

INVESTITIONEN ZUR VERMINDERUNG VON UMWELTBELASTUNGEN
PROGRAMM DES BUNDESMINISTERS FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ
UND REAKTORSICHERHEIT

Energieeinsparung

Abschlußbericht 70441-5/21

Vorhaben-Nr. 20118

Innovative, materialeffiziente Produktion von Titangroßbauteilen mittels Titanfeinguss

von

Dr.-Ing. Ralf Gerke-Cantow

und

Carsten Hellwig

TITAL GmbH

Bestwig (Nordrhein-Westfalen)

Geschäftsführer

Philipp Schack

IM AUFTRAG

DES UMWELTBUNDESAMTES

Februar 2010



Technik und Referenzen

Feingussteile aus Aluminium- und Titanlegierungen finden sich in nahezu allen kommerziellen Flugzeugen und Hubschraubern sowie in Verteidigungsprojekten wie dem Eurofighter, A400M, NH90 oder den Lenkflugkörpern Meteor und Taurus.

TITAL[®] erlebt eine besondere Dynamik bei Kunden, die Triebwerke herstellen und dafür zunehmend einbaufertige Titan- und Aluminiumfeingussprodukte anfragen. Zudem ist ein deutlicher Trend hin zu großen und immer komplexeren Feingussteilen zu erkennen.

Feingussteile mit einer Kantenlänge von über einem Meter sind keine Seltenheit mehr. Darüber hinaus konnte TITAL[®] Aluminiumfeinguss zunehmend als überlegenes Wettbewerbsverfahren zum Aluminiumsandguss positionieren. Im Wettbewerb setzt sich TITAL[®] insbesondere bei größeren Bauteilen durch deutlich bessere Qualität, Liefertreue und geringere Gesamtkosten vom Sandguss ab.

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA 70441-5/21	2. Energieeinsparung	3.
4. Titel des Berichtes Innovative, materialeffiziente Produktion von Titangroßbauteilen mittels Titanfeinguss		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Gerke-Cantow, Dr.-Ing. Ralf Hellwig, Carsten	8. Abschlußdatum 30. September 2009	9. Veröffentlichungsdatum 02. Februar 2010
	6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) TITAL GmbH Kapellenstr. 44 59909 Bestwig	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau	10. Vorh.-Nr. 20118	11. Seitenzahl 33
	12. Literaturangaben	
	13. Tabellen und Diagramme 12	
14. Abbildungen 11		
15. Zusätzliche Angaben		
16. Kurzfassung Der Materialverbrauch je kg Titan-Fertigteil in der Luftfahrt beträgt mehr als 10 kg, wenn das Bauteil durch Fräsen erzeugt wird. Durch Gießen kann der Materialverbrauch auf gut 2 kg je kg reduziert werden. Bedingt durch die aufwändige Rohmaterialherstellung ist somit auch der Energieaufwand von 1.090 kWh je kg beim Fräsen etwa der vierfache im Vergleich zum Gießen mit 266 kWh je kg. Auch der CO ₂ -Ausstoß liegt mit 650 kg je kg Fertigteil mehr als viermal so hoch wie bei durch Gießen erzeugten Bauteilen mit 127 kg je kg Fertigteil. Bei einer erwarteten Produktionsmenge von 15.000 kg/a errechnet sich eine CO ₂ -Einsparung von 7.845 t/a.		
17. Schlagwörter Titan, Fräsen, Gießen, Energieeffizienz		
18.	19.	20.

Report-Coversheet

1. UBA 70441-5/21	2. Energy saving	3.
4. Report Title Innovative, material-efficient production of large structural titanium parts using titanium investment casting		
5. Author(s), Family Name(s), First Name(s) Gerke-Cantow, Dr.-Ing. Ralf Hellwig, Carsten		8. Report Date 30. September 2009
		9. Publication Date 02. February 2010
6. Performing Organisation (Name, Adress) TITAL GmbH Kapellenstr. 44 59909 Bestwig		10. Report-Nr. 20118
		11. No. of Pages 33
7. Sponsoring Agency (Name, Anschrift) Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau		12. No. of References
		13. No. of Tables, Diag. 12
		14. No. of Figures 11
15. Supplementary Notes		
16. Abstract The material consumption per kg finished titanium part in the aviation industry is higher than 10 kg, if the part is produced by milling. Using the casting process the material consumption can be reduced to a little more than 2 kg per kg. An elaborate raw material production process leads to an energy consumption of 1.090 kWh per kg while milling the parts whereas the casting process in comparisson requires just one fourth i.e. 266 kWh per kg. The CO ₂ emission of 650 kg per kg finished milled part is also four times higher compared to castings with 127 kg per kg finished part. Based on an expected production volume of 15.000 kg/a CO ₂ savings of 7.845 t/a can be calculated.		
17. Keywords Titanium, milling, casting, energy efficiency		
18.	19.	20.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	8
Summary.....	8
Das Unternehmen.....	9
1. Einführung	10
1.1 Ausgangslage.....	10
1.2 Projektziel.....	14
2 Nachweisführung (Kontrolle der Projektziele).....	17
2.1 Verbrauchsaufnahme des eingesetzten Titan-Materials und Vergleich zu der üblichen Frästechnologie.....	18
2.2 Ermittlung des Energieverbrauchs zum Fräsen und bei Gießen von Titan.....	19
2.2.1 Ermittlung des Energiebedarfs zum Fräsen der Referenzgeometrie	19
2.2.2 Ermittlung des Energieaufwandes zum Gießen der Referenzgeometrie	22
2.3 Energie und Ressourcenbilanz.....	25
3. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	27
3.1 Investitionen	27
3.2 Finanzierung der geplanten und tatsächlichen Ausgaben.....	27
3.3 Abschätzung der Einsparung.....	28
3.4 Amortisationszeit	30
4 Projektablauf.....	31
5 Zusammenfassung / Verbreitung und weitere Anwendung der Anlage	32

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Luftaufnahme von TITAL 2009	9
Bild 2: Übersicht des Fertigungszyklus für Halbzeugprodukte	11
Bild 3: Energieverbrauch zur Herstellung von Titan-Ausgangsmaterial, Halbzeug und Endprodukt in der Luftfahrt	13
Bild 4: Schmelz- und Gießofen VAR L 500 SM.....	15
Bild 5: Triebwerksbauteil	16
Bild 6: Referenzgeometrie 1030 x 76 x 185 mm ³	18
Bild 7: Materialeinsatz zur Fertigung eines kg Feingussteil.....	18
Bild 8: Ausbringung bei Gießen und Fräsen	19
Bild 9: Ermittlung der Maschinenlaufzeiten zur Bearbeitung der Referenzgeometrie	20
Bild 10: Leistungsaufnahme bei der Bearbeitung von Titan	21
Bild 11: Energiebedarf zur Zerspanung der Referenzgeometrie	21

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Scherspannung und spezifische Zerspanungsleistung verschiedener Werkstoffe....	17
Tabelle 2: Fertigungsablauf des Feingussverfahrens	22
Tabelle 3: Jahresenergieverbrauch Strom.....	24
Tabelle 4: Jahresenergieverbrauch Erdgas	25
Tabelle 5: Energieverbrauch je kg Aluminium- bzw. Titanfeingussteil.....	25
Tabelle 6: CO ₂ -Bilanz Fräsen versus Gießen	26
Tabelle 7: Investitionen.....	27
Tabelle 8: Finanzierung	27
Tabelle 9: Betriebsstoffeinsparung	28
Tabelle 10: Kosten	29
Tabelle 11: Amortisationszeit (nach Plan)	30
Tabelle 12: Amortisationszeit (Ist)	31

Vorwort

Das in diesem Bericht beschriebene Projekt „Innovative, materialeffiziente Produktion von Titangroßbauteilen mittels Titanfeinguss“ hat für die Firma Tital GmbH im Rahmen des Feingießens eine besondere Bedeutung, da mit diesem Projekt die Nutzung neuer technologischer Entwicklungen zur Fertigung großer, komplex gestalteter Titanbauteile möglich wird. Gleichzeitig kann durch die Nutzung des Verfahrens der Ressourcenverbrauch deutlich reduziert werden und die eingesetzte Energie somit ausgesprochen effizient genutzt werden. Es ergeben sich neue Absatzmärkte für das Unternehmen mit folglich auch steigendem Bedarf an Mitarbeitern.

