



Serope Kalpakjian  
Steven R. Schmid  
Ewald Werner

# Werkstofftechnik

5., aktualisierte Auflage

*Bafög-  
Ausgabe*

€39,95 <sup>[D]</sup> €41,10 <sup>[A]</sup>  
sFr 47,10



Gussstück früher erstarren als dicke. Im Ergebnis kann geschmolzenes Metall oft nicht mehr in die dickeren Bereiche vordringen. Dies führt zu Porosität im dickeren Abschnitt, da das Metall sich zusammenziehen muss, daran aber durch die erstarrte Haut gehindert wird. **Mikroporosität** kann sich auch entwickeln, wenn das flüssige Metall zwischen Dendriten und zwischen Dendritenarmen (siehe Abbildung 5.8) erstarrt und schwindet.

Porosität infolge Schwindung lässt sich durch verschiedene Maßnahmen reduzieren oder beseitigen:

- 1 Interne oder externe **Abschreckplatten** (Kühleisen) werden typischerweise beim Sandguss verwendet (Abbildung 5.32), um die Erstarrungsgeschwindigkeit in dickeren Bereichen zu erhöhen. Interne Abschreckplatten bestehen normalerweise aus dem gleichen Werkstoff wie die Gussstücke; externe Abschreckplatten können aus dem gleichen Werkstoff oder aus Eisen, Kupfer oder Graphit hergestellt sein.
- 2 Die **Temperaturgradienten** werden steil gemacht, zum Beispiel mithilfe von Formenwerkstoffen mit hoher thermischer Leitfähigkeit.
- 3 Das Gussstück kann **heißisostatischem Pressen** (siehe Abschnitt 11.3.3) unterworfen werden. Diese Methode ist allerdings sehr teuer und wird hauptsächlich für kritische Komponenten wie zum Beispiel für Teile im Flugzeug- oder Rennmotorenbau eingesetzt.

Porosität aufgrund von Gasen lässt sich dadurch erklären, dass flüssige Metalle im Vergleich zu Festkörpern eine wesentlich größere Löslichkeit für Gase aufweisen (► Abbildung 5.33). Beim Erstarren eines Metalls werden die gelösten Gase aus dem Festkörper ausgetrieben, was zu Porosität führt. Gase können sich auch durch Reaktionen der Schmelze mit den Formenwerkstoffen bilden. Entweder sammeln sich die Gase in Bereichen vorhandener Porosität an, wie zum Beispiel in Zwischendendritenbereichen, oder sie verursachen **Mikroporosität** im Gussstück, was insbesondere in Gusseisen, Aluminium und Kupfer zu beobachten ist.

Gelöste Gase lassen sich aus der Schmelze durch Spülen oder Ausblasen mit einem Edelgas oder Schmelzen und Abgießen des Metalls im Vakuum entfernen. Handelt es sich beim gelösten Gas um Sauerstoff, kann die Schmelze **desoxidiert** (reduziert) werden. Stahl wird normalerweise mit Aluminium oder Silizium desoxidiert, kupferbasierte Legierungen mit einer Kupferlegierung, die 15 % Phosphor enthält.



**Abbildung 5.33:** Löslichkeit von Wasserstoff in Aluminium. Bei der Erstarrung des Aluminiums nimmt dessen Löslichkeit für Wasserstoff drastisch ab.

Ob Mikroporosität ein Ergebnis von Schwindung ist oder durch Gase verursacht wird, lässt sich oft nur schwer feststellen. Bei kugelförmigen Poren mit glatten Wänden (ähnlich wie die glänzenden Oberflächen von Löchern in Schweizer Käse) stammt sie normalerweise von eingeschlossenen Gasen. Wenn die Wände rau und spitz sind, geht die Porosität wahrscheinlich auf Schwindung zwischen Dendriten zurück. Bei ganz grober Porosität oder **Makroporosität**, die durch Schwindung entsteht, spricht man von **Lunkern**.

### 5.11.2 Allgemeine Entwurfsüberlegungen

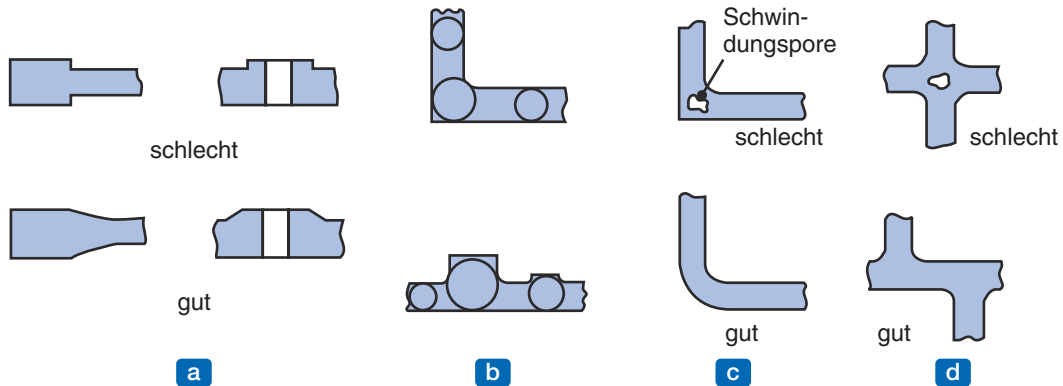
Beim Gießen sind zwei Arten von Entwurfsproblemen zu betrachten: (a) geometrische Merkmale, Toleranzen usw., die in das Teil eingebunden sein sollten, und (b) Merkmale der Form, die für die Herstellung des gewünschten Gussteils erforderlich sind. Bei einem robusten Entwurf von Gussteilen sind normalerweise folgende Schritte erforderlich:

