# Ressourceneffiziente Formgebungsverfahren für Titan und hochwarmfeste Legierungen

V. Güther[1], St. Erxleben[2], P. Janschek[3], U. Hirnschal[4], B. Lorenz[5]

[1] GfE Metalle und Materialien GmbH, Höfener Str. 45, 90431 Nürnberg, e-mail: volker.guether@gfe.com

[2] LASCO Umformtechnik GmbH, Hahnweg 139, 96450 Coburg, e-mail: stefan.erxleben@lasco.de

[3] LEISTRITZ Turbinenkomponenten Remscheid GmbH, Lempstr. 24, 42859 Remscheid, e-mail: pjanschek@leistritz.com

[4] Märkisches Werk GmbH, Haus Heide 21, 58543 Halver, e-mail: info@hirnschal-consulting.de

[5] Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU), Reichenhainer Str. 88, 09126 Chemnitz, e-mail: bernd.lorenz@iwu.fraunhofer.de

## 1 Einleitung

Die Nichteisenmetalle Titan, Nickel und Kobalt sind als Konstruktionswerkstoff in exponierten Anwendungsgebieten unverzichtbar. Für die deutsche Volkswirtschaft, als Hochtechnologieland, gelten diese Werkstoffe als zukünftig strategisch wichtig. Auf eigene Vorkommen kann dabei Deutschland nicht zurückgreifen (siehe Abb. 1).

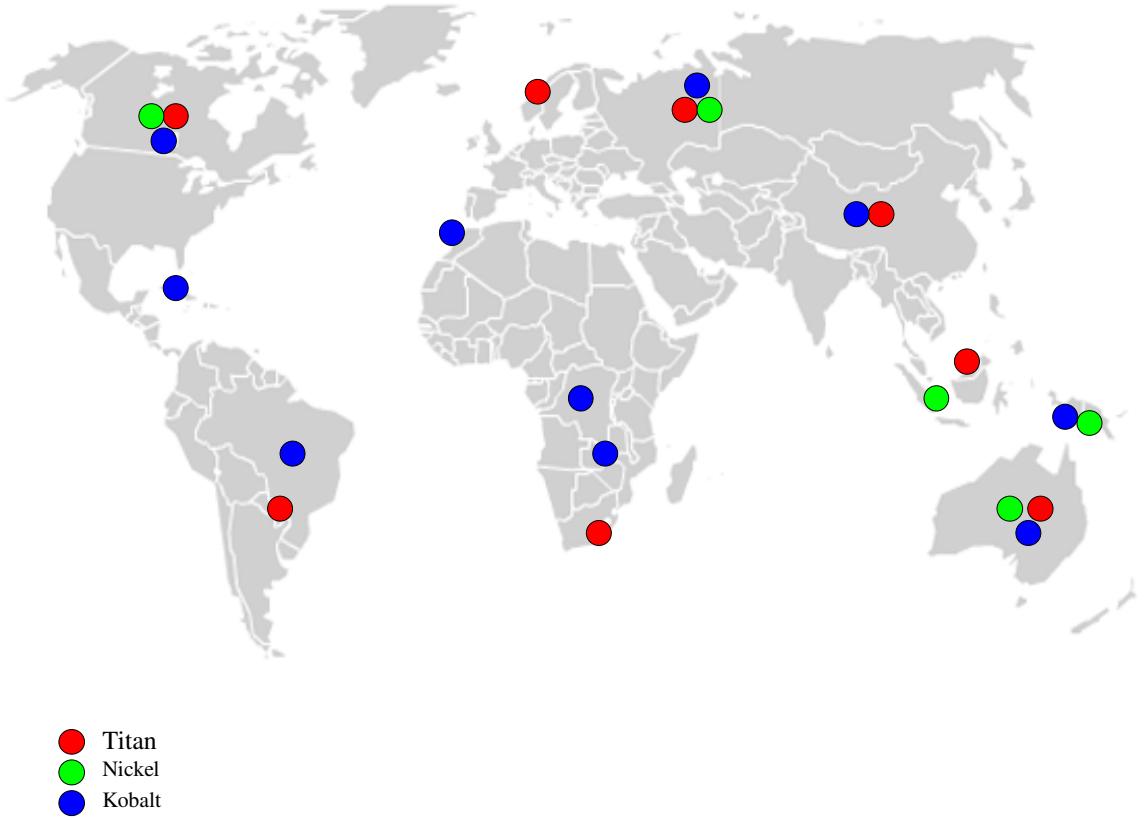



*Abb.1: Weltweite Hauptvorkommen der Erze von Titan, Nickel und Kobalt*

Neben dieser Standortfrage müssen diese Werkstoffe als sehr spekulativ eingeschätzt werden. Wie die Preisentwicklung seit Beginn dieses Jahrhunderts (Abb. 2) zeigt, sind innerhalb weniger Jahre hohe Schwankungen zu verzeichnen. Insbesondere sind hohe Preissteigerungen in den Jahren 2007 bis 2008 zu verzeichnen, die aber vorwiegend auf Spekulationen beruhten. Diese Blase platzte in der Zeit der Krise, aber momentan ist wieder ein Preisanstieg zu verzeichnen. Im Vergleich dazu ist der Stahlpreis zu betrachten, der in den Vorkrise- und Krisezeiten gleiche Entwicklung verzeichnete, aber auf einem viel niedrigerem Niveau.