Das Projekt konnte dank der unterstützenden Anteilsfinanzierung durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Rahmen des Umweltinnovationsprogrammes realisiert werden.

Für die Unterstützung vor und während des Projektes soll der Effizienz-Agentur NRW, insbesondere Herrn Marcus Lodde gedankt werden.

Kurzfassung

Der Materialverbrauch je kg Titan-Fertigteile in der Luftfahrt beträgt mehr als 10 kg, wenn das Bauteil durch Fräsen erzeugt wird. Durch Gießen kann der Materialverbrauch auf gut 2 kg je kg reduziert werden. Bedingt durch die aufwändige Rohmaterialherstellung ist somit auch der Energieaufwand von 1.090 kWh je kg beim Fräsen etwa der vierfache im Vergleich zum Gießen mit 266 kWh je kg. Auch der CO₂-Ausstoß liegt mit 650 kg je kg Fertigteile mehr als viermal so hoch wie bei durch Gießen erzeugten Bauteilen mit 127 kg je kg Fertigteile. Bei einer erwarteten Produktionsmenge von 15.000 kg/a errechnet sich eine CO₂-Einsparung von 7.845 t/a.

Summary

The material consumption per kg finished titanium part in the aviation industry is higher than 10 kg, if the part is produced by milling. Using the casting process the material consumption can be reduced to a little more than 2 kg per kg. An elaborate raw material production process leads to an energy consumption of 1.090 kWh per kg while milling the parts whereas the casting process in comparison requires just one fourth i.e. 266 kWh per kg. The CO₂ emission of 650 kg per kg finished milled part is also four times higher compared to castings with 127 kg per kg finished part. Based on an expected production volume of 15.000 kg/a CO₂ savings of 7.845 t/a can be calculated.

Das Unternehmen

Die TITAL GmbH ist seit 1974 am jetzigen Standort in Bestwig tätig und wurde als Joint Venture von Honsel (Meschede) und der W.C. Heraeus Holding GmbH (Hanau) zur Herstellung von Aluminium- und Titan-Feinguss-Produkten nach dem Wachsausschmelzverfahren gegründet. In den vergangenen 30 Jahren entwickelte sich das Unternehmen bis zum heutigen Tag erfolgreich zu einem heute international anerkannten Speziallieferanten für die anspruchsvolle Luft- und Raumfahrtindustrie. Eine konsequente Technologieorientierung und Qualitätspolitik in Verbindung mit der Qualifizierung nach allen für die Luftfahrt relevanten Qualitätssicherungszertifizierungen bildeten die Basis für diesen Erfolg.

1995 meldeten wir international das Patent für das HERO Premium Casting® -Verfahren zur Herstellung von hochfesten Aluminium-Feinguss-Bauteilen an. Dieses ist eine wesentliche Grundlage für unseren nachhaltigen Erfolg bei Aluminiumbauteilen für die Luft- und Raumfahrtindustrie. Darüber hinaus wurde die Tital von Airbus im Jahre 2001 für die Lieferung kritischer Bauteile mit dem Gussfaktor 1,0 gemäß FAR-AC-25.621 qualifiziert.

TITAL, **Bild 1**, beschäftigte mit Stand 31.12.2008 insgesamt 449 Mitarbeiter (incl. 20 Auszubildende).



Bild 1: Luftaufnahme von TITAL 2009

1. Einführung

1.1 Ausgangslage

Unser Unternehmen war bis zur Umsetzung des Projektes in der Lage, Titanbauteile nur bis zu einer Größe von ~ 600 mm zu fertigen. Der Titanguss ist möglich, da wir einen Gießofen haben, der einen „Schwerkraftgussprozess“ und einen „Schleudergussprozess“ zulässt. Leider war aufgrund der Größe des bisherigen Ofens und der bislang angewandten Verfahrenstechnologie, die Produktion von größeren Teilen aus Titan am Standort und in der Branche nicht möglich.

Vor dem Hintergrund, dass die neue innovative Ofentechnologie die klassische Frästechnik für Titan-Großbauteile ersetzen soll, wird an dieser Stelle die Prozesskette der Rohmaterialherstellung sowie des Fräsens von Großbauteilen kurz vorgestellt.

Aufbereitung des Erzes zu Halbzeugprodukten:

Die Prozesskette zur Herstellung von Blechen, Platten, Stangen für die spätere Weiterverarbeitung durch Fräsen ist in **Bild 2** dargestellt.¹

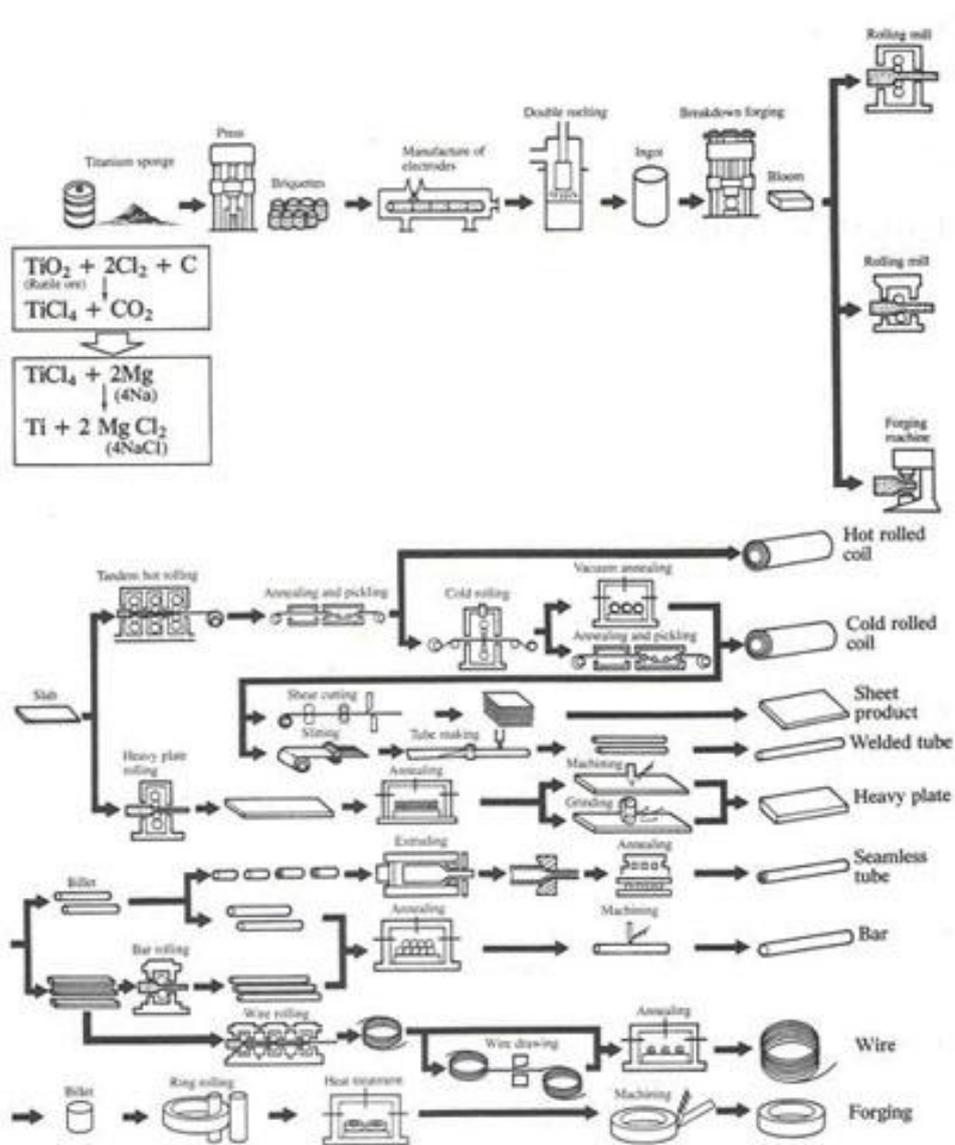


Bild 2: Übersicht des Fertigungszyklus für Halbzeugprodukte

Ermittlung des Energieverbrauches zur Gesteherung des Rohmaterials

Der in der oberen Bildhälfte von **Bild 2** dargestellte Prozess zur Reduktion des Minerals zu Titanschwamm (Kroll-Prozess) verbraucht je kg Schwamm eine Energie von 82,5 kWh.²

