smartGUSS

FEINGUSS BLANK

KONSTRUIEREN UND GIESSEN.

konstruieren + giessen
33. Jahrgang (2008) Nr. 1

Feingießen

Herstellung, Eigenschaften, Anwendung

H. Aue, W. Blank, Dr. F. Feikus, D. Finke, J. Gottschalk, K. Hanke, P. Hippler, Dr. J. Jahn, J. Knaus, K. Kohlgrüber, K. Präfke, Dr. J. Schädlich-Stubenrauch, G. Scholz, K.-H. Schütt, Dr. W. Weihnacht,

Inhalt

1 Einleitung 2
1.1 Ursprung und Entwicklungsgeschichte 2
1.2 Verfahrensabgrenzung 4
1.3 Merkmale 5
1.4 Marktlage und Zukunftsaussichten 6

2 Das Verfahren Feingießen 7
2.1 Werkzeuge für die Modellherstellung 7
2.1.1 Werkzeugarten 7
2.1.2 Anforderungen an die Werkzeuge 7
2.2 Die Feingussfertigung 8
2.2.1 Das Ausschmelzverfahren 8
2.2.2 Sonderverfahren 11
2.3 Qualitätssicherung und Kontrollen 12
2.3.1 Qualitätssicherung 12
2.3.2 Kontrollmaßnahmen 12
2.3.3 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung 12
2.4 Rapid Prototyping und -manufacturing im Feinguss 15
2.4.1 Grundlagen 15
2.4.2 Die Prozessvarianten 16
2.4.3 Vorgehensweise 18
2.4.4 Fallbeispiele 18

3 Werkstoffe für das Feingießen 20
3.1 Allgemeine Eigenschaften 20
3.2 Werkstoffsorten 20
3.3 Wirtschaftlichkeit 20
3.4 Stähle 21
3.5 Nickel- und Cobalt-Basislegierungen 23
3.6 Gusseisen 23
3.7 Aluminium-Basislegierungen 24
3.8 Titan- und Titan-Basislegierungen 24
3.9 Kupfer- und Kupfer-Basislegierungen 26

4 Konstruieren und Gestalten 27
4.1 Wirtschaftlichkeit 27
4.2 Konstruktive Aspekte 27
4.2.1 Außenkontur 27
4.2.2 Innenkontur und Hinterschneidungen 29
4.2.3 Funktions- und beanspruchungsgerechte Gussteilgestaltung 31
4.2.4 Feingießgerechte Gestaltung 32
4.2.5 Bearbeitungsgerechte Gestaltung 36
4.3 Computergestütztes Gestalten 38

5 Preisbestimmende Faktoren 40

6 Schweißen an Feingussbauteilen 41
6.1 Stahlguss 41
6.1.1 Grundlagen 41
6.1.2 Typische Schweißverfahren 41
6.1.3 Thermische Behandlung vor und nach dem Schweißen 42
6.2 Aluminium 42
6.2.1 Grundlagen 42
6.2.2 Typische Schweißverfahren 42
6.2.3 Schweißnahtvorbereitung 43
6.2.4 Schweißerqualifikation 43

7 Wärmebehandlung 43
7.1 Stahlguss 43
7.1.1 Grundlagen 43
7.1.2 Vorbereitendes Wärmebehandeln 43
7.1.3 Qualitätsbestimmendes Wärmebehandeln 43
7.1.4 Wärmebehandeln von Fertigungs und Konstruktionsschweißungen 44
7.1.5 Ausscheidungshärten 44
7.2 Aluminium 44
7.2.1 Grundlagen 44
7.2.2 Qualitätsbestimmendes Wärmebehandeln 44

Anhangteil
Normen und Richtlinen 46
Weiterführende Literatur 47
Glossar 48

1 Einleitung

Im gesamten deutschsprachigen Raum gilt der Name „Feingießen“ für das industriell angewendete Gießen nach „verlorenen“ Modellen, das sogenannte Modellausschmelzverfahren. Im Ausland ist Feingießen beispielsweise unter folgendem Namen bekannt: „Investment casting“ (lost wax process), „fonte à cire perdue“ und andere mehr.

Das Kennzeichen dieses speziellen Gießverfahrens sind die „verlorenen“ Modelle, die so heißen, weil sie nach dem Einformen zerstört werden, um den Formhohlraum in der Gießform freizugeben, in den die Schmelze eingegossen wird. Diese Modelle bestehen meist aus Wachsen oder deren Gemischen und werden vor dem Abgießen aus den Gießformen ausgeschmolzen, ausgelöst und/oder ausgebrannt. Die Wachsmodelle werden in metallischen Werkzeugen auf Wachsspritzmaschinen hergestellt und mit einem aus Wachs bestehenden Gießsystem zu sogenannten Wachstrauben als Gießeinheit verklebt. Sie erhalten durch wiederholtes Tauchen in keramischen Schlicker mit anschließendem Besanden und Trocknen eine keramische Schale. Diese Modelle bestehen meist aus Wachsen oder deren Gemischen und werden vor dem Abgießen aus den Gießformen ausgeschmolzen, -gelöst und/oder -gebrannt (**Bild 1**).

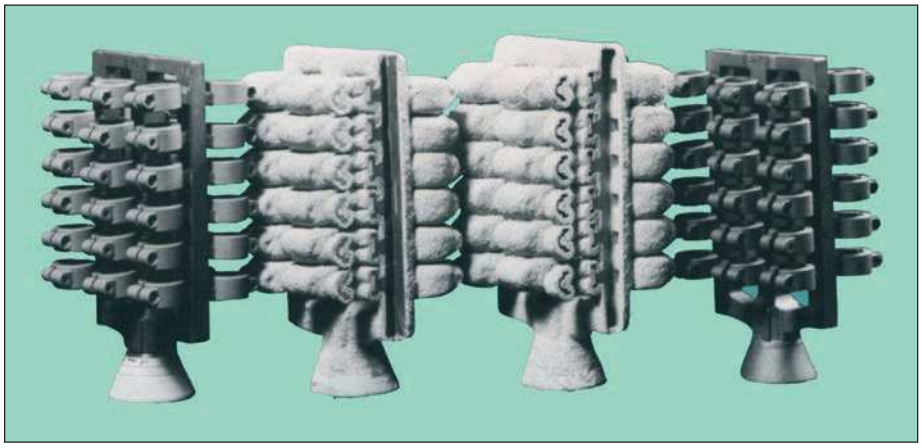


Bild 1: Der Verfahrensablauf beim Feingießen (von links nach rechts): Eine bestimmte Anzahl von Modellen ist mit dem Gießsystem verbunden und bildet eine sogenannte Traube. Durch mehrmaliges Tauchen der Traube in einen „Schlicker“ mit anschließendem Besanden wird die keramische Form hergestellt. Nach dem Herauslösen des Modell- und Gießsystemwerkstoffs wird die Form gebrannt. Das sich anschließende Gießen erfolgt in die noch heiße Form. Nach dem Erkalten des Gussteils werden die Formkeramik entfernt und die einzelnen Gussteile abgetrennt. (Bild: ZGV)

Die Verwendung verlorener Modelle ermöglicht die Nutzung ungeteilter Gießformen. Sie bewirken, dass ohne Formversatz sehr enge Maßtoleranzen eingehalten werden können und Gussteile ohne Teilungsgrat gefertigt werden können (**Bild 1**). Das Gießen in heiße Formen ist dafür prädestiniert, dass auch geringe Wanddicken und komplizierte geometrische Formen konturenscharf zu gießen sind. Damit kommt das Feingießen als urformende Verfahrenstechnik der endgültigen Gestalt eines Bauteiles sehr nahe. In vielen Fällen wird diese sogar erreicht, wie das Beispiel im **Bild 2** zeigt. Das ist einer der Gründe für die Wirtschaftlichkeit von Feinguss.

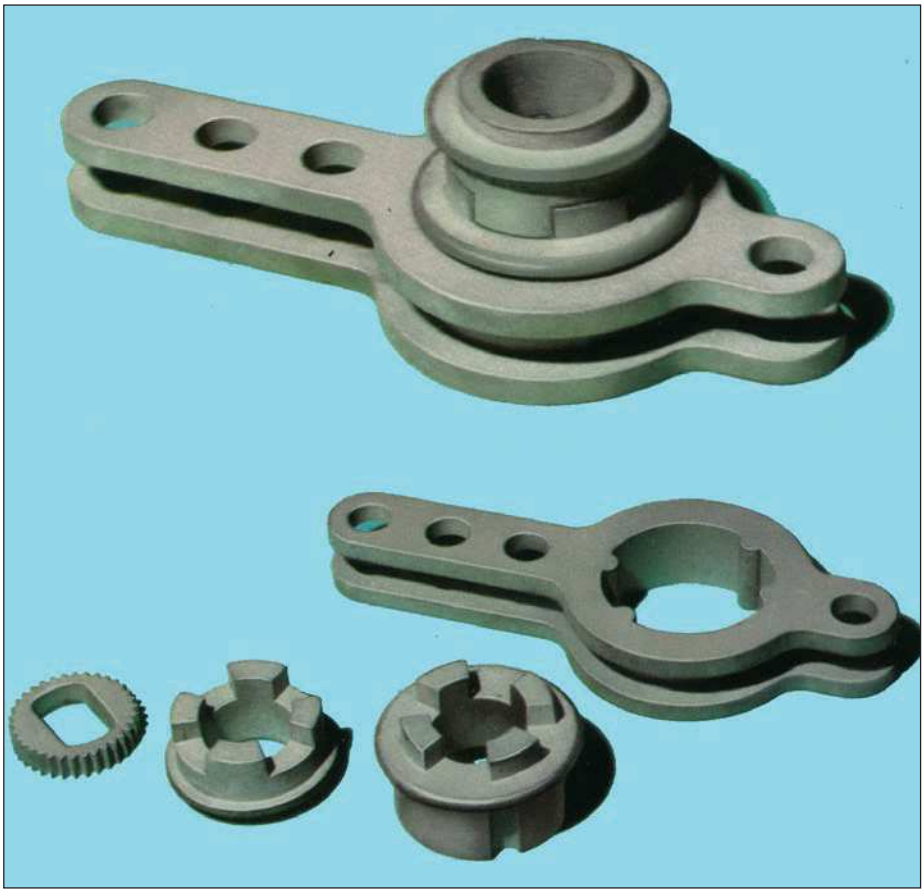


Bild 2: Vierteilige, einbaufertig feingegossene Kupplung für einen Hochspannungsschalter, Werkstoff G16CrMo4 (W.-Nr. 1.7242), Länge 106 mm, Gesamtgewicht 205 g (Bild: Buderus, Moers)

1.1 Ursprung und Entwicklungsgeschichte

Ursprünglich wurde das Wachsausschmelzverfahren für Schmuck und Kunstguss verwendet. Kunstguss wird heute nach verschiedenen Formverfahren hergestellt, wobei auch das Wachsauschmelzverfahren in seinen manuellen Verfahrensmodifikationen zum Einsatz kommt. Die Entscheidung für die Verfahrenswahl erfolgt hier nach fertigungstechnischen Gesichtspunkten und aus künstlerischen Aspekten durch die Gießerei.

Das historische Wachsausschmelzverfahren, Bienenwachs zu formen, es mit Lehm zu umkleiden, nach dem Trocknen das Wachs auszuschmelzen, die verbleibende Lehmhülle zu brennen, den entstandenen Hohlraum mit Metall auszugießen und nach dem Abkühlen den Lehm zu entfernen, um ein Gussteil zu erhalten, ist in der Geschichte der Kultur und der Technik der Ursprung aller Gießverfahren. Seine Ursprünge reichen in die Bronzezeit, also bis etwa 3000 v. Chr. zurück, wie es Funde aus verschiedenen Kulturbereichen der Erde zeigen, so in Mesopotamien, Kreta, Ägypten, China, die von der frühen Blütezeit dieses

Bild 3: Kopf eines Mannes als Kupferplastik, Feinguss aus Mesopotamien, um 2000 v. Chr., gefunden bei Ausgrabungen am Ichtatempel (Im zweiten Golfkrieg verschollen)

Verfahrens zeugen, das sich bald über den gesamten Nahen Osten ausbreitete (**Bild 3**). Bereits damals wurden große Stücke aus mehreren einzeln gegossenen Teilen zusammen gesetzt.

Zwischen 1800 und 1600 v. Chr. breitete sich der Anwendungsbereich des Wachsausschmelzverfahrens auch bis nach Mittel- und Nordeuropa aus. Aus der Bronzezeit des Nordens sind viele Gießstellen und Funde bekannt. Ein besonderes Wahrzeichen dieser Zeit ist der im **Bild 4** abgebildetete Kult- und Sonnenwagen von Trundholm aus dem 11. Jahrhundert v. Chr., der im Museum Kopenhagen ausgestellt ist.

Im Verlauf der Jahrtausende wurde das Wachsausschmelzverfahren zum Gießen von Gegenständen des täglichen Gebrauchs, für Waffen, Musikinstrumente (Luren), Kultgegenstände und Schmuck genutzt. Werkstoffe waren vor allem Bronze, in manchen Fällen auch Gold und Silber, deren Schmelz- und Gießtemperaturen schon damals beherrscht wurden.

In der Renaissance entwickelte sich das Verfahren in Europa zu wohl einmaliger kultureller Blüte. Donatello, Riccio und Cellini in Italien, die Vischers in Nürnberg und viele spätere Künstler schufen Meisterwerke von bleibender Schönheit (**Bild 5**). Standbilder wurden schon damals aus Gewichts- und gießtechnischen Gründen mit Sandkernen gegossen. Den künstlerischen Eindruck beeinträchtigte es jedoch nicht.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts haben Zahnärzte und -techniker begonnen, dieses Verfahren für humanmedizinische Zwecke (Zahnprothesen) zu nutzen. Etwa 20 Jahre später wurden auch Schmuckstücke und Brillenteile nach dem Wachsauschmelzverfahren, wie das Verfahren damals genannt wurde, hergestellt. Damit begann die industrielle Nutzung dieses Verfahrens.

Allerdings war es bis zu diesem Zeitpunkt nur möglich, niedrig schmelzende Metalle zu vergießen, da die Formstoffe Lehm und Gips den hohen Schmelztemperaturen der Eisenwerkstoffe nicht standhielten. Erst die Einführung des Ethylsilicates als Bindemittel mit SiO_2-Basis im Jahre 1929 durch die Deutschen Erdle und Prange ermöglichte den Beginn einer industriellen Nutzung. Zusammen mit feuerfesten Gießereisanden widerstanden die Formen flüssigem Eisen und Stahl von etwa 1600 °C und konnten auch aus anderen hoch schmelzenden Legierungen Gussteile im Wachsausschmelzverfahren hergestellt werden. Das war erst Mitte der 1930er Jahre der Fall, als Ethylsilicat in Verbindung mit feuerfesten Formstoffen als Gießhitze beständiger Formstoff für die Keramikschalenformen entwickelt war.

Anfang der 1940er Jahre wurde das Verfahren in den USA für hitzebeständige Axialturbinenschaufeln für Abgasturbolader von Flugzeugmotoren aus Kobalt-Basislegierungen weiterentwickelt, die damals wegen ihrer Härte nicht bearbeitet werden konnten. 1944 entstand so die erste industrielle Feingießerei in den USA. In der ersten Hälfte der fünfziger Jahre kam das Feingießen über Lizenzerteilungen der Amerikaner nach Deutschland und bewährte sich zunächst im Maschinenbau und in der Feinwerktechnik, wo vor allem Eisen- und Stahllegierungen vergossen wurden [1].

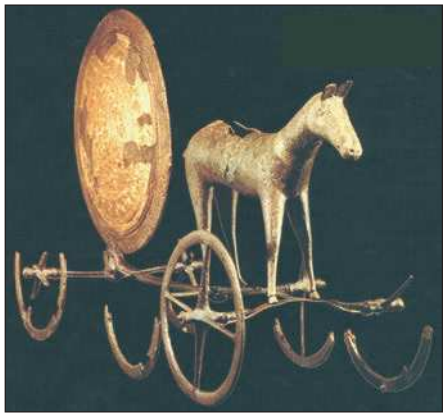


Bild 4: Kult- und Sonnenwagen von Trundholm, Bronzekunstguss nach dem Ausschmelzverfahren aus dem 11. Jahrhundert v. Chr. (Bestand: Museum Kopenhagen)

Bild 5: Perseus mit dem abgeschlagenen Kopf der Medusa, Bronzefeinguss aus dem 15. Jh. von Cellini (Standort: Florenz)

Die Werkstoffpalette hat sich seitdem weiterentwickelt. Neben einer breiten Palette von Stahllegierungen sind es vor allem Kobalt- und Nickel-Basislegierungen sowie Nichteisen-Metalllegierungen aus Aluminium, Kupfer und Titan, die heute im Feinguss dominieren. Welche Legierungen für den Feinguss besonders geeignet sind, wird im Kapitel 3 beschrieben oder kann bei den Feingießereien erfragt werden.

Wirtschaftlichkeit und Qualitätsvorteile haben dazu geführt, dass Feinguss heute praktisch in der gesamten Industrie verwendet wird. Hauptabnehmer sind die Hersteller folgender Erzeugnisse:

- Antriebsaggregate und Getriebe,
- Automobilbau,
- Bergbau- und Bodenbearbeitungsmaschinen,
- Chemische Apparate, Pumpen und Armaturen,
- Druck-, Papier-, Verpackungsmaschinen und Verkaufsautomaten,
- Elektronische Bausätze, Steuer- und Regelgeräte,
- Feinmechanische Erzeugnisse,
- Flecht-, Ketten- und Reißverschlussmaschinen,
- Förder- und Transportgeräte, Aufzüge,
- Funk-, Fernseh-, Fernmelde- und Telemetriegeräte,

- Heimwerkergeräte und Maschinen für das Handwerk,
- Hydraulik- und Druckluftarmaturen,
- Industrieöfen,
- Jagd-, Sport- und andere Waffen,
- Kältemaschinen und physikalische Aggregate,
- Kerntechnische Anlagen,
- Laborgeräte,
- Landmaschinen und andere Fahrzeuge,
- Lebensmittel verarbeitende Maschinen,
- Leit- und Laufschaufeln für Gas- und andere Turbinen,
- Luft- und Raumfahrt,
- Medizinische Instrumente, Implantate für die Humanmedizin,
- Meerwasser-Entsalzungsanlagen,
- Mess-, Prüf-, Zähl-, Stempel- und Nummeriergeräte,
- Navigationsgeräte,
- Optische und geodätische Geräte, Lasertechnik,
- Richtfunk-, Radar- und astronomische Geräte,
- Schalt-, Steuer- und Regelgeräte,
- Schnellverschlüsse,
- Schutz- und wehrtechnische Geräte und Systeme,
- Spielzeug und Werbeartikel,
- Sportartikel und Freizeitgeräte,
- Textil-, Leder-, Holz- und Kunststoff verarbeitende Maschinen,
- Triebwerke, Turbinen und Rotationsverdichter,
- Verbrennungsmotorenteile, wie Wirbelkammern, Turboladerlaufräder, Kipphebel,
- Waagen, Dosiergeräte und Abfüllmaschinen,
- Wasseraufbereitungsanlagen,
- Werkzeuge,
- Werkzeugmaschinen.

1.2 Verfahrensabgrenzung

Die verschiedenen Gieß- und Formverfahren unterscheiden sich nach der Art der verwendeten Modelle, Formen und Formstoffe. Dabei ist mit Form die „Hülle“, eine Schalenform, gemeint, in die das Metall gegossen wird, und mit Modell das Hilfsmittel, um die Form herzustellen. Basis des Herstellungsverfahrens sind industrielle Wachse, die eine kalkulierte Schwindung aufweisen. Die eingesetzten Formstoffe sind für Formtemperaturen über 1000 °C ausgelegt. Im **Bild 6** sind die wesentlichen Form- und Gießverfahren für metallische Werkstoffe enthalten, um die Abgrenzung untereinander deutlich zu machen. Mitunter ist es auch erforderlich, zwei oder mehrere Verfahren gleichzeitig anzuwenden oder zu kombinieren.

Vollformgießen ist dem Prinzip nach mit dem Feingießen am nächsten verwandt. Die Unterschiede sind jedoch, dass beim Vollformgießen die Schaumstoffmodelle vor dem Abguss nicht entfernt werden und dass in kalte Sandformen gegossen wird, wodurch ungleich rauere Oberflächen entstehen und eine wesentlich geringere Maßgenauigkeit als beim Feinguss erreicht wird.

Keramikformgießen wird angewendet, wenn Oberflächengüten und Toleranzen ähnlich dem Feinguss erforderlich sind. Dafür werden praktisch die gleichen oder ähnliche feuerfeste Formstoffe wie für Feinguss verwendet. Aus Kostengründen werden sie jedoch hinterfüllt und nur für diejenigen Partien am Gussteil vorgesehen, an denen sie gebraucht werden. Um Irrtümern vorzubeugen, sei darauf hingewiesen, dass die nach diesem Verfahren hergestellten Bauteile trotz guter Oberflächen kein Feinguss sind, weil mit Dauermodellen und geteilten Formen gearbeitet wird.

Blockgießverfahren mit Wachsmodellen ist ein dem Feingießen sehr ähnliches Verfahren, weshalb es auch oft mit zum Feingießen gezählt wird. Es kommt vielfach wirtschaftlich für kleine Serien und Stückzahlen zur Anwendung. Die Maß- und Oberflächengenauigkeit der so erzeugten Gussteile hängt aber stark von dem verwendeten Blockformstoff ab, und erreicht in vielen Fällen nicht die vom technischen Feinguss bekannten hohen Werte.

Maskenformverfahren wird das Verfahren genannt, das mit geteilten, kalten Formmasken arbeitet, die auf beheizten Modellplatten hergestellt werden. Formstoff ist Kunstharz gebundener Sand.

Druck- und Kokillenguss wird praktisch nur aus Nichteisenmetallen mit „mittleren“ Schmelztemperaturen hergestellt. Es werden Maßtoleranzen erreicht, die zumindest bei Druckguss noch enger als beim Feinguss sind. Für die Herstellung von Druck- und Kokillenguss müssen infolge der relativ hohen Gießtemperaturen metallische Dauerformen aus Gusseisen oder Warmarbeitsstahl (für Druckguss) verwendet werden. Dagegen sind beim Feinguss für die Herstellung der Modelle außer Werkzeugen aus kostengünstigeren Stählen auch solche aus Aluminium oder Weichmetall üblich, weil die Modellwerkstoffe unterhalb 90 °C verarbeitet werden können. Dies ist die Ursache für die meist erheblichen Preisunterschiede zwischen den Druckgießformen und den Werkzeugen für die Feinguss-Ausschmelzmodelle.

Feingießen gehört wie Druck-, Kokillen-, Formmasken- und Keramikformgießen zu den Genaugieß- und -formverfahren, die aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wegen des verminderten Bearbeitungsaufwandes weltweit immer bedeutender werden.

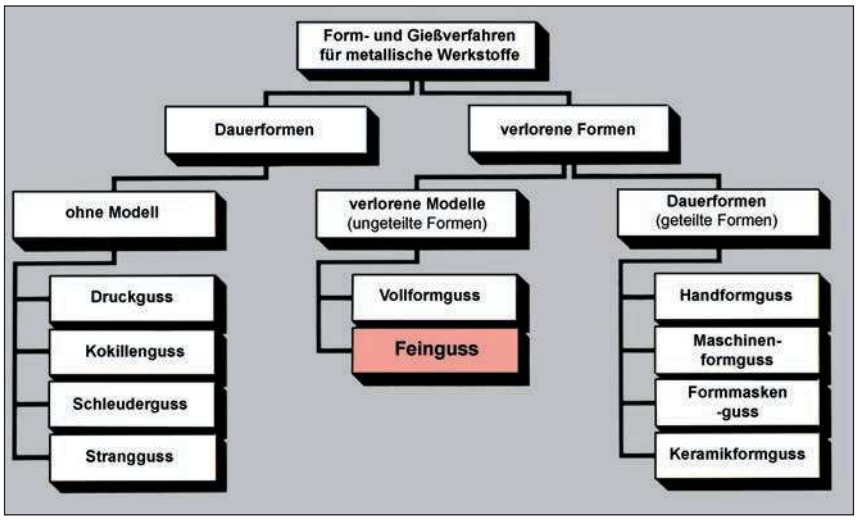


Bild 6: Übersicht der wichtigsten Form- und Gießverfahren

Bild 7: Feste Seilklemme für den Seilbahnbau, Werkstoff G25CrMo4 (W.-Nr. 1.7218), Abmessungen: 212 x 168 x 175 mm, Gewicht: 7,2 kg (Bei diesem Feingussteil wird eine Kostenersparnis von 28 % gegenüber dem früheren Schmiedeteil erzielt!) (Bild: ZGV)

1.3 Merkmale

Charakteristische Merkmale, die diese erfolgreiche Entwicklung des industriellen Feingießens beeinflusst haben, sind nachfolgend aufgeführt.

I. Wirtschaftlichkeit

Hier ist an erster Stelle die Wirtschaftlichkeit zu nennen. Nur rationelle Fertigungsmethoden können sich auf Dauer behaupten. Der Feinguss hat in den über sechzig Jahren seiner industriellen Nutzung sein Anwendungsspektrum mehr und mehr ausweiten können. So werden immer größere Gussteile, andererseits immer schwieriger zu erschmelzende Legierungen feingegossen. Aufgrund seiner wirtschaftlichen Vorteile wird Feinguss bei wertanalytischen Vergleichen zunehmend in Betracht gezogen (**Bild 7**). Einen bedeutenden Entwicklungssprung in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht konnte mit den günstig nutzbaren Rapid-Prototyping- und Rapid-Tooling-Verfahren erzielt werden, wodurch heute auch Kleinserien und Einzelteile mit Feingießen wirtschaftlich und schnell gefertigt werden können (**Bild 8**). Spezielle Wirtschaftlichkeitshinweise werden unter 4.1 gegeben.

II. Gestaltungsfreiheit

Wie kein anderes Gießverfahren bietet Feingießen die Möglichkeit zum optimalen Gestalten (**Bild 9**). Durch Feinguss gerechtes Konstruieren werden oft technische Lösungen erreicht, die auf andere Weise gar nicht oder zumindest wirtschaftlich nicht möglich sind. Einzelheiten hierzu sind im Kapitel 4 „Konstruieren und Gestalten“ dargelegt.

III. Freie Werkstoffwahl

Die im Kapitel 3 genannte breite Werkstoff- und Legierungspalette bietet mit ihren vielfältigen technologischen Eigenschaften ein weites Anwendungsgebiet für die unterschiedlichsten Anforderungen in allen Bereichen der Technik. Selbst für Forschungszwecke und bei seltenen – auch ausländischen – Sonderlegierungen ist der Feingießer immer in der Lage, entsprechenden Wünschen nachzukommen. Dabei ist vorauszusetzen, dass der Werkstoff nach dem heutigen Stand der Technik gießbar ist. Oft ist es zudem möglich, mit einem einzigen Modellwerkzeug angepasst an die jeweiligen betrieblichen Anforderungen die gleichen Feingussteile aus verschiedenen Werkstoffen herzustellen (**Bild 10**).

Bild 9: Feingegossener Zerstäuber für verbrennungstechnische Anlagen, Werkstoff EN AC-AlSi7Mg0,3 (W.-Nr. EN AC-42100), Abmessungen: Dmr. 84 x 62 mm, Gewicht: 82 g (Bild: Feinguss Blank, Riedlingen)

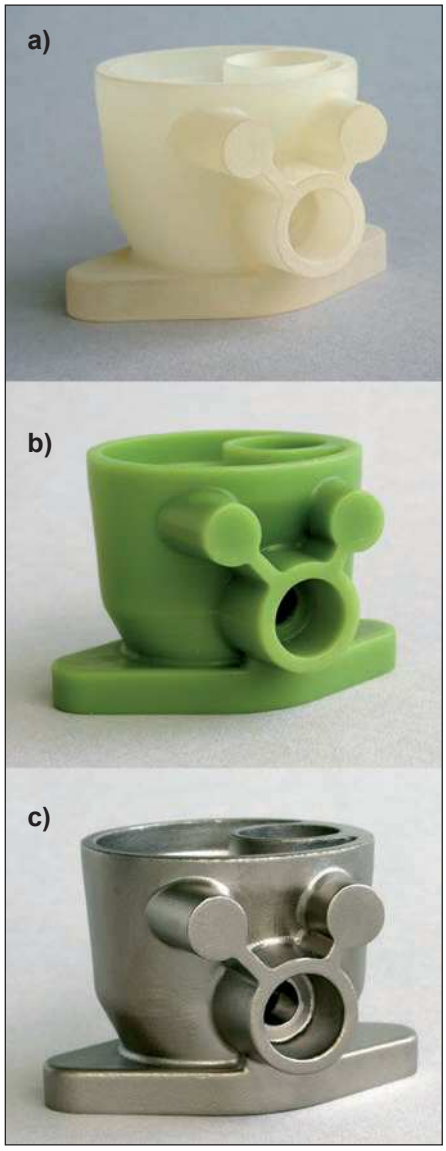


Bild 8: Rapid Prototyping im Feinguss
a) Stereolithographiemodell für die Formenherstellung (Bild: NRU, Neukirchen)
b) Feingusswachsmodell
c) Feingussteil

Bild 10: Mit demselben Modellwerkzeug aus Stahl, CuZn- und Al-Basis-Legierung jeweils entsprechend den Funktionsanforderungen hergestelltes Feingussteil für den allgemeinen Maschinenbau, Maße 140 x 75 x 55 mm (Bild: Feinguss Blank, Riedlingen)

IV. Hohe Maßgenauigkeit und Oberflächengüte

Enge Toleranzen und gute Maßhaltigkeit auch bei wiederholter Großserienfertigung sind mit Feinguss sicher zu erreichen. Die auftretenden Streubreiten liegen etwa bei +/- 0,6 % vom Nennmaß, wie der **Tabelle 1** aus den **VDG-Merkblatt P 690** entnommen werden kann. Feinguss hat zudem eine hohe Oberflächengüte, die sich durch Riefenfreiheit und eine Rautiefe von R_a = 1,6 bis 6,3 µm auszeichnet (**Tabelle 1**).

V. Geringer Bearbeitungsaufwand

Maßgenauigkeit, Maßhaltigkeit und gute Oberflächen kennzeichnen das Erzeugnis Feingussteil, das meist nur geringfügig und vielfach gar nicht bearbeitet zu werden braucht. Das ist besonders dann von Vorteil, wenn es sich um schwer zerspanbare Werkstoffe oder um kompliziert gestaltete Konturen handelt. So lassen sich mit Feinguss auch Bearbeitungsaufwand und Lagerhaltungskosten vermindern.

VI. Stückgewichte

Der größte Teil der gefertigten Feingussteile liegt im Gewichtsbereich von einigen Gramm bis 100 Kilogramm. Es werden aber auch Werkstücke mit Gewichten von weniger als einem Gramm und aus Co-, Cu-, Fe- und Ni-Basis-Legierungen von weit über 100 kg feingegossen, wie beispielhaft die **Bilder 11** und **12** verdeutlichen.

Tabelle 1: Richtwerte für Oberflächenrauheit von Feingussteilen (nach VDG-Merkblatt P 690)

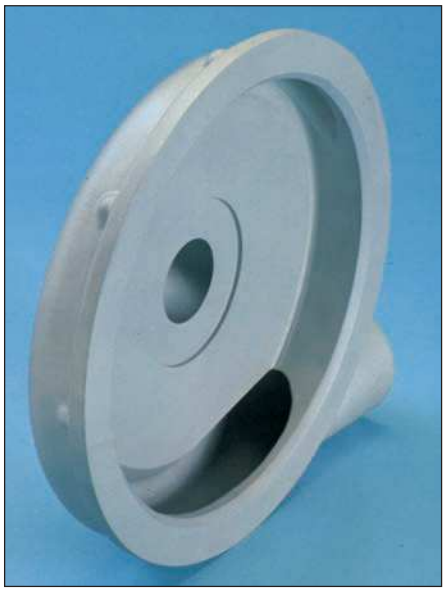
Oberflächennormalien	Werkstoffgruppe D		Werkstoffgruppe A		Werkstoffgruppe T	
	CLA (µinch)	Ra (µm)	CLA (µinch)	Ra (µm)	CLA (µinch)	Ra (µm)
N 7	63	1,6				
N 8	125	3,2	125	3,2		
N 9	250	6,3	250	6,3	250	6,3

Bild 11: Aus verschiedenen Sorten Edelstahl feingegossene Kleinteile mit einem Stückgewicht bis 10 g (Bild: ZGV)

VII. Stückzahlen

Übliche Stückzahlen für Feinguss sind einige hundert bis mehrere tausend Stück. Mit Hilfe der generativen Verfahren lassen sich auch Prototypen und Kleinserien ab der Losgröße Eins heute im Rapid Tooling wirtschaftlich darstellen.

Wegen der Vielfalt der Einflussgrößen können Grenzwerte für eine wirtschaftliche Stückzahl nicht genannt werden. Beispielsweise ist die Blende für einen Abgaskrümmer im **Bild 13** als Feingusskonstruktion schon mit 20 Stück kostengünstiger als die geschweißte Ausführung. Andererseits sind vor allem Automobilserienteile von über 100 000 Stück pro Monat in Feinguss üblich.



1.4 Marktlage und Zukunftsaussichten

Die Entwicklung des Feingussmarktes ist im Wesentlichen auf zwei Forderungen der Abnehmerkreise zurückzuführen:

- Der Bedarf an immer größeren Teilen, weil sich durch Feinguss schwierige und kostspielige Bearbeitungsvorgänge erübrigen. Viele Beispiele dafür sind in diesem Heft abgebildet.
- Der Wunsch, Gussteile aus speziellen Legierungen schon mit endabmessungsnahen Konturen zu erhalten. (Das trifft besonders für Luftfahrtwerkstoffe auf Al- und Fe-Basis, aber auch auf Co- und im Vakuum erschmolzene Ni- und Ti-Basis-Legierungen zu.)

Diese beiden, teils miteinander verbundenen Forderungen haben einerseits zu immer umfangreicheren Investitionen der Feingießer geführt, andererseits aber auch bewirkt, dass sich der Markt entsprechend ausgeweitet hat. Parallel dazu haben der Wettbewerb unter den einzelnen Feingießereien und der Wettbewerb mit anderen Herstellverfahren dazu gezwungen, immer mehr zu rationalisieren, was letztlich den Abnehmern zugute gekommen ist. Aufgrund der positiven Entwicklung in den letzten Jahren und der erwähnten Vorteile kann auch zukünftig ein expansiver Markt mit neuen Einsatz- und Anwendungsgebieten erwartet werden.

< Bild 12: Pumpengehäuse werden bis etwa 500 mm Dmr. und 100 kg aus Fe- und Ni-Basislegierungen feingegossen. (Bild: ZGV)

Bild 13: Endmontierte Blende für einen Sportwagen (links) und das Blendenteil aus Aluminiumfeinguss (rechts), Werkstoff: EN AC-AlSi7Mg0,6 (W.-Nr. EN AC-42200), Gewicht: 450 g (Bild: Feinguss Blank, Riedlingen)

2 Das Verfahren Feingießen

Der Fertigungsablauf beim Feingießen besteht grundsätzlich aus den Produktionsbereichen Wachsmodellfertigung und Keramikformenfertigung, Schmelzbetrieb und Nachbearbeitung (**Bild 14**).

2.1 Werkzeuge für die Modellherstellung

Zum Herstellen der verlorenen Modelle und der Gießsysteme werden Werkzeuge (Wachsspritzformen, auch Matrizen genannt) gebraucht. Diese Wachsspritzformen sind im Prinzip vergleichbar mit den Spritzgießformen für die Kunststoffindustrie. Allerdings sind die Wachsspritzformen oft handbetätigte Formen (**Bild 15**), das heißt, möglicherweise eingebaute Schieber, Stecker oder Handeinlagen werden von Hand bewegt und die Spritzlinge werden von Hand entnommen. Dies hängt mit den benötigten Stückzahlen von Gussteilen zusammen. Feingussteile haben normalerweise nicht die Stückzahlen, wie man sie von der Kunststoffbranche her kennt. Für Automobilgussteile kommen aber auch Automatikwerkzeuge mit mechanisierter Entnahmevorrichtung zum Einsatz **(Bilder 16a** und **b**).

2.1.1 Werkzeugarten

Die Wahl der anzuwendenden Werkzeugart hängt von den vorgesehenen Stückzahlen, dem Modellwerkstoff und der Kontur des Gussteiles ab. So sind folgende Werkzeuge gebräuchlich:

- Mehrfachwerkzeuge für größere Serien, wobei mit den Modellen auch Teile des Gießsystems hergestellt werden können,
- Einfachwerkzeuge für mittlere und kleinere Serien, bei denen die Modelle einzeln mit dem Gießsystem verbunden werden.

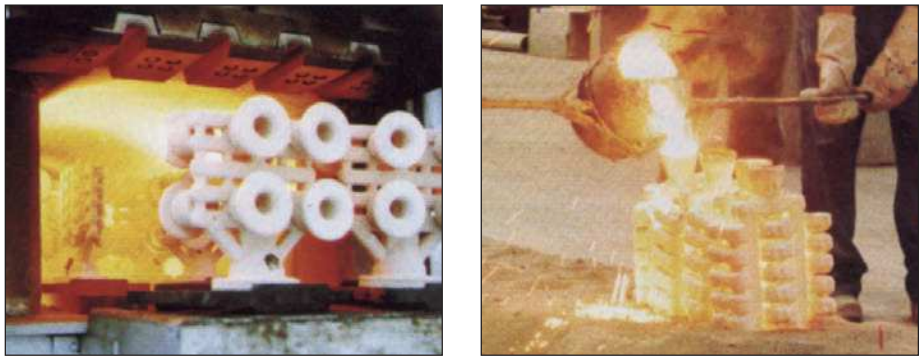


Bild 14: Brennen (a) und Abgießen (b) einer Feingießform

Je nach dem zu verarbeitenden Modellwerkstoff, der herzustellenden Stückzahlen und den verwendeten Spritzmaschinen werden die Werkzeuge dann noch wie folgt unterschieden:

- Stahlwerkzeuge für Großserien werden wegen der höheren Standzeit eingesetzt,
- Aluminiumwerkzeuge werden zum Verarbeiten von Wachsen eingesetzt und haben praktisch unbegrenzte Standzeiten,
- Weichmetallwerkzeuge sind meist aus einer niedrig schmelzenden Sn-Bi-Legierung. Sie werden vereinzelt noch von verschiedenen Feingießereien für kleinere und mittlere Serien angeboten. Diese werden aber zunehmend durch die Rapid-Prototyping-Verfahren verdrängt.

Genauere Feingussteile entstehen, wenn bei Handbetrieb mit Formen aus Aluminium gearbeitet wird. Aluminium ist für den Formenbauer leicht zu bearbeiten und das Arbeiten mit den Formen ist für das Bedienungspersonal an den Wachsspritzmaschinen vom Gewicht vorteilhaft. Für große Feingussteile werden Formen aus Aluminium mit Gewichten bis zu 700 kg gebaut.

Formen für Spritzautomaten kommen zur Anwendung, wenn die Stückzahlen, wie in der Automobilbranche üblich, sehr hoch sind. Auch diese Formen werden in der Regel aus Aluminium gefertigt. Selten, so bei sehr hohen Stückzahlen, wird diese Art der Formen aus Stahl gearbeitet.

2.1.2 Anforderungen an die Werkzeuge

Die Formen beziehungsweise Formnester unterliegen hohen Qualitätsanforderungen insbesondere mit hohen Oberflächengüten. Zum einen müssen die Abmessungen in engen Toleranzen liegen und erfordern eine hohe Oberflächengüte. Zum anderen dürfen die Nester wegen der Luftabfuhr eine nicht zu feine Oberfläche aufweisen. Zwischen Kunden und Gießerei muss deshalb die Oberflächengüte vereinbart werden. Engere Toleranzen sind natürlich möglich und werden auch in speziellen Fällen angewendet, sind aber mit höheren Werkzeugkosten verbunden. Im Allgemeinen gelten die Anforderungen der **ISO 8062**.

Auf die Entformbarkeit der Wachsmodelle muss der Formenbauer besonderes Augenmerk richten. Sehr tiefe Konturen können beispielsweise in der Form sehr fest sitzen. Eine zusätzliche Handeinlage oder ein Schieber begünstigen das Entformen. Auf die Entlüftung solch tiefer Konturen ist zu achten. Wachsteile mit vielen Rippen lassen sich nur schwer entformen. Hier sind nach Vereinbarung mit dem Endkunden Entformungsschrägen vorteilhaft. Für das sichere Entformen der Wachsmodelle, besonders bei höheren Stückzahlen und automatischen Prozessen, sind die verschiedenen Auswerfersysteme unumgänglich.

