

Haupttitel: (deutsch und englisch)

Anlagen für das Thixo-Schmieden
Facilities for the thixoforging process

Autor:

Dipl.-Ing. Jens Baur
Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart, Holzgartenstraße 17, 70174 Stuttgart

Rubrik:

Produktionstechnik, Schmieden

Inhalt: (deutsch und englisch)

Thixo-Schmieden ist Schmieden von Metallen im Temperaturbereich zwischen Solidus- und Liquidustemperatur. Der vorliegende Artikel befasst sich mit den speziellen Anforderungen, die das Verfahren an Werkstoff sowie an Erwärmungsanlage und Presse stellt. Die Erwärmungsanlage hat eine möglichst homogene Temperaturverteilung im Rohteil zu gewährleisten. Die Presse für das Thixo-Schmieden muß im Gegensatz zu konventionellen Schmiedeeinrichtungen über dem Preßweg gesteuerte Stößel-Geschwindigkeitsverläufe ermöglichen. Thixoforging is the forging of metals in the range between solidus and liquidus temperature. The article is about the specific needs of the process, concerning the material as well as the heating system and the forming press. The heater has to realize a homogeneous temperature over the volume of the work piece. The forging process has to follow a certain given punch velocity over the punch stroke.

1. Einleitung

Beim Verfahren des Thixo-Schmiedens findet die Formgebung des Werkstoffs im Temperaturbereich zwischen Liquidus- und Solidustemperatur statt. Zwischen diesen beiden Temperaturen sind je nach Temperatur bestimmte Flüssiganteile gegeben. Das Werkstück befindet sich somit in einem teilflüssigen Zustand. [1]

Die Verfahren des Thixoformings sind Thixo-Schmieden (Thixocasting) und Thixo-Schmieden (Thixoforging), siehe Bild 1. Während beim Thixocasting die Temperatur näher an der Liquidus- Temperatur liegt, d.h. ein höherer Prozentsatz flüssig ist, liegt die Temperatur beim Thixo-Schmieden näher an der Solidus-Linie. Somit ist hier nur ein geringer Anteil flüssig. Das Thixo-Gießen ist anlagentechnisch dem Druckguß zuzuordnen, während das Thi-

xoforging dem Gesenkschmieden und dem Querfließpressen zuzuordnen ist. Besonders hervorzuheben ist, dass beim Thixo-Schmieden die zur Umformung erforderlichen Stempelkräfte - verglichen mit dem Schmieden - äußerst gering sind.

Wichtige Voraussetzungen für das Thixo-Schmieden sind globulares Gefüge, spezielle Werkzeuge und vorgebbare Stempelweg-Stempelgeschwindigkeits-Verläufe.

Ziel des Thixoforgings ist die Kombination der Vorteile des Druckgießens (komplizierte Bauteilgeometrien, dünne Wandstärken) mit den Vorteilen des Schmiedens (druckdichtes Gefüge, hohe Bruchdehnung, hohe Festigkeit, Schweißbarkeit und die Möglichkeit des Wärmebehandeln sowie gute Oberflächen), siehe [2], [3].

Im folgenden Artikel wird auf die Anforderungen, die der Prozeß des Thixo-Schmiedens an die dafür verwendeten Einrichtungen stellt, eingegangen, soweit die Technik von den Einrichtungen für das konventionelle Schmieden abweicht.

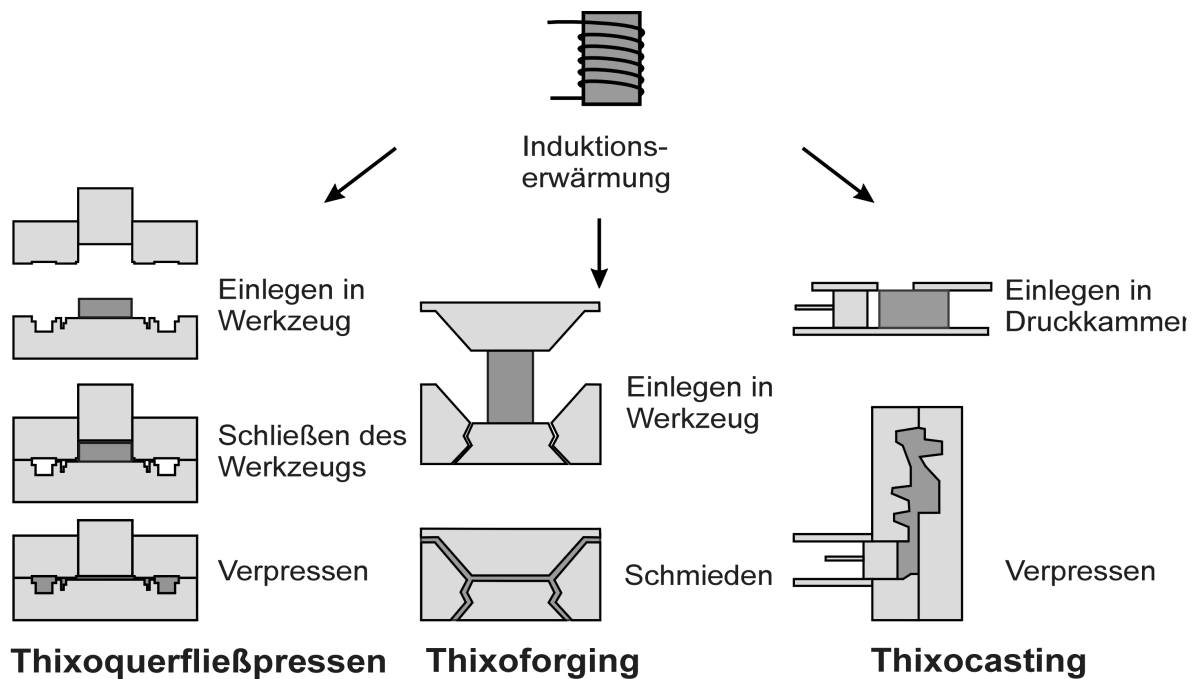


Bild 1: Verfahrensvarianten Thixoforging

2. Verfahrensablauf Thixoforging

Das Thixo-Schmieden lässt sich in die vier Teilschritte Vormaterialbehandlung, Erwärmung, Umformung sowie Abkühlung mit gegebenenfalls nachfolgender Wärmebehandlung untergliedern.

