

2.1. Entscheidungskriterien zur Auswahl geeigneter Fertigungsverfahren

Entscheidungskriterien zur Auswahl geeigneter Fertigungsverfahren

Frau Dipl.-Ing.(FH) Ines Richter
Sembach GmbH & Co. KG
Lauf a.d. Pegnitz

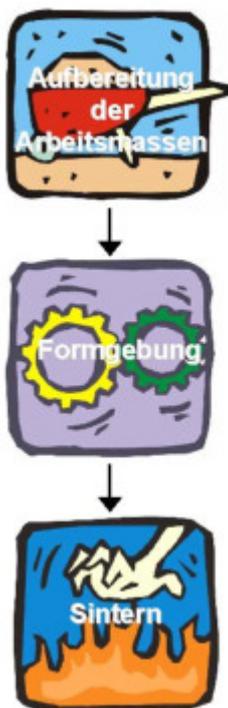


Abb. 1

Groß ist die Palette der keramischen Werkstoffe. Für zahlreiche spezielle Anforderungsprofile läßt sich das geeignete Material finden: ob hohe oder niedrige Wärmeausdehnung, hohe oder niedrige Wärmeleitfähigkeit, höchste Festigkeiten ...

Doch was nützt einem das beste Material, wenn es sich nicht in die erforderliche Bauteilform bringen läßt?

Die zentrale Rolle beim keramischen Fertigungsprozeß nimmt die Formgebung ein (Abb. 1). So zahlreich die verschiedenen Materialien sind, so umfangreich ist auch die Palette der Formgebungsverfahren, aus denen der Keramikhersteller schöpfen kann. Es lassen sich allerdings nicht sämtliche Verfahren in einem Betrieb verwirklichen. Vielmehr werden die praktizierten Formgebungsverfahren danach ausgewählt werden, ob Groß- oder Kleinserien bzw. einfache oder sehr komplexe Bauteile gefertigt werden sollen, und wie hoch der maschinelle Fertigungsaufwand sein soll.

Per Definition dienen alle im Folgenden erläuterten Formgebungsprozesse dem Ziel, „ein keramisches Haufwerk durch äußere Kräfte derart umzuformen, daß sowohl die gewünschte geometrische Gestalt als auch ein bleibender Zusammenhalt bei optimaler homogener Verdichtung erreicht wird.“

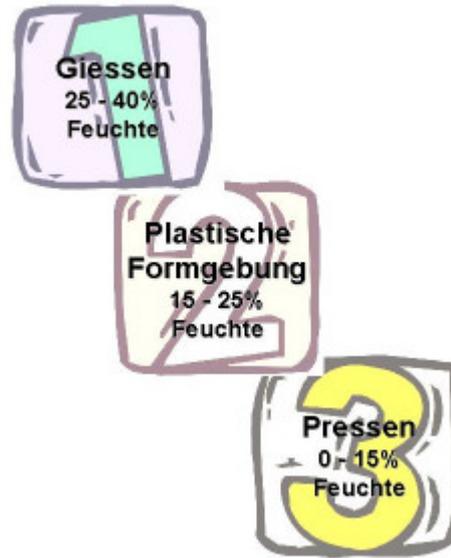
Grundsätzlich lassen sich drei keramische Formgebungsverfahren unterscheiden. Als Kriterium hierfür dient der Feuchtigkeitsgehalt der jeweils verwendeten Ausgangsmassen (Abb. 2).

Jedem der drei Grundtypen der keramischen Formgebung - Gießen, Plastische Formgebung und Pressen - lassen sich wiederum verschiedene Untertypen oder -varianten zuordnen (Abb. 3). Eine Sonderstellung nehmen dabei das Heißgießen und der keramische Spritzguß ein.

Abb. 1: Keramische Formgebungsverfahren

Bei beiden handelt es sich eigentlich um eine thermoplastische Formgebung.

Im folgenden Beitrag werden die Prozeßschritte einiger wichtiger Formgebungsverfahren sowie die Einsatzbereiche der einzelnen Verfahren kurz skizziert. Als Eingangsgröße nicht unerheblich für den Formgebungsprozeß ist die Aufbereitung der Arbeitsmasse. Diese muß je nach gewähltem Formgebungsverfahren bestimmte Parameter oder Charakteristika aufweisen und auch reproduzierbar einhalten. Daher wird auch dieser Punkt etwas genauer beleuchtet.



