

# Titan - Werkstoffe für den Automotive-Bereich und ihre Verarbeitung

Autoren: Dipl.Ing (FH) Thomas Hauptmann und Hans Billhofer

Wegen seiner physikalischen und chemischen Eigenschaften und seiner Bioverträglichkeit ist Titan mit seinen Legierungen und intermetallischen Verbindungen ein gefragter Werkstoff in der Luft- und Raumfahrt, im chemischen Apparatebau und in der Medizintechnik.

Da die intermetallische Verbindung Titan-Aluminium ( $\gamma$ -TiAl) im Vergleich zu Titan ein noch niedrigeres spez. Gewicht hat, kommt diese Verbindung neben vielen anderen Anwendungen auch im Flugzeugbau, als Werkstoff für Motorkomponenten wie z. B. Abgasturboladern, Kolben, Turbinenschaufeln und Ventilen, sowie der optischen Industrie und in der Medizintechnik zur Anwendung. So ermöglicht der Einsatz von TiAl – Turbinenschaufeln und Turboladerrädern (Bild 1.) durch das niedrigere spezifische Gewicht des Materials eine starke Verringerung der bewegten Massen und führt dadurch beim Einsatz in Turbinen und Antriebsmotoren zu einem hohen Einsparungspotenzial an fossilen Kraftstoffen.



Bild 1: Turbinenschaufeln, ein Gießtest-Gitter und Turboladerräder aus TiAl  
Mit einer Euro-Münze als Größenvergleich

Der ständig steigenden Nachfrage an komplexen Teilen aus Titan und Titanverbindungen stand jedoch bisher der hohe Preis entgegen. Die Herstellung von

Bauteilen aus Titan ist mit wesentlich höherem Aufwand und Kosten verbunden als bei herkömmlichen Metallen. Mechanisches Bearbeiten wie Fräsen etc. kann nur langsam und unter hohem Werkzeugverschleiß durchgeführt werden.

Für den speziellen Einsatz in der Medizintechnik und der Luft- und Raumfahrt gelang es Linn High Therm in Zusammenarbeit mit ACCESS e.V., einem Aninstitut der RWTH Aachen, in mehrjähriger Forschungs- und Entwicklungsarbeit, ein ausgereiftes Feingussystem für Titan und Titanlegierungen zu entwickeln.



Bild 2: Titangussteile für die Medizin

Es können formnahe (netshape) Bauteile mit höchster Maßgenauigkeit von 0,1 mm und sehr guter Oberflächenqualität hergestellt werden. Möglich sind Bauteile mit komplizierter Form, Hinterschneidungen und filigranen Strukturen, welche durch mechanisches Bearbeiten nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand gefertigt werden können.

Die gegossenen Teile sind sehr nahe an der Endform. Die sehr aufwändige Nachbearbeitung kann dadurch auf ein Minimum reduziert werden. Die sehr schwierige Bearbeitung der sehr dünnwandigen Flächen von Turboladerrädern und Turbinenschaufeln kann zum Beispiel gänzlich entfallen (Bild 1).

Die Gestaltung dieser Flächen kann sich demzufolge fast ausschließlich nach den strömungstechnischen Gegebenheiten richten, ohne Rücksicht auf fertigungstechnische Einschränkungen nehmen zu müssen.

Die Nachbearbeitung besteht in der Regel nur aus dem Trennen des Gussteiles vom Einlaufkanal mit einer Trennscheibe und dem Verschleifen der Angusstellen. Danach können sich weitere Arbeitsschritte wie Polieren oder Sandstrahlen anschließen.