Durch eine geeignete Vormaterialherstellung und -behandlung soll ein Werkstoffgefüge eingestellt werden, das nach der Erwärmung auf Prozesstemperatur aus festen globularen Gefügebestandteilen in einer flüssigen Matrix besteht. Industriell wird dies meist durch elektro-

magnetisches Rühren während des Stranggiessens erreicht. Bezüglich weiterer Verfahren wird verwiesen auf die Literatur [1].

3. Arbeiten am Institut für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart

Am Institut für Umformtechnik wird schon seit einigen Jahren auf dem Gebiet des Thixo-Schmiedens von Aluminium, Messing, Zink und Stahl geforscht. Neben der Entwicklung der Pressentechnologie und der Anlagen zur induktiven Erwärmung, war die Verarbeitung einer breiten Palette von Werkstoffen sowie das Studium der Fertigung einer weitgespannten Werkstückpalette Ziel der Forschungsaktivitäten.

Im folgenden soll in der Reihenfolge der Prozeßschritte auf die jeweils speziellen anlagentechnischen Voraussetzungen und ihre Realisierung am Institut eingegangen werden.

4. Induktive Erwärmung

4.1 Induktive Erwärmung beim Thixoforging

Um die Rohteile für das Thixoforging in den gewünschten Temperaturbereich zu erwärmen, werden in Industrie und Forschung bislang induktive Erwärmungsanlagen eingesetzt. Nur damit läßt sich eine ausreichend hohe Leistung übertragen, die es ermöglicht, in kurzer Zeit die Rohteile auf die gewünschte Temperatur zu erwärmen. Somit läßt sich ein unerwünschtes Kornwachstum während der Erwärmung verhindern. Dazu ist es notwendig, die Zeit bis zum Erreichen der gewünschten Werkstücktemperatur hinreichend kurz zu halten.

Das Ziel der Erwärmung muß es sein, das Rohteil für das Thixo-Schmieden so zu erwärmen, daß im gesamten Volumen des Rohteils ein zweiphasiger Gefügestand mit flüssigen und festen Gefügeanteilen vorliegt. Unabhängig von der Legierung ist das Temperaturfenster, in dem dieser Zustand vorliegt, äußerst eng.

Problematisch ist dabei vor allem, daß das Innere des Rohteils wegen des Skineffektes bei der induktiven Erwärmung (Stromverdrängung in die Randbereiche des Rohteils) nur über Wärmeleitung in das Innere erwärmt wird. Somit ist auf jeden Fall verfahrensbedingt ein radialer Temperaturgradient vorhanden. Dieser ist durch eine geeignete Wahl der Erwärmungsparameter so klein wie möglich zu halten. Ein weiterer Einflußfaktor ist die Wärmeabstrahlung an der Oberfläche, die bereits bei der Erwärmung von Messing, besonders aber beim Arbeiten mit Stahl die Mantelfläche des Rohteils stark abkühlt. Dieser Effekt verringert günstigerweise die durch die induktive Erwärmung bewirkte Temperaturdifferenz zwischen äußeren und inneren Rohzonen.

4.2 Anlagentechnik am IFU

Am Institut für Umformtechnik wird im Gegensatz zu den üblicherweise in Forschung und Industrie eingesetzten Schwingkreis-Anlagen eine Anlage eingesetzt, bei der eine über einen Thyristor gepulste Gleichspannung an der Induktionsspule anliegt. Die Frequenz der Pulse lässt sich in einem Bereich von 1 bis 4 kHz einstellen. Über die Frequenz lässt sich in einfacher Weise die Eindringtiefe variieren - je niedriger die Frequenz, um so größer die Eindringtiefe des induzierten Stromes. Dies ist bei der verwendeten Anlage besonders einfach möglich, da keine Eigenfrequenz eines Schwingkreises berücksichtigt werden muß. Bei Schwingkreisanlagen erfolgt die Abstimmung der Resonanzfrequenz über das Zuschalten von Blindkondensatoren und –spulen, was sowohl schaltungstechnisch aufwendig als auch energetisch ungünstiger ist. Bei der am IFU verwendeten Thyristoranlage ist es außerdem möglich, bei konstanter Frequenz die in das Werkstück induzierte Leistung über eine Modulation der Pulsbreite zu verändern. Mit diesen beiden Parametervariationen ist eine Optimierung des Erwärmungsvorgangs in einfacher Weise realisierbar.

4.3 Regelung der induktiven Erwärmung

Da die Umformung der Rohteile in einem meist sehr engen Temperaturfenster zwischen Solidus- und Liquidustemperatur erfolgen soll, ist eine hinreichend genaue Kontrolle des Erwärmungsvorgangs erforderlich. In Industrie und Praxis werden dafür verschiedene Methoden eingesetzt.

Am weitesten verbreitet ist die Messung der Induktivitätsänderung im Rohteil. Alternativ hierzu kann über einen Leistungscontroller, der die in das Werkstück eingebrachte Leistung erfasst, bei Vorliegen von entsprechenden Kalibrierkurven der prozentuale Flüssigphasenanteil erfasst werden. Bei ersterem wird die Veränderung des magnetischen Eigenschaften des Rohteils während der Erwärmung über eine Sekundärspule erfasst. Systembedingt sollte diese Sekundärspule möglichst in unmittelbarer Nähe zum Rohteil angebracht werden. In der Praxis wird dies meist durch die Integration der Spule in die Rohteilaufnahme realisiert. Dies bedingt allerdings eine thermische Belastung der Spule. Außerdem ist es notwendig, bei jeder Geometrieänderung des Rohteils auch eine neue Sekundärspule einzusetzen, damit die Meßspule möglichst die gesamte Stirnfläche der zylindrischen Rohrteile erfassen kann. Die Erwärmungsüberwachung über einen Energiecontroller ist problematisch, da der Wärmeverlust über Abstrahlung messtechnisch schwer zu erfassen ist.

