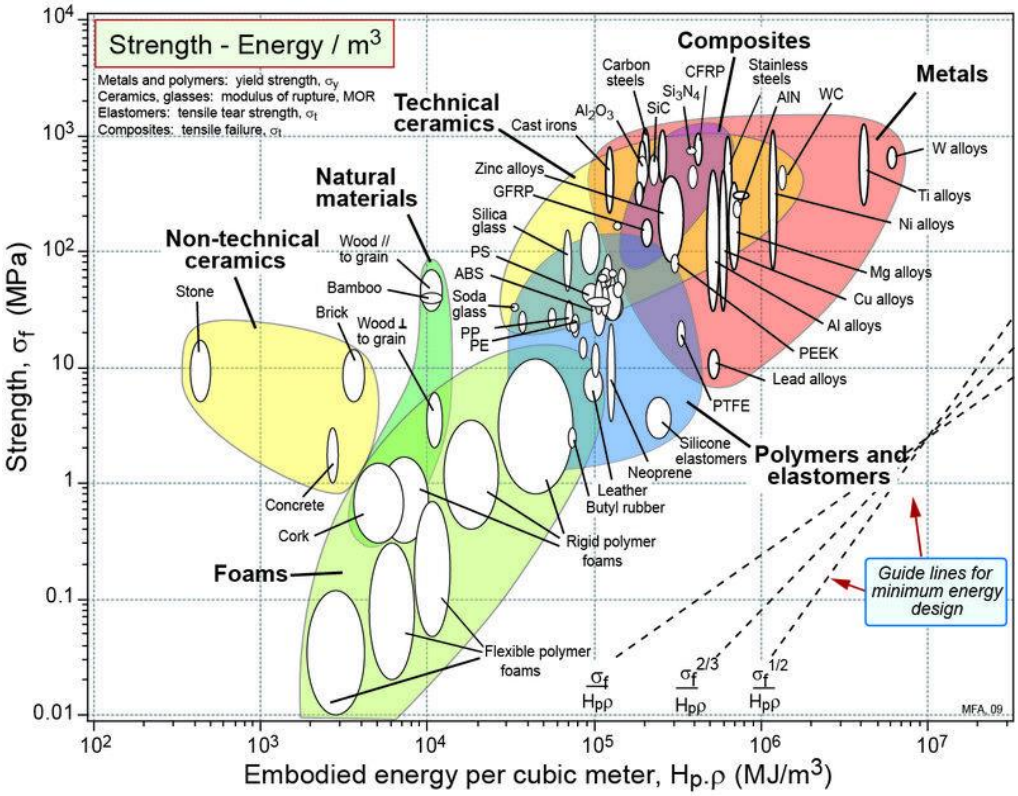


Abb. 98: Ashby-Map zur Auswahl von Werkstoffen mit geringem Energieinhalt

5.6.2 Werkstoffauswahl unter Berücksichtigung der CO_2-Emission

Ein wesentlicher Faktor der Klimaveränderungen liegt in der CO_2-Emission im Zuge der Herstellung, des Gebrauchs und in der Endphase des Lebenszyklus eines Produkts. Wie Abb. 99 zeigt, tragen die Industrie, der Verkehr und die Haushalte etwa gleich viel zum CO_2-Austoss bei. Im unteren Teilbild erkennt man den hohen Anteil der Stahlindustrie und der Zementwerke.

Aufgrund des hohen politischen Drucks wird nun versucht, bei der Stahlherstellung insbesondere auf die Wasserstofftechnologie zu setzen. Dabei wird in Direktreduktionsanlagen ein fester Eisenschwamm erzeugt, der dann in Elektrolichtbogenöfen zu Rohstahl veredelt wird. Dazu soll der Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser unter Verwendung von grünen Stromquellen erzeugt werden. Um noch effizienter zu sein, wird bei Salzgitter AG die Hochtemperaturelektrolyse (mit Wasserdampf bei etwa 150°C) getestet. Natürlich wird der grüne Stahl wesentlich teurer, was zu globalen Verschiebungen der Stahlherstellung führen könnte.

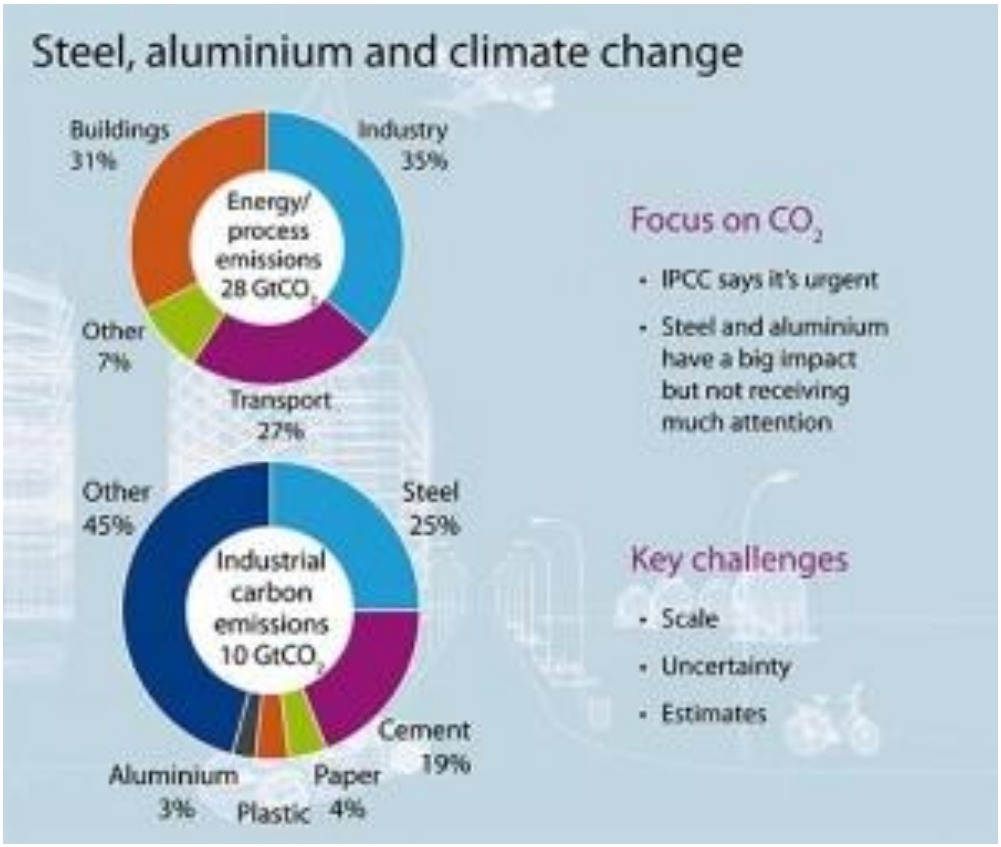


Abb. 99: Emissionswerte nach Branchen und Werkstoffart [All12]

5.6.3 Recyclingfähigkeit

Einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz hat die Recyclingfähigkeit der Produkte bzw. der dabei verwendeten Werkstoffe. Die Experten der Abfallwirtschaft, wie Prof. R. Pomberger an der Montanuniversität Leoben, definieren zwei Hauptsätze der Abfallwirtschaft:

Erster Hauptsatz: Jedes Produkt wird Abfall – es ist nur eine Frage der Zeit

Zweiter Hauptsatz: Abfall geht den Weg des geringsten Geldes – hoffentlich im Sinne der gesetzlichen Rahmenbedingungen

Die größten Herausforderungen der Abfallwirtschaft sind die Überwindung der Entropie (Verteilung und Vermischung) und der Umstand, dass der Rohstoffwert des Abfalls nicht den Aufwand der Wiederaufbereitung finanzieren kann.

Die klassische Recyclingkette umfasst die Schritte: Sammeln, Sortieren/Zerlegen, Aufbereiten (abfall- bzw. industrieorientiert) und der letzte Recyclingschritt. Die Gesamteffizienz setzt sich aus den Wirkungsgraden der Teilschritte zusammen. Der schwächste Schritt hat die größte Auswirkung. In der Recyclingkette ist die Sammlung der ineffizienteste Schritt. In der Produktion ist es am ehesten möglich, Abfälle (bspw. Stanzreste) sortenrein zu sammeln.

Die Wertschöpfungskette von der Materialherstellung bis zum Abfall unter Berücksichtigung der kreislaufwirtschaftlichen Rückführung ins selbe Produkt zeigt Abb. 100 [Wel20]. Daraus ergibt sich selbstredend eine Abfallstrategie, die versucht möglichst große Anteile in der Reihenfolge Vermeidung, Wiederverwendung, Recycling, Sonstige Verwertung und Beseitigung (Deponie/Verbrennen) umzusetzen. Diese Philosophie wird durch die sog. Abfallpyramide, siehe Abb. 101 verdeutlicht.

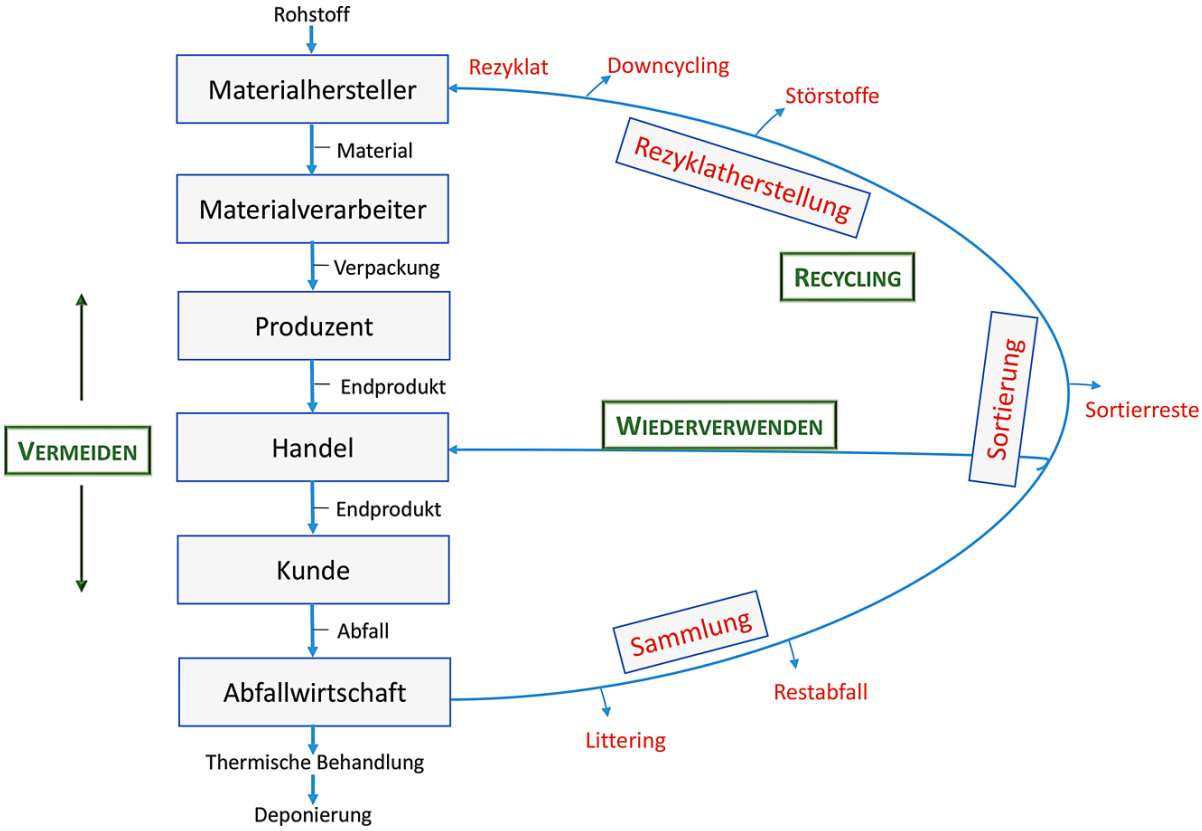


Abb. 100: Wertschöpfungskette von Materialien und abfallwirtschaftliche Möglichkeiten der Rückführung in den Kreislauf [Wel20]

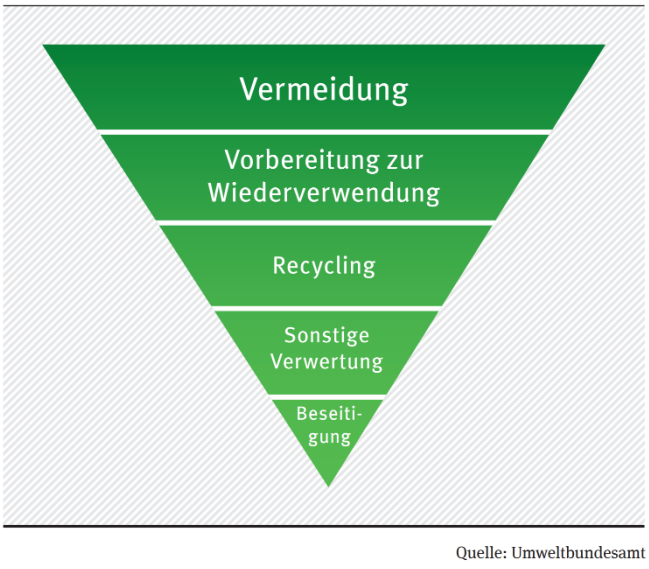


Abb. 101: Die Abfallpyramide

Um die Recyclingquoten zu erhöhen, muss einerseits mehr gesammelt und genauer sortiert werden [Pom20].

5.6.4 Biologische Abbaubarkeit

Für die Beseitigung bzw. Deponie der Abfallstoffe sollte bei der Werkstoffauswahl bereits die Abbauzeit mitberücksichtigt werden. Tabelle 34 zeigt die vom Bundesumweltamt genannten Abbauzeiten verschiedener Materialien, die sogar mehrere hundert Jahre betragen kann.

Material	Abbauzeit	Material	Abbauzeit
Papiertaschentuch	2–4 Wochen	Plastiktüte	10–30 Jahre
Tageszeitung	6 Wochen	Styroporbecher	50 Jahre
Kerngehäuse Apfel	2 Monate	Bierdose	100 Jahre
Pappkarton	2 Monate	Plastikboje	50 Jahre
Baumwolltasche-, shirt	2–5 Monate	Aluminiumdose	80–500 Jahre
Wachskarton	3 Monate	Getränkehalter aus Plastik	400 Jahre
Abbaubarer Getränkebehälter	6 Monate	PET-Flasche	450 Jahre
Sperrholz	1–3 Jahre	Wegwerfwindel	450 Jahre
Wollsocken	1–5 Jahre	Angelschnur	600 Jahre
Zigarettenkippe	1–5 Jahre	Glasflasche	unbestimmt

Tabelle 34: Geschätzte Abbauzeiten verschiedener Materialien im aquatischen Milieu [Woe19]

5.6.5 Biowerkstoffe

Als Biowerkstoffe werden Werkstoffe bezeichnet, die vollständig oder teilweise aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen, wie z.B. Holz. Darüber hinaus haben sich die Biokomposite, wie Holz-Kunststoff-Verbunde (WPC) mit PE oder PP-Matrix und 50-90% Holzmehlanteil und naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) bereits gut etabliert.
Bei den Kunststoffen wird weiters zwischen erdöl- und biobasierten Kunststoffen unterschieden und auch die biologische Abbaubarkeit betrachtet [Woe19, Mec04], siehe Tabelle 35. Der Markt für Biokunststoffe wächst kontinuierlich und schnell.
Biokunststoffe lassen sich aus vielen pflanzlichen Rohstoffen, wie aus

- Zellulose (Zelluloseacetat für Werkzeuggriffe, Brillengestelle etc., Zellophan für Folien)
- Lignin (auch „flüssiges Holz“ benannt, Lautsprechergehäuse, Uhren, Spielwaren, Möbel etc.)
- Stärke und Zucker (Tragetaschen, Joghurtbecher, Spielwaren, Cateringgeschirr u.a.m.)
- Pflanzenölen (Textilien, Autositze, Kraftstoffleitungen, Schuhsohlen, Dübel u.a.m.)

herstellen.
Bezüglich weiterer detaillierter Informationen wird auf die Internetseite https://biowerkstoffe.fnr.de/ und auf das Fachbuch Technische Biopolymere [End09] verwiesen.

	Erdölbasierte Kunststoffe (fossile Ressourcen)	Biobasierte Kunststoffe (erneuerbare Ressourcen)
Nicht biologisch abbaubare Kunststoffe	Polyethylen (PE)	Polysaccharid-Derivate, hoher SG[a]
	Polypropylen (PP)	Polyol-Polyurethan
	Polystyrol (PS)	Bio-Polyethylen (Bio-PE)
	Polyethylenterephthalat (PET)	Bio-Polyethylenterephthalat (Bio-PET)
Biologisch abbaubare Kunststoffe	Poly(ε-caprolacton) (PCL)	Polymilchsäure (PLA)
	Poly(butylensuccinat/adipat) (PBS/A)	Poly(3-hydroxybutyrat) (PHB)
	Poly(butylenadipat-co-terephthalat) (PBA/T) (Ecoflex®)	Polysaccharid-Derivate, niedriger SG[a]
		Polyaminosäuren

[a] Cellulose mit hohem Substitutionsgrad (SG) z.B. bei Celluloseacetat.

Tabelle 35: Biologische Abbaubarkeit von erdöl- und biobasierten Kunststoffen [Woe19]

5.7 Andere Konzepte zur Werkstoffauswahl

5.7.1 Ansätze nach dem Prinzip des Problemlösungsansatzes

Ursprünglich und vielfach wird der Prozess der Werkstoffauswahl nach den Grundprinzipien der allgemeinen Problemlösungsmethode mit den Hauptschritten

- Aufgabe klären
- Lösungssuche
- Analyse
- Bewertung und Entscheidung

durchgeführt.

Als Beispiel zeigt Tabelle 36 ein derartiges Vorgehen mit einer Zuordnung über Hilfen zur Werkstoffauswahl nach Ehrlenspiel und Kiewert [Ehr90].

Grundschritte	Hilfen zur Werkstoffwahl
1. Aufgabe klären	Klärung der Anforderungen an den Werkstoff Anforderungsliste/Pflichtenheft erstellen. Schwerpunktbildung aus Schadensberichten, Analysen ähnlicher Produkte (Vorgänger-, Konkurrenzprodukte), Kosten-, Zuverlässigkeitsstrukturen. ABC-Analysen durchführen für Baugruppen, Bauteile, Funktionen. Werkstoffanforderungsprofil erstellen.
2. Lösungssuche	Suche nach möglichen Werkstoffen Werkstoffkataloge, Regelwerke, Datenbanken, Brainstorming, Gespräche mit Fachleuten
3. Analyse	Ermittlung der Eigenschaften Berechnungen: Festigkeit, Kosten, Versuche: Elementar-, Bauteilversuche, Einsatzspezifische Versuche an Prüfständen oder beim Kunden, Vergleich mit ähnlichen Produkten.
4. Bewertung und Entscheidung	Ermittlung der Eigenschaften der Werkstoffalternativen Anforderungs-/Eigenschaftsliste, gewichtete Punktbewertung, Nutzwertanalyse, Expertengespräche, Werkstoffentscheidungsteam, Chefentscheidung

Tabelle 36: Werkstoffauswahl nach dem Problemlösungszyklus [Ehr90]

5.7.2 Werkstoffauswahl mit dem QFD-Ansatz

Die bereits im Kapitel 2.8.4.1 beschriebene Methode zur Entscheidungsfindung wird auch für die Werkstoffauswahl sehr gerne verwendet. Sie gibt die Möglichkeit, die meist mehrfachen Anforderungen je nach Bedeutung (Gewicht) zu berücksichtigen und die Alternativwerkstoffe übersichtlich zu vergleichen. Die Gewichtung kann durch die max. 10 QFD-Teammitglieder gemittelt und damit objektiviert werden. Der Auswahlvorgang ist transparent und kann jederzeit nachvollzogen werden.

Beispiele und Details zur Anwendung des QFD-Ansatzes für die Werkstoffauswahl finden sich in den Veröffentlichungen [Pra13, Kas14, Cav13].

5.7.3 Werkstoffwahl unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Fertigung

In DeGarmo's Buch Materials and Processes in Manufacturing [Bla12] wird im Kapitel 10 das Thema Werkstoffauswahl ausführlich behandelt. Dabei wird mehrmals auf den Umstand hingewiesen, dass die Werkstoffauswahl nicht nur nach physikalischen oder mechanisch-technologischen Eigenschaften erfolgen soll, sondern dass es auch wichtig ist, die Produktform und die wirtschaftliche Herstellung zu beachten. Bei Vorgabe eines Werkstoffes können manche Fertigungsmethoden ausgeschlossen sein und vice versa sind bei Vorgabe eines Fertigungsprozesses nicht alle Werkstoffklassen für diesen Prozess geeignet. Es wird auch die notwendige Zuverlässigkeit eines Produktes betont, die vom Wissen über das Versagensverhalten, vom Vorliegen von gesicherten Auslegungsdaten (z.B. Langzeitzeitstandverhalten) und notwendiger und anwendbarer Prüfmöglichkeiten abhängt. Bedeutungsvoll ist in diesem Zusammenhang auch die Qualität der Werkstoffdaten bzw. der Vertrauenswürdigkeit des Herausgebers.
Im Buch von Swift and Booker [Swi03] wird in analoger Art und Weise die Werkstoffauswahl mit dem Fertigungsprozess und der Losgröße verknüpft. In „Process Information Maps" (PRIMAs) sind für die wichtigsten Fertigungsmethoden die jeweils geeigneten Werkstoffgruppen angegeben.

5.7.4 Vergleichende und grafische Selektionsmöglichkeiten

Vielfach sind mehrere Zielwerte zu betrachten, weshalb man Methoden für multiobjektiven Optimierung (siehe Kap. 2.8) zur Anwendung kommen.
Häufig werden Polygondarstellungen bzw. Spinnendiagramme bei multiplen Anforderungen verwenden, wie Abb. 102 zeigt.

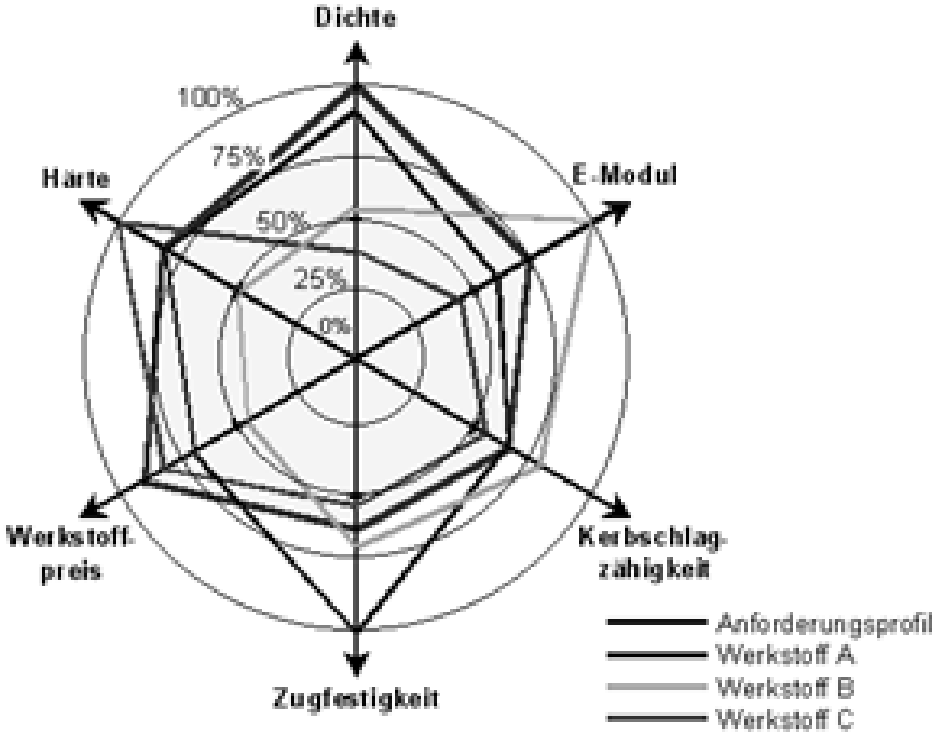


Abb. 102: Übersichtliche Darstellung von Gebrauchswerten in Form eines Polygons (Spinnendiagramm)

Weiters wird sehr gerne eine Nutzwertanalyse durchgeführt, wobei die Eigenschaftswerte prozentuell zwischen 0 und 100% gewichtet oder auch mit dem Kilopreis normiert werden.
Dies führt zu dem Ansatz

$$\frac{1}{Kilopreis_w} \cdot \sum_{i=1..E} \frac{Gew_i * Eig_{w,i}}{\max\{Eig_{w,i}, w = 1..N\}}$$

Nach Schott [Sch81] sind auch andere Ansätze üblich, siehe folgende Tabelle.

Kennzahl	Formel	Formelzeichen	
Z	$Z_i = \sum_{j=1}^{q} \frac{f_j \cdot B_{j,i}}{A_j + \sum_i B_{j,i}}$	Z_i	Zielbaum-Wert
		MWC_i	Mean Weighted Characteristics-Wert
		η_i	Kostenbezogener Gebrauchswert
MWC	$MWC_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^{q} f_j} \sum_{j=1}^{q} f_j \frac{B_{j,i}}{A_j}$	A_j	j-ter Anforderungswert von insgesamt q Anforderungen
		$B_{j,i}$	j-ter Eigenschaftswert des i-ten Werkstoffs von insgesamt p Werkstoffen, die in die Auswahl einbezogen sind
		f_j	Wichtungsfaktor der j-ten Anforderung
η	$\eta_i = \frac{G_{W,i}}{K_i} = \frac{1}{K_i} \sum_{j=1}^{q} f_j \frac{B_{j,i}}{A_j}$	$G_{W,i}$	Gebrauchswertfaktor des i-ten Werkstoffs
		K_i	Kosten des i-ten Werkstoffs

Tabelle 37: Gegenüberstellung von Ansätzen zur Auswahl von Werkstoffen [Sch81]

In [Zam17] wird für die Auswahl die Methoden der Multi-Kriterien-Entscheidungssuche und multiplen Zieloptionen betrachtet. Die verwendeten Ansätze zeigt Abb. 103. In großen Abschnitten werden aber die Ansätze von M.F.Ashby verwendet. Anstelle eines „Screenings“ wird ein „Ranking“ der best-geeigneten Werkstoffe und Verfahren über den hierarchischen AHP-Ansatz (s. Kap.2.8) durchgeführt.

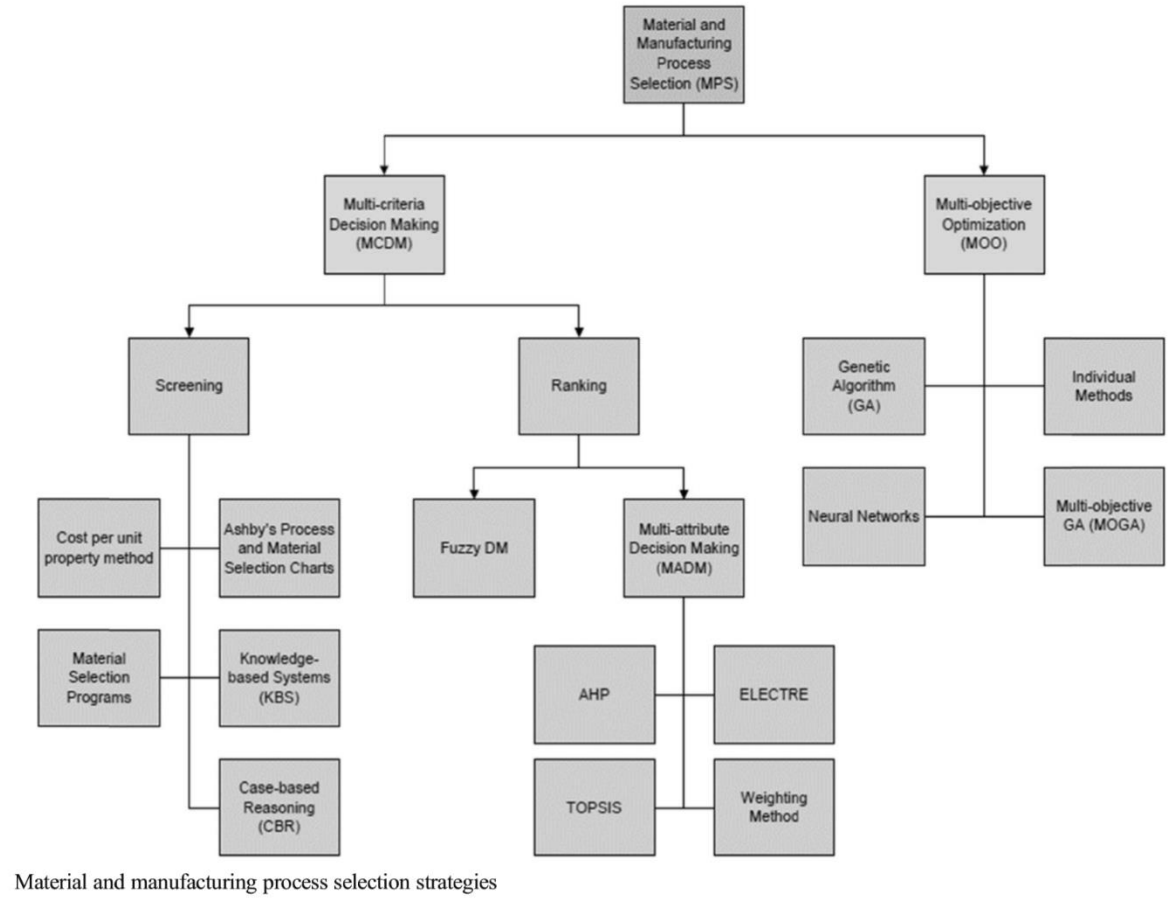


Abb. 103: Auswahlstrategien für Werkstoffe und Fertigungsverfahren nach [Zam17]

5.8 Materialästhetik und Werkstoffe für die Kunst

Bislang haben wir nur über Produkte und Werkstoffe gesprochen, die in erster Linie

- rationale Funktionen
  - technisch-praktische Funktionen (BENUTZEN) und
  - wirtschaftliche Funktionen (BESITZEN)

erfüllen. Es gibt aber auch viele Produkte und Anwendungen, bei denen

- emotionale Funktionen, wie
  - ästhetische Funktionen (ANSEHEN) oder
  - symbolische Funktionen (ZEIGEN)

wichtig sind. Dies soll eine kleine Abwechslung zu den sonst soliden Beiträgen darstellen.

5.8.1 Materialien mit emotionaler Funktion

Bei der zweiten Kategorie geht es um Kunst- oder Designprodukte, bei denen die technische Funktion eher sekundär ist und die emotionale Funktion dominierend ist. Bespiele dazu sind:

- Schmuck
- edle Füllfedern
- Leuchten
- Brillenfassungen
- Uhren u.a.m.

Die Ausführungsformen sind vielfältig und müssen in erster Linie eine gewisse Wertigkeit ausstrahlen. Eine kostengünstige Ausrichtung wird hierbei nicht gefragt. Als Beispiel zeigt Abb. 104 unterschiedlichste Formen von Türdrückern und Abb. 105 Armbanduhren, die über unterschiedliche Oberflächenbehandlungen ihr charakteristisches Aussehen erhalten. Diese ästhetischen, wie auch symbolischen Züge sind natürlich zeitabhängig und unterliegen üblicherweise Modetrends.
Als Techniker beurteilt man diese Produkte meist recht unterschiedlich, aber es kann gezeigt werden, dass die Kilopreise der fertigen Produkte teilweise das 100-fache des echten Materialpreises ausmachen und daher sehr gewinnbringend sein können.

Jugendstil	Hans Hollein, 1985	verchromt	metallisiert	matt vernickelt

Abb. 104: Erscheinungsbild zählt primär – am Beispiel von Türdrückern

Multi-Material	Titan (Ti64)	Holz	CrNi-Stahl	Kunststoff

Abb. 105: Armbanduhren in unterschiedlichen luxuriösen Ausführungen

Materialien haben nicht nur technische Eigenschaften, sondern sie haben eine Ausstrahlung bzw. Ästhetik, die bestimmte Wirkungen bei den Menschen hervorruft. Einigen Materialien besitzen von der Natur her charakteristische Merkmale oder Qualitäten, die in bewusster Art und Weise Raum für Assoziationen eröffnen. In der Frühgeschichte waren es neben Gold, Hartgestein, Bronze und Eisen, die für Schmuck, Waffen und Arbeitsgeräte wichtig waren. Sehr interessant ist auch der Werkstoff-einsatz für Skulpturen und neuzeitliche Kunstwerke.

5.8.2 Werkstoffe für die Kunst

In der Frühgeschichte war angesichts des Bewusstseins menschlicher Vergänglichkeit die Dauerhaftigkeit als Wert und auch für die Lebensdauer von Kunstwerken bzw. Skulpturen wesentlich. Hartgestein, Keramik, Stein und später Eisen wurden als Metapher für Härte und Widerstandsfähigkeit betrachtet. In Ägypten wurde sehr gerne Hartgestein für Monumente verwendet. Der Prunkstein Porphyr gelangte von Ägypten nach Rom und erlangte dort aufgrund seiner Purpur-Farbe imperiale Bedeutung [Raf08].
Zurzeit Karl des Großen wurden symbolträchtige Großbronzen in Aachen errichtet. Vom 14. bis zum 16.Jahrhundert wurde im süddeutsch-österreichischen Raum für Grabskulpturen der Rotmarmor, der in der Nähe von Hallein bei Salzburg abgebaut und teilweise auch für Skulpturen im Wiener Stephansdom verwendet.
Im Mittelalter wurden eher Marmor, Ton für weiche Formen und Holz (bspw. schwarzes Ebenholz, teilweise vergoldet) insbesondere in Sakralbauten benutzt, wobei das örtliche Vorkommen der Baustoffe aufgrund der Größe der Kunstwerke mitbestimmend war. In Italien waren die Marmorvorkommen in Carrara und auch der Veroneser Marmor jene Baustoffe, deren kunstvollen Produkte gut erhalten, noch heute in Verona, Florenz, Siena und Rom bewundert werden können.
Anfang des 19.Jhdts. entstanden Kombinationen verschiedener Materialien und in den 50er Jahren wurden in der Phase des Wiederaufbaus Stahl als Kunst-Werkstoff genutzt [Wag01, Wag02].
Künstler bzw. Bildhauer verstehen die „Sprache der Materialien“ und sie können damit Gefühle, Stimmungen, Eindrücke erzeugen, die faszinieren können.
Die wichtigsten Kriterien bzgl. der Semantik der Materialien und für die Werkstoffwahl für Bildhauer sind wahrscheinlich:

- die Dauerhaftigkeit
- die Wertigkeit
- das Zusammenspiel von Form und Farben
- die innere und äußere Struktur der Materialien und
- der Oberflächenzustand (Glanz, Rauheit…)

Aus werkstoffkundlicher Sicht kann man die Werkstoffauswahl im Kunstsektor auch etwas anders definieren. Stein, Keramik und Marmor sind äußerst korrosionsbeständige Werkstoffe und unterliegen keiner Verwitterung. Die Wertigkeit von Alabaster, Elfenbein, Porphyr u.a. waren sehr selten und daher teuer, galten also in erster Linie nur als Statussymbol.
Der beliebte Bronzeguss resultiert aus der guten Gießbarkeit der Legierung (niedriger Schmelzpunkt) und aus der guten zerspanenden Bearbeitbarkeit, sowie seiner Korrosionsbeständigkeit.
Sehr wesentlich waren auch schon in früheren Zeiten die Möglichkeiten, durch spezielle Techniken unterschiedliche Farbenabstufungen zu erzeugen. Dazu gehört das Patinieren oder das metallische Beschichten mit Zinn oder Zink.
Ab den 60er Jahren haben Künstler auch modernere Werkstoffe als Basis für ihre Skulpturen und Plastiken entdeckt [Bon04]. Glas, Beton [Lat17], Acrylglas, Sperrholz, Pappe, Styropor, 3D-Kunststoffdruck mit dem ökologisch abbaubaren PLA, Textilien, Abfallstoffe oder Recyclingprodukte werden nun stilvoll oder bewusst entfremdend als Ausdrucksmittel verwendet. Die Grundlagen des Gestaltens, siehe [Jon12], bleiben aber weitgehend bestehen. Zum Abschluss sei noch eine aktuelle Arbeit [Rog15] über 27 neue Do-it-yourself-Materialien mit zahlreichen Ausführungsbeispielen erwähnt - günstige Materialien zur Förderung der Kreativität von Jugendlichen!

5.9 Literaturangaben zu Kapitel 5

Kap. 5.1

[AVK10] AVK-Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.: Handbuch Faserverbundkunststoffe – Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen, 3.Aufl., Vieweg+Teubner Verlag, 2010
[Bar98] H.J.Bargel, G.Schulze: Werkstoffkunde, VDI-Verlag, 7.Aufl., Düsseldorf, 1998
[Ber09] W.Bergmann: Werkstofftechnik, Teil 2: Anwendung, Hanser München, 2009
[Bol94] W.Bolton: Materials for Engineering, Routledge, Taylor&Francis Group, London and New York, 2nd ed. 1994
[Buc17] B.Buchmayr: Thermomechanical treatment of steels – a real disruptive technology since decades, steel research int. 87, 2017, No.9999 DOI: 10.1002/srin.201700182
[Bud05] K.G.Budinski, M.K.Budinski: Engineering Materials: Properties and Selection, Prentice Hall, 8.Aufl., 2005
[Dat77] J. Datsko: Materials Selection for Design and Manufacturing, Marcel Dekker, New York, 1997.
[Die00] G.E.Dieter: Engineering Design: A Materials and Processing Approach, McGraw-Hill, New York, 2000.
[Ehr90] K.Ehrlenspiel, A.Kiewert: Die Werkstoffwahl als Problem der Produktentwicklung (II), Ingenieur-Werkstoffe 2, 1990, Nr.2, 39-41
[Ehr02] K.Ehrlenspiel, A.Kiewert: Die Werkstoffauswahl als Problem der Produktentwicklung im Maschinenbau, VDI-Berichte Nr. 797, 1990
[Fri10] C.Fritsche, H.Fritsche, J.Kolbinger, K.-H.Küspert, G.Lindenblatt, D.Morgner, T.Paus, A.Schmidt, F.Schwarze: Fachkunde Kunststofftechnik, Verlag Europa Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2010
[GDA07] GDA Gesamtverband der Aluminiumindustrie, Düsseldorf, Merkblatt W7, Wärmebehandlung von Aluminiumlegierungen, 2007
[Gro97] A.Große: Analyse der Werkstoffauswahl in der industriellen Praxis und Konsequenz für die rechnergestützte Stahlauswahl, TU Clausthal, IMW-Institutsmitteilung Nr.22, 1997
[Hei16] B.Heine: Werkstoffauswahl für technische Anwendungen – Grundlagen und Beispiele, Fachverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2016
[Hub93] R.Hubo, F.E.Hanus, A.Streißelberger: Manufacturing and fabrication of thermomechanically rolled heavy plates, steel research 64, (8/9), 1993, 391-395
[Ilg79] K.H.Ilgner: Werkstoffauswahl für den Konstrukteur, VDI-Z 121, 1979, Nr.20, 1027-1030
[Ils01] B.Ilschner, R.Singer: Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik, Springer Verlag, 3.Auflage, 2001
[IMOA11] Int. Molybdenum Association: Verarbeitungs nichtrostender Duplexstähle – Ein praktischer Leitfaden, London, 2011
[Kai03] K.U.Kainer (Hrsg.): Metallische Verbundwerkstoffe, Wiley-VCH, Weinheim, 2003
[Kar08] E.Karana, P.Hekkert, P.Kandachar: Material considerations in product design: A survey on crucial material aspects used by product designers, Materials and Design 29, 2008, 1081-1089
[Lae07] V.Läpple, B.Drube, G.Wittke, C.Kammer: Werkstofftechnik Maschinenbau, Verlag Europa Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2007
[Lin15] K.-D.Linsmeier: Technische Keramik – Werkstoff für höchste Ansprüche, Die Bibliothek der Technik Band 208, verlag moderne industrie, Landsberg, 2015
[Mer00] M.Merkel, K.-H.Thomas: Taschenbuch der Werkstoffe, Fachbuchverlag Leipzig, 5.Aufl., 2000
[Nei14] M.Neitzel, P.Mitschang, U.Breuer: Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung, Hanser Verlag, 2.Aufl., 2014
[Neu17] H.Neuhaus: Ingenieurholzbau, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2017
[Roo02] E.Roos, K.Maile: Werkstoffkunde für Ingenieure, Springer Verlag, 2002
[Rug07] J.Ruge, H.Wohlfahrt: Technologie der Werkstoffe, vieweg, 8.Aufl., Braunschweig, 2007

[Sal82] H.Salmang, H.Scholze: Kermik, Teil1 Grundlagen und Teil 2 Keramische Werkstoffe, Springer Verlag, Berlin, 1982
[Sch98] W.Schatt, E.Simmchen, G.Zouhar: Konstruktionswerkstoffe des Maschinen-, Anlagen- und Apparatebaus, Dt.Verlag für Grundstoffindustrie, 5.Aufl., Leipzig, 1998
[Sch07] H.Schürmann: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, 2.Aufl., Springer Verlag, Berlin, 2007
[Sha03] C.P.Sharma: Engineering Materials: Properties and Applications of Metals and Alloys, PHI Learning, 2003
[Tam88] I.Tamura, H.Sekine, T.Tanaka, C. Ouchi: Thermomechanical Processing of High Strength Low
Alloy Steels, Butterworth, London 1988.
[Wag18] A.Wagenführ, F.Scholz: Taschenbuch der Holztechnik, Carl Hanser Verlag, 3.Auflage, 2018
[Wei12] W.Weißbach: Werkstoffkunde – Strukturen, Eigenschaften, Prüfung, Viewwg+Teubner, 2012
[Woe19] D.Wöhrle: Wichtige Werkstoffe unserer Zeit - Kunststoffe, Chemie in Unserer Zeit 53, 2019, 50–64
[Wue04] P.Würzinger, R.Rabitsch, W.Meyer: Production of maraging steel grades and the influence of specified and nonspecified elements for special applications, Journal of Materials Science 39, 2004, 7295-7302

Kap. 5.2

[Ash892] M.F.Ashby: Materials selection in conceptual design, Materials Science and Technology 5, June 1989,
517-525
[Ash89] M.F.Ashby: On the engineering properties of materials. Acta Metall. 37, 1989, 1273–1293
[Ash91] M.F.Ashby: Materials and shape.' Acta Metall. 39, 1991, 1025–1039
[Ash92] M.F.Ashby: Materials Selection in Mechanical Design, Pergamon Press, 1992
[Ash93] M.F.Ashby: Materials in Mechanical Design, MRS Bulletin, July 1993, 43-53
[Ash03] M.Ashby, K.Johnson: The art of materials selection, materialstoday, Dec. 2003, 24-35
[Ash04] M.F.Ashby, Y.J.M.Brechet, D.Cebon, L.Salvo: Selection strategies for materials and processes, Materials and Design 25, 2004, 51-67
[Ash14] M.F.Ashby, H.Shercliff, D.Cebon: Materials: engineering, science, processing and design, Butterworth-Heinemann, Oxford, 3rd ed., 2014, ISBN-13: 978-0-08-097773-7
[Ash16] M.F.Ashby: Materials Selection in Mechanical Design", 5th ed., Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2016
[Bre01] Y.Brechet, D.Bassetti, D.Landru, L.Salvo: Challenges in materials and process selection, Progress in Materials Science 46, 2001, 407-428
Askeland, D.R., Phulé, P.P. and Wright W.J. "The Science and Engineering of Materials", 6th edition, Thomson, Toronto, Canada, 2010. ISBN 978-0-49-529602-7. (A well-established materials text that deals with the science of engineering materials.)
Budinski, K.G. and Budinski, M.K. "Engineering materials, properties and selection", 9th edition, Prentice Hall, NY, USA, 2010. ISBN 978-0-13-712842-6. (A well-established materials text that deals with both material properties and processes.)
Callister, W.D. and Rethwisch, D.G. "Materials Science and Engineering: An Introduction", 9th edition, John Wiley & Sons, New York, USA, 2014. ISBN 978-1-118-54689-5. (A well-established text taking a science-led approach to the presentation of materials teaching.)
Farag, M.M. "Materials and process selection for engineering design", 3rd edition, CRC Press, Taylor and Francis, London UK, 2013. ISBN 9-781-4665640-9. (A materials science approach to the selection of materials.)
Shackelford, J.F. "Introduction to materials science for engineers", 8th edition, Prentice Hall, NJ, USA, 2014. ISBN 978-0133789713 . (A well-established materials text with a design slant.)

Thompson, R. "Manufacturing processes for design professionals", Thames and Hudson, London, UK, 2007. ISBN 978-0-500-51375-0. (An illustrated introduction to materials and forming, joining, and finishing processes.)

Kap. 5.3

[Cha97] J.A.Charles, F.A.A.Crane, J.A.G.Furness: Selection and Use of Engineering Materials, Butterworth, 3rd ed., 1997
[Far97] M.M.Farag: Materials Selection for Engineering Design, Prentice Hall Europe, 1997
[Hei16] B.Heine: Werkstoffauswahl für technische Anwendungen – Grundlagen und Beispiele, Carl Hanser Verlag, München, 2016
[Kar13] E.Karana, O.Pedgley, V.Rognoli: Materials Experience: fundamentals of materials and design, Butterworth-Heinemann, 2013
[Reu07] M.Reuter: Methodik der Werkstoffauswahl, Fachbuchverlag Leibzig im Carl Hanser Verlag, München, 2007
[Ash03] M.F.Ashby, Y.J.M.Brechet: Designing hybrid materials, Acta Materialia 51, 2003, 5801-5821
[Ash02] M.F:Ashby, Y.Brechet, D.Cebon: Selection Strategies for Materialsand Processes, Adv.Eng.Mat. 4, (6), 2002, 327-334
[Ant14] R.A.Antunes, M.C.Lopes de Oliveira: Materials selection for hot stamped automotive body parts: An application of the Ashby approach based on the strain hardening exponent and stacking fault energy of materials, Materials & Design 63, Nov. 2014, 247-256
[Arn12] S.M.Arnold, D.Cebon, M.Ashby: Materials Selection for Aerospace Systems, NASA/TM-2012-217411, E-18042, Glenn Research Center Cleveland OH
[Bre01] Y.Brechet, D.Bassetti, D.Landru, L.Salvo: Challenges in materials and process selection, Progr. In Materials Science 46, 2001, 407-428
[Fer10] A.Fernandez, M.Martinez, M.Segarra, I.Martorell: Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage, Solar Energy Materials and Solar Cells 94, Oct.2010, 1723-1729
[Fri17] H.E.Friedrich (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, 2.Aufl. Springer Vieweg, 2017
[Hol98] L.Holloway: Materials selection for optimal environmental impact in mechanical design, Materials & Design 19, Oct.1998, 133-143
[Hos18] P.Hosemann, D.Frazer, M.Fratoni, A.Bolind, M.F.Ashby: Materials selection for nuclear applications: Challenges and opportunities, Scripta Materialia 143, 2018, 181-187
[Kas14] A.Kasaei, A.Abedian, A.S.Milani: An application of Quality Function Deployment method in engineering materials selection, Materials and Design 55, 2014, 912-920
[Lan05] R.A.Lane, D.J.Brumaugh, J.D.Guthrie, B.D.Craig: Corrosion rules of thumb – Material selection considerations for various forms of corrosion, The AMPTIAC Quarterly 9, (3), 2005, 23-30
[Lop12] M.C.Lopes de Oliveira, G.Ett, R.A.Antunes: Materials selection for bipolar plates for polyer electrolyte membrane fuel cells using the Ashby approach, J. Power Sources 206, May 2012, 3-13
[Mal10] M.A.Maleque, S.Dyuti: Materials selection of a bicycle frame using cost per unit property and digital logic methods, J. Mechanical and Materials Eng. 5, 2010, 95-100
[Red10] G.P.Reddy, N.Gupta: Material selection for microelectronic heat sinks: An application of the Ashby approach, Materials&Design 31, (1) 2010, 113-117
[Sha14] D.U.Shah: Natural fibre composites: Comprehensive Ashby-type materials selection charts, Materials&Design 62, Oct.2014, 21-31
[Sot18] K. Sotoodeh: Analysis and improvement of material selection for process piping system in offshore industry, American J. of Mechan. Eng. 6, (1), 2018, 17-26
[Sri03] V.T.Srikar, S.M.Spearing: Materials selection in micromechanical design: an application of the Ashby approach, J. Microelectromechanical Systems 12, Feb.2003, 3-1
[Sri18] N.Sridhar, R.Thodla, F.Gui, L.Cao, A.Anderko: Corrosion-resistant alloy testing and selection for oil and gas production, Corrosion Engineering, Science and Technology 53 (S1), 2018, 75-89
[Ued06] M.Ueda: F.N. speller award lecture: development of corrosion-resistance alloys for the oil and gas industry—based on spontaneous passivity mechanism. Corrosion 62, (10). 2006, 856-867

[Woo97] J.T.Wood, J.D.Embury, M.F.Ashby: An approach to materials processing and selection for high-field magnet design, Acta Materialia 45, (3) 1997, 1099-1104
[Zil08] R.Zils: Werkstoffe im Pumpenbau, Chemie Ingenieur Technik 80, (4), 2008, 499-508
[Zou17] Y.Zou: Materials selection in micro- or nano-mechanical design: Towards new Ashby plots for small-sized materials, Mat. Science and Eng. 680, Jan. 2017, 421-425

Kap. 5.4

[Ash17] M.F.Ashby: Materials Selection in Mechanical Design, Butterworth-Heinemann, 5th ed. 2017
[Bue20] H.-J.Büchner, D.Rauen: Web-Seminar „Rohstoffmärkte“ – Talsohle durchschritten? – Wohin steuern die Rohstoffmärkte im zweiten Halbjahr 2020?“, IKB Deutsche Industriebank, Düsseldorf, 6.7.2020
[Bue20-2] H.-J.Büchner: Die Auswirkungen der Veränderungen der Abnehmerbranchen auf die globale Stahlindustrie, 15. MBI Stahltag, IKB Deutsche Industriebank, Düsseldorf, 23.9.2020
Hndelsblatt
LME

Kap. 5.5

[Die03] G.E.Dieter, H.A.Kuhn, S.L.Semiatin: Handbook of Workability and Process Design, ASM International, Materials Park, Ohio, 2003
[Lan08] K.Lange, M.Kammerer, K.Pöhlandt, J.Schöck: Fließpressen - Wirtschaftliche Fertigung metallischer Präzisionswerkstücke, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 2008
[Ost07] F.Ostermann: Anwendungstechnologie Aluminium, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 2.Aufl. 2007

Kap. 5.6

[All12] J.M.Allwood, J.M.Cullen: Sustainable Materials with both eyes open, UIT Cambridge Ltd, 2012
[All15] J.M.Allwood, J.M.Cullen: Sustainable Materials without the hot air, UIT Cambridge LTD, 2nd ed., 2015
[End09] H.-J.Endres, A.Siebert-Raths: Technische Biopolymere, Hanser Verlag, München, 2009
[Lju07] L.Y.Ljungberg: Materials selection and design for development of sustainable products, Materials and Design 28, 2007, 466-479
[Mec04] S.Mecking: Biologisch abbaubare Werkstoffe – Natur oder Petrochemie? Angew. Chemie 116, 2004, 1096-1104
[Pom20] R.Pomberger: Über theroetische, praktische und reale Recyclingfähigkeit, Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 2020, 19-20
[Rib08] I.Ribeiro, P.Pecas, A.Silva, E.Henriques: Life cycle engineering methodology applied to material selection, a fender case study, J. of Cleaner Productiion 16, 2008, 1887-1899
[Umw20] Umweltbundesamt (Hrsg.): Verlängerung der Produktnutzungsdauer Ansätze zur Abfallvermeidung und Ressourcenschonung durch Wiederverwendung und Vorbereitung zur Wiederverwendung, FBIII, Dessau-Roßlau, ISSN 2363-829X, April 2020
[Wel20] M.Wellacher, A.Schaffernak, S.Lichtenegger: Umsetzung der EU-Kunststoffstrategie in der Steiermark – Ausgangslage, Potenziale, technische Möglichkeiten und Maßnahmen. Studie im Auftrag vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Montanuniversität Leoben (Hrsg.), Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, 2020
[Woe19] D.Wöhrle: Wichtige Werkstoffe unserer Zeit - Kunststoffe, Chemie in Unserer Zeit 53, 2019, 50–64

Kap.5.7

[Bla12] J.T.Black, R.A.Kohser: DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing, 11th ed. John Wiley & Sons, Inc. 2012
[Die86] R.Dietz: Werkstoffe für korrosionsbeanspruchte Bauteile im Kraftfahrzeug, VDI-Berichte Nr. 600, 1986, 299-330
[Far08] M.M.Farag: Quantitative methods of materials substitution: Application to automotive components, Materials and Design 29, 2008, 374-380
[Gra93] U.Gramberg: Werkstoffauswahl in der Chemischen Verfahrenstechnik, Chem.-Ing.-Tech. 65, 1993, Nr.6, 693-702
[Her93] W.R.Herda, M.Rockel: Neue Hochleistungswerkstoffe für die chemische Verfahrenstechnik, TR Technische Rundschau, H.7, 1993, 31-34
[Jah10] A.Jahan, M.Y.Ismail, S.M.Sapuan, F.Mustapha: Material screening and choosing methods – A review, Materials&Design 31, 2010, 696-705
[Man99] P.L.Mangonon: The Principles of Materials Selection for Engineering Design, Prentice Hall, New Jersey, 1999
[Mur97] G.Murray: Handbook of Materials Selection for Engineering Applications, CRC Press, 1997
[Sch86] K.Schneemann: Kriterien für den Werkstoffeinsatz im Chemieanlagenbau, VDI Berichte Nr. 600, 1986, 253-350
[Swi03] K.G.Swift, J.D.Booker: Process Selection from design to manufacture, Butterworth-Heinemann, 2nd ed., 2003
[Sch81] G. Schott: Gegenüberstellung bekannter Werkstoffauswahlverfahren. ???, 1981
[Zam17] U.K.Zaman, A.Siadat, M.Rivette, A.A.Baqai, L. Qiao: Integrated product-process design to suggest appropriate manufacturing technology: a review, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 91, 2017, 1409-1430

Kap.5.8

[Bon04] A.-M.Bonnet: Kunst der Moderne Kunst der Gegenwart. Köln 2004
[Jon12] U.Jonak: Grundlagen der Gestaltung, Springer Vieweg, 2.Aufl. 2012
[Lat17] U.Latzke: Ein kreativer Kunst-Stoff, Beton- und Stahlbetonbau Spezial 2017, 40-46
[Raf08] T.Raff: Die Sprache der Materialien – Anleitung zu einer Ikonologie der Werkstoffe, Münchner Beiträge zur Volkskunde, Waxmann, Münster, N.Y., München, Berlin, 2008
[Rog15] V.Rognoli, M.Bianchin, S.Maffei, E.Karana: DIY materials, Materials and Design 86, 2015, 692-702
[Rue17] D.Rübel, M.Wagner, V.Wolff (Hrsg.): Materialästhetik. Quellentexte zu Kunst, Design und Architektur. Berlin , 2017
[Wag01] M.Wagner: Das Material der Kunst. Eine andere Geschichte der Moderne. München, 2001
[Wag02] M.Wagner, D.Rübel, Dietmar, S.Hackenschmidt (Hrsg): Lexikon des künstlerischen Materials. Werkstoffe der modernen Kunst von Abfall bis Zinn. München, 2002

6 Auswahl geeigneter Fertigungstechnologien

Zusammenfassung: Zunächst werden die Grundprinzipien zur Verfahrensauswahl und die Auswahlkriterien behandelt. Danach folgt eine detaillierte Analyse der wichtigsten Faktoren, die die Entscheidung für eine spezielle Fertigungstechnologie stark beeinflussen. Diese sind Werkstofftyp, Bauteilgeometrie, Leichtbauaspekte, Wirtschaftlichkeit, Ökologische Einflüsse, Oberflächentechnologien, Rapid Prototyping und Additive Fertigung. Die Bedeutung des Werkzeugbaus und der Werkzeugmaschinen wird im abschließenden Subkapitel besonders hervorgehoben.

6.1 Grundlegende Prinzipien zur Auswahl von Fertigungsprozessen

Produkte müssen schnell, qualitativ hochwertig, nachhaltig, fehlerfrei, zuverlässig und kostengünstig hergestellt werden. Diese Herausforderung kann nur dann gelingen, wenn das Wissen und die Erfahrungen aus dem gesamten Bereich der Fertigungstechnik zusammenwirken. Meist trifft der Konstrukteur mit den Produktentwicklern, Arbeitsvorbereitern und Produktionsleitern die Entscheidung, wie ein Bauteil gefertigt wird.
Wie im Kap. 3 ausgeführt, ist die Kenntnis über die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen Design, Material und Fertigungsverfahren für den wirtschaftlichen Erfolg in der Produktion maßgebend. Es kann aber aufgrund der zahlreichen Einflüsse keine einzige Lösung für das Herangehen an die Auswahl geeigneter Fertigungstechnologien geben, weshalb in diesem Kernkapitel mehrere Startpunkte für den Auswahlprozess im Detail betrachtet werden.
Nach einer kurzen, einleitenden Darstellung wichtiger Auswahlkriterien werden die wichtigsten Betrachtungsweisen für die Wahl von Fertigungsverfahren vorgestellt, wie

- Verfahrensauswahl für einen vorgegebenen Werkstoff,
- Selektion eines Fertigungsverfahrens für eine spezielle Bauteilform, -geometrie bzw. -größe,
- Werkstoffeinsparung durch fertigungstechnischen Leichtbau,
- Auswahl möglichst kostengünstigster Fertigungstechnologien,
- stärkere Berücksichtigung ökologischer Gesichtspunkte,
- Beurteilung der Fügbarkeit und geeigneter Fügetechnologien für größere, komplexere Teile, die meist differentiell gefertigt werden,
- Auswahl von geeigneten Oberflächentechniken im Falle von Verschleiß, Korrosion oder Ermüdung,
- Verkürzung der Entwicklungsphase und schnelle Verfügbarkeit von Prototypen, oder auch die werkzeuglose Fertigung durch additive Herstellprozesse,
- Fertigung mit hochbeanspruchten und geometrisch komplexen Werkzeugen inklusive Werkzeugbau und Werkzeugmaschinen.

Aus dieser Aufzählung wird sofort ersichtlich, dass der Auswahlprozess meist nicht nach den Gesichtspunkten der klassischen Einteilung der Fertigungsverfahren, gemäß DIN 8580 (siehe Tabelle 38) erfolgt, sondern die Weichen durch andere Faktoren gestellt werden. Je nach Anwendung und den damit verbundenen Anforderungen erfolgt auch eine passende Auswahl der Fertigungsart.
Anstelle der bekannten Darstellung der einzelnen Hauptgruppen mit ihren Vertretern werden in Abb. 106 nur eine Gliederung der gängigen Verfahren dargestellt.

Änderung der	Zusammenhalt schaffen	Zusammenhalt beibehalten	Zusammenhalt vermindern	Zusammenhalt vermehren	
Form	Hauptgruppe 1 **Urformen**	Hauptgruppe 2 **Umformen**	Hauptgruppe 3 **Trennen**	Hauptgruppe 4 **Fügen**	Hauptgruppe 5 **Beschichten**
Stoffeigenschaft	(Formschaffen)	Hauptgruppe 6 **Stoffeigenschaften ändern** durch Umlagern, Aussondern, Einbringen von Teilchen			

Tabelle 38: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN8580

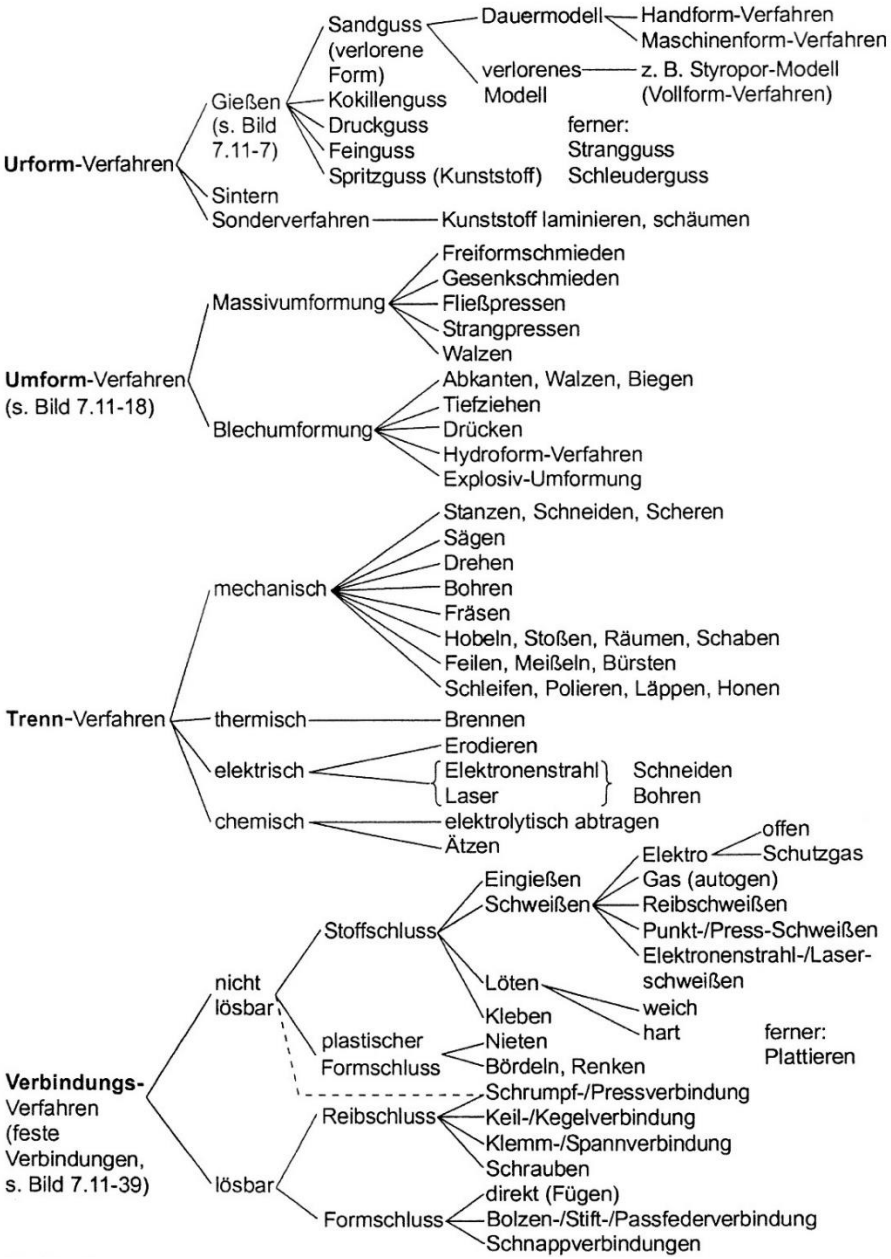


Abb. 106: Überblick über gebräuchliche Fertigungsverfahren nach Bauer

In der englischen Fachliteratur wird nur unterschieden zwischen drei Fertigungshauptgruppen:

- additiv
- subtraktiv und
- verschiebend

Was sind nun die tatsächlichen Faktoren, ob ein Produkt gegossen, geschmiedet, geschweißt oder gestanzt wird? Diese Frage wird in den Fachbüchern meist nicht direkt behandelt, sondern man begnügt sich mit Klassifizierungen und einer Beschreibung der Verfahren.

6.1.1 Wann würde man dem Gießen den Vorrang geben und wie kommt man zum richtigen Gießverfahren?

Gießverfahren stellen den kürzesten Weg vom Rohmaterial zum Endprodukt dar, was sich auch in den niedrigen Preisen zeigt. Aufgrund der Tatsache, dass eine flüssige Schmelze in eine Form gegossen wird und erst nach dem Formfüllen erstarrt, sind auch sehr komplexe Geometrien endkonturnah möglich. Besonders geeignet für den Gießprozess sind niedrigschmelzende Werkstoffe, wie Magnesium, Aluminium, Bronze, Zinn und Zink, sowie eutektische Legierungen.
Aufgrund der direkten Erstarrung aus dem schmelzförmigen Zustand und Erstarrung bei hoher Temperatur ergeben sich meist grobkörnige Mikrostrukturen, die nur durch Verwendung eutektischer Legierungssysteme mit niedrigem Schmelzpunkt und feinen, homogenen Gefügezuständen optimiert werden können. Dazu kommen noch lokale Konzentrationsunterschiede (Seigerungen), die sich negativ auf das Bauteilverhalten auswirken können. Am Beispiel von rostfreien Stählen sind in Tabelle 39 die charakteristischen Eigenschaften von gegossenen und geschmiedeten Bauteilen vergleichend zusammengefasst.

Zusammengefasster Vergleich zwischen den Eigenschaften von gegossenen und geschmiedeten Bauteilen aus rostfreien Stählen		
Eigenschaften	**Gegossene Bauteile**	**Geschmiedete Bauteile**
Korrosive Eigenschaften		
Allgemeine Korrosionsbeständigkeit	schlechter	**besser**
Lochfraßkorrosionsbeständigkeit	schlechter	**besser**
Interkristalline Korrosion	schlechter	**besser**
Spannungsrisskorrosion und Wasserstoffversprödung	schlechter	**besser**
Mechanische Eigenschaften		
Festigkeitseigenschaften	schlechter	**besser**
Kerbschlagarbeit	schlechter	**besser**
Dauerschwingfestigkeit	schlechter	**besser**
Physikalische und Verarbeitungseigenschaften		
Wärmebehandlung	mehr	**weniger**
Zerspanbarkeit	schlechter	**besser**
Polierfähigkeit	schlechter	**besser**
Oberflächenausführung	schlechter	**besser**
Zerstörungsfreie Prüfung	schlechter	**besser**
Nachfolgende Beschichtung	schlechter	**besser**
Reinheitsgrad *	schlechter	**besser**
Geometrisch komplizierte Bauteile *	**besser**	schlechter
Wirtschaftliche Aspekte		
Preis pro gefertigtes Teil	**niedriger**	höher

Tabelle 39: Eigenschaftsvergleich zwischen gegossenen und geschmiedeten Bauteilen (Quelle: ThyssenKrupp Edelstahlprofile)

Für die Auswahl innerhalb der Gruppe der Gießverfahren stellt die Stückzahl eine erste große Weichenstellung dar. Bei einmaligem Guss oder geringen Stückzahlen geschieht das Gießen mit verlorenen Formen, wobei in kleineren Gießereien noch immer der seit der Antike bekannte Sandguss dominiert. Die Modelle werden aus einfach zu bearbeitenden Materialien (bspw. Holz) gefertigt. Für größere Gussstücke und kleineren Stückzahlen wird auch das Vollformgießen mit Modellen aus Styropor verwendet. Sind die Bauteile aber eher klein und sollen hohe Qualitäten erreicht werden, dann kommt das Feingießen oder Wachsausschmelzverfahren zum Zug. Bei den beiden letztgenannten Verfahren spricht man auch von Gießen mit verlorenen Formen und verlorenen Modellen.
Bei größeren Stückzahlen erfolgt das Gießen in Dauerformen, entweder im Kokillenguss oder am häufigsten im Druckguss. In manchen Fällen und bei rotationssymmetrischen Formen wird auch der Schleuderguss verwendet.
Die zuvor genannten Verfahren sind sehr weit verbreitet, es gibt aber noch Sonderverfahren, wie Thixogießen, Vacuralgießen, Squeeze Casting u.a.m.
Bei einer Bewertung aller Verfahren hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Bedeutung dominiert bei den Nichteisenlegierungen sicherlich der Al-Druckguss mit mehr als 60%. Dies passiert auf den hohen Anteil der Gussverwendung im Straßenfahrzeugbau (ca. 60%). Typische Massenanwendungen sind Zylindergehäuse, Getriebegehäuse, Federbeinstützen. Europaweit marktführend ist Deutschland (ca. 5 Mio. to), gefolgt von Italien (ca. 2 Mio. to) und Frankreich mit 1,8 Mio. to [CAEF-The European Foundry Association].
Für den Druckguss werden allgemein folgende Aluminium-Gusslegierungen verwendet:

- AlSi9Cu3(Fe)
- AlSi12Cu1(Fe)
- AlSi12(Fe)
- AlSi10Mg(Cu)

Beim Gusseisen überwiegen der Grauguss und der Sphäroguss, siehe Abb. 107.

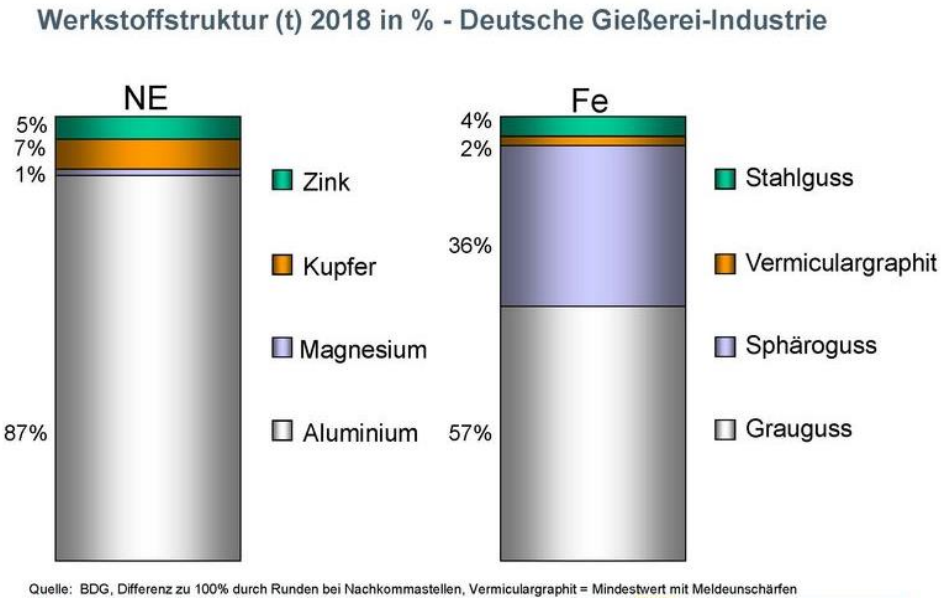


Abb. 107: Gießverfahren und Werkstoffanteile (Quelle: bdguss.de)

Analog zu den metallischen Werkstoffen hat das Spritzgießen bei den Kunststoffen eine vorrangige Bedeutung [Ste08].

6.1.2 Über die Bedeutung der Umformverfahren und primäre Selektionskriterien

Bereits in der DIN 8580 werden die Umformverfahren nach dem Spannungszustand gegliedert. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass das Umformvermögen sehr stark vom hydrostatischen Druckzustand abhängt. Dies wird durch das sog. Stenger-Diagramm (Bild 5.5.3.1.1) beschrieben.
Komplexe Bauteile, sowie hohe Querschnittsänderungen und damit hohe Produktivität werden daher durch Verfahren wie dem Gesenkschmieden, Fließpressen, Strangpressen und Walzen erzeugt.
Neben den Massivumformverfahren gibt es aber auch die Blechumformverfahren, die aus Sicht der gebrauchten Mengen noch bedeutsamer sind. Die wichtigsten Vertreter sind das Stanzen/Biegen und das Tiefziehen. Einen zusammenfassenden Überblick über den breiten Anwendungsbereich und den wichtigsten Systemelementen der Umformtechnik zeigt Abb. 108.

Abb. 108: Bedeutung der Umformtechnik und typische Anwendungsbereiche

Im Falle der Massivumformung ist die Höhe der Umformkraft und damit der notwendige Maschinenpark (Investitionsaufwand) für die Wirtschaftlichkeit maßgebend. Die dafür charakteristische Kenngröße ist die Fließspannung k_f, die sehr stark von der Umformtemperatur abhängig ist. Bei Umformtemperaturen über der Rekristallisationstemperatur einer Legierung spricht man von einer Warmumformung und darunter von Kaltumformung. Dazwischen gibt es auch noch den Bereich der Halbwarmformung. Für Stähle sind diese Bereiche mit ihren charakteristischen Eigenschaften in Abb. 109 dargestellt. Sehr häufig wird daher nach einer Warmumformung eine Kaltumformung angeschlossen, um die Eigenschaften und die Maßhaltigkeit zu verbessern.

	Warm-umformung	Halbwarm-umformung	Kaltumformung (Fließpressen)
Formspektrum	beliebig	möglichst rotationssymmetr.	hauptsächlich rotationssymmetr.
max.Werk-stückgewichte	1200kg	50kg	20kg
Genauigkeit	IT12 - IT16	IT9 - IT12	IT7 - IT11
Oberflächen güte Rt	>100µm	<50µm	10µm
Fließspannung	20-30%	30-50%	100%
Umformgrenze	φ<6	φ<4	φ<1,6
Eingesetzte Stahlqualität	beliebig	C beliebig, niedriglegiert <10%	C niedrig <0,4% niedriglegiert <3%
Losgröße	ab 500 Stück	ab 10000 Stück	ab 3000 Stück
Spanende Fert.	hoch	gering	sehr gering

Abb. 109: Vergleich der Verfahren Warm-, Halbwarm- und Kaltumformung nach IMU Hagen

Die Blechumformung bietet für die Fertigung von Bauteilen viele Vorteile, die notwendigen Umformkräfte sind niedrig, der Prozess ist gut steuer- und kontrollierbar und es sind eine Vielzahl von Werkstoffen mit unterschiedlichen Wandstärken und Oberflächenausführungen vorhanden.
Zu den wichtigsten Verfahren zählen das Stanzen und das Biegen bzw. die Kombination aus beiden Prozessen, das Stanzbiegen. Dazu kommt das Tiefziehen und zu einem geringeren Anteil das Streckziehen.

6.1.3 Wie findet man das passende Trennverfahren?

Die wichtigste Gruppe innerhalb der Trennverfahren ist das Zerspanen mit den Untergruppen Sägen, Hobeln, Fräsen, Bohren, Drehen u.a.m. Weitere wichtige trennende Verfahren sind das Scherschneiden oder Stanzen, das Brennschneiden, Wasserstrahlschneiden, Laserstrahlschneiden und das Funkenerodieren.

6.1.4 Was ist bei der Auswahl von Fügeprozessen wichtig?

Das Verbinden von Teilen kann über Form-, Kraft- oder Stoffschluss erfolgen, wobei man noch zwischen lösbaren und unlösbaren Verbindungen unterscheidet.
Bei den unlösbaren Verbindungen besitzt das Schweißen die größte Bedeutung bei den Metallen. In Tabelle 40 wird das Schweißen mit den typischen Eigenschaften anderer Verfahren verglichen.
Eine Zusammenstellung wichtiger und selektiver Auswahlkriterien für die Fülle der Fügeverfahren ist im Kapitel 6.8 angeführt.
Das Lichtbogenschweißen besitzt die größte Bedeutung, gefolgt vom Widerstandsschweißen, das primär in der Automobilindustrie in Verbindung mit Schweißrobotern in Verwendung ist. Hochenergieverfahren und andere elektrische Verfahren haben einen Anteil kleiner 5%.
In den letzten Jahren hat sich insbesondere das Schutzgasschweißen mit Fülldrähten durchgesetzt, weil damit ein automatisiertes Schweißen und aufgrund der mineralischen Füllstoffe eine gute Schweißnahtqualität möglich ist.

Verfahren	Vorteile des Verfahrens	Nachteile des Verfahrens	Vorteile des Schweißens
Gießen	Gestaltungsfreiheit Massenfertigung oft billiger	Modelle erforderlich (Sandguß) Werkzeuge erforderlich (Druckguß)	Gewichtsersparnis bis 50% höhere Zähigkeit Verbundkonstruktionen
Spritzguß, Platten, Folien (Kunststoff)	leichte Teile Verbundwerkstoffe möglich farbige Ausführungen	geringere Festigkeit geringere Steifigkeit geringere Temperaturbeständigkeit	Schweißen möglich Folien versiegeln
Schmieden	günstiger Faserverlauf beste Zähigkeit unempfindlich gegen Schlag	Gestaltungsmögl. beschränkt Werkzeuge/Gesenke erf.	kürzere Lieferzeiten Werkstoffauswahl größer
Nieten	keine Wärmebeeinflussung keine Eigenspannungen gewisse Nachgiebigkeit oft dekorativ	Gewicht erheblich höher Korrosionsanfälligkeit	günstigerer Kraftfluß weniger Einzelteile
Löten	niedrige Arbeitstemperatur untersch. Werkst. verbindbar geringer Lotverbrauch mechanisierbar	teilweise geringe Festigkeit Korr.-Gefahr durch div. Elemente	keine Flußmittel erforderl. gleicher Werkst. als Zusatz Stumpfstoß
Kleben	Arbeiten bei Raumtemperatur leichte Bauweise gute Festigkeitswerte untersch. Werkst. verbindbar isolierend	Überlappungslänge erheblich Alterungsgefahr Vorbereitung aufwändig Einsatztemperatur begrenzt	Prozeßsicherheit größer Stumpfstoß günstigerer Kraftfluß

Tabelle 40: Vergleich des Schweißens mit anderen Fertigungstechnologien

6.1.5 Unterscheidung innerhalb der Beschichtungsverfahren?

Durch Beschichten werden festhaftende Schichten auf einen Grundwerkstoff aufgebracht, um bestimmte Oberflächeneigenschaften (meist Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit) zu erreichen.
Die Verfahren werden im Kapitel 6.9 im Detail behandelt. Eine erste Auswahl betrifft die Entscheidung, ob die Einstellung der erwünschten Oberflächeneigenschaften durch Modifikation der Randschicht oder durch das Aufbringen einer artfremden Schicht Beschichtung bewerkstelligt werden soll. Ansonsten erfolgt die Auswahl nach Verschleißwiderstand bzw. nach Korrosionswiderstand und den dafür vorhandenen Werkstoffsystemen.

6.1.6 Auswahl innerhalb der Gruppe „Stoffeigenschaften ändern“

Darunter versteht man Prozesse, die zu einer Änderung der Werkstoffeigenschaften führen. Die wichtigsten betreffen das Härten, Vergüten, Entkohlen, Aufkohlen, Nitrieren oder aber auch das Glühen (Weichglühen) von Stählen, um die Bearbeitung zu erleichtern. Andere Technologien, wie bspw. das Ionenimplantieren, haben nur begrenzte Anwendungsbereiche.
In manchen Fällen sind auch lokale Veränderungen (bspw. durch Kugelstrahlen oder Laserhärten) möglich, wodurch über die Beeinflussung der örtlichen mechanischen Werkstoffeigenschaften oder der Eigenspannungsverläufe das Gesamtverhalten/Lebensdauer einer Komponente verbessert werden kann. Bei Kunststoffen ist eine Eigenschaftsverbesserung durch γ-Bestrahlung und die damit verbundene Erhöhung des Vernetzungsgrades möglich.

6.2 Kriterien zur Auswahl von Fertigungsverfahren

Bei der Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens müssen sowohl produkt- und prozess-spezifische als auch ökonomische und auch ökologische Gesichtspunkte berücksichtigt werden. Die wichtigsten Faktoren sind in Tabelle 41 zusammengefasst. Je nach Anwendungsfall können diese Kriterien unterschiedlich bewertet und kombiniert werden, weshalb noch eine detaillierte Beschreibung der Einflussgrößen in den nächsten Unterkapiteln folgt.
Für eine objektive Entscheidungsfindung bei der Verfahrensauswahl können die, im Kap. 2.8 genannten Methoden verwendet werden. Wichtig ist aber, dass die Anforderungen, Suchkriterien, Gewichtungen und Bewertungen gut nachvollziehbar dokumentiert werden. Relativ häufig tritt der Fall ein, dass sich einige Randbedingungen/Parameter im Laufe der Zeit ändern, wodurch eine Neubewertung geeigneter Fertigungsverfahren notwendig wird. Auf Basis der bereits vorliegenden Fakten ist dieser Prozess dann recht rasch umsetzbar.

Produktbezogene Kriterien	Prozessbezogene Kriterien	Wirtschaftliche Kriterien	Ökologische u. soziale Kriterien
Bauteilform & -größe	Taktzeiten	Investitionsaufwand	Energiebedarf
Belastungen	Toleranzanforderungen	Amortisierungsdauer	CO_2-Emission
Werkstoff/Fertigungseignung	Oberflächengüte	Maschinenkosten	Rezyklierbarkeit
Qualitätsanforderungen	Flexibilität	Werkzeugkosten	Abfallstoffe
Stückzahl	Automatisierbarkeit	Personalkosten	…
Erscheinungsbild	Eignung für Werkstoff	Lizenzkosten	Arbeitsschutz
Spez. Anforderungen	Prozesskontrolle	Ausbringung	Ergonomie
	Technologieentwicklung	Know-how	
	Eigenschaftsveränderungen	Kauf / make or buy	

Tabelle 41: Wichtige Kriterien bei der Auswahl von Fertigungsverfahren (nach Prof. Westkämper, Stuttgart)

6.3 Wahl der Fertigungsverfahren je nach Werkstoffklasse

Die Werkstoffhauptgruppen mit ihren zugeordneten Einzelwerkstoffen zeigen aufgrund ihrer Bindungskräfte und ihres Aufbaus eigene Eigenschaftsprofile und Verarbeitungseigenschaften (s. Kap. 5.5), die sich auch auf die Auswahl von geeigneten Fertigungsverfahren auswirken. Einen groben Überblick über den Zusammenhang zwischen Werkstoffgruppen und möglichen Fertigungsverfahren geben die Tabelle 42 und Tabelle 43.
Bei Metallen lohnt es sich zwischen Guss- und Knetlegierungen zu unterscheiden und bei den Kunststoffen separieren sich insbesondere Thermoplaste, Duromere und Faserverbunde bzgl. der geeigneten Verarbeitungstechnologien. Für Gläser und Keramiken gibt es ebenso sehr spezielle Technologien.

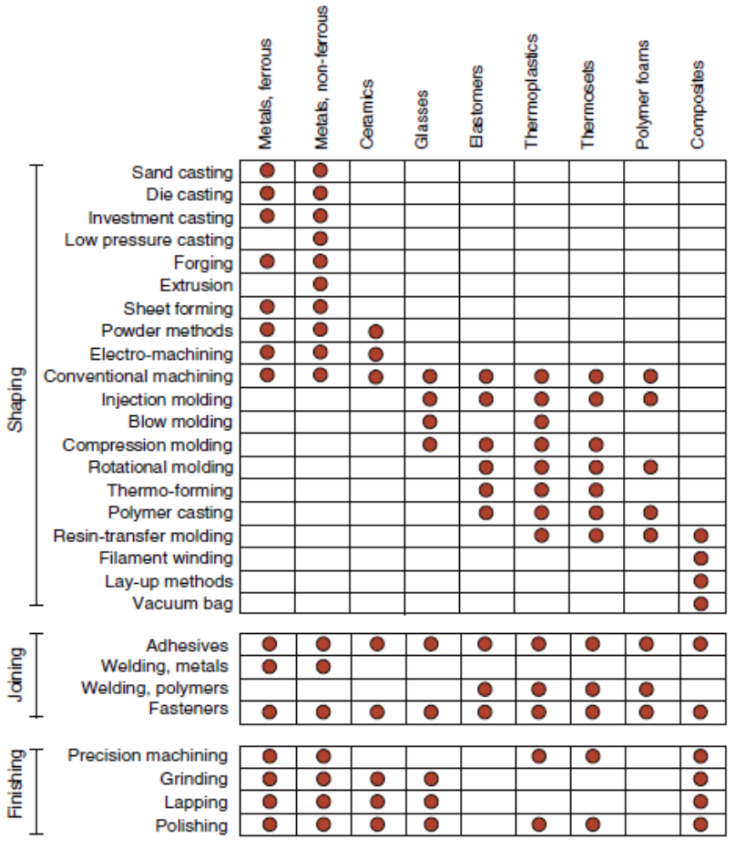


Tabelle 42: Auswahl geeigneter Fertigungsverfahren in Abhängigkeit vom Werkstofftyp nach M.F.Ashby [Ash04]

	Compatability between Processes and Materials													
** = & alloys	Cast Iron	Carbon Steel	Alloy Steel	Stainless Steel	Al **	Cu **	Zn **	Mg **	Ti **	Ni **	Refractory metals	Thermo plastics	Thermo-sets	normal practice
														not common practice
	SOLIDIFICATION PROCESSES													not applicable
Sand Casting														
Investment Casting														
Die Casting														
Injection moulding														
Structural foam moulding														
Blow moulding [ext]														
Blow moulding [inj]														
Rotational moulding														
	BULK DEFORMATION PROCESSES													
Impact extrusion														
Cold heading														
Closed die forging														
Powder metal parts														
Hot extrusion														
Rotary swaging														
	MATERIAL REMOVAL PROCESSES													
Machining [from stock]														
ECM [electrochemical]														
EDM [electrodischarge]														
	PROFILING													
Wire EDM														
	SHEET FORMING PROCESSING													
Sheet metal [stamp/bend]														
Thermoforming														
Metal spinning														

Tabelle 43: Kompatibilität zwischen Werkstoffen und Fertigungsverfahren Quelle: Queens Univ. Canada

6.3.1 Auswahl von Fertigungsverfahren für metallische Werkstoffe

Die Gieß- und Umformtechnik umfassen die wichtigsten Fertigungsverfahren, weil diese zu zuverlässigen, endformnahen und kostengünstigen Produkten führen. Mit Abstand folgen die Zerspanungs- und Schweißtechnik. Das spanlose Trennen und Abtragen und die Pulvermetallurgie sind für die Be- und Verarbeitung von metallischen Komponenten ebenso wichtig.
Wie im vorigen Abschnitt dargestellt, müssen der Werkstoff und das Fertigungsverfahren kompatibel sein, d.h. spezielle Werkstoffeigenschaften müssen die Machbarkeit mit einem speziellen Verfahren unterstützen. Hier sei auf die Ausführungen im Kap. 5.5 verwiesen. Darüber hinaus sind die wirtschaftlichen Aspekte zu berücksichtigen, siehe Kap. 6.6.

6.3.2 Auswahl von Fertigungsverfahren für Kunststoffe

Auch für die Werkstoffgruppe der Kunststoffe gilt der enge Zusammenhang zwischen den Verarbeitungseigenschaften der einzelnen Kunststoffe mit den vom Prozess vorgegebenen Anforderungen. Übersichten zur Kunststoffverarbeitung finden sich in [Hop17, Bon16, Eye08, Rav00, Sch14].
Prinzipiell werden die Verfahren auch nach den sechs Hauptgruppen der DIN8580 unterteilt. Zusätzlich wird aber noch zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Fertigungsverfahren unterschieden.
Zu den wichtigsten kontinuierlichen Fertigungsverfahren zählen:

- Extrusion (Strangpressen),
- Folienblasen und das
- Kalandrieren

Zu den wichtigsten diskontinuierlichen Verfahren (Stückfertigung) zählen:

- Spritzgießen,
- Blasformen (Hohlkörperblasen)
- Thermoformen

Weitere Verfahren in der Kunstverarbeitung sind:

- Extrusions-Blasformen und Streckblasen
- Formteile aus duroplastischen Pressmassen (Pressen)
- Elastomer-Verarbeitung
- Verarbeitung von Polyurethanen (Schaum, RIM-Verfahren…)
- Prozesse zur Herstellung faserverstärkter Kunststoffe (GFK, CFK)
- Schweißen von Kunststoffen
- Kleben von Kunststoffen
- Mechanische Bearbeitung
- Recycling von Kunststoffen

6.3.3 Auswahl von Fertigungsverfahren für Verbundwerkstoff

6.3.3.1 RTM (resin transfer moulding)

Zur Herstellung von lang- und endlosfaserverstärkten flächigen Bauteilen in kleinen und mittleren Serien hat sich das Harzinjektionsverfahren RTM etabliert.
Die Matrix besteht zumeist aus einem duroplastischen Kunststoff wie Polyester, Epoxid- oder Phenolharz. Als Fasern werden Glasfasern, Kohlenstofffasern und auch solche aus Polymerwerkstoffen, wie Aramid- und Polyethylenfasern, eingesetzt. Dabei können die Faser-Rovings zu

verschiedenen Faserhalbzeugen mit unterschiedlicher Architektur verarbeitet werden. Neben Gelegen, Geweben, Vliesstoffen und Matten werden auch Gestricke und Geflechte für die Herstellung von Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen eingesetzt.

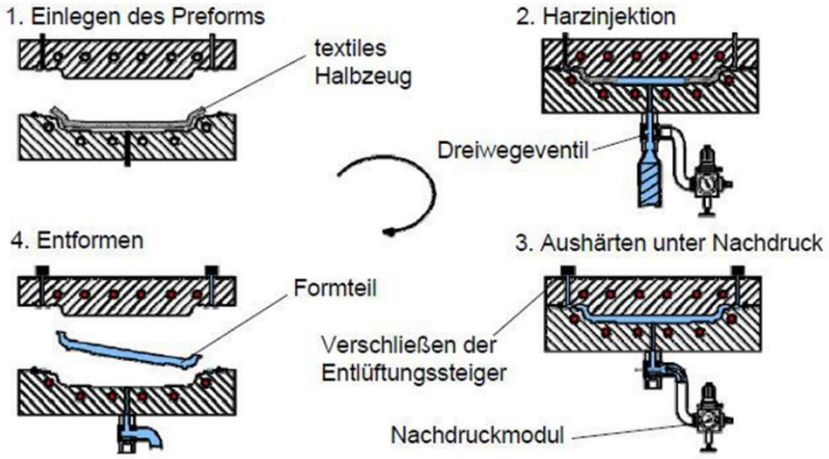


Abb. 110: Verfahrensprinzip RTM [Hop17]

6.3.4 Auswahl von Fertigungsverfahren für keramische Werkstoffe

Die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten keramischer Erzeugnisse beruhen auf den spezifischen Eigenschaften keramischer Werkstoffe, die in vielen Beziehungen von anderen Werkstoffen nicht erreicht werden [Keramikverband]. Sie werden in drei Werkstoffklassen – Silikatkeramik, Oxidkeramik und Nichtoxidkeramik (Karbide, Nitride) – unterteilt. Als positive Eigenschaften sind hervorzuheben:

- niedrige Dichte,
- große Härte,
- hohe mechanische Festigkeit,
- Formstabilität (spezifische Steifigkeit),
- Verschleißbeständigkeit,
- Korrosionsbeständigkeit (Beständigkeit gegen chemische Einflüsse),
- Witterungsbeständigkeit,
- hohe zulässige Einsatztemperatur,
- niedrige oder hohe Wärmeleitfähigkeit,
- hohes elektrisches Isoliervermögen sowie
- dielektrische und ferroelektrische Eigenschaften.