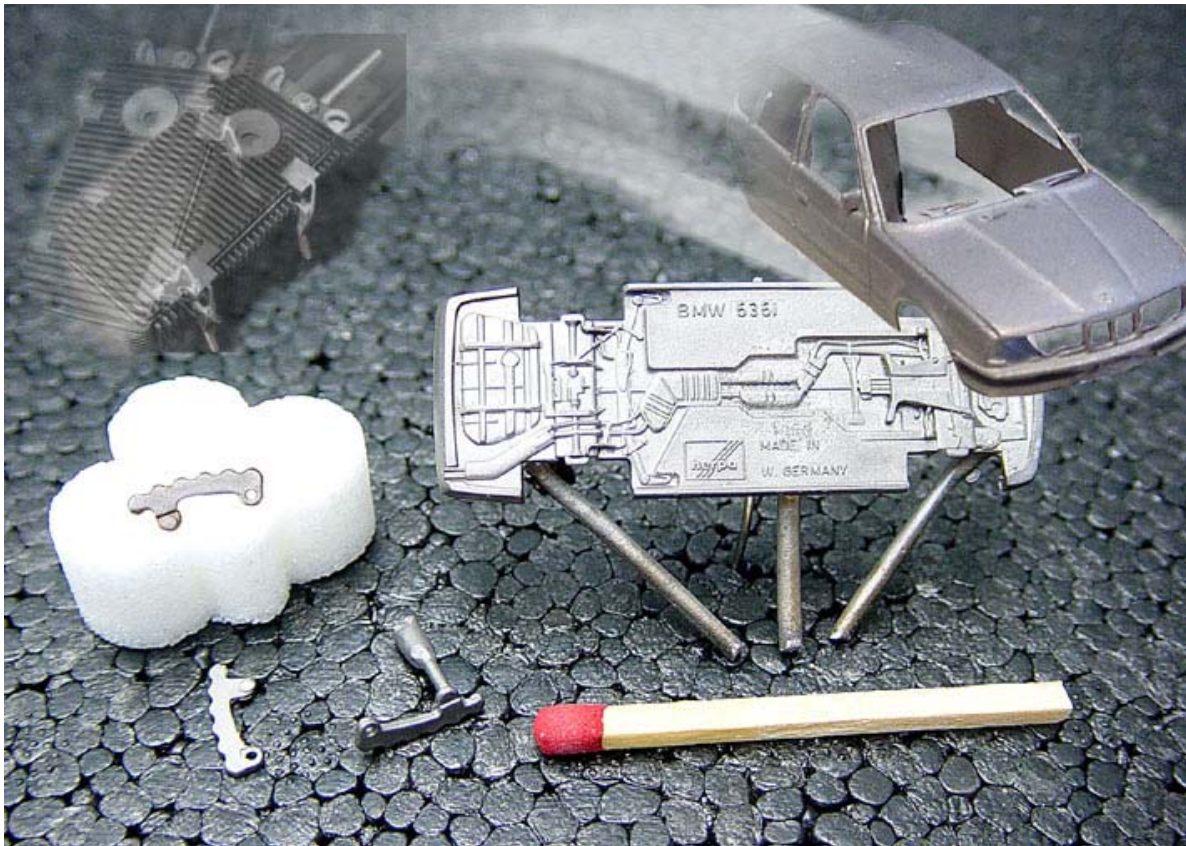


Bild 3: Kleine Gussteile mit filigranen Strukturen

Das hier vorgestellte Feingießen mit Induktions-Schleudergießanlagen ist ein Druckguss-Verfahren, welches dem herkömmlichen Schwerkraft-Feinguss in Bezug auf Materialdichte und Formfüllungsgrad weit überlegen ist. Gegenüber dem Kaltwandtiegel-Verfahren ist es wesentlich kostengünstiger und energieeffizienter. Die bisher üblichen Schmelzverfahren, wie z. B. Lichtbogenschmelzen und Aufschmelzen im Kaltwandtiegel, die aufgrund der extremen Reaktivität des Titans zum Einsatz kommen, sind mit hohen Anlagenkosten verbunden. Das Aufschmelzen des Gussmaterials im keramischen Tiegel mittels induktiver Beheizung mit Hoch- oder Mittelfrequenz ist zeit- und energiesparend und benötigt nur wenig Bauraum in den Anlagen, bei vergleichsweise geringen Anlagenkosten, einfacher Bedienung und genauer Temperaturführung.

Das Erzeugen von Vakuum und das Spülen der Gießkammer mit Schutzgas erweitert die Breite der Anwendungsmöglichkeiten der Induktions-Schleudergießanlagen. Bei Titan und Titanverbindungen wird der Schmelz- und Gießprozess unter Vakuum oder Inertgasatmosphäre durchgeführt, um eine Gasaufnahme in die Schmelze zu vermeiden.



Bild 4: Induktions-Schleudergießanlage Supercast mit Mittelfrequenz-Generator

Mit den kombinierten Vakuum-Induktions-Schleudergießanlagen ist es möglich, das Feingießverfahren, auch unter Vakuum und/oder Schutzgas, mit einer kompakten Anlage sehr wirtschaftlich durchzuführen.

Sind die benötigten keramischen Gießformen vorhanden, ist die Umstellung der Fertigung auf andere Gussteile innerhalb kurzer Zeit ohne hohen Aufwand möglich. Auch für eine Fertigung von nur kleinen Stückzahlen ist das Verfahren aus wirtschaftlicher Sicht interessant.

Die Vorteile des Feingießens mit Induktions-Schleudergießanlagen kommen auch bei anderen Werkstoffen wie Co/Cr -Legierungen, Stählen, Edelmetalle, Kupfer, Magnesium usw. zum tragen.

