

Birgit Awiszus
Jürgen Bast
Thomas Hänel
Mario Kusch (Hrsg.)

Grundlagen der Fertigungs- technik



7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Birgit Awiszus

Jürgen Bast

Thomas Hänel

Mario Kusch

Grundlagen der Fertigungstechnik

7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. Birgit Awiszus, Technische Universität Chemnitz

Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Bast, Freiberg

Dr.-Ing. Thomas Hänel, Technische Universität Chemnitz

Dr.-Ing. Mario Kusch, Technische Universität Chemnitz



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2020 Carl Hanser Verlag München

Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Frank Katzenmayer

Herstellung: le-tex publishing services, Leipzig

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Covergestaltung: Max Kostopoulos, unter Verwendung von Grafiken von

© istockphoto.com/PiotrWytrazek

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Druck und Bindung: Friedrich Pustet GmbH & Co. KG, Regensburg

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-45033-2

E-Book-ISBN 978-3-446-46066-9

Inhalt

Autorenverzeichnis	XV
Vorwort	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Literaturverzeichnis	4
2 Urformen	5
2.1 Einführung	5
2.1.1 Einordnung des Urformens in die Fertigungstechnik	5
2.1.2 Einordnung in den Einzelteilfertigungsprozess	6
2.1.3 Blockgießen	7
2.1.4 Stranggießen	7
2.1.5 Formgießen	8
2.1.6 Gussabnehmer	9
2.2 Verfahrensprinzipien beim Formgießen	9
2.2.1 Einleitung	9
2.2.2 Gieß- bzw. Formverfahren	10
2.2.3 Gussteilherstellung in Formen für den einmaligen Gebrauch ..	10
2.2.3.1 Einleitung	10
2.2.3.2 Handformerei	12
2.2.3.3 Maschinenformerei	14
2.2.3.4 Spezialformverfahren	15
2.2.3.5 Generative Fertigungsverfahren zur Gussteilerzeugung	21
2.2.4 Gussteilherstellung in Formen für den mehrmaligen Gebrauch (Dauerformen)	24
2.2.4.1 Einleitung	24
2.2.4.2 Schwerkraftkokillengießverfahren	25
2.2.4.3 Druckgießverfahren	26

2.2.4.4	Arten von Druckgießmaschinen	27
2.2.4.5	Verfahrensablauf beim Druckgießen	27
2.2.4.6	Thixogießverfahren	28
2.2.4.7	Niederdruckgießverfahren	29
2.2.4.8	Schleudergießverfahren	30
2.3	Gusswerkstoffe	31
2.3.1	Einführung	31
2.3.2	Kennzeichnende Kenngrößen der Gusswerkstoffe	31
2.3.2.1	Niedrige Gießtemperatur	33
2.3.2.2	Fließ- und Formfüllungsvermögen	34
2.3.2.3	Volumenänderung beim Schmelzen und Erstarren ..	35
2.3.3	Arten von Gusswerkstoffen	36
2.3.3.1	Gusseisenwerkstoffe	36
2.3.3.2	Stahlguss	37
2.3.3.3	Aluminium- und Magnesiumgusswerkstoffe	37
2.3.3.4	Kupfergusswerkstoffe	37
2.3.3.5	Mechanische Kennwerte wichtiger Gusswerkstoffe ..	38
2.4	Gussteilgestaltung	38
2.5	Literaturverzeichnis	44
3	Umformen	47
3.1	Begriffe, Ordnungsgesichtspunkte	47
3.1.1	Definitionen und Abgrenzung	47
3.1.2	Einordnungskriterien	47
3.2	Ausgewählte Grundlagen der Umformtechnik	51
3.2.1	Plastomechanische Grundlagen	51
3.2.2	Werkstoffaufbau	57
3.2.3	Kristallbaufehler	61
3.2.4	Fließkurve	63
3.3	Typische Prozesse und Verfahren der umformenden Halbzeugfertigung	69
3.3.1	Wichtige Prozessketten der Halbzeugfertigung	69
3.3.2	Ausgewählte Umformverfahren zur Halbzeugfertigung	71
3.3.2.1	Verfahrensübersicht Walzen	71
3.3.2.2	Verfahrensübersicht Freiformen	73
3.3.2.3	Verfahrensübersicht Durchdrücken - Strangpressen	76
3.3.2.4	Verfahrensübersicht Durchziehen	78
3.3.2.5	Verfahrensübersicht Biegeumformen	80

3.4	Ausgewählte Teilefertigerungsverfahren der Massivumformung	81
3.4.1	Stauchen	81
3.4.1.1	Verfahrensübersicht Stauchen	81
3.4.1.2	Bedeutung und Besonderheiten des Stauchens	83
3.4.2	Freiformschmieden und Rundkneten (Feinschmieden, Rundhämmern)	85
3.4.2.1	Verfahrensübersicht Freiformschmieden	85
3.4.2.2	Bedeutung und Besonderheiten des Freiformschmiedens	86
3.4.2.3	Verfahrensübersicht Rundkneten	87
3.4.2.4	Bedeutung und Besonderheiten des Rundknetens ...	87
3.4.3	Gesenkschmieden und Warmpressen	88
3.4.3.1	Verfahrensübersicht Gesenkschmieden und Warmpressen mit Grat	88
3.4.3.2	Verfahrensübersicht Gesenkschmieden und Warmpressen ohne Grat	90
3.4.3.3	Verfahrensübersicht zur Herstellung der Anfangsformen und Massenverteilungs- Zwischenformen für das Gesenkschmieden und Warmpressen	92
3.4.3.4	Bedeutung und Besonderheiten des Gesenkschmiedens und Warmpressens	95
3.4.4	Kaltfließpressen und Kaltschmieden	98
3.4.4.1	Verfahrensübersicht Kaltfließpressen und Kaltschmieden	99
3.4.4.2	Bedeutung und Besonderheiten des Kaltfließpressens und Kaltschmiedens	103
3.4.5	Walzverfahren der Teilefertigung	105
3.4.5.1	Verfahrensübersicht Walzverfahren zur Erzeugung bzw. Veränderung von Werkstückgrundformen	106
3.4.5.2	Verfahrensübersicht Walzverfahren zur Erzeugung von Nebenformen	112
3.4.5.3	Verfahrensübersicht Walzverfahren zur Feinbearbeitung von Oberflächen	114
3.5	Ausgewählte Teilefertigerungsverfahren der Blechumformung	115
3.5.1	Verfahren zur Herstellung ebener Blechformteile durch Trennverfahren	115
3.5.1.1	Verfahrensübersicht Zerteilverfahren	116
3.5.1.2	Bedeutung und Besonderheiten des Scherschneidens	118
3.5.2	Verfahren zur Herstellung räumlicher Blechformteile	121

3.5.2.1	Verfahrensübersicht Zug-Druck-Umformverfahren zur Erzeugung bzw. Veränderung räumlicher Blechformteile	121
3.5.2.2	Verfahrensübersicht Druck-Umformverfahren zur Erzeugung bzw. Veränderung räumlicher Blechformteile	126
3.5.2.3	Verfahrensübersicht Zug-Umformverfahren zur Erzeugung bzw. Veränderung räumlicher Blechformteile	129
3.5.2.4	Verfahrensübersicht Biege-Umformverfahren zur Erzeugung bzw. Veränderung räumlicher Blechformteile	132
3.6	Literaturverzeichnis	134
4	Trennen	137
4.1	Definition und Einteilung	137
4.2	Trennen durch Spanen	138
4.2.1	Entwicklung und Bedeutung	139
4.2.2	Grundbegriffe beim Spanen	140
4.2.2.1	Kinematik und Geometrie des Spannungsvorganges ..	141
4.2.2.2	Geometrie am Schneidteil spanender Werkzeuge ...	146
4.2.3	Spanbildung	150
4.2.3.1	Vorgänge bei der Spanbildung	150
4.2.3.2	Spanarten und Spanformen	151
4.2.4	Kräfte beim Spanen	154
4.2.4.1	Bedeutung	154
4.2.4.2	Spanungskraft und Spanungskraftkomponenten ...	154
4.2.4.3	Einflussgrößen auf die Kräfte	155
4.2.5	Werkzeugverschleiß und Werkzeugstandzeit	157
4.2.5.1	Verschleißursachen und Verschleißarten	157
4.2.5.2	Verschleißformen und Messgrößen	158
4.2.5.3	Standbegriffe	159
4.2.5.4	Standzeitermittlung	160
4.2.6	Werkzeugschneidstoffe für Werkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide	163
4.2.7	Kühlschmierstoffe	166
4.2.8	Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden	168
4.2.8.1	Drehen	168
4.2.8.2	Fräsen	170
4.2.8.3	Bohren, Senken, Reiben	173
4.2.8.4	Hobeln und Stoßen	176
4.2.8.5	Räumen	178

4.2.9	Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden	180
4.2.9.1	Schleifen mit rotierenden Werkzeugen	180
4.2.9.2	Honen	186
4.2.9.3	Läppen	189
4.2.10	Zeit-, Kraft- und Leistungsberechnung bei ausgewählten Verfahren	191
4.2.10.1	Hauptzeitberechnung	191
4.2.10.2	Kraft- und Leistungsberechnung Drehen	193
4.2.10.3	Kraft- und Leistungsberechnung Fräsen	196
4.2.10.4	Kraft- und Leistungsberechnung Schleifen	201
4.2.11	Spezielle Entwicklungen	203
4.2.11.1	Ultraschallunterstützte Zerspanung	203
4.2.11.2	Kryogene Zerspanung	205
4.3	Trennen durch Abtragen	206
4.3.1	Funkenerosion	208
4.3.1.1	Grundlagen	209
4.3.1.2	Anlagentechnik zum funkenerosiven Schneiden	211
4.3.1.3	Anlagentechnik zum funkenerosiven Senken	213
4.3.2	Wasserstrahltechnologie	221
4.3.2.1	Verfahrensgrundlage	222
4.3.2.2	Anlagentechnik	225
4.3.2.3	Verfahrensmerkmale (Kerbtiefe, Schnittfläche, Schnittfuge)	229
4.3.2.4	Anwendungsgebiete	231
4.3.2.5	Zusammenfassung der Vor- und Nachteile des Verfahrens	231
4.3.3	Autogenes Brennschneiden	232
4.3.3.1	Verfahrensmerkmale und Anwendungshinweise	232
4.3.3.2	Anwendungsbereich - Vergleich zu anderen Trennverfahren	234
4.3.4	Laserstrahlschneiden	235
4.3.4.1	Verfahrensmerkmale und Anwendungshinweise	235
4.3.4.2	Anwendungsbereich - Vergleich zu anderen Trennverfahren	237
4.3.5	Plasmaschneiden	238
4.3.5.1	Verfahrensmerkmale und Anwendungshinweise	238
4.3.5.2	Anwendungsbereich - Vergleich zu anderen Trennverfahren	240
4.4	Literaturverzeichnis	241

5	Fügen	245
5.1	Einführung in die Fügetechnik	245
5.1.1	Einteilung der Fügeverfahren	245
5.1.2	Wirkprinzipien beim Fügen	246
5.1.3	Fügbarekeit	247
5.2	Zusammensetzen	248
5.3	Füllen	250
5.4	An- und Einpressen	251
5.4.1	Überblick	251
5.4.2	Schrauben	252
5.4.3	Fügen durch Pressverbindung	256
5.5	Fügen durch Urformen	258
5.6	Fügen durch Umformen	260
5.6.1	Überblick	260
5.6.2	Fügen durch Umformen drahtförmiger Körper	261
5.6.3	Fügen durch Umformen bei Blech-, Rohr- und Profilteilen	261
5.6.3.1	Überblick	261
5.6.3.2	Bördeln und Falzen	263
5.6.3.3	Durchsetzfügen	264
5.6.3.4	Fließblochformendes Schrauben	265
5.6.4	Fügen durch Nietverfahren	266
5.6.4.1	Überblick	266
5.6.4.2	Stanznieten	267
5.6.4.3	Nieten	269
5.6.4.4	Blindnieten	270
5.6.4.5	Schließringnieten	271
5.7	Fügen durch Schweißen	272
5.7.1	Überblick	272
5.7.2	Pressschweißen	273
5.7.2.1	Überblick	273
5.7.2.2	Pressschweißen durch elektrische Gasentladung	274
5.7.2.3	Pressschweißen durch Bewegung von Masse	276
5.7.2.4	Pressschweißen durch elektrischen Strom	278
5.7.2.5	Diffusionsschweißen	281
5.7.3	Schmelzschweißen	282
5.7.3.1	Überblick	282
5.7.3.2	Schmelzschweißen durch Gas	283
5.7.3.3	Schmelzschweißen durch elektrische Gasentladung	284
5.7.3.4	Schmelzschweißen durch Strahlung	291

