

3. Grundlagen der Präzisionsgusstechnik

3.1 Verfahrensablauf, Einsatzgebiete und Gusswerkstoffe

Unter Präzisionsguss oder Feinguss versteht man Verfahren mit verlorenem Modell und verllorener Form. Mit diesem Verfahren wird von allen Gießverfahren die beste Genauigkeit und Oberflächenqualität erzielt [FRITZ93]. Grundlage dieser Verfahren sind Modelle, die meist aus Wachs hergestellt werden. Diese Modelle werden mit keramischer Masse umhüllt. Durch Ausschmelzen des Wachses und Brennen der Keramik entstehen Hohlformen, in die das flüssige Metall eingegossen wird. Daher wird das Verfahren auch als Wachsausschmelzverfahren bezeichnet. Um den Gusskörper zu erhalten, werden die Formen nach dem Erstarren der Metallschmelze zerstört. Nach dem Entfernen der Gussform werden die Gussteile vom Angussystem getrennt und i. a. mechanisch nachbearbeitet. Die Modelle können dreidimensional sein und müssen keine Trennebene aufweisen. Auf diese Weise lässt sich im Prinzip von jedem dreidimensional strukturierten Wachsmo­dell eine Kopie aus Metall herstellen, es muss lediglich ein Anguss vorgesehen sein. Das Wachsausschmelzverfahren war bereits im Altertum bekannt und hat die menschliche Kulturgeschichte mit beeinflusst [WÜBBENHORST84]. Heutzutage findet der Präzisionsguss vielfältige Anwendung in der Industrie, der Dentaltechnik, im Kunstgewerbe und der Schmuckherstellung [BRUNHUBER88].

Mit Präzisionsgussverfahren lassen sich praktisch alle über eine Schmelze herstellbaren Metalle und Legierungen verarbeiten. Da es sich um vergleichsweise aufwendige Techniken handelt, ist der wirtschaftliche Einsatz dieser Techniken vor allem dann vorteilhaft, wenn hochwertige Werkstoffe eingesetzt werden und durch die hohe Abbildungsgüte und Oberflächenqualität nur eine geringe mechanische Nachbearbeitung erfolgen muss, oder sich durch die hohe dreidimensionale Gestaltungsfreiheit Fügeschritte einsparen lassen. Je nach Anwendungsgebiet kommen unterschiedliche Verfahrensvarianten zum Einsatz:

- *Feinguss für technische Funktionsteile (Automobilbau, Feinwerktechnik, chemische Technik)*
- *Feinguss für medizinische Implantate*
- *Dentalguss*
- *Kunst- und Schmuckguss*

In der Literatur werden die unterschiedlichen Verfahren i.a. nicht im Zusammenhang diskutiert. Daher sind typische Beispiele für Präzisionsgussteile aus den unterschiedlichen Bereichen in Tabelle 3.1 zusammengestellt.

Tabelle 3.1: Anwendungsbeispiele von Präzisionsgussverfahren.

Verfahren	typische Gussteile	Legierungen	typisches Gewicht der Teile	Qualität der Guss-Oberflächen und Nachbehandlung
Technischer Feinguß	Turbinenschaufeln [ADAM98]	Nickel-Super-Legierungen	einige kg	Schleifen, Polieren $R_a = 0,6 - 1\mu\text{m}$
	Wirbelkammer für Dieselmotor [FRITZ93]	Martensitischer Stahl	ca. 50g	$R_z = 5,9-32\ \mu\text{m}$ Schleifen, Polieren
	Lagerelement für Flugzeuglandeklappe [WERNIG90]	Aluminium-Legierungen Titan-Legierungen	einige kg	Mechanisches Entfernen der Gussform Abfräsen der spröden Randschicht (Alphacase)
Feinguss für medizinische Implantate	Hüftgelenksprothesen, Kniegelenke [WERNIG90]	Co-Cr-Mo-Legierungen, Titan	einige 100 g	Sandstrahlen, Schleifen, Polieren
Schmuckguss	z.B. Ringe Anhänger [DEGUSSA95]	Edelmetall-Legierungen Au-Ag-Cu Ag-Cu u.a.	5 g	Glanzstrahlen Beizen Galvanisieren
Dentalguß	Gebissprothesen	Co-Cr-Mo-, Ni-Cr-Mo-Legierungen Titan	10 g	Sandstrahlen Polieren Entfernen der Oxidschichten
	Kronen und Brücken (festsitzender Zahnersatz) [EICHNER95]	Edelmetall-Legierungen: Au-Ag-Cu, Ag-Pd-Cu u.a.	kleiner 1 g bis einige g	$R_a < 1\mu\text{m}$ Glanzstrahlen Polieren Beizen Galvanisieren

Beim technischen Feinguss geschieht die Herstellung der verlorenen Modelle durch Spritzgießen von Modellwachsen, beim Dentalguss durch Abbildung vorhandener Strukturen (Gebissabdruck) und durch freies Modellieren. Typischerweise schmelzen die Modellwaxse bei Temperaturen unter 100 °C. Bei kleinen Modellkörpern der Dentaltechnik werden teilweise Kunststoffe als Modellwerkstoffe eingesetzt. Aus den verlorenen Modellen werden durch Umhüllen mit Keramik Schalenformen oder Kompaktformen hergestellt. Möglich ist auch eine Kombination beider Verfahren.

Schalenformen werden v.a. für größere Gussobjekte eingesetzt, wenn die Formfüllung nur durch die Schwerkraft erfolgt [FLEMMING93, CLEGG91]. Zur Herstellung der Schalenformen werden mehrere Modelle aus Wachs an ein Angusssystem montiert und in

einen Schlicker aus Binder und Füllstoff getaucht. Meist kommen Silikatbinder zum Einsatz. Nach dem Abtropfen werden gröbere Partikel aufgestreut („Besanden“). Der Vorgang wird nach dem Trocknen der Schicht wiederholt. Auf diese Weise wird eine Formschale aufgebaut, wobei zunehmend gröbere Partikel zum Besanden verwendet werden. Nach dem Trocknen der Formschalen erfolgt das Wachs austreiben im Ofen. Dies geschieht durch heißen Dampf. Dadurch schmilzt das Wachs an der Oberfläche zur Form sofort an und fließt aus der Form heraus. Der keramische Brand der Formschalen erfolgt bei 900-1000°C. In die heißen Gussformen wird das erschmolzene Metall abgegossen. Die erstarrten und erkalteten Gusskörper werden anschließend von der umgebenden Formschale befreit und vom Angusssystem getrennt.