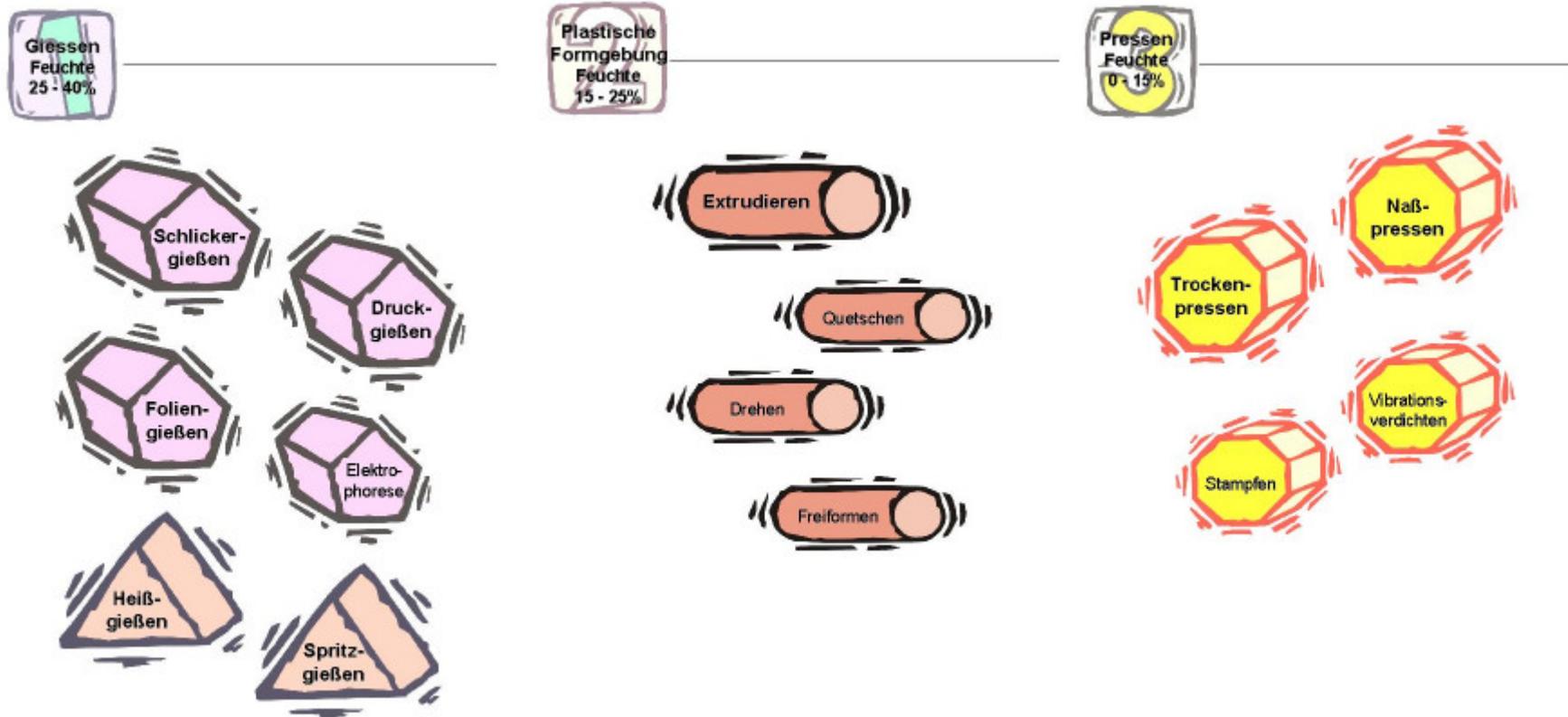


Abb. 3: Die verschiedenen Varianten der keramischen Formgebung

1. Schlickergießen und Druckgießen

Beim keramischen Schlickerguß wird eine stabile Suspension, der sog. Schlicker, in eine poröse, saugfähige Gipsform gegossen. Durch Entzug der Suspensionsflüssigkeit bildet sich an der Formenwand eine Teilchenschicht. Die treibende Kraft für den Flüssigkeitsentzug an der Formenwand ist die Oberflächenenergie der Kapillarwände im Formenmaterial. Man könnte die Scherbenbildung auch als Filtrationsprozeß beschreiben. Die Scherbenbildungsrate ist dabei proportional zur Wurzel aus der Zeit. Wichtige Voraussetzung dafür, daß sich ohne Einwirken äußerer Kräfte ein Scherben bildet, ist die Benetzung des Formenmaterials mit der Suspensionsflüssigkeit.

Beim Hohlguß wird im Gegensatz zum Voll- oder Kernguß der überschüssige Schlicker nach einer bestimmten Standzeit wieder ausgegossen (Abb. 4).