- 1 Das Teil so gestalten, dass sich seine Gestalt leicht gießen lässt. Dieses Kapitel beschreibt an mehreren Stellen dazu wichtige Entwurfsüberlegungen;
- 2 Ein Gussverfahren und einen für das Teil, die Größe, die Maßhaltigkeit, die Oberflächentextur und die mechanischen Eigenschaften geeigneten Werkstoff auswählen;
- 3 Die Trennebene der Form oder des Gießgesenks festlegen;
- 4 Lage und Gestaltung des Anschnittsystems – einschließlich Speiser, Einguss und Steiger festlegen, um eine gleichmäßige Beschickung des Formenhohlraums mit geschmolzenem Metall zu ermöglichen;
- 5 Sicherstellen, dass zweckmäßige Kontrollmechanismen und bewährte Abläufe zur Verfügung stehen.

**Entwurf der Gussteile:** Die folgenden Überlegungen sind für den Entwurf von Gussstücken wichtig:

- 1 **Ecken, Winkel und Wandstärke:** Scharfe Ecken, Winkel und Kehlen sollten möglichst vermieden werden, da sie als Spannungskonzentratoren wirken und zu Rissen im erstarrenden Gussteil (wie auch der Formen/Gesenke) während der Erstarrung führen können. Die Kehlenradien sollten so gewählt werden, dass möglichst geringe Spannungskonzentrationen auftreten und die ordnungsgemäße Strömung des geschmolzenen Metalls beim Eingießen gewährleistet ist. Die Radien liegen gewöhnlich zwischen 3 und 25 mm, obwohl bei kleinen Gussstücken und speziellen Anwendungen auch kleinere Radien möglich sind. Wenn andererseits die Kehlenradien zu groß sind, ist das Materialvolumen in diesen Bereichen ebenfalls groß und die Abkühlungsrate folglich geringer.

Unterschiedliche Wandstärken in Gussstücken sollten sanft ineinanderübergehen. Der Ort des größten Kreises, der sich in einen bestimmten Bereich einschreiben lässt, ist entscheidend für die Lunkerbildung (► Abbildungen 5.34b bis d). Da die Abkühlungsrate in Bereichen mit größeren Kreisen geringer ist, entstehen hier Hotspots, d. h., es kann zum Wärmestau kommen. Diese Bereiche können zu Lunkern und Porosität führen (Abbildungen 5.34c und d). Hohlräume und lokale Wärmestaus lassen sich durch Verwendung kleiner Kerne eliminieren. Durch einheitliche Querschnitte und Wanddicken im gesamten Gussstück kann man die Lunkerbildung minimieren. Obwohl sie die



**Abbildung 5.34:** (a) Abänderung des Entwurfs, um Defekte im Gussstück zu vermeiden. Scharfe Ecken sind zu vermeiden, damit keine Spannungskonzentrationen auftreten. (b–d) Beispiele für Entwürfe, die die Bedeutung einer gleichmäßigen Wandstärke in Gussstücken aufzeigen, wodurch Hotspots und Schwindungsporosität vermieden werden können.

Produktionskosten erhöhen, können *Abschreckplatten* oder *Füllstoffe* lokale Wärmestaus minimieren oder beseitigen (siehe Abbildung 5.32).

- 2 **Flache Bereiche:** Große flache Bereiche (ebene Oberflächen) sollten vermieden werden, da sie sich beim Abkühlen verwerfen oder aufgrund von ungleichmäßigem Fluss des Metalls während der Einfüllphase eine schlechte Oberflächengüte verursachen. Zu den gebräuchlichen Techniken gehört es, flache Oberflächen durch gezackte Rippen und Sägezahnformen aufzubrechen.
- 3 **Schwindung:** Um Risse im Gussteil beim Abkühlen zu vermeiden, sollten Zugaben für die Schwindung in der Erstarrungsphase vorgesehen werden. In Gussteilen mit sich kreuzenden Rippen lassen sich die Zugspannungen durch gezackte Rippen oder durch Modifizieren der Kreuzungsgeometrie vermindern. Modellabmessungen sollten auch eine Schwindung des Metalls während der Erstarrung und Abkühlung berücksichtigen. Die sogenannte **Schwindungszugabe** beträgt typischerweise 10 bis 20 mm/m.
- 4 **Formschrägen:** Eine kleine Schräge (Formschräge) wird typischerweise in Sandformmodellen vorgesehen, um das Entfernen des Modells ohne Beschädigung der Form zu erlauben. Formschrägen reichen üblicherweise von 5 bis 15 mm/m. Abhängig von der Qualität des Modells liegen Freiwinkel gewöhnlich im Bereich zwischen 0,5 bis 2°. Die Freiwinkel an inneren Oberflächen sind typischerweise doppelt so groß wie die für äußere Oberflächen, weil das Gussstück nach innen gegen den Kern schwindet.
- 5 **Maßtoleranzen:** Toleranzen hängen vom konkreten Gussvorgang, der Größe des Gussstücks und der Art der verwendeten Form ab. Die Toleranzen sollten in den Grenzen einer guten Teilefunktion möglichst breit sein, da sonst die Kosten des Gussstücks zu groß werden. In der Praxis liegen die Maßtoleranzen gewöhnlich im Bereich von  $\pm 0,8$  mm für kleine Gussstücke und können bis zu  $\pm 6$  mm bei großen Gussstücken betragen.
- 6 **Beschriftungen und Markierungen:** Es ist übliche Praxis, eine Art von Kennzeichnung in Gussteile einzubinden, beispielsweise Beschriftungen, Zahlen oder Firmenlogos. Diese Merkmale können Eindrücke auf der Oberfläche des Gussstücks sein oder von der Oberfläche hervorstehen. Zum Bei-

spiel wird beim Sandguss eine Modellplatte durch maschinelle Bearbeitung auf einer CNC-Anlage (Abschnitt 8.10) hergestellt und es ist einfacher, die Beschriftung in die Modelloberfläche einzuarbeiten, was zu versenkten Buchstaben führt. Beim Druckguss andererseits ist es einfacher, Buchstaben in das Gesenk einzuarbeiten, was zu erhabenen Buchstaben führt.