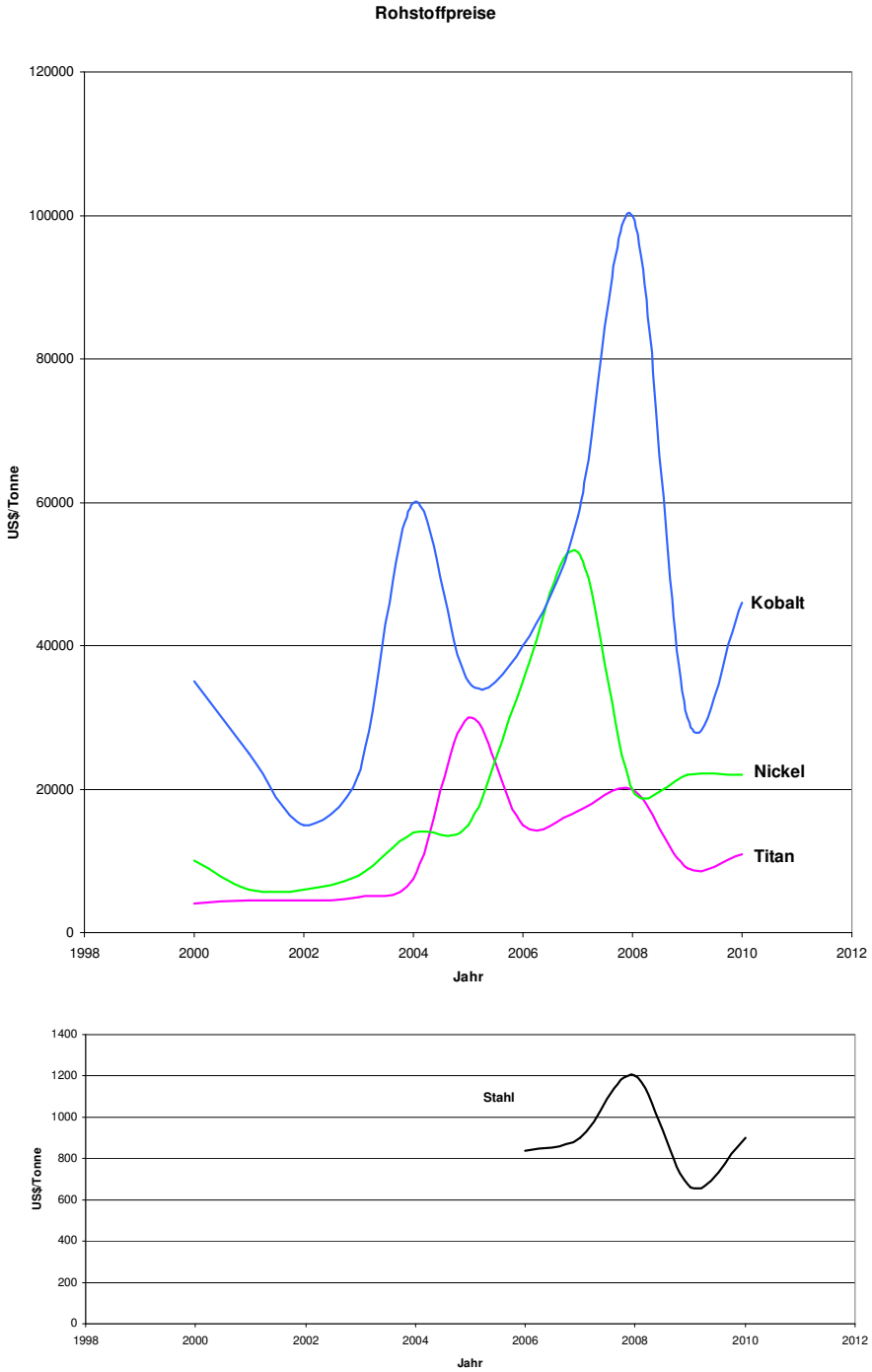



*Abb.2: Preisentwicklung für Stahl, Titan, Nickel und Kobalt seit der Jahrtausendwende*

Diese Entwicklungen zwingen eine Volkswirtschaft dazu, mit diesen Werkstoffen bzw. ihren Legierungen sparsam umzugehen, einerseits durch Substitutionen, andererseits durch eine abfallarme Verfahrenstechnik bei der Herstellung von Bauteilen aus diesen Werkstoffen. Weiterhin muss die Aufbereitung von Recyclinggut hinsichtlich solcher Werkstoffe logistisch und verfahrenstechnisch optimiert werden.

# 2 Einsatz umformtechnischer Verfahren bei der Herstellung von Werkstücken

## 2.1 Allgemeines

Umformtechnische Verfahren bieten die Möglichkeit, Werkstück sehr nah der Endform herzustellen, wobei der Vorteil einer hohen Materialausnutzung zum Tragen kommt. Dabei können die Umformverfahren nach ihrem Formspeichergrad der Werkzeuge geordnet werden. Für einige Verfahren ist dies in Abb. 3 dargestellt.

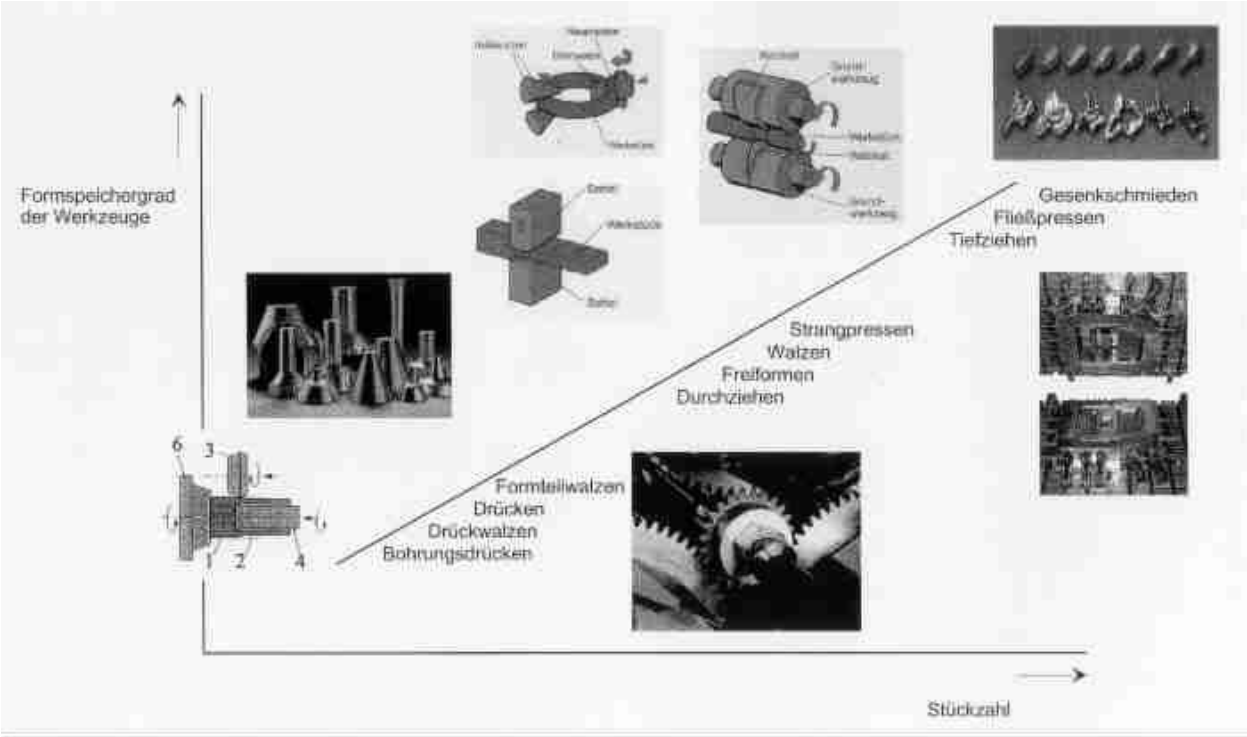



*Abb.3: Einteilung von Umformverfahren nach den Formspeichergrad der Werkzeuge*

Ein hoher Formspeichergrad der Werkzeuge spiegelt eine größer werdende Negativform in den Werkzeugen entsprechend dem herzustellenden Werkstück wieder. Dies bedeutet gleichzeitig einen Anstieg der Werkzeugkosten, es müssen viele Teile mit dem Werkzeug gefertigt werden, damit die Verfahrenstechnik gegenüber spanenden Verfahren wirtschaftlich wird.