Linn High Therm fertigt eine breite Reihe von Induktions-Schleudergießanlagen, vom kleinen Tischgerät für eine maximale Gießmenge von 40 g bis zur großen Supercast (Bild 4) mit einem Gießgewicht bis zu 3,5 kg (je nach Metall / Legierung). Mit diesen Anlagen ist sowohl das Gießen in eine Metall-Kokille als auch der Feinguss im Wachsausschmelzverfahren in keramische Formen möglich. Die Größe der Bauteile, die gegossen werden können, reicht von wenigen Millimeter Größe (Bild 3) bis zu Bauteilen mit einer Länge von 300mm (Bild 1).

Die für den Feinguss im Wachsausschmelzverfahren benötigten Wachsausschmelzöfen, Vorwärmöfen und Wärmenachbehandlungsöfen sind ebenfalls im Lieferprogramm von Linn High Therm enthalten.

Als langjähriger Partner von Linn High Therm ist ACCESS e.V. aus Aachen in der Lage, die Gießprozesse durch Computersimulationen und reale Gießtests weiter zu optimieren

Für die Fertigung von Titan- und  $\gamma$ -TiAl-Bauteilen bietet Linn High Therm eine automatische Gießlinie mit S7-Steuerung an, in welcher die benötigten Vorwärmöfen,

Schleudergießanlagen und Wärmebehandlungsöfen zu einer Funktionseinheit zusammengefasst werden (Bild 5).



Bild 5: Automatische Gießlinie für Titan- und TiAl-Bauteile

Die Schleudergießanlagen sind ebenfalls einsetzbar für den Bereich Probenvorbereitung in der Spektroskopie. Dort weisen sie Vorteile wie gute Reproduzierbarkeit, geringe Materialverluste und besonders die hohe Arbeitsgeschwindigkeit gegenüber den herkömmlichen Verfahren auf, vor allem bei der Herstellung von Eichstandards.

Linn High Therm fertigt neben den beschriebenen Feingussanlagen auch Schwerkraftgießanlagen für verschiedenste Metalle und Sonderanlagen in diesem Bereich, z. B. für die Herstellung von Titanschäumen.

Das umfangreiche Zubehör ist auf vielfältige Anwendungen abgestimmt und rundet die Produktpalette ab.

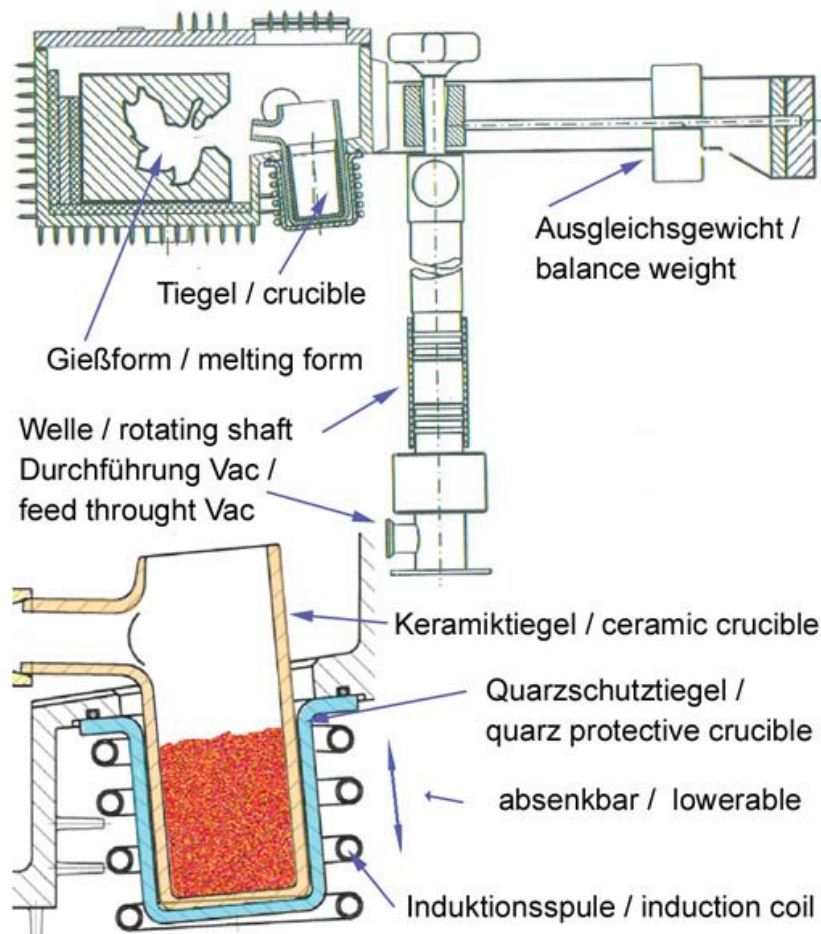


Bild 6: oben: Schleuderarm mit Welle und Drehdurchführung, unten: Schmelztiegel mit Induktionsspule

## Der Präzisions-Feinguss nach dem Wachsausschmelzverfahren – Ein Überblick

Für den Präzisions-Feinguss nach dem Wachsausschmelzverfahren werden Schmelztiegel und Gießformen aus Keramik im Tauchverfahren (Schalentechnik) hergestellt, welche an das Gussmaterial und an die gewünschte Bauteil-Form angepasst sind.

