

Interregionale Ringvorlesung, Materialintegration, 05.05. 2020:

D. Lehmhus, S. Bosse et al.

# Materialintegration II – Materialkonzepte und Fertigungsverfahren

# Einleitung

## Inhalte Materialintegration II

- Einleitung
- Einteilung der Fertigungsverfahren
- Urformverfahren – Metalle
- Urformverfahren - Kunststoffe
- Urformverfahren - FVK
- Additive Manufacturing-Verfahren
- Ausblick, Zusammenfassung

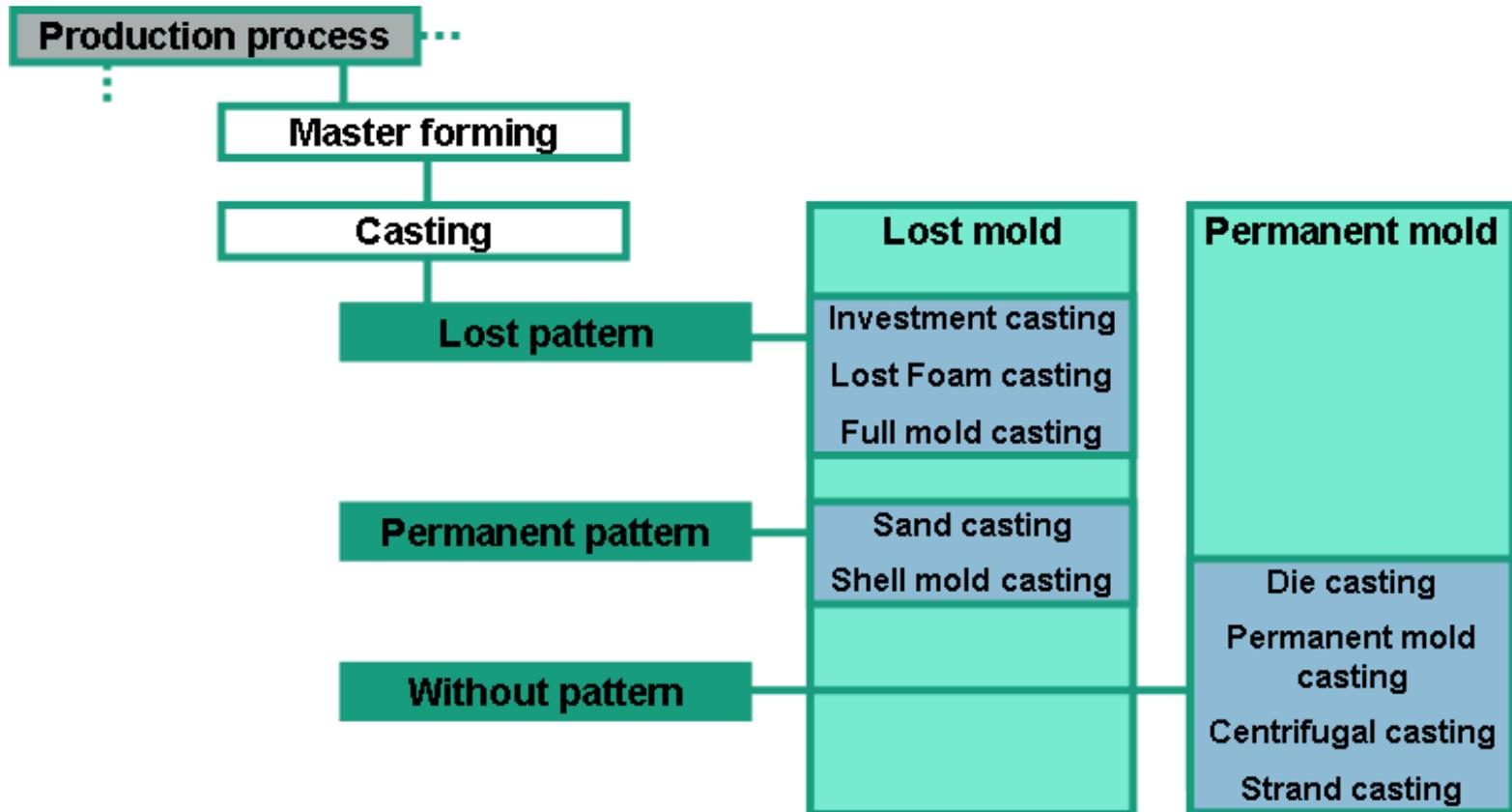
# Fertigungsverfahren: Urformen.

## Gießverfahren: Allgemeine Merkmale.

- Endformnahe Bauteile – geringer Nachbearbeitungsaufwand
- Materialvielfalt – Metalle (Al, Fe, Stahl, Cu, Sn, Zn, Pb, Au etc.), Kunststoffe (Thermoplaste, thermopl. Duroplaste und Elastomere), Grünteile in Pulvermetallurgie und Keramik
- Gestaltungsfreiheit – komplexe Geometrien herstellbar, je nach Verfahren auch mit Hinterschneidungen oder inneren Hohlräumen (durch Kerne) etc.
- Eigenschaftseinstellung durch Wahl des Materials, z. B. Legierungen
- Formgebung in einem Schritt
- Hohe Materialausnutzung
- 100% Recycling von Angüssen etc. möglich (Wiedereinschmelzen)

# Fertigungsverfahren: Urformen.

## Metallguss.



# Fertigungsverfahren: Urformen.

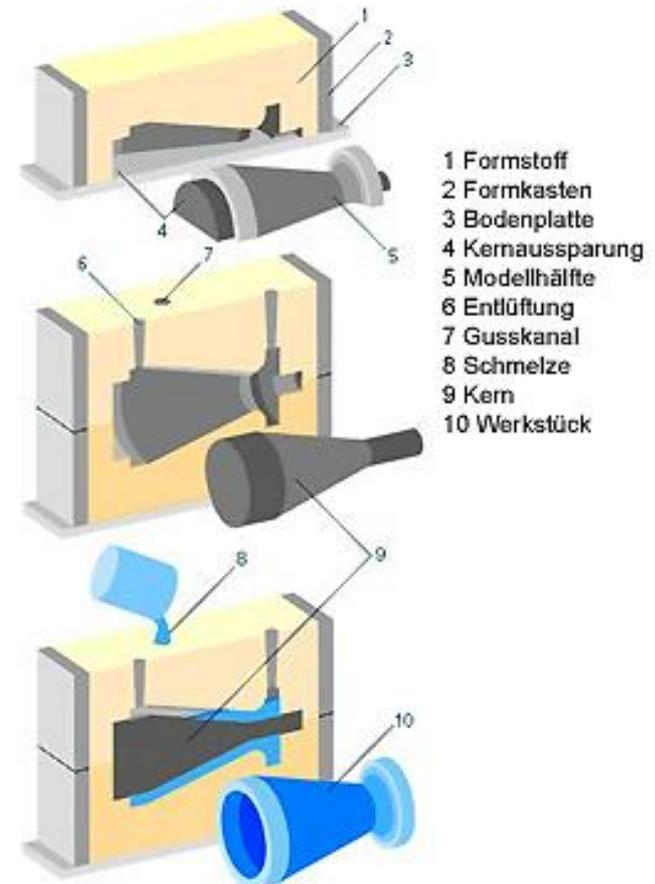
## Metallguss: Sandguss.

Eines der ältesten Gießverfahren,  
Einteilung nach Formstoff und Binder.

Formstoff: Quarz-, Chromit-, Olivin-, Zirkonsande

Binder: Ton, Wasser, Öl, kalthärtende (Furan-) Harze, Wasserglas etc.

- 1) Herstellung eines bleibenden Modells aus Holz, Kunststoff oder Metall, auch über RP-Verfahren
- 2) Umfüllen des Modells mit Formstoff im Formkasten
- 3) Entfernung des Modells
- 4) Einbringen von Gießkanälen, Entlüftungen und Speisern
- 5) Einbringen von Kernen, z. B. aus Sand
- 6) Schließen der Form
- 7) Einfüllen der Schmelze
- 8) Entformen nach Erstarrung



# Fertigungsverfahren: Urformen.

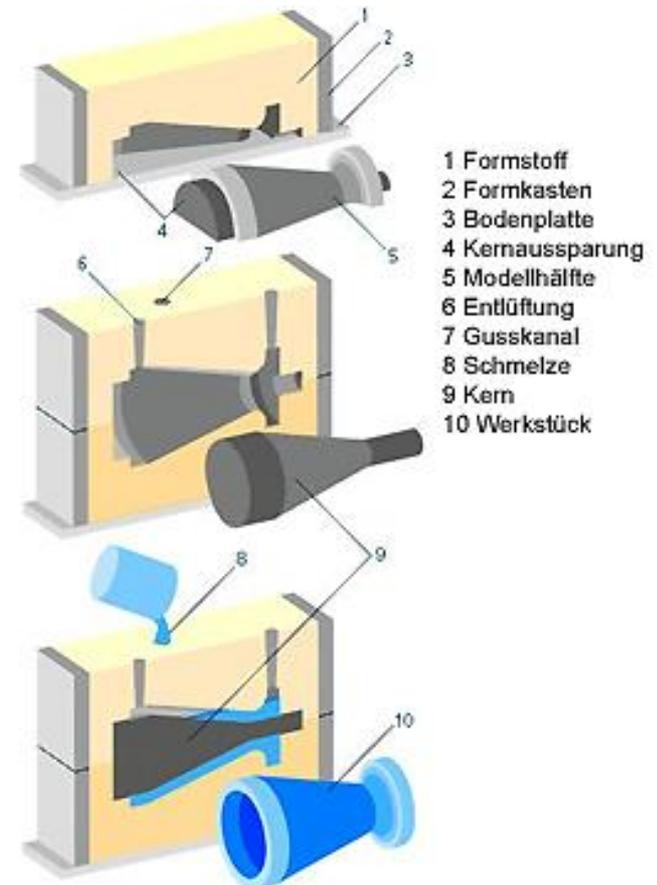
## Metallguss: Sandguss.