- 7 Endbearbeitung:** Es ist wichtig, die oftmals notwendigen nachfolgenden Bearbeitungs- und Endbearbeitungsarbeitsgänge zu berücksichtigen. Wenn zum Beispiel ein Loch in ein Gussteil gebohrt werden muss, ist es besser, das Loch auf einer flachen Oberfläche als auf einer gekrümmten Oberfläche vorzusehen (damit der Bohrer nicht verläuft). Ein noch besserer Entwurf würde eine kleine Vertiefung als Zentrierung für Bohrvorgänge einbinden. Gussstücke sollten auch Merkmale aufweisen, durch die sie sich für die Endbearbeitung leicht auf Werkzeugmaschinen spannen lassen.

**Auswahl des Gießverfahrens:** Tabelle 5.7 gibt Attribute für Gießverfahren an, die bei der Auswahl eines Verfahrens helfen. Wie überall in diesem Buch erwähnt, lässt sich die Auswahl eines Verfahrens nicht von wirtschaftlichen Betrachtungen lösen. Für das Gießen wird dieser Aspekt in Abschnitt 5.12 diskutiert.

**Lage der Trennfuge (Trennebene):** Die Lage der Trennfuge bzw. -ebene ist wichtig und wirkt sich auf den Formenentwurf, leichtes Einfüllen, Anzahl und Gestaltung der erforderlichen Kerne, Supportmethode und Anschnittsystem aus. Ein Gussstück sollte in einer Form so ausgerichtet sein, dass sein größerer Teil relativ niedrig liegt und dass die Höhe des Gussstücks minimiert wird. Die Orientierung des Gussstücks bestimmt auch die Verteilung der Porosität, da sich zum Beispiel beim Gießen von Aluminium Porosität bilden und (durch den Auftrieb) nach oben wandern kann, wodurch die Porosität in den oberen Regionen des Gussstücks höher sein wird. Somit sollten kritische Oberflächen so orientiert sein, dass sie nach unten zeigen.

Für ein ordnungsgemäß orientiertes Teil lässt sich dann die Trennfuge festlegen (siehe Abbildung 5.10). Im Allgemeinen sollte die Trennfuge (a) entlang einer flachen ebenen Fläche verlaufen und nicht profiliert sein, (b) an den Ecken oder Rändern des Gussteils und nicht auf ebenen Oberflächen in der Mitte des Gussstücks liegen, sodass der *Grat* an der Trennfuge (das zwischen den beiden Formhälften herausquellende Material) nicht sichtbar ist, (c) so niedrig wie möglich relativ zum Gussstück bei Metallen mit geringerer Dichte wie zum Beispiel Aluminiumlegierungen und etwa in der halben Höhe bei dichteren Metallen wie zum Beispiel Eisen verlaufen. Typisch für den Sandguss ist, dass Läufe, Anschnitte und Eingusskanal im Unterkasten auf der Trennfuge angeordnet werden.

**Entwurf und Lage von Anschnittsystemen:** Anschnittsysteme sind die Verbindungen zwischen den Läufen und dem zu gießenden Teil. Für den Entwurf von Anschnittsystemen gelten unter anderem folgende Prinzipien:

- 1** Mehrere Anschnitte sind oftmals vorzuziehen und bei großen Teilen notwendig. Die Eingusstemperatur kann dadurch niedriger sein und die Temperaturgradienten im Gussteil werden reduziert.
- 2** Anschnitte sollten in dicke Bereiche des Gussteils einspeisen.
- 3** Eine Kehle sollte verwendet werden, wenn ein Anschnitt auf ein Gussteil trifft. Dadurch entsteht weniger Turbulenz als bei abrupten Übergängen.

- 4 Der am nächsten zum Eingusstrichter liegende Anschnitt sollte genügend weit vom Trichter entfernt sein, damit er sich leicht entfernen lässt. Dieser Abstand kann bei kleinen Gussstücken nur wenige Millimeter betragen und bis zu 500 mm bei großen Teilen reichen.
- 5 Die minimale Anschnittlänge sollte je nach dem zu gießenden Metall das Drei- bis Fünffache des Anschnittdurchmessers betragen. Ihr Querschnitt sollte ausreichend groß sein, um das Füllen des Formenhohlraums zu ermöglichen, und kleiner sein als der Querschnitt des Laufs.
- 6 Gebogene Anschnitte sollten vermieden werden. Sind sie dennoch notwendig, sollte unmittelbar an das Gussstück ein gerader Abschnitt angrenzen.

**Gestaltung der Läufe:** Der Lauf ist ein horizontaler Kanal, der das geschmolzene Metall vom Eingusskanal erhält und es an die Anschnitte weiterführt. Für einfache Teile wird ein einzelner Lauf verwendet, doch für komplizierte Gussstücke lassen sich auch zweiläufige Systeme konzipieren. Läufe werden auch verwendet, um Schlacke daran zu hindern, in die Anschnitte und den Formenhohlraum einzudringen. Üblicherweise werden Schlackeabscheider an den Enden von Läufen platziert. Der Lauf soll über die Anschnitte ragen, um sicherzustellen, dass das Metall in den Anschnitten von unterhalb der Oberfläche der Schmelze abgezogen wird.