5.8	Fügen durch Löten	294
5.8.1	Überblick	294
5.8.2	Löten durch feste Körper	297
5.8.3	Löten durch Flüssigkeit	298
5.8.4	Löten durch Gas	298
5.8.5	Löten durch Strahlung	299
5.8.6	Löten durch elektrischen Strom	300
5.8.7	Ofenlöten	301
5.8.8	Löten durch elektrische Gasentladung	302
5.9	Kleben	303
5.9.1	Überblick	303
5.9.2	Kleben mit physikalisch abbindenden Klebstoffen	305
5.9.3	Kleben mit chemisch abbindenden Klebstoffen	306
5.10	Textiles Fügen	307
5.11	Literaturverzeichnis	311
6	Beschichten	313
6.1	Einführung	313
6.2	Beschichten aus dem flüssigen Zustand	315
6.2.1	Überblick	315
6.2.2	Schmelztauchen	315
6.2.3	Lackieren	316
6.2.4	Emaillieren	318
6.3	Beschichten aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand	319
6.3.1	Überblick	319
6.3.2	Wirbelsintern	320
6.3.3	Elektrostatisches Beschichten	320
6.3.4	Thermisches Spritzen	321
6.4	Beschichten durch Schweißen	325
6.5	Beschichten aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand	327
6.5.1	Überblick	327
6.5.2	PVD-Verfahren	328
6.5.3	CVD-Verfahren	330
6.6	Beschichten aus dem ionisierten Zustand	330
6.6.1	Überblick	330
6.6.2	Galvanisches Beschichten	331
6.6.3	Chemisches Beschichten	332
6.7	Literaturverzeichnis	333

7	Stoffeigenschaftsändern durch Wärmebehandeln	335
7.1	Definitionen, Ziele, metallkundliche Effekte und Abgrenzung	335
7.2	Wärmebehandlungsprozesse für Stähle	340
7.2.1	Thermische Verfahren	340
7.2.1.1	Prozessgrundlagen	340
7.2.1.2	Charakterisierung wesentlicher Verfahren	345
7.2.2	Thermochemische Verfahren	351
7.2.2.1	Prozessgrundlagen	351
7.2.2.2	Charakterisierung wesentlicher Verfahren	353
7.2.3	Thermomechanische Verfahren	358
7.2.3.1	Prozessgrundlagen	358
7.2.3.2	Charakterisierung wesentlicher Verfahren	360
7.3	Fertigungstechnische Realisierung	362
7.4	Stellung der Wärmebehandlung im Fertigungsprozess	365
7.5	Literaturverzeichnis	368
8	Generative Fertigungsverfahren	371
8.1	Prototypen in der Produktentwicklung	371
8.2	Das Grundprinzip generativer Fertigungsverfahren	372
8.3	Die informationstechnische Prozesskette	374
8.3.1	3D-CAD-Modellierung	374
8.3.2	STL-Schnittstelle	375
8.3.3	Datenaufbereitung	376
8.3.4	Bauprozess	377
8.3.5	Finish-Bearbeitung und Folgeverfahren	378
8.4	Industrielle generative Fertigungsverfahren	379
8.4.1	Polymerisation	379
8.4.2	Schmelzen und Verfestigen von Pulvern	382
8.4.3	Ausschneiden und Fügen von Folien	385
8.4.4	Schmelzen und Verfestigen aus der festen Phase	387
8.4.5	Verkleben von Pulvern mit Bindersystemen	389
8.5	Folgetechnologien und Rapid Tooling	391
8.5.1	Zielwerkstoff Kunststoff	391
8.5.2	Zielwerkstoff Metall	393
8.6	Literaturverzeichnis	394

9	Leitlinie zur Gestaltung von Fertigungsprozessen	395
9.1	Einführung	395
9.1.1	Aufgaben und Ziele der Fertigungsprozessgestaltung	395
9.1.2	Einflussgrößen auf den Planungsaufwand	397
9.2	Grundlagen und Begriffe	399
9.2.1	Gliederung der Fertigungsprozesse nach Prozesselementen	399
9.2.2	Gliederung der Fertigung nach der Mengenstruktur	401
9.2.3	Gliederung der Fertigung nach der Organisationsstruktur	402
9.3	Ausarbeiten von Fertigungsprozessen der Teilefertigung	405
9.3.1	Vorbetrachtungen	405
9.3.2	Prüfen der konstruktiven/funktionellen Anforderungen	405
9.3.3	Funktionale Flächen am Einzelteil	406
9.3.4	Bestimmflächen	410
9.3.5	Auswahl der Arbeitsweise	411
9.3.6	Generierendes Ausarbeiten des Fertigungsprozesses	412
9.3.6.1	Ermittlung der technischen Elemente (Bearbeitungselemente) und des Rohteiles	413
9.3.6.2	Prozessgrobentwurf	414
9.3.6.3	Prozessfeinentwurf	416
9.4	Vergleich technologischer Varianten	423
9.4.1	Entscheidungskriterien	423
9.4.2	Methoden zur Berechnung vergleichbarer Kosten	424
9.4.2.1	Kostenschema	424
9.4.2.2	Berechnung der direkt zurechenbaren technologischen Einzelkosten	426
9.4.2.3	Zuschlagskalkulation	428
9.4.2.4	Stundenkostenkalkulation	432
	Stichwortverzeichnis	439

Autorenverzeichnis

■ Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. Birgit Awiszus, Technische Universität Chemnitz

Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Bast, Freiberg

Dr.-Ing. Thomas Hänel, Technische Universität Chemnitz

Dr.-Ing. Mario Kusch, Technische Universität Chemnitz

■ Autoren

Kapitel 1

Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. Birgit Awiszus, Technische Universität Chemnitz

Kapitel 2

Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Bast, Freiberg

Dr.-Ing. Marcel Graf, Technische Universität Chemnitz

Kapitel 3

Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. B. Awiszus, Technische Universität Chemnitz

Dr.-Ing. Marcel Graf, Technische Universität Chemnitz

Dr.-Ing. Sebastian Härtel, Technische Universität Chemnitz

Kapitel 4

Dr.-Ing. Jan Glühmann, Westsächsische Hochschule Zwickau

Dr.-Ing. Thomas Hänel, Technische Universität Chemnitz

Dipl.-Ing. Holger Letsch, Technische Universität Chemnitz

Dr. rer. nat. Rolf Pilz, Chemnitz

Prof. Dr. sc. techn. Michael Schneeweiß, Westsächsische Hochschule Zwickau

Kapitel 5

Dr.-Ing. Mario Kusch, Technische Universität Chemnitz

Kapitel 6

Dr.-Ing. Mario Kusch, Technische Universität Chemnitz

Kapitel 7

Dipl.-Ing. Ulrich Thieme, Chemnitz

Kapitel 8

Dr.-Ing. Thomas Hänel, Technische Universität Chemnitz

Dr.-Ing. Frank Rommel, Chemnitz

Kapitel 9

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Göpfert, Fachhochschule Vorarlberg (Dornbirn)

Dr.-Ing. Thomas Hänel, Technische Universität Chemnitz

Vorwort

Dieses Buch entstand aus der Vorlesungsreihe „Fertigungslehre“ an der Technischen Universität Chemnitz sowie der Vorlesungsreihe „Grundlagen der Fertigungstechnik“ an der Westsächsischen Hochschule Zwickau. Die Ihnen vorliegende nunmehr 7. Auflage des Fachbuches „Grundlagen der Fertigungstechnik“ wurde vom Autorenteam vollständig inhaltlich und grafisch überarbeitet.

Hauptanliegen der Herausgeber ist es, den Studentinnen und Studenten in technisch geprägten Bachelor- und Diplomstudiengängen, wie z. B. in den Fachrichtungen Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen sowie integralen Studiengängen solides Basiswissen der Teilefertigung in der Einheit von Theorie der Fertigungsverfahren und Fertigungsprozessgestaltung zu vermitteln.

Das Lehrbuch behandelt die wesentlichen Grundlagen der Verfahrenshauptklassen nach DIN 8580, d. h. Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Stoffeigenschaftsändern (Wärmebehandeln), wird ergänzt um die generativen Fertigungsverfahren (3D-Druck-Verfahren) und schließt mit einem Leitfaden zur Fertigungsprozessgestaltung. Die Behandlung aller Verfahrensmodifikationen ist nicht Gegenstand dieses Lehrbuches.

Die Autoren haben sich bemüht, sich auf solche Wissensfelder zu beschränken, die bei der ständigen Weiterentwicklung der Fertigungsverfahren und Fertigungsmethoden als wissenschaftliche Grundlage längerfristig Bestand haben.

Die Autoren danken besonders Frau *Ute Eckardt*, Frau *Christina Kubiak* und Herrn *Frank Katzenmayer* vom Carl Hanser Verlag für das Vertrauen in das Fachbuch, die Anregungen und kooperative Zusammenarbeit.

Birgit Awiszus

Jürgen Bast

Thomas Hänel

Mario Kusch

1

Einleitung

Die Fertigungslehre vermittelt die theoretischen Grundlagen zur Fertigungstechnik und zur Gestaltung von Fertigungsprozessen der Teilefertigung. Die Fertigungstechnik bezeichnet die Gesamtheit aller Fertigungsverfahren und Fertigungsmittel zur Herstellung geometrisch bestimmter, fester Körper und beinhaltet vor allem die materiell-technischen Elemente eines Fertigungsprozesses. Dieser spiegelt die Gesamtheit aller auf einen Arbeitsgegenstand (Einzelteil) bezogenen und aufeinander folgenden Arbeitsgänge zur schrittweisen Überführung von einem Anfangs- in einen Endzustand wider. Wesentliche Elemente sind dabei die

- Fertigungsverfahren,
- Fertigungseinrichtungen,
- Fertigungsmittel und
- Fertigungsstoffe.

Dabei schließen die Fertigungsverfahren die technische Anwendung naturwissenschaftlicher Effekte sowie Wirkprinzipien zur Teilefertigung ein, während die Fertigungsmittel wie beispielsweise Maschinen, Vorrichtungen, Werkzeuge, Prüfmittel u. a. zur Änderung von Form, Substanz oder Gefügeausbildung eines Bauteils erforderlich sind.

Aufgrund der Vielzahl bekannter und zukünftiger Fertigungsverfahren erfolgt die Einordnung der einzelnen Verfahrensbereiche in ein überschaubares und konsistentes System. Verbindliche Festlegungen zur systematischen Einteilung der Fertigungsverfahren sind mit der Norm DIN 8580 [1.1] gegeben, deren Ordnungsprinzipien in Bild 1.1 Systematik der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 dargestellt sind.

		Fertigungshauptgruppen					
		1. Urformen	2. Umformen	3. Trennen	4. Fügen	5. Beschichten	6. Stoffeigenschaftändern
Systematisierungs- gesichtspunkte	Zusammenhalt	schaffen	beibehalten	vermindern	vermehrten	vermehrten	vermehrten
							vermindern
							beibehalten
	Form	schaffen	ändern	ändern	ändern	beibehalten	beibehalten
	Stoffteilchen					einbringen	einbringen
							aussondern
					umlagern		

Bild 1.1 Systematik der Fertigungsverfahren nach DIN 8580

Für die Auslegung von Fertigungsprozessen ist es notwendig, die wirtschaftliche Herstellung oder Veränderung eines durch den Konstrukteur vorgegebenen Einzelteils vorzubereiten. Dazu gehören u. a. die

- Analyse der Werkstoffbearbeitung und -verarbeitung,
- Anwendung und Entwicklung von Fertigungsverfahren,
- Verfahrens- und Werkstoffsubstitution,
- Einflussnahme auf die fertigungsgerechte Konstruktion von Einzelteilen und Baugruppen,
- Einflussnahme auf die optimale Wahl und Gestaltung von Fertigungsmitteln sowie Werkzeugen und
- Vorausbestimmung der notwendigen Kennwerte für den wirtschaftlich technologischen Prozess.

Ausgehend vom Fertigungsziel, Teile mit dem geforderten Gebrauchswert, einer möglichst geringen Anzahl von Prozessstufen und mit minimalem Aufwand an Zeit und Kosten herzustellen, werden in diesem Buch die wichtigsten industriellen Verfahren theoretisch und in ihrer Anwendung dargestellt.

Schwerpunkt der sich anschließenden Kapitel ist die Vermittlung des Basiswissens zur Herstellung geometrisch bestimmter fester Körper aus verschiedenartigen Werkstoffen und mit unterschiedlicher Qualität. Dazu zeigt Bild 1.2 Mögliche Fertigungsverfahren zur Herstellung einer Kurbelwelle die Vielfalt der Herstellungsmöglichkeiten eines Bauteils am Beispiel einer Pkw-Kurbelwelle, die sich in den jeweiligen Kapiteln zu den Fertigungshauptgruppen nach DIN 8580 wiederfinden. Dabei werden auch neuere Entwicklungen und Tendenzen in der Fertigungstechnik behandelt, wie z. B. die generativen Fertigungsverfahren.

Das Lehrbuch schließt mit einem Leitfaden zur Gestaltung von Fertigungsprozessen ab, in dem Grundlagen und Methoden der Arbeitsplanung beschrieben werden.