Von dieser Problematik ausgehend wurde am Institut für Umformtechnik eine Alternative zum Einsatz einer Sekundärspule entwickelt. Der Schaltplan hierzu ist in Bild 2 dargestellt.

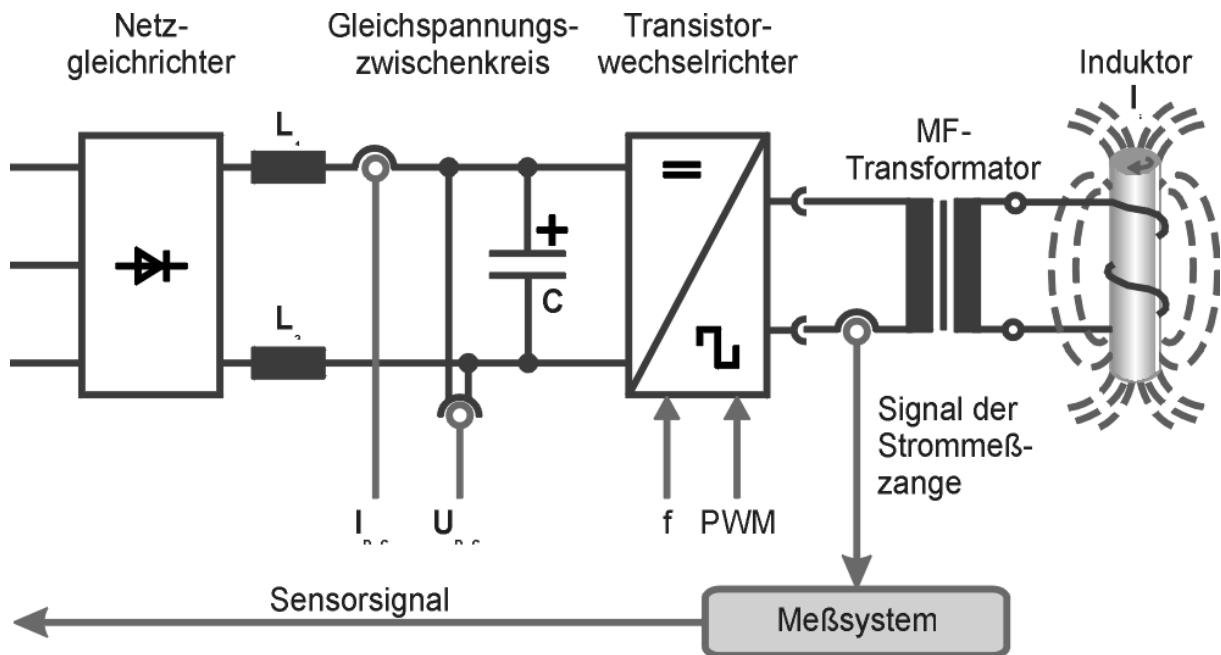


Bild 2: Elektrischer Schaltplan der induktiven Erwärmungsanlage

Hierbei erfolgt die Erfassung des Flüssigphasenanteils mittels der Induktionsspule über die Veränderung der induktiven Eigenschaften des Rohteils. Ausgegangen wurde vom Gedanken, daß die verwendete Anlage eine konstante Spannung an der Spule realisiert. Das neue Messprinzip beruht nun darauf, daß sich die magnetischen und elektrischen Eigenschaften von Metallen beim Übergang vom festen zum teilflüssigen Zustand deutlich ändern. Bei einer konstanten Spannung an der Spule muß sich somit infolge der sich ändernden induktiven Last auch der Strom in der Induktionsspule ändern. Die Nutzung dieses Effekts ermöglicht es, sowohl den Moment des Aufschmelzens, als auch das Verhältnis von flüssiger zu fester Phase im Rohteil zu ermitteln, da sich der Spulenstrom auch mit einem wachsenden Anteil flüssiger Phase im Rohteil verändert. Allerdings ist diese Änderung weit geringer als bei Beginn des Aufschmelzens.

Der Einsatz des Verfahrens erfolgt so, daß bei Referenzversuchen die Temperatur mittels Thermofühlern gemessen wird. Die so erhaltenen Werte werden über den parallel dazu aufgenommenen Werten für den Spulenstrom aufgetragen, so daß eine Kalibrierung des Spulenstroms über der Temperatur erfolgt. Damit ist es möglich, während des Erwärmungsvorgangs online die Temperatur anhand des Spulenstroms angeben zu können.

Zusätzlich kann – ausgehend von Literaturwerten oder Angaben des Herstellers des verwendeten thixotropen Materials - aus der Temperatur auf die Anteile von flüssiger und fester Phase geschlossen werden.

Noch exakter ist es, die Flüssigphasenanteile mittels Schlifften zu ermitteln, so daß ein direkter Zusammenhang zwischen Gefüge und Spulenstrom erstellt wird. Dazu werden Schliffe aus Rohteilen, die auf bestimmte Temperaturen erwärmt und dann abgeschreckt werden, auf ihr Phasenverhältnis hin untersucht. Die so ermittelten Anteile an Flüssigphase werden über den Werten für den Spulenstrom, die im Moment des Abbruchs der Erwärmung zu verzeichnen waren, aufgetragen. Damit ist es dann möglich, online während der Erwärmung den momentanen Anteil der Flüssigphase anzugeben.