¹ Donachie, M.J.; Titanium A Technical Guide; ASM International, 2000

² Zwicker, U.; Titan und Titan-Legierungen, Springer-Verlag, 1974

Für das Schmelzen des Titans sind je kg Schmelze rd. eine kWh elektrischer Strom aufzubringen.³ Die Materialverluste in der Primärfertigung sind hoch bedingt durch erforderliche Reinigungs-vorgänge: Abtrennen der Stirnenden des Ingots und Drehen der Ingotoberfläche nach Schmelzen zur Vermeidung von Einschlüssen im Plattenmaterial. Es fließen Späne aus der Bearbeitung zurück und werden dem Aufbereitungsprozess wieder zugeführt, verunreinigte Späne fließen als Zuschlagstoff der Aluminium und Stahlfertigung zu. Werte für die aufgewandte Energie für das Freiformschmieden zum Billet, wie auch für die Reinigungsvorgänge sowie für das Walzen stehen leider nicht zur Verfügung.

Wird das entstehende Halbzeug⁴ (Platte, Blech, Billet) zu 1 gesetzt, wird für den Ingot die 1,9 fache Materialmenge benötigt, welche aus 1,3 x Sponge (Titanschwamm) und 0,6 x Schrotten besteht, die aufbereitet aus der Fertigung dem Prozess wieder zufließen.

Es ergibt sich folglich ein Stromverbrauch für die Produktion eines kg Ingot:

$$(1,3 \times 82,5 + 0,6 \times 1) / 1,9 = \underline{56,76 \text{ kWh/kg (berechnet aus)}}$$

Für ein kg Halbzeugformat folgt dementsprechend:

$$56,76 \times 1,9 = \underline{107,85 \text{ kWh/kg (berechnet aus)}}$$

Typische Geometrien, die in der Luftfahrt dann aus diesen Halbzeugformaten gespannt werden, führen zu Materialverlusten von 40 % bei der Fertigung von Aluminiumbauteilen durch Fräsen von Halbzeugteilen⁵. Der hier genannte Wert wurde jedoch „vorgesehen“ und ist nach „endgültiger Wahl des Gießverfahrens zu präzisieren“. Entsprechend persönlicher Mitteilungen⁶ ergeben sich **90 % Materialverlust in Form von Spänen bei der Zerspanung von Titanteilen für die Luftfahrt** (was im Folgenden in 2.3 auf Seite 26 auch an einem konkreten Beispiel untermauert wird):

$$107,85 \times 10 = \underline{1.078,5 \text{ kWh/kg}}$$

³ TITAL GmbH; Eigene Stromverbrauchserfassungen

⁴ Leyens, C., Peters, M.; Titanium and Titanium Alloys; Wiley-VCH, 2003

⁵ Ketscher, N., Herfurth, K., Kademann, R.; Kummulierter Energieaufwand der Gussteilfertigung – Variantenvergleich zum Spanen von Halbzeugen, Gießerei – Rundschau, 45, 1998

⁶ Pers. Mitteilung Lange, M., PREMIUM AEROTECH VAREL

Dieser hohe Materialverlust zur Gesteung eines kg Fertigteil durch Fräsen ist im wesentlichen begründet durch die in der Luftfahrt üblicherweise gewichtsoptimierten Bauteilgeometrien.

Zusammenfassend ergibt sich das folgende **Bild 3**:

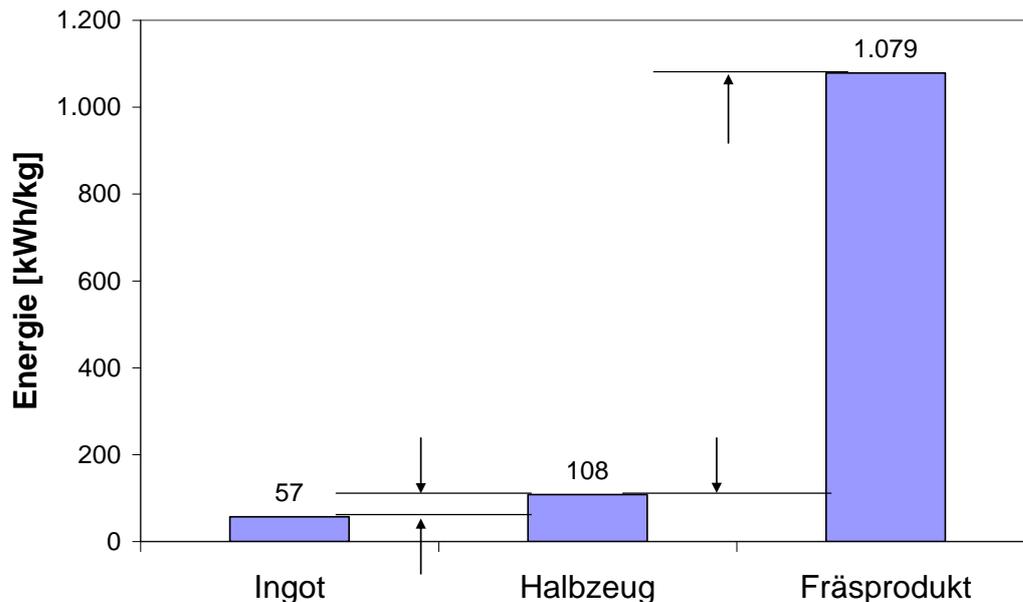


Bild 3: Energieverbrauch zur Herstellung von Titan-Ausgangsmaterial, Halbzeug und Endprodukt in der Luftfahrt

Üblicherweise werden Titanprodukte nicht durch Gießen hergestellt. Besonders für „größere“ Teilegruppen wird das herkömmliche Fräsverfahren eingesetzt. Durch die neue innovative Produktionsmethode der TITAL GmbH besteht aber auch nun die Möglichkeit, Produkte bis zu einem Durchmesser von nun 1.500 mm im Feingießverfahren herzustellen.

Herkömmliches Fräsverfahren:

Fräsen ist das spanabhebende Bearbeiten von Metallen mittels eines Fräswerkzeuges. Es erfolgt auf speziellen Werkzeugmaschinen (Fräsmaschine). Die zur Spanabhebung notwendige Schnittbewegung wird durch Rotation des Schneidwerkzeuges gegenüber dem fest eingespannten Werkstück erzeugt. Die hingegen zur Formgebung notwendige Vorschubbewegung wird je nach Bauart entweder durch Verschiebung des Werkstückes oder durch Bewegung des Fräskopfes um das Werkstück herum erreicht. Vorschubbewegungen können je

nach Bauweise- auch kombiniert- in der X-, Y- und Z-Achse oder entlang der jeweiligen Rotationsachsen erfolgen. Dabei wird, insbesondere bei Luftfahrtbauteilen, die gewichtsoptimiert ausgelegt werden, der überwiegende Materialanteil einer gewalzten Platte in Späne umgewandelt, die beim weiteren Fertigungsprozess nicht mehr oder nur mit erheblichem technischen und qualitätssichernden Aufwand recycelt werden können. Darüber hinaus müssen die beim Fräsen eingesetzten Fräswerkzeuge zur Verlängerung Ihrer Lebensdauer ständig mit Kühlschmierstoffen beaufschlagt werden.