Je nach Zusammensetzung und Aufbereitung der verwendeten Rohmaterialien sowie nach Formgebung und Art des Brennens können die Eigenschaften der jeweiligen Erzeugnisse dem beabsichtigten Verwendungszweck im hohen Maße angepasst werden.
Die erreichbaren Eigenschaften werden durch die Rohstoffe und das Herstellungsverfahren beeinflusst. Ähnlich wie bei den anderen Werkstoffhauptgruppen werden die Eigenschaften über die Mikrostruktur, die vom Pulvertyp, von der Formgebung und vom Sinterprozess abhängt. Der gesamte, komplex Herstellungsprozess ist in Abb. 111 dargestellt. Die Auswahl der Formgebungsmethode ist in erster Linie vom Feuchtigkeitsgehalt der verwendeten Ausgangsmassen abhängig, siehe Tabelle 44. Die Kriterien für die Formgebungsverfahren werden in [Ric00] ausführlicher behandelt.

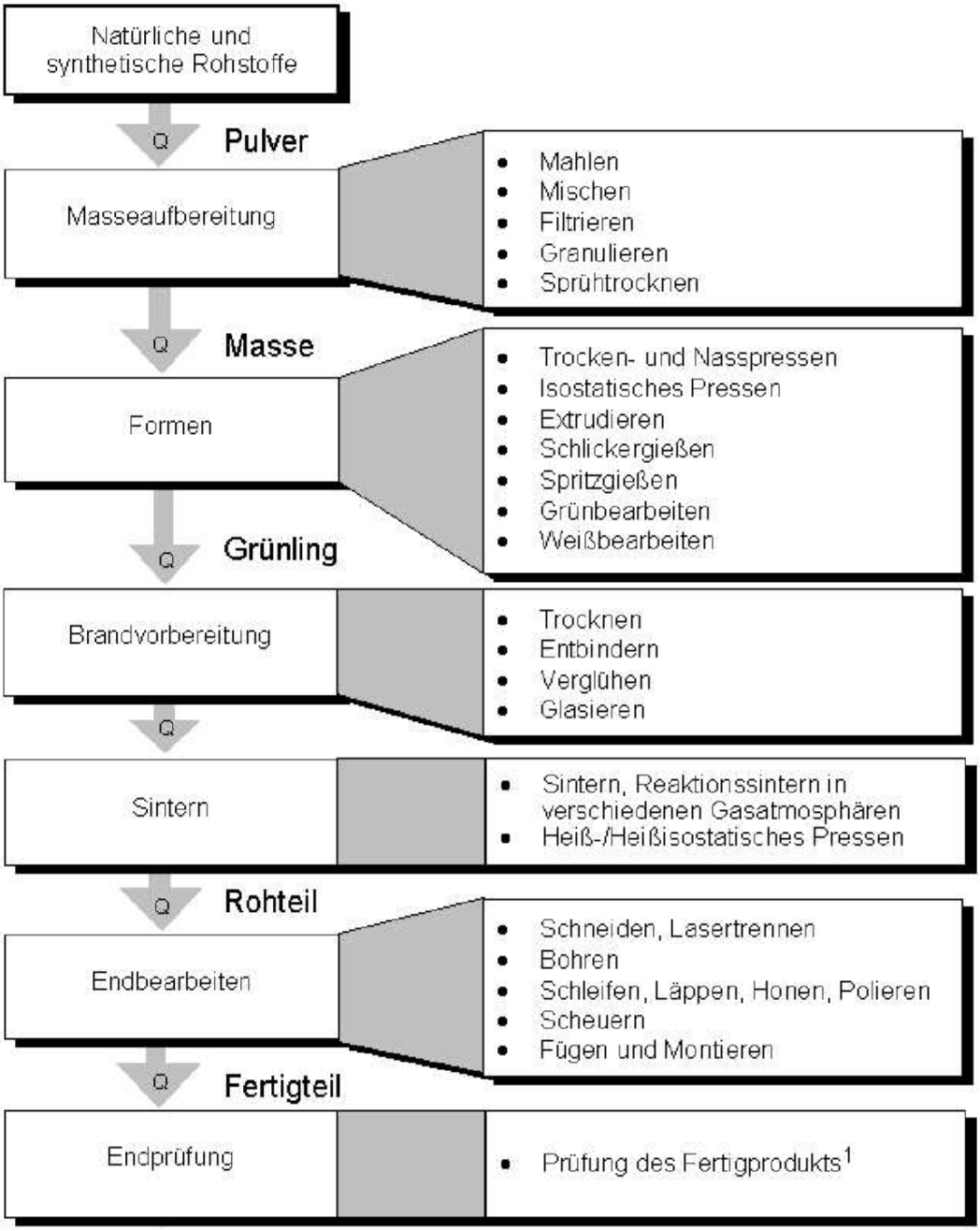


Abb. 111: Keramischer Herstellungsprozess (Quelle: Keramikverband.de)

Gießen (25 – 40 % Feuchte)	**Plastische Formgebung** (15 – 25 % Feuchte)	**Pressen** (0 – 15 % Feuchte)
• Schlickergießen • Druckgießen • Foliengießen • Elektrophorese • Heißgießen • Spritzgießen	• Extrudieren • Quetschen • Drehen • Freiformen	• Nasspressen • Trockenpressen • Vibrationsverdichten • Stampfen

Tabelle 44: Keramische Formgebungsverfahren (Quelle: Keramikverband.de)

6.4 Einfluss der Bauteilform und -Größe auf die Verfahrensauswahl

Erst durch die Bauteilform wird in vielen Fällen eine bestimmte, vom Kunden gewünschte Funktion erfüllt. Es hat sich dafür der Merksatz aus dem englischen Sprachraum eingebürgert:

FFF – Form Follows Function

Dieses Designprinzip ist in Abb. 112: Beispiele für das Design-Prinzip FFF „Form Follows Function“ an einigen klassischen Beispielen dargestellt.

Abb. 112: Beispiele für das Design-Prinzip FFF „Form Follows Function“

Am schönsten sieht man die Auswirkungen dieses Prinzips bei der Betrachtung der Gestaltentwicklung von Konsumgütern. Abb. 113 zeigt, wie sich die technologischen Veränderungen der Fertigungsverfahren auf das Erscheinungsbild von Haushaltsgeräten ausgewirkt hat, siehe auch [Pol12]. Man erkennt auch, dass über die letzten 50 Jahre die Kunststoffverarbeitung an Bedeutung zugenommen hat.

Abb. 113: Form und Werkstoffeinsatz bei älteren Haushaltsgütern. (Bildquelle: www.braunsammlung.info)

Bemerkenswert ist auch der Umstand, dass ein Großteil unserer Konsumgüter meist dünnwandig ist, einerseits aufgrund eines gewohnten Umgangs bei der manuellen Fertigung bspw. mit Blechdicken um 1mm und andererseits durch das Bestreben nach Leichtbau. Aus dieser Beobachtung lässt sich auch logischerweise ableiten, dass jene Fertigungsverfahren, die für dünnwandige Bauteile konzipiert sind, große Bedeutung haben. Dazu zählen die Fertigungsverfahren

- Kunststoff-Spritzguss,
- Druckguss (Zn, Al, Mg,…),
- Stanzen und Biegen & Tiefziehen.

Ganz allgemein kann man die Bedeutung der Blechverarbeitung auch mit dem Marktvolumen, bspw. durch Vergleich der Blech- mit der Massivumformung, belegen.

Die Bauteilgeometrie eines Bauteils beeinflusst sehr wesentlich die Auswahl geeigneter Fertigungsverfahren. Je nachdem ob eine linear, ebene oder komplexe 3D-Gestalt vorliegt, sind ganz unterschiedliche Technologien sinnvoll anwendbar.
Bei der Herstellung metallischer Komponenten dominieren wirtschaftlich herstellbare Halbzeugformate wie Platten, Bleche, Stangen, Drähte, Rohre, Profile etc., die dann durch spezielle Umformprozesse zu Endgeometrien weiterverarbeitet werden.
Ganz allgemein sind die Stückzahlen in Verbindung mit der Bauteilgröße verantwortlich für die Fertigungstechnologie, siehe Abb. 114.

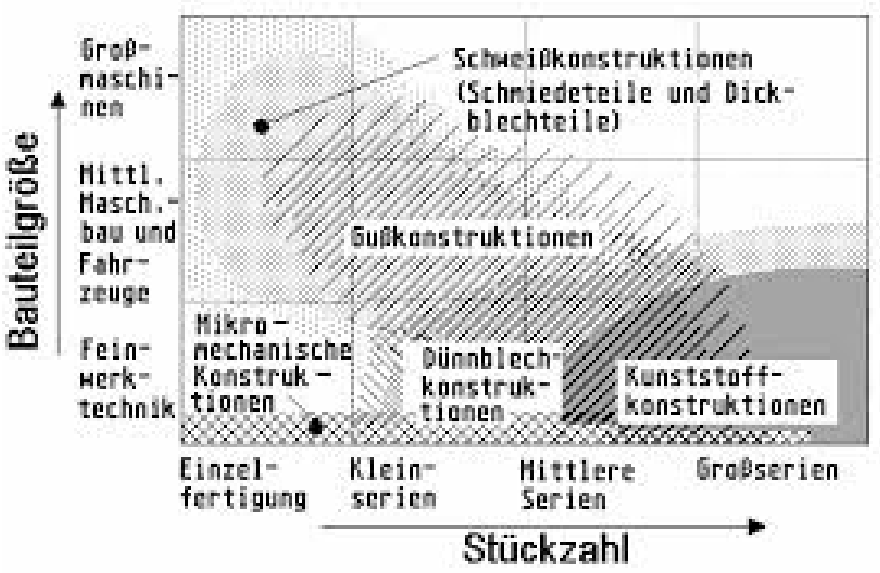


Abb. 114: Einfluss der Stückzahl und der Bauteilgröße auf die Fertigungsart (Quelle: The Design Society.org) [Franke]

6.4.1 Einfluss der Wandstärke

Materialeffizienz bzw. Leichtbau erfordern dünnwandige Bauteile. Dabei stellt sich die Frage mit welchen Fertigungsverfahren dünnwandige Teile prozesssicher hergestellt werden können und welche minimalen Wandstärken erreichbar sind. Aufgrund der Problematik der Instabilität (Beulen) spielt die Möglichkeit von Verstärkungsmaßnahmen eine besondere Rolle. Auch hier soll aufgezeigt werden, welche Fertigungsverfahren diesen Sachverhalt am besten berücksichtigen können.
Abb. 115 gibt einen groben Überblick mit welchen Fertigungsverfahren dünnwandige Komponenten herstellbar sind.

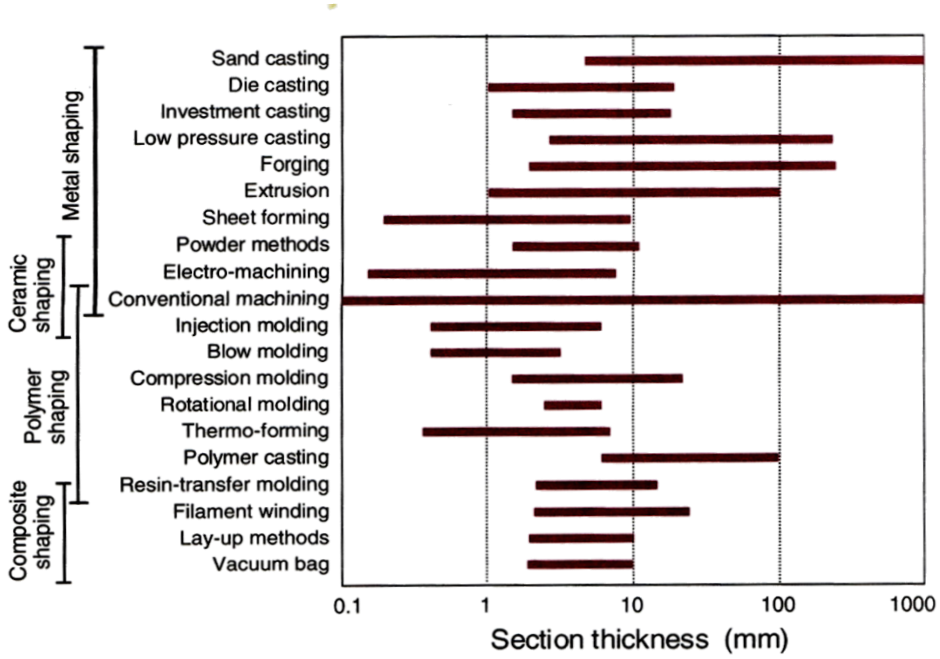


Abb. 115: Typische Wanddickenbereiche für verschiedene Fertigungstechnologien [Ash04]

6.4.1.1 Minimale Wandstärke beim Gießen

Die minimale Wandstärke bei Gießtechnologien hängt in erster Linie vom Fließvermögen der Legierung ab, welches von folgenden Faktoren bestimmt wird:

- Wärmeübergang Schmelze – Form
- Oberflächenrauigkeit der Form
- Oberflächenspannung der Schmelze
- Temperatur der Schmelze
- Füllgeschwindigkeit

Einen Vergleich der minimalen Wandstärken für verschiedene Gießtechnologien zeigt Tabelle 45.

Verfahren	Sandguss	Kokillenguss	Feinguss	Druckguss	Spritzguss
Werkstofftyp	Eisenguss, NE-Metalle	NE-Metalle	NE-Metalle	NE-Metalle	Kunsstoffe
min. Wand-dicke [mm]	s > 3 bis 5	s > 3	s > 1,5	s > 0,5 bis 3,0	s > 0,5

Tabelle 45: Minimale Wandstärke für verschiedene Gießprozesse

6.4.2 Einfluss der Bauteilsymmetrie

Axialsymmetrische Kleinteile sind besonders für das Fließpressen geeignet, wie Abb. 116 für die Herstellung von Aluminiumteilen zeigt.
Als Ausgangsprodukt werden meist Drahtabschnitte verwendet. Ebenso gut geeignet wären Rohre, die durch Aufweiten oder Endenbearbeitung weiterverarbeitet werden.

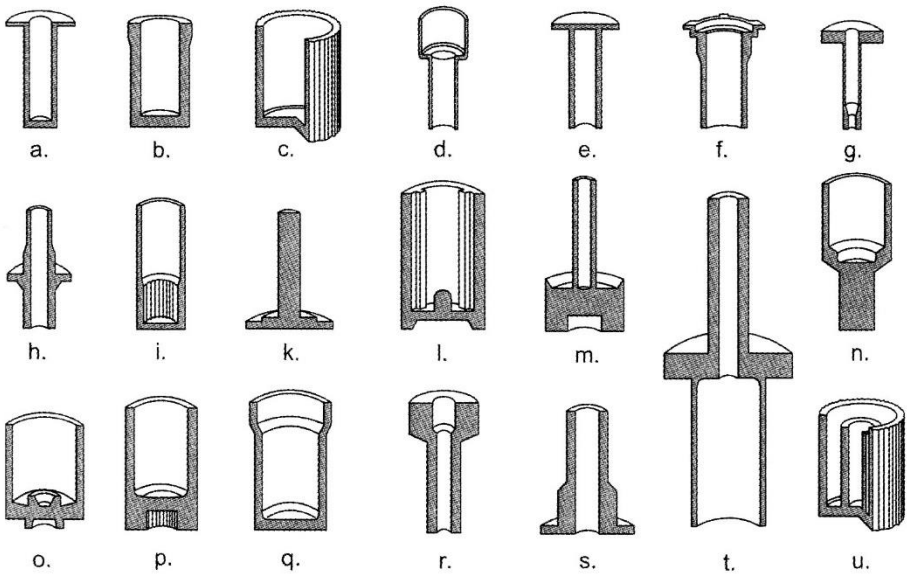


Abb. 116: Formenbeispiele für technische Kaltfließpressteile aus Aluminium und Al-Legierungen
Bildquelle: Anwendungstechnologie Aluminium

Tabelle 46 zeigt weitere Geometriezuordnungen zu verschiedenen Fertigungstechnologien.

Table 3, Shape Generation Capabilities of Processes

	D1	D2	UW	US	AR	RX	CC	E	ND	PC	AF	IF
SOLIDIFICATION PROCESSES												
Sand Casting	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	4	3	1
Investment Casting	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	5	5	2
Die Casting	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N	4	5	3
Injection moulding	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N	5	5	5
Structural foam moulding	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N	4	4	3
Blow moulding [ext]	Y	Y	M	N	Y	Y	M	Y	N	3	4	3
Blow moulding [inj]	Y	Y	M	N	Y	Y	M	N	N	3	4	3
Rotational moulding	Y	Y	M	N	Y	Y	N	M	N	2	2	1
BULK DEFORMATION PROCESSES												
Impact extrusion	Y	N	Y	Y	Y	Y	N	N	Y	3	3	1
Cold heading	Y	N	Y	Y	Y	Y	N	N	Y	3	2	1
Closed die forging	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N	3	3	1
Powder metal parts	Y	N	Y	Y	Y	Y	N	N	Y	3	2	1
Hot extrusion	Y	N	Y	M	Y	Y	N	N	Y	2	1	3
Rotary swaging	N	N	N	N	M	N	N	N	N	1	3	1
MATERIAL REMOVAL PROCESSES												
Machining [from stock]	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	2	3	2
ECM	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N	3	4	1
EDM	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N	3	4	1
PROFILE GENERATING PROCESSES												
Wire EDM	Y	N	Y	Y	Y	Y	N	N	Y	2	2	3
SHEET FORMING PROCESSES												
Sheet metal [stamp/bend]	Y	Y	M	Y	Y	Y	N	N	N	4	3	4
Thermoforming	Y	Y	M	N	Y	Y	N	N	N	1	3	3
Metal spinning	N	N	M	N	M	N	Y	N	N	1	1	1

Process can produce parts with this characteristic: Y

Process cannot produce parts with this characteristic: N

Process must be specially designed for this characteristic: M

Process is capable of producing a part meeting DFA needs [1 is low & five is a high capability]: 1,5

D1: depressions in one direction
UW: uniform wall thickness
US: Uniform cross section
AR: Axis of rotation
RX: Rectangular cross section
CC: Captured cavities
E: Enclosed
ND: Draft free surfaces
PC: Part consolidation
AF: Alignment features

Tabelle 46: Eignung der Fertigungsverfahren für spezielle Formen (Quelle: Queens University, Canada)

6.4.3 Einfluss der Toleranzanforderungen

Ziel jeder Teilefertigung sollte es sein, mit möglichst geringem Fertigungsaufwand eine ausreichende Funktionsqualität zu gewährleisten und damit Kosten zu reduzieren. Toleranzen sollten ohne Mehraufwand, also mit den werkstattüblichen Einrichtungen eingehalten werden [Mue83]. Diesem Prinzip liegen auch die Angaben in der DIN 7168 für Allgemeintoleranzen zugrunde. Die erreichbaren IT-Qualitäten für verschiedene Fertigungsverfahren sind in Abb. 117 und Abb. 118 wiedergegeben.

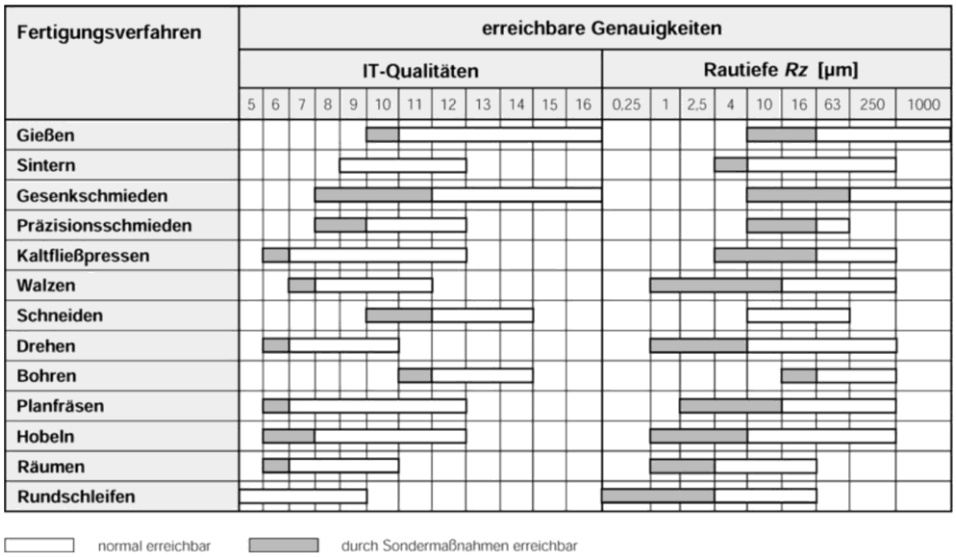


Abb. 117: Erreichbare Genauigkeiten für verschiedene Fertigungsverfahren

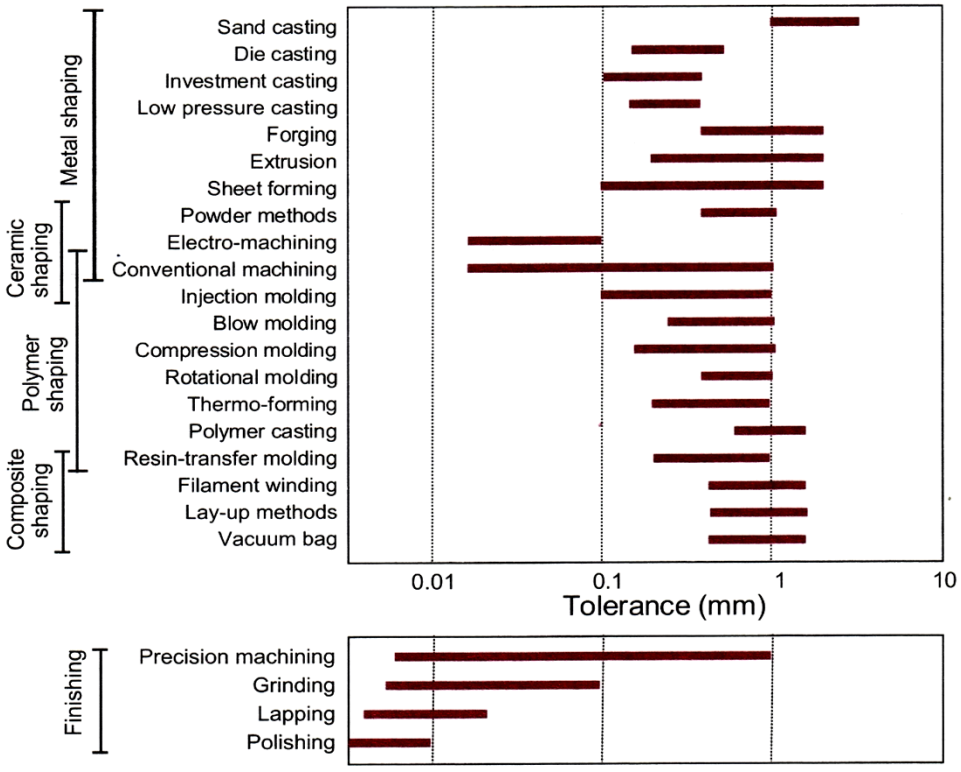


Abb. 118: Vergleich der absoluten Toleranzen für verschiedene Technologien [Ash04]

6.4.4 Einfluss des Bauteilgewichtes auf die Auswahl geeigneter Fertigungsverfahren

Hier werden primär Fertigungstechnologien für den Schwermaschinenbau angesprochen. Dazu zählt der Bau von Lokomotiven, Schiffen, Kränen, Schaufelradbagger, Bergbaumaschinen, Energiemaschinen, Waffen, Walzwerken, Schmiedeeinrichtungen, Großgetriebe, Behälter und anderer Großapparate.
Die Herstellung von Schwermaschinen erfolgt meist in geringen Stückzahlen und erfordert robuste, aber auch flexible Fertigungseinrichtungen. Bevorzugte Fertigungsverfahren für die differentielle Bauweise sind daher der Sandguss, das Freiformschmieden und die schweißtechnische Fertigung. Von den Schweißverfahren kommen aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nur Hochleistungsschweißverfahren (UP-Schweißen, mechanisiertes Mehrdraht-Schutzgasschweißen, Elektro-Schlacke-Schweißen u.a.m.) zum Einsatz.
Aufgrund des hohen Anteils an manueller Fertigung und der damit verbundenen hohen Lohnkosten hat sich die Fertigung von Großmaschinen von Europa in den Osten verlagert.

6.4.5 Mikrofertigung

Eine gesonderte Betrachtung der Mikrofertigung ist deshalb notwendig, weil es einige „Größeneffekte“ gibt, die eine direkte Übertragung (Skalierung) von bekannten Prozessen auf die Mikroebene verhindern [Zha09, Vol08, Vol09]. Im Hinblick auf die Metallumformung nimmt z.B. der Einfluss einzelner Körner im Gefüge auf der Mikroebene zu und verändert das Materialverhalten maßgeblich. Wenn ein Bauteil in der Dickenrichtung nur einige Körner aufweist (ab ca. 50µm), so tritt lokalisierte Gleitung auf, die Fließspannung nimmt zu und das Formänderungsverhalten nimmt ab, wobei die Materialwerte zusätzlich noch stärker streuen. Vollertsen [Vol08] unterscheidet unterschiedliche Arten von Größeneffekten, die er in drei ursächliche Kategorien „Dichte“, „geometrische Gestalt“ und „Mikrostruktur“ unterteilt.
Durch den zunehmenden Trend zur Miniaturisierung in den Bereichen Feinmechanik, Mikrosystemtechnik, Mikrooptik, Mikro-elektro-mechanische Systeme (MEMS), Elektronik (Leiterplatten, Chip-Fertigung, Sensoren, Aktoren), Medizintechnik (minimal-invasiven Chirurgie, Endoskopie) etc. sind neue Fertigungsverfahren auf den Markt gekommen [Gat15, Qin15, Fas17].
In der feinmechanischen Bearbeitungstechnik konnte die Genauigkeit von einigen Mikrometern auf unter 0,1 µm bei gleichzeitiger Beschleunigung vieler Arbeitsgänge durch Robotik gesteigert werden. Das Thema Sauberkeit bei Mikroteilen ist ein Thema für sich.
Zu den wichtigsten Verfahren der Mikrofertigung zählen:

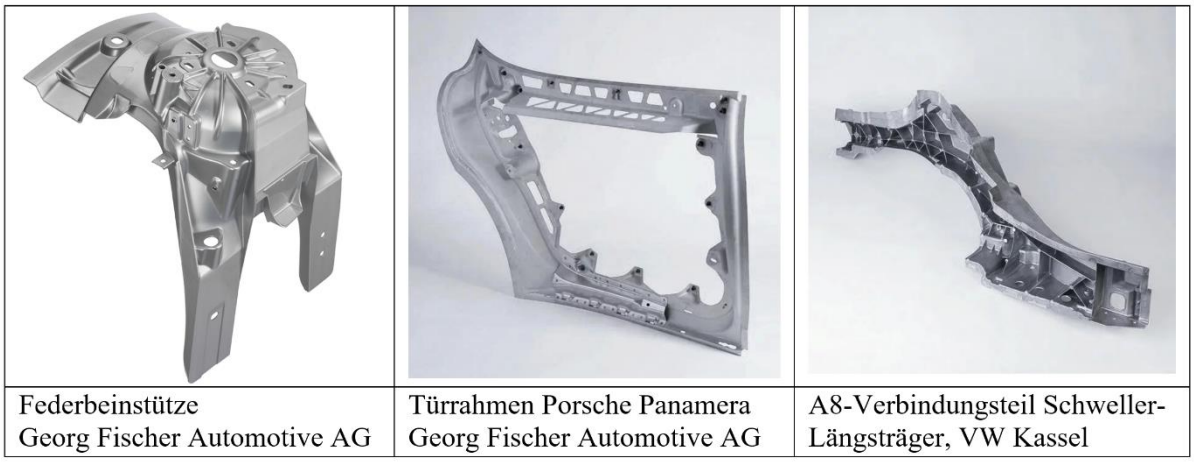
- Galvanische Abscheidung
- Stereolithografie
- Mikrospritzgießen
- Mikro-Funkenerosion (µ-EDM)
- Mikrozerspanung
- Mikroumformung (Stanzbiegen, Tiefziehen)
- Lasermikrostrukturierung

6.5 Materialeffizienz durch fertigungstechnischen Leichtbau

Der fertigungstechnische Leichtbau ist dafür verantwortlich, wie stoffliche und formspezifische Leichtbauprinzipien in ökonomisch sinnvoller Art und Weise zu verbesserten Produkten umgesetzt werden. Dabei zeigt sich, dass insbesondere jene Fertigungstechnologien für Leichtbaukonstruktionen geeignet sind, die dünne Wandstärken, Profilformen oder Hohlraumkonzepte zulassen.
Der fertigungstechnische Leichtbau zeigt seine Stärken in allen Mobilitätsbereichen, weil er gerade für hohe Stückzahlen kostengünstige Lösungen anbietet.

6.5.1 Gießtechnischer Leichtbau

Die Gießtechnologien erlauben die größten Freiheitsgrade in der Formgebung von Produkten [Kni09]. Strukturoptimierte Produkte können durch Sand-, Kokillen oder Druckguss günstig und simulationsgestützt, zuverlässig hergestellt werden. Sandgießen eignet sich eher für Eisengusswerkstoffe, bei Al-Teilen sind, aufgrund der geringen Abkühlraten, die erreichbaren Festigkeitswerte niedriger. Für höhere Ansprüche, insbesondere für Al-Sicherheitsbauteile im Fahrwerk (wie z.B. Radträger) bietet der Kokillenguss mit Dauerformen aus temperaturbeständigen Stählen, aufgrund der feineren Mikrostruktur, eine Verbesserung. Das häufigste Near-Net-Shape-Verfahren ist aber das Druckgießen, das dünnste Wandstärken in engen Toleranzen ermöglicht.
Abb. 119 zeigt einige Beispiele für moderne Druckgussteile für den Automobilbau.



Federbeinstütze Georg Fischer Automotive AG	Türrahmen Porsche Panamera Georg Fischer Automotive AG	A8-Verbindungsteil Schweller-Längsträger, VW Kassel

Abb. 119: Aluminium-Druckguss-Teile für den Automobilbau

Für noch komplexere Teile mit Wandstärken unter einem Millimeter werden Mg-Legierungen mit dem Druckgießverfahren hergestellt. Ein klassisches Beispiel ist der Instrumententräger bei PKWs.

Wenn es aber um filigrane und komplexe Strukturen geht, dann kommt der Feinguss zum Einsatz. Bei diesem Verfahren, das sich durch hohe Detailstärke, Maßgenauigkeit und Oberflächenqualität auszeichnet, werden zunächst sog. verlorene Wachsmodelle durch Spritzgießen hergestellt, die dann als Gusstraube gruppiert, schichtweise mit einer keramischen Schale überzogen werden. Durch Erhitzen der Gießform wird das Wachs entfernt und es entsteht die Kavität für den Metallguss. Nach dem Abguss und der Erstarrung wird die keramische Form mechanisch entfernt.

Alternative Varianten wären pulvermetallurgisch hergestellte Leichtbauprodukte (PM-Sintern) oder das Metallpulverspritzgießen oder Metal Injection Moulding (MIM).

6.5.2 Umformtechnischer Leichtbau

Die wesentliche Aufgabe des umformtechnischen Leichtbaus besteht darin, die konstruktiven Grundsätze des Leichtbaus möglichst effizient mit umformtechnisch Ansätzen und Verfahren umzusetzen, wie dies in Tabelle 47 dargestellt ist.

Grundregeln für leichtbau-gerechtes Design	Umformtechnische Umsetzung
Möglichst direkte Krafteinleitung um komplizierte Spannungszustände zu vermeiden	Innenhochdruckumformung – T-förmige Rohrabzweigungen
Realisieren möglichst hoher Flächenträgheitsmomente	Rohre, Gitterrohrrahmen, Profile, Sandwich-Strukturen (Wellblech, Wabenkern, Schaumstoffkern etc.)
Räumliche Tragwerkskonzepte zur Erhöhung der Biege- und Torsionssteifigkeit	space frame concept
Verrippung und Feingliederung von Strukturen	Gesenkschmieden von Al-Leg. Sicken bei Blechen
Krümmen von Strukturen und Blechfeldern	Wölbstrukturierte Bleche (z.B. Motorhaube-Innenblech)
Lokale Verstärkungskonzepte	Tailored blanks and tubes Geometrieanpassung bei Profilen Patchwork
Möglichst viele Funktionen in einem Lösungsansatz (Integralbauweise)	Komplexe Strangpressprofile bzw. Walzprofile Direkt gebogene Strangpressprofile

Tabelle 47: Konstruktive Leichtbauprinzipen und deren umformtechnische Umsetzung [Buc09]

Mehr als 90% der Leichtbaustrukturen sind dünnwandig, weshalb schon allein deshalb der Blechverarbeitung (Stanzen, Biegen, Tiefziehen) hohe Bedeutung zukommt. Im Automobilbau wird für ein gutes Fahrverhalten eine hohe Biege- und Torsionssteifigkeit gefordert. Im Pilotprojekt ScaLight [Bue08], siehe **Error! Reference source not found.**, wurden dazu kosten- und g ewichtsreduzierende Verfahrenstechniken zur Herstellung von Karosseriekomponenten vorgestellt.

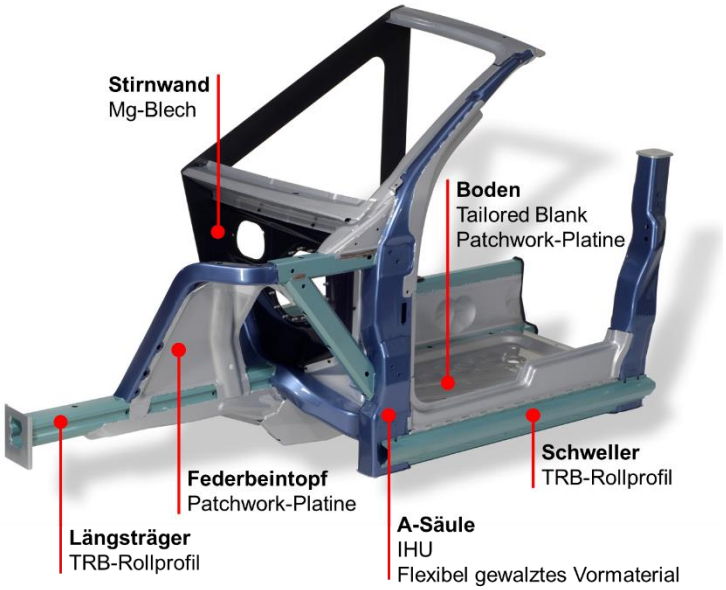


Abb. 120: Konzepte des umformtechnischen Leichtbaus im Automobilbau (ScaLight [Bue08])

Zu den wichtigsten Technologien für den umformtechnischen Leichtbau zählen:

- Tailored Blanks
- Patchwork
- Flexibel gewalzte Bleche (Tailored rolled blanks)
- Formhärten oder Press hardening (direkt oder indirekt)
- Wölbstrukturierte Bleche
- Walzprofilierung (roll forming)
- Innenhochdruckumformung (IHU)
- Stranggepresste Profile
- Rundkneten von Hohlwellen
- Drückwalzen bzw. Flow-Forming von zylindrischen Bauteilen

Eine Ausnahmestellung nehmen Rohre ein. Durch die angepasste Endenbearbeitung und durch Gitterrohrrahmen („space frame concept“) lassen sich hohe Steifigkeiten im Karosseriebau, aber auch bei Motorrädern erreichen. Aufgrund des hohen Widerstandsmomentes sind rohrförmige Teile im Karosseriebau sehr häufig zu finden. Eine Sonderform sind Wellrohre oder corrugated tubes, die sich trotz geringer Wandstärke durch einen hohen Querkraftwiderstand, bei guter Biegsamkeit auszeichnen.

Ergänzend zu den oben genannten umformtechnischen Leichtbaukonzepten existieren noch eine Reihe von lokalen Verstärkungskonzepten, die die Steifigkeit von dünnen Blechkonstruktionen signifikant verbessern können. Abb. 121 gibt einen Überblick über die prinzipiellen Möglichkeiten zur Verstärkung von Bauteilen und damit zur Materialeinsparung.

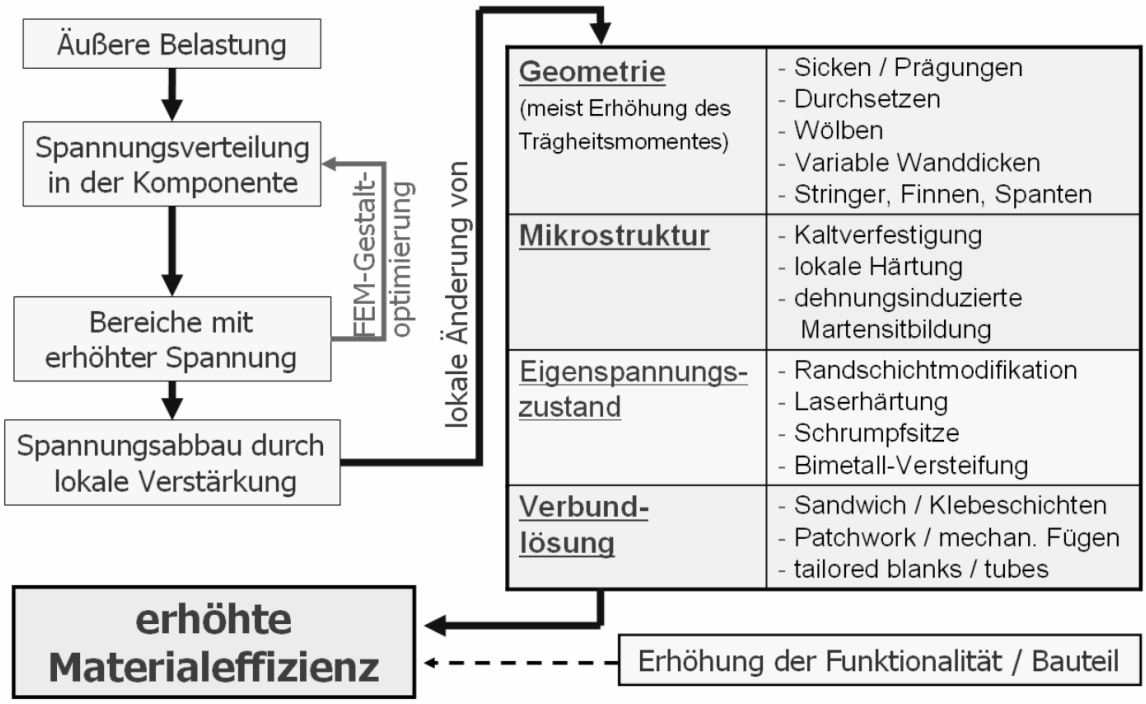


Abb. 121: Prinzipielle Möglichkeiten zur globalen und lokalen Verstärkung von Komponenten [Buc10]

Im Bereich der Massivumformung bilden stranggepresste Al-Profile mit hoher Funktionsintegration, Fließpressen und das Radialschmieden Bauteile mit Leichtbaucharakter herzustellen.

6.5.3 Multi-Material- oder Hybrid-Bauweise

Mit dem im Fahrzeugbau üblichen hohen Stückzahlen macht es sich bezahlt, je nach den örtlichen Anforderungen die dafür bestgeeigneten Werkstoffe zu wählen, was zum Konzept der Mischbauweise geführt hat.
Abb. 122 zeigt die zeitliche Entwicklung der Fahrzeugbauweisen hin zum Muli-Material-Design.
Die Kombination unterschiedlicher Werkstoffgruppen führt aber zu höheren Herausforderungen in der Auswahl und Optimierung der Fügetechnologien. Als Beispiel sei die stoffschlüssige Verbindung von Aluminium- mit Stahlblechen genannt, die mit dem sog. CMT-Verfahren möglich ist, wobei das Aluminium aufgeschmolzen wird, und der Stahl gelötet wird. Den Multi-Material-Mix im neuen Audi A8 zeigt Abb. 123.
Auch das Ein-, An- und Umgießen von Profilen und Einlegeteilen ermöglicht neue Anwendungspotenziale für Gussteile. Mehrfach werden auch Seitenstreben in Hybridbauweise aus Stahlblech und glasfaserverstärktem Polyamid im LKW-Bau hergestellt.
Ein aus ökologischer Sicht ist die eingeschränkte Rezyklierbarkeit von Multi-Materials-Komponenten als bedeutsamer Nachteil zu nennen. Das Auslegungs-Know-How und das Wissen über das Crash-Verhalten sind meist wenig bekannt. Probleme kann es auch bzgl. der Lackierbarkeit geben.

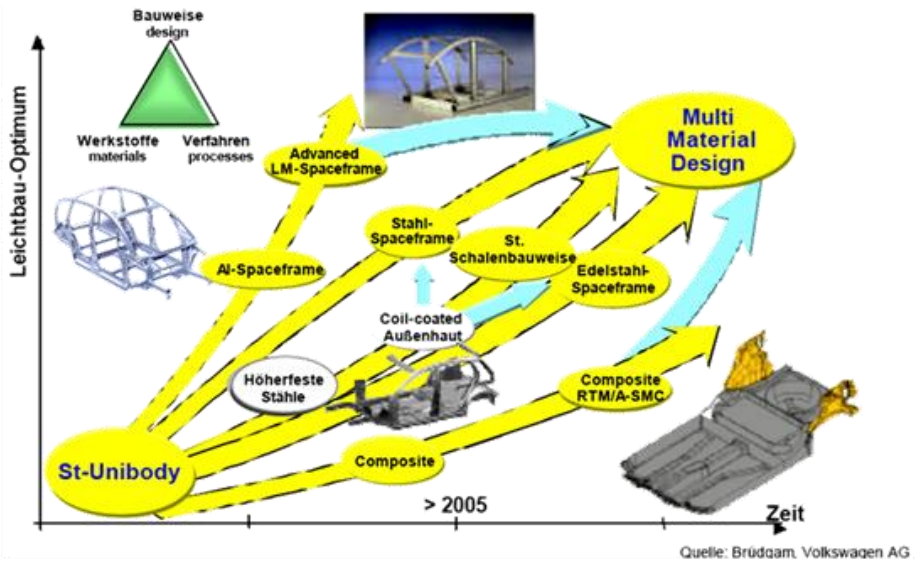


Abb. 122: Entwicklung der Fahrzeugbauweisen (Bildquelle: VW)

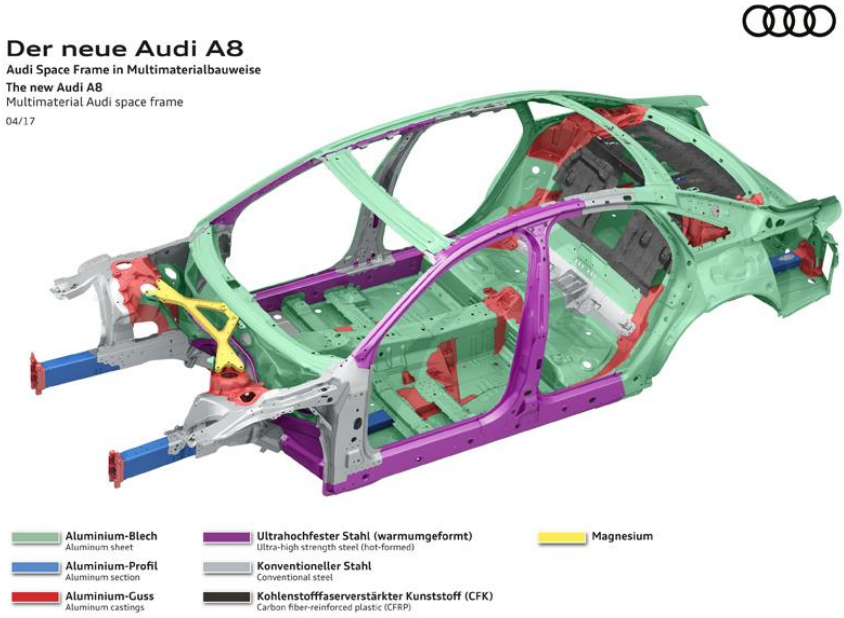


Abb. 123: Audi Space Frame in Multimaterialbauweise (Bildquelle: Audi)

Interessant ist auch das Faktum, dass bei Stahlleichtbau bzw. Mischbauweise das Fahrzeuggewicht bei gleichen oder sogar geringeren Kosten verringert werden kann, siehe Abb. 124. Natürlich sind dazu geeignete Fügetechnologien vorzusehen.

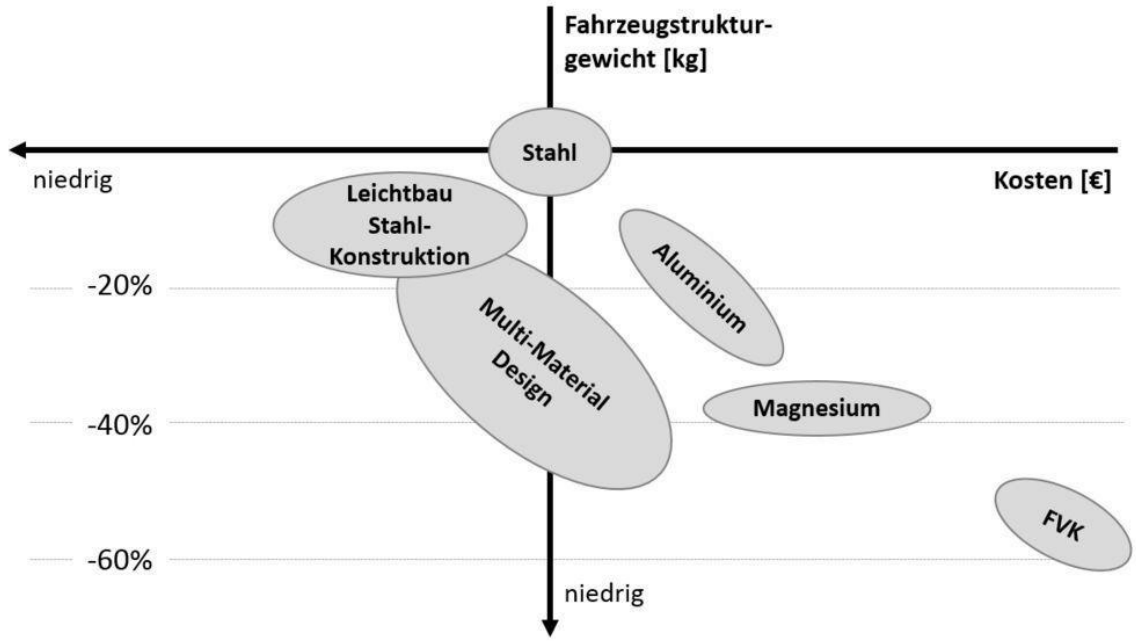


Abb. 124: Leichtbaukonstruktionen und Werkstoffeinsatz aus Sicht der Gewichts- und Kostensituation nach [Goe20]

6.6 Wirtschaftliche Aspekte der Auswahl von Fertigungsverfahren

Die Kosten für den Fertigungsprozess von Produkten setzen sich grob zusammen aus:

- Maschinenkosten
- Werkzeugkosten
- Arbeitskosten
- Energiekosten
- Zustell-/Lieferkosten
- Abschreibungen

Als gute Faustregel gilt, dass die Fertigungskosten indirekt proportional zu den Taktzeiten bzw. direkt proportional zur Produktionsrate in Einheiten/Stunde sind. Abb. 125 zeigt die Produktionsraten für verschiedene Fertigungstechnologien, ermittelt mit dem Softwarepaket Granta CES Selector. Die linke Seite des Bildes zeigt jene Verfahren mit der höchsten Produktivität. Dazu zählen die Verfahren Fließpressen, Tiefziehen, Stanzen, Spritzgießen, elektromagnetisches Umformen, Druckgießen u.a.m. Die Farben beziehen sich auf die Werkstoffhauptgruppen.

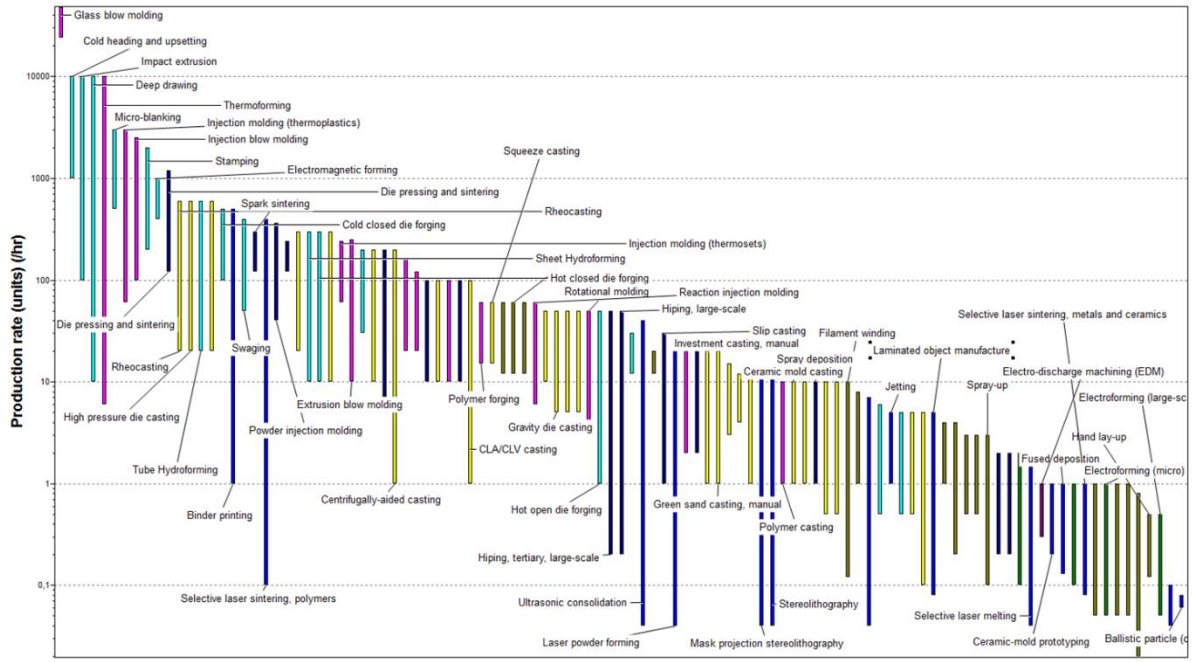


Abb. 125: Produktionsraten für verschiedene Fertigungsverfahren. (Quelle: CES EduPack, Granta Design)

6.6.1 Grobe Kostenübersicht für verschiedene Fertigungstechnologien

Eine grobe Übersicht der Kosten pro Kilogramm für verschiedene Fertigungstechnologien zeigt Abb. 126. Auch hier zählen das Stanzen, Pressen und Sintern, Thermo-Forming und Druckgießen zu den günstigsten Verfahren. Die Relativkosten zeigen eine Spreizung über drei Größenordnungen. Die höchsten Kosten findet man bei High-Tech-Technologien, wie Laserbasierten Methoden, Abscheideverfahren (PVD, CVD), EDM, Feinguss und 3D-Druck.
Einen deutlichen Einfluss auf die Fertigungskosten hat die Eignung für Serienfertigung, wie Abb. 127 zeigt.

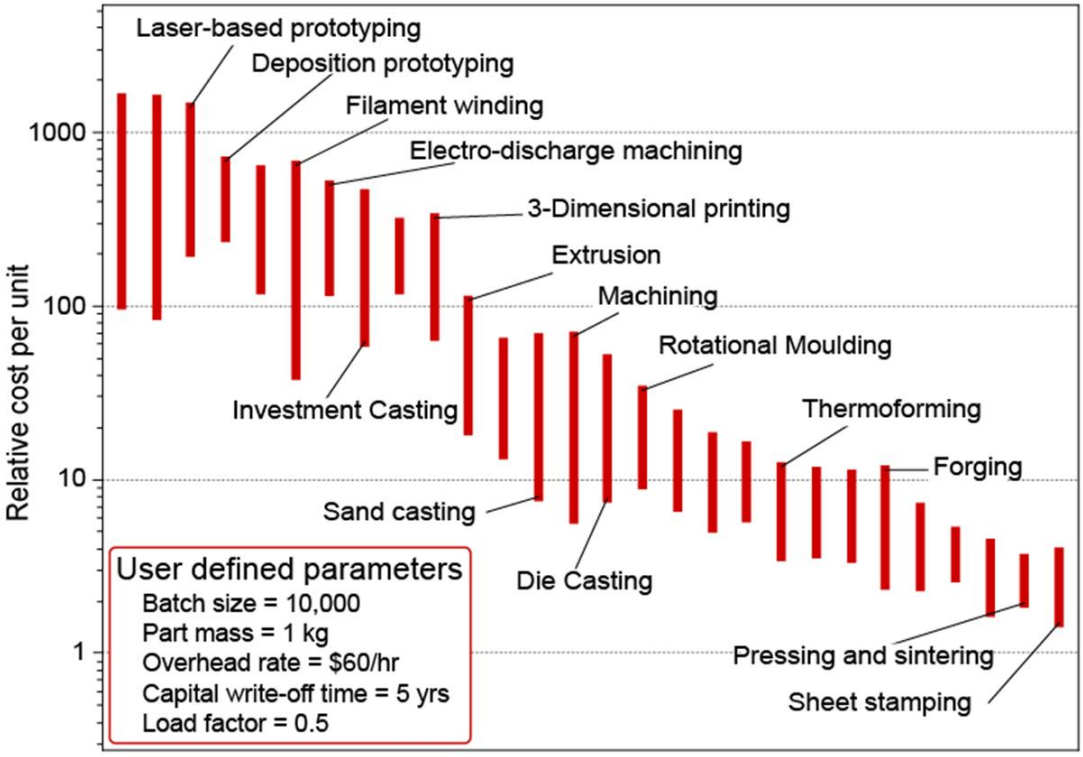


Abb. 126: Relativstückkosten für verschiedene Fertigungstechnologien nach Ashby

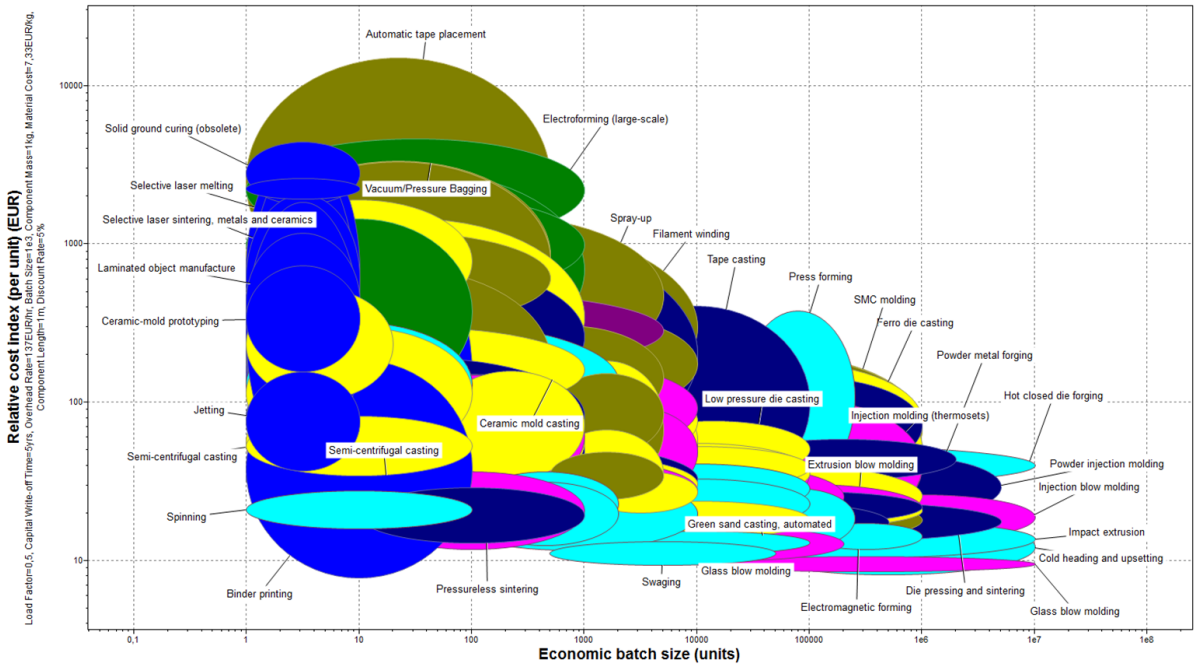


Abb. 127: Relativkosten über wirtschaftlicher Losgröße für verschiedene Fertigungsverfahren (Bildquelle: Software CES EduPack von Granta Design, UK)

Gelegentlich findet man direkte Kostenvergleiche am Beispiel eines konkreten Anwendungsfalls. Abb. 128 zeigt einen Vergleich verschiedener Technologien bzgl. Materialverlust und Energieverbrauch. Daraus erkennt man auch die besondere Bedeutung der Pulvermetallurgie und der PIM-Technologie für die Metallverarbeitung. Powder Injection Moulding (PIM) ist auch nach Abb. 127 (rechte Seite) bzgl. Losgrößen und Kosten eine interessante Variante.

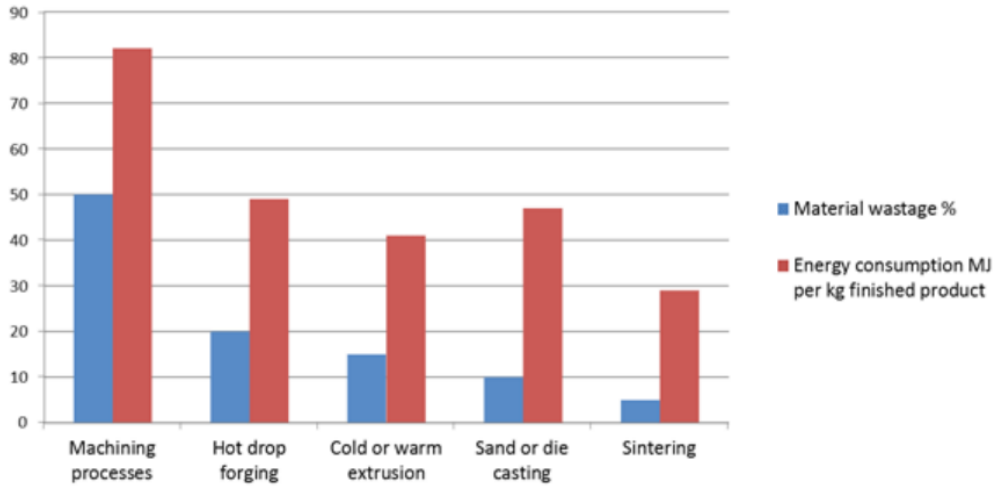


Abb. 128: : Energieaufwand und Materialabfall bei verschiedenen Fertigungsverfahren (Bildquelle: EPMA, CH)

6.6.2 Einfluss der Stückzahlen auf die Herstellkosten

Die Kostensenkung wird erreicht durch:

- Aufteilung einmalige Kosten
- Trainiereffekte
- Leistungsfähigere Fertigungsverfahren
- Rüstzeitdegression
- Mengenrabatt
- Rationalisierungsmaßnahmen
- Optimierte Konstruktionen

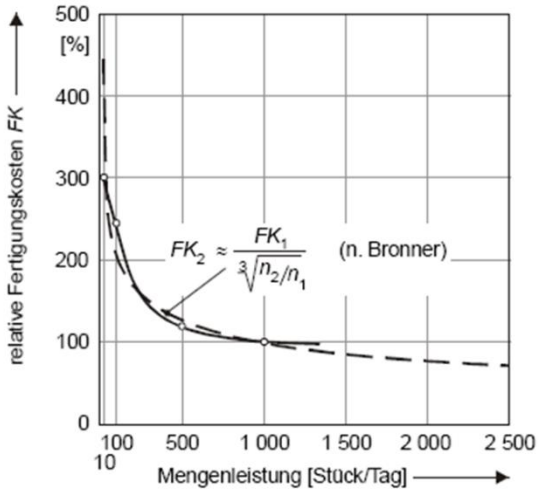


Abb. 129: Senkung der Fertigungskosten mit steigender Stückzahl

Für die Kunststoffverarbeitung gilt analoges im Hinblick auf den Einfluss der Stückzahl. Abb. 130 zeigt die Kosten in Abhängigkeit der Stückzahl und die typischen Bereiche der unterschiedlichen Technologien.

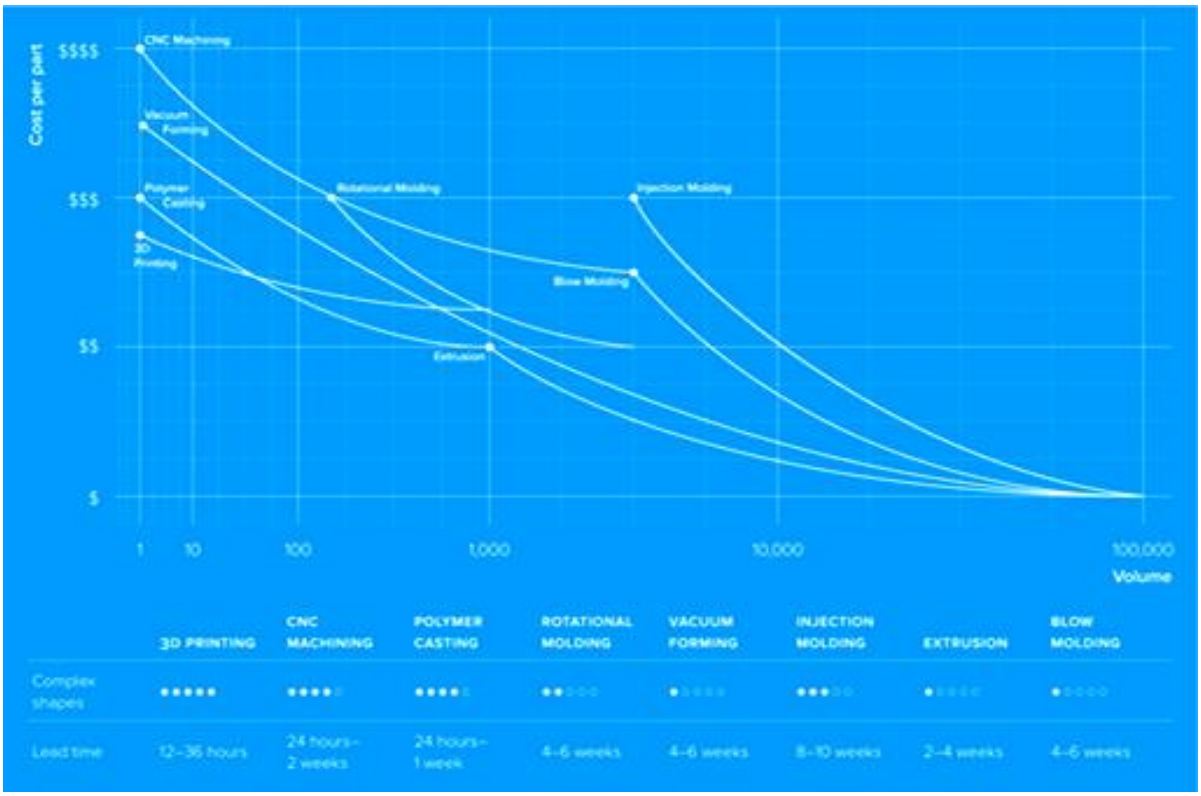


Abb. 130: Kostenvergleich für verschiedene Kunststoff-Verarbeitungsprozesse (Bildquelle: Formlabs.com)

6.6.3 Größeneinfluss auf die Herstellkosten

Für eine rasche Abschätzung der Fertigungskosten kann insbesondere bei großen Konstruktionen über das Bauteilgewicht die Gesamtkosten abgeschätzt werden, siehe Abb. 131. Die Abschätzung ist direkt über die CAD-Daten möglich und dient in vielen Fällen als Richtwert für eine Angebotslegung.

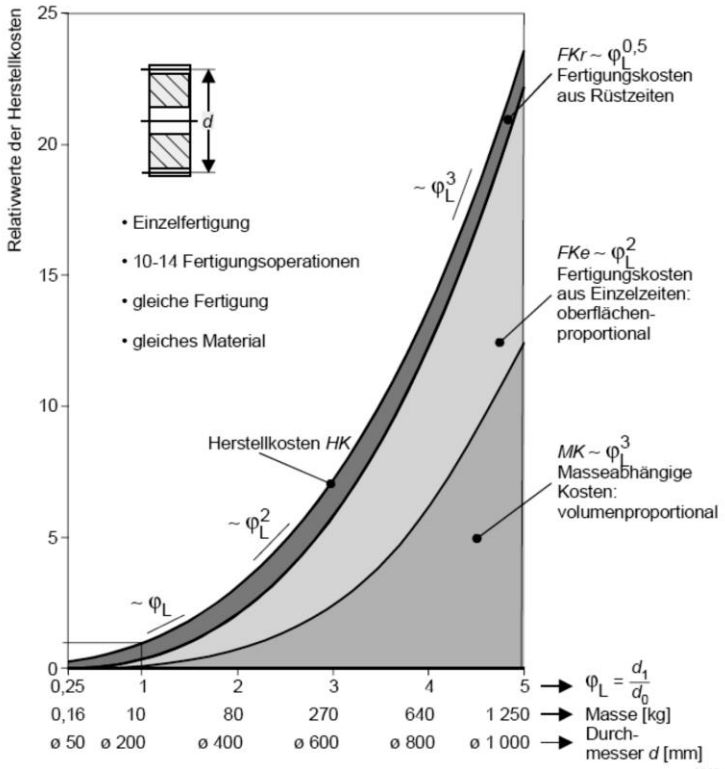


Abb. 131: Abschätzung der Herstellkosten als Funktion der Masse

6.7 Ökologische Einflüsse auf die Fertigung

Ziel einer nachhaltigen Produktion muss es sein, die negativen Auswirkungen von Produkten und Prozessen auf die natürlichen Ressourcen zu minimieren. Natürlich kann ein nachhaltiger Mehrwert nur dann sinnvoll erreicht werden, wenn neben der Ökologie auch die Ökonomie und Soziales (bekannt als Drei-Säulen-Modell bzw. Nachhaltigkeitsdreieck) über den gesamten Produktlebenszyklus betrachtet werden. Dabei geht es einerseits um den Verbrauch von Ressourcen und andererseits um die CO_2-Emissionen.

Zur Emission von Treibhausgasen trägt die produzierende Industrie etwa einen Anteil von 20% in der EU-28 bei [Saa19], siehe Abb. 132. Es muss daher ein gesellschaftlich verpflichtendes Ziel für Unternehmer sein, durch geeignete Maßnahmen und auch durch die Verwendung nachhaltiger Fertigungssysteme zur Reduktion der Emissionen beizutragen. Ein wichtiges Werkzeug dazu stellt das Stoffstrommanagement dar.

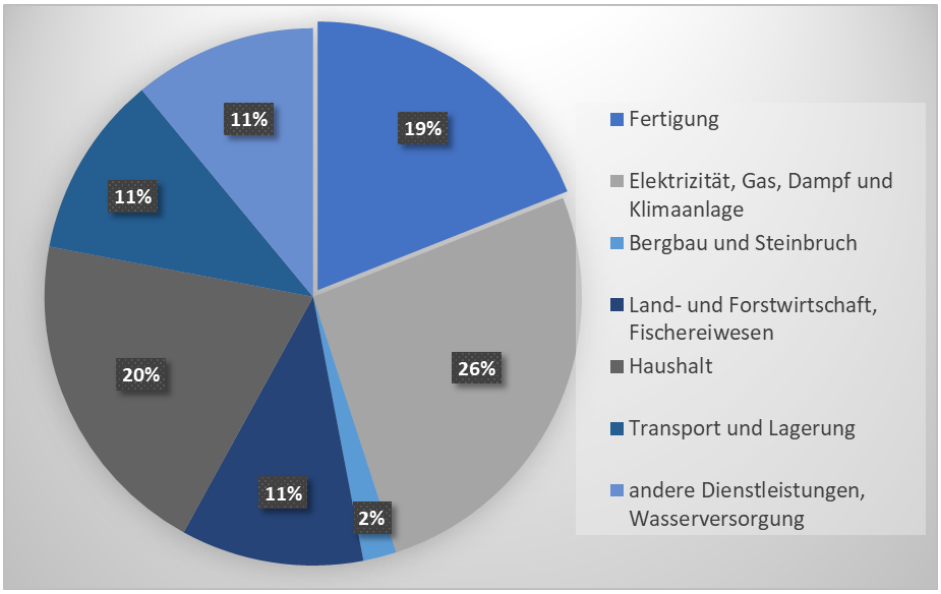


Abb. 132: Emission von Treibhausgasen in der EU-28 im Jahr 2013, nach [Saa19]

Im Bereich der Fertigung können vielfach umweltrelevante Aktivitäten gesetzt werden, wie bspw.:

- Senkung des Energieverbrauchs (LED-Beleuchtung, Nutzung von Abwärme, bspw. durch Einspeisung in ein Fernwärmenetz, min. Reibungsverluste, elektrische Antriebe, Druckluft, etc.)
- Standby-Moden optimieren (Einsparungen von einigen Prozent möglich)
- Wasserverbrauch ermitteln und reduzieren
- Reduktion von Kühlschmiermittel durch Trockenbearbeitung oder Minimalmengenkühlung
- Transportwege verkürzen (Emissionen senken)
- Abfalltrennung, Verwendung nachwachsender Rohstoffe oder von Rezyklaten und
- Recycling (bspw. von verschlissenen Schneidstoffen, Öl, Verpackungsmaterial, Demontagekonzepte, etc.)

Die großen Themen, die bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden müssen, betreffen die Energieeffizienz, die CO_2-Bilanz und die Rezyklierbarkeit bzw. die Recycling-Quote, beeinflussen aber auch die Auswahl von Fertigungsverfahren mit besonderer Rücksichtnahme auf die Ökologie. Einige Ziele des ECO-Designs [Abe08] wurden bereits im Kapitel 4.6 behandelt.

6.7.1 Energieeffizienz

Nach den Angaben des dt. Statistischen Bundesamtes wird ca. ein Viertel des Primärenergieverbrauchs im privaten Haushalt und drei Viertel in allen Produktionsbereichen benötigt. Im Bereich der Produktion hat das verarbeitende Gewerbe, also die Warenherstellung, den größten Anteil mit ca. 40%. Die Anteile der Sektoren am Primärenergieverbrauch des verarbeitenden Gewerbes im Jahre 2015 sind in Abb. 133 dargestellt.

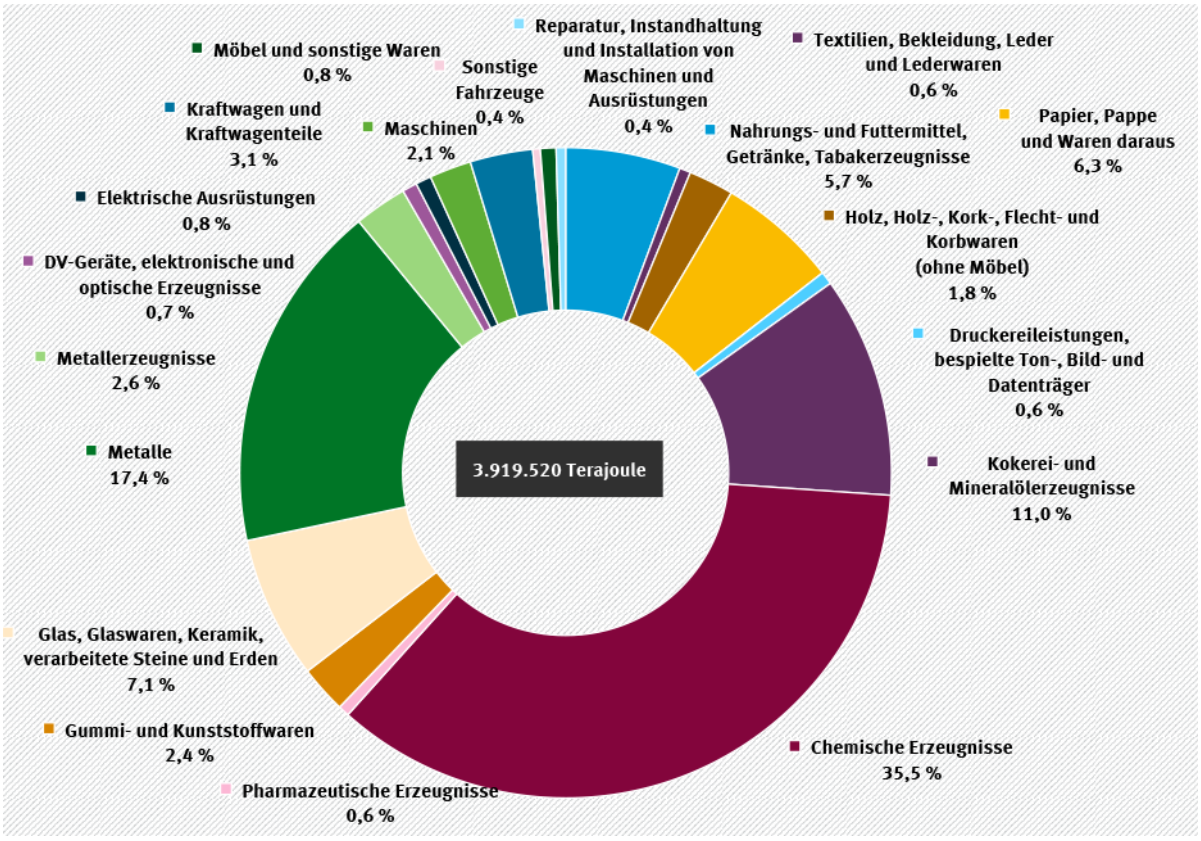


Abb. 133: Anteile der Sektoren am Primärenergieverbrauch des verarbeitenden Gewerbes im Jahr 2015 in Deutschland. Datenquelle: Statistisches Bundesamt 2017, Umweltnutzung und Wirtschaft, Umweltökonomische Gesamtrechnungen)

In der Metallindustrie zählen Schmelzaggregate (z.B. Elektrolichtbogenofen), Gießöfen bzw. sekundärmetallurgische Pfannen, Walzgerüste, Dreh- und Fräsmaschinen, Wärmebehandlungsöfen und Schweißanlagen zu den energieintensiven Verfahren. Am Beispiel des Stahlwerks Lech wird in [Lsw19] der Umgang mit Ressourcen, inklusive Recycling, gegeben. Für den Bereich der Al-Druckguss-Produktion gibt es umfangreiche Informationen, siehe Kapitel 6.7.4, aus dem Buch [Her13]. In [Bed13] wird eine Roadmap für energieeffiziente Fertigungsbetriebe dargestellt. Weitere gute Informationsquellen sind [All12, Bru18, Hes12, You97, Neu14].
Sehr intensive Energienutzung findet man auch bei Zementwerken, die hinsichtlich der Brennstoffe jedoch oft eigene Wege gehen.

Als erster Schritt zur effizienten Energienutzung soll zunächst der Ist-Zustand analysiert werden, d.h. die betrieblichen Energieströme müssen erfasst und die hauptsächlichen Verbraucher identifiziert werden. Vielfach kann durch Wärmedämmung, Abwärmenutzung, Änderung der Erwärmungsart, energetische Prozessoptimierung u.a.m. Energie eingespart werden.

Die energetischen Zusammenhänge in produzierenden Unternehmen können in Anlehnung an Delhi [Del98] allgemein in Energiebezug, -umwandlung und -verteilung, -anwendung, -rückgewinnung und -verlust eingeteilt werden, siehe Abb. 134 aus [Haa13].

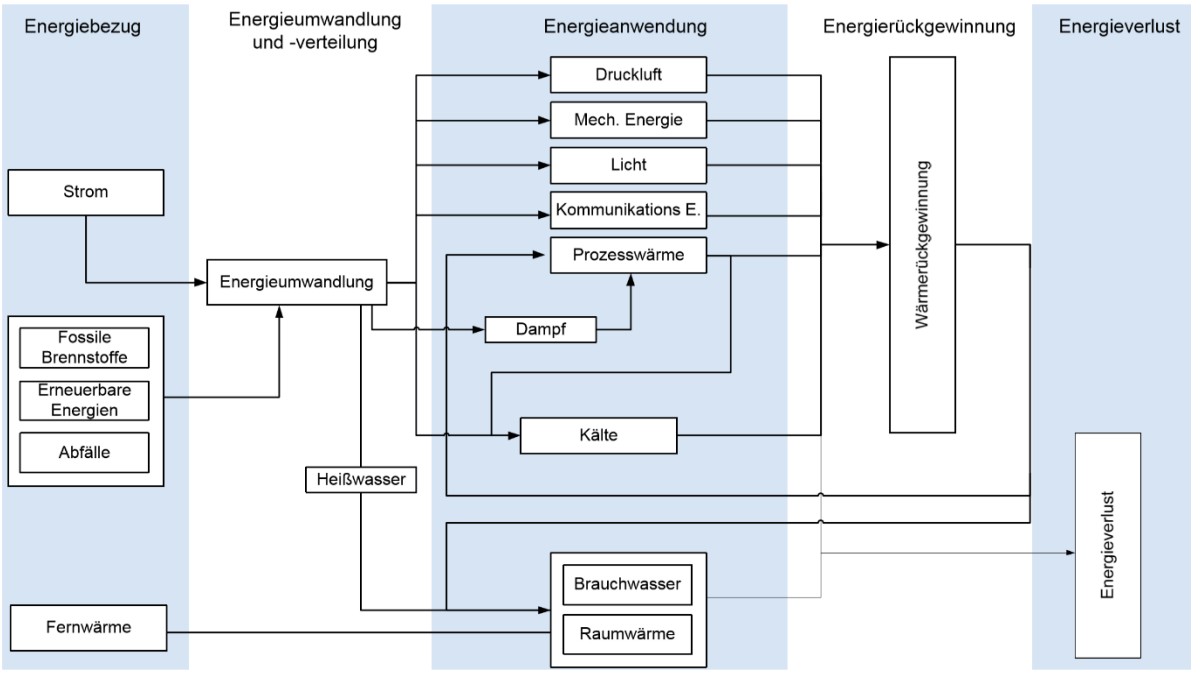


Abb. 134: Energetische Zusammenhänge im Unternehmen nach Delhi aus [Haa13]

Durchschnittlich beträgt der Anteil des Energieverbrauch in der Industrie ca. 2 bis 10 Prozent des Jahresumsatzes. Dazu gibt es auch Abschätzungen zum Energieeinsparpotenzial von bis zu 30% [Ene20]. Einige allgemeine Energiespartipps sind:

- Abwärme-/Prozesswärmenutzung
- Blockheizkraftwerk nutzen
- Wartung von Pumpen, Ventilatoren, Heizungen etc.
- Optimierung elektrischer Antriebe
- Solarthermie und Photovoltaik einsetzen
- Überprüfung der Druckluftanlagen
- Senkung des Energiebedarfs durch Senkung des Materialeinsatzes
- Energiebeauftragte bzw. -berater einsetzen
- Einsatz eines Energiemanagementsystems

Ein umfassender Leitfaden für Energiemanagementsysteme in der Praxis nach ISO 50001 wurde vom Umwelt-Bundesamt im Jahre 2019 herausgegeben [Umw19]. Die Hauptargumente sind: Kosteneinsparungen, erhöhte Produktivität, Verbesserung von Investitionsplanung, Verbesserung von Betriebsabläufen und Erhöhung der Effizienz von Prozessen.
Hinsichtlich der Auswahl von Fertigungsprozessen ist eine Reihung der Fertigungsprozesse nach Energiebedarf [MJ/kg] als Übersicht zielführend [Ash14, Ash20]. Dazu kommen aber noch die Energieaufwände für die Rohstoffherstellung, für den Transport, bei der Anwendung und beim Rezyklieren. Im CES-System gibt es eine gute SW-Unterstützung in Form von Eco-Audit-Files.

6.7.2 CO_2-Fußabdruck (carbon footprint)

Der CO_2-Fußabdruck beschreibt die Menge an CO_2-Emissionen, die während des gesamten Produktlebenszyklus anfallen. Grundlage für die Bestimmung des CO_2-Fußabdrucks ist die internationale Ökobilanzierungsnorm ISO 14040.
Trotz zahlreicher Bemühungen um den Klimaschutz konnte aber leider bislang noch keine Einigung über wirkungsvolle Maßnahmen getroffen werden. Betrachtet man die weltweiten Pro-Kopf-Emissionswerte, so sieht man den größten Bedarf für Verbesserungsmaßnahmen bspw. in den USA, China, Indien, gerade jene Länder, die die Klimaprogramme sabotieren. Eine Übersicht über die weltweite CO2-Emission gibt Abb. 135.
Freilich sind die CO2-Emissionen eines Landes nur ein Indikator bei den Treibhausgasen. Zudem sind noch weitere Gase wie Methan, Fluorkohlenwasserstoffe und Distickstoffoxid von Bedeutung. Im englischen Sprachgebrauch spricht man von greenhouse gases (GHGs).

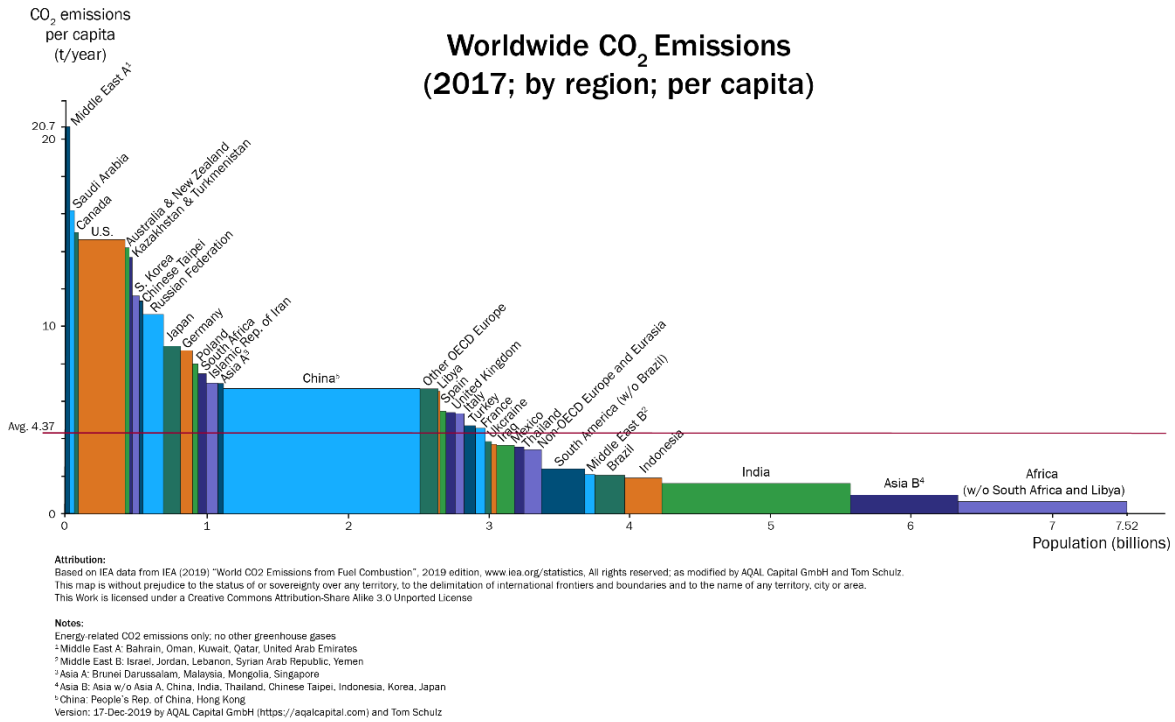


Abb. 135: Liste der Länder nach CO2-Emission pro Kopf im Jahr 2017. Bildquelle: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_carbon_dioxide_emissions

Hauptemittenten für die Treibhausgase in der Industrie finden sich in der Stahl- und Eisenerzeugung (7,2 %, Nichteisenmetalle ca. 0,7%), sowie in der Zementindustrie (3%). Eine Gesamtschau über die Quellen der Treibhausgase in unterschiedlichen Sektoren wurde vom World Resources Institute (WIR) erhoben, siehe Abb. 136.

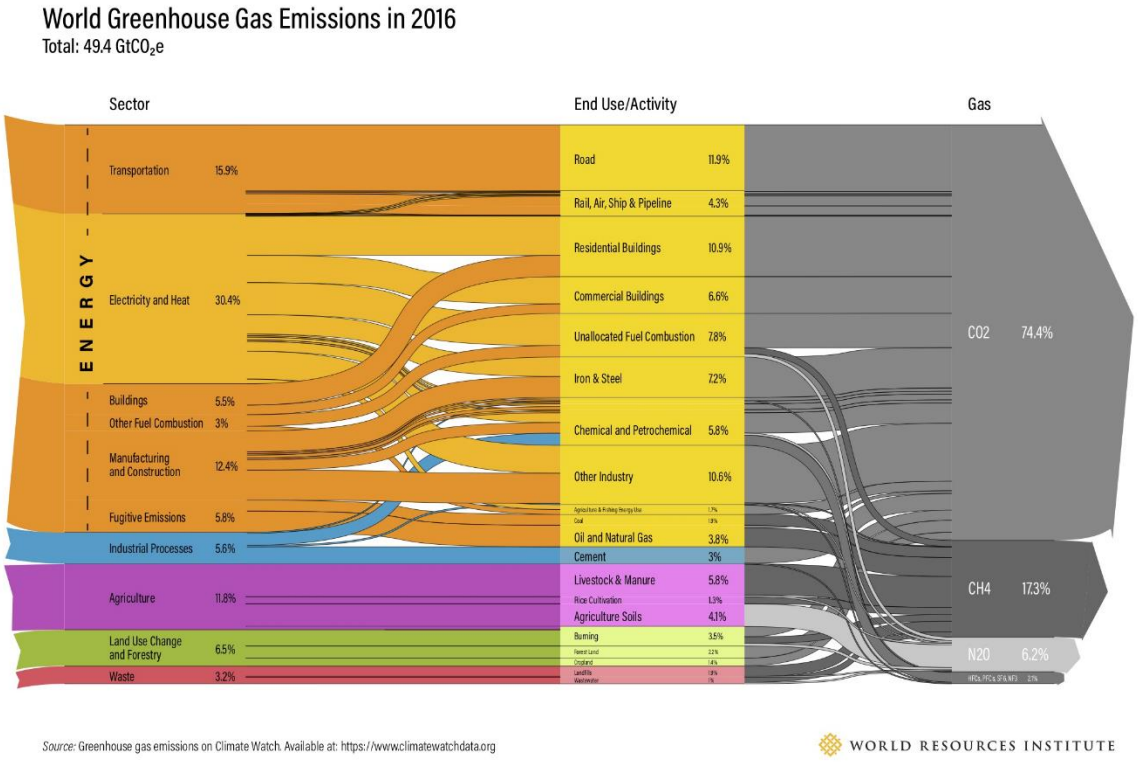


Abb. 136: Weltweite Emission von Treibhausgasen nach Sektoren. Bildquelle: https://www.wri.org/resources/data-visualizations/world-greenhouse-gas-emissions-2016

6.7.3 Abfall- und Kreislaufwirtschaft

Nachdem jedes Produkt einmal als Abfall endet – dies ist nur eine Frage der Zeit, müssen auch in der Produktion die grundlegenden Prinzipien zur Minimierung der negativen Umwelteinflüsse verfolgt werden. Strategisch gibt es dazu die 3R-Abfallstrategie (reduce, reuse, recycle), mit der nach abnehmender Priorität gereihten Maßnahmenfolge [Sko18]:

- Vermeidung
- Minimierung
- Wiederverwendung
- Rezyklierung
- Thermisches Rezyklieren
- Deponie

Produkte und deren Herstellprozesse sollen so geplant werden, dass möglichst keine oder nur wenige Abfälle anfallen, d.h. am Ende der Nutzungsdauer sollte ein nahezu vollständiges Rezyklieren möglich sein. Dieser ewige Kreislauf wird auch als Cradle-to-Cradle bezeichnet, im Gegensatz zum Cradle-to-Grave.

Durch das Rezyklieren wird der Verbrauch an Rohstoffen reduziert und rezyklierte Materialen sind meist kostengünstiger als Primärwerkstoffe. Die Recycling-Quote ist je nach Werkstoffklasse unterschiedlich (Stahl und Gusseisen sind 100% rezyklierbar, bei Aluminium wird ein Wert von ca. 70% erreicht). Keramiken werden meist über den pulvermetallurgischen Weg rezykliert. Kunststoffabfälle werden in der EU zu etwa 30% recycliert, 39% werden verbrannt und 31% deponiert [EUP18]. Die Menge an Verpackungsabfällen aus Kunststoff nimmt ständig zu (die Kunststoffherstellung betrug 1950 ca. 1,5 Mio Tonnen und 2015 ca. 320 Mio Tonnen!) und hat im Jahre 2016 ca. 30 kg pro Person

erreicht. Eine Prozesskette zum stofflichen Recycling von Kunststoffabfällen wird in [Leh16] postuliert.
Prinzipiell ist anzuraten, bereits beim Einsammeln der Altstoffe bereits sehr früh und sortenrein zu trennen und die Produktionsabfälle als Kreislaufschrott wiedereinzusetzen. Bei Blechen oder bei Strangpressprofilen werden die sortenreinen Abfälle eingeschmolzen, ohne dass eine Abwertung der mechanisch-technologischen Eigenschaften notwendig ist, siehe auch VDI-Richtlinie 2243 [VDI02].
Im Falle der Rezyklierung von Al-Spänen gibt es seit kurzer Zeit neben der Möglichkeit der sortenreinen Einschmelzung auch die Möglichkeit einer Kompaktierung im festen Zustand (solid state recycling). Nach einem gründlichen Reinigungsprozess zur Entfernung von Kühlschmiermittel gibt es die Verfahren

- Konsolidierung durch Kaltfließpressen
- Hochgradige plastische Verformung durch „severe plastic deformation“
- Sintern unter Stromfluss (Pulsed Electric Current Sintern oder Spark Plasma Sintern)

Ein Vergleich dieser Verfahren und eine Analyse der Wiederverwendbarkeit wird in [Cis20] beschrieben.
Wesentlich schwieriger und teurer wird die Trennung der Abfälle bei unsortierter Sammlung. Dazu sind aufwendige Prozessschritte zum Trennen (Magnetabscheider, Dichteseparation und andere spezifische Sensoren) notwendig. Meist ist dann auch eine Abwertung der Produkteigenschaften in Kauf zu nehmen.
Abb. 137 zeigt die rasche Zunahme des Elektronik-Schrotts in unterschiedlichen Ländern. Abhilfen und Recycling-Methoden sind hier unbedingt notwendig.