Ein kleiner Formspeichergrad bedeutet im Gegensatz einfache Werkzeuge mit geringer Formanpassung an das zu fertigende Werkstück, was wiederum zu kostengünstigeren Werkzeugen führt. Die Intelligenz dieser Verfahren liegt in der Maschinen- und Anlagentechnik, wobei durch eine Verlagerung von konturbildenden Werkzeuggeometrien in die Bewegungssteuerung der Maschine eine Ausformung der Werkstücke erreicht wird. Diese niedrigeren Werkzeugkosten ermöglichen eine wirtschaftliche umformtechnische Fertigung von Bauteilen auch in kleineren Stückzahlen.

Im Besonderen eignen sich für eine derartige Fertigungsphilosophie die Verfahren des Längs- und Querwalzens. Diese inkrementell wirkenden Verfahren sind gekennzeichnet durch momentan kleine gedrückte Flächen während des Umformprozesses. Dadurch sind die Umformkräfte niedrig und es können die Möglichkeiten der Anwendung intelligenter Werkzeuge bzw. geometriebildender Steuerungen angewendet werden.

## 2.2 Verfahrenstechniken

Im Rahmen des Projektes werden die Verfahren Querwalzen, Axialgesenkwalzen und Bohrungsdrücken auf ihre Anwendbarkeit zur wirtschaftlichen Herstellung von Werkstücken aus Titan bzw. hochwarmfesten Legierungen untersucht.

**Querwalzen**

Querwalzen ist Druckumformen von rotationssymmetrischen Werkstücken, insbesondere für Teile der Langform, zwischen gegenläufig bewegten Werkzeugen, die sich auf der Oberfläche des Werkstückes abwälzen. Es wird unterschieden in

- das Durchlaufverfahren zwischen rotierenden schrägstehenden Walzen oder spiralig angeordneten Walzwerkzeugen und
- das Einstechverfahren zwischen rotierenden parallelen Walzen mit keilförmigen Walzwerkzeugen.

Im Einstechverfahren kommen vorwiegend Maschinen mit rotierenden Walzen oder Flachbacken zum Einsatz (Abb. 4).

Das Verfahren Querwalzen wird derzeitig vorwiegend als Masseverteilungsverfahren in der Großserien- und Massenfertigung der Stahlschmiedeindustrie eingesetzt. Einerseits werden Vorformen für das Schmieden in gleicher Wärme erzeugt, andererseits wellenförmige Endformen, die nur noch spanend fertig bearbeitet werden (Abb. 5).

Diese modernen Verfahren bedarf bei seinem Einsatz ein formgebundenes Werkzeug, d.h. mit einem Werkzeug ist prinzipiell nur eine Form bzw. eine Geometrie der Zwischenform

herstellbar. Auf Grund der daraus entstehenden Werkzeugkosten ist dieses Verfahren i.a. der Großserien- und Massenfertigung vorbehalten.

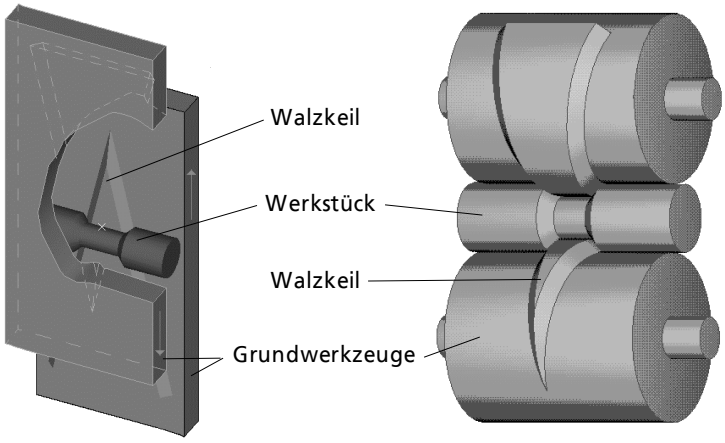



*Abb 4: Verfahrensprinzipien des Querwalzens (links: Flachbackenprinzip, rechts: Rundbackenprinzip)*

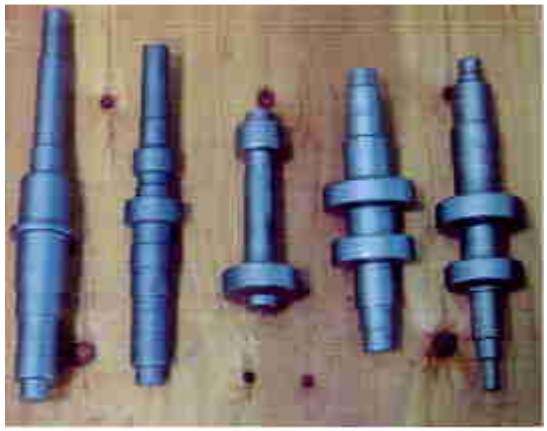


*Abb. 5: Verfahrensbeispiele des Querwalzens (oben: Vorformen zum Schmieden, rechts: Getriebewellen)*

Für geometrisch ähnliche Zwischenformen ist es durch die segmentartig strukturierte Bauweise bei Querwalzwerkzeugen prinzipiell möglich, eine modulare Konstruktion der Werkzeuge anzustreben, die es erlaubt, durch Austausch bzw. Verstellung einzelner Werkzeugsegmente unterschiedliche Größen geometrisch gleicher bzw. ähnlicher Zwischenformen zu erzeugen. Damit wird das Querwalzen auch für kleinere Stückzahlen interessant.

Anlagen für die Umformtechnik sind i.a. kompakte, für ein großes Teilesortiment nutzbare und langlebige Maschinen. Dem entsprechend ist auch die mögliche Belastung der Maschinen für einen weiten Bereich offengehalten. Einzweckmaschinen sind kaum bzw. nicht anzutreffen, da die Sortimente an Werkstücken einem ständigen Wechsel unterliegen. Entsprechend diesen

Auslegungskriterien sind Umformanlagen investitionsintensiv, sie werden vielfach nur in der Großserien- und Massenfertigung eingesetzt.

Mit einem „Abrüsten“ einer Umformanlage auf ein eingeengt herstellbares Teilesortiment bei gleichzeitiger belastungsfähigen Auslegung auf die entstehenden Kräfte und Spannungen lassen sich im erheblichen Maße die Investitionskosten für die Anlage verringern.

Gleichzeitig bieten die modernen Entwicklungen in der Steuerungs- und Regelungstechnik die Möglichkeit, geometriebildende Funktionen eines Umformwerkzeuges in die Steuerung der Maschinen zu integrieren. Damit kann der Kostenfaktor Umformwerkzeug entscheidend gesenkt werden. Dadurch werden die Umformverfahren auch bei Klein- und Mittelserienfertigung wirtschaftlich interessant.

Im Rahmen des Projektes wird von der Fa. LASCO Umformtechnik GmbH Coburg eine Anlage entwickelt (Abb. 6), die es erlaubt, mit einfachen Werkzeugen ähnliche Teilesortimente des Querwalzens herzustellen. Die formengebundenen keilförmigen Werkzeuge werden dabei durch Scheiben ersetzt, die während der Formgebung gesteuert die Konturen an den Werkstücken erzeugen.