Bild 3 zeigt die gemessenen Spulenströme über den gemessenen Temperaturen bei der Erwärmung von 4 Rohteilen der Legierung AlSi7Mg. Bei allen 4 Versuchen betrug die Bandbreite der gemessene Ströme nur wenige Ampere. Verglichen mit der Größe des Stromes ist dieser Fehler sehr gering. Es ist ersichtlich, daß die Reproduzierbarkeit der Messung gegeben ist.

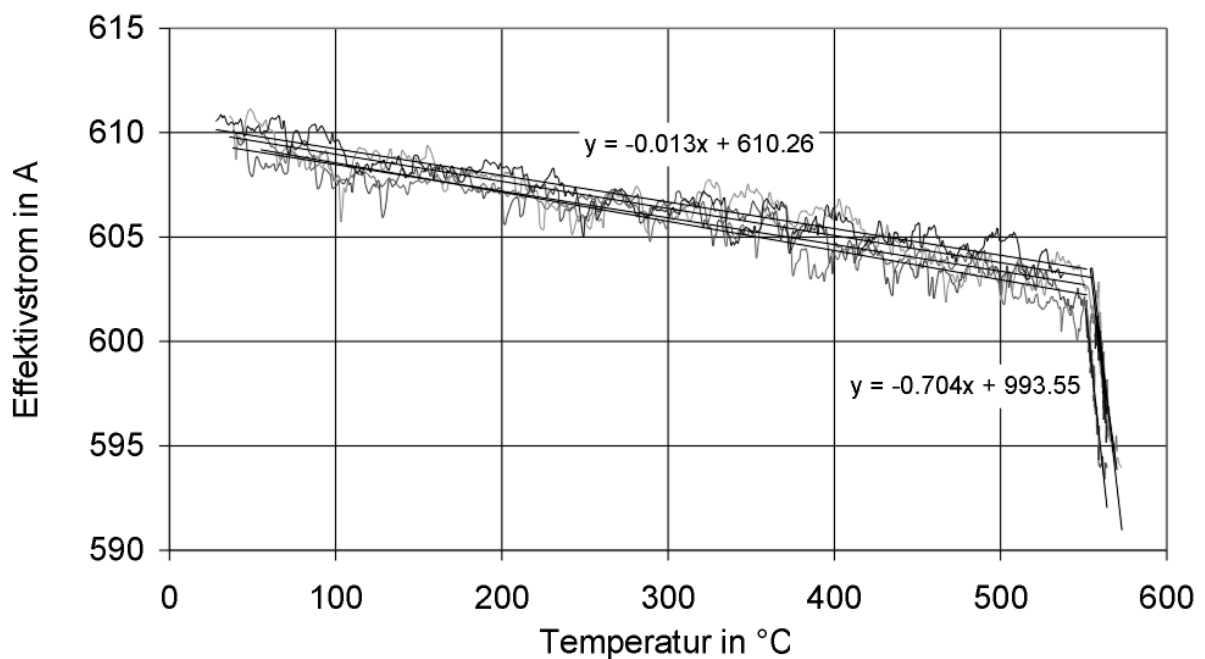


Bild 3: Effektivströme über Rohteiltemperatur bei der Erwärmung von 4 Rohteilen aus AlSi7Mg (Ø 59mm, Höhe 24,5mm)

5. Presse für das Thixoforging

5.1 Anforderungen an die Presse

Das Verfahren des Thixo-Schmiedens erfordert einen speziellen Stößelgeschwindigkeitsverlauf über dem Stößelweg.

Der Umformvorgang beginnt in jedem Fall mit einer möglichst schnellen Schließbewegung der Werkzeughälften. Dies ist notwendig, da aufgrund der hohen Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Werkstück letzteres sehr schnell abkühlt und somit das Temperaturintervall verlassen würde, in dem feste und flüssige Phasen gleichzeitig vorliegen. Als Richtwert kann für die Schließgeschwindigkeit von 800 mm/s Stößelgeschwindigkeit ausgegangen werden.

Bei allen verwendeten Werkzeugtypen – sowohl offenen als auch geschlossenen Gesenken – muß zum Ende des Schließvorgangs ein sanftes Aufsetzen des Werkzeuges erfolgen. Dies ist notwendig, um ein Auseinanderspritzen des teilflüssigen Werkstoffs zu verhindern. Beim Einsatz von Schließwerkzeugen ist darüber hinaus ein Aufsetzen des Werkzeugoberteils auf das Werkzeugunterteil mit geringer Geschwindigkeit zur Verringerung eines Druckstoßes im Federsystem angebracht. Die Aufsetzgeschwindigkeit beträgt je nach Werkstückgeometrie ca. 50 – 200 mm/s.

Das anschließende Umformen erfolgt mit einer von der Werkzeuggeometrie abhängigen Geschwindigkeit, wobei 2 Randbedingungen zu beachten sind.

Zum einen kühlt - je nach dem Verhältnis der Oberfläche zum Werkstückvolumen - das Werkstück bei Kontakt mit dem deutlich kälteren Werkzeug schnell ab. Um ein "Einfrieren" während des Prozesses zu verhindern, muß die Stößelgeschwindigkeit so gewählt werden, daß der Umformvorgang beendet ist, bevor das gesamte Gefüge in die feste Phase übergegangen ist. Eine einfache Möglichkeit, die Zeit bis zum Einfrieren des Werkstücks zu verlängern, wäre eine Erhöhung der Werkzeugtemperatur. Dieses würde jedoch prozessverlängernd wirken, weil nach dem Umformen das Werkstück möglichst schnell abgekühlt werden sollte und hierfür die Temperaturdifferenz zwischen Werkstück- und Werkzeugtemperatur möglichst hoch sein sollte. Auch sind Grenzbelastungen (Temperatur, Kontaktzeit) der Schmierstoffe zu beachten.