Durch Trocknung des Scherbens in der Gipsform schwindet der Formling von der Formenwand ab und kann zur weiteren Verarbeitung entnommen werden.

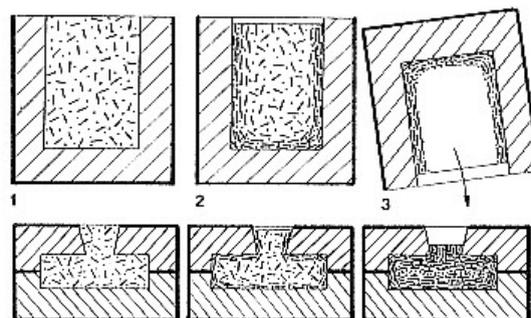


Abb. 4: Prinzipskizze *Hohlguß* (oben): 1. Eingießen des Schlickers, 2. Scherbenbildung, 3. Ausgußstellung; *Vollguß* (unten): 1. Eingießen des Schlickers, 2. Scherbenbildung, 3. Fertiger Formling

Um die Pulverteilchen gleichmäßig und stabil in der Suspension in Schwebelage zu halten, werden dem System Verflüssiger zugegeben. Diese dienen zur Kontrolle der Oberflächenladungen der Teilchen. Entscheidenden Einfluß auf die Verflüssigungswirkung hat außerdem der pH-Wert der Suspension. Das System Pulver-Verflüssiger-Lösemittel muß optimalerweise so abgestimmt werden, daß man einen möglichst dünnflüssigen Schlicker mit dennoch hoher Feststoffkonzentration erhält.

Der Schlickerguß eignet sich besonders für komplizierte Teile hinsichtlich Dünnwandigkeit und unsymmetrischer Form. Der Materialaufwand für die benötigten Formen ist gering. Das Gießverfahren kann soweit automatisiert werden, daß auch Kleinserien wirtschaftlich herstellbar

sind. Begrenzt wird der Arbeitstakt durch die Zeiten, die zur Scherbenbildung, Entnahme des Formlings und Trocknung der Gipsformen erforderlich sind.

Erheblich reduzieren läßt sich die Scherbenbildungszeit durch den Einsatz des Hochdruck- (1,50 bis 4,00 MPa) bzw. Mitteldruck- (0,15 bis 0,35 MPa) Gießens. Als Formenwerkstoff wird hierbei allerdings Kunststoff eingesetzt. Im Bereich der technischen Keramik ist das Druckgußverfahren lange nicht so verbreitet wie bei der Herstellung von Geschirr- oder Sanitärkeramik. Dies liegt daran, daß zur Verarbeitung der sehr feinen oxidischen und nichtoxidischen Pulver der Druckgußschlicker und der verwendete Formenwerkstoff gut aufeinander abgestimmt sein müssen.

2. Foliengießen

Zur Herstellung von großflächigen, dünnen keramischen Bauteilen wird das Foliengießverfahren eingesetzt. Hierbei wird ein keramischer Schlicker mit verschiedenen organischen Zusätzen auf ein endloses, über Rollen angetriebenes Stahlband „gegossen,“ (Abb. 5). Das heißt, der Schlicker läuft kontinuierlich aus einem Vorratsbehälter durch einen einstellbaren Spalt auf das Band. Im Gegenstrom wird zur Trocknung Warmluft über die Folie geblasen, so daß man am Bandende eine flexible Grünfolie erhält. Diese kann entweder aufgewickelt werden oder direkt durch schneiden, stanzen, prägen o.ä. weiter verarbeitet werden.

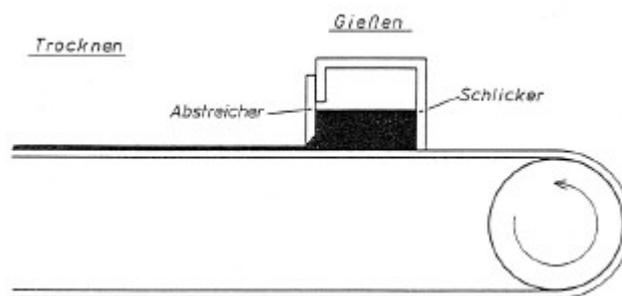


Abb. 5: Prinzipskizze des Foliengießens

Die Aufbereitung und Zusammensetzung einer Foliengießmasse ist sehr komplex. Die einzelnen Bestandteile einer solchen Gießmasse sowie deren Funktion zeigt Tabelle 1.