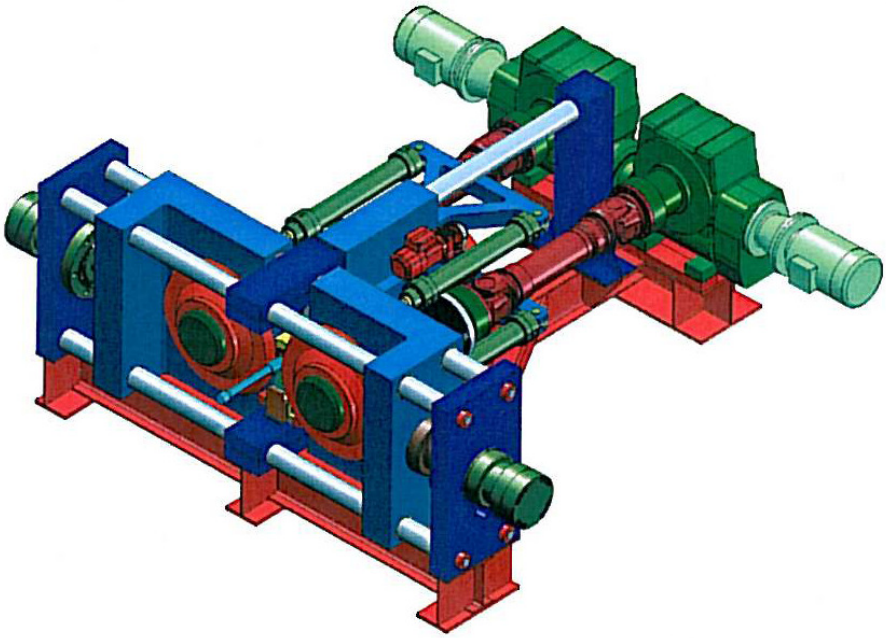


*Abb. 6: Entwurf einer Axialvorschub-Querwalzmaschine der Fa. LASCO*

**Axialgesenkwalzen**

Axialgesenkwalzen ist ein partielles Formgebungsverfahren, bei dem ein Block oder vorgeformter Rohling in eine Werkzeuggravur gewalzt wird. Ober- und Unterwerkzeug rotieren

dabei um ihre vertikale Drehachse. Zum Walzen wird eine Werkzeugeinheit axial gegen die andere zugestellt.

Das Oberwerkzeug ist um einen Winkel α gegen die Vertikale geneigt. Dadurch bedingt entsteht in der Kontaktzone zwischen Oberwerkzeug und Rohling eine halbparabelförmige Berührungsfläche [1]. Abb. 7 zeigt das Verfahrensprinzip für die Herstellung eines Scheiben- bzw. ringförmigen Werkstückes.

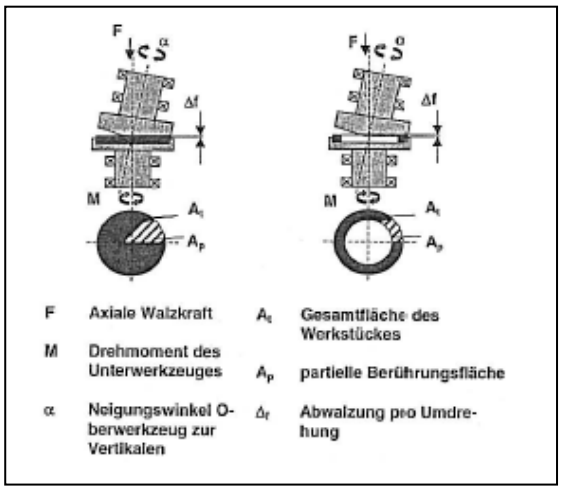
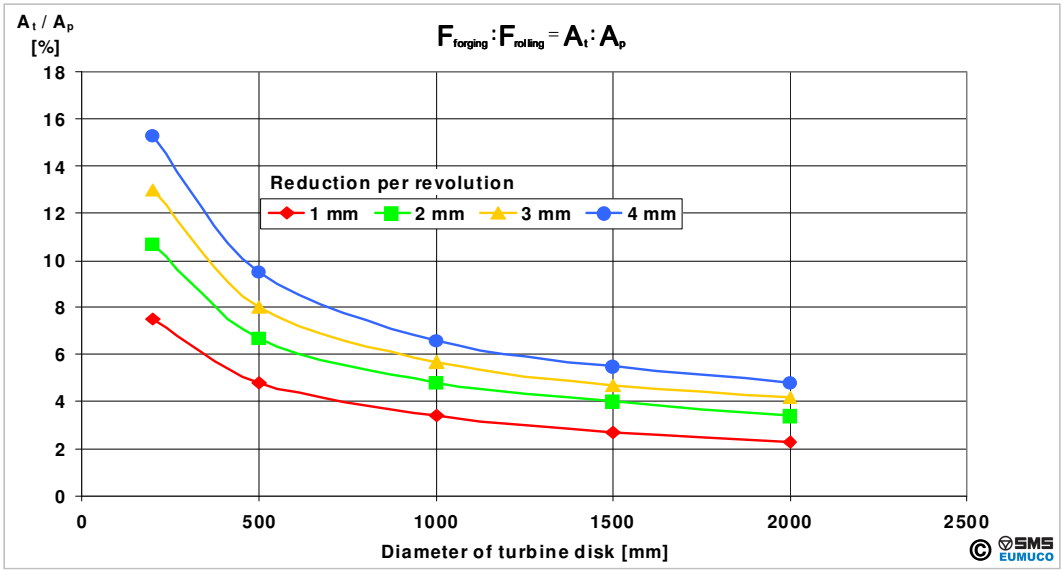



*Abb. 7: Verfahrensprinzip des Axial-Gesenkwalzens*

Das Verhältnis der momentanen Kontaktfläche $A_P$ zur Gesamtfläche $A_t$ ist gleichzeitig ein Maß für den reduzierten Kraftbedarf des Axialgesenkwalzens im Vergleich zum Gesenkschmieden. So werden beispielsweise Achsantriebsräder, die konventionell auf einer mechanischen 25 MN Gesenkschmiedepresse hergestellt werden, auf einer Axialgesenkwalze mit 1250 kN Walzkraft gewalzt.

Abb. 8 zeigt den Vergleich des Kraftbedarfs zwischen konventionellen Schmiedepressen und Axialgesenkwalzen für ein scheibenförmiges Werkstück.




The ratio of this contact surface ($A_p$) to the total surface ($A_t$) is at the same time the force ratio between axial closed-die rolling and closed-die forging. Compared to closed-die forging, only a small percentage of the force is required for axial closed-die rolling.