1.2 Projektziel

Neue Flugzeugprogramme wie der A380 oder auch der A350 von Airbus oder die B787 von Boeing vertrauen bei immer mehr Bauteilen im Flugzeug auf leichte CFK (Carbon-Faser-Kunststoff) -Bauteile. Der Nachteil der CFK-Bauteile ist jedoch eine korrosive Wirkung gegenüber den konventionell in der Luftfahrt eingesetzten Aluminiumlegierungen. Die Spannungsreihe der Elemente ist letztendlich verantwortlich hierfür. Einige Experten sprechen bei Aluminium in Kombination mit CFK-Bauteilen in der Luftfahrt von der „fliegenden Batterie“.

Der Werkstoff Titan ist bedingt durch die nicht vorhandene Korrosionsneigung sowie durch einen vergleichbaren Elastizitätsmodul mit CFK die bevorzugte Wahl des Konstrukteurs. Aus diesem zentralen Grund wird der Einsatz von Titan im Flugzeugbau als direkte Folge des vermehrten Einsatzes von CFK-Bauteilen weiter gesteigert werden. Der Airbus A320 hat einen Titananteil am Gesamtmaterialmix des Flugzeuges von 3 %. Der neue A380 verfügt bereits über ca. 10 % Titan. Der im Jahre 2012 für den Erstflug vorgesehene neueste Flieger von Airbus, der A350 / XWB wird bereits ca. 14 % Titananteil aufweisen – dies bei einem CFK-Anteil von bereits über 50% und bei einem Treibstoffverbrauch von deutlich unter 3 Liter Kerosin pro geflogenem Fluggastkilometer. Die Ermöglichung des „3-Liter-Flugzeugs“ steht insofern in direktem kausalen Zusammenhang mit der Materialauswahl. Der Materialmix und damit der vermehrte Einsatz von Titan ist ein wichtiger Beitrag zur Senkung der CO₂ – Emissionen im Luftverkehr.

Heute werden die Groß-Bauteile aus Titan für die Luft- und Raumfahrtindustrie aufwendig gefräst – so wie das historisch auch mit dem Werkstoff Aluminium das übliche Fertigungsverfahren war. Halbzeuglegierungen können hier mit höheren Festigkeitseigenschaften gegenüber Aluminium-Gusslegierungen realisiert werden, was zu höheren spezifischen Festigkeiten (Festigkeit/Gewicht) führt.

Bei der Verwendung von Titan entfällt dieser materialbedingte Nachteil, da die Halbzeuglegierungen denen der Gusslegierungen in ihrer Zusammensetzung exakt entsprechen und Festigkeitseinbußen bei Guss vernachlässigbar sind. Metallurgisch durchlaufen bei Titan sowohl die Halbzeugmaterialien wie auch der Guss die gleiche Phasenumwandlung, durch die folgende Umformung erreichte Festigkeitssteigerung, wie auch die Beeinflussung der Eigenschaften durch unterschiedliche Wärmebehandlungen sind vernachlässigbar. Genau diese materialbedingten Randbedingungen sind die Basis der Markt- und Technologieinnovation unseres Unternehmens.

Ziel unseres Projektes war es, im Rahmen einer erstmaligen großtechnischen Anwendung im Bereich des Titan-Feingießens, Großbauteile mittels einer neuen innovativen Ofentechnik herzustellen. Damit sollte eine material- und energieeffiziente Verfahrensalternative zur Frästechnik erstmals zur Anwendung kommen.

Durch die Entwicklung des neuen Schwerkraftgussofens, dargestellt in **Bild 4** (in Kooperation mit der Firma ALD), wollen wir als erster Anbieter im deutschen Markt Bauteile in einer Größe bis ca. 1.500 mm anbieten können.



Bild 4: Schmelz- und Gießofen VAR L 500 SM



Bild 5: Triebwerksbauteil

Für Großbauteile aus Titan, wie beispielhaft in **Bild 5** gezeigt, bietet diese neue innovative verfahrenstechnische Alternative zur Frästechnologie deutliche Vorteile bei:

- Materialeffizienz
- Energieeffizienz
- Effizienz im Verbrauch von Hilfs- und Betriebsstoffen.

Diese Vorteile stellten sich beim Projektstart wie folgt dar:

- 1.) Hoher prinzipieller Energieaufwand der Zerspanung im Vergleich zum Gießen (**31.900 GJ/t**)⁷ (Seite 12). Bei diesem Vergleich der Energieaufwendungen handelt es sich aber um den Werkstoff Stahl. Im weiteren Teil des Berichtes werden wir daher noch auf die Besonderheiten des Werkstoffes Titan eingehen.

Gerade bei der Titanbearbeitung ist die Wärmeentwicklung an der Schneide ein Problem, denn Titan hat schlechte Wärmeleiteigenschaften und der größte Teil der zerspanungsbedingten Wärmeentwicklung muss dementsprechend durch die Werkzeugschneide aufgenommen werden.

Der hohe spezifische Energieaufwand zum Zerspanen von Titan wird in der nachfolgenden **Tabelle 1** näher dargestellt:⁸

⁷ Ketscher, N., Herfurth, K., Kademann, R.; Kummulierter Energieaufwand der Gussteilfertigung – Variantenvergleich zum Spanen von Halbzeugen, Gießerei – Rundschau, 45, 1998

⁸ ASM-Handbook 16 machining, ASM International, 1989

Tabelle 1: Scherspannung und spezifische Zerspanungsleistung verschiedener Werkstoffe

Material	Scherspannung [MPa]	Spezifische Zerspanungs-Leistung [Wh/cm³]
Magnesium	193,05	0,13
Aluminium	344,74	0,35
Kupfer	309,23	0,59
Edelstahl	723,95	1,14
Titan	1196,24	1,44

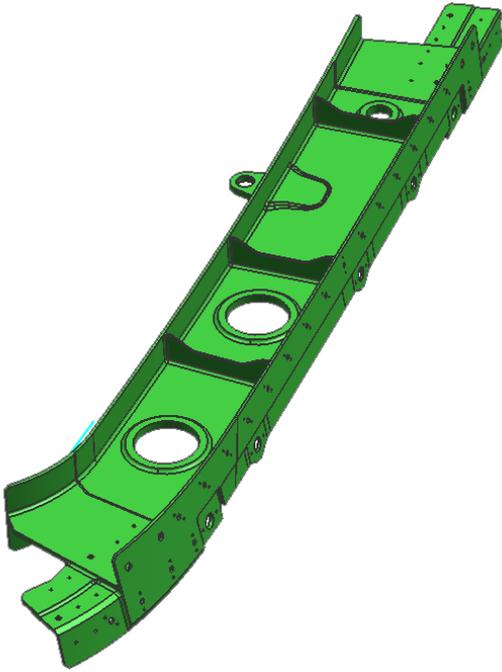
- 2.) Das Fräsen von Titan führt zu einem hohen Materialverlust (~90 %). Der Materialverlust kann wegen der Anhaftung von Ölen und Fetten nur begrenzt recycelt werden (schlechte Materialeffizienz!).

2 Nachweisführung (Kontrolle der Projektziele)

Die Kontrolle der mit unserem Vorhaben verbundenen Projektziele erfolgte anhand der nachfolgend aufgeführten Aufgabenstellungen:

1. Verbrauchsaufnahme des eingesetzten Titan-Materials und Vergleich zu der üblichen Frästechnologie
2. Stromzählung am neuen Ofen im Vergleich zu Energieverbrauch von modernen 5-Achs CNC-Bearbeitungszentren
3. Aufstellung einer Energie- und Ressourcenbilanz (Input / Output mit Stoffströmen, Emissionen, etc.)