**Entwurf weiterer Formenmerkmale:** Das Ziel beim Entwurf eines *Eingusskanals* (beschrieben in Abschnitt 5.4.1) besteht vor allem darin, die erforderlichen Einfüllmengen zu erreichen und dabei Ansaugen von Luft oder übermäßige Schlackebildung zu verhindern. Fließraten werden so bestimmt, dass Turbulenz vermieden, die Form aber im Vergleich zur erforderlichen Erstarrungszeit schnell gefüllt wird. Mit einem *Eingusstrichter* lässt sich gewährleisten, dass der Schmelzeffluss in den Eingusskanal nicht unterbrochen wird. Zudem sorgt die im Eingusstrichter vorhandene Schmelze dafür, dass die Schlacke während des Einfüllvorgangs auf der Schmelze schwimmt und nicht in den Formenhohlraum gelangt. Mit *Filtern* werden große Verunreinigungen zurückgehalten. Außerdem sind Filter geeignet, die Geschwindigkeit des Metalls zu verringern und Strömung laminarer zu machen. Mit *Abschreckplatten* ist es möglich, die Erstarrung des Metalls in einem bestimmten Bereich eines Gussteils zu beschleunigen.

**Einrichten von bewährten Arbeitsmethoden:** Es lässt sich feststellen, dass ein bestimmter Formenentwurf akzeptable wie auch defekte Teile produzieren kann und nur selten ausschließlich gute Teile oder ausschließlich defekte Teile ergibt. Somit sind Prozeduren der Qualitätskontrolle erforderlich, um auf fehlerhafte Gussstücke zu prüfen. Allgemein ist dabei auf folgende Punkte zu achten:

- 1 Die Produktion guter Gussstücke beginnt mit einer hochqualitativen Schmelze. Einfülltemperatur, Zusammensetzung der Schmelze, Gaseinschlüsse und Behandlungsprozeduren können die Qualität des in eine Form einzufüllenden Metalls beeinflussen.
- 2 Das Eingießen des Metalls sollte nicht unterbrochen werden, da dadurch Schlackeneinschlüsse und Verwirbelungen entstehen können. Der Gießspiegel des geschmolzenen Metalls im Formenhohlraum sollte kontinuierlich, nicht unterbrochen nach oben steigen.
- 3 Variierende Abkühlungsraten innerhalb des Gussstücks können Eigenspannungen hervorrufen. In kritischen Anwendungen kann deshalb eine Entspannungsglühung (Abschnitt 3.12) notwendig sein, um Verwerfungen der Gussstücke zu vermeiden.

### 5.11.3 Entwurfsprinzipien beim Gießen mit verlorenen Formen

Beim Gießen mit verlorenen Formen gibt es bestimmte Entwurfsüberlegungen, die hauptsächlich dem Formenwerkstoff, der Teilegröße und dem Gießverfahren zuzurechnen sind. Wichtige Entwurfsbetrachtungen sind folgende:

- 1 Formgestaltung:** Die Elemente in der Form müssen logisch und kompakt platziert werden, einschließlich der Anschnitte (wenn erforderlich). Die Erstarrung beginnt an einem Ende der Form und setzt sich in einer einheitlichen Front über das Gusstück fort, wobei die Speiser zuletzt erstarren. Traditionell basiert die Formgestaltung auf Erfahrungswerten. Allerdings setzen sich immer mehr kommerzielle Computerprogramme durch (siehe Abschnitt 5.11.5). Basierend auf der Finite-Differenzen-Methode erlauben diese Techniken die Simulation für das Befüllen der Form und die schnelle Bewertung von Formenaufbauten.
- 2 Speiserentwurf:** Wichtig beim Entwurf von Gusstücken ist die Größe und Anordnung von Speisern (siehe Abbildung 5.10). Mithilfe von Speisern lässt sich das Voranschreiten der Erstarrungsfront durch ein Gussteil entscheidend beeinflussen und sie sind ein wichtiges Element bei der oben beschriebenen Formgestaltung. Geschlossene Speiser sind zu bevorzugen, da sie die Wärme länger halten als offene Speiser. Für den Entwurf von Speisern gelten folgende fünf Grundregeln:
  - a. Das Metall im Speiser darf nicht erstarren, bevor das Gussteil erstarrt. Deshalb verzichtet man auf kleine Speiser und wählt zudem zylindrische Speiserformen mit kleinen Verhältnissen von Höhe zu Querschnitt. Am besten sind kugelförmige Speiser, mit denen allerdings schwierig zu arbeiten ist.
  - b. Das Speiservolumen muss groß genug sein, damit ausreichend flüssiges Metall vorhanden ist, um Schwindung im Gussteil zu kompensieren.
  - c. Verbindungen zwischen dem Gussteil und dem Speiser sollten keinen Wärmestau entwickeln, wo Schwindungsporosität auftreten kann.
  - d. Speiser müssen so angeordnet werden, dass flüssiges Metall an die Stellen geliefert werden kann, wo es am meisten benötigt wird.
  - e. Es muss ausreichend Druck vorhanden sein, um das flüssige Metall an die Orte in der Form zu treiben, wo es benötigt wird. Speiser sind demzufolge nicht so nützlich für Metalle mit geringer Dichte (wie zum Beispiel bei Aluminiumlegierungen) wie für Metalle mit hoher Dichte (wie Stahl und Gusseisen).
- 3 Bearbeitungszugabe:** Da die meisten Gusstücke mit verlorenen Formen zusätzliche Endbearbeitungsschritte (wie zum Beispiel spanende Bearbeitung und Schleifen) erfordern, sollten hierfür entsprechende Zugaben im Gussentwurf eingeplant werden. Bearbeitungszugaben, die in die Modellabmessungen eingerechnet werden, hängen vom Typ des Gussteils ab und nehmen mit der Größe und der Wandstärke von Gussteilen zu. Normalerweise liegen die Zugaben bei 2 bis 5 mm für kleine Gusstücke und bis zu mehr als 25 mm für große Teile.