Quelle: [www.qualitydigest.com](http://www.qualitydigest.com)



Quelle: [www.manufactum.de](http://www.manufactum.de)

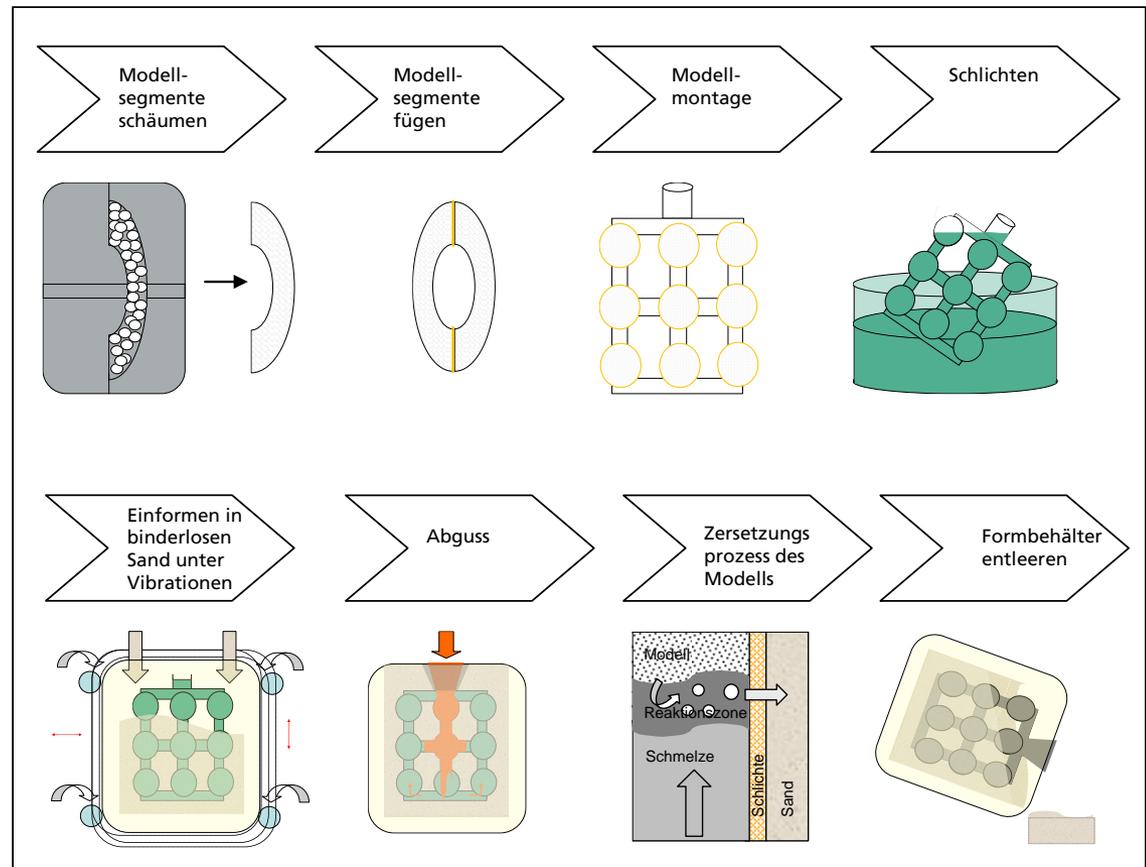


# Fertigungsverfahren: Urformen.

## Metallguss: Lost Foam (Vollform-)Gießen.

Variante des Sandgießens, verlorenes Modell aus geschäumtem Polystyrol (z. B. Styropor®).

Dauerformen für die Herstellung des verlorenen Modells, Aufschäumen mit Wasserdampf, thermische Zersetzung bei Kontakt mit der Schmelze.



# Fertigungsverfahren: Urformen.

## Metallguss: Lost Foam (Vollform-)Gießen.

Produkt-  
Beispiele



Drill hook out of steel from GSL



Charge air distributor, Al, Handtmann.



Crankcase of electric engines  
out of aluminium from Isotta  
Fraschini



Cover Pump, Al, Handtmann.

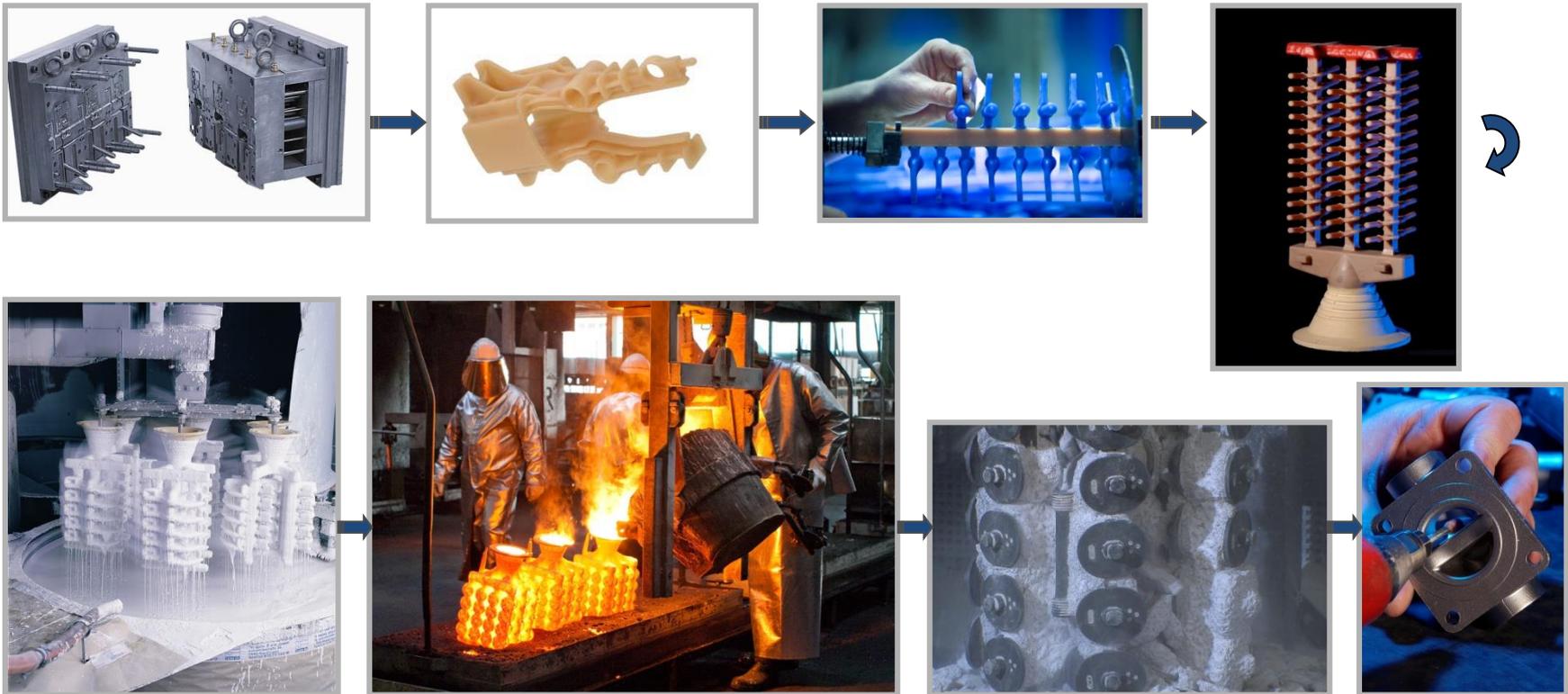
# Fertigungsverfahren: Urformen.

## Metallguss: Feinguss/Wachsausschmelzverf.

- Herstellung des Urmodells (“master pattern”)
- Herstellung der Form für Wachs-(positiv-)modelle des Bauteils
- Herstellung der Wachsmodelle
- Montage von Wachsmodelle und Angussssystem zu einer Gießtraube
- Herstellung der keramischen Form durch Tauchen in einen Keramikschlicker, ggf. Besanden und erneutes Tauchen
- Ausschmelzen der Wachsmodelle
- Ausbrennen der Form: Entfernung von Feuchtigkeit und letzten Wachsresten, Sintern der Form
- Gießen, Materialien z. B. Stahl, Al, Ti, Superlegierungen etc.
- Entfernung der Form (mechanisch)

# Fertigungsverfahren: Urformen.

Metallguss: Feinguss/Wachsausschmelzverf.