Das Gussmaterial wird in einem Schmelztiegel (Bild 6) platziert und in den Schleuderarm (Bild 6 und 7) eingesetzt. Dem Schmelztiegel gegenüber wird die vorgeheizte Gießform eingelegt.

In dem geschlossenen Schleuderarm-Rezipienten wird, wenn nötig, ein Vakuum erzeugt und mehrere Schutzgas-Spülungen durchgeführt. Dies ist z. B. bei Titan und TiAl notwendig.

Eine Induktionsspule wird von unten über den Schmelztiegel gefahren (Bild 6) und das Gussmaterial wird in kurzer Zeit aufgeschmolzen. Nach Erreichen der Schmelztemperatur wird die Induktions-Spule abgesenkt und der Zentrifugalgußvorgang ausgelöst.

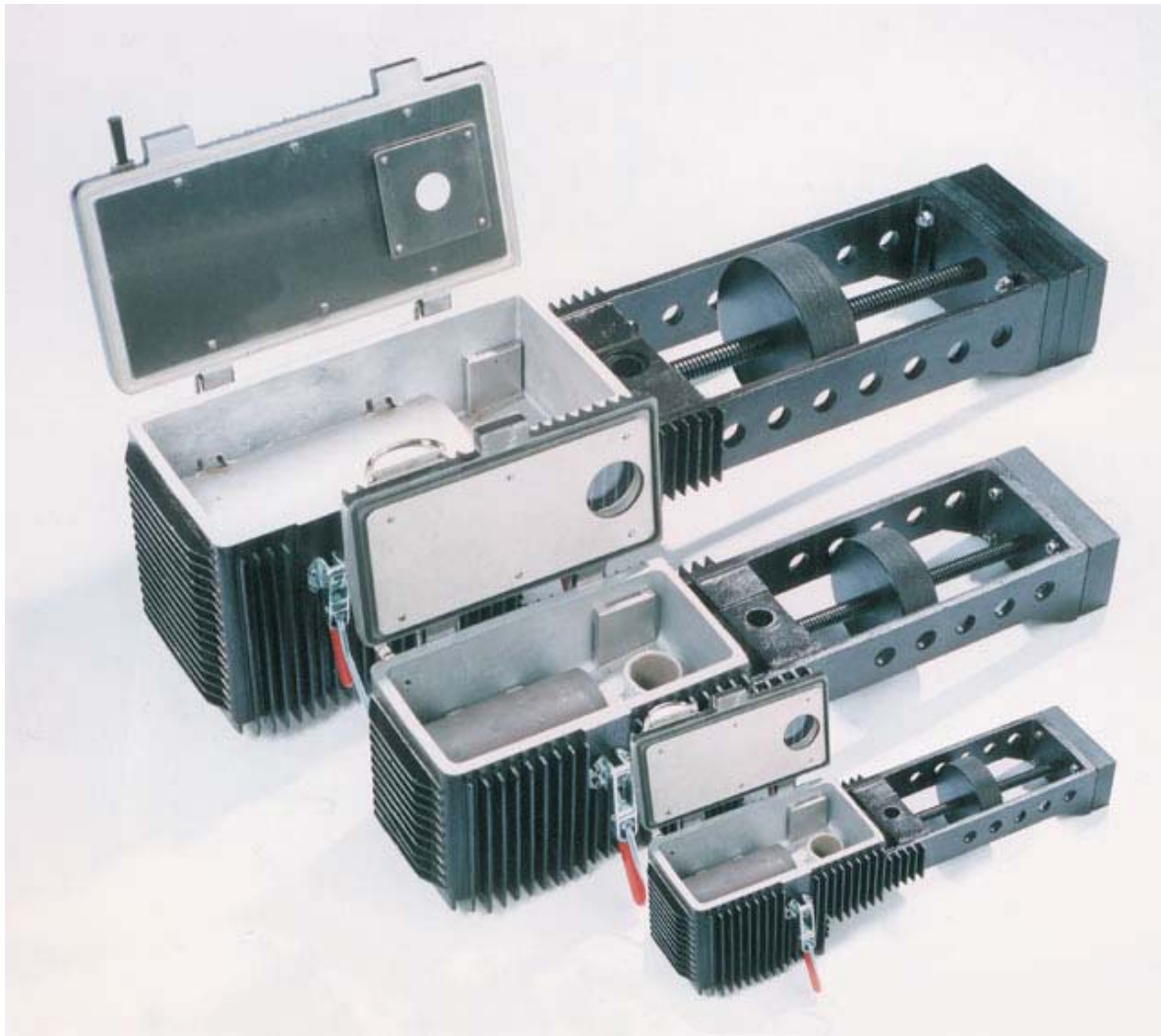


Bild 7: Schleuderarme der Induktions-Schleudergießanlagen (Supercast, Titancast und Platicast)