Kompaktformen werden bei kleinen Gussstücken, wie sie im Dentalguss üblich sind, hergestellt [CAESAR88]. Hierbei werden fertig vorgemischte Einbettmassen verwendet, die mit Wasser oder einer Anmischflüssigkeit unter Vakuum angerührt werden. Die Einbettmassen sind gips-, phosphat- oder silikatgebunden und enthalten keramische Füllstoffe. Die verlorenen Modelle aus Wachs werden unter Verwendung von Stahlringen so eingebettet, dass eine massive Form entsteht. Der Vorteil dieser Technik liegt bei der höheren Stabilität der Gussformen, die somit einer höheren Beanspruchung bei der Formfüllung standhalten können, wie sie z. B. beim Schleuderguss auftritt. Im Dentalguss haben sich heutzutage phosphatgebundene Einbettmassen weitgehend durchgesetzt [EICHNER95].

Eine Kombination aus Schalen- und Kompaktform findet Anwendung beim Titanguss [SCHÄDLICH89]. Auf dem Wachsmo- dell wird dabei zunächst eine Schale aus besonders feuerfestem Material aufgebaut. Anschließend erfolgt die Herstellung der Kompaktform durch Einbetten in phosphatgebundene Einbettmasse.

Im dentalen Modellguss von Co-Cr-Mo-Legierungen oder Titan werden häufig *Feineinbettungen* angewandt [HAGG95]. Das Wachsmo- dell wird hierbei mit einem keramischen Schlicker beschichtet und anschließend in phosphatgebundene Keramikmasse eingebettet. Hierdurch soll die Gussoberfläche verbessert werden. Problematisch ist bei dicken Schichten die unterschiedliche Wärmeausdehnung zwischen Schichtmaterial und umgebender Einbettmasse, was zu Rissen und Gussfehlern führen kann.

Welche Präzision im Feinguss im Einzelfall erreicht werden kann, ist das Know-How des Gießereibetriebes. Anhaltswerte liefert die DIN1680. Bei Gussteilen mit Abmessungen bis zu 6 mm werden z.B. an Aluminiumwerkstoffen lineare Maßabweichungen bis 0,2 mm toleriert.

Im technischen Feinguss werden an Turbinenschaufeln bei kleinsten Gussstückgewichten von ca. 2 g minimale Wanddicken bis zu 0,6 mm realisiert [ADAM98]. Die kleinsten

Gussobjekte mit Abmessungen im Millimeterbereich bei minimalen Wandstärken im Bereich 0,3 mm werden beim Dentalguss erreicht. Die erzielbare Maßgenauigkeit ist von der Größe der Gussteile und den Gusswerkstoffen abhängig. Die Oberflächenqualität hängt in hohem Maße vom Gusswerkstoff und Formsystem ab. Bei den hochschmelzenden Legierungen Stahl, Co-Cr-Mo und Titan bilden sich harte Oxidschichten aus [SCHÄDLICH89]. Das Randgefüge im Gusswerkstoff unterscheidet sich vom Inneren des Gussteils. Beim Titan kommt es durch Sauerstoffaufnahme und Reaktionen mit der Gussform zur Ausbildung einer spröden Randschicht, die mechanisch entfernt werden muss. Dies begrenzt die mit diesen Werkstoffen erzielbare Abbildungsgüte und Oberflächenqualität. Im Dentalguss werden durch den Einsatz von Edelmetall-Legierungen die besten Oberflächengüten erzielt. Minimalwerte liegen in der Größenordnung $R_a = 0,5 \mu\text{m}$ [EICHNER95]. Die Gussobjekte werden im Allgemeinen chemisch gebeizt, glanzgestrahlt und poliert [CAESAR88]. Abb. 3.1 zeigt im Dentalguss hergestellte Teile für Zahnersatz [DEGUSSA95].

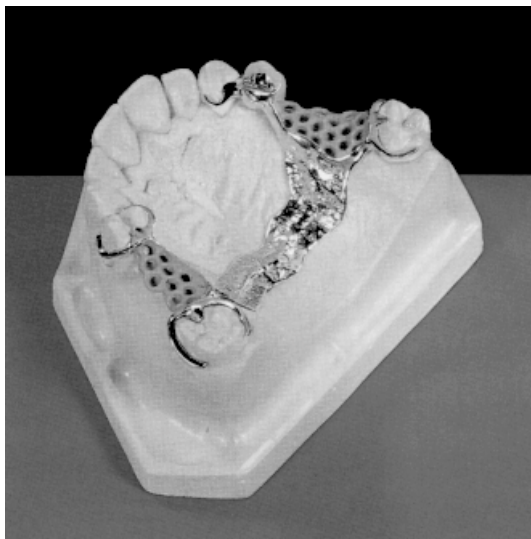


Abb. 3.1: Im dentalen Präzisionsguss hergestellte Teile für Zahnersatz: Das linke Bild zeigt eine herausnehmbare Modellgussprothese aus einer Co-Cr-Mo-Legierung. Auf dem rechten Bild sind Kronen aus einer Goldlegierung mit Keramikverblendung zu sehen, die als feststehender Zahnersatz dienen [DEGUSSA96].

3.2 Materialien für Gussformen

In der modernen Gießtechnik werden verlorene Formen für den Präzisionsguss aus keramischen Pulvern als Füllmaterial und einem flüssigen Binder hergestellt werden. Bei Kompaktformen handelt es sich um Binder auf Phosphat-, Gips- oder Silikatbasis. Für die Schalengusstechnik finden vorwiegend silikatische Binder Verwendung. Aus dem Füllstoff und dem Binder wird eine plastische Einbettmasse hergestellt, mit der das verlorene Modell umhüllt wird. Die Gussform muss die folgenden Anforderungen erfüllen [SCHULZ76]:

- chemisch inertes Verhalten gegenüber der Metallschmelze
- geeignetes Dimensionsverhalten
- niedrige Oberflächenrauheit und Porosität
- Fließfähigkeit und Verarbeitbarkeit
- ausreichende mechanische Festigkeit
- leichtes Entfernen vom Gussteil