In den vergangenen Jahren haben sich verschiedene Hilfsmittel für das Formen von Hinterschneidungen in Gussteilen entwickelt. Zuerst wird versucht, durch Schieber oder Handeinlagen so viel wie möglich darzustellen. Wenn das technisch nicht möglich ist, werden wasserlösliche oder keramische Kerne verwendet. So-

Bild 15: Handbetätigte Wachsspritzform aus Aluminium mit 34 Handeinlagen

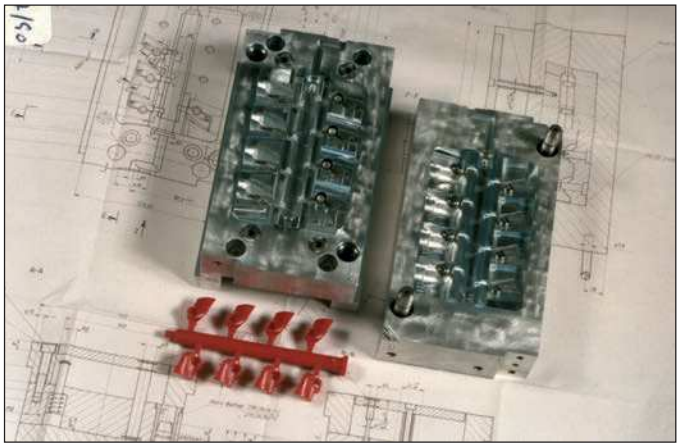


Bild 16a: Halbautomatische Wachspritzform in Aluminiumausführung für die Fertigung von acht Wachslingen mit Gießstab

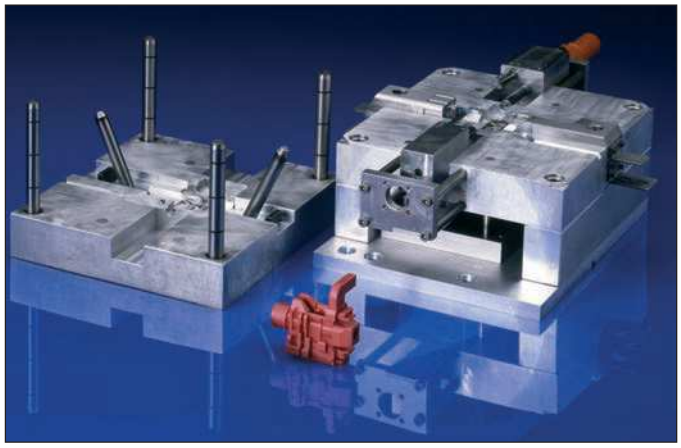


Bild 16b: Automatische Wachspritzform in Aluminiumausführung mit vier Stahlschiebern und Auswerfersystem

wohl für das Herstellen wasserlöslicher Wachskerne als auch keramischer Kerne sind ebenfalls Spritzwerkzeuge erforderlich.

Wesentlich für die Modellqualität ist das Anspritzen der Teile. Der Anspritzpunkt sollte möglichst immer am Anguss sein, um späteres zusätzliches Verputzen der Gussteile zu vermeiden. Der oder die Spritzkanäle müssen immer ausreichend dimensioniert sein, um ein Einfrieren zu vermeiden. Das Wachs hat wie jedes zu verspritzende Material die Eigenschaft, an den Formwänden zuerst zu erhärten. Diesem Gesetz unterliegt auch der Spritzkanal. Um das Wachsteil sicher zu versorgen und Einfallstellen zu vermeiden, muss der Spritzkanal immer bis zum Schluss eine flüssige Seele behalten und entsprechend groß im Durchmesser gehalten werden.

Einfallstellen können vermieden werden, indem sogenannte Füllkerne in die Konturen der Wachsspritzform mit großer Wanddicke eingelegt werden. Die Füllkerne sollten aber mindestens 4, besser 5 mm Wand allseitig offen lassen, damit das Wachs des Wachsmodells den Füllkern voll umschließen kann. Der Füllkern selbst wird durch mitgespritzte Spitzen in seiner Position gehalten.

Die Modellqualität wird auch von der Betriebstemperatur der Spritzform beeinflusst. Je nach Spritztechnologie, Modellwachstyp, eingespritzter Wachsmenge und Spritzfolge kann eine Formtemperierung zum Beispiel mit einer durchströmenden Temperierungsflüssigkeit in einem inneren Bohrungssystem unumgänglich sein.

Die Gestaltung der Gussteile (Geometrie und Abmaße) beziehungsweise Wachsmodelle stimmt der Feingießer mit dem Endabnehmer ab. Dabei werden neben den gießtechnologischen Gesichtspunkten auch moderne Möglichkeiten der Zerspanung beim Formenbauer (auf CNC-Hochleistungsmaschinen lassen sich Radien < 0,5 mm herstellen!) berücksichtigt. Alle Angaben zur Auslegung der Spritzform (Maße des Wachsmodells, Dimensionierung des mit zu formenden Angusses, Anzahl der Nester, Spritzkanäle, Anschlussmaße in der Spritzmaschine usw.) erhält der Formenbauer vom Feingießer.

Der Endabnehmer als Kunde des Feingießers kann zur preiswerteren Anfertigung einer Form beitragen, in dem er seine dem Teil entsprechenden 3D-Daten zur Verfügung stellt. Gießtechnische Änderungen wie zusätzliche Bearbeitungszugaben und Schwindmaßzugaben bringen der Feingießer oder Formenbauer ein.

Eine dem Feingussverfahren gerecht werdend angefertigte Wachsspritzform ist wesentliche Voraussetzung für die Herstellung guter Feingussteile.

2.2 Die Feingussfertigung

Neben der Modellfertigung und -montage gehören die Gießformenherstellung (**Bild 17**), der Gieß- und Auspackprozess sowie diverse Nachbehandlungsaufgaben zum Leistungsangebot der Feingießereien.

2.2.1 Das Ausschmelzverfahren

Die weiteren Arbeitsgänge der Feingussfertigung sind schematisch im **Bild 18** dargestellt. Im Einzelnen handelt es sich um die Arbeitsgänge

- **Herstellen der Modelle und der Gießsysteme (A):** Mit den unter 2.1 beschriebenen Werkzeugen werden dann, vergleichbar dem Kunststoffspritzgießen, die Modelle hergestellt, die bereits mit „Angüssen“ (Teil des Gießsystems) versehen sind. Dabei lassen sich der Arbeitsdruck der Spritzmaschine und die Temperatur des Modellwerkstoffs so steuern, dass prozesssicher maßhaltige Modelle entstehen. Auf ähnliche Weise werden auch die Gießsysteme hergestellt.
- **Zusammenbau zu Gießeinheiten (B):** Der nächste Schritt ist das Zusammenfügen (Kleben und/oder Verschweißen) der Modelle und Gießsysteme zu sogenannten Trauben (**Bilder 19** und **20**). Damit werden gießgerechte und vor allem wirtschaftliche Gießeinheiten erhalten. Größere Teile können natürlich auch einzeln gegossen werden. Entsprechend

Bild 17: Die Schalenformherstellung beim Feingießen (Bilder: NRU, Neukirchen)
a) Formschalen vor dem Wachsausschmelzen b) Brennen der Formschale c) Abgießen der Formschale unter Vakuum

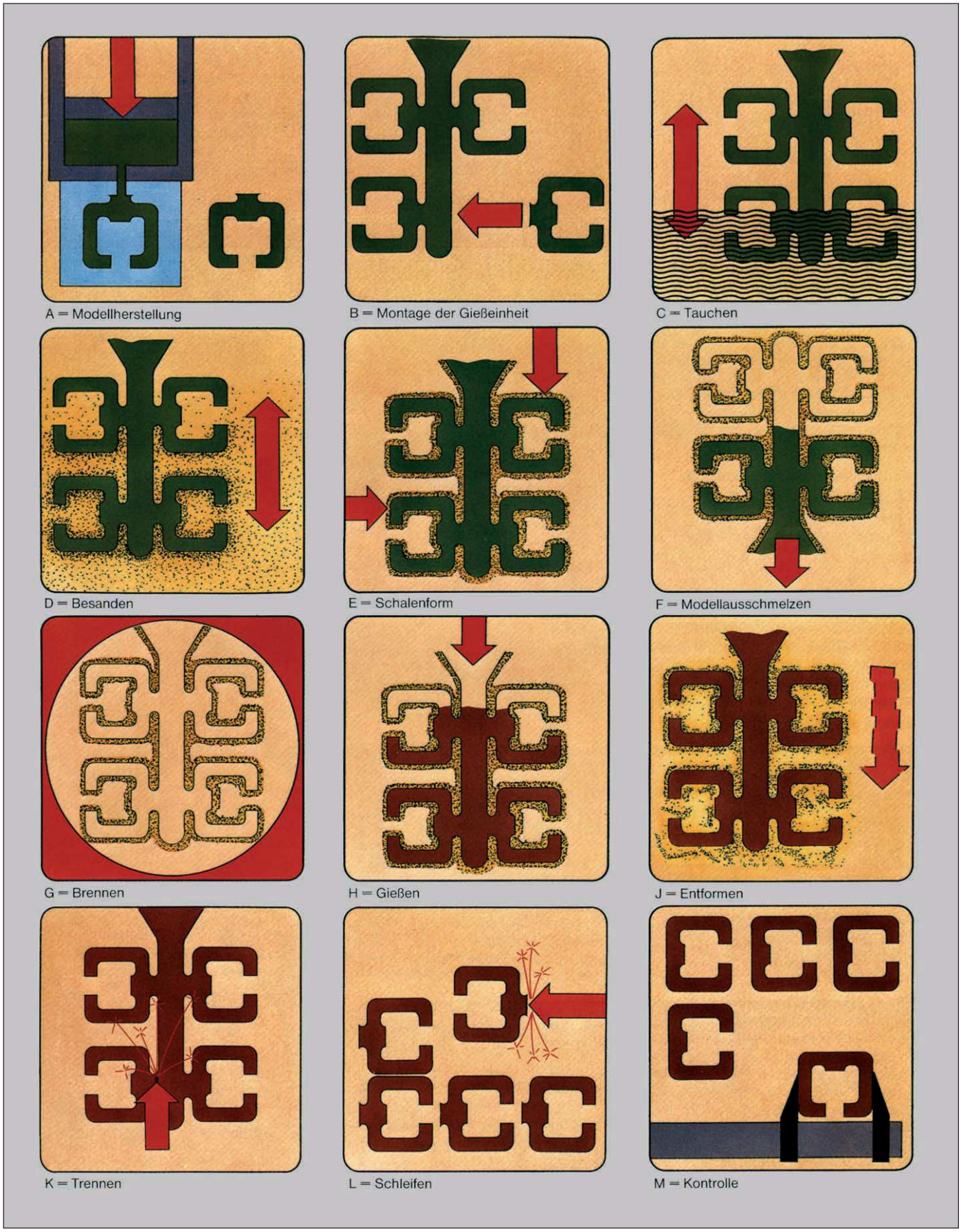


Bild 18: Die Arbeitsgänge der Feingussfertigung

A - Wachsmodellherstellung
B - Zusammenbau der Gießeinheit
C - Tauchen der Gießeinheit in Formschlicker
D - Besanden der Gießeinheit
E - Trocknen der keramischen Schale
F - Ausschmelzen der Modelle
G - Brennen der Formschale
H - Abgießen der Schalenform
J - Entfernen der Formschale
K - Abtrennen der Gussteile
L - Verschleifen der Anschnittreste
M - Qualitätskontrolle am Gussteil

den technischen Gegebenheiten der Gießerei erfolgt die Montage der Gießeinheiten. Ein sachkundiger Aufbau der Gießeinheiten und entsprechende Angusstechnik sind ausschlaggebend für die Fertigung gefügedichter und sauberer Feingussteile und fallen in den Aufgabenbereich der Feingießerei.

- **Herstellen der Gießformen (C, D, E):** Die so entstandenen Gießeinheiten bilden die Träger für die zähflüssige Formkeramik, die aus feuerfesten Mehlen und Bindern besteht. Durch wiederholtes Eintauchen in den Formstoffschlicker, anschließendes Besanden und nachfolgendes Trocknen entsteht so eine keramische Schale aus mehreren, fest miteinander verbundenen Schichten (**Bild 21**).
- **Ausschmelzen und Brennen (F, G):** Nun müssen der Modellwerkstoff entfernt und die so entstandenen Schalen gebrannt werden, um die für das Gießen erforderliche feste Keramikform zu erhalten. Die Wachse werden im Dampfautoklaven herausgeschmolzen. Bei Brenntemperaturen von über 1000 °C werden anschließend die Modellwerkstoffreste vollständig und rückstandslos verbrannt und die für das Gießen erforderliche Festigkeit und Gasdurchlässigkeit der Formschale eingestellt.
- **Schmelzen und Gießen (H):** Für das Erschmelzen und das Vergießen von Stählen, Co-, Ni- und Ti-Basis-Legierungen werden Induktionsöfen oder Vakuum-Induktionsöfen eingesetzt. Zum Schmelzen von Al- und Cu-Basislegierungen kommen Gas-, Öl- und elektrisch beheizte Tiegelöfen zur Anwendung. Das Fassungsvermögen der Ofenaggregate reicht von etwa 15 bis 600 kg, was maßgeblich die abzugießende Gussteilgröße bestimmt. Das Abgießen erfolgt in die noch heißen Formschalen, die beispielsweise bei Stählen eine Temperatur von 900 bis 1200 °C haben. Dadurch ist gewährleistet, dass auch enge Querschnitte und feinste Konturen sicher mit Schmelze gefüllt werden. Eine saubere Schmelzeführung und das exakte Einhalten sowohl der Schmelz- als auch der Formtemperaturen werden als wichtige Voraussetzung für qualitativ hochwertige Feingussteile sorgfältig überwacht.
- **Entformen (J):** Nach dem formfesten Erkalten des Gießmetalls in der Form wird die Formkeramik mit Drucklufthämmern und/oder mit Druckwasser weitgehend entfernt. Schlagempfindliche und verzuggefährdete Gussteile sowie solche mit komplizierter Innengestaltung werden in Keramik lösenden Bädern chemisch vom Formstoff befreit.
- **Trennen (K):** Gussteile und Gießsysteme werden nun voneinander getrennt. Das erfolgt meist mit Trennscheiben oder Bandsägen. An den Gussteilen noch anhaftende Formstoffreste werden durch Strahlen entfernt. Je nach Gusswerkstoff kommt dafür Stahlkies, Korund, Glasperlen oder Druckwasser zum Einsatz.

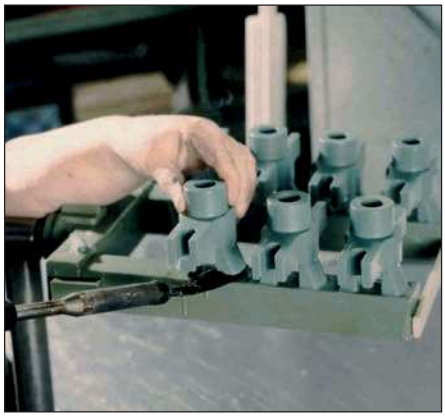


Bild 19: Montage der vorgefertigten Ausschmelzmodelle an das Gießsystem zur Gießeinheit

Bild 20: Werkzeuglos mit dem generativen Verfahren Stereolithographie aufgebaute Ausschmelzmodelle (Quick-Cast-Verfahren)

- **Schleifen (L):** Angussreste, die vom Trennen her noch stehengeblieben sind, werden anschließend beigeschliffen. Liegt der Anguss auf einer Fläche, die vom Abnehmer noch spanend bearbeitet wird, dann kann aus Kostengründen oft vereinbart werden, den Angussrest stehen zulassen. Er wird während der nachfolgenden Bearbeitung „automatisch“ mit entfernt,wodurch ein Arbeitsgang und entsprechende Kosten eingespart werden können.
- **Wärmebehandeln:** Feingegossene Werkstücke können im Gusszustand und in den verschiedensten Wärmebehandlungszuständen geliefert werden. Der Lieferzustand ist beispielsweise für

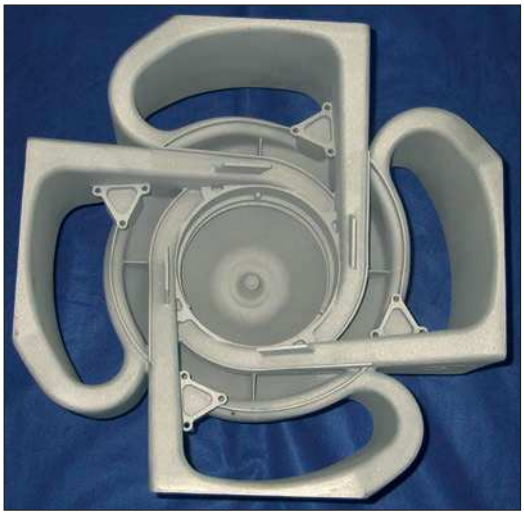
  Stähle: weichgeglüht, normalisiert, ausscheidungs- oder einsatzgehärtet, vergütet, lösungsgeglüht;

  Co- und Ni-Basislegierungen: Guss zustand, lösungsgeglüht, ausscheidungsgehärtet, gealtert;

  Al-Basislegierungen: Gusszustand, lösungsgeglüht, warmausgelagert und überaltert;

  Cu-Basis-Legierungen: Gusszustand, ausgehärtet, vergütet.
- **Richten:** Wenn aufgrund der konstruktiven Gestaltung des Gussteils während des Erstarrens oder Wärmebehandelns ein Verzug auftritt, wird ein Richten erforderlich. Je nach Werkstoff und Gussteil geschieht dies warm oder kalt, manuell oder maschinell.
- **Prüfen und Kontrollieren (M):** Alle oben genannten Verfahrensschritte unterliegen entsprechenden begleitenden Kontrollen, um die gleichbleibende gute Qualität des Erzeugnisses Feinguss zu sichern. Diese Kontrollen beziehen sich nicht nur auf die Maße der Werkzeuge, Modelle und Gussteile, sondern beispielsweise auch auf die Gasdurchlässigkeit, das Ausdehnungsverhalten und die Festigkeit der Keramikformen im heißen oder kalten Zustand. Ebenfalls wird die chemische Zusammensetzung der Feingusswerkstoffe überwacht und dem Kunden auf Wunsch die Analyse zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus ist es jedoch notwendig, auch die verwendeten Rohstoffe einer Wareneingangsprüfung zu unterziehen, um eine optimale Fertigung zu gewährleisten. Die gewünschten Eigenschaften werden mit den Rohstofflieferanten in Form von Datenblättern oder Liefervorschriften vereinbart. So sind zum Beispiel nur Modellwerkstoffe, Formstoffe und Formstoffbinder, Metalle und Legierungselemente für Feinguss geeignet, die bestimmte technologische beziehungsweise chemische Eigenschaften aufweisen. Die speziellen Punkte der Gütesicherung, der statistischen Qualitätskontrolle und der zu vereinbarenden Abnahmebedingungen sind im Kapitel 2.3 dargelegt.
- **Vorrichtungen:** Zur wirtschaftlichen Fertigung können für die verschiedenen Arbeitsgänge Vorrichtungen erforderlich werden, die wie auch die Werkzeuge dem Besteller oder Kunden berechnet werden.

Bild 21: Automatisierter Aufbau der Keramikschalenform durch abwechselndes Tauchen in Schlicker und fluidisiertem Sandbad



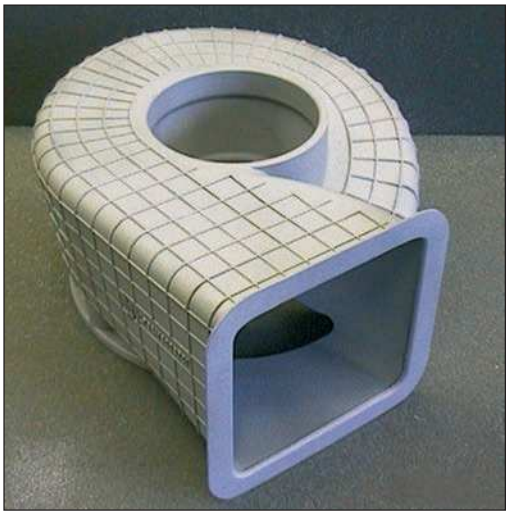


Bild 22: Strukturteile für Fluggeräte (a), für Optikträger (b) und für eine dünnwandige Verstärkung, alle nach dem Sophia-Verfahren gefertigt, Werkstoff: EN AC-AlSi7Mg,0,6 (W.-Nr. EN AC-42200) (Bild: Zollern Soest)

2.2.2 Sonderverfahren

Spezielle Verfahrensmodifikationen erweitern zudem das Anwendungsspektrum des Feingießens. Das **Sophia-Verfahren** wurde entwickelt, um komplexe Aluminium-Feingussteile mit sehr unterschiedlichen Wanddicken über das gesamte Bauteil mit einem gleichmäßigen und dichten Gefüge zu fertigen. Das wird durch regelbare reproduzierbare Erstarrungsparameter, die prozessseitig auf die konstruktiven Gegebenheiten des Gussteils abgestimmt werden, erreicht [2].

Dadurch werden außergewöhnlich hohe statische und dynamische Festigkeitseigenschaften erzielt, die denen von Knetlegierungen nahe kommen. Damit lassen sich mit diesem Verfahren vor allem hoch beanspruchte Bauteile mit sehr komplexer Gestalt schnell und wirtschaftlich fertigen (**Bild 22**).

In die gleiche Richtung zielt das **HERO Premium Casting,** wo durch Kombination des Feingießens mit einer computergelenkten Erstarrung unabhängig von der Wanddicke ein feines und gleichmäßig verteiltes Gefüge im Gussteil eingestellt wird. Festigkeit und Zähigkeit der Gussteile werden dadurch deutlich gesteigert. Für die Festigkeitssteigerung ist das feine Mikro- und Makrogefüge und für die Zähigkeitsverbesserung das dichte Gefüge verantwortlich (**Bilder 23 bis 25)** [3].

Diese Sonderverfahren kommen vor allem in den Hochtechnologien wie der Luft- und Raumfahrt oder dem Rennsport, aber auch in der Medizintechnik u. ä. Bereichen zum Einsatz. Genutzt werden können zudem diese verbesserten Eigenschaften zum weiteren Leichtbau.

Beim **Vakuumfeinguss** wird die Schmelze im evakuierten luftleeren Raum vergossen, um nicht erwünschte Reaktionen mit der Umgebungsluft zu vermeiden. Mit diesem Verfahren können deshalb Werkstoffe vergossen werden, die sich unter der Normalatmosphäre nicht schmelzen und vergießen lassen würden und zudem über einen sehr hohen Reinheitsgrad der Schmelze verfügen müssen.

Dieses Verfahren kommt für Ni-Basis-Legierungen zum Einsatz, wie sie bei chemisch beständigen und hochwarmfesten Bauteilen bis zu 1000 °C Einsatztemperatur zum Einsatz kommen. Hochtemperaturbeständige Feingussteile aus Ni-Basis-Werkstoffen im Vakuumfeinguss erschmolzen, kommen in modernen Antriebslösungen zum Einsatz. Weitere Anwendungsgebiete werden bei Hochtemperatur belasteten Automobilteilen in Großserienfertigung aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen gesehen. Zudem erfordern die Zukunftskonzepte für die Energieerzeugung immer hochtemperaturbeständigere Gussteile.

Bild 23: Gehäuse für das Zwischengetriebe einer Flugturbine, hergestellt nach dem HERO Premium Casting aus der Legierung EN AC-AlSi7Mg0,6. Mit einem Gewicht von 80 kg gehört das Gussteil zu den größeren Feingussteilen. (Bild: Tital, Bestwig)

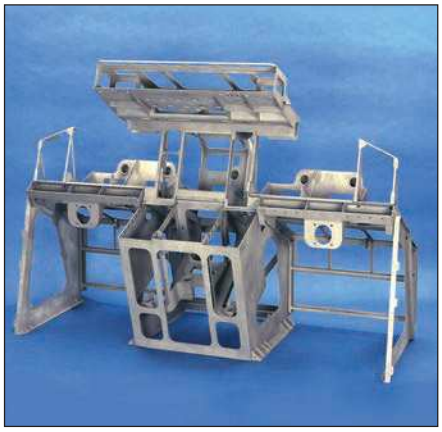


Bild 24: Instrumententräger für das Cockpit eines Verkehrsflugzeuges nach dem HERO Premium Casting gefertigt. Bei einer bedeutenden Gewichtsreduzierung ersetzt dieses Teil eine aus 296 Blech- und Frästeilen bestehende Fügekonstruktion (Bild: TItal, Bestwig)

Bild 25: Ein Headset nach dem Vakuum-Differenzdruck-Verfahren (VDD) gefertigt mit Wanddicken von bis zu 1,5 mm und feinen Details im Stegbereich mit Wanddicken unter 1 mm aus der Mg-Legierung AZ 91 (Bild: 1zu1 Prototypen, Dormbirn)

2.3 Qualitätssicherung und Kontrollen

Die Qualität nimmt in zunehmendem Maße eine Schlüsselfunktion auf allen Märkten ein, was auch für Feinguss gilt. Das Wort Qualität leitet sich aus dem lateinischen qualitas ab und heißt wörtlich Beschaffenheit beziehungsweise Eigenschaft. Im heutigen Sinne verbindet sich mit dem Ausdruck Qualität jedoch nicht nur der Begriff der Beschaffenheit zum Beispiel einer Ware, sondern auch Eigenschaften, die das Mittelmaß des beurteilten Kriteriums positiv übertreffen. Seit dem Inkrafttreten der **DIN ISO 9000 ff** im Jahre 1994 haben die Gießereien Qualitätsmanagementsysteme aufgebaut, die nach der Neufassung der **DIN ISO 9001** im Jahre 2000 Prozess orientiert gegliedert und von den Kunden und Mitarbeitern einsehbar sind. Im **Bild 26** ist der Qualitätsregelkreis eines Qualitätsmanagementsystems aufgezeigt. Inzwischen hat hier die Computertechnik verstärkt Eingang gefunden, so dass die Dokumentationen des Qualitätssicherungssystems auch datentechnisch angeboten werden können.

Forderungen an die Qualität eines Produktes müssen dem Hersteller bekannt sein, bevor er zu fertigen beginnt. Das gilt gleichermaßen für die Kriterien, nach denen das Produkt später beurteilt wird. Unbeschadet wirtschaftlicher Aspekte gilt danach für Hersteller und Verbraucher der Leitsatz: „Die Qualität eines Erzeugnisses ist der Grad seiner Eignung, dem Verwendungszweck zu genügen."

Um die gleichbleibend hohe Qualität feingegossener Bauteile in der Praxis zu sichern und für die Serie zu gewährleisten, sind Merkmalkontrollen in allen Fertigungsstufen nach festgelegten Richtlinien erforderlich. Diese Merkmale müssen von der Konstruktion des Bestellers über das Angebot des Feingießers in enger Zusammenarbeit mit dessen Qualitätsstelle erarbeitet und in Liefervorschriften festgelegt werden, die über das Qualitätsmanagementsystem der Gießerei umgesetzt werden.

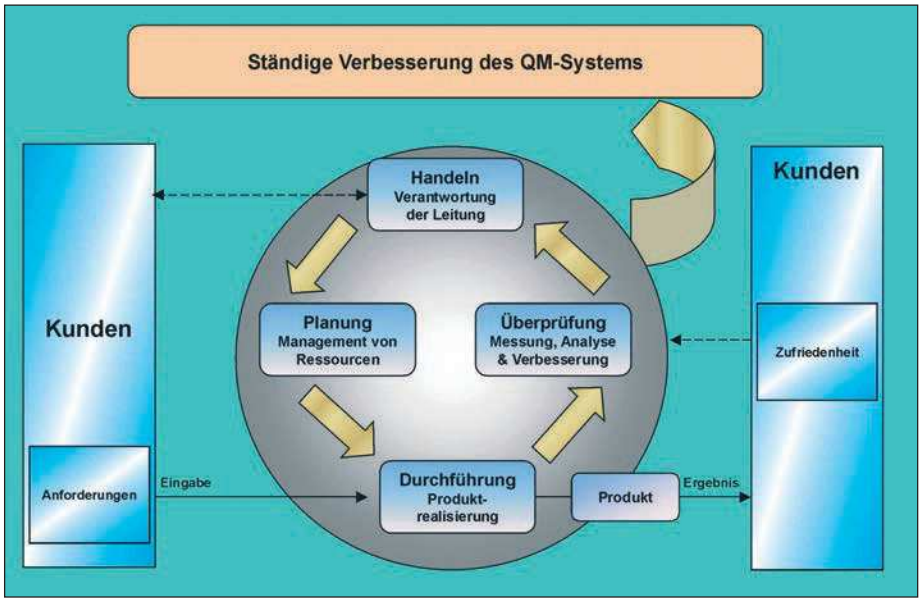


BIld 26: Qualitätsregelkreis eines Qualitätsmanagementsystems für Feingießereien

2.3.1 Qualitätssicherung

Die Qualität seines Erzeugnisses zu sichern ist nicht nur das Bestreben eines jeden Feingießers, sondern eine Notwendigkeit. Qualität kann nicht erzeugt werden, ohne sie gleichzeitig zu sichern. Deshalb betrifft die Qualitätssicherung alle Abteilungen einer Feingießerei einschließlich ihrer Betriebsstruktur, die über ein betriebliches Qualitätsmanagementsystem umgesetzt werden. Das Qualitätssicherungssystem eines Betriebes wird in einem Qualitätssicherungshandbuch beschrieben. Hierin legt der Hersteller offen, wie er produziert und prüft. Weiterhin wird darin erläutert, in welcher Form und mit welchen Kontrollen die Qualitätssicherung die Produktion überwachend begleitet.

Die Qualitätssicherung beginnt bereits in der Angebotsphase, wenn die Liefervorschriften festgelegt werden. Weitere Schritte sind die Eingangskontrollen, die Kontrollen während der Fertigung und am Schluss die Ausgangskontrollen der fertigen Feingussteile. Werden dabei unzulässige Abweichungen festgestellt, erfolgt eine Ergänzung der Qualitätsvorschriften, so dass das Qualitätssicherungssystem über entsprechende Maßnahmen direkt in den Fertigungsablauf eingreift.

Alle Roh- und Hilfsstoffe wie die metallischen Einsatzstoffe, Modellwerkstoffe, Formmassen, Bindemittel und Sande werden nach vorgegebenen Spezifikationen in der Eingangskontrolle überprüft und erst nach Gutbefund für die Fertigung freigegeben. Besondere Bedeutung kommt dabei den Maßkontrollen der Modellwerkzeuge sowie der Modelle und Kerne zu. Qualitätssichernde Maßnahmen gelten ferner für die Traubenmontage, die Gießformherstellung, das Schmelzen und Gießen, das Trennen und Putzen sowie die Wärmebehandlung der Feingussteile.

Die Endkontrollen erfolgen nach vereinbarten Vorschriften und Prüfanweisungen (**Bild 27**). Außer den Maßen werden auch die Oberflächenbeschaffenheit der Feingussteile, die chemische Zusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften sowie andere vereinbarte Parameter überprüft. Als zerstörungsfreie Werkstückkontrollen werden die Röntgenprüfung und die Rissprüfung (magnetisch und nach dem Farbeindringverfahren) eingesetzt.

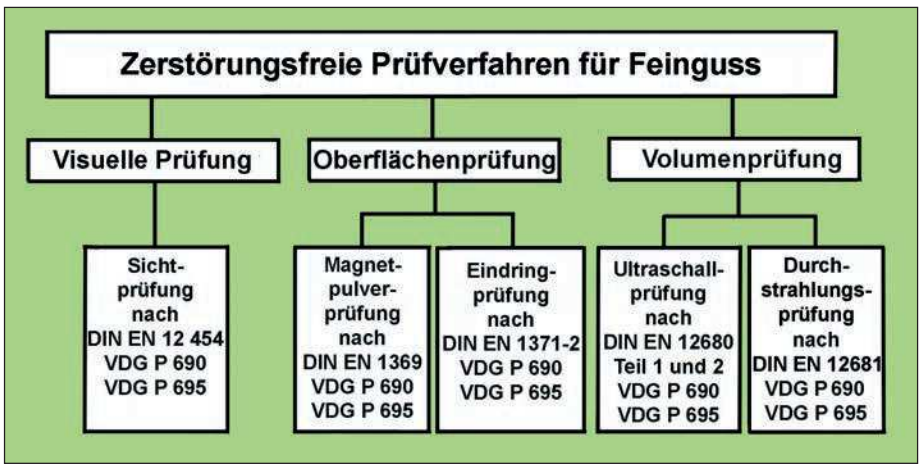


Bild 27: Überblick über die bei Feingusserzeugnissen zu vereinbarenden Prüfverfahren

2.3.2 Kontrollmaßnahmen

Feingießereien arbeiten nach Rohteilzeichnungen oder CAD-Datensätzen, deren lineare Toleranzen zwischen dem Besteller und der Feingießerei vereinbart wurden. Die erreichbaren Genauigkeiten sind von der geometrischen Form, der Größe und vom Werkstoff des Gussteiles abhängig.

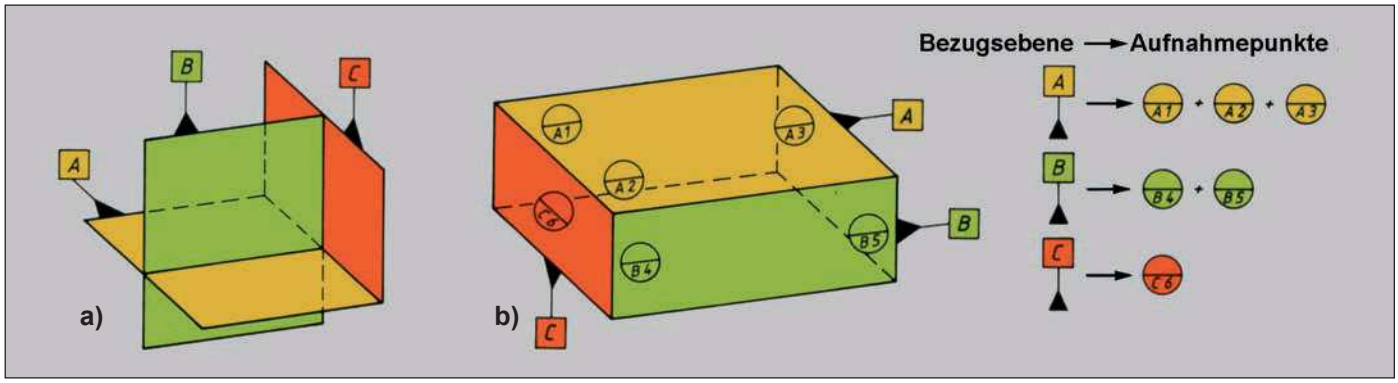


Bild 28: Bestimmung der Bezugspunkte für die Maßkontrolle bei Feingussteilen

a) Festlegen dreidimensionaler Bezugsebenen
b) Definieren von drei Maßbezugsflächen über sechs Bezugs- beziehungsweise Aufnahmepunkte

In das Qualitätssicherungssystem der Feingießerei sind systematische Maßkontrollen während der gesamten Fertigung eingebunden. Dabei hat die Maßkontrolle nicht nur eine passive, überwachende Funktion, sondern ist gleichzeitig auch aktives Stellglied in einem Regelkreis, um die Sollqualität zu sichern.

Die Maßkontrolle mit Justier- und Prüfeinrichtungen, elektronischen Tastern und programmgesteuerten 3D-Messmaschinen und anderen technischen Einrichtungen erfolgt an den Werkzeugen für die Modellherstellung, an den Modellen und Kernen sowie an den bei Bedarf gerichteten und wärmebehandelten Gussteilen.

I. Maßkontrolle

Um sicherzustellen, dass die Vermaßung von Zeichnungen in der Industrie überall gleich ist, müssen bei der Konstruktion die Zeichnungsangaben detailliert ausgeführt werden. Hierunter ist zu verstehen, dass die Zeichnungen nicht nur die „üblichen“ Maß- und Toleranzangaben enthalten, sondern auch die Form- und Lageabweichungen nach **DIN ISO 8062**, soweit diese für die Bearbeitung oder aus funktionellen Gründen von Bedeutung sind.

Damit die spätere Bearbeitung mit den erforderlichen Maßkontrollen übereinstimmt, ist es notwendig, das Gussteil mit dreidimensionalen Bezugselementen zu versehen. Sie werden mit den Buchstaben „A“, „B“ und „C“ gekennzeichnet (siehe **Bild 28a**). An diesen theoretischen Ebenen lassen sich natürlich keine Messungen vornehmen. Ihnen werden daher Bezugspunkte zugeordnet, die Ausgangs- oder Aufnahmepunkte sowohl für das Messen als auch für das Bearbeiten sind. Dadurch werden die gleichbleibende Lage der Teile und die Wiederholbarkeit der Messung gewährleistet. Diese Bezugs- oder Aufnahmepunkte sind an zugänglichen Stellen der Oberfläche vorzusehen und in der Zeichnung zu vermerken. Sie sollten soweit auseinander liegen, wie es Größe und Gestalt des Gussteiles zulassen.

Meist werden Aufnahmepunkte so angeordnet, dass die Bezugsebene „A“ durch drei Aufnahmepunkte, die Ebene „B“ durch zwei Aufnahmepunkte und die Ebene „C“ durch einen Aufnahmepunkt fixiert werden (siehe **Bild 28b**). In Sonderfällen, zum Beispiel bei räumlich gekrümmten Flächen, ist es erforderlich, dass sich Feingussbezieher und Feingießer miteinander abstimmen. Während der Fertigung können die Bezugspunkte nicht mehr geändert werden, ohne dass beide Seiten dem zustimmen.

II. Ausgangskontrolle

Zweck der Ausgangskontrolle ist, zu beurteilen, ob die Feingussteile den vorgeschriebenen und vereinbarten Zeichnungstoleranzen entsprechen. An Erstmustern werden deshalb alle Maße kontrolliert. In der Serienfertigung hat sich herausgestellt, dass eine Kontrolle aller Zeichnungsmaße wirtschaftlich nicht zu vertreten ist. Erfahrungsgemäß ist es vorteilhaft, nur Funktionsmaße zu prüfen, die vorher mit dem Besteller vereinbart worden sind. Üblicherweise werden sie in der Zeichnung vermerkt oder in einer separaten Prüf- und Kontrollanweisung festgeschrieben.

Prüflehren vereinfachen das Messen und erhöhen die Wirtschaftlichkeit. Bei entsprechendem Kompliziertheitsgrad oder nachfolgender NC-Bearbeitung ist stets eine Lehre oder Messvorrichtung erforderlich, um Spannen und Bearbeiten zu beherrschen. Lehren dieser Art werden meist vom Feingussbezieher zur Verfügung gestellt. Wird mit ihrer Herstellung jedoch der Feingießer beauftragt, dann müssen ihm die Prüfmaße und die Aufnahme zur ersten Bearbeitung genannt werden.

Bild 29: Maßendkontrolle an einem Gussteil mit einer Messmaschine

Bild 30: Blick in ein modernes Werkstofflabor einer Gießerei

2.3.3 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung

Die zerstörungsfreien Prüfverfahren dienen dazu, die Beschaffenheit von Gussteilen zu prüfen. Prüfverfahren für die äußere Beschaffenheit sind die Magnetpulverprüfung (**DIN EN 1369**) und die Eindringprüfung (**DIN EN 1371 Teil 2**). Prüfverfahren für die innere Beschaffenheit sind die Ultraschallprüfung (**DIN EN 12680, Teile 1 und 2**) und die Durchstrahlungsprüfung (**DIN EN 12681**). In einem Sonderdruck der ZGV [4] sind diese Verfahren ausführlich beschrieben. Spezielle Liefervorschriften für den Feinguss enthält das VDG-Merkblatt P 695 [5].

Zur Beurteilung der Prüfergebnisse werden Feingussteile aus Stahl in Gütestufen mit unterschiedlichen Anforderungen an die äußere und innere Beschaffenheit eingeteilt. Die Oberflächenzone und das Innere eines Bauteils werden häufig unterschiedlich beansprucht. Deshalb sind die Gütestufen für äußere und innere Beschaffenheit unabhängig voneinander definiert, können also je nach Anforderung unterschiedlich gewählt werden.

I. Visuelle Prüfung

Die **Oberflächenbeschaffenheit** muss zwischen Besteller und Hersteller vereinbart werden. Für die visuelle Beurteilung, die sich auf Oberflächenfehler, zum Beispiel Poren, Schlackenstellen, Kaltschweißen, Schülpen, Keramikreste, aber auch auf Unebenheiten und Grate bezieht, gibt es die Norm **DIN EN 12454**. Sie stützt sich auf die BNIF- und SCRATA - Richtreihen zur Bestimmung der Oberflächenfehler. Diese Richtreihen enthalten Oberflächenvergleichsmuster, mit denen die Oberflächenfehler klassifiziert werden können. Hierzu ist ein Sonderdruck bei der ZGV in Düsseldorf erhältlich [6].Häufig wird jedoch Bezug genommen auf das VDG-Merkblatt P 690 [7], in dem unter anderem Kriterien für Oberflächen beschrieben sind.