Source: Feinguss Blank

# Fertigungsverfahren: Urformen.

## Metallguss: Feinguss.

Quelle: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)



Bernwardstür,  
Dom zu Hildesheim,  
Bronze, gegossen ca. 1015

Quelle: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)



Turbinenschaufel,  
Flugzeugtriebwerk



Turbolader-Rotor

Quelle:  
[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

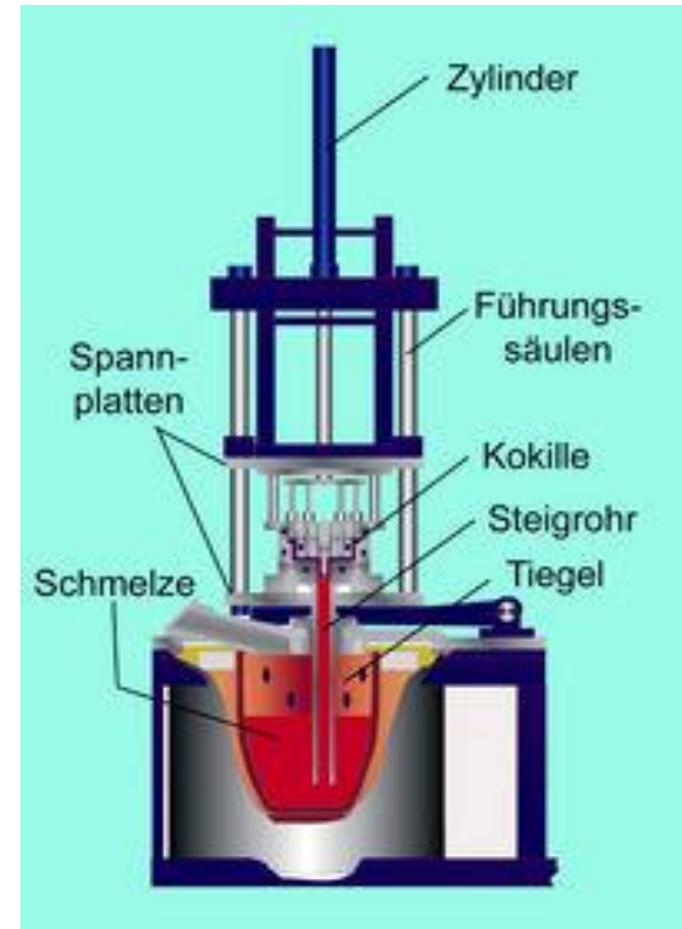
# Fertigungsverfahren: Urformen.

## Metallguss: Kokillenguss.

Beispiel für Gießen mit Dauerformen (“permanent mould casting”).

Formen üblicherweise aus Metall, Schwerkraft-Gießverfahren ebenso verbreitet wie Niederdruck-Verfahren, bei denen wenige bar Überdruck genutzt werden, um die Form zu füllen.

Typisches Fertigungsverfahren z. B. für Leichtmetallfelgen im Automobilbereich. Die metallische Dauerform schränkt die Gestaltungsfreiheit ein, etwa bezüglich Hinterschneidungen etc.

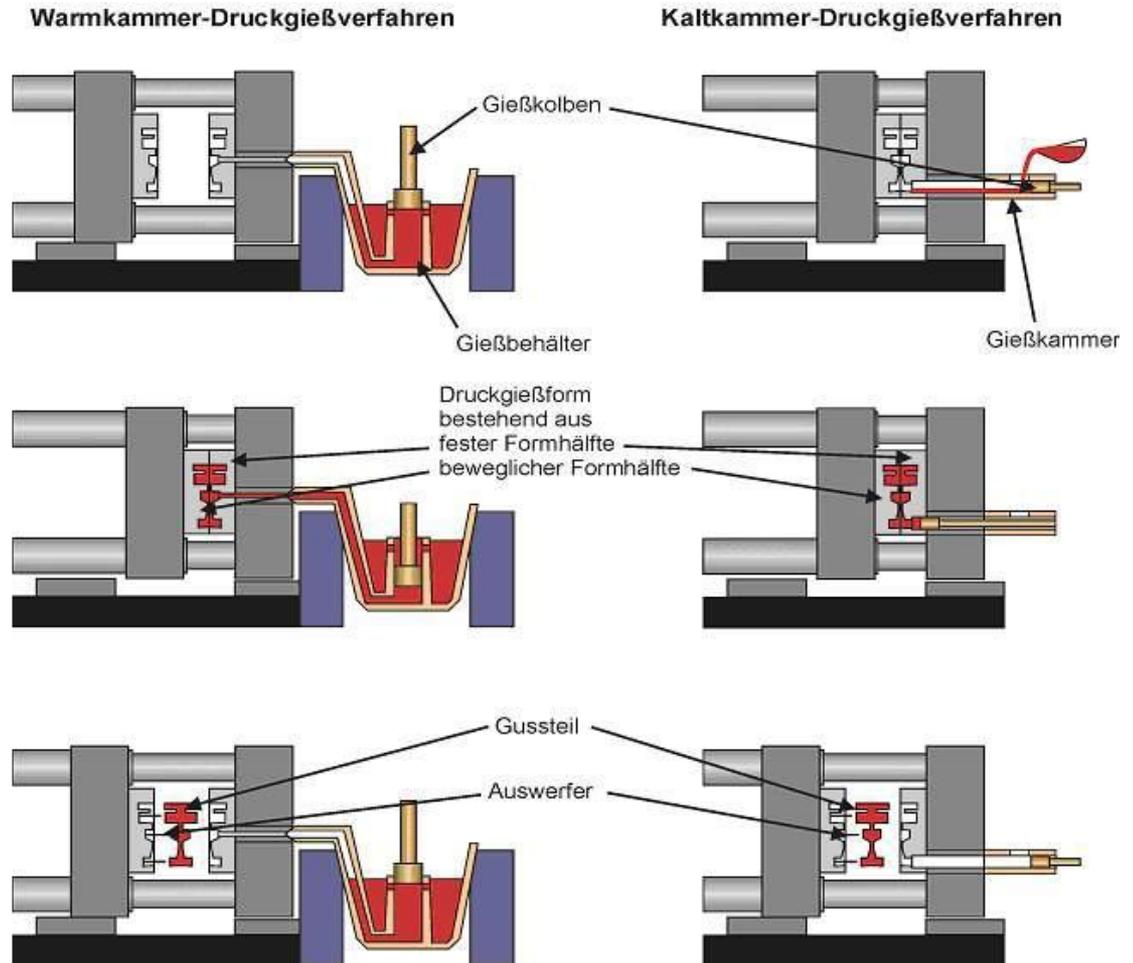


Quelle: BDG, Kurtz, Kreuzwertheim

# Fertigungsverfahren: Urformen.

## Metallguss: Druckguss.

Druckguss oder  
High Pressure Die  
Casting (HPDC):  
Vergleich Warm-  
und Kaltkammer-  
Anlagen.



# Fertigungsverfahren: Urformen.

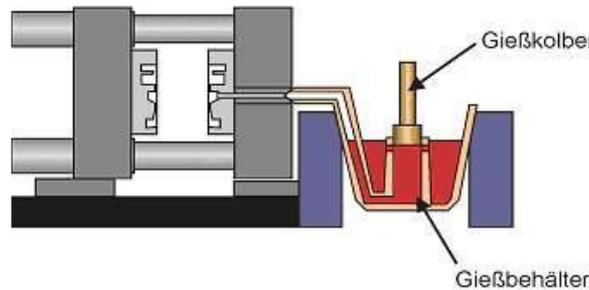
## Metallguss: Druckguss.

### Cold-chamber HPDC machines:

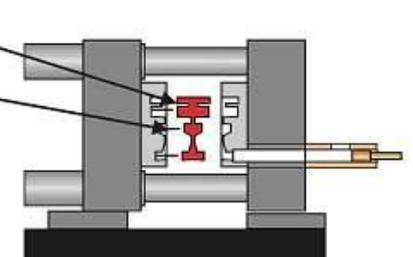
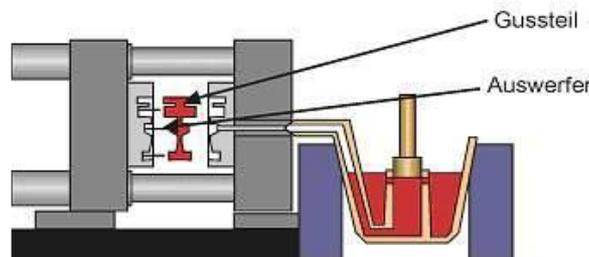
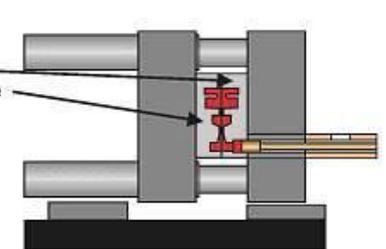
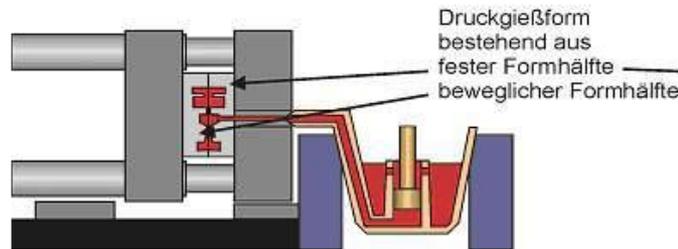
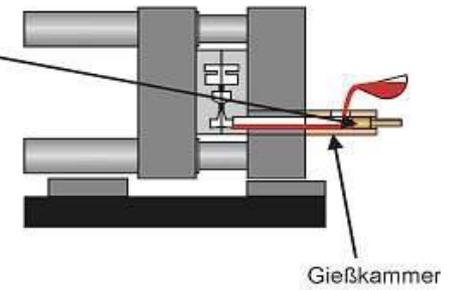
Such machines mainly consist of two parts, injection system and clamping unit. For each single loop the melt is filled from the dosing furnace into the shot sleeve.