Als Füllstoffe für Einbettmassen der Dentaltechnik finden vor allem Quarz und Cristobalit Anwendung. Beide Mineralien haben die chemische Formel SiO_2 , jedoch unterschiedliche Kristallstruktur. Außerdem findet im Feinguss die amorphe Modifikation des SiO_2 , genannt Schmelzquarz oder amorpher Quarz Verwendung. Für die Herstellung von Gussformen finden im Feinguss außerdem Aluminiumoxid, Zirkonoxid, Zirkonsilikat und gebrannte Tonminerale wie Mullit und Molochite Verwendung. Für den Einsatz ist v.a. die thermische Ausdehnung von Bedeutung. In Tabelle 3.2 sind die wichtigsten keramischen Füllmaterialien aufgeführt [CLEGG91]. Die besondere Bedeutung der Mineralien Quarz und Cristobalit liegt im großen thermischen Ausdehnungsverhalten begründet. Diese Mineralien durchlaufen, im Gegensatz zum amorphen Quarz, Phasenumwandlungen, die mit einer starken Volumenzunahme verbunden sind. Das spezifische Volumen von Quarz nimmt mit der Temperatur überproportional zu. Am Quarzsprung bei 573 °C tritt eine Volumenänderung von 0,8 % auf, der so genannte Tiefquarz wandelt sich in den Hochquarz um. Das spezifische Volumen von Cristobalit ist bei Raumtemperatur um 14 % größer als das von Quarz. Nach Literaturangaben tritt bei 270 °C eine Volumenvergrößerung von 2,8 % auf, es handelt sich um den Übergang des Tiefcristobalit in den Hochcristobalit [SALMANG86]. Die Werte in der Praxis weichen bedingt durch kinetische Effekte und Verunreinigungen bzw. Fehlordnungen in der Kristallstruktur der Rohstoffe von den Literaturwerten ab. Abb.3.2 zeigt die lineare thermische Expansion von Quarz, Cristobalit und amorphem Quarz, gemessen an den Rohstoffen im Vergleich [DEGUSSA96].

Tabelle 3.2: Eigenschaften keramischer Füllmaterialien für Präzisionsgussformen [CLEGG91].

Stoff	Schmelzpunkt [°C]	Dichte [kg/m ³]	Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ K]
Schmelzquarz	1710	2,2	0,5
Quarz	1710	2,6	*)
Cristobalit	1710	2,7	*)
Aluminiumoxid	2050	3,9	7- 8
Zirkonoxid	2677	5,0	10 - 12
Zirkonsilikat	2420	4,2 - 4,6	4,5
Magnesiumoxid	2800	2,5	11 -30
Titanoxid	1850	3,5	6 -8
Mullit	1810	3,1	6,0
Molochite	1600	2,7	4,4

*) Diese Materialien weisen Phasenumwandlungen auf, siehe Text und Abb. 3.2

Man erkennt, dass Cristobalit die größte lineare thermische Expansion von 1,6 % zeigt. Quarz zeigt bis ca. 650 °C eine lineare Expansion von 1,3 % und mit weiterer Temperaturerhöhung eine Kontraktion. Im Vergleich dazu zeigt amorpher Quarz eine sehr niedrige thermische Expansion von unter 0,1 %. Aufgrund des Expansionsverhaltens nimmt die lineare Expansion von Einbettmassen mit zunehmendem Anteil an Cristobalit zu.

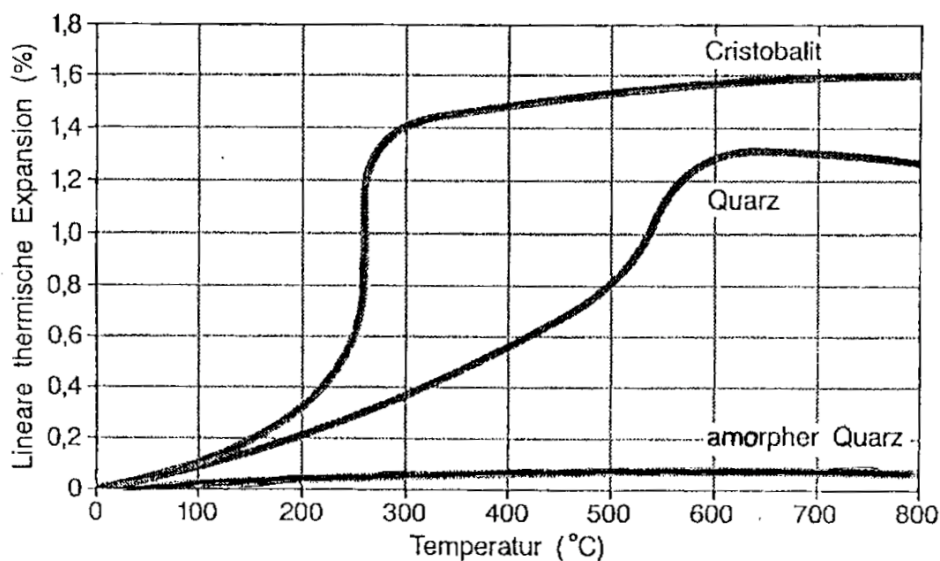


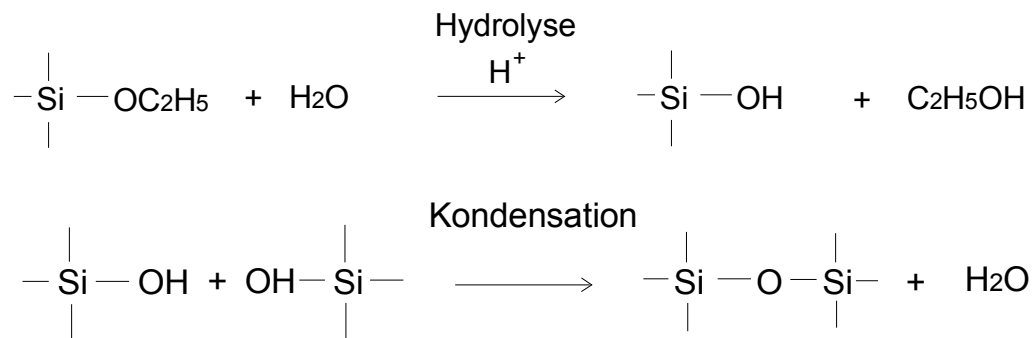
Abb. 3.2: Thermisches Ausdehnungsverhalten von Quarz, Cristobalit und amorphem Quarz.