Bestandteil	Funktion	Beispiel 1	Beispiel 2
Keramisches Pulver	Matrix	Al ₂ O ₃	SiC
Lösemittel	Dispersion	dest. Wasser	Ethylalkohol Trichlorethylen
Verflüssiger	Dispersion, Kontrolle von Oberflächenladungen und pH-Wert	Arylschwefelsäure	Menhaden-Fischöl
Binder	Grünfestigkeit	Polyvinylacetat	Polyvinylbutyral
Plastifizierer	Flexibilität	Polyethylenglycol Dibutylphtalat	Polyethylenglycol Octylphtalat
Benetzungsmittel	Reduzierung der Oberflächenspannung des Lösemittels	Octylphenoxyethanol	

Tabelle 1: Zusammensetzung einer Foliengießmasse

Bei der Aufbereitung wird zuerst das keramische Pulver zusammen mit einem geeigneten Verflüssiger in dem ausgewählten Lösemittel dispergiert. Anschließend werden Binder, Plastifizierer und Benetzungsmittel zugemischt. Die fertige Mischung muß vor dem Vergießen gut entlüftet werden, um Blasenbildung zu vermeiden.

Mittels Foliengießen lassen sich keramische Teile mit einer Dicke im Bereich 0,2 bis 1,5 mm herstellen, was mit anderen Formgebungsverfahren gar nicht oder nur unter hohem Aufwand machbar wäre. Aus einzelnen Keramiksubstraten werden z. B. mehrschichtige keramische Gehäuse für die Elektronik oder Wärmetauscher für die Energietechnik aufgebaut.

3. Heißgießen und Spritzgießen

Bei den thermoplastischen Formgebungsverfahren werden ebenfalls Suspensionen verarbeitet, wobei hier das keramische Pulver in einer Thermoplastschmelze dispergiert wird. Bei den Arbeitsmassen handelt es sich also eigentlich um (hoch)gefüllte Polymere. Einige wesentliche Unterschiede zwischen Heißgießen und Spritzgießen zeigt Tabelle 2:

Sowohl Heißgieß- als auch Spritzgießverfahren eignen sich für die Herstellung kleiner, kompliziert geformter Bauteile, wobei der Spritzguß eher bei Serienfertigung in Frage kommt. Es lassen sich bei den gesinterten Heißgieß- oder Spritzgießteilen sehr hohe Oberflächengüten erzielen, so daß eine Nachbearbeitung mittels Schleifen oder Polieren oftmals nicht nötig ist. Einen nicht zu unterschätzenden Aufwand bedeutet bei den beiden beschriebenen Verfahren allerdings das Ausheizen der zur Formgebung erforderlichen organischen Zusätze. Dieser Vorgang muß sehr schonend durchgeführt werden, damit es nicht zu einer Zerstörung des Formteils kommt. Die Wandstärken der herstellbaren Bauteile sind daher nach oben auf ca. 15 mm limitiert. Andererseits stellt die Herstellung von Mikrobauteilen kein Problem dar.

4. Extrudieren

Die plastische Formgebung ist wohl die älteste der keramischen Formgebungsverfahren. Entsprechend zahlreiche Ansätze gibt es zur Definition, Beschreibung und Beurteilung der Plastizität oder Bildsamkeit der verwendeten Arbeitsmassen. Dies im Einzelnen zu erläutern würde zu weit führen. Unerlässlich ist es jedoch in der Praxis, eine praktikable Methode zur Verfügung zu haben, um die Homogenität und Verarbeitbarkeit der Extrudiermassen beurteilen und überprüfen zu können.

Zur Aufbereitung von Extrudiermassen stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Ausgehend von einem Schlicker, der über Filterpressen wieder entwässert wird, erhält man Filterkuchen. Diese werden in evakuierbaren Knetern homogenisiert, entgast und zu Hubeln verarbeitet.
2. Das Pulver wird mit Plastifizierern und evtl. weiteren organischen Hilfsstoffen vermischt. Anschließend wird Wasser zugegeben, bis die Masse die gewünschte Plastizität aufweist. Wie unter Punkt 1 beschrieben werden schließlich Hubel hergestellt.

Die eigentliche Formgebung erfolgt mittels Kolbenstrangpressen oder Vakuumschneckenpressen (Abb. 7). Die homogenisierte Masse (= Hubel) wird dabei durch das Mundstück zu Endlossträngen geformt. Wichtig ist eine optimale Verdichtung der Masse. Je nach gewünschtem Strangdurchmesser sollte man daher den Preßzylinderdurchmesser ca. doppelt so groß wie den Mundstücksdurchmesser auslegen.