### 5.11.4 Entwurfsprinzipien beim Gießen mit Dauerformen

Typische Entwurfsrichtlinien und Beispiele für das Gießen mit Dauerformen sind schematisch in ► Abbildung 5.35 für Druckguss dargestellt. Die Querschnitte wurden verringert, um die Erstarrungszeit zu reduzieren und Material zu sparen. Außerdem sind spezielle Überlegungen beim Entwurf von Werkzeugen für Druckguss anzustellen. Obwohl sich der Entwurf modifizieren lässt, um die Formschräge für bessere Maßhaltigkeit zu eliminieren, ist gewöhnlich ein Freiwinkel von  $0,5^\circ$  oder wenigstens  $0,25^\circ$  erforderlich. Andernfalls kann Scheuern (örtliche Reibverschweißung oder Haften von Material) zwischen dem Teil und den Gießgesenken auftreten und zu Teileverzug führen.

Druckgussteile sind endkonturnah und erfordern typischerweise nur das Entfernen von Anschnitten und etwas Putzen, um ausgetretenes Material und andere kleinere Defekte zu entfernen. Druckgussteile weisen gute Oberflächengüte und Maßhaltigkeit auf (siehe Tabelle 5.2) und erfordern im Allgemeinen keine Bearbeitungszugabe.

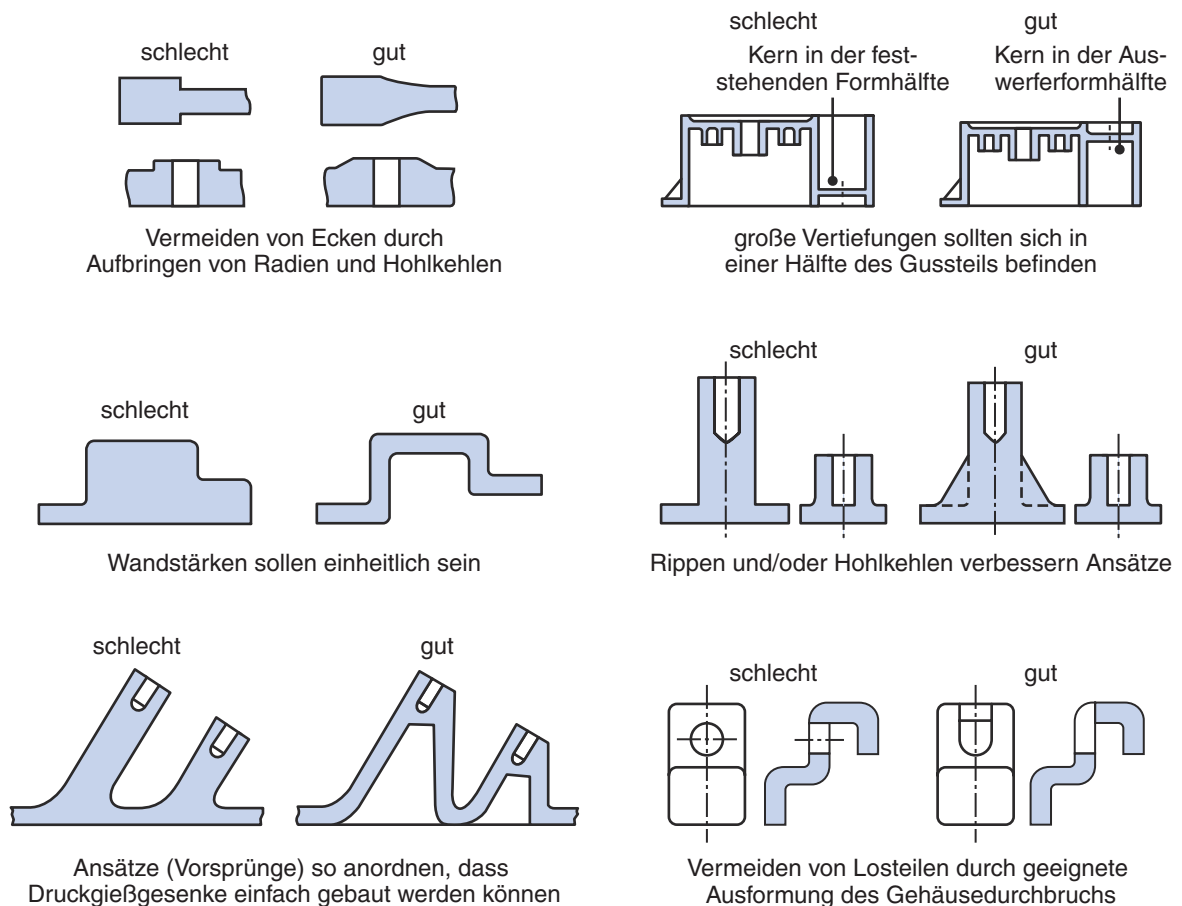


Abbildung 5.35: Entwurfsmodifikationen zur Vermeidung von Fehlern in Druckgussteilen.