Durch die Drehung des Schleuderarmes um die senkrechte Welle entsteht eine Zentrifugalkraft nach außen, welche die flüssige Schmelze aus dem Schmelztiegel in die vorgeheizte Gießform drückt. Durch die anhaltende Rotation bleibt diese Kraft während des Erstarrens der Schmelze bestehen und noch flüssige Schmelze wird über die Speiser nachgedrückt.

Nach Erstarrung der Schmelze wird die gefüllte Gießform aus dem Schleuderarm entnommen. Wenn das eingesetzte Material es erfordert, wird anschließend eine Wärmenachbehandlung nach vorgegebenen Temperaturverläufen und Atmosphären in einem Wärmebehandlungs-Ofen durchgeführt. Nach Abkühlung der Gießform wird das Gussteil unter Zerstörung der Form ausgeschlagen.

Die Gussteile werden mit einer Trennscheibe vom Speiser abgetrennt, und die Angüsse werden verschliffen und verputzt. Polieren oder Sandstrahlen können sich danach als weitere Arbeitsschritte anschließen.

### **Herstellung der Gießformen für das Wachs ausschmelzverfahren**

Von einer Urform wird eine Silikonform oder ein Formwerkzeug hergestellt. Von dieser Form lassen sich manuell oder im Spritzgussverfahren beliebig viele Duplikate in Wachs oder Kunststoffen fertigen. Diese Wachsmodelle werden von Hand zu wirtschaftlich sinnvollen Gießtrauben zusammengestellt (Bild 8).



Bild 8: Wachsmodelle zu Gießtrauben präpariert

Die Gussbäume werden in einem speziellen Keramikschlicker getaucht und anschließend besandet. Danach werden sie zum Aushärten aufgehängt. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt. (Bild 9). Für sehr hohe Anforderungen können bis zu 12 Keramikschichten notwendig sein, in der Regel sind aber 5 bis 6 Schichten ausreichend.



Bild 9: Modelltraube nach mehrmaliger Besandung

Wenn die mechanische Anforderung an die Gießform sehr hoch ist kann zusätzlich eine Metallgittereinlage in die Gießform eingearbeitet werden oder die Form wird in einer Küvette aus hitzefestem Stahl mit einer phosphatgebundenen keramischen Masse hinterfüllt um die nötige Stützwirkung zu erzielen. In der Regel ist aber das Gießen in die Gießform ohne Hinterfüllung möglich.

Das Wachs ausschmelzen erfolgt bei 140 °C bis 180 °C, das Brennen der Formen abhängig von dem verwendeten Materialien bei Temperaturen über 900 °C.

Zum Gießen wird die Form in einem Vorwärmofen (Bild 10) auf die erforderliche Vorwärmtemperatur aufgewärmt und anschließend in den Schleuderarm eingesetzt. Diese Vorwärmtemperatur ist von dem Gussmaterial und der Geometrie des zu vergießenden Werkstücks abhängig und beträgt zwischen 350 °C und 1100 °C.





Bild 10: Drehherdöfen für Gießformherstellung oder Wärmebehandlung

## Schmelztiegel

Im keramischen Schmelztiegel wird das Gussmaterial durch Induktion aufgeschmolzen.

Durch den Schmelzvorgang werden an den Tiegel große mechanische und chemische Anforderungen gestellt und es wird eine hohe Temperatur- und Temperaturwechselbeständigkeit benötigt.

Einige Gussmaterialien, wie z. B. bestimmte Edelstähle oder Titan, sind als Schmelze chemisch sehr aktiv und es müssen noch höhere Anforderungen in Bezug auf chemische Beständigkeit von den Schmelztiegeln bewältigt werden. Weiterhin muss sichergestellt sein, dass von dem Tiegelmateriale keine unerwünschten Stoffe an die Schmelze abgegeben werden.

Um eine hohe Prozesssicherheit zu erreichen bedarf es einer genauen Abstimmung von Tiegelmateriale, Tiegelform und Gussmateriale.

Mit Hilfe von 3D-Gieß-Simulationsprogrammen (Bild 11) wurden Gießvorgänge unter unterschiedlichsten Bedingungen simuliert und eine Reihe von Schmelztiegeln mit optimalen Tiegelformen für einen Großteil der Anwendungen entwickelt. Diese Tiegel sind Teil des umfangreichen Zubehörprogramms von Linn High Therm. Damit ist eine Sonderanfertigung der Schmelztiegel im Normalfall nicht nötig.