Zur konkreten Ermittlung des für die Zerspanung erforderlichen Energie- und Materialeinsatzes eines ausgewählten Geometriebeispiels in **Bild 6** wurde ein Untersuchungsauftrag an die Universität Hannover, Produktionstechnisches Zentrum (PZH) erteilt:



Durchgeführte Tätigkeiten

- ◆ Analyse des CAD-Bauteils und Ableitung von Fertigungsstrategien
- ◆ Ergänzung fehlender Flächen des Datenmodells
- ◆ Erstellung von Hilfsgeometrien zur Verringerung von Werkzeugwegen
- ◆ Erstellung des CAM-Szenarios
- ◆ Generierung von Werkzeugwegen inkl. Kollisionskontrolle

Besonderheiten

- ◆ Eine der beiden formgebenden Außenwände ist schräg und bedingt eine mehrachsige Bearbeitung

Bild 6: Referenzgeometrie 1030 x 76 x 185 mm³

2.1 Verbrauchsaufnahme des eingesetzten Titan-Materials und Vergleich zu der üblichen Frästechnologie

Bedingt durch die schlechte Titan-Verfügbarkeit in den Jahren 2005 bis 2008 ist bei TITAL ein Verfahren zur Wiederverwendung interner Schrotte etabliert worden. Der Materialverbrauch je kg erzeugtem Titan-Guss wurde hierdurch auf die Hälfte reduziert, wie in **Bild 7** zu sehen ist.

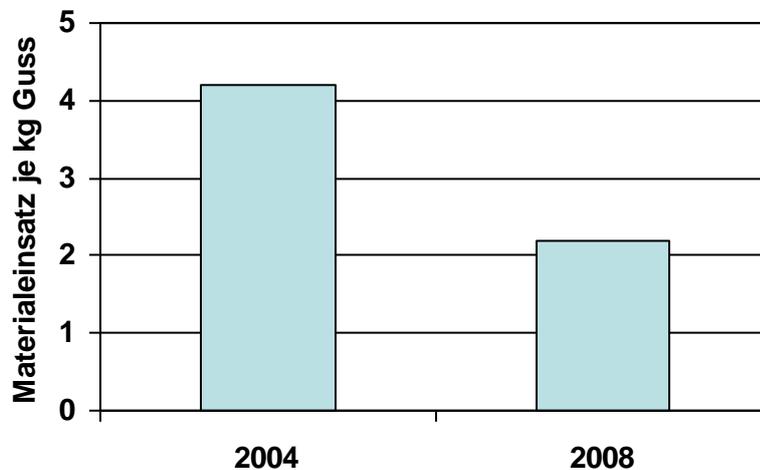


Bild 7: Materialeinsatz zur Fertigung eines kg Feingussteil

Der Materialeinsatz zur Herstellung eines kg Feigussteils ergibt sich somit nur in Höhe von 2,1 kg (4,2 kg im Jahre 2004).

Übliche Werte für komplex gestaltete große Titanteile bei Anwendung der Frästechnik ergeben Zerspanungsanteile von > 90 %. Je kg Fertigteil erzeugt durch Zerspanung sind somit mindestens 10 kg Halbzeug erforderlich.

Der Rohmaterial-Einsatz bei Gießen und Fräsen ist in **Bild 8** dargestellt.

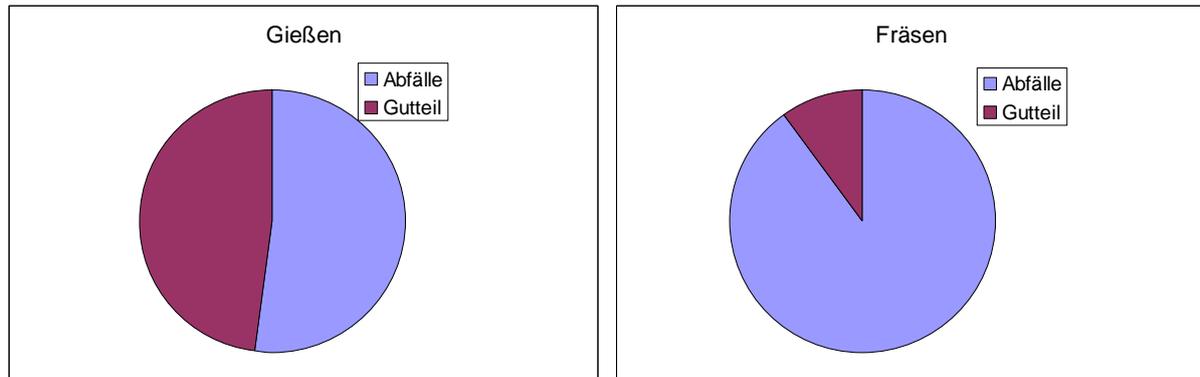


Bild 8: Ausbringung bei Gießen und Fräsen

2.2 Ermittlung des Energieverbrauches zum Fräsen und bei Gießen von Titan

2.2.1 Ermittlung des Energiebedarfs zum Fräsen der Referenzgeometrie

Mit dem Untersuchungsauftrag an die Universität Hannover, Produktionstechnisches Zentrum (PZH), wurde der übersandte Datensatz des Bauteiles zur Erstellung des Fräsprogrammes genutzt. Anhand von Praxis-Fräsversuchen wurden die Schnittparameter Vorschubgeschwindigkeiten und Bearbeitungsgeschwindigkeiten für ein modernes 5 – Achsiges CNC-Bearbeitungszentrum ermittelt.

Basierend auf den Bearbeitungsprogrammen erfolgte dann virtuell die Bestimmung der Bearbeitungszeiten.

Das Ergebnis dieser Arbeiten ist in der Übersicht **Bild 9** dargestellt:

AP3: Ermittlung der Haupt- und Nebenzeiten

Maschinenlaufzeiten aus Geometrie- und Verfahrenssicht

◆ Geometriesicht

	Bearbeitungszeiten	Weganteil G0/G1	Zeitanteil G0/G1	Werkzeugwechsel
Oberseite	527,2 min.	75,01%	2,56%	1
Unterseite	521,8 min.	63,27%	0,98%	5
Gesamt	1.049,0 min.			6

Bild: Oberseite



◆ Verfahrenssicht

	Schruppen	Schlichten	Schlichten	Gesamt
Werkzeug	20 mm	20 mm	8 mm	-
Oberseite	271,0 min.	42,25 min.	213,96 min.	527,2 min.
Unterseite	313,4 min.	53,25 min.	155,15 min.	521,8 min.
Gesamt	584,4 min.	95,50 min.	369,11 min.	1.049,0 min.

Bild: Unterseite



Hp © IFW

Bild 9: Ermittlung der Maschinenlaufzeiten zur Bearbeitung der Referenzgeometrie

Die Maschinenlaufzeiten für das Bearbeitungsprogramm, wie auch die bereits durchgeführten Praxis-Fräsversuche, waren die Basis zur Ermittlung der erforderlichen Arbeit. Die Fräsmaschine wurde instrumentiert – mit der notwendigen Sensorik ausgestattet – und es erfolgten Messungen der erforderlichen Leistung für die spezifische Zerspannungsaufgabe.

Ergebnisse dieser Messungen sind beispielhaft in **Bild 10** aufgeführt.