Silikatgebundene Gussformen

Silikatgebundene Systeme bilden die Grundlage für die Schalenfeingusstechnik [FLEMMING93]. Aus silikatgebundenen Einbettmassen werden in der Dentaltechnik Gussformen für den Modellguss hergestellt. Aufgrund des Einsatzes phosphatgebundener Einbettmassen, die leichter handhabbar sind, werden die silikatgebundenen Einbettmassen zur Herstellung von Kompaktformen kaum mehr verwendet [EICHNER95]. Phosphatgebundene Einbettmassen enthalten jedoch auch silikatische Anteile in Form von Kieselsole.

Bei den Kieselsole lassen sich alkoholische Kieselsole (Alkosole) und wässrige Kieselsole (Hydrosole) unterscheiden. Lösungen der Kieselsole sind entweder im Sauren oder im Basischen stabil (Abb. 3.3) *Wässrige Kieselsole* (Hydrosole) stellen kolloidale alkalische Lösungen von amorphem Siliziumdioxid in Wasser dar. Handelsübliche Lösungen weisen eine SiO_2 -Konzentration von 27 - 40 % auf. Diese hohen Konzentrationen sind nur möglich, weil kolloidale Teilchen vorliegen und durch geringe Anteile an stabilisierenden Kationen (NH_4^+ , Na^+) eine Agglomeration und Ausfällung verhindert wird. Die Lösungen sind durch die SiO_2 -Konzentration, den pH-Wert, die Alkalität, sowie die Dichte und Viskosität charakterisiert. Die kugelförmigen Partikel liegen in der Größenordnung von 10 bis 60 nm. Zwischen pH 4 und 8 ist eine verstärkte Gelbildung zu erwarten. Hydrosole werden im Feinguss vorzugsweise für die erste Schicht verwendet. *Alkoholische Kieselsole* (Alkosole) sind Kieselsäureesterhydrolysate, die in stabilisierter Form vorliegen oder vor Verwendung durch saure Hydrolyse aus Kieselsäureestern hergestellt werden. Die Bindeeigenschaften der hydrolysierten Lösungen basieren auf der katalysierten, vollständigen Hydrolyse und dem Ablauf von Kondensationsreaktionen unter Abspaltung von Wasser (Dehydratation), die zu höhermolekularen Gelabscheidungen führen.

Im technischen Feinguss wird der Binder aus *Ethylsilikat* hergestellt, welches wasserunlöslich ist. Bei der Umwandlung des Ethylsilikats während der Formherstellung handelt es sich um einen Sol-Gel-Prozess. Dieser lässt sich in eine *Hydrolysereaktion*, eine *Kondensationsreaktion*, sowie eine anschließende *Trocknung* und *Umwandlung in eine Keramik* gliedern. Durch Zugabe von Wasser und Ethylalkohol als Lösungsvermittler, sowie eines Reaktionsbeschleunigers (z. B. HCl) erfolgt zunächst eine Teilhydrolyse. Hierbei wird Alkohol freigesetzt. Bei der folgenden Kondensationsreaktion bildet sich unter Abspaltung von Wasser ein Netzwerk aus höhermolekularen Kieselgelteilchen aus.



Die beiden Reaktionen Hydrolyse und Kondensation sind z. T. überlagert und hängen vom pH-Wert ab. Sie werden sowohl von Säuren als auch von Basen katalysiert. Die Hydrolyse steigt bei kleinen und bei großen pH-Werten stark an. Am isoelektrischen Punkt des Siliziumdioxids, an dem die Partikel ungeladen sind, ist die Kondensation minimal (pH = 2). Durch den Trocknungsprozess werden Alkohol und Wasser freigesetzt, wodurch sich das Gel verfestigt. Der Sol-Gel-Übergang ist mit einer starken Schwindung verknüpft, weshalb eine reine Binderlösung noch nicht zur Formherstellung geeignet ist. Es werden daher Suspensionen hergestellt.

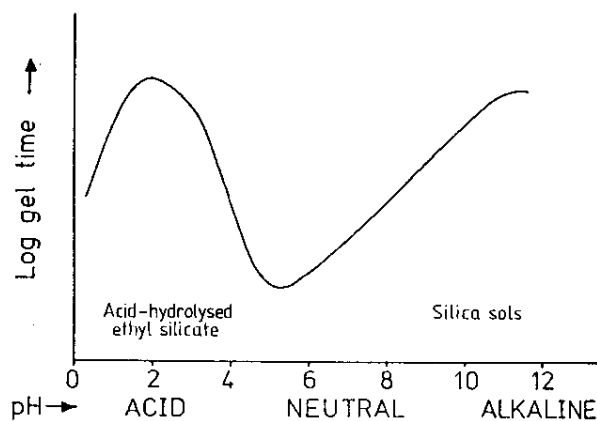
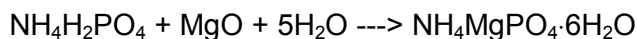


Abb 3.3: Kieselsole sind im Sauren oder im Alkalischen stabil. Die Zeit bis zum Gelieren des Silikatbinders nimmt im Sauren und Alkalischen stark zu, im Neutralen härten Kieselsole schnell aus [CLEGG91].

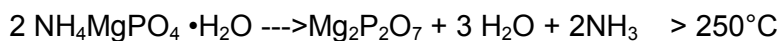
Beim Brennen der Keramikform erfolgt eine Umwandlung des Kieselgels in amorphes SiO₂ unter Freisetzung von Wasser [JONES94]. Das thermische Ausdehnungsverhalten ist im wesentlichen durch den Füllstoff bestimmt. Der silikatische Binder lagert sich dabei zwischen die Körner des Füllmaterials. Übliche Brenntemperaturen liegen bei 900 – 1200°C für 3 - 6 Stunden. Hohe Brenntemperaturen führen zu einer Erhöhung der Porosität der Gußform. Dadurch wird die Gasdurchlässigkeit der Formen erhöht.