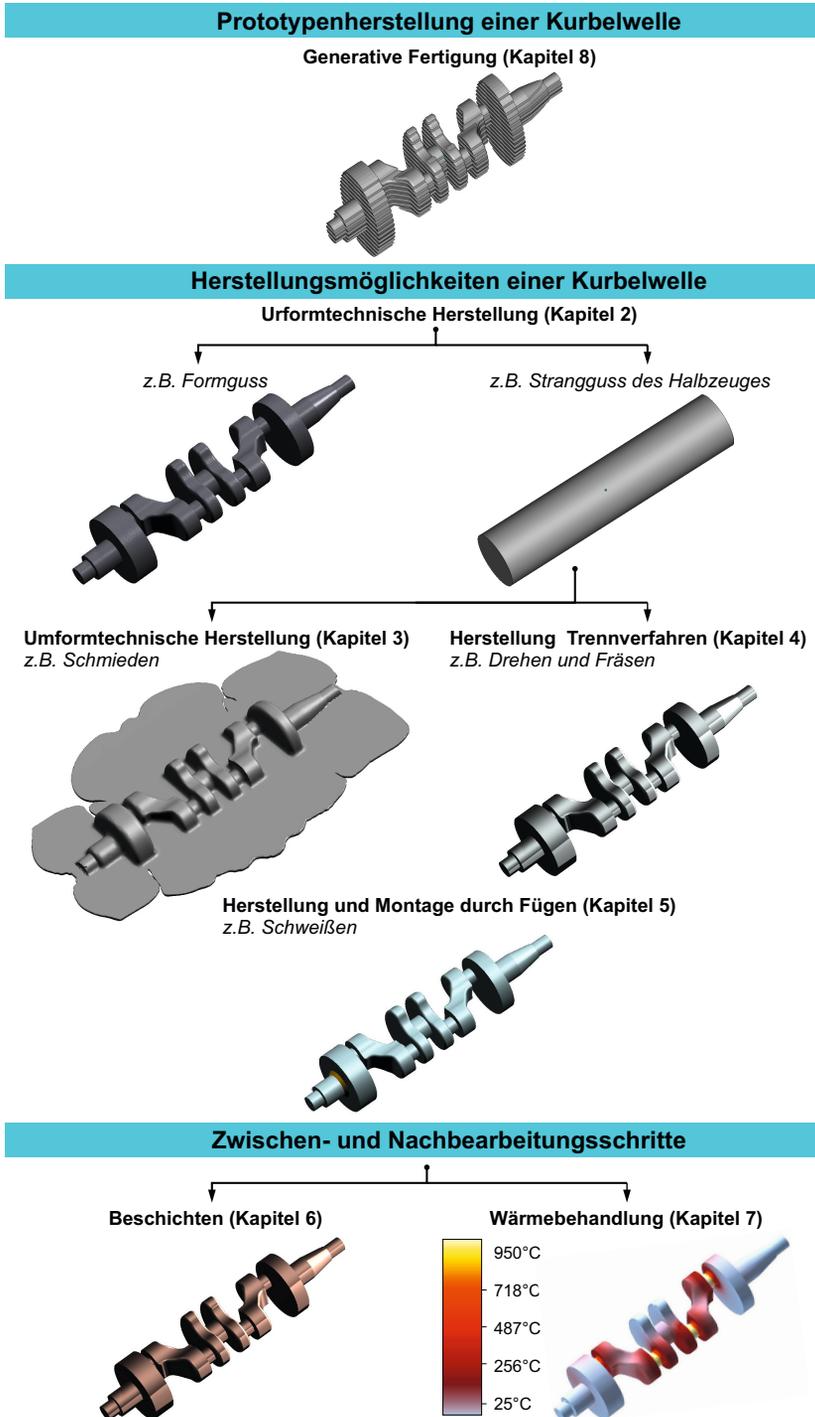


Bild 1.2 Mögliche Fertigungsverfahren zur Herstellung einer Kurbelwelle

■ 1.1 Literaturverzeichnis

[1.1] DIN 8580 (2003-09): Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth Verlag.

2

Urformen

■ 2.1 Einführung

2.1.1 Einordnung des Urformens in die Fertigungstechnik

In Übereinstimmung mit der DIN 8580 und dem Schema der Fertigungsverfahren (Bild 1.1) wird das Urformen als eines der sechs möglichen Fertigungsverfahren zur Erzeugung von Bauteilen eingeordnet. Unter diesen kann der Bauteilentwickler auswählen, wobei ein Vergleich zwischen den Verfahren Umformen, Trennen, Fügen und den neuartigen generativen Fertigungsverfahren anzustellen ist.



Urformen ist das Fertigen eines festen Körpers aus einem formlosen Stoff durch Schaffen des Zusammenhalts. Hierbei treten die Stoffeigenschaften des Werkstoffes bestimmbar in Erscheinung. Als formloser Stoff werden Gase, Flüssigkeiten, Pulver, Fasern, Späne und Granulat verwendet.

Um den festen Zusammenhalt zu schaffen, sind in Abhängigkeit vom formlosen Stoff beispielhaft folgende Verfahren im Einsatz:

- aus dem flüssigen Zustand → **Gießen**,
- aus dem plastischen oder teigigen Zustand → **Extrahieren**,
- aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand → **Sintern**,
- aus dem ionisierten Zustand → **Galvanoplastik**.

Die meisten urgeformten Bauteile werden aus dem flüssigen Zustand heraus erzeugt. Aus diesem Grund wird im vorliegenden Buch auch nur dieses Verfahren vorgestellt [2.1 – 2.3].

2.1.2 Einordnung in den Einzelteilfertigungsprozess

Im technologischen Prozess der Einzelteilfertigung stellt das Urformen (Gießen) die Ausgangsstufe aller metallischen Einzelteile dar. Dabei lässt sich das in Bild 2.1 gezeigte Schema aufstellen.

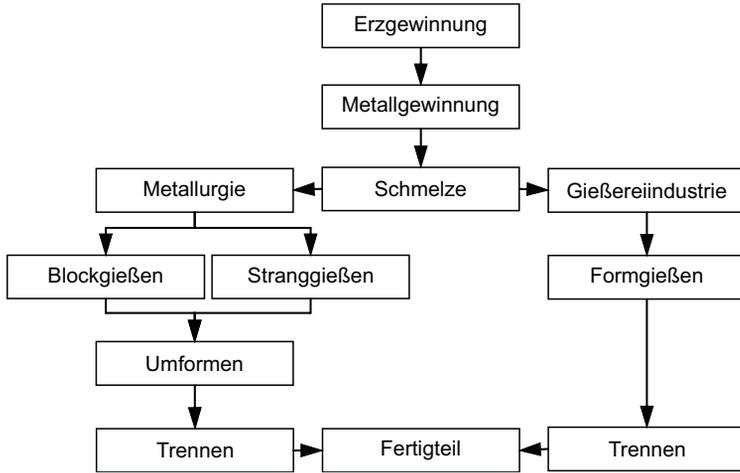


Bild 2.1 Urformen im technologischen Prozess der Fertigteilfertigung

Unter Berücksichtigung der Hauptgruppen der Fertigungsverfahren ergibt sich der Prozessablauf wie in Bild 2.2. Dabei unterscheidet man im Wesentlichen zwei Prozessvarianten. In Abhängigkeit von der Vergießart der Schmelze führen diese Prozessvarianten zu unterschiedlichen nachfolgenden Vorgängen, um aus dem Urformprodukt ein Fertigteil herzustellen.

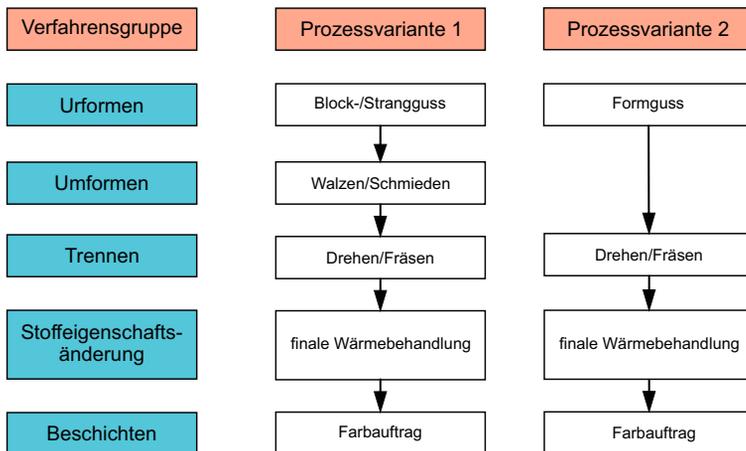


Bild 2.2 Prozessabläufe zur Herstellung von Fertigteilen (stark vereinfacht)

2.1.3 Blockgießen

Beim Blockgießen wird das flüssige Metall (insbesondere Stahl) in metallische Dauerformen, sogenannte Kokillen, gegossen (Bild 2.3). Durch Wärmeabfuhr erstarrt die Schmelze und es entstehen Blöcke oder Brammen, die Halbzeuge darstellen und durch andere Hauptgruppenverfahren weiter verarbeitet werden müssen.

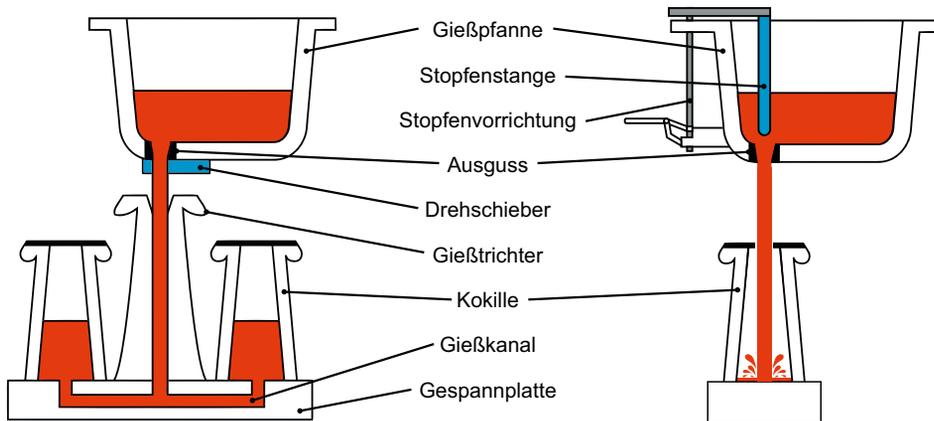


Bild 2.3 Steigender Blockguss mit bis zu acht Kokillen (links) und fallender Guss (rechts)

2.1.4 Stranggießen

Aufgrund der aufwendigen Vorbereitung der Blockgießkokillen, ihrer Einschränkung in den Abmessungen und des hohen Anteiles an erforderlichem Speisematerial zur Kompensation der Lunkererscheinungen wurde das Stranggießverfahren entwickelt. Bei diesem Verfahren wird das flüssige Metall in eine beidseitig offene (nur zu Beginn des Prozesses) am Boden verschlossene, wassergekühlte Kokille (Kristallisator) aus Kupfer gegossen. Der zu Prozessbeginn die Kokille verschließende, sogenannte Anfahrblock gewährleistet das Füllen der Kokille mit dem flüssigen Metall (Bild 2.4).

Durch die Wärmeabfuhr erstarrt die Schmelze vom Rand und Boden her, sodass beim anschließenden Absenken des Anfahrblocks ein Strang aus der Kokille gezogen werden kann, der im Inneren noch flüssiges Metall enthält. Durch ein kontinuierliches Nachgießen der Schmelze in die Kopfseite der Kokille und dem darauf abgestimmten Absenken entsteht ein endloser Strang [2.4, 2.5].

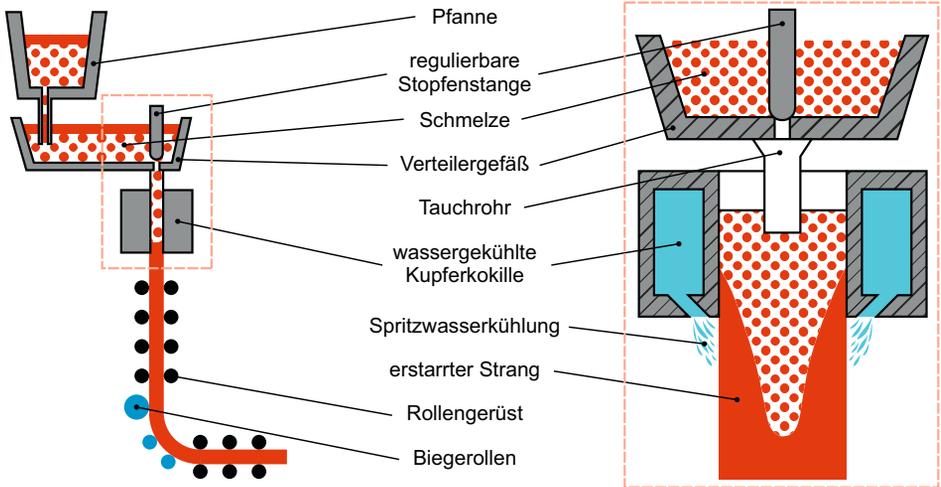


Bild 2.4 Anfahrblock und Stranggießanlage

Zur Unterstützung des Abkühlprozesses wird der abgezogene Strang in einer Sekundärkühlzone mit Kühlwasser besprüht. In Übereinstimmung mit der zu fertigenden Länge wird der Strang auf das entsprechende Maß zerteilt. Unter der Voraussetzung einer akzeptablen Strangoberfläche kann der Strang nach dem Durchlaufen eines Ofens direkt in das Walzwerk eingeleitet werden, sodass ein vollständig kontinuierlicher Prozess bis zur Erzeugung eines Vorproduktes für ein Einzelteil entsteht. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in der Verminderung der Gießmetallverluste, im höheren Ausbringen, in der höheren Produktivität und in der besseren Anpassung der nachgeschalteten Verarbeitungsprozesse (Umformen). Der Hauptanteil des geschmolzenen Stahls wird mit diesem Verfahren verarbeitet.