*Abb. 8: Gegenüberstellung des Kraftbedarfs beim Schmieden und Axialgesenkwalzen [1]*

**Bohrungsdrücken**

Das Bohrungsdrücken ist ein partielles, inkrementelles Druckumformverfahren zur Herstellung axialsymmetrischer Hohlteile aus massiven Halbzeugen. Der durch die Drückrollen und den gleichzeitig axial wirkenden Formstempel verdrängte Werkstoff fließt entgegen der Vorschubrichtung axial ab und bildet so die Napfwand aus (Abb. 9). Das Werkstück wird in einer Spanneinrichtung an der Spindel aufgenommen und rotiert um seine Längsachse. Der Drückstempel dreht sich synchron zur Spindel. Die Drückrollen und der Stempel führen eine synchrone axiale Bewegung aus. Das Verfahren kann als Kalt-, Halbwarm- oder Warmumformung ausgeführt werden.

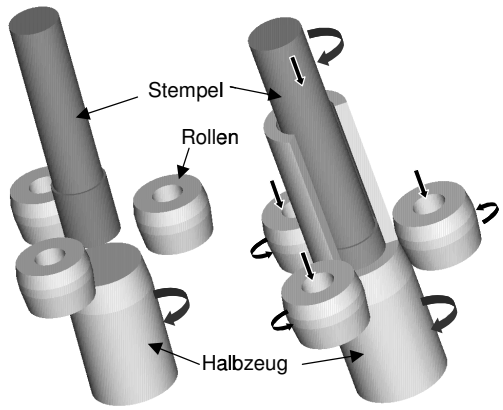



*Abb. 9: Prinzipdarstellung des Bohrungsdrückens*

Durch Bohrungsdrücken wird die umformende Herstellung von Teilen mit kreiszylindrischen Innenformen, Innenprofilen und Innenpolygonen realisiert, die mit anderen Verfahren nicht effektiv erreichbar sind.

Ein wesentlicher Vorteil gegenüber dem Tiefbohren besteht in der weit höheren Materialausnutzung (ca. 90 %) bei geringerem Einsatzbedarf. Das Verfahren ist dadurch besonders attraktiv für die Verarbeitung preisintensiver Werkstoffe. Der Zeitaufwand des Bohrungsdrückens liegt für vergleichbare Formen bei ca. 40 % des Tiefbohrens.

Abb. 10 zeigt das Prozessfenster des Bohrungsdrückens für die Verarbeitung von Stahlwerkstoffen gegenüber dem klassischen Fliesspressen und dem Tiefbohren.

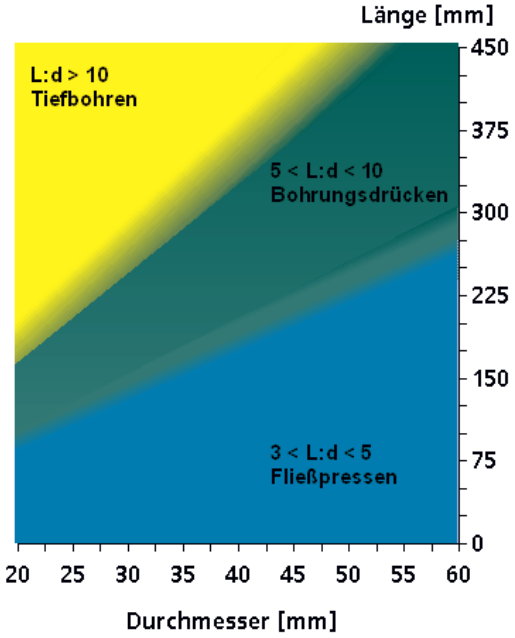



*Abb. 10: Prozessfenster des Bohrungsdrückens*

Die Materialeffizienz des Verfahrens gegenüber dem Tiefbohren ist in Abb. 11 dargestellt.

Bohrungsdrücken ist gegenüber dem Fließpressen vorteilhaft, wenn besonders dickwandige Hohlteile oder solche mit Absätzen zu erzeugen sind. Das betrifft in der Regel Durchmesser-Wanddickenverhältnisse D : s < 5. Bohrungsdrücken erfordert außerdem keine chemische Oberflächen-vorbehandlung. Durch die kinematische Formerzeugung entfallen aufwändigen Matrizen. Mit einfachen Werkzeugen lässt sich eine große Formenvielfalt erzeugen (Abb. 12). Die für kleinere Serien erforderliche Flexibilität wird durch das Verfahren gewährleistet.

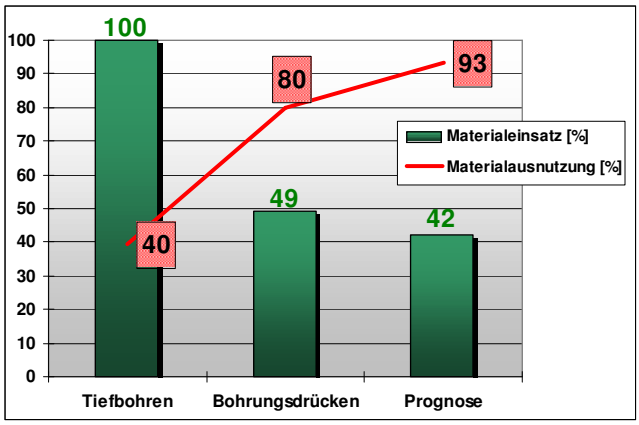



*Abb. 11: Materialeffizienz des Bohrungsdrückens im Vergleich zum Tiefbohren*

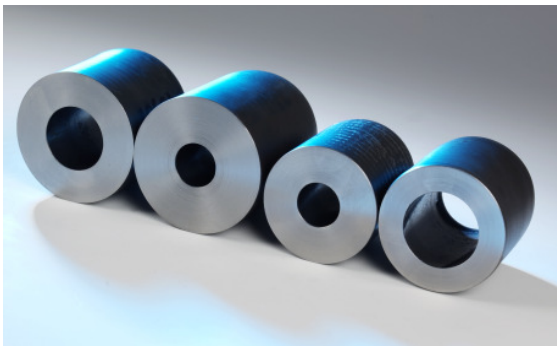


*Abb. 12: dickwandige Hohlteile, durch Bohrungsdrücken gefertigt*

Die Forschungseinrichtung verfügt über eine Experimentalanlage, die als Prototyp einer Bohrungsdrückmaschine am Institut entwickelt wurde. Die Maschine verfügt über ein extrem verformungsarmes Maschinengestell, eine Werkzeugmaschinenspindel für große Axialkräfte und hohe Drehzahlen sowie spezielle Schlitten für Umformmaschinen. Die Nachrüstung mit einer zusätzlichen Zerspanungseinrichtung ist erfolgt. Die Maschine verfügt über sieben NC-Achsen.

Durch Bohrungsdrücken sind grundsätzlich alle Werkstoffe bearbeitbar, deren Bruchdehnung etwa 10% erreicht. Bisher wurden überwiegend Bau- und Einsatzstähle sowie Kohlenstoffstähle untersucht. Es liegen erste Erkenntnisse über die Bearbeitbarkeit von NE-Metallen und deren Legierungen, wie Titan, Aluminium und Magnesium vor.