Zum anderen muß - je nach Bauteilgeometrie - die Stößelgeschwindigkeit so eingestellt werden, daß eine laminare Strömung beim Füllen des Bauteils möglich ist. Im Fall von starken Querschnittsänderungen bedeutet dies, daß entsprechend den veränderten Fließquerschnitten auch eine veränderte Stößelgeschwindigkeit gewählt werden sollte.

Nach Beendigung des Füllvorgangs sollte das Werkstück unter Druck vollständig erstarren. Als Erstarrungsdruck ist ein Innendruck im Werkstück von mindestens 1.000 bar im Werkstück erforderlich. Hierdurch werden Lunker im Schmiedeteil vermieden und somit die Güte des Schmiedeteils beeinflußt.

Im Anschluß an die Erstarrung erfolgt das Auswerfen des Werkstücks, wenn die Werkstücktemperatur soweit abgesunken ist, daß das Werkstück ohne Verkippungen ausgeworfen werden kann. Somit ergibt sich der in Bild 5 gezeigte angestrebte Stößelgeschwindigkeitsverlauf über der Zeit.

5.2 Presse für das Thixoforging am Institut für Umformtechnik

Am Institut für Umformtechnik erfolgt die Herstellung der Bauteile auf einer einfachwirkenden hydraulischen Presse mit einer Stößelgeschwindigkeit von bis zu 800mm/s. Diese relativ hohe maximale Geschwindigkeit wurde am IFU in Zusammenarbeit mit der Firma SMG durch einen entsprechend dimensionierten ölhydraulischen Speicherantrieb realisiert. Der Druck des Stickstoffspeichers wirkt über einen Kolbenspeicher auf eine Ölsäule, die geschwindigkeitsgesteuert über den Hauptzylinder auf den Stößel wirkt. Die Geschwindigkeit des Stößels wird über ein Stromregelventil zwischen Kolbenspeicher und Pressenzylinder gesteuert [4].

Bild 4 zeigt die am Institut eingesetzte Presse. Der Kolben-Speicher ist durch ein groß dimensioniertes Rohrsystem mit dem Stickstoffspeicher verbunden. Der Stickstoffspeicher ist – wie das Hydraulikaggregat – im Untergeschoß angeordnet. Der Kolbenspeicher ist seinerseits direkt auf den Hauptventilblock montiert, der wiederum unmittelbar auf dem Zylinder sitzt. Dadurch ist es möglich, die trägheitsbehaftete Ölsäule so kurz wie möglich zu halten. Außerdem wurden rohrlungsbedingte Verluste dadurch minimiert.

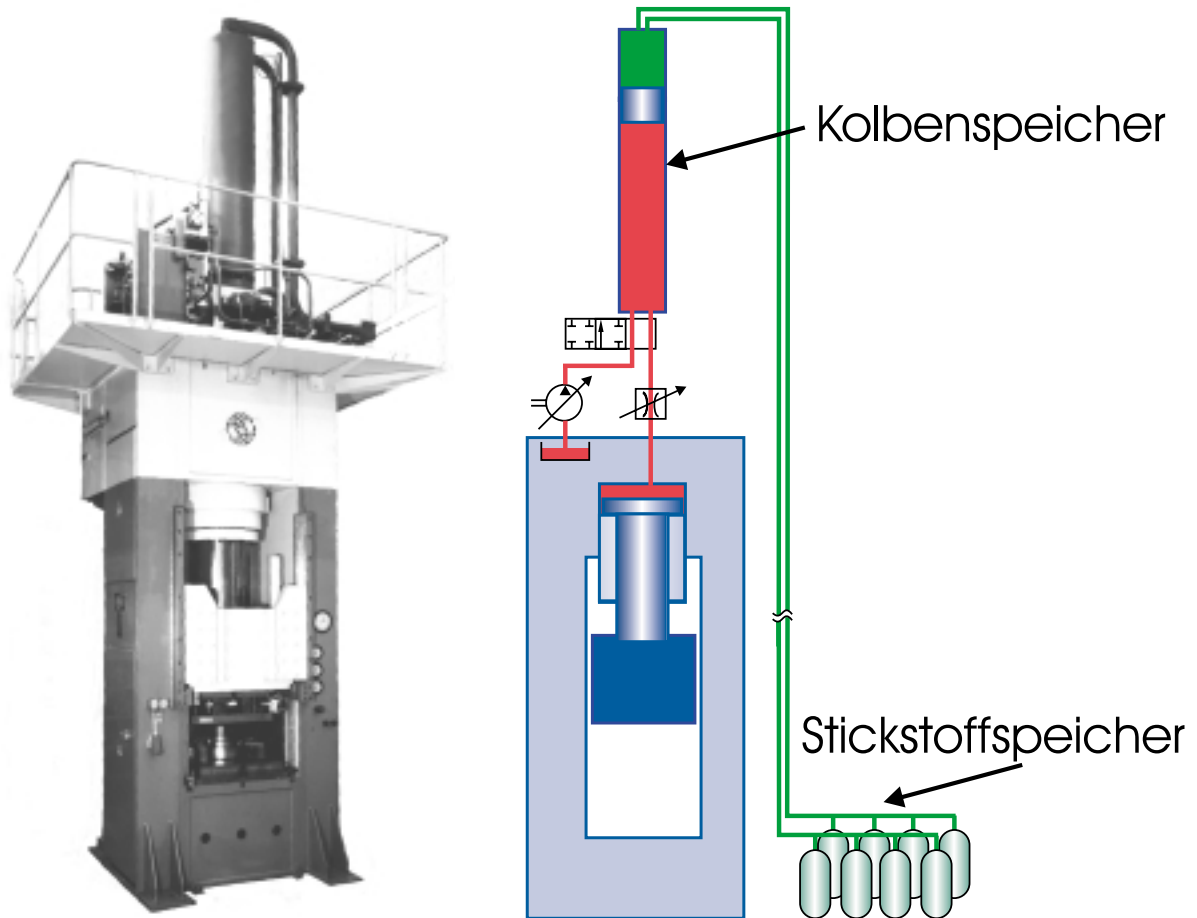


Bild 4: Hydraulische einfachwirkende 5.000kN-Pressen für das Thixoforging

5.2.1 Meßwerterfassung der Pressenparameter

Über in die Presse integrierte Meßtechnik können Stößelweg, Stößelgeschwindigkeit und Stößelkraft während der Umformung gemessen werden. Gleichzeitig kann durch eine Innendruckmessung im Werkzeug der Formfüllungsprozess überwacht werden. Somit ist es möglich, den Formgebungsprozess zu überwachen und gegebenenfalls auftretende Werkstückfehler zu erkennen.