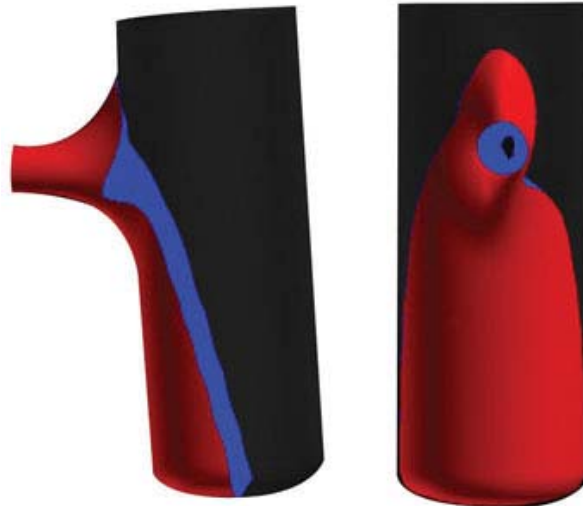


Bild 11: 3D-Simulation des Auslaufvorganges der Schmelze beim Schleuderguss

### Vakuum und Schutzgas

Um unerwünschte Reaktionen des Gussmaterials auszuschließen und die vollständige Füllung der Gießform zu begünstigen, kann im Schleuderarm Vakuum erzeugt und Spülungen mit Schutzgas zur Entfernung von Restsauerstoff durchgeführt werden. Dafür ist in den Linn-Gießanlagen ein Vakuum-Pumpenstand mit Schutzgas-Einspeisung integriert.

Die Achse des Schleuderarms ist als Hohlwelle ausgebildet. Sie ist über eine vakuumdichte Drehdurchführung mit dem Pumpstand verbunden (Bild 6). Als Schutzgas wird in der Regel Argon, Stickstoff oder Formiergas verwendet. Für das Gießen von Titan und Titanlegierungen wurde das Vakuumsystem verbessert und das Pumpprogramm (frei wählbare Vor- und Nachpumpzeiten) an die Anforderungen beim Schmelzen von Titan angepasst. Weiterhin ist es möglich, eine Partialdruckregelung mit Gasspülung bei z. B. 100 mbar einzusetzen um das Abdampfen von Legierungsbestandteilen aus der Schmelze zu verringern. Das Vakuumsystem besteht zum Beispiel bei der Supercast Titan aus einer Wälzkolbenpumpe mit 800 m<sup>3</sup>/h und einer entsprechenden Vorpumpe. Dieser Pumpenstand ermöglicht sehr schnelle Evakuierungszeiten und garantiert das benötigte Vakuum auch während des Schmelzens und dem Guss. Das Arbeits-Vakuum von  $5 \times 10^{-2}$  mbar kann innerhalb von 20 s erreicht werden, als max. Endvakuum in der Kammer sind  $1 \times 10^{-3}$  mbar möglich. Als Drehdurchführung wird eine speziell konstruierte Ausführung mit magnet-fluid Dichtsystem eingesetzt, welche ein sicheres Vakuum bei sehr hoher Standfestigkeit garantiert.

### Induktives Schmelzen

Das Prinzip der induktiven Erwärmung lässt sich mit einem Transformator vergleichen. Die wassergekühlte Induktions-Spule (primäre Wicklung) induziert im Gussmaterial (sekundäre Wicklung) Wirbelströme, die durch Ohmsche Verluste direkt in Wärme umgewandelt werden. Neben der Erwärmung des Gussmaterials bewirken die Wirbelströme gleichzeitig eine optimale Durchmischung, was bei Legierungen und Metallverbindungen höchste Homogenität und reproduzierbare Gussergebnisse gewährleistet.

Für den Guss von z. B. Titan und Titanverbindungen können mit einer Schmelzleistung von bis zu 30 kW kurze Aufheizzeiten und geringe Verweilzeiten der Schmelze im Tiegel erreicht werden.

Die Temperaturmessung erfolgt mit einem Pyrometer, welches die Temperatur der Schmelze durch das Schauglas des Schleuderarm-Deckels berührungslos misst und an die S7-Steuerung weitergibt.

Zur Erleichterung der visuellen Überwachung wird das Bild des Pyrometers auf einem Monitor ausgegeben (Bild 12).