## 2.3 Umformbarkeit der Werkstoffe

Erste Ergebnisse zu den Untersuchungen zur Umformbarkeit der Werkstoffe zeigen, dass für die Umformfestigkeit der Nickelbasislegierung Inconel in den Bereichen der i.a. angewendeten Schmiedetemperatur mit ca. 100% höheren Werten gegenüber Kohlenstoffstählen zu rechnen ist (Abb. 13). Dies hat entsprechende Auswirkungen auf die Werkzeuggestaltung sowie auf die Auslegung der Umformaggregate.

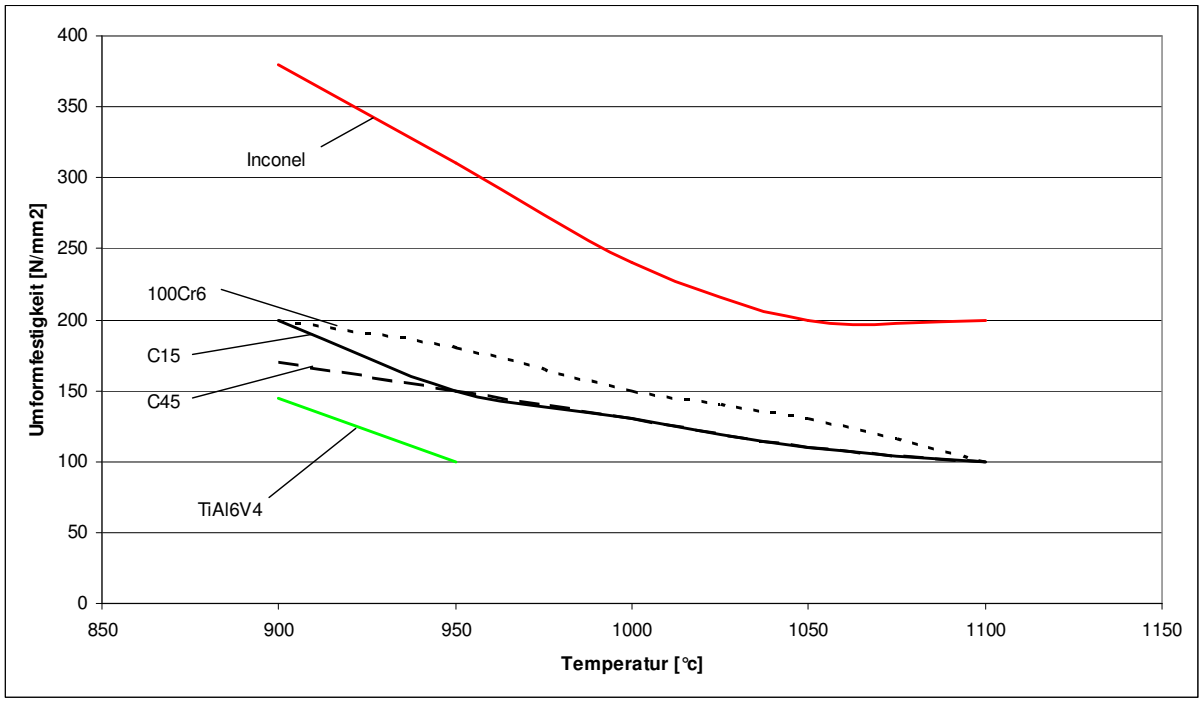



*Abb. 13: Fließkurven von Titan und Inconel im Vergleich zu herkömmlichen Kohlenstoffstählen*

Untersuchungen an der Titanlegierung TiAl6V4 haben gezeigt, dass das Prozessfenster hinsichtlich der Umformtemperatur sehr klein ist. Eine Umformtemperatur um 950°C lässt eine eine Verformung des Werkstoffes bis zu relativ hohen Umformgraden zu. Tiefere Temperaturen führen schnell zu Werkstoffversagen, höhere Temperaturen sind auf Grund der gewünschten Werkstoffeigenschaften (Transustemperatur [2]) für eine Umformung nicht möglich.

Für eine prozesssichere Einhaltung dieses Temperaturbereiches bedarf es neben einer genauen Temperatursteuerung auch einer Kenntnis des Gefügeverhaltens zu örtlich auftretenden Temperaturänderungen durch die eingebrachten Umformenergien [3].

Mit der Fa. LEISTRITZ Remscheid wurde ein Versuchsprogramm zur Ermittlung umformtechnischer Kennwerte für die Titanlegierung Ti64 (TiAl6V4) und die Nickelbasislegierung Inco 718 erarbeitet. Unter den in Tabelle 1 dargestellten technologischen

Parametern sind die Fließkurven sowie Grenzformänderungswerte zu ermitteln. Insbesondere sind dabei hohe Umformgeschwindigkeiten zu berücksichtigen.

*Tabelle 1: Parameter zur Ermittlung umformtechnischer Kenngrößen*

| **Werkstoff** | **Umformtemperatur $\vartheta$ [°C]** | **Umformgeschwindigkeit $\dot{\phi}$ [$s^{-1}$]** |
|---|---|---|
| Ti64 | 600<br>700<br>800<br>900<br>975 | 10<br>11<br>12<br>(12,5) |
| Inco 718 | 900<br>1000<br>1100<br>1150 | 10<br>11<br>12<br>(12,5) |

Die Versuche werden auf dem Umformdilatometer durchgeführt. Für die Absicherung der statistischen Sicherheit wird jeder Versuch dreimal wiederholt.

## 2.4 Optimierung von Prozessketten

### Grundformgebung von Triebwerkschaufeln

Im Triebwerksbau kommen präzisionsgeschmiedete Leitschaufeln aus der Standardlegierung Ti-6Al-4V im Temperaturbereich bis 315°C zum Einsatz [4]. Die Grundform für den gesamten Herstellungsprozess der Leitschaufeln wird durch Gesenkschmieden gegeben. Der Ausgangspunkt der Arbeitsplanung für die umformtechnische Grundformgebung ist die umformgerechte Gestalt der Triebwerksschaufel (Abb. 14).

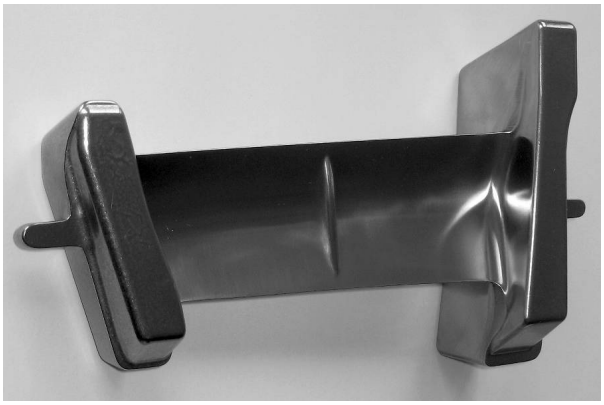


Abb. 14: gesenkgeschmiedete Leitschaufel

Die erforderlichen Arbeitsgänge von der Halbzeugstange bis zum Schmiedeteil sind in vereinfachter Folge:

- Material Trennen
- Anfangsform Erwärmen
- Masseverteilung
- Querschnittvorbildung
- Gesenkschmieden und
- Abgraten.