In Bild 5 sind Stößelkraft und Stößelgeschwindigkeit über den Stößelweg beim Umformen eines Werkstücks aus Messing im geschlossenen Gesenk aufgetragen.

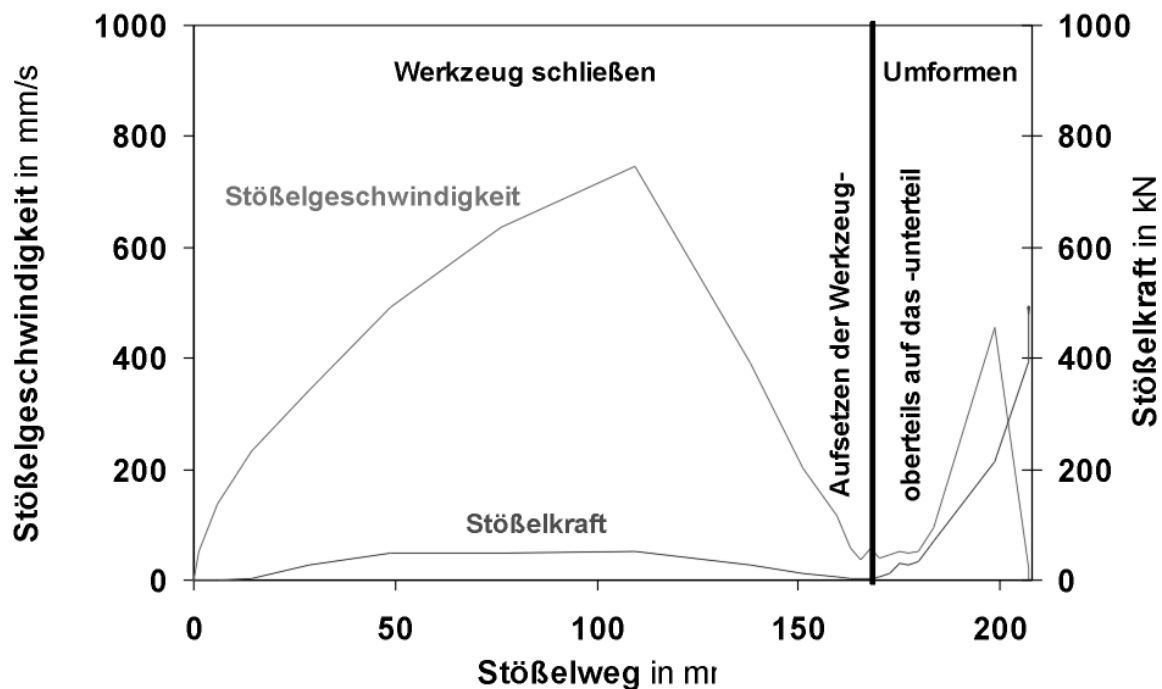


Bild 5: Stößelweg-, Stößelgeschwindigkeit- und Stößelkraftverlauf über der Zeit

Es ist ersichtlich, daß es möglich ist, den theoretisch wünschenswerten Verlauf praktisch zu realisieren. Zu Beginn der Umformung wird der Stößel aus dem oberen Umkehrpunkt heraus auf eine Schließgeschwindigkeit von 800 mm/s beschleunigt. Zum sanften Aufsetzen des Werkzeugs auf das Werkstück wird der Stößel zum Ende des Schließweges hin abgebremst, um dann mit einer Geschwindigkeit von ca. 70 mm/s auf das Werkstück aufzusetzen. Anschließend folgt der eigentliche Umformvorgang, für den die Stößelbewegung einem vorgegebenen Weg-Geschwindigkeits-Profil folgt – im vorliegenden Fall mit einer werkstückspezifischen Maximalgeschwindigkeit von ca. 500 mm/s. Kurz vor dem unteren Umkehrpunkt wird die Geschwindigkeit stark verringert, um die Werkzeugbelastung zu vermindern. Die Stößelkraft wird über den Druck in der Ölsäule im Zylinderraum ermittelt. Daher wird zu Beginn der Stößelbewegung ein vermeintlicher Anstieg der Kraft gemessen, der jedoch Folge des Druckanstiegs im Zylinderraum während der Stößelbeschleunigung ist. Nach dem Aufsetzen des Oberwerkzeugs auf das Unterwerkzeug erfolgt dann der Umformvorgang mit vorgegebener Geschwindigkeit über dem Stößelweg. Die hierfür benötigte Kraft ist relativ gering. Bei Schmiedewerkzeugen mit Schließvorrichtung addiert sich jedoch zur Umformkraft noch die Schließkraft der Schließvorrichtung. Gegen Ende des Umformvorgangs wird das Werkstück

ausgeformt. Wie bei einem konventionellen Schmiedevorgang ist auch beim Thixo-Schmieden ein Anstieg der Kraft zum Ende des Vorgangs hin erkennbar. Zusätzlich wird der Kraftbedarf in dieser Phase jedoch auch durch den aufgrund der Abkühlung des Werkstücks in der Presse geringer werdenden Anteil an Flüssigphase und der damit zunehmenden Fließspannung des Werkstoffs erhöht. Nach Erreichen des unteren Umkehrpunktes muß die Presse noch eine vollständige Erstarrung des Materials unter Druck gewährleisten.