2.1.5 Formgießen

Die zweite Prozessvariante, um zu einem Fertigteil zu gelangen, stellt das sogenannte Formgießen dar, mit dessen Hilfe die meisten Gussteile gefertigt werden. Bei dieser Prozessvariante wird das flüssige Metall in Formen gegossen, in denen das herzustellende Gebilde als Hohlraum eingearbeitet ist. Die Formen können dabei aus nichtmetallischen (überwiegend Quarzsand) oder aus metallischen (überwiegend Eisenlegierungen) Werkstoffen bestehen [2.6].

Nach dem Erstarren des flüssigen Metalls wird bei den nichtmetallischen Werkstoffen die Form zerstört und das Gussteil entnommen, während bei den metallischen Formen deren Öffnen die Entnahme des Gussteils ermöglicht. Beim Formgießen strebt man eine weitgehende Annäherung an das Fertigteil an, was zur Entwicklung endabmessungsnaher Gießverfahren geführt hat.

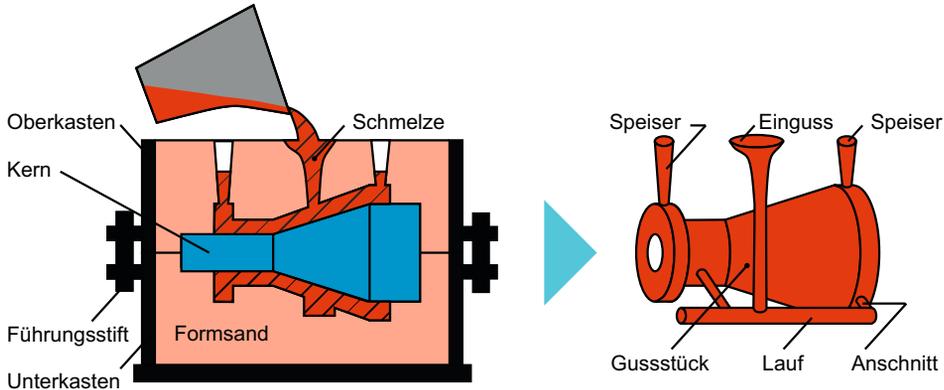


Bild 2.5 Gießform mit Kern und abgegossenes Gussteil mit Anschnitt- und Gießsystem

In Bild 2.5 sind eine Gießform aus nichtmetallischen Werkstoffen und das in ihr erzeugte Gussteil mit dem zum Füllen der Form notwendigen Gießsystem und den sogenannten Speisern dargestellt.

2.1.6 Gussabnehmer

Die wichtigsten Abnehmer von Gussteilen sind: Fahrzeugbau, Maschinenbau, Bauindustrie, Medizin, Schiffbau, Schienenverkehr, Energietechnik sowie Luft- und Raumfahrt und die Kunst. Der Hauptabnehmer ist die Kraftfahrzeugindustrie mit 40% Eisenguss und 80% Aluminiumguss. In einem Pkw sind mehr als 100 Gussteile eingebaut. Die Mehrzahl der technischen Gebilde ist ohne Gussteile undenkbar. Die Masse der Gussteile kann in einem Bereich von 1 Gramm bis 250 Tonnen variieren. Mithilfe des Formgießens werden in den Gießereien Gussteile aus den unterschiedlichsten Werkstoffgruppen hergestellt.

2.2 Verfahrensprinzipien beim Formgießen

2.2.1 Einleitung



Im Allgemeinen sind die Urformverfahren durch folgende technologische Fertigungsschritte gekennzeichnet: Bereitstellung des formlosen Werkstoffs als Ausgangsmaterial, Erzeugung des urformfähigen (flüssigen) Werkstoffzustandes, Füllen des Urformwerkzeugs mit dem urformfähigen Werkstoff, Übergang des Werkstoffes in den festen Zustand im Urformwerkzeug, Entnahme des geformten Erzeugnisses aus dem Urformwerkzeug.

Die Umsetzung dieser Fertigungsschritte beim Gießen verdeutlicht Bild 2.6.

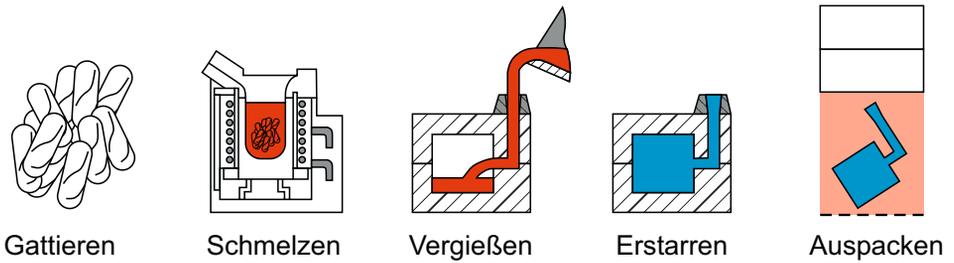


Bild 2.6 Fertigungsschritte des Urformverfahrens „Gießen“

2.2.2 Gieß- bzw. Formverfahren

Die das Fertigungsverfahren „Urformen-Gießen“ kennzeichnenden Grundprozesse werden in Abhängigkeit vom jeweils konkreten Fertigungsprozess durch zusätzliche Operationen erweitert, wobei in Übereinstimmung mit den „Geburtsvorgängen“ des Gussteils (Vergießen und Erstarren in der Form) die unterschiedlichsten Gussteilherstellungsverfahren entwickelt worden sind. Diese werden in Abhängigkeit davon, ob die Formherstellung oder der Gießvorgang bei der Erzeugung des Gussteils die dominierende Rolle spielen, im allgemeinen Sprachgebrauch im ersten Falle als Formverfahren und im zweiten Falle als Gießverfahren bezeichnet. Hinsichtlich der Verwendung der Form lässt sich das Fertigungsverfahren Gießen wie folgt unterteilen (Bild 2.7) [2.7].



Bild 2.7 Einteilung der Gieß- bzw. Formverfahren

2.2.3 Gussteilherstellung in Formen für den einmaligen Gebrauch

2.2.3.1 Einleitung

Der gesamte Zyklus der Gusserzeugung in Formen für den einmaligen Gebrauch besteht aus einer Reihe von Haupt- und Hilfsoperationen, die sowohl parallel als auch nacheinander folgend in den unterschiedlichen Abteilungen einer Gießerei durchgeführt werden [2.8, 2.9].

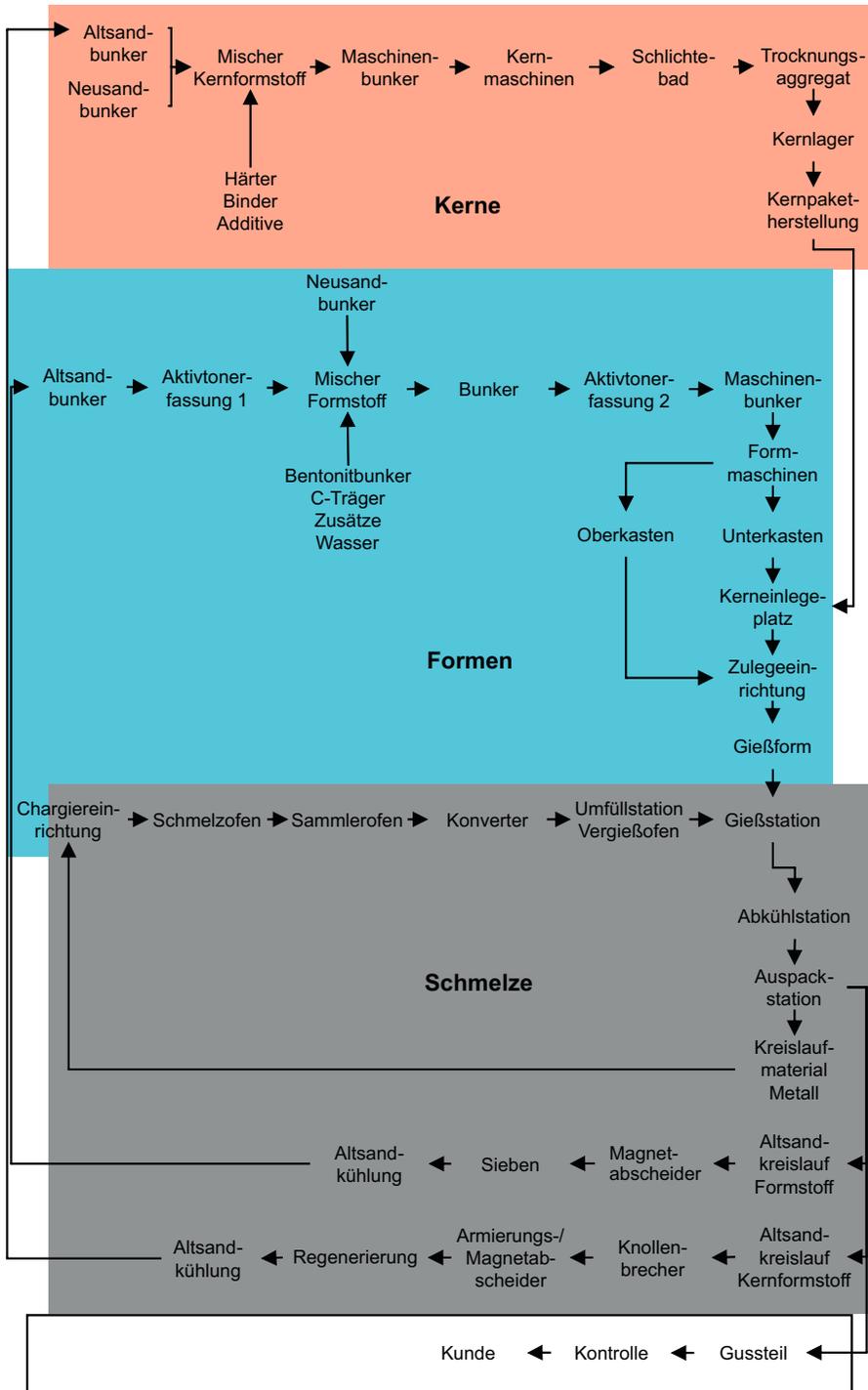


Bild 2.8 Fertigungsabteilungen und Fertigungsschritte beim Gießen mit Formen für den einmaligen Gebrauch [2.10]

Bild 2.8 enthält die einzelnen Abteilungen und die in ihnen durchzuführenden Arbeiten. Bei der Darstellung wurde die Verwendung von tongebundenen Formstoffmischungen vorausgesetzt, wobei diese Darstellung sowohl für die Hand- als auch für die Maschinenformerei Gültigkeit besitzt. Aus Bild 2.8 lässt sich ableiten, dass das Fertigungsverfahren durch eine Vielzahl stoffwandelnder und stofftrennender Vorgänge realisiert wird. Außerdem werden ein hoher Transportaufwand sowie Erhitzungs- und Abkühlprozesse durchgeführt. Mit diesen Aussagen erhebt sich auch die Frage nach der Wirtschaftlichkeit dieses Fertigungsverfahrens im Vergleich zu den anderen Varianten. Andererseits erkennt man aber auch, dass viele der eingesetzten Stoffe im Kreislauf genutzt und der Wiederverwendung innerhalb der Gießerei zugeführt werden. Dies betrifft insbesondere den Formstoff aber auch die von den Gussteilen abgetrennten metallischen Gieß- und Speisersysteme, die in den Schmelzprozess zurückgeführt werden und somit die Bezeichnung „Kreislaufmaterial“ erhalten haben.

2.2.3.2 Handformerei

In Bild 2.9 ist der Verfahrensablauf zur Herstellung eines Rohrstützens ausgehend von der Werkstückzeichnung dargestellt. Zunächst werden ein zweigeteiltes Modell, das die Kopie des tatsächlichen Werkstücks widerspiegelt, und ein Kernkasten hergestellt. Das Modell dient zur Schaffung des Formhohlraumes in der Form, während der Kernkasten dazu genutzt wird, einen Kern zu erzeugen. Dieser wird in die Form eingelegt. Er dient zur Bildung eines inneren Hohlraumes im Gussteil. Zur Fixierung des Kerns in der Form muss das Modell um die Kernmarke erweitert werden. Mit der einen Modellhälfte wird zuerst der Formstoff im Unterkasten verdichtet. Anschließend wird er gewendet und der Oberkasten mit Führungsstiften auf ihn aufgesetzt. Nach dem Auflegen der zweiten Modellhälfte und dem Einbringen des Gießsystems (Einguss, Lauf und Anschnitt) kann der Formstoff im Oberkasten verdichtet werden. Durch das Gießsystem gelangt das flüssige Metall in den Formhohlraum.

Zur Kompensation der Volumenabnahme des Gussteils beim Erstarren und Abkühlen werden Speiser angebracht, in die sich das Metallvolumendefizit verlagern soll, damit ein Gussteil frei von Lunkern und Porositäten entsteht. Nach dem Verdichten des Formstoffs im Oberkasten wird dieser abgehoben und die Modellteile aus den Formkastenhälften entfernt. Sie hinterlassen im Formstoff den Negativabdruck des herzustellenden Gussteils. In die Abdrücke der Kernmarken wird der Kern eingelegt. Die beiden Formkastenhälften werden zugelegt und mit einer Klammer gesichert, um den Auftrieb des flüssigen Metalls beim Gießvorgang abzufangen. Die fertige Form wird mit dem flüssigen Metall gefüllt. Dieses kühlt in ihr ab und erstarrt. Danach wird die Form zerstört und der Kern aus dem Gussteil entfernt. Durch Putzen wird die Gussteiloberfläche verbessert [2.11, 2.12].