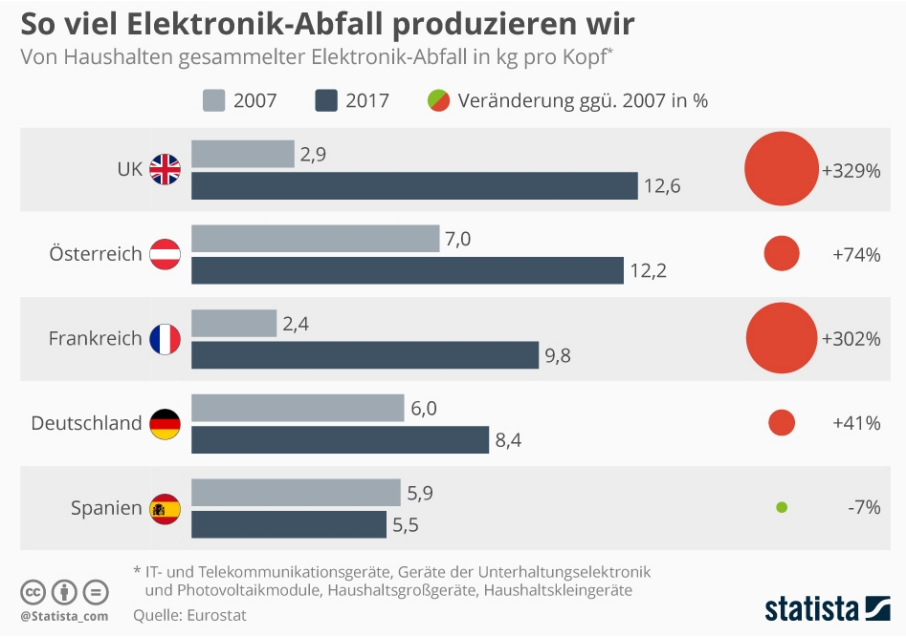


Abb. 137: Von Haushalten gesammelter Elektronik-Abfall in kg/Kopf. Bildquelle: statistica

Meist ist eine Wiederaufarbeitung von Produkten mit unterschiedlichen Werkstoffen sehr kostenintensiv, weshalb sie zurzeit nicht im gesellschaftlich gewünschten Maße durchgeführt wird. Auch die integrale Bauweise von Produkten verhindert meist ein ökonomisch gerechtfertigtes Rezyklieren. Aus diesen Gründen müssen zukünftig die Abfallwirtschaftsgesetze verschärft werden, um eine über Generationen reichende Nachhaltigkeit zu garantieren. Ein Positionspapier zu den Strategien der österreichischen Recycling- und Abfallwirtschaft findet sich in [ÖWAV18]. Zu den Ländern mit den höchsten Recyclingraten in Europa zählen Deutschland, Österreich, Schweiz und Belgien.

Pfandsysteme oder die EU-Plastikabfallabgabe sind geeignete Maßnahmen die Recyclingraten zu erhöhen. Mit der geplanten Abgabe von 800 Euro pro Tonne Kunststoffabfall ergibt sich ein Gesamtbetrag von etwa 5,7 Mrd. Euro für Europa. Damit sollten größere Sprünge im Umweltschutzbereich und in der Entwicklung neuer Technologien möglich sein.

6.7.4 Praxisbeispiel für erfolgreiche Umsetzung einer nachhaltigen Produktion

Als sehr gelungenes Beispiel zur Gestaltung ressourceneffizienter Prozessketten in einem sehr wichtigen Verfahrensbereich, jener der mittelständische Aluminiumdruckgießereien, wird in [Her13] sehr detailliert dargestellt. Diese Umsetzung kann für viele andere Bereiche als Muster gelten.
Zunächst werden in Abb. 138 die aktuellen Energieflüsse beim Al-Druckgießen nach [Röd06] betrachtet. Der Hauptteil eines größeren Gemeinschaftsprojektes lag aber in der durchgehenden energetischen Analyse der gesamten Prozesskette beim Al-Druckgießen, siehe Abb. 139.
Insgesamt konnte mit der durchgehenden Analyse der gesamten Prozesskette ca. 28% der eingesetzten Energie eingespart werden.

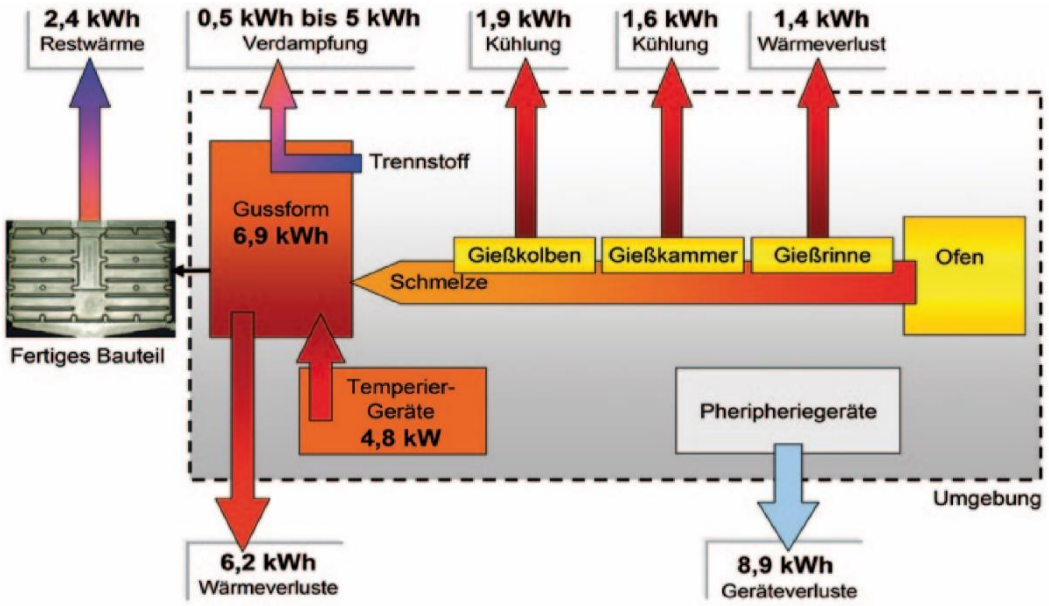


Abb. 138: Energieflüsse beim Al-Druckgießen nach [Röd06]

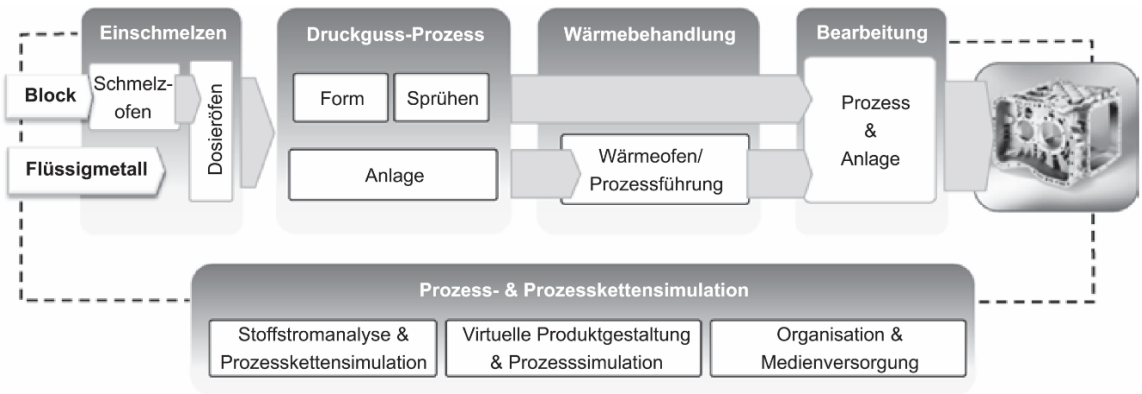


Abb. 139: Prozesskette des Aluminiumdruckgusses inkl. der durchgeführten Prozesssimulationen [Her13]

6.7.5 Kreislaufwirtschaft und Life-Cycle-Management

Die aktuell vorliegenden Probleme im Umweltbereich (Verschmutzung), der Wertverlust durch Deponie, die Abhängigkeit von volatilen Rohstoffmärkten, die geringe Schonung der natürlichen Ressourcen und die geringe Menge an Rezyklaten zeigen, dass die Kreislaufwirtschaft noch nicht ausreichend stattfindet. Durch Life-Cycle-Analysis (LCA), siehe Kap.7.7, und dem übergeordneten Life-Cycle-Management soll die Bedeutung einer Kreislaufwirtschaft unterstützt und gefördert werden.
Dabei müssen die drei Säulen Technikentwicklung, Ökonomie und Ökologie gleichrangig zusammengeführt werden. Voraussetzung dafür ist ein integrierter Ansatz, der die Kreislauffähigkeit eines Produktes bereits in der Design-Phase (durch ECO-Design, s. Kap.4.6) berücksichtigt, den Nutzungsprozess verlängert und in der Nachnutzungsphase für eine Wiederverwendung geeignet ist. Abb. 140 zeigt das Konzept der Kreislaufwirtschaft der Europäischen Umweltagentur [EEA16, Wil17].

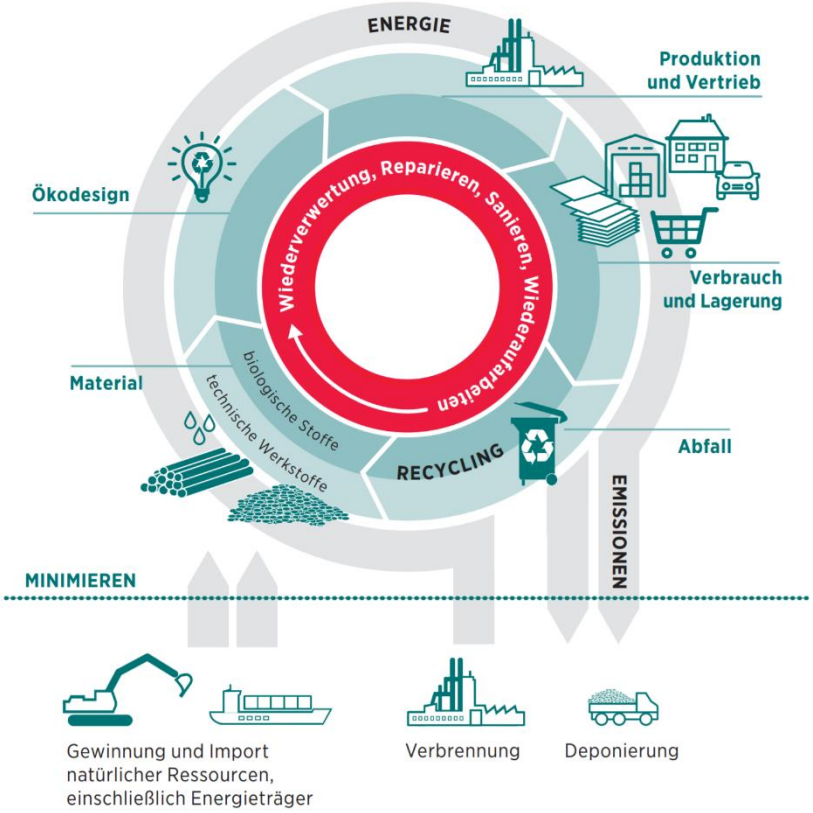


Abb. 140: Das Konzept der Kreislaufwirtschaft [EEA16]

Die wesentlichen Schlüsselelemente in diesem Konzept sind:

- Eco-Design
- Einsatz kreislauffähiger (recyclingfähiger) Werkstoffe (z.B. Al statt Kunststoffe)
- Minimierung der Werkstoffvielfalt und Sicherung der Trennbarkeit der Produkte und Werkstoffe
- Reparaturfähigkeit und Instandhaltung
- High-quality Recycling (up-cycling)
- Förderung der Wiederverwertung (Steuersenkung)
- Förderung von Eco-Innovationen
- Besserer Datenaustausch, Monitoring und B2B-Angebote

- Bessere Schulung der Studenten und des beteiligten Personals

6.8 Wahl geeigneter Fügetechnologien

Die DIN 8593 unterteilt das Fügen in neun Gruppen, in denen die verschiedenen Fügeverfahren zusammengefasst werden.

- Zusammensetzen, wie Einsetzen, Einhängen und Ineinanderschieben
- Füllen von Hohlräumen mit Werkstoffen. Beispielsweise das Imprägnieren.
- An- und Einpressen - dazu gehören Schrauben, Nageln oder Pressverbindungen
- Fügen durch Urformen, insbesondere durch Gießen
- Fügen durch Umformen: Beispiele sind Bördeln, Falzen, Biegen und Nieten.
- Fügen durch Schweißen: Fügen unter Einfluss von Wärme und/oder Druck. An den Fügestellen werden die Werkstücke aufgeschmolzen. Von allen Verfahren am wichtigsten.
- Fügen durch Löten: Die Fügestellen werden erwärmt, aber nicht geschmolzen. Lotzusatz
- Kleben: meist für das Fügen von unterschiedlichen Werkstoffarten und insbes. Kunststoffen
- Textiles Fügen

Die Anforderung, ob eine Verbindung lösbar oder unlösbar sein soll, ist ein erstes, aber sehr selektives Auswahlkriterium. Die unlösbaren Fügetechniken gliedern sich in

- stoffschlüssige, (bspw. Schweißen, Löten, Kleben)
- formschlüssige und (bspw. Nieten, Falzen, Bördeln)
- kraftschlüssige Verbindungen. (bspw. Aufschrumpfen)

Aufgrund der Vielfalt der Möglichkeiten unterschiedliche Werkstoffe mit Vorgabe von spezifischen Randbedingungen zu verbinden, erfordert die Auswahl von geeigneten Fügeverfahren ein umfassendes Wissen und zum Teil auch Spezialausbildungen (bspw. zum European Welding Engineer).
Einige Fachbücher zu diesem Thema sind [Beh02, Boe90, Bud95, Fah06, Fel13, Hah96, Hen92, LeB02, Mat12, Hab12]. Im Folgenden werden einige wichtige Selektionskriterien aufgezählt.

6.8.1 Auswahlkriterien für die Auswahl von Fügetechnologien

Eine Werkstoffverbindung sollte genauso gut sein, wie die beteiligten Werkstoffe, d.h. eine Fügestelle sollte keine Schwachstelle sein. Die mechanisch-technologischen Eigenschaften der beteiligten Werkstoffe sind in den meisten Fällen nur durch Schweißen erreichbar. Als primäres Selektionskriterium gilt daher die Festlegung der zu fügenden Werkstoffe. Im Falle von Legierungen bildet die Kenntnis der Schweißeignung eine wesentliche Voraussetzung. Aber auch bei Kunststoffen ist neben dem Kleben das Schweißen sehr gut geeignet. Bei temperaturempfindlichen Materialien bzw. zur Vermeidung von Verzügen hat sich neben dem Schweißen das mechanische Fügen etabliert. Zum mechanischen Fügen zählen insbesondere die Technologien, wie Blindnieten, Stanznieten, Clinchen und Schließringbolzen, die insbesondere bei dünnen Blechen angewandt werden. Auch die Automatisierbarkeit der Fügetechnologien ist für eine wirtschaftliche Fertigung essenziell.
Wichtige Anforderungen, die die Auswahl geeigneter Fügetechnologien beeinflussen, sind:

- Werkstofftyp (Metall, Kunststoff, Verbundwerkstoff, Keramik)
- Schlussart (form-, kraft- oder stoffschlüssig)
- Wanddicke bzw. Geometrie der Verbindung (Blech, Rohr, Profil, Stange etc.)
- Wärmeeintrag durch den Fügeprozess (Eigenschaftsänderung, Eigenspannungen und Verzug)
- artgleiche oder artverschiedene Verbindungen
- mechanisch-technologische Eigenschaften der Fügeverbindung
- Anforderungen an das Korrosionsverhalten

- Zugänglichkeit (ein- oder beidseitig)
- Wirtschaftlichkeit des Verfahrens (Fügegeschwindigkeit, Automatisierbarkeit, Investitions- und Prozesskosten)
- Vor-Ort-Verfügbarkeit der Technologien
- Anforderungen an die Fertigungstoleranz
- Erforderliche Hilfs-/Zusatzstoffe
- Alterungsbeständigkeit (bei Kunststoffen und Klebungen), u.a.m.

Eine besondere Herausforderung ist die Auswahl von Fügetechnologien in Multimaterialsystemen, die im modernen Automobilbau häufig vorkommen. Eine Methodik und einen Katalog zur Auswahl von Multimaterialsystemen wird in [Pru10] vorgestellt.

6.8.2 Fügetechnologien im Automobilbau

Aufgrund der ressourcenschonenden Leichtbauweise und der damit verbundenen Einsparung im Treibstoffverbrauch werden im Karosseriebau vielfach Multimaterialkonzepte verfolgt. Die Werkstoffe Stahl, Aluminium (Knet- und Gusswerkstoffe), Magnesium und faserverstärkte Kunststoffe müssen dauerfest verbunden werden. Abb. 141 zeigt den Wettbewerb der Fügetechnologien. Neben den Schweißverfahren kommen die mechanische Fügetechnologien und das Kleben zum Einsatz. Beim Zusammenbau des neuen Audi A8 werden 14 unterschiedliche Fügeverfahren genutzt. Eine detaillierte Beschreibung der innovativen Technologien kann auf [Aud80] abgefragt werden. Das CMT-Verfahren zum Fügen von Alu- mit Stahlblechen wird in einer modifizierten Form der Schutzgasdüse angewandt, wodurch Prozessgeschwindigkeiten bis zu 50 mm/s erreicht und eine feine Nahtoptik erzielt werden.

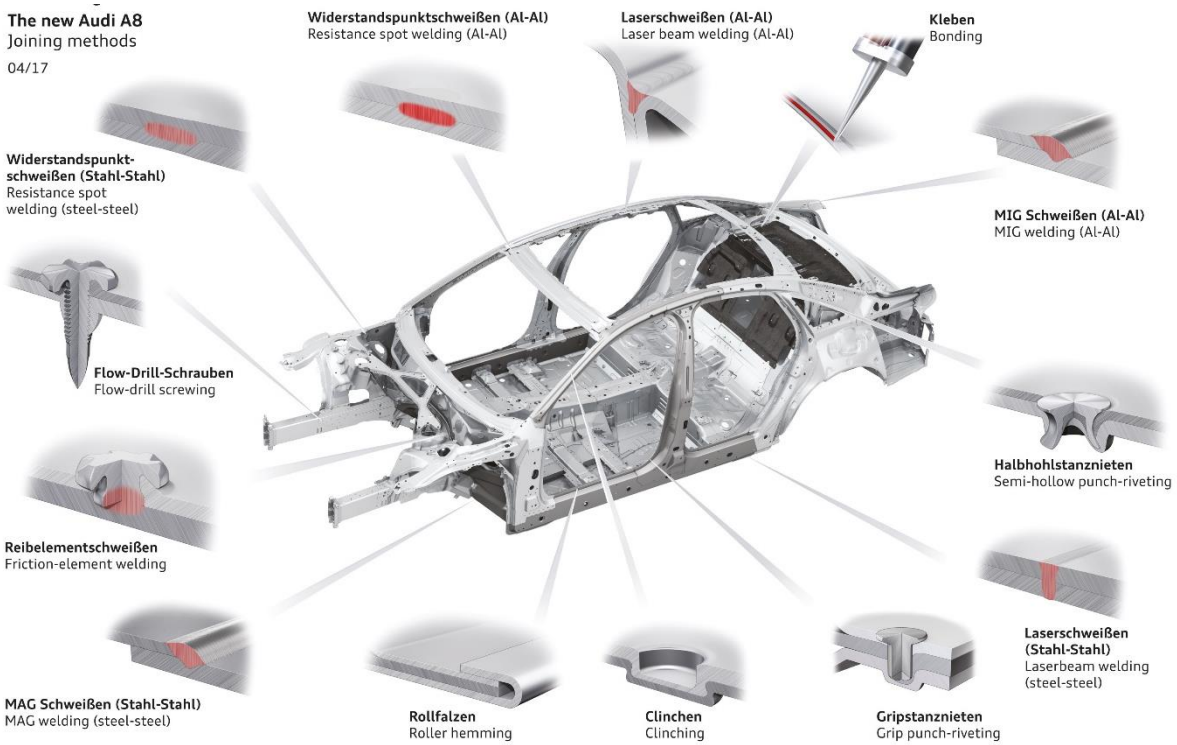


Abb. 141: Fügetechnologien im modernen Automobilbau [Aud20]

6.8.3 Wirtschaftlichkeit in der Schweißtechnik

Es gibt keinen Schweißprozess, den man generell als den wirtschaftlichsten hervorheben könnte, dies auch deshalb, weil unterschiedliche Faktoren, wie Stückzahl, Werkstoff, Blechdicke, Zugänglichkeit und Güteanforderungen das Ergebnis beeinflussen.
In der Praxis hat sich die Abschmelzleistung mit der Einheit kg/h als Leistungskennzahl etabliert. Abb. 142 zeigt einen Vergleich der Abschmelzleistung verschiedener Schweißverfahren.
In den meisten Fällen werden die Gesamtkosten pro Meter Schweißnaht dominiert durch die Arbeitskosten des Schweißers. Ein primäres Ziel zur Kostensenkung ist daher die Minimierung der Haupt- und Nebenzeiten. Die Haupt- oder Schweißzeit kann verringert werden durch

- kleinere Einschweißquerschnitte (kleine Öffnungswinkel, kleine Nahtdicken)
- maßhaltiger Zusammenbau (gute Nahtvorbereitung)
- Verfahren mit hoher Abschmelzleistung (UP, MAG, Fülldraht)
- Mechanisierte Verfahren mit genauer Nahtvorbereitung
- PA und PB-Positionen bevorzugen (Verwendung von Dreh- und Wendevorrichtungen)

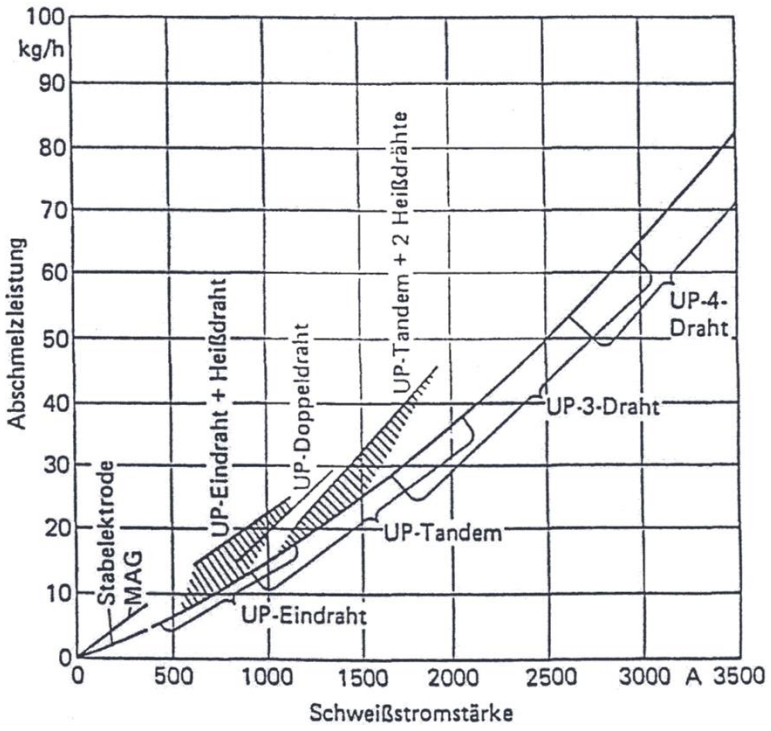


Abb. 142: Abschmelzleistung verschiedener Schweißverfahren (Bildquelle: Linde)

6.8.4 Montagesysteme

Für die Auswahl von Montagesystemen gibt es ein paar wenige Auswahlkriterien, die in Tabelle 48 zusammengefasst sind. In erster Linie bestimmt die Stückzahl das Montagesystem.

	Losgröße	Flexibilität	Investment
Manuelle Montage	Kleinserie	hoch	niedrig
Halbautomatische Montage (Hybridsystem)	Mittelgroße Losgröße	mittel	mittel
Automatisierte Montage	Große Stückzahlen	eingeschränkt	hoch

Tabelle 48: Auswahlkriterien für die Festlegung der Art der Montage

6.9 Nutzung von Oberflächentechnologien

Durch Anwendung moderner Randschichtmodifikations- und Beschichtungssysteme können Bauteile hinsichtlich oberflächenspezifischer Eigenschaften, wie Reibung, Verschleiß, Korrosion, Biokompatibilität, elektrische Eigenschaften, Optik, oder Ermüdung verbessert werden. Es werden nur die Oberflächeneigenschaften verändert, aber nicht die vom Volumen abhängigen Werkstoffkennwerte, siehe Abb. 143.

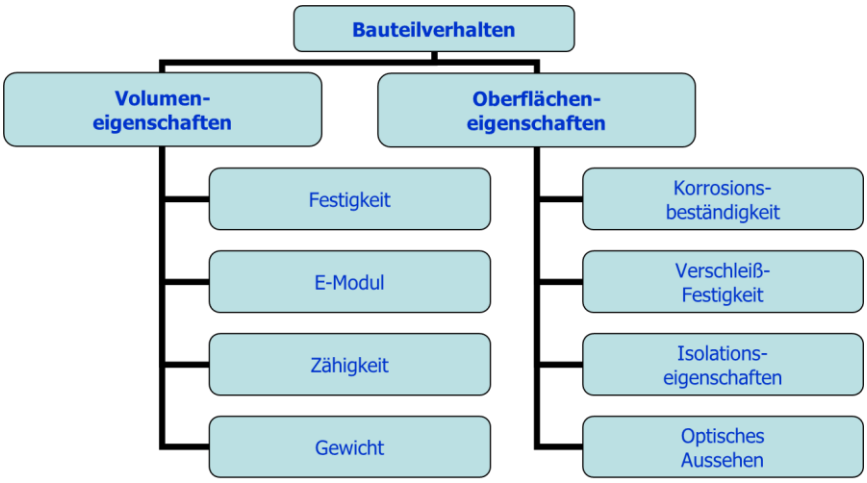


Abb. 143: Unterscheidung von Volumen- und Oberflächeneigenschaften

Die gewünschten Oberflächeneigenschaften sind als Systemgröße von den Elementen

- Grundwerkstoff
  - Werkstoffeigenschaften (Schmelzpunkt, Wärmeausdehnung etc.)
  - Wärmeleitfähigkeit, Oberflächenbeschaffenheit
  - Bauteilgeometrie (Zugänglichkeit, Hinterschneidungen etc.)
- Schichtwerkstoff
  - Werkstoffeigenschaften (Schmelzpunkt, Wärmeleitfähigkeit etc.)
  - Abscheidung aus fester, flüssiger oder gasförmiger Phase
- Beschichtungsverfahren
  - Chemisch/elektrochemisch/thermochemisch
  - PVD oder CVD oder Ionenimplantation
  - Thermisches Spritzen
  - Auftragsschweißen oder Plattieren

abhängig.

Die aufgebrachten Schichten unterstützen vielfältige Oberflächeneigenschaften, wie

- Mechanische Eigenschaften
  - Verschleißbeständigkeit, Reibungsverhalten, Erosionsverhalten, Thermoschockbeständigkeit, Ermüdungsverhalten, Notlaufverhalten etc.
- Korrosionsverhalten
  - Nasschemischer Angriff, Heißgaskorrosion, Oxidation u.a.
- Thermophysikalischen Eigenschaften
  - Wärmeausdehnungsverhalten, Wärmeleitfähigkeit, Permeabilität u.a.
- Physikalische Eigenschaften
  - Leitfähigkeit, dielektrisches Verhalten etc.
- Biokompatibilität
- Dekorative Eigenschaften
  - Glanz, Farbe, Haptik u.a.

6.9.1 Mechanische Randschichtmodifikation

Durch Kugelstrahlen, Rollen, Festwalzen werden Druckeigenspannungen in der Randschicht eingebracht, durch die Kaltumformung erfolgt eine Festigkeitssteigerung und durch die Glättung der Oberfläche können Mikrokerben beseitigt werden.

6.9.2 Thermische Oberflächenhärteverfahren

Durch Flammhärten, Induktionshärten und Laserhärten wird in der Randzone eine martensitische Umwandlung und deutlich Härtesteigerung erreicht. Sehr gut automatisierbar ist das Induktionshärten, weil durch Einstellung der Frequenz (Niederfrequenz: 50 bis 500 Hz, Mittelfrequenz: 500 Hz bis 10kHz, Hochfrequenz: 10kHz bis 10Mhz) über den Skin-Effekt die Eindringtiefe vorgegeben ist und als einzige Kontrollgröße die Zeit zu fixieren ist. Die Vorteile bestehen in einer sehr kurzen Anwärmzeit, gute Kontrollierbarkeit, Zunderarmut und der Möglichkeit von partieller Härtung. Laserstrahlhärten wird bspw. beim Härten von Eintrittskanten von Turbinenschaufeln bei Verdichtern oder Gasturbinen verwendet.

6.9.3 Thermische Beschichtungsverfahren

Dazu zählen

- Metallschmelztauchen (Feuer- oder Tauchverzinken)
- Thermisches Spritzen
- Plattieren
- Auftragsschweißen

Beim thermischen Spritzen ist die Haftung und Qualität der Schicht sehr von den Prozessparametern, wie Temperatur und Geschwindigkeit abhängig. Demnach unterscheiden sich die gängigen Verfahren, aber auch die Kosten. Einen Vergleich der Verfahren bzgl. der charakteristischen Eigenschaften des thermischen Spritzens zeigt Tabelle 49.

	Flammspritzen	**Lichtbogen-spritzen**	**Hochgeschwindig-keitsflammspritzen**	**Plasmaspritzen**
Spritzwerkstoff	Draht bei Metallen, Pulver für alle Werkstoffe	Metalle	fast alle Werkstoffe	fast alle Werk-stoffe
Art des Zusatzes	Drähte u. Pulver	Drähte	Pulver	Pulver
Temperaturen [°C]	max. 3160	ca. 4000	max. 3160	bis 20000
max. Energiedichte [W/cm²]	10^3 bis 10^4	10^4 bis 10^5	k.A.	10^5 bis 10^6
Partikelgeschwin-digkeit [m/s]	Draht bis 200 Pulver bis 50 Kunststoffe bis 30	ca. 150	bis 550	bis 450
Leistung [kg/h]	Metalle 3 bis 8 Keramik 1 bis 2 Kunststoff 2 bis 4	8 bis 20	Metalle 4 bis 8 Keramik 2 bis 4	Metalle 4 bis 8 Keramik 2 bis 4
Gase	Acetylen Ethen Sauerstoff Propan	Pressluft	Acetylen Ethen Sauerstoff Propan	Argon Helium Wasserstoff Stickstoff
Wechselwirkungen zwischen Spritz-werkstoff und Umgebung	stark	sehr stark	weniger stark	gering

Tabelle 49: Vergleich der Eigenschaften der Verfahren des Thermischen Spritzens

Beim Plattieren werden zwei (oder mehrere) relativ dicke Metallschichten unter Einwirkung von Wärme und/oder Druck miteinander verbunden (die Schichten verschweißen). Das Schichtmaterial wird in kompakter Form (Blech) aufgetragen. Die erforderliche Energie wird in Form von thermischer Energie (Glühofen), mechanischer Energie (Walzen, Pressen oder Explosion) oder als Reaktionsenthalpie (beim aluminothermen Plattieren) aufgebracht. Dieses Verfahren ermöglicht dicke Schichten (1-20 mm), wobei die Dicke der Plattierauflage nur ca. 10 % der Gesamtdicke sein soll. Die Plattierung kann ein- und doppelseitig (auch mit unterschiedlichen Belägen) erfolgen.
Zu den wichtigeren Verfahren zählen:

- Gussplattieren
- Walzplattieren (siehe Abb. 144)
- Explosions-, Spreng- oder Schockplattieren
- Schweißplattieren oder Auftragsschweißen
- Reibplattieren
- Aluminothermisches Plattieren
- Elektroplattieren (siehe galvanische Schichten)

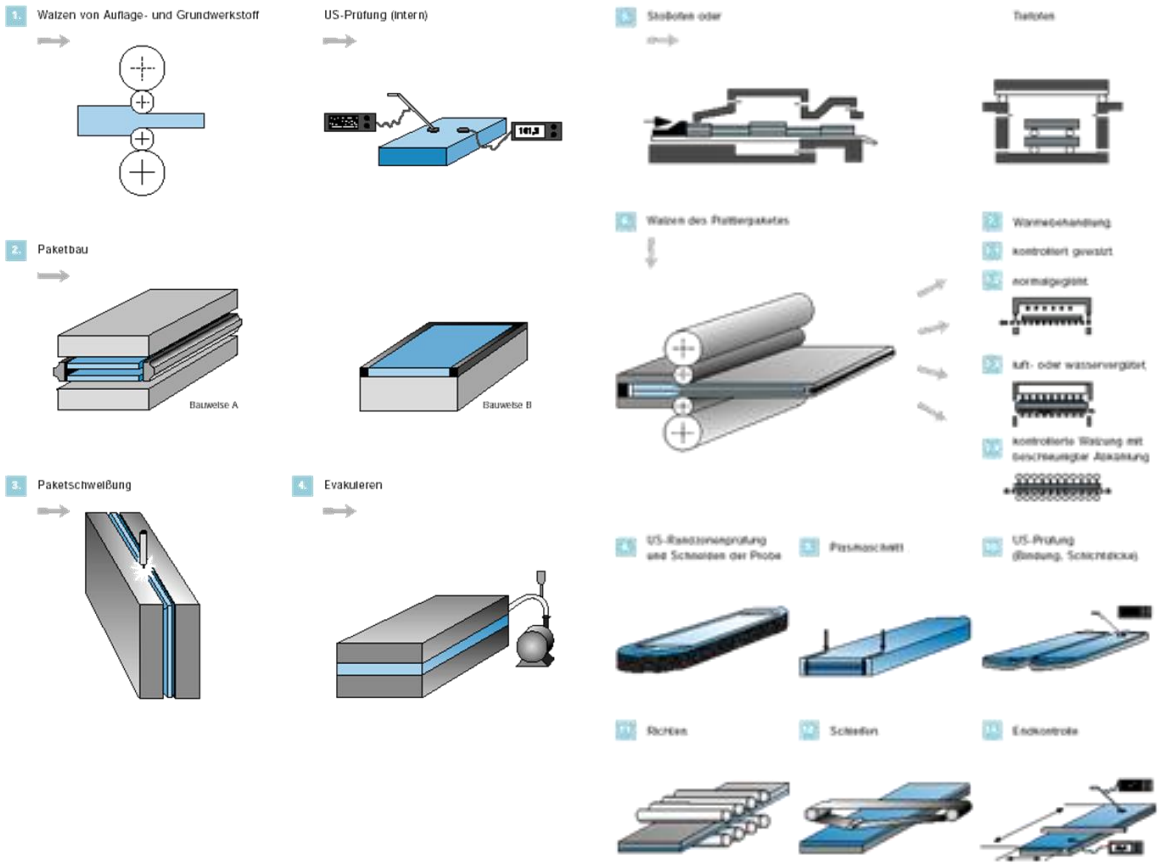


Abb. 144: Arbeitsschritte beim Walzplattieren (Schema nach voestalpine Stahl Linz Grobblech GmbH)

6.9.4 Galvanische Abscheidung

Ca. 50% aller Anwendungen fallen auf die Verzinkung, ca. je 15% teilen sich Vernickeln und Verchromen, Hartverchromen und chemisches Vernickeln. Hauptanwendungen sind Kfz-Teile, Hydraulikteile, Maschinenbau, Möbelbeschläge, Sanitärteile u.a.

6.9.5 Dünnschichttechnologien

Die üblichen Schichtdicken liegen im µm-Bereich. Dazu zählen die Verfahren

- CVD (chemical vapour deposition, chemische Abscheidung aus der Dampfphase)
  - Die Reaktion wird durch das thermodynamische Gleichgewicht bestimmt und damit vom Partialdruck der gasförmigen Komponenten und von der Temperatur kontrolliert. Man unterscheidet Kaltwand- und Heißwandreaktoren.
  - Es können damit Schichten aus Metallen, Oxiden, Nitriden, Carbiden, Boriden, Silizide und anderen festen Verbindungen (auch Diamant) hergestellt werden.
  - Wesentlich für die Durchführung der Verfahren sind die so genannten Reaktanten, die die gasförmige Metallverbindung darstellen. Besonders geeignet sind Fluoride, Chloride und Bromide, wenn sie bereits bei Raumtemperatur in gasförmiger oder flüssiger Form vorliegen.
  - Die übliche Prozesstemperatur liegt zwischen 800 und 1000°C.
  - Beispiel: $TiCl4 + CH4 \rightarrow TiC + 4\ HCl$
    Reaktivgas Schicht
  - VT gegenüber PVD:
    - höhere Streukraft (komplexe Geometrien, Hohlräume, gleichmäßige Dicke),
    - höhere Haftfestigkeit der Schicht (Adhäsion basiert auf chemischer Bindung)
    - Normaldruck oder schwaches Vakuum
  - NT gegenüber PVD:
    - Erwärmung des Werkstückes,
    - hohe Prozesstemperatur (bei therm. CVD ca. 800 bis 1100°C),
    - Verzugsgefahr (ungeeignet für Toleranzen <0,03 mm)
    - Giftigkeit und Reaktivität der Prekursoren und gasförmigen Reaktionsprodukte
    - Geringes Ausbringen des Reaktionsgases
- PVD (Physikalische Gasenphasenabscheidung)
  - Beim PVD (physical vapour deposition) handelt es sich um eine physikalische Abscheidung aus der Gasphase.
  - Es umfasst die Verfahren:
    - Bedampfen,
    - Sputtern und
    - Ionenplattieren (am wichtigsten),

    sowie deren reaktiven Varianten (reaktives Gas (N,O,CxHy) in der Vakuumkammer).
  - Die Beschichtungstemperatur liegt unter 500°C.
  - Übliche Schichtdicken liegen bei dekorativen Zwecken und Werkzeugen bei 1- 2 µm und zu Korrosionsschutzzwecken bei ca. 20 µm.
- Plasmagestützte Verfahren

Typische Hartstoffschichten, die über CVD bzw. PVD hergestellt werden, sind in Tabelle 50 aufgelistet.
Spezielle Methoden der Oberflächentechnik in der Kunststoffverarbeitung finden sich im Fachbuch [Lak17].

Coating	Coating material	Microhardness (HV 0.05)	Coefficient of friction against steel (dry)	Coating thickness (µm)	Max. working temperature (°C)
BALINIT® A	TiN	2'300	0.4	1 - 4	600
BALINIT® B	TiCN	3'000	0.4	1 - 4	400
BALINIT® C	WC/C	1'000	0.2	1 - 4	300
BALINIT® D	CrN	1'750	0.5	1 - 4 / 10	700
BALINIT® FUTURA	TiAlN Multilayer	3'000	0.4	1 - 5	800
BALINIT® X.TREME	TiAlN	3'500	0.4	1 - 3	800
BALINIT® HARDLUBE	TiAlN WC/C	2'600 1'000	0.2	2 - 6	800 - 1'000
BALINIT® DIAMOND	polycrystalline diamond	≥ 8'000		6 - 30	

Tabelle 50: Über Gasabscheidung herstellbare Schichten und ihre Eigenschaften (Quelle: Balzers)

6.10 Rapid Prototyping, Rapid Tooling und Additive Fertigung

6.10.1 Entwicklungsschritte beim Rapid Prototyping

Im Unterschied zur früheren Produktentwicklung werden heute komplexere Teile in hoher Qualität mit niedrigeren Herstellkosten und kürzeren Entwicklungszeiten auf den Markt gebracht. Dies ist nur mit Methoden, wie Concurrent Engineering, Simultaneous Engineering, CAD, Simulation, CAE und Rapid Prototyping, Rapid Tooling und Rapid Manufacturing erreichbar. Anfänglich wurden nur geometrische Modelle als Visualisierungshilfe generiert, danach funktionsfähige Prototypen, Modelle zur Überprüfung der Machbarkeit und Assemblierung hergestellt, bis schließlich hinreichend mechanisch belastbare Bauteile gebaut wurden, siehe Abb. 145.

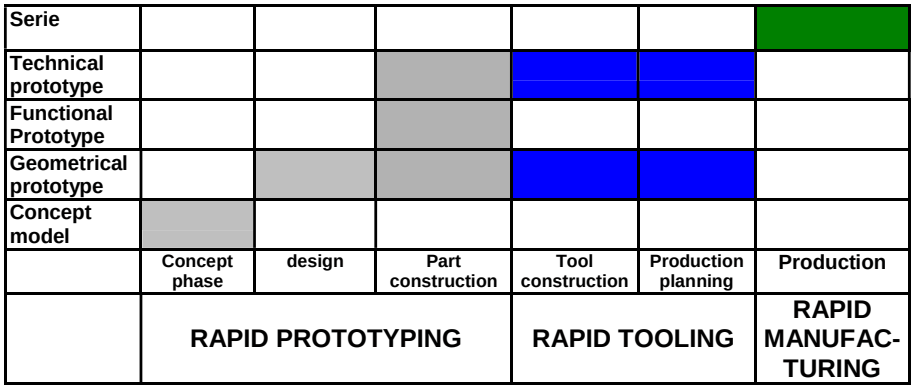


Abb. 145: Die Entwicklung vom Rapid Prototyping zum Rapid Tooling bis zum Rapid Manufacturing

Die Prozesskette sollte dabei möglichst kurz und vollständig digital unterstützt sein.

Bereits Anfang der 90er Jahre hat man sich bemüht, physikalische Anschauungsobjekte direkt aus dem CAD-File zu generieren. Dazu wurde bspw. das „laminated object manufacturing“ (LOM)-Verfahren entwickelt, wobei über einseitig mit Kleber beschichtete Papierrollen mit einem Laserstrahl je nach Querschnittslage ausgeschnitten. Die einzelnen Schichten wurden zu einem 3D-Bauteil zusammengeklebt und konnten so als physikalischer Prototyp als Visualisierungs- oder Designmodell vorgezeigt werden. Cirka gleichen Zeit wurde in den USA zunächst von Charles W. Hull (1986) eine erste kommerzielle rapid prototyping-Maschine entwickelt. Sehr erfolgreich war dann die Entwicklung der Firma 3D-Systems, die über das Konzept der Sterolithographie photoempfindliche Polymere schichtweise zu 3D-Modellen mit dem Laser und einem Spiegelsystem aushärtete. Das Prinzip und einfache Probestücke sind in Abb. 146 dargestellt.

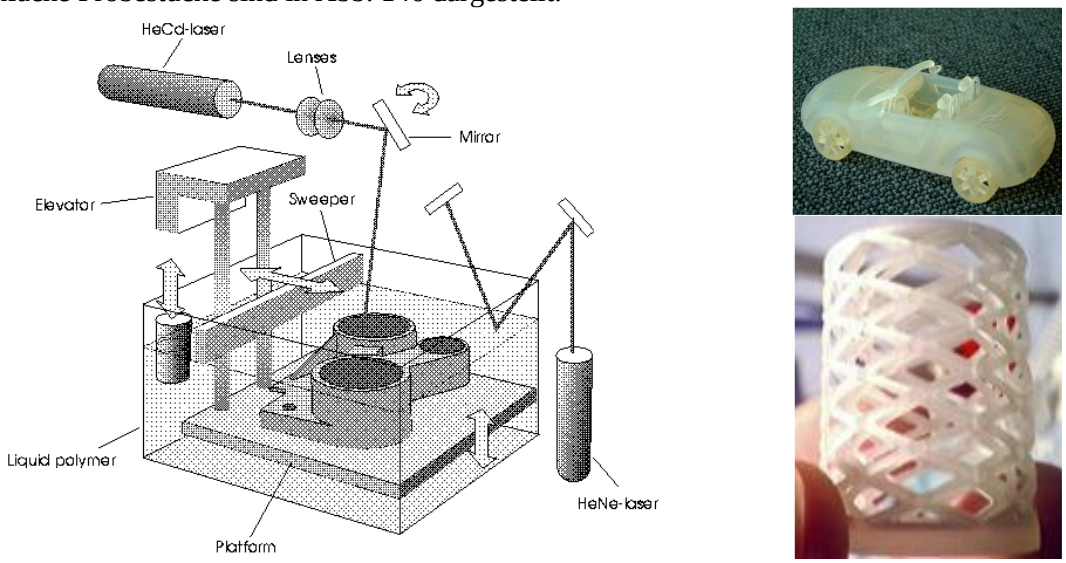


Abb. 146: Stereolithographische Produktion von 3D-Kunststoffteilen (Quelle: 3D Systems Inc., US)

Im Bereich des Rapid Toolings ging es darum, die langen Zeiten für den konventionellen Werkzeugbau durch einfachere Lösungen im Hinblick auf Prototypen oder für geringe Stückzahlen zu ersetzen. Als Werkzeugmaterial wurden Zement, Kunststoffe, niedrigschmelzende Legierungen, wie Zamak (ZnAlMgCu) oder Cerrotru (Bi57Sn43), Gusseisen oder Stahl-Plattenbauweisen für das Druckgießen oder für das Tiefziehen verwendet. Ein paar wenige Beispiele zeigt Abb. 147.

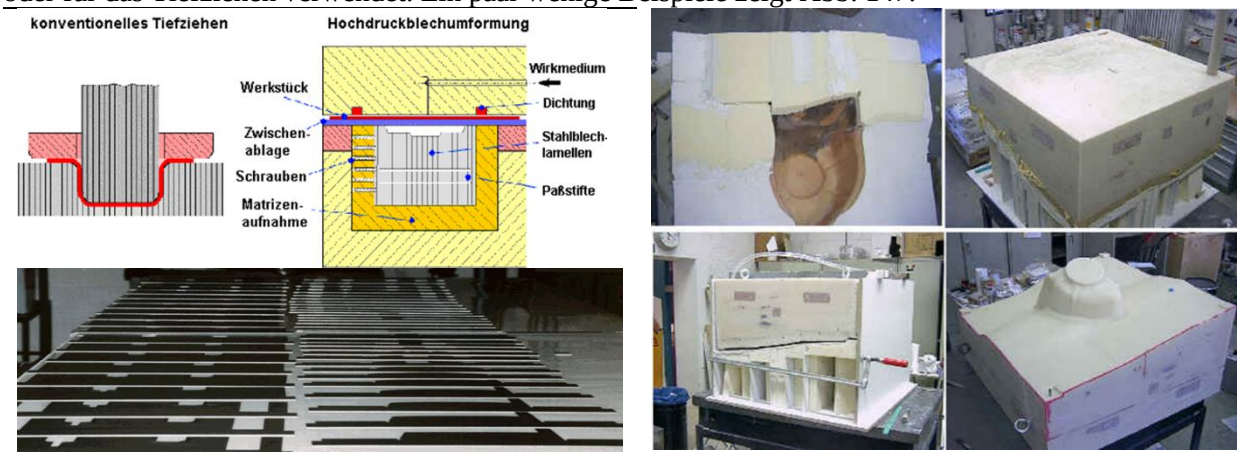


Abb. 147: links: aus vielen lasergeschnittenen Stahllamellen gefertigtes Gesenk zum Tiefziehen, rechts: Tiefziehwerkzeug aus Blähbeton mit PU-Überzug

6.10.2 Additive oder generative Fertigung

Die additive oder generative Fertigung ist ein Rapid Prototyping von Kunststoff- oder von metallischen Komponenten. Die Fertigung erfolgt direkt auf der Basis von CAD-Daten im STL-Format aus formlosen (Flüssigkeiten, Pulver) oder formneutralen (Bänder, Drähte) Material mittels chemischer oder physikalischer Prozesse. Obwohl es sich um umformende Verfahren handelt, sind keine speziellen Werkzeuge erforderlich. Zu den wichtigsten Verfahren der additiven Fertigung zählen FDM (Fused Deposition Modelling) und Stereolithografie primär für Kunststoffteile, sowie selektives Lasersintern (SLS) und -schmelzen (SLM), WAAD (wire-based arc-light Additive Manufacturing) oder auch DED (Direct Energy Deposition) genannt, für metallische Bauteile.
Mitte der 80er Jahre wurde insbesondere in Deutschland der 3D-Druck für metallische Bauteile entwickelt. Der Entwicklungspfad ist in Abb. 148 dargestellt. Im Folgenden wird nur auf das selektive Laserschmelzen (SLM) eingegangen, weil damit hochwertige Legierungen und hoch belastbare Bauteile darstellbar sind.

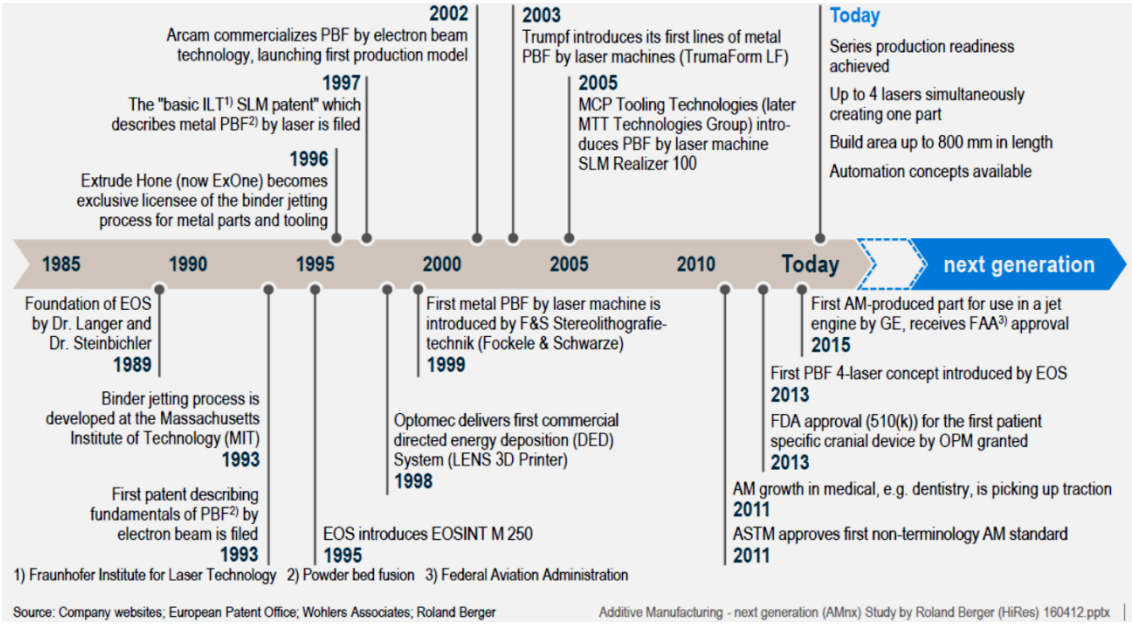


Abb. 148: Zeitliche Entwicklung der additiven, metallischen 3D-Fertigung

6.10.2.1 Der SLM-Prozess (selective laser melting)

Beim SLM werden 10 bis 50 µm große, gasverdüste (runde) Metallpulverpartikel schichtweise auf eine Bauplatte aufgebracht und mit einem Laser an den zu schmelzenden Positionen aufgeschmolzen. Die Lagendicke beträgt ca. 20-40µm, die durch ein präzises Absenken der Plattform eingestellt wird. Das Arbeitsprinzip dieses Prozesses und eine kommerzielle SLM-Anlage sind in Abb. 149 dargestellt. Grundsätzlich entspricht der Prozess einem Laserschweißprozess, wobei die Breite der Schweißraupe nur ca. 0,1mm beträgt. Zu den charakteristischen Prozessparametern zählen die Laser-Leistung, die Scan-Geschwindigkeit, die Lagenschichtdicke und die Spotgröße. Meist werden diese Einzelgrößen zur Kenngröße der volumetrischen Energiedichte zusammengefasst. In Form von Prozessdiagrammen (Strahlleistung über Scan-Geschwindigkeit werden je nach Werkstoff optimal geeignete Parametereinstellungen erfasst. In [Buc15] wurde der SLM-Prozess mittels einer SWOT-Analyse charakterisiert, siehe Tabelle 51 Eine wesentliche Kernaussage der Zusammenstellung betrifft die potenzielle Anwendbarkeit des SLM-Verfahrens, primär für

- geometrisch sehr komplexe Teile,
- eher für teure Werkstoffe und

- für geringe Stückzahlen (kleiner 30-50 Stück).

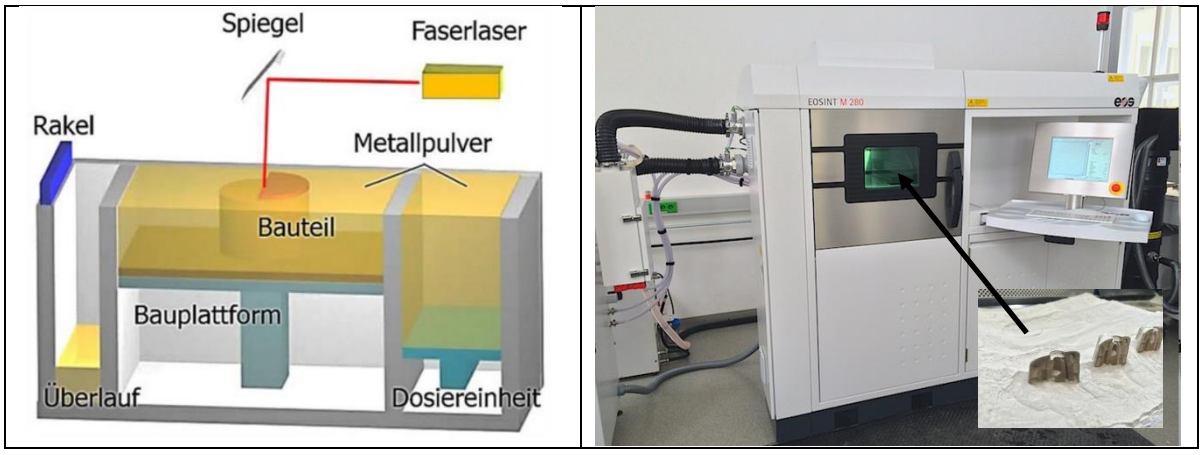


Abb. 149: SLM-Arbeitsprinzip und EOSINT M280 Anlage an der Montanunversität Leoben

Stärken (S)	Schwächen (W)
1 Darstellung komplexer Geometrien (Hohlräume, Hinterschnitte, Freiform-flächen)	1 Hohe Produktionskosten (Investitions- und Metallpulverkosten)
2 Erhöhte Bauteilkomplexität wird ohne zusätzliche Kosten erreicht	2 Geringe Produktionsgeschwindigkeit
3 Werkzeuglose Fertigung	3 Begrenzte Bauteilgröße
4 Mannlose Fertigung (über Nacht)	4 Gute Oberflächenqualität erfordertNachbearbeitung (Strahlen)
5 Hohe Materialeffizienz	5 Eigenspannung/Verzug/Toleranzen
6 Rasche Prototypenfertigung	6 Fehlendes Prozess Monitoring (QS)
7 Direkte Herstellung von Werkzeugen	7 Begrenzte Metallpulververfügbarkeit
8 Geeignet für Kleinserien	8 Hoher Optimierungsaufwand für die Prozessparameter bei neuen Pulvern
9 Eignung für viele Legierungen	9 SLM-gerechtes Design und angepasste Stützkonstruktionen
10 Feinheit der Mikrostruktur und gute mechanische Eigenschaften	10 Prozessbedingte Fehlerarten (Binde- Fehler, Balling und Porosität)
11 Metallaufbau auf Grundkörper (Hybridbauweise, Schichtverbunde)	11 Anisotropie der Eigenschaften
12 Einsparung von Fertigungsschritten	12 Unwirtschaftliche Großserienfertigung
13 Mehrere Anlagenanbieter in der EU	13 Eigenständige Systemwartungen kaum möglich
14 Gute Prozesssteuerbarkeit	
Chancen (O)	Gefahren (T)
1 Senkung der Pulverkosten durch mehrere Pulverhersteller	1 Mangel an guten Konstrukteuren
2 Neue Anwendungspotentiale bei Verfügbarkeit neuer Pulverwerkstoffe	2 Unzureichende Schulung bzgl. Additiver Fertigung
3 Trend zu „Customization“	3 Wirtschaftlicher Druck durch kostengünstigere Fertigungsverfahren
4 Wachsende Bedeutung von Materialeffizienz und Leichtbau	4 Zu langsame Weiterentwicklung des SLM-Verfahrens
5 Steigerung der Funktionalität	5 Zeitintensive, notwendige Nacharbeit
6 Kombination mehrerer Bauteile und damit vereinfachte Montage	6 Arbeit mit reaktiven Pulvern und Reststoffen
7 Verkürzte Taktzeiten durch bessere Werkzeugkühlkonzepte	7 Fehlende Parameterwerte für neue Pulver-Werkstoffe
8 Genderneutrale IT&CAD-Arbeitsplätze	8 Rasche Zunahme der Mitbewerber
9 Hohe Akzeptanz bei Jugendlichen	9 Technologie-Wettbewerb aus USA und Asien
10 On-Demand-Fertigung (keine Lagerhaltung)	10 Unzureichende Harmonisierung
11 Nachbau durch Reverse Engineering	11 Überzogene Umweltauflagen
12 weltweite Vor-Ort-Verfügbarkeit	12 Sehr hohe Sicherheitsanforderungen
13 Min. logistischer Aufwand/Transport	
14 Prozessoptimierung durch Modellierung und Simulation	
15 Bessere Bildanalysesysteme für QS	

Tabelle 51: Beziehungsmatrix für die SWOT-Analyse des SLM-Prozesses [Buc15]

6.10.2.2 Metallische Pulver für den SLM-Prozess

Das Ausgangsprodukt für den SLM-Prozess sind metallische Pulver, die meist durch Gasverdüsung von Metallschmelzen gewonnen werden. Sie sollten möglich rund und frei von anhaftenden, kleineren Teilchen (sog. Satelliten) sein. Die Größe und Pulverqualität haben entscheidenden Einfluss auf die späteren mechanischen Eigenschaften des Bauteils. Daher werden in die charakteristischen Kenngrößen, wie

- Partikelgrößenverteilung,
- Partikelmorphologie,
- Fließfähigkeit,
- Schüttdichte und
- andere rheologische Eigenschaften

bestimmt und dokumentiert. Eine ausführliche Beschreibung der Bestimmung dieser Kenngrößen findet sich in der VDI-Richtlinie 3405 Bl.1. Sehr umfangreiche Untersuchungen über die werkstoffkundliche Eignung verschiedener Metallpulver, deren Prüfung und deren Verarbeitungseigenschaften sind in der Doktorarbeit von Herrn Panzl [Pan20] zu finden.

Vielfach verwendete und daher verfügbare Metallpulver sind in Abb. 150 mit den typischen Härte- und Festigkeitswerten dargestellt.

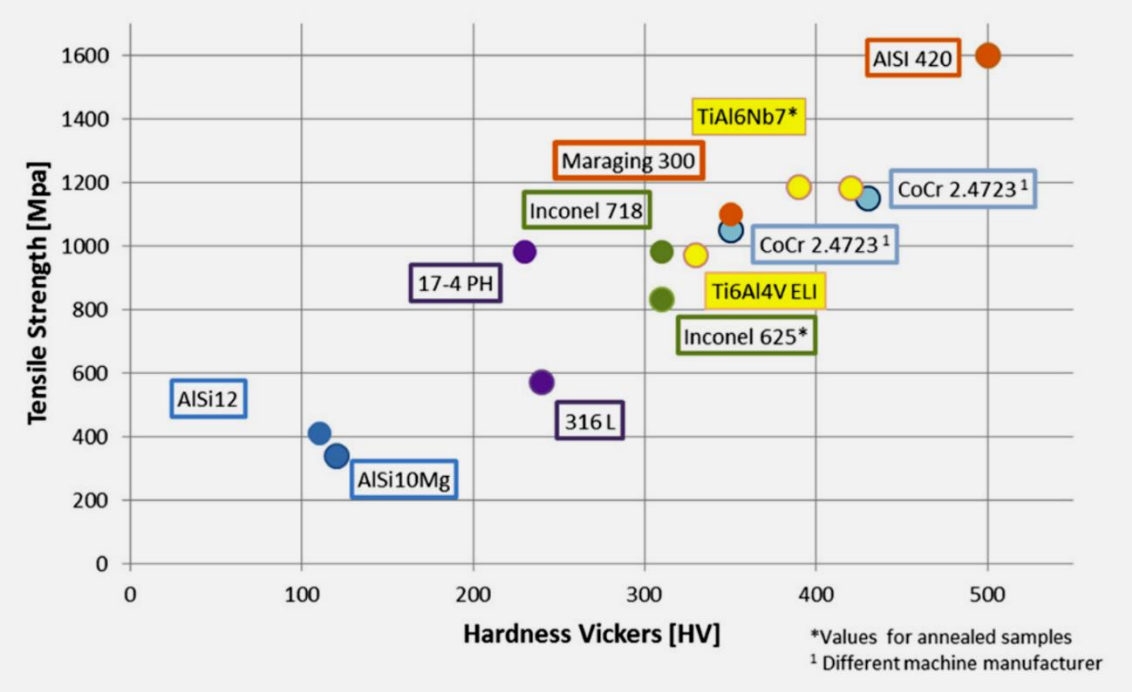


Abb. 150: Häufig verwendete Metallpulver für den SLM-Prozess nach EMPA

6.10.2.3 Einflüsse auf die Qualität von SLM-gefertigten Bauteilen

Auf dem ersten Blick mag der Prozess recht einfach aussehen, dies täuscht aber. Es gibt etwa 100 Einflussfaktoren, die sich gegenseitig beeinflussen, und damit den Verzug, die Fehlerbildung und die mechanischen Eigenschaften eines Bauteils bestimmen. Eine recht gute Übersicht mit den kausalen Zusammenhängen zeigt Abb. 151.

In einem vom österreichischen Forschungsförderungsfonds FWF geförderten Leuchtturmprojekt „addmanu“ konnten im Zeitraum von 2015 bis 2018 durch Zusammenarbeit von 20 Forschungs-

partnern einige offene Fragen und neue Entwicklungen behandelt werden. Die Hauptthemen waren die Werkstoffentwicklung, das SLM-gerechtes Design inkl. Auslegung, die Verfahrensoptimierung und die Suche nach neuen Anwendungen. Eine Zusammenfassung mit den wesentlichen Erkenntnissen ist in [Buc19] abgedruckt.

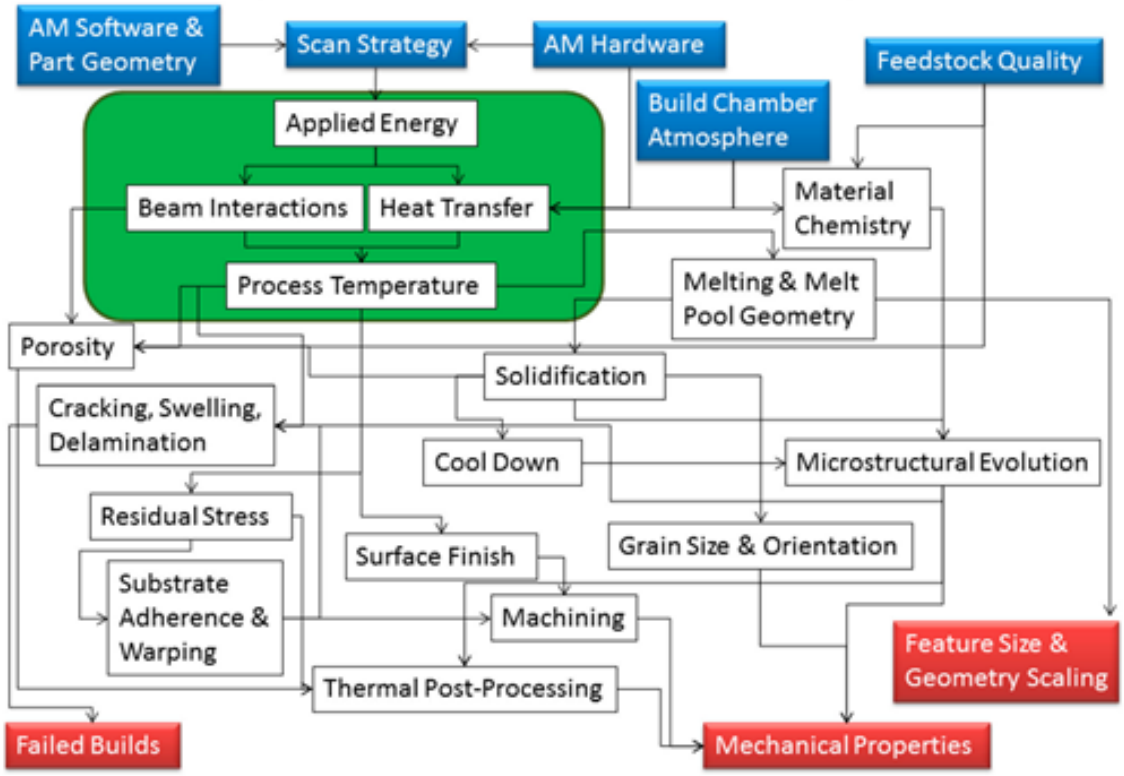


Abb. 151: Processing map für den SLM-Prozess nach [Sam16]

6.10.2.4 Reverse Engineering und SLM

Üblicherweise werden SLM-Bauteile so hergestellt, dass ausgehend von einem CAD-File und der Festlegung etwaiger Stützkonstruktionen, über die Generierung eines STL-Files und Eingabe von maschinenspezifischen Daten der Bauprozesse gestartet wird.
In einigen Fällen gibt es aber keine Design-Daten (z.B. für den Nachbau älterer Teile, in der Ersatzteilfertigung oder beim Bau metallischer Komponenten ausgehend von einem Lehm-Objekt u.a.m.). Eine Abhilfe dazu bietet die Methodik des Reverse Engineering. Die Geometrieerfassung kann dabei über taktile oder optische, berührungslose Verfahren (Lichtschnittprojektion, Laser-Scanner, Moirè-Technik, time off flight (TOF) Radar, Computertomographie, MRI u.a.) erfolgen. Aus den Messungen ergibt sich eine Punktwolke, die durch Kurven höherer Ordnung (sog. NURBS) approximiert werden. Ziel ist es die Struktur eines Objektes in eine 3d-Geometrie überzuführen und damit wieder gegenständliche Objekte zu erzeugen.
Am Beispiel des Scannens eines Schmiedeteiles sind in Abb. 152 die einzelnen Arbeitsschritte dargestellt. Die 3D-Punktgenauigkeit beträgt 10µm.

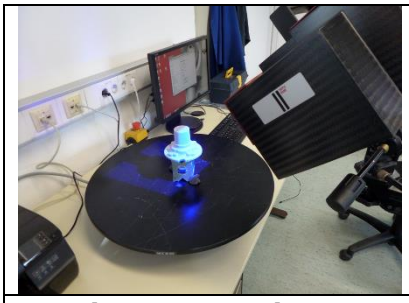
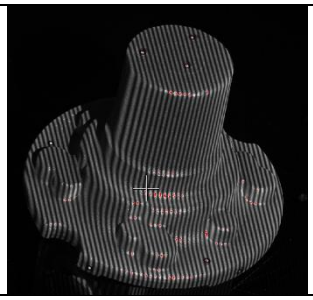
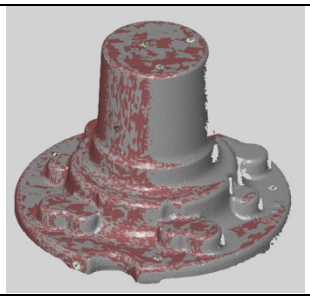
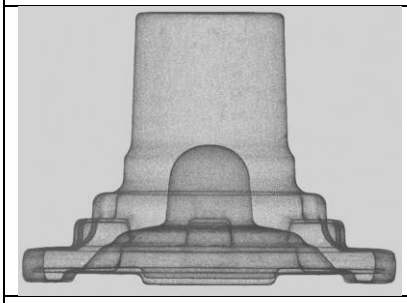
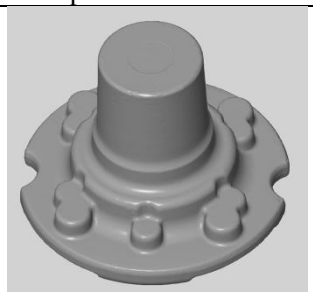
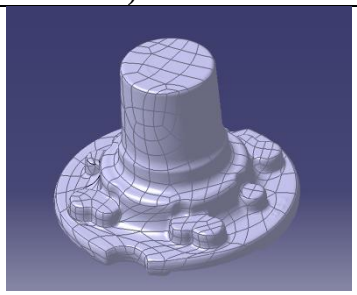
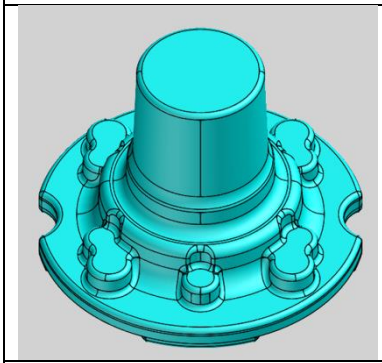
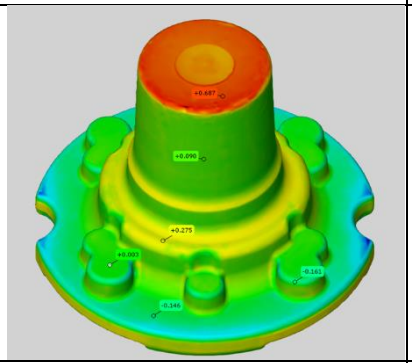
		
Digitalisierung mit dem GOM Atos II System mit Blue Light Technology, Messvolumen 320*240*240mm	Scannen durch Triangulation mit zwei Kameras und proj. Streifenmuster, ca. 5 Mio Messpunkte/Aufnahme	Scannen und Zusammenführen mehrerer Einzelaufnahmen über Referenzmarken (auch von Unterseite)
		
Punktwolke von mehreren tausend Punkten	Die Punktwolke wird zu einem Polygonnetz verarbeitet	Exakte Flächenrückführung. Das Nurbs-Modell kann sofort für FEM-Simulationen und CAM-Fertigung genutzt werden.
		
Parametrisches Modell. Auf dem Flächennetz wird ein neues CAD-Modell mit kompletter Modellhierarchie aufgebaut, wodurch geometrische Änderungen jederzeit möglich sind	Nach dem Schmiedeprozess werden die Bauteile vermessen und mit dem CAD-Modelldaten verglichen	Ansicht des Realteils

Abb. 152: Arbeitsschritte beim Reverse-Engineering eines Schmiedeteils (Bildquelle: Krenhof, Köflach)

6.10.2.5 Nachbehandlung der SLM-gefertigten Teile

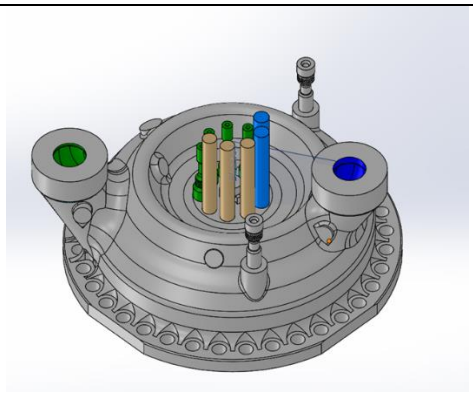
Nach dem Ende des Bauprozesses wird das überschüssige lose Pulver abgesaugt, die Bauplattform entnommen und ggfs. in einem Ofen spannungsarmgeglüht. Danach werden die Teile von der Plattform getrennt, Support-Strukturen entfernt, Übergänge gefeilt und geschliffen. Durch Kugelstrahlen mit Nussschalen kann die Oberfläche poliert werden. Verwendet man Metallkugeln, so können auch Druckeigenspannungen für eine erhöhte Lebensdauer eingebracht werden.

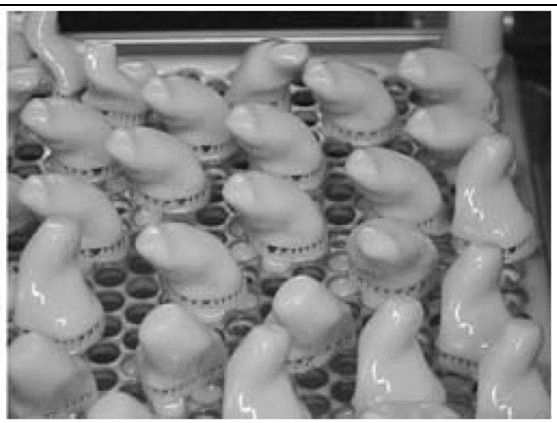
6.10.2.6 Bevorzugte Anwendungsbereiche für die additive Fertigung metallischer Bauteile

Aufgrund der vergleichsweisen hohen Fertigungskosten des SLM-Prozesses, bedingt durch die hohen Herstellkosten der Metallpulver und durch die langen Bauzeiten, haben sich nur einige wenige Anwendungsbereiche ökonomisch etabliert. Dazu zählen vor allem folgende Branchen

- Luft- und Raumfahrt
- Medizintechnik
- Werkzeugbau
- Schmuckherstellung

Einige illustrative Beispiele sind in Abb. 153 zusammengestellt.

<table>
<tr><td>  </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="2">Raumfahrtanwendung: Einspritzdüsensystem für Raketenantrieb (Projekt: addmanu, FOTEC, Wr.Neustadt)</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>Vorkammern aus IN718 für Gasmotore (Projekt: addmanu, GE Jenbacher, Jenbach)</td><td>Konturnahe und bionisch gestaltete Kühlung von Kunst-stoffformen (Projekt addmanu, Kunststofftechnik, Leoben)</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td></tr>
</table>



Reverse Eng. stereolithographische Herstellung von Gehäusen für Hörgeräte (Bildquelle: ReSound Corp, USA)

Abb. 153: Anwendungsbeispiele für SLM- und stereolithografisch gefertigte Komponenten

6.11 Werkzeugbau und Werkzeugmaschinen

Bei der Fertigung von Bauteilen in großer Serie kommt man am Werkzeug- bzw. Formenbau nicht vorbei, denn das werkzeugtechnische Wissen zählt zur Kernkompetenz der industriellen Fertigung. Die Schlüsselfunktion kommt auch durch folgende Faktoren

- Prozesssicherheit
- Prozessgeschwindigkeit
- Produktqualität
- Produktionskosten

zur Geltung.

6.11.1 Bedeutung des Werkzeugbaus

Ein Werkzeug ermöglicht die Herstellung von großen Stückzahlen (bis zu1 Mio. Produkte), wobei

- der Anteil an den Produktionskosten kleiner 5% ist, aber
- der Anteil an der Profitabilität der Produktion größer als 90% ist.

Der Werkzeugbau steht im Zentrum des fertigungstechnischen Know-hows, weil dadurch die Art, Anzahl, Reihenfolge und Geschwindigkeit von Fertigungsschritten in entscheidendem Masse beeinflusst werden. Der Werkzeugbau ist das Bindeglied zwischen Produktentwicklung und Serienproduktion.
Das Werkzeug

- ist die Grundlage für die Machbarkeit und Qualität der Serienartikel, und
- beeinflusst die Kosten der Serienfertigung entscheidend.

Dies sind auch die Gründe, warum jährlich ein Wettbewerb zum Werkzeugbau („Excellence in Production“) stattfindet, der vom Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen und dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT veranstaltet wird.
Ein weiteres Gebiet des Werkzeugbaus ist die Herstellung von Prüfmitteln und Vorrichtungen – dieses Thema wird aber hier aus Platzgründen nicht näher betrachtet. Viele konstruktive Ratschläge und Anwendungsbeispiele aus der Praxis finden sich in [Kra08, Kra18, Hes09] und in der Zeitschrift FORM+Werkzeug des Hanser-Verlags.

Der weltweite Werkzeugbedarf beträgt ca. 70 Mrd. Euro (Int. Special Tooling and Machining Association, ISTMA Europe, 2010, siehe www.istma-europe.org). Davon fallen zu je 20% auf USA und Japan, 11% auf China und ca. 16% auf Europa. Die Branche ist sehr arbeitsintensiv, d.h. der Personalkostenanteil am Umsatz beträgt bis zu 50%, während dieser im Maschinenbau nur bei ca. 30% und in der

Automobilindustrie bei ca. 25% liegt. Dies begründet auch das Outsourcing in den nahen und fernen Osten. Die Hauptabnehmer sind die Industriebereiche:

- Automobilindustrie (vor allem die Zulieferindustrie)
- Elektroindustrie
- Eisen-, Blech-, Metallwarenindustrie
- Kunststoffverarbeitende Industrie

Die Einbindung des Werkzeugbaus in die automobile Wertschöpfungskette zeigt Abb. 154.
Um die Durchlaufzeit im Werkzeugbauprozess zu reduzieren, werden bereits in einer frühen Phase Umformsimulationen durchgeführt, um auch die Anzahl der Optimierungsschleifen bei den Tryout-Pressen zu senken. Das vorrangige Ziel ist es, die Werkzeugzuverlässigkeit zu erhöhen, um eine effiziente und verlässliche Produktion zu erreichen.
Zur Abschätzung der nicht unerheblichen Werkzeugkosten gibt es spezielle Software-Systeme, wie z.B. den CostEstimator. (https://www.autoform.com/media/AutoForm-CostEstimator_en.pdf).

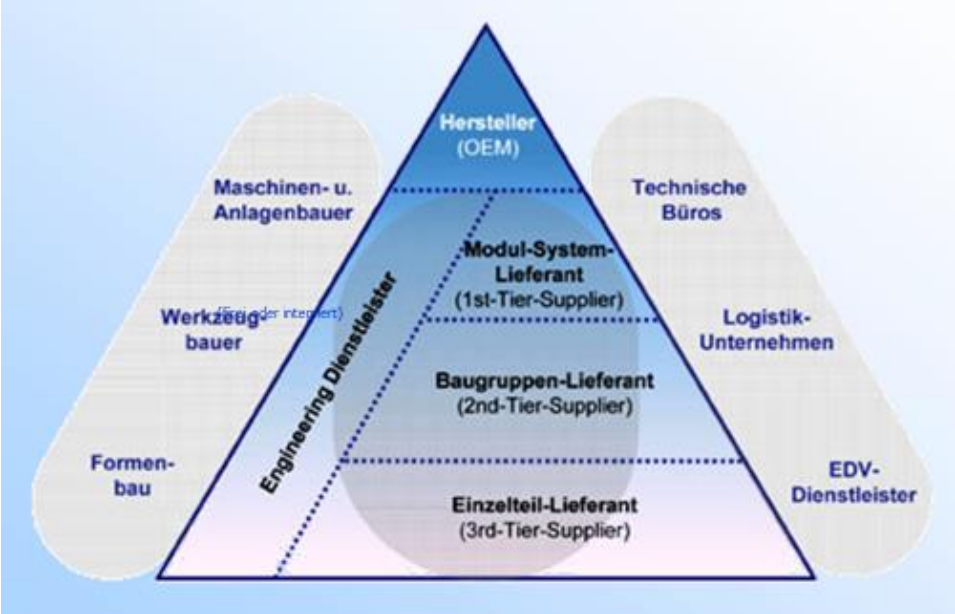


Abb. 154: Einbindung des Werkzeugbaus in die automobile Wertschöpfungskette

Laut einer Umfrage in der Industrie ergibt sich die in Abb. 155 dargestellte Häufigkeit der Werkzeugtypen, die in weitere Folge noch im Detail behandelt werden.

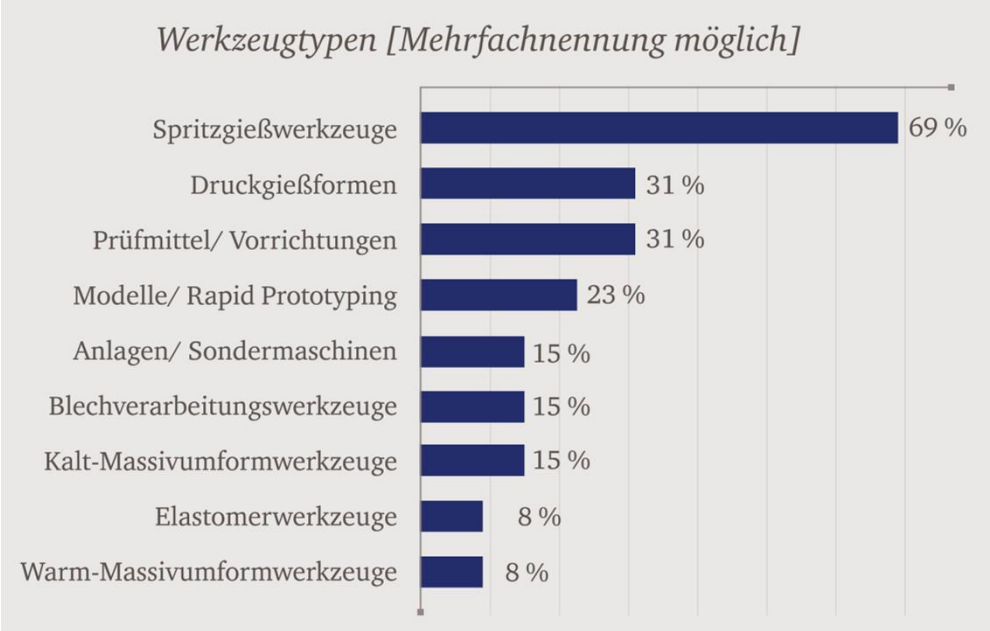


Abb. 155: Häufigkeit unterschiedlicher Werkzeugtypen [Boo17]

Die Bearbeitung der harten Werkzeuge erfolgt mit den üblichen, zerspanenden Technologien, die im Abschnitt 6.11.2 behandelt werden. Der Technologieeinsatz in Abhängigkeit vom Produktspektrum ist in Abb. 156 nach [Boo17] dargestellt. Die Hartbearbeitung erfolgt dabei häufig auf HSC-Fräsmaschinen.

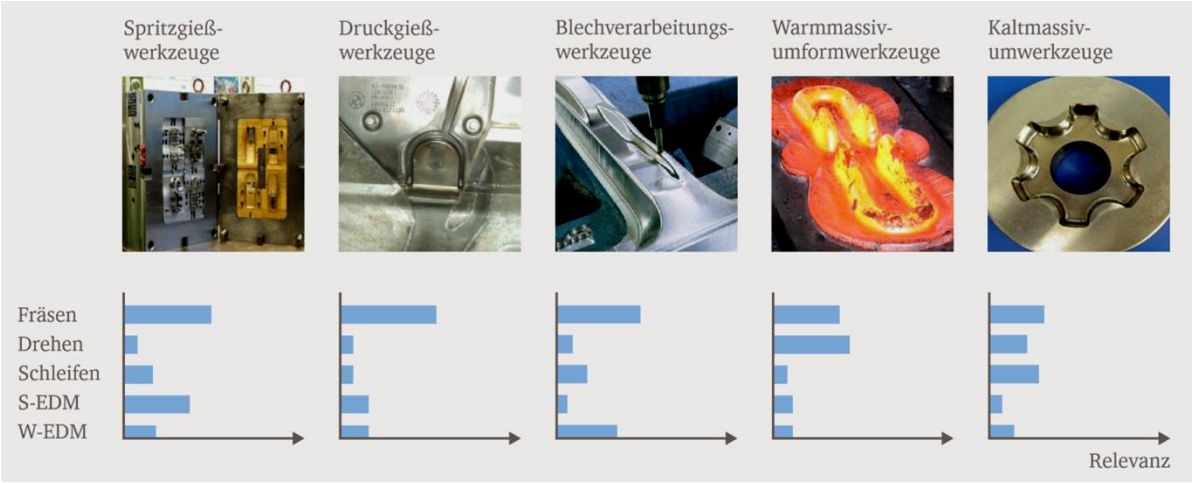


Abb. 156: Technologieeinsatz zur Fertigung unterschiedlicher Werkzeugtypen [Boo17]

Den Nachteil der höheren Lohnkosten versucht man durch Innovationen, Termintreue, höhere Produktivität, Präzision u.a.m. zu entgegnen. Dazu kommen noch die Standardisierung,

Mehrmaschinenbedienung und Erhöhung des Qualifikationsprofils. Der Anteil an angelernten Kräften ist gering.

6.11.1.1 Spritzgießwerkzeuge

Spritzgießwerkzeuge werden nach Anzahl der Formhohlräume (Kavitäten), nach der Art des Angusssystems, nach der Anzahl der Trennebenen und nach Art der Entformung unterschieden. Ein einfaches Werkzeug mit den wesentlichen Komponenten zeigt Abb. 157.
Sehr wesentlich ist auch die Werkzeugtemperierung und -kühlung, weil damit die Zykluszeit bzw. die Produktivität beeinflusst wird.
Detaillierte Beschreibungen zu den Werkzeugen, aber auch zu den Spritzgussmaschinen sind in der unten angeführten Literatur [Kra08, Men07] zu finden.

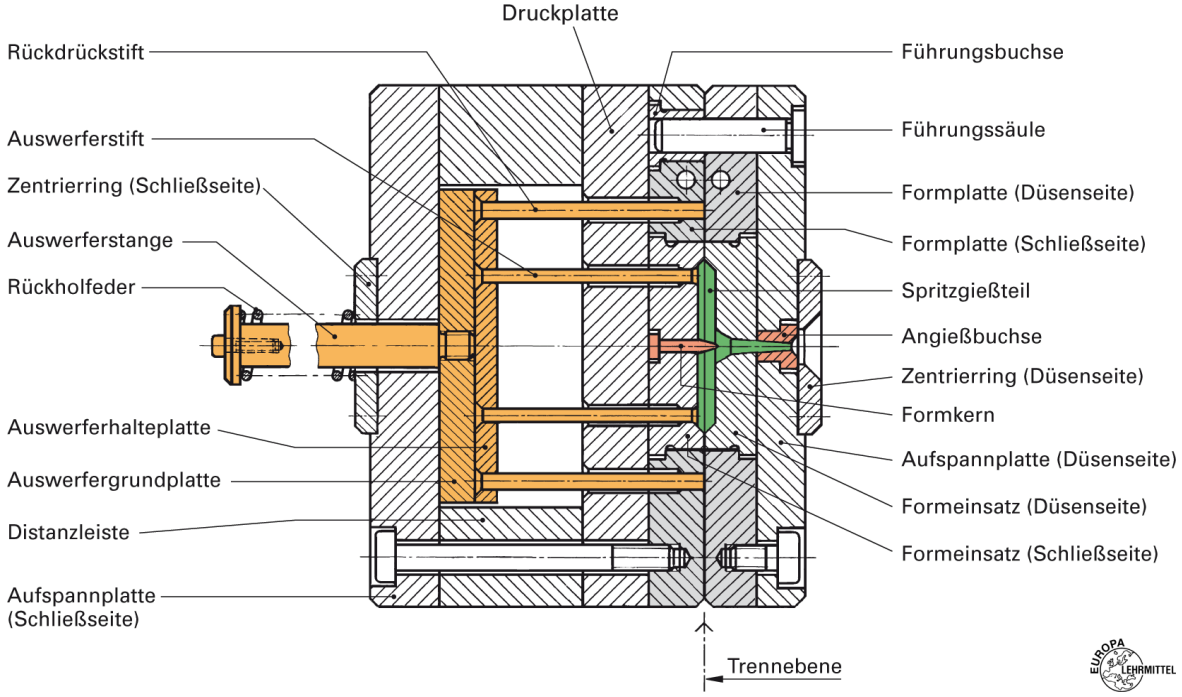


Abb. 157: Einfaches Spritzgießwerkzeug [Fri10]

6.11.1.2 Druckgusswerkzeuge

Im Automobilbau findet das Al-Druckgießen eine hohe Anwendung, weil hochpräzise Bauteile mit hoher Produktivität erzeugt werden können. Die Druckgusswerkzeuge unterliegen einem ständigen Temperaturwechsel (thermische Ermüdung, LCF-Beanspruchung) bei Spitzentemperaturen bis zu 650°C. Dafür werden hochwarmfeste Warmarbeitsstähle (bspw. X40CrMoC5-1 oder 1.2344) verwendet.
Aufgrund der hohen Gießdrücke (bis 200MPa) sind mit dem Verfahren wesentlich kleinere Wandstärken im Vergleich zu Sand- und Kokillenguss möglich. Die hohen Temperaturen und Formfüllgeschwindigkeiten bis zu 12 m/s führen auch zu einem relativ großen Verschleiß bzw. zu reduzierten Lebensdauern.

6.11.1.3 Blechverarbeitungswerkzeuge

6.11.1.3.1 Stanzwerkzeuge

Zu den häufigsten Metallverarbeitungsprozessen zählen das Stanzen und das Biegestanzen. Man unterscheidet dabei ein Schneiden mehrerer Schnittlinien am gleichen Werkstück mit einem Hub und das Folgeschneiden in mehreren Hüben.
Kleinteile (bspw. Stecker, Federn, Hülsen etc.) werden mit Hochleistungsstanzmaschinen und einer Hubzahl von bis zu 4000 Hüben/min gefertigt. Die Teile werden direkt vom Coil ausgestanzt, die Nennkraft der Pressen liegt zwischen 250 und 40000 kN.
Die für die Qualität entscheidende Kenngröße ist der Schneidspalt, also der Abstand zwischen den sich aneinander vorbei bewegenden Schneidkanten. Der Schneidspalt beträgt zwischen 0,5 und 5% der Blechdicke, wobei man im ersten Fall von Präzisionsschnitt spricht.
Der Schneidspalt beeinflusst:

- den Anteil der Schnitt- und Bruchfläche bzw. die Oberflächengüte der Schnittfläche
- den Einzug und die Konizität der Schnittflächen
- die Maßgenauigkeit des Stanzteiles
- die erforderliche Schneidkraft
- den Verschleiß des Schneidwerkzeuges und damit die Werkzeuglebensdauer

6.11.1.3.2 Folgeverbundwerkzeuge

Bei mehrfachen Stanz-, Biege- oder Tiefziehoperationen wird ein Blechstreifen so lange um eine bestimmte Vorschublänge durch das Werkzeug getaktet bis die letzte Station (Trennvorgang) erreicht ist. Es können auch andere Verfahren wie Gewindeformen oder Fügeprozesse ins Werkzeug integriert werden. Abb. 158 zeigt ein Beispiel für ein Folgeverbundwerkzeug mit dem Streifenbild [Dol13].
Durch die Vereinigung mehrerer Arbeitsgänge in einem Verfahren können Werkzeugkosten, Rüst- und Stückzeiten und damit die Durchlaufzeit reduziert werden.