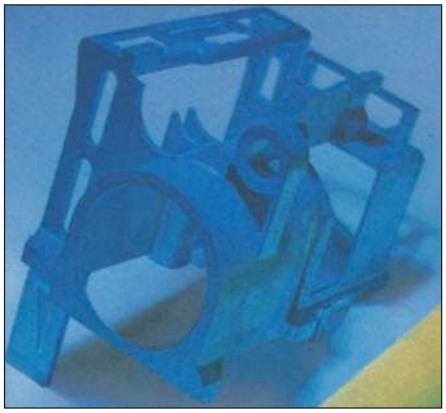


Bild 31: Rissprüfung nach der Farbeindringmethode an einem Aluminium-Gehäuseteil aus Feinguss

II. Oberflächenprüfung

Die **Magnetpulverprüfung**, die Beurteilung der Anzeigen und die Einteilung in Gütestufen sind in **DIN EN 1369** beschrieben. Das Verfahren ist auf ferromagnetische Stahlsorten beschränkt. Austenitische und teilaustenitische Stähle sind nur schwach magnetisierbar und daher nicht mit diesem Verfahren prüfbar. Alle Magnetisierungsverfahren und Prüfmittelkombinationen sind anwendbar. Bevorzugt wird mit Selbstdurchflutung und nassen Prüfmitteln gearbeitet. Die Prüfoberfläche muss dabei sauber sein und eine bestimmte Mindestbeschaffenheit haben, die durch den kleinsten nachzuweisenden Fehler bestimmt wird.

Die **Farbeindringprüfung** (**Bild 31),** die Beurteilung der Anzeigen und die Einteilung in Gütestufen sind in **DIN EN 1371** beschrieben. Diese Norm ist bei allen Stahlgusssorten anwendbar, wird jedoch üblicherweise nur bei austenitischem und austenitisch-ferritischem Stahlguss vorgesehen. Die **DIN EN 1371, Teil 1** gilt für Sand-, Schwerkraftkokillen- und Niederdruckkokillen-Gussteile, die **DIN EN 1371, Teil 2** für Feingussstücke. Die Ausblutungsgrößen werden neben der Unterscheidung nach Gütestufen auch nach der Wanddicke der Bauteile unterschieden.

III. Volumenprüfung

Die **Ultraschallprüfung**, die Beurteilung der Anzeigen und die Einteilung der Gütestufen sind in **DIN EN 12680** beschrieben. Teil 1 der Norm gilt bei Stahlgussteilen für allgemeine Verwendung, Teil 2 enthält verschärfte Anforderungen für hoch beanspruchte Bauteile, zum Beispiel für bestimmte Turbinenkomponenten. Über die Ultraschallprüfung sind alle gusstypischen Fehler auffindbar. Mit einem Normalprüfkopf sind Fehler mit Volumenausdehnung bestimmbar, mit einem Winkelprüfkopf werden planare (rissartige) Fehler bestimmt.

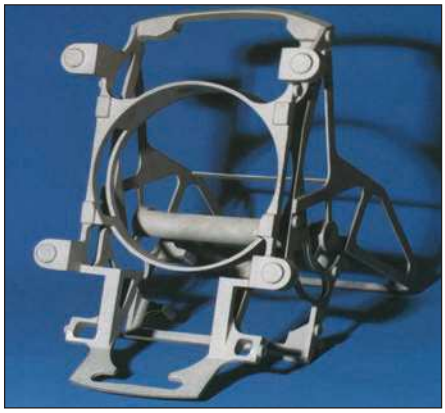


Bild 32: Halter für Navigationsgeräte aus EN AC-AlSi7Mg0,3 wa (W.-Nr. EN AC-42100) mit einer minimalen Wanddicke von 1,5 mm, Abmessungen: 330 x 280 x 200 mm, Gewicht 840 g

Besonders wichtig ist die Echodynamik, das heißt das Wandern des Echos auf dem Bildschirm und seine gleichzeitige Höhenänderung beim Bewegen des Prüfkopfs. Wenn hierdurch Hinweise auf rissähnliche, also gefährliche Fehler gegeben werden, müssen solche Anzeigen registriert werden, auch wenn die Echohöhe sehr gering ist.

Das Ausmessen der Anzeigenhöhe in seitlicher und Tiefenrichtung wird so beschrieben und festgelegt, dass die Wahrscheinlichkeit, die wahre Fehlergröße zu erfassen, sehr groß ist. Versuche haben das bestätigt.

Wichtig für eine einwandfreie Ultraschallprüfung ist ferner qualifiziertes Prüfpersonal und eine genaue Prüfanweisung, die die Lage und Orientierung zu erwartender Fehler berücksichtigt. Aufgrund der Größe und komplizierten Geometrie findet die Ultraschallprüfung beim Feinguss selten Anwendung.

Für die **Durchstrahlungsprüfung**, gilt **DIN EN 12681**. Die möglichen Aufnahmeanordnungen, Strahlenquellen und deren Anwendungsbereiche sind beschrieben. Nach den erforderlichen Prüfbedingungen werden die Prüfklassen A und B unterschieden. Im Allgemeinen ist die Prüfklasse A ausreichend. Die Prüfklasse B gilt nur für Sonderfälle.

Die bei der Durchstrahlungsprüfung erhaltenen Anzeigen sind auf der Grundlage von ASTM-Bildreihen nach Güteklassen (Level 1 bis 8) eingeteilt. Nichteisenmetalle werden auch nach den ASTM-Richtreihen eingestuft.

Die maßliche Bemusterung mit der **Computertomographie** ist heute ein sich ausbreitendes und gleichberechtigtes Verfahren zur taktilen Messtechnik für die zerstörungsfreie Bestimmung von komplexen Innen- und Außenkonturen von Gussteilen und damit auch gut für die Feingussfertigung einsetzbar. Allerdings ist dieses auch als Serienprüfung einsetzbare Verfahren mit hohen Aufwendungen im Kostenbereich verbunden.

Die Verfahren zur Prüfung der inneren Beschaffenheit ergänzen sich gegenseitig. Die Verfahren werden daher häufig miteinander kombiniert. Die Ultraschallprüfung wird bevorzugt bei größeren Wanddicken, ferritischen Werkstoffen oder in der Serienfertigung angewendet. Die Durchstrahlungsprüfung wird entsprechend bei dünnwandigen Teilen, bei austenitischen und austenitisch-ferritischen Werkstoffen oder in Kombination mit der Ultraschallprüfung angewendet.

2.4 Rapid Prototyping und - Manufacturing im Feinguss

2.4.1 Grundlagen

Immer kürzer werdende Produktlebenszeiten und ständig zunehmender Wettbewerbs- und Innovationsdruck fordern Verkürzungen und Einsparungen in den Entwicklungs- und Produkteinführungsprozessen. Simultane Entwicklungs- und Erprobungsschritte sind ein notwendiges Erfordernis zur Erfüllung dieser Marktvorgaben. Vom Entwurf bis zur Erprobung sind minimale Zeiträume zur Erstellung der benötigten Bauteile vorgesehen, der Trend geht - je nach Komplexität der jeweiligen Projekte und der betreffenden Branche - hin zu wenigen Wochen. Diese Forderungen werden an alle für die einzelne Konstruktion benötigten Werkstoffe gestellt. Aus diesen Gründen ist es erforderlich, in kürzesten Zeitspannen unter anderem alle Informationen über die geometrischen und technisch-physikalischen Anforderungen und Eigenschaften bereitzustellen und zu verarbeiten.

Durch den Einsatz von Rapid-Prototyping-Verfahren (RP) in der Feingießerei ist es möglich, innerhalb kürzester Zeit serienidentische Prototypen und Nullserien herzustellen. Hierdurch wird die Entwicklungszeit bis zur Markteinführung eines Produktes entscheidend verkürzt. Der Kunde ist nun in der Lage, sein Produkt als Erster zu vermarkten. Dies ist im Zeitalter sich ständig reduzierender Produktlebenszyklen ein entscheidender Wettbewerbsvorteil. Durch den Verzicht auf Werkzeuge in der Entwicklungsphase werden die erhöhten Kosten von RP-Gussteilen im Vergleich zu Serienguss-teilen bei weitem kompensiert.

Bild 33: Entwicklung des Rapid Prototyping zum Rapid Manufacturing

Dies ist besonders bei Neuprodukten der Fall, bei denen es am Anfang noch keine genauen Designvorstellungen gibt und sich das endgültige Design erst nach mehreren Testphasen herausstellt. Für die Industrie ist der Feinguss mit RP-Modellen deshalb besonders dort interessant, wo es um kleine Serien mit hoher Änderungsgeschwindigkeit und um Projekte mit hohen Entwicklungskosten geht. Ein weiterer Vorteil ist, dass der Komplexität der Gussteile (Hinterschnitte, keramische Kerne, Eingussteile aus Stahl) nahezu keine Grenzen gesetzt sind. Dies macht das Verfahren für die Luft- und Raumfahrt, die Medizintechnik, den Rennsport und den Sondermaschinenbau besonders attraktiv [8].

Das „Rapid Prototyping“ hat seit 1990 eine rasante Entwicklung hinter sich. Während dieser Zeit ist eine Vielzahl von Prozessvarianten entstanden, wovon sich einige zu technisch ausgereiften Prozessen etabliert haben. Ebenfalls sind auch verschiedene Bezeichnungen entstanden, die für die unterschiedlichsten Prozessvarianten verwendet werden. Zur Abgrenzung all dieser Prozesse und Bezeichnungen von anderen Gieß- und Herstellungsverfahren sollen die **Bilder 33** und **34** dienen.

Mit der im Sprachgebrauch der deutschen Feingussindustrie verwendeten Bezeichnung „Feinguss“ ist gemeint, dass unter Verwendung von Wachsspritz- oder Wachsgießformen ausschmelzbare Modelle aus speziellen Feingusswachsen hergestellt werden. Diese werden zu Modelltrauben zusammengefügt und anschließend wiederholt in keramische Schlicker getaucht und mit Keramiksanden bestreut. Die Modelle werden thermisch durch Ausschmelzen entfernt, die gebrannten Formschalen in dem gewünschten Werkstoff abgegossen.

In Abwandlung zu der vorgenannten Vorgehensweise wird diese Bezeichnung auch für andere ausschmelzbare Modelle und Formverfahren verwendet. Diese sind im Glossar näher beschrieben. Allen Verfahrensvarianten ist aber gemein, dass sie mit verlorenen Modellen und Formen arbeiten. Somit sollte der Kunde, falls er ein besonderes Herstellverfahren wünscht, dies auch explizit mit der Gießerei vereinbaren.

Die so genannten „Rapid-Prototyping“-Verfahren haben sich nun zu festen Prozessrouten etabliert, mit denen Bauteile produziert werden, die immer exakter die vom Konstrukteur geforderten Eigenschaften aufweisen (**Bild 33**). Mit „Rapid-Prototyping“ (= schnelle Herstellung von Prototypen) kann jede Art von Herstellungsverfahren gemeint sein, das in kurzer Zeit

Bild 34: Die modell- und gusstechnischen Prozessketten zum schnellen Herstellen von Feingussteilen

zu einem Bauteil führt. Besser kennzeichnend für die hier besprochenen Prozessketten ist der Begriff „Solid Freeform Manufacturing(SFM)“ (= aufbauende Verfahren zu Herstellung von Bauteilen mit Freiformflächen), auch unter dem Begriff „generierende“ Verfahren im Gegensatz zu zerspanenden Verfahren bekannt. Das „Rapid Manufacturing“ und die hierauf aufsetzenden Verfahrensweisen „Individual Manufacturing“ und „Flexible Manufacturing“ beziehen grundsätzlich alle Verfahrensweisen ein, die zu einsatzfähigen Bauteilen führen. Ausführliche Informationen zu den Begriffen Qualitätsbedingungen und Liefervereinbarungen sind in der **VDG-Richtlinie 3404** [9] enthalten.

Der Wandel vom „Rapid-Prototyping“, dem oft der Makel des „provisorischen“ anhaftete, ist vollzogen. Weiter noch werden sich die SFM-Prozessketten zu noch individuelleren und flexibleren Produktionsrouten fortentwickeln. Bislang ist das „Rapid-Prototyping“ durch hohen Personaleinsatz gekennzeichnet. Das darin befindliche, hohe Rationalisierungspotenzial wird mit steigendem Bedarf an derart hergestellten Bauteilen zunehmend ausgeschöpft.

Neben dem schnellen Herstellen von Anschauungs-, Funktions- oder Handmustern in den frühen Phasen der Produktentwicklung bietet das Feingießen als Folgeprozess auch die Möglichkeit, fast alle technisch nutzbaren metallischen Werkstoffe als Rapid-Prototyping-Werkstücke mit nahezu vollständiger Funktionsfähigkeit herzustellen. Die ursprüngliche Konstruktionsidee wird überprüfbar hinsichtlich Konstruktion, Funktionsfähigkeit und Design. Rapid Prototyping im Feinguss stellt somit eine Ergänzung und Erweiterung der Anwendung von Feingussteilen dar, insbesondere bei der

Bild 35: Gehäuse für den Fahrzeugbau nach dem Quick-Cast-Verfahren gefertigt aus der Aluminiumlegierung EN AC-AlSi7Mg0,3 (W.-Nr. EN AC-42100), Gewicht 690 g, Größtmaß etwa 150 mm (Bild: NRU, Neukirchen)

- Unterstützung von Entwicklungsprojekten durch schnelle Bereitstellung gebrauchs- und funktionsfähiger Feingussteile in der Entwicklung von der Stückzahl 1 bis zur Vorserie für Großserienabnehmer;
- Erste Bauteile können zunächst ohne „gussgerechte“ Konstruktion hergestellt werden, wichtig für Grundsatzuntersuchungen und Neuentwicklungen;
- Die „gegossene Konstruktion“ kann unabhängig vom späteren Serienprozess gefertigt, getestet oder eingesetzt werden;
- Einsparung von Werkzeugkosten bei der Entwicklung neuer Teile durch Nutzung preiswerter und schneller Wege für Variantenuntersuchungen;
- Herstellung von Musterteilen auch für Druckgießer, Kokillengießer und Sandgießer;
- Angebot von Feingussteilen auch bei Einzelteilen und Kleinserien;
- Entwicklungsbegleitung bis zur Verifizierung und Serienfreigabe (Engineering).

Die Anwendung von Rapid Prototyping im Feinguss verändert nicht die Grundtechnologien des Feingießens, sondern schafft neue Möglichkeiten, wesentlich schneller zum Feingussteil zu kommen. Dies ist vor allem dadurch möglich, dass in kürzester Zeit Ausschmelzmodelle bereitgestellt werden und dies eben ohne die Herstellung von Wachsspritzformen, worauf schnell abgießbare Formen entstehen.

2.4.2 Die Prozessvarianten

Je nach Entwicklungsstand eines Projektes werden vom Entwickler oder Konstrukteur Entwürfe beziehungsweise CAD-Daten bereitgestellt, die primär die Funktionalität des Bauteiles sicherstellen sollen. Die Daten reichen von prozessgerecht, das heißt form- und gießgerecht konstruierten Bauteilen bis hin zu Geometrien, die in einem späteren Serienproduktionsprozess völlig anders hergestellt werden können.

Neben durchgängigen CAD/CAE-Systemen tragen die CNC-Techniken zum raschen Erstellen von Prototypen und Kleinserien bei. Mittlerweile haben sich auch die sogenannten SFM-Prozesse (Solid-Freeform Modelling) zu durchgängigen Prozessketten etabliert, mit denen qualitativ hochwertige Bauteile hergestellt werden können. Eine Übersicht über die gängigen modell- und gusstechnischen Prozessketten gibt **Bild 34**. Feingussteile lassen sich über verschiedene Prozessketten herstellen. Die optimale und gesamtwirtschaftlich günstigste Herstellungsvariante wird vom geforderten Liefertermin und ganz entscheidend vom Anforderungsprofil beeinflusst, das an das Bauteil gestellt wird. In den Fallbeispielen sind einzelne Beispiele genauer beschrieben.

Die Gemeinsamkeit aller Prozessketten ist, dass sie allesamt auf CAD-Datenbasen beruhen, was grundsätzlich reproduzierbare Bauteilmaße gewährleistet. Die Gussteile können somit auch sehr schnell mittels eines 3D-Messsystems vermessen werden.

Grundsätzlich existieren zum einen die Prozesse, bei denen die Modelle auf direktem Weg hergestellt werden. Die wirtschaftlich sinnvolle Stückzahl ist auf Einzelteile bis hin zu einigen 10 Stück beschränkt, abhängig von deren Größe und der geforderten Lieferzeit. Auf Grund der lagenförmigen Bauweise sind Einschränkungen bezüglich der Oberflächengüte und der Fertigungstoleranzen üblich, aber mit erhöhtem manuellem Finishaufwand zu verbessern.

Neben den für das Feingießen bekannten Wachsmodellen können auch verschiedenste thermoplastische Kunststoffe verwendet werden. Entscheidend für den Einsatz als Modellwerkstoff sind hierbei das vollständige, rückstandslose Verbrennen des Kunststoffes und seine möglichst geringe Ausdehnung während des Aufheizens der Keramik- beziehungsweise Schalenform, damit diese nicht zerstört wird.

Für größere Stückzahlen und für Feingussteile mit höheren Anforderungen an die Oberflächengüte werden die Modelle indirekt über Wachsspritz- oder Wachsgießformen hergestellt. Diese können aus Kunststoff oder Metall erstellt werden. Unter einem derartigen Vorserienwerkzeug wird ein voll funktionsfähiges Feingusswerkzeug verstanden, welches einfacher ausgelegt und damit kostengünstiger und deutlich schneller herzustellen ist als ein Serienwerkzeug. Ein solches Werkzeug eignet sich für Vorserien mit mittleren bis größeren Stückzahlen. Es können schnell und kostengünstig Änderungen oder Teileoptimierungen bei nur geringem Preisunterschied zu Teilen aus dem Serienwerkzeug durchgeführt werden. Die Oberfläche, Maßgenauigkeit und Gussausführung entsprechen vollständig denen späterer Serienteile [7].

Eine schnelle und preisgünstige Möglichkeit ist aber auch der Einsatz flexibler, elastischer Siliconformen. Für die Siliconformenherstellung können neben zerspanend hergestellten Urmodellen insbe-

Bild 36: „CYCLONE"-Automat zum Schlickertauchen, Besanden und Schnelltrocknen von Feingussformen (Bild: MK Technology, Grafschaft)

Bild 37: Herstellung von Gussteilen nach dem Kompaktformverfahren, hier Form aus gipsgebundenem Formstoff (auch bezeichnet mit „Gipsfeinguss", Gipsguss, usw.) (Bild: Spacecast, Eschweiler)

sondere die „generativ" hergestellten Urmodelle Verwendung finden. Besonders geeignet sind Modelle, die mittels Stereolithographie (SLA) unter Verwendung flüssiger UV-empfindlicher Harze hergestellt werden. Diese können relativ enge Toleranzen realisieren. Durch die anschließende Finishbearbeitung der Oberfläche wird eine diesbezüglich äquivalente Qualität erzeugt, wie sie in festen Wachsspritzformen möglich ist.

Die Urmodelle werden gefinisht und anschließend mit Silicon unter Vakuum umgossen. Die Siliconform wird aufgeschnitten und das Modell entnommen. Danach können in einer Kunststoff-Vakuumgießanlage Wachsteile auch mit komplizierterer Struktur relativ einfach und preisgünstig hergestellt werden. Die Siliconform ist verwendbar für die Herstellung von maximal 20 bis 30 Wachsteilen. Danach kann es zu Qualitätseinbußen kommen, die durch thermische und chemische Belastungen des Silicons durch das heiße Wachs begründet sind.

Um den Vorteil der schnellen Modellherstellung voll nutzen zu können, sind neben den etablierten Strecken zur Formschalenfertigung auch noch weitere Möglichkeiten der Formherstellung im Einsatz.

Die eine beruht darauf, die Herstellzeiten im Vergleich zur klassischen Technologie der Formschalenherstellung drastisch zu verkürzen. Dies wird erreicht, indem durch eine thermisch geregelte Trocknung die erforderliche Trocknungszeit von etwa 24 Stunden pro Schicht der Schale auf etwa 30 bis 40 min reduziert wird. Damit kann die Zeit für das Herstellen einer Schale von etwa 7 Arbeitstagen auf nur 4 bis 5 h verkürzt werden (**Bild 36**).

Eine zweite Möglichkeit zur schnellen Formenherstellung nutzt die „alte" Technologie der Kompaktformfertigung, wie sie in den Anfängen des Feingusses bei der Herstellung von Dentalprothesen und auch bei der Schmuckherstellung zum Einsatz kam, jedoch mit modernen Formstoffen. Die Form besteht bei der Herstellung von Gussteilen aus niedrig schmelzenden Metallen meist aus gipsgebundenem Formstoff, der auch als „Gipsfeinguss", Gipsguss", usw. bezeichnet wird. Die Zeit von der Formherstellung bis zum Abguss beträgt wegen eines aufwändigen Brennprozesses bis zu etwa 48 Stunden (**Bild 37**). Kleine Formen sind aber auch innerhalb eines Arbeitstages abgießfähig.

Häufig wird auch auf eine Kombination beider Verfahren zurückgegriffen, um zum Beispiel sehr große oder Gussteile mit sehr komplexen Innenkonturen herzustellen, wie bei dem im **Bild 38** gezeigten Pelton-Turbinenrades und im **Bild 39** abgebildeten Druckwellenladers.

Die Lieferzeiten für derartig hergestellte Gussteile liegen in der Nähe der physikalisch-technischen Produktionsgeschwindigkeit der jeweiligen Prozesskette, was besondere Anforderungen an alle Beteiligten stellt:

Bild 38: Formschale und Abguss eines Pelton-Turbinenrades (Bild: ES-Innocast und Edelstahlwerke Schmees, Langenfeld), Bedarf vier Stück, Werkstoff: GX4CrNi13-4 (W-Nr. 1.4317), Modellwerkstoff: Segmentiert aufgebaute Polystyrolmodelle, Durchmesser 1 100 mm, Gewicht der Formschale etwa 150 kg, Hinterfüllung mit Schamotteformstoff, Gussgewicht rund 830 kg. Vorteil gegenüber Sand- oder Keramikformverfahren: höhere Genauigkeit, bessere Oberflächengüte und somit Einsparung von manueller Schleifbearbeitung (links)

Bild 39: Projekt Druckwellenlader (Bild: ES-Innocast, Langenfeld), Bedarf je zwei Stück, Abmessungen: 150 x 150 x 145 mm mit komplexer Gussteil-Innengeometrie, Gewicht: 3 bis 4,5 kg, Werkstoff: GX40CrNiSi25-20 (W-Nr. 1.4848), Leistungsumfang: Erstellung Polystyrol-Ausschmelzmodelle, Abguss im Kompaktformverfahren, 3D-Messprotokoll, mechanische Endbearbeitung, Durchlaufzeit: 15 Arbeitstage (10 Arbeitstage ohne mechanische Bearbeitung) (rechts)

- Lieferzeit
- Stückzahl
- Werkstoff
- Abmessungen
- Gewicht
- CAD-Datenbasis
- Änderungswahrscheinlichkeit
- Komplexität: Hohlräume im Bauteil darstellbar?
- Gewünschte Genauigkeit, Toleranzen
- Oberflächengüte
- Gütestufen
- Mechanische Eigenschaften
- Sonstige Eigenschaften
- Mechanische Bearbeitung

Bild 40: Übersicht über das Anforderungsprofil an die gießtechnisch herzustellenden Bauteile

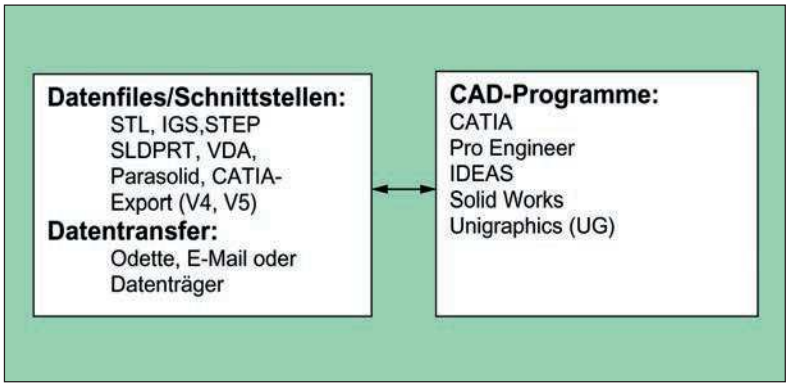


Bild 41: Einige gängige Datenfiles und CAD-Programme für die Gussteilentwicklung und -fertigung

- Maximales Engagement der Mitarbeiter,
- Zeitnahes, straffes Projektmanagement,
- Flexible Fertigungsmöglichkeiten,
- Hinreichende Fertigungskapazitäten,
- Prozessspezifisches Know-How,
- Optimales Informationsmanagement.

Gegenüber einer konventionellen Serienfertigung wird folgenden Punkten besondere Beachtung geschenkt:

- Sehr enge beziehungsweise keine Zeitfenster für Vorversuche und Optimierungszyklen,
- Der erste Guss muss wegen der straffen Zeitschiene sitzen,
- Alle Qualitätsansprüche müssen, wie gefordert, auf Anhieb erfüllt sein:
  - druckdicht, glatte Oberfläche,
  - Geometrie und Maße,
  - Gefüge und Eigenschaften mit Prüfungen und Zeugnissen.

Eine Besonderheit unter den SFM-Verfahren ist die Herstellung von Formen und Kernen. Dies kann entweder über das selektive Lasersintern oder auch über das 3D-Printen erfolgen. In beiden Fällen werden feingussspezifische, pulverförmige Formstoffe lagenweise so verfestigt, dass nach dem Entfernen des nicht verfestigten Pulvers die gewünschte Form,

Bild 42: Thermojet-Anlage zum schichtweisen Aufbauen von Wachsmodellen für den Feinguss ohne Wachsspritzform (Bild: Feinguss Blank, Riedlingen)

Segmente der Form oder Kerne zur weiteren Verarbeitung bereitgestellt werden können.

Die Kerne können in Wachsspritzformen zur Darstellung der Innenkonturen eingesetzt werden. Diese Verfahren werden sicherlich in Zukunft weitere Möglichkeiten zum schnellen und preisgünstigen Herstellen von Gussteilen eröffnen. Obwohl diese Prozesskette rein begrifflich nicht zum Feinguss gehört, ist es doch erwähnenswert, da hiermit werkzeuglos Kerne für die Fertigung von Feingussprototypen hergestellt werden können.

2.4.3 Vorgehensweise

Je nach Anforderungsprofil, das an das herzustellende Bauteil gestellt wird, erscheinen die verschiedenen Prozessketten unterschiedlich sinnvoll. Daher muss zum Zeitpunkt der Angebotserstellung der Kunde zusammen mit dem Gießer dieses Anforderungsprofil genau abstimmen. Im **Bild 40** wird ein grober Überblick über die grundsätzlich notwendigen Informationen zur Durchführung eines Projektes gegeben. Bei der Stückzahl ist zu berücksichtigen, ob eventuell später weitere Muster benötigt werden. Hierbei spielt es eine besondere Rolle, ob nach zum Beispiel Testläufen noch Änderungen an dem jeweiligen Bauteil erfolgen könnten.

Die aufgelisteten Punkte beinhalten selbstverständlich noch weitere Unterpunkte, die unter anderem in diversen Normen und Merkblättern hinterlegt sind. Dies gilt insbesondere für die Genauigkeiten, Oberflächengüten und die werkstoffbezogenen Eigenschaften, auf die an anderer Stelle ausführlich eingegangen wird.

Für die CAD-Datenbasis gilt, dass zur raschen Herstellung mit SFM-Prozessen nur reine 3D-Daten verwendet werden können. Die gebräuchlichsten Datenfiles und CAD-Programme für den Gussteilentwicklungs- und -fertigungsprozess sind im **Bild 41** zusammengestellt.

2.4.4 Fallbeispiele

Da sehr oft der Zeitfaktor entscheidend für die gewählte Prozesskette ist, werden zunehmend auch Aufträge gleicher Bauteile über zwei verschiedene Prozessketten abgewickelt. So stehen in kürzester Zeit erste Gussteile zur Verfügung, die zum Beispiel zum Einrichten von Bearbeitungsanlagen, Funktionstests usw. eingesetzt werden. Je komplexer ein Bauteil ist, desto weiter verschiebt sich die Grenzstückzahl hin zu größeren Losgrößen, denn für jedes Gussteil muss ja zum Beispiel ein Ausschmelzmodell hergestellt werden. Die Herstellung dieser Teile kann größenabhängig einige Stunden bis zu zwei Tagen dauern.

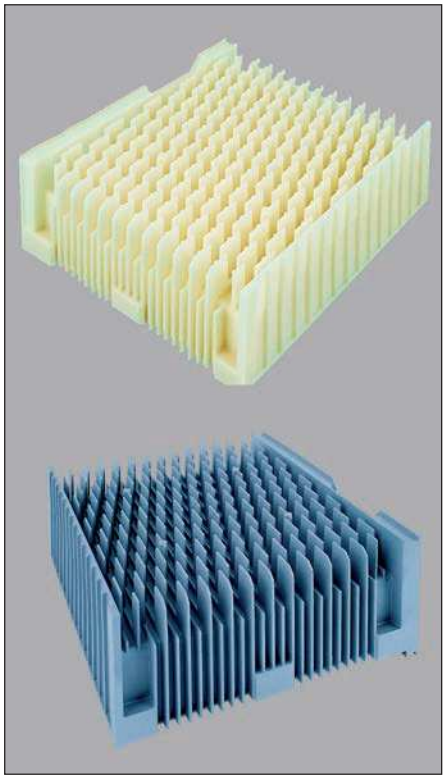


Bild 43: Mit dem Thermojet-Verfahren aufgebautes Ausschmelzmodell (oben) und das damit gefertigte komplizierte Feingussteil aus Aluminium (unten) (Bild: Feinguss Blank, Riedlingen)

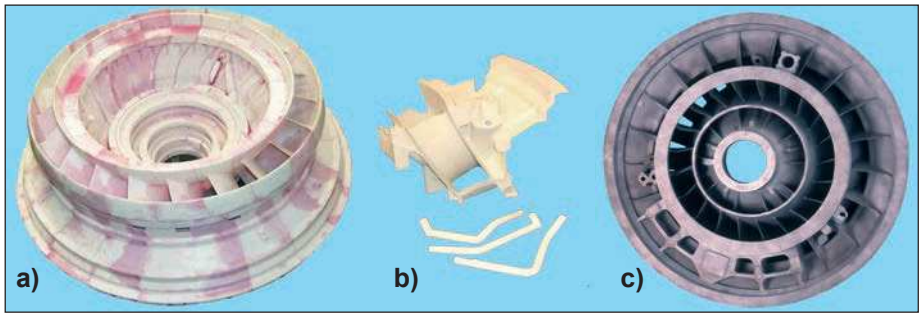


Bild 44: Herstellung des Feingussteils „Intermediate Case“ unter Nutzung des Selektiven Lasersinterns (SLS) zur Herstellung des mehrteiligen Ausschmelzmodelles (Bild: Tital, Bestwig)

a) Komplett montiertes Wachsmodell aus SLS-Teilen
b) Ein Modellsegment mit den dazu gehörigen keramischen Kernen
c) Das fertige Feingussteil aus der Legierung EN AC-AlSi7Mg0,6, (W-Nr. EN AC-42200) Dmr. 900 x 360 mm, Gewicht: 80 kg

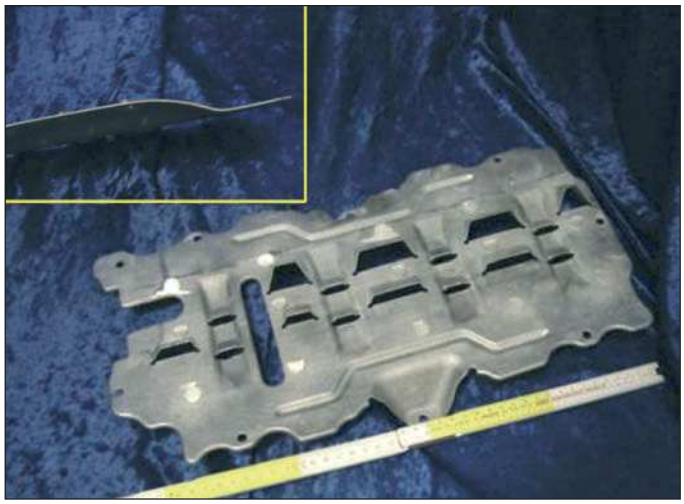


Bild 45: Ölleitblech, Maße: 470 x 210 mm, Wanddicke 0,8 mm, Gewicht: 0,15 kg, Werkstoff EN AC-AlSi9Mgwa (W-Nr. EN AB-43300), Kompaktformguss, Stückzahl 2, Lieferzeit 8 Arbeitstage (Bild: Spacecast, Eschweiler)

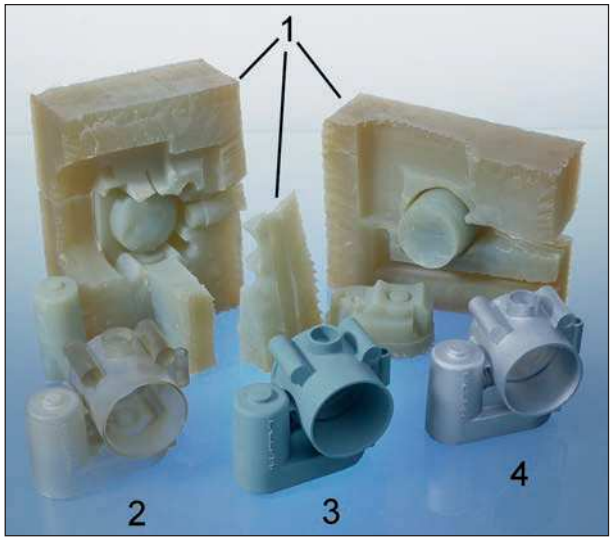


Bild 47: Prozessstufen zur Herstellung eines elektrisch gesteuerten Ventilgehäuses für PKW (Bild: MCP HEK, Lübeck)

1: mehrteilige Siliconform, hergestellt nach dem MCP-Vakuumgießverfahren mit Hilfe eines Modells, das mit dem RP-Verfahren Stereolithographie (SLA) gefertigt wurde

2: das nach dem Selektiven Lasersintern (SLS) in dieser Form gefertigte Modell für den Vakuumguss (Oberflächen gefinisht)

3: Wachsteil nach dem Vakuumgießverfahren hergestellt

4: Feingussteil aus Aluminium, hergestellt nach dem Metal-Part-Casting(MPC)-Verfahren(Kompaktformguss) mit bis zu 1,25 mm Wanddicke

In den **Bildern 42** bis **48** sind einige Fallbeispiele aufgeführt, die nur einen Ausschnitt aus den vielfältigen Möglichkeiten der SFM-Prozessketten darstellen.

Ausführlich wurde die Problematik Rapid-Prototyping im Feinguss in [8] abgehandelt. Das Heft der Zeitschrift „konstruieren + giessen“ kann bei der Zentrale für Gussverwendung in Düsseldorf bezogen werden.

Bild 46: Lagergehäuse für einen Turbolader, Stückzahl 10, Abmessungen: 86 x 78 x 80 mm, Gewicht 700 g, Werkstoff EN-GJL-250, SLS-Polystyrol-Ausschmelzmodelle, hergestellt im Kompaktformverfahren. Besonderheit: Komplexe Gussteilinnenkontur mit Kerndurchmessern von 5 mm. Lieferzeit einschließlich Fertigbearbeitung 15 Arbeitstage (Bild: ES-Innocast, Langenfeld)

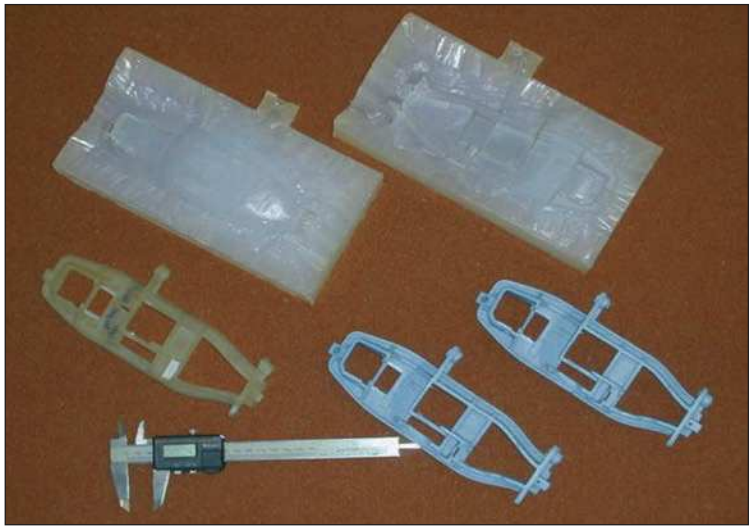


Bild 48 : Gussteile für Kfz-Türbeschlag (Prototypen für spätere Zink-Druckgussserien), Besonderheit: Druckguss-Werkstoff: Z 410 (ZnAl4Cu1), Urmodell: Stereolithographie, Wachsspritzform: 2-Komponenten-Silicon, Herstelldauer: 14 Arbeitstage, Stückzahl: 20 (Bild: Spacecast, Eschweiler)

3. Werkstoffe für das Feingießen

3.1 Allgemeine Eigenschaften

Feingegossene Werkstoffe erstarren praktisch quasi-isotrop (ausgenommen einige gerichtet erstarrte Bauteile). Sie weisen damit nicht das zeilige, gerichtete Gefüge von Knetwerkstoffen mit unterschiedlichen Längs- und Querwerten auf, das zum Beispiel durch Walzen, Schmieden oder Ziehen entsteht. Bei feingegossenen Werkstoffen kann deshalb in allen drei Dimensionen mit gleichen technologischen Werten gerechnet werden.

Da die jeweilige Wärmebehandlung vorwiegend von der Art des Werkstoffs bestimmt wird, werden feingegossene Werkstoffe praktisch auf die gleiche Weise wärmebehandelt wie Knetwerkstoffe gleicher chemischer Zusammensetzung. Dabei ist die Neigung zum Verziehen bei Feinguss nur gering, was Präzisionsarbeiten besonders erleichtert.

An vielen Flächen ist wegen der hohen Sauberkeit und Maßgenauigkeit eine spanende Bearbeitung nicht mehr erforderlich. Eine Gusshaut im bekannten Sinne entsteht bei Feinguss nicht. Dadurch ergeben sich saubere Oberflächen, die spanendes Bearbeiten nicht beeinträchtigen. Lediglich Titan-Basislegierungen weisen eine härtere Oberfläche auf. Die spanende Bearbeitbarkeit von Feinguss entspricht derjenigen von Knetwerkstoffen gleicher chemischer Zusammensetzung und Wärmebehandlung. Die Vor- und Endbearbeitung sowie Montageleistungen gehören heute auch zum Leistungsangebot der Feingießereien (**Bild 49**).

Für das Schweißen, Panzern und Löten gilt das Gleiche. Die Feingussoberfläche braucht vorher nicht bearbeitet zu werden. Schweißfasern und Sitze für aufzulötende Teile werden deshalb vorteilhaft mitgegossen.

3.2 Werkstoffsorten

Nach dem Feingießverfahren lässt sich eine fast unübersehbare Vielfalt sowohl von Guss- als auch von Knetwerkstoffen, in Normen und anderen Richtlinien genannt oder nicht genormt, verarbeiten. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit muss aber eine Beschränkung erfolgen, zumal einerseits zahlreiche Werkstoffe ähnliche Eigenschaften aufweisen und mindestens gleichwertig durch einen einzigen auch wirtschaftlicher „ersetzt“ werden können.

Andererseits ermöglicht Feingießen oft die kostenneutrale Verwendung eines höherwertigeren Werkstoffs, womit eine Vielzahl von Anwendungsfällen abgedeckt werden kann. Entsprechend werden nachfolgend zu den verschiedenen Werkstoffgruppen nur ausgewählte Sorten genannt. Es gelten die entsprechenden Werkstoffnormen und Mindestwerte, die im Anhangsteil 1, Seite 46, zusammengestellt sind. Die dort in den Tabellen angegebenen Daten sind Anhaltswerte, weil ausschließlich der betreffende Feingießer verbindliche Werte nennen kann.

Das gilt auch dann, wenn in Normen oder sonstigen Vorschriften gewährleistete Mindestwerte genannt werden, denn diese beziehen sich üblicherweise auf andere Formgebungsverfahren und sind aus metallurgischen Gründen nicht auf das Feingießen einfach übertragbar. Wenn nichts anderes vereinbart, gelten die Werte für den getrennt gegossenen Probestab.

Werden für bestimmte Anwendungsfälle andere Werkstoffe bindend vorgeschrieben, so sind diese beim Feingießer anzufragen. Die verschiedenen Feingießereien stellen jeweils nicht alle der nachfolgend genannten Werkstoffgruppen beziehungsweise Basislegierungen her. Hier ist ebenfalls eine Anfrage erforderlich.

Bild 50: Einsatz von RP-Techniken in der Dentaltechnik zur Herstellung von individuell über 3D-Datenmodell gestalteten Kronen und Brücken aus speziellen körpervertäglichen Legierungen im Feingießverfahren (Bild: Envisiontec, Marl)

3.3 Wirtschaftlichkeit

Optimale Werkstoffwahl, zweckmäßige Wärmebehandlung und richtige Oberflächenbehandlung sind wesentliche Kriterien für die Wirtschaftlichkeit von Feinguss. Es ist deshalb wirtschaftlich vorteilhaft, gängige Feingusswerkstoffe zu verwenden. Im Zweifelsfalle ist es angeraten, den Feingießer zu befragen. Wenn irgend möglich, wird er artgleiche oder besser geeignete Werkstoffe aus der laufenden Fertigung vorschlagen.