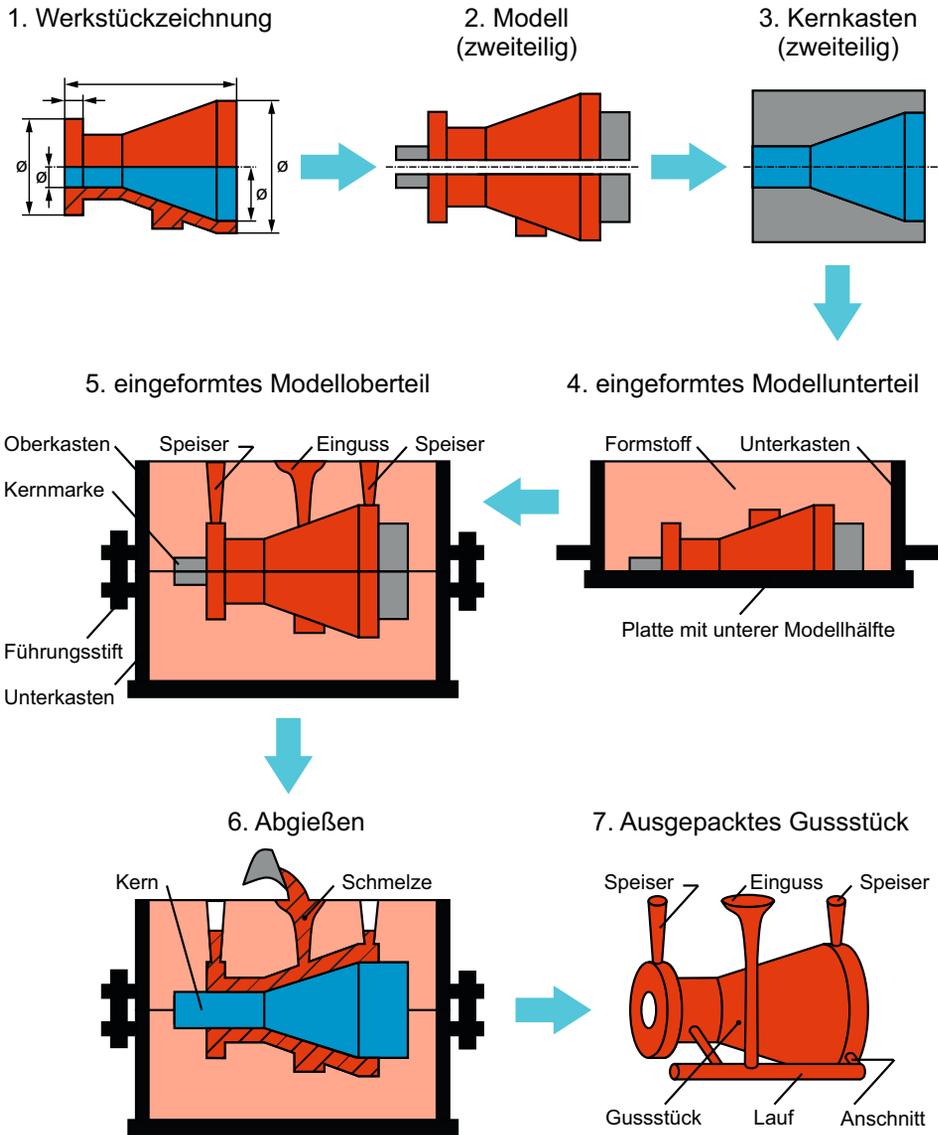


Bild 2.9 Verfahrensablauf der Gussteilfertigung mittels Handformerei

Modell

Das Modell kann aus Holz, Kunststoff, Wachs, Gips oder Metall gefertigt sein. Es dient zur Schaffung des Formhohlraums, besitzt aber selbst keine Hohlräume. Bei der Herstellung müssen weitere Forderungen eingehalten werden: Anbringen eines Schwindmaßes in Abhängigkeit vom zu vergießenden Metall, Kernmarken zur Lagefixierung des später einzulegenden Kerns, Teilungsebene zum leichteren Einfüllen des Modells, Bearbeitungszugaben an später zu bearbeitenden Funk-

tionsflächen, Aushebeschrägen zur besseren Entnahme des Modells aus dem Formstoff, Farbanstrich zum Schutz des Modells vor Feuchtigkeit [2.13].

Kern

Der Kern ist ein notwendiger Bestandteil der Form, wenn das zu gießende Bauteil Hohlräume enthalten soll. Der Kern verkörpert den herzustellenden Hohlraum im Gussstück. Er besteht aus einer Kernformstoffmischung.

Formstoff- und Kernformstoffmischungen

Um einen qualitätsgerechten Formhohlraum zu schaffen, sind an die Formstoffe bestimmte Anforderungen zu stellen: gute Festigkeit, gute Bildsamkeit, gute Gasdurchlässigkeit, gute Feuerfestigkeit und Langlebigkeit. Diese Eigenschaften lassen sich durch ein Gemisch aus Quarzsand (SiO_2) sowie Ton und Wasser als Bindemittel (oder andere Bindemittel z. B. Zement, Wasserglas oder Harze) gezielt einstellen. Außerdem werden in der Formstoffaufbereitung noch Zusatzstoffe (z. B. Graphit) zugegeben, die die unmittelbare Reaktion des flüssigen Metalls mit dem Sand der Formoberfläche einschränken. Da die Kerne größeren Belastungen ausgesetzt sind, werden sie in der Regel nicht aus tongebundenen Formstoffmischungen, sondern aus Mischungen bestehend aus Quarzsand und speziellen Bindemitteln (Erstarrungsöl, Wasserglas oder Harz) gefertigt.

2.2.3.3 Maschinenformerei

Mit der Entwicklung der Modellplatte wurde es möglich, die beiden Formhälften einer Gießform getrennt herzustellen. Dazu wird auf einer Modellplatte die Modellhälfte für die Bildung des Unterkastenformhohlraums und auf einer anderen Modellplatte die Modellhälfte für die Bildung des Oberkastenformhohlraumes befestigt. Neben den Modellen wurde gleichzeitig das Gießsystem mit Einguss, Lauf und Anschnitt installiert. Um der unterschiedlichen Anzahl der zu fertigenden Gussteile gerecht zu werden, wurden sogenannte Segmentmodellplatten entwickelt (Bild 2.10). Das heißt, nach dem Erreichen der von der Produktionsplanung vorgegebenen Gussteilzahl wird das jeweilige Segment entfernt und durch ein anderes ersetzt.

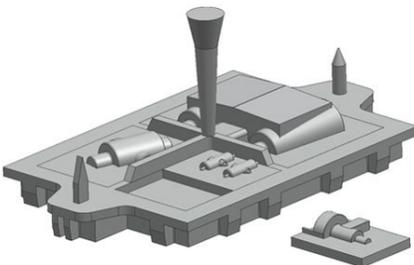


Bild 2.10
Segmentmodellplatte

Die Schaffung der Modellplatte war die Voraussetzung für die maschinelle Formherstellung. Die Hauptoperationen, die dabei von der Maschine vollzogen werden sollen, sind:

- Einfüllen des Formstoffs,
- Verdichten des Formstoffs und
- Trennen des Formkastens von der Modellplatte.

In Abhängigkeit von der Verdichtungsart des Formstoffs sind dabei unterschiedliche Maschinentypen entstanden: Rüttelform-, Pressform-, Membranpressform-, Vielstempelpressform-, Blasform-, Schießform-, Luftstrompressform-, Impulsform-, Schleuderform- (Slinger) und Formmaschinen unter Kombination der genannten Verdichtungsverfahren.

Bis auf die Blas- und Schießformmaschinen werden die oben genannten Typen hauptsächlich für das Verdichten von tongebundenen Formstoffmischungen eingesetzt und dienen damit in erster Linie zur Herstellung von Formen.

Anstelle des Ton-Wasser-Gemisches als Bindemittel sind im Laufe der Zeit andere Binder eingesetzt worden, die durch entsprechende chemische Reaktionen zu einer Verfestigung der Formstoffmischung führen. In diesem Zusammenhang unterscheidet man die Verfestigungsverfahren:

- Harz-Härter-Formverfahren,
- Zementsandformverfahren,
- Wasserglas-CO₂-Formverfahren,
- Gefrierformverfahren,
- Vakuumformverfahren,
- Präzisionsformverfahren,
- Maskenformverfahren,
- Vollformverfahren sowie
- bestimmte generative Formverfahren wie Direct-Croning-Formverfahren, Formdrucken und Formfräsen.

2.2.3.4 Spezialformverfahren

Hinsichtlich des technologischen Ablaufes unterscheiden sich die ersten vier genannten Formverfahren nicht wesentlich von denen der Verdichtungsverfahren und zwar nur mit dem Unterschied, dass der Quarzsand nicht mit dem Ton-Wasser-Gemisch sondern entsprechend mit Harz und Härter, Zement und Wasser, Wasserglas und Kohlendioxid sowie mit Wasser und einem Kältemittel verfestigt wird und somit keine Verdichtung erforderlich ist [2.14].

Die anderen Formverfahren stellen Fertigungsprozesse dar, die spezielle Besonderheiten aufweisen und die für die Fertigung von maßgenaueren, komplizierteren Bauteilen mit erhöhter Oberflächengüte zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Vakuumformverfahren

Bei diesem Verfahren [2.15] erfolgt die Verfestigung des Formsandes durch Anlegen eines Unterdrucks. Damit dieser aufgebracht werden kann, wird die Modellkontur mit einer Folie überzogen, auf diese wird danach der rieselfähige, binderfreie Formsand aufgeschüttet und der Kasten mit einer weiteren Folie abgedeckt (Bild 2.11). Der Unterdruck bewirkt das Entstehen von Reibungskräften zwischen den Sandkörnern, sodass eine Verfestigung zwischen ihnen eintritt.

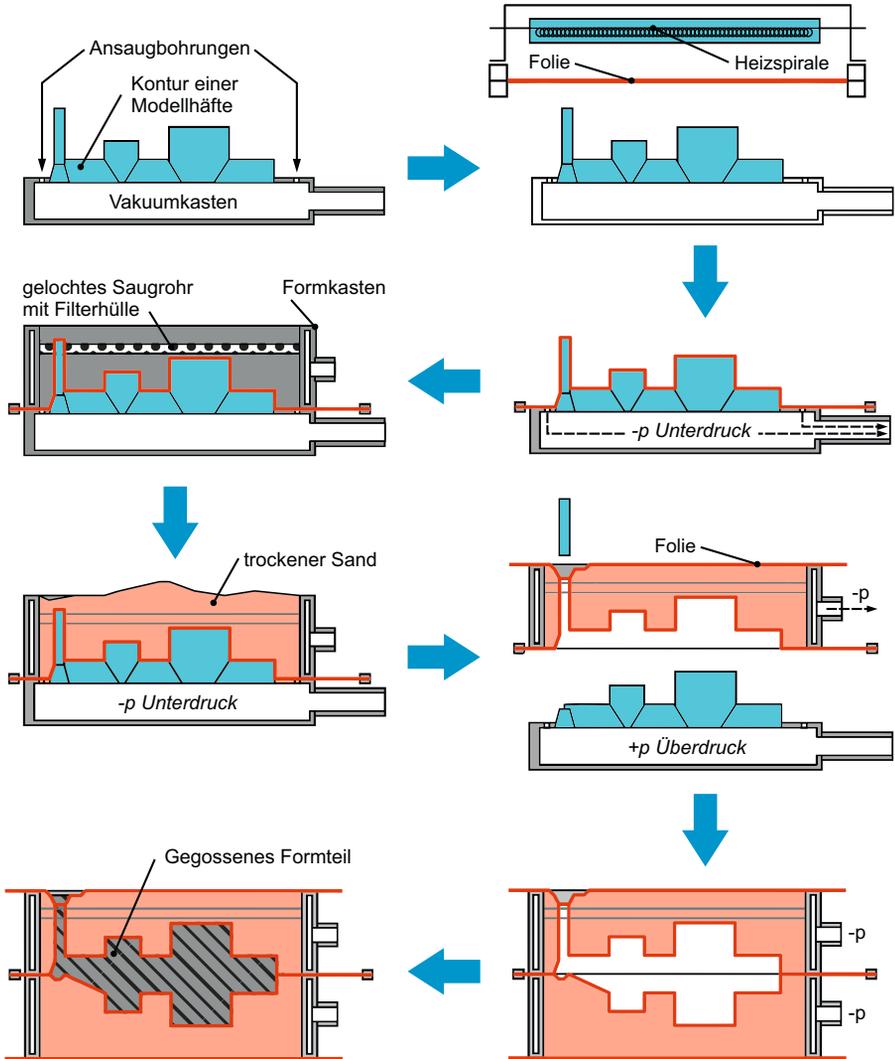


Bild 2.11 Verfahrensablauf beim Vakuumformverfahren

Die Plastikfolie (0,05 ... 0,1 mm Dicke) wird wenige Sekunden erhitzt, wodurch sie plastisch verformbar wird. Anschließend wird sie von oben über die Modellplattenhälfte gezogen. Ein leichter Unterdruck (0,5 bar) genügt, um die thermoplastische Folie konturentreu und dicht an das Modell anzulegen. Der Formkasten mit einer Absaugeinrichtung wird auf die folienüberzogene Modellplatte abgesetzt. Die Formkasten­hälfte wird mit trockenem, binderfreiem Quarzsand gefüllt. Danach erfolgen das Ausformen des Eingießtumpels und das Abstreifen der Formhälfte sowie das Abdecken mit Plastikfolie und die Verdichtung des Quarzsandes durch Anlegen des Unterdrucks (0,5 bar). Beim Abhebevorgang wird das Vakuum des Modellplattenträgers abgeschaltet, sodass die unter Druck stehende Formkasten­hälfte mit anhaftender Plastikfolie leicht abgehoben werden kann. Unter- und Oberkasten werden in gleicher Weise hergestellt und können nach dem Zulegen sofort abgegossen werden. Der Unterdruck wird vom Abgießen bis zum Ende der Erstarrung aufrechterhalten. Nach dem Abkühlen des Gussstücks wird das Vakuum abgeschaltet. Der lose Quarzsand ist wiederverwendbar.