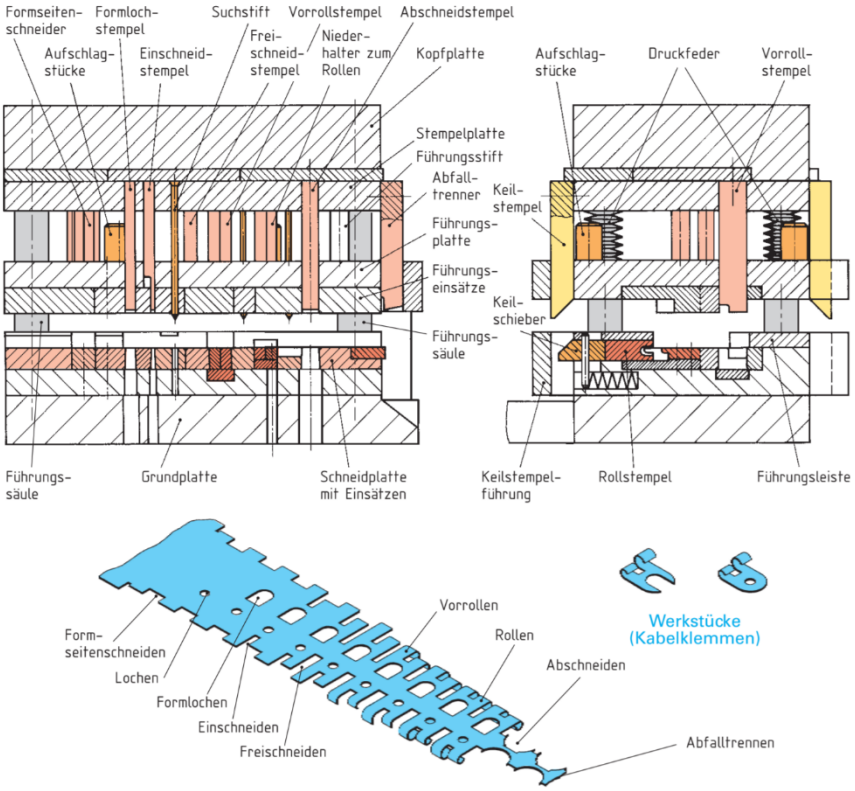


Abb. 158: Folgeverbundwerkzeug mit Streifenbild aus [Dol13]

6.11.1.3.3 Transferwerkzeuge

Im Transferwerkzeug werden zuerst einzelne Blechstücke in der Trennstation abgetrennt. Die abgetrennten Einzelteile werden dann mittels Greiferschiene und einer mit der Presse gekoppelten Transfereinrichtung von Station zu Station transportiert, siehe Abb. 159.

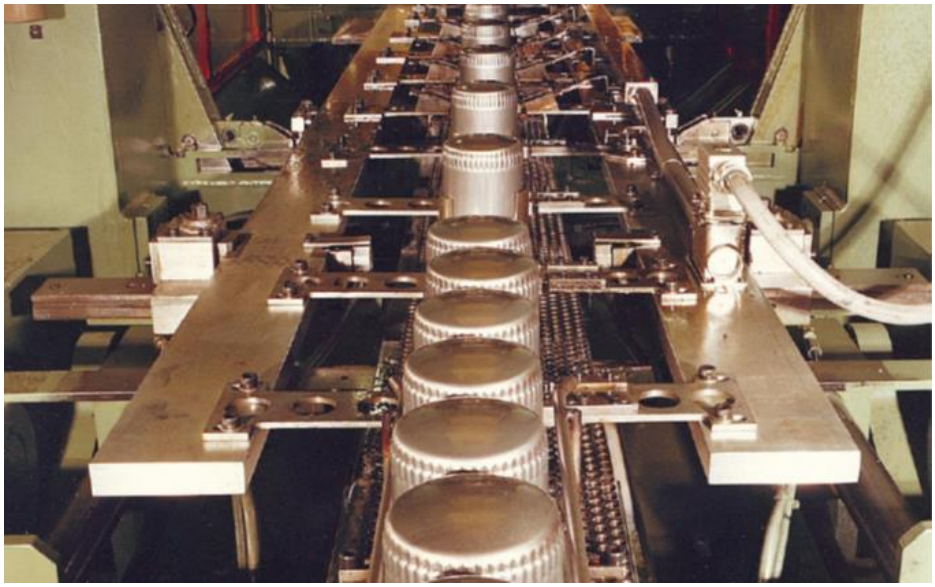


Abb. 159: Werkzeugraum einer Transferpresse bei der Fertigung von Ölfiltergehäusen mit Greiferschiene

6.11.1.3.4 Großwerkzeuge

Bei großen Bauteilen und mechanisiertem Transport in mehreren Stufen in Pressenlinien der OEMs (VW, Daimler) oder bei Tier1-Zulieferern (Magna) werden massive Werkzeuge benötigt. Die Produktionsgeschwindigkeiten üblicher Pressenstraßen liegen bei ca. 13 Hübe/min. Die Ober- und Unter-Werkzeuge wiegen je ca. 20 Tonnen, siehe Abb. 160.

Abb. 160: Linienwerkzeug zur Fertigung einer Autotür

6.11.1.4 Kalt-Massivumformwerkzeuge

Fließpressen wird meist für nahezu axialsymmetrische Kleinteile in großer Stückzahl angewandt. Die Vorteile sind: hohe Werkstoffausnutzung, hohe Maßgenauigkeit, hohe Oberflächengüte, kurze Zykluszeiten, komplexe Geometrien, günstiger Faserverlauf und Kaltverfestigung. Aufgrund der hohen Fließspannungen bei Raumtemperatur und der Reibungskräfte sind die KFP-Werkzeuge sehr hoch belastet, weshalb meist Hartmetall-Einsätze verwendet werden. Rissbildungen an Runden bzw. Querschnittsübergängen sind eine häufige Schadensart. Durch FEM-Studien mit integrierten Schädigungsmodellen kann die Stadienfolge und die Lebensdauer der Werkzeuge optimiert werden. In manchen Fällen wird durch eine Vorspannung der Werkzeuge, durch sog. armierte Werkzeuge, die Belastbarkeit bei schwierig umformbaren Werkstoffen oder komplexen Bauteilgeometrien erhöht. Zur

Absenkung der Reibwerte zwischen Werkstück und Werkzeug werden die Ausgangsmaterialien phosphatiert, dies kann auch mit dem Ölfilm Kaltverschweißungen verhindern.
Prinzipiell besteht auch die Möglichkeit warm oder halbwarm umzuformen, vor allem dann, wenn größere Teile gefertigt werden sollen.
Durch die hohe Produktivität und exzellente Oberflächengüte hat das Fließpressen einen hohen Stellenwert in der Zulieferindustrie gefunden. Unterstützt wird die rasche Fertigung durch schnelle und zuverlässige Umformmaschinen, siehe Abb. 161.

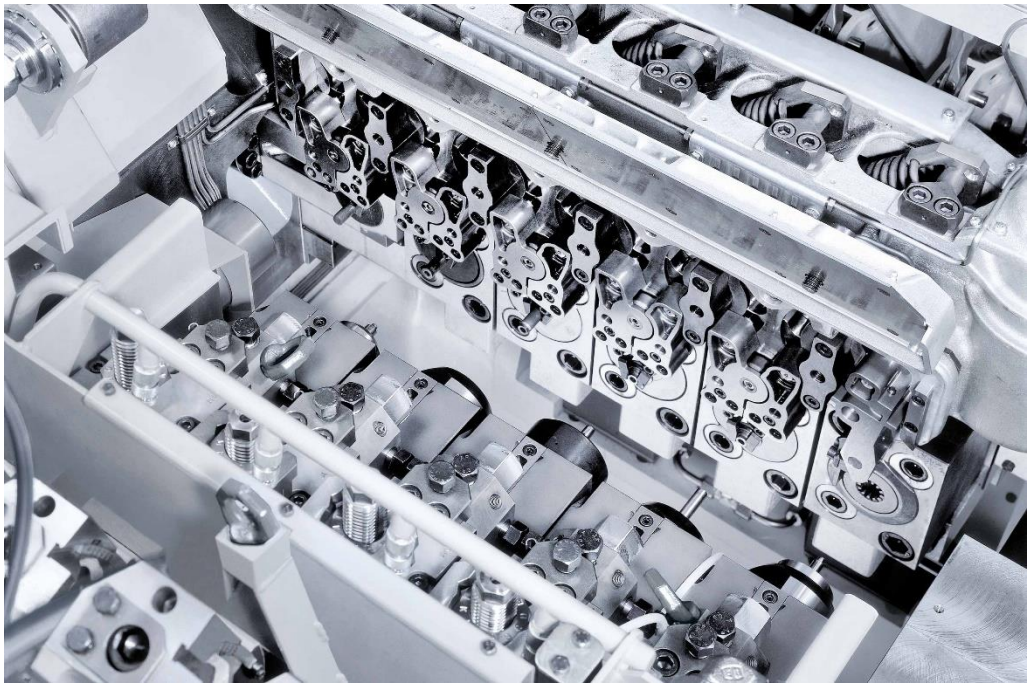


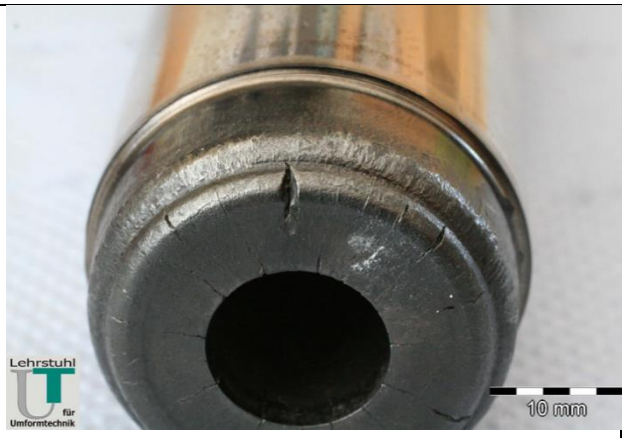
Abb. 161: Eingebauter Werkzeugsatz für mehrstufige Kaltumformung in Maschine vom Typ Hatebur

6.11.1.5 Warm-Massivumformwerkzeuge

Typische Warm-Massivumformwerkzeuge sind Schmiedegesenke, die meist aus Warmarbeitsstahl gefertigt sind. Die Gravur wird endabmessungsnah durch Fräsen hergestellt und unterliegt im Betrieb starkem Verschleiß (= 70% der Schadensursachen), mechanischer und thermischer Rissbildung, sowie plastischer Verformung. In Abb. 162 sind zwei geschädigte Werkzeuge nach einigen tausend Zyklen dargestellt. Durch Nacharbeiten der Kontur, Aufpanzern mit Stelliten (CoCr-Leg.) oder Ni-

Basislegierungen, sowie durch Nitrieren der Werkzeuge versucht man die Lebensdauer der Werkzeuge zu verlängern und Kosten zu sparen.

a) Flanschwerkzeug mit starken Verschleißspuren und Brandriss-Merkmalen



b) Auswerfer-Werkzeug eines Auswerfers einer Hatebur-Warmumformmaschine mit thermischen Ermüdungsrissen und Materialausbrüchen

Abb. 162: Aussehen von Warmarbeitswerkzeugen nach einigen tausend bis zwanzigtausend Schlägen

Die Genauigkeit der formgebenden Werkzeuge wirkt sich unmittelbar auf die Werkstückgenauigkeit aus. Durch genaueren Zuschnitt, Berücksichtigung der elastischen Auffederung der Maschine und geschickte Ausgangs- und Zwischenformen kann die Genauigkeit deutlich erhöht werden. Genauschmiedeteile weisen eine um drei IT-Qualitätsstufen höhere Genauigkeit auf, was durch Schmieden im geschlossenen Gesenk, durch Halbwarmumformung oder durch Kombination Warm- und Kaltumformung erreicht werden kann. Rotationssymmetrische Werkstücke können kalt durch Präzisionsschmieden hergestellt werden, wobei die Wirkflächen eine Genauigkeit haben, die einer spanenden Schlichtbearbeitung gleichzusetzen ist.

6.11.2 Werkzeugmaschinen

Zur Fertigung von präzisen und komplexen Werkzeugen in geringen Stückzahlen gibt es eine Vielfalt an Werkzeugmaschinen. Allein diese Branche verbucht jährlich einen Umsatz von ca. 60 Mrd. Euro.
Im Folgenden werden Werkzeugmaschinen, die entweder für die Fertigung von Werkzeugen oder aber auch für die Fertigung der Endprodukte Verwendung finden. In den meisten Fällen ist aber die Produktivität im Vergleich zu den zuvor genannten werkzeuggebundenen Fertigungsverfahren deutlich geringer. Aber diese Bearbeitungsmaschinen zeichnen sich durch eine hohe Genauigkeit und Flexibilität aus. Sie bilden die Grundausrüstung für den Werkzeugbau in großen Produktionsstätten.

6.11.2.1 Klassifizierung von Werkzeugmaschinen

In Abb. 163 ist die Klassifizierung von Fertigungsanlagen oder Werkzeugmaschinen nach den Fertigungsverfahren dargestellt.

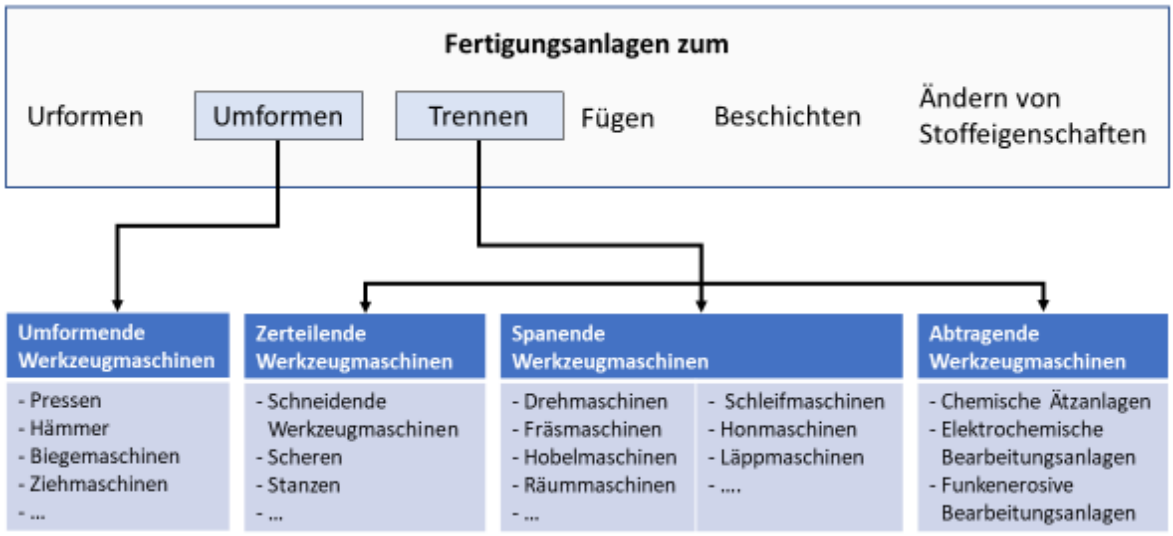


Abb. 163: Klassifizierung von Fertigungsanlagen und Werkzeugmaschinen nach den Fertigungsverfahren nach [Hir12]

6.11.2.1.1 Umformende Werkzeugmaschinen

Die Maschinen der Massivumformung sind neben den Umformwerkzeugen die wichtigsten Betriebsmittel zur Herstellung eines Umformteils. Sie müssen hohe Kräfte und Energien bereitstellen und die Umformwerkzeuge genau führen. Sie müssen eine hohe Produktivität haben, damit sich die hohen Investitionskosten in wenigen Jahren amortisieren. Wie in Abb. 164 gezeigt, kommen drei verschiedene Maschinenarten zum Einsatz.

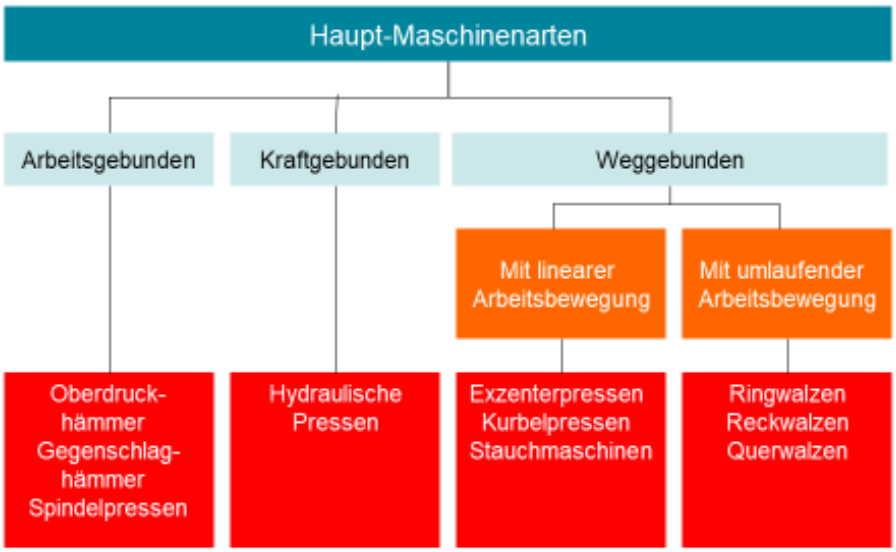


Abb. 164: Maschinentypen für die Schmiede- bzw. Umformtechnik nach IMU Hagen

Die Auswahl der Umformmaschinen hängt vom Vorgang, Werkstück (Geometrie, Größe, Werkstoff), von der zu fertigenden Stückmenge, dem möglichen Automatisierungsgrad und anderen Gesichtspunkten ab. Eine Unterstützung bei der Auswahl geeigneter Umformmaschinen gibt Tabelle 52.

	weggebunden	**energiegebunden**	**kraftgebunden**
Typischer Einsatzbereich	Großserie (Massenteile)	Klein-/ Großserie	Klein/ Großserie
Mengendurchsatz	+++	++	+
Automatisierbarkeit	++	+ (Hammer -)	+
Energieeinhalt	+	++ (Hammer -)	+
Umformgeschwindigkeit	+	+	-
Druckberührzeit	+	+	--
Notwendige Anschlussleistung*	+	+	--

Tabelle 52: Auswahlkriterien für den richtigen Umform-Maschinentyp

Umformende Maschinenkonzepte folgen meist den spezifischen Kundenbedürfnissen, d.h. die Maschinen werden kundenorientiert je nach Produktgruppe. Die Anpassung geht von mechanischen Stanzbiegeautomaten über hybride Bearbeitungszentren bis hin zu servogesteuerten Produktions- und Montagesystemen. Die integrierbaren Technologien umfassen: Stanzen, Biegen, Gewindefertigen, Schweißen, Bördeln, Entgraten, Federwinden, Laserbeschriften, Prägen, Rollen, Senken, Taumeln, Verstemmen u.a.m. Einen Eindruck über die Vielfalt an Teilen bzw. komplexen Baugruppen (Zündkerzen, Scheibenwischer, Kopfstützen etc.), die für die Automobilindustrie mit flexiblen oder maßgeschneiderten Maschinenkonzepten produziert werden können zeigt Abb. 165.
Ein leistungsstarkes Maschinensystem mit zwei Bearbeitungsseiten zur Massenfertigung großer Stanzbiegeteile und Baugruppen zeigt Abb. 166. Die Produktionsgeschwindigkeit erreicht 150 Hübe pro Minute.

Abb. 165: Stanzbiegeteile, wie sie in großer Stückzahl im Automobilbau benötigt werden. (Bildquelle: Otto Bihler Maschinenfabrik GmbH&Co.KG, Halblech)

Abb. 166: Hybrides Produktionssystem für die Massenfertigung von Typ MC120 (Bildquelle: Otto Bihler Maschinenfabrik GmbH&Co.KG, Halblech)

6.11.2.1.2 Zerteilende Werkzeugmaschinen

Stanzmaschinen zeichnen sich durch eine hohe Produktionsrate aus. Zur Beherrschung der Fliehkräfte müssen die schnell bewegten Umformmaschinen (bis zu 4000 Hübe/min) mit einem Massenausgleichsystem operieren. Ein führendes System auf diesem Gebiet ist jenes der Schweizer Fa. Bruderer. Abb. 167 zeigt das Massenausgleichssystem der Bruderer-Maschine.

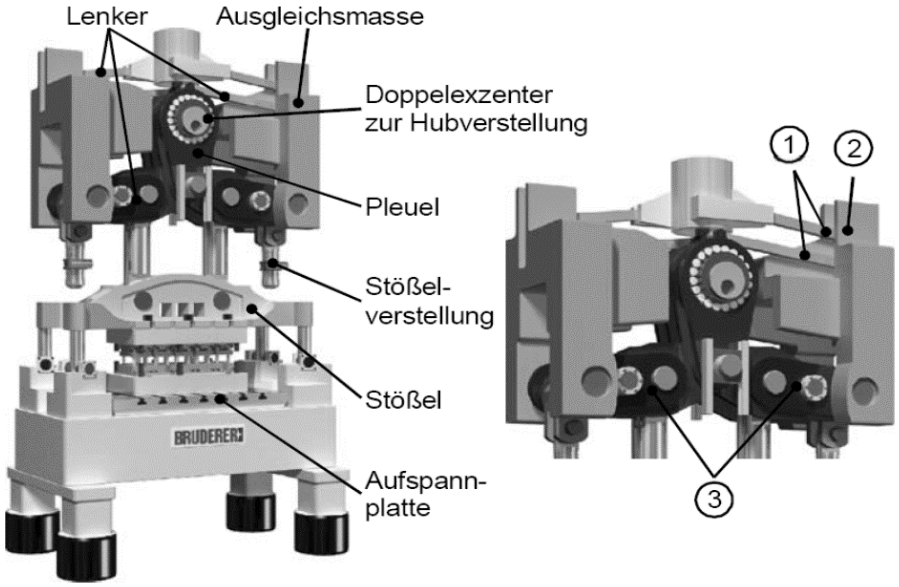


Abb. 167: Massenausgleichssystem [Quelle: Fa. Bruderer, CH]

Neben den mechanischen Schneidmaschinen gibt es auch noch eine Reihe anderer Möglichkeiten, wie bspw. das Laser- und das Wasserstrahlschneiden. Letzteres zeichnet sich durch folgende Vorteile aus:

- keine Wärmeeinbringung, damit keine Gefügeveränderungen im Bauteil und kein Verzug
- glatte Schnittflächen, ohne Grat
- Anwendung für einen großen Dickenbereich (0,5 bis 200 mm)
- Bis auf wenige Ausnahmen sind nahezu alle Werkstoffe schneidbar

6.11.2.1.3 Spanende Werkzeugmaschinen

Die spanenden Maschinen zählen mit etwa 60% des Produktionswertes aller Werkzeugmaschinen zu den wichtigsten. Zu ihnen gehören neben Dreh- und Fräsmaschinen auch Bohr-, Hobel-, Stoß-, Räum-, Säge-, Schleif, Hon- und Läppmaschinen. Bearbeitungszentren, Flexible System, Drehmaschinen und Drehzentren, sowie Fräsmaschinen tagen circa zur Hälfte zum Produktionsanteil der spanenden Maschinen bei. Deutliche Unterschiede betreffen den Automatisierungsgrad und die Produktivität. Man unterscheidet zwischen

- Standard-Werkzeugmaschinen
- Flexible Fertigungssysteme
- Kundenspezifische Sondermaschinen
- Transferstraßen bzw. Fertigungslinien

Für die Auswahl der spanenden Werkzeugmaschinen ist die Flexibilität und gegenläufig, die zu fertigende Stückzahl bzw. die Ausbringung entscheidend, siehe Abb. 168.

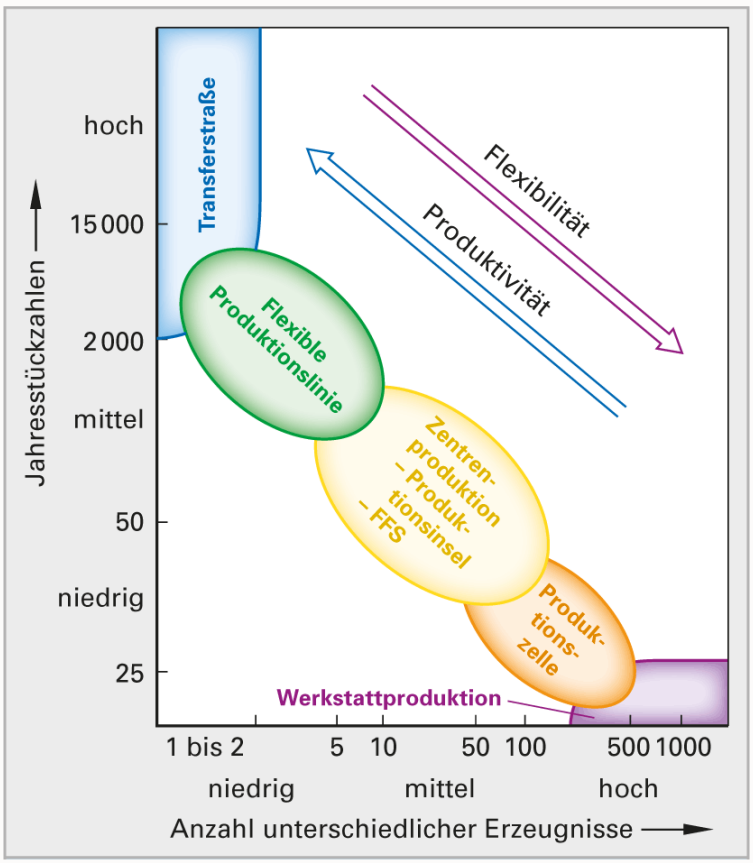


Abb. 168: Auswahlkriterien für spanende Bearbeitungsmaschinen und -zentren. (Bildquelle: Fachbuch Produktion, Lehrmittel Europa)

6.11.2.1.4 Abtragende Werkzeugmaschinen

Hier sind vor allem die Technologien der Elektroentladung und der elektrochemischen Bearbeitung zu nennen.
Das Verfahrensprinzip der Funkenerosion oder auch EDM (electro-discharge-machining) und typische Bauteile sind in Abb. 169 dargestellt. Es können damit auch sehr harte, dünne und spröde Werkstoffe ohne Verzug und sehr präzise bearbeitet werden. Nachteilig ist, dass nur elektrisch leitfähige Materialien bearbeitet werden können und die Abtragraten relativ niedrig sind.
Wichtige Anwendungsbereiche sind die Fein- und Mikrotechnik mit Dimensionen bis zu 10µm.

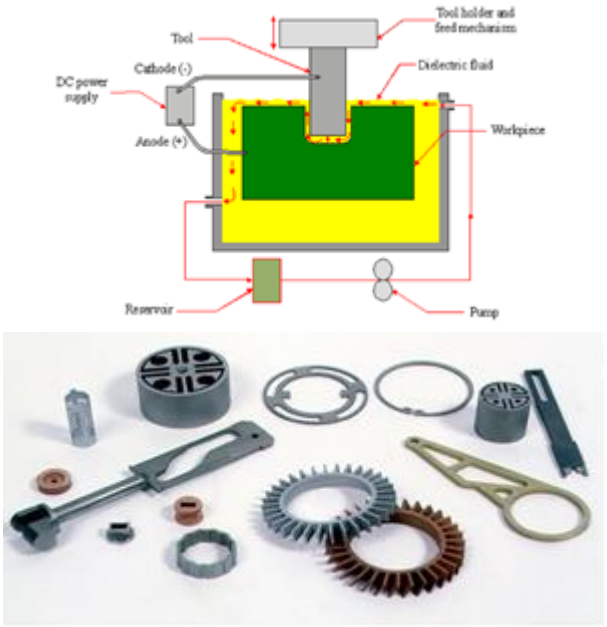


Abb. 169: EDM-Prinzip und Bauteile [NITC.ac.in]

Beim Verfahren ECM (electro-chemical-machining) werden die Bauteile weder thermisch noch mechanisch belastet. Es können damit geometrisch sehr komplexe Bauteile mit glatten Oberflächen aus hochfesten Werkstoffen, wie z.B. für Turbinenschaufeln, Düsen und andere Teile für die Luftfahrt gefertigt werden. Scharfe Kanten werden jedoch etwas erodiert. Abb. 170 zeigt das Verfahrensprinzip und einige damit gefertigte Bauteile. Nachteilig sind die hohen Investitionskosten, weshalb die Methode nur in speziellen Bereichen, wie Luft- und Raumfahrt, sowie Medizintechnik beschränkt.

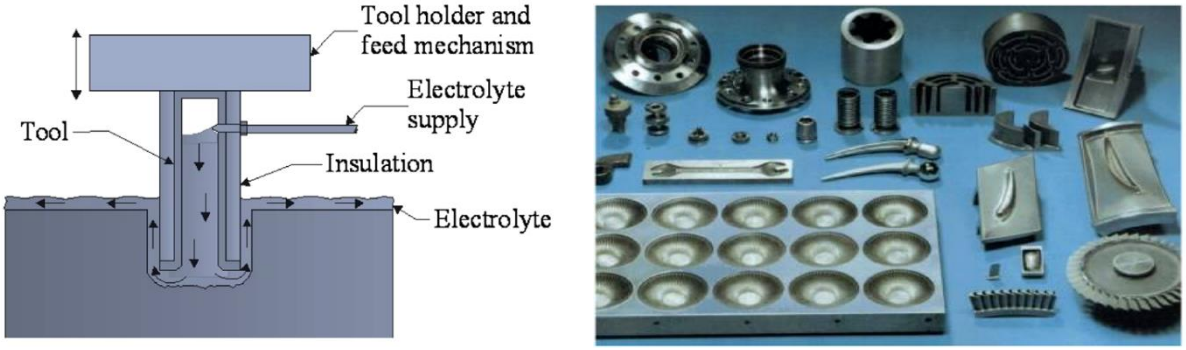


Abb. 170: ECM-Prinzip und Bauteile [NITC.ac.in]

6.11.3 Der Laser als universelles Werkzeug in der Fertigung

Je nach Laserintensität und Geschwindigkeit bzw. Bestrahldauer kann der Laser für unterschiedliche Fertigungsprozesse verwendet werden, wie Abb. 171 zeigt.

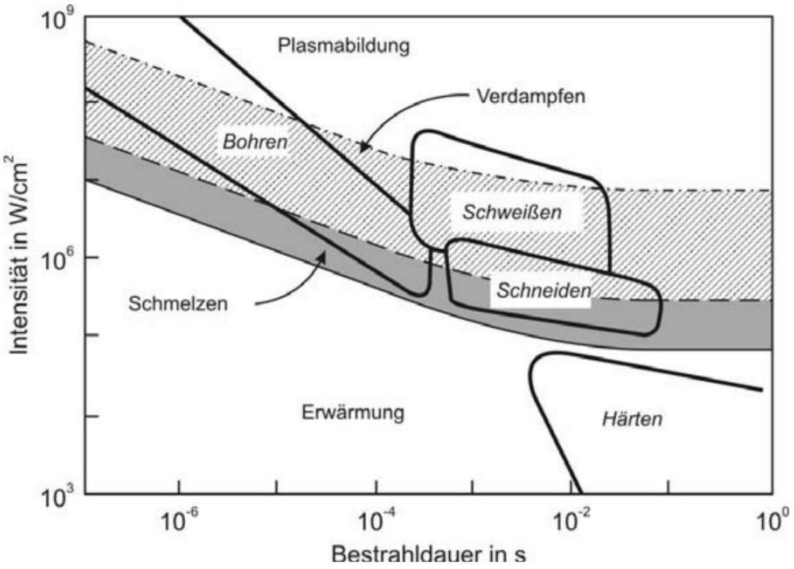


Abb. 171: Die Bereiche des Erwärmens, Schmelzen und Verdampfens im Parameterfeld Laserintensität über Bestrahldauer, sowie zugehörige Bereiche einiger Fertigungsverfahren. [Hue09]

6.11.3.1 Laserschneiden

Die Vorteile gegenüber anderen thermischen Verfahren liegen in der sehr viel höheren Schneidgeschwindigkeit, der größeren Maßhaltigkeit und Formtreue und in der geringeren Breite der Wärmeeinflusszone. Das Laserschneiden benötigt eine hohe Leistung (einige kW), meist kommt der CO_2-Laser zum Einsatz. Die optimalen Parameter sind vom zu schneidenden Material und dessen Dicke abhängig. Abb. 172 zeigt den Zusammenhang zwischen der Schneidgeschwindigkeit und der Blechdicke bei gegebener Laserleistung.

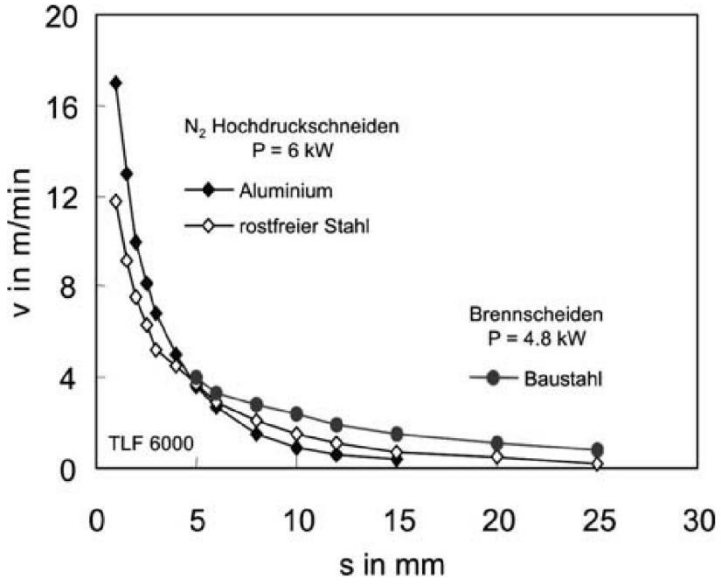


Abb. 172: Schneidgeschwindigkeit für unterschiedliche Blechstärken und Materialien [Hue09]

Die entstehenden Rauigkeiten an den Schnittflächen hängen ab vom Material, von der Blechdicke (dünn besser als dick) und von der Gasart ab. Die R_z-Werte liegen zwischen 2 und 20µm.
Am häufigsten wird das Laserschneiden bei Blechbauteilen angewandt und steht dort in Konkurrenz zum Stanzen, wobei das Laserschneiden bei niedrigen Wiederholzahlen einer Kontur sogar wirtschaftlicher sein kann. Beim Laserschneiden von Rohren und Profilen besteht diese Konkurrenzsituation nicht, weshalb auch größere Stückzahlen gefertigt werden. Eine erprobte Anwendung ist der Beschnitt von Prototyp-Tiefziehteilen nach dem Ziehen auf Tryout-Pressen.

6.11.3.2 Laserschweißen

Je nach Wärmeeinbringung bzw. Streckenenergie wird entweder nur erwärmt oder aber auch verdampft, demnach unterscheidet man zwischen dem Wärmeleitungsschweißen und dem Lasertiefschweißen. Es werden CO2- und YAG-Laser verwendet, wobei letzterer wegen der besseren Absorption eher bei Al- und Cu-Bleche bevorzugt wird. Die erreichbare Schweißtiefe ist von Material, Laserleistung und von der Schweißgeschwindigkeit abhängig.
Aufgrund der guten Kontrollierbarkeit des Prozesses, der geringen Wärmeeinbringung und der hohen Schweißgeschwindigkeiten (bis zu 20 m/min) gewinnt dieses Verfahren ständig an Bedeutung. Im Karosseriebau werden damit sog. Tailored Blanks gefügt, das sind Blechplatinen, die aus Einzelblechen mit unterschiedlichen Dicken, Materialien oder Beschichtungen bestehen. Ein ebenfalls bekanntes Beispiel ist das gasdichte Verschweißen von Herzschrittmachern.
Eine besondere, moderne Anwendung hat das Laserschweißen für die additive Fertigung als SLM (selective laser melting im Fließbett) und als LMD (laser metal deposition) gefunden, was durch den

kleinen Strahldurchmesser (ca. 0,1mm), der guten Ablenkbarkeit und Leistungskonstanz begründet werden kann.

6.11.3.3 Weitere Laseranwendungen

Die zuvor genannten Technologien finden sich wohl am häufigsten im Einsatz [Pop06, Bli13]. Es gibt aber auch noch die Verfahren

- Laserlöten
- Laserbohren
- Laserbeschriften
- Laserstrukturieren
- Laserhärten (Umwandlungshärten)
- Laserumschmelzen, -legieren, -dispergieren
- Laserbeschichten
- Laserbiegen
- Laserstrahlpolieren

Diese Aufzählung mit den vielfältigen Anwendungsfeldern und die sehr ausgereiften, kommerziell angebotenen Technologiepakete zeigen die Flexibilität und Bedeutung des Werkzeugs Laserstrahl.

6.12 Literaturangaben zu Kapitel 6

Kap. 6.1

[Ash04] M.F.Ashby, Y.J.M.Brechet, D.Cebon, L.Salvo: Selection strategies for materials and processes, Materials and Design 25, 2004, 51-67

[Awi12] B.Awizus, J.Bast, H.Dürr, K.-J.Matthes (Hrsg.): Grundlagen der Fertigungstechnik, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 5.Aufl. 2012

[Fri98] H.A. Fritz: Fertigungstechnik, Springer Verlag, 4.Aufl., 1998

[Gro13] M.P.Groover: Fundamentals of Modern Manufacturing, John Wiley&Sons, 5th ed., 2013

[Gup09] H.N.Gupta, R.C.Gupta, A.Mittal: Manufacturing Processes, 2nd ed., New Age Int. New Delhi, 2009

[How03] L.Howard, H.Lewis: The development of a database system to optimise manufacturing processes during design, J. of Mat. Processing Technology 134, 2003, 374-382

[Kal10] S.Kalpakjian, S.R.Schmid: Manufacturing Engineering and Technology, 6th ed., Prentice Hall, Pearson, 2010

[Lov98] A.M.Lovatt, H.R.Shercliff: Manufacturing process selection in engineering design. Part 1: the role of process selection, Materials & Design 19, 1998, 205-215

[Lov98-2] A.M.Lovatt, H.R.Shercliff: Manufacturing process selection in engineering design. Part 2: a methodology for creating task-based process selection procedures, Materials and Design 19, 1998, 217-230

[Man18] M.R.Mansor, S.M.Sapuan: Concurrent Conceptual Design and Materials Selection of Natural Fiber Composite Products, Chapt.4 Manufacturing Process Selection, Springer Briefs in Materials, 2018, 45-58

[Mar20] D.Marini, J.R.Corney: Process selection methodology for near net shape manufacturing, Int. J. Adv. Manufact Technol 106, 2020, 1967-1987

[Nee15] A.Y.C.Nee (ed.): Handbook of Manufacturing Engineering and Technology, Springer London, 2015

[Per98] M.Perzyk, O.K.Meftah: Selection of manufacturing process in mechanical design, J. of Mat. Processing Technology 76, 1998, 198-202

[Pol12] Braun: 50 Jahre Produktinnovationen, Dumont, 2012

[She01] H.R.Shercliff, A.M.Lovatt: Selection of manufacturing processes in design and the role of process modelling, Progress in Materials Science 46, 2001, 429-459

[Sko18] W.Skolaut: Maschinenbau – Ein Lehrbuch für das ganze Bachelor-Studium, Springer Vieweg, 2.Aufl. 2018

[Ste08] G.Steinbichler: Methoden und Verfahren zur Optimierung der Bauteilentwicklung für die Spritzgießfertigung, Dissertation Uni Erlange-Nürnberg, Erlangen, 2008

[Swi03] K.G.Swift, J.D.Booker: Process Selection – From Design to Manufacture, Butterworth-Heinemann, Burlington, MA, 2nd ed., 2003

[Wit06] G.Witt: Taschenbuch der Fertigungstechnik, Fachbuchverlag Leipzig, 2006

Kap. 6.2

[Cha95] O.L.Chau, C.Parkan: Selection of a manufacturing process with multiple attributes: A case study, J.Eng.Technol.Mangement 12, 1995, 219-237

[Dar96] S.M.Darwish, A.M.El-Tamimi: The selection of the casting process using an expert system, Computers in Industry 30, 1996, 77-86

[Luk17] D.Lukic, M.Milosevic, A.Antic, S.Borojevic, M.Ficko: Multi-criteria selection of manufacturing processes in the conceptual process planing, Adv. In Production Eng. & Management 12, 2017, No.2, 151-162

[Man18] M.R.Mansor, S.M.Sapuan: Concurrent Conceptual Design and Materials Selection of Natural Fiber Composite Products, Chapt.4 Manufacturing Process Selection, Springer Briefs in Materials, 2018, 45-58

[Sta13] J.Stahlmann, S.Wohletz: Prozessketten in der Umformindustrie, ZWF 108, 2013, H.4, 229-233
[Wan14] S-I.Wang, L.Guo, L.Kang, C-S.Li, X-Y.Li, Y.M.Stephane: Research on selection strategy of machining equipment in cloud manufacturing, Int J Adv Manuf Technol 71, 2014, 1549-1563
[Yaz18] M.Yazdani, P.Chatterjee: Intelligent decision making tools in manufacturing technology selection, in: S.S.Sidhu et.al..(ed): Futuristic Composites, Materials Horizons, From Nature to Nanomaterials, Springer Nature Singapore, 2018, 113-125

Kap. 6.3

[BDG17] Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie e.V.: Sand- und Kokillenguss aus Aluminium, Technische Richtlinien, Düsseldorf 2017
[Bon16] C.Bonten: Kunststofftechnik – Einführung und Grundlagen, Hanser, 2.Aufl., 2016
[Dom12] H.Domininghaus, P.Elsner, P.Eyerer, T.Hirth: Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen, Springer, 8.Aufl., 2012
[Eye08] P.Eyerer, T.Hirth, P.Elsner: Polymer Engineering – Technologie und Praxis, Springer, 2008
[GKN] GKN Sinter Metals, Werkstoffe und Verfahren, Broschüre, Radevormwald
[Gra16] M.Graf, M.Ullmann: Einfluss des Materialzustandes einer EN-AW 6.xxx-Legierung auf das Umformverhalten und die FE-Berechnung, Vortrag SAXSIM 2016, TU Chemnitz, 22.3.2016
[Ham13] L.Hamm, B.Krautkrämer, R.Malik, V.Peitz, R.Plank, P.Solfrank: Werkstoffe und Fertigungsverfahren, in: H.-H.Braess, U.Seiffert (Hrsg.), Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, 1039-1110
[Hop17] C.Hopmann, W.Michaeli: Einführung in die Kunststoffverarbeitung, Hanser, 8.Aufl., 2017
[Rav00] R.Raviwongse, V.Allada, T.Sandidge: Plastic manufacturing process selection methodology using self-organising map (SOM)/Fuzzy Analysis, Int J Adv Manuf Techno 16, 2000, 155-161
[Ric00] I.Richter: Entscheidungskriterien zur Auswahl geeigneter Fertigungsverfahren, Brevier Keramikverband, 2000
[Sch14] R.Schledjewski, H.Grössing, S.Konstantopolous, C.Hueber, M.Tonejc: Christian Doppler Laboratory for High Efficient Composite Processing, BHM 159, 2014, 41-49
[VDD16] Verband Deutscher Druckgießereien (VDD), Hrsg.: Druckguss aus NE-Metallen, Technische Richtlinien, bdguss, Düsseldorf, 2016

Kap. 6.4

[Eng11] B.Engel: Potentiale und Fertigungsstrategien zur geometrischen Gestaltung von Profilbauteilen, umformtechnik.net, Verlag Meisenbach, Whitepaper, 12.6.2011
[Fas17] I.Fassi, D.Shipley: Micro-Manufacturing Technologies and their application, Springer Int. Switzerland, 2017
[Gat15] H.H.Gatzen, V.Saile, J.Leuthold: Micro and Nano Fabrication, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2015
[Lon02] H.Long, D.J.Mynors, P.Holland, P.M.Standring: Forming feature representation and process selection in cold extrusion, J. of Mat. Processing Technology 125-126, 2002, 456-463
[Mar20] D.Marini, J.R.Corney: Process selection methodology for near net shape manufacturing, Int. J. Adv. Manufacturing Technology 106, 2020, 1967-1987
[Mue83] H.Müller, G.Bieber (Hrsg.): Prinzipien konstruktiver Gestaltung, Springer Vieweg, 1983
[Qin15] Y.Qin: Micromanufacturing Engineering and Technology, Elsevier, 2nd ed. 2015
[Reu13] M.Reuter: Technischer und wirtschaftlicher Vergleich von Herstellungsverfahren bei der Entwicklung von Kunststoffhohlkörpern in Automobilanwendungen, Doktorarbeit, Uni Duisburg-Essen, 2013
[Ris12] A.Risse: Fertigungsverfahren der Mechatronik Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik, Kap.10 Fertigungsverfahren der Mikrostrukturtechnik, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2012, 503-537
[Vol09] F.Vollertsen, D.Biermann, H.N.Hansen, I.S.Jawahir, K.Kuzmann: Size effects in manufacturing of metallic components, CIRP Annals – Manufacturing Technology 58, 2009, 566-587

[Zau05] R.Zauner: Pulverspritzgießen, BHM 150, 2005, H.7, 242-245
[Zha09] K.Zhang, L.Kun: Classification of size effects and similarity evaluating method in micro forming, Journal of Materials Processing Technology 209 (11), 2009, 4949-4953
[Zhe19] Q.Zheng, X.Zhuang, Z.Zhao: State-of-the-art and future challenge in fine-blanking technology, Production Engineering 13, 2019, 61-70

Kap. 6.5

[Bru14] S.Bruschi, A.Ghiotti: Hot Stamping, in: Comprehensive Materials Processing Vol.3, 2014, 27-54
[Buc07] B.Buchmayr: Innovative Beiträge der Umformtechnik zum Leichtbau von Kraftfahrzeugen, BHM 152, 2007, H.5, 136-141
[Buc09] B.Buchmayr: Umformtechnischer Leichtbau, in: H.P.Degischer, S.Lüftl: Leichtbau – Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsverfahren, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2009, 214-245
[Buc10] B.Buchmayr, G.Figala, L.Wunsch: Lokale fertigungstechnische Verstärkungskonzepte zur Erhöhung der Materialeffizienz, BHM 155, 2010, H.7, 307-312
[Bue08] M.Buescher, A.Kröff, A.Wedemeier: ScaLight – The way to the intelligent body in white architecture, 2nd Int. Conf. on Steels in Cars and Trucks (eds. B.Fuchsbauer, H.-J.Wieland, Verlag Stahleisen, 2008, 123-130
[Deg09] H.P.Degischer, S.Lüftl: Leichtbau – Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsverfahren, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2009
[Far18] M.A.Farooq, R.Roth, R.Kirchain: Lightweighting technologies: Analyzing strategic and economic implications of advanced manufacturing processes, Int J of Production Economics 206, 2018, 268-279
[Goe20] T.Götz, M.Schneider: Fügetechnik – Geeignete Fügeverfahren für Multimaterialbauweisen ermitteln, Konstruktionspraxis, 27.3.2020
[Kle05] B.Klein: Leichtbau-Konstruktionen, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 6.Aufl., 2005
[Kni09] L.Kniewallner: Fertigungstechnischer Leichtbau – Gießtechnik, , in: H.P.Degischer, S.Lüftl: Leichtbau – Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsverfahren, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2009, 173-191
[Kop09] G.Kopp, J.Kuppinger, H.E.Friedrich, F.Henning: Sandwich-Strukturen für den funktionsintegrierten Leichtbau, lightweightdesign 3/2009, 38-43
[Nac13] W.Nachtigall, G.Pohl: Bau-Bionik – Natur, Analogien, Technik, Springer Vieweg, 2.Aufl. 2013
[Sch17] J.Schönherr, D.Landgrebe, S.Polubinski: Entwicklungen beim Presshärten – ein update. ZWF 112, 2017, H.1-2, 33-36
[Wie07] J.Wiedemann: Leichtbau – Elemente und Konstruktion, Springer Berlin, 3.Aufl., 2007

Kap. 6.6

[Esa03] A.M.K.Esawi, M.F.Ashby: Cost estimates to guide pre-selection of processes, Materials and Design 24, 2003, 605-616

Kap. 6.7

[Abe08] E.Abele, R.Anderl, H.Birkhofer, B.Rüttinge (Hrsg.): EcoDesign – Von der Theorie in die Praxis, Springer Berlin Heidelberg New York, 2008
[All12] J.M.Allwood, J.Cullen: Sustainable Materials – with both eyes open, UIT, Cambridge, 2012
[Ash14] M.F.Ashby, H.R.Shercliff, D.Ceon: Materials; engineering, science, processing and design, 3rd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2014, Chapter 20
[Ash20] M.F.Ashby: grantadesign.com/teachingresource/manufacturing/, Unit 12, Eco design and the Eco Audit tool, Granta Design, 2020

[Bed13] T.Bednar et.al.: Roadmap für Energieeffiziente Fertigungsbetriebe, Hrsg. Konsortium Projekt INFO, TU Wien, Inst. für Fertigungstechnik u. Hochleistungslasertechnik, 2013
[Bru18] M.Brugger, V.Selleneit, C.Richter, G.Reinhart: Potenzialanalyse zur Energiekostenoptimierung von Produktionsanlagen, ZWF 113, 2018, H.9, 535-539
[Cis20] C.N.Cislo: Ressourcenschonendes Recycling von Aluminumspänen zu hochwertigen Produkten, Dissertation Montanuniversität Leoben, 2020
[Del98] M.Delhi: Energieeinsparung in Industrie und Gewerbe: praktische Möglichkeiten des rationellen Energieeinsatzes in Betrieben, Renningen-Malmsheim, expert, 1998
[EEA16] European Environment Agency: Circular economy in Europe – developing the knowledge base, EEA Report No. 2/2016, Copenhagen
[Ene20] https://www.energieeffizienz-im-betrieb.net/energiekosten-unternehmen/energiesparen-industrie.html aufgerufen am 29.8.2020
[Haa13] H.Haag: Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion, Diss. Uni Stuttgart, Fak. Konstruktions-, Produktions- u. Fahrzeugtechnik, 2013
[Her13] C.Herrmann, H.Pries, G.Hartmann: Energie- und ressourceneffiziente Produktion von Aluminiumdruckguss, Springer Vieweg Berlin Heidelberg, 2013
[Hes12] J.Hesselbach: Energie- und klimaeffiziente Produktion – Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele, Springer Vieweg, 2012
[Leh16] M.Lehner, M.Bauer, W.Hofer: Prozesskette zum stofflichen Recycling von Kunststoffabfällen, BHM 161, 2016, H.6, 246-261
[Lsw19] Lech-Stahlwerke GmbH: Gelebte Kreislaufwirtschaft – Nachhaltigkeitsbericht 2018, Meitlingen, Okt.2019
[Neu14] R.Neugebauer: Handbuch Ressourcenorientierte Produktion, Carl Hanser Verlag, 2014
[Röd06] G.Röders, C.Indorf, K.Dilger, H.Pries, U.Anders: Optimierung der Energiebilanz beim Aluminium-Druckguss, Abschlussbericht Sept.2007, Dt. Bundesstiftung Umwelt, AZ 22197.
[Saa19] M.H.Saad, M.A.Nazzal, B.M.Darras: A general framework for sustainability assessment of manufacturing processes, Ecological Indicators 97, 2019, 211-224
[Sko18] W.Skolaut (Hrsg.): Maschinenbau, Kap.33 Nachhaltige Produktion – Emissionen vermeiden und Ressourcen schonen. Springer Verlag Deutschland, 2018
[Umw19] Umweltbundesamt BMU: A.Barckhausen, J.Becker, P.Malodobry: Energiemanagementsysteme in der Praxis, Dessau-Roßlau Dez. 2019
[VDI02] VDI-Richtlinie 2243: Recyclingorientierte Produktentwicklung, Juli 2002
[Wil17] H.Wilts: Digitale Kreislaufwirtschaft – die digitale Transformation als Wegbereiter ressourcenschonender Stoffkreisläufe, Wuppertaler Impulse zur Nachhaltigkeit, Wuppertal Institut 04/2017
[You97] P.Young, G.Byrne, M.Cotterell: Manufacturing and the environment, Int J Adv Manuf Technol 13, 1997, 488-493

Kap. 6.8

[Aud20] https://www.audi-mediacenter.com/de/suche?utf8=%E2%9C%93&query=Verbindungstechniken, 08/2020
[Beh02] H. Behnisch (Hrsg.): Kompendium der Schweißtechnik, Bände 1-4, Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd. 128/S, DVS-Verlag, Düsseldorf, 2002
[Boe90] U. Boese, D. Werner, H.Wirtz: Das Verhalten der Stähle beim Schweißen, Teil 1: Grundlagen, Teil 2: Anwendung, DVS-Verlag Düsseldorf, 1980
[Bud95] L.Budde, R.Pilgrim: Stanznieten und Durchsetzfügen, Bibliothek der Technik 115, Landsberg/Lech, Verlag Moderne Industrie, 1995
[Fah06] H.J.Fahrenwaldt, V.Schuler: Praxiswissen Schweißtechnik – Werkstoffe, Prozesse, Fertigung, Vieweg Praxiswissen, DVS Verlag, 2.Aufl., 2006
[Fel13] K.Feldmann, V.Schöppner, G.Spur: Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren, Carl Hanser Verlag, München, 2.Aufl. 2013

[Hab16] G.Habenicht: Kleben – erfolgreich und fehlerfrei, Springer Vieweg, 7.Aufl., 2016, Kap8: Klebstoffauswahl, S.111ff
[Hah96] O.Hahn, U.Klemens: Fügen durch Umformen – Nieten und Durchsetzfügen – Innovative Verbindungsverfahren für die Praxis, Studienges. Stahlanwendung, Düsseldorf, 1996
[Hen92] O.-D.Hennemann, W.Brockmann, H.Kollek: Handbuch Fertigungstechnik Kleben, Carl Hanser Verlag München Wien, 1992
[LeB02] C.LeBacq, Y.Brechet, H.R.Shercliff, T.Jeggy, L.Salvo: Selection of joining methods in mechanical design, Materials and Design 23, 2002, 405-416
[Mat12] K.-J.Matthes, W.Schneider: Schweißtechnik – Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 5.Aufl., 2012
[Pru10] H.Prüß, C.Stechert, T.Vietor: Methodik zur Auswahl von Fügetechnologien in Multimaterialsystemen, 21.DfX-Symposium, TU Braunschweig, 2010

Kap. 6.9

[Bob13] K.Bobzin: Oberflächentechnik für den Maschinenbau, Wiley-VCH, 2013
[Dob15] L.A.Dobrzanski, A.D.Dobrzanska-Danikiewicz, T.Tanski, E.Jonda, A.Drygala, M.Bonek: Laser surface treatment in manufacturing, in A.Y.C.Nee (ed.) Handbook of Manufacturing Engineering and Technology, Springer Verlag London, 2015, 2677-2717
[Hof15] H.Hofmann, J.Spindler: Verfahren in der Beschichtungs- und Oberflächentechnik, Hanser, 3.Aufl., 2015
[Lak17] M.Lake: Oberflächentechnik in der Kunststoffverarbeitung, CaLR Hnser Verlag, 2.Aufl., 2017
[Mue96] K.-P.Müller: Praktische Oberflächentechnik – Vorbehandeln, Beschichten, Prüfen, Vieweg, 1996
[Mue03] K.-P.Müller: Praktische Oberflächentechnik – Vorbehandeln, Beschichtungsfehler, Umweltschutz, Vieweg JOT-Fachbuch, 2003
[Sim85] H.Simon, M.Thoma: Angewandte Oberflächentechnik für metallische Werkstoffe, Hanser Verlag, 1985
[Vet05] J.Vetter, G.Barbezat, J.Crummenauer, J.Avissar: Surface treatment selections for automotive applications, Surface & Coatings Technology 200, 2005, 1962-1968

Kap. 6.10

[Bre13] J.Breuninger, R.Becker, A.Wolf, S.Rommel, A.Verl: Generative Fertigung mit Kunststoffen, Springer Verlag, 2013
[Buc15] B.Buchmayr, G.Panzl: Eine SWOT-Analyse zum Einsatz der Additiven Fertigung für metallische Bauteile, BHM 160, 2015, H.1, 15-20
[Buc19] B.Buchmayr, G.Panzl, A.Walzl, C.Wallis, R.Hubmann, M.Kitzmantel: Results and conclusions on metallic materials made by AM within the Austrian Leader Project „addmanu“.
Berg. Huettenmaenn Monatsh 164, 2019, H.3, 117-126
[Fas12] P.Fastermann: 3D-Druck / Rapid Prototyping, Springer Verlag, 2012
[Fay18] H.Fayazfar, M.Salarian, A.Rogalsky, D.Sarker, P.Russo, V.Paserin, E.Toyserkani: A critical review of powder-based additive manufacturing of ferrous alloys: Process parameters, microstructure and mechanical properties, Materials and Design 144, 2018, 98-128
[Geb13] A.Gebhardt: Generative Fertigungsverfahren, Carl Hanser Verlag, 4.Aufl., 2013
[Ger12] R.M.German: Markets applications, and financial aspects of global metal powder injection moulding (MIM) technologies, MPR, metal-powder.net, Jan/Feb.2012, 19-26
[Gib10] I.Gibson, D.W.Rosen, B.Stucker: Additive Manufacturing Technologies. Springer, 2010
[Gu15] D.Gu: Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials, Springer Verlag Heidelberg, 2015

[Han15] J.Hanssen, Z.H.Moe, D.Tan, O.Y.Chien: Rapid Prototyping in Manufacturing, in: A.Y.C.Nee (ed.): Handbook of Manufacturing Engineering and Technology, Springer Verlag, London, 2015, Chap.69, 2505-2523
[Kum18] M.Kumke: Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018
[Jim19] M.Jimenez, L.Romero, I.A.Dominguez, M.delMar Espinosa, M.Dominguez: Additive Manfacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects, Hindawi Complexity 2019, Article ID 9656938, 30 pages
[Mac15] B.Macy: Reverse Engineering for Additive Manufacturing, in: A.Y.C.Nee (ed.): Handbook of Manufacturing Engineering and Technology, Springer Verlag, London, 2015, Chap.68, 2485-2504
[Man15] C.G.Mancanares, E.deS.Zancul, J.C. da Silva, P.A.Cauchick Miguel: Additive manufacturing process selection based on parts‘ selection criteria, Int J. Adv. Manuf. Technol. 80, 2015, 1007-1014
[Plo19] J.Plocher, A.Panesar: Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures, Materials and Design 183, 2019, 108164
[Ste10] W.M.Steen, J.Mazumder: Laser Material Processing, Chap.7 Rapid Prototyping and Low-volume Manufacture, Springer, 2010, 349-369
[Tof18] S.A.M.Tofail, E.P.Koumoulos, A.Bandyopadhyay, S.Bose, L.O'Donoghue, C.Charitidis: Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities, Materials Today 21, Nr.1, 2018, 22-37
[VDI09] VDI-Richtlinie 3404: Generative Fertigungsverfahren – Rapid Technologien (Rapid Prototyping), Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen, Beuth Verlag, 2009
[Ver19] R.Verma, G.Kaushal: State of the Art of Powder Bed Fusion Additive Manufacturing: A Review, in: I.J.Kumar (ed.): 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies, Springer Nature Singapore, 2019, 269-279
[Woh11] T.Wohlers: Wohlers Report 2011, www.wohlers-associates.com
[Yak17] M.Yakout, A.Cadamuro, M.A.Elbestawi, S.C.Veldhuis: The selection of process parameters in additive manufacturing for aerospace alloys, Int J Adv Manuf Technol 92, 2017, 2081-2098
[Zae06] M.F.Zäh: Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien, Carl Hanser Verlag, 2006
[Zha18] Y.Zhang, L.Wu, X.Guo, S.Kane, Y.Deng, Y-G.Jung, J-H. Lee, J.Zhang: Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review, J Mat Eng and Performance 27, 2018, 1-13
[Zla08] B.S.Zlatkov, E.Griesmayer, H.Loibl, O.S.Aleksic, H.Danninger, C.Gierl, L.S.Lukic: Recent Advances in PIM Technology I, Science of Sintering 40, 2008, 79-88

Kap6.11

[Bad08] C.Bader: Werkzeugbau für die Kunststoffverarbeitung - Bauarten, Herstellung, Betrieb, Hanser, 2008
[Bir13] A.Birkert, S.Haage, M.Straub: Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile – Auslegung von Ziehanlagen, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013
[Bli13] J.Bliedtner, H.Müller, A.Barz: Lasermaterialbearbeitung – Grundlagen, Verfahren, Anwendungen, Beispiele, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2013
[Boo17] W.Boos, K.Arntz, L.Johansen, T.Dröscher, M.Wollbrink, M.Prümmer: Erfolgreich Fertigungstechnologien einsetzen im Werkzeugbau, Studie Fraunhofer, IPT, Aachen, 2017
[Buc13] B,Buchmayr: Werkzeugbau, Vorlesungsskript, Montanuniversität Leoben, 2013
[Dol13] H.Dolmetsch, D.Holznagel, R.Ihwe, E.Keller, W.Klein: Der Werkzeugbau, Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 16.Aufl., 2013
[Fri10] C.Fritsche, H.Fritsche, J.Kolbinger, K.-H.Küspert, G.Lindenblatt, D.Morgner, T.Paus, A.Schmidt, F.Schwarze: Kunststofftechnik – Lernfelder 1 bis 14, Verlag Europa Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2.Aufl, 2010
[Hes09] S.Hesse: Grundlagen der Handhabungstechnik, 2.Aufl., Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2009

[Hir12] A,Hirsch: Werkzeugmaschinen – Grundlagen, Auslegung, Ausführungsbeispiele, 2.Aufl., Vieweg-Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2012
[Hue09] H.Hügel, T.Graf: Laser in der Fertigung – Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren. Vieweg+Teubner, 2.Auflage, 2009
[Kra08] H.Krahn, D.Eh. H.Vogel: 1000 Konstruktionsbeispiele für den Werkzeug- und Formenbau beim Spritzgießen, Hanser Verlag, 2008
[Kra18] H.Krahn, M.Storz: Konstruktionsleitfaden Fertigungstechnik, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018
[Men07] G.Mennig (Hrsg.): Werkzeuge für die Kunststoffverarbeitung – Bauarten, Herstellung, Betrieb, Hanser Fachbuchverlag, 2007
[Neu12] R.Neugebauer (Hrsg.): Werkzeugmaschinen – Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2012
[Pop06] R.Poprawe: Lasertechnik für die Fertigung, Springer-Verlag, 2006

7 Aspekte der Wirtschaftlichkeit

Zusammenfassung: Jedes solide Unternehmen braucht ein straffes Kostenmanagement. Das Wissen über die Kostentreiber und Kostenanteile in der Fertigung fließen direkt in die Prozesskostenrechnung ein und unterstützen den Entwicklungsprozess bei Zielkostenbetrachtungen. Zur Senkung der Herstellkosten werden zahlreiche Maßnahmen angeführt. Dazu gehören auch ein moderner Einkauf und die Optimierung der Kosten bei verketteten Prozessen. Mithilfe der Lebenszyklusanalyse oder auch Ökobilanz wird eine systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten über den gesamten Lebensweg skizziert. Abschließend werden noch Maßnahmen zur Bewältigung von Krisensituationen aufgezählt.

7.1 Kostenmanagement und Kostenrechnung

Entsprechend der unternehmerischen Ziele (Umsatz-, Gewinnsteigerung, Erhöhung des Marktanteils) werden in der Produktion primär folgende Ziele verfolgt:

- **Kostenziele:**
  - Senkung der Herstellkosten (Material- und Fertigungskosten) durch Leichtbau, kostengünstige Fertigungsverfahren, Automation etc.
  - Geringe Instandhaltungs- u. Nacharbeitskosten, längere Werkzeugstandzeiten etc.
- **Zeitziele:**
  - Einhaltung von Lieferterminen und Vermeidung von Fehlzeiten (OEE↑)
  - Schnelle Auftragsausführung und niedrige Kapitalbindung
  - kurze Durchlaufzeiten (Vermeidung von Engpässen, Einsatz von leistungsstarken Maschinen)
- **Ergebnisziele:**
  - hohe Stückzahlen/Zeiteinheit (große Losgrößen, Massenproduktion etc.)
  - hohe Qualität

Diese drei Ziele bilden das sog. *Magische Dreieck* (Kosten-Zeit-Qualität), das für die Rentabilität und Produktivität eines Unternehmens von zentraler Bedeutung ist.
Die Internationalisierung der Märkte und das Zusammenwachsen der Wirtschaftsräume verschärfen den Druck auf die Unternehmen, die Wertschöpfungsprozesse zu optimieren und regelmäßig zu versuchen, die Herstellkosten zu minimieren.
Durch ein frühzeitiges, proaktives Kostenmanagement wird versucht die Kosten zu beeinflussen und zukünftige Ereignisse in die Kostenplanung mit einzubeziehen. Das Kostenmanagement umfasst nicht nur die gesamte Wertschöpfungskette im Unternehmen, sondern auch die Einbindung der Lieferenten und Kunden im Rahmen der Supply Chain.

7.1.1 Kostenmanagement

Das Kostenmanagement beinhaltet die drei Aufgabenbereiche

- Kostenplanung,
- Kostensteuerung und
- Kostenkontrolle

Da ca. 70% der Herstellkosten bei der Produktgestaltung festgelegt werden [Ehr14], haben die Festlegung des Designs, die Wahl der Werkstoffe und der Fertigungsmethoden auch die größte Wirkung auf den Produktpreis und diese drei Aktivitäten beinhalten aber auch das höchste Kostensenkungspotential. Dieser logische Zusammenhang wurden auch mittels Umfrage in 116 deutschen Unternehmen bestätigt [Kaj05]. An oberster Stelle in der Prioritätenliste, siehe Abb. 173, steht das Ziel der Kostensenkung. In derselben Studie wurde auch der Methodeneinsatz nachgefragt.

Dabei ergab sich folgende Reihung bzgl. der Häufigkeit: Benchmarking, Target Costing, Prozesskostenrechnung und Life Cycle Costing, weshalb diese Methoden im Folgenden zumindest ansatzweise vorgestellt werden.

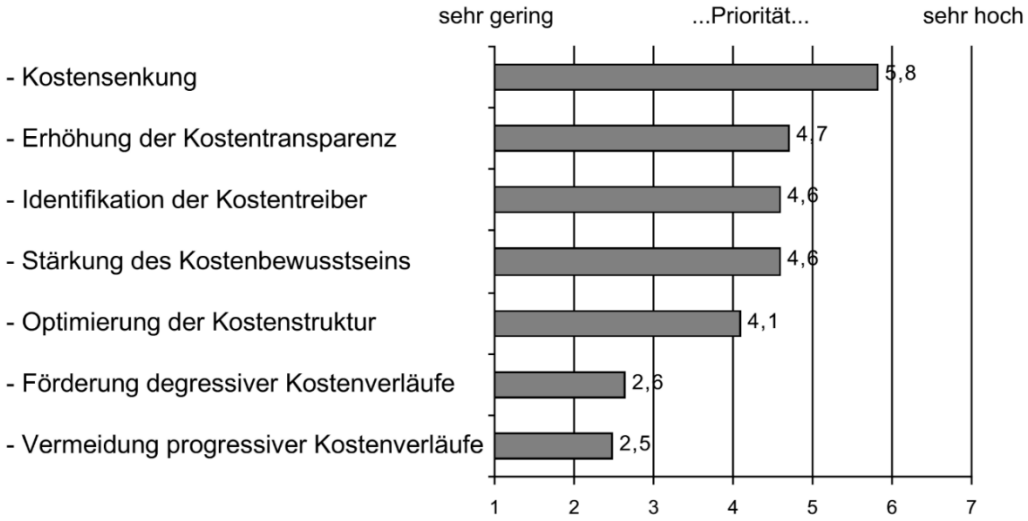


Abb. 173: Prioritätsrangfolge der Ziele des Kostenmanagements [Kaj05]

Die vernetzten Möglichkeiten zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit bzw. Wettbewerbsfähigkeit über die drei Faktoren des goldenen Dreiecks (Zeit, Qualität, Kosten) und die Erfassung wichtiger spezifischer Kennzahlen zeigt Abb. 174 nach [Bel15].
In mittleren und größeren Firmen erfolgt das Kostenmanagement über ERP-Softwaresysteme, wie SAP HANA oder Oracle oder Sage oder Microsoft. Eine Marktübersicht und Hilfestellung bei der Auswahl von passenden ERP-Systemen werden auf der Internet-Seite https://www.erp-system.online/ gegeben.

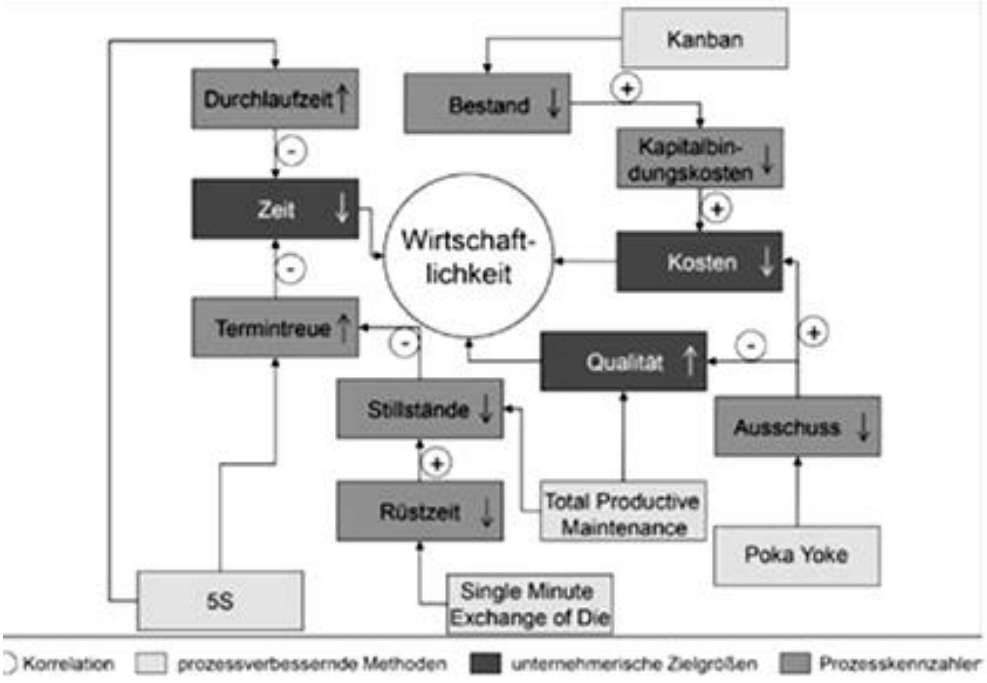


Abb. 174: Darstellung der Wirkbeziehungen zwischen prozessverbessernden Methoden und Prozesskennzahlen [Bel15]

7.1.2 Grundlagen der Kostenrechnung

Das betriebliche Rechnungswesen hat die Aufgabe, das Unternehmen, seine inneren Abläufe und seine Beziehungen mit der Umwelt zahlenmäßig zu beschreiben, um auf diese Weise Informationen für die Steuerung des Unternehmens zu liefern. Das betriebliche Rechnungswesen gliedert sich zunächst in zwei Bereiche. Beim externen Rechnungswesen geht es um gesetzliche Vorschriften zum handels- und steuerrechtlichen Jahresabschluss (Bilanz, Gewinn/Verlust-Rechnung, Vermögen / Schulden, Eigenkapital und Verlust bzw. Gewinn). Das interne Rechnungswesen wird aus rein innerbetrieblichen Überlegungen heraus gestaltet, um die Steuerung der betrieblichen Prozesse und Investitionen zu ermöglichen. Das interne Rechnungswesen wird freiwillig erstellt, und seine Ergebnisse werden nicht veröffentlicht.

Die Kosten- und Leistungsrechnung verfolgt andere Zwecke und Aufgaben als die übrigen Bereiche des betrieblichen Rechnungswesens. In [Pli06] werden vier Hauptzwecke für die Kostenrechnung genannt:

- Preiskalkulation und Preisbeurteilung (zum Zwecke der Preisfindung)
- Wirtschaftlichkeitskontrolle (Aufdecken von Schwachstellen, unwirtschaftliche Bereiche)
- Gewinnung von Unterlagen für Entscheidungsrechnungen (z.B. Verfahrensvergleiche)
- Erfolgsermittlung (wie erfolgreich war ein Betrieb in einer Periode)

Die Kostenrechnung ist ein Instrument zur Gewinnung von Informationen zur Erreichung bzw. Erhaltung der Wirtschaftlichkeit [Her15]. Sie beantwortet folgende Fragen:

- Welche Kosten sind entstanden? (zugeordneter Begriff: Kostenarten)
- Wo sind die Kosten entstanden? (Kostenstellen)
- Warum sind die Kosten entstanden? (Kostenträger).

Die Kosten- und Leistungsrechnung hat demnach die Aufgabe, die betrieblich bedingten Kosten zu erfassen und sie den Produkten und Dienstleistungen zuzuordnen. Eine wichtige Unterscheidung betrifft die Voll- und die Teilkostenrechnung, siehe [Her15, Pli06]. In der Praxis wird auch die Deckungsbeitragsrechnung angewandt.

7.1.3 Zuschlagskalkulation

Mit der häufig angewandten Zuschlagskalkulation werden die Herstellkosten plus Gemeinkostenzuschläge zur Ermittlung eines Angebotspreises verwendet. Ein Beispiel der Ermittlung mit üblichen Ansätzen nach VDMA zeigt Abb. 175.

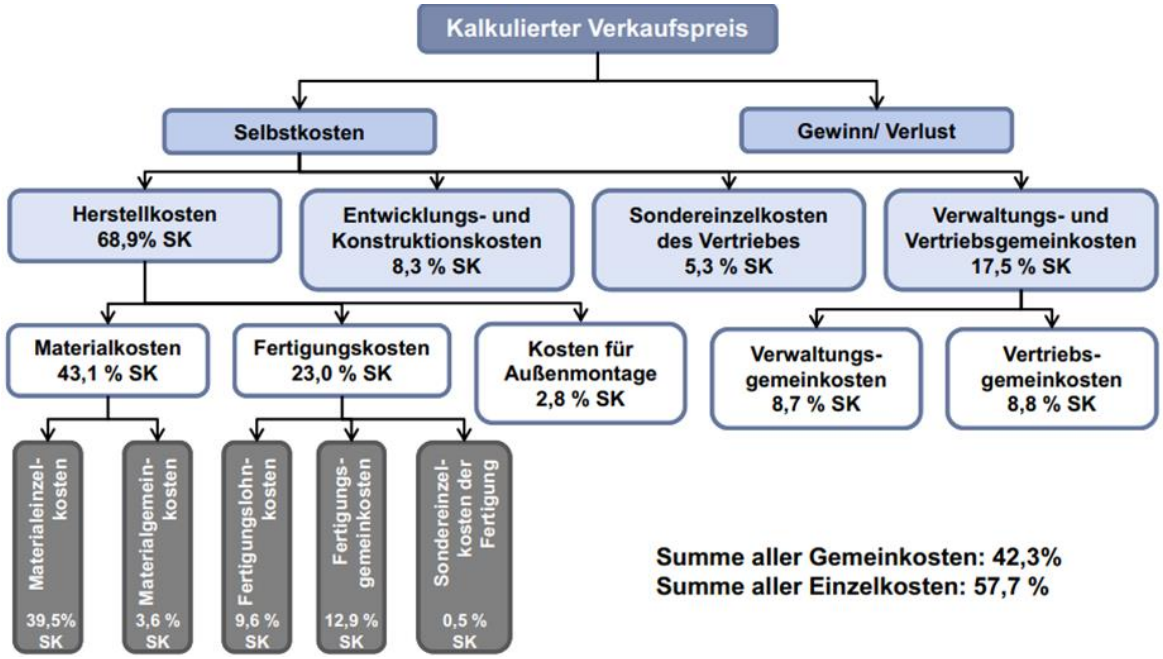


Abb. 175: Differenzierende Zuschlagskalkulation (VDMA Kennzahlenkompass 2002)

7.1.4 Benchmarking

Beim Benchmarking geht es darum eigene Produkte und eigene Produktion mit jenen der besten Mitbewerber zu vergleichen, um damit die Effektivität und Effizienz der eingesetzten Mittel/Methoden zu verbessern und die Kundenerwartungen bestmöglich zu erfüllen. Vielfach spricht man auch von „Best practice"-Analysen.

Die zuerst von R.Camp [Cam07] beschriebene Methodik umfasst dabei vier Phasen:

1. Zielsetzungsphase (Festlegung des Objekts und des Teams)
2. Vergleichsphase (Festlegung der Kennzahlen, Datenerhebung, Ermittlung der Besten)
3. Analysephase (qualitative Analyse der Prozesse und Ableitung der Best Practices)
4. Implementierungsphase (Verbesserungsmaßnahmen festlegen, implementieren, kontrollieren)

Insgesamt ergibt sich daraus die Möglichkeit das eigene Produkt und die eigene Produktionsweise mit jenen der besten Mitbewerber zu vergleichen, d.h. auch von den Besten zu lernen, Defizite in der eigenen Vorgangsweise zu erkennen, alternative Lösungen zu finden und damit die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. Viele nationale Organisationen, die ein Benchmarking-Service anbieten, arbeiten international im Global Benchmarking Network (GBN) zusammen und tauschen Erkenntnisse aus.

Es gibt auch ein internes Benchmarking, bei dem innerbetriebliche Bereiche und Prozesse miteinander in Bezug auf Wirtschaftlichkeit, Produktivität und Qualitätssicherung u.a. verglichen werden.

7.1.5 Prozesskostenrechnung

Die Prozesskostenrechnung oder auch „activity based costing“ zielt darauf ab, die in einem Unternehmen anfallenden Gemeinkosten prozessbezogen zu erfassen und über die Bildung von Prozesskostensätzen auf jene Kostenträger zu verrechnen, die die betreffenden Haupt- und Nebenprozesse bei der Realisierung von Aufträgen verursacht haben. Sie ersetzt nicht die traditionellen Systeme der Kostenrechnung, sondern sie ergänzt diese. Damit erlaubt die Prozesskostenrechnung

- den Ressourcenverbrauch und die Kapazitätsauslastung zielgerichteter zu steuern,
- Kostentreiber zu erkennen und
- ein besseres Kostenmanagement, insbesondere in Bezug auf Gemeinkosten zu verwirklichen.

Für die wirtschaftliche Beurteilung möglicher Prozessrouten ist die Berechnung der Detailkosten aus den Beiträgen Materialkosten, Maschinenkosten, Personalkosten, Energiekosten und Zuschlägen besonders wichtig, weil nur dadurch ein realistisches Kostenbild entsteht.
Im Kostenmodell von M.F.Ashby [Ash10] werden zur Ermittlung der Stückkosten die vier Kostenkomponenten: die Materialkosten unter Berücksichtigung des Schrottabfalls, die anteiligen Werkzeugkosten, die anteiligen Maschinenkosten und die Overhead-Kosten aufsummiert.

7.2 Kostenanteile in der Fertigung

7.2.1 Sichtweise: Kostenfestlegung und Kostenentstehung

Nach Ehrenspiel [Ehr00] werden in der Konstruktionsphase ca. 70% und in der Arbeitsvorbereitung nahezu 20% der Produktkosten festgelegt, obwohl die Kosten erst mit den Zuliefer- und Produktionskosten anfallen. In der ersten Phase sind etwaige Änderungen schnell und kostengünstig durchführbar, im Gegensatz zu späteren Änderungen in der Teilefertigung, Montage oder gar während der Nutzung in Form von Rückrufaktionen. Die Änderungskosten erhöhen sich in diesen Lebensphasen jeweils um einen Faktor von rund zehn (»rule of ten«).

7.2.2 Sichtweise: Wo einsparen?

Es macht Sinn, wenn man zunächst einmal überlegt, wo die höchsten Kostenanteile anfallen, weil die Auswirkungen von Kosteneinsparungen an diesen Stellen insgesamt gesehen meist effektiv sind. Als Basis für weitere Betrachtungen kann die allgemeine, durchschnittliche Kostenstruktur in der Produktion herangezogen werden, siehe Abb. 176. Das Bild ist sicherlich je nach Branche und Produktgruppe unterschiedlich, aber im Mittel dominieren in vielen Fällen die Materialkosten, gefolgt von den Personalkosten. In Kapitel 7.4 werden dazu noch konkrete Maßnahmen angegeben.
Obwohl die Kostenanteile je nach Branche bzw. Produktgruppe voneinander abweichen, zeigt es sich im Allgemeinen, dass die Materialkosten meist dominieren, gefolgt von Personalkosten, Maschinenkosten und Kosten für Zukaufteile.

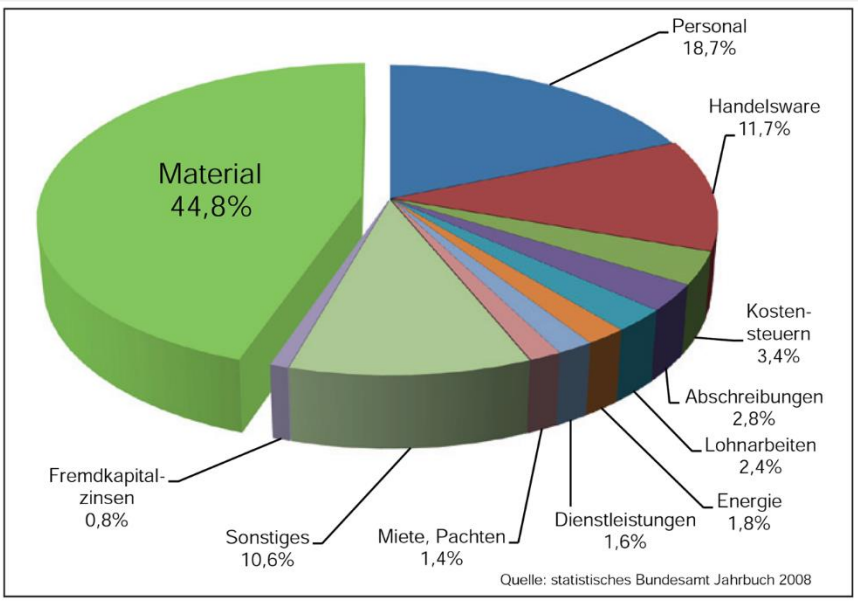


Abb. 176: Allgemeine Kostenstruktur in der Produktion nach Daten vom dt. statistischen Bundesamt

7.2.3 Sichtweise: Relativkosten

Für eine erste grobe Abschätzung kostengünstiger Varianten ohne Vorkalkulation genügen meist Tabellen über Relativkosten, siehe Tabelle 53, die auf eigenen Erfahrungen basieren und in Wissensmanagementsystemen hinterlegt werden können.
Sehr sensibel zeigt sich dabei der Einfluss von zu hohen Toleranzansprüchen und der damit verbundenen Notwendigkeit hochpräzise Fertigungsverfahren verwenden zu müssen, siehe Abb. 177. Maximale Kostensteigerung können einen bis zu 40-fachen Faktor ausmachen.

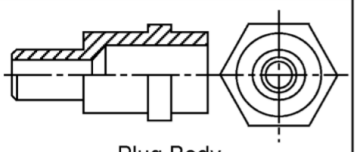
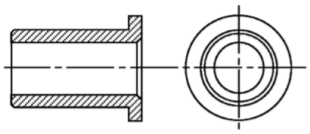
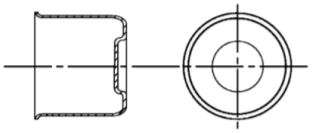
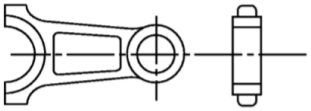
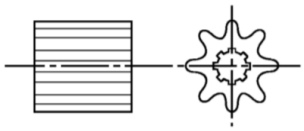
Component	Material	Number Per Annum	Manufacturing Process	Relative Economic and Technical Merits	Relative Cost
 Plug Body	Low Carbon Steel	1,000,000	Machining	High waste Low to medium production rates Poor strength	**3.9**
			Cold Forming	Little waste Very high production rates High strength	**1**
 Plain Bearing	Bronze	50,000	Machining	High waste Low to medium production rates Non-porous properties	**2.2**
			Powder Metal Sintering	No waste High production rates Porous product	**1**
 Cover	Alum. Alloy	5,000	Spinning	High labour costs Low production rates Limited detail and accuracy	**1.8**
			Deep Drawing	Low labour costs High production rates High detail and accuracy	**1**
 Connecting Rod (after (1.6))	Medium Carbon Steel	100,000	Closed Die Forging	Long lead times High tooling costs High equipment costs	**1.3**
			Sand Casting	Short lead times Low tooling costs Low equipment costs	**1**
 Pump Gear	Low Carbon Steel	5,000	Machining	High waste Low to medium production rates Poor strength	**2.6**
			Cold Extrusion	Little waste Very high production rates High strength	**1**

Tabelle 53: Relative Kostenvergleiche unterschiedlicher Fertigungsverfahren nach Swift & Booker [Swi03]

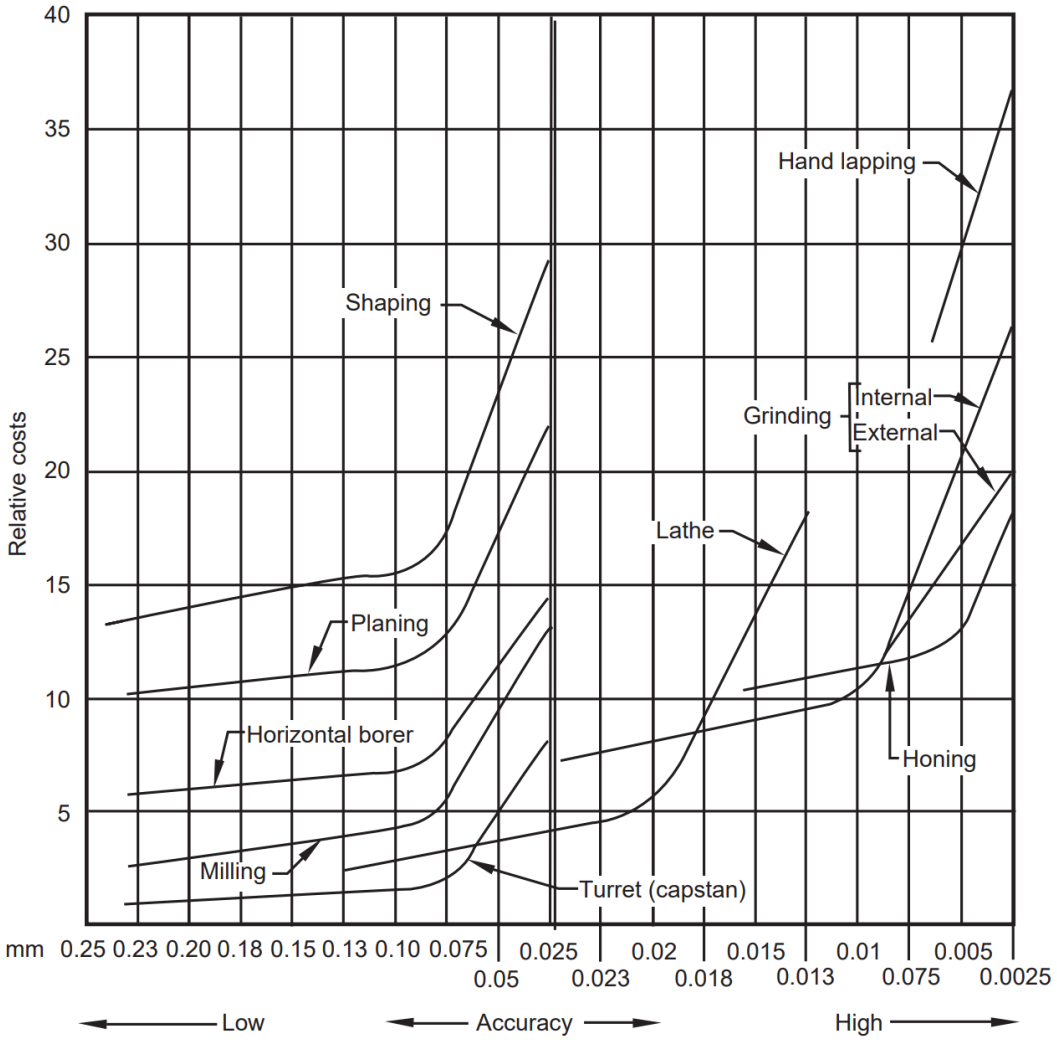


Abb. 177: Relativkosten für unterschiedliche Fertigungsverfahren in Abhängigkeit von der geforderten Bearbeitungsgenauigkeit [Swi03]

7.2.4 Sichtweise: Kostengefühl

Generell ist es sinnvoll und für rasche Entscheidungen wichtig, dass man als Entscheidungsperson einige Eckpfeiler von absoluten Kosten im Kopf und ständig parat hat. Damit kann man sofort überprüfen, ob die Größenordnung von Kosten oder Preisen überhaupt realistisch ist. Dieses gefestigte Skelett an Kostensätzen oder auch Relativkostenfaktoren hilft sehr wesentlich bei Kostenvergleichen und daher auch zur Abschätzung der Machbarkeit und der Einschätzung, ob Varianten auch ökonomisch machbar sind. Der Grund, warum mancherorts bei Konstrukteuren dieses Gefühl fehlt, liegt möglicherweise daran, dass die Kostenverantwortung nur im Einkauf fixiert ist und auch die Rückkopplung aus der Arbeitsvorbereitung fehlt.
Die Anregung, einige Grundwerte im Kopf zu haben, stammt ursprünglich von Prof. U.Lindemann (TU München, Vorlesung Produktentwicklung) und wurde vom Autor noch etwas ergänzt.
Was kostet

ein Kilo Baustahl	→ 1 €/kg
ein Kilo rostfreier Stahl oder Al-Leg.	→ 2,50 €/kg
ein Kilo Jausenwurst	→ 5 €/kg
ein Kilo PKW (21000€, 1400kg)	→ 15 €/kg

Strom (Industrie – Haushalt)	→	8 bis 10 Cent/kWh - 30 Cent/kWh
eine M5 Schraube (OEM, im Baumarkt)	→	einige Cent für OEM, 1 € im Baumarkt
Stundensatz Schlosser bzw. Ingenieur	→	30 € bzw. 150 €
die Entwicklung eines neuen Klein-Pkws	→	1 bis 2 Mrd € (bei 5 Mio Stk: je Pkw 200-400€)
eine Stunde Betrieb einer Transferstraße	→	mehrere 1000 €/h
BIP (BRD, Österreich)	→	BRD: 3500 Mrd. €, AUT: 400 Mrd €
VW-Konzern Umsatz und Gewinn	→	250 Mrd (2019), 12 Mrd (2017)
Rückrufaktion (Bsp. Gaspedal-Blockade)	→	3 Mrd. € Verlust (Japan, 2010)

7.2.5 Sichtweise: Kostenabschätzung

Durch eine grobe Abschätzung der Kosten sollen Entscheidungsprozesse rasch unterstützt werden. Sie basieren meist auf Kostenbetrachtungen aus früheren Projekten ähnlichen Umfangs, aus dem Erfahrungswissen von Experten oder aus einfachen Modellrechnungen bspw. über eine multiple Regressionsrechnung oder über Neuronale Netzwerke. Im Anlagenbau hat sich die Kostenschätzung über das gesamte verbaute Materialgewicht etabliert, welches bei CAD-Programmen automatisch ermittelt wird.