Phosphatgebundene Einbettmassen

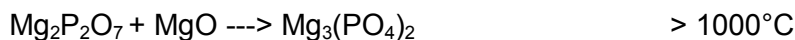
In der Dentaltechnik sind phosphatgebundene Einbettmassen das meist verwendete Material zur Herstellung verlorener Formen. Diese Einbettmassen bestehen aus dem Binder Magnesiumoxid und Ammoniumdihydrogenphosphat sowie den SiO₂-Modifikationen Quarz und Cristobalit als Füllstoff. Manche Einbettmassen enthalten zusätzlich Graphitpulver. Die vorgemischten Pulver werden mit einer Anmischflüssigkeit, die im wesentlichen aus wässrigem Kieselsol besteht, angerührt. Nach dem Anmischen erfolgt durch das Auskristallisieren des Ammoniummagnesiumphosphates bei Raumtemperatur die Verfestigung nach der folgenden Reaktionsgleichung [EICHNER95]:



Beim anschließenden Vorwärmprozess im Ofen kommt es zur Abspaltung von Wasser und Ammoniak und es bildet sich Magnesiumpyrophosphat:



Bei Temperaturen oberhalb 1000°C reagiert überschüssiges Magnesiumoxid weiter mit dem Phosphat und mit dem Silikat:



Dimensionsverhalten

Der Formherstellungsprozess ist mit Volumenänderungen der Einbettmasse verbunden. Hierbei konkurrieren Schwindung und Expansion. Die Expansion setzt sich aus der Abbindeexpansion und der thermischen Expansion zusammen. Es gilt:

$$\text{Gesamtexpansion} = \text{Abbindeexpansion} + \text{thermische Expansion}$$

Die Abbindeexpansion und thermische Expansion lassen sich durch die Konzentration der Anmischflüssigkeit steuern. Je höher konzentriert die Anmischflüssigkeit ist, desto größer ist im Allgemeinen die Abbindeexpansion.

Beim Brennen der Einbettmasse findet die Schwindung nur zwischen den sich berührenden Körnern des Füllstoffes statt, sodass ein poröser Keramikkörper entsteht. In den Bereichen zwischen den Körnern des Füllstoffes wandelt sich das Kieselsol der Anmischflüssigkeit in amorphes SiO₂ um. Die Expansion wird daher im wesentlichen durch das Füllmaterial bestimmt. Dieses ist bei dentalen Einbettmassen i.a. ein Gemisch aus Quarz und Cristobalit, sodass beim Quarzumwandlungspunkt 270 °C und beim Cristobalitemwand-

lungspunkt 573 °C eine starke Volumenzunahme auftritt. Die thermische Expansion wird durch die Konzentration der Anmischflüssigkeit zusätzlich beeinflusst (Abb. 3.4): Ein hoher Gehalt an Kieselzol erhöht die thermische Expansion.

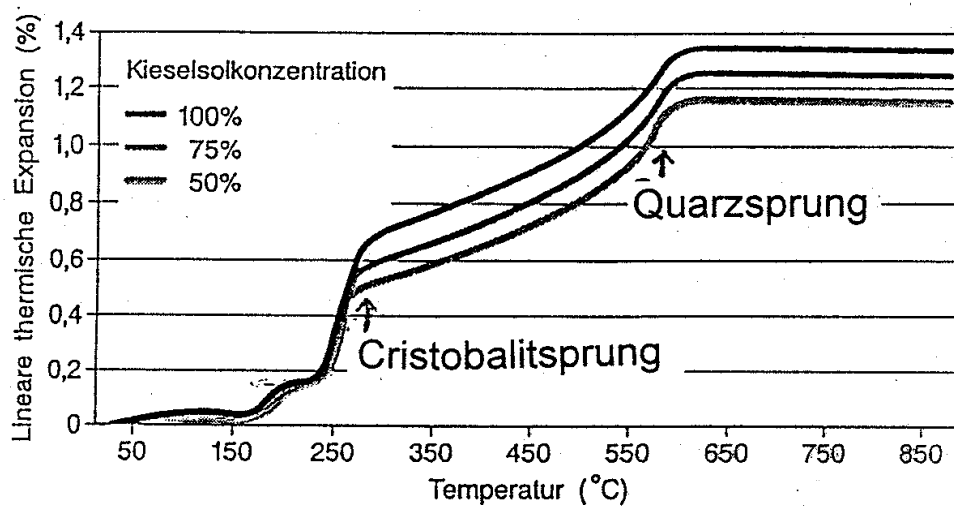


Abb. 3.4: Thermische Expansion einer phosphatgebundenen Einbettmasse in Abhängigkeit der Temperatur. Beim Quarz- und Cristobalit-Umwandlungspunkt tritt eine starke Volumenzunahme auf [DEGUSSA96].

Die lineare Gesamtexpansion der Einbettmasse lässt sich auf den Wert von 1,7 % einstellen, was in etwa der linearen thermischen Schwindung der Edelmetall-Legierungen bei Abkühlung von Erstarrungs- bis Raumtemperatur entspricht.

Oberflächenstruktur und Porosität

Die Oberflächenstruktur der Einbettmasse ist durch offene Porosität gekennzeichnet, die abhängig vom Gehalt an Kieselzol in der Anmischflüssigkeit ist. Die aus dem Kieselzol entstehenden Partikel aus amorphem Silikat dichten die Poren teilweise ab. Daher ist die Oberfläche des Innenhohlraums der Gussform bei hohem Kieselzolgehalt der Anmischflüssigkeit glatter. Bei graphithaltigen Einbettmassen kommt es durch die Pyrolyse des Graphits beim Vorwärmprozess zu einer höheren Oberflächenporosität als bei graphitfreien Einbettmassen. Der Graphitzusatz bewirkt durch die höhere Porosität eine höhere Gasdurchlässigkeit der Form und ein leichteres Ausbetten des Gusskörpers.

Phosphatgebundene Einbettmassen kommen im Dentalguss sowohl für Edelmetalle als auch für Modellguss-Legierungen bei Vorwärmtemperaturen bis 1100 °C zum Einsatz. Zur Herstellung konturgenauer Objekte aus Edelmetall-Legierungen werden besonders feinkörnige Einbettmassen verwendet. In der Praxis spielt die Verarbeitbarkeit eine entscheidende Rolle, sodass Einbettmassen nicht beliebig feinkörnig gemacht werden können.

Fließfähigkeit

Die Fließfähigkeit ist wichtig zur vollständigen, konturgenauen Abbildung des Modells und zum zügigen Befüllen der Gusskuvette. Einbettmassen weisen thixotropes Verhalten auf, d.h. sie werden unter Vibration dünnflüssiger. Die Fließfähigkeit wird nach der Norm durch das Ausbreitemaß einer vorgegebenen Menge Einbettmasse gemessen, die aus einem Muffelring auf eine Glasplatte fließt. Der mittlere Durchmesser des Fließkuchens wird nach dem Erstarren gemessen. Eine andere Möglichkeit ist das Messen der Eindringtiefe eines Kegels mit definiertem Gewicht.