Präzisionsformverfahren

Das Präzisionsformverfahren (Feinguss) ist ein Formverfahren zur Herstellung von Guss­stücken mit höchster Maßgenauigkeit und bester Oberflächenqualität unter Verwendung verlorener Modelle (Wachsmodelle, deshalb auch als Wachsausschmelzverfahren bezeichnet) [2.16, 2.17].

Seine Anwendung war in der Vergangenheit auf Guss­stücke mit vorwiegend geringer Masse und kleineren Abmessungen ausgerichtet. Mit den steigenden Anforderungen an die Bauteilqualität hinsichtlich Oberflächengüte und Maßgenauigkeit beobachtet man gegenwärtig die Tendenz zu größeren Abmessungen und höheren Massen der Präzisionsgussteile, die oftmals aufgrund der hohen Abbildungsgüte als einbaufertige Teile ausgeliefert werden können.

Der in Bild 2.12 gezeigte Verfahrensablauf lässt sich wie folgt beschreiben: Ausgehend von der Bauteilzeichnung wird eine Metallform konstruiert, in der die Herstellung der Wachsmodelle durch Spritzen oder Pressen erfolgt. Danach werden die Modelle zu einer Modelltraube montiert. Diese (mit dem Gießsystem) werden mehrfach in eine Bindersuspension (keramische Masse zur Herstellung einer Maske aus einer entsprechenden Formstoffmischung mit feinem Quarzsand als Formgrundstoff und Ethylsilikat als Bindemittel) getaucht. Auf diese Schichten wird ein körniges, feuerfestes Material (trockener Quarzsand) in einer Wirbelschicht oder durch Berieseln aufgebracht.

Zum Ausschmelzen der Wachsmodelle bei etwa 150 °C dienen Ausschmelzöfen, während das Brennen der Formen in Brennöfen bei etwa 900 ... 1200 °C vorgenommen wird. Nach dem Abgießen der noch heißen Formen und dem Erstarren der Schmelze in ihnen erfolgt das Trennen der Feinguss­stücke mittels Trennscheibe, Vibration oder Säge.

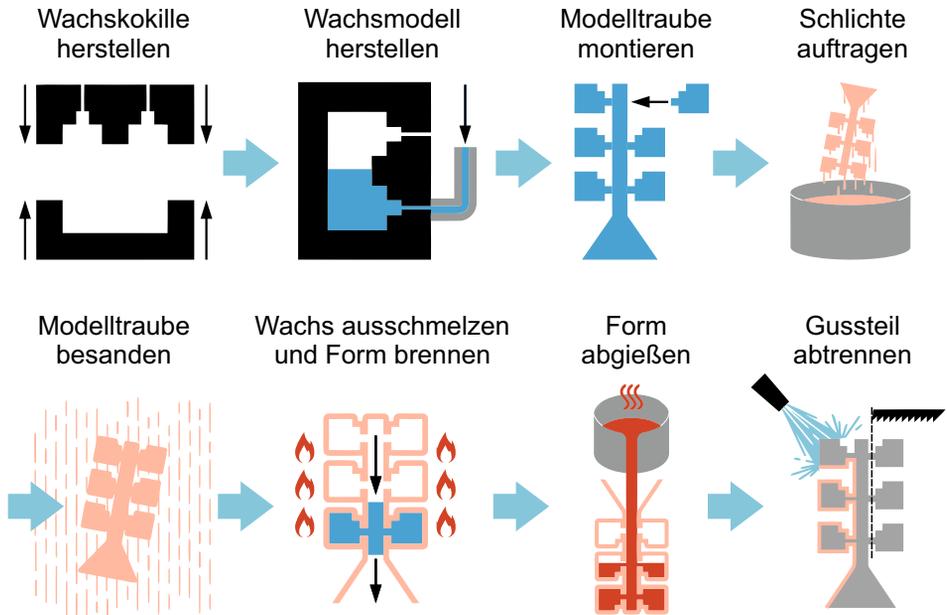


Bild 2.12 Verfahrensablauf beim Präzisionsformverfahren

Maskenformverfahren

Das Maskenformverfahren [2.18] ist ein Formverfahren zur Herstellung schalen-(masken-)artiger Formen (Bild 2.13). Es arbeitet mit einem Dauermodell. Zur Formherstellung wird eine Formstoffmischung verwendet, deren Quarzsandkörner mit einem Kunstharz umhüllt sind.

Im Verarbeitungszustand ist diese Mischung trocken und rieselfähig, sodass zur Erzeugung der Formhohlraumkontur nur die Schwerkraft erforderlich ist. Die Formstoffmischung wird auf die erhitzte metallische Modellplatte (200 ... 300 °C) aufgestreut und 20 ... 30 s dieser Temperatur ausgesetzt (Verfahrensschritt 1 in Bild 2.13). Dabei härtet das Harz aus, und es entsteht die feste Maske, die eine Dicke von 5 ... 8 mm aufweist (Verfahrensschritt 2). Die nicht ausgehärtete Mischung kann von der Modellplatte abgekippt werden (Verfahrensschritt 3). In einem auf 300 ... 350 °C aufgeheizten Ofen wird die Maske vollständig ausgehärtet.

Mithilfe von Ausstoßerstiften wird die Maske von der erhitzten Modellplatte abgehoben (Verfahrensschritt 4). Die beiden Formhälften werden zusammengeklebt und zum Abgießen in einen Behälter gestellt, in dem sie mit Quarzsand oder Stahlkies hinterfüllt werden (Verfahrensschritt 5). Auf diese Weise wird die Stabilität der Masken erhöht. Das Abgießen, Erstarren, Ausleeren und Putzen der Gussteile erfolgt in Analogie zu den anderen Verfahren. Mit diesem Verfahren lassen sich Gussteile mit hoher Oberflächengüte erzeugen. Außerdem sinken der Produktionszyklus und der Ausschussanteil, während das Ausbringen steigt.

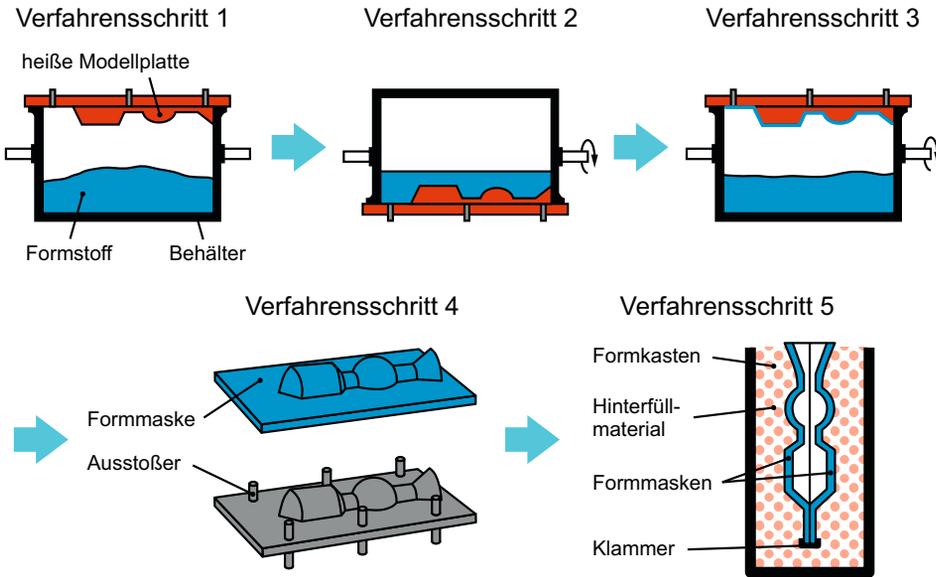


Bild 2.13 Verfahrensablauf beim Maskenformverfahren

Vollformverfahren

Beim Vollformverfahren [2.19] besitzt die Gießform im Gegensatz zu den anderen Formherstellungsverfahren keinen Hohlraum, sondern sie ist mit einem Modell gefüllt, das aus einem vergasbaren Medium (Polystyrolschaumstoff) besteht. Dieses wird entweder durch mechanische Bearbeitungsverfahren aus Schaumstoffblöcken herausgearbeitet oder durch Einblasen von Polystyrolschaumstoffperlen in Schäumformen aufgeschäumt (Bild 2.14) [2.20]. Dabei werden in der Regel nicht sofort das gesamte Modell sondern nur Modellbereiche gefertigt, die anschließend durch Kleben miteinander verbunden werden.

Die Modellherstellung durch spangebende Bearbeitungsverfahren wird bevorzugt für die Herstellung großer Teile in Einzelfertigung benutzt, wobei das Einformen der Modelle einschließlich des Gießsystems in harzgebundene Formstoffmischungen und unter Verwendung von Formkästen erfolgt. Die Modellherstellung (Bild 2.14) mittels Schäumen nutzt man zur Fertigung kleiner Teile in großen Serien. Mit dem Gießsystem werden die Modelle zu Trauben verklebt (Bild 2.14 - Montage). Anschließend werden sie mit einer Schlichteschicht überzogen (Bild 2.14 - Schlichten), die beim Gießen einen direkten Kontakt des flüssigen Metalls mit dem Quarzsand verhindert und die den Seitenwänden des sich zwischen dem vergasenden Modell und der nachströmenden Schmelze bildenden Spalts eine gewisse Stabilität verleiht, sodass der ungebundene Quarzsand nicht in diesen Hohlraum kollabiert. Die Schlichteschicht muss getrocknet werden (Bild 2.14 - Trocknen).

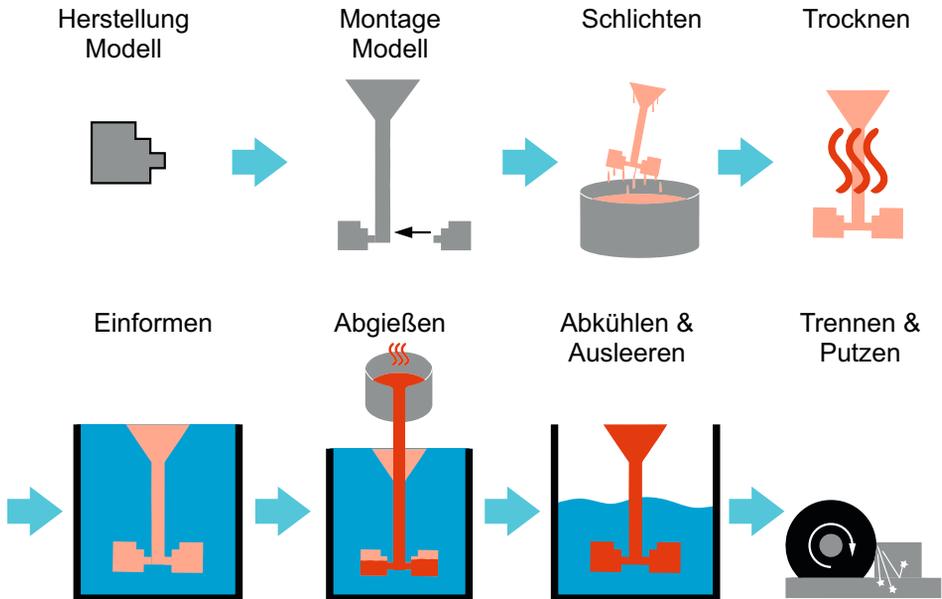


Bild 2.14 Verfahrensablauf beim Vollformgießverfahren

Das Einformen der Modelltrauben erfolgt mit trockenem, rieselfähigem Quarzsand ohne Bindemittel. Das Umhüllen der Modelle und das Verdichten des Quarzsandes werden durch Vibration unterstützt (Bild 2.14 – Einformen).

Da das Modell nicht aus der Form entfernt werden muss und aus Einzelteilen aufgebaut ist, ergeben sich für dieses Verfahren folgende Vorteile gegenüber anderen Formfertigerungsverfahren:

- fast unbegrenzte Freiheit bei der konstruktiven Gestaltung der Teile,
- geringe Aushebeschrägen,
- keine Teilungsebene,
- hohe Oberflächengüte,
- geringer Putzaufwand,
- hoher Automatisierungsgrad und
- geringe Kapitalinvestitionen für die Ausrüstungen.