7.3 Zielkosten ("Target Costing") und „Design to Cost"

Beim Target Costing werden zunächst die Kundenwünsche oder ggfs. Mitbewerberprodukte analysiert, um festzustellen, wie viel ein Produkt kosten darf, siehe Abb. 178. Unter Berücksichtigung der verfügbaren Ressourcen werden Zielkosten für das Produkt und für alle Komponenten mit Betrachtung der Funktionserfüllung zugeordnet. Alle beteiligten Kostenstellen sind nun gefordert, die Teilkostenziele zu erreichen. Die Maßnahmen im Rahmen von Design-to-Cost kann als eine Untergruppe (da nur Design-bezogene Kosten) des Zielkostenmanagements betrachtet werden.

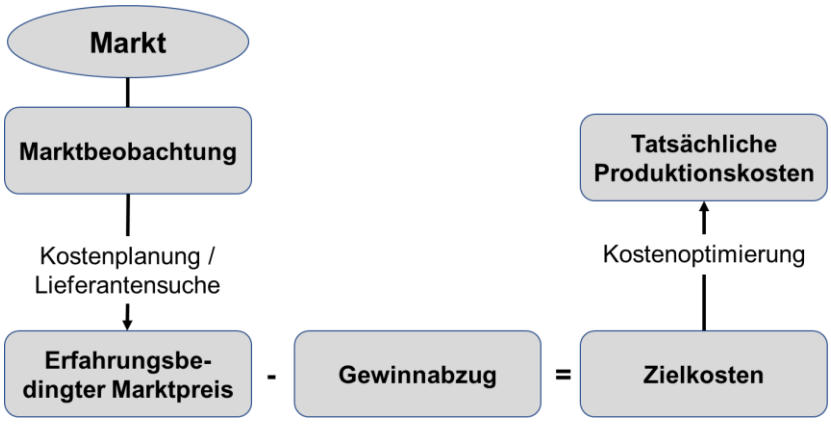


Abb. 178: Ablauf des Target Costing

7.3.1 Design-to-Cost

Bei der Produktentwicklung nach dem Konzept Design to Cost (DTC) wird bereits beim Entwurf der Kostengesichtspunkt festgelegt. Es handelt sich um ein systematisches Vorgehen mit dem Ziel, ein markt- und kostengerechtes Produkt zu entwickeln bzw. ein bestehendes zu überarbeiten. DTC ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der technischen Bereiche mit den Planungs- und

Wirtschaftsbereichen, die vor allem zu einer Sensibilisierung des Kostenbewusstseins aller Beteiligten führt.
Ausgehend von einer Marktanalyse oder den Vorgaben des Auftraggebers werden zunächst die Zielkosten definiert und die Gesamtkosten in einzelne Komponenten und Teile heruntergebrochen. Anschließend werden technische und nichttechnische Kostentreiber identifiziert. Durch kostenbezogene Konstruktionsrichtlinien, Fertigungskataloge und Materialpreislisten erfolgt eine Kostendarstellung der einzelnen Alternativen. Durch Kostenkontrolle werden die Zielkosten der einzelnen Produktkomponenten und –teile laufend überwacht.
Ähnlich dem bekannten Kano-Modell, bei dem die Kundenzufriedenheit und der Erfüllungsgrad betrachtet wird, wird im Zielkostenkontrolldiagramm der Kostenanteil über den Nutzenanteil aufgetragen, wodurch man sehr schnell erkennen kann, bei welchen Komponenten eine Notwendigkeit zur Kostenreduktion besteht. Das Vorgehen ähnelt damit jenem der Nutzwertanalyse.
Die erlaubten Selbstkosten ergeben sich daher aus dem Markt- bzw. Zielpreis minus den geplanten Gewinn. Die Zielkostenbetrachtung steht auch im direkten Zusammenhang mit der Bereitschaft der Kunden, einen angemessenen Preis für ein bestimmten Produkt zu zahlen.

7.3.2 Die Methode der Wertanalyse

Der Wert eines Produktes wird bei der Wertanalyse nach VDI-Richtlinie 2800 als das Verhältnis von Funktionserfüllung zu Funktionskosten definiert. Beschreibt man die Funktionserfüllung mit dem Begriff der technischen Wertigkeit, so muss diese mit der wirtschaftlichen Wertigkeit korrelieren, was durch das sog. Stärke-Diagramm dargestellt wird [Fis08]. Charakteristisch für die Wertanalyse ist das Denken in Funktionen, ein systematisches Vorgehen und eine bereichsübergreifende Zusammenarbeit. Aus früheren Analysen von Ehrenspiel [Ehr03] und Horvath [Hor96] sind mit dieser Methode durchschnittlich zwischen 25 und 33% möglich.

7.3.3 Kostenprognose über multiple Regressionsrechnung

Liegen bereits zahlreiche Produkt- und Kosteninformationen von ähnlichen Produktgruppen vor, so ist es auch denkbar, über eine multiple Regressionsrechnung Kostenprognosen zu erstellen. Die Kostenschätzung ergibt sich aus den einzelnen, charakteristischen Parametern (Masse, Materialkilopreis, Fertigungszeit, Rüstzeit, Geometrieklasse etc.) und den numerisch ermittelten Wirkfaktoren.
Der Vorteil dieser Methodik liegt in der raschen Verfügbarkeit von Kosten für eine rasche Angebotserstellung.

7.4 Maßnahmen zur Kostensenkung

Eine sehr umfassende Zusammenstellung der kostenreduzierenden Möglichkeiten über die gesamte Lebensdauer stammt von [Kol94, Kal06]. Bemerkenswert ist dabei, dass ein Großteil der Kostensenkungsmaßnahmen in der Planungs- und Entwicklungsphase ansetzen. Kostenreduktionspotentiale bei der Entwicklung, Herstellung, im Betrieb und Entsorgung nach [Kal06] zeigt Tabelle 54.

Kostenreduzierendes Konstruieren			
Entwicklungs-kosten	**Herstellungs-kosten**	**Betriebs-, Wartungs- und Instandhaltungs-kosten**	**Recycling- und/oder Beseitigungs-kosten**
Herstellungskosten			
A. Forderungen reduzieren			
B. Kostengünstige Prinziplösung			
C. Fertigungsoperationen reduzieren oder kostengünstig gestalten 1. Standardisieren (d.h. Typenvielfalt reduzieren, Baureihen-, Baukastenbauweise) 2. Baugruppen reduzieren (Monobaugruppenbauweise) 3. Bauteilezahl reduzieren (integrierte Bauweise) 4. Einfache Bauteilgestalt (differenzierte Bauweise) 5. Flächenzahl reduzieren 6. Flächengröße reduzieren 7. Fertigungsoperationen reduzieren (toleranzgerechtes Konstruieren) 8. Nebentätigkeiten reduzieren 9. Eigenfertigung reduzieren 10. Günstigere Fertigungsverfahren 11. Günstigere Oberflächenformen 12. Einheitliches Fertigungsverfahren 13. Fertigungskosten minimieren (fertigungsgerechtes Konstruieren) 14. Losgrößen erhöhen (Mehrfachverwendung, Baureihen, Baukasten) 15. Einheitliches Werkzeug anstreben 16. Fertigungsgerechter Werkstoff			
D. Montageoperationen reduzieren oder kostengünstig gestalten 1. Bauteilezahl reduzieren 2. Nebentätigkeiten reduzieren 3. Kurze Fügewege anstreben 4. Einfache Fügebewegungsformen 5. Selbsttätiges Positionieren 6. Mehrfache Verwendung von Montageeinrichtungen (gleiche Teile) 7. Bauteileordnung bei Zwischentransport aufrecht erhalten 8. Ordnen von Bauteilen vereinfachen 9. Fehlmontagen automatisch verhindern			
E. Materialmengen reduzieren, teures Material substituieren 1. Bauteilezahl reduzieren 2. Unnötige Materialmengen vermeiden 3. Bauteilgröße reduzieren 4. Wiederverwertung von Abfallmaterial 5. Wiederverwendung gebrauchter Produkte (Recycling) 6. Umschichten von Material 7. Teures Material substituieren (Partial-, Insert-/Outsertbauweise)			
F. Prüfoperationen reduzieren oder kostengünstig gestalten 1. Stochastische Prüfungen 2. Prüfungen automatisieren 3. Bei Eintreten eines Fehlers: Folgeoperationen verhindern			
G. Lager- und Transportkosten reduzieren 1. Bauteilezahl reduzieren 2. Typenvielfalt reduzieren 3. Klein bauen 4. Leicht bauen 5. Transport- und lagergerechte Gestaltung (stapelbar)			
H. Recycling- und Entsorgungskosten reduzieren 1. Trennbarkeit der Materialien vorsehen 2. Umweltschonende Materialien einsetzen 3. Materialeinsatz reduzieren			

Tabelle 54: Kostenreduktionspotentiale bei der Entwicklung, Herstellung, im Betrieb und Entsorgung [Kal06]

Tabelle 55 zeigt übliche Herstellkostenanteile im produzierenden Gewerbe (etwa für einen mittelgroßen Schmiedebetrieb, KMU) aus eigener Erfahrung.

Kostenart	Prozentueller Anteil an den Gesamtkosten
Materialkosten	**40**
Personalkosten	**30**
Maschinenkosten (Abschreibungen)	**10**
Betriebsmittel	**10**
Energiekosten	**3**
Werkzeugbau	**3**
Instandhaltung und Nacharbeit	**2**
Sonstige Kosten	2

Tabelle 55: Detaillierte Kostenanteile an den Herstellkosten in einem Schmiedebetrieb

Aus diesem einfachen Beispiel wird bereits deutlich, dass einerseits durch Materialkosteneinsparungen (billigere Rohstoffe, Gewichtsreduktion durch Leichtbau, Oberflächenbeschichtungen u.a.m), sowie andererseits durch kostengünstigere Fertigungsverfahren (Maschinen mit hoher Produktivität bzw. Verfahren mit kurzen Taktzeiten, sowie Energie- und Ressourcenschonung) eine merkbare Kostenreduktion erreicht werden kann.

7.4.1 Senkung der Materialkosten

Aufgrund der Tatsache, dass Materialkosten im Schnitt ca. 40% der Gesamtkosten ausmachen, ist durch Maßnahmen zur Senkung der Materialkosten ein großes Potential vorhanden.
Folgende Möglichkeiten bieten sich an:

- Günstigere Einkaufquelle
- Kostengünstigeren Werkstoff wählen (Beispiele typischer Kilopreise, siehe Abb. 179
- Materialvolumen einsparen (Leichtbau, Topologieoptimierung, Vorformgebung beim Gesenkschmieden, Zerspanvolumen reduzieren, Abfallquote senken)
- Gewichtseinsparung durch Einsatz höherfester Werkstoffe
- Verfahren verwenden, die endkonturnah Produktion ermöglichen
- Reduzierung von Verschnitt (bspw. durch Nesting)
- Verbundlösungen
- Oberflächenveredeltes Material verwenden
- Günstige Standardteile zukaufen statt selbst fertigen
- Artgleichen Schrott preisgünstiger verkaufen

In der Bundesrepublik Deutschland wurden Aktivitäten in Richtung Materialeffizienz öffentlich gefördert, siehe Endbericht [Sch11].

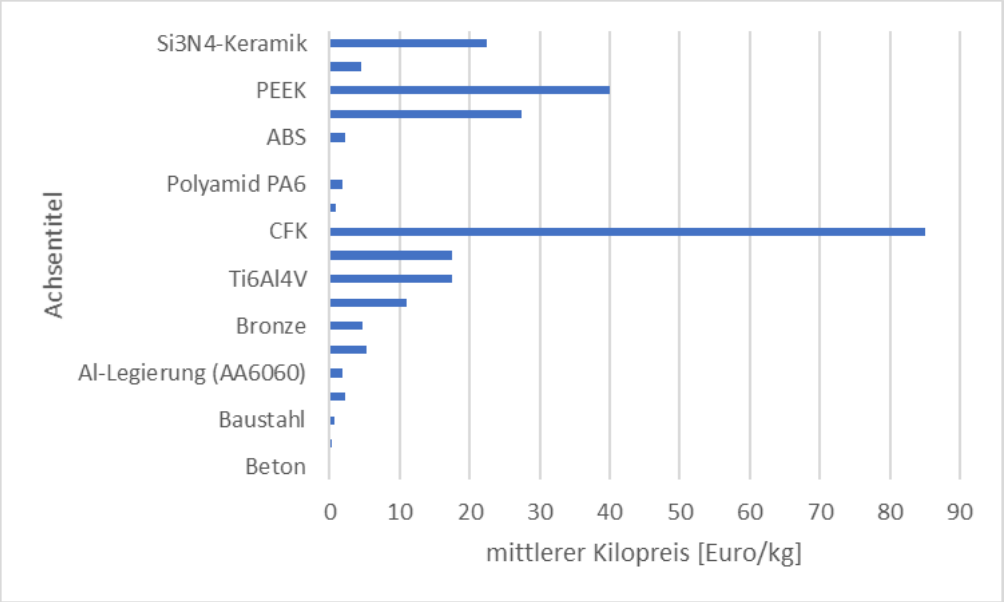


Abb. 179: Kilopreise häufig verwendeter Konstruktionswerkstoffe (eigene Recherche 2020)

7.4.2 Kosteneinsparung von direkten Fertigungskosten

Prinzipiell können Fertigungskosten durch folgende Maßnahmen reduziert werden:

- Verwendung kostengünstiger Fertigungsverfahren, siehe Abb. 180 bis Abb. 182
- Verwendung von Fertigungsarten mit kurzen Taktzeiten
- Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens je nach Losgröße, siehe Abb. 183
- Fertigung mit hohem Automatisierungsgrad
- Einsparung von Fertigungsschritten
- bessere Abstimmung zwischen Werkstück und Fertigungsverfahren (optim. Parameter)
- gut ausgebildetes Fachpersonal bzw. Schulungsmaßnahmen

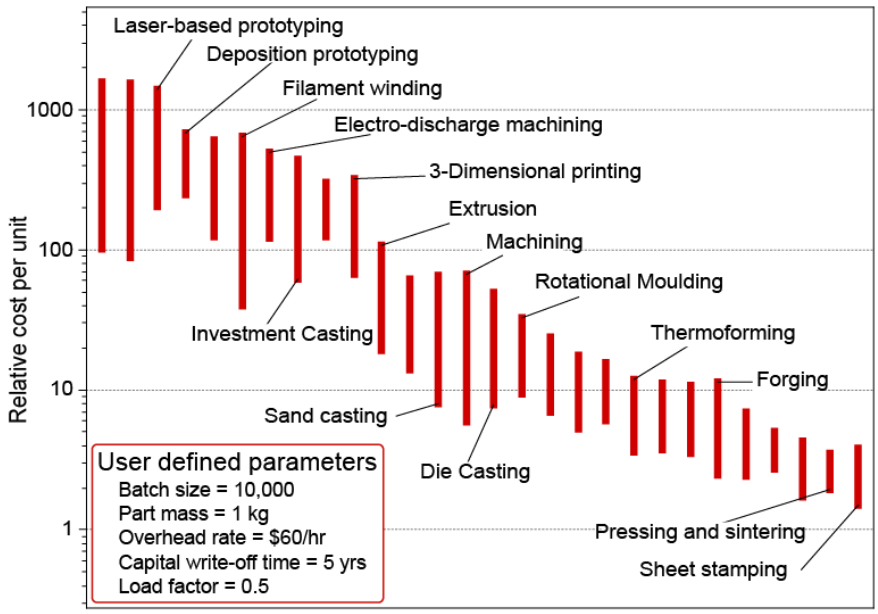


Abb. 180: Relativer Kostenvergleich einiger Fertigungstechnologien nach M.F.Ashby

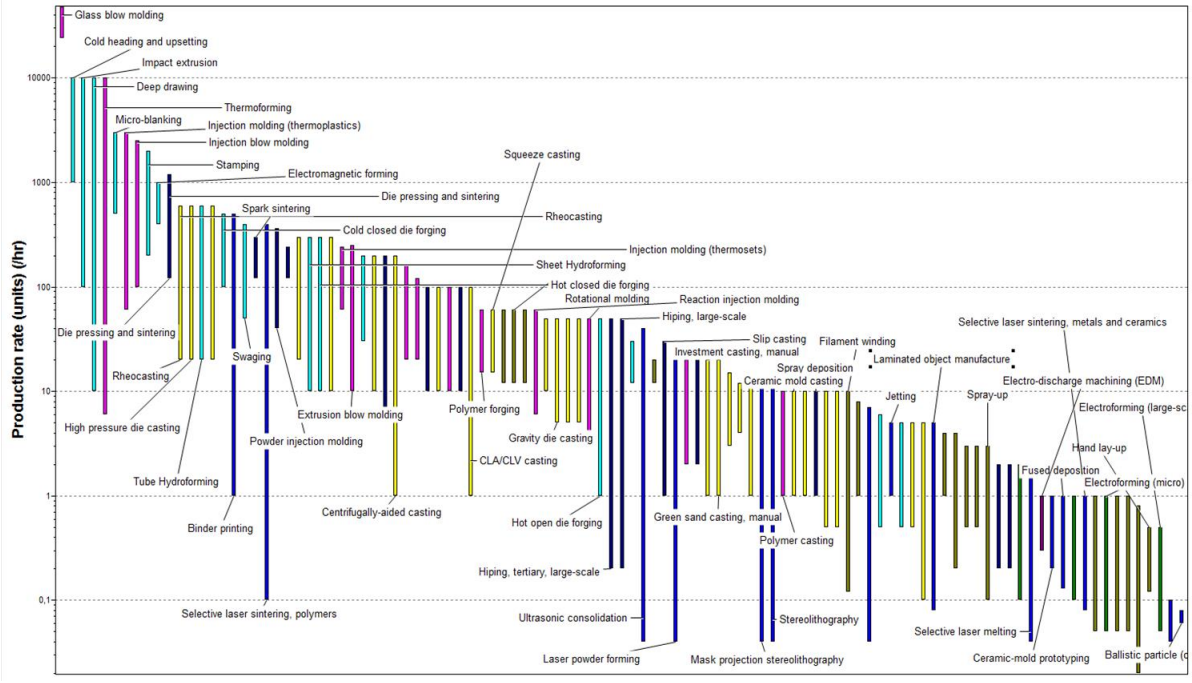


Abb. 181: Vergleich der Produktionsraten (Stück/Zeiteinheit), erstellt mit dem Software-Paket CES-EduPack von der Fa. Granta Design (UK)

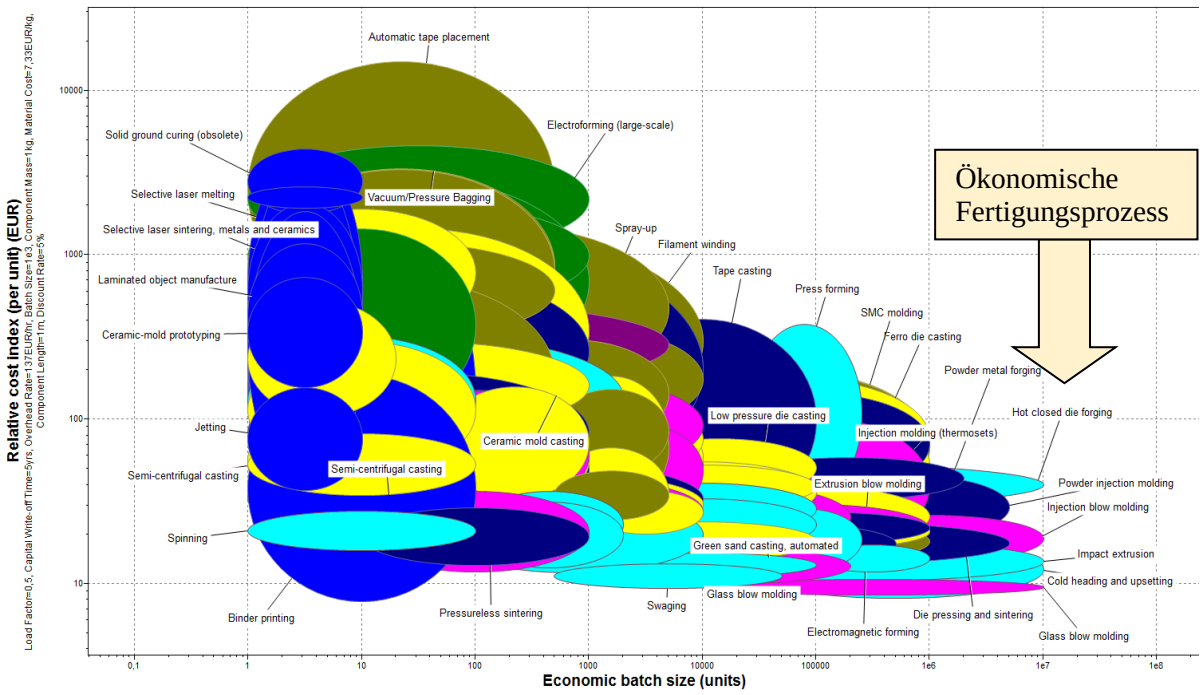


Abb. 182: Vergleich der Fertigungstechnologien nach ökonomischer Losgröße und Relativkosten, erstellt mit dem Software-Paket CES-EduPack von der Fa. Granta Design (UK)

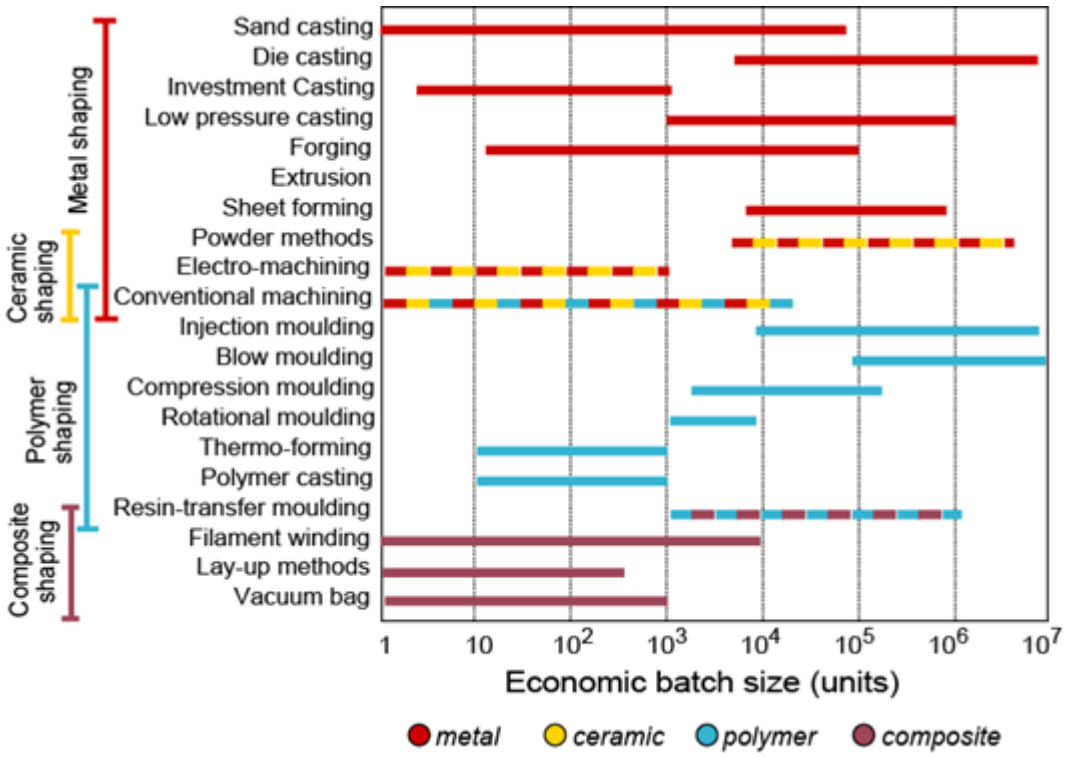


Abb. 183: Typische Losgrößenbereiche für einige wichtige Fertigungstechnologien nach M.F.Ashby

Als konkretes Beispiel seien Kostensenkungsmaßnahmen für das Strangpressen von Al-Profilen dargestellt [Ost98]:

- möglichst geringes Profilgewicht
  - Mindestwanddickenbegrenzung beachten
  - Querschnittsform optimieren
  - Legierungsfestigkeit abstimmen
- Möglichst kleinen umschriebenen Kreis
  - Werkzeugkosten sparen
  - Mindestwanddicken sind abhängig von der Profilgröße
- Fertigungskosten einsparen durch:
- Möglichst hohe Pressgeschwindigkeit
  - Optimale Querschnittsform (offen/hohl/einfach)
  - Legierungsfestigkeit abstimmen
  - Abhängigkeit von Pressenkapazität
- Möglichst geringe Nacharbeit
  - Optimale Profilform finden, um Richtarbeit zu vermeiden
  - An der Presse abschrecken
  - Nicht zu enge Toleranzen fordern
- Möglichst hohe Losgröße
  - Mindestliefermenge beachten

7.4.3 Kostenvergleich für unterschiedliche Kunststoff-Fertigungsvarianten

Einfache Kostenvergleiche umfassen die vom Bauteilvolumen abhängigen Materialkosten inkl. Nebenkosten und die von der Zykluszeit abhängigen Fertigungskosten, die sich aus den Kosten für das Personal, Maschinenabschreibung, Hallenmiete, Strom, Werkzeug etc. zusammensetzen. Abb. 184 zeigt am Beispiel eines Espresso-Maschinendeckels die Gegenüberstellung der Herstellkosten bei Verwendung von PP bzw. von ABS.

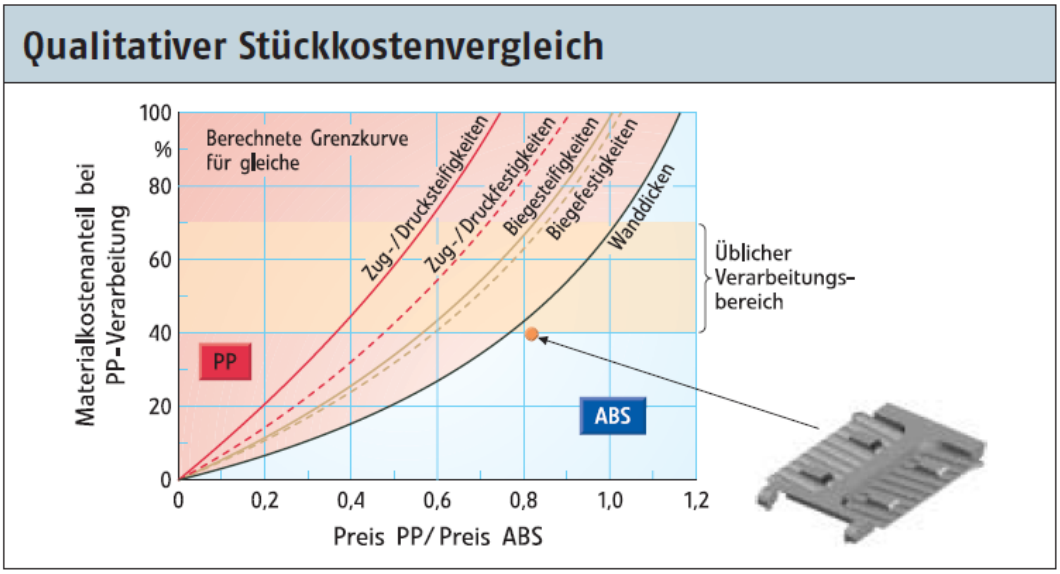


Bild 1. Abgrenzung der Bereiche mit geringeren Stückkosten bei ABS- und PP-Verarbeitung durch Grenzkurven am Beispiel eines Espressomaschinendeckels

Abb. 184: Abgrenzung der Bereiche mit geringeren Stückkosten bei ABS- und PP-Spritzgießverarbeitung eines Espressomaschinendeckels nach Pitz [Pit03]

Ein weiteres Beispiel zeigt den Vergleich des Spritzgießens zur Platten- und Profilextrusion, siehe Tabelle 56, für eine Langfeldleuchtenabdeckung mit einer Länge von ca. einem Meter und 2,5 mm Wanddicke. Die Kostenkalkulation in Abb. 185 zeigt den Kostenvorteil des Spritzgießens bei großen Stückzahlen.

Spritzgießen	Extrusion
Für jede Länge ein Spritzgießwerkzeug erforderlich	Nur ein Satz Werkzeuge für alle Längen
ggf. mehrere SG-Maschinen notwendig	3 Maschinen erforderlich (Extruder, SG-Maschine, Schweißanlage)
Höchste Oberflächenqualität	Geringere Oberflächenqualität
Höhere Funktionsintegration möglich	Nicht so hohe Funktionsintegration
Verschiedene Oberflächen realisierbar	Verschiedene Oberflächen/Strukturen machbar
Hohe Werkzeugkosten	Niedrige Werkzeugkosten
Für genau zu planende Fertigungslose	Flexible Fertigung
Aufwendige Lagerhaltung	Verringerte Lagerhaltung

Tabelle 56: Vergleich der beiden Technologien Spritzgießen und Extrusion

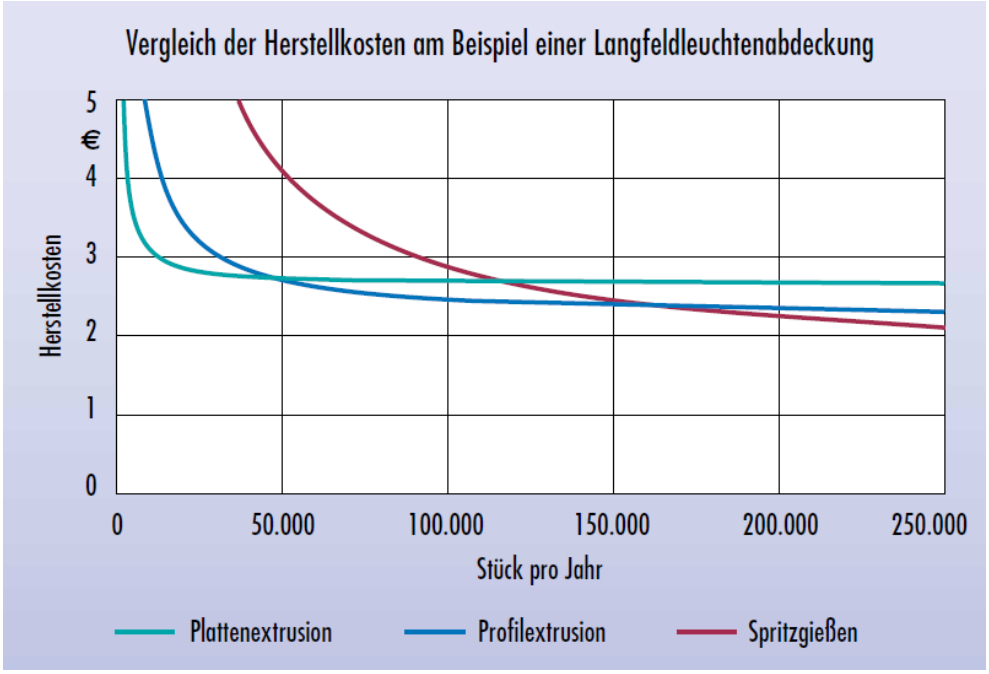


Abb. 185: Herstellkostenkalkulation für eine Langfeldleuchte nach BAYER

Nach [Ehr14] können die Herstellkosten für Spritzgussteile aus PP durch die in Abb. 186 angegebenen konstruktiven Maßnahmen gesenkt werden.

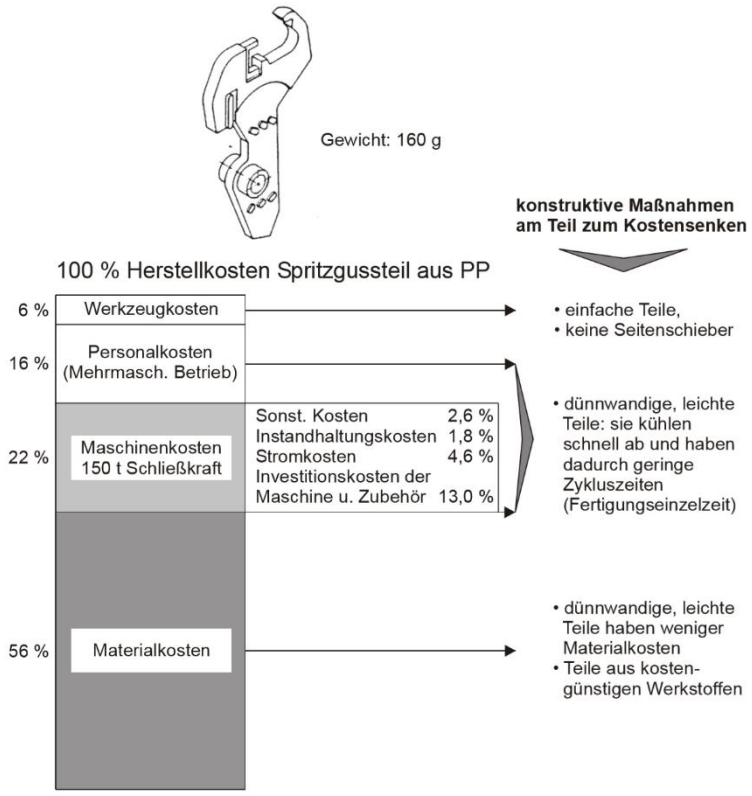


Abb. 186: Senkung der Herstellkosten beim Spritzgießen nach Ehrenspiel [Ehr14]

7.4.4 Industrielle Erfahrungen zur Kostenreduktion

Vom Institut für Produktentwicklung der TU München [Lin12] wurde vor einigen Jahren eine Studie über die tatsächlich umgesetzten Maßnahmen zur Kostenreduktion bei der Produktentwicklung durchgeführt, basierend auf 135 Wertanalysen. Die Häufigkeit der Nennungen auf die Frage, wie konkret Kostensenkungen erzielt werden konnten, ist in Abb. 187 gezeigt. Es bestätigen sich die aktuellen Themen, wie kostengünstige Fertigungsverfahren, fertigungsgerechte Gestaltung, Auswahl geeigneter Werkstoffe, geändertes Halbzeug u.a.m.

Entsprechend der Kaizen-Methode bzw. der Ansätze zur kontinuierlichen Verbesserung müssen alle Tätigkeiten, die keinen Beitrag zur Wertschöpfung liefern und die in der Literatur als Verschwendung beschrieben werden, eingeschränkt werden. Dazu gehören die Verringerung der Durchlaufzeit, Anpassung von Personal, Transport, Vorrichtungen u.a.m., Einsparungen bei Strom, Heizung, Wasser etc., organisatorische Maßnahmen zur Optimierung der Prozessabläufe und der Effizienz, optimierte Formen der Informationsbereitstellung und alle anderen Maßnahmen, die den Kundennutzen erhöhen.

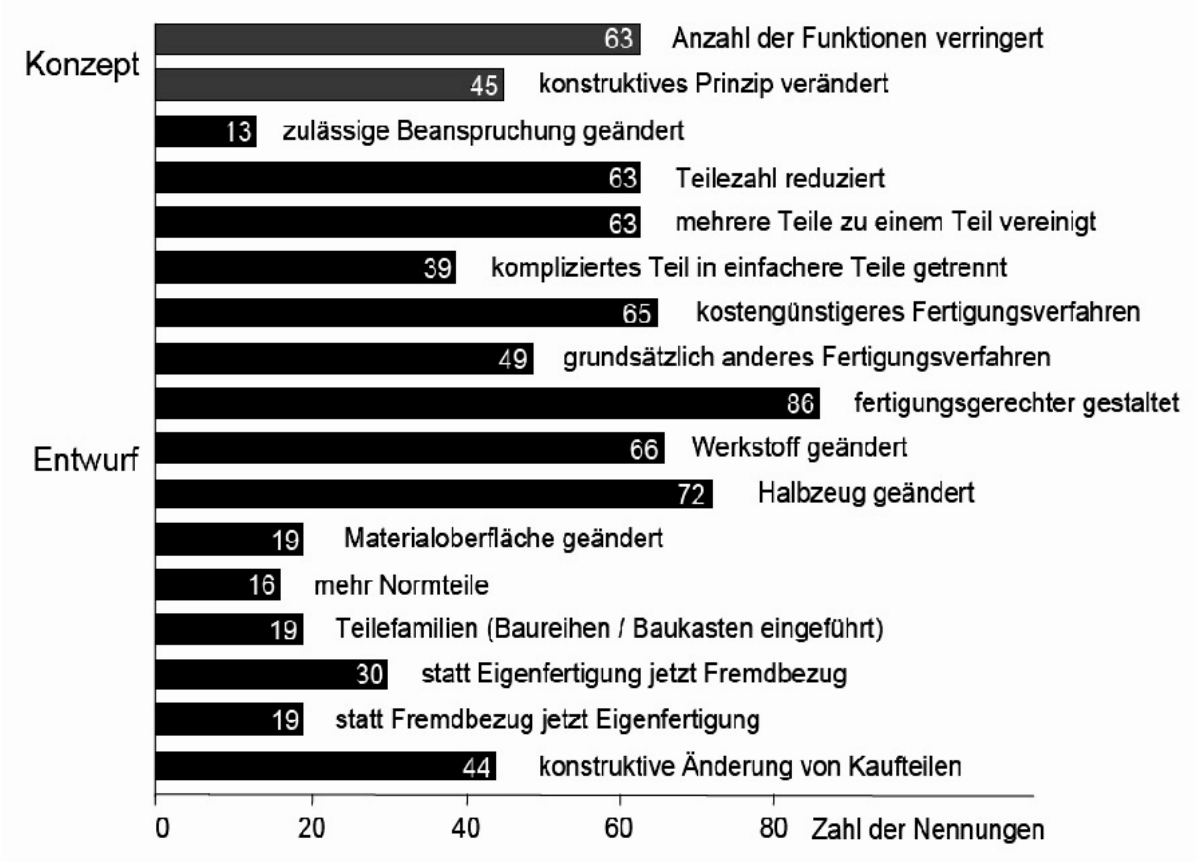


Abb. 187: Maßnahmen zur Senkung der Herstellkosten basierend auf industriellen Erkenntnissen [TUM]

7.4.5 Sekundäre Ansatzpunkte zur Kostensenkung

Die zuvor genannten Ansätze sind sicherlich nicht vollständig. Weitere Möglichkeiten wären:

- Überprüfung und Optimierung des Produktdesign
- Vollständige Material- und Betriebsmittel-Analyse
- Prüfung des Qualitäts-Niveaus inkl. Ausschuss und Nacharbeit
- Analyse der gesamten Wertschöpfungskette
- Identifikation von Verlusten in den einzelnen Prozessen
- Analyse der Anlagenverfügbarkeit und –auslastung
- Deckungsbeitrags-Analysen
- Analyse der Fest- und Lohnkosten

Damit verbunden ergibt auch die Frage des Zukaufs von außen bzw. einer „**make-or-buy**"-Entscheidung. Zu den quantifizierbaren Einflussfaktoren gehören in erster Linie die Kosten.
Sie sind zwar häufig das zentrale Entscheidungskriterium, dennoch müssen noch andere Faktoren berücksichtigt werden, wie

- Qualität, Technik und Funktionalität,
- Fertigungstechnisches Know-how und Flexibilität,
- Qualifikation der Mitarbeiter,
- Logistik,
- Zulieferer (Abhängigkeit, Termintreue) und
- Kunden- und Mitarbeiterzufriedenheit.

Wie in Abb. 188 dargestellt, werden ur- und umgeformte Teile aufgrund der hohen Fixkosten und des speziellen Prozess-Know-hows meist zugekauft, während spanende Verfahren wegen des geringen Investments oder des nicht unerheblichen Beitrags zur Genauigkeit und Funktion eher selten vergeben werden. Die Montage bleibt fast immer im eigenen Betrieb, weil damit eine enge Kundennähe gepflogen wird.

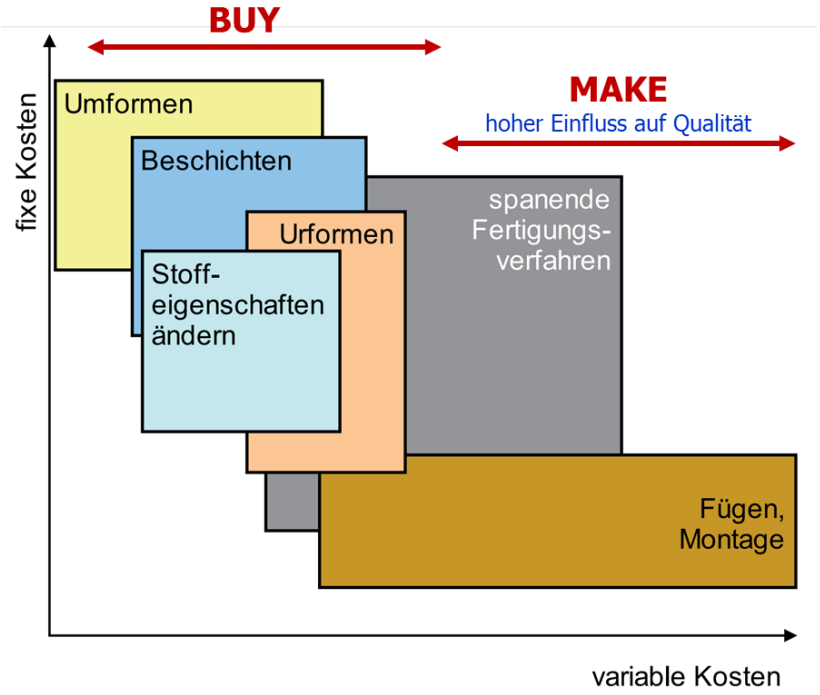


Abb. 188: Entscheidung zwischen „make-or-buy“ basiert auf den fixen und variablen Kosten

7.5 Kostensenkung durch modernen Einkauf

Nach dem Motto „Im Einkauf liegt der Gewinn“ - eine alte hanseatische Kaufmannsweisheit, werden in [Gab08, Wan13] die wichtigen Punkte, wie Global Sourcing, Outsourcing, effizientes Lieferantenmanagement, E-Procurement, ganzheitliche Kostenermittlung u.a.m. sehr detailliert beschrieben. Die operativen Beschaffungsabteilung hat dabei die Aufgabe, dem Bedarfsträger unter Betrachtung von Kostengesichtspunkten das richtige Material zum richtigen Zeitpunkt in der richtigen Menge und Qualität bereitzustellen. Der Ablauf erfolgt in mehreren Schritten [Wan13]:

1. Bedarfsermittlung (Materialdisposition ermittelt Nettobedarfsmenge und Termin)
2. Bedarfsmeldung (Meldung an den zuständigen Einkäufer)
3. Konsolidierung (der Einkauf konsolidiert die Bedarfe zu einer Sammelbestellung)
4. Lieferantenauswahl (der Einkauf sucht qualifizierte Lieferanten)
5. Angebotsanfrage (Anfrage an ausgewählte Lieferanten evtl. mit Lastenheft)
6. Angebotsvergleich (Vergleich der Angebote nach bestimmten Kriterien)
7. Angebotsauswahl (Auswahl des besten Angebots)
8. Bestellung (Bestellung wird ausgelöst, Lieferant bestätigt den Auftrag)
9. Auftragsverfolgung (Einkauf/Disposition überwacht Bestellungstermin und -mengen)
10. Lieferantenbeurteilung (Bewertung bzgl. Zeit- und Qualitätserfüllung)

Bei Klein- und Mittelbetrieben erfolgt die Beschaffung über eine zentrale Einheit. Die Vorteile einer zentralen Beschaffung sind:

- Die Bestellung von großen Mengen/Losgrößen führt zu günstigen Preisen.
- Der Einkauf hat umfassende Information bei allen Beschaffungsvorgängen
- Es gibt nur eine zentrale Ansprechstelle für interne Nachfragen und für Lieferanten.
- Höhere Potentiale für Standardisierung, Typung und Normung.

Bei einer dezentralen Beschaffung ergeben sich kürzere Entscheidungswege und eine höhere Flexibilität und Anpassungsfähigkeit.
Zudem gibt es Erfahrungsaustausch zwischen den großen Unternehmen bzgl. Einkaufsstrategien, siehe [BME09, BME10]. Erfahrungswerte zeigen, dass durch Global Sourcing ca. 30% bei den Kosteneinsparungen, aber 70% durch Design-Änderungen erreichbar sind.
Dem Prozess der Lieferantenauswahl kommt jedenfalls eine große Bedeutung zu. Hauptziele sind dabei die Sicherstellung der Versorgungssicherheit, Kostensenkung durch spezielle Konditionen und vereinbarte Losgrößen, Vermeidung von Abhängigkeit und Kooperations-/Teamfähigkeit [Wan14].
Bei komplexen Produkten wie bspw. beim Automobilbau kommt es beim OEM (=“original equipment manufacturer“, wie VW, Daimler oder BMW) häufig zu einer Reduktion der Lieferantenanzahl hin zu System- (Tier 1) und Modullieferanten (Tier 2). Systemlieferanten übernehmen dabei eine gemeinsame Verantwortung und Entwicklungstätigkeit. Von Komponentenlieferanten wird eine hohe Qualität, angepasste Kosten und Flexibilität erwartet. Normteillieferanten (Tier 3) werden dagegen meist über das Preisniveau ausgewählt.
Einige Datenquellen zu Unternehmen, Branchen, Märkte und Produkten zeigt Abb. 189.

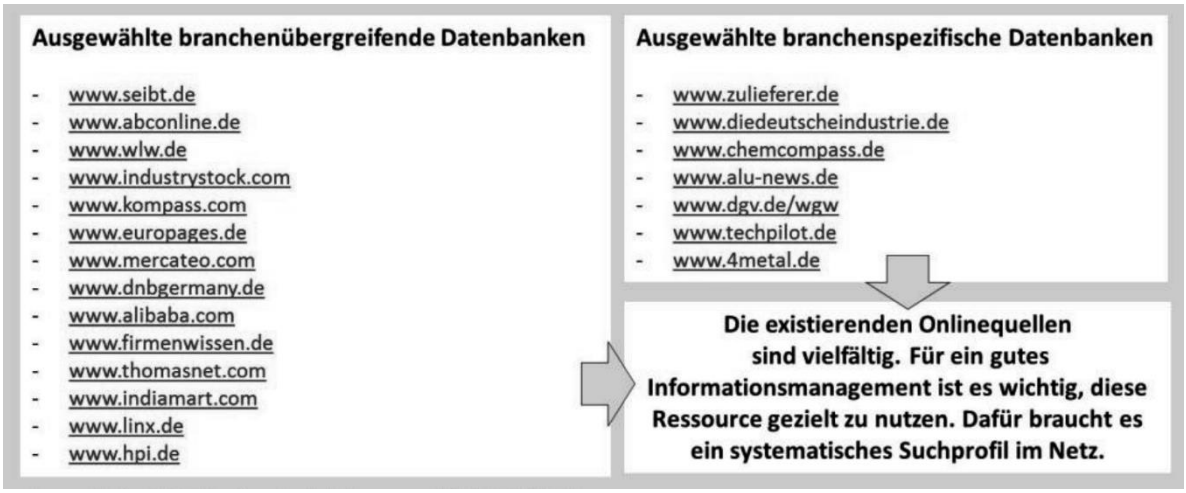


Abb. 189: Einige nützliche Datenbanken für den Einkauf nach Power in Procurement [Bra12]

7.6 Kostenoptimierung bei verketteten Prozessen

In Anlehnung an die Vorgehensweise nach der VDI-Richtlinie 2221, wird in [Goe11] eine Methodik zur Prozesskettenbewertung vorgestellt, siehe Abb. 190. Dabei werden konkrete Kosten für jeden Prozessschritt ermittelt und aufsummiert, sowie die relevanten Kostenarten inklusiver der Einflussgrößen, siehe Abb. 191, berücksichtigt. Dadurch sind Sensibilitätsstudien und Variantenvergleiche möglich. Am Beispiel der Herstellung von Strukturbauteilen durch Presshärten wird der Ansatz konkret verifiziert. Die Ausgangsdaten wurden wie folgt festgelegt:

- Produktionsmenge 6400 Stück/Tag

- Arbeitsstunden 6000 h/Jahr
- Lohnsatz 35 €/h
- Materialpreis 1 €/kg
- Zinssatz 7%
- Raumkostensatz 160 €/m²
- Energiepreis 0,08 €/kWh Strom
- Nutzungsdauer 15 Jahre für Anlagen, 7 J für Werkzeuge

Die Ergebnisdarstellung für diesen Anwendungsfall in Tabelle 57 zeigt eine klare Übersicht der Kostenarten, der Kosteneinflussgrößen, aufgeschlüsselt entlang der Prozessroute.

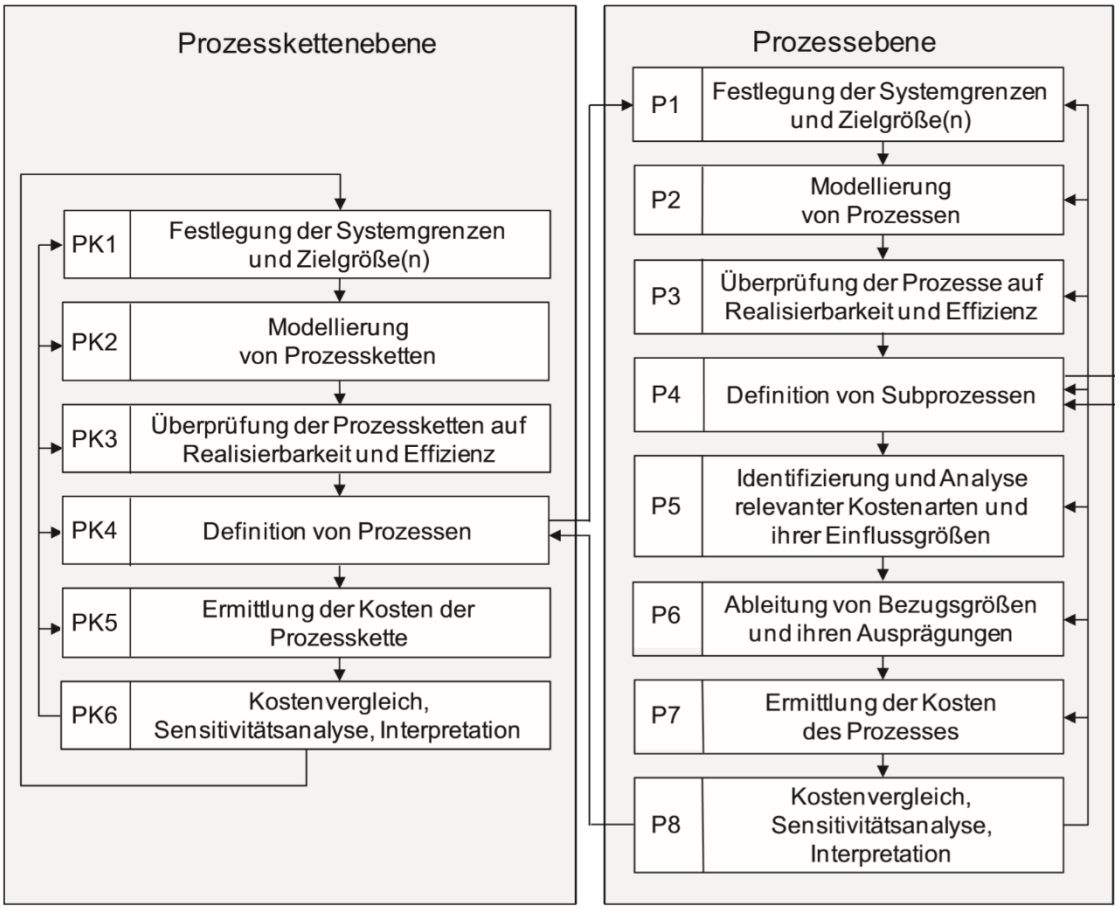


Abb. 190: Vorgehensmodell zur wirtschaftlichen Bewertung von Prozessketten [Goe11]

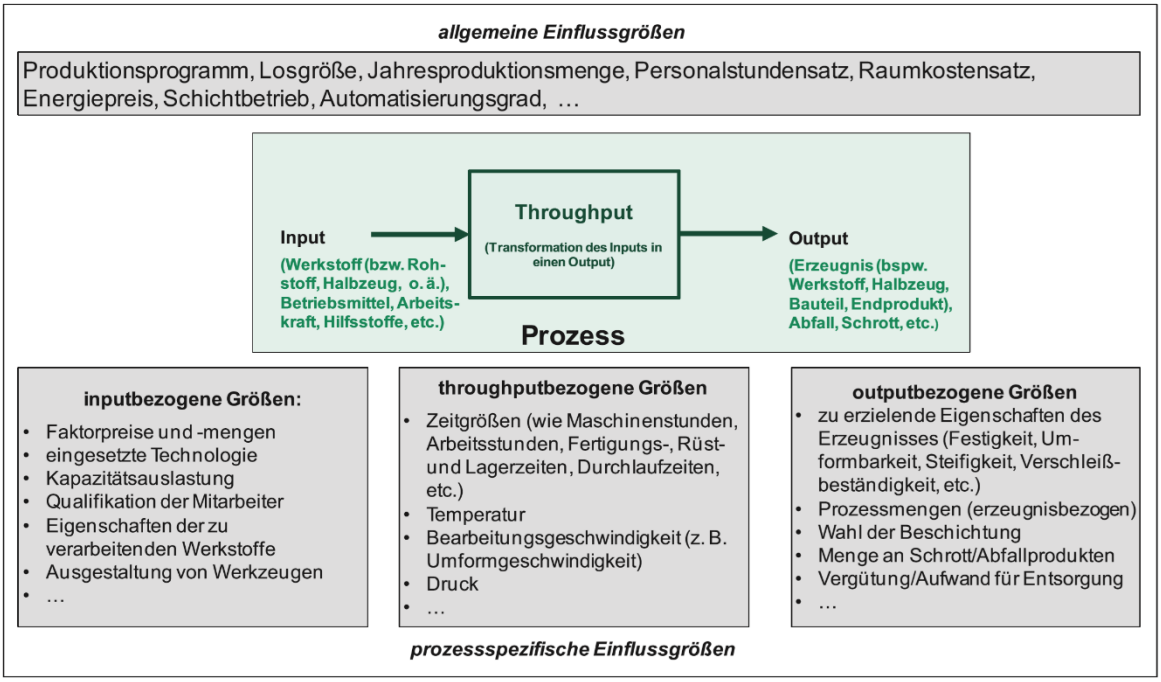


Abb. 191: Typische Einflussgrößen der Kosten eines Prozesses

	PROZESS							
	Platinen-schnitt	Handling	Erwärmung	Handling	Presshärten	Handling	Laser-beschnitt	Hart-beschnitt
Anlagenanzahl	1	2	1	1	1	2	9	1
Taktzeit [s]	2	25	25	25	25	25	120	4
Maschinenauslastung [%]	7	93	93	93	93	93	99	30
Abschreibung [T€/Jahr]	101,3	8,7	80	5,2	166,7	9,13	420	166,7
Raumkosten [T€]	5,6	9,6	25,6	4,8	1,6	9,6	72	1,6
Energiekosten [T€/Jahr]	3,9	20,3	117,3	10,1	58,7	20,3	25,6	5,2
Sonstige Kosten (Werkzeug, Hilfsstoffe, Instandhaltung, ohne kalkul. Zinsen, …) [T€/Jahr]	48,2	1,5	207,3	0,75	185,9	1,5	448,7	151,4
Maschinenstundensatz [€/h]	483,49	8,03	64,04	4,25	93,22	8,15	200,28	241,82
Fertigungsgemeinkosten [€/Bauteil]	0,13	0,03	0,22	0,03	0,32	0,03	0,74	0,27
Personaleinsatz	1	2					3,5	1
Personalkosten [€/Bauteil]	0,13	0,26					0,46	0,13
Bauteilgewicht [kg]	4,25							
Materialausnutzungsgrad [%]	70							
Materialkosten [€/Bauteil]	6,07							

Tabelle 57: Übersicht zu den Kostenarten je Prozess in der Prozesskette des Presshärten von Karosserieteilen nach [Goe13]

Die Ziele und Entscheidungskriterien bei der Auswahl der Prozesskette bleiben aber so, wie für jede einzelne Fertigungstechnologie, siehe Abb. 192 nach [Swa14].

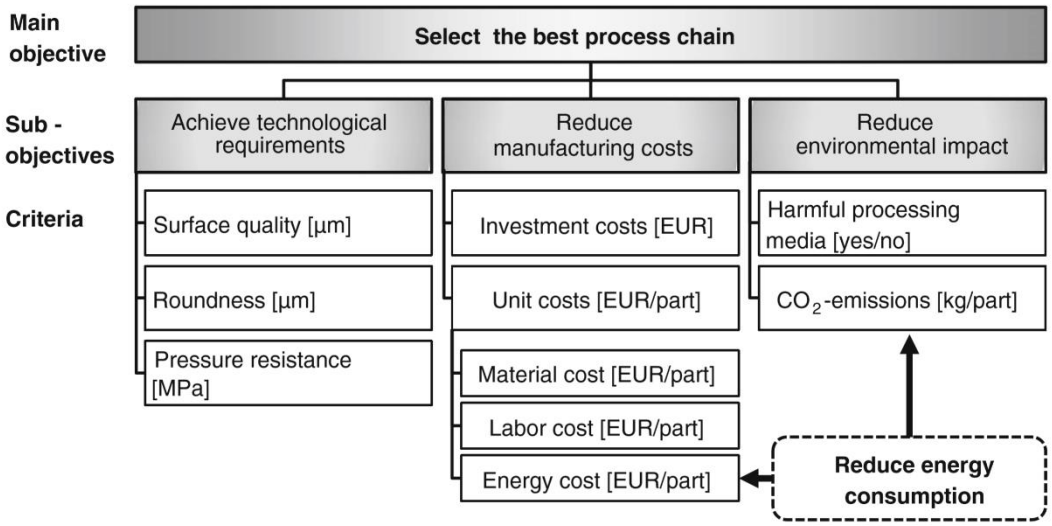


Abb. 192: Ziele und Auswahlkriterien für die Auswahl von Fertigungsketten nach [Swa14]

7.7 Life-Cycle-Assessment (LCA), -Costing (LCC) und -Management (LCM)

7.7.1 Lebenszyklusanalyse (LCA)

Eine Lebenszyklusanalyse /Life Cycle Assessment (LCA) oder auch Umweltbilanz oder Ökobilanz ist eine systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten während des gesamten Lebensweges (from cradle to grave – von der Wiege zum Grab). Dabei wird ausgehend vom Rohstoff, die Herstellung, die Nutzung und die Entsorgung.
Beim Erstellen einer Lebenszyklusanalyse sind zwei wichtige Grundsätze zu berücksichtigen: Erstens die Betrachtung aller relevanten potenziellen Schadwirkungen auf die Umweltmedien Boden, Luft und Wasser und zweitens die Betrachtung aller Stoffströme.
Eine vollständige Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 umfasst folgende Phasen:

1. Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen,
2. Erstellung einer Sachbilanz,
3. Wirkungsabschätzung und
4. Auswertung

In der Zieldefinitionsphase wird der Nutzen und die Funktionen eines Produktes festgelegt und der übliche Lebensweg beginnend vom Rohstoff bis zur Entsorgung beschrieben. In der Sachbilanz werden Ressourcenverbräuche, Emissionen und evtl. andere Risikofaktoren quantitativ erfasst. In Phase 3 werden die Umweltauswirkungen (Treibhauseffekt, saurer Regen, Toxizität u.a.m.) bewertet und normiert, um eine gute Vergleichbarkeit zu erreichen. In der Auswertung werden wichtige Parameter identifiziert und eine Konsistenz- Vollständigkeits- und Sensitivitätsanalyse angeschlossen. Als Bewertungsmethoden werden Verfahren wie die ABC-Analyse, CO_2-Fußabdruck, CO_2-Bilanz, Schadenskostenansätze, Eco-Indikator 99, Energieaufwände, kritische Volumina, Umweltbelastungspunkte u.a. herangezogen. Die verbale Bewertung ist ein sehr einfache, aber weit verbreitete Möglichkeit unterschiedliche Lösungsalternativen zu vergleichen.
Zu diesem Thema gibt es sehr viele Literatur und Fallbeispiele. Einige Referenzen sind im Literaturanhang angeführt.

7.7.2 Lebenszykluskosten (LCC)

Das Life Cycle Costing (LCC) betrachtet nicht nur die Anschaffungskosten, sondern auch die Kosten der Nutzung (für Betriebspersonal, Instandhaltung, Energiebedarf, Verbrauchsmittel) und der Entsorgung. LCC ist somit eine mit der LCA verknüpfte finanzielle Aufwandsbewertung über die gesamte Lebensdauer. Zur Durchführung der LCC gibt es mehrere Vorgehensweisen bzw. Empfehlungen:
DIN EN 60300-3-3:2004 „Anwendungsleitfaden Lebenszykluskosten“
VDI 2884:2005 „Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC)“
VDMA 34160:2006 „Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen“
In einer Gesamtkostenbetrachtung „Total Cost of Ownership (TCO)“ werden alle anfallenden Kosten abgeschätzt und zusammengefasst, also nicht nur die Anschaffungskosten, sondern auch alle Kosten der Nutzung und der Entsorgung.

7.7.3 Life-Cycle-Management (LCM)

Die gesamte Gestaltung im Sinne von geschlossenen Stoffkreisläufen ist Aufgabe des Life-Cycle-Managements. Ziel ist es, das Prinzip „from Cradle to Grave“ durch das Konzept „from Cradle to Cradle“ zu ersetzen, d.h. Nachhaltigkeitsfragen, Recycling, Wiederverwertung u.a. stehen im Mittelpunkt.
Mit diesen Zielen versucht man, den technischen Fortschritt in Übereinstimmung mit den ökonomischen und den ökologischen Randbedingungen bzw. mit einem verstärkten Umweltbewusstsein zu bringen. Konkrete Schritte dazu sind:

- Wahl abfallarmer, energiesparender und emissionsarmer Fertigungsverfahren in der Güterproduktion,
- Einsatz kreislauffähiger (recyclingfähiger) Werkstoffe (z.B. neuartiger verrottungsfreudiger Verpackungsmaterialien),
- weitgehender Verzicht auf Zusatz- und Hilfsstoffe (z.B. Verzicht auf Kühlschmierstoffe oder galvanische Überzüge),
- Minimierung der Werkstoffvielfalt und Sicherung der Trenn- und Separierbarkeit der Werkstoffe,
- Einsatz einer zerlegungsfreundlichen Baustruktur und Verbindungstechnik u.a.m.

Aufgrund des verstärkten Umweltbewusstseins und der klaren Aussage und Bekenntnis der EU zur Kreislaufwirtschaft und zur Nachhaltigkeit wird das Thema Life-Cycle-Management in Zukunft noch einen größeren Platz einnehmen – ein Umstand, der auch in der Ausbildung gebührend berücksichtigt werden muss.

7.8 Maßnahmen zur Bewältigung von Krisensituationen

Gerade in der Finalisierungsphase dieses Buches im März 2020 wurde die Welt von der Coronavirus-Pandemie heimgesucht, die natürlich auch enorme Auswirkungen für das Wirtschaftsleben mit sich führte und evtl. noch längere Zeit beeinflussen wird. Durch die drastische Einschränkung der Reisetätigkeiten waren insbesondere die Luftfahrt, die Reisegesellschaften, Hotellerie und Automobilindustrie essenziell betroffen. Nur durch rasche Unterstützungsmaßnahmen durch den Staat und die Europäische Zentralbank konnte ein wirtschaftlicher Kollaps verhindert werden. Wir wissen zurzeit noch zu wenig über die Folgen dieser Krise, aber wir wollen hier frühere, zum Teil ähnliche Situationen betrachten und zielorientierte Maßnahmen zur Bewältigung von Krisensituationen ableiten. Krisen sind auch ein fester Bestandteil der Wirtschafts- und Finanzwelt, d.h. nach der Krise ist vor der Krise, weshalb man stets dafür gerüstet sein soll.

Eine Wirtschaftskrise ist gekennzeichnet durch ein starkes Absinken des Wirtschaftswachstums (d.h. Rezession), mit den Folgen von Einkommensverlusten, Zahlungsproblemen, Unternehmenskonkurse und steigende Arbeitslosigkeit. Große Weltwirtschaftskrisen waren in den Jahren 1873 (Immobilienblase an der Wiener Börse), die Weltwirtschaftskrise 1929 (unvorsichtige Kreditvergaben, überhitzte Finanzmärkte, drastische Aktienkursstürze), die Erdölkrise 1973 (Ölembargo) und die Liquiditätskrise 2008/2009 [Plu17, Bau13].
Einige wesentliche Ansätze zur Bewältigung derartiger Wirtschaftskrisen im Bereich der Produktion werden in [Wim13, Dis09, Gie12] behandelt und umfassen die Punkte:

- realistisches Einschätzen der Lage und glaubwürdige Kommunikation
- Zahlungsfähigkeit (Liquidität) sicherstellen
- Optimierung des Working Capital (Cash-Position verbessern)
- gute Kommunikation mit der Hausbank (Vermeidung einer Kreditklemme)
- weitsichtige Personalpolitik (Zusammenstehen, Loyalität, Wertschätzung…)
- Kostensenkungsprogramme (Verschlankung von Prozessen, Reorganisation)
- Effizienzsteigerungen in unterschiedlichsten Bereichen
- maßvolle Reduktion/Stopp der Investitionsvorhaben
- Kapitalzuschüsse durch Eigentümer
- Vorbereitungen treffen für einen raschen, erfolgreichen Neustart (Innovationsdenken)

Von den zuvor genannten Faktoren ist sicherlich die Sicherung der Liquidität und der Umgang mit dem Personal am wichtigsten. Wie ein Unternehmen in Krisen mit seinen Leuten umgeht, entscheidet über deren Loyalität und Engagement. Mit Kurzarbeit, Talentmanagement und Ausbildungsmaßnahmen unter direkter Einbindung der Belegschaft bei größeren Entscheidungen sind in vielen Fällen die Krisen bewältigbar. Diese besondere Fähigkeit, mit schweren Krisen fertig zu werden, wird auch als „organizational resilience“ bezeichnet.
Natürlich sollten all diese Maßnahmen bereits in guten Zeiten vorbereitet werden (Stichwort: mind. 1/3 Eigenkapitalquote, Leiharbeiteranteil, Flexibilitätskonzepte u.a.m.).
Aus technisch-wirtschaftlicher Sicht ergibt sich meist auch die Notwendigkeit einer Reorientierung auf zukünftige neue Herausforderungen, d.h. ein strategisches Überdenken der Unternehmensziele, des Produkt-Portfolios und das Aneignen neuer Fähigkeiten (E-Commerce, Automatisierung, Digitalisierung, Wissensmanagement, Serviceangebot u.a.m.).

7.9 Literaturangaben zu Kapitel 7

Kap.7.1
[Ash10] M.Ashby, H.Shercliff, D.Cebon: Materials engineering, science, processing and design, 2nd ed. Butterworth-Heinemann / Elsevier, 2010
[Bau12] J.Bauer: Produktionscontrolling und -management mit SAP®ERP, Springer Vieweg, 4.Aufl., 2012
[Bec08] T.Becker: Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren, Springer Verlag, 2.Aufl., 2008
[Bel15] V.K.Bellmann, G.Meyer: Effiziente Auswahl von Methoden – Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit durch eine zielgerichtete Methodenauswahl, Hanser ZWF 110, H.6, 344-347
[Cam07] R.Camp: Benchmarking - The search for industry best practices that lead to superior performance. Productivity Press, University Park, Il. 2007
[Ehr14] K.Ehrlenspiel, A.Kiewert, U.Lindemann, M.Mörtl: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren – Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung, Springer-Verlag, Berlin, 7.Aufl. 2014
[Fis08] J.O.Fischer: Kostenbewusstes Konstruieren – Praxisbewährte Methoden und Informationssysteme für den Konstruktionsprozess, Springer Berlin Heidelberg, 2008
[Her15] E.Hering: Kostenrechnung und Kostenmanagement für Ingenieure, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015
[Kaj05] P.Kajüter: Kostenmanagement in der deutschen Unternehmenspraxis, Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung (ZfbF), 57, Feb. 2005, 79-100
B.Klein: Kostenoptimiertes Produkt- und Prozessdesign, Carl Hanser Verlag, München, 2010
[Pli06] W.Plinke, M.Rese: Industrielle Kostenrechnung – Eine Einführung, Springer Verlag, 7.Aufl., 2006
[Rip19] S.Ripperda: Methodische Unterstützung zur kostenbasierten Auswahl modularer Produktstrukturen, Springer Vieweg, Berlin, 2019

Kap.7.2
[Ehr00] K.Ehrlenspiel, A.Kiewert, U.Lindemann: Kostengünstiges Entwickeln und Konstruieren, Springer-Verlag, Berlin, 2000
[Swi03] K.G.Swift, J.D.Booker: Process Selection – From Design to Manufacture, Butterworth-Heinemann, Burlington, MA, 2nd ed., 2003

Kap.7.3
[Bad97] A.Baden: Strategische Kostenrechnung: Einsatzmöglichkeiten und Grenzen, Springer Gabler, Wiesbaden, 1997
[Boc17] S.Bock, M.Pütz: Implementing value engineering based on a multidimensional quality-oriented control calculus within a Target Costing and Target Pricing approach, Int.J.Production Economics 183, 2017, 146-158
[Bug95] W.Buggert, A.Wielpütz: Target costing: Grundlagen und Umsetzung des Zielkostenmanagements, Hanser Verlag, München, Wien, 1995
[Cli03] M.B.Clifton, H.M.B.Bird, R.E.Albano, W.P.Townsend: Target Costing – Market-Drifen Product Design, Marcel Dekker Inc. New York, 2003
[Dom85] A.Domin, J.Maskow: Design to Cost (DTC) – eine Methode zur Kostenreduzierung in der Produktentwicklungsphase, Konstruktion 37, 1985, H.10, 395-399
[Ehr03] K.Ehrlenspiel: Integrierte Produktentwicklung, Hanser München, 2.Aufl., 2003
[Esa98] A.M.K.Esawi, M.F.Ashby: Cost-based ranking for manufacturing process selection, Proc. 2nd Int. Conf. On Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME'98), Compiegne, France, May 27-29, 1998, Vol.4, 1001-1008
[Fis12] S.Fischbach: Grundlagen der Kostenrechnung, mi-Wirtschaftsbuch, 5.Aufl., 2012

[Fri10] G.Friedl, C.Hofmann, B.Pedell: Kostenrechnung – eine entscheidungsorientierte Einführung, Verlag Vahlen, 2010
[Gin11] L.Ginzinger, W.Günthner, M.Schneider, H.Ulbrich: Kettenspanner als Beispiel für Design-to-Cost im Automobilbau, MTZ-Motortechn. Zeitschrift 72, 2011, 220-225
[Hor96] P.Horvath, R.Gleich, K.Scholl: Vergleichende Betrachtung der bekanntesten Kalkulationsmethoden für das kostengünstige Konstruieren, in: W.Männel, Frühzeitige Produktkostenkalkulation für das Kostenmanagement, Kostenrechnungspraxis, Sonderheft 1, 1996, 53-62
[Mei11] G.Meier: Prozessintegration des Target Costings in der Fertigungsindustrie am Beispiel Sondermaschinenbau, Dissertation, KIT Karlsruhe, 2011
[Sav17] A.Savoretti, M.Mandolini, R.Raffaeli, M. Germani: Analysis of the requirements of an early life-cycle cost estimation tool: an industrial survey, Procedia Manufacturing 11, 2017, 1675-1683
[Sch08] C.Schulte-Henke: Kundenorientiertes Target Costing und Zuliefererintegration für komplexe Produkte, Gabler Ed. Wissenschaft, 2008
[Zen10] Y.Zengin, E.Ada: Cost management through product design: target costing approach, Int. J. of Production Research 48, 2010, 5593-5611

Kap.7.4

[Bay02] Bayer AG, GB Kunststoffe: Spritzgießen von Qualitätsformteilen, ATI 1147 d Verfahrenstechnische Alternativen und Verfahrensauswahl, Leverkusen, 2002
[Ehr14] K.Ehrlenspiel, A.Kiewert, U.Lindemann, M.Mörtl: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, Springer Vieweg, 7.Auflage, 2014
[Hat08] T.Hatzenbichler, B.Buchmayr: Vorformoptimierung für das Gesenkschmieden mittels numerischer Simulation, BHM 153, H.11, 2008, 413-417
[Hau04] M.Haunerdinger, H.-J.Probst: Kosten senken. Checklisten – Rechner – Methoden, Haufe Verlag, 2004
[Kal06] A.Kalweit, C.Paul, S.Peters, R.Wallbaum: Handbuch für Technisches Produktdesign, Springer Berlin, Heidelberg, 2006
[Kol94] R.Koller: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 3. Aufl., 1994
[Lin12] U. Lindemann, Institut für Produktentwicklung, TU München, www.pe.mw.tum.de
[Ost98] F.Ostermann: Anwendungstechnologie Aluminium, VDI-Buch, Springer, 1998
[Pit03] H.-J.Pitz: Zykluszeit ist Geld, Kunststoffe 5/2003, 41-46
[Sch11] M.Schröter, C.Lerch, A.Jäger: Materialeffizienz in der Produktion: Einsparpotenziale und Verbreitung von Konzepten zur Materialeinsparung im Verarbeitenden Gewerbe, Endbericht an das BMWi, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, 2011

Kap.7.5

[BME09] BME Akademie GmbH: Einkauf von Schmiedeteilen, BME-Forum München, 25.-27.11,2009
[BME10] BME Akademie GmbH: Einkauf von Schmiedeteilen, 2.BME-Forum, München, 24.-26.11.2010
[Bra12] E.Bräkling, K.Oidtmann: Power in Procurement -Erfolgreich einkaufen - Wettbewerbsvorteile sichern - Gewinne steigern. Springer Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012
[Gab08] C.W. Gabath: Gewinngarant Einkauf, Gabler Wiesbaden, 2008
[Sch16] D.Schrack: Nachhaltigkeitsorientierte Materialflusskostenrechnung, Springer Gabler Verlag, 2016
[Wan13] H.Wannenwetsch: Erfolgreiche Verhandlungsführung in Einkauf und Logistik, Springer Vieweg, 4.Aufl., 2013
[Wan14] H.Wannenwetsch: Integrierte Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung, Springer Vieweg, 5.Aufl., Berlin, Heidelberg, 2014

Kap.7.6
[Goe11] U.Götze, B.Hache, A.Schmidt, T.Weber: Methodik zur kostenorientierten Bewertung von Prozessketten der Werkstoffverarbeitung. In: MWT, 2011, 42(7): 647-657
[Goe13] U.Götze, S.Zönnchen, J.Schönherr: Wirtschaftliche Bewertung von Prozesskettenvarianten am Beispiel von Strukturbauteilen, in R.Neugebauer et.al. Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD, Workshop, Auerbach, 2013
[Jen07] S.Jende, S.Baumgarten: Material- und Kosteneinsparungen bei kombinierten Fertigungsprozessen – Massenteile für die Automobilindustrie, Konstruktion Jan/Feb. 2007, 63-66
[Lab17] I.Labbus, C.Schmidt, S.Thiede, C.Hermann: Integration von Produktionsdaten zur lebenszykluskostenorientierten Prozesskettenplanung, ZWF 112, 2017, 540-543
[Sch14] S.Schindler: Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion, Dissertation, TU München, Fak.f.Maschinenwesen, 2014
[Swa14] M.Swat, H.Brünnet, D.Bähre: Selecting Manufacturing Process Chains in the Early Stage of the Product Engineering Process with Focus on Energy Consumption, in E.Henriques (eds.) Technology and Manufacturing Process Selection, Springer Series in Advanced Manufacturing, Springer Verlag, London, 2014, 153ff
[Wiki] Wikipedia: Wertschöpfungskettendiagramm, abgefragt am 2.11.2019
[Will08] H.Willms: Methodisches System zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen, Dissertation RWTH Aachen, Fak.Maschinenwesen, 2008

Kap.7.7
[Arn11] V.Arnold, H.Dettmering, T.Engel, A.Karcher: Product Lifecycle Management beherrschen: Ein Anwenderbuch für den Mittelstand, Springer, 2.Auflage, 2011
[Asi98] Y.Asiedu, P.Gu: Product life cycle analysis: state of the art review, Int. J. Prod. Res. 36, 1998, No.4, 883-908
[Bra18] R.Bradley, I.S.Jawahir, F.Badurdeen, K.Rouch: A total life cycle cost model (TLCCM) for the circular economy and its application to post-recovery resource allocation, Resources, Concervation & Recycling 135, 2018, 141-149
[Hag08] C.Hagelüken: Recycling ausgewählter NE-Metalle aus offenen Systemen – rohstoffwirtschaftliche & umweltpolitische Implikationen, Zukunftsdialog Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung, umicore, Berlin, 24.1.2008
[Has15] N.A.J.Hastings: Physical Asset Management, Kap.8 Life Cycle Costing, Springer Int. Publ. Switzerland, 2015, 149ff
[Rib08] I.Ribeiro, P.Pecas, A.Silva, E.Henriques: Life cycle engineering methodology applied to material selection, a fender case study, J. of Cleaner Production 16, 2008, 1887-1899
[Sko18] W.Skolaut (Hrsg.): Maschinenbau, Kap.33 Nachhaltige Produktion, Springer Verlag, 2018, 1161ff
[Unt16] L.Unterreiner, V.Jülch, S.Reith: Recycling of Battery Technologies – Ecological Impact Analysis Using Life Cycle Assessment (LCA), Energy Procedia 99, 2016, 229-234
[Vit19] A.Vita, V.Castorani, M.Germani, M.Marconi: Comparative life cycle assessment and cost analysis of autoclave and pressure bag molding for producting CFRP components, The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology 105, 2019, 1967-1982

Kap.7.8
[Bau13] H.Bauer, C.Schlager, J.Thoman: Krise macht Schule – Informations- und Unterrichtsmaterial zur Finanz- und Wirtschaftskrise, ÖGB, AK Wien, 2013 ISBN 978-3-7063-0458-0
[Dis09] J.Dispan: Werkzeugmaschinenbau 2009 – Krisenwirkungen und aktuelle Herausforderungen, IMU-Institut Stuttgart H.5/2009, ISBN 978-3-934859-28-9

[Gie12] M.Giese, A.Weigert: Liquiditätsgenerierung in der Krise, Concentro Management, Juni 2012, 1-7
[Gro09] F.Groll: Von der Finanzkrise zur solidarischen Gesellschaft, VSA Verlag, Hamburg, 2009
[Plu17] W.Plumpe: Wirtschaftskrisen – Geschichte und Gegenwart, C.H.Beck Verlag, 5.Aufl., 2017
[Ram11] C.Rammer: Auswirkungen der Wirtschaftskrise auf die Innovationstätigkeit der Unternehmen in Deutschland, ZEW Zentrum für Europ. Wirtschaftsforschung, Mannheim, Disc. Paper N. 11-070, 2011
[Sil15] M.Silgoner, M.Gächter: Wirtschaftskrise – Finanzkrise – Schuldenkrise, Themenblatt 6, eurologisch, ÖNB, Wien, 2015
[Wim13] R.Wimmer: Die Bewältigung der Wirtschaftskrise als Führungsaufgabe, Teil 1, konflikt Dynamik, Heft 2/2013, 126-135, Teil 2, konflikt Dynamik Heft 3/2013, 222-232

8 Automation und Digitalisierung

Zusammenfassung: Beginnend mit der Datenerfassung über Sensoren, RFIDs, Robotersystemen, Edge-Computing, Prozess- und Unternehmensleitebene wird der Datenfluss und die Auswertung von Daten mittels Data Mining bis hin zur adaptiven Optimierung von verketteten Fertigungsprozessen beschrieben. Die Digitalisierung, die Vernetzung (Internet of Things), die Strategien von Industrie 4.0 werden erläutert und einige Beispiele für die Transformation in Betriebe dargestellt. Dazu kommt noch die Modellierung gesamter Fertigungsstraßen und deren Kopplung mit dem Leitsystem. Die aktuellen Entwicklungen, wie Digitaler Zwilling, Cyber-Physical-Systems und Smart Factories werden grundsätzlich erklärt.

8.1 Automatisierte Fertigungskonzepte

8.1.1 Maschinendatenerfassung

Die Maschinendatenerfassung (MDE) bildet die Grundlage für die weitere Nutzung der Daten über produzierte Menge, Auslastung, Maschinenzustand, Energieverbrauch u.a.m. Die Daten stehen im Prozess entweder direkt zur Verfügung oder sie werden mit speziellen Sensoren gemessen. In vielen Fällen ist ein Analog/Digital-(AD)-Wandler oder ein Microcontroller notwendig. Über entsprechende Schnittstellen (Ethernet oder über die OPC-Architektur) werden die Daten direkt an ein ERP- oder MES-System übertragen, gespeichert und ausgewertet (Kennzahlen, wie OEE u.a. werden errechnet). Der aktuelle Zustand der Produktion wird direkt, also auch für den Werker sichtbar, angezeigt.
Die Ziele der Maschinendatenerfassung sind:

- Analyse von Fertigungsprozessen (Qualitätsverbesserung)
- Optimierung von Maschinenlaufzeiten (Produktivität)
- Auswertung von Maschinenstillständen
- Meldung von Maschinenstörungen (bspw. per SMS)
- Bereitstellung von Daten für den KVP-Prozess

Die eigenständige (autonome), automatische Erfassung, Speicherung, Überwachung und Steuerung wird mit dem Begriff Automation zusammengefasst.

8.1.1.1 Sensoren

Ein Sensor dient zur Aufnahme einer physikalischen oder chemischen Messgröße. Das Steuersignal wird zunächst linearisiert und entweder direkt angezeigt oder elektronisch über ein Netzwerk zur Weiterverarbeitung übertragen. Prinzipiell unterscheidet man direkt umsetzende Sensoren, bei denen die Eingangsgröße ohne Zwischengröße direkt umgesetzt wird (z.B. Nutzung des piezoelektrischen, fotoelektrischen oder des Seebeck- Effekts) und indirekt umsetzende Sensoren (bspw. Kraftmessung über Dehnmessstreifen). Darüber hinaus unterteilt man noch in aktive Sensoren, die ein elektrisches Signal ausgeben und passive Sensoren (resistiv, kapazitiv oder induktiv), die externe Energie benötigen. Generell laufen ständig Entwicklungen spezifische Sensoren in der Baugröße zu reduzieren. Häufige Typen sind in Tabelle 58 zusammengestellt. Es stehen ca. 2000 unterschiedliche Sensortypen zur Verfügung. Die Auswahl richtet sich nach Messbereich, Genauigkeitsanforderung, Ausgangssignalbereich und Datenübertragung (mit Kabel oder mittels Bluetooth).

Druck	Kraft/Dehnung	Beschleunigung
Vibration	Weg/Abstand	Neigung
Gyroskop	Drehwinkel	Drehmoment
Wägezelle	Laserposition	Schall
Helligkeit	pH-Wert	Elektrochem. Potenzial
Feuchtigkeit	Fotozelle/CCD	Volumen/Füllstand
Magnetsensor		

Tabelle 58: Verfügbare Sensorarten mit unterschiedlichsten Messtechnologien

In Bezug auf die Fertigungstechnologie werden Sensoren eingeteilt in [Her15]:

- Klassische Messwertaufnehmer,
- SI-Technologie (ähnlich Halbleiterschaltungen),
- Dünnschichttechnologie,
- Dickschichttechnologie und
- Faseroptische Sensoren.

Hinsichtlich weiterer Informationen sei auf die Fachliteratur verwiesen [Sch92, Hof07, Sch07].
Der Datenfluss vom Sensor zur Datenauswertung über Signalkonditionierung (Linearisierung, Vorverarbeitung durch sog. Edge-Computer) und Einbindung in ein Cloud-System zur weiteren Auswertung zeigt Abb. 193. Die Methoden der Bildanalyse von digitalen Bildern/Filmen haben in der Überwachung von Fertigungsprozessen und zur Fehlerdetektion breite Anwendung gefunden [Dem13, VDI00].
Die Vielfältigkeit an Sensoranwendungen in den Bereichen Automotive, Industrial and Consumer Applications zeigt eine Broschüre und Auswahlhilfe vom Technologieführer Infineon [Inf20]. Als Beispiel für Sensoranwendungen zeigt Abb. 194 Sensoren im Bereich der Antriebstechnik (Motor und Getriebe) in PKWs.

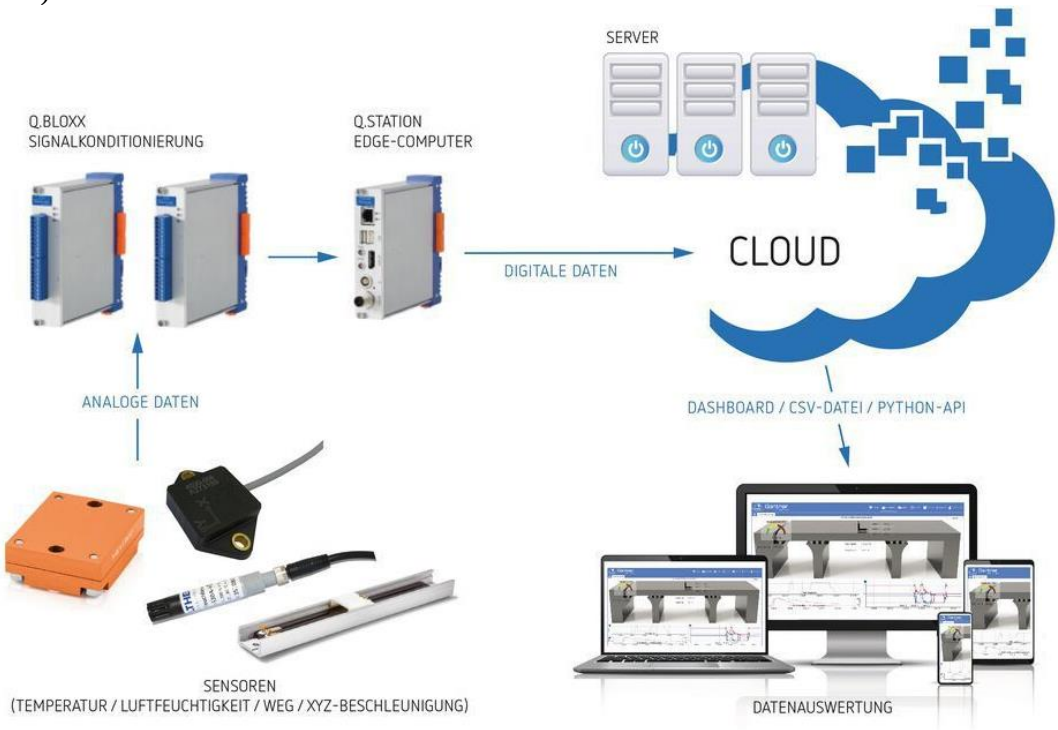


Abb. 193: Sensortechnik in Industrial IoT-Plattformen (nach ALTHEN)

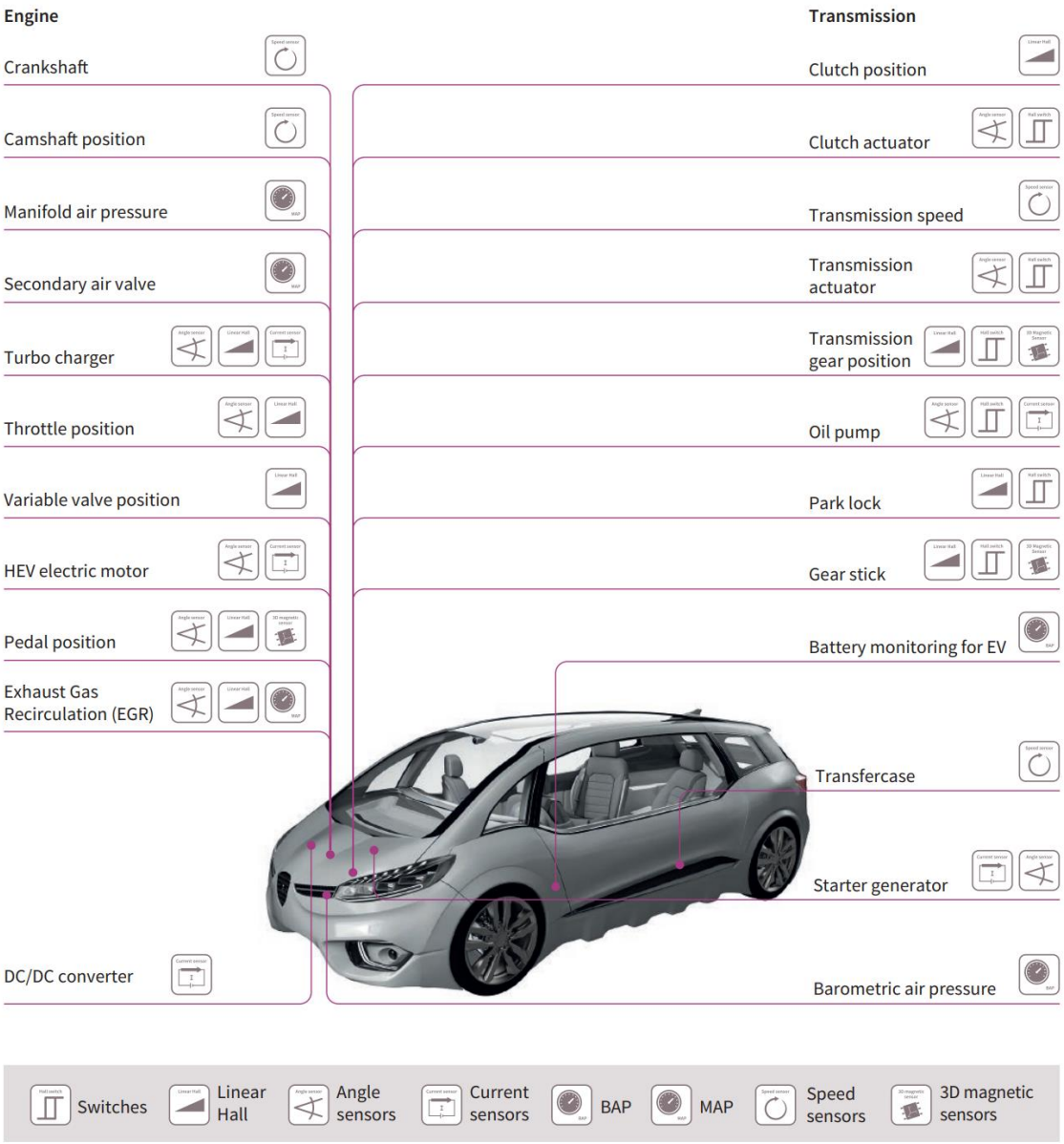


Abb. 194: XENSIV-Sensoren im Bereich der Antriebstechnik von PKWs [Inf20]

8.1.1.2 RFID (Radio Frequency Identification)

Diese Technologie zur automatischen und berührungslosen Identifikation von Objekten stammt bereits aus dem Jahr 1948 (von Harry Stockman). Der RFID-Datenträger oder Transponder besteht aus einem Mikrochip, der über eine Spule oder Dipol (Antenne) mit einem Lesegerät kommuniziert. Die Energieversorgung der Transponderchips wird bei vielen RFID-Systemen ebenfalls über die Kopplung realisiert. Die typischen Reichweiten der RFID-Tags beträgt je nach Frequenz zwischen 0,5 und 10m. Zu den typische Einsatzfällen zählen die Fahrzeug- und Personenidentifikation, Wegfahrsperren, Positionsbestimmung, Zugriffskontrolle, Zeiterfassung, Bezahlkarten u.a.m. RFID wird oft als Grundlage für das Internet der Dinge angesehen, es fehlt aber die direkte Kommunikationsfähigkeit.