### 5.11.5 Computersimulation von Gießprozessen

Da Gießvorgänge durch komplexe Interaktionen zwischen Material und Prozessvariablen gekennzeichnet sind, ist eine quantitative Untersuchung dieser Wechselwirkungen für den geeigneten Entwurf und die Produktion hochqualitativer Gussstücke wichtig. In der Vergangenheit haben derartige Untersuchungen erhebliche Schwierigkeiten bedeutet. Die Fortschritte in der Computertechnik und der Modellierung haben allerdings zu wichtigen Neuerungen im Hinblick auf die Modellierung verschiedener Aspekte beim Gießen geführt. Das betrifft unter anderem Flüssigkeitsströmungen, Wärmeübertragung und Mikrostrukturen, die sich während der Erstarrung und unter verschiedenen Gießprozessbedingungen entwickeln.

Die Modellierung von *Flüssigkeitsströmungen* basiert auf dem Gesetz von Bernoulli und der Kontinuitätsgleichung (Abschnitt 5.4). Damit lässt sich das Verhalten des Metalls beim Einfüllen in das Anschnittsystem und seine Strömung in den Formenhohlraum sowie die Geschwindigkeits- und Druckverteilungen im System vorhersagen. Große Fortschritte sind auch beim Modellieren der *Wärmeübertragung* beim Gießen zu verzeichnen. Diese Studien umfassen die Untersuchung der Kopplung von Strömungen und Wärmeübertragung und die Wirkungen von Oberflächenbeschaffenheit, thermischen Eigenschaften der beteiligten Werkstoffe und natürliche und erzwungene Konvektion beim Kühlen. Die Grenzflächeneigenschaften variieren während der Erstarrung, da sich eine Luftschicht zwischen dem Gussstück und der Formwand als Ergebnis der Schwindung bildet. Ähnliche Studien werden zur Modellierung der Entwicklung von *Mikrostrukturen* beim Gießen durchgeführt. Diese Studien umfassen den Wärmefluss, Temperaturgradienten, Keimbildung und Wachstum von Kristallen, Bildung von dendritischen und gleichachsigen Gefügen, Aufeinandertreffen von Körnern und Bewegung der Grenzfläche zwischen flüssigen und festen Anteilen während der Erstarrung.

Derartige Modelle sind heute in der Lage, zum Beispiel die Breite der breiartigen Zone (siehe Abbildung 5.6) während der Erstarrung und die Korngröße in Gussstücken vorherzusagen. Auch die Fähigkeit, Temperaturverteilungen zu berechnen, liefert Einblicke in die mögliche Ausbildung von Wärmestaus und die darauffolgende Entwicklung von Lunkern. Mit der Verfügbarkeit von benutzerfreundlichen Computern und Fortschritten im computerunterstützten Entwurf und in computerunterstützter Fertigung (siehe Anhang A) sind Modellierungstechniken immer leichter zu realisieren. Die Vorteile sind erhöhte Produktivität, verbesserte Qualität, erleichterte Planung und Kostenabschätzung sowie schnellere Reaktion auf Entwurfsänderungen. Für die Modellierung von Gießprozessen stehen heute verschiedene kommerzielle Softwareprogramme wie zum Beispiel Procast und Magmasoft zur Verfügung.

## 5.12 Wirtschaftliche Überlegungen beim Gießen

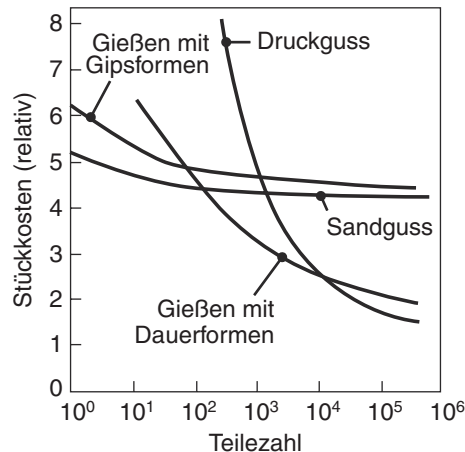
Bei der Untersuchung verschiedener Gießvorgänge wurde angemerkt, dass einige Verfahren aufwendiger sind als andere, bei manchen teure Gesenke und Vorrichtungen notwendig sind und manche viel Zeit bis zur Fertigstellung benötigen. Jeder dieser wichtigen Faktoren, die in Tabelle 5.2 zusammengefasst sind, beeinflusst die Gesamtkosten eines Gießvorgangs in unterschiedlichem Maße. Wie in Anhang B ausführlich beschrieben wird, fließen in die Gesamtkosten eines Produkts die Kosten für Material, Arbeit, Werkzeuge und Maschinen ein. Zu den Vorbereitungen für das Gießen eines Produkts gehören das Her-



stellen der Formen und Gesenke, die Werkstoffe, Maschinen, Zeit und Aufwand erfordern und zu den Kosten beitragen. Während beim Sandguss relativ geringe Kosten für die Formen entstehen, bestehen Druckgussgesenke aus teuren Werkstoffen und erfordern einen größeren Umfang an maschineller Bearbeitung und Vorbereitung. Einrichtungen mit Öfen und verwandter Ausrüstung sind ebenfalls für das Schmelzen und Einfüllen des geschmolzenen Metalls in die Formen oder Gesenke erforderlich und ihre Kosten hängen vom Grad der gewünschten Automatisierung ab. Schließlich entstehen auch Kosten beim Putzen und Begutachten der Gussstücke.

Der Umfang der erforderlichen Arbeiten bei Gießvorgängen kann beträchtlich variieren, je nach dem konkreten Prozess und dem Grad der Automatisierung. Zum Beispiel verlangt das Modellausschmelzverfahren viel Arbeitsaufwand aufgrund der großen Anzahl von Schritten, die bei diesem Vorgang anfallen. Umgekehrt können Operationen wie zum Beispiel hoch automatisierter Druckguss auch hohe Produktionsraten bei geringem Arbeitsaufwand gewährleisten.