Zur Stabilisierung der Form kann bei der Formfüllung ein Unterdruck angelegt werden (Bild 2.14 – Abgießen). Die Operationen des Abkühlens und Ausleerens (Bild 2.14 – Abkühlen und Ausleeren) und Putzens (Bild 2.14 – Trennen und Putzen) erfolgen wie bei den anderen Formfertigerungsverfahren. Wenn statt des Quarzsandes Eisengranulat verwendet und dieses mit einem Magnetfeld verfestigt wird, dann spricht man vom Magnet-Vollformverfahren. Um das Ausscheiden von Porositäten im Gussstückinneren zu unterdrücken, kann beim Erstarren der Gussteile im Formbehälter ein Überdruck aufgegeben werden (Castyral-Vollform-Verfahren).

2.2.3.5 Generative Fertigungsverfahren zur Gussteilerzeugung

Die oben genannten Formfertigungsverfahren erfordern zur Schaffung des Formhohlraumes ein Modell, das entweder als Dauermodell oder als verlorenes Modell ausgeführt sein kann. Damit ergibt sich bei der Fertigung von Gussteilen ein nicht unerheblicher Nachteil, der aus den hohen Kosten für das Modell und dessen zeitaufwendigen Herstellungsprozess resultiert. Dieser Nachteil wirkt sich insbesondere dann aus, wenn das zu fertigende Bauteil eine Einzelanfertigung sein soll bzw. wenn es noch nicht seine endgültige Gestalt besitzt und konstruktive Veränderungen vorgenommen werden müssen. Um diese Nachteile auszuschalten, wurde im Zusammenhang mit der Soft- und Hardwareentwicklung auch in der Gießereindustrie versucht, Formen ohne die Beistellung von Modellen zu produzieren. Dazu werden sogenannte generative Fertigungsverfahren für die Belange der Formfertigung eingesetzt [2.21 – 2.23].

Da die nachfolgend genannten generativen Fertigungsverfahren zunächst für die Herstellung von Formen entwickelt und eingesetzt wurden, werden sie auch teilweise in diesem Kapitel behandelt. Die Entwicklung ist auf diesem Gebiet sehr rasch vorangeschritten, sodass diesen Fertigungsverfahren im Kapitel 8 weitere Aufmerksamkeit geschenkt wird.

Direct-Croning-Verfahren

Als erstes derartiges Verfahren wurde das sogenannte Direct-Croning-Verfahren [2.24] entwickelt. Dabei werden die Formen und Kerne für die Gussteilfertigung mithilfe des Computers direkt aus den CAD-Daten und einem harzummüllten Formstoff produziert. Die Teile werden in Schichten von 0,2 mm Dicke durch lokale Aushärtung aufgebaut. Die Aushärtung erfolgt mit einem Laserstrahl, der in Abhängigkeit von der Gussteilgeometrie von einem Computer geführt wird und der genau den in der jeweiligen Höhe der Form oder des Kernes vorhandenen Querschnitt mit Energie beaufschlagt. Der Formstoff entspricht dabei dem, der bei Maskenformverfahren Anwendung findet.

Dieses Verfahren ist ein sogenanntes aufbauendes Verfahren, sodass die Fertigung von Hinterschneidungen, Kröpfungen und ähnlich komplizierten Details an der Form oder dem Kern möglich wird. Auf Aushebeschränken kann verzichtet werden. Komplizierte Kernkonturen, die normalerweise aus mehreren Segmenten montiert werden müssten, können einteilig gefertigt werden. Mehrteilige Formen lassen sich mit wesentlich weniger Elementen fertigen, wodurch die Maßgenauigkeit des Bauteils steigt. Der nichtausgehärtete Formstoff wird vom ausgehärteten Bereich getrennt. Er kann erneut verwendet werden. Die Formen und Kerne können direkt in der Gießerei abgegossen werden, d. h., es gibt keinen weiteren Verfahrensschritt, der die Genauigkeit, den Preis oder die Lieferzeit des Gussteils negativ beeinflusst. Alle üblichen Gusslegierungen, wie Stahl, Aluminium und Gusseisen, können in derartigen Formen vergossen werden. Mit diesem Verfahren werden die Forderungen

gen nach komplizierten, voll funktionsfähigen Gussteil-Prototypen mit kurzen Vorlaufzeiten und ohne Verwendung von Modellen und Kernkästen voll erfüllt.

Den Arbeitsablauf beim Direct-Croning-Verfahren zeigt Bild 2.15. Zur Vorbereitung des Fertigungsprozesses muss die dreidimensionale Geometrie des zu fertigenden Bauteils an die Rechnersteuerung übergeben werden, wobei diese in Form einer Schichtdatendatei abgelegt wird. Die absenkbare Bauplattform befindet sich in seiner höchsten Position und verschließt dabei bündig den Rahmen. Im ersten Prozessschritt wird die Plattform um eine Schichtdicke von 0,2 mm abgesenkt. Die Besandungseinrichtung verfährt horizontal und bringt dabei eine Schicht Formstoff genau dieser Dicke auf den Arbeitstisch. Nach dem Zuschalten des Lasers wird über das Linsen- und Spiegelsystem der Strahl geometrieabhängig über die Formstoffschicht geführt. Durch die Laserenergie härtet der Formstoff aus. Beim nächsten Arbeitsschritt wird der Tisch erneut um den gleichen Betrag abgesenkt und der Vorratsbehälter der Besandungseinrichtung mit Formstoff befüllt. Durch ihre horizontale Bewegung wird erneut eine Formstoffschicht aufgetragen, die mit dem Laser ausgehärtet wird. Die nichtbestrahlten Formstoffpartien bleiben im losen, rieselfähigen Zustand und betten das Formteil ein. Nach Beendigung dieses Fertigungsprozesses wird der lose Formstoff abgelöst und das Formteil gesäubert. Es muss entsprechend dem Croning-Prozess noch nachgehärtet werden.

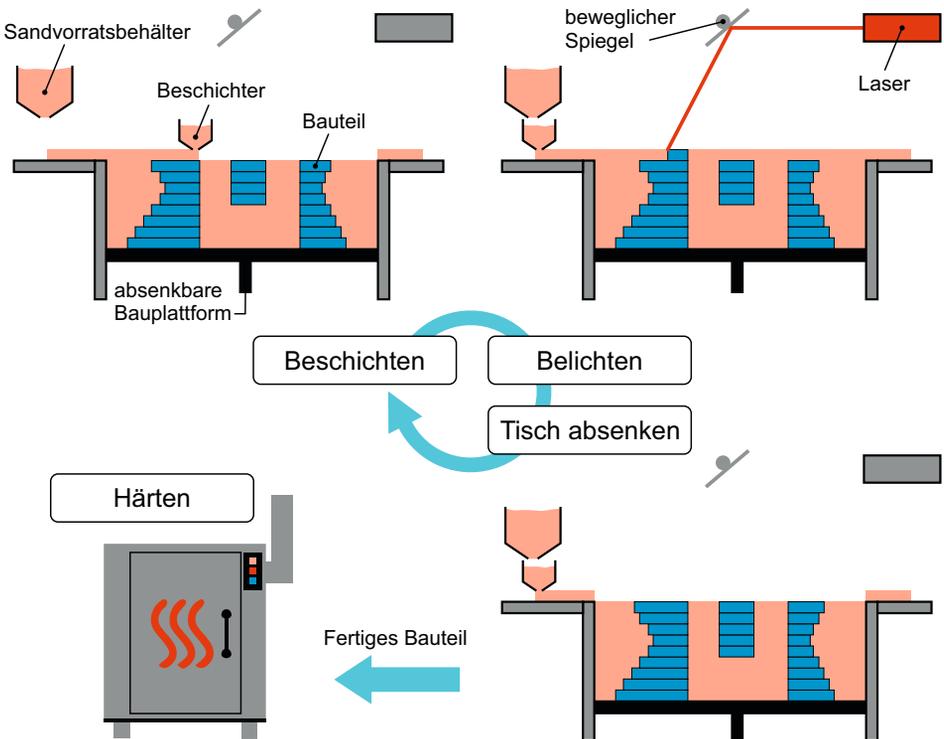


Bild 2.15 Verfahrensablauf beim Direct-Croning-Verfahren

Bild 2.16 zeigt einen nach diesem Verfahren gefertigten Sandkern (links) und das abgegossene Gussteil (rechts).

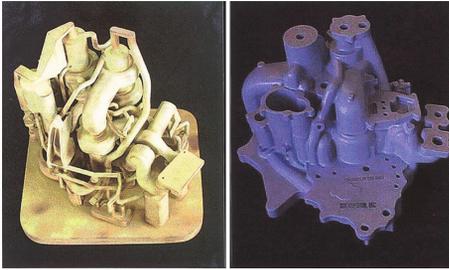


Bild 2.16

Mit dem Direct-Croning-Verfahren gefertigter Sandkern (links) und Gussteil (rechts)

Formstoffdrucken

In dem Zusammenhang, wie sich in der Kommunikationstechnik die Effizienz der Drucker, insbesondere auch der Tintenstrahldrucker entwickelte, ergab sich die Möglichkeit, den mit Härter vorgemischten Formstoff durch die Zugabe von Bindern punktuell zu verfestigen. Dies führte zum generativen Fertigungsverfahren Formstoffdrucken (Bild 2.17) [2.25].

Der apparative Aufbau der Formstoffdruckeinrichtung entspricht dem des Direct-Croning-Verfahrens (vgl. Bild 2.15). Auch hier wird das zu fertigende Formteil im Computer schichtweise zerlegt, und bei seiner Herstellung schichtweise wieder aufgebaut. Dabei wird die mit dem Härter vorgemischte Formstoffmischung in dünnen Schichten aufgetragen. Der Sprühkopf für die Binderdosierung wird vom Computer geometrieabhängig gesteuert über die Formstoffschicht bewegt und sprüht den Binder auf die auszuhärtenden Partien. Die nächsten Fertigungsschritte entsprechen dem des Direct-Croning-Verfahrens. Der nicht ausgehärtete Formstoff muss nach Beendigung des Druckvorgangs vom gefertigten Formteil entfernt werden.

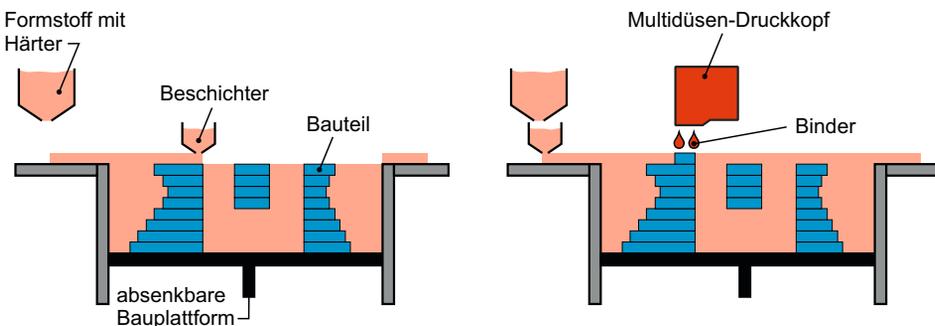


Bild 2.17 Verfahrensablauf beim Formstoffdrucken

Direktes Formstofffräs-Verfahren

Mit der Entwicklung des Hochgeschwindigkeitsfräsens in der Zerspanungstechnik und den Möglichkeiten einer mehrachsigen Führung der Werkzeugspindeln wurde der Gedanke geboren, dieses Verfahren auch für die Herstellung von Formen zum Abgießen von Gussteilen zu verwenden. Allerdings reichten dabei die Festigkeiten der Formstoffe auf tongebundener Basis nicht aus. Aus diesem Grunde entwickelte man für dieses Verfahren Formstoffe auf der Basis von Kunstharzen, die eine wesentlich höhere Festigkeit besitzen [2.26, 2.27].

Folgende Fertigungsschritte umfasst dieses Verfahren. Zunächst werden die 3D-Daten des zu fertigenden Gussteils in die Steuerung der CNC-Maschine eingelesen. Gleichzeitig wird in einem Kernkasten ein sogenannter Rohblock aus harzgebundenem Formstoff hergestellt. Durch die Wechselwirkung des im Formstoff befindlichen Binders mit dem Härter werden die Quarzkörner gebunden und verfestigt. Dieser Block wird nach Ablauf der Aushärtereaktion in der CNC-Maschine positioniert. Abschließend läuft das in der Maschine voreingelesene Bearbeitungsprogramm ab. Durch das Bearbeitungswerkzeug werden die Konturen des Gussteils in den Sandblock eingefräst. Dabei ist die Verwendung von unterschiedlichen Fräsern möglich, um die unterschiedlichen Konturen besser herauszuarbeiten. Bild 2.18 zeigt den Fräser bei der Bearbeitung des Formsandblocks.