AP4: Leistungsaufnahme beim Schruppen $d = 20$ mm

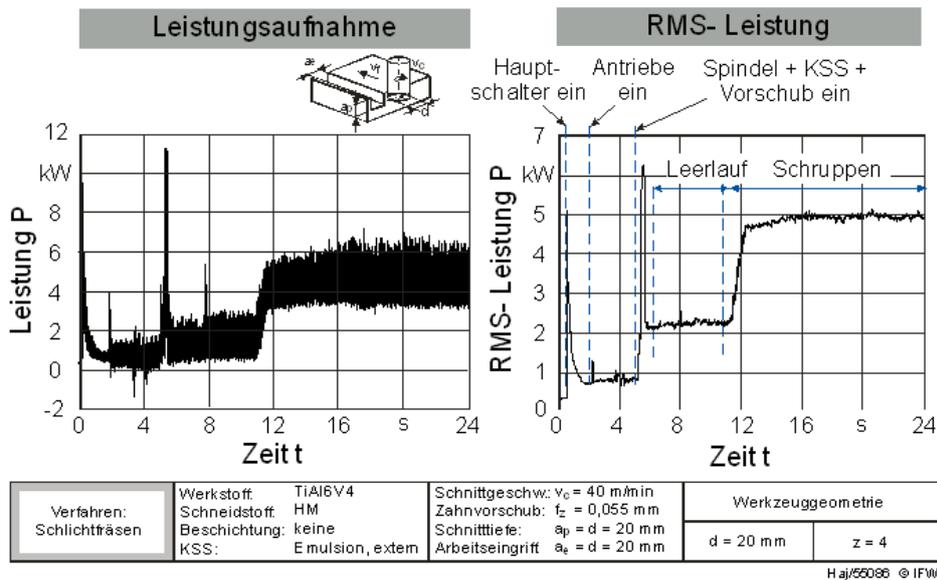


Bild 10: Leistungsaufnahme bei der Bearbeitung von Titan

Mit dem Bearbeitungsprogramm konnten die erforderlichen Zeiten für die Zerspanungsaufgaben bestimmt werden. Die für die jeweilige Zerspanungsaufgabe erforderliche Leistung multipliziert mit der Zerspanungszeit entsprechend dem Fräsprogramm ergibt die für die Zerspanung erforderliche Arbeit, **Bild 11**.

AP5: Energiebedarf für die Herstellung des Strukturbauteils

$$\text{Arbeit [J]} = \text{Energie [W]} \times \text{Zeit [s]}$$

Schritt	d [mm]	Arbeitszeit [min]	Energiebedarf [kW]	Arbeit [MJ]
Schruppen	20	584,4	4,89	171,29
Schlichten	20	95,5	2,75	15,77
Schlichten	8	369,11	2,22	49,07
Gesamt	-	-	-	236,13

Haj © IFW

Bild 11: Energiebedarf zur Zerspanung der Referenzgeometrie

Demzufolge ist für die reine Zerspangung eine Arbeit von **66,7 kWh (=236,13 MJ)** aufzuwenden.

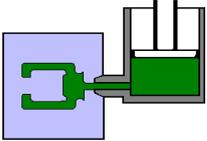
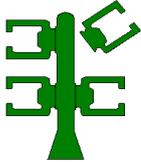
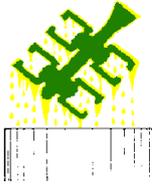
Das Bauteilgewicht beträgt **6 kg** und somit ergibt sich ein Energiebedarf von **~ 11 kWh** je kg Fertigteil.

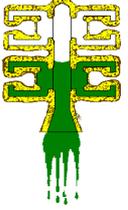
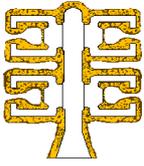
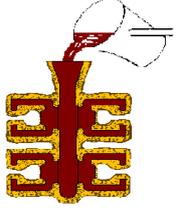
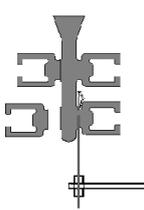
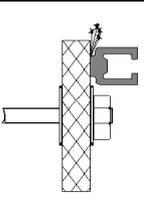
2.2.2 Ermittlung des Energieaufwandes zum Gießen der Referenzgeometrie

Der Fertigungsprozess des Gießens im Vergleich zur Zerspangung ist deutlich umfangreicher, da für das Gießen zunächst eine Form erstellt werden muss, in die das geschmolzene Metall gegossen werden kann. Die Form beinhaltet alle notwendigen Kanäle und für den Gießprozess erforderliche Details, die es ermöglichen ein den Anforderungen entsprechendes Bauteil zu gießen.

Einen Überblick über die erforderlichen Einzelprozesse beim Feinguss von Titanlegierungen ist in der folgenden **Tabelle 2** dargestellt. Das Verfahren wird angewandt, um Gussstücke mit höchster Maßgenauigkeit und bester Oberflächenqualität zu erhalten.

Tabelle 2: Fertigungsablauf des Feingussverfahrens

	<p>Das Modell wird dabei aus Spezialwachsen im Spritzgussverfahren hergestellt. Die Modelle werden zunächst in Einfach- oder Mehrfachwerkzeugen gespritzt. Diese Werkzeuge bestehen in der Regel aus Aluminium oder Stahl. Je nach Gesamtstückzahl, Gestalt des Gussstückes und Art des Modellwerkstoffes wird das entsprechende Spritzwerkzeug gebaut. Um Hinterschneidungen in der Kontur mit einzubringen, können vorgeformte wasserlösliche oder keramische Kerne erforderlich sein, für welche dann ein Zusatzwerkzeug benötigt wird.</p>
	<p>Im nächsten Schritt werden die Modelle mit dem Gießsystem zu sogenannten Modelltrauben zusammengefügt.</p>
	<p>Diese Modelltraube wird dann in einen sogenannten Schlicker getaucht. Der Schlicker ist eine keramische Masse zur Herstellung einer Formschale aus feinem feuerfesten Mehl als Formgrundstoff und z.B. Ethylsilikat als Bindemittel.</p>
	<p>Die mit Schlicker benetzte Traube wird anschließend mit Sand berieselt, oder die Traube wird in ein durch Druckluft fluidisiertes Sandbett getaucht. Das Tauchen und Besanden wird so oft wiederholt, bis die Formschale die notwendige Stabilität zum Abguss erreicht hat.</p>

	<p>Zum Ausschmelzen der Wachsmodelle bei etwa 150 °C dienen spezielle Ausschmelzöfen (in der Regel sind dies Autoklaven).</p>
	<p>Das Brennen der Formen wird bei etwa 750 bis 1200 °C vorgenommen.</p>
	<p>Die gebrannten Formen können nun direkt abgegossen werden. Ist der metallostatische Druck und die Gießtemperatur der Schmelze hoch, können die Formen auch in einen Kasten gegeben, und mit trockenem Sand als Füllstoff hinterfüllt werden. Das Gießen geschieht meistens in heiße Formen, damit auch enge Querschnitte und feine Konturen sauber auslaufen.</p>
	<p>Nach dem Abguss und der vollständigen Erstarrung der Schmelze wird das Gussstück entformt.</p>
	<p>Die Gussteile werden mittels Trennscheibe, Säge oder Vibration vom Gießsystem getrennt.</p>
	<p>Anschließend erfolgt die notwendige Nacharbeit, durch Putzen, Schleifen, Strahlen sowie die Wärmebehandlung und Richten wie auch die erforderlichen Prüfungen der Gussteile.</p>

Mit dem Feingießverfahren können Gussstücke mit einer Masse von 0,001 bis zu mehreren hundert kg vergossen werden. Die linearen Toleranzen liegen bei etwa $\pm 0,4$ bis $\pm 0,7$ % vom Nennmaß. Es können Stähle und Legierungen auf Eisen-, Aluminium-, Nickel-, Kobalt-, Titan-, Kupfer-, Magnesium- oder Zirkoniumbasis vergossen werden.

Der Vorteil des Feingießens besteht darin, dass die gegossenen Teile in der Regel einbaufertig sind oder nur sehr wenig Bearbeitung erfordern. Als Faustregel für die Wirtschaftlichkeit gilt, dass das Feingießen besonders günstig ist, wenn das Bauteil kompliziert gestaltet ist und/oder je schwieriger es bearbeitet werden kann. Darüber hinaus ist das Verfahren besonders dann vorteilhaft, wenn weitere in anderen Verfahren erforderliche Anbauteile in das Feingussteil integriert werden können.