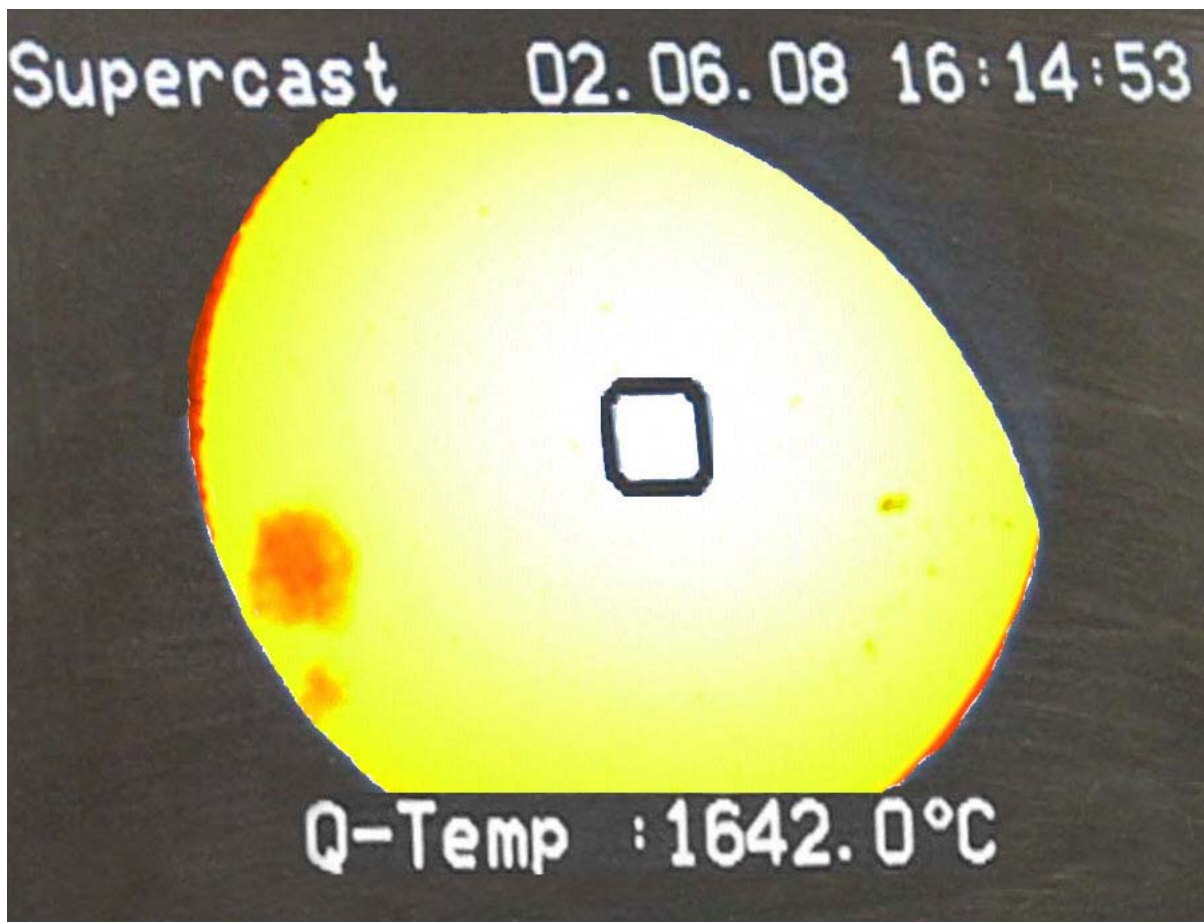


Bild 12: Videobild des Pyrometers, TiAl-Schmelze kurz vor dem Abguss

### **Schleuder-Gieß-Vorgang**

Der sehr leistungsstarke, drehzahlgeregelte Spezialmotor wirkt auf den Schleuderarm und ermöglicht die exakte Einhaltung der materialspezifischen Gießparameter während des eigentlichen Gusses.

Alle Prozessschritte werden durch den Programmregler in allen Parametern automatisch gesteuert.

Für den Titanguss wurde die Winkelbeschleunigung des Schleuderarms erhöht. Wegen des geringen spezifischen Gewichts und des hohen Schmelzpunktes von Titan muss es beim Giessen - im Gegensatz zu anderen Metallen - mit wesentlich höheren Kräften in die Form gedrückt werden um diese vollständig auszufüllen. Abhängig von der Geometrie des Gussteils lassen sich Beschleunigung und

Enddrehzahl des Schleuderarms stufenlos einstellen, z. B. bei der Supercast von 1 bis 15 s bzw. von 0 bis 300 U/min. Realisiert wird dies durch einen speziellen Drehstrom-Servomotor mit vorgeschaltetem Hochstrom-Frequenzumwandler.