Oft können, besonders für kleinere Teile, korrosionsbeständige Werkstoffe verwendet werden, um ein teures Oberflächenveredeln bei niedrig- und unlegierten Werkstoffen einzusparen. Solche Teile bleiben auch dann chemisch beständig, wenn ihre Oberfläche beschädigt wird (**Bild 50**).

Häufig ist es möglich, mit nur einem Modellwerkzeug die gleichen Bauteile aus verschiedenen Werkstoffen (auch aus Legierungen auf unterschiedlicher Basis) zu beziehen. So kann zum Beispiel für gleiche Armaturen- und Pumpenteile der Werkstoff optimal auf die Aggressivität des jeweiligen Mediums abgestimmt werden. Die problemlose Werkstoffumstellung ist aber auch dann von Vorteil, wenn höhere Beanspruchungen auftreten als vorher bekannt oder vorhersehbar waren. Dann kann fast immer ein besser geeigneter Werkstoff gewählt werden.

Bild 49: 200 g leichtes aber hoch belastbares Feingussteil Fußraste für Motor-Cross-Krafträder aus G42CrMo4 (W.-Nr. 1.7227), welches in der Gießerei nicht nur entwickelt und gefertigt, sondern auch montiert und paarweise samt Zubehör als Bausatz (rechts) direkt zur Montage zur Verfügung gestellt wird (Bild: Feinguss Blank, Riedlingen)

3.4 Stähle für den Feinguss

Für die feingegossenen Stähle gelten die betreffenden DIN und DIN EN-Normen, die im Anhang Teil 1, S. 46, und den Quellen [10 bis 12] aufgeführt sind. Zudem sind diese zusammenfassend in der Broschüre „Stahlguss“, die bei der ZGV in Düsseldorf bezogen werden kann, aufgeführt und näher erläutert [10]. Im internationalen Geschäft kommen noch die entsprechenden nationalen Normen zur Anwendung, die bei den betreffenden Normengremien bezogen werden können, die im Anhangteil aufgeführt sind. Im Nachfolgenden wird deshalb nur auf die Besonderheiten des Feingusseinsatzes eingegangen.

I. Einsatzstähle

Feinguss eignet sich für alle Aufkohlungsverfahren, wie dem Bad- oder Gasaufkohlen. Legierte Einsatzstähle werden den unlegierten meist vorgezogen, weil sie besser zu gießen sind, bessere mechanische Eigenschaften aufweisen und dennoch kaum mehr kosten als unlegierte. Bevorzugte Legierungen sind der G16CrMo4 (W-Nr. 1.7242), der G15CrNi6 (W-Nr. 1.5919) und der C18D (W-Nr. 1.0416). Im einsatzgehärteten Zustand werden diese Sorten für Bauteile hoher Oberflächenhärte und Verschleißfestigkeit (Härtewerte von 59 bis 65 HRC) genutzt, die zum Beispiel als Schaltklinken und -räder, Nocken, Druckstücke, Klemmplatten, Hebeln sowie Waffenteilen zum Einsatz kommen.

II. Nitrierstähle

Da sich aluminiumlegierte Nitrierstähle offen nur schlecht vergießen lassen, bietet der Feingießer Cr-Mo-V-legierte Sorten an. Sie sind auf hohe Festigkeiten zu vergüten und nehmen bei geringstem Härteverzug an der Oberfläche Härten von über 750 bzw. 900 HV an. Der GX38CrMoV5-1(W-Nr. 1.2343) ist ein Warmarbeitsstahl aus dieser Gruppe, der bevorzugt im Feinguss zur Anwendung kommt.

Bild 51: Getriebeteile für den Fahrzeugbau aus der Stahlgusslegierung G16CrMo4 (W.-Nr. 1.7242) (Bild: Buderus, Moers)

III. Vergütungsstähle

Nur sachgemäßes Vergüten verleiht diesen Stählen die hohen Festigkeiten und Zähigkeiten. Sie sind flamm-, induktions- und tauchhärtbar. Die unlegierten Sorten sind Schalenhärter, die bis etwa 5 mm Tiefe einhärten. Bevorzugte Sorten sind hier der C45E (W-Nr. 1.1191) für Bauteile ohne besondere Anforderungen, der C60E (W-Nr. 1.1221) für Bauteile mit höherer Festigkeit und guter Zähigkeit wie in Büro-, Druck-, Schuh-, Textil- und Werkzeugmaschinen und die legierten Sorten G42CrMo4 (W-Nr. 1.7225) und G50CrV4 (W-Nr. 1.8159) für Bauteile mit bestimmter Vergütungsfestigkeit bei guter Zähigkeit, die bei Schnellverschlüssen von Waffen, Sicherheits-, Flugkörper und Zellenbauteilen zum Einsatz kommen. Ist nach dem Gießen unerwünschtes Randentkohlen aufgetreten, wird dies durch entsprechendes Wiederaufkohlen ausgeglichen.

IV. Hochfeste Stähle

Diese höchst- beziehungsweise hochfesten Stähle sind gut bearbeitbar und werden erst nach dem Fertigbearbeiten praktisch ohne Verzug ausgehärtet. Ihre Elastizitätsmoduln liegen weit über denen der Leichtmetalle. Auch ihr Streckgrenzen/Gewichts-Verhältnis „Leistungsgewicht“ erreicht je nach Konstruktion oft Werte, die über denen der Leichtmetalle liegen. Zu dieser Gruppe gehören die Sorten GX2NiCoMo18-9-5 (W-Nr. 1.6358) und GX2CrNiCoMo12-8-5 (W-Nr. 1.6980) im ausscheidungsgehärteten Zustand.

Wegen der geringen Wanddicken, die im Feinguss herstellbar sind, werden diese hochfesten Stähle in erheblichem Umfang in der Luftfahrt eingesetzt. Außerdem bieten sie Vorteile bei Präzisionsteilen für höchstbeanspruchte Maschinen und Werkzeuge, besonders bei Raummangel und kommen bei schnell laufenden Maschinen und Werkzeugen zum Einsatz.

Um optimale technologische Werte zu erreichen, werden beide genannten Werkstoffe im Vakuum erschmolzen und vergossen.

V. Werkzeugstähle

Da bei Gussteilen kein Rekristallisationsglühen durchgeführt wird, ist bei feingegossenen Werkzeugstählen die Wärmebehandlung besonders sorgfältig vorzunehmen. Beim Abkühlen in der Gießform eventuell auftretende Randentkohlung wird durch entsprechendes Wiederaufkohlen mit anschließendem Diffusionsglühen aufgehoben.

Scharfe, schneidende Kanten können wegen der Oberflächenspannung der flüssigen Metalle nicht gegossen werden, sie sind nur spanend zu fertigen. Am Gussteil ist deshalb ein kleines Aufmaß vorzusehen (siehe Bearbeitungszugaben und Messerkanten, Seite 36).

Mit Ausnahme der rostträgen Sorten, GX165CrMoV12 (W.-Nr. 1.2601) und GX90CrCoMoV17 (W.-Nr. 1.4535) sind diese Werkzeugstähle nicht korrosionsbeständig. Die unlegierten Sorten eignen sich für Bauteile und Werkzeuge mit einem guten Widerstand gegen Schlag, Verschleiß und Druck, Handwerkzeuge und Körper von Verbundwerkzeugen. Die legierten kommen als Messerstahl für Papier, Textilen und Kunststoffe sowie zur Lebensmittelzerkleinerung zum Einsatz.

VI. Verschleißbeständige Stähle

Die hier genannten Legierungen können offen erschmolzen werden und erstarren naturhart. Ihr Gefüge ist durch Wärmebehandeln nicht zu beeinflussen oder zu verändern. Bei nur geringen Zähigkeitswerten weist diese Werkstoffgruppe eine Reihe günstiger Eigenschaften auf.

Sie sind als Stähle auf Cobalt-Basis Legierungen nicht magnetisierbar, hoch korrosionsbeständig und hoch verschleißfest. Bemerkenswert ist die hohe Wärmehärte. Sie beträgt beispielsweise bei 700 °C etwa 36 HRC für GX250CoCrW48-33 (W.-Nr. 2.8897).

Co-Basislegierungen haben relativ niedrige Härtewerte, die ihre Ursache in der austenitischen Grundmasse haben. Die hohe Verschleißfestigkeit beruht auf der Kaltverfestigung der Grundmasse und auf den in ihr eingelagerten sehr harten Carbiden. Dadurch haben sie eine höhere Verschleißfestigkeit als gehärtete Werkzeugstähle. Co-Basis-Hartlegierungen sind hartlötbar, jedoch ist Schweißen nicht zu empfehlen. Wenn Feinbearbeiten erforderlich sind, sollte oberhalb etwa 50 HRC geschliffen oder erodiert werden.

Bild 52: Diverse feingegossene Werkzeugeinsätze aus G51CrV4 (W.-Nr. 1.8159) (Bild: Buderus, Moers)

Zum Einsatz kommen diese Legierungen für Blech-, Draht- und Fadenführungen, wo ihre hohe Verschleißfestigkeit gefordert ist. Bei Gleitringdichtungen in Säurepumpen und Armaturen, Ventilteilen, Verschleißbuchsen, Werkzeugen, Mess- und medizinischen Geräten kommen die zudem hohe Korrosionsbeständigkeit aufweisenden Sorten zur Anwendung. Der GX250CoCrW48-33 eignet sich des Weiteren für Warmpressmatritzen.

VII. Nichtrostende ferritisch-martensitische Stähle

Zwar werden die hier genannten Cr-Stähle nach **DIN EN 10283** als nichtrostend aufgeführt, treffender ist aber die Bezeichnung „rostträge“. Aufgrund ihrer hohen Chromgehalte weisen sie gegenüber vielen Medien eine gute Korrosionsbeständigkeit auf, die unter der Voraussetzung eines dichten Gefüges, mit der Werkstoffhärte und der Oberflächengüte, die durch Beizen, Schleifen, Polieren erzielt wird, ansteigt, aber nicht die der austenitischen Stähle erreicht.

Die Chromstähle sind magnetisierbar und temperaturbeständig.Sie widerstehen leichten korrosiven Angriffen, zum Beispiel durch Wasser, Feuchte, Dampf, oxidierende Salzlösungen und schwache Säuren. Sie werden deshalb für Gussteile höherer Festigkeit, die rostträge sein müssen, verwendet.

Im Feinguss kommen bevorzugt die Sorten GX22CrNi17 (W-Nr. 1.4059), GX9CrMo17-1 (Sonderwerkstoff) und GX4CrNi13-4 (W.-Nr. 1.4317) im vergüteten Zustand zur Anwendung. Die Erstgenannte hat ihr bevorzugtes Anwendungsgebiet bei Teilen, die gegen Luftfeuchte, Dampf, Wasser und häufiges Handhaben beständig sein sollen. Die zweite Legierung kommt vorzugsweise für optische, medizinische und andere Messgeräte im Temperaturbereich bis 500 °C zum Einsatz. Weitere Anwendungsgebiete sind hitze- und verschleißbeständige Armaturenteile sowie hochfeste korrosionsbeständige und Salzwasser beständige Bauteile.

VIII. Nichtrostende austenitische Stähle

Die austenitischen Stähle sind je nach Legierungstyp rost-, säure-, hitze- und/oder zunderbeständig bis etwa 900 °C (Versprödungsbereich beachten!). Sie weisen hohe Duktilitätswerte auf und sind kaltzäh bis etwa -190 °C. Als austenitische Werkstoffe sind sie nicht härt- oder vergütbar und nicht oder nur schwach magnetisierbar. Da sie kaltverfestigen, sind sie schwieriger zu bearbeiten als andere Stähle gleicher Festigkeit. In Partien, die zum Beispiel durch Schnittkräfte, Druck, Schlag oder Biegen kaltverfestigt werden, wandelt das Gefüge um und wird schwach

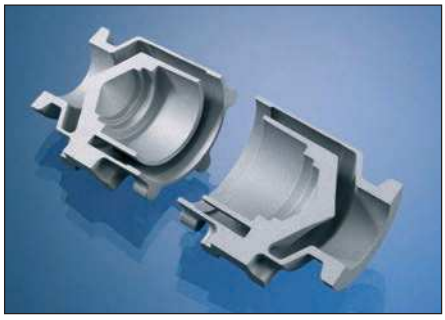


Bild 53: Wärmeabnehmer für Klimaanlage in Flugzeugen aus GNiCr19NbMoTi, Abmessungen: 80 x 86 x 84 mm, Gewicht: 980 g (Bild: Zollern, Sigmaringen)

magnetisierbar. Das beeinträchtigt jedoch die Korrosionsbeständigkeit nicht, die, ein dichtes Gefüge vorausgesetzt, nur vom Legierungstyp und der Oberflächenbehandlung bestimmt wird. Die Schweißbarkeit ist gut. Bei artgleichen Zusätzen ist jedoch der Stabilisator (Ti, Ta/Nb) zu beachten.

Titanstabilisierte und nichtstabilisierte austenitische Stähle lassen sich gut Hochglanz polieren. Sie werden deshalb auch für sichtbare Armaturen an Lebensmittel verarbeitenden Maschinen verwendet. Bei verschiedenartigem, nicht vorhersehbarem oder wechselndem chemischen Angriff durch Säuren oder Laugen hat sich die Sorte GX5CrNiMoNb18-10 (W-Nr. 1.4581) bewährt, so beispielsweise bei Pumpen und Armaturen.

Wird außer hoher Korrosionsbeständigkeit auch hohe Härte und/oder hohe Verschleißfestigkeit gefordert (zum Beispiel an Sitzen von Ventilen oder Schiebern in Armaturen), dann sind Hartlegierungen zu verwenden.

Bei sehr hoher dynamischer Beanspruchung und daraus resultierender Kriechgefahr können die austenitischen Stähle nicht verwendet werden. Es sind dann die im Vakuum erschmolzenen Ni- und Co-Basislegierungen einzusetzen.

Bauteile aus austenitischen Stählen sind gut dafür geeignet, mit solchen aus Al-Basislegierungen zusammengebaut zu werden, weil wegen der geringen Unterschiede in den Spannungspotentialen praktisch keine galvanische Elementbildung auftritt.

Bevorzugt kommen im Feinguss die Sorten GX5CrNi19-10 (W-Nr. 1.4308) und GX5CrNiMoNb18-10 (W-Nr. 1.4581) im abgeschreckten Zustand zur Anwendung. Einsatz finden diese Feingussteile in Pumpen, Zentrifugen, Rührwerken, Ventilen, Armaturen der chemischen, Textil-, Kunstseide-, Zellstoff- und Kaliindustrie aber auch für Anlagen der Luft-, Stickstoff- und Sauerstoffverflüssigung und für Teile von Maschinen, die Lebensmittel, Getränke, Genussmittel, Gewürze und Arzneimittel verarbeiten. Die Sorte GX12CrNi18-11 (W-Nr. 1.3955) besticht durch ihre magnetische Permeabilität von >/= 1,01.

IX. Duplexstähle

Duplexstähle nach **DIN EN 10283** haben ein austenitisch-ferritisches Zweiphasengefüge mit etwa gleichen Volumenanteilen an Ferrit und Austenit. Aufgrund der Legierungselemente Cr, Ni und Mo verfügen sie über hervorragende Korrosionseigenschaften. Gegenüber den austenitischen Werkstoffen werden deutlich höhere Festigkeiten erzielt, die erhebliche Vorteile bringen beim Einsatz in Medien mit Feststoffanteilen. Sie sind wie Austenite nicht härt- oder vergütbar.

Aufgrund der hohen Versprödungsneigung (Versprödungsbereiche bei 700 bis 900 und bei 400 bis 600 °C) sind diese Werkstoffe einem Lösungsglühen bei etwa 1 100 °C mit raschem Abschrecken in Wasser oder vergleichbaren Medien zu unterziehen. Zum Erzielen einer höheren Festigkeit sind absichtliche Versprödungen um 500 °C möglich, die jedoch zu einer deutlich geringeren Duktilität und schlechterer Korrosionsbeständigkeit führen.

Die am häufigsten zur Anwendung kommenden Werkstoffe, wie GX2CrNiMoN22-5-3 (W-Nr. 1.4470) oder GX2CrNIMoCuN25-6-3-3 (W-Nr. 1.4517), sind in der **DIN EN 10283** „Korrosionsbeständiger Stahlguss“ genormt. Je nach Anforderungsprofil an die Korrosionseigenschaften kann zwischen den Standard- und den Superduplex-Werkstoffen unterschieden werden.

Die für das Korrosionsverhalten entscheidenden Elemente werden in Form einer Wirksumme („Pitting Corrosion Resistance Equivalent - PRE „), die einen Zu-

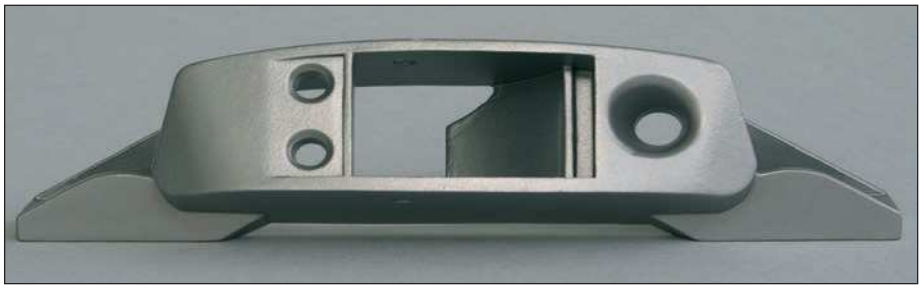


Bild 54: Verschlussplatte für den Fahrzeugbau aus Stahlfeinguss der Sorte GX5CrNi19-10 (W.-Nr. 1.4308), Größtmaß etwa 160 mm, Gewicht: 300 g (Bild: NRU, Neukirchen)

Bild 55: Turbinenschaufeln für den Airbus A 380 nach dem Vakuum-Differenzdruck-Verfahren gefertigt (Bild: 1zu1 Prototypen, Dormbirn)

sammenhang zwischen der Lochfraßbeständigkeit und der ehemaligen Zusammensetzung herstellt, zusammengefasst.

PRE= Cr + 3,3Mo + 16N (1)

(Massenanteile von Cr, Mo und N in %)

X. Hitze- und zunderbeständige Stähle

Bei Temperaturen über 500 bis 600 °C sind hitzebeständige Stähle erforderlich. Sie sind, bedingt durch ihre hohen Chromgehalte, je nach Legierungszusammensetzung, beständig gegen verzundernde Gase. Es kommen sowohl ferritische als auch austenitische Stähle zum Einsatz. Bei allen austenitischen Stählen ist zu beachten, dass sie in bestimmten Temperaturbereichen verspröden (können) und bei entsprechend hoher Beanspruchung nicht kriechfest sind.

Übliche Feingusslegierungen dieser Werkstoffsorte sind der GX40CrSi13 (W.Nr. 1.4729) und der GX40CrNiSi25-20 (W-Nr. 1.4848), die für Öfenteile, Apparate und stationäre Gasmotoren sowie Verbrennungsmotoren Einsatz finden.

XI. Hochwarmfeste offen erschmolzene Stähle

Die offen erschmolzenen hochwarmfesten Werkstoffe sind gegen heiße Medien (Dämpfe, Gase) beständig. Werte für die Zeitdehngrenze und Zeitstandfestigkeit werden auf Anfrage vom jeweiligen Feingießer genannt. Wegen ihrer guten Kriechfestigkeit können sie auch für statisch und dynamisch hochbeanspruchte Bauteile bei niedrigen Betriebstemperaturen Verwendung finden.

Bevorzugte Stahlgusslegierungen sind der GX20CrCoMo12-21 (W.-Nr. 1.4912) und der GX15CrNiCo21-20-20 (W-Nr. 1.4957), die für Turbinenbauteile, Brennereinsätze, Vorkammern, Strebenhaltern, Leitschaufeln und Nachverbrennungsteile zum Einsatz kommen. Für Turbolader- und Gasturbinenteile sowie Leitschaufeln werden hier auch spezielle Co-Legierungen (siehe Kapitel 3.5) eingesetzt.

3.5 Nickel- und Cobalt-Basislegierungen

I. Hochkorrosionsbeständige Legierungen

In Fällen, in denen die Korrosionsbeständigkeit der austenitischen Stähle nicht (mehr) ausreicht, werden Nickel- und Cobalt-Basislegierungen verwendet, von denen hier je ein Typ als Vorzugslegierung für den Feinguss genannt ist: GNiCr20Mo15 und GCoCr28Mo. Diese Werkstoffe haben ein austenitisches Grundgefüge, sind nichtmagnetisierbar und noch etwas schwieriger zu bearbeiten als die austenitischen Stähle. Um Werkstoffe dieser Art optimal auszuwählen, ist es erforderlich, dass sich Feingussbezieher und Feingießer detailliert abstimmen.

Die Cobaltlegierungen haben ihr Hauptanwendungsgebiet in der medizinischen Implantattechnik (**Bild 56**). Sie kommen wegen ihrer guten Körperverträglichkeit bei Hüft- und Kniegelenkimplantaten sowie bei metallischem Zahnersatz (Dentalguss) zum Einsatz.

II. Hochwarmfeste offen erschmolzene Legierungen (Co-Basislegierungen)

Die offen erschmolzenen hochwarmfesten Werkstoffe sind gegen heiße Medien (Dämpfe, Gase) beständig. Werte für die Zeitdehngrenze und Zeitstandfestigkeit werden auf Anfrage vom jeweiligen Feingießer genannt. Wegen ihrer guten Kriechfestigkeit können sie auch für statisch und dynamisch hochbeanspruchte Bauteile bei niedrigen Betriebstemperaturen Verwendung finden.

Neben den unter 3.4 beschriebenen Stahlsorten kommen für Turbolader- und Gasturbinenteile die Co-Basislegierung GCoCr25NiW und die spezielle Leitschaufel- und -ringelegierung GCoCr-20Ni20W (W-Nr. 2.4989) zum Einsatz (**Bild 55**).

III. Hochwarmfeste vakuumerschmolzene Legierungen (Ni-Basislegierungen)

Die große dynamische Belastbarkeit bei hohen Temperaturen wird bei diesen Nickel-Basislegierungen durch Ausscheidungshärten erreicht. Die Metalle, die dies über intermetallische Verbindungen bewirken, sind Aluminium und Titan. Wegen der Affinität zu Sauerstoff muss unter Luftabschluss geschmolzen und gegossen werden, also unter Vakuum oder Schutzgas. Als Austenite sind die hochwarmfesten Legierungen kaltverfestigend und dementsprechend schwierig zu bearbeiten.

Diese Legierungen sind ursprünglich für Gasturbinenschaufeln in Flugtriebwerken entwickelt worden. Inzwischen werden sie auch für Rotoren von Abgas-Turboladern und Schaufeln von stationären und beweglichen Frischgas-Turbinen verwendet. Bevorzugte Feingusslegierungen dieser Gruppe sind die GNiCr12Al6MoNb (W-Nr.

Bild 56: Feingussrohlinge Implantate für die Medizintechnik aus einer CoCrMo-Legierung gemäß ASTM F75 (Bild: Buderus, Moers)

2.4670) und die GNiCr16Co8AlTi (Sonderwerkstoff). Verbindliche Zeitstandwerte nennt der Feingießer, mit dem auch vorher die Abnahmebedingungen zu vereinbaren sind.

Jedoch auch bei niedrigen Betriebstemperaturen empfehlen sich diese Legierungen für dynamisch und statisch hoch belastete, korrosionsbeständige Maschinen- und Geräteteile, an deren Kriechfestigkeit hohe Anforderungen gestellt werden. Die hochwarmfesten Legierungen bieten somit auch für „normale“ Betriebstemperaturen die Voraussetzung, Bauteile kleiner, mit geringeren Wanddicken und damit leichter, also wirtschaftlicher, zu konstruieren und zu bauen.

Für stengel- und monokristallin erstarrte Feingussteile sind besondere, in der Tabelle nicht aufgeführte Legierungen erforderlich. Ein solcher Bedarf ist mit demjenigen Feingießer zu besprechen, der darauf eingerichtet ist, diese Legierungen zu schmelzen, zu gießen und gerichtet erstarren zu lassen.

3.6 Gusseisen

Gusseisen gehört nicht zu den meist genutzten Feingusswerkstoffen. Die Verwendung ist aber prinzipiell möglich. Gusseisen mit Lamellengraphit (alt: GG, neu: GJL) wird verwendet, wenn gute Gleit- und Notlaufeigenschaften oder ein hohes Dämpfungsvermögen gegenüber Schwingungen gefordert werden. Bevorzugt wird hier die Legierung EN-GJL-250 (W-Nr. EN-JL1040) genutzt. Wird zusätzlich zu den genannten, typischen Eigenschaften von unlegiertem Gusseisen auch Korrosionsbeständigkeit gefordert, so kommt das austenitische Gusseisen GJLA-XNiCu-Cr15-6-2 (W-Nr. EN-JI3011) zum Einsatz. Es ist nicht magnetisierbar und hat eine hohe Wärmeausdehnung.

Aus Gusseisen mit Kugelgraphit (alt GGG, neu: GJS) werden solche Bauteile feingegossen, an die neben Gleit-, Notlauf- und/oder Dämpfungseigenschaften außerdem höhere Anforderungen an die Zähigkeit und Festigkeit gestellt werden. Eine hier eingesetzte Legierung ist die EN-GJS-400-15 (W-Nr. EN-JS1030).

3.7 Aluminium-Basislegierungen

Wegen seiner geringen Dichte und der guten mechanischen Eigenschaften wird Aluminiumfeinguss vor allem in der Elektro- und Elektronikindustrie eingesetzt. Das Gleiche gilt für Flugzeugbau und für Geräte, die aus Handhabungsgründen leicht sein müssen [13, 14].

Im Vergleich zum Druckguss zeichnet sich Feinguss durch ein dichteres Gefüge, die definierten elektrischen und thermischen Leitwerte sowie relativ niedrige Werkzeugkosten aus. Hinzu kommt, dass Feinguss praktisch keine Aushebeschrägen erfordert und wesentlich kompliziertere Konstruktionen ermöglicht. Wenn Druckgießen und Feingießen für ein bestimmtes Teil in Frage kommen, lohnt sich aus diesen Gründen eine Vergleichskalkulation mit Blick auf die Werkzeugkosten dann, wenn es sich um relativ kleine Stückzahlen handelt. Zwar kann wegen der sonstigen Einflussgrößen keine feste Grenzkostenstückzahl angegeben werden, aber bis etwa 1000 Stück wird meist Feingießen wirtschaftlicher sein.

Nicht nur die Druckgießform, auch die daran eventuell notwendigen Änderungen sind sehr aufwändig. Daher hat es sich bewährt, für geplante Druckgussgroßserien die Vor- und Versuchsserien feinzugießen. Wenn die mit den Feingussteilen durchgeführten Testreihen abgeschlossen sind, kann nahezu risikolos auf Druckgießen übergegangen werden.

Um galvanische Elementbildung zu vermeiden, werden Bauteile aus Al-Basislegierungen vorteilhaft mit solchen aus austenitischen Stählen und austenitischen Legierungen zusammenmontiert.

Die EN AC-AlSi7Mg0,6 (W.-Nr. EN AC-42200) im warmausgelagerten Zustand ist die Standardlegierung für Feingussteile, die gut gieß- und schweißbar ist. Diese Legierung ist eine in vielen Industrieländern genormte Hüttenlegierung mit sehr guten Gieß- und Korrosionseigenschaften. Sie ist druckdicht, unempfindlich gegen Spannungsrisskorrosion, seewasserbeständig, anodisch oxidierbar und lässt sich sehr gut schweißen und gut polieren. Produkte aus dieser Legierung werden farblos oder farbig und für technische Zwecke auch schwarz anodisiert geliefert. Sie findet Einsatz bei Teilen für die Elektro- und Elektronikindustrie sowie im Flugkörper- und Zellenbau.

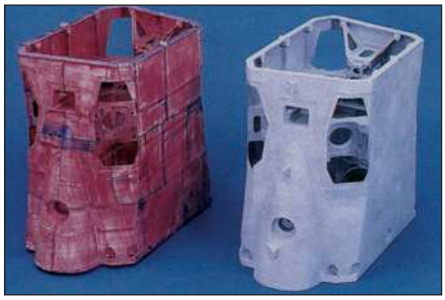


Bild 57: Gehäuse für einen Flugkörper, Abmessungen: 900 x 600 x 400 mm, mit einem aus mehreren Einzelteilen aufgebautem SLS-Modell aus der Legierung EN AC-AlSi7Mg0,6 (W.-Nr. EN AC-42200) nach dem HERO Premium-Casting gefertigt (Bild: Tital, Bestwig)

Die EN AC-AlCu4MgTi (W.-Nr. EN AC-21000) kommt sowohl kalt- als auch warmausgelagert zum Einsatz, wenn an die gefertigten Teile höhere Ansprüche gestellt werden. Die EN AC-AlMg3(a) (W.-Nr. EN AC-51100) zeichnet sich bereits im Gusszustand durch eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit gegen Meerwasser, schwach alkalische Medien und Witterungseinflüsse aus.

Wenn es auf weitere Gewichtsredzierung ankommt, kann auch Magnesium feingegossen werden. Allerdings ist hier aus Wirtschaftlichkeitsgründen, wegen der aufwändigeren Fertigungstechnologie und schlechteren Gießbarkeit, zu prüfen, ob nicht, wie in den meisten Fällen, eine Al-Basislegierung günstiger ist.

3.8 Titan und Titan-Basislegierungen

Titanlegierungen wurden 1954 erstmalig in den USA im Feinguss vergossen. Titan als reaktives Metall mit hoher Schmelztemperatur kann nur unter Luftabschluss, also im Vakuum, erschmolzen und vergossen werden. Die Wärmebehandlung und auch ein eventuelles Schweißen erfolgen unter Schutzgas. Die hohe Reaktivität des Titans erfordert ein Schmelzen nach der Skull-Melting-Technik im Vakuumlichtbogenofen. Wegen der für Titan üblichen Reaktionszone, die durch Beizen entfernt werden muss, lassen sich die für Feinguss üblichen Wandstärketoleranzen wegen der Notwendigkeit des Beizens schwierig erreichen. Es kann bei den Maßtoleranzen praktisch nur der Genauigkeitsgrad T_1 nach **VDG-Merkblatt P 690** [7] angewendet werden.

Titan und seine Legierungen sind weitgehend beständig gegen freie Chlorionen, oxidierende und reduzierende Säuren sowie unempfindlich gegenüber Lochfraß, um nur einige Beispiele zu nennen. Daraus ergeben sich zahlreiche Anwendungen unter anderem in der chemischen und der Lebensmittel verarbeitenden Industrie, aber auch für Implantate in der Humanmedizin.

Die günstige spezifische Festigkeit wird besonders bei Bauteilen für die Luft- und Raumfahrt sowie Renn- und Sportwagen umfangreich genutzt. Titan ist je nach Legierungstyp bis maximal 550 °C einsetzbar. Gleich den austenitischen Werkstoffen verfestigt Titan kalt, was beim Bearbeiten zu berücksichtigen ist.

Alle Gussteile werden aus kommerziellen Halbzeuglegierungen hergestellt. Übliche Legierungen im Feinguss sind die G-Ti2 (W.-Nr. 3.7031) , GTi3 (W-Nr. 3.705) und

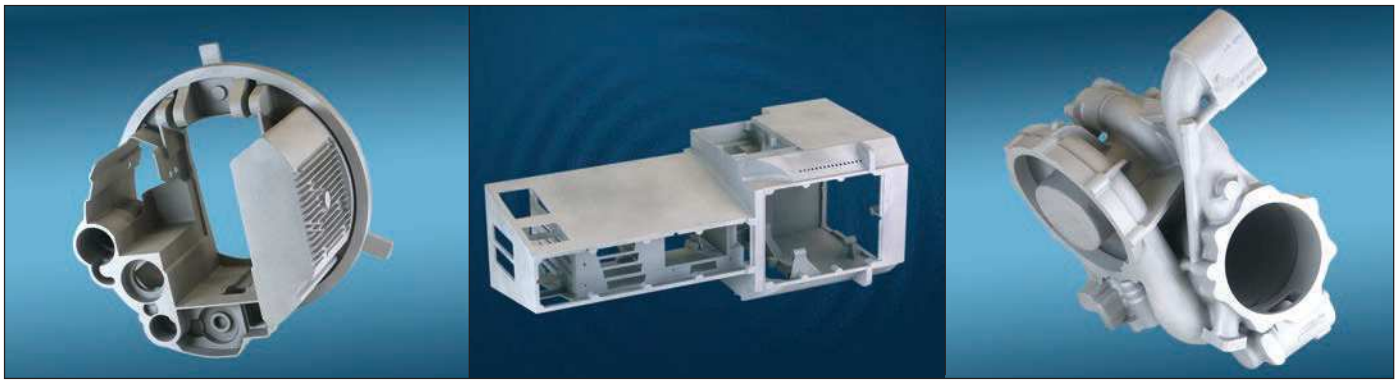


Bild 58: Feingussteil Housing für Fluggeräte aus dem Werkstoff EN AC-AlSi7Mg0,6 wa (W.-Nr. EN AC-42200) nach dem SOPHIA-Verfahren gefertigt, Abmessungen: Dmr. 410 x 200 mm, Gewicht: 7400 g (links)
Bild 59: Elektronikgehäuse für die Luftfahrt aus dem Werkstoff EN AC-AlSi7Mg0,6 wa (W.-Nr. EN AC-42200), Abmessungen: 600 x 250 x 165 mm, Gewicht: 3200 g (Mitte)
Bild 60: Pumpengehäuse für Triebwerk aus dem Werkstoff EN AC-AlSi5Cu1 wa (W.-Nr. EN AC-45300) nach dem SOPHIA-Verfahren gefertigt (rechts) (Alle Bilder: Zollern, Soest)

die G-TiAl6V4 (W.-Nr. 3.7165), die die größte wirtschaftliche Bedeutung hat. Bei höheren Einsatztemperaturen kommt zunehmend auch die Legierung G-TiAl-6Sn2Zr4Mo2Si (W.-Nr. 3.7145) nach **DIN 17865** zur Anwendung. Die in den Gussteilen erzielten Eigenschaften liegen auf einem dem Halbzeug vergleichbaren Niveau.

Die hohe Festigkeit des Titans gegenüber Aluminium und der geringe E-Modul gegenüber Stahl machen ein Richten der gegossenen Teile schwierig. Mit speziellen Lehren aus Stählen mit ausgewählten Ausdehnungskoeffizienten kann aber bei der Wärmebehandlung das Gussteil durch Kriechen auf Maß gebracht werden.

TiAl-Titanaluminide

Ti-Al-Legierungen (TiAl) sind ein High-Tech-Werkstoff für Hochtemperaturanwendungen. Die TiAl-Aluminide bilden eine Familie von intermetallischen Werkstoffen, welche durch eine niedrige Dichte, gute Hochtemperatureigenschaften, einen guten Korrosionswiderstand und hervorragende Kriecheigenschaften gekennzeichnet sind (**Tabellen 2** und **3**). Damit besitzen sie ein großes Potential zur Anwendung in Bereichen, die bisher von Nickelbasis-Superlegierungen dominiert wurden.

Limitierungen des Werkstoffeinsatzes auf Grund der niedrigen Duktilität bei Raumtemperatur wurden bereits durch die Entwicklung neuer Legierungen überwunden. Legierungen der letzten Generation zeigen sehr attraktive Eigenschaften für die Herstellung von Turbinenschaufeln (**Bild 64**) oder Turboladerrädern (**Bild 65**). Durch eine starke Gewichtsreduktion von bis zu 50 % steigen die Ansprechzeiten von beweglichen Komponenten, wodurch Leistung und Energieeffizienz deutlich verbessert werden. Hohe Schmelztemperaturen und die charakteristische Reaktivität von TiAl erfordern jedoch speziell angepasste Schmelzprozesse und chemisch und thermisch stabile Keramikformschalen.

Titanfeingießereien sind darauf eingerichtet, auch Zirkonium und dessen Legierungen zu vergießen.

Bild 61: Fingergelenk-Implantate für die Medizintechnik aus körpervertäglichem Titanfeinguss (NRU, Neukirchen)

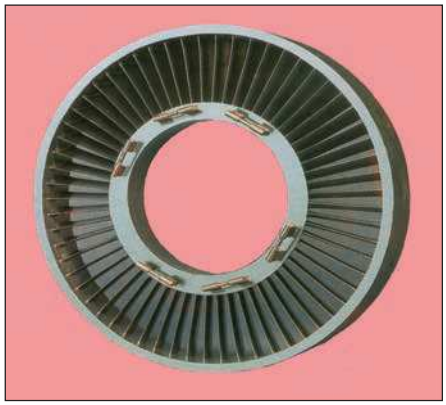


Bild 62: Strator aus Titanfeinguss für Flugzeugturbine mit angegossenen Probestücken und 2 mm dicken Schaufeln, Werkstoff: GTiAl6V4 (W.-Nr. 3.7264), Dmr. 570 mm, Gewicht: 18 500 g (Bild: Tital, Bestwig) (oben)

Bild 63: Spiralgehäuse für eine Flugturbine aus GTiAl6V4 (W.-Nr. 3.7264) nach dem Quick-Cast-Verfahren gefertigt, Dmr. 450 mm (Bild: Tital, Bestwig) (links)

Tabelle 2: Dichte und Schmelztemperatur der technisch angewandten TiAl-Aluminiden

Legierung	Chemische Zusammensetzung	Dichte [g/cm³]	Liquidus-temperatur [C°]	Erfinder
TNB-V2	Ti-45Al-10Nb-0.2B	4,2	1550	GKSS
TNB-V5	Ti-45Al-5Nb-0.2C-0.2B	4,0	1530	GKSS
GE48-2-2	Ti-48Al-2Cr-2N	3,9	1500 - 1520	GE

[1] GKSS - Forschungszentrum Geesthacht GmbH
[2] GE - General Electrics

Bild 64: Turbinenschaufel aus TiAl-Aluminiden (Bild: ACCESS, Aachen)

Tabelle 3: Die wichtigen mechanischen Eigenschaften der TiAl-Aluminiden

Mechanische Eigenschaften	TNB-V2	TNB-V5	GE48-2-2
Streckgrenze bei RT [MPa]	1050	600	310-385
Streckgrenze bei HT [MPa]	800 (800°C)	570 (700°C)	335 (760°C)
Festigkeit bei RT [MPa]	1080	780	410-445
Festigkeit bei HT [MPa]	830 (800°C)	740 (700°C)	475 (760°C)
Dehnung bei RT [%]	1,0	0,5	0,6
Dehnung bei HT [%]	5,0 (800°C)	1,75 (700°C)	5,1 (760°C)
Kriecheigenschaften [s-1]	6,00E-09 T:800°C, p:250MPa	8,13E-10 T:700°C, p:300MPa	5,50E-08 T:760°C, p:138MPa

RT - Raumtemperatur
HT - Hochtemperatur

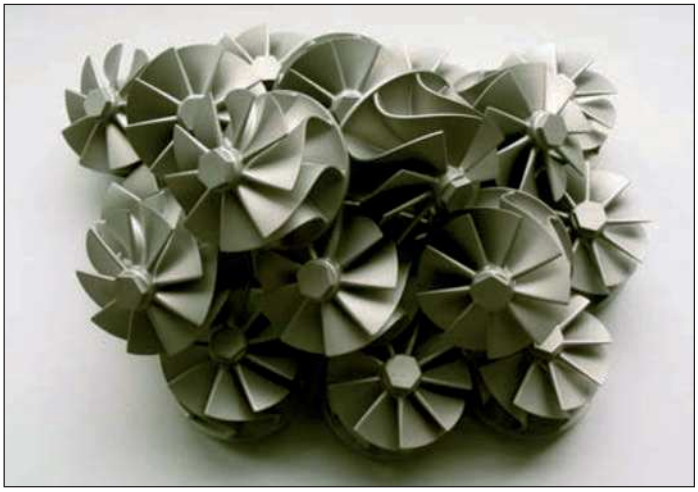


Bild 65: Turbinenlaufräder aus TiAl-Aluminiden (Bild: ACCESS, Aachen)

3.9 Kupfer- und Cu-Basis-Legierungen

Kupferlegierungen zeigen je nach Zusammensetzung unterschiedliche Eigenschaften. In Verbindung mit Aluminium und Eisen entsteht ein Werkstoff, der eine hochfeste Korrosionsbeständigkeit gegenüber Meerwasser zeigt. Typische Einsatzgebiete sind Pumpenteile, Schiffspropeller, Ventilgehäuse, Heißdampfarmaturen, Hydraulikteile, wassergekühlte Auspuffteile, Schiffsanbauten, Knetarme für die chemische Industrie, Wärmetauscher, sowie Gleit- und Druckstücke. Diese Legierungen besitzen auch gute Abrieb- und Verschleißfestigkeit, weiterhin sind sie nichtmagnetisch. Feingussteile aus Kupfer und Kupfer-Basislegierungen werden zudem bevorzugt von der Elektro- und Elektronikindustrie verwendet, die bestrebt sind, immer kleiner und leichter zu bauen. Im Feinguss kommt vor allem die Kupfer-Aluminium-Legierung CuAl10Fe5Ni5-C (W-Nr. CC333G) (entspricht der DIN-Sorte CuAl10Ni) zum Einsatz.