**Suitable for  
Al-, Mg- and Cu alloys.**

Warmkammer-Druckgießverfahren



Kaltkammer-Druckgießverfahren



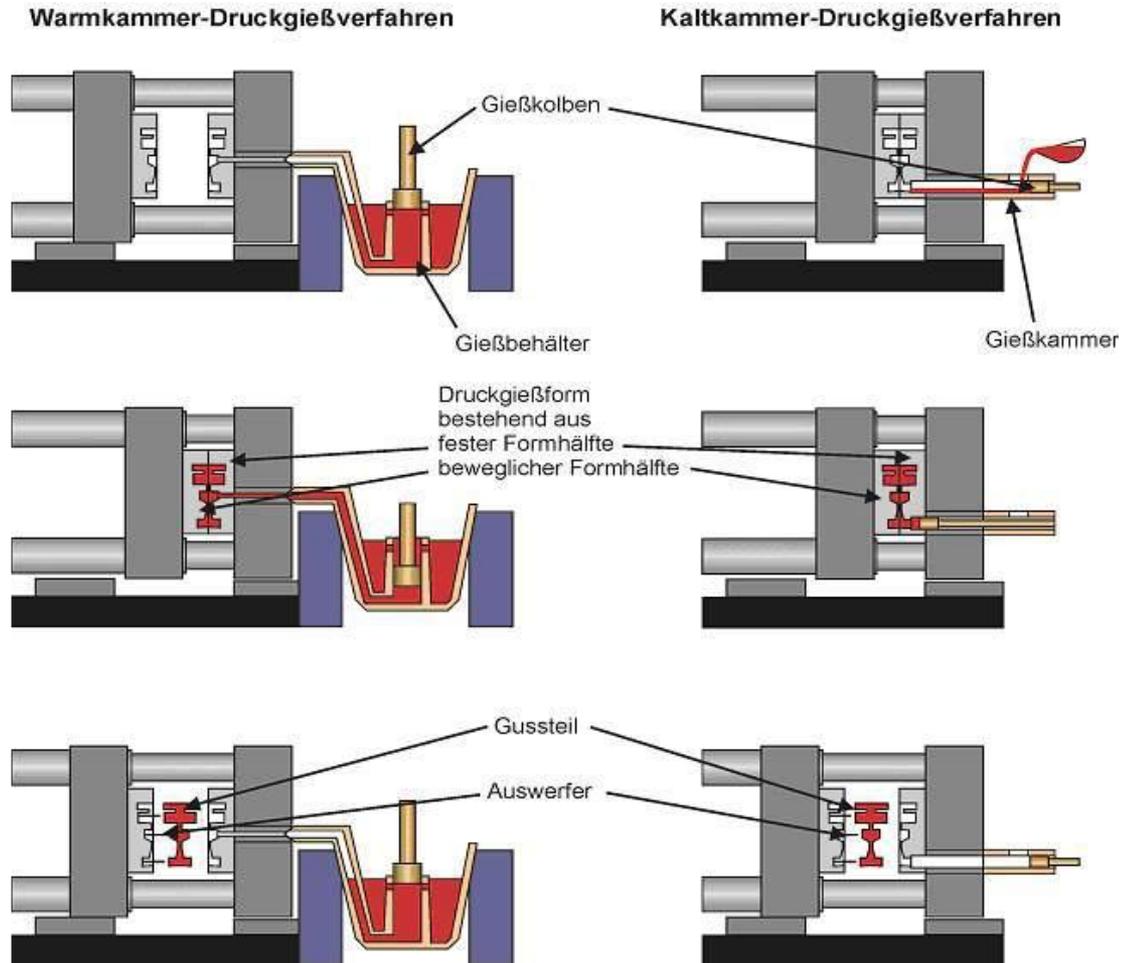
# Fertigungsverfahren: Urformen.

## Metallguss: Druckguss.

### Hot-chamber HPDC machines:

Integrated holding furnace with shot sleeve inside injection system out of steel, which is always within the metal melt.

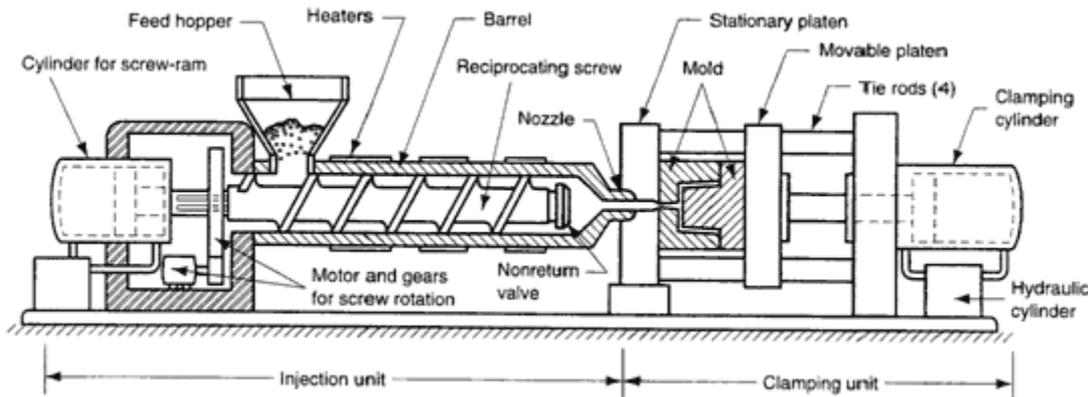
**Suitable for  
Mg-, Sn-, Zn alloys  
(not aggressive ag. steel).**



# Fertigungsverfahren: Urformen.

## Kunststoff-Spritzguss.

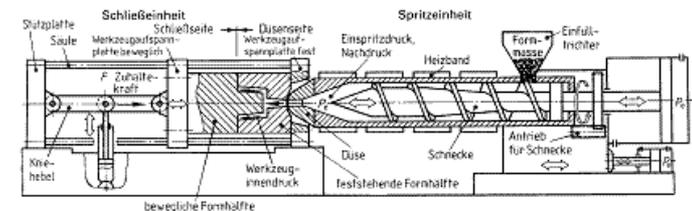
Übersichtsdarstellung einer Kunststoff-Spritzgussmaschine:



Quelle: [www.elitemachinerysystems.com](http://www.elitemachinerysystems.com)



Quelle:  
[www.kunststoffreport.de](http://www.kunststoffreport.de)

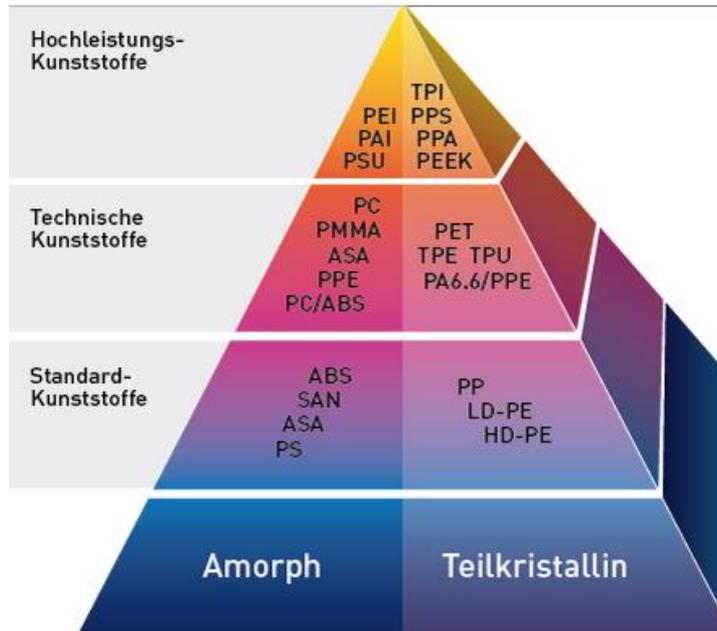


Quelle: [www.wegu.de](http://www.wegu.de)

# Fertigungsverfahren: Urformen.

## Kunststoff-Spritzguss.

Verarbeitete Werkstoffe:  
Thermoplaste, Duroplaste.