Die Supercast-Baureihe ist mit einer modernen Siemens S7-Steuerung mit Touchpanel und Rezeptur ausgestattet. Der gesamte Ablauf kann neben dem manuellen Modus auch in einem automatischen Modus absolviert werden, so dass die Prozessschritte Vakuumpumpen, Schutzgas spülen, Schmelzen und Schleudern selbstständig von der Anlage durchgeführt werden.

Damit ist ein sicherer, reproduzierbarer Prozessablauf garantiert und die Gießparameter können zu 100 % eingehalten werden.

### **Wärmebehandlung**

Einige Materialien, wie z. B. Titanlegierungen für besonders anspruchsvolle Anwendungen, erfordern direkt nach dem Gießen eine Wärmebehandlung. Die Gussteile werden unmittelbar nach dem Guss in einen Wärmebehandlungsofen (Bild 13) eingelegt und durchlaufen dort unter Schutzgas- oder Normalatmosphäre vorgegebene Temperaturen, Haltezeiten und genau definierte Abkühlgeschwindigkeiten. Der Ofen kann ein kontinuierlicher Banddurchlaufofen sein oder ein Kammerofen, der im Batch-Betrieb gefahren wird, z. B. ein FAH bzw. ein KS-S Modell von Linn High Therm.

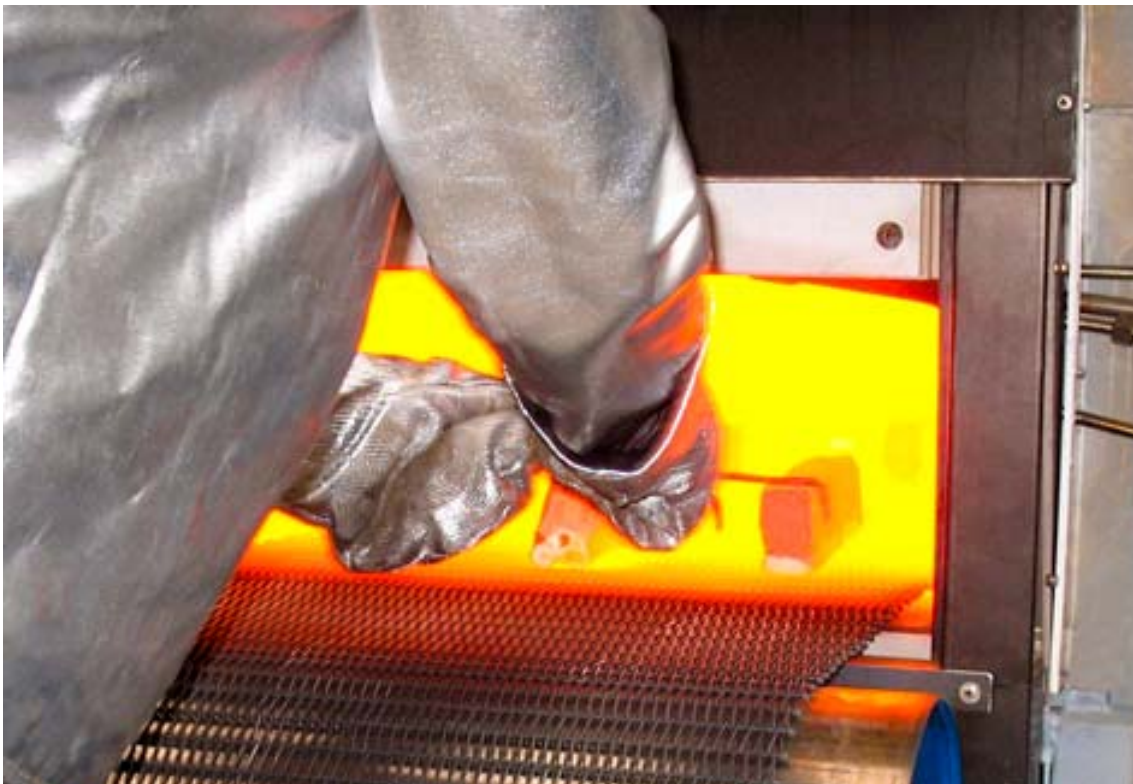


Bild 13: Einlegen einer gegossenen Gießform in einen Wärmebehandlung-Bandofen

## Fazit

Induktions-Schleudergießanlagen ermöglichen das preiswerte, aber trotzdem prozessstabile Gießen von endkonturnahen Bauteilen aus vielen Metallen und Metalllegierungen. Besonders interessant sind die Gießanlagen für die Verarbeitung von Werkstoffen mit hohen Ansprüchen, z. B. Titan und intermetallische Verbindungen wie  $\gamma$ -TiAl oder FeAl.

Durch ihre breite Produktpalette sind Anlagen von Linn High Therm sowohl für die Fertigung kleinster Bauteile mit geringen Stückzahlen als auch für die Serienfertigung großer Bauteile einsetzbar.