Kupfer-Zinn-Legierungen zeichnen sich durch hohe Dehnungseigenschaften, Korrosions- und Meerwasserbeständigkeit, sowie gute Kavitationsbeständigkeit aus. Weiterhin besitzen sie gute Gleit- und Dämpfungseigenschaften. Die CuSn10-C (W-Nr. CC480K) und CuSn12-C (W-Nr. CC483K) sind hier bevorzugte Feingusslegierungen. Die günstigen technologischen Eigenschaften werden ferner für Textilmaschinen- und Armaturenteile genutzt.

Cu-Zink-Basislegierungen sind wegen ihrer guten Gleiteigenschaften und ihrer Korrosionsbeständigkeit außerdem für Teile geeignet, die reibendem Verschleiß und/oder chemischem Angriff zum Beispiel durch Meerwasser ausgesetzt sind. So wird die Sorte CuZn16Si4-C (W-Nr. CC761S) beispielsweise für Kompassteile verwendet, bei denen es auf völlige Nichtmagnetisierbarkeit ankommt.

Kupfer-Zink-Legierungen zeichnen sich durch eine besonders gute Gießbarkeit für dünnwandige Teile aus, sie besitzen ebenfalls gute Korrosionseigenschaften. Typische Anwendungsgebiete sind komplizierte Armaturen mit geringen Wanddicken.

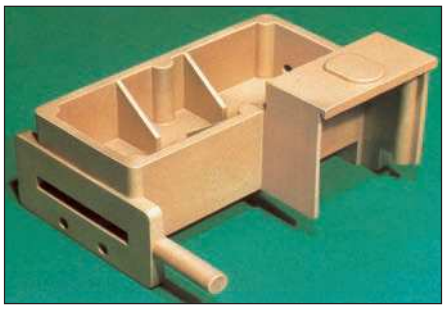


Bild 66: Gehäuse mit integriertem Hohlleiter für die HF-Technik, Werkstoff CuZn16Si4-C (EN CC761S), Abmessungen: 110 x 95 x 60 mm, Gewicht 795 g (Bild: ZGV)

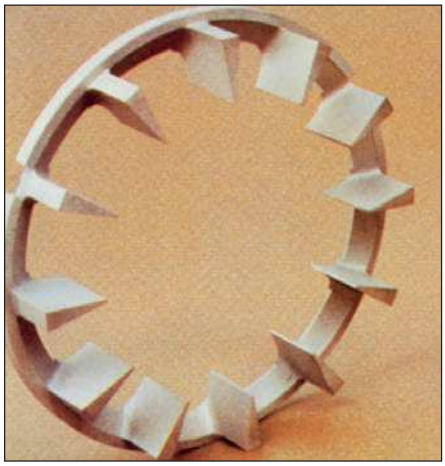


Bild 67: Schaufelrad für den Landmaschinenbau aus G-CuZn15Si4-C (W.-Nr. CC761S), Abmessungen: Dmr. 170 x 30 mm, Gewicht 410 g (oben links)

Bild 68: Schaltfinger für Elektronik aus G-CuZn34Al2-C (W.-Nr. CC764S), Abmessungen 50 x 40 x 20 mm, Gewicht. 43 g (oben rechts)

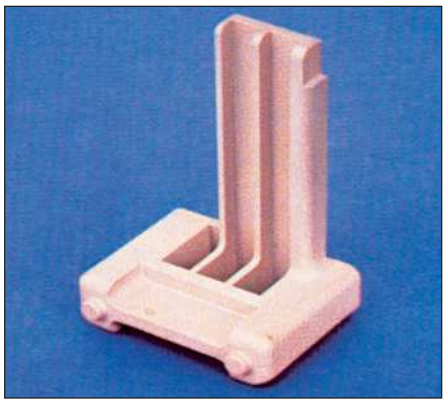


Bild 69: Führungsstück für den Fahrzeugbau aus G-CuZn35Al1 (W.-Nr. CC765S); Abmessungen. 90 x 60 x 40 mm, Gewicht: 250 g (unten rechts) (Alle Bilder: ZGV)

3.10 Nachdichten

Wird in besonderen Fällen eine Steigerung der Gefügedichtheit gefordert, so können die Werkstücke imprägniert oder heißisostatisch gepresst werden.

I. Imprägnieren

Hierbei erfolgt das Abdichten von Porositäten durch Tränken der Gussteile mit zum Beispiel flüssigen Kunststoffen oder Mitteln auf Wasserglasbasis. Das Imprägnieren erfolgt nach der Vakuum/Druckmethode, die ein optimales Infiltrieren des Abdichtmittels sichert. Die Druckverdichtung durch Imprägnieren kommt bei offenen Oberflächenfehlern zur Anwendung.

II. Heißisostatisches Pressen

Beim HIP-Verfahren („Hippen“) werden die zu behandelnden Feingussstücke in einem Autoklaven unter Schutzgas (Argon) hohen Drücken und Temperaturen ausgesetzt, zum Beispiel bei Stählen und Ni-Basis-Legierungen bis 1500 bar und über 900 °C. Dabei werden die Poren durch Fließen des Werkstoffs im Mikrobereich unter gleichzeitigem „Verschweißen“ der Porenwände geschlossen. Das HIP-Verfahren kommt bei eingeschlossenen Poren zur Anwendung. Grundsätzlich ist das Verfahren für alle Feingusswerkstoffe einsetzbar. Das Hippen erfordert eine nachfolgende Wärmebehandlung, weshalb die Wärmebehandlung des Gussteils generell nach diesem Prozess erfolgen sollte.

Informationsmaterial der Zentrale für Gussverwendung unter e-mail:zgv@bdguss.de und Tel. (02 11) 6871-223

Die Vielfalt der Gusswerkstoffe mit ihren unterschiedlichen Eigenschaftsprofilen ist groß. Erst die richtige Werkstoff- und Verfahrensauswahl und eine gieß- und anwendungsgerechte Gussteilkonstruktion ermöglichen es, die Vorteile eines Gussteils voll auszuschöpfen. Die ZGV-Zentrale für Gussverwendung hat für die wichtigsten Fragen und Problemstellungen bei der

Werkstoffauswahl, Gusskonstruktion und Gussanwendung

Sonderdrucke und Werkstoffmonographien, die auf Anfrage zur Klärung bestehender Fragen zu diesen Themen zur Verfügung gestellt werden:

Fordern Sie das Lieferverzeichnis unter e-mail: zgv@bdguss.de an!

4 Konstruieren und Gestalten

Feingießen erweitert die Freiheit des konstruktiven Gestaltens außerordentlich. Es sind sehr kompliziert und komplex ausgeführte Werkstücke mit geringen Wanddicken, hoher Oberflächengüte und engen Maßtoleranzen herstellbar. Zusammen mit der Werkstoffvielfalt werden für Konstruktionsaufgaben der verschiedensten Art mit Feinguss oft neue, vor allem aber wirtschaftliche Lösungen gefunden.

Ein unter allen technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimal gestaltetes Feingussteil setzt den engen Kontakt zwischen dem Gestaltenden und dem Feingießer voraus: hier die konstruktiven Forderungen, dort die fertigungstechnischen Möglichkeiten. Das Ergebnis einer solchen Zusammenarbeit sind anwendungstechnisch optimierte Bauteile, hergestellt mit möglichst geringem Fertigungsaufwand. Gestaltende in diesem Sinne sind Konstrukteure und Entwicklungsingenieure, betriebliche Führungskräfte sowie technische Kaufleute und Einkäufer, die neue und rationelle Wege suchen, wirtschaftlich zu fertigen.

Trotz aller Freizügigkeit beim Konstruieren in Feinguss empfiehlt es sich im Interesse verbesserter Wirtschaftlichkeit, einige Hinweise zu beachten, um den Fertigungsaufwand möglichst niedrig zu halten. Damit werden einerseits die physikalischen Gesetzmäßigkeiten beim Gießen sowie der Arbeitablauf vom Werkzeug bis zum Gussstück berücksichtigt, andererseits zeigen sie weitere Potenziale auf, die mit dem Feingießen zu erreichen sind. Ein „richtig“ konstruiertes Feingussteil sollte demnach folgenden Gesichtspunkten gerecht werden:

- wirtschaftlich,
- funktions- und beanspruchungsgerecht,
- feingießgerecht,
- bearbeitungsgerecht,
- montagegerecht,
- formschön.

Bild 70: Je nach den betrieblichen Anforderungen (z. b. Turbolader, Kältetechnik) werden Verdichterräder aus Al- und Ti-Basis-Legierungen feingegossen, Maße bis etwa Dmr. 900 mm, Gewicht bis rund 35 kg (Bild: Tital, Bestwig)

4.1 Wirtschaftlichkeit

In jedem Fall gilt die Faustregel: Je komplizierter ein Werkstück und/oder je schwieriger es zu bearbeiten ist, desto wirtschaftlicher ist es, feinzugießen. Beste Wirtschaftlichkeit und optimale Gestalt werden jeweils so erreicht.

Der Konstrukteur lässt das im Blickpunkt stehende Teil vor seinem geistigen Auge sozusagen „schrumpfen“ beziehungsweise abmagern, um so die kleinstmögliche, noch vertretbare Gestalt (Form, Kontur) zu erreichen. Er vermeidet Materialanhäufungen und schroffe Querschnittsübergänge, verringert sinnvoll Wanddicken, sieht Aussparungen vor und nutzt die hohen technologischen Werte feingegossener Werkstoffe. Hierzu kommen heute verstärkt die computerunterstützten Techniken zum Einsatz, auf die unter Punkt 4.3 eingegangen wird.

Besonders geeignet ist für die Herstellung kosten- und masseoptimierter Gussteile auch die bionisch orientierte Bauteilgestaltung [16].

Die allgemeinen Preis bestimmenden Faktoren werden unter Kapitel 5 dargelegt. Im Wesentlichen werden sie gebildet aus Stückzahlen pro Gießeinheit, Sperrigkeitsgrad, Werkstoff, Toleranzen sowie den Abnahmekriterien.

Bild 71: Zangeneinsätze für den Werkzeugbau aus G51CrV4 (W.-Nr. 1.8159) (Bild: Buderus, Moers)

4.2 Konstruktive Aspekte

4.2.1 Außenkontur

Das Feingießen ermöglicht, wie schon mehrfach erwähnt, die Herstellung sehr komplexer und filigraner Bauteile. Für die optimale Ausnutzung dieser Möglichkeiten sind folgende Regeln zu beachten.

I. Räumlich gekrümmte Flächen

Räumlich gekrümmte Flächen lassen sich im Feingießverfahren genau und formtreu reproduzieren. Die Wirtschaftlichkeit ist dadurch gegeben, dass der dafür notwendige hohe Bearbeitungsaufwand nur einmal, nämlich beim Herstellen des Werkzeuges, erforderlich ist.

II. Teilefamilien

Bei entsprechender Konstruktion können sogenannte Teilefamilien gebildet werden, wenn es für ähnliche Teile möglich ist, mit einem Werkzeug und mehreren auswechselbaren Kernschiebern zu arbeiten. Die Werkzeugkosten verringern sich dadurch spürbar (**Bilder 70** und **71**).

Andererseits kommt es aber auch zum Beispiel bei Elektronikgehäusen vor (**Bild 72**), dass alle Details ein- und angegossen werden, die für mehrere, ähnliche Einbausätze gebraucht werden. Im Einzelfall werden sie selten alle genutzt. Das betreffende Gussstück ist dann aber vielseitig ver-

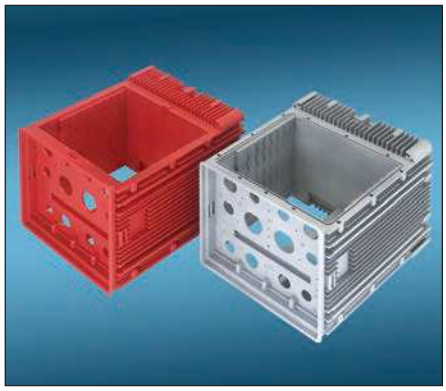


Bild 72: Elektronikgehäuse aus EN AC-AlSi7-Mg.0,3 wa (W.-Nr. EN AC-42100), Abmessungen: 330 x 280 x 240 mm, Gewicht: 5 400 g (Bild: Zollern, Soest)

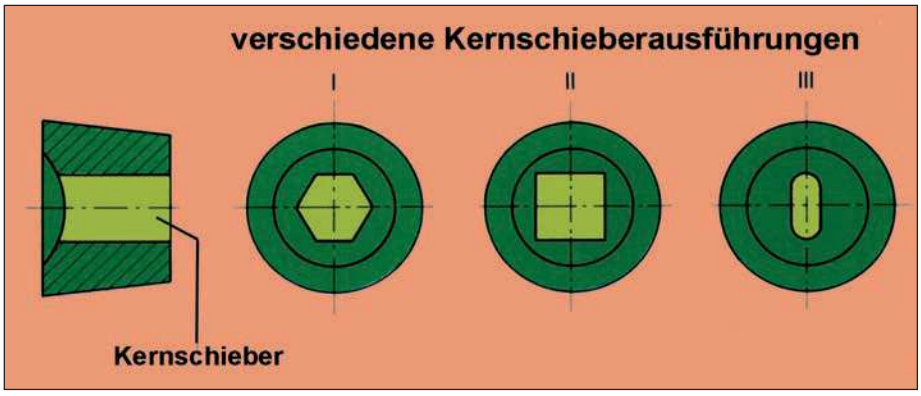


Bild 73: Bildung von Teilefamilien durch verschiedene Kernschieberausführungen

wendbar und kann bei nur einmal erforderlichen Werkzeugkosten in größerer Stückzahl bezogen werden (**Bild 73**).

III. Sperrigkeit

Durch Aussparungen, über gießgerechtes Konstruieren erzielbar, kann die Zahl der Anschnitte verringert werden. Dies senkt den Sperrigkeitsgrad des betreffenden Bauteils und mindert den gießtechnischen Aufwand (**Bild 74**).

IV. Verzahnungen

Verzahnungen für umlaufende Zähne sind allgemein im Abwälzfräsverfahren billiger und genauer herzustellen, als feinzugießen. Wirtschaftlich vorteilhaft ist das Vorbeziehungsweise Fertiggießen von Sonderverzahnungen der verschiedensten Art (**Bild 75**) vor allem aus schwer und nicht zerspanbaren Werkstoffen, wie zum Beispiel

- Schalt-, Kupplungs- und Kerbzähne,
- Hirthverzahnungen,
- Innenzähne und zahnradähnliche Profile, die nicht im Abwälzfräsverfahren hergestellt werden können,
- Kegel- und Kettenräder,
- Räder für Schneckengetriebe,

Ein nachfolgendes Bearbeiten durch beispielsweise Schleifen hängt vom Verwendungszweck ab und ist erforderlich, wenn die Feingusstoleranzen für Teilung und Durchmesser nicht ausreichen.

Die noch gießbaren Moduln sind von der Größe des Gussteils und vom Werkstoff abhängig, es gelten

- für Fe-, Ni- , Co- und Ti-Basislegierungen: m ≥ 1,0 mm,
- für Al- und Cu-Basislegierungen m ≥ 0,5 mm.

Bei Hirth- und ähnlichen Verzahnungen (**Bild 77**) sollten die nach der Mitte hin feiner werdenden Zähne an den Stellen ausgespart werden, an denen die Teilungen

- bei Fe-, Ni-, Co- und Ti-Basislegierungen t = 1,0 mm,
- bei Al- und Cu-Basislegierungen t = 0,5 mm

unterschreiten.

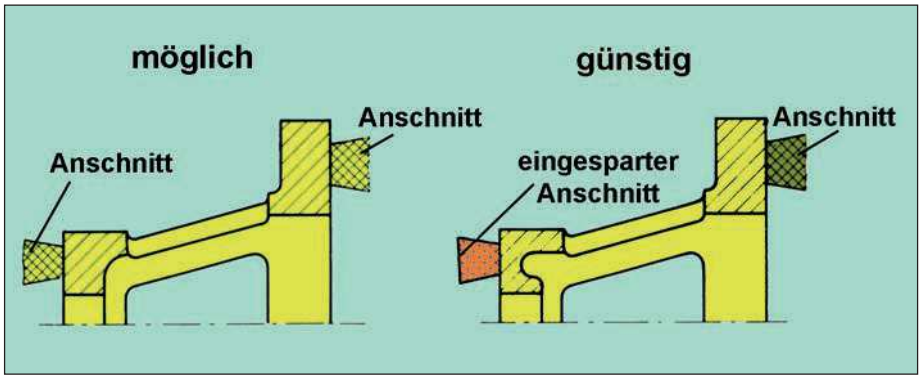


Bild 74: Einsparung eines Anschnitts über konstruktive Umgestaltung

Bild 75: Rastenzahnsegment mit fertig gegossenen Zähnen für den Steuerungsteil einer Baumaschine, Werkstoff: GX5CrNiMoNb18-10 (W.-Nr. 1.4581), Abmessungen: 60 x 60 x 18 mm, Gewicht: 93 g (Bild: Feinguss Blank, Riedlingen)

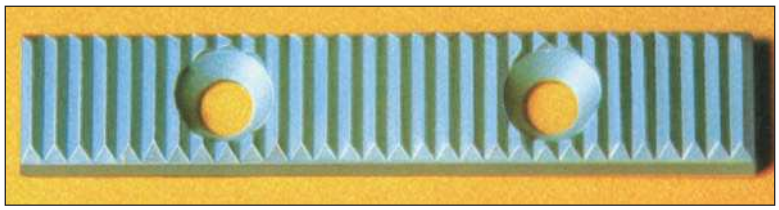


Bild 76: Klemmleiste mit fertig gegossenen Riffeln, Werkstoff G16CrMo4 (W.-Nr. 1.7242), Abmessungen: 54 x 10 x 2,5 mm, Gewicht: 8 g (oben) (Bild: ZGV)

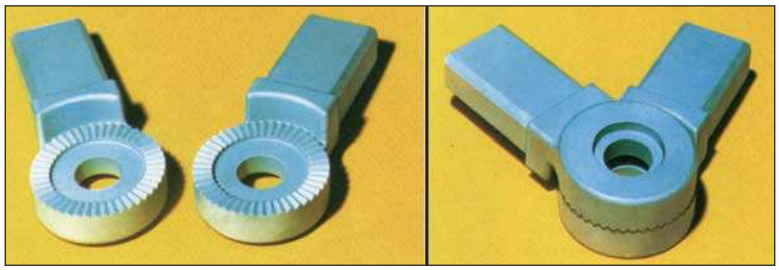


Bild 77: Zweiteiliges Gelenk mit fertig gegossener Hirth-Verzahnung für ein medizinisches Gerät, Werkstoff GX5CrNiNb18-9 (W.-Nr. 1.4552), Maße eines Elements 110 x 50 x 13 mm, Stückgewicht: 415 g (Bild: ZGV)

V. Gewinde

Gewinde werden nur dann mitgegossen, wenn die Feingusstoleranzen für die Steigung und das Profil ausreichen. Damit kommen praktisch nur folgende Sonderausführungen in Frage:

- Unterbrochene Gewinde (zum Beispiel für Bajonettverschlüsse und Schnellkupplungen) (**Bild 78**),
- Gewinde, deren Gegenstück aus Gummi, Kunststoff oder Ähnlichem besteht,
- Grobe Rund- und Trapezgewinde (**Bild 79**),
- Gewinde nicht oder kaum zerspanbarer Legierungen (Hier sollte jedoch stets geprüft werden, ob sie konstruktiv umgangen oder ein- beziehungsweise nachgeschliffen werden können!) (**Bild 80**).

Das Vorgießen von Gewindedurchmessern mit Schneidaufmaß ist bei Feinguss üblich, wobei für Innengewinde die Hinweise „Durchgehende Löcher und Kanäle“ (siehe Seite 34) zu beachten sind. Desgleichen werden Gewindebüchsen aus hitzebeständigem Edelstahl in Aluminium- und Kupfer-Basislegierungen eingegossen.

VI. Rändel und Riffeln

Rändeln, Riffeln und sogenannte „Fischhaut“ können mitgegossen werden (**Bilder 81 bis 82**). Für die Teilungen gelten

- bei Fe-, Ni-, Co- und Ti-Basislegierungen: t ≥ 0,8 mm,
- bei Al- und Cu-Basislegierungen: t ≥ 0,5 mm.

Die Spitzen weisen stets einen kleinen natürlichen Gießradius von etwa 0,1 mm auf.

Umlaufende Kreuzrändel erfordern einen unvertretbar hohen Aufwand im Werkzeug und sollten daher vermieden werden.

Bild 79: Verschluss für PKW-Schiebedach, für die Vorserie einteilig aus Vergütungsstahl feingegossen, Abmessungen: Dmr. 29 x 50 mm, Gewicht: 90 g (Bild: Buderus, Moers)

Bild 78: Melkmaschinengehäuse, Werkstoff GX5CrNiNb18-9 (W.-Nr. 1.4552), Abmessungen: Dmr. 84 x 47 mm, Gewicht: 520 g (Bild: Buderus, Moers)

BIld 80: Hüftschalen-Implantatteil aus Titan oder Ti-Basislegierung mit angegossenen Gewindesegmenten, Abmessungen: Dmr. 47 x 26 mm, Gewicht: 31 g (Bild: Tital, Bestwig)

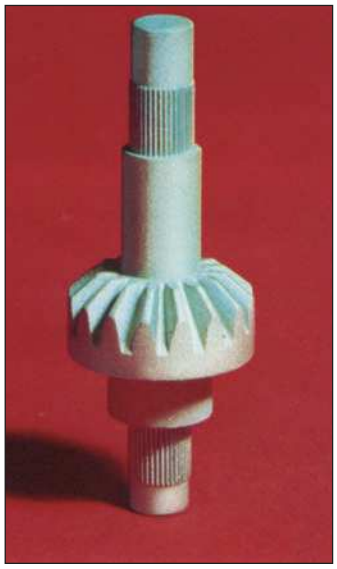


Bild 81: Baumaschinenteil mit vorgegossener Verzahnung und Rändelung, Werkstoff GX5CrNiMo-Nb18-10 (W.-Nr. 1.4581), Abmessungen: Dmr. 22 x Dmr. 9 x 59 mm, Gewicht: 44 g

Bild 82: Rändelhülse für Elektrowerkzeug aus G16MnCr5 (W.-Nr. 1.7131), Abmessungen: Dmr. 46/29 x 35 mm, Gewicht: 123 g (Beide Bilder: ZGV)

4.2.2 Innenkontur und Hinterschneidungen

Die hochentwickelte Kerntechnik des Feingießverfahrens bietet bei Innenkonturen und Hinterschneidungen vielfältige Möglichkeiten zum kostengünstigen Gestalten. So können oft mehrere Konstruktionselemente zu einem Teil „aus einem Guss“ zusammengefasst werden, womit aufwändige Passungsarbeiten und das Zusammenfügen samt Montageeinrichtungen eingespart werden. Es könnten Innenkonturen ausgebildet werden, die auf andere Weise nicht oder nur schwierig herzustellen sind. Hierfür werden Handeinlagen, Kernschieber und/oder Einlegekerne im Werkzeug verwendet. Auch können Modelle aus einzelnen Elementen zusammengebaut werden. Von den Möglichkeiten, die nachfolgend beschrieben werden, kommt in Abhängigkeit von der Bauteilgestalt die jeweils wirtschaftlichste zum Einsatz.

I. Kernschieber und Handeinlagen

Wenn es die darzustellende Kontur erlaubt, werden im Werkzeug Kernschieber und/oder Handeinlagen vorgesehen und wenn möglich, die Kernschieber automatisch entformt. Oft müssen sie jedoch von Hand gezogen werden, was besonders bei Gehäusen mit vielfach hinterschnittenen Innenkonturen erforderlich ist (siehe auch Kapitel 2.1). Können die Kernschieber durch Drehen entformt werden, so lassen sich auch kreisförmige Hinterschneidungen ausbilden (**Bild 83**).

Bild 83: Kurvenstück (rechts geschnitten) aus G16CrMo4 (W.-Nr. 1.7242), dessen Modelle mit Hilfe drehbarer Kernschieber hergestellt werden, Abmessungen: 40 x 18 x 14 mm, Gewicht 20 g (Bild: Feinguss Blank, Riedlingen)

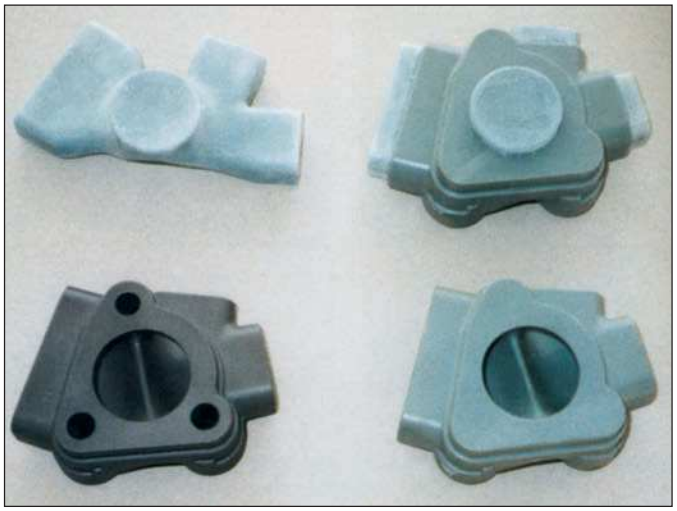


Bild 84: Feingussteil (unten links), dessen Innenraum am Wachsmodell (unten rechts) durch einen wasserlöslichen Kern (hellgrün) abgeformt wird (oben) (Bild: Schubert & Salzer, Lobenstein)

Bild 85: Gasturbinenschaufel (links) aus einer warmfesten Nickel-Basislegierung und Schnitt durch dieses Teil (Mitte), dessen schmale Kühlkanäle durch keramische Kerne (rechts) abgeformt werden, Abmessungen: 205 x 115 x 110 mm, Gewicht: 4,1 kg (Bild: Doncasters)

II. Wasserlösliche Kerne

Für nicht zu enge Innenkonturen können wasserlösliche Kerne verwendet werden, für die allerdings je ein weiteres Werkzeug benötigt wird. Sie werden in das Modellwerkzeug eingelegt und mit dem nicht wasserlöslichen Modellwerkstoff umspritzt. Wird der Kern dann im Wasserbad herausgelöst, entsteht die gewünschte Innenkontur. Diese Art der Kerntechnik wird unter anderem bei Hydraulikteilen angewendet (**Bild 84**).Voraussetzung ist, dass die entstandenen Hohlräume beim Aufbringen der keramischen Schalenform ordnungsgemäß ausgefüllt werden können.

III. Keramische Kerne

Für enge und/oder kompliziert gestaltete, hinterschnittene Gussteilhohlräume, die vom keramischen Formstoff bei der Formherstellung nicht erreicht oder ausgefüllt werden können, kommen keramische Kerne zum Einsatz. Sie werden fertig gebrannt in das Werkzeug eingelegt und verbleiben im Gegensatz zu den wasserlöslichen Kernen bis nach dem Abguss in der Gießform.

Keramische Kerne sind für den Feingießer Zulieferteile, die meist lange Lieferzeiten haben. Dies ist bei der Terminplanung zu berücksichtigen. Obwohl sie hohen Aufwand bedingen, rechtfertigt das damit Erreichte die höheren Kosten. So sind die Innenkonturen von Triebwerkschaufeln (**Bild 85**) gar nicht anders herzustellen.

IV. Kombinierte Kerntechnik

Bei Gussteilen mit vielgestaltigen Innenkonturen und Hinterschneidungen werden mehrere Kerntechniken gleichzeitig angewendet. Ein Beispiel mit keramischen und wasserlöslichen Kernen ist im **Bild 86** zu sehen.

V. Zusammengesetzte Modelle

In anderen Fällen bietet sich das Zusammensetzen von Modellteilen an. Mit Hilfe von Passmarken werden sie exakt zusammengefügt und verbunden, wodurch die hinterschnittenen Konturen entstehen, wie beim Leitring im **Bild 87**. Diese Art zu verfahren ist oft auch wirtschaftlich, wenn symmetrische Modelle aus zwei oder mehreren gleichen Modellteilen zusammengesetzt werden können, weil nur ein (Teil-)Werkzeug benötigt wird.

VI. Gekrümmte Kanäle

Können gekrümmte Kanäle konstruktiv so gestaltet werden, dass sie mit Kernschiebern im Werkzeug herzustellen sind, so ist dies besonders wirtschaftlich.

In allen anderen Fällen müssen wasserlösliche oder keramische Kerne verwendet werden, wofür jeweils ein Werkzeug für ihre Herstellung benötigt wird (**Bilder 88** und **89**).

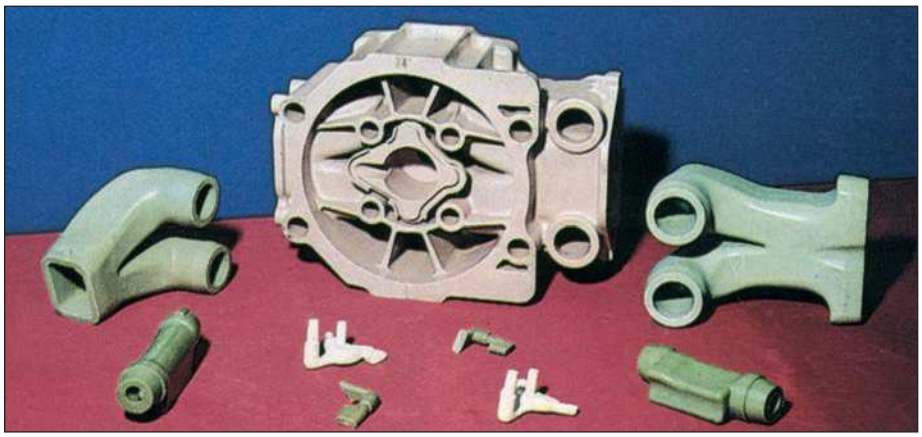


Bild 86: Zylinderkopf für einen Dieselmotor aus CrMo-legiertem Vergütungsstahlguss (Mitte), dessen Ausschmelzmodell mit Hilfe von wasserlöslichen (grün) und keramischen (weiß) Kernen hergestellt wurde. (Bild: ZGV)

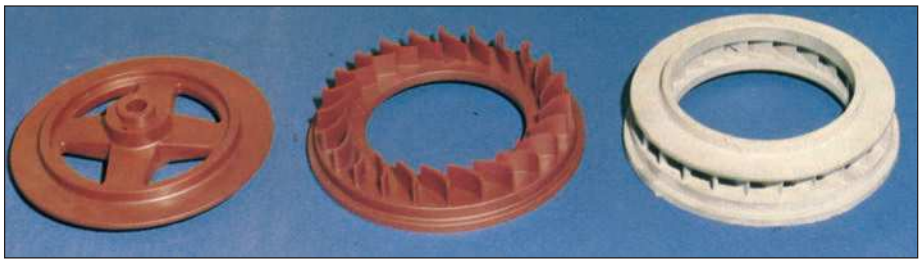


Bild 87: Zweiteiliges Ausschmelzmodell (links und Mitte) für einen Turbinenlaufring (rechts) aus einem hitzebeständigen hoch legierten Edelstahl, Abmessungen: Dmr. 230 x 58 mm, Gewicht: 3150 g (Bild: Buderus, Moers)

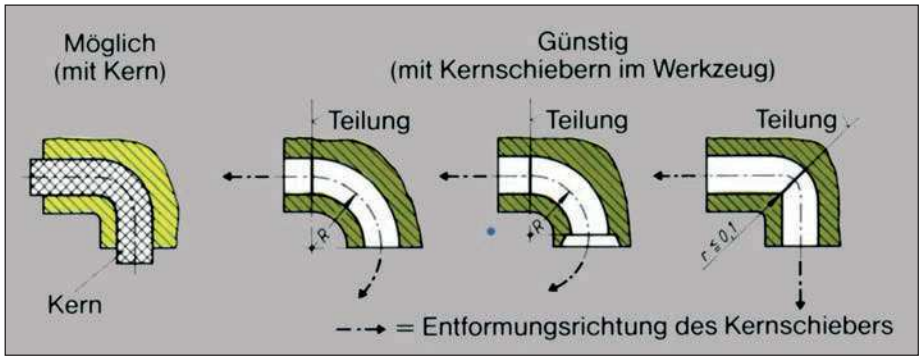


Bild 88: Verschiedene Möglichkeiten zum Gestalten von gekrümmten Kanälen bei feingegossenen Gussteilen

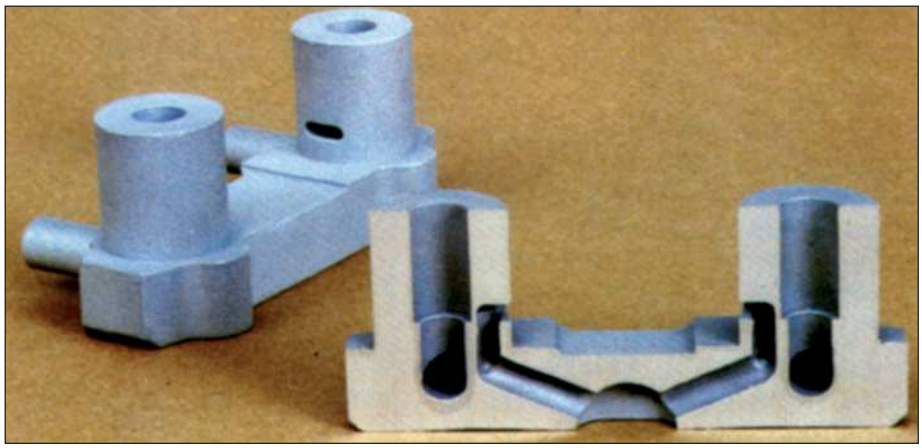


Bild 89: Ansicht und Schnitt durch einen Saugkörper für ein hydraulisches Aggregat aus dem Werkstoff EN-AC-AlSi7Mg0,3 (W.-Nr. EN AC-42100), Abmessungen: 77 x 35 x 34 mm, Gewicht: 70 g, dessen eng dimensionierte Innenkonturen mit einem keramischen Kern ausgebildet werden. (Bild: Feinguss Blank, Riedlingen)

Bild 90: Bandklammerwerkzeug für eine Verpackungsmaschine, Werkstoff G15CrNi6 (W.-Nr. 1.5919), Abmessungen: 35 x 47 x 68 mm, Gewicht: 300 g (Einteilig feingegossen (rechts) sind die Herstellkosten gegenüber früherer Fügekonstruktion (links) um 72 % niedriger!) (Bild: ZGV)

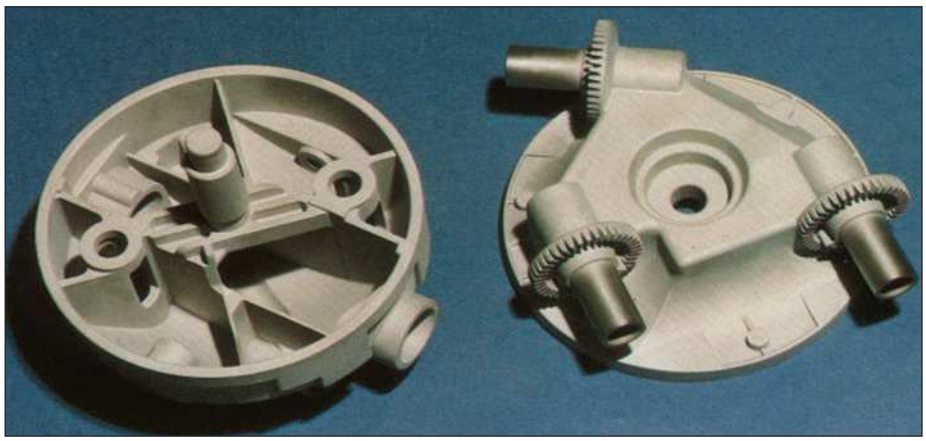


Bild 91: Gehäuseober- und -unterteil, rechts mit drei eingegossenen, feingegossenen Gewindebüchsen aus GX 40CrNiSi25-20, (W.-Nr. 1.4848), Werkstoff: EN-AC-AlSi7Mg0,3 (W.-Nr. EN AC-42100), Abmessungen: Dmr. 165 x 155 bzw. 70 mm, Gewicht: 715 bzw. 800 g (Bild: Zollern; Soest)

4.2.3 Funktions- und beanspruchungsgerechte Gussteilgestaltung

Oft besteht die Möglichkeit, wegen des großen Gestaltungsfreiraumes beim Feinguss, mehrere bisher gefügte Teile wirtschaftlich zu einem Gussteil zusammenzufassen. Bezüglich der Ausführung der Gusskonstruktion müssen dabei bestimmte Regeln beachtet werden, die nachfolgend beschrieben werden.

I. Integralgussausführung

Werden mehrere Konstruktionselemente, die bisher beispielsweise durch Schweißen, Schrauben und Löten zusammengefügt werden mussten, zu einem Feingussteil zusammengefasst, so entsteht ein Integralgussteil aus einem Guss (**Bild 90**). Das erhöht nicht nur die Funktionssicherheit, zum Beispiel, wenn Schwingungen auftreten, sondern ist auch noch besonders wirtschaftlich, da Werkzeugkosten und Bearbeitungskosten reduziert werden können.

Mit dem Umstellen einer mehrteiligen Montage- in eine einteilige Feingusskonstruktion ist gleichzeitig die Möglichkeit gegeben, einen wesentlich besser geeigneten, aber teureren Werkstoff zu verwenden und dennoch einen Kostenvorteil zu erreichen.

II. Eingießteile

Das Eingießen von Teilen erfolgt üblicherweise so, dass Teile aus höher schmelzenden Metallen mit Metall niedrigeren Schmelzpunktes umgossen werden, das beim Erkalten aufschrumpft (**Bild 91**). Die Eingießteile müssen wie folgt beschaffen sein:

- sie müssen (verfahrens- und gusslegierungsbedingt) aus hitzebeständigen Werkstoffen bestehen,
- sie müssen sich im Werkzeug und in der Formkeramik arretieren lassen,
- sie müssen so gestaltet sein, dass sich das um sie herum fließende Metall mit ihnen formschlüssig verbindet.

III. Kerbwirkungen

Nicht nur der Konstrukteur ist bestrebt, Kerbwirkungen zu vermeiden, sondern auch der Feingießer, denn scharfe Kerben (Aufheizkanten) stören beim Gießen (**Bild 92**). Ein mit möglichst großen Radien versehenes Gussteil weist im Kraftfluss geringere Spannungsgefälle auf und wird dadurch funktionssicherer.

Die Feingussoberfläche weist die gleiche Kerbunempfindlichkeit auf wie eine feinstbearbeitete Fläche.