Dauer-  
gebrauchs-  
temperatur

300°C

150°C

100°C

TPI  
PPS  
PPA  
PEEK  
*PEI*  
*PAI*  
*PSU*

thermoplastische Polyimide  
Polyphenylsulfid  
Polyphthalamid  
Polyetherketon  
*Polyetherimid*  
*Polyamidimid*  
*Polysulfon*

PET  
TPE  
TPU  
PA  
PPE  
*PC*  
*PMMA*  
*ASA*  
*PPE*  
*PC/ABS*

Polyethylenterephthalat  
thermoplast. Elastomere  
thermoplast. Polyurethan  
Polyamid  
Polyphenylenether  
*Polycarbonat*  
*Polymethylmetacrylat*  
*Acrylnitril-Styrol-Acrylester*  
*Polyphenylenether*  
*vgl. PC und ABS*

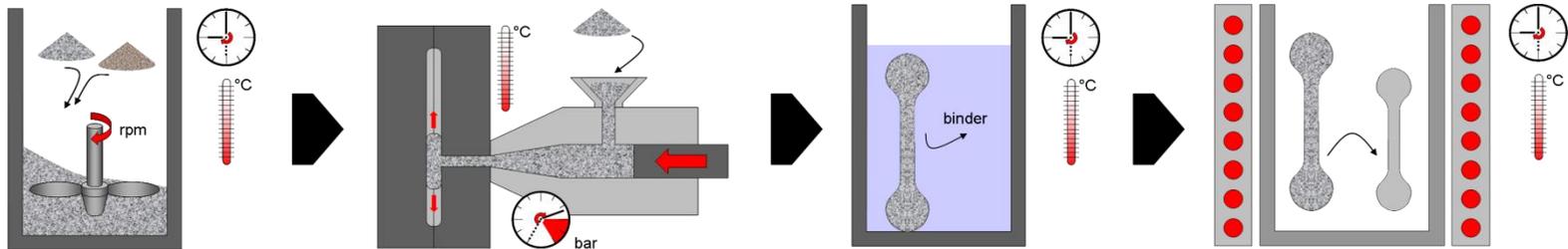
PP  
LD-/HD-PE  
ABS  
SAN  
ASA  
PS

Polypropylen  
Polyethylen low/high density  
*Acrylnitril-Butadien-Styrol*  
*Styrol-Acrylnitril*  
*Acrylnitril-Styrol-Acrylester*  
*Polystyrol*

Quelle:  
[www.eugsterag.com](http://www.eugsterag.com)

# Fertigungsverfahren: Urformen.

## Verfahrensvariante Metallpulverspritzguss.



1. Feedstock

2. Injection moulding

3. Chem. debinding

4. Thermal debinding, sintering

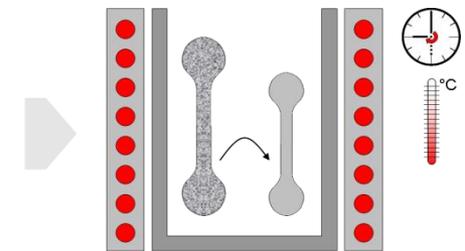


# Fertigungsverfahren: Urformen.

## Verfahrensvariante Metallpulverspritzguss.

### Problem Sinterschwindung:

Integration starrer Bauelemente führt zu Eigenspannungen und massivem Verzug - Problem aller pulvermetallurgischen Verfahren, umso ausgeprägter, je höher der (prozessbedingt) erforderliche Binderanteil ist.



3. Chem. debinding

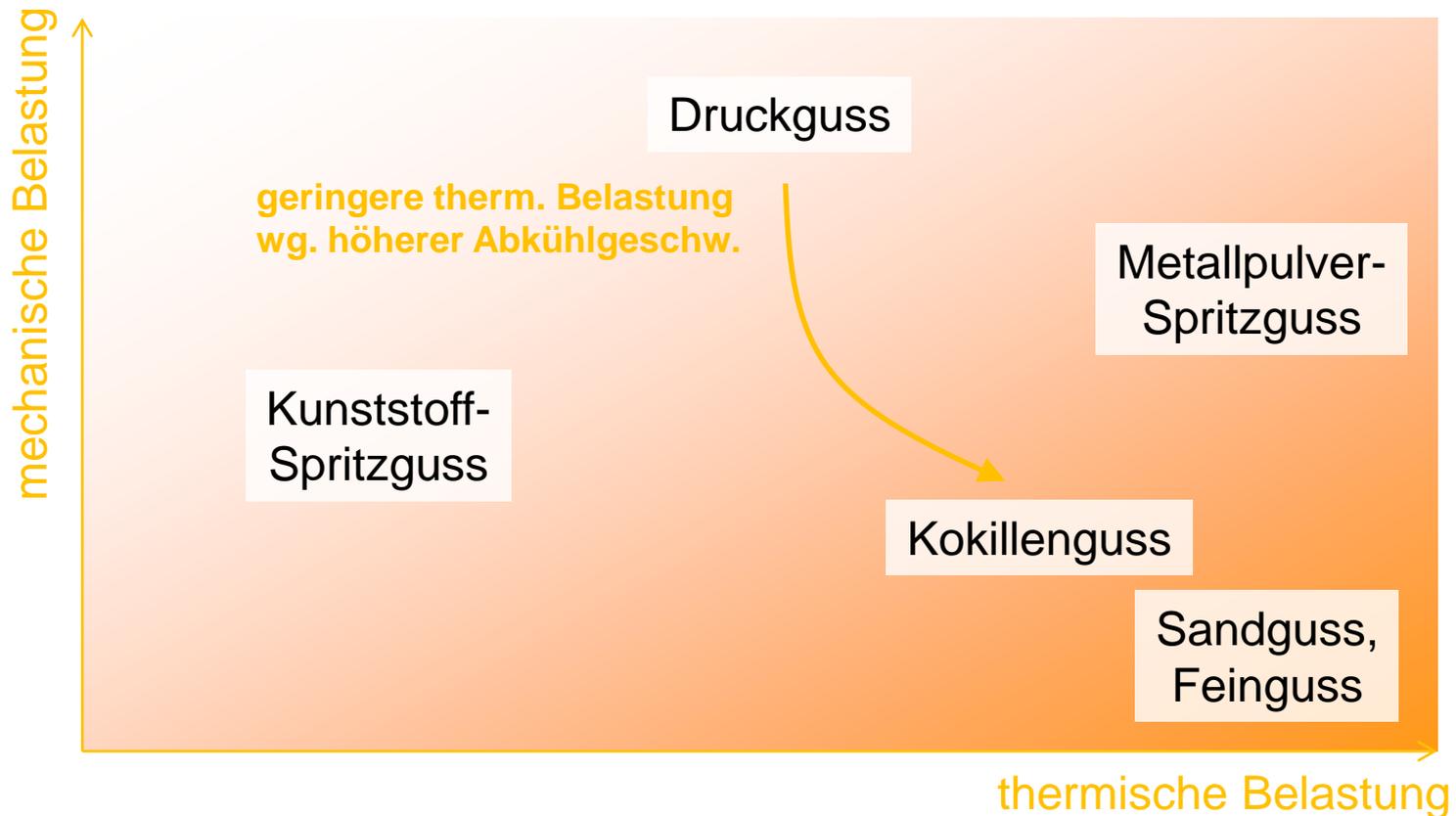
4. Thermal debinding, sintering

### Typische Binderanteile in der Pulvermetallurgie:

- Metallpulverspritzguss: bis zu 50 Vol.-%
- Pulverpressen: einige Vol.-%
- Drucklos Sintern: kein Binder erforderlich

# Anforderungen an integrierbare Systeme.

## Gießverfahren: Mech./therm. Belastung.



# Faserverbundkunststoffe.

## Übersicht und Einteilungen.

FVK kombinieren lasttragende Fasern mit einer Matrix, die die Fasern verbindet und gegen Ausknicken (bei Druckbelastung in Faserrichtung) schützt und so eine Lastübertragung zwischen den Fasern sowie eine Lasteinleitung in ein Bauteil ermöglicht.

Einteilung nach Faserlänge:

Kurzfasern < 1mm:	Verarbeitung im Extruder möglich, u. a. Spritzguss.
Langfasern 1-50 mm:	Verarbeitung im Extruder möglich, u. a. Faserspritzen
Endlosfasern > 50 mm:	Verarbeitung in Form von Faserhalbzeugen, u. a. Prepreg- oder Infiltrationsverfahren wie Resin Transfer Moulding (RTM)

# Faserverbundkunststoffe.

## Übersicht und Einteilungen.

FVK kombinieren lasttragende Fasern mit einer Matrix, die die Fasern verbindet und gegen Ausknicken (bei Druckbelastung in Faserrichtung) schützt und so eine Lastübertragung zwischen den Fasern sowie eine Lasteinleitung in ein Bauteil ermöglicht.

Einteilung nach Faserlänge:

Kurzfasern < 1mm, Langfasern 1-50 mm, Endlosfasern > 50 mm.

Einteilung nach Fasertyp:

anorganisch (Basalt-, Bor-, Glas-, Keramikfasern), metallisch (Stahl), organisch (Kohlenstofffasern, Aramidfasern, auch Naturfasern)

Einteilung nach Matrix:

thermoplastisch (PEEK, PPS, PSU, PEI, etc.), duroplastisch (Epoxidharz EP, UP, PUR, etc.), ggf. auch elastomerisch.