5.2.1 Meßwerterfassung der Werkzeugfüllung

Bild 6 zeigt ein Werkzeug, das über Stickstofffedern geschlossen gehalten wird. Es zeichnet sich dadurch aus, dass das Werkzeugoberteil zunächst auf das Werkzeugunterteil aufsetzt. Während des folgenden Umformvorgangs werden Werkzeugober- und unterteil von einem Stickstoff-Federsystem geschlossen gehalten. Sobald die Werkzeughälften geschlossen sind, dringt der Stempel in das Werkzeug ein und bewirkt die Umformung des Werkstücks.

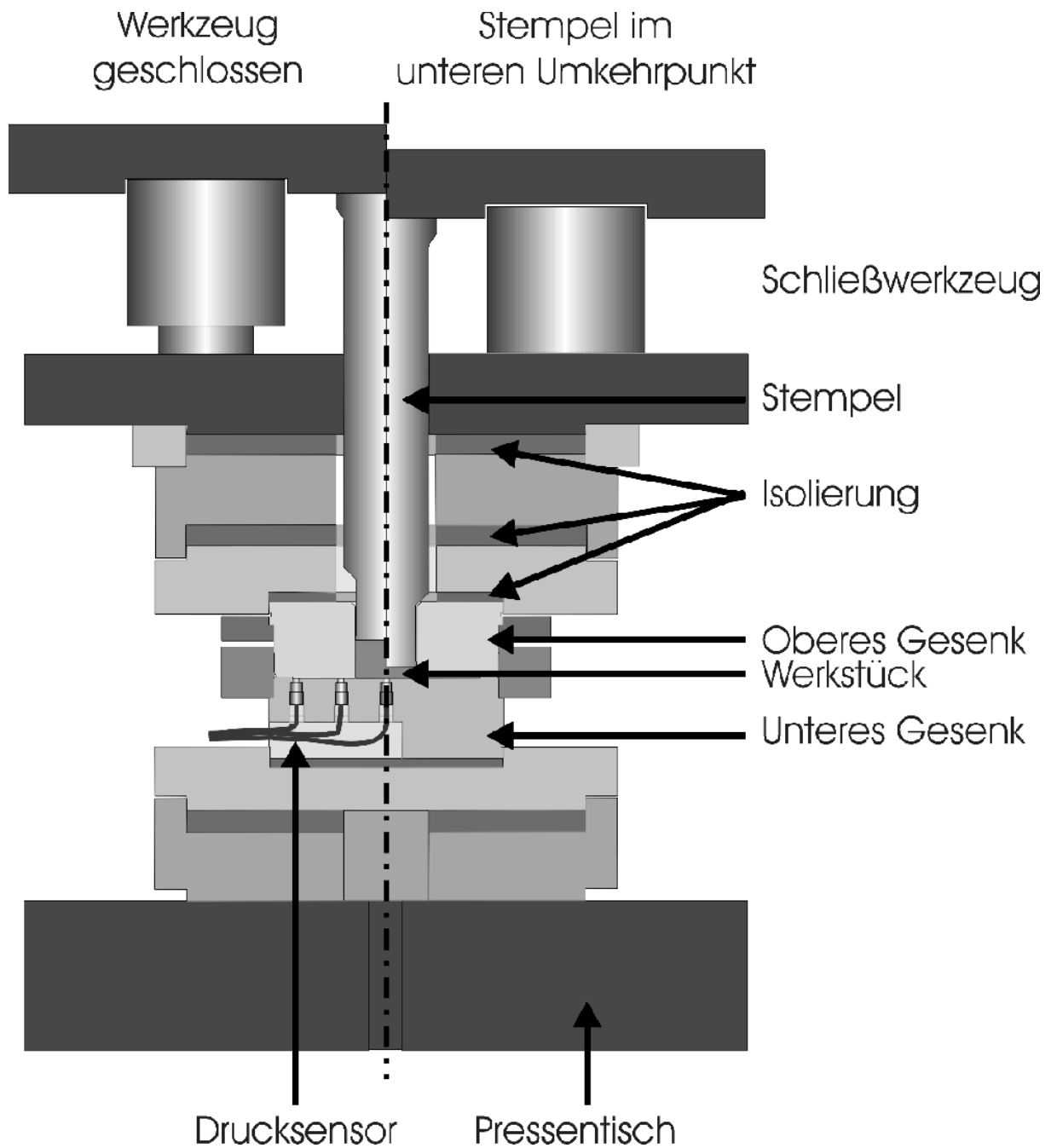


Bild 6: Schließwerkzeug mit Stickstoffedern und integrierter Druckmessung

In Bild 7 sind zwei während eines Umformvorgangs aufgenommenen Verläufe des Innendrucks im Werkzeug über der Zeit dargestellt.

Der obere Verlauf des Innendrucks wurde während der Umformung eines Werkstücks aufgenommen, bei der die Matrizenhälften korrekt geschlossen waren.

Die untere Verlauf des Innendrucks über der Zeit ergab sich bei zu geringem Rohteilevolumen. Ursache dafür war ein Effekt, der bei nicht optimaler Erwärmung beim Thixoforging – vor allem von Aluminium – auftreten kann. Infolge einer zu starken Erwärmung des Rohteils kann es zu sogenannten Abtropfverlusten kommen. Diese Verluste äußern sich in einem Ab-

tropfen der Flüssigphase während der Erwärmung und während des Werkstücktransports. Da beim Thixo-Schmieden im Gegensatz zum Thixo-Gießen mit einer vollständigen Materialausnutzung des Rohteils gearbeitet wird, d. h. Rohteilvolumen gleich Produktvolumen, bedeutet ein Verlust während der Erwärmung, daß das Werkstück nicht vollständig ausgeformt wird. Dadurch wird der Innendruck im Werkzeug deutlich geringer, da aufgrund des Materialverlustes keine vollständige Ausformung erzielt wird.