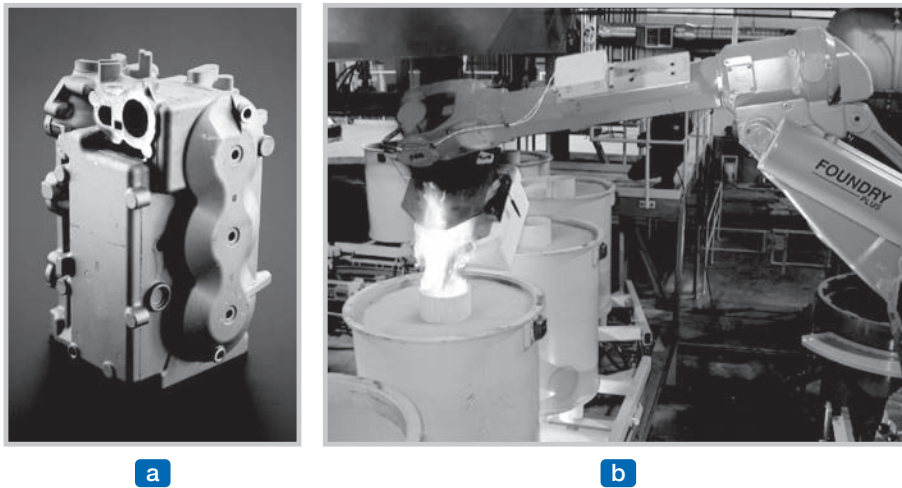
Die Kosten der Ausrüstung pro Gussteil (**Stückkosten**) fallen mit zunehmender Anzahl der zu gießenden Teile (► Abbildung 5.36). Somit können nachhaltig hohe Produktionsraten die hohen Kosten von Gesenken und Maschinen rechtfertigen. Wenn jedoch der Bedarf relativ gering ist, steigen die Kosten pro Gussstück schnell an. Dann ist es ökonomischer, die Teile durch Sandguss oder andere Herstellungsverfahren zu fertigen. Abbildung 5.36 schließt auch andere Gießverfahren ein, die für die Herstellung desselben Teils geeignet sind. Die beiden Verfahren (Sand- und Druckguss) produzieren Gussstücke mit erheblich verschiedenen Abmessungs- und Oberflächengüteparametern. Somit sollten nicht alle Fertigungsentscheidungen allein auf wirtschaftlichen Betrachtungen fußen. In der Praxis lassen sich Teile normalerweise nicht nur durch einen oder zwei Prozesse herstellen (siehe zum Beispiel Abbildung 1.6). Somit hängt die endgültige Entscheidung sowohl von wirtschaftlichen als auch von technischen Bewertungen ab. Die Aspekte der Konkurrenzfähigkeit von Fertigungsverfahren werden in Anhang B ausführlicher diskutiert.



**Abbildung 5.36:** Stückkosten beim Gießen eines Teils mit verschiedenen Verfahren. Wegen der hohen Form- und Maschinenkosten ist Druckgießen erst ab einer hohen Stückzahl rentabel.

## Fallstudie: Vollformguss von Motorblöcken und Zylinderköpfen

Zu den wichtigsten Teilen eines Verbrennungsmotors gehören Motorblock und Zylinderkopf. Beide sind im Betrieb erheblichen thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt. Diese Beanspruchungen sowie die Notwendigkeit, hochqualitative, kostengünstige und leichtgewichtige Konzepte zu realisieren, und die wirtschaftlichen Vorteile, die sich durch das Gießen komplizierter Geometrien ergeben, erfordern innovative Fertigungskonzepte für diese Bauteile. In den USA hat Mercury Casting erkannt, dass der Vollformguss alle diese Anforderungen erfüllen kann, und errichtete eine Lost-Foam-Gießstraße für die Fertigung von Motorblöcken und Zylinderköpfen aus Aluminium für marine Anwendungen (► Abbildung 5.37).

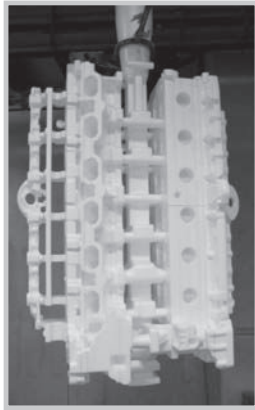


**Abbildung 5.37:** (a) Motorblock eines 45-kW-Dreizylindermotors, der im Vollformguss (Lost-Foam-Verfahren) hergestellt wurde. (b) Gießroboter, der flüssiges Aluminium in einen Formkasten füllt, welcher ein Polystyrolmodell enthält. Beim druckunterstützten Lost-Foam-Prozess wird nach dem Befüllen der Formkasten unter Druck gesetzt (etwa 1000 kPa).

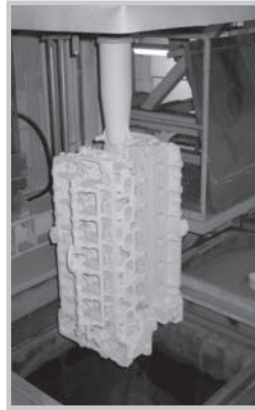
Das Lost-Foam-Verfahren kann als Weiterentwicklung des Vollformgießens betrachtet werden, welches seit mehr als 50 Jahren industriell genutzt wird. Diese Gießtechnik wurde anfangs meist für die Einzelfertigung großer Gussstücke eingesetzt. In Deutschland fand das Verfahren 1975 erstmals Anwendung in der Serienfertigung. Heute wird die Fertigung von Gussteilen mit Schaumstoffmodellen, die in gebundenem Sand eingebettet sind, als Vollformguss bezeichnet. Wird jedoch binderloser Sand verwendet, spricht man vom Lost-Foam-Verfahren.