Für das Festlegen der Umformstufen wird das Masseverteilungsschaubild benutzt. Die Triebwerksleitschaufeln lassen sich in die Bereiche Deckband, Blatt und Fuß gliedern. In der Abb. 15 sind die Querschnittsflächen über die Länge der Triebwerksleitschaufel aufgetragen.

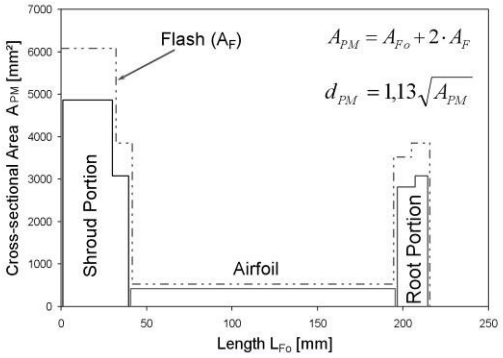



*Abb.15: Masseverteilungsschaubild der Triebwerksleitschaufel*

Die Notwendigkeit der Masseverteilung wird durch den Kurvenverlauf deutlich. Für die Formfüllung des Blatt ist bedeutend weniger Material notwendig gegenüber den Bereichen Fuß und Deckband.

Üblicher Weise wird ein Fertigungsverfahren zur Materialanhäufung aus Anfangsmaterial mit dem kleinsten Durchmesser gewählt. Der kleinste Durchmesser $d_{PM}$ ergibt sich aus der Umrechnung der Querschnittsfläche im Bereich des Blattes. Der Durchmesser beträgt 26 mm. Mittels der Volumenkonstanz kann mit diesem Durchmesser die Länge der Anfangsform berechnet werden. Für den Deckbandbereich ergibt sich eine Länge von 416 mm mit einem Stauchverhältnis von 16. Im Bereich Fuß beträgt die Länge 125 mm und das Stauchverhältnis beträgt 4,8. Für die Prozessgestaltung bietet sich die Möglichkeit in mehreren Stufen anzustauchen oder den Durchmesser der Anfangsform zu vergrößern. Beide Möglichkeiten wirken sich hinsichtlich der oben genannten Ziele negativ aus. Die große Anzahl der Anstauchoperationen führt zu einer Addition der Kosten für jede einzelne Umformstufe und die zweite Möglichkeit belastet die Materialausnutzung im Bereich des Blattes. Die herkömmliche

Fertigung macht wegen des großen Längen-Durchmesser-Verhältnis ein wiederholtes Anstauchen in einer kegeligen Gravur auf einer Waagerecht-Stauchmaschine notwendig.
Als alternatives Fertigungsverfahren wurden die Möglichkeiten des Querkeilwalzens untersucht. Mittels der Berechnung der zulässigen Durchmesserreduzierung und unter Beachtung der lieferbaren Halbzeuge wurde ein Anfangsdurchmesser von 60 mm gewählt. Aus dem Gesetz der Volumenkonstanz berechnet sich die Abschnittslänge des Deckbandbereiches zu 78 mm und der Stangenabschnitt im Fußbereich ist 24 mm lang. Für beide Bereiche ist aufgrund der kleinen Stauchverhältnisse von 1,3 und 0,4 nur noch jeweils ein Stauchvorgang notwendig, der zur Querschnittsvorbildung benutzt werden kann.
Das Querkeilwalzen erlaubt das Herstellen von Doppelteilen in einem Hub. Somit können die anteiligen Werkzeugkosten je Schmiedestück gesenkt und die Möglichkeiten des Querkeilwalzens sehr gut ausgenutzt werden. Die mit dieser Fertigungsvariante verkürzte Prozesskette ist in Abb. 16 dargestellt.
Da für das Querkeilwalzen kein Schmiermittelauftrag notwendig ist, entfällt dieser Arbeitsgang. Aufgrund der hohen Umformfestigkeit der Titanlegierung und dem damit verbundenen Werkzeugverschleiß wurde auf das Warmscherschneiden am Ende des Walzprozesses in der Querkeilwalzmaschine zu Gunsten des Sägens verzichtet.

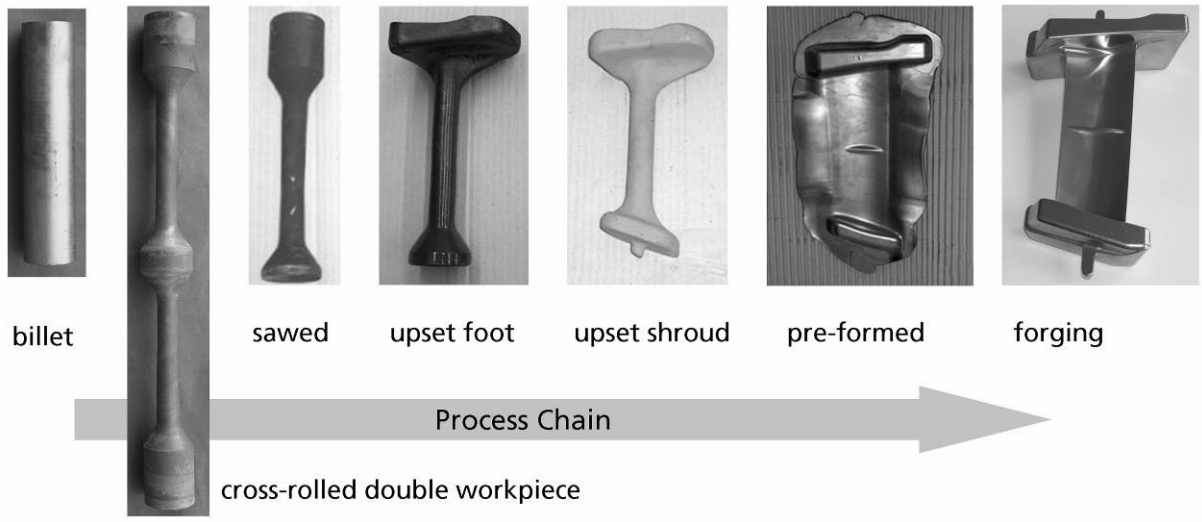



*Abb. 16: Prozesskette zur Grundformgebung von Triebwerksleitschaufeln*

Es konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz des Querkeilwalzens die Anzahl der notwendigen Umformstufen zur Masseverteilung (3 Stauchstufen) beim Gesenkschmieden von Triebwerkleitschaufeln aus Titanlegierungen verringert werden konnte. Der damit verbundene Wegfall der vorbereitenden Arbeitsgänge zur Erwärmung, dem Schmiermittelauftrag und der Zwischenadjustage führte zu einer wesentlichen Verkürzung der Prozesskette. Die

Fertigungskosten sind geringer und die Durchlaufzeit kann wesentlich verkürzt werden. Durch die Einsparung an Zwischenerwärmung und den verbesserten Materialeinsatz (17%/Teil) konnte notwendige Energiemenge (28%/Teil) für die Warmumformung verringert werden.