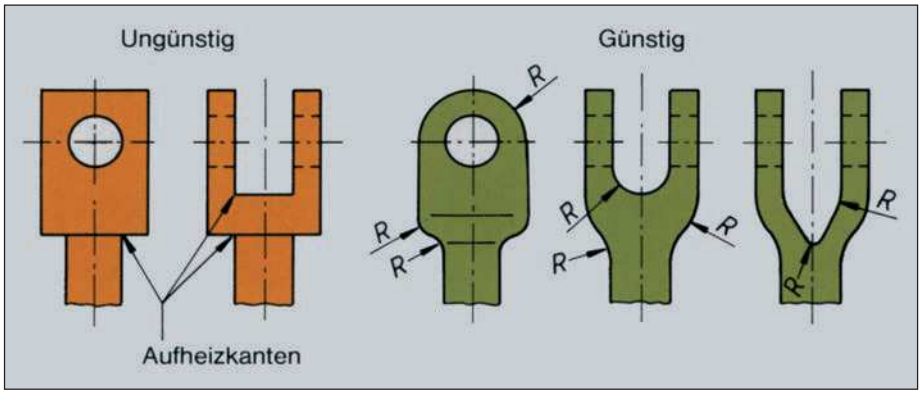


Bild 92: Feingießgerechte verrundete Gestaltung einer Gabel zur Vermeidung von Aufheizkanten

Bild 94: Elektronikgehäuse aus dem Werkstoff EN AC-AlSi7Mg0,3 wa (W.-Nr. EN AC-42100) mit Außen- und Innenverrippung für Leiterplattenführungen, Maße 330 x 280 x 240 mm, Gewicht 5400 g (Bild: Zollern, Soest)

Tabelle 4: Möglichkeiten zur Vermeidung von überhöhten Beanspruchungen eines Feingießteils

Zu hohe mechanische Beanspruchung	Wahl eines Werkstoffs höherer Festigkeit
Zu hoher Verschleiß	Härten (zum Beispiel Nitrieren, Einsatzhärten) oder Wahl eines verschleißbeständigen Werkstoffs oder einer geeigneten Beschichtung
„Fressen"	Wahl eines Werkstoffs mit Notlaufeigenschaften oder einer anderen Werkstoffpaarung
"Kriechen"	Wahl eines kriechfesten Werkstoffs
Unerwarteter korrosiver Angriff (zum Beispiel in den Tropen)	Wahl eines nichtrostenden, korrosions- oder säurebeständigen Werkstoffs
Auftreten zu hoher oder zu niedriger Temperaturen	Wahl eines hitzebeständigen, warmfesten oder kaltzähen Werkstoffs
Auftreten „harter" Strahlung	Wahl eines Co- und Ta-armen Werkstoffs
Zu hohe elektromagnetische Beanspruchung	Wahl eines weichmagnetischen Stahls oder eines nichtmagnetisierbaren Werkstoffs

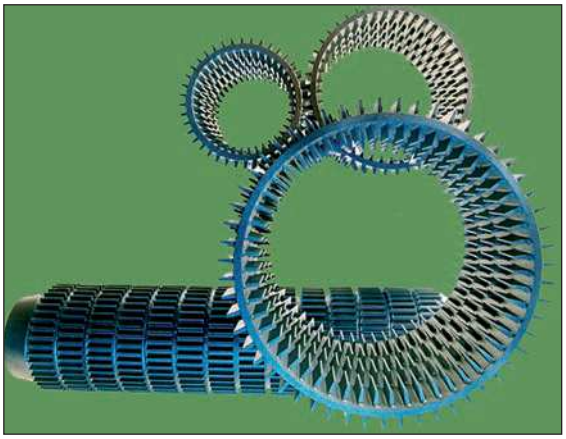


Bild 95: Feingegossene Rekuperatoren für Industrieöfen mit sehr dünner Verrippung aus hochhitzebeständigen Stählen und Nickellegierungen, die entsprechend ihrer Beständigkeit gegen die Prozessmedien zum Einsatz kommen (Bild: Dörrenberg, Engelskirchen)

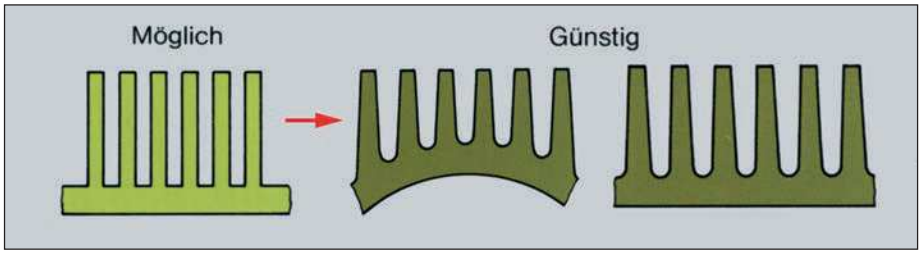


Bild 93: Feingießgerecht günstige Rippengestaltung mit nach außen abnehmenden Rippenabmessungen

IV. Höhere Beanspruchung

Bei Neu- und Weiterentwicklungen kommt es immer wieder vor, dass die später auftretenden Beanspruchungen noch nicht genau bekannt oder höher sind als erwartet. Dann ist es meist ohne weiteres möglich, einen besser geeigneten Werkstoff zu vergießen, ohne dass das Werkzeug für die Herstellung der Modelle geändert werden muss. Zudem bestehen in vielen Fällen Möglichkeiten der gezielten Eigenschaftsverbesserung durch Wärmebehandlung und/oder Beschichtungen. In solchen und ähnlichen Fällen sollte der Feingießer ebenfalls um seinen sachkundigen Rat befragt werden (**Tabelle 4**). Vielfach gehören diese Aufgaben mit zum Leistungsangebot der Feingießerei oder werden in Kooperation mit betreffenden Partnern realisiert.

V. Kühlrippen

Kühlrippen sollten nach außen abnehmende Querschnitte aufweisen: dies verbessert nicht nur die Gießbarkeit, sondern auch den Wärmefluss (**Bild 93**).

Zudem können Verrippungen auch funktionelle Aufgaben haben, die sich im Feinguss bereits in vielen Fällen gießtechnisch realisieren lassen (**Bild 94** bis **96**).

4.2.4 Feingießgerechte Gestaltung

Lunker (gießbedingte Einfallstellen) entstehen beim Erstarren flüssiger Metalle naturgesetzlich nach den Regeln der Erstarrungsschrumpfung bei der Abkühlung. Die Aufgabe des Gießers besteht darin, sie durch geeignete Maßnahmen aus dem Gussteil heraus in die Anschnitte zu verlegen, die abgetrennt werden. Aus Kostengründen kommt es vor, dass der Feingussbezieher auch definierte Lunker zulässt, weil sie entweder an unkritischen Stellen auftreten oder durch nachfolgendes spanendes Bearbeiten entfernt werden. Das ist jedoch mit dem Feingießer ausdrücklich zu vereinbaren.

Bild 96: Gießtechnisch problemlos möglich, Rippenunterbrechungen

Das „ideale Gussteil“ ist dadurch gekennzeichnet, dass seine Querschnitte vom Anschnitt nach den entfernteren Partien abnehmen, so dass die Erstarrung in umgekehrter Richtung zum Anschnitt erfolgen kann. Dem idealen Gussteil nahe kommen solche, die annähernd gleiche Wanddicken aufweisen und dem Gießer die Möglichkeit bieten, sie gießgerecht „anzuschneiden“ (**Bild 97**). Die sich hieraus ergebenden gießtechnischen und feingussspezifischen Konstruktionshinweise sind nachfolgend dargelegt.

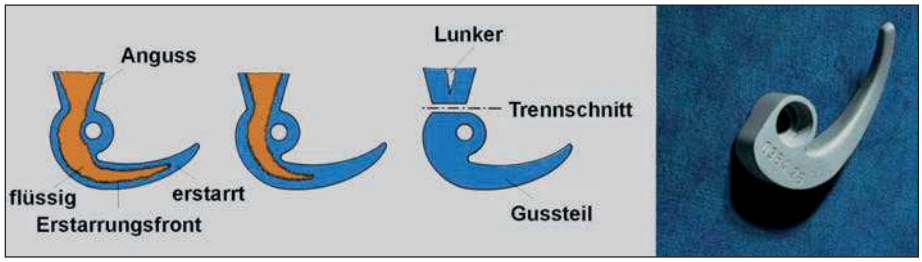


Bild 97: Drillhaken für den Drahtbinder einer Heu- und Stroh-Hochdruckpresse, mit dem Stahldraht von 2 mm Dmr. verdrillt wird, Werkstoff: Vergütungsstahlguss, Länge: 80 mm

I. Scharfe Innenkanten

Scharfe Innenkanten und Kerben sind ungünstig beim Gießen, da sie wie „Aufheizkanten“ wirken und es dadurch zu Porositäten kommen kann. Es ist deshalb erforderlich, Radien und/oder Hohlkehlen vorzusehen. Sie sollten etwa 20 % der Wanddicke, bei dünnwandigen Teilen mindestens 0,3 bis 0,5 mm ausmachen. (**Bild 98**).

II. Knotenpunkte

Knotenpunkte sollten so gestaltet werden, dass keine scharfen Innenkanten und Materialanhäufungen entstehen. Deshalb sind auch schräg und parallel zueinander stehende Wände möglichst rechtwinklig miteinander zu verbinden (**Bild 99**).

III. Anschnitte

Für die Anschnitte sollte möglichst je eine geeignete ebene Außenfläche am dicksten Querschnitt vorgesehen sein, um sie später kostengünstig entfernen zu können. Diese Anschnittflächen können nicht als Mess- oder Bezugspunkte für nachfolgendes Bearbeiten dienen (**Bild 100** und **101**).

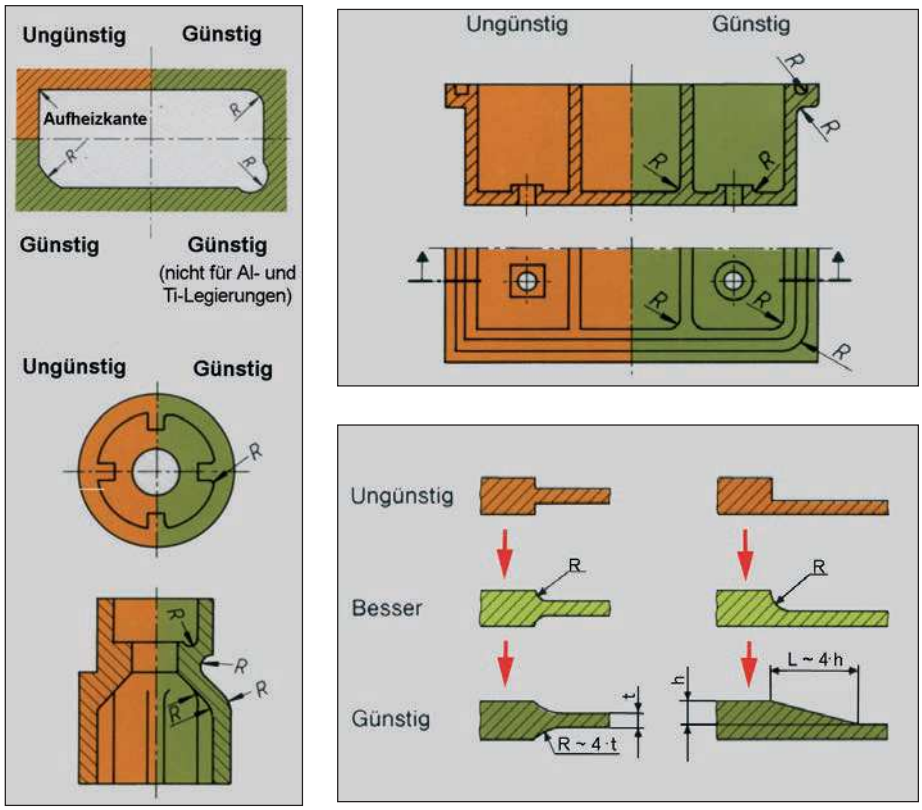


Bild 98: Möglichkeiten zur Vermeidung scharfer Innen- und Außenkanten

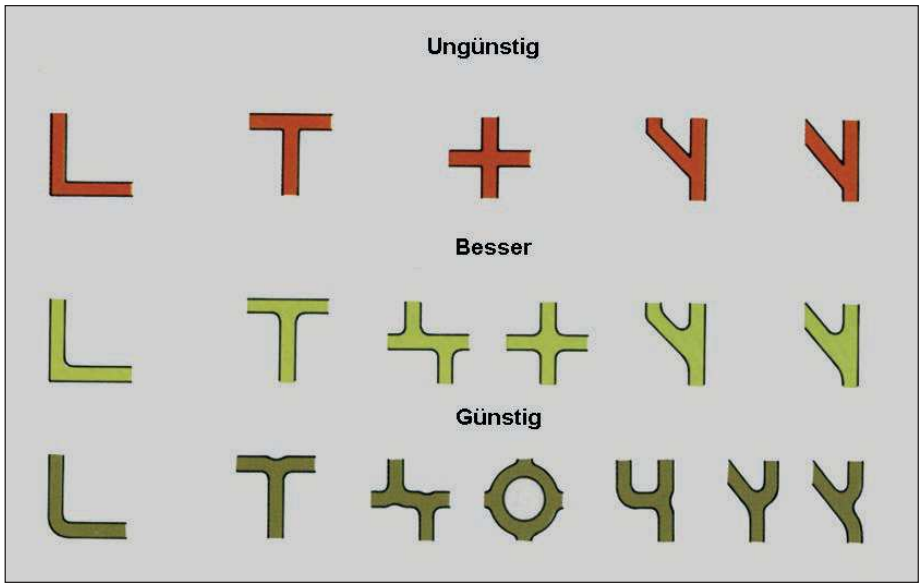


Bild 99: Gießtechnisch mögliche, günstige und ungünstige Formen der Knotengestaltung bei Feingussteilen

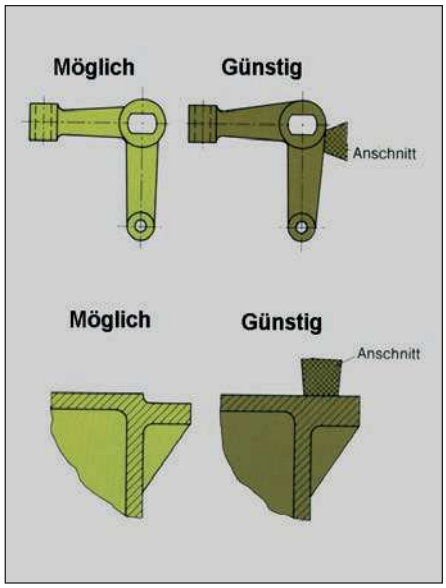


Bild 100: Konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten von Anschnittflächen

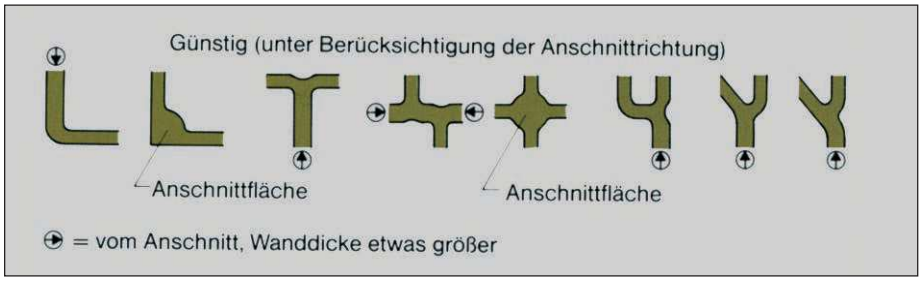


Bild 101: Konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten von Feingussteilen unter Berücksichtigung der Anschnittrichtung

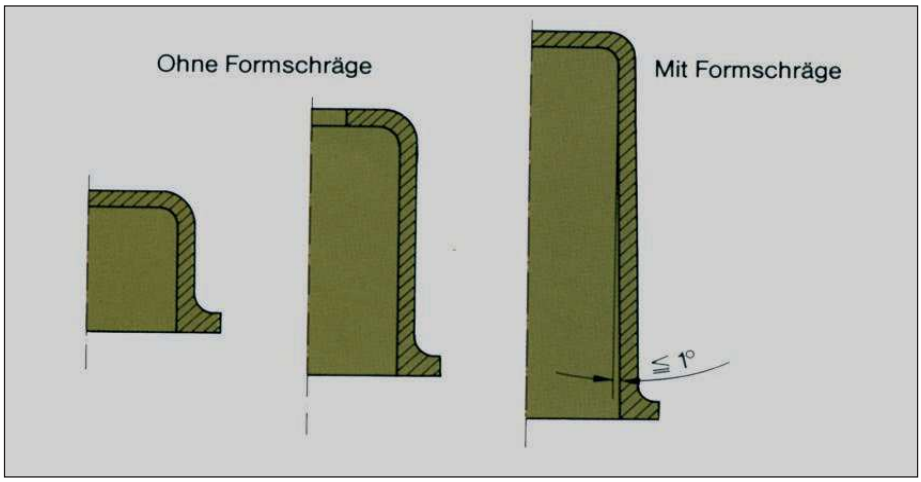


Bild 102: Aushebeschrägen sind bei Feinguss nur bei extrem langen Konturen erforderlich.

Tabelle 5: Richtwerte für das Vorgießen von Löchern und Kanälen (links) und Schlitzen (rechts) beim Feingießverfahren (nach VDG-Merkblatt P 690)

Löcher und Kanäle			Schlitze u. ä.		
Ø bzw. □ o. ä.	größte Länge bzw. Tiefe		Breite	größte Tiefe	
	durchgehend	Sackloch		offen	geschlossen
d [mm]	L	t	b [mm]	l	t
≥ 2 bis 4	1 x d	0,6 x d	≥ 2 bis 4	1 x b	1,0 x b
> 4 bis 6	2 x d	1,0 x d	> 4 bis 6	2 x b	
> 6 bis 10	3 x d	1,6 x d	> 6 bis 10	3 x b	1,6 x b
> 10	4 x d	2,0 x d	> 10	4 x b	2,0 x b

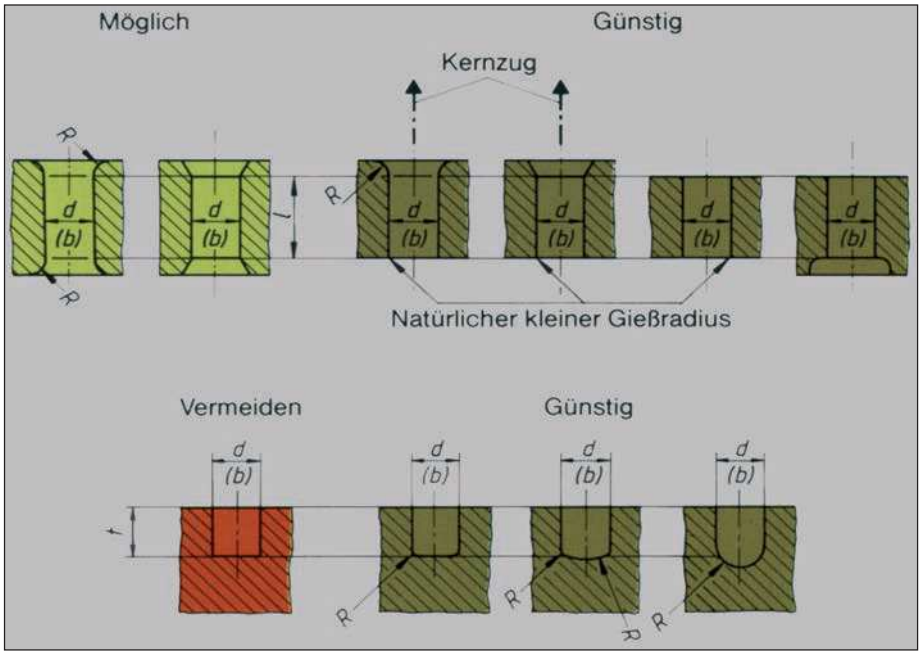


Bild 103: Gestaltungsmöglichkeiten für Durchgangs- (oben) und Sacklochbohrungen (unten) bei Feingusserzeugnissen

IV. Form- und Aushebeschrägen

Form- und Aushebeschrägen sind nur in Ausnahmefällen erforderlich. Nur bei sehr langen Innenkonturen oder ähnlichen Gussteilbereichen ist eine geringe Konizität beziehungsweise Schräge vorzusehen (**Bild 102**).

V. Löcher und Schlitze

Durchgehende und geschlossene Löcher, Kanäle und Schlitze sind dann besonders wirtschaftlich mitzugießen, wenn dies ohne keramische Kerne erfolgen kann, dazu sind die im **VDG-Merkblatt P 690** genannten Werte einzuhalten.

Werden durchgehende Löcher und Schlitze so gestaltet, dass sie mit einem ungeteilten Kernschieber ausgebildet werden können, so ist dies vorteilhaft. Sacklöcher und geschlossene Schlitze sind unten auszurunden (**Bilder 103** bis **105**). Bei Al- und Ti-Legierungen sind Sacklöcher zu vermeiden. Um Schlitze ohne keramische Kerne ausbilden zu können, ist das Verhältnis b : t beziehungsweise b : l nach **Tabelle 5** einzuhalten. Das Maß S kann beliebig gewählt werden.

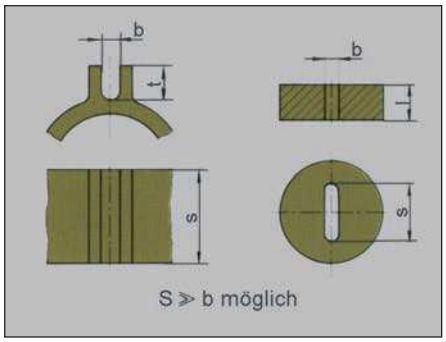


Bild 104: Ausführungen für einen offenen (links) und geschlossenen Schlitz (rechts) bei Feingussteilen

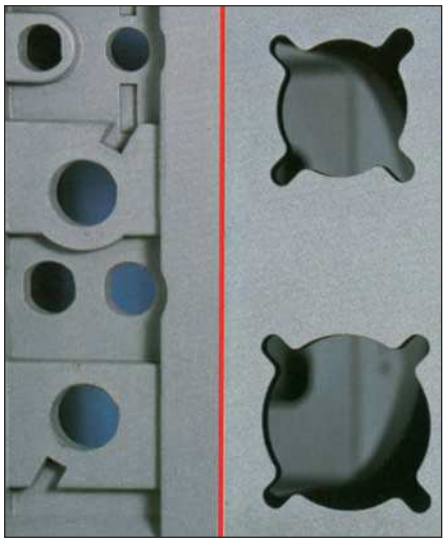


Bild 105: Vorgegossene Indexlöcherr (links) und Steckerdurchbrüche an einem Elektronikgehäuse aus Al-Feinguss (rechts)

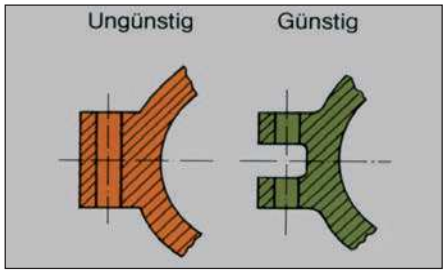


Bild 106: Gießtechnisch günstige Gestaltung eines Flansches

Oft ist es mit konstruktiven Maßnahmen leicht möglich, eine wirtschaftliche und fertigungstechnisch günstige Gussteilgestalt zu erreichen, wie die Beispiele in den **Bildern 106** bis **108** zeigen. Die Vereinheitlichung der Wanddicken und Vermeidung von Masseanhäufungen sind nicht nur gießtechnisch günstig, sondern führen auch zu einer leichteren Gusskonstruktion.

VI. Ebene Flächen

Relativ große ebene Flächen sind zwar zu gießen, sollten jedoch vermieden werden, weil sie nur mit höherem Aufwand auszuführen sind. Sie sollten deshalb „gegliedert", also verrippt, ausgespart oder durchbrochen werden. Das erleichtert das Gießen, erhöht bei entsprechender Ausführung die Gestaltfestigkeit des Bauteils und vermindert oft das Gewicht (**Bild 109** bis **111**).

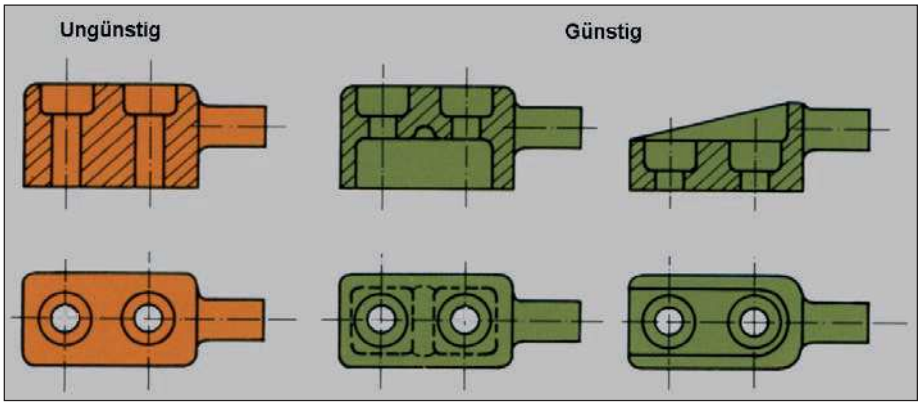


Bild 107: Mögliche Lösungen für die konstruktive Beseitigung von Masseanhäufungen bei Feingussteilen

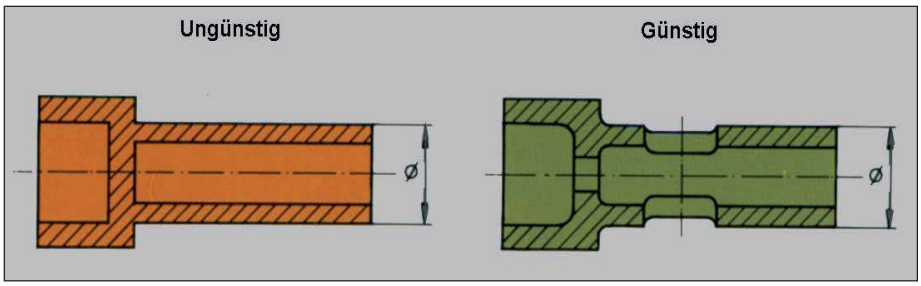


Bild 108: Gießtechnisch günstige Gestaltung eines Hohlzylinderteil

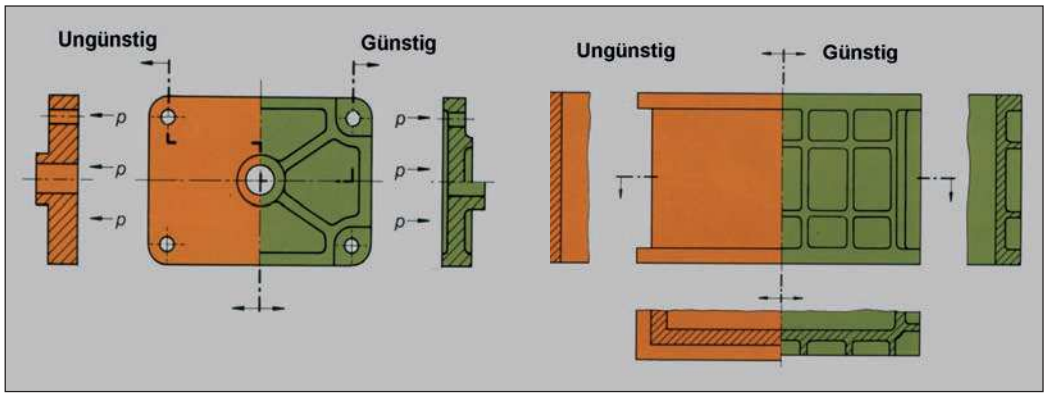


Bild 109: Möglichkeiten für Masseeinsparung durch gießtechnisch günstige Verrippung
links: Diagonalverrippung rechts: Querverrippung

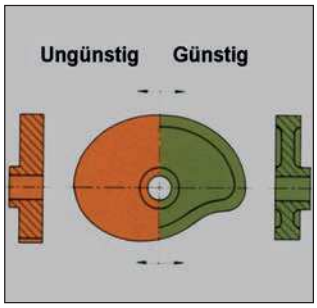


Bild 110: Materialsparende Konstruktion durch zweiseitige Verrippung des Gussteils

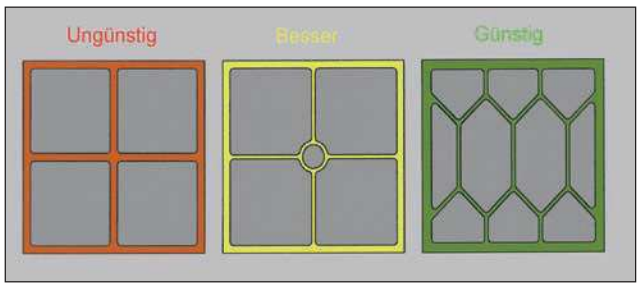


Bild 111: Aus gießtechnischer Sicht ist die Wabenverrippung die beste Lösung

Bild 112: Diverse Turbinenräder, bei denen die dünnen Flügel im Feinguss mitgegossen wurden (Bild: Zollern, Sigmaringen)

VII. Mindest-Wanddicken

Die Mindest-Wanddicken sollten üblicherweise etwa 1,5 bis 2 mm betragen. Die Gießbarkeit von Wänden geringerer Dicke ist abhängig von ihrer Größe und dem Gusswerkstoff. Ferner ist von Einfluss, in welchem Umfang die betreffende Fläche mit Partien dickeren Querschnitts verbunden oder ob sie verrippt ist. So sind für partielle Flächen folgende Wanddicken s möglich:

- mit Fe-, Ni-, Co- und Ti-Basis-Legierungen s = 0,8 bis 1,0 mm,
- mit Al- und Cu-Basis-Legierungen s = 0,8 mm.

Das Gießen solch geringer Wanddicken erfordert einen erhöhten Aufwand. Es sollte deshalb rechtzeitig eine Abstimmung mit dem Feingießer erfolgen (**Bilder 112** und **113**).

VIII. Messerkanten am Gussteil

Messer- und scharfe Kanten können wegen der Oberflächenspannung flüssiger Metalle nicht gegossen werden. Sie müssen deshalb ein Aufmaß erhalten und spanend fertig bearbeitet werden (**Bild 114**).

IX. Messerkanten im Werkzeug

Würden im Werkzeug oder am Kernschieber Messerkanten entstehen, beispielsweise weil Bohrungen unterschiedlichen Durchmessers tangential aufeinanderstoßen, dann müssen für diese Werkstückbereiche wasserlösliche oder keramische Kerne verwendet werden. Sind solche Querschnittsübergänge jedoch funktionsbedingt nicht erforderlich, so erlaubt oft eine leicht geänderte Konstruktion, Kernschieber zu verwenden, was besonders wirtschaftlich ist (**Bild 115**).

4.2.5 Bearbeitungsgerechte Gestaltung

Feingussteile werden oft einbaufertig gegossen. Wenn das wegen zu enger Toleranzen nicht möglich ist, müssen sie spanend fertig bearbeitet werden. Sachgemäßes Konstruieren erleichtert das Bearbeiten, vermindert damit den Aufwand und erhöht die Wirtschaftlichkeit. Vor- und Endbearbeitung sowie Montageleistungen gehören heute zum Leistungsangebot der Feingießereien.

Folgende Aspekte sind aus Sicht der spanenden Bearbeitung von Gussteilen zu berücksichtigen:

I. Freistiche

Freistiche sollten so gestaltet werden, dass ein wasserlöslicher oder keramischer Kern nicht erforderlich wird. Hierbei ist die Entformungsrichtung in der Modellspritzmaschine zu beachten, das heißt, der Freistich bestimmt die Entformungsrichtung, wie aus der Graphik im **Bild 116** hervorgeht.

Bild 113: Modellturbinen für Modellflugzeuge (links) aus GNiCr13Al6MoNb, Gewicht: 220 g, die mit extrem dünnen Wanddicken im Feinguss gefertigt wurden (Bild: Zollern, Sigmaringen)

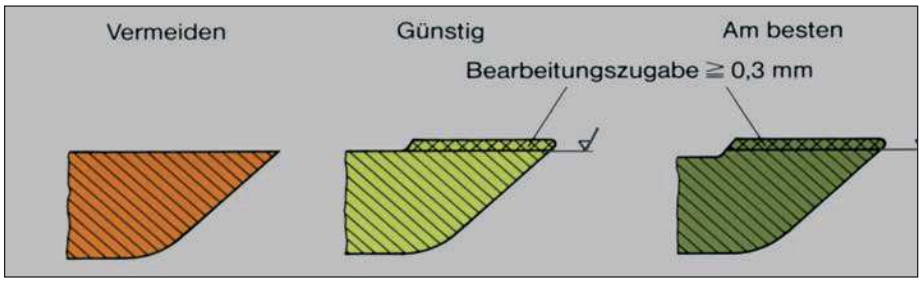


Bild 114: Möglichkeiten zur spanenden Fertigung von scharfen Kanten an Feingussteilen

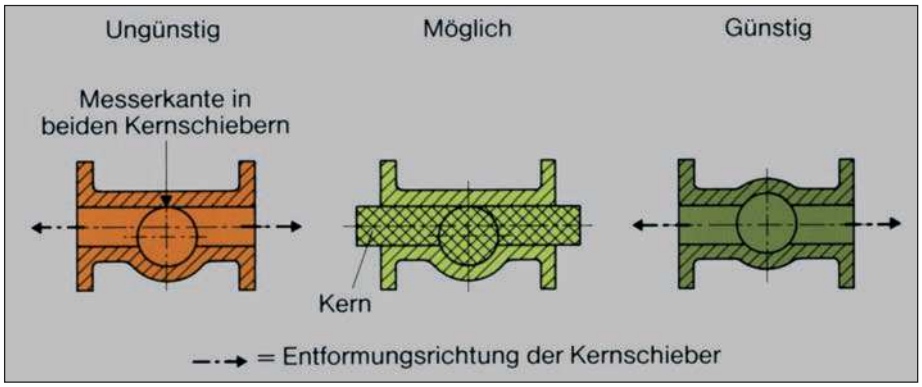


Bild 115: Möglichkeiten zur Vermeidung von Messerkanten im Formwerkzeug

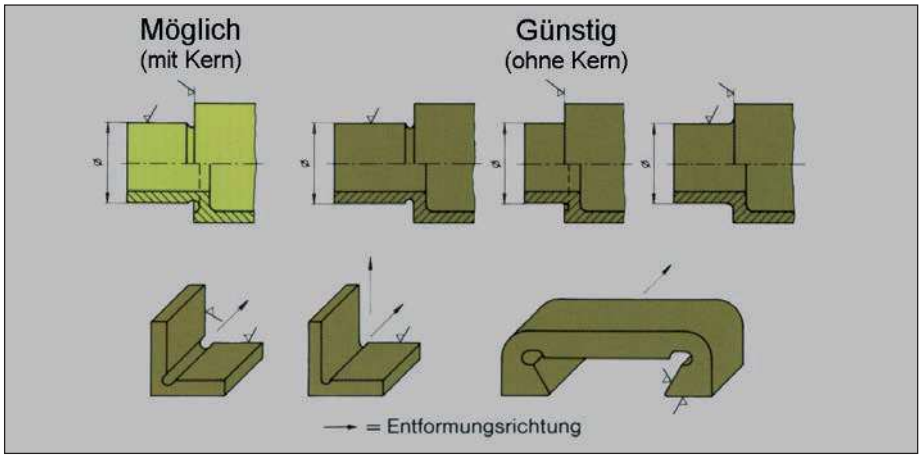


Bild 116: Gestaltungsmöglichkeiten von Freistichen an Feingussteilen
oben: umlaufende Freistiche unten: gerade Freistiche

II. Aussparungen

Wenn es die Bauteilfunktion erlaubt, sind zu bearbeitende Flächen auszusparen, um den Bearbeitungsaufwand (und das Gewicht) zu vermindern (**Bild 117**).

III. Montagegerecht

Sechs-, Vier- und Mehrkanten für Ring- und Maulschlüssel, Nuten für Hakenschlüssel und Ähnliches werden fertig an- und eingegossen. Die Feingusstoleranzen entsprechen denjenigen der Werkzeuge.

IV. Beschriftungen

Eingegossene Firmenzeichen, Ersatzteilnummern, Arretierungen, Lage- und Durchflussmarkierungen sowie sonstige Kennzeichen sparen Montage- und Nebenzeiten und vermeiden Irrtümer beim Auswechseln und Nachbestellen von Ersatzteilen.

Die Art der Schrift beziehungsweise des Kennzeichens hängt aus Gründen der Wirtschaftlichkeit vom Werkzeugwerkstoff ab und ist vertieft bei Weichmetall-, erhaben bei Al- und Stahlwerkzeugen. Ist Letzteres aus Funktionsgründen nicht möglich, sollte das Schriftfeld vertieft und die Schrift erhaben sein. Dies zeigen die nebenstehenden Bilder, die jeweils für das Gussteil gelten (**Bilder 117** und **118**).

Ebenfalls aus Kostengründen sollte die Beschriftung möglichst parallel zur Teilungsebene des Werkzeugs liegen. In Zweifelsfällen genügt ein Vermerk auf der Anfrage oder Zeichnung, an welchen Stellen das Schriftfeld angebracht werden kann (**Bild 119**).

Für die Nennhöhe der Schriften gilt:

- h ≥ 2,5 mm bei Fe-, Ni-, Co- und Ti-Basislegierungen,
- h ≥ 2,0 mm bei Al- und Cu-Basislegierungen.

V. Formschönheit

Jede durchdachte und ausgereifte Konstruktion wird formschön oder sogar elegant wirken, und zwar nicht nur im ästhetischen, sondern vor allem im technischen Sinne. Funktion und Form bilden hier eine natürliche, harmonische Einheit. Wie kein anderes Fertigungsverfahren bietet Feingießen aufgrund seiner vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten und seiner guten Oberflächenbeschaffenheit die notwendigen Voraussetzungen, dies zu erreichen. Das ist für viele Fertigerzeugnisse zusätzlich ein wichtiges Verkaufsargument.

Weitere Ausführungen zum gießgerechten Gestalten von Gussteilen sind in [17 bis 19] enthalten, die bei der Zentrale für Gussverwendung in Düsseldorf bezogen werden können.

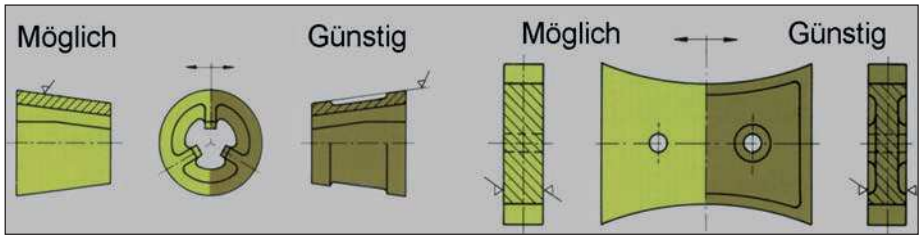


Bild 117: Aussparungen gehören zu den Vorzügen des sehr großen Gestaltungsfreiraumes beim Feingießen

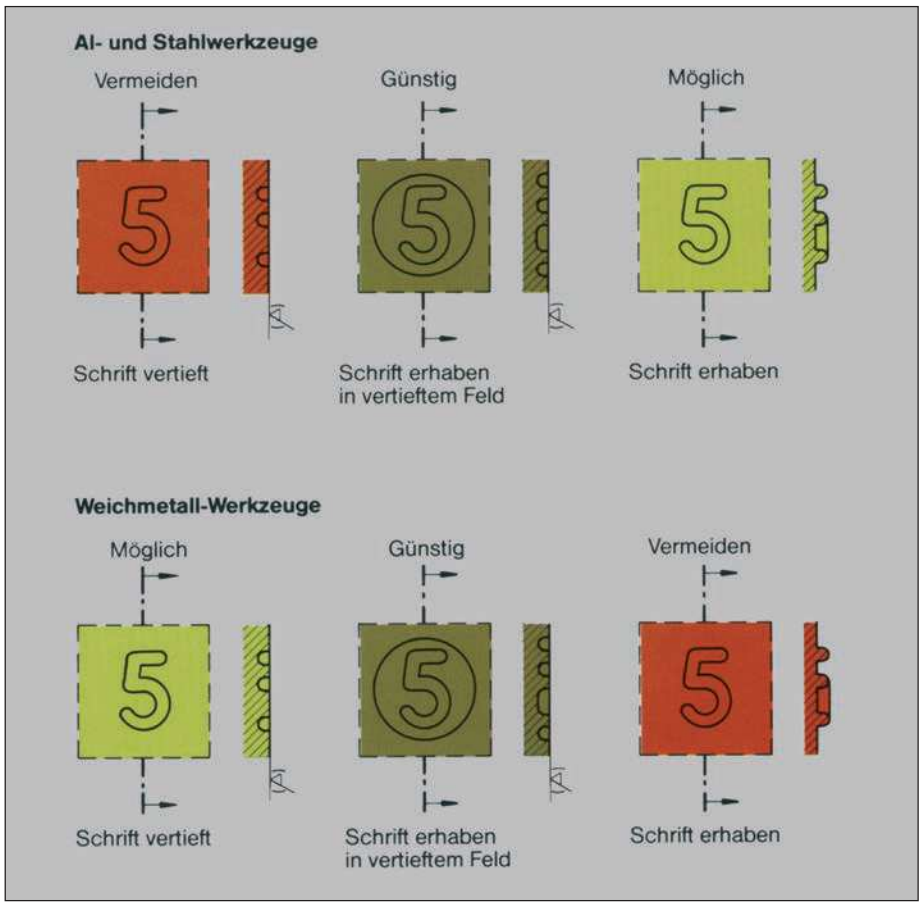


Bild 118: Mögliche vorgießbare Beschriftungsarten bei Feingussteilen in Abhängigkeit von der Art des Werkzeuges
oben: für Aluminium- und Stahlgusswerkzeuge
unten: für Weichmetallwerkzeuge

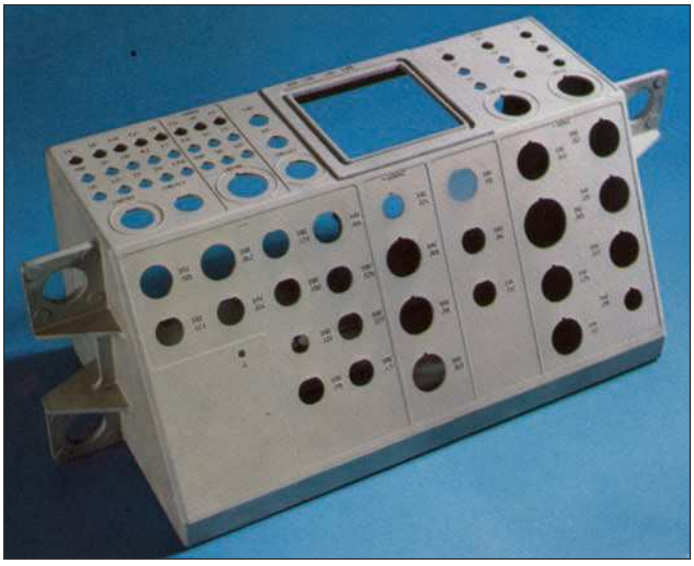


Bild 119: Elektronisches Steuergehäuse bei dem sämtliche Beschriftungen am Feingussteil angegossen wurden, Werkstoff: EN AC-AlSi7Mg0,3 wa, (W.-Nr. EN AC-42100) Abmessungen: 720 x 310 x 265 mm, Gewicht: 6,3 kg (Bild: Zollern, Soest)

4.3 Computergestütztes Gestalten

Zunehmender Zeit- und Kostendruck in der Bauteilentwicklung und der hohe Entwicklungsstand der CAE-Techniken haben dazu geführt, dass der Bauteilentwicklungsprozess zunehmend über CAD-Daten-Modelle abgewickelt wird. Die Feingießereien unterstützen ihre Kunden bei der Bauteilerstellung mit ihren gießspezifischen und ihrem verfahrensspezifischen Wissen, was beim Feingießen einen besonderen Einfluss ausübt. Die Gießereien sind so neben der gießtechnischen Aufbereitung der üblichen Zeichnungsunterlagen auch in der Lage, mit 3D-CAD-Modellen zu arbeiten, was bei der Nutzung von Rapid-Prototyping-Techniken sogar zwingende Voraussetzung ist, denn die dort genutzten generativen Fertigungstechniken erfordern die Verfügbarkeit eines 3D-CAD-Datensatzes des Gussteils (Volumenmodell), was von der Feingießerei sowohl zur Anfertigung der Modelle in werkzeuglosen Schichtaufbauverfahren, als auch zur Entwicklung und Fertigung der Modellspritzformen genutzt werden kann (**Bilder 120** bis **122**). Zudem können die heute verfügbaren virtuellen Techniken auch zur wirtschaftlichen und schnelleren Entwicklung von Feingussteilen und zur Qualitätssicherung eingesetzt werden. Die möglichst durchgängige Nutzung von 3D-CAD-Daten bringt erhebliche Zeiteinsparungen, denn diese Daten finden wie oben schon angedeutet in vielen Bereichen Anwendung, die nachfolgend beschrieben werden.