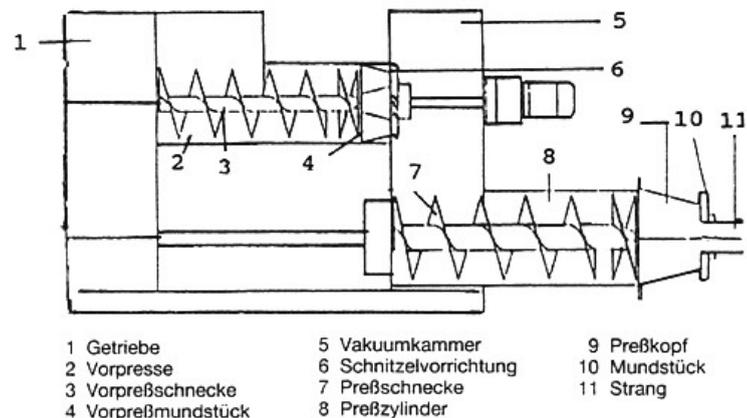


Abb. 7: Prinzipskizze eines *Vakuumschneckenextruders*

Mit dem Extrusionsverfahren lassen sich besonders gut rotationssymmetrische Teile wie Achsen oder Rohre herstellen. Aber auch kompliziertere Profile sind bei entsprechender Mundstücksauslegung machbar. Die herzustellenden Längen der Stränge hängen im Wesentlichen von der Neigung der Arbeitsmasse zum Verzug ab. Diesem läßt sich durch geeignete Verfahrenstechnik beim Trockenprozeß oder entsprechende Auswahl der organischen Hilfsstoffe bei unplastischen Massen entgegenwirken.

5. Naßpressen

Die zum Naßpressen verwendeten Massen weisen in der Regel Feuchtigkeiten im Bereich 10 – 15% auf. Unter der einachsigen aufgebrachten Druckbelastung werden diese Massen fließfähig, so daß eine relativ gleichmäßige Verdichtung erreicht werden kann. Es können beim Naßpressen auch Bauteile mit Hinter- und Unterscheidungen gepreßt werden.

Nachteilig wirkt sich aus, daß die Naßpressmassen nur begrenzt Druckspannungen aufnehmen können. Dadurch ist auch der Verdichtungsgrad, der stark vom Feuchtigkeitsgehalt der Masse abhängt, begrenzt. Darüberhinaus ist unter Umständen eine Trocknung der Preßteile erforderlich.

6. Trockenpressen

Trockenpressen ist ein besonders wirtschaftliches Verfahren zur Herstellung großer Stückzahlen, bei denen sich der erforderliche maschinelle Aufwand rechnet. Da die verwendeten

Arbeitsmassen eine sehr geringe Restfeuchte aufweisen, entfällt der Trockenprozeß. Dadurch muß nicht mit einer Trockenschwindung gerechnet werden, so daß sich sehr maßgenaue Teile herstellen lassen.

Geeignet zum Trockenpressen sind nahezu alle keramischen Werkstoffe. Optimalerweise werden die Ausgangspulver zu gut rieselfähigen Granulaten aufbereitet. Je nachdem, welche Anforderungen an das Granulat gestellt werden, stehen hierfür verschiedene Granulationsverfahren zur Verfügung.

Das gängigste Verfahren zur Herstellung von Preßgranulat ist die Sprühtrocknung (Abb. 8). Die Suspension (= Sprühschlicker) wird über eine Düse in die Trocknungskammer eingesprüht. Die dabei entstehenden Tropfen werden durch das Trocknungsgas im Gleich- oder Gegenstrom getrocknet. Bei Sprühgranulat handelt es sich typischerweise um Hohlkugeln.

Als weiteres interessantes Granulierverfahren sei hier die Wirbelschichttrocknung genannt (Abb. 9). Hier verwendet man eine fluidisierte Keimvorlage, auf die die Suspension aufgesprüht wird. Auf diesem Wege lassen sich agglomerierte, gecoatete oder Aufbaugranulate herstellen.