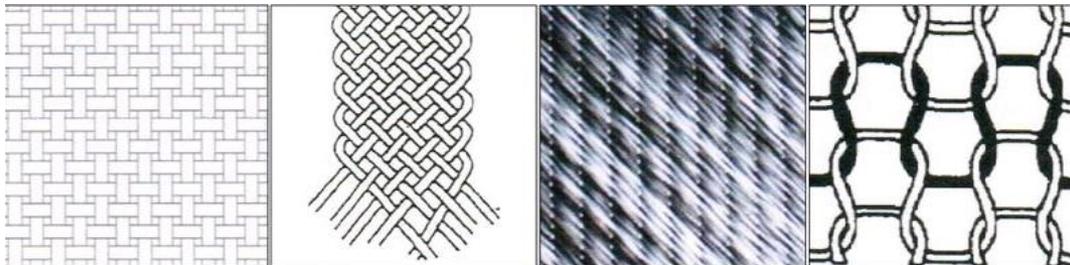
# Faserverbundkunststoffe.

## Faserhalbzeuge: Typen.

Herstellung über textile Verfahren. Basis für Schichtaufbau der FVK. Rovings als Grundlage: Zusammenfassung einiger 1000 Faser-Einzelfilamente zu einem Bündel mit gleicher Ausrichtung, für eine leichtere Verarbeitung (Multifilamentgarn), darauf basierend u. a.

- Gewebe, inkl. Abstandsgewebe
- Geflechte
- Gelege, inkl. Multiaxialgelege
- Gestricke

} *Endlosfasern*



Quelle:  
[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

# Faserverbundkunststoffe.

## Faserhalbzeuge: Typen.

Herstellung über textile Verfahren. Basis für Schichtaufbau der FVK. Rovings als Grundlage: Zusammenfassung einiger 1000 Faser-Einzelfilamente zu einem Bündel mit gleicher Ausrichtung, für eine leichtere Verarbeitung (Multifilamentgarn), darauf basierend u. a.

- Gewebe, inkl. Abstandsgewebe
- Geflechte
- Gelege, inkl. Multiaxialgelege
- Gestricke

- Matten
- Vliese
- Feinschnitt als Füllmaterial

*Endlos-  
fasern*

*Lang- u.  
Kurz-  
fasern*



Quelle:  
[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

# Endlosfaserverstärkte FVK.

## Fertigungsverfahren: Übersicht/Beispiele.

### Verfahren für vorimprägnierte Halbzeuge (Prepregs):

- Autoklav-/Vacuum Bag-Verfahren
- Pressen
- Pultrusionsverfahren (Strangziehverfahren, für Profile)
- Wickelverfahren

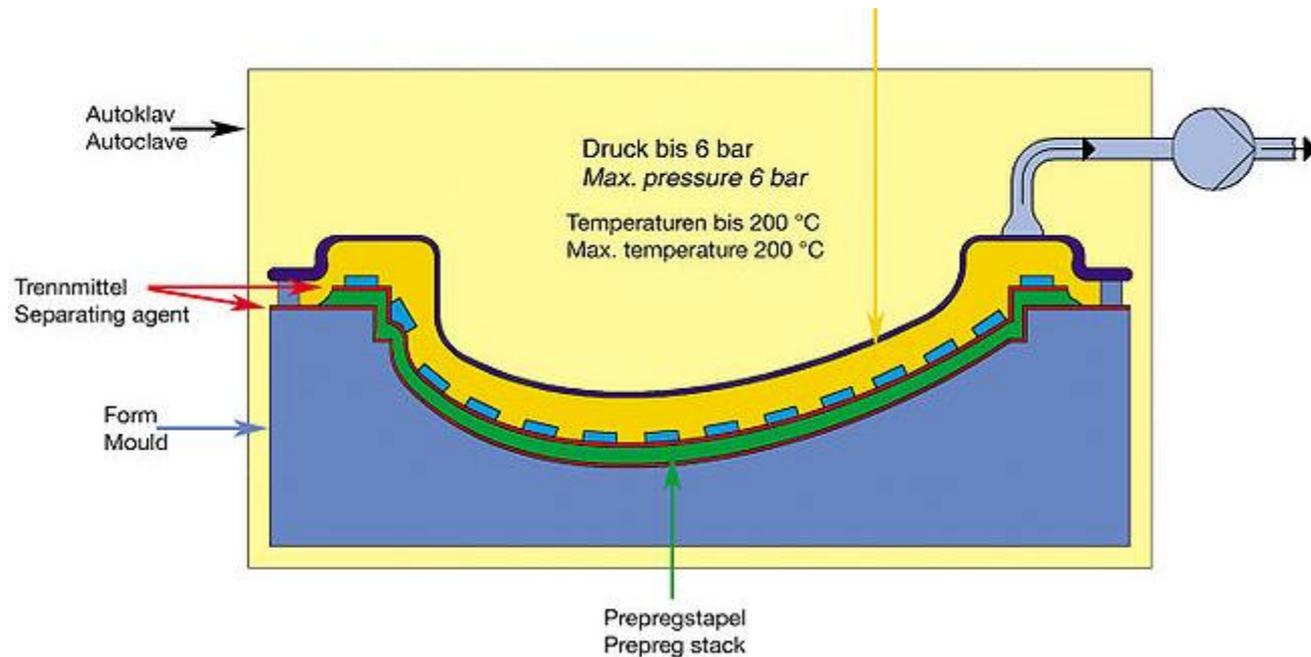
### Verfahren für trockene Halbzeuge:

- Handlaminieren
- Harzinjektionsverfahren, z. B. Resin Transfer Moulding
- Wickelverfahren

# Endlosfaserverstärkte FVK.

## Fertigungsverfahren: Autoklav-Verfahren.

Faserhalbzeuge werden als Prepregs verarbeitet. Sie werden auf eine einseitige Form aufgelegt und der Aufbau inkl. Trennmedien von einer Vakuumfolie komplett umschlossen, evakuiert in den Autoklaven verbracht und unter Druck und Temperatur ausgehärtet.



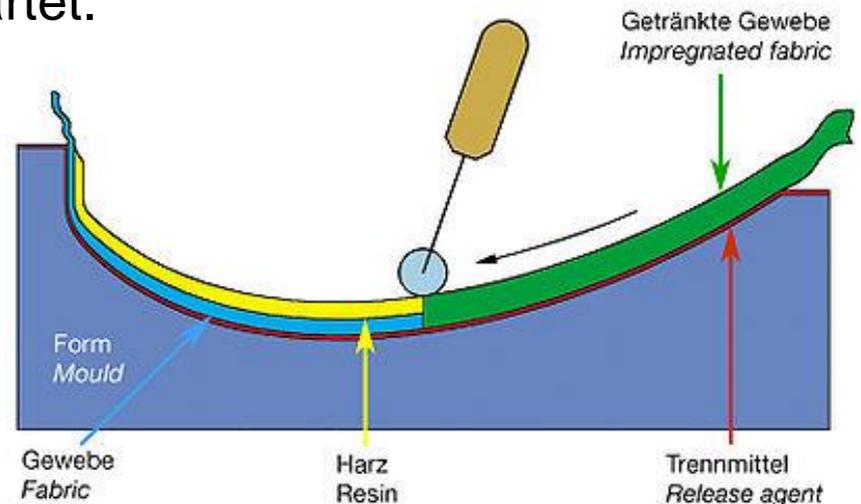
# Endlosfaserverstärkte FVK.

## Fertigungsverfahren: Autoklav-Verfahren.

Die Faserhalbzeuge werden als Prepregs verarbeitet, d.h. in vorimprägnierter Form. Sie werden auf eine einseitige Form aufgelegt (per Hand oder automatisiert, ggf. zusätzlich Trennmittel oder -folien etc.).

Der Aufbau wird auf der Form liegend von einer Vakuumfolie komplett eingeschlossen, evakuiert, in den Autoklaven verbracht und unter Druck und Temperatur die Matrix ausgehärtet.

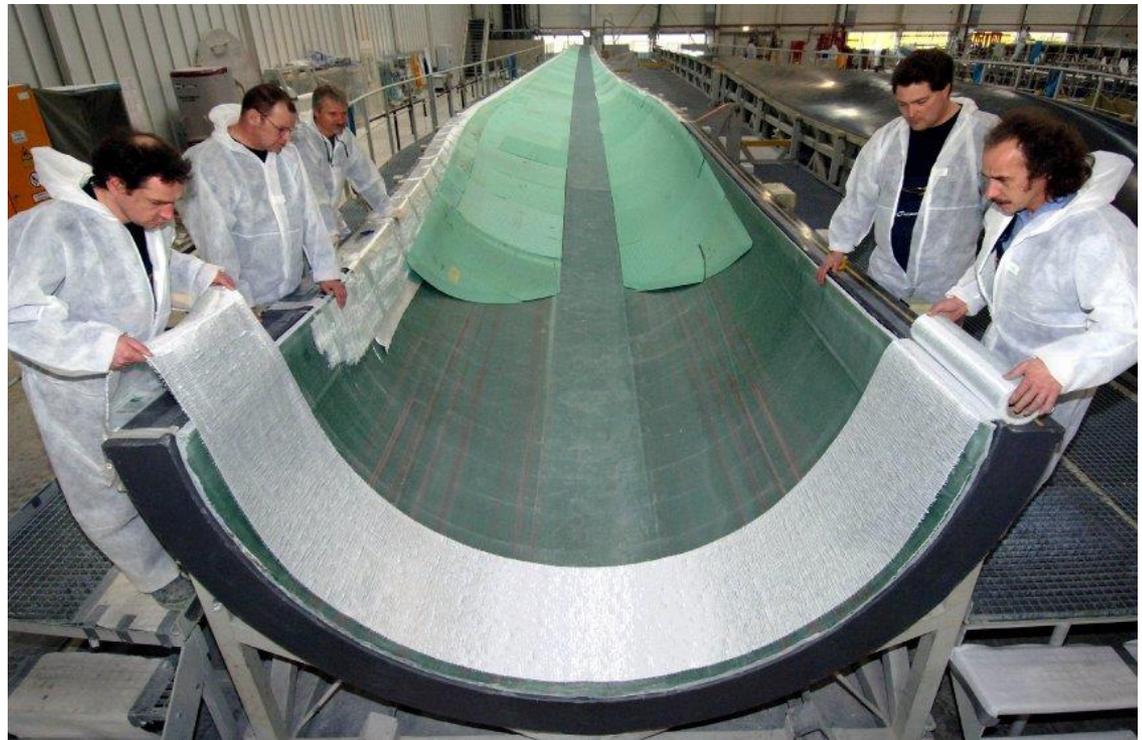
Im Gegensatz dazu wird beim Handlaminieren das Gewebe von Hand mittels eines geeigneten Werkzeuges mit dem Matrixharz getränkt.