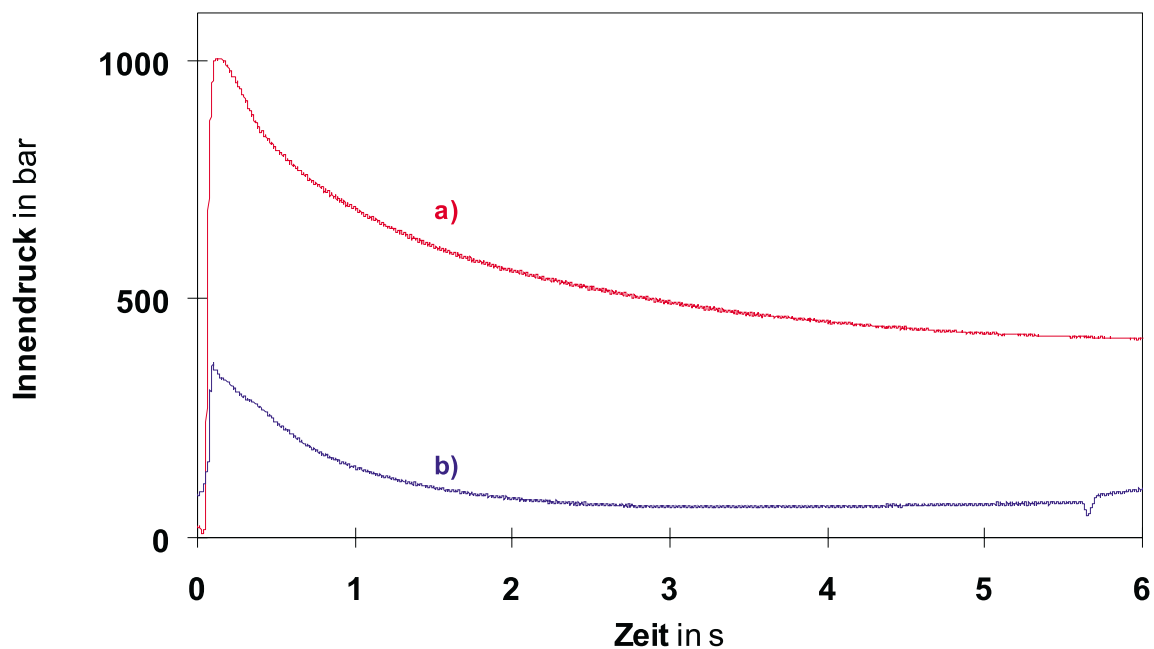


Bild 7: Verlauf des Innendrucks in einem geschlossenen Werkzeug über der Zeit

a) Rohteilvolumen in Ordnung, b) Rohteilvolumen zu gering

6. Thermische Nachbehandlung

Die Werkstücke für das Thixoforging werden – je nach Legierung und Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften – häufig einer thermischen Nachbehandlung unterzogen. Speziell bei Aluminium und Messing ist für die Erzielung optimaler mechanischer Eigenschaften noch eine Wärmebehandlung angebracht. Diesbezüglich wird verwiesen auf [2] sowie [5].

7. Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Artikels wurden für das Thixo-Schmieden die spezifischen Anforderungen an die Rohteilerwärmung, an das Werkzeug und an die Presse dargestellt. Mit den am Institut

für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart vorhandenen Anlagen lassen sich Werkstücke aus Zink-, Aluminium- und Kupferlegierungen sowie aus Stahl fertigen.

8. Literatur

- [1] Hirt, G. et al.: Thixoforming – ein Verfahren mit Zukunft. In: Neuere Entwicklungen in der Massivumformung 1995, Siegert, K. (Herausgeber). Tagungsband zur gleichnamigen Konferenz, Fellbach (bei Stuttgart), 13./14.06.1995, S. 275 – 293.
- [2] Gabathuler, J.P.: Thixoforming: Ein neues Verfahren für die Produktion von Net-Shape-Formteilen. In: Neuere Entwicklungen in der Massivumformung 1997, Siegert, K. (Herausgeber). Tagungsband zur gleichnamigen Konferenz, Fellbach (bei Stuttgart), 3./4.06.1997, S. 91 – 105.
- [3] Gabathuler, J.-P.: Quality and properties of thixoforming suspension components for the automotive industry. Proceedings of the 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Sheffield (GB), 19. – 21.06.1996, S. 331 – 335.
- [4] Fritz W.; et al.: Machine Concept of a hydraulic Thixoforging Press, in: Proceedings of the 5th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Golden (Colorado), 23. – 25.06.1998.
- [5] Kopp R.; Neudenberger D.; Winning G.; Möller T.: Thixoforging and Thixoextrusion - Benefits of innovative Forming Technologies", in: Proceedings of the 6th ICTP, 1999

9. Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Verfahrensvarianten Thixoforming

Bild 2: Elektrischer Schaltplan der induktiven Erwärmungsanlage

Bild 3: Effektivströme über Rohteiltemperatur bei der Erwärmung von 4 Rohteilen aus AlSi7Mg (Ø 59mm, Höhe 24,5mm)

Bild 4: Hydraulische einfachwirkende 5.000kN-Pressen für das Thixoforging

Bild 5: Stößelweg-, Stößelgeschwindigkeit- und Stößelkraftverlauf über der Zeit

Bild 6: Schließwerkzeug mit Stickstoffedern und integrierter Druckmessung

Bild 7: Verlauf des Innendrucks in einem geschlossenen Werkzeug über der Zeit

a) Rohteilvolumen in Ordnung, b) Rohteilvolumen zu gering