8.1.1.3 Aktoren

Aktoren sind die Stellglieder in einem Regelkreis, die elektrisch angesteuert werden und mit denen eine Regelgröße beeinflusst wird [Jan92, Her15]. Häufig kommen dazu Relais, Ventile, Schrittmotore oder andere elektromechanische Antriebe zum Einsatz. Ebenso gibt es Aktoren auf pneumatischer oder hydraulischer Basis. Unkonventionelle Aktoren, also Aktoren, die auf anderen als den zuvor genannten Prinzipien beruhen werden in [Jan13] behandelt. Ähnlich wie bei den Sensoren ist ein Trend in Richtung Miniaturisierung beobachtbar.

8.1.1.4 Netzwerkanbindung und Kommunikationsstandards

Grundvoraussetzung für eine automatisierte Maschinendatenerfassung ist eine durchgängige Vernetzung. In der Industrie hat sich dafür die IP-basierte Vernetzung durchgesetzt. Die Kommunikationsprotokolle, die zur Datenabfrage über die IP-basierte Kommunikation gesprochen werden, können proprietäre oder standardisierte sein. Mittlerweile setzen sich die standardisierten Protokolle, wie MQTT, MTConnect und OPC UA durch. In den letzten 20 Jahren hat sich der OPC-Standard durchgesetzt, weil die Mechanismen für den Datenzugriff definiert werden können. Die Vorteile von OPC UA liegen insbesondere darin, dass die MDE-Infrastruktur jederzeit erweiterbar, herstellerunabhängig, plattformunabhängig, interoperabel und branchenübergreifend ist.
Altsysteme sind schwieriger einzubinden, jedoch sind die Daten über Kleinsteuerungen, wie z.B. von WAGO (PFC200), Beckhoff (Embedded PC) oder Siemens (S7-1200) erfassbar.
Die Maschinendaten werden meist in einer zentralen relationalen Datenbank (z.B. Microsoft SQL Server, Oracle, MySQL) abgelegt und können für spätere Auswertungen bereitgestellt werden.
In jüngster Zeit werden Maschinendaten in der Cloud gespeichert (s. Bild 8.1.1.1.1), wo mehrere Möglichkeiten zur Auswertung zur Verfügung stehen. Durch das Cloud-Computing werden Anwendungen in die Cloud verlagert und sind damit nicht mehr direkt im Produktionsnetzwerk verfügbar. Es gibt aber Aufgaben, die nah an der Produktion, also an der „Edge“, betrieben werden müssen. Diese sind bspw. eine schnelle Datenanalyse und eine Datenverdichtung, um das Datenvolumen für die Cloud zu verringern. Für höhere Verfügbarkeit und bei sensiblen Daten kann noch ein Fog-Computing-Schritt eingebaut werden.

8.1.2 Fertigungsautomatisierung

Damit die Fertigungsprozesse ohne menschliches Eingreifen ablaufen können, sind Automatisierungseinrichtungen, die zum Steuern und Regeln innerhalb von vorgegebenen Grenzen und trotz störender Umgebungseinwirkungen dienen, notwendig. Automatisierungssysteme können auch mit einem adaptiven Verhalten als selbstoptimierendes System ausgerüstet sein, wodurch eine gleichbleibende hohe Qualität der erzeugten Produkte gewährleistet werden kann.
Mit der Fertigungsautomatisierung werden folgende Ziele verfolgt:

- Verkürzung der Produktionszeiten bzw. Erhöhung der Produktivität
- Einsparung von Personalkosten
- Erleichterung der menschlichen Arbeit bei schweren und monotonen Tätigkeiten
- Verbesserung der Produktqualität und Senkung der Fehlerquote
- Effiziente Gestaltung der Materialflüsse und flexiblere Produktion

Mit Hilfe der Informations- und Kommunikationstechnik entstand die flexible Automation, d.h. unterschiedliche Werkstücke sind in beliebiger Reihenfolge und variierenden Losgrößen wirtschaftlich fertigbar. Diese Entwicklungen werden heute den Aktivitäten der Industrie 4.0 zugeordnet.

8.1.3 Fertigungskonzepte

Je nach technisch-wirtschaftlichen Bedingungen (Stückzahl, Flexibilitätsanforderungen, Produktivität, Automatisierungsgrad) kommen verschiedene Fertigungskonzepte zum Einsatz, siehe Abb. 195. Im Bereich A (Fertigung auf Einzelmaschinen) liegt der Einsatzbereich der CNC-Maschinen für Einzel-

oder Serienfertigung mit hohem Personaleinsatz und NC-Maschinen bzw. Bearbeitungszentren, die mehrere Bearbeitungsverfahren beherrschen und mit wechselbaren Werkzeugen arbeiten. Flexible Fertigungszellen und flexible Fertigungssysteme (Bereich B) können ein bestimmtes Teilespektrum bei mittleren Losgrößen bearbeiten. Für sehr hohe Stückzahlen bzw. eine sehr hohe Produktivität sind nur mit starren Mehrmaschinensystemen, wie Transferstraßen möglich.
Der Anteil an Funktionen, die automatisiert gestaltet sind, bestimmt den Automatisierungsgrad im betreffenden System. Danach unterscheidet man:

- Teilautomatisierung (z. B. Stanzautomat),
- Vollautomatisierung (z. B. automatisierte Fertigungszelle) und
- Systemautomatisierung (automatisiertes Produktionssystem = Computer Integrated Manufacturing - CIM)

Flexible Fertigungssysteme umfassen meist Systeme für den Materialfluss (z.B. Transportwagen), Handhabungsgeräte (z.B. Roboter), CNC-Zentren, Werkzeugwechseleinrichtungen, Leitrechner zur Steuerung und Regelung, Systeme zur Maschinendaten- und Betriebsdatenerfassung (Sensoren) und Versorgungs- und Entsorgungssysteme (z.B. für die Spanabfuhr). Aktuelle Weiterentwicklungen der flexiblen Fertigungssysteme werden unter dem Begriff Industrie 4.0 extra im Kapitel 8.5 behandelt.

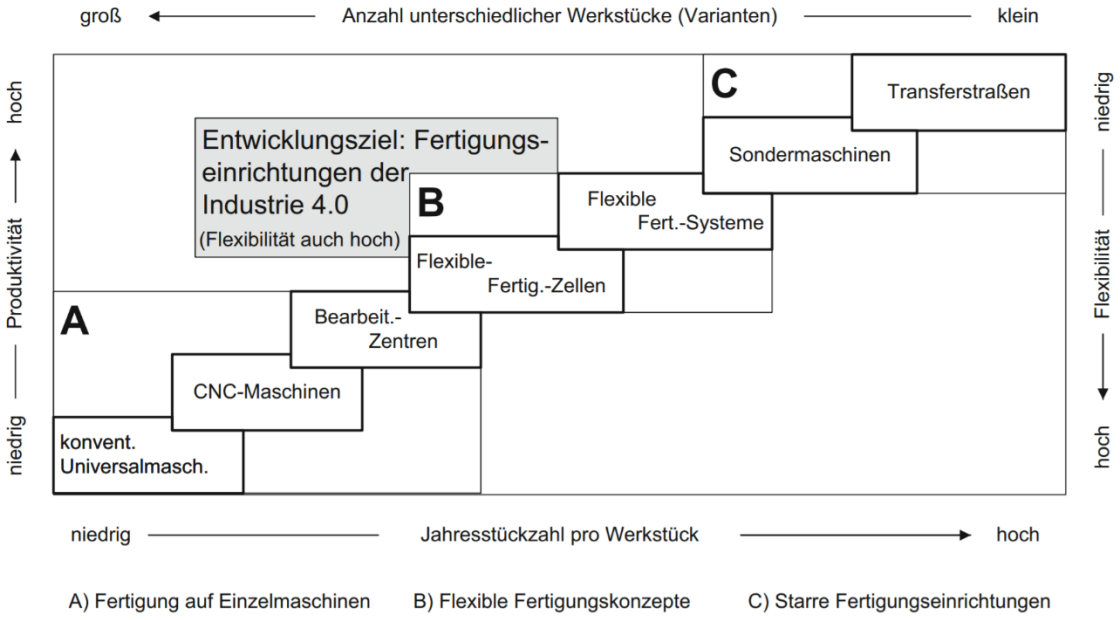


Abb. 195: Einsatzbereiche und Merkmale verschiedener Fertigungskonzepte nach [Hein20]

8.1.4 Einsatz von Industrierobotern

Industrieroboter bestehen im Allgemeinen aus den Komponenten

- Manipulator (Roboterarm)
- Steuerung
- Effektor (Werkzeug, Greifer etc.)
- Sensoren

Durch die Maschinenprogrammierung ist ein Roboter in der Lage einen Arbeitsablauf autonom durchzuführen, oder diese in engen Grenzen über die Sensordaten zu verändern. Je nach Bewegungsart unterscheidet man zwischen

- Serielle Kinematik
  - Gelenkarmroboter (5- und 6-Achs-Knickarmroboter, Scara-Roboter u.a.)
  - Portalroboter (meist 3 Linearachsen und eine Rotationsachse)

- Parallele Kinematik
    - Delta-Roboter (3 gestellfest montierte Rotationsachsen)
    - Hexapod-Roboter (oft als Flugsimulatoren verwendet)

Industrieroboter werden meist angewandt für immer wiederkehrende Aktivitäten, wie zum Fügen (Punktschweißen), Hantieren/Montage, Lackieren, Schneiden und Schweißen. Die Programmierung erfolgt entweder Online (Teach-In-Verfahren, Playback-Verfahren) oder Offline (Textuelle, CAD-gestützte oder Makroprogrammierung). Einen Überblick über die Roboterdichte und damit auch ein Maß für den Automatisierungsgrad in der Fertigungsindustrie zeigt Abb. 196. Demnach liegt Südkorea vor Singapore, Deutschland, Japan, Schweden, Dänemark und USA. Die jährlichen Zuwachsraten liegen zwischen 5 und 10%. Bezüglich der Branchen liegen die Automobilindustrie und di Elektronik-Industrie an vorderster Stelle, siehe Abb. 197. Weltweit sind fast eine halbe Million Industrieroboter im Einsatz, wobei der größte Anteil auf Asien fällt.
Auswahlkriterien/Kenngrößen für Roboter sind:

- Niedrige Kosten
- max. Traglast
- Wiederholgenauigkeit (Präzision)
- Mensch-Maschine-Interface
- Einfachheit/Flexibilität der Programmierung
- max. Geschwindigkeit am Kopf
- Aktionsradius
- Service-Unterstützung

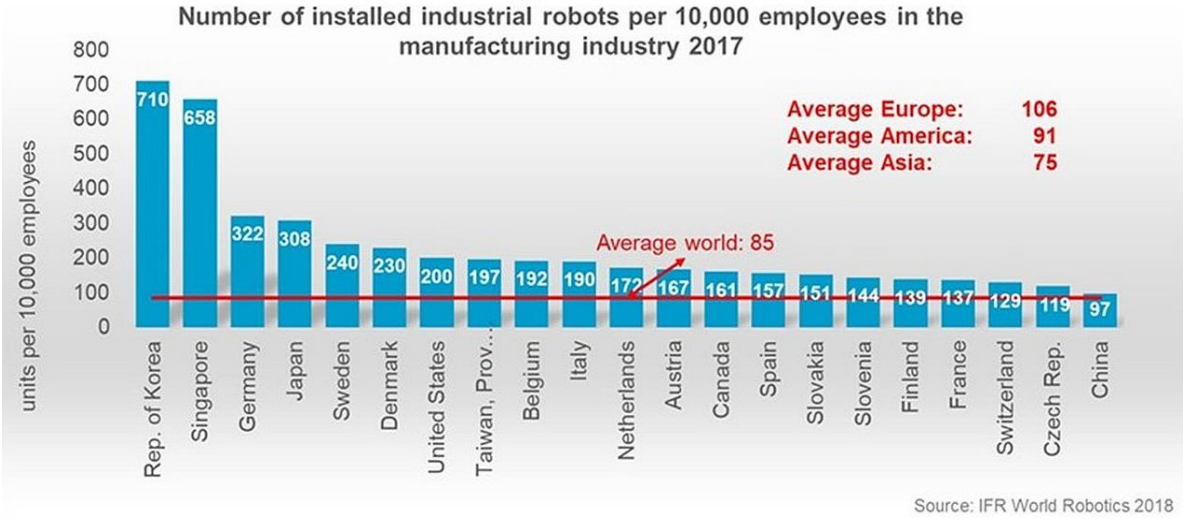


Abb. 196: Weltweite Roboterdichte, gereiht nach Ländern (Bildquelle: IFR Int. Federation of Robotics)

Der wirtschaftliche Nutzen muss für jeden Fall gesondert abgeschätzt werden. Größere Anwenderfirmen beschränken sich meist auf einen Roboterzulieferer, um die Ersatzteilhaltung und die Schulungskosten für die Mitarbeiter zu minimieren.
Neuere Generationen verfügen bereits über kognitive Fähigkeiten bzw. sind sie auch für den interaktiven Betrieb bzw. sichere Zusammenarbeit konfiguriert (Cobot oder kollaborativer Roboter).
Weitere Angaben und Detailinformationen über Industrierobotersysteme sind in [Web09, Hau13, Pot19] zu finden.

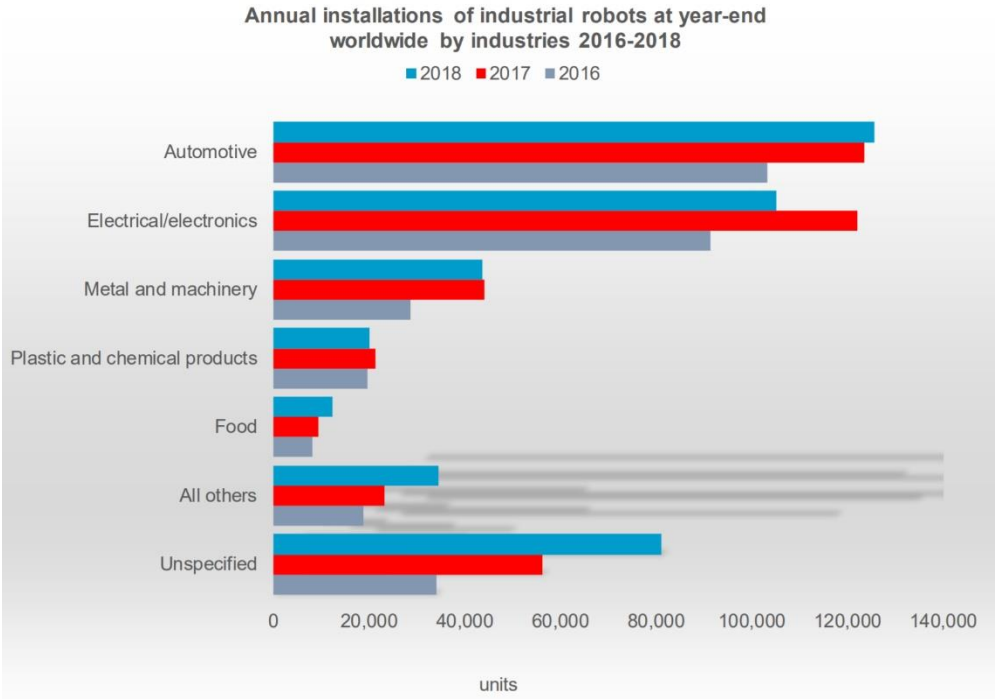


Abb. 197: Jährliche Installationen von Industrierobotern in den verschiedenen Branchen (Bildquelle.: ifr.org, World Robotics 2019)

8.2 Die Automatisierungspyramide

Zweifelsohne hat die Automatisierung der Produktionsprozesse seit den Anfängen der Industrialisierung die größten Fortschritte erzielt. Die Integration klassischer Technologien, wie die der Mechanik mit den modernen Technologien (Elektronik, Informatik, Telekommunikation) – auch Mechatronik genannt – macht diese Entwicklung möglich.

8.2.1 Die klassische, industrielle Automatisierungspyramide

Das Zusammenwirken verschiedener Technologien wird mit der Automatisierungspyramide, siehe Bild 8.2.1.1 dargestellt, wobei man zwischen fünf Ebenen unterscheidet.
Die unterste Ebene („Feldebene“) bilden die Mess- und Stellglieder, wie Sensoren und Aktoren, die elektronische, mechanische oder chemische Vorgänge erfasst und über elektronische Impulsgeber oder Leitungen übertragen. Im englischen Sprachgebrauch spricht man auch von Level 0.
In der zweiten Ebenen oder „Steuerungsebene“ sind Steuervorrichtungen, wie Micro-Controller, speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS), PIDs oder Distributed Control Systems (DCS) angesiedelt. Hier verarbeitet und analysiert die Steuerung die Eingaben der Messinstrumente. Damit werden die Produktionsanlagen gesteuert.
Die dritte Ebene oder „Prozessleitebene“ wird durch Systeme zur Überwachungssteuerung und Datenerhebung gebildet. Dazu gehören SCADA (**S**upervisory **C**ontrol **a**nd **D**ata **A**cquisition) und HMI (**H**uman **R**esource **I**nterface). Auf dieser Ebene werden die Fertigungsprozesse in nahezu Echtzeit digital erfasst, überwacht und über eine bestimmte Zeit gespeichert.
Die vierte Ebene oder “Planungs- und Betriebsleitebene“ befindet sich das Fertigungsmanagementsystem (**M**anufacturing **E**xecution **S**ystem, MES). In dieser Ebene werden die

Fertigungsaufträge und Stücklisten in Arbeitspläne umformuliert und der Material-, Personal und Maschineneinsatz geplant (Produktionsplanung), sowie die Arbeitszeiten erfasst. Das MES hilft bei der Produktionsanalyse und ermittelt die Gesamtanlageneffektivität (overall equipment effectiveness, OEE).
Die Spitze der Pyramide („Unternehmensebene“) bilden die Systeme für das integrale Firmenmanagement (**E**nterprise-**R**esource-**P**lanning, ERP). Das ERP-System ist das Hauptsteuerungselement eines jeden Unternehmens, in dem unternehmensübergreifende sämtliche Bestellungen, Lieferanten, Aufträge, Termine und Produktions-/Fertigungsdaten erfasst werden. Ebenso beinhaltet das ERP die Informationen über die Produktionskapazität, den Cashflow, die Lohnabrechnung und die gesamte Warenwirtschaft.

8.2.2 Die neue industrielle Automatisierungspyramide aufgrund von Industrie 4.0

Mit den Technologien von Technologie 4.0 bzw. Internet of Things (IoT) verändert sich auch die Automatisierungspyramide. Mit Cloud-Systemen müssen nicht mehr alle Teile des Prozesses an demselben physischen Ort sein. Über das IoT kann der Datenaustausch zwischen allen Ebenen stattfinden. Die typischen Schnittstellen zur Leistungsabgrenzung entfallen, weil durch die Ethernet-basierten Protokolle eine Durchlässigkeit der Kommunikation bis zum Sensor ermöglichen, siehe Abb. 198. Die klassische Pyramide wird dadurch obsolet. Diese Änderungen erfordern aber auch strikte Regeln für die Kompetenzen und für die Cyber-Security.

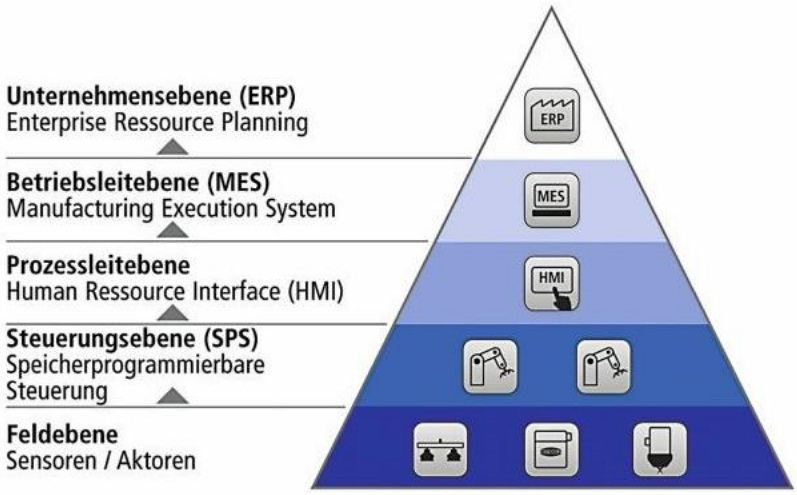


Abb. 198: Automatisierungspyramide nach IPH-Hannover

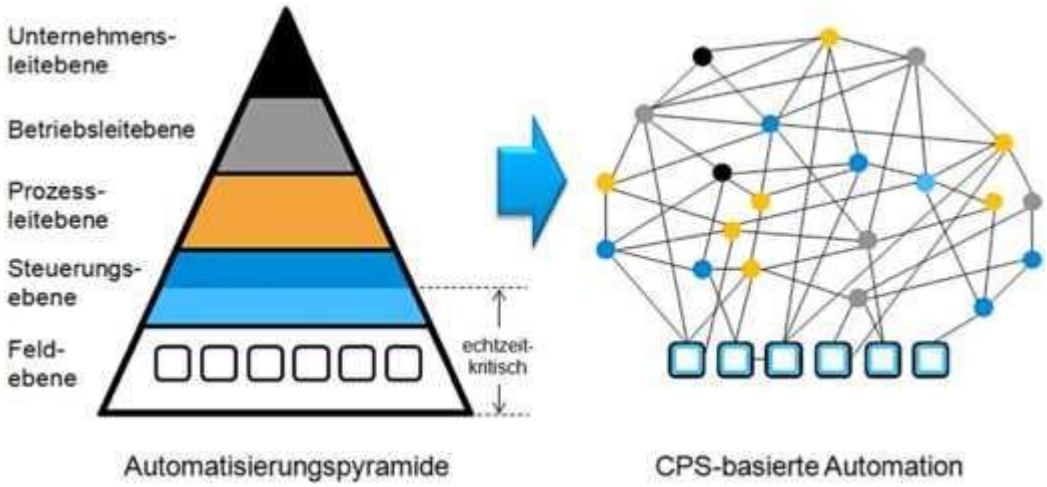


Abb. 199: Veränderung der klassischen Automatisierungspyramide durch Industrie4.0/ CPS-basierte Automation (Bildquelle: VDI/VDE GMA, 2013)

8.3 Mit Methodik aus Daten lernen oder „Data Mining“

Unter Data-Mining versteht man die systematische Anwendung statistischer Methoden auf große Datenbestände (Big Data) mit dem Ziel, Korrelationen, Trends zu erkennen und Wissen zu extrahieren. Nach der Jahrtausendwende haben sich auch die Begriffe „Knowledge Discovery“ und „Data Analytics“ etabliert [Est00]. Auch hier geht es darum, mit Computerunterstützung große Datenmengen zu analysieren und damit eine Entscheidungsunterstützung zu geben.
Daten werden erfasst, ausgewählt, gesäubert, gefiltert, visualisiert, analysiert und interpretiert. Im Ablauf des KDD-Prozesses (Knowledge Discovery in Databases), siehe Abb. 200, oder im Zuge eines CRISP-DM-Prozesses (Cross Industry Standard Process for Datamining) bedeutet Data Mining den eigentlichen Analyseschritt des Knowledge Discovery. Der KDD-Prozess umfasst folgende Phasen:

- Fokussieren/Vorbereitung: die Datenerhebung und Selektion, aber auch das Bestimmen bereits vorhandenen Wissens
- Vorverarbeitung: die Datensäuberung, bei Inkonsistenzen beseitigt werden, beispielsweise durch Entfernen oder Ergänzen von unvollständigen Datensätzen.
- Transformation in das passende Format für den Analyseschritt, beispielsweise durch Selektion von Attributen oder Diskretisierung der Werte
- Data-Mining, der eigentliche Analyseschritt
- Interpretation und Evaluation der gefundenen Zusammenhänge oder Muster durch den Experten

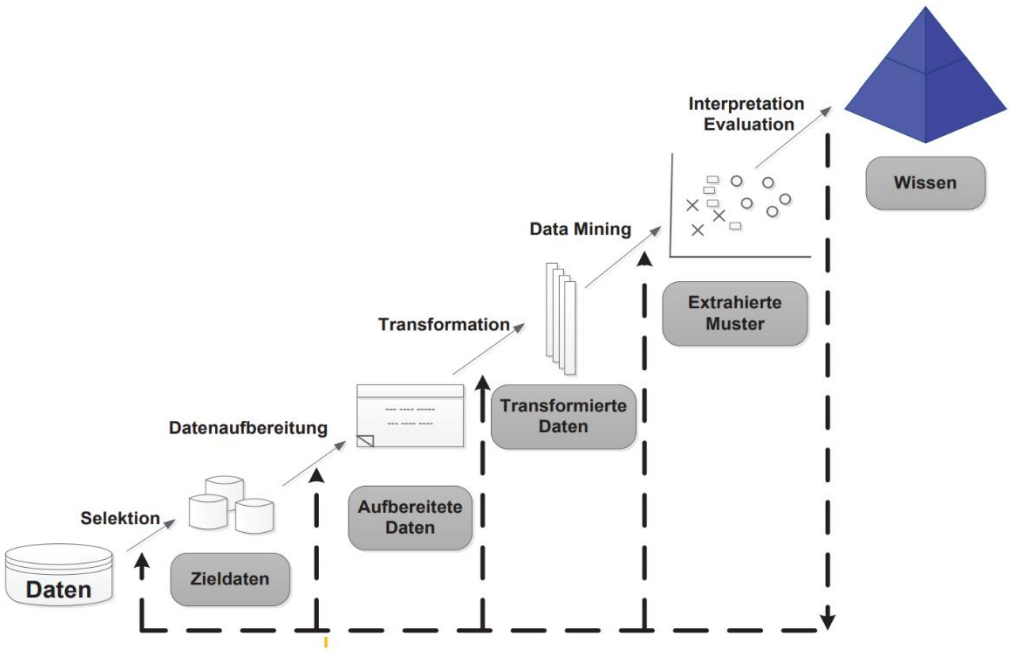


Abb. 200: Schritte im KDD-Prozess in Anlehnung an [Fay96]

In weiteren Iterationen kann nun bereits gefundenes Wissen verwendet („in den Prozess integriert“) werden, um in einem erneuten Durchlauf zusätzliche oder genauere Ergebnisse zu erhalten (adaptives Vorgehen).
Das Data Mining wird heute durch kommerzielle Statistik-Programmpakete (SPSS, SAS, STATISTICA u.a.) oder spezielle Software-Tools, wie z.B. MATLAB, Rapid Miner, Tableau oder WEKA unterstützt [Mik11].
Typische Aufgabenstellungen des Data-Mining sind:

- Ausreißer-Erkennung
- SPC-Analyse
- Daten-Visualisierung
- Gruppierung von Objekten aufgrund von Ähnlichkeiten
- Klassifikation: Elemente werden bestehenden Klassen zugeordnet.
- Assoziationsanalyse: Identifizierung von Zusammenhängen und Abhängigkeiten in den Daten in Form von Regeln wie „Aus A und B folgt normalerweise C“.
- Identifizierung von linearen oder nichtlinearen Beziehungen zwischen mehreren Einflussgrößen und einer oder mehrerer Zielgrößen
- Predictive Maintenance

Mathematisch betrachtet kommen zur Datenanalyse vielfach folgende Algorithmen zum Einsatz:

- Varianzanalyse
- Korrelationsanalyse
- Hauptkomponentenanalyse
- Mehrdimensionale Skalierung
- Regressionsanalyse (linear/nichtlinear, multivariat, robust)
- Bayes-Klassifikation
- Diskriminanzanalyse
- Neuronale Netze
- Clusteranalyse
- Fast-Fourier-Transformation

- Wavelet-Analyse
- Zeitreihenanalyse
- Bildanalyse-Methoden, wie z.B. CNN (Convolutional Neural Networks)

Anwendungsbeispiele zur Vorgehensweise der Datenanalyse im Bereich der Fertigung findet man in [Wit11, Fre15, Moy17, Sch19, Cvi19].

8.4 Modellierung und Simulation von Fertigungsprozessen

Neben der rein datenbasierten Analyse von Produktionsdaten, die heute mit dem Begriff „machine learning“ bezeichnet werden, gibt es noch eine Reihe anderer Ansätze, die je nach Zielsetzung zum Einsatz kommen. Dazu gehören:

- Phänomenologische Prozessmodelle (empirische Ansätze, deren Parameter mit den Produktionsdaten angepasst werden)
- Physikalisch-basierte Prozessmodelle unter Verwendung von grundlegenden mechanistischen Ansätzen [She01, Buc02]
- logistische Modellrechnungen (siehe Kap.8.4.3)
- Cyber-Physical Systems (siehe Kap. 8.7)

Nahezu alle Fertigungsprozesse werden heutzutage bereits mit empirischen oder physikalischen Ansätzen modelliert. Neueste Entwicklungen zielen darauf hin, dass die Modelle adaptiv gestaltet werden und direkt in die Prozessautomatisierung eingebunden sind. Weitere Details folgen in den Kapiteln 8.5, 8.6 und 8.7.

8.4.1 Physikalische Modellierung der Fertigungsprozesse

Für die wichtigsten Fertigungsprozesse, wie sie im Kapitel 6 dargestellt wurden, liegen Prozessmodelle vor, die die wesentlichen Vorgänge physikalisch korrekt beschreiben. Damit ist es möglich, sowohl die Wirkung der einzelnen Einflussgrößen und auch die gewünschte Zielgröße wesentlich genauer vorherzusagen. Die Wirkmechanismen sind besser interpretierbar und die Potenziale für Weiterentwicklungen sind wahrscheinlich treffsicherer. Eine automatische Anpassung an Messdaten, wie es bei neuronalen Netzwerken möglich ist, ist mit den physikalischen Modellen nicht direkt möglich. Im Folgenden werden einige Beispiele der Modellierung von Fertigungsprozessen dargestellt.

8.4.1.1 Methodenplanung im Karosseriebau

Gerade im Bereich der Prototypfertigung unterstützt die numerische Simulation von Fertigungsprozessen die rasche Entwicklung und Sicherung der Machbarkeit bzw. ermöglicht die Optimierung der Fertigungsparameter.

Abb. 201 zeigt die Vorgehensweise bei der Methodenplanung in der Karosseriefertigung von PKWs. Diese Aktivitäten inklusive der Simulation der Tiefziehprozesses werden bereits in der Design-Phase durchgeführt, wo eine Geometrieänderung noch ohne Probleme bzw. ohne Zusatzkosten durchführbar ist. Nach diesem Meilenstein mit dem „Design Freeze in“ besteht ein deutlich niedrigeres Risiko bei der Bestellung der teuren Tiefzieh-Werkzeuge.

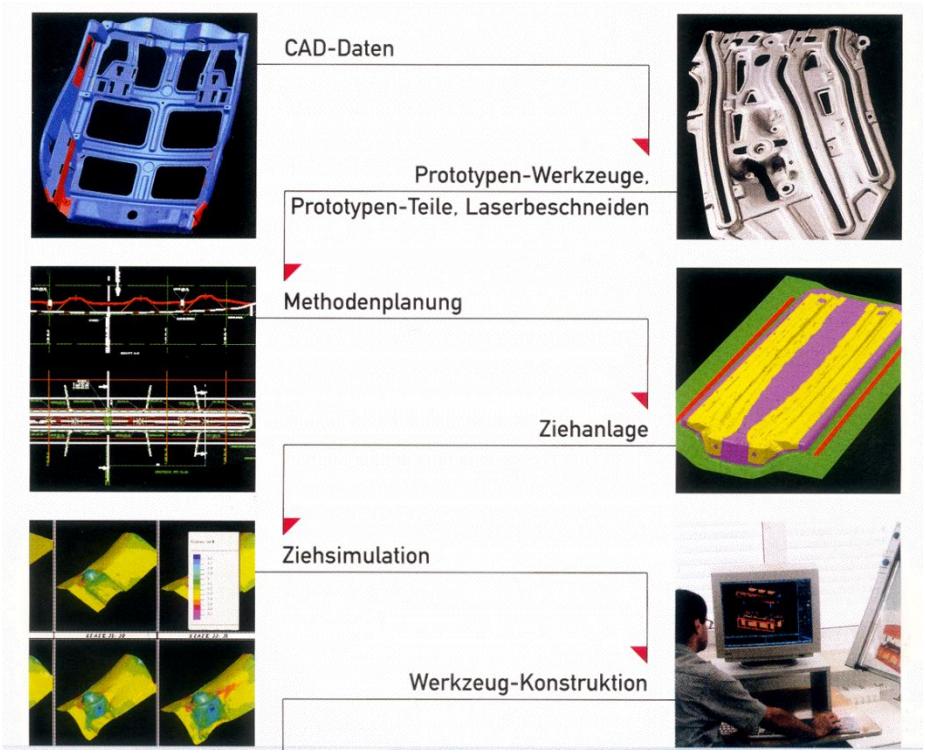


Abb. 201: Software-unterstütze Methodenplanung für Karosserieteile

8.4.1.2 Simulation der Formfüllung- und der Erstarrung

Das Gießen komplexer Bauteile, wie z.B. eines Motorblockes, wäre ohne Simulation nicht mehr vorstellbar [Stu09]. Die Optimierung des Anschnitt- und des Speisersystems, das Erkennen von Hot Spots, die Vorhersage der lokalen Gefügezustände (Dendritenarmabstände) geschieht mit speziellen Programmen. Früher gab es nur den Zusammenhang zwischen Abkühlzeit und dem Modul M (Verhältnis Oberfläche zu Volumen, während heute die physikalischen Zusammenhänge zwischen Abkühlrate dT/dt, Temperaturgradient G und der Wachstumsgeschwindigkeit konsequent genutzt werden, um feine Gußgefüge zu erzeugen. Das entscheidende Prozess-Diagramm ist in Abb. 202 dargestellt.
Im Bereich der metallischen Gießtechnik sind folgende Zusammenhänge wichtig:

- Erstarrungszeit t_s mit dem empirischen Ansatz $t_s \sim M^2$
- Gefügefeinheit über die Beziehung dT/dt=G*v
- Morphologie (planar, zellular, dendritisch, globular)
- Gussfehler (Lunker, Poren, Warmrisse) werden über sog. Kriteriumsfunktionen beschrieben
- Makro- und Mikroseigerungen
- Gefügeaufbau (Phasenmengen, Form, Größe)
- lokale mechanische Eigenschaften
- Spannungszustände nach dem Abguss bzw. nach einer Wärmebehandlung

Aufgrund der Komplexität der Vorgänge sind Vorhersagen der Gefügeentwicklung, der mechanischen Eigenschaften oder des Gussteilverzugs nur mehr durch Strömungs- und Erstarrungsmodelle beschreibbar. Dazu haben sich am Markt einige Softwaresysteme etabliert, wie z.B. MAGMAsoft, ProCAST, PamCast, Flow-3D, Fluent, Nova-Solid/Flow u.a.m. Diese SW-Systeme beinhalten in den meisten Fällen auch die zur Simulation notwendigen Daten von häufig verwendeten Werkstoffen. Eine

Vergleichsstudie über die am Markt verfügbaren Software-Programme für Gießprozesse findet sich in [Kha18].

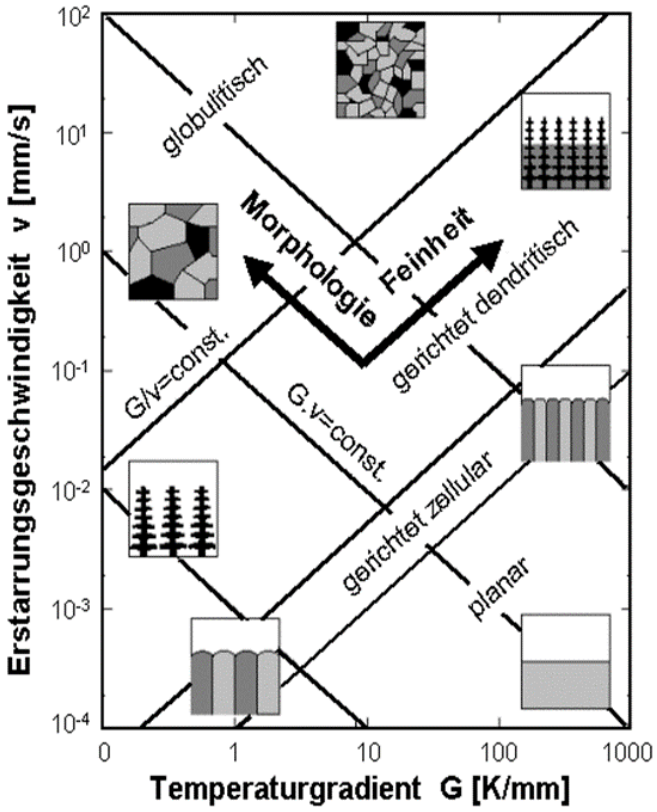


Abb. 202: Zusammenhang zwischen Temperaturgradient, Erstarrungsgeschwindigkeit und Gefügemorphologie bzw. -feinheit

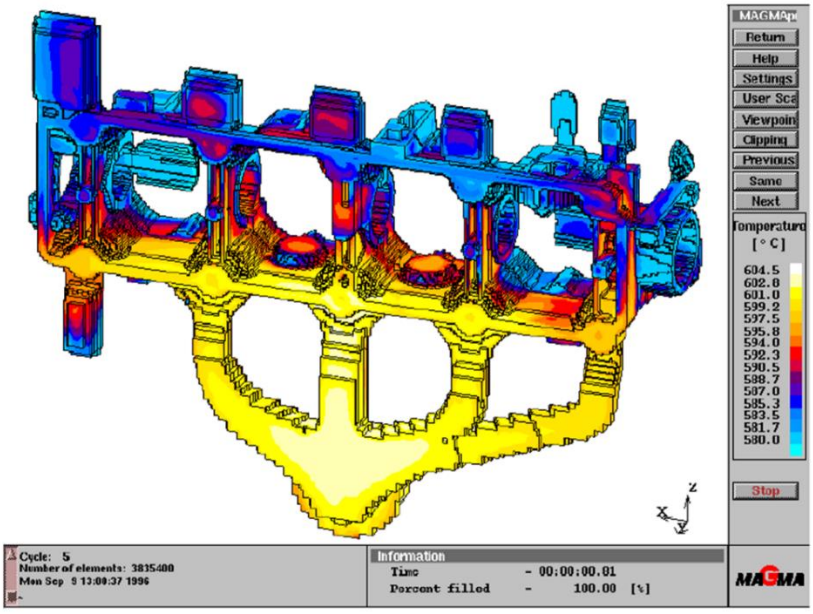


Abb. 203: Ergebnis der Simulation der Formfüllung

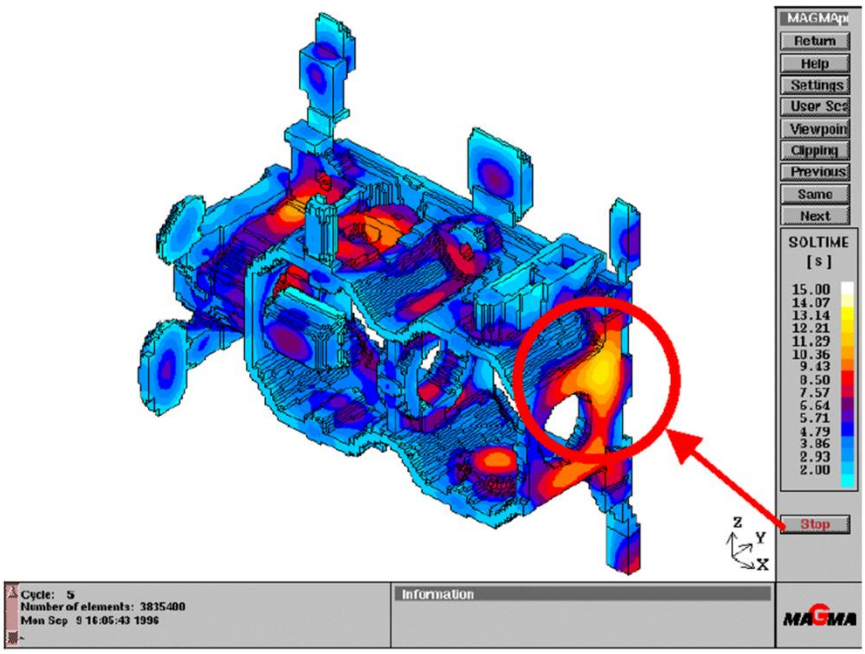


Abb. 204: Lokale Erstarrungszeiten ergeben Hinweise auf „hot spots“

8.4.1.3 Simulation von Umformprozessen

Meist werden bei der Simulation von Umformprozessen folgende Ziele verfolgt:

- Materialfluss (Verteilung der plastischen Umformungen)
- Formfüllung des Gesenkes
- Kraftbedarf
- Optimierung der Umformschritte und der Vorformgeometrie
- Werkzeugbelastung
- Fehlererkennung (Schmiedefalten, Rissbildung u.a.)
- Gefügeausbildung und Härteverteilung

Abb. 205 zeigt zwei Simulationsbeispiele zur Massivumformung. Im linken Bild ist das Gesenkschmieden einer Portalachse eines Eisenbahnwagons dargestellt. Die Aufgabe umfassten die Optimierung der Werkzeugkonstruktion, die Vorformoptimierung, die Kraftermittlung, die Feststellung etwaiger Problemzonen und die Formoptimierung. Das rechte Teilbild zeigt die Fertigungssimulation eines fließgepressten Treibstoff-Filters. Auch hier konnten Fragen der Kontrolle des Materialflusses, Erhöhung der Prozesssicherheit, eine Sensibilitätsanalyse der Auswirkungen der Prozessparameter und die Werkzeugoptimierung mit hoher Vorhersagegenauigkeit beantwortet werden.

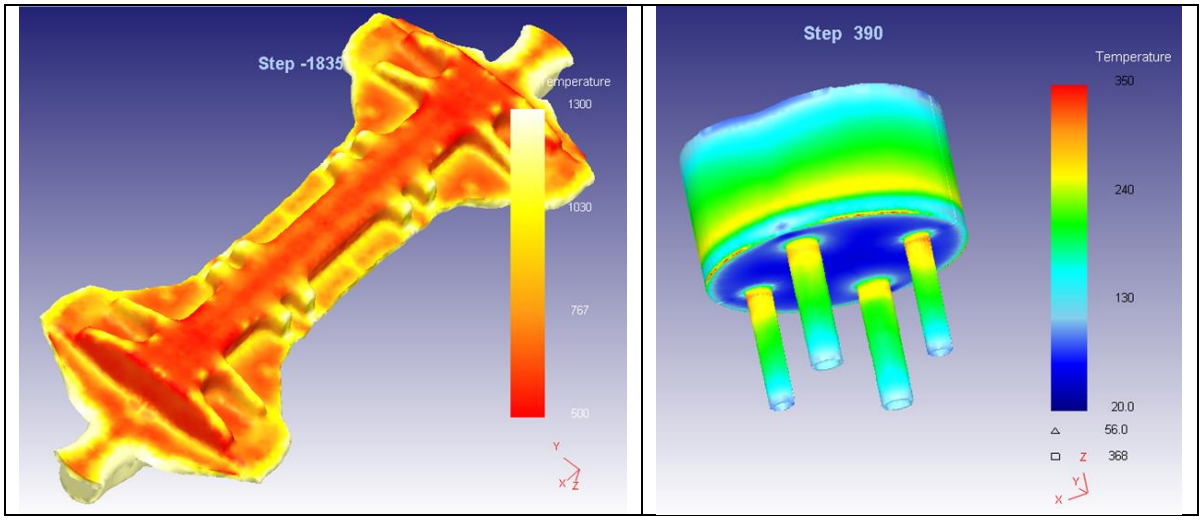


Abb. 205: Umformsimulation eines Gesenkschmiedeteils (re) und eines Fließpressteils (li)

Für die Fertigung von Karosserieteilen ist die Simulation von Tiefziehteilen in der Phase der Entwicklung von immanenter Bedeutung. Die richtige Wahl der zahlreichen Einflussfaktoren, wie Niederhaltekraft, Reibung, Ziehradien, Zuschnitt-Geometrie, Blechwerkstoff (n- und r-Wert), ist für die Qualität des Tiefziehteils entscheidend [Kas19]. Mit derartigen Simulationen kann bspw. auch die Auswirkung von Schwankungsbreite auf die Rückfederung ermittelt werden.
Abb. 206 zeigt als Beispiel das Ergebnis einer Tiefziehsimulation einer B-Säule mit dem Programm AutoForm.

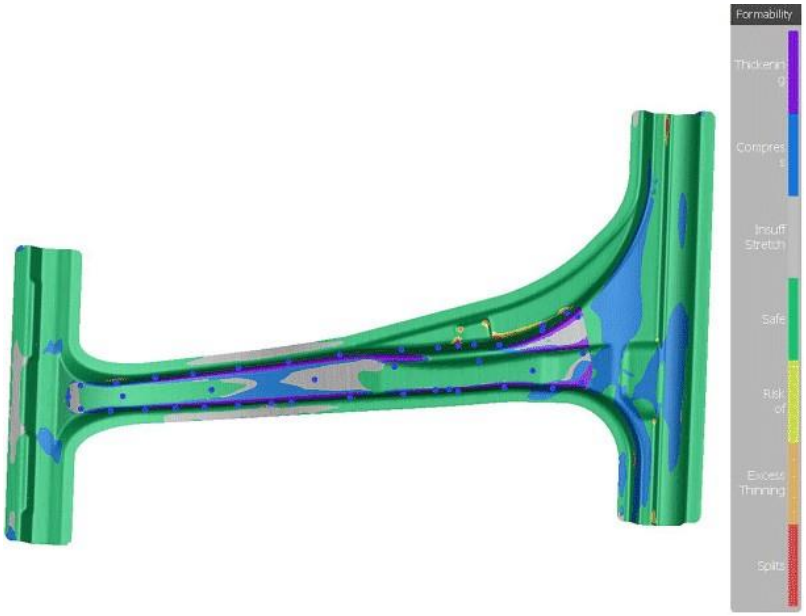


Abb. 206: Tiefziehsimulation einer B-Säule [Jad18]

Ergänzend soll hier noch angeführt werden, dass es zwischen der Simulation von Massiv- und Blechumformungen gravierende Unterschiede bestehen, weshalb für beide Prozesse jeweils eigene Software-Paket notwendig sind. Diese typischen Unterschiede sind in Tabelle 59 zusammengestellt.

	Blechumformung	Massivumformung
Werkstück-geometrie	flächenstrukturiert, eben	voluminös
Materialverhalten	• Anisotropie-Effekte • Kaltverfestigung • Fließverhalten=f(φ)	• Bauschinger-Effekt • Rekristallisationseffekte • k_f=f(φ,φ_{pkt} ,T)
Umformkinematik	• große Verschiebungen aber mäßige Umformgrade • Instabilitäten (Falten, Einschnürung..) • Rückfederung ist kritisch	• geringere Verschiebungen aber große Umformgrade • keine Forminstabilitäten • Eigenspannungen sind kritisch
FE-Simulation	• immer elasto-plastisch • Schalen(Membran) Elemente • isotherm (Raumtemperatur) • hauptsächlich explizit • Neuvernetzung wegen inhomo-gener Verformung (Einschnürung)	• starr/visko-starr/elasto-plastisch • Kontinuumselemente • thermomechanisch gekoppelt • implizit • Neuvernetzung wegen großer Elementverzerrungen

Tabelle 59: Vergleich der Simulations-Charakteristiken von Blech- und Massivumformung

8.4.2 Wertstromanalyse – Wertstromdesign - Wertstrommanagement

Eine gängige Methode zur Optimierung von Wertschöpfungsprozessen ist die Wertstromanalyse, bei der die relevanten Material-, Energie- und Informationsströme vom Kundenauftrag bis zur Auslieferung eines Produktes erfasst werden [Kle07, Erl10]. Zunächst wird der aktuelle Ist-Zustand (Wertstrom) visuell dargestellt und kritisch hinterfragt, bspw. auch danach, ob eine Aktivität wertschöpfend ist oder eben nicht. Durch eine enge Verknüpfung der Einzelprozesse soll ein Wertfluss mit geringen Wartezeiten entstehen und dadurch die Durchlaufzeit verkürzt werden. Außerdem wird gleichzeitig versucht, den Bestand an Roh- und Fertigware zu reduzieren und Fehler sofort zu erkennen und damit die Qualität zu erhöhen.
Die Vorteile dieser Methode sind:

- Breite Darstellung der gesamten Prozesskette mit Konzentration auf den Prozessfluss
- Es wird eine ganzheitliche Optimierung der Prozesse gefördert.
- Die Analyse führt zu einer Transparenz der Aktivitäten und Leerläufe und erlaubt somit eine klare Erkennung der Problembereiche.
- In weiterer Folge ist ein rasches Handeln zur Optimierung des Gesamtprozesses möglich.
- Prioritäten werden ebenfalls rasch erkannt.

Zur übersichtlichen Abwicklung gibt es EDV-Werkzeuge, die helfen, den Prozess mit allen wichtigen Daten, Informationen und mit verständlichen Symbolen darzustellen. Zur Steigerung der Wertschöpfung unterteilt sich die Wertstromanalyse in die

- Prozessanalyse (Zykluszeit, Rüstzeit, Maschinenverfügbarkeit, verfügbare Arbeitszeit)
- Materialflussanalyse (Push Prinzip)
- Bestandsanalyse (hat meist das größte Potenzial → Beseitigung von Liegezeiten)

- Steuerungsanalyse
- Kennzahlenanalyse.

Nach der Analyse macht es Sinn auch die Verbesserungen in einer strukturierten Art und Weise durchzuführen. Dies geschieht mit dem Wertstromdesign, bei dem die Grundprinzipien des „Lean Management“ zur Anwendung kommen, d.h. jede Art der Verschwendung sollte vermieden werden. Qualitätskennzahlen (KPIs), wie z.B. die Gesamtanalgeneffektivität OEE, werden verwendet, um zu sehen, wie weit man vom Ideal-/Zielzustand entfernt ist.

8.4.3 Simulations-Software für Materialfluss, Logistik und Lean Manufacturing

Einen hohen Stellenwert für die Simulation in den Bereichen Produktion, Vertrieb, Logistik, Lagerverwaltung und Geschäftsprozesse haben die Programme zur Ablaufsimulation. Eine Grundlage für die Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen bildet die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 [VDI14]. Konkrete Ziele einer Simulationsstudie können sein:

- Maschinenbelegungsplanung und Steigerung der Maschinenauslastung
- Identifikation von Engpassstellen
- Optimierung der Strategie zur Auftragsreihenfolgebildung
- Simulation der Intralogistik (Förder-, Lager- und Fahrzeugsysteme)
- Optimierung von Lieferketten
- Auslegung von Produktionsressourcen und Puffergrößen
- Verringerung des Personalbedarfs
- Verringerung des Lagerplatzbedarfs
- Höherer Durchsatz
- Kürzere Durchlaufzeiten
- Bewertung von Layoutalternativen
- Optimierung von Steuerungsstrategien

Zu den bekannten Simulationswerkzeugen zählen AnyLogic, AutoMod, Demo3D, jasima, Simul8 u.a.m. Ein Leitfaden für den Simulationseinsatz im Bereich Materialfluss und Logistik wurde in [Sim20] publiziert.

8.5 Digitalisierung und Industrie 4.0

Der Begriff Industrie 4.0 geht auf eine Hightech-Strategie der deutschen Bundesregierung zurück, wobei insbesondere beabsichtigt wurde, die industrielle Produktion mit modernen Informations- und Kommunikationstechnik zu verzahnen. Ausschlaggebend dafür ist der erhöhte Kostendruck und die Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit in den Industrieländern, die erhöhte Anforderungen an Geschwindigkeit, Qualität, Flexibilität, Innovation, Individualisierung und Variantenvielfalt verlangen. Auf Basis intelligenter und digital vernetzter Systeme sollte eine selbstorganisierte Produktion möglich werden und der gesamte Lebenszyklus eines Produktes von der Produktidee über die Entwicklung, Fertigung und bis zum Recycling unterstützt werden. Durch die intelligente Vernetzung von Menschen, Maschinen, Abläufen und Produkten in Ergänzung zu den bisherigen Entwicklungen der Automatisierung, spricht man von der vierten industriellen Revolution. Wichtige Begriffe, Übersichten, Herausforderungen und Handlungsempfehlungen finden sich auf der Plattform Industrie 4.0 (www.plattform-i40.de bzw. https://plattformindustrie40.at)

Unternehmen erhalten dadurch neue Möglichkeiten [Pla20], wie

- Flexible Produktion (bessere Abstimmung der Produktionsschritte und der Maschinenauslastung)
- Wandelbare Fabrik (durch einen modularen Aufbau können individualisierte Produkte auch in kleinen Stückzahlen mit hoher Produktivität und Wirtschaftlichkeit erzeugt werden)
- Kundenzentrierte Lösungen (Annäherung von Konsument und Produzent durch online-Datenaustausch in beide Richtungen)
- Optimierte Logistik (Sicherstellung eines optimalen Warenflusses bzgl. Zeit, Lieferweg etc.)
- Datenagglomeration: Datenanalysen zusammengeführter Daten geben Infos zu Produkt- und Serviceverbesserungen
- Ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft (Produkte werden datengestützt wiederverwertet)

Nach der industriellen Einführung von Maschinen, der Fließband- und Massenproduktion und der Digitalisierung werden in der vierten industriellen Revolution die reale mit einer virtuellen Welt zu einem Internet der Dinge vernetzt. Die zeitliche Entwicklung dieser Epochen zeigt Tabelle 60.

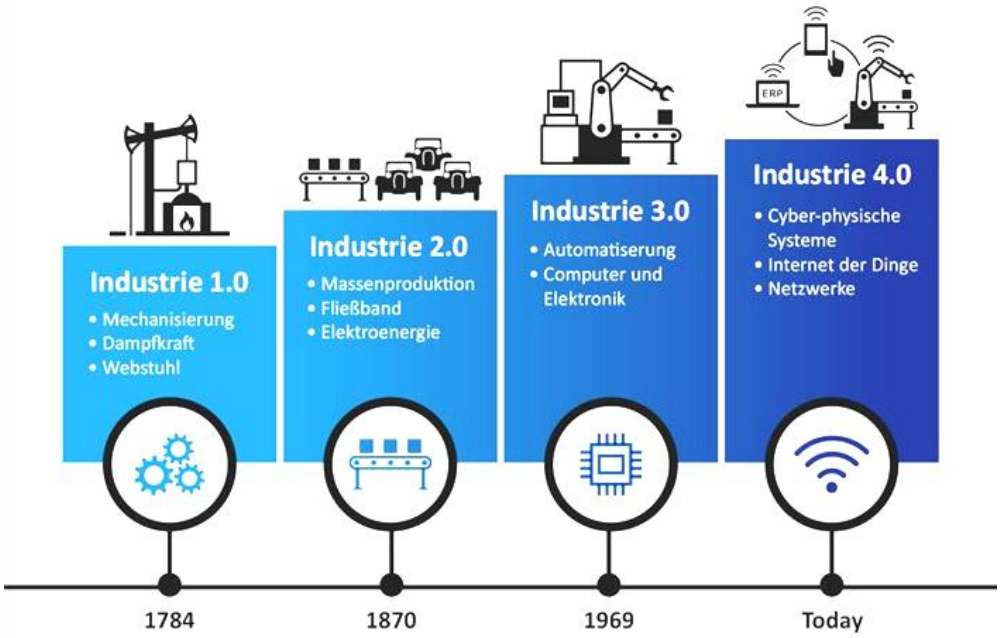


Tabelle 60: Die vier Entwicklungsstufen der industriellen Produktion (in Anlehnung an b-telligent, 2018)

8.5.1 Vernetzung - Internet of Things (IoT)

In seinem Aufsatz von 1991 „The Computer for the 21st Century“ sprach Mark Weiser [Wei91] unter dem Begriff „Ubiquitous Computing“ zum ersten Mal von einer Vision, in der Objekte, die mit Sensoren ausgestattet sind, nahtlos in die Umgebung integriert sind.

Ziel des IoT ist es, automatisch relevante Informationen aus der realen Welt zu erfassen, miteinander zu verknüpfen und im Netzwerk verfügbar zu machen. Das IoT verbindet physische Objekte miteinander, die mit Sensoren oder Software ausgestattet sind. Diese Verbindung ermöglicht es den Objekten, miteinander zu kommunizieren. Geräte bekommen eine eindeutige Identität (Adresse) im Netzwerk und werden mit elektronischer Intelligenz ausgestattet. Dank immer günstigerer, kleinerer und leistungsfähigerer Mikroprozessoren lassen sich Gegenstände mit relativ geringem Aufwand mit elektronischer Intelligenz ausstatten. Sie erhalten zusätzlich eine kabelgebundene oder drahtlose

Schnittstelle für die Anbindung an das Internet und eine eindeutige Internetadresse. Auf Unternehmensebene bedeutet das vor allem eins: Effizienz. Viele Unternehmen haben das bereits erkannt – heutzutage sind nahezu 10 Milliarden IoT-Geräte vernetzt. Dazu ist eine Standardisierung der Komponenten und Dienste im Internet der Dinge notwendig. Diese Schnittstellen werden auch als APIs (Application Program Interfaces) bezeichnet, die die Geräte mit dem Internet verbinden.
Dadurch, dass die Geräte im Internet miteinander vernetzt sind, sind sie grundsätzlich der Gefahr eines Angriffes von außen oder einer unbefugten Nutzung ausgeliefert. Durch ein zuverlässiges Identitäts- und Zugriffsmanagement, Verschlüsselung der übertragenen Daten und anderen Möglichkeiten kann dieses Risiko stark reduziert werden.

Die Informationen der realen Welt zu erfassen, miteinander zu verknüpfen und im Netzwerk verfügbar zu machen ist die Aufgabe des Internets der Dinge. Als Vorreiter für diese Technologie ist die RFID-Identifikation zu nennen.
Als Übertragungsmedium eignen sich neben dem klassischen kabelgebundenen Ethernet/LAN natürlich auch alle Funkverfahren wie WLAN, GSM (Mobile IPv6) und Bluetooth.
Gemeinsam haben alle IoT-Konzepte, dass jedes Objekt, das ins jeweilige IoT eingebunden ist, durch eine eindeutige Internet-Adresse (URL) gekennzeichnet ist. Die Beispiele für sinnvolle Verknüpfungen sind nahezu unendlich, siehe Abb. 207. Begründet wird dieser Erfolg durch die Miniaturisierung der Übertragungsmodule, siehe Abb. 208.
Als Dienstleistung für Speicherplatz, Rechenleistung oder Anwendungssoftware kann über das IoT auch beim Cloud Computing angesprochen werden.

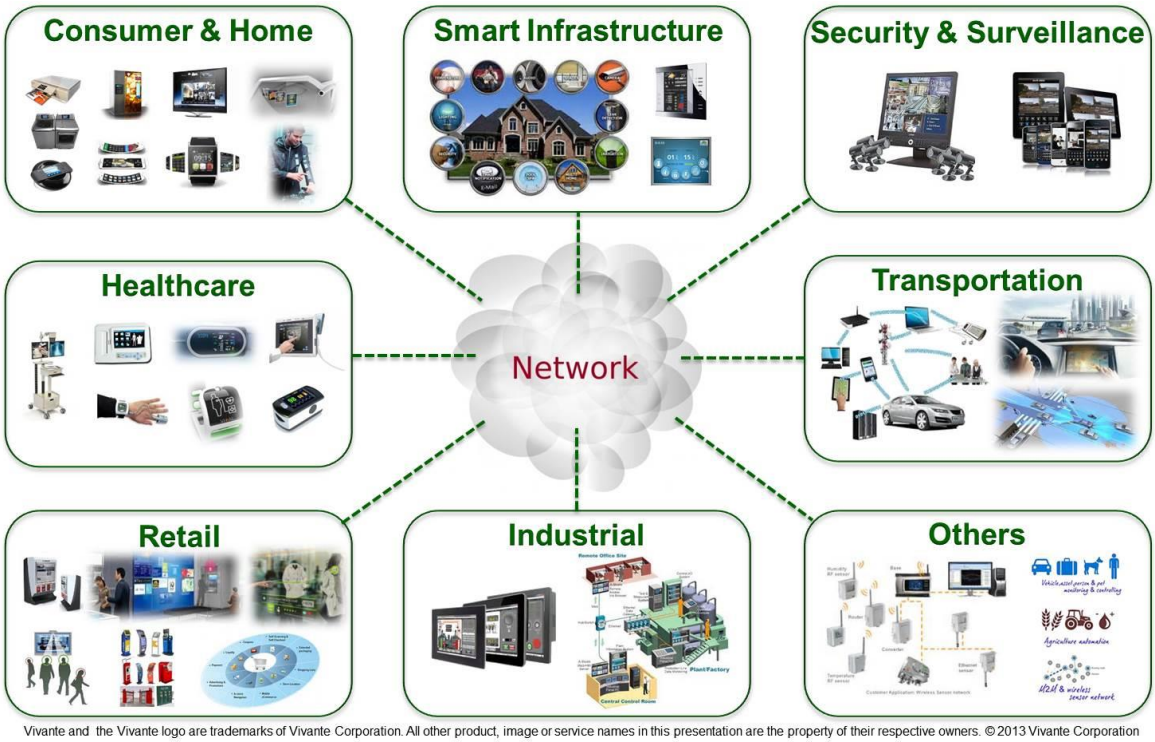


Abb. 207: IoT-Anwendungsfälle in verschiedenen Bereichen (Bildquelle: Vivante)

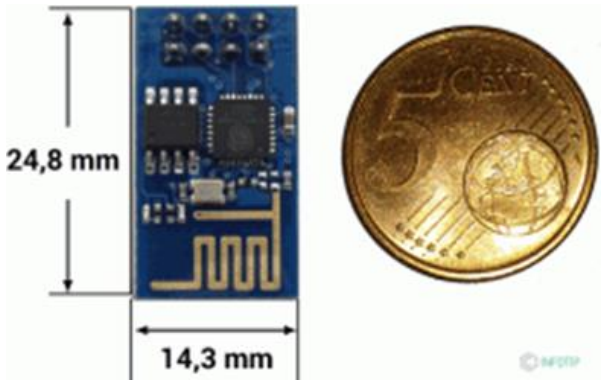


Abb. 208: Daumennagelgroßes Modul zur IoT-Ankopplung an ein WLAN (Bildquelle: infotip.de)

8.5.2 Industrielle Beispiele für die digitale Transformation in der Produktion

Die digitale Transformation ist ein fortlaufender Veränderungsprozess bzw. ein Wandel, der den Unternehmen neue Möglichkeiten in der Produktion, aber auch in der Zusammenarbeit mit Zulieferfirmen und Kunden, sowie bzgl. neuer Geschäftsmodelle eröffnet. Um die digitalen Technologien erfolgreich einsetzen zu können, müssen die Kompetenzen in den Bereichen Software Engineering, Systems Engineering, IT-Sicherheit, Data-Analytics, Big Data und Cloud Computing zu erschließen in ausreichendem Maße vorhanden sein.
Die größten Hürden für die Umsetzung der Digitalen Transformation sind der Mangel an qualifizierten Mitarbeiter mit digitalem Know-How, fehlende Erfahrung, hohe Sicherheitsanforderungen und die Scheu vor notwendigen, radikalen Entscheidungen [Dep19].

8.5.2.1 Pioniere des Zukunftsprojektes Industrie 4.0

Mit dem Ziel Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort zu sichern, wurde im Jänner 2012 ein Arbeitskreis Industrie 4.0 unter dem Vorsitz von Dr.S.Dais (Robert-Bosch GmbH) und Prof. H.Kagermann (acatech) gegründet. Der Abschlussbericht des Arbeitskreises wurde in Form von Umsetzungsempfehlungen im Oktober 2012 veröffentlich [Kag12]. Um die digitale Transformation in der industriellen Wertschöpfung voranzubringen, wurde 2013 die Plattform Industrie 4.0 als zentrales Netzwerk eingerichtet. Die Plattform steht unter der Leitung folgender Akteure:

- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
- Bundesministerium für Bildung und Forschung
- Deutsche Telekom AG
- Robert Bosch GmbH
- Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.
- IG Metall
- SAP SE
- Fraunhofer-Gesellschaft
- Siemens AG
- Festo AG
- Schunk GmbH & Co. KG

In der Plattform sind über 350 Akteure aus mehr als 150 Unternehmen, Verbänden, Gewerkschaften, Wissenschaft & Politik sind an der Plattform beteiligt. Unter der Adresse www.plattform-i40.de sind zahlreiche Publikationen, Ergebnisse, Fallstudien und Umsetzungsprojekte zu finden. Über eine „Industrie 4.0 Landkarte“ sind Praxisbeispiele zur digitalen Anwendung aufrufbar.

Auf der Hannover Messe 2019 wurde das Leitbild 2030 für Industrie 4.0 vorgestellt [BMWi19]. Es hebt Souveränität, Interoperabilität und Nachhaltigkeit als zentrale Säulen für globale offene, digitale Ökosysteme hervor.

8.5.2.2 Automation, Software-Entwicklung, Anlagenbau und Produktion unter einem Dach

Zu den führenden Spezialisten auf dem Gebiet der Hochleistungsautomation gehört sicherlich auch die STIWA Group in Attnang-Puchheim mit den drei Geschäftsfeldern Automation, Automotive und Manufacturing Software. STIWA baut nicht nur Anlagen, sie setzt ihre Maschinen auch selbst als Produktionsunternehmen ein und stellt damit vor allem Getriebe-, Motor- und Lenkungskomponenten her. Ein wesentlicher Wettbewerbsvorteil ergibt sich aus der einzigartigen Kombination aus Anlagenbau, Software und Produktion. Allein im Bereich Manufacturing Software werden mehr als 100 Mitarbeiter in Hagenberg beschäftigt.

8.5.2.3 Die Modernste Drahtwalzstraße der Welt

Im Herbst 2017 wurde die modernste Drahtwalzstraße in Leoben-Donawitz eröffnet. Dabei wurde eine Prozess-Automatisierung im Sinne von Industrie 4.0 voll umgesetzt. Nur drei Personen können die Drahtfertigung über Computermodelle betreiben, siehe Abb. 209. Noch einige Fakten dazu:
Betreiber: voestalpine wire rod Austria GmbH
Anlagenbauer: Danieli
Produktion von ca. 0,5 Mio to/a Stahldrähte (weiche bis harte Stahlgüten)
Drahtdurchmesser: 5 bis 60 mm
Investitionskosten ca.140 Mio Euro
Ca. 2000 Sensoren, 450km Kabel verlegt, durchgehendes Prozessmodell inkl. Gefügemodule
Siehe auch: www.voestalpine.com/wiretechnology

Durch diese Maßnahmen sind engste Maßtoleranzen, ein thermomechanisches Walzen, eine hochleistungsfähige Anlagensteuerung und eine genaue Einhaltung der gewünschten Eigenschaftswerte der erzeugten Drähte möglich. Durch ein modernes Materialflussteuerungssystem können die Manipulationsaufwände im Hochregallager minimiert und Zeit gespart werden.

Resümee: Die Grundlagen des Drahtwalzens bestehen weiterhin, aber die Anforderungen für junge Ingenieure haben sich verändert!

Abb. 209: Schaltzentrale zur Überwachung einer Hochleistungs-Drahtstraße

8.6 Der Digitale Zwilling und der Digitale Schatten

Meist werden Digitale Zwillinge (DZ) als digitale Repräsentanzen von Dingen aus der realen Welt definiert [Jon19, Eig20, Him20, Woh19]. Sie beschreiben sowohl physische Objekte als auch nicht-physische Dinge. Ein DZ kann sowohl die Merkmale eines Objekts als auch dessen Verhalten mithilfe von Simulationsmodellen beschreiben. Ein DZ kombiniert also die Informationen einer Anlage mit einem Simulationsmodell.

In der Industrie gibt es digitale Zwillinge für Produkte, Produktionsanlagen, Prozesse und Dienstleistungen. Ein Bespiel einer Anwendung aus dem Bereich der Produktion zeigt Abb. 210.

Ein digitaler Zwilling eignet sich perfekt für die Zustandsüberwachung in Echtzeit, eine darauf aufbauende vorausschauende Wartung der Anlagen und auch für Prognosen und Tests, die auf zukünftige Anwendungen abzielen [Mas20]. Fertigungsprozesse sind aber nicht immer mit digitalen Zwillingen regelbar, weil die Simulationszeiten so schnell sein müssen, damit eine Echtzeit-Adaption möglich wird. Aus diesem Grund spricht man dann von einem Digitalen Schatten, bei dem ein datenreduziertes Abbild der Realität betrachtet wird. Das heißt, der Digitale Schatten berücksichtigt nur die relevanten Produktions- und Prozessdaten (Maschinenstatus, Stillstandzeiten), um über vergangene sowie aktuelle Zustände in Echtzeit Auskunft zu geben. Der eigentliche Unterschied zwischen einer modellbasierter Offline-Simulation, einem Digitalen Schatten und einem Digitalen Zwilling liegt im Datenfluss, siehe Abb. 211 nach [Kri18].

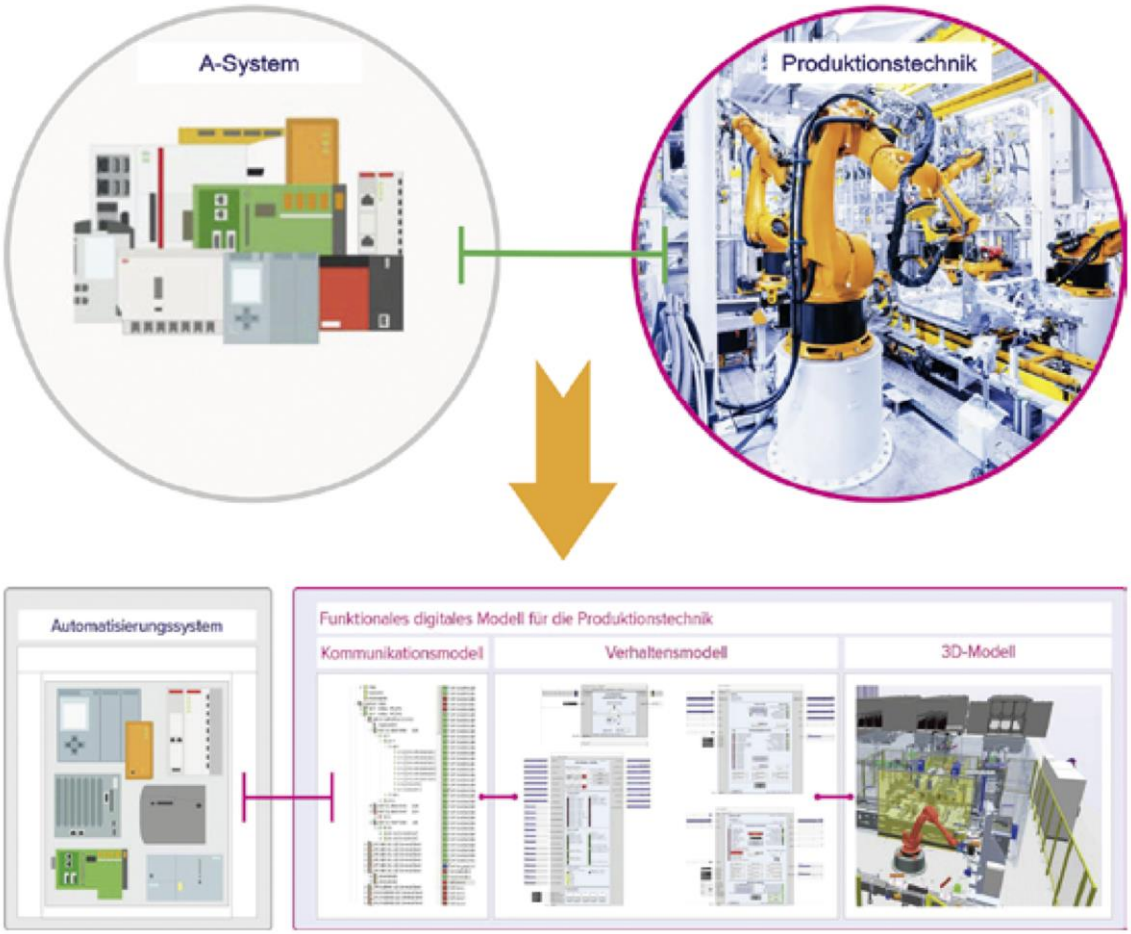


Abb. 210: Der Digitale Zwilling als funktionales digitales Modell der realen Produktionstechnik [Mew20]

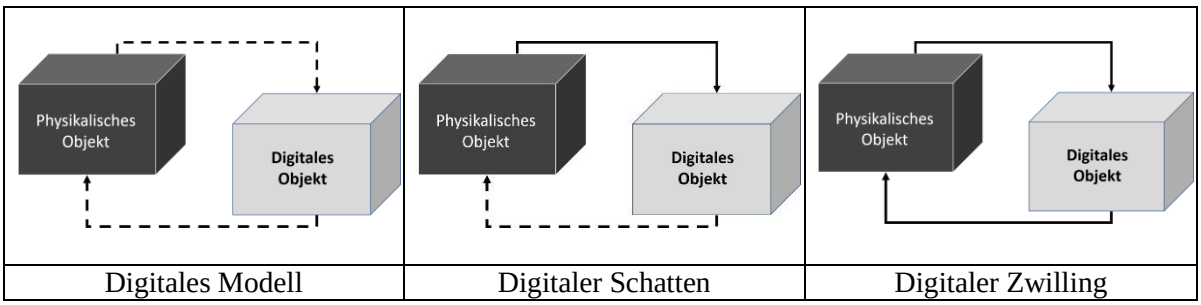


Abb. 211: Manueller Offline-Datenfluss (strichliert) und automatischer Online-Datenfluss (durchgezogen) als Unterscheidungskriterium zwischen einem Digitalen Modell, Digitalen Schatten und einem Digitalen Zwilling

8.7 Cyber-Physical Systems

Schon heute arbeiten etwa 98 Prozent der Mikroprozessoren eingebettet in Alltagsgegenständen und Geräten, über Sensoren und Aktoren mit der Außenwelt verbunden. Zunehmend werden sie untereinander und in das Internet vernetzt. Die physikalische Welt verschmilzt mit der virtuellen Welt, dem Cyberspace. Es entstehen Cyber-Physical Systems (CPS) [aca12, Bro10, Moe16, Son17].
Ein CPS ist also ein Verbund informatischer, softwaretechnischer Komponenten mit mechanischen und elektronischen Teilen, die über eine Dateninfrastruktur, wie z.B. das Internet, kommunizieren.
Laut dem Positionspapier „Smart Engineering“ der WiGeP (wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung) gehören zu den wichtigsten Charakteristika solcher zukünftigen industriellen Produkte (Smart Products) [Abr17]:

- eingebettete Intelligenz
- hohe Konnektivität
- hohe Benutzerfreundlichkeit
- ein hoher Grad von Personalisierbarkeit
- Rekonfigurierbarkeit entlang des Lebenszyklus
- neue Geschäftsmodelle (Verfügbarkeitsgarantien, Predictive Maintenance)
- Integration in Produkt-Service- und Ökosystemen
- eine zunehmend wichtige Rolle von Software

Eine Concept-Map mit den charakteristischen Merkmalen von CPS zeigt Abb. 212.

Ein allseits bekanntes Beispiel für eine CPS-Anwendung ist die vernetze Mobilität bzw. das Autonome Fahren. Die Beherrschung der Softwaretechnik wird dabei zum zentralen Wettbewerbs- und Erfolgsfaktor. Anwendungen im Bereich der Fertigung werden in [Kue15, Wan17] im Detail dargestellt.
Wie in Abb. 212 gezeigt, ist die Sicherstellung der Vertrauenswürdigkeit (Sicherheit, Zuverlässigkeit, Belastbarkeit bzw. als übergeordneter Begriff die Cyber Security, eine große Herausforderung siehe Abb. 213. Wichtig für das Systemverhalten ist auch die Art und Weise des Feedbacks und echtzeitfähige physikalische Modellansätze, die mit den modernen FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) preisgünstig verwirklichbar sind. Dazu wird bspw. MATLAB mit dem HDL-Coder zur Erzeugung der Hardwarebeschreibung eingesetzt.

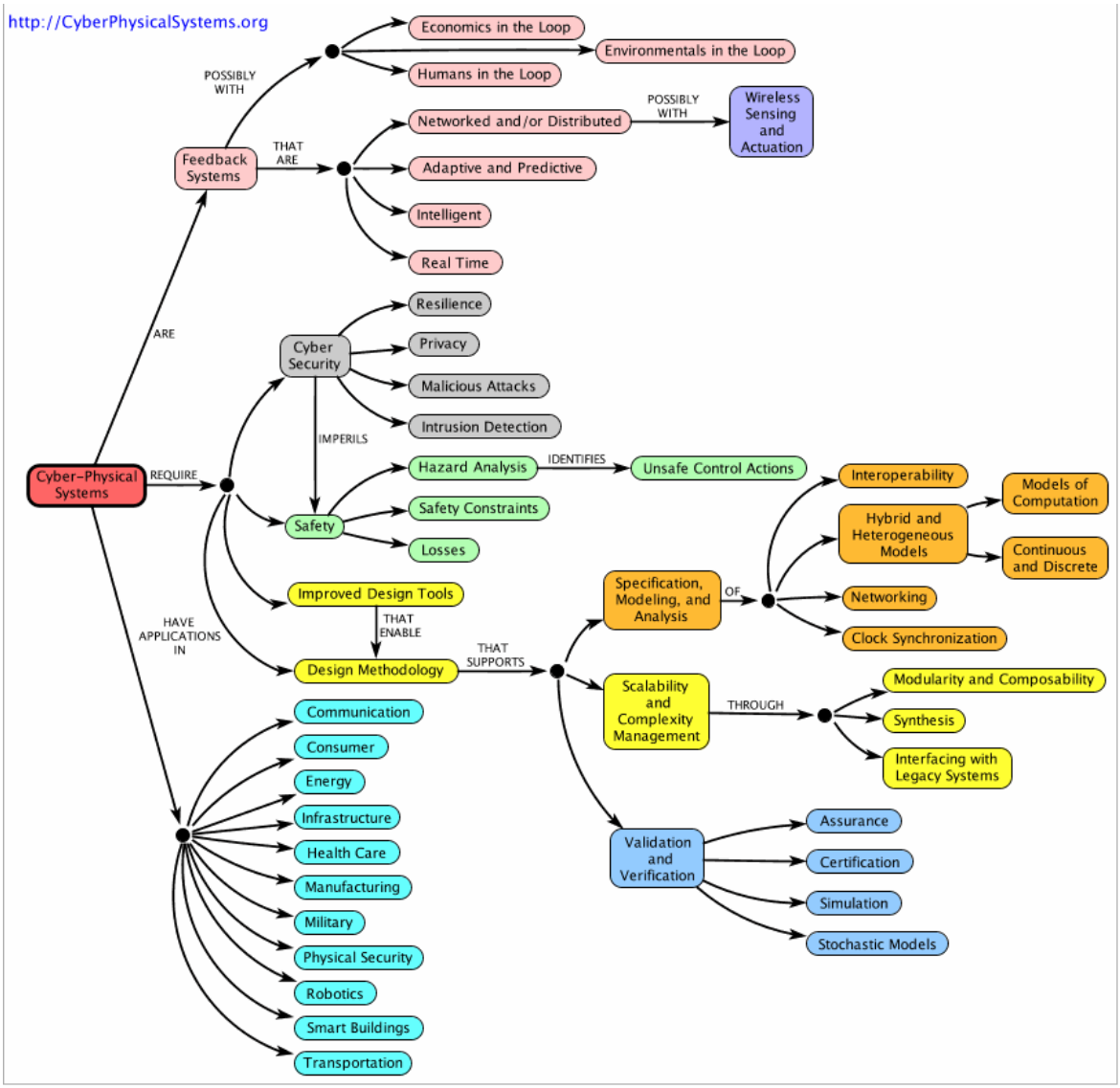


Abb. 212: Cyber-Physical Systems mit den typischen Systemeigenschaften (Quelle: NIST CPS Workshop, E.Lee, Uni Berkeley, siehe http://CyberPhysicalSystems.org)

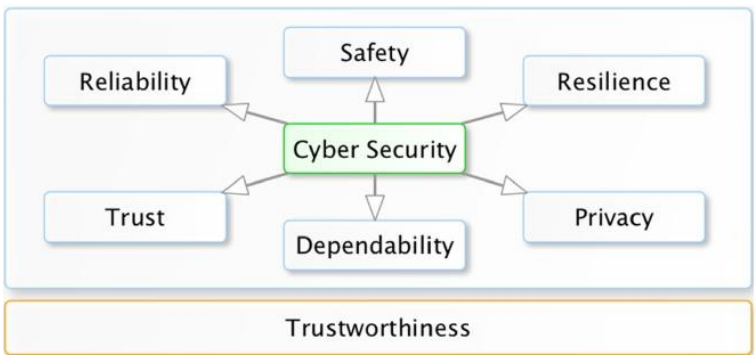


Abb. 213: Cyber-Security zur Sicherstellung der Vertrauenswürdigkeit von CPS-Anwendungen

Für den Entwurf von CPS in industriellen Anwendungen wird ein fünfstufiges Vorgehen, entsprechend dem Weg von Daten zum Wissen, vorgeschlagen. Diese fünf Niveaus sind in Abb. 214 dargestellt.

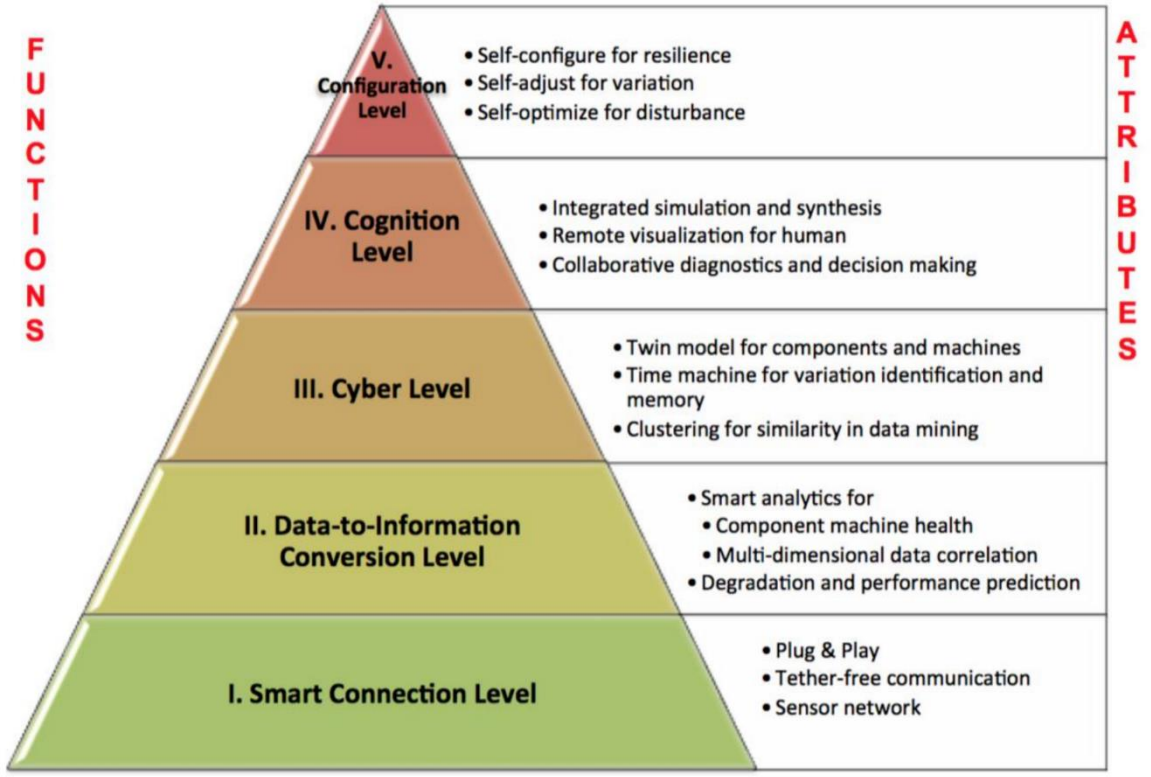


Abb. 214: Empfohlene 5C-Architektur zur Implementierung von CPS im Produktionsbereich [Kao15]

8.8 Die Digitale Fabrik

Auf Basis der Architektur und der Ansätze der Cyber-physikalischen Systeme mit der intelligenten Vernetzung von Maschinen und Produkten entstehen in der Fertigung CPPS oder Smart Factories bzw. Digitale Fabriken [Bra18]. Die wesentlichen Entwicklungsschritte vom Sensor bis zum CPPS zeigt Abb. 215. Eine grundsätzliche Anforderung betrifft die Wandlungsfähigkeit von CPPS.
Mit den am Ausgangsprodukt applizierten Fertigungsinformationen (RFID mit Infos über Fertigungsstationen, Fertigungsdaten, Anbauteilen etc.) werden den Maschinen drahtlos (bspw. über LAN) die durchzuführenden Aktivitäten übermittelt. Dabei werden übergeordnet auch noch Optimierungsschleifen durchlaufen und ggfs. selbstorganisierend Durchlaufzeiten minimiert. Über das Feedback können Maschinenparameter adaptiv verändert werden, sodass eine fortwährende Sicherung höchster Qualitätskriterien ermöglicht wird. Abb. 216 zeigt einen Blick auf ein derartiges Produktionssystem.
Weitere Aufgaben der digitalen Fabrik sind nach [de.wikipedia.org/wiki/Digitale_Fabrik]

- Übernahme der Produktplanungsdaten,
- Prozesszeitenplanung,
- Planung der Produktionsprozesse,
- Planung der Betriebsmittel (Konstruktionsvorschlag, Festlegung Anzahl),
- Einsatzfaktorplanung,

- Layoutplanung des Werks und der Arbeitsplätze,
- Kostenbewertung, sowie
- Absicherung der Planungsergebnisse,
- Übergabe der Planungsdaten an den Betrieb.

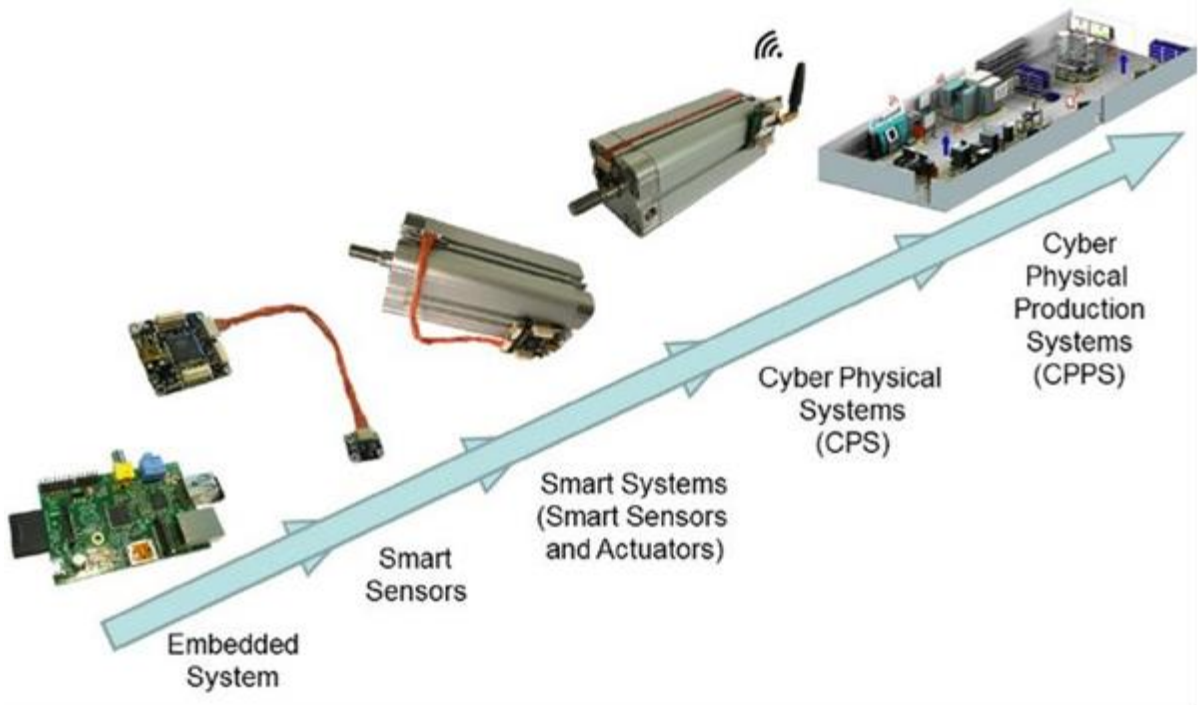


Abb. 215: Entwicklung vom Smart Sensor zur Smart Factory

Abb. 216: Blick in eine reale, mannlose Digitale Fabrik (Bildquelle: de.industryarena.com)

8.9 Auswirkungen von Industrie4.0 auf die Auswahl von Fertigungsverfahren

Der Einzug von selbststeuernden Prozessen, vernetzte Maschinen und autonome Fertigungssysteme ist bereits voll im Gang. Für diese digitale Transformation muss vor allem das Wissen über Automation, embedded systems, Cyber-Physical Systems, Digital Twins, Data Analystics und Kommunikationssysteme u.a.m. vertieft werden.
Aus Sicht der Auswirkungen auf die Fertigungsverfahren ist festzuhalten, dass insbesondere jene Technologien an Bedeutung gewinnen werden, die sich gut digital integrieren lassen, weil sie bereits ein hohes Maß an Digitalisierung angenommen haben. Dazu gehören die Fertigungstechnologien:

- Additive Fertigung (Stereolithografie, Selective Laser Melting u.a.)
- Roboter-gesteuerte Fertigungsstraßen
- Laser-basierte Fertigungssysteme
- Zerspanende Werkzeugmaschinen (Bsp: DMG Mori Integrated Digitization, s. Bild 8.9.1)
- Spritzgussmaschinen (100% digital gesteuert)
- Druckgussmaschinen
- Schweißsysteme (bspw. Fronius Systeme)
- Stanzbiegeautomaten
- Vollautomatisierte Fertigungsstraßen
- und noch einige andere

Digitale Fertigungssysteme, wie in Abb. 217 dargestellt, zeichnen sich durch eine durchgängige Digitalisierung aus. Im Falle der Zerspanungsmaschinen von DMG MORI gibt es Software-Produkte für die Planung, Vorbereitung und Produktion, sowie für das Monitoring, die Instandhaltung und den Service. Es werden alle relevanten Protokolle, wie OPC UA, umati, MTconnect und MQTT unterstützt. Die Vernetzung und Erfassung der Maschinendaten erfolgt über die MDE-Schnittstelle sowie die Anbindung an alle wesentlichen IoT-Plattformen, wie ADAMOS, MindSphere, FIELD system. Damit können die Maschinen optimal in die Shopfloor-Umgebung des Kunden integriert werden.