Weiterführende Informationen zur computerunterstützten Bauteilentwicklung im Feinguss sind in [8] enthalten.

I. Gussteilentwicklung

Hier bietet sich der Einsatz computerunterstützter Entwicklungstechniken an, denn, wie an anderer Stelle schon ausgeführt, lassen sich im Feinguss wie bei kaum einen anderem Verfahren hochkomplexe und filigrane Gusskörper fertigen, die an ihren Belastungsfall optimiert ausgelegt werden können. Mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) lassen sich Schwachstellen bereits im CAD-Entwurf ermitteln und verschiedene Konstruktionsvarianten objektiv beurteilen. Durch iterative Topologieoptimierung lässt sich hier bereits vor der Anfertigung teurer Werkzeuge und Vorserienteile eine kraftflussgerechte Konstruktion des Bauteils entwickeln . Da die Feingussteile sehr komplex sind, sind hierfür bedeutend mehr Iterationsschritte erforderlich als bei einfachen geometrischen Körpern, was wirtschaftlich nur rechentechnisch zu realisieren ist. Zudem lassen sich durch Anpassen konstruktiver Elemente, wie Radien, Rundungen, Rippen usw. örtliche Spannungsspitzen abbauen. Außerdem können die gießtechnischen Anpassungen der Gusskonstruktion (Schrägen, Radien, Hinterschneidungen usw.) relativ schnell von der Gießerei in das CAD-Modell des Bauteils eingearbeitet werden.

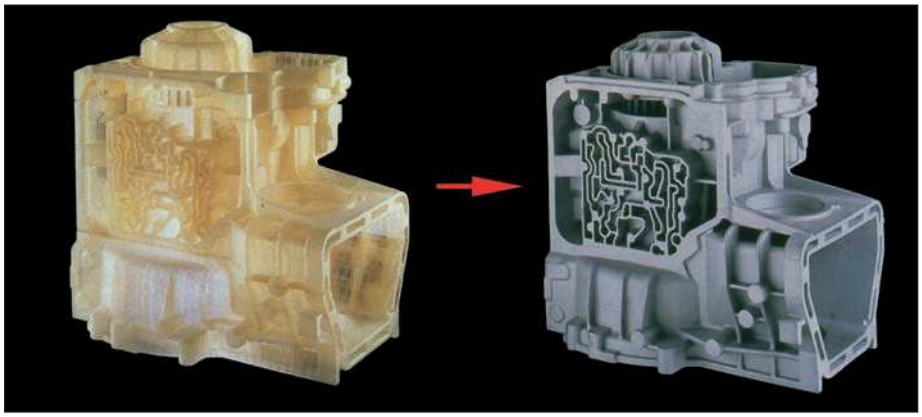


Bild 120: Gehäuse für PKW-Automatikgetriebe aus EN AC-AlSi7Mg0,6 (W.-Nr. EN AC-42200) (rechts), werkzeuglos unter Nutzung des CAD-Datenmodells hergestellt nach dem Quick-Cast-Verfahren mit generativ aufgebauten Stereolithographie(SL)-Modellen, Abmessungen: 480 x 360 x 400 mm, Gewicht: 18 000 g (Bild: Tital, Bestwig)

Bionisch gestaltete Bauteile, die sich durch ein Optimum in der Spannungsverteilung und damit größtmögliche Belastbarkeit des Bauteils auszeichnen, sind meist komplexe Konstruktionen mit verwinkelten und verdrehten Konturen. Diese Strukturen lassen sich vielfach wegen ihrer Komplexität nur durch Formgießen fertigen. Auf Grund der hohen Gestaltungsfreiheit ist das Feingießen besonders für die Fertigung bionisch gestalteter Bauteile besonders geeignet. Mehr Informationen zur Herstellung bionischer Gussteile enthält die Quelle [15].

II. Werkzeugentwicklung

Das CAD-Datenmodell des Bauteils lässt sich nicht nur zur gießgerechten Anpassung der Bauteilkonstruktion nutzen, sondern auch zur Gestaltung des Spritzwerkzeuges (**Bild 122**). Neben dem Festlegen von Aushebeschrägen, Teilungen u. ä. werden auch Kerne, Formteile und andere konstruktive Aspekte der Werkzeuggestaltung berücksichtigt und an die Aufspannung der Maschine angepasst.

Des Weiteren findet das CAD-Modell Eingang in die CNC-Maschinensteuerung der Bearbeitungsmaschine zur Anfertigung der Formenkonturen und zur virtuellen Überprüfung der Bearbeitungsschritte und sorgt so dafür, dass ein qualitativ einwandfreies Modell und damit Gussteil herstellbar ist.

Bild 121: Prototypenfertigung nach dem Vakuum-Differenzdruck-Verfahren (VDD) mit durchgehender Nutzung der CAD-Daten am Beispiel des Feingussteils für einen elektronisch steuerbaren Saugregelmodul für Schraubenkompressoren (Bild: 1zu1 Prototypen, Dornbirn)

a) CAD-Datenmodell des Gussteils
b) Wachsmodell mit keramischem Kern (weiß), das in einer Siliconform gefertigt wurde, deren Formgebung über ein SL-Modell erfolgte
c) verlorenes FDM-Model im VDD-Verfahren gefertigt
d) bearbeitetes Feingussteil

III. Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing

Auf das Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing von Feingussteilen wurden bereits unter Kapitel 2.4 ausführlich eingegangen. Die zeitlich schnellere Umsetzung von Neukonstruktionen als Marketinginstrument bei vertretbaren Kosten ist ohne CAD-Datennutzung nicht möglich. Dieser Datensatz wird zur werkzeuglosen Herstellung von Wachsmodellen oder Muttermodellen für die Vorserienwerkzeugfertigung in Feingießereien eingesetzt, die zur Prototypenfertigung von Feingussteilen in Serienqualität zum Einsatz kommen (**Bild 121**). Wegen der Einsparungen der Werkzeugbearbeitungskosten ist diese Vorgehensweise oft sehr wirtschaftlich, aber vor allem zeitlich viel schneller.

Das Feingießen ist verfahrensbedingt ein Serienverfahren. Durch die Anfertigung von für die Serienfertigung unattraktiven Stückzahlen (1 bis 50) lassen sich im Rapid Manufacturing mit Hilfe generativer Schichtaufbauverfahren und des 3D-Datensatzes des Bauteiles werkzeuglos zu oft günstigen Bedingungen auch Kleinserien fertigen.

Von Interesse ist diese Vorgehensweise auch dann, wenn im Vorserienstadium, beispielsweise für eine spätere Druckgussfertigung, die ursprüngliche Konstruktion überprüft, optimiert und geändert werden muss. Da so die erforderlichen Änderungen und Anpassungen bereits vor der Gießwerkzeugfertigung erfolgen können, lassen sich Zeit und Kosten im Werkzeugbau einsparen. Das ist auch dann von Vorteil, wenn es sich um kleine Serien mit hohem Änderungsaufwand oder Projekte mit hohen Entwicklungskosten handelt.

IV. Vorhersage der Gussteileigenschaften

Für höher belastete Bauteile sind Festigkeitsversuche und rechnerische Festigkeitsnachweise zu führen. Mit Hilfe des CAD-Datensatzes lassen spezielle Softwarelösungen heute bereits auch virtuell hochgradig die zu erwartenden Festigkeiten auf Basis einer Ermittlung örtlicher Spannungsverläufe vorhersagen und können damit bereits im Bauteilentwicklungsprozess Berücksichtigung finden. Hierfür kommen die entsprechend gültigen Regelwerke zur Anwendung.

V. Überprüfung des Gießprozesses

Nutzen lässt sich zudem der CAD-Datensatz zur Fertigungsprozessoptimierung in der Gießerei. Am Computer kann mit Hilfe entsprechender Softwarepakete die Herstellbarkeit des Gussteils simuliert und bei Bedarf verbessert werden. Es existieren Lösungen zur präzisen Vorhersage der zu erwartenden Formfüllungs- und Erstarrungsvorgänge (**Bild 123**), der Gefügeumwandlungen und Eigenschaftsverteilung im erstarrten Zustand sowie zu den Verformungen und Eigenspannungen, die im Rohgussteil zu erwarten sind.

Um solche Projekte erfolgreich durchführen zu können, ist ein enger Kontakt zwischen Konstrukteur und Feingießer bereits in den frühen Stadien der Bauteilentwicklung erforderlich, damit bereits von vornherein die gießtechnischen Aspekte der Bauteilgestaltung entsprechende Berücksichtigung finden können. Die Gießereien verfügen über das dafür erforderliche Datenmanagement, das den notwendigen Austausch der CAD-Daten zwischen Kunden, Feingießerei, Modell- und Werkzeugbau ermöglicht, und das für die Bauteilentwicklung erforderliche gießtechnische Wissenspotenzial. Der Kunde sollte sich deshalb möglichst frühzeitig an die Gießerei wenden.

Bild 122: CAD-Datenmodell aus der Gussteilkonstruktion (links) und daraus abgeleitete Ausschmelzmodell-Werkzeugentwicklung in der Feingießerei mit Unigraphics NX 4

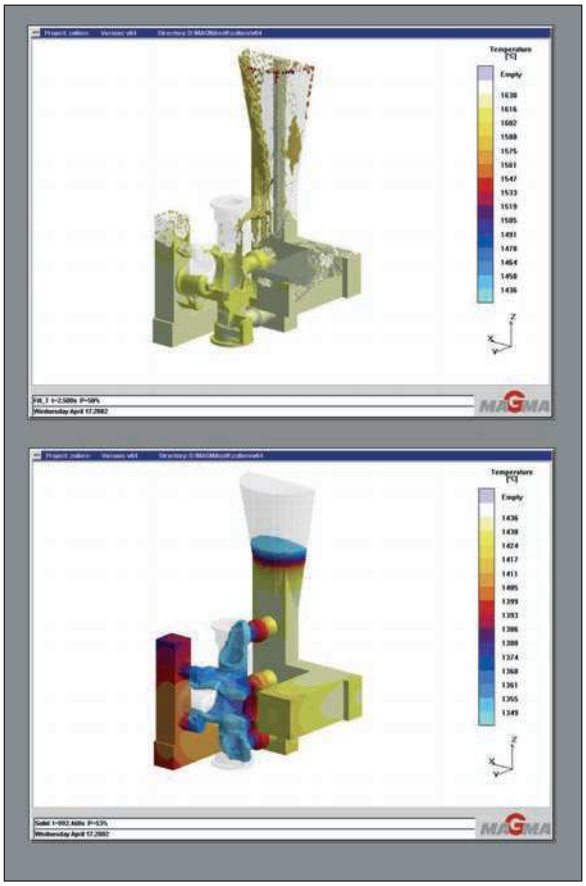


Bild 123: Vorhersage der Temperaturverteilung im Gießmetall während der Formfüllung (oben) und im Gussteil bei der Erstarrung (unten) zum Zeitpunkt einer 50%igen Formfüllung und Erstarrungszeit

5 Preisbestimmende Faktoren

Feinguss ist, wie bereits mehrfach angesprochen, eine in vielen Fällen wirtschaftliche Lösung zur Teilefertigung, da es ein langlebiges Erzeugnis ist, wo durch den endabmessungsnahen, oberflächensauberen Gusszustand Bearbeitungsgänge, Fügeprozesse, Logistikleistungen und Nachbehandlungsschritte eingespart werden können. Zudem lassen sich über die Nutzung generativer Verfahren (siehe Kapitel 2.4) im Prototypen- und Kleinserienbereich Werkzeugkosten einsparen.

Weitere Aspekte, die die Wirtschaftlichkeit der Feingussfertigung beeinflussen können, sind im Folgenden beschrieben.

I. Stückzahlen

Je größer die Stückzahl insgesamt ist, hergestellt in einer oder mehreren Serien, desto niedriger sind die anteiligen Werkzeugkosten je Stück. Möglich sind auch die werkzeuglose Fertigung mit Hilfe generativer Verfahren, die ein Rapid Prototyping und Rapid Tooling ab Losgröße Eins ermöglichen, worauf ausführlich im Kapitel 2.4 berichtet wird.

Die in einer Serie herzustellende Stückzahl bestimmt, inwieweit das Spritzen der Modelle, der Zusammenbau, das Trennen, Schleifen und gegebenenfalls Richten mechanisiert werden können. Trotz des Aufwandes für das Mechanisieren vermindern die dadurch eingesparten Zeiten den Stückpreis beachtlich.

II. Sperrigkeitsgrad und Stückzahlen

Je mehr Modelle zu einer Gießeinheit, der sogenannten Traube, zusammengefasst werden können, desto günstiger ist der Stückpreis. Dies wird beeinflusst vom Sperrigkeitsgrad der Teile, womit der Raum gemeint ist, den sie in der Gießform einnehmen. Daher wird ein kompaktes Feingussteil meist billiger sein als ein sperriges mit dem gleichen Gewicht. Der Sperrigkeitsgrad wird aber auch davon beeinflusst, ob ein Gussteil aus gießtechnischen Gründen ein- oder mehrfach angeschnitten werden muss. Der Einfluss des Sperrigkeitsgrades ist einer der Gründe, warum es bei Feinguss nicht möglich ist, Preise je Gewichtseinheit, sogenannte „Kilopreise“, zu nennen.

III. Kerne

Wasserlösliche und keramische Kerne bieten vielfältige Möglichkeiten für die wirtschaftliche Formgebung, erfordern aber auch entsprechenden Aufwand. Wenn es konstruktiv möglich ist, ohne sie auszukommen, verringern sich jeweils Stückpreis und Werkzeugkosten beträchtlich.

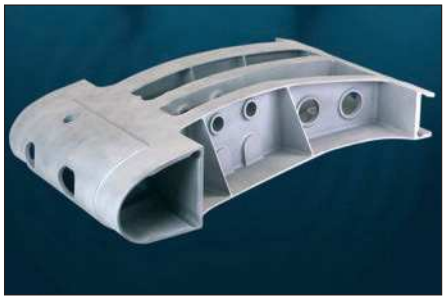


Bild 124: Landeklappenstrukturteil für Fluggerät aus dem Werkstoff EN AC-AlSi7Mg0,6 wa (W.-Nr. EN AC-42200) nach dem SOPHIA-Verfahren gefertigt, Abmessungen: 700 x 420 x 125 mm, Gewicht: 12 300 g (Bild: Zollern, Soest)

IV. Werkstoff

Beim Feinguss liegt der Kostenschwerpunkt bei den Arbeitszeiten und den Formstoffen. Die Art des Werkstoffes beeinflusst deshalb den Preis nur bei hoch legierten Stählen, Cobalt-, Kupfer-, Nickel- und Titan-Basislegierungen. Bei Bauteilen gleichen Legierungstyps sind die Preisunterschiede für ein bestimmtes Gussteil nur gering.

Werden jedoch Werkstoffe höchster Qualität im Vakuum erschmolzen und im Vakuum vergossen, so rechtfertigen die damit erzielten hohen Gebrauchswerte den höheren Aufwand. Die Aufpreise betragen etwa 10 bis 120 %, bezogen auf einen unlegierten, offen erschmolzenen Stahl.

V. Toleranzen

Auch bei Feinguss beeinflussen vorgeschriebene Toleranzen den Preis spürbar. Es ist deshalb sinnvoll, keine Toleranz enger zu wählen, als es der Zweck erfordert. Erfahrungsgemäß werden dem Feingießer oft Maßtoleranzen genannt, die ursprünglich aus der spanenden Fertigung stammen und so eng gar nicht gebraucht werden. Es bringt Preisvorteile, sie den verfahrenstechnischen Möglichkeiten des Feingießers anzupassen.

Für die Toleranzen der Werkstoffanalysen gilt das nur dann, wenn die allgemein genormten Elemente eingeschränkt werden müssen, was jedoch nur selten vorkommt.

Bild 125: Glashalter für die Installationstechnik aus dem Werkstoff: G2CrNiMo17-12-2 (W.-Nr. 1.4404) (Bild: Buderus, Moers)

VI. Abnahmebedingungen

Besondere Güteanforderungen und Abnahmevorschriften erfordern meist auch zusätzliche Maßnahmen in der Gießerei. Sie gehen damit naturgemäß in die Herstellkosten und damit in die Preise ein. Die erforderlichen Prüf- und Abnahmevorschriften sind deshalb mit dem Feingießer zu vereinbaren und müssen geklärt sein, bevor die Fertigung beginnt.

Grundlage für die Abnahme der Feingusserzeugnisse sind die Prüfspezifikationen, die im Allgemeinen vom Besteller erstellt werden und gemäß den geltenden Vorschriften mit den Feingießereien in Prüfanweisungen umgesetzt werden. Es genügt also nicht, Feingussteile nur mit der Angabe „Abnahme nach **EN 10204**“ in Auftrag zu geben, weil dadurch der Abnahmeumfang nicht hinreichend genug definiert ist. Erst bei Nennung einer Liefer- und/oder Abnahmevorschrift ist der Feingießer in der Lage, den geforderten Prüfumfang anzubieten.

Wird also vom Besteller eine Abnahme gewünscht, so ist das bereits bei der Bestellung zu vereinbaren. Diese Vereinbarungen beziehen sich dann auf die Art der Probennahme, den Prüfumfang und auf die Prüfung. Dabei ist es ratsam, die entsprechenden Normen für die Technischen Lieferbedingungen heranzuziehen, die im Anhang, Seite 47 aufgeführt sind. Die Kosten für gewünschte Abnahmen sind vom Besteller zu tragen.

Feingussteile aus Aluminiumlegierungen werden nach **DIN 1559-1 und -4** und solche aus Stahl-Nickel- und Cobaltlegierungen nach **DIN EN 2103** abgenommen. Ausländische Normen, wie zum Beispiel **MIL-C-6021 H** und **MIL 21180 C**, sowie die Abnahmevorschrift **AIR 3380** kommen ebenfalls zur Anwendung. Ausländische Normen können auch Grundlage zur Lieferung von Feingussteilen sein.

VII. Günstige Preise

Der geringste Aufwand wird durch detailliertes Abstimmen zwischen Besteller und Feingießer erreicht. Das sollte rechtzeitig geschehen, also bevor die Werkzeuge angefertigt werden. Aber auch später kann das Gießen noch durch oft nur geringfügig erscheinende Änderungen erleichtert werden. So lassen sich meist Werkstoffkosten und Gussteilpreise senken und/oder die Funktionssicherheit und Standzeit der Gussteile erhöhen.

VIII. Richtpreise

Für die Projektkalkulationen und als Orientierungshilfe werden vom Feingießer auf Wunsch Richtpreise genannt. Für wertanalytische Vergleiche ist es jedoch unerlässlich, einschließlich der Abnahme- und Prüfkosten alle erforderlichen Daten zu erfassen und exakt zu kalkulieren. Nur so ist es möglich, verbindliche Preise zu nennen.

6 Schweißen an Feingussbauteilen

Produktionsschweißungen an Feingussteilen sind sicherlich nicht die Regel, jedoch auch nicht wegzudenken, insbesondere dann, wenn die Stückgewichte größer werden. Die hohe Vielfalt der Anforderungen an Oberflächen und Volumengüten, an die Geometrie und die Maßhaltigkeit der Feingussprodukte zwingt dazu, immer häufiger konstruktive Veränderungen vorzunehmen oder aber Oberflächen- und Volumengüten zu verbessern. Hierzu ist es unumgänglich, Verfahren anzuwenden, wie zum Beispiel das Schweißen, damit auch die Wirtschaftlichkeit gewährleistet bleibt.

Nach den gängigen Regelwerken, zum Beispiel der **DIN EN 1559** „Gießereiwesen, Technische Lieferbedingungen", ist das Schweißen an Stahl- und Aluminiumgussteilen grundsätzlich erlaubt und als Produktionsschweißung definiert. Das Produktionsschweißen schließt definitionsgemäß die Begriffe Fertigungs- und Verbindungsschweißen ein.

Unter angemessener Berücksichtigung des Werkstoffs und der Form des Gussteils sind Produktionsschweißungen so durchzuführen, dass die im Schweißwerkstoff und in der Wärmeeinflusszone relevanten Eigenschaftswerte den Anforderungen an die Eigenschaften des Grundwerkstoffs ausreichend entsprechen. Die Bereiche, wo Produktionsschweißungen durchgeführt werden sollen, sind so vorzubereiten und zu prüfen, dass eine einwandfreie Schweißung sichergestellt ist. Die Dokumentation dieser Bereiche kann vereinbart werden (Auszug aus **DIN EN 1559**).

Ebenso bedarf es der Vereinbarung zwischen Kunde und Lieferant/Hersteller, Schweißverfahrens-Prüfungen zum Beispiel nach **DIN EN 288-3** oder Schweißerqualifikation nach **ISO 9606-1** zu verlangen zum Nachweis, dass der Hersteller die Produktionsschweißungen korrekt ausführen kann, gegebenenfalls in Verbindung mit einer Wärmebehandlung nach dem Schweißen.

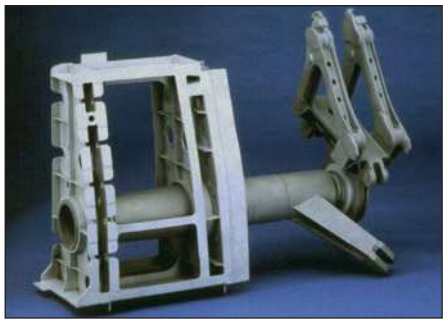


Bild 126: Feingegossene Landeklappe für den Airbus A 340 Träger (links) aus EN AC-AlSi-7Mg0,6 (W.-Nr: EN AC-42200), Rohr und Wagen (rechts) aus G-TiAl6V4 (Bild Tital, Bestwig)

6.1 Stahlguss

6.1.1 Grundlagen

Unter den Gusswerkstoffen zeichnet sich Stahlguss durch seine gute Schweißbarkeit aus. Dieser besondere Vorteil der Erzeugnisform Stahlguss kann bei der konstruktiven Gestaltung von hoch beanspruchten Bauteilen vorteilhaft ausgenutzt werden. Das gilt auch für den Stahlfeinguss.

I. Schweißeignung

Feingussteile aus Stahllegierungen zeichnen sich unter anderem in Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung durch Ihre gleichmäßigen mechanischen Eigenschaften in allen Richtungen als gut schweißbar aus. Die Schweißeignung wird im Wesentlichen durch die Eigenschaftsänderungen in der Wärmeeinflusszone (WEZ) bestimmt, die ihrerseits bei gegebener chemischer Zusammensetzung durch die Wanddicke sowie die Schweißparameter, zum Beispiel Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur, und/oder Wärmeeinbringen bedeutend beeinflussen kann.

II. Schweißvorbereitung

Die zum Schweißen vorbereiteten Bereiche sind grundsätzlich durch eine Sichtprüfung zu beurteilen, wenn möglich zusätzlich mittels der Farbeindring- oder Magnetpulverprüfung.

Die Kriterien für die Beurteilung der Schweißbereiche sollten mindestens denjenigen des Gussteils beziehungsweise der betreffenden Gussteilzone entsprechen. Im Allgemeinen sollten jedoch verschärfte Kriterien angelegt werden. Lineare Anzeigen, die auf Risse schließen lassen, sind grundsätzlich zu beseitigen.

Zu beachten ist, dass die zum Schweißen vorbereitete Mulde oder Schweißflanke vor dem Schweißen frei von Schmutz, Öl oder Prüfmittelresten ist.

III. Vorgaben und Regelwerke für das Schweißen

Die Schweißzusatzwerkstoffhersteller informieren auf den Schweißzusatzwerkstoffverpackungen (zum Beispiel bei E-Hand-Elektroden) umfangreich über Stromstärke, Stromart oder Vorwärmtemperaturen. Zusätzlich können viele wichtige Informationen aus den Herstellerkatalogen entnommen werden. Da die meisten Stahlgusssorten in Regelwerken enthalten sind, zum Beispiel in **DIN EN 10283**, erhält der Anwender auch hier die notwendigen Informationen, die für eine fachgerechte Schweißung notwendig sind.

6.1.2 Typische Schweißverfahren

In den letzten Jahren erfolgte ein Umbruch bei den Schweißverfahren. Durch die Herstellung von Fülldrähten für das **Metallschutzgasschweißen** (MSG) konnte die Angebotspalette an den verschiedensten Schweißzusatzwerkstoffen deutlich erhöht werden. Für diese Drähte kommen kostengünstige Standardgrundwerkstoffe zum Einsatz. Durch Einbringen der verschiedensten Legierungselemente in Pulverform entsteht ein Draht mit genau definierter Zusammensetzung. Hierdurch wurde der Anteil an Schweißelektroden für das E-Handschweißen deutlich reduziert.

Stark verbreitetet ist inzwischen, auf Grund der Größe der Bereiche, die durch Schweißen instandgesetzt werden müssen, das **Wolfram-Inertgas-Schweißverfahren** (WIG) und das **Laserschweißen**. Auch Kombinationsverfahren, wie das **Laserhybridschweißen**, werden genutzt. Mit diesem Verfahren lassen sich die Vorteile vom Lichtbogen- und Laserschweißen verbinden. Das Prinzip ist einfach: Beim Laserhybridsystem trifft die mit Lichtgeschwindigkeit transportierte Energie des Laserstrahls mit dem Plasma des Lichtbogens zusammen. Sie wirken gleichzeitig in dieselbe Schweißzone und verstärken ihre Wirkung.

Ein Multitalent für Auftrags- und Verbindungsschweißungen oder auch für das Beseitigen partieller Poren, Schwindungsfehler usw. ist das Laserschweißen von Hand. Dieses Verfahren kommt bevorzugt zum Einsatz, wenn kleinste Schweißungen notwendig sind, die möglichst ohne Maßverzug vollzogen werden müssen.

Neben dem Handlaserschweißen mit einem ND:YAG-Laser (die Buchstaben stehen für Neodym - Yttrium - Aluminium - Granat) sind auch automatische Verfahren heute im Einsatz. Mit diesem Verfahren sind alle Feingusswerkstoffe außer Gusseisen gut schweißbar.

Bild 127: Einteilig gegossene Schwinggabeln für Füllstandsmessung aus dem Werkstoff GX-2CrNiMo18-14-3 (W.-Nr. 1.3952), Abmessungen: 106 x 38 mm, Gewicht: 78 g (oben) und 23 x 64 mm, 35 g (unten) (Bild: Zollern, Sigmaringen)

6.1.3 Thermische Behandlung vor und nach dem Schweißen

Je nach Art und Größe der Schweißungen wird niedrig legierter bis martensitischer Vergütungsstahl entweder in geglühtem oder vergütetem Zustand geschweißt. Sofern im geglühten Zustand geschweißt wird, muss danach die Vergütung erfolgen. Andererseits ist es möglich, dass vor dem Schweißen angelassen oder entspannt wird. Hierbei ist zu beachten, dass die Anlass-/Spannungsarmglühtemperatur etwa 20 bis 30 °C unterhalb der gewählten Anlasstemperatur liegt, damit die eingestellten mechanisch-technologischen Werte nicht verändert werden.

Austenitischer Stahlguss wird grundsätzlich im abgeschreckten Zustand geschweißt. Bezüglich eines erneuten Lösungsglühens nach dem Schweißen muss unterschieden werden in die Standard-Austenite mit C-Gehalten bis 0,07 % ohne Niob-/Titanzusätze und in die Gruppe der Austenite mit C-Gehalten < 0,03 % oder mit Niob-Titan stabilisiert. Grund hierfür ist beispielsweise die Gefahr von interkristalliner Korrosion in der Wärmeeinflusszone, die durch chemischen Angriff entlang der Korngrenzen entstehen kann. Hierbei wird das Gefüge aufgelockert und der metallische Zusammenhang gestört.

Bei den Standard-Austeniten scheidet sich durch das hohe Wärmeeinbringen beim Schweißen Chromcarbid aus. Der Chrommindestgehalt für die Passivierung der Oberfläche in der Matrix nahe den Korngrenzenbereichen wird unterschritten und es entsteht interkristalline Korrosion. Um dies zu verhindern, werden häufig sogenannte Low-Carbon-Austenite oder Niob- und Titanvarianten eingesetzt. Hierdurch können längere Verweilzeiten im kritischen Temperaturbereich zwischen 600 und 700 °C gefahrlos durchlaufen werden, oder es erfolgt ein Post Weld Heat Treatment, ein Lösungsglühen.

6.2 Aluminium

6.2.1 Grundlagen

Im Allgemeinen lässt sich Aluminium schweißen. Das Metall weist jedoch, verglichen mit den Schweißeigenschaften von Stahl, zahlreiche Spezialcharakteristika auf. Insbesondere der Sauberkeit kommt hohe Bedeutung zu. Der Schmelzpunkt der auf der Aluminiumoberfläche befindlichen Oxidschicht beträgt gegenüber dem Metall selbst gut das Dreifache (rund 2050 °C). Diese Schicht, die auch als Elektroisolierung fungiert, erschwert daher die Raupenbildung auf der Fugenoberfläche. Die Oxidschicht ist ausgesprochen hart und zäh, und die absplitternden Partikel können beim Schweißen leicht in das Schmelzbad geraten und Schweißnahtfehler oder Oxideinschlüsse verursachen. Bei einer stärkeren Oxidschicht, insbesondere bei gleichzeitig ansteigender Temperatur und Luftfeuchtigkeit, wird die Oberfläche porig und absorbiert Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft. Mit dieser Feuchtigkeit gelangt Wasserstoff in die Schweißnaht und verursacht die Entstehung von Poren. Aus diesem Grunde sollte die Oxidschicht vor dem Schweißen mechanisch oder chemisch entfernt werden.

Grundsätzlich ist nach dem Schweißen eine Wärmebehandlung gemäß der Werkstoff-Spezifikationen der Gussteile durchzuführen. Hinweise zur Schweißbarkeit der einzelnen Legierungen sind in der Norm **DIN EN 1706** hinterlegt.

6.2.2 Typische Schweißverfahren

Das **Wolfram-Inert-Gasschweißen (WIG)** ist das wichtigste Schmelzschweißverfahren zum Fügen von Aluminium und dessen Legierungen. Es wird eine nicht abschmelzende Elektrode aus Wolfram verwendet. Der blanke Zusatzdraht muss gesondert zugeführt werden. Dieses Verfahren wird im Allgemeinen für das Freihandschweißen mit Wechselstrom unter Argon als Schutzgas angewandt. Produktionsschweißungen lassen sich zuverlässig bei allen gängigen Feingusslegierungen mit dieser Technik durchführen. Qualitativ verbesserte Ergebnisse bei Schweißungen an Gussteilen werden heute mit dem Einsatz von Argon/Helium-Gasgemischen erzielt.

WIG-Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Gleichstrom wird vorzugsweise bei voll mechanisierten oder automatischen Schweißungen eingesetzt. Als Schutzgas fungiert Helium. Instandsetzungsarbeiten können heute mit diesem Verfahren in guter Qualität an großen, dickwandigen Aluminiumbauteilen durchgeführt werden, da hier das Schweißen ohne Vorwärmung möglich ist.

Automatisierte Schweißvorgänge lassen sich heute vorteilhaft in Verbindung mit entsprechenden Spann- und Positioniervorrichtungen mit der **Laserstrahlschweißtechnik** an Gussteilen durchführen.

Die Elektroden für das WIG-Schweißen bestehen aus Wolfram oder aus Wolfram mit Beimengungen oxidischer Zusätze. Die Elektrodenwerkstoffe sind in **DIN EN 26848** genormt.

Argon ist das Standardschutzgas für normale Schweißaufgaben. Argon/Helium (Gasgemisch) wird überall dort eingesetzt, wo erhöhte Anforderungen an die Schweißnahtqualität gestellt werden (**DIN 32 526** beziehungsweise **DIN EN 439**).

Im Allgemeinen ist artgleicher Zusatzwerkstoff zu verwenden. Zusatzwerkstoffe werden als relativ dünne nackte Drähte (1,6 oder 2,4 mm, auch 3,2 Dmr.) verwendet, die als Stäbe oder aufgespult geliefert werden. Der Draht muss vor Schmutz und Feuchtigkeit geschützt werden, da Verunreinigungen die Qualität der Schweißverbindung herabsetzen. Mit geschältem Draht ist das Gefüge der Schweißnaht zu verbessern.

Bild 128: Bearbeitete und polierte Knie-Implantate aus CoCrMo-Legierung gemäß ASTM F75 (Bild: Buderus, Moers)

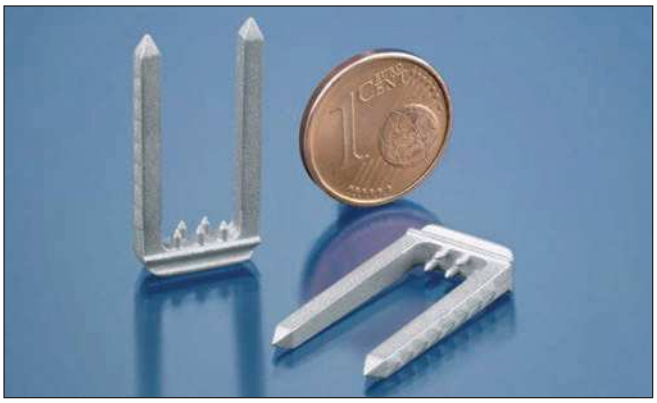


Bild 129: Knochenklammern für die Medizintechnik aus Co-Basislegierung, Abmessungen: 25 x 13 x 4 mm, Gewicht: 3 g (Bild: Zollern, Sigmaringen)

Bild 130: Fertig bearbeitetes Bauteil „Link“ aus Titanfeinguss im einbaufähigen Zustand (Bild: Tital, Bestwig)

6.2.3 Schweißnahtvorbereitung

Die Schweißnahtvorbereitung bedarf einer sorgfältigen Ausführung. Die auszubessernden Gussteiloberflächen sind mechanisch von Oxydhäuten zu befreien. Schmutz, Öl oder Prüfmittelreste sind ebenfalls zu entfernen. Bei großen, dickwandigen Gussteilen ist ein Vorwärmen zu empfehlen, um Bindefehler, Porositäten und Spannungen zu vermeiden. Vorwärmtemperaturen bis etwa 250 °C werden angewendet.

6.2.4 Schweißerqualifikation

Käufer und Hersteller werden darauf aufmerksam gemacht, dass nur zugelassene Verfahren und entsprechend qualifizierte Schweißer eingesetzt werden dürfen. Schweißerprüfungen können nach **DIN EN 287** oder **DIN 29591** durchgeführt werden. Die Vorschriften des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften sind einzuhalten.

Die beim Schutzgasschweißen mit hohen Stromstärken besonders hohe UV-Strahlungsintensität des Lichtbogens und die relativ hohen Leerlaufspannungen erfordern gegenüber dem offenen Lichtbogenschweißen verstärkte Schutzmaßnahmen für den Schweißer. Der Augenschutz sowie Körperschutz und eine wirksame Absaugung für Gase und Dämpfe sind wichtige Aspekte beim Lichtbogenschweißen.

Weitere Informationen sind in [19, 20] enthalten

Bild 131: Das Prismengehäuse für Teleskop aus Aluminiumfeinguss verbindet anspruchsvolle Geometrie mit hoher Oberflächengüte und Leichtbau (Bild: Feinguss Blank, Riedlingen)

7 Wärmebehandlung

Feingussteile können in vielen Fällen unbehandelt zum Einsatz kommen. Sie werden bei Bedarf und bei bestimmten Werkstoffen zur Erzielung der geforderten Eigenschaften aber auch wärmebehandelt. Werkstoffspezifisch können unterschiedliche Wärmebehandlungen erforderlich sein. Diese erfordern deshalb eine spezielle Vereinbarung zwischen dem Kunden und der betreffenden Gießerei.

7.1 Stahlguss

Stahlguss wird mit wenigen Ausnahmen immer wärmebehandelt. Dabei werden folgende Ziele angestrebt:

- Vermindern der erstarrungsbedingten Seigerungen (hauptsächlich bei größeren Gießquerschnitten),
- Kornfeinen des relativ grobkörnigen Erstarrungsgefüges bei umwandlungsfähigen Sorten,
- Erzielen der legierungsabhängigen Werkstoffeigenschaften durch qualitätsbestimmendes Wärmebehandeln.

7.1.1 Grundlagen

Im Vergleich zu den umgeformten Stählen sind die Haltezeiten beim Wärmebehandeln von Stahlguss im Allgemeinen länger, was dem gewünschten Diffusionsausgleich der Seigerungszonen sowie den meist größeren Wanddicken entgegenkommt. Im Übrigen besteht bezüglich der legierungstechnisch erforderlichen Wärmebehandlungsschritte zwischen umgeformtem und gegossenem Stahl kein grundsätzlicher Unterschied.

Die Ofeneinrichtungen zum Wärmebehandeln sind in der Mehrzahl leicht isoliert und werden über eine Vielzahl gleichmäßig verteilter, vorwiegend rechnergesteuerter Kleinbrenner beheizt. Dies gewährleistet das exakte Einhalten der Aufheiz- und Abkühlkurven und während der Haltezeit eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Ofen, auch bei stark wechselnder Belegungsdichte.

Kurze Wege zu den Abschreckbädern begünstigen das Einhalten einer gleichmäßigen Abschrecktemperatur am ganzen Gussteil. Mögliche Maßabweichungen durch Verzug oder Verzundern der Oberfläche werden durch entsprechende Maßnahmen wie zum Beispiel Auflagen im Glühofen oder Maßzugaben kontrolliert. Da üblicherweise nicht in Schutzgasatmosphäre wärmebehandelt wird, weist die Randschicht meist eine legierungsabhängige Entkohlungszone auf.

Die nachfolgend beschriebenen wichtigsten Wärmebehandlungsverfahren beziehungsweise -schritte können je nach Werkstoffgruppe oder Gussteilkategorie teilweise entfallen oder werden miteinander kombiniert. Eine Übersicht der Temperaturlagen beim Wärmebehandeln von unlegiertem Stahlguss wird im **Bild132** gegeben.

7.1.2 Vorbereitendes Wärmebehandeln

Zu den vorbereitenden Wärmebehandlungsverfahren gehören unter anderem das Diffusionsglühen, das Normalglühen, das Weichglühen und das Spannungsarmglühen. Angestrebt werden die im Folgenden aufgeführten Ziele:

- Ausgleich von Kristallseigerungen,
- feineres Ausgangsgefüge für ein nachfolgendes Vergüten,
- Senken des Risikos der Rissbildung beim thermischen Bearbeiten wie Brennschneiden oder Fugenhobeln,
- Erleichtern des spanenden Vorbearbeitens, zum Beispiel zum Verringern der maßgebenden Wanddicken, damit das Durchvergüten begünstigt wird.

7.1.3 Qualitätsbestimmendes Wärmebehandeln

Die Art der qualitätsbestimmenden Wärmebehandlung ist in der Regel in Normen, normähnlichen Regelwerken und/oder Kundenvorschriften spezifiziert. Hierzu gehören beispielsweise das Normalglühen (Normalisieren), Härten, Vergüten und Spannungsarmglühen. Zur Gewährleistung der erwarteten Eigenschaften sind einige stahlgussspezifische Besonderheiten zu beachten, die sich im Wesentlichen aus der freien Gestaltungsmöglichkeit von Stahlgussteilen ergeben:

- Die Gestalt des Gussteile muss ein gegebenenfalls erforderliches Abschrecken in einem Flüssigkeitsbad zulassen. Neben schroffen Wanddickenübergängen müssen auch schlecht zugängliche Innenräume beachtet werden.
- Die angestrebten Eigenschaften können im Allgemeinen nur bis zu den in den Normen oder normähnlichen Regelwerken aufgeführten maßgeblichen Wanddicken erwartet werden.
- Die vom Konstrukteur festgelegte Werkstoffsorte muss bezüglich der erwarteten Eigenschaften mit der maßgeblichen Wanddicke beziehungsweise mit der erreichbaren Abkühlgeschwindigkeit abgestimmt sein. Abgekühlt wird üblicherweise im Wasser- oder Ölbad sowie an bewegter oder ruhender Luft.