Folgende Granulatcharakteristika können abhängig von der Wahl des Granulationsverfahrens und der dabei eingestellten Prozeßparameter beeinflusst werden:

- Restfeuchte
- Schüttdichte
- Granulatform (kugelförmig, splittrig)
- Granulatdichte (hohl, porös, dicht)
- Granulatgröße
- Granulathärte

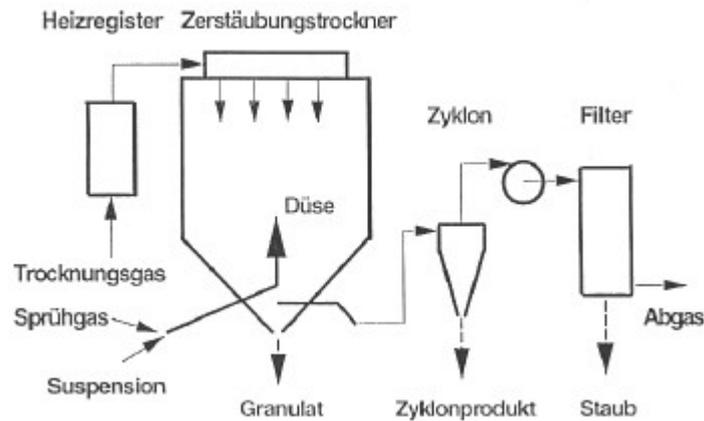


Abb. 9: Prinzipskizze eines *Sprühtrockner* zur Preßgranulatherstellung

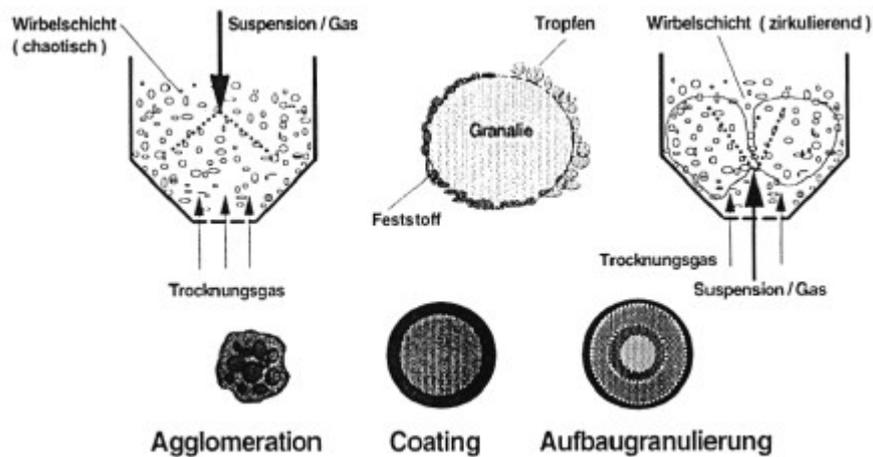


Abb. 9: Prinzipskizze des *Wirbelschichtverfahrens* zur Preßgranulatherstellung

Hinter dem Begriff Trockenpressen verbergen sich unterschiedliche Formgebungsvarianten. Man unterscheidet das axiale und das isostatische Trockenpressen (CIP = cold isostatic pressing). Letzteres wiederum lässt sich in die Naß- und Trockenmatrizentechnik unterteilen. Außerdem kann der Preßvorgang auch mit einem Temperaturzyklus kombiniert werden. Dann spricht man vom Heiß- oder Heißisostatischem Pressen (HP oder HIP).

Ein Preßwerkzeug zum axialen TP besteht aus einer Preßmatrize sowie Ober- und Unterstempel. Die Stempel können zusätzlich mehrfach unterteilt sein, je nach Kompliziertheit des Bauteils. Das Preßgranulat wird mittels Füllschuh in die Form eingefüllt. Beim zweiseitigen Pressen führt anschließend eine gesteuerte Bewegung von Ober- und Unterstempel zur Verdichtung des Granulates, während sich beim einseitigen Pressen nur der Oberstempel

bewegt (Abb. 10). Der Preßling wird über Ausstoßer, Schieber und Greifer automatisch entnommen.

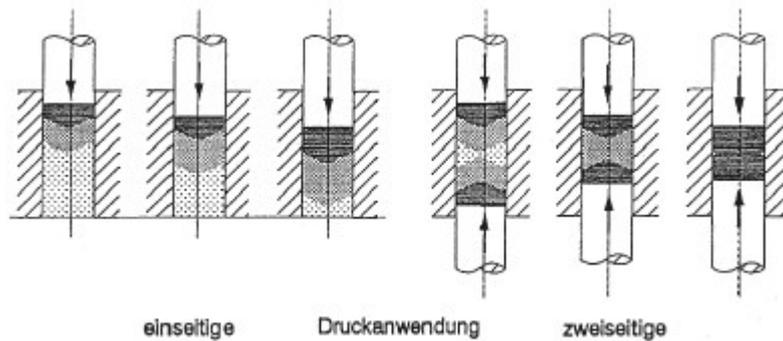


Abb. 10: Dichteverteilung im Preßteil bei *einseitigem* und *zweiseitigem* axialen Preßvorgang