Verarbeitungszeit

Die Verarbeitungszeit ist die Zeitspanne, in der die Einbettmasse noch genügend fließfähig ist, um eine Form füllen zu können. Der Verfestigungsbeginn der Einbettmasse lässt sich nach dem genormten Vicat-Test bestimmen [DIN EN 26873]. Bei diesem Test wird eine Nadel, belastet mit dem Gewicht von 300 g, wiederholt in die angemischte Einbettmasse abgesenkt und die Zeit ab dem ersten Kontakt von Pulver und Flüssigkeit registriert, in der die Nadel nicht mehr vollständig durch die Mischung hindurch auf den Boden trifft. Bei Einbettmassen für den Edelmetall-Präzisionsguss liegt die Verarbeitungszeit bei einigen Minuten.

Festigkeit

Die Druckfestigkeit phosphatgebundener Einbettmassen liegt je nach Zusammensetzung zwischen 4 N/mm^2 und 30 N/mm^2 [DENTAL95]. Durch eine höhere Kieselolonzentration der Anmischflüssigkeit wird die Festigkeit erhöht.

Gipsgebundene Einbettmassen

Gipsgebundene Einbettmassen bestehen, ähnlich wie phosphatgebundene Einbettmassen, aus feuerfesten Grundstoffen wie Quarz und Cristobalit mit Gips als Bindemittel und Hilfsstoffen. Die Anwendung gipsgebundener Einbettmassen ist aufgrund der Schwefelfreisetzung und der niedrigen Festigkeit auf einige Sonderanwendungen in der Technik und im Kunstguss begrenzt. In der Dentaltechnik haben sich gipsgebundene Einbettmassen beim Guss hochgoldhaltiger Legierungen mit Liquidustemperaturen von maximal 1000°C bewährt [EICHNER95]. Die mangelnde Festigkeit gipsgebundener Einbettmassen erlaubt keine scharfen Konturen oder freistehende Strukturen in der Gussform.

Weitere Bindersysteme

In der Dentaltechnik werden zum Gießen von Co-Cr-Mo-Legierungen so genannte Feineinbettungen angewendet. Dies sind spezielle Suspensionen zum Beschichten der Modelle vor dem eigentlichen Einbetten und bestehen aus den Basiskomponenten Wasserglas, Metallchelaterbindungen und Füllstoffen. Besondere Anstrengungen wurden zur Verbesserung der Oberflächenqualität im Titanguss unternommen. Hier wurden Frontschichten aus *Zirkonatbindern* und Zirkonsilikat als Füllstoff entwickelt [SCHÄDLICH89]. Versuche wurden außerdem mit Bindern auf Basis von *Titanestern* und *Aluminaten* unternommen [OTT90, 94, HAGG95]. Durch die Freisetzung der organischen Bestandteile während des Vorwärmprozesses weisen die genannten Suspensionen zur Feineinbettung eine gewisse Schwindung auf, sodass Oberflächen mit Restporosität entstehen.

3.3 Schmelz- und Gießverfahren

Für die Herstellung von Mikroteilen sind die im Dentalguss eingesetzten Gießverfahren interessant. Die Schmelzwärme wird durch eine elektrische Heizwicklung, eine Induktionsspule, eine Gasflamme oder durch einen Lichtbogen erzeugt. Der Schmelztiegel besteht entweder aus Keramik oder aus Graphit. Graphittiegel erzeugen bei hoher Temperatur an Luft eine reduzierende Atmosphäre aus CO, sodass bei Edelmetall-Legierungen die Schmelze vor Oxidation geschützt wird. Keramiktiegel werden bei Legierungen verwendet, die zur Kohlenstoffaufnahme neigen. Bei Edelmetall-Legierungen wird durch den Zusatz des Reduktionsmittels Borax die Oxidation der Schmelze verhindert [BRÄMER94].

Bei Gießgeräten mit *elektrischer Widerstandsheizung* wird die erforderliche Schmelzwärme durch eine Heizwicklung erzeugt, die den Tiegel umschließt. Die Wicklung besteht z.B. aus Platin-Rhodium. Das Verfahren eignet sich zum Schmelzen von Legierungen mit Schmelzpunkten bis ca. 1300°C. Derartige Geräte kommen beim Gießen von Edelmetall-Legierungen zum Einsatz. Bei *induktionsbeheizten Geräten* befindet sich das Metall im Inneren eines Tiegels, der von einer Spule umgeben ist. Über eine Röhre wird ein elektrisches Wechselfeld erzeugt, das im Metall Wirbelströme induziert, die zu einer starken Wärmeentwicklung führen. Als Tiegelmateriale werden Graphit oder Keramik verwendet. Die in das Metall eingekoppelte Energiemenge hängt von der Legierung und von der Arbeitsfrequenz ab. Moderne Anlagen arbeiten mit Hochfrequenz. Der Vorteil des Verfahrens besteht in der Möglichkeit des sehr raschen Schmelzens. Durch die direkte Einkopplung der Energie lassen sich auch höherschmelzende Legierungen verarbeiten. Die

induzierten Wirbelströme führen zu starken Konvektionen in der Schmelze, sodass eine gute Durchmischung erfolgt. Beim *Flammschmelzen* wird das Metall in einer keramischen Schmelzmulde mit einer Gas-Sauerstoff-Flamme geschmolzen. Das Verfahren erfordert handwerkliches Geschick und ist auf relativ kleine Metallmengen begrenzt. Beim *Lichtbogenschmelzen* wird das aufzuschmelzende Metall in einer keramischen Schmelzmulde elektrisch kontaktiert. Zwischen der oberhalb der Schmelzmulde angeordneten Gegenelektrode aus Wolfram und dem Metall wird ein Hochfrequenzlichtbogen gezündet.

Da zur Formfüllung die Schwerkraft nicht ausreicht, muss eine zusätzliche Kraft aufgewendet werden, um die Schmelze in die Form zu drücken. Dies geschieht im *Schleuderguss* durch die Zentrifugalkraft. Schmelztiegel und Gießform sind hierbei auf einem Schleuderarm mit Gegengewicht montiert. Die Metallschmelze verlässt dadurch den Tiegel und wird in die Form getrieben. Im *Vakuum-Druckguss* befinden sich die Schmelzeinrichtung und die Gießform in einem Kessel. Vor dem Abgießen der Schmelze wird ein Unterdruck erzeugt. Anschließend erfolgt das Abgießen z.B. durch Schwenken des Tiegels. Die Schmelze fließt zunächst durch die Schwerkraft in die Form. Die Formfüllung wird durch das nachfolgende Aufbringen von Druck auf die Schmelze erreicht. Bei kommerziellen Geräten läuft der Gießvorgang programmgesteuert ab [BEGO96, DEGUSSA96, HERAEUS96].