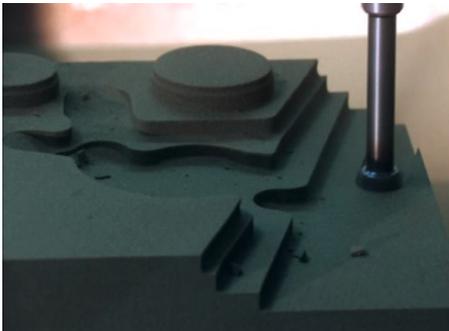


Bild 2.18
Formstofffräsen

2.2.4 Gussteilherstellung in Formen für den mehrmaligen Gebrauch (Dauerformen)

2.2.4.1 Einleitung

Bei dieser Verfahrensvariante der Gusserzeugung werden Formen (Dauerformen oder Kokillen) verwendet, die wiederholt genutzt werden können. D. h., in diesem Fall wird nicht für jeden Abguss eine Form erzeugt. Damit steht die Form im Gegensatz zu den Verfahren mit verlorenen Formen nicht im Verfahrensmittelpunkt, sodass sich sprachlich die Bezeichnung „Gießverfahren“ eingebürgert hat

(Bild 2.19). Auf diese Weise lässt sich eine Einteilung der Verfahren nach der Art der Formfüllung vornehmen, wobei diese durch das Einwirken unterschiedlicher Kräfte (z. B. Schwer-, Druck-, oder Zentrifugalkraft) realisiert werden kann.

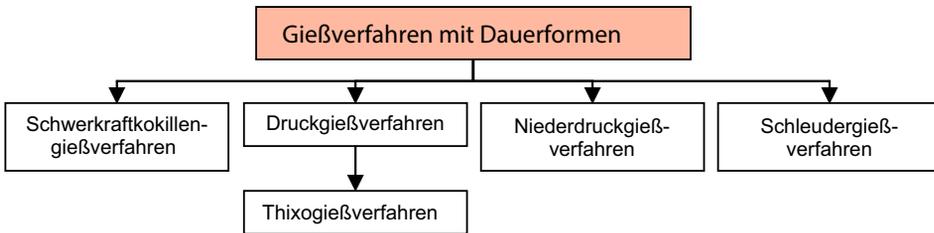


Bild 2.19 Schema der Gießverfahren mit Dauerformen

Um den immer wiederkehrenden thermischen Beanspruchungen beim Abgießen standzuhalten, muss der Kokillenwerkstoff einen ausreichend hohen Schmelzpunkt besitzen, nicht warmrissanfällig, aber anlassbeständig sein und eine hohe Verschleißfestigkeit aufweisen. Als Werkstoffe werden Gusseisen, Stahlguss, Stahl oder Kupferlegierungen verwendet. In die metallischen Dauerformen sind die Negativkonturen des Gussteils eingearbeitet, sodass ihr Werkstoff eine gute Bearbeitbarkeit haben muss. Die Gussstückinnenkontur wird bei einfacher Gestalt durch Dauerkerne und bei komplizierten Geometrien durch verlorene Kerne (außer beim Druckgießverfahren) geschaffen.

Gegenüber den Fertigungsverfahren mit verlorenen Formen haben die Gießverfahren mit Dauerformen folgende Vorteile: geringere Produktionsfläche, erhöhte Arbeitsproduktivität, geringere Zugaben für die mechanische Bearbeitung, erhöhtes Ausbringen, weniger Kernformstoff und Wegfall des Formstoffs, niedrigerer Putzaufwand, niedrigerer Ausschussanteil, verbesserte Oberflächengüte und höhere mechanische Eigenschaften.

Als Nachteile sind zu nennen: teurere Formen, geringe Nachgiebigkeit und Gasdurchlässigkeit, Gussteile mit hoher Eigenspannungs- und Warmrisswahrscheinlichkeit sowie Gussoberflächen mit hohen Härtewerten.

Damit sich die hohen Herstellungskosten für die metallischen Formen amortisieren, werden die Dauerformverfahren für die Großserienproduktion von Gussteilen eingesetzt.

2.2.4.2 Schwerkraftkokillengießverfahren

Beim Schwerkraftkokillengießverfahren erfolgt das Einfüllen des flüssigen Metalls in den Formhohlraum nur unter der Einwirkung der Schwerkraft. Bild 2.20 zeigt den Verfahrensablauf [2.28].

Neben diesen Hauptoperationen müssen zur Erzielung eines qualitativen Gussteils noch weitere Fertigungsschritte ausgeführt werden: Überziehen der Kokillenarbeitsfläche mit einer feuerfesten Schutzschicht (Schlichte), Erwärmen oder Kühlen der Kokille bis auf eine vorgegebene Arbeitstemperatur und gegebenenfalls Einlegen von Sandkernen. Die sich nach dem Erstarren und Abkühlen anschließenden Operationen sind denen der Gusserzeugung in verlorenen Formen äquivalent.

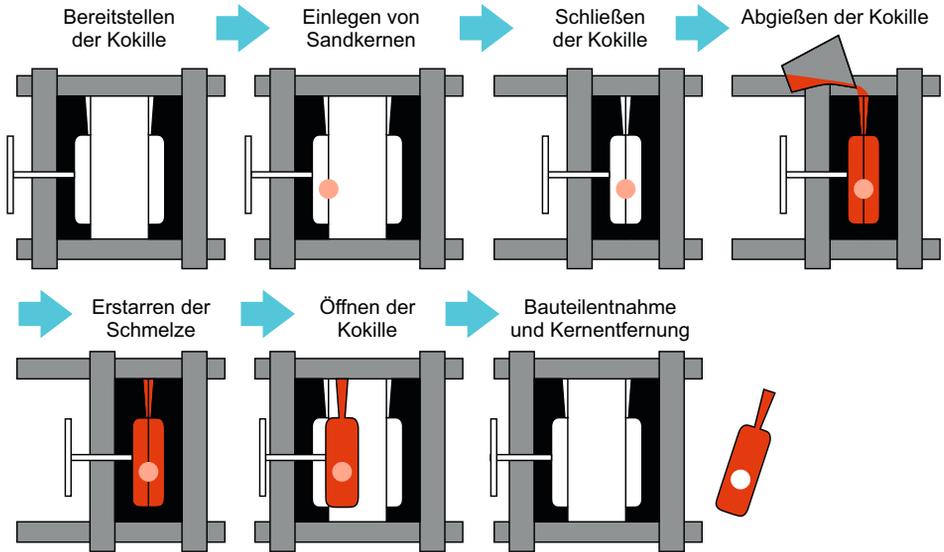


Bild 2.20 Verfahrensablauf des Schwerkraftkokillgießverfahrens

2.2.4.3 Druckgießverfahren

Beim Druckgießverfahren wird das flüssige Metall unter hohem Druck (10 ... 200 MPa) und hoher Geschwindigkeit (bis 120 m/s) in die Dauerform gedrückt. Damit wird klar, warum bei diesem Verfahren keine Sandkerne verwendet werden können. Infolge der hohen Drücke können die Gussteile sehr dünnwandig sein und eine komplizierte Geometrie aufweisen [2.29, 2.30].

Unmittelbar am Ende der Formfüllung wird die kinetische Energie des Presskolbens vollständig in Druckenergie umgesetzt, wodurch ein sogenannter hydraulischer Impuls entsteht. Die Druckbeanspruchung wird während des Erstarrens aufrechterhalten. Das Druckgießverfahren wird vorwiegend für Aluminium-, Magnesium-, Zink- und Zinnlegierungen sowie in geringem Umfang für Kupferlegierungen eingesetzt. Bei den Eisenlegierungen würden die Dauerformen den hohen thermischen und mechanischen Beanspruchungen nicht standhalten. Der Verfahrensablauf ist durch kurze Zyklen und wenige Einzelschritte gekennzeichnet. Zu seiner Realisierung benötigt man aber spezielle Druckgießmaschinen.

2.2.4.4 Arten von Druckgießmaschinen

Generell unterteilt man die Druckgießmaschinen in solche mit kalter und warmer Befüllungskammer, wobei bei den Kaltkammerdruckgießmaschinen zusätzlich noch zwischen solchen mit horizontaler oder vertikaler Anordnung unterschieden wird. Der Unterschied wird in den nachfolgenden Bildern deutlich.

Bei den Kaltkammerdruckgießmaschinen sind die Druckgießmaschine und der Ofen zur Bereitstellung des flüssigen Metalls stets getrennt angeordnet und die für jeden einzelnen Druckgießvorgang erforderliche Schmelzemenge wird manuell oder automatisch in die Befüllkammer dosiert.

Bei den Warmkammerdruckgießmaschinen befindet sich die Schmelze in einem Ofen direkt an der Maschine. Im Ofen ist das Befüllgerät aus Stahl untergebracht, in das der Druckkolben eintaucht und auf diese Weise das flüssige Metall in die Druckgießform presst.

2.2.4.5 Verfahrensablauf beim Druckgießen

Kaltkammerdruckgießmaschine mit horizontaler Befüllkammer

Zunächst wird das flüssige Metall in die Befüllkammer (Bild 2.21) eingefüllt. Mit dem horizontal beweglichen Druckkolben erfolgen das Füllen der Druckgießform und das Erstarren unter Druck. Nach dem Öffnen der Druckgießform wird der Druckkolben zurückgefahren, sodass das Auswerfen des Gussteils möglich wird.

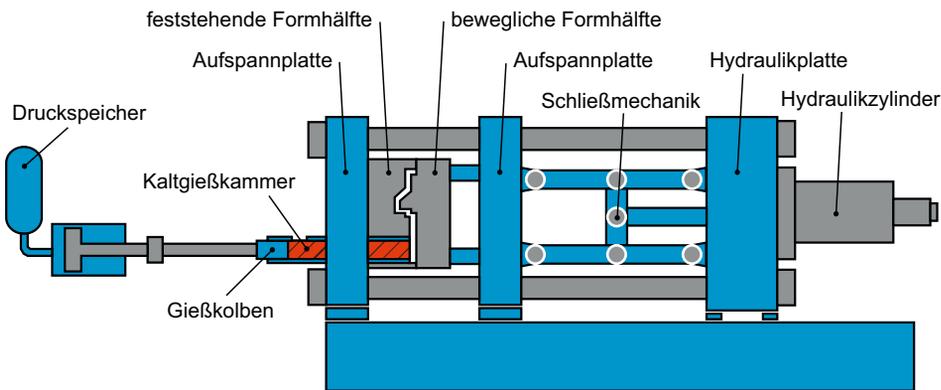


Bild 2.21 Druckgießmaschine mit horizontaler Befüllkammer

Warmkammerdruckgießmaschine

Die Druckgießmaschinen mit warmer Befüllkammer (Bild 2.22) enthalten als Besonderheit unmittelbar in der Schmelze, die in einem beheizten Tiegel warmgehalten wird, eine Konstruktion, die den Ofen mit der Druckgießform verbindet. In diese Konstruktion wird das flüssige Metall durch den sich aufwärts bewegen-

den Presskolben eingesaugt. Bei der abwärts gerichteten Bewegung wird die Einlassöffnung verschlossen und das flüssige Metall in die Druckgießform gedrückt.

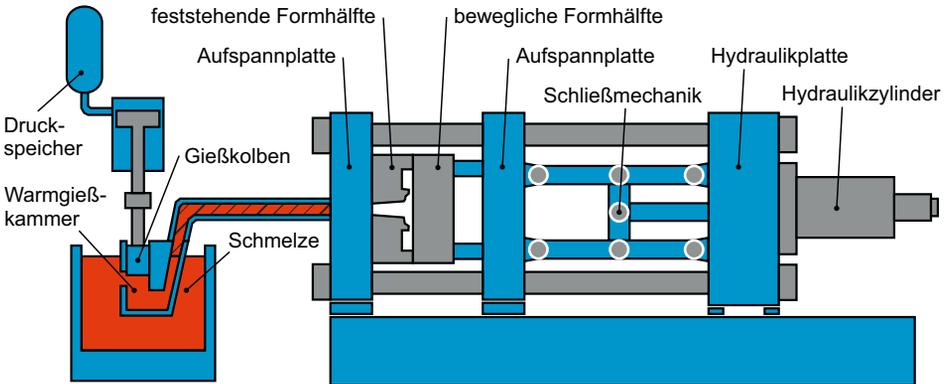


Bild 2.22 Warmkammerdruckgießmaschine

Die Druckgießformen besitzen eine hohe Wärmeabfuhrgeschwindigkeit, sodass das Gefüge dieser Teile sehr feinkörnig und unmittelbar unter der Randschale der Teile dicht ist. Infolge der hohen Einströmgeschwindigkeiten des flüssigen Metalls kann die Luft aus dem Formhohlraum nicht schnell genug entweichen. Auf diese Weise findet man im Innenteil der Gussstücke oft Poren [2.31].

2.2.4.6 Thixogießverfahren

Dieses Verfahren [2.32] bedient sich bei der Konturgebung der Gussteile ebenfalls der Druckgießmaschinen. Anstelle der fließfähigen Schmelze wird in die Befüllkammer ein Festkörper eingesetzt, der sich aufgrund seiner Zusammensetzung und seiner Temperaturverteilung in einem thixotropen Zustand befindet [2.33]. Dieser wird durch das Aufheizen des Rohmaterialbarrens in den Solidus-Liquidus-Bereich mit etwa 30 ... 40% Schmelzeanteil erreicht. Der teilaufgeschmolzene Rohbarren verhält sich wie ein Festkörper und kann auf diese Weise in die Befüllkammer der Druckgießmaschine eingelegt werden. Die Druckbeaufschlagung mit dem Presskolbens bewirkt ein Absinken der Viskosität, und durch die wirkenden Scherkräfte nimmt der Rohbarren einen fließfähigen Zustand an. Dadurch lässt sich der Werkstoff in den Druckgießformhohlraum einfüllen. Bild 2.23 zeigt den Verfahrensablauf beim Thixogießverfahren.