Die aufgeführten Einzelschritte detailliert auf Ihre Energieverbräuche zu untersuchen war im Rahmen dieser Untersuchung nicht möglich. Eine weitere Schwierigkeit, den spezifischen Energieverbrauch zur Fertigung eines kg Titangussteil innerhalb der TITAL zu ermitteln ist, dass neben Titan-Feingussteilen auch Aluminium-Feingussteile gefertigt werden und Fertigungsanlagen teilweise auch für beide Produktbereiche genutzt werden. Somit wurde der Energieverbrauch bestimmt, in dem die eingesetzte Gesamt-Energie in Form von Strom in **Tabelle 3** und Gas in **Tabelle 4** durch Zuordnung auf Anlagen und deren spezifischer Verbräuche und daraufhin folgend auf die Produktbereiche in **Tabelle 5** aufgeteilt wurde.

Der Jahresstromverbrauch der TITAL betrug in 2007 6.800.000 kWh:

Tabelle 3: Jahresenergieverbrauch Strom

Anlage	Anschlussleistung [kW]	Nutzungsdauer je Tag [h]	Stromverbrauch [kWh] für Aluminium	Stromverbrauch [kWh] für Titan
Kompressor groß	70,00	8,00	392,00	168,00
Klima/Kälte	28,00	24,00	537,60	134,40
Hochdruckpumpen	200,00	8,00	1.600,00	0,00
Wachstöpfe	7,00	24,00	134,40	33,60
Autoklav Ti	96,00	8,00	0,00	768,00
Zentrale Wachse	10,00	24,00	192,00	48,00
Aluminium Kleben	15,00	10,00	150,00	0,00
Vakuum-Ofen	150,00	1,50	0,00	225,00
Trockner	16,00	24,00	0,00	384,00
Vorwärmofen	20,00	10,00	0,00	200,00
Autoklav Al	120,00	10,00	1.200,00	0,00
Schleifen Ti	12,00	8,00	0,00	96,00
ND-Ofen	65,00	8,00	520,00	0,00
Teleflex Klima	28,00	24,00	537,60	134,40
Kaltwassersatz	28,00	24,00	537,60	134,40
Lichtbogen-Ofen Al-	650,00	1,75	0,00	1.137,50
Wärmebehandlung Schleuder	900,00	1,50	1.350,00	0,00
	60,00	8,00	0,00	480,00
		Summe	<u>7.151,20</u>	<u>3.943,30</u>
		Anteil	64%	36%
		Anteil x Jahresverbrauch [kWh]	<u>4.383.087,12</u>	<u>2.416.912,88</u>

Der Jahresgasverbrauch der TITAL betrug in 2007 ~ 9.778.000 kWh:

Tabelle 4: Jahresenergieverbrauch Erdgas

Anlagen:	Al [Stk.]	Ti [Stk.]
Brennöfen	2,00	2,00
Vorheizöfen	5,00	1,00
Entlackungsöfen	2,00	0,00
Vorschmelzofen (Al)	4,00	0,00
Anteil	81%	19%
Anteil x Jahresverbrauch [kWh]	<u>7.920.180,00</u>	<u>1.857.820,00</u>

Für Strom und Gas ergibt sich zusammenfassend:

Tabelle 5: Energieverbrauch je kg Aluminium- bzw. Titanfeingussteil

	Aluminium	Titan
Jahresverbrauch [kWh]	12.303.267,12	4.274.732,88
Jahresproduktion [kg]	120.000,00	27.000,00
Energieaufwand je kg	<u>102,53</u>	<u>158,32</u> kWh/kg

Ergebnis dieser Bewertung ist ein Energieaufwand (Strom und Gas) von **158 kWh für die Fertigung eines kg Titanfeingussteil. Hierin beinhaltet sind alle Energieaufwendungen für erforderliche Nebenbetriebe einschließlich der Verwaltung.**

2.3 Energie und Ressourcenbilanz

Zum Fräsen der Referenzgeometrie wird eine Platte von 1030 x 80 x 185 mm³ (=15,244 l) benötigt. Bei einer Dichte von 4,43 g/cm³ ergibt sich ein Einsatzgewicht von 67,5 kg. Das Gewicht des gespannten Bauteils beträgt 6,0 kg und somit beträgt die Materialausbringung in diesem konkreten Fall 8,9 %.

Wird bei der Betrachtung der reinen Fertigungsprozesse Gießen und Fräsen der Energieaufwand zur Gesteherung des Metalls vernachlässigt, erscheint es günstiger Bauteile aus dem Halbzeug zu zerspanen.

Da jedoch beim Fräsen üblicherweise mehr als 90 % des Halbzeuges in Form von Spänen verloren ist, ergibt sich für die durch Zerspanung hergestellten Titanfrästeile ein Energiebedarf von 1.079 kWh/kg zur Gesteherung des Rohmaterials + 11 kWh/kg zur Zerspanung = **1.090 kWh/kg + Energieaufwand für Nebenbetriebe.**

(Je kg Fertigteil erzeugt durch Zerspanung sind mindestens 10 kg Halbzeug erforderlich.)

Für die Herstellung eines kg Titan-Feingussteil ergibt sich:

Energieaufwand zur Erzeugung des Halbzeuges 108 kWh/kg + der Energie zur Erzeugung des Gussteiles in der Gießerei 158 kWh/kg = **266 kWh/kg**.

Anzumerken ist: Die erforderliche Energie zur Rückführung von Anschnittmaterial in den Fertigungsprozess ist bereits in der Ermittlung des Energiebedarfes für Gussteile enthalten! Für die Herstellung eines Kilogramm Feingussteil ist ein Materialeinsatz von nur 2,1 kg erforderlich.

Das CO₂-Äquivalent für Strom⁹ beträgt 596 g/kWh und für Erdgas¹⁰ rund 200 g/kWh.

Etwa 50 % der eingesetzten Energie in der Gießerei ist Erdgas zum Betrieb der Öfen für das Brennen und Vorheizen der Formen auf Abgustemperatur.

Für das Fräsen ergibt sich:

$$1.090 \times 0,596 = 650 \text{ kg CO}_2 / \text{kg Frästeil (+x)}$$

Für das Gussteil ergibt sich:

$$(108 + 158/2) \times 0,596 + 158 / 2 \times 0,2 = 127 \text{ kg CO}_2 / \text{kg Gussteil}$$

Die **Tabelle 6** stellt die Ergebnisse auf Basis einer erwarteten Produktionsmenge von 15.000 kg/a dar.

Tabelle 6: CO₂-Bilanz Fräsen versus Gießen

	Fräsen	Gießen	Produktionsmenge:	15.000	Kg/a
CO ₂ -Ausstoß [kg]	9.750.000	1.905.000			
Stromverbrauch [kWh] (berücksichtigt Rohmaterialherstellung)	16.350.000	1.342.500			
Gasverbrauch [kWh]		0			1.035.000
Materialverbrauch [kg]	150.000	31.500			

⁹ <http://www.g-o.de/wissen-aktuell-8259-2008-05-21.html>

¹⁰ http://www.tschreiber.de/b_shk/erdgas.html

3. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

3.1 Investitionen

Die **Tabelle 7** zeigt eine Übersicht über geplante und tatsächlich getätigte Investitionen für das Projekt. Die **Tabelle 8** gibt Auskunft über die Finanzierung.

Tabelle 7: Investitionen

Teilvorhaben	geplant (EUR)	tatsächlich (EUR)
Schwerkraftgießofen	2.228.000	2.227.570
Sicherheitsumwandlung (Mauer für Ofen)	60.000	32.655
Vorheizofen	140.000	158.564
Krananlage für Ofenbefüllung	30.000	37.958
Tiegel	70.000	52.818
Kosten für Stromversorgung	24.000	48.284
Fremdleistungen für Installation und Inbetriebnahme	97.000	97.000
Leistung für Material und Personalkosten	200.200	261.012
Förderfähige Gesamtausgaben	2.849.200,00	2.915.861

3.2 Finanzierung der geplanten und tatsächlichen Ausgaben

Tabelle 8: Finanzierung

Finanzierungsform	geplant (EUR)	tatsächlich (EUR)
Zuschuss aus dem BMU-Umweltinnovationsprogramm	854.760	854.760
Eigene Mittel	1.994.440	2.061.101
Gesamt:	2.849.200	2.915.861

3.3 Abschätzung der Einsparung über den Abgleich der Betriebsstoffeinsparung und der anfallenden Kosten

Die Ermittlung der Betriebsstoffeinsparung (Ti-Metall) erfolgt auf Basis einer erwarteten Jahresfertigung von 15.000 kg und kann anhand der **Tabelle 9** nachvollzogen werden.