Ein zügiges Befüllen der Gussform ist vor allem bei reaktiven Metallen notwendig. Im Titanguss werden die Gussformen mit hohem Druck gefüllt, sodass die Vorwärmtemperatur möglichst niedrig gehalten werden kann, wodurch die Randschichtbildung im Gussteil minimiert wird. Andererseits ist bei empfindlichen Strukturen in der Gussform und weichen gipsgebundenen Einbettmassen eine schonende Formfüllung wünschenswert. Um dem Rechnung zu tragen, sind heute Schleudergussgeräte mit einstellbarer Enddrehzahl und regelbarer Anfahrbeschleunigung des Schleuderarms auf dem Markt erhältlich [LINN96].

3.4 Gestaltung von Gussteilen

Der Präzisionsguss mit verllorener Form bietet eine hohe geometrische Gestaltungsfreiheit. Dennoch müssen einige Regeln zur Erzielung fehlerfreier Gussteile beachtet werden. Kompakte Gussformen, wie sie im Dentalguss verwendet werden und auch im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz kamen, besitzen eine vergleichsweise hohe Wärmekapazität. Das Innere der massiven Form bleibt noch auf erhöhter Temperatur, während die Oberfläche nach der Entnahme aus dem Vorwärmofen schnell abkühlt, d.h. in der Gussform liegt zum Zeitpunkt des Einfließens des Metalls ein Temperaturfeld mit einem hohen

Wärmegradienten vor. Zum Erzielen lunkerfreier Gussstücke muss der Erstarrungsverlauf so vonstatten gehen, dass die Erstarrungsschwindung außerhalb des Gussobjektes vorliegt (Abb.3.5). Dies wird dadurch erreicht, dass die dünnwandigen Bereiche in der Gussform außen und die dickwandigen Bereiche innen positioniert werden. In den dickwandigen Bereichen des Gusskörpers bleibt das Metall am längsten flüssig, sodass diese als Speiser fungieren. Eine kontinuierliche Zunahme des Querschnitts ohne Einschnürungen von außen nach innen sorgt für ein ungehindertes Nachfließen der Schmelze, wodurch Lunker im Gussteil vermieden werden.

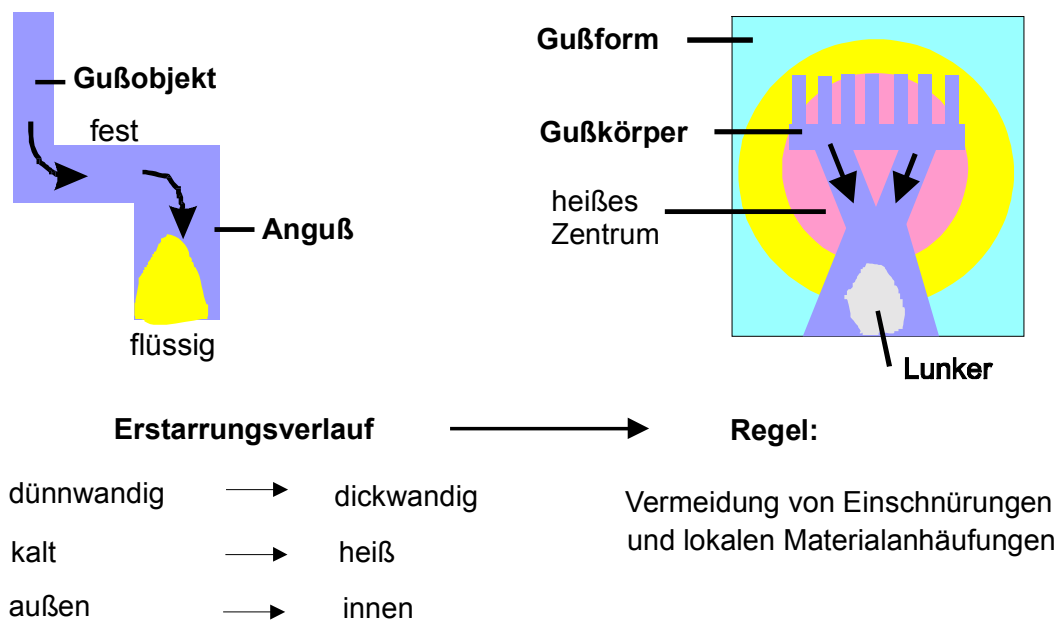


Abb. 3.5: Gießgerechte Gestaltung von Gußteilen bei Verwendung kompakter Gußformen [CAESAR88].

3.5 Gießbarkeit

Gießbarkeit ist ein Sammelbegriff für Eigenschaften, die in der Gießereipraxis von Bedeutung sind. Unter diesen Begriff fallen die Eigenschaften Fließ- und Formfüllungsvermögen, geringe Warmrissneigung, niedrige Porosität und Lunkerbildung, geringe Schwindung und Schrumpfung, wenig Seigerungen, hohe Oberflächengüte und gute mechanische Eigenschaften [BRÄMER93, FRITZ93, BRUNHUBER88]

Eine Legierung gilt als gießbar, wenn die genannten Eigenschaften unter Einsatz des gegebenen Gießverfahrens ausreichend gewährleistet werden können. Die Gussqualität

lässt sich im wesentlichen durch die Kriterien *Formfüllung*, *Oberflächengüte*, *Gefüge* und *Maßhaltigkeit* charakterisieren. Abweichungen von der Norm gelten als Gussfehler und sind entweder auf fehlerhafte Verarbeitung zurückzuführen oder durch die Grenzen der Verfahrenstechnik gegeben.

Formfüllung

Unvollständige Gussobjekte werden dadurch verursacht, dass die Schmelze erstarrt, bevor sie den Formhohlraum vollständig ausfüllen kann. Dies geschieht infolge zu niedriger Vorwärmtemperatur der Form oder zu geringe Überhitzung der Schmelze über die Liquidustemperatur. Eine weitere Ursache ist ein zu niedriger Fülldruck, sodass die Oberflächenspannung nicht überwunden werden kann.