# Endlosfaserverstärkte FVK.

## Fertigungsverfahren: Autoklav-Verfahren.

Herstellung von Rotorblättern für Windenergieanlagen, Prepreg-basiertes Verfahren.



Quelle:  
[www.manager-magazin.de](http://www.manager-magazin.de)

# Endlosfaserverstärkte FVK.

## Fertigungsverfahren: Autoklav-Verfahren.

Herstellung von Rotorblättern für Windenergieanlagen,  
Harzinjektionsverfahren  
(Siemens IntegralBlade).



Quelle: [www.windkraft-journal.de](http://www.windkraft-journal.de)



Quelle: [www.siemens.com](http://www.siemens.com)

# Endlosfaserverstärkte FVK.

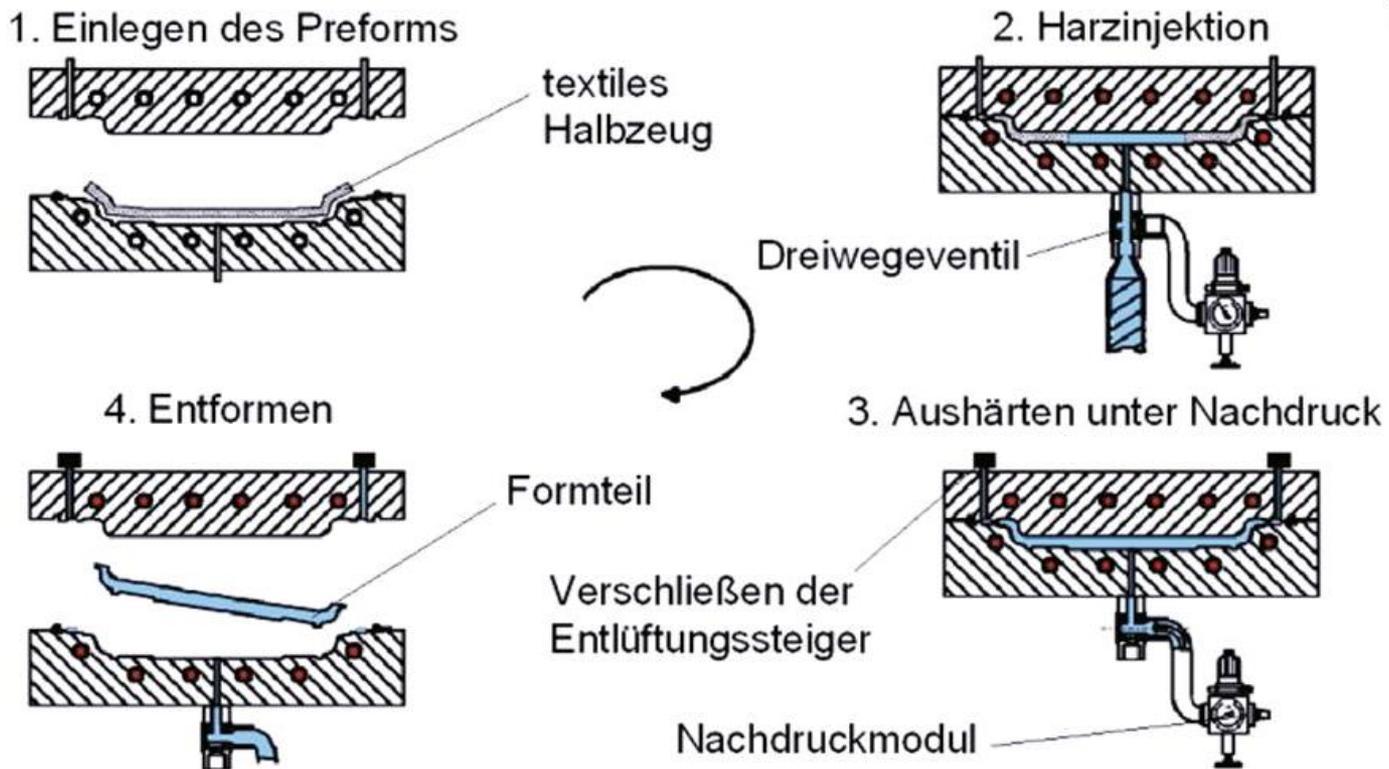
Fertigungsverf.: Resin Transfer Moulding.



Quelle: [www.k-zeitung.de](http://www.k-zeitung.de)

# Endlosfaserverstärkte FVK.

Fertigungsverf.: Resin Transfer Moulding.



Quelle: AVK (2010)

# Endlosfaserverstärkte FVK.

Fertigungsverf.: RTM, Bauteilbeispiele.



Quelle: [www.n-m-s.at](http://www.n-m-s.at)

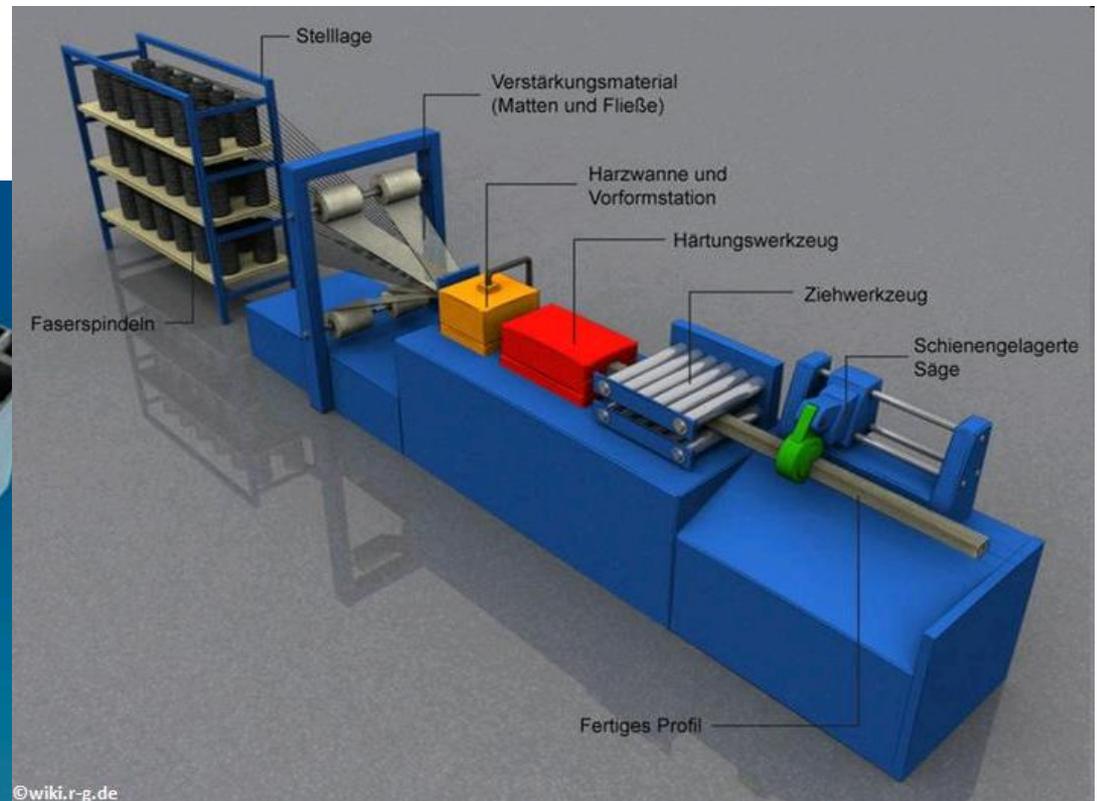


Quelle: [www.faserinstitut.de](http://www.faserinstitut.de)

# Endlosfaserverstärkte FVK.

## Fertigungsverfahren: Pultrusion.

Profilbeispiele und  
Anlagenschema.