.

- Die Werkstoffspezifikation darf nicht überbestimmt sein, zum Beispiel durch zu enge Spannen bei den Wärmebehandlungstemperaturen bei gegebenen Mindestwerten für die mechanischen Eigenschaften.

Die werkstofftechnischen Zielsetzungen für die wichtigsten Werkstoffgruppen lauten:

- Feinkörniges Schwarz-Weiß-Gefüge (Ferrit-Perlit) bei un- bis niedriglegiertem Stahlguss, erzielt durch ein Normalglühen,
- Möglichst 100 % Vergütungsgefüge (angelassener Martensit und unterer Bainit) bei niedrig bis hoch legiertem Vergütungsstahlguss zum Gewährleisten des gewünschten Festigkeits-/Zähigkeits-Verhältnisses. Dazu sind mindestens zwei Wärmebehandlungsschritte erforderlich: Härten und Anlassen,
- Möglichst ausscheidungsfreies austenitisches oder austenitisch-ferritisches Gefüge bei den umwandlungsfreien hoch legierten Stahlgusssorten, erreicht durch ein Lösungsglühen mit nachfolgendem Abschrecken,
- Nach umfangreichem spanenden Bearbeiten kann unter Umständen ein Spannungsarmglühen empfehlenswert sein.

7.1.4 *Wärmebehandeln von Fertigungs- und Konstruktionsschweißungen*

Bei un-, mittel- und hoch legierten ferritisch-martensitischen Stahlgusssorten wird üblicherweise nach dem Schweißen zum Härte- und Eigenspannungsausgleich ein weiteres Anlassglühen durchgeführt. Wenn dabei die Abkühlrate höchstens 25 °C/h beträgt, kann auf ein zusätzliches Spannungsarmglühen verzichtet werden.

Bei ungleichen Werkstoffpaarungen, die unter anderem bei Konstruktionsschweißungen auftreten können, müssen die Glühtemperaturen werkstoffgerecht angepasst werden. Für bestimmte Anwendungsbereiche, wie beispielsweise warmfester Stahlguss, sind die entsprechenden Regelwerke zu beachten. Eine erneute qualitätsbestimmende Wärmebehandlung nach dem Schweißen ist nur in Ausnahmefällen üblich, wie beispielsweise bei Werkstoffen mit Sondereigenschaften (kaltzäh, hochkorrosionsbeständig). In diesen Fällen kann bei Fertigungsschweißungen der in den betreffenden Normen beschriebene Dokumentationsnachweis entfallen.

7.1.5 *Ausscheidungshärten*

Ein Ausscheidungshärten kann bei der Verwendung von mikrolegiertem Vergütungsstahlguss sowie bei martensitischem, austenitischem und austenitisch-ferritischem Stahlguss, der über Sonderelemente wie Kupfer und Niob ausscheidungshärtbar ist, angewendet werden. Diese Sonderelemente werden nach einem Lösungsglühen über eine weitere thermische Behandlung, üblicherweise im unteren Temperaturbereich des Anlassens, gezielt ausgeschieden und können so zu einer beachtlichen Festigkeitssteigerung bei vertretbarer Zähigkeitsminderung führen. Bei den hoch legierten korrosionsbeständigen Stahlgusssorten ist zusätzlich ein Abfall der Korrosionsbeständigkeit zu beachten.

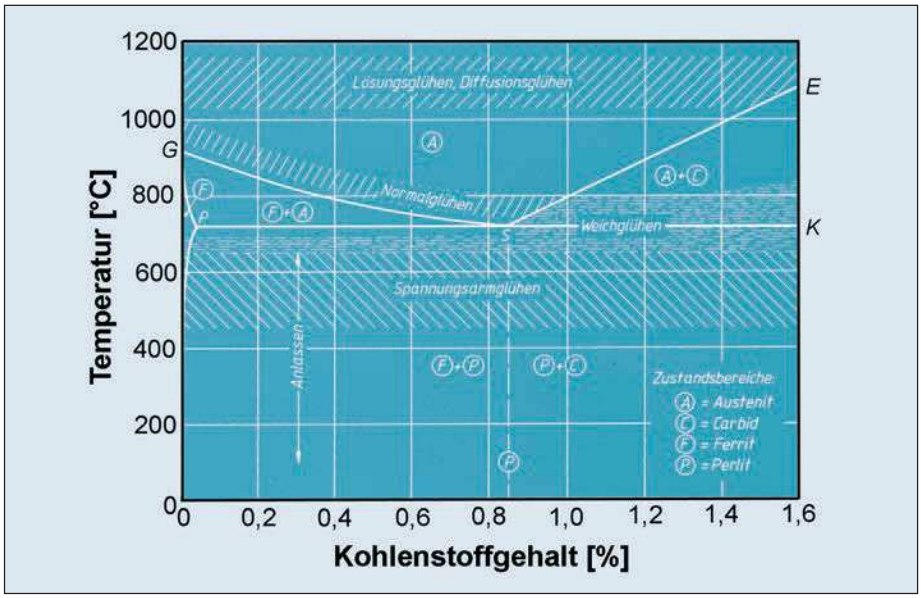


Bild 132: Temperaturlagen der verschiedenen Wärmebehandlungsverfahren für unlegierten Stahlguss im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm
A1 - Umwandlungstemperatur Austenit - Perlit (Linie P - S)
A3- Umwandlungstemperatur Ferrit - Austenit (Linie G - S)

7.2 *Aluminium*

7.2.1 *Grundlagen*

Die Eigenschaften bestimmter Aluminiumgusslegierungen können nach dem Gießen durch eine Wärmebehandlung verbessert werden. Sie wird vor der mechanischen Bearbeitung am Rohguss durchgeführt. Die Art der Wärmebehandlung richtet sich nach der verwendeten Legierung und der beabsichtigten Wirkung. Ihre Durchführung setzt deshalb genaue Kenntnisse der vorhandenen Möglichkeiten und der geeigneten Methoden voraus, ebenso praktische Erfahrungen und geeignete Einrichtungen.

Folgende Varianten der Wärmebehandlung sind im Bereich des Aluminiumgusses verbreitet:

- **T4:** Lösungsgeglüht und kaltausgelagert,
- **T5:** Kontrollierte Abkühlung nach dem Guss und warmausgelagert oder überaltert,
- **T6:** Lösungsgeglüht und vollständig warmausgelagert,
- **T7:** Lösungsgeglüht und überaltert (stabilisierter Zustand).

Bei der T4-, T6- und T7-Behandlung werden die Gussteile einem Lösungsglühen unterzogen, anschließend abgeschreckt und danach kalt- oder warmausgelagert. Bei der T5-Wärmebehandlung werden die Gussteile aus der Gießhitze kontrolliert abgekühlt und **ohne** ein Lösungsglühen warmausgelagert.

Die werkstoffseitig notwendige Voraussetzung, dass eine Legierung wärmebehandelt werden kann, ist das Vorhandensein von Legierungsbestandteilen, die mit Aluminium aushärtbare Phasen bilden und/oder bei hoher Temperatur im Aluminiummischkristall eine größere Löslichkeit besitzen als bei niedriger Temperatur. Solche Bestandteile sind zum Beispiel Kupfer, Magnesium oder Silicium (**Bild 133**).

7.2.2 *Qualitätsbestimmendes Wärmebehandeln*

I. T6-Wärmebehandlung

Die T6-Wärmebehandlung, früher auch als Aushärtung bezeichnet, ist die weitaus wichtigste Wärmebehandlung beim Aluminiumfeinguss. Während für viele Anwendungsfälle die im Gusszustand erreichbaren Festigkeitswerte genügen, werden für hoch beanspruchte Gussteile aushärtbare Legierungen eingesetzt. Mit diesen Legierungen lassen sich – aufgrund ihrer speziellen Zusammensetzung – durch eine T6-Wärmebehandlung die höchsten bei Aluminiumguss möglichen Festigkeitswerte erzielen. Die EN AC-AlSi7Mg03 (W.-

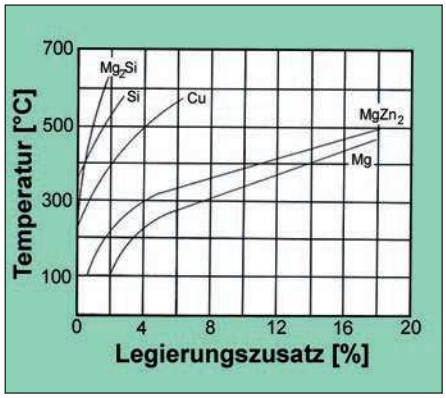


Bild 133: Einfluss der Temperatur auf die Löslichkeit verschiedener Legierungsbestandteile im Aluminium

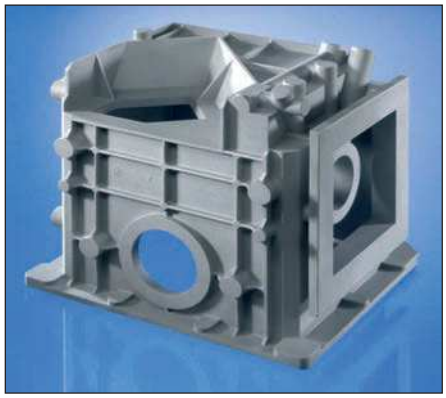


Bild 134: Eckblock für Laserstrahlumlenkung aus EN AC-AlSi7Mg0,6 (W.-Nr. EN AC-42200), Abmessungen: 260 x 280 x 230 mm, Gewicht: 3600 g (Bild: Zollern Sigmaringen)

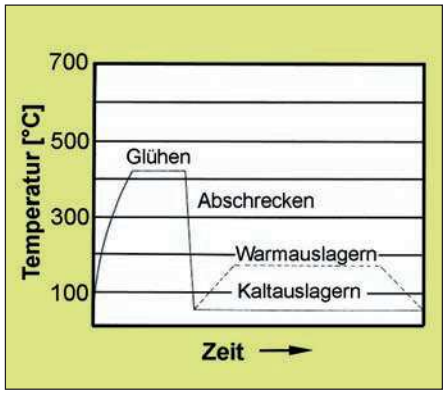


Bild 135: Temperaturverlauf bei der Aushärtung von Feingussteilen aus Aluminium

Nr. EN AC-42100) und EN AC-AlSi7Mg06 (W.-Nr. EN AC-42200) sind typische Legierungen, die T6 wärmebehandelt und im Feinguss häufig eingesetzt werden.

Mit einem Erhöhen der mechanischen Festigkeit ist immer ein Anstieg der Härte verbunden. Das Wesentliche ist jedoch nicht das Erhöhen der Härte, sondern die Steigerung von Streckgrenze, Zugfestigkeit und dynamischer Festigkeit.

Die T6-Wärmebehandlung selbst erfolgt allgemein in drei Arbeitsstufen (**Bild 135**):

- Lösungsglühen,
- Abschrecken,
- Warmauslagern.

Die anzuwendenden Temperaturen und Glühzeiten sind legierungsabhängig. Richtwerte sind den Legierungspezifikationen zu entnehmen [21, 22].

Beim **Lösungsglühen** bei 480 bis 540 °C (siehe auch Angaben in Werkstoffleistungsblättern) sollen jene Gefüge- beziehungsweise Legierungsbestandteile, die eine Aushärtung bewirken, vollständig in Lösung gebracht werden. Es ist darauf zu achten, dass die vorgeschriebene, angegebene Höchstgrenze nicht überschritten wird, weil sonst bereits niedrig schmelzende, eutektische Legierungsbestandteile anschmelzen können und die Gussteile dadurch unbrauchbar werden. Wird die angegebene Lösungstemperatur unterschritten, kann der Aushärtungseffekt nicht erreicht werden. Das Lösungsglühen muss deshalb unbedingt in einem regelbaren Ofen mit Luftumwälzung vorgenommen werden.

Die Festigkeit der Gussteile ist während des Lösungsglühens sehr gering. Daher muss durch entsprechende Vorrichtungen vermieden werden, dass die Gussteile auf Biegung oder Druck beansprucht werden. Sie dürfen deshalb keinesfalls aufeinander liegen.

Durch das **Abschrecken** in Wasser wird der Gefügezustand, der sich beim Lösungsglühen eingestellt hat, bei Raumtemperatur eingefroren. Dabei entstehen, wie bereits erwähnt, übersättigte Aluminiummischkristalle, die aushärtungsfähig sind.

Mit Wasser als Abschreckmedium lassen sich die höchsten Abkühlraten erzielen. Es wird bei der Wärmebehandlung von Gussteilen am häufigsten angewendet. Für das Abschrecken muss eine ausreichende Wassermenge zur Verfügung stehen, da andernfalls die Teile beim Tauchen größtenteils nur vom Wasserdampf umgeben sind, wodurch der Abschreckeffekt ungenügend ausfällt. Zusatzmittel wie Aqua-Tenside verbessern die Abschreckbedingungen speziell für große verzugsgefährdete, dünnwandige Feingussteile.

Manche Gussteile sind jedoch so ungünstig gestaltet, dass sie während des Abschreckens starke Eigenspannungen aufbauen und zum Verziehen neigen. Solche Gussteile müssen nach dem Abschrecken gerichtet werden.

Die Zeit zwischen dem Öffnen des Lösungsglühofens und dem Abschrecken muss so kurz wie möglich sein. Als Richtwert gilt etwa 10 Sekunden. Nur bei Einhaltung dieser Zeit kann mit einem optimalen Aushärtungseffekt gerechnet werden.

Unmittelbar nach dem Abschrecken sind die Teile zunächst noch weich und dehnbar. Eventuell erforderliche Richtarbeiten sind in diesem Stadium auszuführen.

Durch das **Warmauslagern** werden metastabile Phasen im Kristallgitter ausgeschieden. Dadurch steigen die Streckgrenze, Festigkeit und Härte, während die Dehnung abfällt. Die Ausscheidungen sind im Lichtmikroskop nicht sichtbar.

II. T7-Wärmebehandlung

Die T7-Wärmebehandlung ist der T6-Behandlung ähnlich. Der Unterschied besteht lediglich in der Dauer und Temperatur der Warmauslagerung. Sie wird gezielt länger und /oder bei höherer Temperatur durchgeführt. Dadurch fällt die Festigkeit wieder ab und die Dehnung steigt an. Bei Bauteilen, die im Betrieb höheren Temperaturen ausgesetzt sind, stabilisiert das die mechanischen Eigenschaften. Die sonst erfolgende sogenannte Überalterung wird vorweggenommen.

III. T4-Wärmebehandlung

Bei der T4-Wärmebehandlung werden die Gussteile lösungsgeglüht und abgeschreckt. Abweichend von der T6- oder T7-Behandlung findet das Auslagern der Gussteile dann aber bei Raumtemperatur statt und man spricht vom Kaltauslagern. Diese Kaltauslagerung erfolgt selbsttätig und ist nach etwa zehn Tagen abgeschlossen (legierungsabhängig). Kaltausgehärtete Legierungen enthalten Cu und/oder Zn als Legierungsbestandteile. Diese Legierungen werden im Feingießverfahren allerdings nur selten verwendet.

IV. Entspannen, Stabilisieren, Weichglühen

Diese Wärmebehandlung wird in der Praxis verhältnismäßig selten angewendet. Einzelheiten sollten jeweils mit einer erfahrenen Gießerei besprochen werden.

V. Selbstaushärtung

Es gibt einige Aluminiumgusslegierungen, die bereits durch Lagerung bei Raumtemperatur einen Festigkeits- und Härteanstieg durch Kaltaushärtung zeigen, auch ohne dass aus der Gießhitze kontrolliert abgekühlt wurde (Vergleiche T4-Wärmebehandlung). Dieser Effekt wird als Selbstaushärtung bezeichnet. Dazu gehört zum Beispiel die Legierung EN AC-AlZn5Mg (W.-Nr. EN AC-71000). Festigkeitsprüfungen sind frühestens nach 8 Tagen durchzuführen. Die Festigkeitswerte können sich aber auch noch nach Monaten, teilweise Jahren ändern, was die Verwendung der selbstaushärtenden Legierungen problematisch macht.

Anhang

Normen und Richtlinien

Die Normen und Richtlinien für die Feingusswerkstoffe und deren Anwendung bieten eine Fülle an Informationen und Hinweisen für den Konstrukteur und Gussanwender. Durch sie lassen sich die Anforderungen und Eigenschaften an ein spezifisches Bauteil definieren. Durch die Nutzung dieser Normen wird die Beschaffung von Gussteilen vereinfacht und sichergestellt, dass die gelieferten Bauteile den Anforderungen des Konstrukteurs entsprechen. Durch die Definition der Anforderungen und Grenzen, in denen bestimmte Qualitätsmerkmale schwanken dürfen, werden die Kosten im Kern beeinflusst. Hier ermöglicht der Dialog zwischen Konstrukteur, Gießer sowie Modell- und Werkzeugbauer, das große Leistungsvermögen des Feingießens als Fertigungsverfahren auch wirtschaftlich optimal zu nutzen. Die Anwendung der betreffenden Normen, Richtlinien oder Spezifikationen ist somit ein wichtiger Baustein zur konstruktiven Lösung unter Nutzung des Feingießverfahrens.

Werkstoffnormen und Technische Lieferbedingungen

Die Werkstoffpalette für den Feinguss überstreicht alle wichtigen technischen Gusswerkstoffe. Diese sind national nach **DIN** (deutsche Normung) oder **DIN EN** (europäische Normung) und international zusätzlich zur EU-Normung nach **ISO** genormt. Vielfach kommen im internationalen Handel auch die amerikanischen Normen (**ASTM**) zur Anwendung.

Die Werkstoffe können entweder durch Kurzzeichen oder durch Nummern definiert werden. Kurzzeichen dürfen sowohl für genormte als auch nicht genormte Gusswerkstoffe angewendet werden. Die Werkstoffnummern sind nur für die genormten Werkstoffe anwendbar. Einige Gusswerkstoffe werden nach ihrer chemischen Zusammensetzung bezeichnet, wie beispielsweise die Stahlgusssorten.

In der folgenden Tabelle sind die derzeit genormten beziehungsweise nicht genormten Werkstoffsorten aufgeführt und spezifische Normen für die Gussteile angegeben, die für Feinguss im Speziellen gelten. Grundsätzlich sollte die aktuellste Ausgabe dieser Normen Anwendung finden.

Neben den Technischen Lieferbedingungen für die Gusswerkstoffe (siehe Tabelle rechts) gelten verfahrensbedingt für Feingussteile spezielle Technische Lieferbedingungen, Maßtoleranzen, Oberflächengenauigkeiten und Bearbeitungszugaben, die in den **VDG-Merkblättern** der Tabelle rechts unten enthalten sind. Diese befinden sich in ständiger Überarbeitung, so dass die jeweils aktuelle Fassung Anwendung finden sollte.

Werkstoffgruppe	National (DIN)	Europäisch (EN)	International (ISO)[1]	USA (ASTM)[1]
Stahlguss für allgemeine Anwendungen	DIN EN 10293	DIN EN 10293	ISO 3755 ISO 9477 ISO 14737	ASTM A 27
Hitzebeständiger Stahlguss	DIN EN 10295	DIN EN 10295	ISO 11973	ASTM A 297 ASTM A 351
Korrosionsbeständiger Stahlguss	DIN EN 10283	DIN EN 10283	ISO 11972	ASTM A 743 ASTM A 744
Kaltzäher Stahlguss				ASTM A 352
Austenitischer Manganstahlguss			ISO 13521	A128/A128M
Gussstücke aus Titan- und Titanlegierungen	DIN 17865			ASTM B367
Aluminium- und Aluminiumlegierungen - Gussstücke	DIN EN 1706	DIN EN 1706	ISO 3522	ASTM B618 (Investment casting)
Kupfer- und Kupferlegierungen - Blockmetalle und Gussstücke	DIN EN 1982	DIN EN 1982	ISO 197-4 (Part 4)	ASTM B824
Magnesium- und Magnesiumlegierungen - Blockmetalle und Gussstücke	DIN EN 1753	DIN EN 1753	ISO 16220	ASTM B80
Gießereiwesen - Technische Lieferbedingungen Teil 1: Allgemeines Teil 2: Stahl Teil 4: Aluminium Teil 5: Magnesium	DIN EN 1559	DIN EN 1559	ISO 4990 (steel casting)	
Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Maß-, Form- und Lagetoleranzen für Formteile Teil 1 - 3	DIN EN ISO 8062	DIN EN ISO 8062	DIN EN ISO 8062	
Visual examination of the surface condition of investment castings - Steel, nickel alloys and cobalt alloys			ISO 19959	

[1] Werkstoffe entsprechen nur zum Teil denen der DIN und DIN EN-Normung

VDG-Merkblatt	Bezeichnung
P 690	Feinguss - Maßtoleranzen, Oberflächen, Bearbeitungszugaben
P 695	Technische Lieferbedingungen für Feingussstücke

(*Bezug der VDG-Merkblätter über e-mail: infozentrum@vdg.de*).

Informationen zu den nationalen Normen anderer Länder unter:

Australien: www.standards.com.au
Belgien: www.ibn.be
Canada: www.scc.ca
Dänemark: www.ds.dk
Deutschland: www.din.de
Finnland: www.sfs.fi
Frankreich: www.afnor.fr
Großbritannien: www.bsi-global.com
Indien: www.bis.org.in
Italien: www.uni.com
Japan: www.jisc.org
Niederlande: www.nen.nl
Norwegen: www.standard.no
Österreich: www.on-norm.at
Schweden: www.sis.se
Schweiz: www.snv.ch
Spanien: www.aenor.es
Südafrika: www.sabs.co.za

Länderübergreifende Normen:

Internationale Normen: www.iso.ch
Europäische Normen: www.cenorm.be

Allgemeine Prüfverfahren

Für die Prüfung der mechanisch-technologischen Kennwerte sind die jeweils aktuellen Fassungen der Normen anzuwenden.

Zugversuch (RT)	ISO 6892, DIN EN 10002-12
Zugversuch (HT)	ISO 783, DIN EN 10002-5
Brinellhärte	DIN EN ISO 6506-1
Vickershärte	DIN EN ISO 6507-1
Rockwellhärte	DIN EN ISO 6507-1
Härte-Umwertung	ISO 4964, DIN 50150
Kerbschlagarbeit (Chapy-V)	ISO 148, DIN EN 10045-1, DIN 50115
Umlaufbiegeversuch	DIN 50113
Zeitstandversuch Zug	DIN EN 10291
Innendruckversuch	DIN 50104

Spezielle Prüfverfahren

Für die Prüfung der mechanisch-technologischen Kennwerte sind die jeweils aktuellen Fassungen der Normen anzuwenden.

Inhalt	**Norm**
Oberfläche	DIN EN 1370: Gießereiwesen - Prüfung der Oberflächenrauheit mit Hilfe von Vergleichsmustern *(spezielle Angaben zur Oberflächengenauigkeit für Feingussteile siehe VDG-Merkblatt P 960)*
Magnetpulverprüfung	DIN EN 1369: Gießereiwesen – Magnetpulverprüfung
Eindringprüfung	DIN EN 1371-1: Gießereiwesen - Eindringprüfung - Teil 1: Sand-, Schwerkraftkokillen- und Niederdruckkokillen-Gussstücke
Ultraschallprüfung	DIN EN 12680: Gießereiwesen - Ultraschallprüfung
Durchstrahlungsprüfung	DIN EN 12681: Gießereiwesen – Durchstrahlungsprüfung VDG-Merkblatt P 541

Weiterführende Literatur

[1] Hauschild, E.: Feingießen - Geschichtliche Entwicklung und heutige Herstellung. konstruieren + giessen 18 (1993) H. 2, S. 11 - 17.

[2] Gabriel, J.: Aluminium-Feinguss wirtschaftlich konstruieren (mit Sonderteil SOPHIA-Verfahren) konstruieren + giessen 21 (1996) H. 1, S. 4 - 10.

[3] Liesner, C., u. R. Gerke-Cantow: Aluminium-Feinguss nach dem HERO Premium Casting-Verfahren. konstruieren + giessen 27 (2002) H. 2, S. 41 - 44.

[4] Zerstörungsfreie Gussteilprüfung: Magnet- und Eindringprüfverfahren, Durchstrahlungsprüfung. Sonderdruck, ZGV Düsseldorf.

[5] Technische Lieferbedingungen für Feinguss. VDG- Merkblatt P 695, VDG Düsseldorf.

[6] Europäische Normung: Prüfung der Oberflächenrauheit mit Hilfe von Vergleichsmustern - DIN EN 1370 und Visuelle Bestimmung von Oberflächenfehlern an Stahl-Sand-Gussstücken DIN EN 12 454. Sonderdruck, ZGV Düsseldorf.

[7] Feinguss: Maßtoleranzen, Oberflächen, Bearbeitungszugaben. VDG-Merkblatt P 690, VDG Düsseldorf.

[8] Rapid Prototyping für Feingussteile. Thementeil in: konstruieren + giessen 30 (2005) H. 1, S. 2 - 17.

[9] Generative Fertigungsverfahren - Rapid Technologien/Rapid Prototyping - Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen. VDI-Richtlinie Nr. 3404.

[10] Stahlguss: Herstellung - Eigenschaften - Anwendungen . Sonderdruck, ZGV Düsseldorf.

[11] Hauschild, E.: Stahlfeinguss - Möglichkeiten und Grenzen. konstruieren + giessen 18 (1993) H. 2, 18 - 22.

[12] DIN-Taschenbuch Nr. 455, Band 1: Gießereiwesen: Gusseisen und Stahlguss, Beuth-Verlag, Berlin.

[13] DIN-Taschenbuch Nr. 455, Band 2: Gießereiwesen: Nichteisenmetallguss, Beuth-Verlag, Berlin.

[14] Hesse, W,: Aluminium-Werkstoff-Datenblätter. Aluminium-Verlag, Düsseldorf.

[15] Konstruieren wie die Natur - Gussteile wachsen wie Bäume und Knochen. Sonderdruck, ZGV Düsseldorf.

[16] Gießgerechtes Konstruieren. Sonderdruck, ZGV Düsseldorf.

[17] Richtig Guss bestellen - Bei der Konstruktion fängt es an. Sonderdruck, ZGV Düsseldorf.

[18] Die wirtschaftliche Gusskonstruktion - Grundregeln für das gießgerechte Gestalten. Merkblatt, ZGV Düsseldorf.

[19] Aluminium-Taschenbuch, Aluminium-Verlag, Düsseldorf.

[20] Aluminium-Merkblatt V 2, Herausgeber: Aluminium-Zentrale, Düsseldorf.

[21] Aluminium-Gusslegierungen. Herausgeber: Vereinigung Deutscher Schmelzhütten, Düsseldorf.

[22] Aluminium-Merkblatt: Werkstoffe W8.- Herausgeber: Aluminium-Zentrale, Düsseldorf.

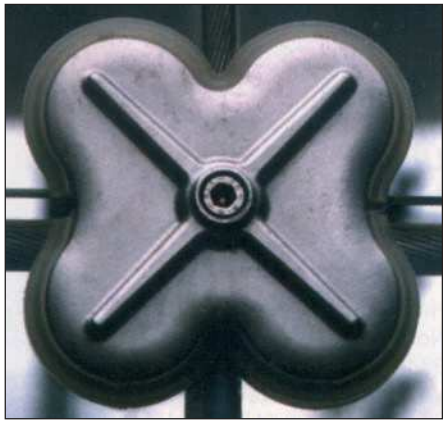


Bild 136: Lagergehäuse für Turbolader aus G25CrMo4 (W.-Nr. 1.7218) mit Keramikkern (weiß) gefertigt, Abmessungen: 125 x 200 mm, Gewicht: 4 200 g (links) (Bild: Zollern, Sigmaringen)
Bild 137: Kreuzklemme, bestehend aus vier Feingussteilen aus GX5CrNiMo16-5 (W.-Nr. 1.4405) zur Fixierung des Knotenpunktes und Befestigung von Glasscheiben für die Außenfassade vom Kempinski-Hotel in München (rechts) (Bild: Dörrenberg, Engelskirchen)

Glossar

Gebräuchliche Bezeichnung	Weitere Bezeichnungen	englische Bezeichnung
Feingießverfahren[1]	Feingussverfahren	Investment casting process, shell mold process
Wachsausschmelzverfahren[2]	Modellausschmelzverfahren, mit Verwendung von ausschmelzbaren Modellen als Modellwerkstoff	Lost wax process
Keramikformverfahren	Präzisionsgussverfahren	Shaw process, ceramic mold process
Kompaktformverfahren	Gipsguss, Gipsgussverfahren, Küvettenguss, Küvettenformverfahren, Blockformverfahren,	Block mold process
Küvette[3] Muffel[4]	Keramikform mit hitzebeständigem Formkasten bzw. mit hitzebeständiger zylindrischer Formhülse	Block mold
Modelltraube	Kompletter Ausschmelzmodell-Einguss-Verbund	Pattern assembly
Formschlicker	Aufschlämmung feingemahlener feuerfester Stoffe und Binder als Tauchmasse für Keramikschalenbildung um Wachsmodelle	Slurry, suspension
Ausschmelzmodell	Modellwerkstoffe sind z.B.: Feingusswachs, Wachs, Polystyrol(PS), Polyethylen(PE),Polymethylmetacrylat(PMMA)	Heat-disposable pattern, Investment wax
Verlorene Modelle	Ausschmelzmodelle Wachsmodelle	Loast pattern Wax pattern
Wachsspritzform	Matrize zur Herstellung der Ausschmelzmodelle	Wax injection mould
Feingussbinder	Wässrige Tauchmasse für Schalenformen, flüssiges Bindemittel zur Herstellung von Schalenformen	Binder for investment casting process
Feingussrohteil	Feingussstück im Gusszustand (unbearbeitet)	Unfinished investment casting, raw investment casting, Undressed investment casting
Feingussteil	Gussstück nach dem Feingießverfahren in keramischer Schalenform gefertigt	Investment casting
Rapid Prototyping [5]	Schnelle Herstellung von Prototypen, generierende Prozessketten	Rapid Prototyping(RP), solid freeform modeling(SFM)
Rapid Manufacturing [6]	Schnelle Produktion von Bauteilen	Rapid Manufacturing
Individual Manufacturing [6]	Individuelle Herstellung von Bauteilen(Just in time).	Individual Manufacturing
Flexible Manufacturing	Flexible Herstellung von Bauteilen	Flexible Manufacturing
Lasersintern, selektives Lasersintern(SLS)	3D-Herstellung von Ausschmelzmodellen aus hochpolymeren Pulvern	Selective laser sintering(SLS)
n. b.	3D-Herstellung von Ausschmelzmodellen aus strang- oder fadenförmigen Hochpolymeren	Fused deposition Modelling(FDM), Fused layer modeling(FLM)
3D-Wachsdrucker	3D-Herstellung von Ausschmelzmodellen aus granulierten Hochpolymeren	Multi-Jet Modelling(MJM)
3D-Drucker	3D-Herstellung von Ausschmelzmodellen aus Pulvern mittels Bindern	3D-Printing(3DP)
n. b.	3D-Herstellung von Ausschmelzmodellen aus flüssigen, breiförmigen Polymergemischen	Poly-Jet Modelling(PJM)
SFM-Verfahren	Formgebung ohne Formwerkzeuge	Solid-Freeform-Modelling

[1] Nach dem Sprachgebrauch der deutschen Feingießereien: Herstellung von Gussteilen unter Verwendung von in Wachsmodellspritzformen hergestellten Wachsmodellen aus speziellen Feingusswachsen und keramischen Formschalen

[2] Verwendung von Wachs als Modellwerkstoff

[3] wird häufig beim Schmuckguss verwendet

[4] wird ausschließlich beim Dentalguss verwendet

[5] Schnelle Herstellung von Prototypen prinzipiell nach allen technischen Möglichkeiten. Im Allgemeinen Spachgebrauch sind aber damit die „generierenden“ Prozessketten gemeint. Die Eigenschaften des Prototypbauteils entsprechen nicht unbedingt den geforderten Eigenschaften des Serienbauteils.

[6] Die Bauteileigenschaften entsprechen den geforderten Eigenschaften.

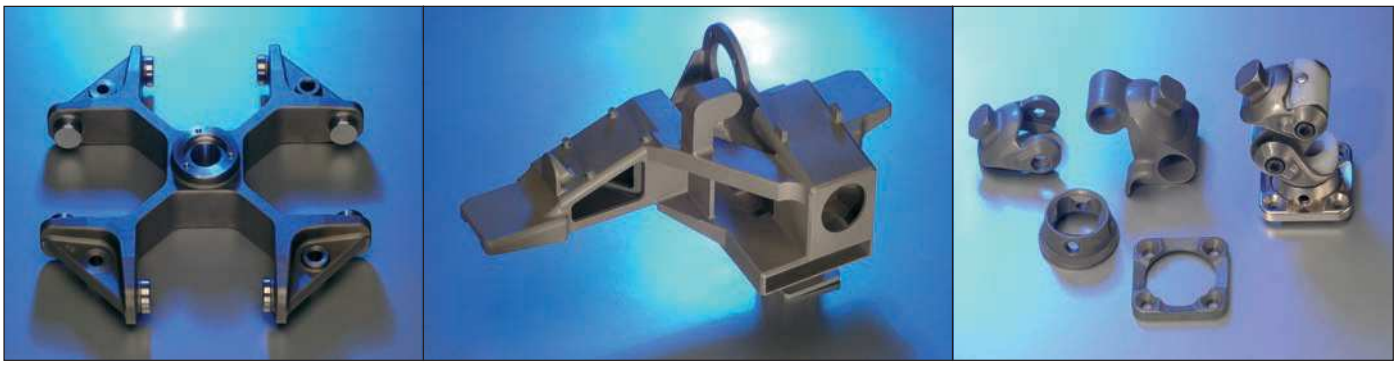


Bild 138: Rotorkreuz für Laborzentrifuge in der Medizintechnik aus G46Cr13 (W.-Nr. 1.4034), Abmessungen: Dmr. 280 x 42 mm, Gewicht 4 000 g (Bild links)

Bild 139: Kreuzkopf für Elektronik im Bereich Optik aus GX5CrNi19-10 (W.-Nr. 1.4308), Abmessungen: 360 x 195 x 180 mm Gewicht: 3 850 g (Bild Mitte)

Bild 140: Feingussteile für Beinprothese (links) sowie bearbeitete und montierte Baugruppe (rechts) aus dem Werkstoff GX5CrNiMoNb19-11-2 (W.-Nr. 1.4581) (Bild rechts) (alle Bilder: Buderus, Moers)

Bild 141: Gitterplatte für Reaktor aus dem Werkstoff GX7CrNiNB18-9, Abmessungen: 135 x 54 mm, Gewicht: 6 600 g (Bild links)

Bild 142: Zwischenstück zwischen Bohrkopf für Erdarbeiten und Antriebswelle aus dem Werkstoff GX5CrNiCu16-4-3, Abmessungen: 375 x 145 mm, Gewicht 20 000 g (Bild Mitte)

Bild 143: Anschlussgehäuse für Füllstandsmessung aus dem Werkstoff GX2CrNiMo18-14-3 (W.-Nr. 1. 4435), Abmessungen: 165 x 124 x 120,5 mm, Gewicht: 6 600 g (Bild rechts) (Alle Bilder: Zollern, Sigmaringen)

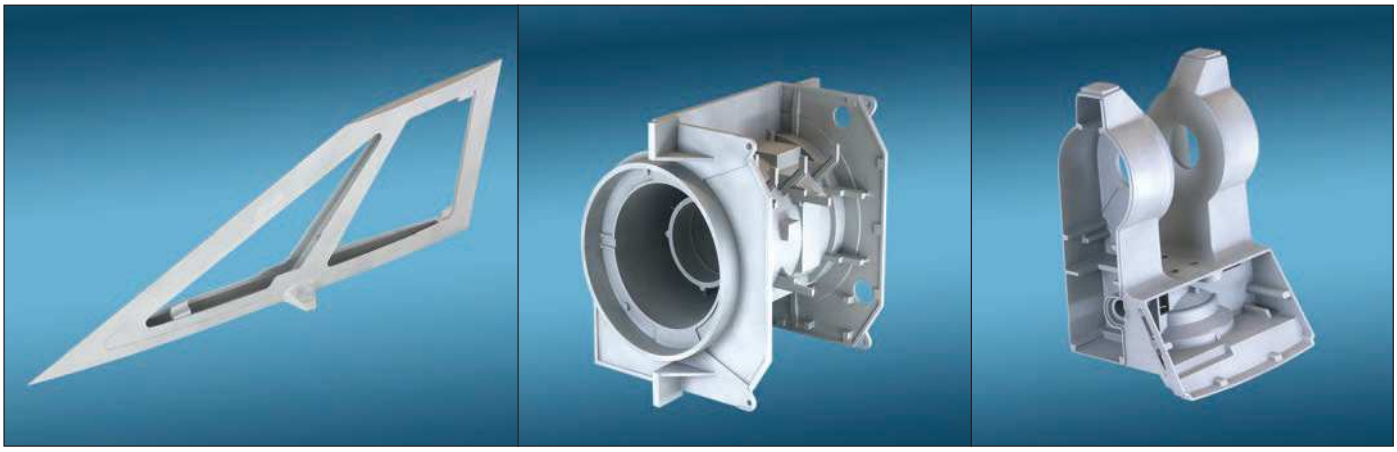
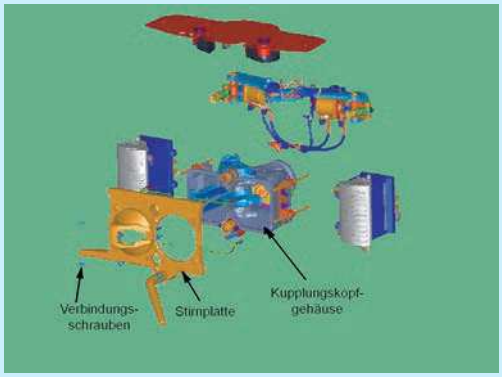


Bild 144: Flügelstrukturbauteil aus dem Werkstoff EN AC-AlSi7Mg0,6 wa (W.-Nr. EN AC-42200) nach dem Sophia-Verfahren gefertigt, Abmessungen: 840 x 335 x 45 mm, Gewicht: 2 150 g (Bild links)

Bild 145: Motorgehäuse für Anwendungen in der Luftfahrt aus dem Werkstoff EN AC-AlSi7Mg0,6 wa (W.-Nr. EN AC-42200), Abmessungen: 370 x 320 x 400 mm, Gewicht 2 700 g (Bild Mitte)

Bild 146: Stütze für optisches Gerät aus dem Werkstoff EN AC-AlSi7Mg0,3 wa (W.-Nr. EN AC-42100), Abmessungen: 190 x 200 x 260 mm, Gewicht: 1 807 g (Bild rechts) (Alle Bilder: Zollern, Soest)

Stirnplatte für Scharfenbergkupplung



Parameter	**Stirnplatte für VOITH TURBO Scharfenberg** (Schubert & Salzer, Lobenstein)
Werkstoff Gussausführung Bauteil Abmessungen Gewicht	G26CrMo4 (W.-Nr. 1.7221) / GX5CrNi19-10 (W.-Nr. 1.4308) Feingussteil aus verschiedenen Stahlgusslegierungen Stirnplatte für Kupplungskopfgehäuse 640 x 381 x 67 mm 18,3 kg
Besondere Eigenschaften	In der bisherigen Bauweise war die Stirnplatte fester Bestandteil des Kupplungskopfgehäuses. Jeder Kupplungstyp benötigte ein oder mehrere dieser Sandgussgehäuseteile. Durch Trennung der Stirnplatte vom Kupplungsgehäuse kann dieses Gussteil jetzt für vier verschiedene Kupplungstypen eingesetzt werden. Damit lassen sich eine Vielzahl von Varianten abbilden. Durch eine funktiongerechte Umstellung auf ein Feingussteil konnten zudem bisher aufwändig mechanisch bearbeitete Flächen bereits durch die saubere Gussoberfläche abgebildet werden. Optional kann die Stirnplatte auch in Nirosta-Stahl hergestellt werden. In diesem Fall ist keine Beschichtung der Stirnplatte erforderlich. Durch den Einsatz dieses Feingussteils konnten erhebliche Vorteile in der Beschaffung, Fertigung, Montage und Wartung beim Kunden erzielt werden.

Im Internet unter www.bdguss.de:

Werkstoff- und Konstruktionshinweise der ZGV-Zentrale für Gussverwendung im Direktzugriff für Gussanwender und Gusskonstrukteure

Mit einem Mausklick zu wissenswerten Informationen über die Gusswerkstoffe und nützlichen Hinweisen zur Gestaltung von Gussteilen und interessanten Gusslösungen handlich als einseitige PDF-Dateien zum Download mit Hinweisen auf weiterführende Informationen

ZGV GUSS

© ZGV-Zentrale für Gußverwendung

FEINGUSS BLANK GmbH
Industriestraße 18 · 88499 Riedlingen
P +49 7371 182-100
E-Mail sales@feinguss-blank.de
www.feinguss-blank.de