Oberflächengüte

Die Oberflächenbeschaffenheit der Gussobjekte wird durch mehrere Faktoren bestimmt:

- *Gussperlen* am Gussobjekt sind mit Metall gefüllte ursprüngliche Luftblasen am Modell, die beim Einbetten nicht entfernt worden sind.
- *Erhabene (konvexe) Rauigkeit* wird bei Einbettmassen mit großporiger Oberfläche beobachtet.
- *Vertiefte (konkave) Rauigkeit* kann bei grobkörnigem Formmaterial entstehen indem sich die Körner der Einbettmasse abzeichnen.
- *Hohe Gießtemperatur* führt zu *Oberflächenlunkern und Oberflächenporen* infolge zu langsamer Erstarrung und guter Benetzung der Einbettmasse durch die Schmelze.
- *Hohe Formtemperatur* und damit verbundener langsamer Wärmeabfluss führt zu schwammig-dendritischer Erstarrung an der Formwand und rauer Oberfläche.
- *Niedrige Gießtemperatur* führt zu glatten Oberflächen, da die Schmelze durch die hohe Oberflächenspannung und schnelle Erstarrung nicht in die Poren der Form eindringt.
- *Niedrige Formtemperatur* begünstigt durch die schnelle Wärmeabfuhr die Schalenbildung an der Formwand und führt zu glatten Oberflächen.
- *Riefen und Runzeln* bilden sich auf der Oberfläche, wenn die Schmelze infolge zu niedriger Gieß- oder Vorwärmtemperatur zu früh erstarrt.
- Durch das Eindringen der Schmelze in Risse in der Formwand entstehen *Schülpen* (das Metall hinterfließt Bereiche der Einbettmasse) und *Grate*.

Gussgefüge

- *Einschlüsse* im Gusswerkstoff entstehen durch den Eintrag von Oxidresten aus dem Schmelztiegel in den Formhohlraum oder bei mangelnder Kantenfestigkeit durch mitgerissene Teilchen der Einbettmasse.
- *Lunker* bilden sich infolge der Erstarrungsschwindung durch mangelndes Nachfließen der Schmelze.
- *Gasporosität* entsteht dadurch, dass eingeschlossene Gase nicht entweichen können.
- *Schwammartiges Gefüge* tritt bei zu hoher Gieß- und Formtemperatur und ungerichteter Erstarrung auf.

Maßhaltigkeit

Infolge der Temperaturunterschiede in der Form kommt es bei größeren Gussobjekten zu Spannungen, die zu Dehnungen und Verzerrungen der Gussobjekte führen können. Um dies zu verhindern sollen alle Partien des Gussobjekts nach der Formfüllung möglichst die gleiche Temperatur aufweisen. Dies wird durch mehrfaches Anschneiden mit Gusskanälen erreicht.

Prüfkörper zur Ermittlung der Gießbarkeit

Die genannten Eigenschaften lassen sich nur in sehr beschränktem Maße aus theoretischen Betrachtungen ableiten. Daher werden zur experimentellen Ermittlung der technologischen Eigenschaft Gießbarkeit in der Praxis verschiedene Prüfkörper verwendet. Diese werden geometrisch so gestaltet, dass sie das Abstecken der Grenzen des Gießverfahrens ermöglichen. Anhand von Probegüssen lässt sich so der Einfluss der Prozessparameter wie Temperatur der Schmelze, Formtemperatur und Fülldruck auf die erzielbaren Eigenschaften der Gussteile testen. Prüfkörper lassen sich im Feinguss an verschiedenen Stellen der Gusstraube anbringen, sodass auch der Einfluss des Einströmens der Schmelze getestet werden kann. Darüber hinaus hat auch der keramische Formstoff einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften der Gussteile. Im Folgenden werden Beispiele genannt, wie die Gießbarkeit in der Praxis von verschiedenen Autoren untersucht wurde.

Unter Fließvermögen wird in der Gießereipraxis die Fließlänge verstanden, die eine Metallschmelze in einem Hohlraum mit konstantem Querschnitt zurücklegen kann. Der Begriff Formfüllung bezeichnet die Wiedergabe von Konturen und Kanten [BRUNHUBER88]. Das Fließvermögen wurde im *Stahl-Feinguss* an Spiralen getestet, die einen Querschnitt von 3 mm x 3,6 mm und eine Länge von 843 mm aufwiesen [FRIEDRICH84], die Formfüllung an einem Stufenkeil der Länge 180 mm und Breite 120 mm bei einer Angussdicke von 25 mm, die stufenweise bis auf eine Minimaldicke von 2,5 mm abnahm.

Die Formfüllung wurde im *Dentalguss* z. B. an Gittern, so genannten Retentionsnetzen, geprüft. Diese wiesen z.B. eine Maschenweite von 1,8 mm bei einem Stegdurchmesser von 0,7 mm auf. Die Anzahl der vollständig abgebildeten Kästchen im Verhältnis zur Zahl der möglichen Kästchen wurde dabei als die Größe Formfüllung definiert. An dünnen Plättchen wird im Dentalguss neben der Formfüllung auch die Oberflächenqualität getestet. An derartigen Proben lässt sich der Einfluss der Einbettmasse auf die Oberfläche des Gussteils mittels Rauheitsmessgeräten quantitativ ermitteln [WEBER79, 81].

Die Porosität und Lunkerbildung ist von verschiedenen Autoren an kugelförmigen Prüfkörpern ermittelt worden [OTT94]. Zur Überprüfung des Einflusses der Wanddicke des Gussteils auf das Metallgefüge und insbesondere der Bildung von Randschichten haben sich keilförmige Proben bewährt. Im Titanguss wird auf diese Weise die Bildung der spröden Randschicht untersucht [SCHÄDLICH89, HAGG95].

Die Maßhaltigkeit der Gussobjekte wird in der Dentaltechnik anhand der Passgenauigkeit von konusförmigen Modellkronen überprüft, wobei der entstehende Randspalt gemessen wird. Zur Bestimmung der Maßgenauigkeit an komplexeren Teilen ist es in der Praxis sinnvoll, Prüfkörper zu verwenden, welche die Geometrie der herzustellenden Gussteile möglichst exakt annähern. Anhand von Probegüssen können dann die Schwindmaße ermittelt werden.

Zur Bestimmung der Festigkeitswerte und Duktilität werden zweckmäßigerweise Zugstäbe genormter Größe gegossen. Der Einfluss der Wanddicke auf die mechanischen Eigenschaften lässt sich anhand von Härtemessungen an Schlifflinien keilförmiger Proben ermitteln. Dies ermöglicht auch das Erkennen lokaler Unterschiede im Gefüge und die Bestimmung des Einflusses von Randschichten, wie z. B. der Randentkohlung bei Stahlguss oder der Versprödungsschicht bei Titan.