**Axialgesenkwalzen von Ventilsitzen**

Die Optimierung der Prozessfolge zur Herstellung von Ventilsitzen hatte das Ziel, eine verbesserte Materialausnutzung des hochwertigen Werkstoffes bei gleichzeitiger Senkung der Fertigungszeit zu realisieren. Abb. 17 zeigt die bisherige Anfangsform (Vollmaterial) sowie die Anfangsform für die optimierte Prozesskette (Rohrstück aus Schleuderguss).

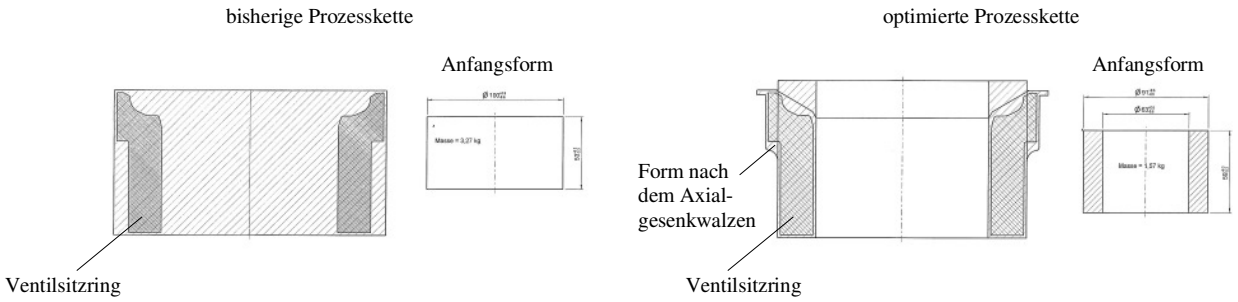



*Abb. 17: Optimierung der Prozesskette Ventilsitz*

Zur Herstellung der Zwischenform für die optimierte Prozesskette des Ventilsitzes wurde ein Axialgesenkwalzwerkzeug entwickelt und gebaut (Abb. 18).

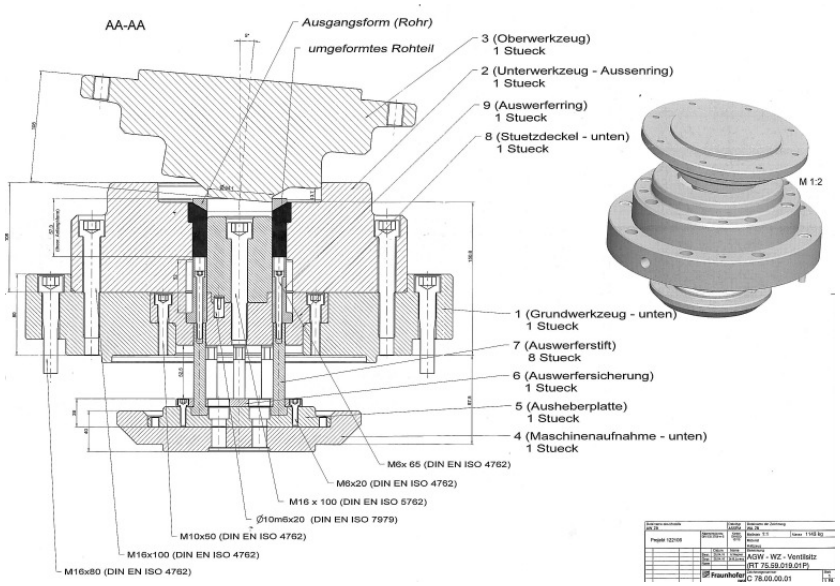



*Abb. 18: Axialgesenkwalzwerkzeug zur Herstellung des Ventilsitzes*

Die Ergebnisse zeigen, dass mit der neuen Prozesskette 64% Ausgangsmaterial eingespart werden kann. Obwohl dies sich nicht unmittelbar auf den Preis der Anfangsform auswirkt, der

Abschnitt aus Vollmaterial hat den gleichen Preis wie das Rohrstück als Schleudergussteil, kann gesamtvolkswirtschaftlich gesehen davon ausgegangen werden, dass dieses eingesparte Material in der ersten Verarbeitungsstufe nicht hergestellt werden muss. Es kommt in diesem Industriezweig zu erheblichen Material- und Energieeinsparungen.
Einen Vergleich der spanenden Fertigbearbeitung des Ventilsitzes zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2: spanenden Fertigbearbeitung des Ventilsitzes

| **Arbeitsgang** | **bisherige Prozesskette** | **optimierte Prozesskette** |
|---|---|---|
| sägen | 10:00 | |
| 1. Seite drehen außen | 01:36 | 01:03 |
| 1. Seite drehen innen | 01:26 | 00:44 |
| 1. Seite drehen plan | 00:24 | 00:22 |
| 2. Seite drehen außen | 00:38 | 00:37 |
| 2. Seite drehen innen | 00:45 | 00:27 |
| 2. Seite drehen plan | 00:15 | 00:11 |
| Gesamt | 15:04 min | 03:24 min |

Die Zeitanteile in der spanenden Fertigbearbeitung zeigen, dass mit der optimierten Prozesskette ca. 80% Hauptzeit eingespart werden kann. Eine Kalkulkation der notwendigen Nebenzeiten (Werkzeugwechsel, Spannoperationen, usw.) bringt nochmals eine Einsparung von 20%.

# 3 Zusammenfassung

Die vorgestellten Ergebnisse des Projektes zeigen, dass mit einem gezielten Einsatz von Umformverfahren auch im Bereich der Klein- und Mittelserie eine Effizienzerhöhung möglich ist. Die betrifft insbesondere die Einsparung von Werkstoffen, aber gleichzeitig ergibt sich daraus ein geringerer Energieverbrauch auch in der ersten Verarbeitungsstufe. Gesamtvolkswirtschaftlich gesehen ist dies insbesondere für strategische Materialien bedeutsam.

# 4 Literatur

[1] Lieb,A.; Husmann, J.; Axial-Gesenkwalzen – Neueste Entwicklungen und Potentiale des Verfahrens; *16. Aachener Stahlkolloquium,* 2001, S.281-288

[2] Peters, M.; Leyens, Ch.; *Titan und Titanlegierungen*; Wiley-VCH Verlag, 1. Auflage, 2002

[3] Pannasch, S.; Lorenz, B.; Bachmann, K.; *Querwalzen von Titan-Legierungen*; Jahresbericht des Fraunhofer Institutes für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) 1995, S. 32

[4] Hegazy, A-A.: Untersuchung zur Warmumformbarkeit der Titanlegierung TiAl6V4. *Aluminium* 59 (1983) 6, pp. 451-455