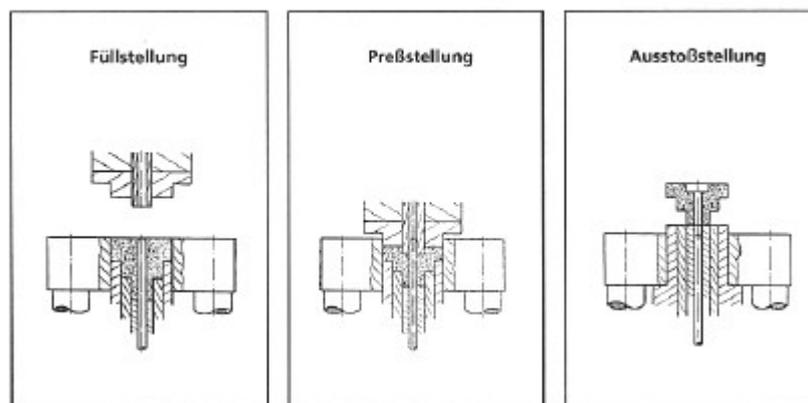


Abb. 11: Prozeßabschnitte beim *axialen* Trockenpressen

Die Problematik der ungleichmäßigen Dichteverteilung im Preßling beim axialen Trockenpressen zeigt Abb. 10. Beim zweiseitigen Pressen bildet sich aufgrund dessen in der Mitte des Preßteils eine sog. „Preßneutrale,, eine Zone mit geringerer und damit ungünstigerer Verdichtung. Großen Einfluß auf die Verdichtung beim Preßvorgang haben außerdem:

- der zu verpressende Werkstoff selbst. Steatitmassen, die zu 90% den extrem gleitfähigen Speckstein enthalten, lassen sich sehr gut verdichten mittels Trockenpressen.
- die Restfeuchte des Preßgranulates. Für jedes Granulat gibt es einen optimalen Feuchtigkeitsgehalt, abhängig vom gewählten Preßdruck. Der Feuchtigkeitsfilm bildet eine Gleitschicht um die Feststoffteilchen und verringert dadurch die äußere und innere Reibung.

Bei zu niedrigem Feuchtigkeitsgehalt wird diese Gleitschicht nur unvollständig ausgebildet, bei zu hoher Restfeuchte wirken inkompressible Feuchtigkeitsanteile der Verdichtung entgegen.

- eine eventuelle Gleitmittelzugabe. Gleithilfsmittel verringern zum einen die äußere und innere Reibung. Zum anderen verbessern sie den Druckdurchgang beim Pressen und ermöglichen ein einfacheres Entformen (Ausstoßen) des Preßlings.

Das isostatische Pressen folgt dem Pascal'schen Prinzip. Danach breitet sich ein auf eine ruhende Flüssigkeit oder ein ruhendes Gas einwirkender Druck nach allen Seiten gleichmäßig aus. Bei der Naßmatrizentechnik wird eine Gummiform außerhalb des Druckbehälters mit Pulver oder Granulat gefüllt, während bei der Trockenmatrizentechnik die Form fest mit dem Druckgefäß verbunden ist (Abb. 12). Daraus lassen sich für beide Verfahren folgende Unterschiede ableiten:

Naßmatrizentechnik	Trockenmatrizentechnik
große Formlinge, hohe Drücke	Kleinteile
einfacher Formenwechsel	aufwendiger Formenwechsel
Taktzeit bis zu mehreren Minuten	Taktzeit teilweise bis zu einigen Sekunden
Kleinserien	Großserien

Tabelle 3: Vergleich Naß- und Trockenmatrizentechnik

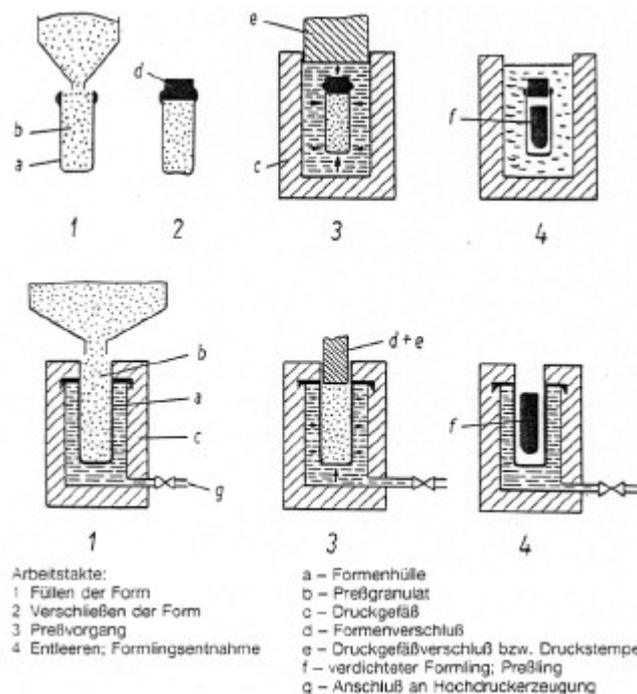


Abb. 12: Prinzipskizze der Naß- (oben) bzw. Trockenmatrizentechnik (unten) beim kaltisostatischen Pressen