Die Bayerischen Motorenwerke (BMW Group) stellen seit vielen Jahrzehnten hochqualitative Automobile der Fahrzeugoberklasse her, die sich durch herausragende Niveaus von Fahrleistung, Komfort, Sicherheitsstandards und Fertigungsqualität auszeichnen und daher Weltruf genießen. Die BMW Group erkannte sehr früh die Möglichkeiten der Lost-Foam-Gießtechnik. Nach kurzer Entwicklungszeit erfolgte schon 1995 die Verfahrensfreigabe und die Serienproduktion. Als einziges Unternehmen in Europa fertigt BMW komplexe 6-Zylinder-Reihenzyylinderköpfe und bestückt damit die Benzinmotoren der 3er-, 5er-, 6er- und 7er-Baureihen. Bisher wurden mit dieser Gießtechnik mehr als 1 Million Zylinderköpfe hergestellt.

## Fallstudie: Vollformguss von Motorblöcken und Zylinderköpfen (Fortsetzung)



a



b



c

**Abbildung 5.38:** Einige Verfahrensschritte bei der Lost-Foam-Herstellung von Zylinderköpfen von BMW-Ottomotoren. (a) Modelltraube bestehend aus zwei Zylinderkopfmodellen und einem Angussystem. (b) Die mit keramischer Schichte versehene Modelltraube wird in den Gießbehälter abgesenkt und dort mit Quarzsand umgeben. Am rechten Bildrand des Teilbilds erkennt man einen sandbefüllten Gießbehälter und den aus dem Sand ragenden Oberteil des Angussystems. (c) Die entformten Zylinderköpfe werden durch Sägen vom Angussystem getrennt.

Die Fertigung der Zylinderköpfe erfolgt in mehreren Schritten. Der erste Schritt umfasst die Herstellung der Modelltraube. Dazu wird expandierbares Polystyrol (EP-S) durch Polymerisation (Kapitel 10) aus Granulat und eingeschlossenem Pentan (als Treibmittel) hergestellt. Das Rohmaterial wird in einem Autoklaven mittels Wasserdampf bei 120 °C geschäumt, getrocknet und in Silos zwischengelagert. Mit diesen EP-S-Perlen werden die Schäumformen mittels Druckluft befüllt und die einzelnen Konturscheiben geformt (siehe Abschnitt 10.12.1). Sechs Konturscheiben werden jeweils zu einem Zylinderkopf-Modell verklebt. Zwei dieser Modelle bilden zusammen mit einem Angussystem eine Modelltraube (► Abbildung 5.38a), die danach mit einem wasserlöslichen, keramischen Schichteüberzug auf Basis von Aluminium- und Siliziumoxiden mittels Tauchen versehen wird. Die geschichteten Modelltrauben werden an entfeuchteter, erwärmter Luft getrocknet. Die Dicke des Schichteüberzugs beträgt etwa 200 µm. Diese Dicke hat sich als optimal erwiesen, um der Modelltraube ausreichende Stabilität beim Gießen zu verleihen, die Abfuhr der flüssigen und gasförmigen Zersetzungsprodukte des Schaumkerns während des Abgusses zu gewährleisten sowie die Gießzeit und die Formfüllung zu steuern.

Im nächsten Schritt werden die Gießtrauben in den Gießbehälter eingehängt, dieser mit einem ungebundenen Quarzsand befüllt, welcher danach durch Rütteln verdichtet wird (Abbildung 5.38b). Der Quarzsand muss sehr fließfähig und gut verdichtbar sein und wird kontinuierlich hinsichtlich dieser Eigenschaften geprüft. BMW vergießt eine untereutektische Aluminiumlegierung mit 6 Masse-% Si und 4 Masse-% Cu. Die Schmelze wird von Flüssigmetalllieferanten angeliefert und vor dem Abguss sorgfältig gereinigt, um aus der Atmosphäre aufgenommene Gase auszutreiben. Zusätzlich dazu

# Copyright

Daten, Texte, Design und Grafiken dieses eBooks, sowie die eventuell angebotenen eBook-Zusatzdaten sind urheberrechtlich geschützt. Dieses eBook stellen wir lediglich als **persönliche Einzelplatz-Lizenz** zur Verfügung!

Jede andere Verwendung dieses eBooks oder zugehöriger Materialien und Informationen, einschließlich

- der Reproduktion,
- der Weitergabe,
- des Weitervertriebs,
- der Platzierung im Internet, in Intranets, in Extranets,
- der Veränderung,
- des Weiterverkaufs und
- der Veröffentlichung

bedarf der **schriftlichen Genehmigung** des Verlags. Insbesondere ist die Entfernung oder Änderung des vom Verlag vergebenen Passwortschutzes ausdrücklich untersagt!

Bei Fragen zu diesem Thema wenden Sie sich bitte an: [info@pearson.de](mailto:info@pearson.de)

## Zusatzdaten

Möglicherweise liegt dem gedruckten Buch eine CD-ROM mit Zusatzdaten bei. Die Zurverfügungstellung dieser Daten auf unseren Websites ist eine freiwillige Leistung des Verlags. **Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.**

## Hinweis

Dieses und viele weitere eBooks können Sie rund um die Uhr und legal auf unserer Website herunterladen:

**<http://ebooks.pearson.de>**