Abb. 217: Digital Manufacturing Package von DMG Mori

Die Digitalisierung von älteren, bestehenden Maschinen ist zwar möglich, aber evtl. nicht immer wirtschaftlich sinnvoll. Dabei sollte zuerst die strategischen Zielsetzungen und die Umsetzungsschritte gut überlegt werden.
Um den Prozess der Digitalen Transformation proaktiv zu gestalten, werden von [Him19] sechs Stufen vorgeschlagen:

1. Strategie – Möglichkeiten entdecken
2. Readiness – Fitness Check durchführen
3. Roadmap – Richtung und Meilensteine festlegen
4. Technologie – Radar der technischen Möglichkeiten
5. Prototyp-Entwicklung – Erste funktionale Anwendung umsetzen und testen
6. Realisierung – Umsetzungsprojekt starten

Ein erster Schritt kann die Maschinendatenerfassung sein. Die Auswertung der Produktionsdaten mittels „machine learning“-Verfahren oder mit guten statistischen Software-Systemen kann bereits Hinweise über die Sensitivität der Einflussgrößen auf wichtige Zielgrößen geben. Zeitreihenanalysen, FFT-Analysen und andere multi-variate Methoden führen in vielen Fällen zu einer guten Unterstützung und Hilfe für die Prozessführung und für die Qualitätskontrolle.
Jede längere Reise beginnt mit dem ersten Schritt, der aber rasch gesetzt werden sollte.

8.10 Literaturangaben zu Kapitel 8

Kap. 8.1
[Dem13] C.Demant, B.Streicher-Abel, C.Garnica: Industrial Image Processing – Visual Quality Control in Manufacturing, Springer, 2nd ed. 2013
[Hau13] M.Haun: Handbuch Robotik – Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter, Springer Vieweg Berlin Heidelberg, 2.Aufl., 2013
[Hei20] B.Heinrich, P.Linke, M.Glöckler: Grundlagen zur Automatisierung, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020
[Her15] E.Hering, H.Steinhart (Hrsg.): Taschenbuch der Mechatronik, 2.Aufl., Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2015
[Hof07] J.Hoffmann: Taschenbuch der Messtechnik, 5.Aufl., Hanser Verlag, Leipzig, 2007
[Inf20] Infineon Technologies AG: XENSIV™ – sensing the world: Sensor solutions for automotive, industrial and consumer applications, München, 2020 , siehe auch www.infineon.com/sensors
[Jan92] H.Janocha (Hrsg.): Aktoren: Grundlagen und Anwendungen, Springer Verlag, 1992
[Jan13] H.Janocha: Unkonventionelle Aktoren – Eine Einführung, 2.Auflage, De Gruyter Oldenbourg, 2013
[Kle07] C.Kleinschmidt: Technik und Wirtschaft im 19. und 20.Jahrhundert, Oldenbourg, München, 2007
[Pot19] A.Pott, T.Dietz: Industrielle Robotersysteme – Entscheiderwissen für die Planung und Umsetzung wirtschaftlicher Roboterlösungen, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2019
[Sch92] E.Schiessle: Sensortechnik und Messwertaufnahme, Vogel, Würzburg, 1992
[Sch07] W.-D.Schmidt: Sensorschalttechnik, 3.Aufl. Vogel, Würzburg, 2007
[Spu91] G.Spur: Vom Wandel der industriellen Welt durch Werkzeugmaschinen. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1991
[VDI00] VDI/VDE Ges. Mess- und Automatisierungstechnik: Bildverarbeitung im industriellen Einsatz, Tagung Stuttgart 18./19.Okt.2000, Berichte 1572, VDI 2000
[Web09] W.Weber: Industrieroboter – Methoden der Steuerung und Regelung, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2.Aufl. 2009

Kap. 8.2
[Gev06] H.-J.Gevatter, U.Grünhaut: Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion, Springer VDI, 1.Aufl., 2006
[Hes10] S.Hesse, V.Malisa (Hrsg.): Taschenbuch Robotik Montage Handhabung, Carl Hanser Verlag, 2010
[Lan04] R.Langmann: Taschenbuch der Automatisierung, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2004
[Rei18] G.Reinhart, A.Magana Flores, C.Zwicker: Industrieroboter – Planung, Integration, Trends – Ein Leitfaden für KMU. Vogel Fachbuch, 2018
[Sch16] E.Schiessle: Industriesensorik – Sensortechnik und Messwertaufnahme, Vogel Fachbuch, 2.Aufl., 2016
[Sch20] M.Schleipen (Hrsg.): Praxishandbuch OPC UA – Grundlagen, Implementierung, Nachrüstung, Praxisbeispiele. Vogel Fachbuch, 2.Aufl. 2020

Kap. 8.3
[Cvi19] A.Cviko, T.Böing: Manufacturing Analytics in der Herstellung, ZWF 114, 2019, 230-233
[Est00] M.Ester, J.Sander: Knowledge Discovery in Databases. Techniken und Anwendungen. Springer, Berlin 2000
[Fay96] U.Fayyad, G.Piatetsky-Shapiro, P.Smyth: From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. In: AI Magazine 17 (3), 1996, 37-54

[Fre15] M.Freitag, M.Kück, A. Ait Alla, M.Lütjen: Potenziale von Data Science in Produktion und Logistik, Industrie 4.0 Management 31, 2015, 39-46
[Kro19] J.Kröckel: Data Analytics in Produktion und Logistik. Vogel Fachbuch, 2019
[Mik11] R.Mikut, M.Reischl: Data mining tools, Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery 1(5), 2011, 431-443
[Moy17] J.Moyne, J.Iskandar: Big Data Analytics for smart manufacturing: Case studies in semiconductor manufacturing, Processes 5 (3), 2017, 39
[Run15] R.A.Runkler: Data Mining – Modelle und Algorithmen intelligenter Datenanalyse, Springer Vieweg, 2.Auflage, 2015
[Sch19] F.Schäfer, A.Mayr, A.Hess, C.Zeiselmair, H.Otten, J.Franke: Six Sigma 4.0, Data Mining als unterstützende Technologie im Null-Fehler-Management, ZWF 114, 2019, 140-144
[Wit11] I.H.Witten, E.Frank, M.A.Hall: Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques. 3. Auflage, Morgan Kaufmann, Burlington, MA 2011

Kap. 8.4

[Beh19] B.-A.Behrens, B.Breidenstein, D.Duran, S.Herbst, R.Lachmayer,S.Löhnert, T.Matthias, I.Mozgova, F.Nürnberger, V.Prasanthan, R.Siqueira, F.Töller, P.Wriggers: Simulation-Aided Process Chain Design for the Manufacturing of Hybrid Shafts, HTM 74, 2019, 115-135
[Buc02] B.Buchmayr: Werkstoff- und Produktionstechnik mit Mathcad – Modellierung und Simulation in Anwendungsbeispielen, Springer, 2002
[Den18] B.Denkena, B.Bergmann, A.Schmidt, O.Pape: Virtuelle Prozesssimulation für Fräsprozesse, ZWF 113, 2018, 804-808
[Erl10] K.Erlach: Wertstromdesign – Der Weg zur schlanken Fabrik, 2.Aufl., Springer Verlag, 2010
[Jad18] S.Jadhav, M.Schoiswohl, B.Buchmayr: Applications of Finite Element Simulation in the development of advanced sheet metal forming processes, BHM Berg- und Hüttenmänn. Monatshefte 163 (3), 2018, 109-118
[Kas19] M.Kastner: Numerische Analyse der Wirkung der Einflussgörßen beim Tiefziehen, Masterarbeit Montanuniversität Leoben, Feb. 2019
[Kha18] M.A.A.Khan, A.K.Sheikh: A comparative study of simulation software for modelling metal casting processes, Int. J. Simul. Model 17, 2018, 197-209
[Kle07] T.Klevers: Wertstrom-Mapping und Wertstrom-Design. Verschwendung erkennen – Wertschöpfung erhöhen. mi-Fachverlag Redline GmbH, Landsberg am Lech, 2007
[She01] H.R.Shercliff, A.M.Lovatt: Selection of manufacturing processes in design and the role of process modelling, Progress in Materials Science 46, 2001, 429-459
[Sim20] SIMPLAN Simulation in der Praxis, https://www.simplan.de/wp-content/uploads/SimPlan_Simulationsbroschuere.pdf aufgerufen am 12.10.2020
[Stu09] J.C.Sturm, E.Flender: 30 Jahre Gießtechnische Simulation; Giesserei 96 (5), 2009, 94 – 109
[VDI14] VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Grundlagen. VDI-Handbuch Technische Logistik, Bd.8, Materialfluss II, Beuth, Berlin, 2014

Kap. 8.5

[BMWi19] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Leitbild 2030 für Industrie 4.0 – Digitale Ökosysteme global gestalten, Red. Plattform Industrie 4.0, Berlin, Mai 2019
[Dep19] P.Depiereux: Digitale Transformation 2019, etventure-Studie Die Zukunftsfähigkeit der deutschen Unternehmen, Berlin 2019 abrufbar über www.etventure.com/studie 2019
[Kag12] H.Kagermann, W.Wahlster, J.Helbig (Hrsg.): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht, acatech, Forschungsunion Wirtschaft und Wissenschaft, 2.Okt.2012
[Pis20] J.Pistorius: Industrie 4.0 – Schlüsseltechnologien für die Produktion, Grundlagen, Potenziale, Anwendungen, Springer Vieweg, 2020

[Pla20] https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html aufgerufen am 12.10.2020
[Rei17] G.Reinhart: Handbuch Industrie 4.0 – Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik, Carl Hanser Verlag, München, 2017
[Sch17] T.Schulz (Hrsg.): Industrie 4.0 – Potenziale erkennen und umsetzen. Vogel Fachbuch, 2017
[Wei91] M.Weiser: The Computer for the 21st Century, Scientific American 265 (9), 1991, 66-75
[WiG17] WiGeP-Positionspapier: „Smart Engineering“, Industrie 4.0 wird das Engineering radikal verändern, KEM Konstruktion 7-08, 2017, 21-23
[Wis18] S.Wischmann, E.A.Hartmann: Zukunft der Arbeit – Eine praxisnahe Betrachtung. Springer Vieweg Open Access, Berlin, 2018

Kap. 8.6

[Eig20] M.Eigner: Digitaler Zwilling – Stand der Technik, ZWF 115, 2020, 3-6
[Him20] S.Himstedt: Digitaler Zwilling und Produktion 4.0, ZWF 115, 2020, 41-42
[Jon20] D.Jones, C.Snider, A.Nassehi, J.Yon, B.Hicks: Characterising the Digital Twin: A systematic literature review, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 29 (5), 2020, 36-52
[Kri18] W.Kritzinger, M.Karner, G.Traar, J.Henjes, W.Sihn: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification, IFAC PapersOnLine 51-11, 2018, 1016–1022
[Mas20] A.Massonet, R.Kiesel, R.H.Schmitt: Der Digitale Zwilling über den Produktlebenszyklus, ZWF 115, 2020, 97-100
[Mew20] J.Mewes, A.Justus: Digitaler Zwilling für die Produktionstechnik – auf die Nutzung kommt es an, ZWF 115, 2020, 26-28
[Woh19] D.Wohlfeld: Digitaler Zwilling für die Produktion von Übermorgen, ZWF 114, 2019, 65-67

Kap. 8.7

[Abr17] M.Abramovici: Industrie 4.0 wird das Engineering radikal verändern, KEM Konstruktion H.07-08, 2017, 21-23
[aca12] acatech (Hrsg.): Cyber-Physical Systems – Innovationsmotoren für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion, Springer, 2012
[Bro10] M. Broy (Hrsg.): Cyber-Physical Systems: Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme. Springer, acatech, Berlin/ Heidelberg 2010
[Kao15] H.-A. Kao, W.Jin, D.Siegel, J.Lee: A cyber physical interface for automation systems – methodology and examples, Machines 3, 2015, 93-106 doi:10.3390/machines3020093
[Kue15] H.Kühnle, G.Bitsch: Foundations & Principles of Distributed Manufacturing – Elements of Manufacturing Networks, Cyber-Physical Production Systems and Smart Automation, Springer, 2015
[Moe16] D.P.F.Möller: Guide to Computing Fundamentals in Cyber-Physical Systems, Computer Communications and Networks, Springer Int. Publ. Switzerland, 2016
[Son17] H.Song, D.B.Rawat, S.Jeschke, C.Brecher, F.Xhafa: Cyber-Physical Systems: Foundations, Principles and Applications, Academic Press, London, 2017
[Wan17] L.Wang, X.V.Wang: Cloud-based Cyber-Physical Systems in Manufacturing, Springer, 2017

Kap.8.8

[Bra18} U.Bracht, D.Geckler, S.Wenzel: Digitale Fabrik – Methoden und Praxisbeispiele, Springer Vieweg, 2.Aufl. 2018
[Pis20] J.Pistorius: Industrie 4.0 – Schlüsseltechnologien für die Produktion, Grundlagen, Potenziale, Anwendungen, Springer Vieweg, 2020
[Rie20] W.Riegelmayer: Industrie 4.0 – Vernetzungen für die digitale Fabrik, Hanser Verlag, 2020

Kap. 8.9

[Him19] S.Himstedt, S.Human: In 6 Schritten zur digitalen Transformation in der Produktion, https://www.industry-of-things.de/in-6-schritten-zur-digitalen-transformation-in-der-produktion-a-859990/ 10.9.2019

9 Zukünftige Entwicklungen und Herausforderungen

Zusammenfassung: Die Gesellschaftlichen Veränderungen und Megatrends zeigen die Notwendigkeit des ständigen Wandels und einer hohen Agilität in der Unternehmensführung. Die produktionstechnischen Herausforderungen und die wesentlichen Maßnahmen zur Stärkung der globalen Wettbewerbsfähigkeit werden aufgezeigt. Die technologischen Veränderungen, insbesondere die zunehmende Bedeutung der Digitalisierung und der ökologischen Anforderungen erfordern auch Veränderungen im Bereich der Ausbildung junger Nachwuchskräfte. Dazu gehören auch ethische Prinzipien, die auch für in der Zukunft wichtig sein werden.

9.1 Gesellschaftliche Veränderungen und Megatrends

Die globalen großen Themen wie

- die Überalterung der Bevölkerung,
- die Einbeziehung bei Entscheidungen am Arbeitsplatz oder in der Politik,
- die Verschlechterung der natürlichen Ressourcen,
- die stetige Migration,
- das Anwachsen von Industriegebieten,
- die Digitalisierung und die digitale Vernetzung im Internet,
- die Stärkung von Cyberbedrohungen und
- die fortschreitende globale Erwärmung

lösen neue politische Vorschläge und Innovationsentwicklungen aus, die das herkömmliche Denken über die industrielle Evolution verändern.

Die gegenwärtige und zukünftige Situation unseres Umfelds wird durch die Abkürzung VUCA beschrieben, deren Merkmal es ist, dass eine Vorhersage und eine klare Lenkung durch die Unternehmensführung schwieriger ist bzw. wird. Das Kunstwort steht für:

V …	volatility	Instabilität, Schwankung
U …	uncertainty	Unsicherheit
C …	complexity	Komplexität
A …	ambiguity	Mehrdeutigkeit

Eine Strategie zum Überleben in unserer Zeit leitet sich ebenfalls von der Abkürzung VUCA ab:

vision	Vision, Kreativität, originäre Vorstellung
understanding	Verstehen und Wissen
clarity	Klarheit und leicht zu verstehende Aussagen machen
agility	Agilität (flexibles, proaktives oder antizipatives Handeln)

Diese kurze Einleitung soll verdeutlichen, dass der ständige Wandel auch ein flexibles Denken und Handeln notwendig macht, weil sich die Randbedingungen sehr häufig und unerwartet ändern.

9.1.1 Gesellschaftliche Veränderungen und globale Megatrends

Das Zukunftsinstitut in Frankfurt/Main zählt zu den einflussreichsten Think Tanks der europäischen Trend- und Zukunftsforschung. Fragen wie „Welche Veränderungen, welche Trends und Megatrends prägen unsere Gegenwart und welche Rückschlüsse lassen sich daraus für die Zukunft von Gesellschaft, Unternehmen und Kultur schließen?“ sind die täglichen Herausforderungen dieses Forschungsinstituts [Zuk20].

Als Megatrends werden längerfristige Entwicklungen bezeichnet, die für alle Bereiche der Wirtschaft und Gesellschaft hohe Bedeutung haben. Megatrends sind meist globale Phänomene, die aufgrund ihrer Mehrschichtigkeit und unterschiedlichen Dimensionen überaus komplex sind. Sie eignen sich aber sehr gut, um realistisch die Änderungen und Zukunftspotentiale in den ableitbaren Einzeltrends

zu bewerten. Daher bilden sie einen guten Ausgangspunkt für eine Abschätzung der Auswirkungen der wahrscheinlichen Veränderungen auf Branchen, Unternehmen, Märkte und auf jeden Einzelnen. Das Zukunftsinstitut zeichnet zwölf Megatrends aus, die in Tabelle 61 zusammengefasst und in Abb. 218 mit den Subtrends vernetzt visualisiert sind. Diese Karte soll insbesondere eine Orientierung und Einordnung, sowie ein besseres Verständnis der Zusammenhänge geben.

Megatrend	Typische Ausprägungen
Wissenskultur	Lebenslanges Lernen, neue Vermittlungsmethoden, leichterer Wissenszugang
Urbanisierung	Städte sind die Staaten von morgen, neue Lebens- und Denkweisen
Konnektivität	sehr wirkungsstark, Digitale Kommunikation und Vernetzung ist dominant
Individualisierung	Freie Wahlmöglichkeit, neue Wertesysteme und Konsummuster
Neo-Ökologie	Bio-Märkte, EU-Plastikverordnung, Energiewende
Globalisierung	Handelskriege, Cyber-Angriffe, internationale Konzernmächte
Gesundheit	Starkes Gesundheitsbewusstsein, Gesundheitsförderungen
Gender Shift	Stärkeres Selbstbewusstsein von Frauen, neue Kultur des Pluralismus,
New Work	Digitalisierung beeinflusst Arbeitssinnfrage, Kreativökonomie im Kommen
Silver Society	Zunehmend mehr ältere und gesunde Menschen, mehr Selbstentfaltung
Mobilität	Vielfalt an Mobilitätsformen, Fortbewegung vernetzt, digital und geteilt
Sicherheit	Krisen sind ständige Begleiter, großes Sicherheitsbedürfnis

Tabelle 61: Die zwölf Megatrends - Liste des Zukunftsinstituts in Frankfurt [Zuk20]

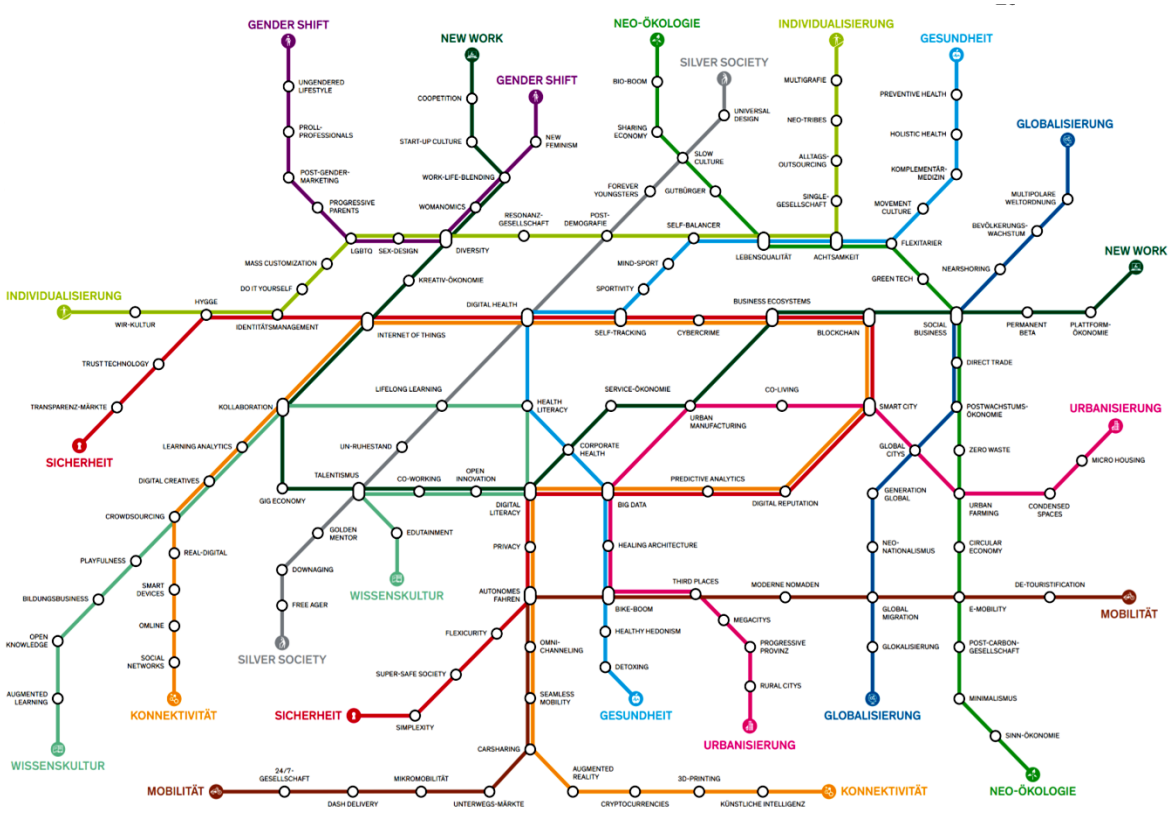


Abb. 218: Megatrend-Map mit den Vernetzungen zwischen den zwölf zentralen Megatrends [Zuk20]

9.1.2 Megatrends in der Werkstofftechnik

In der kürzlich veröffentlichten, österreichischen Studie „Austrian Materials Foresight“ [Hri19], werden ausgehend von den Megatrends im Materialsektor insbesondere für die Bereiche Stahl, NE-Metalle, Kunststoffe und Keramik und intermetallische Verbindungen wichtige Forschungsthemen bis zum Jahr 2030 aufgezeigt. Als übergreifende strategische Forschungshauptrichtungen werden sieben Themen genannt:

- Nachhaltige Werkstoffe und Recycling (geschlossene Kreisläufe)
- Energieeffiziente Fertigungsprozesse (inkl. CO_2-Reduktionsmaßnahmen)
- Innovative, flexible Fertigungssysteme (generative Verfahren)
- Kontinuierliche Eigenschaftsverbesserungen (mechanisch, Korrosion, Verarbeitbarkeit)
- Advanced Materials 2.0 („self-healing materials“)
- Modellierung und Simulation (für das Design von Werkstoffen)
- Prüftechniken für Werkstoffe und Produktion (im Nano-Bereich)

Aus diesem Haus der Forschungsthemen wurden nachfolgend einige konkrete Themen herausgegriffen. Damit soll die vom industriellen und gesellschaftlichen Bedarf definierte Spielwiese für junge Forschergeneration umrissen werden.
Nachdem die o.g. Studie stark auf die nationalen Gegebenheiten Bezug nimmt, seien hier noch ergänzend einige andere Referenzen angeführt [Bur18, Ven20]. Bemerkenswert sind die Themen Superkondensatoren, Photopolymere, Li-Ionen-Batterie-Materialien, Biomaterialien, Nano-Werkstoffe, Werkstoffe für die Energiespeicherung und Elektrokatalyse.

9.1.2.1 Forschungsthemen aus dem Bereich Stahl

- Selbstheilende Stähle
- Hybride Stahlverbunde
- Neuartige Oberflächen
- Ab initio-Modellierung für Hochleistungsstähle

9.1.2.2 Forschungsthemen aus dem Bereich NE-Metalle

- Sensor-basierte Sortierung von Schrotten mit hohem Durchsatz für Al-Recycling
- Erhöhung der Produktqualität aus Recyclingwerkstoffen
- Hochduktile Al-Legierungen mit Streckgrenzen von 1000 MPa
- Korrosionsresistente isotropes Mg-Legierungen
- Nanokristallines, hochfestes Aluminium
- Mg-Knetlegierungen mit verbesserten Eigenschaften
- Funktionsbeschichtungen für NE-Metalle
- Entwicklung von NE-Metallen für Hochleistungsenergiespeicher

9.1.2.3 Forschungsthemen aus dem Bereich Kunststoffe und Verbundwerkstoffe

- Selbstheilende, selbstreparierende Polymere
- Schadenstolerante Kunststoffe für den Leichtbau
- Simulation der Biokompatibilität von smarten Hybridwerkstoffen
- Energieeffiziente Produktion mit geringen Losgrößen
- Automatisierung für CFK-Bauteile

9.1.2.4 Forschungsthemen aus dem Bereich Keramik

- Recycling von Ingenieurkeramik mit geringem Energieaufwand
- Selbstheilende Keramik
- Gestalten von Mikrostrukturen durch smarte Pressen
- Fügen von Keramik

9.1.3 Megatrends in der Produktion

Laut einer Studie des WMF [WMF18] stehen im Produktionsbereich folgende Trends im Vordergrund:

- Competences & Skills Gap for Advanced Manufacturing
- Zero-Waste Manufacturing
- Global-Agile Supply Chain Networks
- Energy & Resources Efficiency
- Mass Personalisation
- Integration of IT, OT und ET
- Data Security and Data Authority

9.2 Neue produktionstechnische Herausforderungen

Bevor die Herausforderungen in der Zeit der Digitalisierung behandelt werden, sollte noch ein konventioneller Blick auf die Herausforderungen und Weiterentwicklung im Bereich der Produktion angestellt werden, denn die Produktion der Zukunft wird noch lange auf den Fundamenten der aktuellen Technologien basieren. Gerade im Werkzeugmaschinenbau, in der Umformtechnik und auch in anderen Bereichen ist die Bundesrepublik Deutschland („MADE IN GERMANY“) weltweit führend.
Daher sollen Abb. 219 beispielhaft die Bemühungen im Bereich der kaltgeformten Produkte aufgezeigt werden. In vielen Bereichen sicherlich eher inkrementell als disruptiv, aber dafür altbewährt und gut.

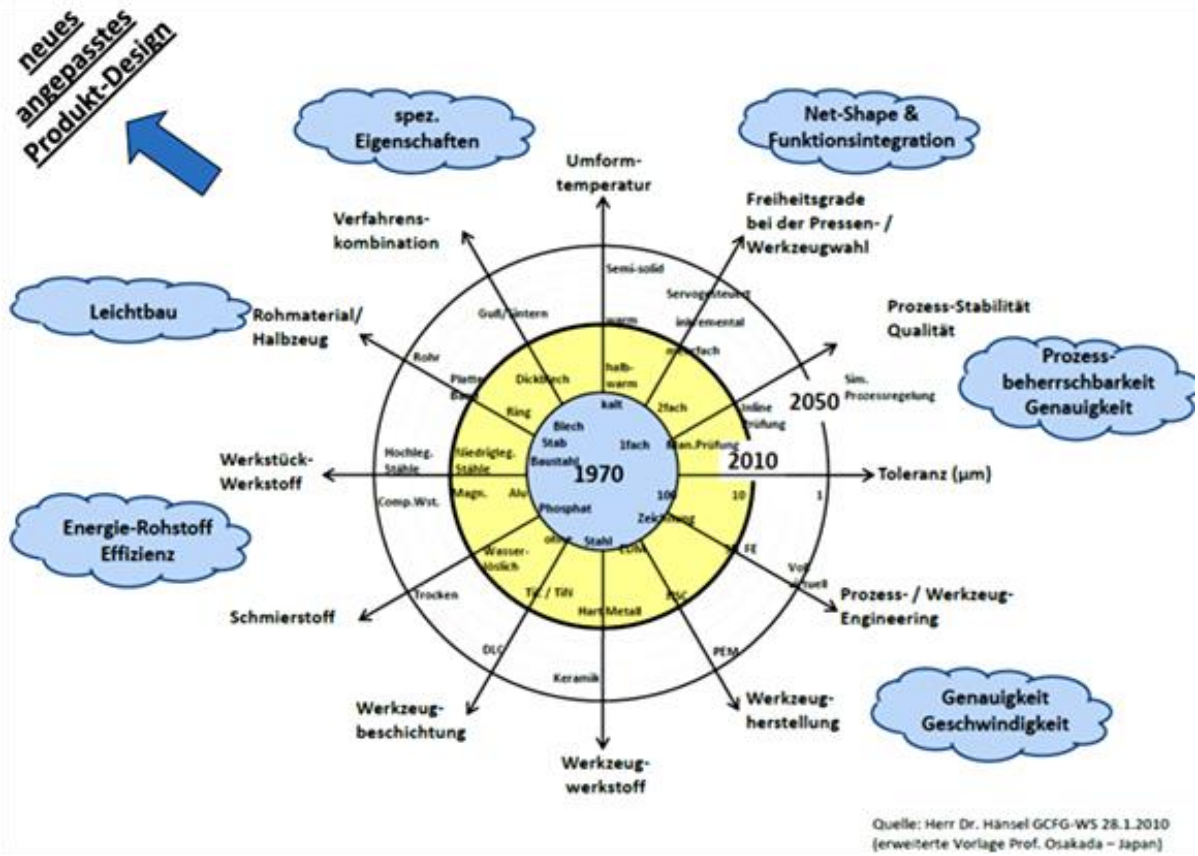


Abb. 219: Entwicklungsrichtungen über die letzten Jahre im Bereich der Kaltumformung

9.2.1 Treiber und Bewertung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit

Mit Industrie 4.0 wird sich die Produktion grundlegend verändern und es werden auch neue Fertigungstechniken und Geschäftsmodelle entstehen. Die Geschwindigkeit und Komplexität dieses technologischen Wandels stellen eine hohe Herausforderung sowohl für Unternehmer als auch für die politischen Entscheidungsträger dar. In einer Studie des World Economic Forums in Zusammenarbeit mit A.T.Kearney [WEF18] werden die treibenden Kräfte für die zukünftige Produktion, sowie die Bereitschaft bzw. Akzeptanz verschiedener Nationen auf allen Kontinenten zu diesem Wandel analysiert. Letzteres wird im Kapitel 9.2.2 noch näher behandelt.

Abb. 220 gibt einen Überblick der treibenden Kräfte für die zukünftige Produktion, wobei zu den wichtigsten Treibern die Bereiche Technologie & Innovation, gut ausgebildete Fachleute, unterstützende Rahmenbedingungen der Regierungen und globale Handelsbeziehungen zählen. Eine ähnliche Bewertung und Einschätzung der Maßnahmen im Bereich der Produktion für die Zukunft zeigt Abb. 221 nach IPA Stuttgart.

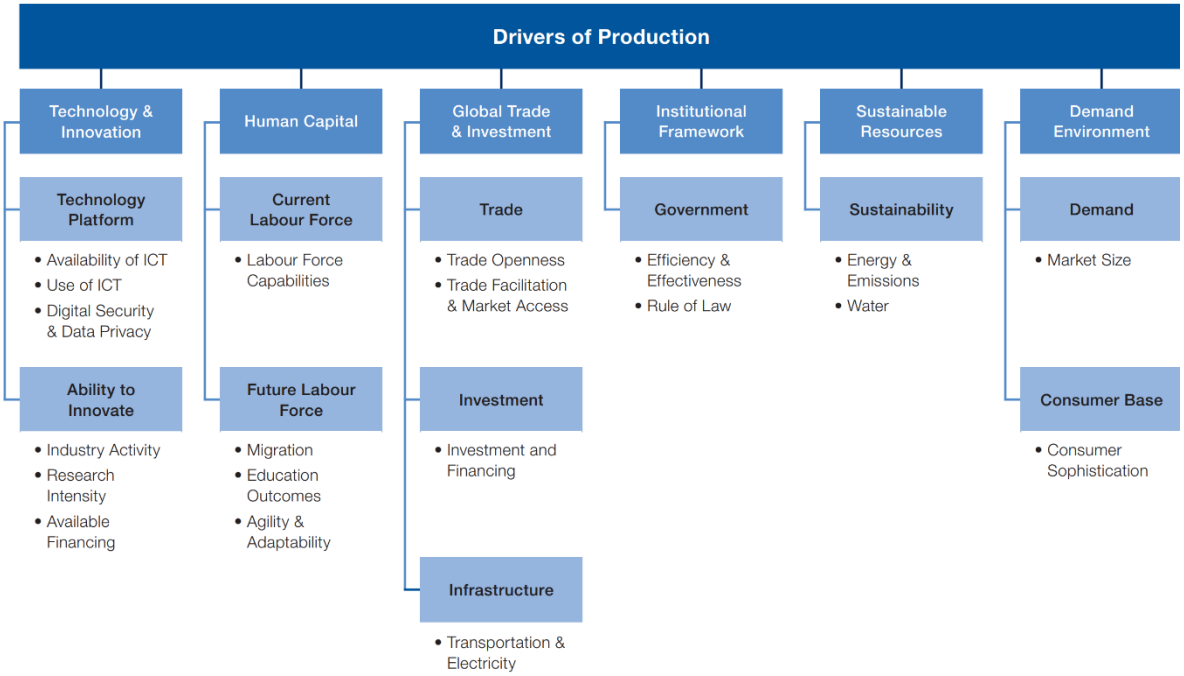


Abb. 220: Treibende Kräfte für die zukünftige Produktion nach [WEF18]

Abb. 221: Herausforderungen für die Produktion (Quelle: IPA, FhG Stuttgart)

Im Deloitte-Report 2016 zur weltweiten Beurteilung der Wettbewerbsfähigkeit, werden die in Abb. 222 dargestellten Faktoren berücksichtigt und zu einem Global Manufacturing Competitiveness Index GMCI zusammengefasst. Eine Reihung der Länder nach diesem GMCI wird in Kap.9.2.2 gezeigt.

Abb. 222: Treibende Elemente für die globale Wettbewerbsfähigkeit im Bereich der Produktion [Del16]

Wichtige, zukünftige Technologiefelder der Industrie zeigt Abb. 223. Diese Technologien werden auch im Rahmen der EU-Forschungsförderung HORIZON 2020 besonders gefördert. Dazu stehen zweistellige Milliardenbeträge für die nächsten Jahre zur Verfügung.

Abb. 223: Wichtige Technologiefelder der Industrie

9.2.1.1 Die Rolle der Schlüsseltechnologien (key enabling technologies - KET)

Schlüsseltechnologien oder KETs spielen für die technologische Weiterentwicklung von bestehenden Produkten und Fertigungsprozessen eine wichtige Rolle. Im Horizon 2020 Programm der EU bildet die Entwicklung und Implementierung von KETs in der europäischen Industrie einen Themenschwerpunkt, wobei für die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit der EU-Industrie vorrangig sechs Technologiebereiche

- Nanotechnologie
- Mikro- und Nanoelektronik
- Photonik
- Werkstoffe
- Biotechnologie
- Produktion

Identifiziert wurden. Tabelle 62 zeigt einige Beispiele, die zeigen, wie wichtige Schlüsseltechnologien umgesetzt werden können und welche Vorteile/Nutzen daraus erwachsen.
Eine detaillierte Darstellung bedeutender Technologien für die Zukunft stammt vom World Economic Forum aus dem Jahre 2017 [WEF17].

Schlüsseltechnologie (KET)	Anwendung	Nutzen
Sensortechnologie	Prozesskontrolle	Höhere Produktivität
Simulationssoftware	spez. Fertigungstechnologien	Parameteroptimierung
Data Analytics	Data Mining	Erkenntnisgewinn
Werkstoffmodelle	Gefügeentwicklung	Vorhersage der Korngröße und der mechanischen Eigenschaften
Neue zfP-Techniken	Qualitätsmanagement	Sichere Fehlererkennung
Physikalische Modellierung	F&E	Produkt-/Prozessverbesserung
Robotersysteme	Automatisierung & Handling	Entlastung von schwerer Arbeit
Computer hardware	Prozesskontrolle, Echtzeit-Datenerfassung	Speicherung großer Daten und Echtzeitverarbeitung
Künstliche Intelligenz	Automatisierungs- und Entscheidungsmodul	Muster-, Sprach- und Feature-Erkennung, Prozesssteuerung
Cyber-Physical Systems	Embedded systems	Physikalische, adaptive Steuerung

Tabelle 62: Schlüsseltechnologien ermöglichen Verbesserungen in unterschiedlichsten Bereichen [Buc18]

Das Europäische Innovations- und Technologieinstitut EIT führt dazu die weltweit besten Köpfe aus den Bereichen Bildung, Forschung und Industrie zusammen. Als Dachorganisation werden Wissens- und Innovationsgemeinschaften bzw. „Knowledge and Innovation Communities“ (KICs) gefördert.
Seit 2010 wurden in Europa acht große Innovationscluster gegründet:

- EIT InnoEnergy: Nachhaltige Energie
- EIT Climate-KIC: Klimawandel – Anpassung und Vermeidung
- EIT Digital: Nächste Generation der Informations- und Kommunikationsgesellschaft
- EIT Health
- EIT Food
- EIT Raw Materials (mit Sitz an der Montanuniversität Leoben)
- EIT Urban Mobility
- EIT Manufacturing

Die Visionen und Missionen des European Institute of Innovation and Technology (EIT), sowie die zukünftigen Strategien zur Stärkung der Europäischen Forschungsstellen, der Ausbildung und der Unternehmen können online unter https://eit.europa.eu/ abgefragt werden.

9.2.2 Länderspezifische Betrachtung

Die Reihung nach dem GMCI, wie in Kap 9.2.1 erwähnt, mit den Faktoren aus Abb. 222 zeigt Tabelle 63.
Im Bericht des WEF [WEF18] wurde auch analysiert, wie gut die einzelnen Länder für die Produktion der Zukunft positioniert sind. Dazu wurde der Stand bzgl. der treibenden Kräfte und die Struktur der Produktion in Bezug auf Größe und Komplexität bewertet und in einem Diagramm dargestellt. Als Beispiel zeigt Abb. 224 eine Bewertung für Österreich mit der Einordnung unter den führenden Nationen mit starkem Fokus auf die Produktion der Zukunft.
Eine ähnliche Studie wurde 2018 von Deloitte zur Attraktivität des Wirtschaftsstandortes Österreichs durchgeführt [Del18]. Dabei wurden sieben Standortfaktoren bewertet: Politisches and makroökonomisches Umfeld, Unternehmensinfrastruktur, Regulatorisches Umfeld, Kosten, Digitalisierung/Innovation/F&T, Verfügbarkeit von Arbeitskräften und Lebensqualität.
Zusammenfassend wird Österreich als wohlhabend, exportorientierte Nation mit hoher Produktivität und hoher Lebensqualität bewertet. In Bezug auf die Zukunftsaussichten wird von den Autoren festgehalten: Es gibt deutlich Luft nach oben. Zu den Top10-Nationen Zählen die Länder Schweiz, USA, Singapur, Niederlande, Deutschland, Hong Kong, Schweden, UK, Japan und Finnland. Österreich liegt auf Platz 18.

2016 (Current)		
Rank	Country	Index score (100=High) (10 = Low)
1	China	100.0
2	United States	99.5
3	Germany	93.9
4	Japan	80.4
5	South Korea	76.7
6	United Kingdom	75.8
7	Taiwan	72.9
8	Mexico	69.5
9	Canada	68.7
10	Singapore	68.4
11	India	67.2
12	Switzerland	63.6
13	Sweden	62.1
14	Thailand	60.4
15	Poland	59.1
16	Turkey	59.0
17	Malaysia	59.0
18	Vietnam	56.5
19	Indonesia	55.8
20	Netherlands	55.7
21	Australia	55.5
22	France	55.5
23	Czech Republic	55.3
24	Finland	52.5
25	Spain	50.6
26	Belgium	48.3
27	South Africa	48.1
28	Italy	46.5
29	Brazil	46.2
30	United Arab Emirates	45.4
31	Ireland	44.7

2020 (Projected)			
Rank	2016 vs. 2020	Country	Index score (100=High) (10=Low)
1	(▲ +1)	United States	100.0
2	(▼ -1)	China	93.5
3	(⟷)	Germany	90.8
4	(⟷)	Japan	78.0
5	(▲ +6)	India	77.5
6	(▼ -1)	South Korea	77.0
7	(▲ +1)	Mexico	75.9
8	(▼ -2)	United Kingdom	73.8
9	(▼ -2)	Taiwan	72.1
10	(▼ -1)	Canada	68.1
11	(▼ -1)	Singapore	67.6
12	(▲ +6)	Vietnam	65.5
13	(▲ +4)	Malaysia	62.1
14	(⟷)	Thailand	62.0
15	(▲ +4)	Indonesia	61.9
16	(▼ -1)	Poland	61.9
17	(▼ -1)	Turkey	60.8
18	(▼ -5)	Sweden	59.7
19	(▼ -7)	Switzerland	59.1
20	(▲ +3)	Czech Republic	57.4
21	(▼ -1)	Netherlands	56.5
22	(▼ -1)	Australia	53.4
23	(▲ +6)	Brazil	52.9
24	(⟷)	Finland	49.7
25	(▲ +2)	South Africa	49.3
26	(▼ -4)	France	49.1
27	(▼ -2)	Spain	48.4
28	(▲ +5)	Romania	45.9
29	(▼ -3)	Belgium	45.8
30	(▼ -2)	Italy	45.0
31	(⟷)	Ireland	43.7

Tabelle 63: Reihung der Industrieländer nach dem Global Manufacturing Competitiveness Index (GMCI) nach [Del16]

Austria

Leading

Readiness for the Future of Production Assessment 2018 edition

WORLD ECONOMIC FORUM

Key economic indicators

Population millions	8.7	**GDP per capita** US$	44,498.4
GDP US$ billions	386.8	**Unemployment rate** %	6.0

Key production indicators

Manufacturing value added 2010 millions US$	71,962.7	**Manufacturing value added growth** Annual %	1.0
Manufacturing value added in economy % GDP	17.3	**Medium hi-tech & hi-tech industries** % of manu. value added	45.9
Manufacturing employment % working population	16.0	**CO2 emission per unit of value added** kg/USD	0.1

Readiness Overall Assessment

Drivers of Production 6.8

Driver	Weighting	Rank	Score /10
Technology & Innovation	20%	21st	6.2
Human Capital	20%	18th	6.8
Global Trade & Investment	20%	22nd	6.5
Institutional Framework	20%	15th	8.0
Sustainable Resources	5%	4th	8.7
Demand Environment	15%	31st	5.6

Structure of Production 7.5

Structure	Weighting	Rank	Score /10
Complexity	60%	7th	8.7
Scale	40%	21st	5.6

Archetype

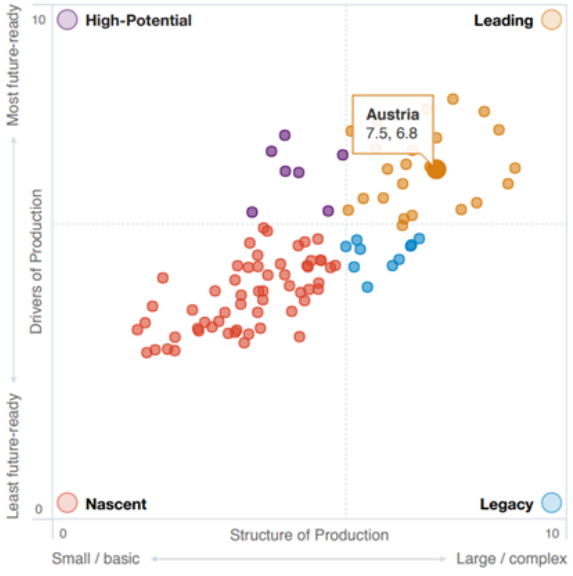


Abb. 224: Readiness for the Future of Production nach World Economic Forum Report 2018 [WEF18]

9.2.3 Empfehlungen für die produktionstechnische Zukunft

Das WMF (world manufacturing forum) [WMF18] empfiehlt für die Zukunft der Fertigungstechnik bzw. Produkt folgend Maßnahmen:

- Kultivieren Sie eine positive Wahrnehmung der Fertigung
- Förderung von Bildung und Kompetenzentwicklung für das gesellschaftliche Wohlbefinden
- Entwickeln Sie effektive Richtlinien zur Unterstützung globaler Geschäftsinitiativen
- Stärkung und Erweiterung der Infrastrukturen für eine zukunftsorientierte Fertigung
- Förderung des Ökosystems für Fertigungsinnovationen weltweit
- Schaffen Sie attraktive Arbeitsplätze für alle
- Entwerfen und produzieren Sie sozial orientierte Produkte
- Unterstützung von KMU bei der digitalen Transformation
- Entdecken Sie den wahren Wert datengesteuerter kognitiver Fertigung
- Förderung der Ressourceneffizienz und der länderspezifischen Umweltpolitik

Die für die Zukunft notwendigen, multiplen Schwerpunkte für eine intelligente und optimierte Fertigung/Produktion sind in Abb. 225 aus [Qia17] dargestellt.

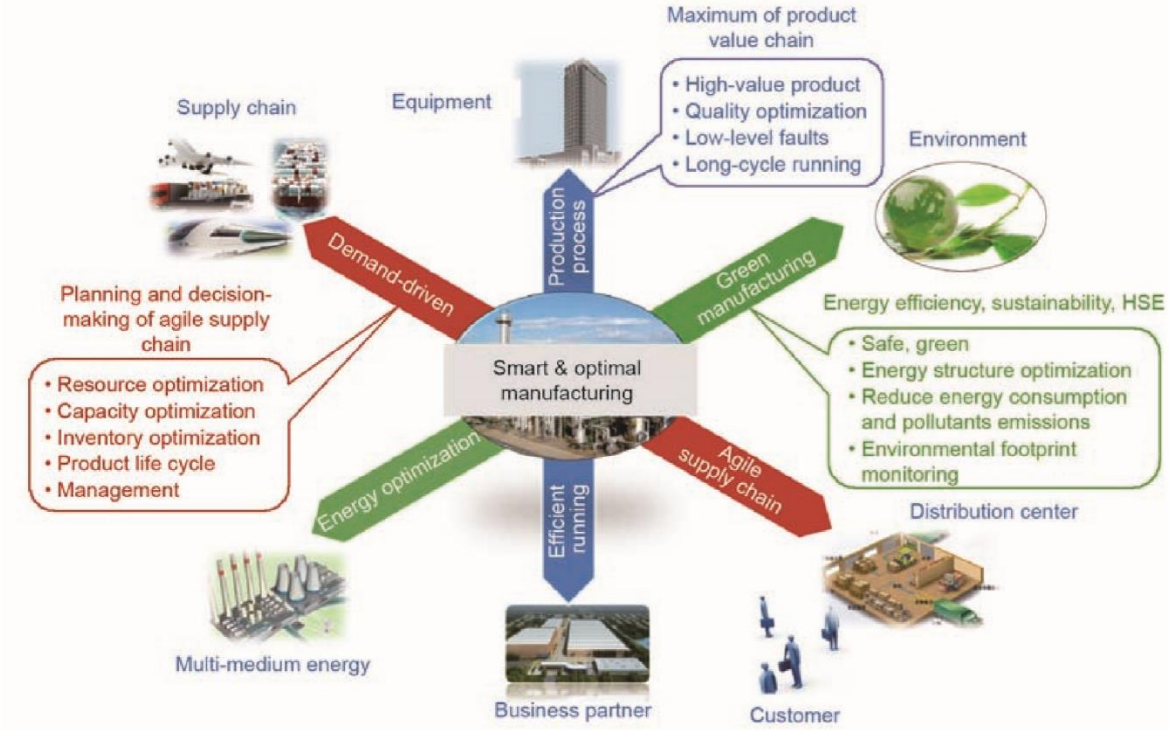


Abb. 225: Die Stoßrichtungen für eine smarte und optimierte Fertigung nach [Qia17]

Die noch zu lösenden wissenschaftlichen Aufgaben und Schlüsseltechnologien für die smarte und optimierte Fertigung zeigt Abb. 226.

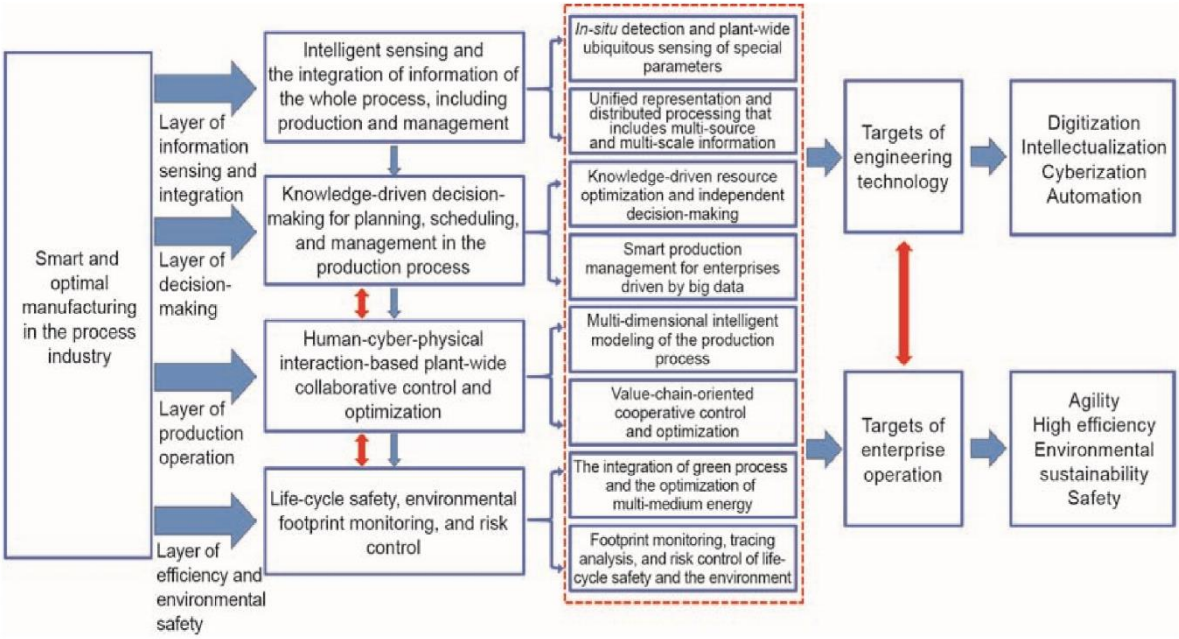


Abb. 226: Die grundlegenden Theorien und Schlüsseltechnologien für die Transformation zu smarten und optimierten Fertigungsprozessen [Qia17]

9.2.4 Prioritäre Forschungsfelder für die produzierende Industrie 2030

Von der Plattform MANUFUTURE©–DE und IPA, Fraunhofer Institut Stuttgart werden für die Zeit bis 2030 folgende prioritäre Forschungsfelder genannt, siehe Abb. 227.

Abb. 227: Prioritäre Forschungsfelder für die produzierende Industrie 2030 [Quelle: Manufuture-DE]

Zusammenfassend sind die Erfolgsfaktoren für Unternehmen im 21.Jahrhundert:

- eine klare Vision, die von allen verstanden wird

- Offenheit für neue Technologien und Entwicklung von High-Tech-Produkten
- Nutzung der Digitalisierung für Unternehmen und für die Produktion
- Rekrutieren der besten Leute mit den richtigen Grundfertigkeiten
- Gute Kommunikation mit dem eigenen Team und den Kunden
- Mitarbeitermotivation auf einem hohen Niveau
- Weiterbildung der Mitarbeiter und Aufbau internationaler Netzwerke

9.3 Die wichtige Rolle der Kreativität und der Ausbildung

9.3.1 Die Rolle der Kreativität für die Generierung von Innovationen

Aufgrund der Tatsache, dass bei vielen Fertigungstechnologien die Sättigungsphase der Lernkurve bereits erreicht wurde, ist die Wirkung evolutionärer Entwicklungen nur mehr gering. Mittels Querdenken oder „Design Thinking“ wird daher versucht, in unterschiedlichsten Bereichen neue, disruptive Lösungen zu finden. Eine wesentliche Voraussetzung dazu ist die Fähigkeit in hohem Maße kreativ zu sein. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Kreativität wurden von Prof. Perkins in Form des „Snowflake Model of Creativity“ geschaffen [Per84], wobei er sechs wichtige Eigenschaften/Fähigkeiten hervorhebt, siehe Abb. 228.

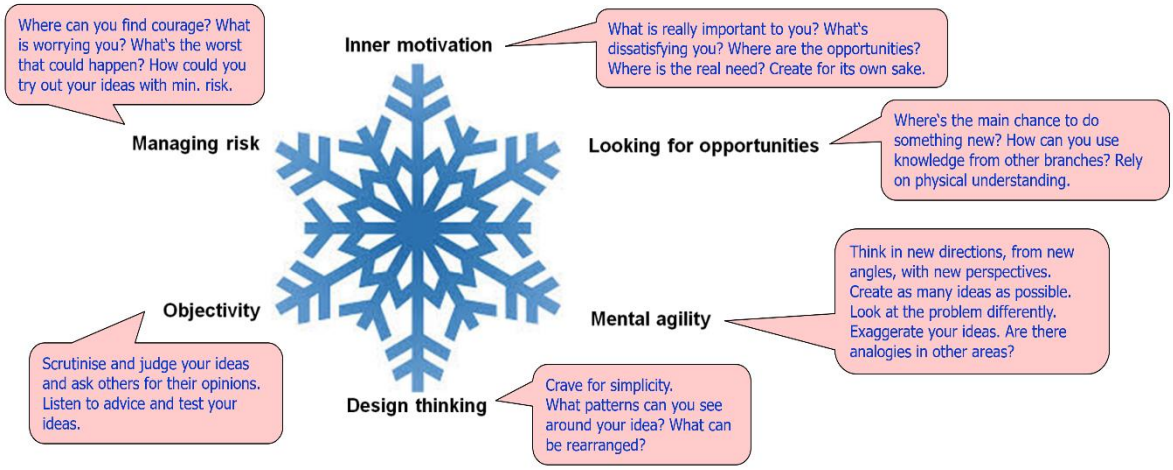


Abb. 228: Snowflake Model of Creativity nach Prof. D.Perkins [Buc18]

Kreative Personen zeichnen sich aus durch gute Kommunikationsfähigkeit, durch Aufgeschlossenheit gegenüber Neuem, durch hohe Risikobereitschaft und Resilienz, durch gutes und breites Fachwissen und durch hohe Flexibilität im Denken.
Die Fähigkeit zum kreativen Denken und Werken sollte bereits im Kindesalter durch Rollenspiele, Phantasiegeschichten, kleine Experimente, Malen, Bauen mit Lego-Baukästen u.a.m. gefördert werden. In [Sta04] sind viele Anregungen und Beispiele für Kreativitätsspiele zu finden. Ähnliche Empfehlungen gibt auch Prof. Perkins in seinem Buch für Kinder [Per14]. Moderne Technik-Spielzeuge sind ideale Weihnachtsgeschenke und Grundelemente zur Kreativitätsförderung. Im jugendlichen Alter sollte der Weg in FabLabs führen, wo die Jugendlichen unter Anleitung oder auch selbständig Experimente durchführen oder 3D-gedruckte Bauteile generieren können. Im frühen Studium sind programmierbare Mikro-Controller, wie MINDSTORM EV3 von Lego, ein guter Einstieg, um Roboter oder Fahrzeuge zu programmieren. Wie in [Sat14] am Beispiel der Steuerung eines Drückwalzprozesses beschrieben, ist der EV3-Block ein erster Schritt in Richtung Automatisierungstechnik.

9.3.2 Neue Anforderungen an die Ausbildung von Technikern

Ausgehend von der Mechatronik erfordert die zunehmende Digitalisierung in der Produktion eine verstärkte Ausbildung in den relevanten Fächern, wie Sensortechnik, SPS-Programmierung, Netzwerktechnologie, WLAN, RFID, Programmierung von modernen CNC-Steuerungsmodulen (z.B. Sinumerik 840D), Roboterprogrammierung u.a.m.
Einen Überblick über zukünftige Herausforderungen bzgl. der Fähigkeiten von Produktionstechniker gibt Abb. 229. Neben dem technologischen Wissen sind auch andere wichtige Kenntnisse im kognitiven und sozialen Bereich notwendig.

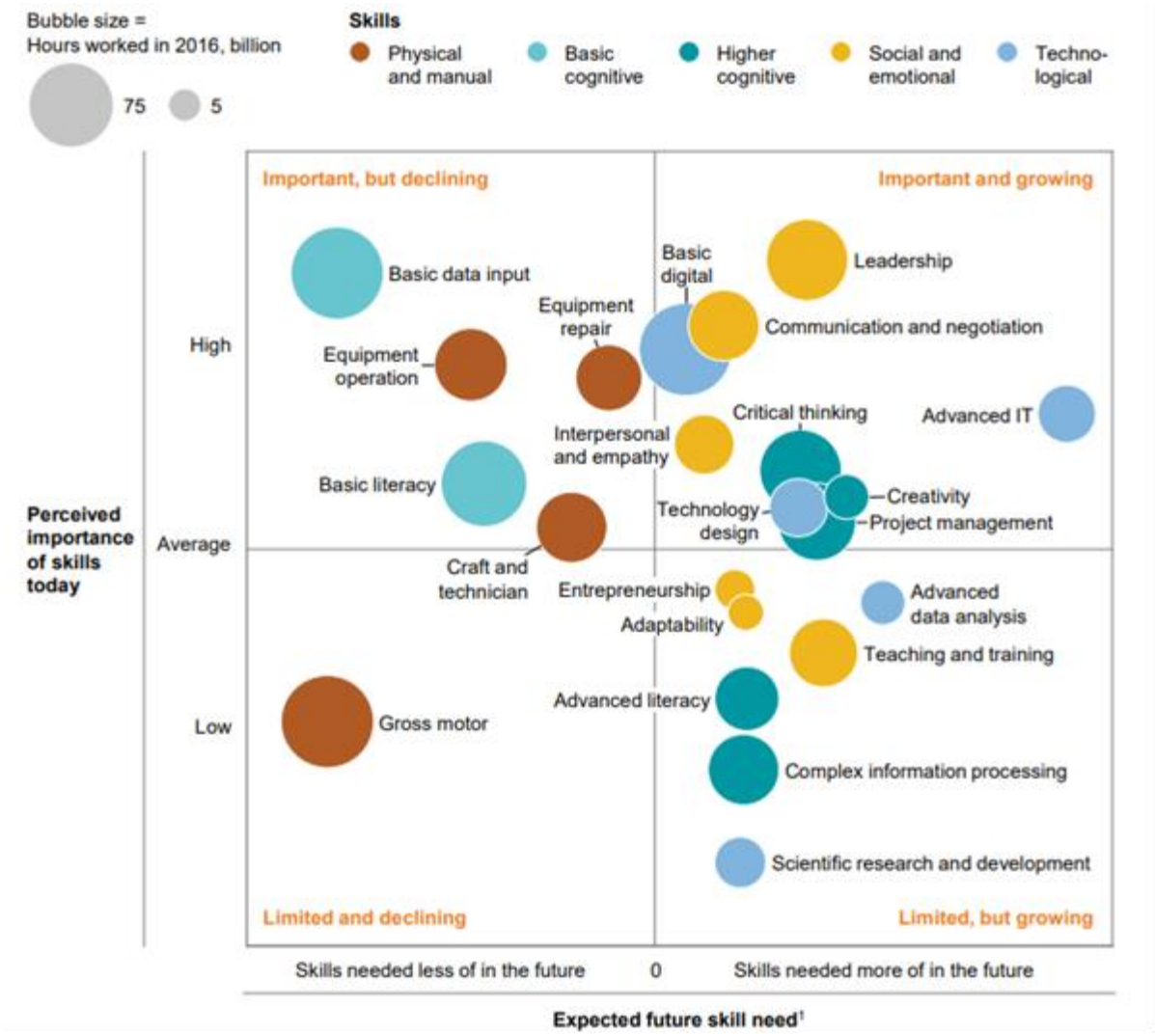


Abb. 229: Zukünftige Herausforderungen an Produktionstechniker (Quelle. McKinsey Global Institute, 2018)

Das World Manufacturing Forum [WMF19] empfiehlt für den Bereich der Fertigung die in Tabelle 64 dargestellte Ausrichtung der Fähigkeiten (Skills).

Tabelle 64: Top10 Fähigkeiten (Skills) für die Zukunft der Fertigung nach [WMF19]

9.4 Fachkräftemangel – was ist zu tun?

Systematisches Vorgehen basierend auf einer ausgewogenen Systemanalyse ermöglicht stets nachhaltige Lösungen auch für komplexe Aufgabenstellungen. Diese Grundhaltung muss auch die Maxime für jeden Maschinenbauer sein. Sie entsteht durch eine exzellente fachliche Ausbildung und das ständige Bemühen schwierige Aufgaben stets bestmöglich zu meistern. Das ständige Bemühen bei der Lösung neuer maschinenbaulicher Aufgaben reicht auch in vielfältige Randbereiche, wie Einsatz neuer Werkstoffprüfmethoden, Schadensanalyse, physikalische und numerische Simulation, durchgehende Analyse von mehrstufigen Fertigungsketten, sowie zum Kennen lernen der Herausforderungen wichtiger Technologiebereiche, wie der Automobilindustrie, der Kraftwerks- bzw. Energietechnik und der industriellen Verfahrenstechnik.
Der Kampf um Talente hat bereits vor einigen Jahren begonnen. Mittlerweile kennt man schon die wichtigsten Köder, die für junge Leute attraktiv sind. Dazu gehören:

- Gute Ausbildung (gute persönlich betreute Lehrlingsausbildung, Duale Bildungskonzepte, interessante Bildungsinhalte, beste Lehrer und gutes Ausbildungsklima)
- Gute Ausgewogenheit zwischen Förderung und Forderung der Nachwuchskräfte
- Klare Vermittlung der Bedeutung der Lehrinhalte und der persönlichen Einstellung dazu.
- Klare Vermittlung der weiteren Entwicklungsmöglichkeiten in einem Betrieb.

- Anleitung zum selbständigen Handeln und vorbildliches Wirken und Anleiten
- Förderung der Kreativität (Mut zu Neuem)
- Stärkung der Team- und Kooperationsfähigkeit
- Erziehung zu einer offenen, ehrlichen Zusammenarbeit
- Anerkennung von zusätzlichen Leistungen
- Vermittlung/Stärkung des Selbstbewusstseins
- Unterstützung bei Wohnungs- oder Betreuungsbedarf für Kinder
- Höhere Wertschätzung für Fachkräfte

Im Bereich der Ausbildung sind insbesondere die Inhalte anzupassen und neue Formen des Lernens (E-learning etc.) anzubieten. Beispiele sind:

- Praktikum zum Programmieren und Arbeiten mit Robotersystemen
- Vertiefte Kenntnisse in Mathematik, Physik, IT, Elektronik, Internet-Technik etc.
- Ermutigung zur Durchführung von Experimenten (in FabLabs, digital factories)
- Erweiterte Ausbildung in den Detailfragen der Digitization
- Ausbau des dualen Ausbildungssystems
- Mitwirkung im Aufbau eines mobilen 5G Netzwerkes in Europa
- Förderung neuer Lernplattformen (Wiki, MOOC oder SPOC etc.)
- Einfordern des Bildungsauftrages der öffentlichen TV-Stationen

Generell ist eine rasche Anpassung an die veränderten Bedingungen und Herausforderungen notwendig, entsprechend dem Spruch: „Der frühe Vogel fängt den Wurm“ oder alternativ „Wer zuerst kommt, malt zuerst“.

9.5 Ethische Prinzipien - Werte nicht vergessen!

9.5.1 Unternehmerethik

Mangelnde Ethik und Unmoral nehmen in unserer globalisierten, digitalisierten und beschleunigten Welt stetig zu, besonders in der Wirtschaft, und erreichen ein nie bekanntes Ausmaß. Sie vernachlässigen Nachhaltigkeit und zerstören langfristig die Unternehmen. Die christlich geprägte alte Ethik trägt nicht mehr.
In seinem Buch „Business Ethik 3.0 [Mey20] fordert Prof.Dr. Meyer-Galow dringend ein Umdenken im unternehmerischen Zusammenwirken. Als Ursache für eine zunehmende Ichbesessenheit sieht er den Mangel an Achtsamkeit, Mitgefühl, Empathie, Kongruenz und Zuverlässigkeit. Trotz aller Fortschritte ist der Mensch der Postmoderne durch die einseitige Fokussierung auf Denken, Wissen, Machen, Habenwollen in eine Sackgasse geraten.
In [Ben17] werden die wesentlichen Merkmale der Industrie 4.0 herausgearbeitet und ins Verhältnis zur Ethik gesetzt. Dabei zeigt sich, dass neben den ökologischen und technischen Chancen und Risiken einhergehen.

9.5.2 Produktethik

Die unterschiedlichen Dimensionen der Produktethik wurden von E.Türk übersichtlich in [Tür04] am Beispiel des Zulassungsverfahrens für den Flughafen Berlin Brandenburg zusammengefasst:

- Verbraucherethik
    - Unkenntnis der Verbraucher darf nicht ausgenutzt werden
    - Keine kurzlebigen Güter
    - Kein Verschweigen von Nebenwirkungen

- Umweltethik
  - Umweltverbrauch als Kosten sehen
  - Technologiefolgeabschätzungen
- Sozialethik
  - Bewertung von neuen Technologien anhand ihrer Wirkung auf Arbeitsplätze
  - Rationalisierung nur mit neuen Arbeitsplätzen
- Arbeitsethik
  - Humanisierung der Arbeit
  - Leistungsprivilegien statt Positionsprivilegien
- Gesundheitsethik
  - Achtung der Menschenwürde
- Tierethik
  - Tierversuche und Käfighaltung sind unmoralisch
  - Erhaltung der Artenvielfalt

9.5.3 Die Rolle der Werte

Werte haben einen sehr großen Einfluss auf unser Leben und sind uns dennoch meist unbewusst. Sie sind aber dafür verantwortlich, die Ziele zu finden, die es uns wirklich wert sind, die uns motivieren, die uns sagen, was richtig oder falsch ist, die uns sagen, was gut oder böse ist, für die wir Zeit und Ressourcen aufwenden (siehe auch www.wertesysteme.de).

Das Wissen um seine eigenen Werte hilft einem bei der Orientierung und Findung von persönlichen Zielen, sowie dabei, die richtigen Verbündeten zu finden, welche gleiche oder ähnliche Wertvorstellungen besitzen. In kollektiven Systemen sind gemeinsame Werte eine der wichtigsten Grundlagen für Sinnstiftung.

Der amerikan.-israelische Sozialpsychologe Shalom H. Schwartz (Univ. of Wisconsin-Madison) hat herausgefunden, dass Werte miteinander in Verbindung stehen und in 10 Wertegruppen zusammengefasst werden können. Unterschiedliche Charaktere zeigen eine überraschende Kontinuität in den Dingen, die in ihrem Leben wichtig sind. Durch statistische Auswertung der Wertestrukturen von über 64000 Menschen aus fast 70 Ländern konnte mit der Methode der multidimensionalen Skalierung eine Karte von Wertegruppen erstellt werden, siehe Abb. 230.

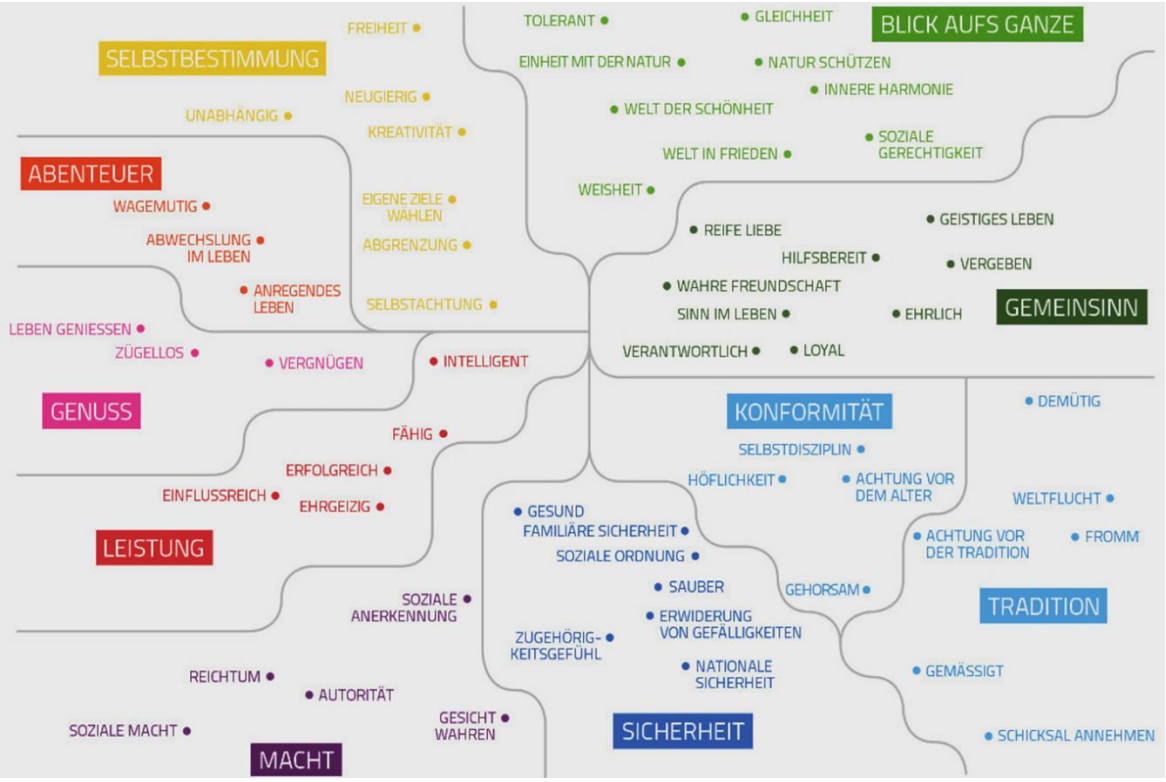


Abb. 230: Ergebnis einer statischen Analyse der Wertestrukturen von über 64000 Menschen

Mit dieser Karte können die Verhaltensmuster unterschiedlicher Menschentypen (Vorgesetzter, Forscher, Abenteurer, junge und ältere Menschen etc.) mit den eigenen Erfahrungen im Einklang gesehen werden. Wertvorstellungen sind auch keine „normativen Gesetze“, sondern können durch das Umfeld und durch eigene Erlebnisse verändert werden. Nach der Stiftung für Zukunftsfragen findet zurzeit eine Rückbesinnung auf soziale Werte statt.
Allenfalls sind Werte das, was uns am meisten motiviert – sie sind Leitmotive unserer Einstellung und unseres Handelns. Nur über die Wertsetzung können wir darauf Einfluss nehmen, wie wir in Zukunft leben wollen. Vertrauen, Verlässlichkeit, Freiheit, Sicherheit, Freunde und Zusammenhalt in den Familien und in der Gesellschaft, sowie die Natur bilden die wichtigsten persönlichen Werte.

In einem Symposium des Roman Herzog Instituts in München [RHI17] wurden einige Kernaussagen gefällt, wie z.B.

- Digitale Chancen: Viele Arbeitsplätze entstehen, indem neue Technologien entwickelt und neue Produkte hergestellt werden.
- Digitale Kontrolle: Die großen Internetfirmen sammeln ständig unsere Daten und wissen, wie wir uns verhalten.
- Digitale Verdummung: Die Menschen verlernen, was sie können, weil sie es nicht mehr müssen.

Der Schweizer Ökonom und Glücksforscher Bruno S. Frey wies in derselben Veranstaltung darauf hin, dass Vertrauen in der Arbeitswelt wichtig ist, sieht dieses durch die digitale Vermessung bedroht und fordert von den Chefs mehr Wertschätzung statt permanenter Kontrolle der Mitarbeiter.
Managementcoach Nicole Brandes warnte davor, dass Führungskräfte angesichts der Datenflut das Wesentliche aus den Augen verlieren: Je mehr die Digitalisierung den Arbeitsalltag prägt, desto mehr Einfühlungsvermögen ist nötig, damit der technische Fortschritt dem Menschen nützt.
Der Philosoph Andreas Urs Sommer plädierte für Wertevielfalt und für ein Führen mit Werten.

9.5.4 Sei ein wertvoller, kreativer Mensch

Gerade in Zeiten des ständigen Wandels oder von Krisen braucht es Menschen, die eine konstruktive Geisteshaltung besitzen. Von Albert Einstein stammt der Ausspruch:
Versuche nicht, ein erfolgreicher, sondern ein wertvoller Mensch zu sein.

Ein wertvoller Mensch (high valuable person, HVP) ist eine Person, die sich für Mitmenschen und gesellschaftliche Themen mit ihrer hohen emotionalen und analytischen Intelligenz einsetzt.
Nach F.H. Sauer [Sau18] kann der potenzielle Wert eines Menschen für die Gesellschaft mit dem Produkt aus ethischer Gesinnung, emotionaler und analytischer Intelligenz gemessen werden.

HVP-Wert = Ethisches Verhalten * Emotionale Intelligenz * Klassischer IQ

Eine ebenso wichtige Fähigkeit eines Menschen ist die Kreativität. Sie ist die Basis, um etwas zu erschaffen, neue Ideen zu generieren, Probleme zu lösen oder ergebnisorientiert zu denken und handeln. Vom Chemiker Louis Pasteur stammt das Zitat: *„Wandel entsteht aus dem Einwirken einer neuen Idee auf einen aufnahmebereiten Geist“*.

Abschließend noch ein weiterer Spruch von Albert Einstein:

Fantasie ist wichtiger als Wissen, denn Wissen ist begrenzt.

9.6 Literaturangaben zu Kapitel 9

Kap.9.1
[And17] F.M.Androsch, U.Redl: We aim to win – How innovation is managed at voestalpine, Springer BHM 162, H.9, 2017, 389-396
[And19] F.M.Androsch, U.Redl: How Megatrends drive innovation, Springer BHM 164, H.11, 2019, 479-483
[Aze18] R.Azevedo: World trade statistical review 2018, World Trade Organiszation WTO, 2018
[Bur18] M.Burke, J.Evans: Hot topics in material science, Elsevier Special Report, 2018 – a summary can be found in materialstoday 22, 2019, 1-2, https://doi.org/10.1016/j.mattod.2018.10.037
[Gro13] D.Gros, C.Alcidi: The global economy in 2030 – Trends and strategies for Europe. Centre for Europ. Policy Studies (CEPS), Brussels, 2013
[Hal18] M. Hallward-Driemeier, G.Nayyar: Trouble in the Making? The future of manufacturing-led development, World Bank Group Washington, 2018, DOI: 10.1596/978-1-4648-1174-6
[Hri19] B.Hribernik, B.Kriszt, M.Hörlesberger: Austrian Materials Foresight, Studie im Auftrag des BMVIT und FFG, ASMET Leoben, 2019
[Lar15] M.Larkin: Outlook on the Global Agenda 2015, World Economic Forum, Davos, 2015
[Lin17] B.Lindorfer: Technologie-Management – Lessons learned, Springer BHM 162, H.9, 2017, 400-410
[Man19] ManuFUTURE High-Level Group: ManuFUTURE – Strategic Research and Innovation Agende – SRIA 2030, Report Dec.2019
[Mes19] D.Messner et.al.: Unsere gemeinsame digitale Zukunft, WBGU – Wiss. Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin, 2019, ISBN 978-3-946830-20-7
[Mue19] A.Müller, L.Cretegny: Branchenszenarien 2014 bis 2030/2060, ECOPLAN Schlussbericht, April 2019, im Auftrag des Bundesamt für Energie, Schweiz. Eidgen., Bern, 2019
[Sch18] T.Schmidt et.al.: Die wirtschaftliche Entwicklung im Ausland: Weltkonjunktur trotzt den gestiegenen Risiken, RWI Konjunkturberichte, ISSN 1861-6305, RWI-Leibniz-Inst. f. Wirtschaftsforschung, Essen, VOl.69, Iss.3, 2018, 5-19
[Sto19] D.Storrie: The future of manufacturing in Europe, Publ. of the European Union, Luxembourg, 2019, doi:10.2806/44491
[Ven20] T.van de Ven, A.Soldera: Advanced Materials, De Gruyter, 2020
[WBG11] WBGU Welt im Wandel Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation,
[Zuk20] Zukunftsinstitut GmbH, Frankfurt https://www.zukunftsinstitut.de/dossier/megatrends/

Kap.9.2
[Buc18] B.Buchmayr, M.Degner, H.Palkowski: Future challenges in the steel industry and consequences for rolling plant technologies, Springer BHM 163, H.3, 2018, 76-83
[Buc19] B.Buchmayr: Manufacturing – ein Ausblick bis 2030, Vortrag 10 J.STT, Krieglach, 27.6.2019
[Cea18] D.Cearley, B.Burke: Top 10 Strategic technology trends for 2019, Gartner Inc.Report, Stamford, CT, USA, 15.10.2018
[Del16] Deloitte Center for Industry Insights: Global Manufacturing Competitiveness Index, London, 2016
[Del18] Deloitte Services: Radar 2018 – Attraktivität des Wirtschaftsstandortes Österreich, Fünfte Ausgabe, Wien 2018
[Del19] Deloitte Insights: TechTrends 2019, Beyond the digital frontier, 2019
[Eur19] Eurofer Economic Report: Economic and Steel Market Outlook 2019-2020, EUROFER Brussels, Dec.2019
[Fre19] P.Fretty: 2020: Future of Manufacturing Technology, Industry week Dec.03, 2019
[Fru] P.Früauf (ed.): Future Manufacturing – Automation, Qualitätssicherung, VDMA Elektr. Automation, LogiMAT Stuttgart, März 2018

[Gho19] E.J.Ghomi, A.M.Rahmani, N.N.Qader: Cloud manufacturing: challenges, recent advances, open research issues, and future trends, Int.J. of Adv. Manufacturing Technol. 102, 2019, 3613-3639
[Gif18] C.Giffi et.al.: Deloitte insights, Manufacturing Inst.: Skills gap and future of work study, Deloitte study, 2018
[Gun99] A.Gunasekaran: Agile manufacturing: A framework for research and development, Int. J. Production Economics 62, 1999, 87-105
[Man18] ManuFuture High-Level Group: ManuFuture Vison 2030, Report Dec.2018, ISBN: 978–989–95853–7–9
[Mat19] D.T.Matt, G.Orzes, G.Pedrini, M.Beltrami, E.Rauch: Roadmap in eine Digitale Welt – Roadmap für die Makroregion Tirol-Veneto, ZWF 114, 2019, (9), 576-579
[Sto19] D.Storrie: The future of manufacturing in Europe, Publications Off. of The European Union, Luxembourg, Eurofound, 2019
[Tai18] M.Taisch: 2018 World Manufacturing Forum Report, WMF, Sept.2018
[Qia17] F.Qian, W.Zhong, W.Du: Fundamental Theories and Key Technologies for Smart and optimal manufacturing in the process industry, Engineering 3, 2017, 154-160
[Wan18] B.Wang: Future of Manufacturing: A new perspective, Engineering 4, 2018, 722-728
[Wel18] P.Wellener, H.A.Manolian: A manufacturing perspective: TechTrends2018, Deloitte Insights, 2018
[Wis] S.Wischmann, E.A.Hartmann (Hrsg.): Zukunft der Arbeit – eine praxisnahe Betrachtung, Springer Vieweg, 2018
[WEF18] World Economic Forum: Readiness for the future of production, Report 2018 in Collaboration with A.T.Kearney, Genf, 2018
[WMF18] World Manufacturing Forum: The 2018 world manufacturing forum report – Recommendations for the future of manufacturing, 2018, ISBN: 978-88-943861-1-0
[WMF19] World Manufacturing Forum: The 2019 world manufacturing forum report – Skills for the future of manufacturing, 2019, ISBN: 978-88-94386-14-1

Kap.9.3

[Buc18] B.Buchmayr: The role of creativity and new enabling technologies for efficient manufacturing and automation, INDTECH Conf. Vienna, 2018
[Mue19] G.V.Münch, S.Robak, B.Denkena: Digital Lernen für die digitalisierte Produktion, ZWF 114, H.10, 2019, 639-642
[Per84] D.N.Perkins: Creativity by Design, Educational Leadership, Spt. 1984, 18-25
[Per14] D.N.Perkins: Future Wise: Educating our children for a changing world, Jossey-Bass; 1st Edition, 2014
[Sat14] E.Sattler: Vom Spielzeug zur Steuerung von Umformtechnologien – Walzdrücken im Kontext von Industrie 4.0, Springer BHM 159, H.7, 2014, 308-309
[Sta04] P.Stamer-Brandt: Kreativitätsspiele, Christophrus Freiberg, 2004

Kap.9.4

[Ban19] R.Bantes: Was bedeutet technologische Entwicklung für den Fachkräftemangel, Faunhofer INT, Euskirchen, Vortrag 2019
[Ost18] M.Ostermeier, C.Hesse, T.Mühlbradt, P.Kuhlang: Anforderungen an Digitalkompetenz in der industriellen Produktion, ZWF 113, H.10, 2018, 633-636
[Ter19] C.Terkowsky, S.Frye, D.May: Online engineering education for manufacturing technology: Is a remote experiment a suitable tool to teach competences for “Working 4.0”? Eur. J. Educ. 54, 2019, 577-590
[WBG19] WBGU (Wiss.Beirat der Bunderegierung Globale Umweltveränderungen): Unserre gemeinsame digitale Zukunft, Bericht 2019
[Wie] D.Weichert, B.Rauhut, R.Schmidt (eds.): Educating the Engineer for the 21st Century, Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow, 2004

Kap.9.5

[Ben17] O.Bendel: Die Industrie 4.0 aus Sicht der Ethik, Kap11. In Industrie 4.0, S.Reinheimer (Hrsg.), Springer Fachmedien Wiesbaden 2017, 161-171
[Mey20] E. Meyer-Galow: Business Ethik 3.0, Springer Gabler, 2020
[RHI17] Roman Herzog Institut (Hrsg.): Arbeit, Werte, Zukunft – In welcher Gesellschaft wollen wir leben? RHI-WissensWert, Nr.16, München, 2017
[Sau18] F.H.Sauer: Das große Buch der Werte – Enzyklopädie der Wertvorstellungen, Intuistik-Verlag, Hrsg. Da Vinci 3000 GmbH, Hürth, 2.Aufl. 2018
[Tür04] E.Türk: Wir in mir – Ethik als Verfahrensethik, Paperback, Books on Demand, US, 200 ISBN 978-3833410567

10 Ausgewählte Fallbeispiele

Die folgenden Fallbeispiele sollen das interaktive Vorgehen bei der Festlegung des Designs, der Werkstoffe und der Fertigungstechnologien in unterschiedlichen Branchen im Detail demonstrieren. Dabei wurde versucht, aus Gründen des leichteren Vergleichs und der Übersichtlichkeit, ein einheitliches Formular-Layout, siehe Excel-Sheet in Tabelle 65, zu verwenden. Die Beispiele wurden bewusst aus unterschiedlichen Branchen ausgewählt, damit auch die Anwendungsbreite illustriert werden kann. Die Gewichtung der Anforderungen für die Werkstoff- und Verfahrensauswahl sowie die Angaben zur Wirtschaftlichkeit beruhen auf Schätzungen. Es kann auch keine Gewähr für die Angaben übernommen werden. Die Tabellen sollen aber gute erste Näherungen sein, die von den Benutzern jederzeit verändert werden können.

Firma/Proj.:				Katalog: Bauteil - Werkstoff - Fertigungsverfahren			
Bauteil-Bez.	**Radschraube**					Dok.Nr.	**3207**
Produktgr.						Klassif.	
Doc.Owner:	B.Buchmayr Tel: DW 5600			Rev.datum	30.04.2020	Version 1.0	Seite 1/2
Bauteilbeschreibung:			Produktanforderungen: 1. 2. 3. 4. 5.		Foto		
Formtyp:			Durchmesser:				
Gewicht:			Wandstärke:				
Anforderungen an den **Werkstoff**			Gew.:1-10	Begründungen der Entscheidungen			
1.				gewählt:			
2.				weil:			
3.							
4.							
5.							
6.				WB-Parameter:			
7.				**Alternativwerkstoff:**			
Anbieter:				1.	wenn:		
				2.	wenn:		
Kriterien für die **Verfahrensauswahl**			Gew.:1-10	gewählt:			
1.				weil			
2.							
3.							
4.							
5.				Wichtige Prozessparameter:			
6.							
7.				**Alternativverfahren:**			
Prozessschritte:				1.	wenn:		
				2.	wenn:		
Maschinennutzung:				Normen:			
Wirtschaftliche Faktoren:			Euro/Stk	Kostentreiber:			
Stückzahl:		Mat.kosten		Kostensenkung:			
Taktzeit [s]		Masch.kosten		nächste Entwicklungen:			
Arbeitzeit/Stk		Pers.kosten					
Prod.rate:		Zusätzl.K.					
		QS-Kosten		Ökologische Bemerkungen / Nachhaltigkeit:			
		Zuschläge					
		Herstellkosten:					
USP:				Mitbewerber:			
Literatur:							
Experten:							
genehmigt:			Datum:		Beilagen: Seite 2		

Tabelle 65: Muster eines Excel-Sheet mit den wesentlichen Faktoren zur Auswahl geeigneter Werkstoffe und Fertigungstechnologien

Folgende Themenfelder und Anwendungsbeispiele wurden ausgewählt:

a. Verkehrstechnik

i. Kurbelwelle
ii. Nockenwelle
iii. Pleuel
iv. Gasgenerator für Airbag
v. Getriebehohlwelle
vi. Kugelzapfen
vii. Motorradrahmen
viii. Autofelge
ix. Pkw-Scheinwerfer (Reflektor)
x. Zylinderkurbelgehäuse (Motorblock)

b. Möbelbau

i. Tischfuß

10.1 Beispiele aus dem Bereich Verkehrstechnik

10.1.1 Kurbelwelle aus AFP-Stahl oder Kugelgrafit-GGG

Kurbelwellen:

- Massenbauteil, daher niedrige Kosten
- Primäre Anforderung: Hohe Schwingfestigkeit

1. Schieden
   Vergütungsstahl 42CrMo4 oder (besser) 42CrMoV6-4
   Vergüten: Härten + Anlassen auf höhere Temperatur (500-650°C)

   Problem Kostenfaktor:
   Warmbehandlung einsparen
   Spanabhebende Bearbeitung verbessern

   Lösung:
   Verwendung einers mikrolegierten schmiedeperlitischen Stahles, C 38 MnVS 5
   Gute mechanische Eigenschaften durch gesteuerte Abkühlung aus der Schiedehitze (→ schmiedeperlitisches Gefüge)

2. Gießen
   GGG-60 bzw. GGG-80 (Gusseisen mit Kugelgraphit, Sphäroguss)
   Erhöhung von Festigkeit und Zähigkeit durch Wärmebehandlung möglich durch isothermisches Umwandeln in der Bainitstufe (bainitisches GGG)

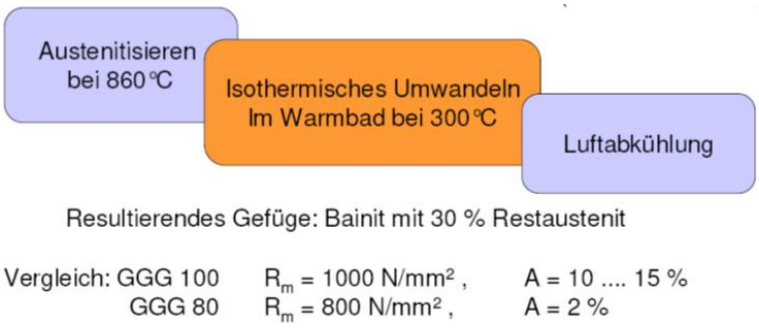


Abb. 231: Verbesserung der Materialeigenschaften von Gusseisen

3. Hochbeanspruchte Kurbelwellen – Optimierung des Randschichtzustandes

   Möglichkeiten:

   Randschichthärtung, heute meist induktiv:
   Härtungsgefüge und Druckeigenspannungen führen zur Erhöhung der Schwingfestigkeit der Kurbelwellen. Optimale Radienhärtung wichtig!
   Festwalzen, z.B. bei gegessenen Kurbelwellen:
   Verfestigung und Druckeigenspannungen führen zur Erhöhung der Schwingfestigkeit der Kurbelwellen.