Kurz erwähnt sei hier noch das Quasi-isostatische Pressen. Hier wird ein Kunststoff verwendet, der unter Druckbelastung eine Gel-Sol-Umwandlung erfährt. Dadurch übernimmt der Kunststoff zum einen die Funktion der Hydraulikflüssigkeit und zum anderen die der flexiblen Hülle.

Eine abschließende, vergleichende Zusammenfassung des Naßpreßverfahrens sowie des axialen und isostatischen Trockenpressens zeigt Tabelle 4:

Kriterium	Naßpressen	Axiales Trockenpressen	Kaltisostatisches Trockenpressen
Feuchte der Preßmasse	10 – 15%	< 3%	< 3%
Druckeinwirkung	einachsig	einachsig	mehrachsig
Verdichtungsverhalten	begrenzt, aber gleichmäßig	hoch, aber Verdichtungsunterschiede in Preßrichtung	hoch, fast völlig gleichmäßig
Maßhaltigkeit	gut	sehr gut	gut
Gestalttreue	gut	sehr gut	gut bis mäßig
Trocknung	evtl. erforderlich	entfällt	entfällt
Produktivität	gut	sehr gut	gut bis sehr gut
Wirtschaftlichkeit	gut	bei hohen Stückzahlen sehr gut	gut, stückzahlabhängig

Tabelle 4: Zusammenfassung der verschiedenen Preßverfahren

Zu guter Letzt soll an dieser Stelle die Grünbearbeitung keramischer Halbzeuge als interessante Formgebungsmöglichkeit für Prototypen genannt werden. Auch hier spielen unter Umständen organische Hilfsstoffe zur Verbesserung der Bearbeitbarkeit im ungebrannten Zustand eine wichtige Rolle.

Zusammenfassend betrachtet gewinnen die organischen Zusätze immer mehr an Bedeutung, je weiter man sich bei der Werkstoffauswahl von den natürlichen silicatischen Rohstoffen entfernt. Damit wird das Know How der richtigen Rohstoff-Organik-Kombination für einen optimalen Fertigungsablauf zunehmend wichtiger.

Die Aufbereitung der Arbeitsmassen ist eine wichtige Eingangsgröße für den Formgebungsprozeß. Mindestens ebenso entscheidend sind Bauteilkonstruktion und Werkzeugauslegung. Es existieren grundlegende, keramikspezifische Konstruktionskriterien, die hierbei beachtet werden müssen. Und natürlich stellen unter Umständen die verschiedenen vorgestellten Formgebungsverfahren spezielle Anforderungen an die Werkzeuggestaltung.

Literatur

„*Technische Keramische Werkstoffe*„, Hrsg. Jochen Kriegesmann, Deutscher Wirtschaftsdienst

„*Handbuch der Keramik*„, Gruppe I D 1 bis I D 4, Verlag Schmid GmbH, Freiburg

„*Heißgießen – ein interessantes Formgebungsverfahren*„, R. Lenk, cfi 72 (1995) No. 10

„*Strangpressen für die bildsame Formgebung keramischer Massen*„, W. Steiner, Keramische Zeitschrift 43 (1991) Nr. 2

„*Technologische Grundlagen der Granulierung und Granulatverarbeitung*„, Fortbildungsseminar der Deutschen Keram. Gesellschaft, März 1999

„*Granulate in der Keramik*„, Fortschrittsberichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft, Band 11, 1996

„*Entwicklung der Trockenpreßverfahren in der keramischen Industrie*„, St. Erxleben, cfi 74 (1997) No. 4

„*Wirtschaftliche Aspekte des Trockenpressens*„, H. Reh, Keramische Zeitschrift 42 (1990) Nr. 3

„*Stand und Entwicklungen des isostatischen Kaltpressens*„, P. Alt, Keramische Zeitschrift 42 (1990) Nr. 3

„*Technische Keramik in der Praxis*„, Seminarunterlagen 1998, 1999