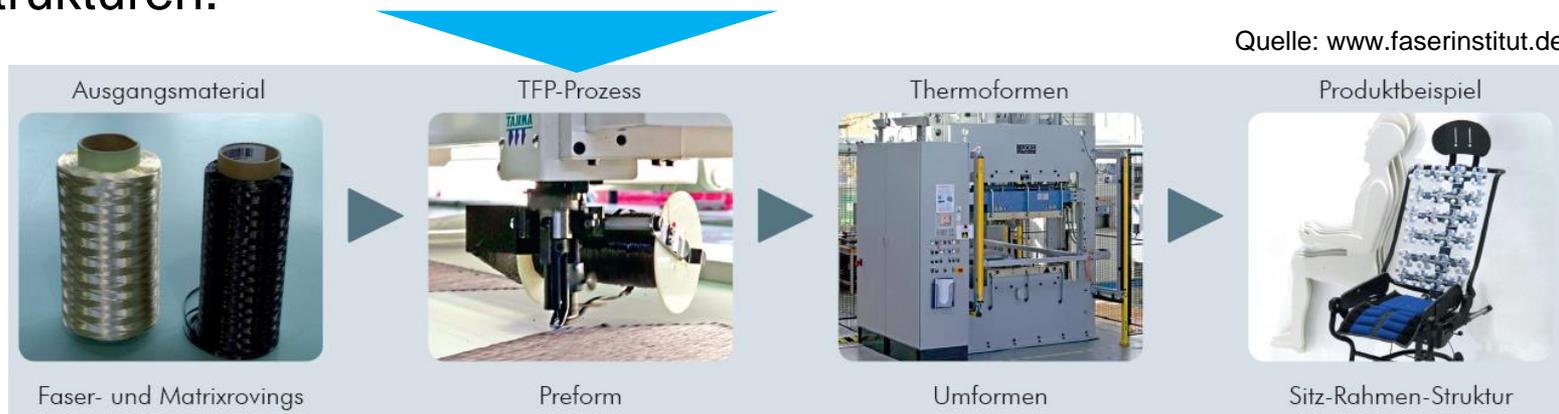


# Endlosfaserverstärkte FVK.

## Unterstützende Verfahren: Fibre Placement.

Tailored Fibre Placement (TFP) oder Automated Fibre Placement (AFP) bezeichnet den Prozess einer gezielten, automatisierten Platzierung von Faserhalbzeugen zur Erstellung einer Preform.

Das Verfahren ist flexibel einsetzbar und kann die Bauteilherstellung vom Autoklav-Prozess bis zum Pressen von FVK mit thermoplastischer Matrix unterstützen. Ergebnis sind belastungsorientiert aufgebaute Strukturen.

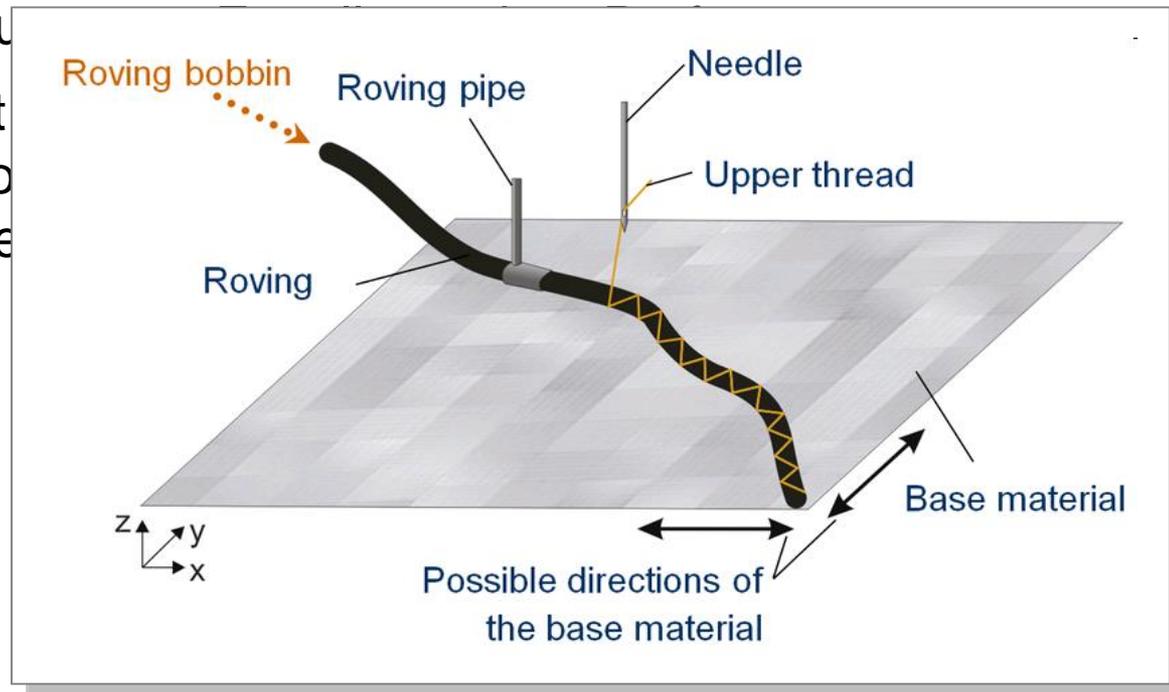


# Endlosfaserverstärkte FVK.

## Unterstützende Verfahren: Fibre Placement.

Tailored Fibre Placement (TFP) oder Automated Fibre Placement (AFP) bezeichnet den Prozess einer gezielten, automatisierten Platzierung von Faserhalbzeugen.

Das Verfahren ist vom Autoklav-Produktionssystem abgeleitet und ermöglicht die Herstellung von Matrix unterstützten Strukturen.



Quelle:  
[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

# Fertigungsverfahren: Hybridwerkstoffe.

## Beispiel Faser-Metall-Laminare.

Kombination aus Werkstoffen unterschiedlicher Materialklassen – unklare, teils abweichende Definitionen für „Hybridwerkstoffe“.

Beispiel Faser-Metall-Laminare – mehrschichtiger Verbund aus FVK und Metallschichten, äußere Schichten in der Regel metallisch, neues Eigenschaftsprofil, u. a. gutes Impact- und Ermüdungsverhalten.

Vorteil hinsichtlich Materialintegration sensorischer Systeme:

Verarbeitung (Herstellung blechartiger Halbzeuge) unter Bedingungen der Verarbeitung organischer Werkstoffe bzw. der beteiligten Faserverbundkunststoffe – Möglichkeiten u. a. Einbettung von Folien/Patches, textile Integration von Sensorsystemen in die FVK-Lagen, Nutzung der Metallagen als Substrat z. B. für Druckverfahren etc.

# Additive Manufacturing.

## Verfahrensübersicht, Anmerkungen.

- (generative Fertigung) üblich ist schichtweiser Aufbau des Bauteils, wg. Auftrag der folgenden Schicht dürfen zu integrierende Komponenten nicht zu einem "Dickenaufbau" führen - Alternative ist das vorsehen von Hohlräumen und Einlegen der Komponenten, ggf. auf Kosten der mechanischen Integration
- Basis Pulvermetallurgie: u. a. Lasersintern, 3D-Printing
- Basis Kunststoffverarbeitung: u. a. Stereolithographie, Druckverfahren
- Additive Layer Manufacturing: Diffusionslötungen zugeschn. Metallfolien, Nutzung von Einzelschichten als Substrat für Sensorsysteme denkbar

# Zusammenfassung

## Fazit und Ausblick

- Komplexität der Aufgabe Materialintegration steigt mit dem Integrationsgrad, d.h. von der Oberflächenapplikation bis zur Volumenintegration.
- Belastung der zu integrierenden Komponenten unterscheidet sich je nach Fertigungsprozess und aufnehmendem Material.
- Anforderungen an integrierbare Sensorsysteme lassen sich klassifizieren, wobei mechanische und thermische Stabilität und Kompatibilität die wichtigsten Kategorien darstellen.
- Es ist zu unterscheiden zwischen Stabilität und Kompatibilität im Prozess und im Betrieb.

# Einleitung.

## Volumenintegration: Ausblick.

- **Typ des aufnehmenden Materials**  
Metall, Leichtmetall, (thermoplastischer/duroplastischert) Kunststoff, Textil, faserverstärkter Kunststoff, ...
- **Verarbeitung des aufnehmenden Materials**  
Gießverfahren, Additive Manufacturing, Laminierverfahren, pulverbasierte Verfahren, ...
- **Konfiguration des Sensor-Matrix-Verbundes**  
Klassifikation nach Konnektivität der aufnehmenden Phase und der die Sensorknoten repräsentierenden Phase
- **Sensortyp nach**  
faseroptischer Sensor (F)
- **Sensortyp**  
mechanischer (D)

Volumen-  
integration

### Dritte Vorlesung heute:

- Anforderung an eingebettete Komponenten
  - gezielte Anpassung der Komponenten
- auf Basis konkreter Beispiele (Studien, Prototypen, etc.)

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit ...

Wo Sie uns finden:

Dr.-Ing. Dirk Lehmhus

Tel. +49 (0)421 2246 7215

Fax +49 (0)421 2246 300

Email [dirk.lehmhus@uni-bremen.de](mailto:dirk.lehmhus@uni-bremen.de)

Web [www.ifam.fraunhofer.de](http://www.ifam.fraunhofer.de)

Postal Address      Wiener Straße 12  
28359 Bremen  
Germany