10.1.2 Pleuelfertigung

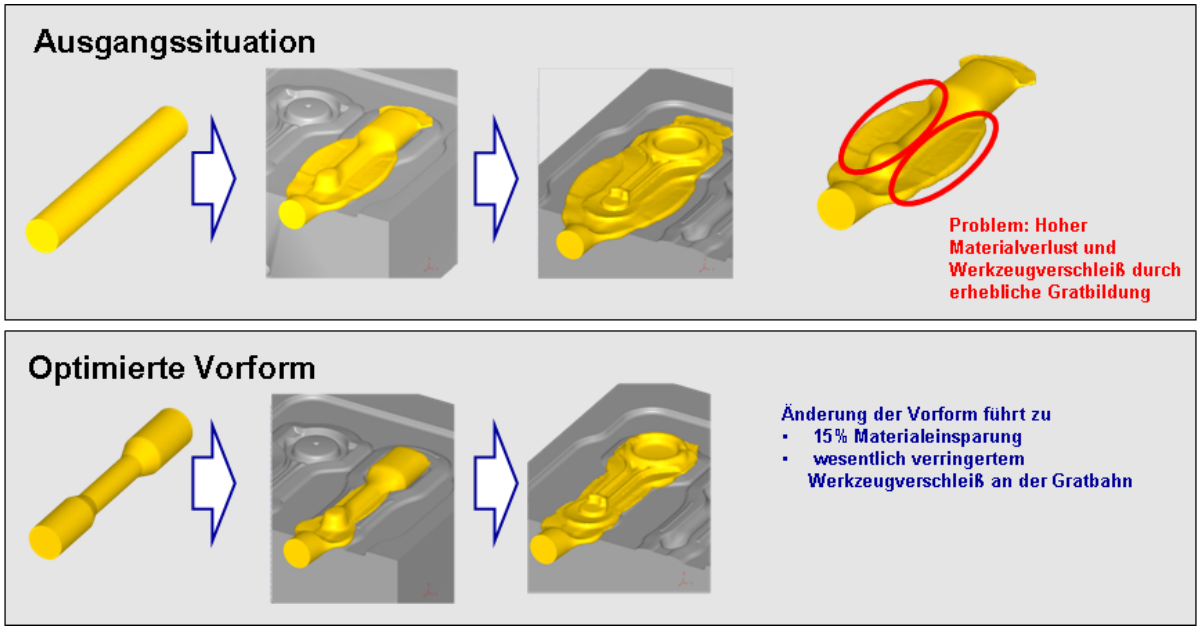


Tabelle 66: Material-Optimierung bei Pleuelfertigung

10.1.3 Nockenwellenfertigung

Nockenwellen steuern das Öffnen und Schließen der Ventile im Zylinder.
Man unterscheidet:

- geschmiedete,
- gegossene,
- gebaute und
- IHU-geformte Nockenwellen.

Welches Fertigungsverfahren unter welchen Umständen?
(spez. Eignung, Kostenvorteile etc.)

1. Gegossene Nockenwellen sind am billigsten, eignen sich aber nur für weniger belastete Motoren.
   (Hersteller: Federal Mogul, Mahle)
2. Geschmiedete Nockenwellen werden dann eingesetzt, wenn die mechanische Belastung des Bauteils die Möglichkeiten der gegossenen Nockenwellen überschreitet, d.h. bei großen Dieselmotoren mit hohen Drehmomenten (bspw. bei LKW-Motoren).
   (Marktführer: Mahle Brockhaus, Pettenberg)
3. Gebaute Nockenwellen werden aus Gewichts- und Verschleißgründen den gegossenen Nockenwellen vorgezogen. Sie sind aber ca. 15% teurer.
   (Marktführer: ThyssenKrupp-Presta, FL)
4. IHU-geformte Nockenwellen für Rennsport (Leichtbau)
   (Anbieter: Magna IHU, Bopfingen)

Abb. 232: Nockenwelle - Fertigung durch IHU

Gegossene Nockenwellen
Zur Produktion wird in erster Linie der Schalenhartguss eingesetzt. Für hohe Anforderungen im Rollkontakt können auch Gussnockenwellen mit induktiv gehärteten Nocken verwendet werden. Um das Gewicht zu reduzieren, können die Wellen zylindrisch oder profiliert hohl gegossen werden. Die Gussproduktion findet auf hochmodernen und vollautomatischen Produktionsanlagen statt. Eine breite Palette von Standardwerkstoffen, aber auch Spezial-werkstoffe für spezifische Kundenanforderungen stehen zur Verfügung. Moderne Bearbeitungs-zentren und vollautomatisch arbeitende CBN-Schleifmaschinen garantieren eine konstant hohe Qualität.

10.1.4 Stahlnockenwellen aus Vollmaterial

Für bestimmte hoch belastete Dieselmotoren werden auch geschmiedete oder aus dem Vollen gearbeitete Nockenwellen eingesetzt. Diese werden auf rechnergesteuerten Schmiedeanlagen mit integrierter Wärmebehandlung gefertigt oder durch Zerspanung aus Vollmaterial hergestellt.

Gebaute Nockenwelle:
Zur Optimierung des gesamten Ventiltriebs werden gebaute Nockenwellen auf Basis von Präzisionsstahlrohren mit Nocken aus Stahl und Sinterwerkstoffen gebaut. Antriebs- und Abtriebselemente werden designorientiert mit verschiedenen Fertigungsverfahren und Werkstoffen ausgeführt.

Die Hauptmerkmale dieser Nockenwellen sind:
- Präzisionsstahlrohre mit hoher Torsions- und Biegesteifigkeit
- Wahlweiser Einsatz von Sinter- und Stahlnocken
- Hohe Winkelgenauigkeit beim Fügen
- Große Konstruktionsfreiheit hinsichtlich Nockenwellenrohr, Nockenwelllagerung, Anbauteile, Werkstoffe und Integration in die Motorschmierung
- Hohe Fügepräzision ohne Einfluss auf die Nockenform
- Gewichtsreduktion bis zu 45 Prozent im Vergleich zu Vollschaft-Nockenwellen

IHU-gefertigte Nockenwellen:

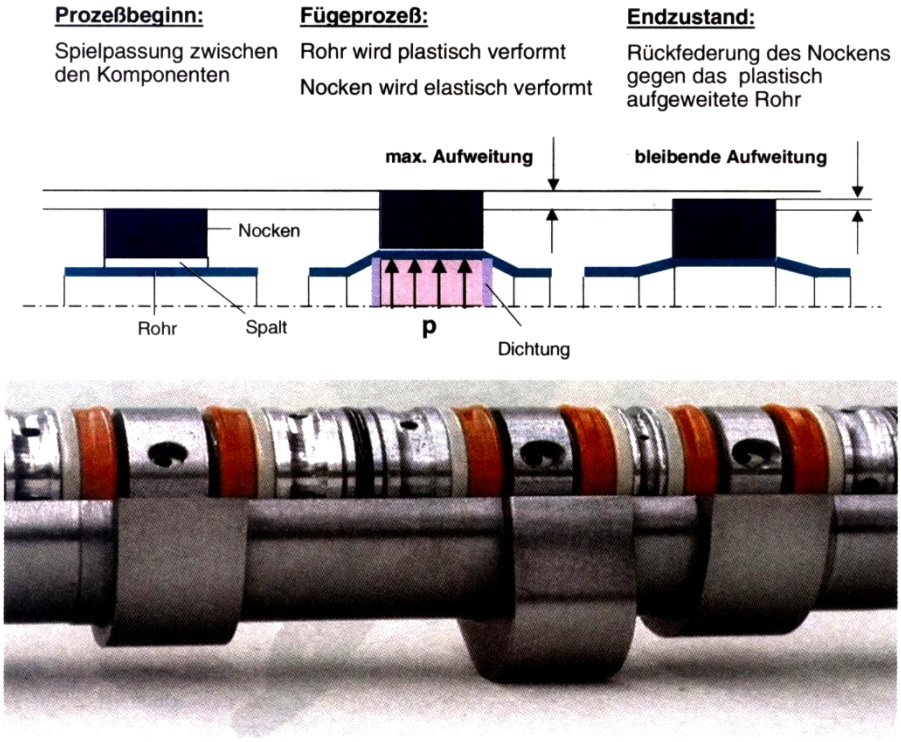


Abb. 233: Fertigungsprozess IHU-gefertigter Nockenwellen

10.1.5 Hohlwelle für Verteilergetriebe

Dynamisch hochbeanspruchte Bauteile, wie die Komponenten des Antriebsstrangs im Fahrzeugbau sind meist nur durch spezielle Umformverfahren herstellbar. Erhöhte Belastbarkeit (Betriebsfestigkeit) kann nur durch Ausnutzung von Verfestigung, günstigen Faserverlauf und Einbringen von Druckeigenspannungen möglich. Prinzipiell sind Fließpressen und Rundschmieden sehr gute Fertigungsverfahren, die für diese Anwendung in Frage kommen, siehe Tabelle 67. Höchsten Nutzwert dürfte das Rundschmieden bzw. Rundkneten haben.

	Rundkneten	**Rundschmieden**	**Innenhochdruck umformen**	**Fließpressen und Reibschweißen**	**Fließpressen und Tieflochbohren**
Ausgangs-geometrie	Rohr	Rohr	Rohr	Stange	Stange
Umform-temperatur	überwiegend kalt	überwiegend warm	kalt	kalt	kalt
Schmiermittel	nein	partiell	partiell	ja	ja
Umformstufen	mehrere Stufen	mehrere Stufen	eine Stufe	mehrere Stufen	mehrere Stufen
Bearbeitung-aufmaß	gering	groß	mittel	gering	gering
Fertigungs-toleranzen	gering	groß	mittel	gering	gering
Oberflächengüte	sehr gut	mäßig	gut	sehr gut	sehr gut
Verfahrens-einschränkung	Flansch-durchmesser	d/s-Verhältnis	d/s-Verhältnis	min. Bohrungs-durchmesser	-
Mindeststückzahl	klein	klein	groß	mittel	mittel
Taktzeit	mittel	mittel	lang	kurz	kurz

Tabelle 67: Vergleich der Fertigungsmethoden zur Herstellung von Getriebe-Hohlwellen durch Massivumformung

10.2 Weitere Bauteile im Automobilbau

10.2.1 Airbag-Fertigung

Der Gasgenerator enthält einen Feststofftreibsatz auf Basis von Natriumacid in Tablettenform. Der Sensor im Steuergerät aktiviert den elektrischen Brückenzünder und die Zündpille leitet die Verbrennung des Treibstoffes ein. Die Erwärmung des Drahtes im Brückenzünder erfolgt durch den im Zündkondensator gespeicherten Zündstrom. Diese Wärme reicht aus um die ca. 8 g Schwarzpulver, die in der Zündpille sind, zu zünden. Es findet keine Explosion, sondern ein definierter Abbrand des Festtreibstoffes statt. Dabei entsteht das für die Insassen ungefährliche Airbag-Füllgas Stickstoff, das durch das Metallfilter gereinigt und von 300°C abgekühlt wird. Beim Eintritt in den Luftsack hat das Gas noch eine Temperatur von ca. 60°C. Der beim Aufblasen entstehende Knall (ca 160dBA) dauert nur 3 ms und führt daher zu keiner Gehörschädigung.

a) Blechteil
b) Fließpressteil
c) Flow-Forming

Gasgenerator-Hersteller

Inzwischen versuchen sich viele Firmen in der Herstellung von Gasgeneratoren und Airbag-Systemen, deren Anzahl allerdings mehr oder minder konstant bleibt. Die einen gehen in Konkurs, die anderen werden von größeren Mitbewerbern aufgekauft und andere versuchen, neu in diesem engen Markt Fuß zu fassen. Neben TRW (USA/D) sind hier noch Autoliv, Takata-Petri, Daicel (JP), Delphi (USA) und Nippon Kajaku (JP) als die größten Hersteller zu nennen.

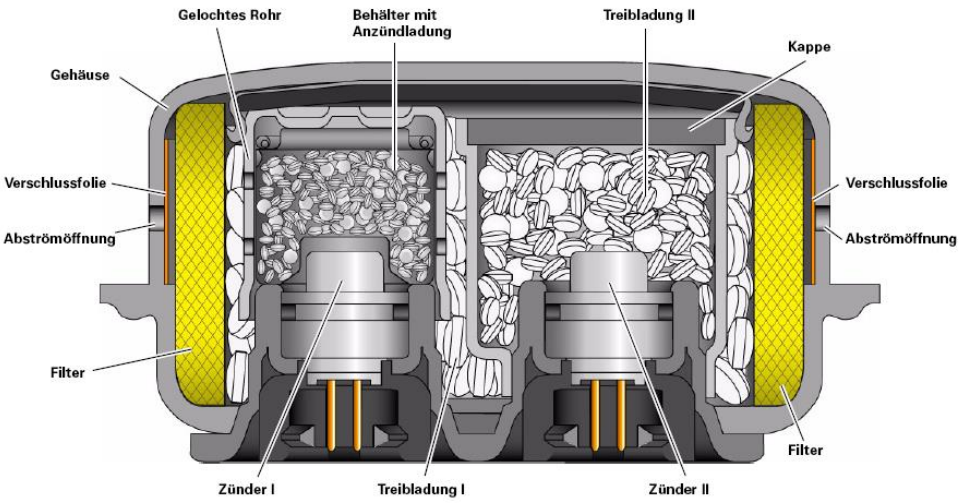


Abb. 234: Zweistufiger Fahrer-Airbag

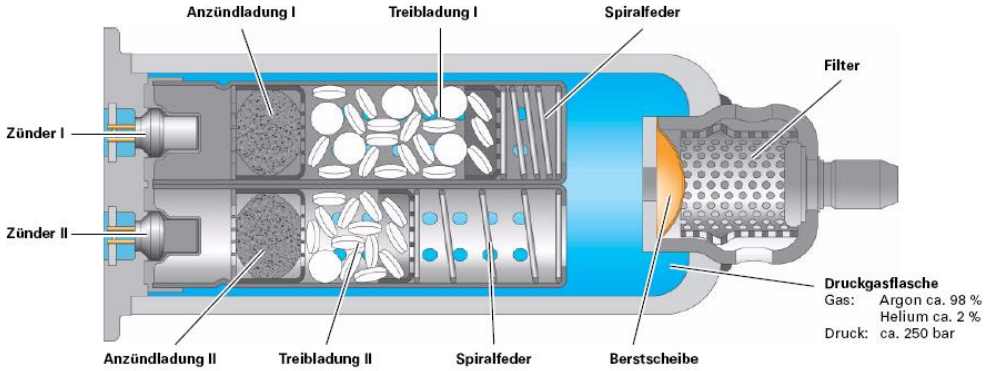


Abb. 235: Beifahrer Airbag

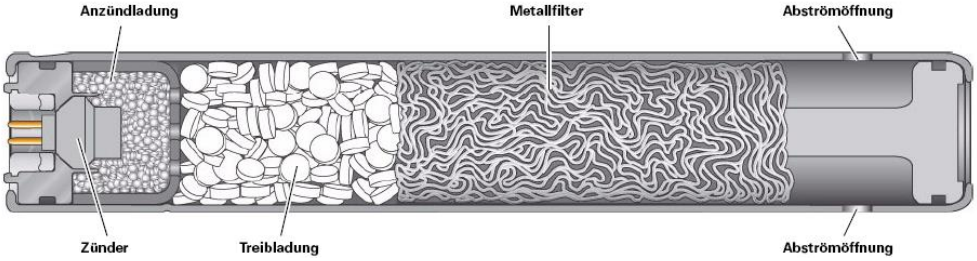


Abb. 236: Seitenairbag

Abb. 237: Tiefgezogene Airbagteile

Abb. 238: Fließgepresstes Airbagteil (re) mit Werkzeug (li)

Flowforming

Das Fließrollverfahren ist dem Drücken/Drückwalzen sehr ähnlich.
Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass das Werkzeug keine Rolle ist, die eine bestimmte Form abfährt, sondern ein topfförmiges Werkzeug, in das der gesamte Formverlauf eingearbeitet ist. Die Bauteile müssen rotationssymmetrisch sein.

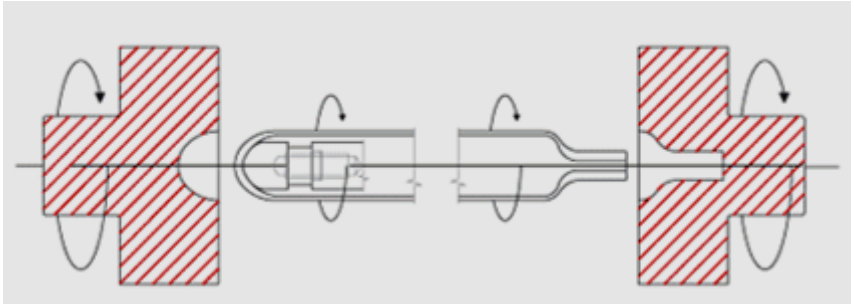


Abb. 239: Skizze des Flowforming-Prozesses

Abb. 240: Warmgeformte, symmetrische Bauteile

10.2.2 PKW-Kugelzapfen aus mikrolegiertem Stahl

Kugelzapfen kommen im Fahrwerk, in Querlenkern, Spurstangen und Radgelenken zum Einsatz. Eine Schnittdarstellung eines Traggelenkes zeigt Abb. 241. Üblicherweise wird für dieses Teil ein Vergütungsstahl (bspw. 41Cr4) verwendet, der für die Kaltumformung meist GKZ-geglüht wird. Nach dem Glühen wird der Walzdraht gebeizt, phosphatiert und einem Kalibrationszug unterworfen. Die Kaltumformung zum Kugelzapfen wird meist bei einer Zulieferfirma durchgeführt. Durch eine V-Mikrolegierung und thermomechanische Walzung können die Prozessschritte Weichglühen und Vergüten eingespart werden. Insgesamt konnte in [Kruse04] gezeigt werden, dass das mechanische Verhalten (Dauerfestigkeit, Zähigkeit) des ausscheidungsgehärteten ferritisch-perlitischen (AFP) Stahles 35V1 nahezu den Werten des Vergütungsstahles entspricht. Eine Kosteneinsparung durch Wegfall der Wärmebehandlungen kann mit ca. 10% abgeschätzt werden.

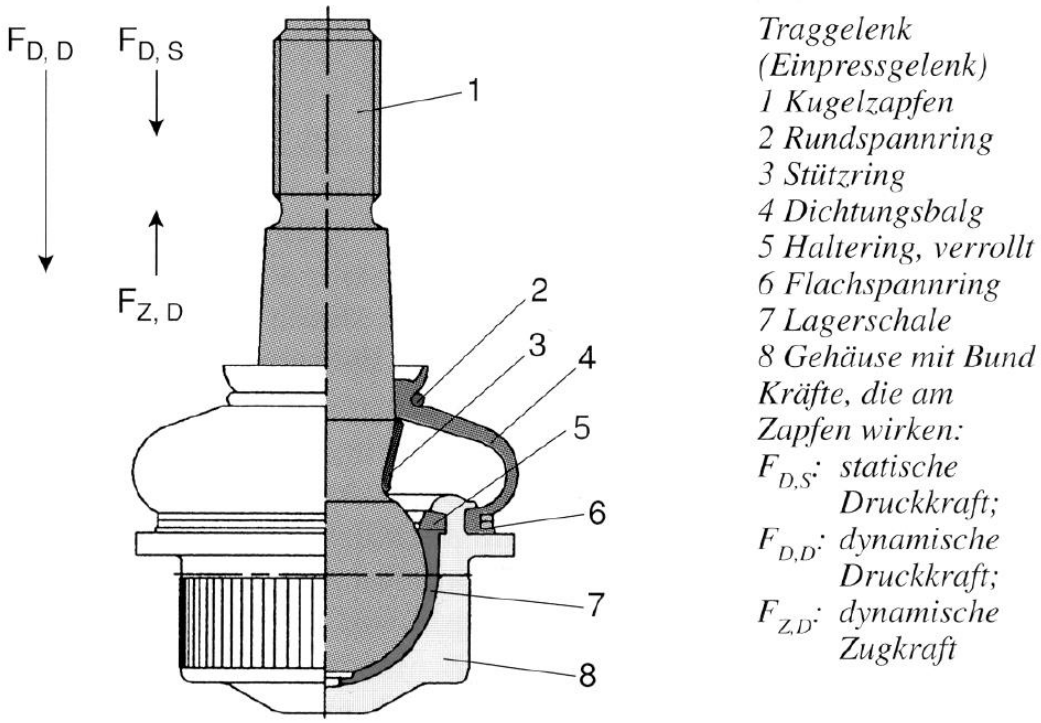


Abb. 241: Kugelgelenk (Traggelenk) in Seitenansicht und Halbschnitt nach [Fecht97]

Abb. 242: Umformschritte eines Kugelzapfen

N.Fecht (Hrsg.): Komponenten für Fahrwerk und Lenkung, Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 1997

J.Kruse, U.Urlau: Mikrolegierte Stähle für PKW-Kugelzapfen, Sächsische Umformtage, Freiberg, 6.-8.10.2004, 259-275

10.2.3 Rahmenfertigung für ein Motorrad

- Aufgabe: Verwindungssteife Verbindung zwischen gelenktem Vorderrad und Hinterradaufhängung

- Anforderungen
  - Hohe Steifigkeit (E-Modul, Konstruktion)
  - Geringes Gewicht
  - Aufnahme des Antriebes
  - Günstige Position des Fahrers
  - Zugänglichkeit zu den Aggregaten
  - Gutmütigkeit bei Überlastung (Bruchdehnung)
  - Geringe Herstellkosten
  - Reparaturmöglichkeiten (Aluminium-, Stahlrahmen)
  - Ansprechendes Design

- Frage: Rahmen aus Aluminium oder Stahl?

Kombination von kostengünstigen Profilen aus Aluminium und Stahl (Umformen) und Aluminiumgussbauteilen.

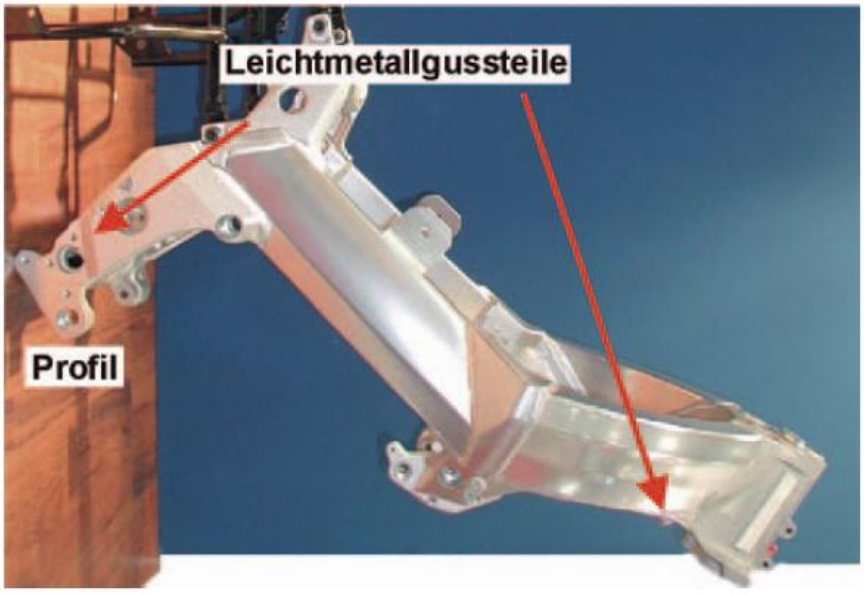


Abb. 243: Al-Rahmen in Profilbauweise (Honda)

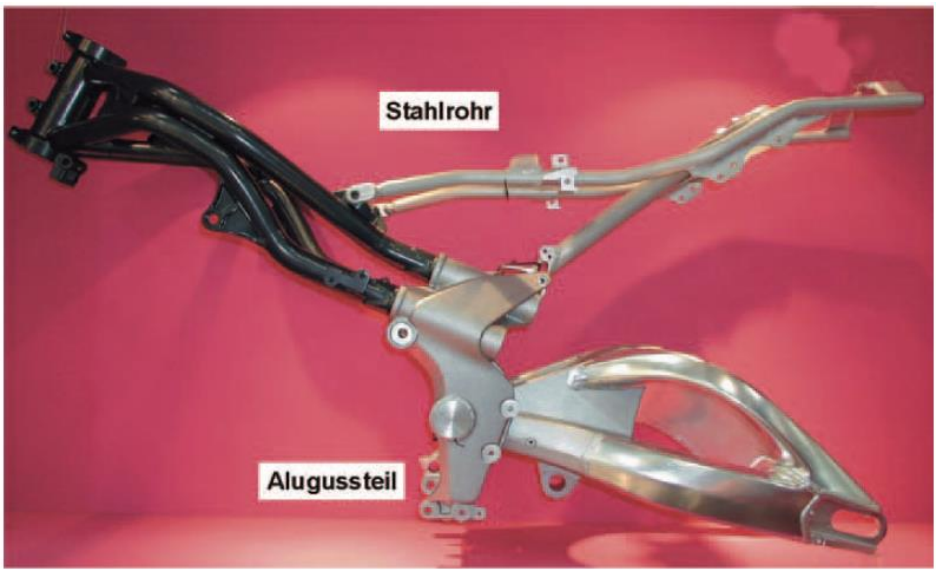


Abb. 244: Verbundrahmen (Benelli)

Abb. 245: Leichtmetallgussrahmen (Yahama)

10.2.4 Hinterradschwinge eines Motorrades

- Früher Schweißkonstruktion

- Ersetzt durch Gussbauteil
  - Aluminiumkokillenguss
  - Formschönes Design
  - Gleichmäßige Oberfläche
  - Bessere Materialeigenschaften (Homogenität)
  - Integralbauweise (mehrere Funktionen)
  - weniger Arbeitsgänge (Gießen, Spanen)

Abb. 246: Hinterradschwinge, Bildquelle: Georg Fischer

Weiterführende Literatur:

Stoffregen, J.: *„Motorradtechnik – Grundlagen und Konzepte von Motor, Antrieb und Fahrwerk“*, ATZ/MTZ-Fachbuch, 6. Aufl. Vieweg & Sohn Verlag; 2006
Herfurth K., Ketscher N., Köhler M.: *„Giessereitechnik kompakt – Werkstoffe, Verfahren, Anwendungen“*, Veränderter Nachdruck, Giesserei-Verlag GmbH, 2005
Roller, R et.al.: *„Fachkunde für gießertechnische Berufe – Technologie des Formens und Gießens“*, 5. Aufl., Verlag Europa-Lehrmittel, 2007
Degischer H. P., Lüftl S.*: „Leichtbau – Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten“*, Wiley-Vch Verlag, 2009
Fritz A. H., Schluze G.: „Fertigungstechnik“, 8.Aufl., Springer Verlag, 2008
N.N.: „Feinguss ermöglicht innovative Leichtbaukonstruktion in Stahl“, Konstruieren und Gießen 29, H.4, S.32, 2004
Sonderheft Konstruieren und Gießen: „Feingießen – Herstellung, Eigenschaften, Anwendung“, Konstruieren und Gießen 33, H.1, 2008
www.georgfischer.com
www.sorelmetal.com
www.feinguss-blank.de
www.motorradonline.de
http://de.wikipedia.org/wiki/Motorrad

10.3 Möbelfertigung / Tischfuß

In der Möbelindustrie überwiegt die Kundenanforderung Design und Haptik. Abb. 247 zeigt eine Entwicklungsstudie, wobei hier nur ein Variantenvergleich für den optisch hochwertigen Schrägfuß betrachtet wird.
Ausgehend von Herstellzielkosten in Höhe von etwa 50 Euro sollen die Anforderungen Festigkeit, Zähigkeit, Schweißeignung, Pulverbeschichtbarkeit und Verchrombarkeit erfüllt werden. Es wurden die in Tabelle 68 gezeigten Fertigungsvarianten näher betrachtet.

	Alu-Druckguss	Profil mehrteilig	Hydroforming
Design	++	++	+
Vorteile	Fuß besteht nur aus einem Teil Freie Gestaltungsmöglichkeit Schöne Übergänge Keine Farbunterschiede Chromoberfläche möglich	Profillängen bedingt variabel Chromoberfläche im Rohrbereich realisierbar	Keine Spaltbildung zwischen Fuß und Stellteller bzw. Rollen Schöne Übergänge Keine Farbunterschiede
Nachteile	Rel. Hohe Werkzeugkosten Keine Flexibilität (Tischhöhe)	Komplexe Rollenaufnahme Gefahr von Spaltbildungen und Farbunterschieden Min. 3 teure Werkzeuge erforderlich	Rel. Hohe Werkzeugkosten Geringe Flexibilität Nur wenige IHU-Anbieter
Var. Herstellkosten	ca. 50 Euro	Ca. 48 Euro	ca. 85 Euro

Tabelle 68: Fertigungsvarianten eines Tischfußes

Abb. 247: Projektstudie Schrägfuß eines hochwertigen Tisches

Bewertung - Schrägfuß Fertigungsverfahren (bewertet wurde nach dem Schulnotensystem)

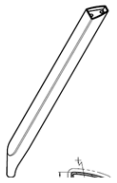
Fertigungsverfahren / Kriterien	Kriterienstärke															
1. Kosten																
1.a. var. Herstellkosten	15%	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1.b. Werkzeugkosten	10%	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Versorgungssicherheit																
2.a. Lieferantenunabhängigkeit	5%	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
3. Logistik																
3.a. Lieferzeit bis Serienanlauf	5%	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
3.b. Lieferzeit in Arbeitstagen nach Serienanlauf	5%	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
3.c. Mindestbestellmengen, Gebindelosgrößen	5%	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Gesamtnote Einkauf	45%	2,30					2,10					3,30				
4. Funktion																
4.a. Design Gestaltung, Formgebung)	15%	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
4.b. Design (Farbgleichheit, Übergänge)	15%	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
4.c. Stabilität (Dauerfestigkeit)	20%	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
4.d. techn. Risiko	5%	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
6. Allgemeine techn. Anforderungen																
6.a. GS Zertifikate	0%	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Gesamtnote Technik	55%	1,10					5,00					2,70				
Gesamtnote mit prozentualer Aufteilung	100%	1,70					3,55					3,00				

Abb. 248: Bewertung der Varianten Druckguss, Walzprofil und IHU

Weiterführende Literatur:

H.Pichler: Schrägfuß – Auswahl Material und Fertigungsverfahren, Projektarbeit im Rahmen des Unilehrgangs Produktentwicklung der Montanuniversität Leoben, 6.4.2009

11 Die Erfindung der Glühlampe und die Auswahl der Werkstoffe

Das elektrische Licht schloss eine Beleuchtungsrevolution ab, die mit dem Gaslicht begonnen hat und bis zur heutigen Zeit andauert. Der genaue Zeitpunkt, an dem das elektrische Licht erfunden wurde, ist stark umstritten. Schon die ersten elektrischen Versuche haben gezeigt, dass ein genügend starker Strom einen Draht bis zur Rotglut erhitzen kann. Auf diesem Prinzip beruht die Glühfadenlampe. Bereits 1835 behauptete der schottische Lehrer James Bowman Lindsay, dass er durch eine elektrische Lampe Licht erzeugt hätte. In einem Patent für eine Glühlampe, welches der Amerikaner J.W. Starr 1845 einrichtete, wird die Verwendung von Kohlefäden in einem Glaskolben beschrieben, aus dem die Luft herausgepumpt wurde. Der Engländer Joseph Swan ergriff diese Gedanken und stellte einige kurzlebige Lampen her, deren Glühfäden aus einem mit Kohlenstoff beschichteten Papier bestanden. Die erste brauchbare Glühbirne stellte der deutsche Mechaniker Heinrich Goebel her und beleuchtete 1854 seine Werkstatt. Als Leuchtkörper diente dabei eine verkohlte Bambusfaser in einer luftleeren Glasglocke. Aufgrund der unzuverlässigen Stromquellen konnte sich diese Erfindung jedoch nicht durchsetzen.
Als Erfinder der Kohlefadenlampe und damit der ersten wettbewerbsfähigen Elektrobeleuchtung gilt Thomas Alva Edison, obwohl der Brite Joseph Wilson Swan bereits ein Jahr vor Edison eine Kohlefadenlampe (Abb. 1) zum Patent angemeldet hat. Da seine Lösung jedoch ein niederohmiger Kohlefaden war, wird die bahnbrechende Erfindung Thomas Alva Edison zugeschrieben. Edison verwendete für seine Glühbirne Nähgarn, das er durch Erhitzen in Kohlenstoff umwandelte. Probleme bei der Stabilität des Stromversorgungsnetzes konnten durch die hochohmigen Glühlampen aus Nähgarn leichter gelöst werden und Helligkeitsveränderung brennender Glühlampen und Flackern gehörte der Vergangenheit an. Trotz zahlreicher Patentstreite um die Erfindung des elektrischen Lichtes gründeten Edison und Swan die Edison & Swan Light Company und die deutsche Edison Gesellschaft, später AEG.

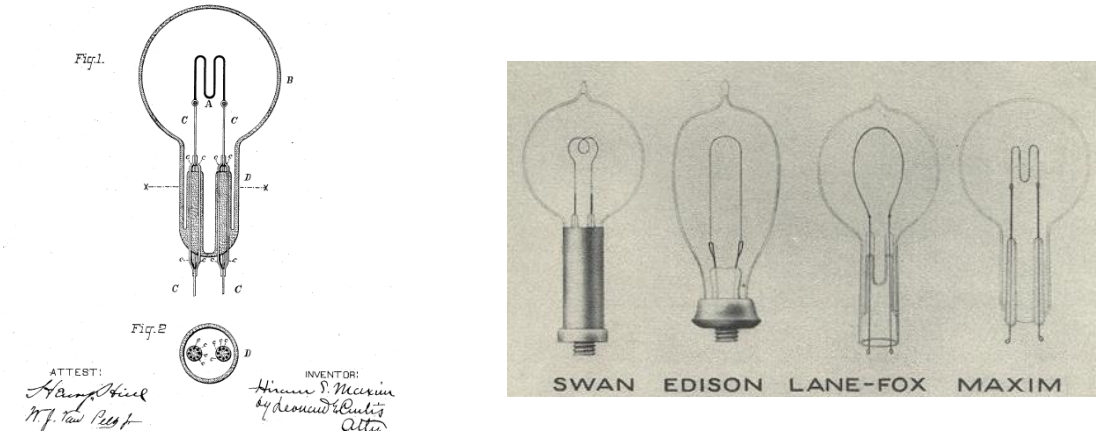


Abb. 249: Frühe Modelle einer Kohlefadenlampe (1881) [2]

1902 wurden vom Österreicher Carl Auer von Welsbach (Gründer OSRAM) Kohlefäden aus dem Metall Osmium eingeführt. Als ideales Material für Glühfäden erwies sich aber Wolfram, das einen wesentlich höheren Schmelzpunkt besitzt. Die Schwierigkeit aus dem harten brüchigen Wolfram einen feinen Draht herzustellen, wurde erst 1908 überwunden. Aus dem pulverförmigen Wolfram wurden dabei Stäbe gepresst, anschließend geschmiedet und daraus feine Drähte gezogen.

Im Jahr 1910 wurde vom französischen Chemiker eine wesentlich wirkungsvollere Art der elektrischen Lichterzeugung vorgestellt. Dabei fließt Strom durch eine Röhre die mit einem Edelgas (Neon) gefüllt war. Bei der elektrischen Endladung begann das Gas hellrot zu leuchten und durch den Wegfall der

Glühfäden konnte eine beliebige Form der Neonröhre gebildet werden. 1939 wurde erstmals die Fluoreszenzlichtröhre auf der New Yorker Weltausstellung präsentiert. Wenn man die Innenwände einer Quecksilberdampflampe mit Phosphor bestreicht, beginnt dieser unter dem Einfluss des unsichtbaren ultravioletten Lichtes selbst zu leuchten. Er strahlt im Sichtbaren Bereich ein Licht aus, dessen Licht von der Art des Phosphors abhängt. Die Lichtausbeute ist dabei rund viermal höher als bei der Glühlampe.

In den weiteren Jahren des vorigen Jahrhunderts wurde die Glühlampe stetig weiterentwickelt. 1925 bringt OSRAM in Zusammenarbeit mit BOSCH die erste Bilux-Lampe als Autoscheinwerferanlage für ein 12 Volt Netz auf den Markt. Erst 1971 wurde diese Lampe von der „H4-Halogenlampe“ abgelöst und damit eine wesentliche Steigerung in der Lichtausbeute erzielt.

Die Meilensteine in der Entwicklung von Glühlampen wurden 2001 bei der steirischen Landesausstellung „Die Geschichte der elektrischen Beleuchtung von 1880 bis 2001“ in Weiz ausgestellt. Aus [1] kann die Geschichte der elektrischen Beleuchtung als Beitrag zur Landesausstellung detailliert entnommen werden.

11.1 Technische Hindernisse bei der Erfindung der Kohlefadenlampe

Zur Zeit der Erfindung der Glühlampe waren für die Fertigung einer Kohlefadenlampe rund 200 Einzelschritte notwendig. Obwohl Metalle mit sehr hohen Schmelzpunkten bekannt waren, machen es die damaligen Kenntnisse in der Metallurgie nicht möglich diese Materialien zu bearbeiten und für die Serienfertigung einzusetzen. Glühfäden wurden daher aus elektrisch leitfähigen Kohlenstoffen mit hohen Schmelzpunkten hergestellt. Daraus entstanden jedoch Nachteile im Produktentwicklungsprozess, die erst durch zahlreiche technische Einzellösungen ausgeglichen werden konnten (Tabelle 69).

Erst als die Wolfram- Doppelwendellampe eingeführt wurde und es gelang die Birnen mit einem Argon Stickstoffgemisch zu füllen und dicht zu verschließen, stand dem endgültigen Einsatz der Glühlampe nichts mehr im Weg. Die Lichtausbeute und die Lebensdauer konnten dabei so gesteigert werden, dass erstmals eine wirtschaftliche Ausnutzung der Glühlampe möglich war.

Problemstellung	Lösung
Bei hohen Temperaturen verdampft die Atome des Kohlefadens und schlagen sich an der kälteren Innenwand des Glaskolbens nieder. Die Lichtausbeute und die Nutzungsdauer werden dadurch herabgesetzt.	Tantal-, Osmium- oder Wolframdraht
Der negative Temperaturkoeffizient von Kohle führt zu einer Verminderung des Widerstandes bei hohen Temperaturen. Kohlefadenlampen müssen daher einen sehr hohen Widerstand bei Raumtemperatur haben, damit ein Schmelzen bei 2000° C verhindert wird.	Tantal-, Osmium- oder Wolframdraht
Schwierige Herstellung von Fäden aus organischen Materialien	Metallische Werkstoffe
Schlechte Mechanische Eigenschaften (Erschütterung, Vibrationen) bei Kohlefäden begrenzen die Anwendbarkeit.	Nichtleitende Stützstellen
Bei der Einleitung des Metalldrahtes in den Glaskolben kommt es durch unterschiedliche Temperaturausdehnungskoeffizienten zu Undichtheiten. Haltbarkeit der Lampe wird durch Vakuumverlust reduziert.	Quetsch-Einschmelzsystem, Teller-Einschmelz-Verfahren
Notwendige Verbindung zwischen Metalldraht und Kohlefaden musste sehr aufwendig mechanisch verbunden werden.	Lötprozess
Wärmebrücke zwischen Metalldraht (niedriger Schmelzpunkt) und Kohlefaden	Isolation
Homogene Struktur der Faser aus pflanzlichen Werkstoffen zur Herstellung von Kohlefäden (japanischer Bambus) bedingt sehr hohe Werkstoffkosten.	Metallische Werkstoffe
Eingeschlossene Gase im Kohlefaden bedingen sehr komplexe Verfahren zur Erhitzung und Abkühlung während des Entlüftungsvorganges.	Prozesssicherheit durch neuartige Werkstoffe

Tabelle 69: Technische Problemstellungen bei Kohlefadenlampen

11.2 Werkstoffe moderner Glühlampen

Obwohl sich am grundsätzlichen Aufbau von Glühlampen im Laufe der Zeit nur sehr wenig geändert hat, stehen heute neuartige Fertigungsmethoden und moderne Werkstoffe zur Verfügung, um den ökologischen Anforderungen hinsichtlich des Umweltschutzes und der Energieeinsparung Sorge zu tragen. Anhand eines einfachen Beispiels möchte ich nachfolgend die Verwendung moderner Werkstoffe im Produktionsprozess der Glühlampe beschreiben:

Mikro-Glühlampen stellen ein wichtiges Bauelement für nahezu alle Bereiche der modernen Elektrotechnik und Elektronik dar. Die Einsatzmöglichkeiten sind derartig vielseitig und fast unbegrenzt. Aufgrund der Baugröße und der Produktanforderungen stellt diese Art der Lampenherstellung die Industrie vor neuen Aufgaben und stetig wachsenden Anforderungen im

Hinblick auf die Materialien und die damit verbundenen Fertigungsabläufe. In Abb. 250 ist der Aufbau einer Mikroglühlampe dargestellt.

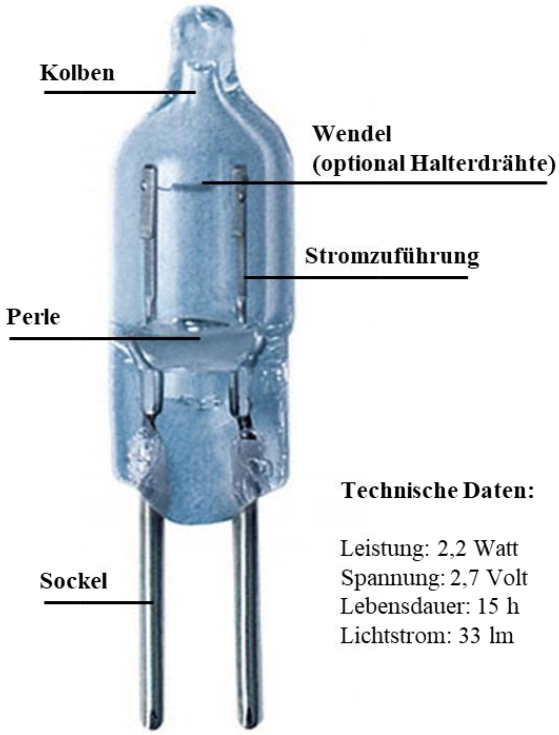


Abb. 250: Hauptbestandteile einer Mikroglühlampe (Xenon Miniwatt Osram)

Die für die Herstellung der Mikroglühlampe verwendeten Werkstoffe werden in den nachfolgenden Kapiteln ausführlich beschrieben.

11.2.1 Metallgewinnung und Glühfadenproduktion

In den meisten konventionellen Lichtquellen wird heute ein Wolframdraht als Temperaturstrahler eingesetzt. Wolframerze sind bergtechnisch gewonnene Erze, gewöhnlich Wolframit oder Schneelit. Wolframit ist ein Mischkristall aus Ferberit ($FeWO_4$) und Hüberit ($MnWO_4$). Schneelit, auch Tungstein oder Schneelspat genannt, besteht aus $CaWO_4$. Wolframit wird überwiegend in China abgebaut. Das gewonnene Erz wird zu Tage gefördert, zerkleinert und in einem Flotationsprozess vom tauben Gestein getrennt. Der Wolframgehalt reichert sich somit erheblich an. Anschließend wird das gewonnene Erz bei 800° C im Flammofen unter Beigabe von Soda aufgeschlossen. Das dabei entstehende Natriumwolframat (Na_2WO_4) wird mit Wasser herausgelöst und unter Salzsäure in Wolframsäure (H_2WO_4) ungewandelt. Diese fällt aus und wird nach Filtration durch Erhitzen in Wolframoxid (WO_3) und Wasser aufgespalten. Dieses Wolframoxid wird in Nickelschiffchen mit Wasserstoff oder Kohle bei 1200°C zu Wolframmetall reduziert (Wolframgewinnung und Produktion siehe [3]).

Das reine Wolframpulver von geeigneter Körnung wird mittels einer hydraulischen Presse in Stahlformen zu Stäben gepresst. Diese gepressten Stäbe werden in einem Ofen so weit erhitzt, dass die Metallkörner aneinander sintern und somit eine höhere Festigkeit erlangen. Danach wird unter

Gasatmosphäre der Wolframverbund auf Weißglut (nahe dem Schmelzpunkt) erhitzt, indem man durch ihn einen elektrischen Strom leitet.
Der daraus gewonnene metallisch aussehende Stab wird im hoch erhitzten Zustand einem Hämmer-Prozess unterworfen, wodurch man aus dem spröden Material einen bei Raumtemperatur biegsamen und ziehbaren Draht mit reiner Faserstruktur erhält [6]. Der Vorgang des Hämmerns wird so lange wiederholt, bis ein Metalldraht mit 1mm Durchmesser entsteht. Anschließend beginnt die Weiterverarbeitung des Grobzugdrahtes auf den Ziehbänken, wobei als Ergebnis ein Durchmesser des Feindrahtes von 0,01 mm entsteht. Die thermische und mechanische Bearbeitung bei diesen Prozessen muss mit größter Sorgfalt durchgeführt werden.
Wegen der großen Härte des Wolframs werden für die Ziehvorrichtungen im allgemeinen Diamanten, zum Teil auch Ersatzstoffe (Rubine), verwendet. Damit der Draht trotz seines größeren Durchmessers in die nächstfolgenden Ziehsteine eingebracht werden kann, muss die Spitze nach jedem Ziehschritt chemisch verjüngt werden. Mechanische Schleifverfahren sind nicht möglich.

Bei der Wendelfertigung wird der Wolframdraht gleichmäßig auf einen Molybdänkerndraht spiralisiert. Die Durchmesser beider Drähte, die gewählte Steigung und die Länge des Gewendels bestimmen bereits die lichttechnischen und mechanischen Daten der Lampe, in der dieser Wendel zum Einsatz kommen soll. Je nachdem, für welche Spannung der Wendel ausgelegt ist, erfolgt nach dem ersten Wickeln ein nochmaliges Spiralisieren, wieder auf einen Mo-Kerndraht. Das fertige Produkt wird als Doppelwendel bezeichnet. Anschließend erfolgt das Glühen des Wendels in einem separaten Arbeitsgang zur Steigerung der Festigkeit und Formbeständigkeit. Von den Wendel-Wickelmaschinen wird die allergrößte Genauigkeit verlangt, da ungleiche Wicklungen infolge ungleicher Temperaturverteilungen zu frühzeitigem Durchbrennen der Lampe führen.

Nach dem Spiralisieren des Wolframdrahtes wird das fertige endlose Gewendel (der Wendelschlauch) auf die vorgegebene Länge geschnitten. Der jetzt nicht mehr benötigte Mo- Kerndraht wird auf chemischem Wege herausgelöst (geätzt). Abschließend wird die Wendel noch einem gründlichen Reinigungsprozess unterworfen, um auch letzte Rückstände zu beseitigen. Jetzt wird eine kleine Menge entnommen und eine Musterserie von Lampen produziert, um zu sehen, ob die Wendel die theoretischen Daten bestätigen.

11.2.2 Stromzuführungen und Halterdrähte

Als Stromzuführungen (zwei Stück je Lampe) finden ausschließlich Kupfermanteldrähte Einsatz. Diese bestehen aus einem Nickel-/Eisen-Kern mit einem Kupferüberzug und gewährleisten eine optimale vakuumdichte Verschmelzbarkeit mit den Glasperlen bzw. Glaskolben. Andere Drähte, z.B. Platinmanteldraht, können ebenfalls bei Sonderlampen zum Einsatz kommen. Die verfügbaren Drahtdurchmesser liegen ab 0,15 bis 0,40 mm. Die Verbindung zwischen den Elektroden und der Stromzuführung erfolgt über einen Dichtungsdraht. Dieser geht durch die Glasperle und muss das Innere der Lampe luftdicht abschließen. Wärmeausdehnungskoeffizient von Glas und Metall müssen in diesem Bereich gleich sein, um Risse und Ausströmen des Gases zu vermeiden. Die Verbindung des Kupfermanteldrahtes mit der Stromzuleitung und der Elektrode erfolgt durch einen Schweißprozess.

Bei Lampen, deren Wendel so lang ist, dass er nicht stabil in der Lampe montiert werden kann oder die Gefahr des Zusammenfallens bzw. Anlegens an die Glaskolbeninnenwand besteht, werden eine oder zwei Wendelstützen in die Glasperle eingeschmolzen. Diese bestehen aus Molybdändraht mit einem Durchmesser von 0,10 mm und sind im oberen Bereich zu Häkchen geformt, in die die Wendel eingehängt wird. Die Häkchen werden anschließend zugebogen und verhindern dadurch ein Herausspringen des Wendels bei mechanischen Belastungen (z. B. Schocks/Vibrationen). Alle Wendelaufbauten sind in Abb. 251 dargestellt.

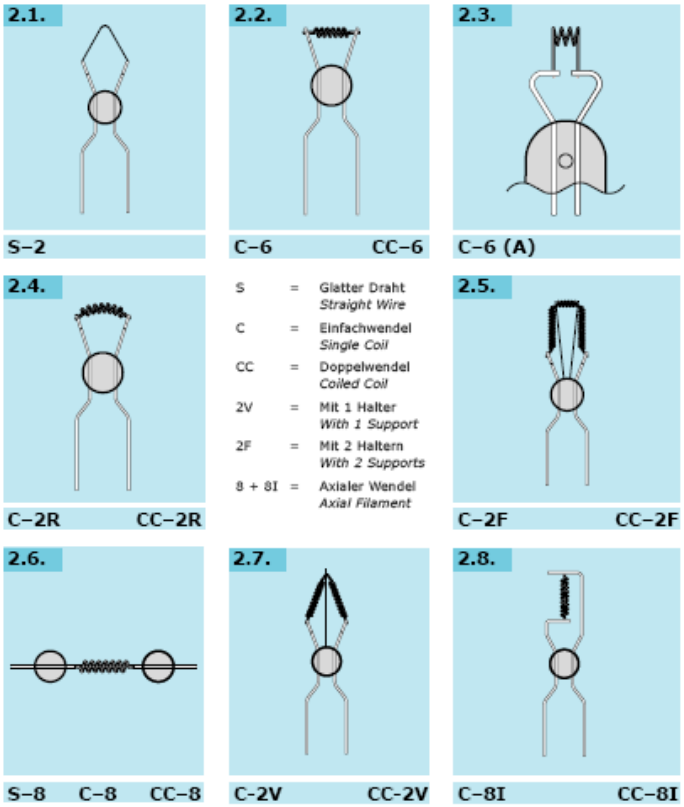


Abb. 251: Wendelaufbauten bei Mikroglühlampen [4]

11.2.3 Glasperle

Eine Glasperle (Abb. 250) hat verschiedenartige Funktionen in der Lampe. Sie wird um die Stromzuführungen herumgeschmolzen, sorgt für einen gleichmäßigen Elektrodenabstand und nimmt je nach Länge des in der Lampe eingesetzten Wendels einen oder zwei Halter auf (s. Wendelaufbauten, Abb. 251). Bei Lampen mit einem Durchmesser von 5,85 mm (T-1 3/4) und kleiner, sowie Soffitten, dient die Perle gleichzeitig zum vakuumdichten Verschmelzen zwischen Stromzuführungen und Glaskolben.

11.2.4 Kolbenarten in Mikroglühlampen

Im Wesentlichen kommen bei der Fertigung von Mikroglühlampen 4 verschiedene Arten von Glaskolben zum Einsatz:

- Rundkolben
- Flachkolben
- Linsenkolben
- Kugelkolben
- Soffitenkolben

Die unter 1 bis 3 genannten Kolben sind alle röhrenförmig und unterscheiden sich nur durch den oberen Abschluss. Rundkolben sind halbrund ausgeführt, Flachkolben sind plan abgeschlossen und Linsenkolben haben eine Plankonvexlinse (bei T-2/3, T-3/4 und T-1). Bei Lichtwurf- bzw.

Punktlichtlampen ist die Linse bikonvex ausgeführt. Kugelkolben haben einen gleichmäßigen runden Durchmesser, Soffittenkolben bestehen aus einem zylindrischen Glasrohr, in dessen Enden die Stromzuführungen mit Hilfe von Glasperlen eingeschmolzen werden. Alle Lampen werden entsprechend ihres Glaskolbens klassifiziert. Die Bezeichnungen kommen aus der amerikanischen Fachliteratur:

Lampen mit röhrenförmigen Kolben = tubes _ T
Lampen mit kugelförmigen Kolben = globes _ G

Zusätzliche Zahlenangaben erläutern die Bauform der Lampentype. So steht „T-1" z.B. für eine röhrenförmige Lampe mit einem Durchmesser von 3,175 mm. Die „1" steht für 1/8" (inch). Glaskolben werden aus verschiedenen Glassorten gefertigt, die optimal auf alle anderen Materialien und Maße, insbesondere die Ausdehnungskoeffizienten der Stromzuführungen, abgestimmt sind.
Jeder Fertigungsprozess in der Kolbenfertigung wird laufend kontrolliert. Die fertigen Kolben werden, bevor sie in die Produktion fließen, noch einmal statistisch überprüft, sowohl mechanisch auf Abmessungen als auch visuell auf optische Beschaffenheit.

11.2.5 Fertigungsablauf und Endkontrolle

Auf automatisierten Fertigungsstraßen werden die Stromzuführungen von Rollen zugeführt, auf erforderliche Länge geschnitten und mit der Perle vakuumdicht verschmolzen. Der separat gefertigte Wendel wird automatisch dem Perlfuß zugeführt und montiert. Das fertige System wird weitergeleitet, mit dem vorproduzierten Glaskolben bestückt und zum Evakuieren und Verschmelzen übergeben. Die Lampe durchläuft ein Zinnbad und geht dann zum Einbrennen (bzw. Altern) auf das Einbrennfeld. Die Dauer ist für jede Type spezifisch festgelegt, im Mittel liegt sie zwischen 4 bis 16 Stunden. Dadurch werden Fertigungs- und materialbedingte Frühausfälle sichtbar und sofort eliminiert und die Wendel der Lampe für den weiteren Gebrauch stabilisiert.

Nach erfolgtem Einbrennen werden alle Lampen auf Licht- und Stromwerte gemessen und klassifiziert, zum Teil geschieht dieses vollautomatisch (prozessgesteuert). Lampen, die noch gefärbt werden müssen, laufen entsprechend weiter. Nach dem Sockeln schließen Funktions- und Stichprobenprüfung der mechanischen Maße an. Lampen, die fertig und durch die Endkontrolle gelaufen sind, gehen ans Lager und stehen dem Verkauf unmittelbar zur Verfügung.

11.3 Lebensdauer von Glühlampen

Glühbirnen sollten im Dauerbetrieb idealerweise 1000 Stunden leben, wenn es nach deren Hersteller ginge. Manche Birnen brennen erst nach Jahren durch, andere bereits nach ein paar Tagen. Eine einheitlichere Produktqualität wird durch feine Risse im Wolframdraht zunichte gemacht. Mit diesem Problem kämpfen die beiden weltweit größten Glühlampenhersteller Osram und Philips. Bisher arbeitete man in der Branche mit Versuch und Irrtum, um das Ziehverfahren für den Draht zu verbessern. Mit der Simulation des Materialverhaltens soll die Produktion gezielter als bisher nachgebessert werden.

Je nach Anzahl der Ziehstufen kann der Wolframdraht dabei wenige oder viele Längsrisse bekommen. Solche Splits bilden sich vor allem während der ersten Ziehstufen, also beim Verjüngen von knapp 4mm auf 0,3mm. Die feinen Risse verlängern sich, wenn der Draht weiter auf bis zu fünf Mikrometer Durchmesser gezogen wird. Der Grund dafür ist die Spannung, die nach dem Ziehen im Draht bestehen bleibt. Das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM beschäftigt sich seit Jahren mit der rechnerischen Lebensdauervorhersage von Wolframdrähten. Das Verhalten der Rissentstehung während des Ziehens ist bereits als Simulationsmodell vorhanden (Abb. 252).

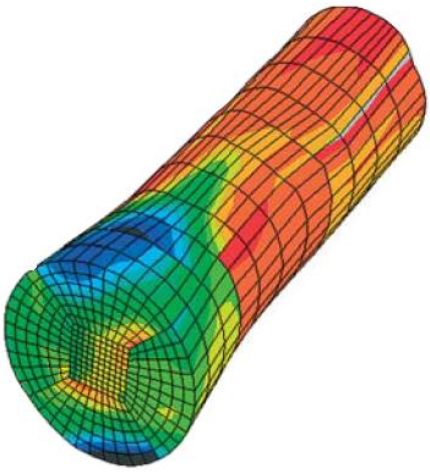


Abb. 252: Simulationsmodell eines Wolframdrahtes bei der Herstellung [5]

Ebenfalls ein wesentlicher lebensdauerbestimmender Faktor für Glühlampen ist die Betriebsart. Problemlos ist dabei der Wechselspannungsbetrieb. Bei Betrieb mit Gleichspannung/-strom (DC) können aber zum Teil Lebensdauer-Reduzierungen von bis zu über 50 % auftreten, insbesondere bei Lampen mit kleinem Drahtquerschnitt (niedrigem Strom) und geringer Wendeltemperatur. Die normale Abdampfung des Wolframwendels wird durch 2 Effekte zusätzlich verstärkt,

- durch den Soret-Effekt und
- durch die Elektromigration.

Die Soret'sche Wirkung basiert auf einem starken Temperaturgefälle in Längsrichtung der Drahtachse. Der auftretende Massetransport (der Wolfram-Atome) führt zu einer gezähnten Oberflächenstruktur des Wolframdrahtes. Zwangsläufig tritt daraus eine Querschnittsreduzierung hervor, die bei Einwirkung von Schocks, Vibrationen oder Impulsbetrieb zu einem Bruch führen kann. Bei der Elektromigration ist die gleiche Veränderung der Drahtoberfläche zu beobachten wie beim Soret-Effekt. Bedingt wird diese allerdings nur durch Gleichspannungs/-strom-Betrieb, wobei der Massetransport durch das sich in Längsrichtung des Wolframdrahtes befindliche elektrische Feld mit einseitigen Spannungsgradienten bewirkt wird.

Gewisse Anwendungsfälle für Glühlampen bringen mechanische Belastungen durch Schocks und Vibrationen mit sich. Während bei Lampen, die wenig gebrannt haben, die Empfindlichkeit noch nicht gravierend ist, tritt mit zunehmender Alterung des Wolframwendels eine Versprödung auf, die zum Bruch führen kann. Besonders betroffen werden hiervon Lampen mit höheren Spannungen (lange Wendel) und kleinen Strömen (dünne Drähte). Derartige Wendel können sich verformen und führen zumeist zu Wendelverwerfungen und Windungskurzschlüssen, die ebenfalls einen Lampenausfall zur Folge haben.

Das Normalverhalten von Glühlampen bringt mit zunehmender Lebensdauer eine Schwärzung der Glaskolbeninnenwand mit sich, hervorgerufen durch vom Wendel abgedampftes Wolfram. Ist die Abdampfung stark ausgeprägt, kann davon ausgegangen werden, dass sich der Wolframquerschnitt entsprechend reduziert hat. Diese Reduzierung erfolgt nicht durchgehend über den gesamten Draht, sondern partiell. An den am stärksten ausgeprägten „Kerbungen" neigt der Draht leicht zum Bruch, ausgelöst z.B. durch mechanische Belastungen oder Impulsbetrieb.

11.4 Anwendung von Glühlampen in der Automobilindustrie

In der Frühzeit des Automobils waren Nachtfahrten eher unüblich. Acethylengas aus einem mitgeführten Karbid-Gaserzeuger erlaubte bereits um 1905 eine als ausreichend empfundene Scheinwerfer Konstruktion. Elektrische Beleuchtung setzte sich erst nach dem zweiten Weltkrieg in der Automobilindustrie durch. Ab 1957 wurde dann erstmals das asymmetrische Abblendlicht eingeführt. Der Fahrbahnrand wurde dabei besser ausgeleuchtet als der Gegenverkehr und damit entstanden unterschiedliche Scheinwerfer für Rechts und Linksverkehr. Ab 1960 wurden Halogenlampen eingesetzt, die mit der doppelten Lichtleistung rasch den Durchbruch fanden. Seit 1991 werden Xenon Scheinwerfer vermarktet, die erneut die Lichtleistung verdoppelten und deren Marktanteil kontinuierlich zunimmt. Die Entwicklung der Scheinwerfer über nahezu ein Jahrhundert, ist in Abb. 253 gezeigt.

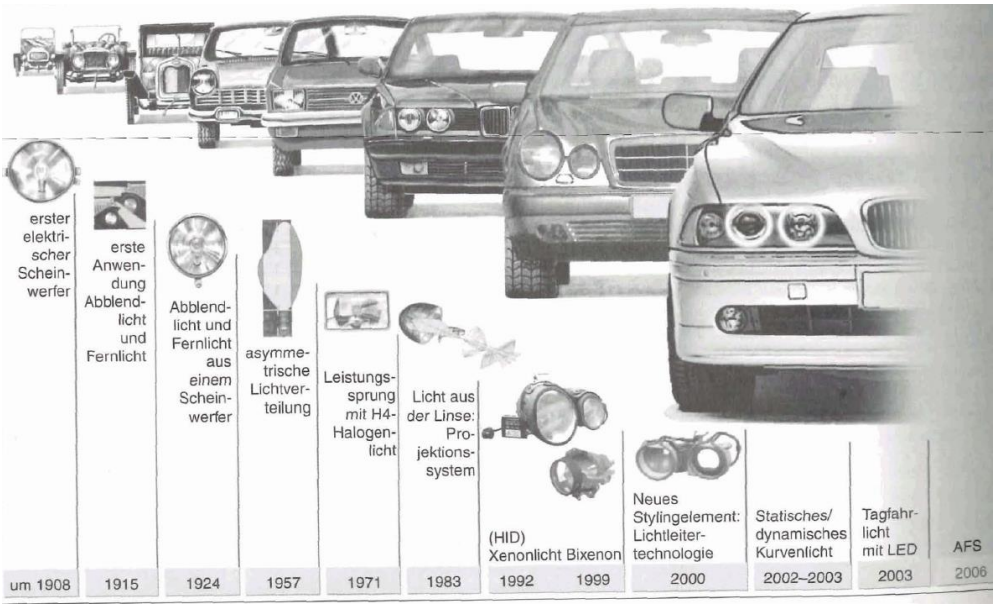


Abb. 253: Produktentwicklung der Scheinwerfer im Automobilbau [7]

Die Anforderungen an moderne Scheinwerfersysteme und Leuchten sind sehr vielfältig geringe Blendung des Gegenverkehrs bei immer höherer Verkehrsdichte, bessere Fahrbahnausleuchtung auch bei höheren Geschwindigkeiten, auffällige Signalwirkung der Leuchten und leuchtende, übersichtlich angeordnete Anzeige- und Bedienelemente im Innenraum.
Immer stärker tritt auch das Design der Scheinwerfer in den Vordergrund. Den Scheinwerfern gilt eine gesteigerte Aufmerksamkeit bei der Symbiose von Funktion und Fahrzeugdesign. Am Computer entwickelte Reflexionsscheinwerfer mit stufenlosen oder partitionierten Reflektoren, Projektionsscheinwerfer mit Poly-Ellipsoid-System (PES), das Scheinwerfer-System „Litronic“ mit Xenon-Gasentladungslampe, die Leuchtweitenregelung sowie andere lichttechnische Einrichtungen optimieren trotz gestaltungstechnischer Einschränkungen die Wirkung des Lichts.

11.4.1 Scheinwerferarten und Reflektortechnologien

Abblendlichtscheinwerfer werden bei der heutigen Verkehrsdichte am meisten benutzt (ca. 95 bis 97%). Fern- und Zusatzscheinwerfer werden dabei allein oder gemeinsam mit den Abblendscheinwerfern betrieben. Wird derselbe Reflektor für Abblendlicht und Fernlicht verwendet, so handelt es sich um ein Zwei – Scheinwerfer – System. Sind Abblendlicht und Fernlicht voneinander getrennt, so spricht man von einem Vier – Scheinwerfer – System.
Scheinwerfer bestehen im Wesentlichen aus der Lichtquelle und einem Reflektor, der das Licht sammelt und die Strahlen ausrichtet. Zusätzlich können transparente optische Elemente wie Linsen oder Prismen die Lichtverteilung bewirken, kombiniert werden. Grundsätzlich können dabei das Reflektionssystem und das Projektionssystem unterschieden werden.

11.4.1.1 Reflektionssystem

Licht aus dem Brennpunkt einer Rotationsparabel wird annähernd parallel gerichtet und stellt somit eine gute Basis für ein Fernlicht dar. Eine weitere Lichtquelle außerhalb des Brennpunktes erzeugt ein konvergierendes Lichtbündel (Abb. 254).

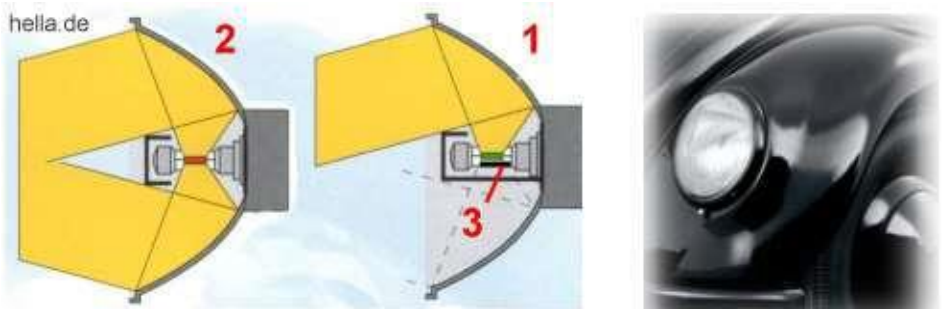


Abb. 254: Strahlengang Parabolid Fernlicht/Abblendlicht [8]

Das oben liegende Lichtbündel ergibt das Abblendlicht, wohingegen das Fernlicht über dem unteren Lichtbündel betrieben wird. Bei Verwendung einer Glühlampe mit zwei Wendeln, kann aus demselben Reflektor Abblendlicht und Fernlicht erzeugt werden. Die eigentliche Lichtverteilung wird durch Prismen und Zylinderlinsen auf der Streuscheibe erzeugt. Beim Einsatz von Freiflächen-Reflektoren wird die gewünschte Lichtverteilung direkt ohne zusätzliche Profile erzeugt. Sinnvoll ist dann eine Strahlenblende, die direkt austretendes Licht abschattet und aus dekorativen Gründen meist glänzend erscheint.

11.4.1.2 Projektionssystem

Während das Reflektionssystem großflächige Reflektoren benötigt, kann das Projektionssystem mit einer kleinen asphärischen Linse auskommen (Abb. 255). Vorteile sind neben der kompakten und modularen Bauform die beliebige Gestaltung der Hell – Dunkel- Grenze durch die Form der Blende im inneren der Linse.

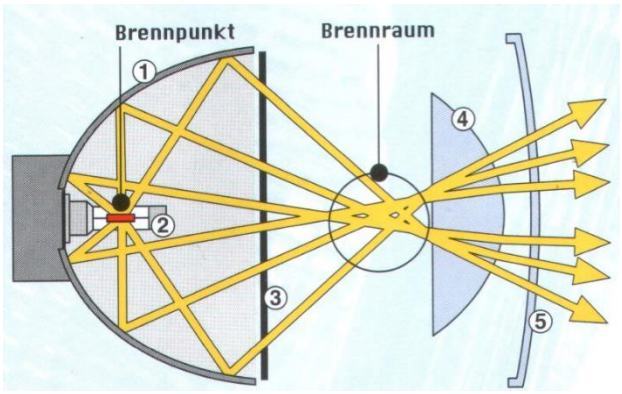


Abb. 255: Bündelung des Lichtes in einer Linse [9]

11.4.2 Materialien bei der Herstellung von Schweinwerfern

11.4.2.1 Reflektormaterialien und Rauheit der Spiegelfläche

Traditionelle Reflektoren wurden aus Blech, überwiegend Stahl, seltenes Messing oder Aluminium gepresst. Die Oberfläche ist durch Lack eingeebnet und mit Reinaluminium im Vakuum metallisiert. Einschließlich einer zusätzlichen Korrosionsschutzschicht beträgt der Reflexionsgrad etwa 87%. Reflektoren aus Metallguss werden bei kleinen Abmessungen und hohen Temperaturen eingesetzt. Bei Reflexionssystemen wird am häufigsten Duroplaste (BMC) verwendet. Als Beispiel Low Profile Polyester, welches eine gute Wärmebeständigkeit und Formtreue aufweist, kann für Reflektoren unter Verwendung einer Grundlackierung ebenfalls eingesetzt werden.
Damit die Lichtausbeute einen wirtschaftlichen Faktor erhält, werden an die Oberfläche sehr hohe Ansprüche gestellt. Die Rauheit dieser Fläche darf etwa 1/10000 mm betragen.

11.4.2.2 Abschlussscheibe

Abschlussscheiben mit optischen Streuscheiben, können nur maximal 25° aus der Senkrechten Ebene gekippt werden. Bei Freiflächenreflektoren sind optikfreie Abschlussscheiben möglich. Diese können entsprechend stärker geneigt werden und ermöglichen eine ästhetische Formgebung bei Lichtverlusten in Abhängigkeit des Auftreffwinkels der Lichtstrahlen. Bei 0°C beträgt die Transmission bei Glas etwa 92% und bei Kunststoff etwa 85% (Abb. 256). Gepresste Glasscheiben werden nur noch bei Zusatzscheinwerfer verwendet, wenn die Formbeständigkeit bei hohen Temperaturen für den Einsatz von Vorteil ist.

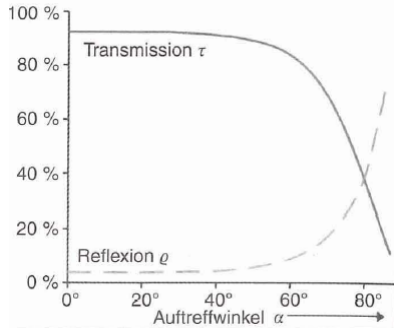


Abb. 256: Reflexions- und Transmissionsgrad in Abhängigkeit des Auftreffwinkels [7]

In Europa wurden bis 1983 ausschließlich gepresste (seltener gewalzte) Glasscheiben verwendet. Der Pressvorgang legt der Gestaltung enge Grenzen auf und ergibt durch schnellen Werkzeugverschleiß grobe Toleranzen. Positiv ist jedoch die Kratzfestigkeit und die relativ gute Temperaturbeständigkeit, die durch chemische oder durch thermische Härtung noch weiter gesteigert werden kann. Kunststoffscheiben haben gegenüber dem Glas die großen Vorteile des geringen Gewichtes und der Designfreiheit. Als Basismaterial wird überwiegend Polycarbonat, geschützt durch eine Hartbeschichtung, eingesetzt. Diese Hartbeschichtung muss unter Reinraumbedingungen aufgebracht werden. Eine maximale Temperatur von 143 °C darf werkstoffbedingt, auch bei vollkommener Verschmutzung, nicht überschritten werden. Für die Berechnung des Wärmehaushaltes innerhalb eines Schweinwerfers werden daher speziell bei Halogenlicht erweiterte Berechnungsmethoden und Simulationsprogramme herangezogen. Die Installation einer Scheinwerferwaschanlage ist bei Halogenlicht gekoppelt mit der Scheibenwaschanlage zwingend vorgeschrieben.

11.4.3 Lichtquellen für Scheinwerfer

Ursprünglich wurde die amerikanische Glühlampe in die europäische Automobilindustrie übernommen. Die Anforderungen an Fahrzeugglühlampen sind bedingt durch Erschütterungen und Spannungsschwankungen erheblich höher als an stationäre Glühlampen. Bereits seit ca. 1970 werden in der Automobilindustrie **Halogenlampen** für eine höhere Lichtausbeute eingesetzt (Abb. 257).
Der Halogenprozess verhindert bei hohen Temperaturen das Schwärzen des Lampenkolbens durch die Unterbindung des Wolframniederschlages. Aus diesem Grund kann die Baugröße der Glaskolben sehr kompakt ausgeführt werden und ein höherer Betriebsdruck erreicht werden. Dieser Lebensdauerverlängernde Effekt führt zu einer geringeren Abschmelzung des Wolframdrahtes. Das Befüllen mit schweren Edelgasen kann durch die kleinen Abmessungen zu vertretbaren Kosten durchgeführt werden.
Zur Angabe der Lampenlebensdauer in Automobilen Anwendungen dienen verschiedenartige Kennzahlen. Tc bezeichnet die Anzahl der Stunden bis 63,6 % ausgefallen sind und B3 die Zeitdauer bis 3 % der Prüflampen ausgefallen sind. Überspannung ist dabei das Hauptkriterium zur tatsächlichen Lebensdauer einer Glühlampe. Wird auf eine langlebige Glühlampe Wert gelegt, so bringt eine geringfügig schwächer Lichtleistung bereits eine wesentlich längere Lebensdauer (LL Longlife Glühlampen).

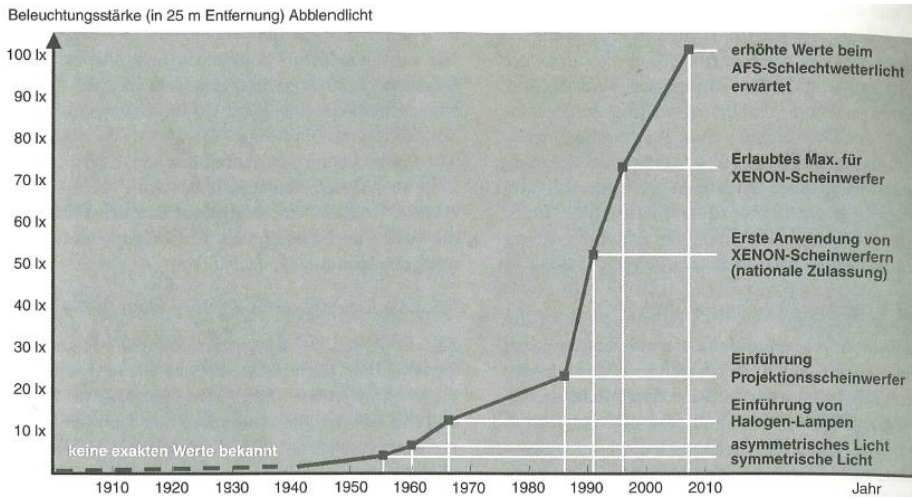


Abb. 257: Anstieg der Beleuchtungsstärke bei Kraftfahrzeugscheinwerfer

Das **Xenonlicht** ist etwa 2,5-mal intensiver und tageslichtähnlicher als das Halogenlicht (Abb. 10). Die dazugehörigen Lampen werden Gasentladungslampe (GDL = Gas discharge lamp) oder HID (= High intensity discharge lamp) genannt. Erzeugt wird das Xenonlicht durch einen etwa 4mm langen Lichtbogen in einem Entladungsgefäß, in dem sich kleine Mengen von Salzen und seltenen Erden befinden. Diese Salze haben vor allem die Aufgabe die Farbtemperatur des lila leuchtenden Lichtes auf die Tageslichtfarbe von etwa 5000 Kelvin herabzusenken. Im Gegensatz zur Halogenlampe enthält Xenonlicht fast nur sichtbares Licht und nur sehr wenig Infrarotlicht. Zur Initiierung des Lichtbogens wird zusätzlich eine Ansteuerelektronik mit folgenden Funktionen verwendet:

- Erzeugung einer Zündspannung (18000 bis 28000 V)
- Verdampfen der Halide durch kurzzeitige hohe Energiezufuhr
- Konstantbetrieb bei 35 Watt Leistung
- Automatisches Wiederentzünden bei starken Erschütterungen
- Spannungsstabilisierung
- Kurzschluss- Nebenschlussüberwachung

Die Lebensdauer einer Xenonlichtquelle hängt nicht von der Brenndauer, sondern von der Anzahl der Einschaltvorgänge ab.

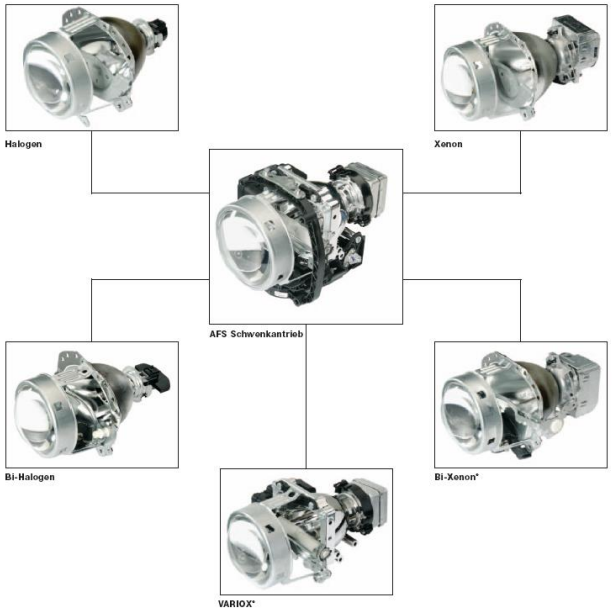


Abb. 258: Modulartiger Aufbau von Xenonlichtquellen [10]

Der Einsatz von zwei Xenon Lichtquellen in einer Lampe für Fern- und Abblendlicht ist nicht möglich. Bei den sogenannten Bi – Xenon Schweinwerfern (Abb. 258) wird daher eine Blende eingesetzt, die über Zugmagnete eine Umschaltung zwischen Fern- und Abblendlicht durchführt. Diese Umschaltung erfolgt so schnell, dass ein Lichthupen (<0,3 sec.) ebenfalls möglich ist. Bei Ausfall geht dieses System durch Federzug in die Abblendstellung zurück. Wegen des einfachen Aufbaus hat sich dieses System in Projektionstechnik gegenüber entsprechenden Reflektionssystemen mit bewegter Lampe, verschobenen Reflektor oder bewegter Strahlblende, durchgesetzt.

11.4.4 Ausblick – Intelligente Scheinwerfer – Neue Technologien

11.4.4.1 Intelligente Fahrzeugbeleuchtungen

Im Einzelnen haben sich in verschiedenen Fahrsituationen eine unterschiedliche Lichtverteilung auf die Fahrbahn bewährt.

- **Town light** für niedrige Geschwindigkeiten
- **Cross country** wie heutiges Abblendlicht
- **Motorway light** als weitreichendes Licht
- **Adverse weather light** Schlechtwetterlicht bei Reduktion der Blendung und gleichzeitiger kräftiger Ausleuchtung des Fahrbahnrandes

Alle diese Lichtverteilungen lassen sich zusätzlich noch mit einem Kurvenlicht (Abb. 259) kombinieren. Beim statischen Kurvenlicht oder Abbiegelicht wird zur Kurveninnenseite Licht aus einem separaten Reflektor oder Projektor hinzugeschaltet. Beim dynamischen Kurvenlicht schwenken die Scheinwerfer ebenfalls zu Kurveninnenseite in Abhängigkeit des Kurvenradius. Durch modulare Aufbauten lässt sich eine Schwenkkonstruktion mit Bi-Xenon Projektionsmodul und Schrittmotorantrieben und gegebenenfalls Rückmeldeeinrichtung im Scheinwerferdesign integrieren.

Abb. 259: Digitale Produktentwicklung eines Kurvenlichtes bei Zizala Lichtsysteme [11]

Der modulare Aufbau kann sogar so weit erweitert werden, dass anstelle einer beweglichen Blende des Bi- Xenon- Systems entweder mehrere Blenden oder eine drehbare Freiformwalze die unterschiedlichen Lichtverteilungen erzeugen. Zusätzlich sind speziell beim Autobahnlicht einfache, aber wirksame Maßnahmen wie das Anheben des Scheinwerfers oder Lichtstärkenerhöhung durch den Leuchtweitesteller möglich. Beladungsbedingte Leuchthöhenänderungen können ebenfalls über dieses System ausgeglichen werden.
Zur Ansteuerung der intelligenten Scheinwerfer können neben Geschwindigkeitssignal, Lenkwinkelsensor und Querbeschleunigungssensoren auch noch Navigationsgeräte und Kameras eingesetzt werden.

Im Fachmagazin ATZ (Automobiltechnische Zeitung) befinden sich zahlreiche Artikel über die technischen Lösungen rund um die Beleuchtung von Fahrzeugen. Diese tragen maßgeblich dazu bei, dass die Verkehrssicherheit trotz ansteigender Teilnehmer im Straßenverkehr in den letzten Jahren deutlich zugenommen hat.

11.4.4.2 Neue Technologien im Scheinwerferbau

Durch Lichtsimulation kann im Produktentwicklungsprozess bereits eine Vorentscheidung eines optischen Systems getroffen werden. Geometrieänderungen, die die Ausleuchtung in bestimmten Bereichen steigern oder die Senkung der Herstellkosten des Schweinwerfers können bereits im Vorfeld der Entwicklung wesentliche Vorteile gegenüber der Konkurrenz bringen. Diesen Vorteilen steht aber auch ein gewisser Aufwand von Simulationssoftware gegenüber. Nachfolgend wird der Produktentwicklungsprozess anhand der Heckleuchte des Audi TT dargestellt.

Modellierung

Mit der optischen Systemauswahl werden für die jeweilige Anwendung Geometrien zur Lichtlenkung (Abb. 260) erstellt. Bei Heckleuchten und Scheinwerfern stehen je nach Entwicklungsstadium (Vorentwicklung – Konstruktion) unterschiedliche Fragestellungen zur Lichttechnik im Focus.

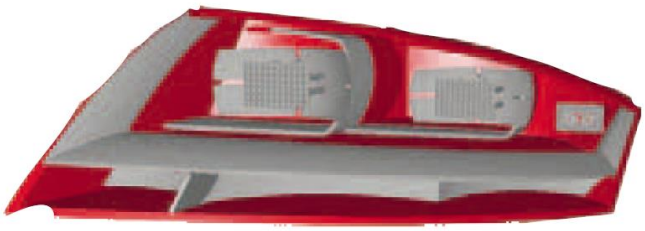


Abb. 260: Designmodell Audi TT ohne Reflektoren [12]

In einer frühen Konzeptphase existiert typischerweise nur ein Entwurf in Form eines 3D-Flächenmodelles ohne lichttechnische Flächen. Diese müssen unter der Einhaltung von Rahmenbedingungen (Normen) entworfen werden. Das Erscheinungsbild und der Bauraum können durch eine Simulation bereits von Designern bewertet werden.

Materialauswahl

Zunächst müssen dem 3D Modell Materialeigenschaften zugewiesen werden. Die Modellierung erfolgt bei transparenten Materialien wie PMMA über die Angaben der optischen Eigenschaften für das Volumenmaterial. Oberflächenstruktur, Absorption/Transmission und Streuung bzw. Lichtlenkung sind ebenfalls für die Modellierung erforderlich.

Lichtquellen

Nachdem alle Bauteile mit Materialeigenschaften Versehen sind, müssen die Lichtquellen modelliert, d.h. in der Szene platziert werden. Lichtquellen sind unter optischen Blickpunkten über die optische Leistung, das Spektrum sowie die räumliche Abstrahlcharakteristik definiert. Diese Kenngrößen können messtechnisch erfasst werden und als Eingangsgrößen in die Simulation eingebettet werden.

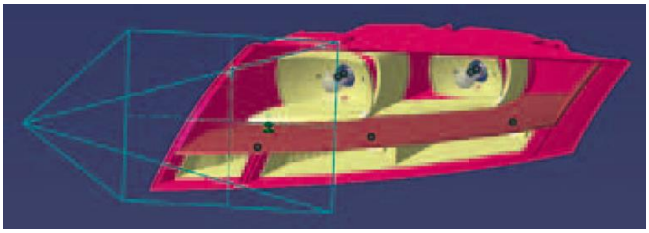


Abb. 261: Heckleuchte Audi TT mit Leuchtmitteln

Durch die Definition des Detektors kann in der virtuellen Beleuchtungssimulation die Abstrahlung in Abhängigkeit der Position bestimmt werden (Abb. 261). Grundlage dafür ist die in der Realität vorkommende Perspektive von Fußgängern bzw. anderen Autofahrern. Nach der Definition der Eingabeparameter kann die eigentliche Lichtsimulation mit dem Verfolgen der Lichtstrahlen beginnen. Erscheinung, Beleuchtungsstärke Lichtverteilung und gegenseitige Bestrahlungseffekte können festgestellt werden und in der frühen Produktentwicklungsphase korrigiert werden. Die Ergebnisse sind in Abb. 262 ersichtlich.

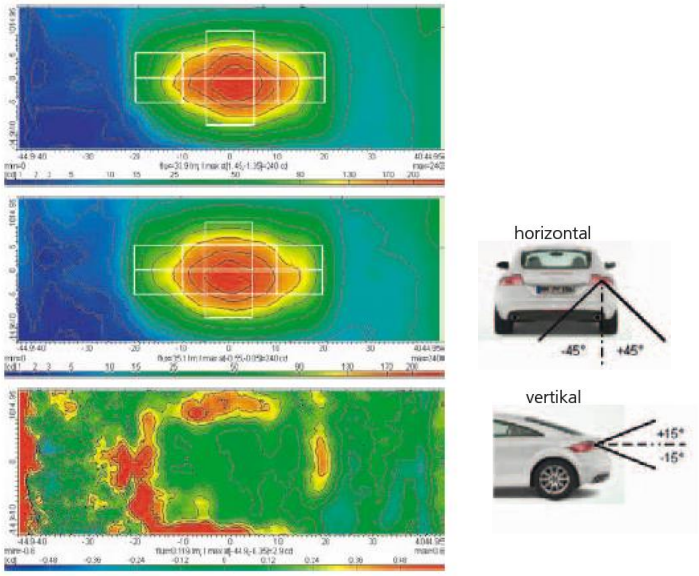


Abb. 262: Gemessenen und simulierte Lichtverteilung [12]

In den nächsten Jahren wird der virtuellen Lichtsimulation innerhalb der Automobilindustrie eine wesentlich weitreichende Bedeutung zukommen, da sie die Schnittstelle zwischen Technik und Design darstellt. Für die Serienherstellung bringt diese virtuelle Umgebung ein gewaltiges Einsparungspotential im Hinblick auf die Formen und Materialeinsätze. Anpassungen im laufenden Fertigungsprozess sind nicht mehr notwendig.

11.5 Literaturverzeichnis

[1] Schopf E.; "Geschichte der Elektrischen Beleuchtung von 1800 bis 2001", Herausgeber: Stadtgemeinde Weiz, 2001
[2] Wikipedia „Glühampe"
[3] Hochwimmer G.;"Wolfram ein Metall mit außergewöhnlichen Eigenschaften", Research Studie General Research GmbH, Oktober 2006
[4] MGG- Mikro- Glühlampen GmbH; „Technisches Datenblatt", Hamburg
[5] Brehm H.; "Berechenbare Wolframdrähte", Frauenhofer IWM Report, 2005
[6] Almanstötter J.; „Rekristallisation von Wolframdrähten – Modellierung und Experiment", Dissertation an der Universität Stuttgart, 1977
[7] Braess H., Seiffert U.; „Handbuch Kraftfahrzeugtechnik", 5. Auflage, Vieweg Verlag, 2007
[8] Borgwart M.; "Lichttechnik im Automobilbau", VW –Informationsmaterial, 2006
[9] „Scheinwerferausführungen" bei kfztech.de
[10] „Technische Information zu Licht und Lampen", Hella Scheinwerfer KG, Deutschland
[11] „Trends in der Lichtentwicklung", Zizala Lichtsysteme GmbH
[12] Möckel C.; „Lichtsimulation in der Mobilindustrie – Integration von Design und Technik", Audi AG, 2007

12 Ein paar persönliche Schlussbemerkungen

Die Vielfalt der Herausforderungen in der Kombination von Werkstoff- und Verfahrensfragen, die im Zuge der Produktentwicklung und Produktion aufkommen, stellen einen Ingenieur immer wieder vor neue Herausforderungen.
Für mich ist ein klassischer Konstrukteur der „König der Ingenieure“, weil er meist den Überblick über die wesentlichsten, eigenschaftsbestimmenden Faktoren hat, weil er zum Zeitpunkt der Planung und des Designs ca. 70% der Kosten festlegt und weil er die Hauptverantwortung für die Bewährung und den wirtschaftlichen Erfolg eines Produktes trägt.
Dennoch gibt es im 21.Jahrhundert neue Herausforderungen, wie z.B. Digitalisierung, Ressourcenschonung und Klimaschutz, die neue Lösungskonzepte brauchen. Bereits Einstein hat darauf hingewiesen, dass für die Lösung von Problemen andere Mittel/Werkzeuge gebraucht werden, als jene mit denen man die Probleme geschaffen hat.
Kreativität, Mut zur Veränderung, Offenheit für Neues, ethische Grundhaltung bleiben auch in Zukunft wichtige Säulen für unsere nachhaltige Entwicklung im Einklang mit der Natur.
Ein nachhaltiges Wirken und ein gemeinsames Herangehen an gesellschaftlich relevante Aufgaben sind möglich, wenn man die menschlichen Schwächen, wie Gier, Egoismus und Machtstreben, in den Hintergrund stellt.
Ein ehrliches Zusammenwirken aller motivierten Personen kann das Spannungsfeld zwischen Marktwirtschaft und Umweltschutz entschärfen und die Ökonomie durch umweltgetriebene Produktentwicklungen forcieren, siehe Abb. 263.

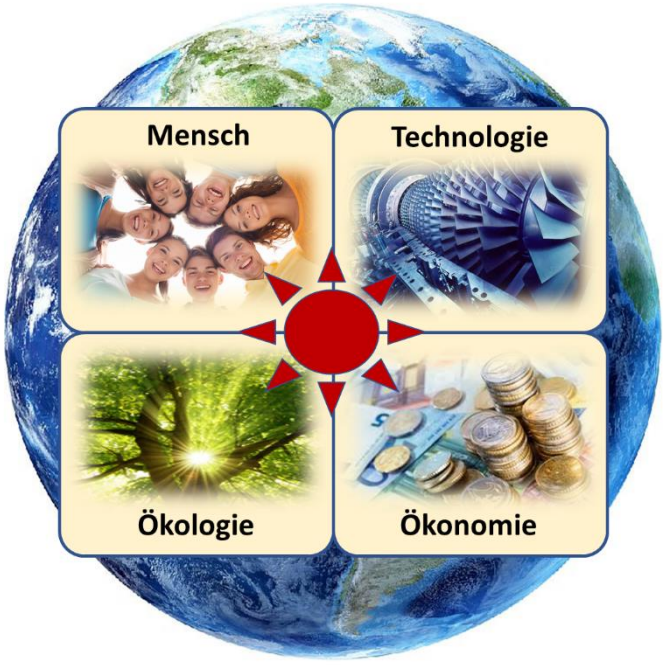


Abb. 263: Zukünftiges, verpflichtendes Zusammenwirken der vier Bereiche Mensch, Technologie, Ökonomie und Ökologie für eine nachhaltige Entwicklung auf unserem wunderschönen Planeten