Tabelle 9: Betriebsstoffeinsparung

Materialverbrauch für "Frästeile"	Materialverbrauch für "Frästeile"	Preis je kg TiAl6V4 Rohstoff	Materialkosten für Frästeile
erzeugte Netto-Prod.-Menge [kg]	Einsatz 9 kg Ti-Rohmat. je kg Fertigteil	in €	in €
15.000	135.000	27,00 €	3.645.000 €
Materialverbrauch für "Gussteile"	Materialverbrauch für "Gussteile"		Materialkosten für Gussteile
erzeugte Netto-Prod.-Menge [kg]	Einsatz 2,1 Kg Ti-Rohmat. je kg		in €
15.000	31.500	27,00 €	850.500 €
	(gerechnet mit einem Einsatzfaktor von 2,1) (berücksichtigt den Ti- Recycling-Effekt)		
Materialkosteneinsparung	Summe		2.794.500 €

Die auf der folgenden Seite dargestellte **Tabelle 10** gibt Auskunft darüber, mit welchen zusätzlichen Kosten (im Vergleich zur sonst üblichen Fertigung) auf Basis einer erwarteten Jahresfertigung von 15.000 kg zu rechnen ist. Wesentliche Kostengrößen sind der Instandhaltungsaufwand, die Personalkosten, die Formstoffkosten, die Energiekosten (Strom) und die Anlaufkosten im ersten Jahr.

Tabelle 10: Kosten

Zusätzliche Kosten für Gussteile		in €
Instandhaltung Giessofen	4% von den Anschaffungskosten (2,9 Mio.€) inkl. Tiegel 3 Personen je 45 T€	116.000 €
Personalkosten Gießerei	inkl. LNK 13 Personen je 45 T€	135.000 €
Personalkosten sonstiger Bereiche	inkl. LNK	585.000 €
Formstoffkosten	15.000 kg * 18,10 €/kg	271.500 €
	Zuschlag für größeren Tauchtopf für Großteile	70.000 €
Energiekosten (Strom)	15.000 kg x 6,50 €/kg	97.500 €
Anlaufkosten im ersten Jahr / 10 Jahre	400 kg Ausschuss * * 250 €/kg HK	10.000 €
Zusätzliche Kosten		1.285.000 € 1.285.000 €

Bringt man die Summe der in **Tabelle 10** berechneten Kosten in Abzug zu der Betriebsstoffeinsparung errechnet sich eine jährliche Einsparung in Höhe von **1.509.500 €**. Dieser Betrag fließt in die nachfolgende statische Amortisationsrechnung ein.

Anmerkung: Bei den berechneten Instandhaltungsmehrkosten handelt es sich um eine geschätzte Kostengröße. Aufgrund der Inbetriebnahme des Ofens im 2. Halbjahr 2009 können zum jetzigen Zeitpunkt noch keine belastbaren Aussagen zu den tatsächlichen Instandhaltungskosten gemacht werden.

3.4 Amortisationszeit

Die **Tabelle 11** gibt Auskunft über die Amortisationszeit zum Zeitpunkt der Antragstellung. Sie betrug unter der Berücksichtigung des zugehörigen Gebäudes, welches nicht Gegenstand der Förderung war, 10,1 Jahre.

Tabelle 11: Amortisationszeit (nach Plan)

	Innovative Technik in €	Gebäude (Planwerte) Zzgl. Peripherie in €	Gesamt in €
Anschaffungskosten [€]:	2.849.200,00	4.896.000,00	7.745.000,00
Nutzungsdauer [a]:	10	30	
Kalkulatorischer Zins [%]:	5	5	0,00
Kalkulatorische Abschreibung [€]:	284.920,00	163.200,00	448.100,00
Betriebsstoffeinsparung [€]:	960.250,00		960.250,00
Kapitalkosten [€]:	356.125,00	285.600,00	641.725,00
Jährliche Kosteneinsparung:	604.125,00	-285.600,00	318.525,00
Amortisationszeit [a]:			
	3,20	-40,00	10,10

Die auf der nachfolgende Seite in **Tabelle 12** dargestellte Amortisationsrechnung berücksichtigt die unter **3.3** ermittelte tatsächliche Einsparung und die tatsächlichen Investitionskosten gemäß **3.1**. Unter der Berücksichtigung dieser Werte ergibt sich in der Gesamtbetrachtung eine Amortisationszeit von 5,94 Jahren.

Tabelle 12: Amortisationszeit (Ist)

	Innovative Technik in €	Gebäude (Planwerte) Zzgl. Peripherie in €	Gesamt in €
Anschaffungskosten [€]:	2.915.860,58	4.896.000,00	7.811.860,58
Nutzungsdauer [a]:	10	30	
Kalkulatorischer Zins [%]:	5	5	0,00
Kalkulatorische Abschreibung [€]:	291.586,06	163.200,00	454.786,06
Betriebsstoffeinsparung [€]:	1.509.500,00		1.509.500,00
Kapitalkosten [€]:	364.482,57	285.600,00	650.082,57
Jährliche Kosteneinsparung:	1.145.017,43	-285.600,00	859.417,43
Amortisationszeit [a]:			
	2,03	-40,00	5,94

4 Projektablauf

Zum Ablauf des Projektes möchten wir noch folgende Angaben machen:

Zum 3. Quartal des Jahres 2008 lag der Schwerpunkt der Entwicklung in der Erprobung von Anschnitt- und Verfahrenstechniken zur Fertigung der Großbauteile.

Mitte Dezember 2008 wurde der erste erfolgreiche Schmelz- und Gießversuch durchgeführt. Hierbei wurde eine Elektrode abgeschmolzen und in ein einfaches, dickwandiges Stahlrohr gegossen. Damit lagen wir weit hinter unserem ursprünglichen Zeitplan.

Der erste erfolgreiche Abguss in eine Feingussform konnte daher erst im Januar 2009 erfolgen. Alle Abnahmekriterien des Schmelz- und Gießofens wurden jedoch noch nicht erfüllt. Die finale Übergabe erfolgte leider erst zum Ende August 2009. Bis dahin waren einige Abstimmungsarbeiten und Änderungen am Ofen durch den Lieferanten vorzunehmen.

Im gesamten Zeitraum musste eine kontinuierliche Überwachung der Aufbau- und Inbetriebnahmearbeiten des Ofens mit seinen Schnittstellen zum Gebäude und der Infrastruktur Strom, Wasser und Luft erfolgen.

Unser Terminplan konnte, wie bereits dargestellt, nicht wie gewünscht eingehalten werden. Die Gründe für die Verzögerungen lagen im wesentlichen in notwendigen Änderungen der Fa. ALD. Auch die vorgesehenen Liefertermine von Einzelteilen für den Ofen konnten durch Verzögerungen bei Unterlieferanten nicht rechtzeitig erfolgen.

Weitere Probleme traten mit dem für den Ofen maßgeblichen Vakuumpumpensystem auf, die einen „Kalttest“ der Anlage und den ersten Schmelz- und Gießprozess zeitlich verzögerten.

Auch die Installation des Vorheizofens konnte entgegen unserer ursprünglichen Planung erst im 1. Quartal 2009 vollständig abgeschlossen werden. Grund hierfür waren wiederum Verzögerungen durch den Lieferanten.

Unser Ziel, die innovative, materialeffiziente Produktion von Titangroßbauteilen mittels Titanfeinguss zu realisieren, konnten wir trotzdem schon jetzt erreichen. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass sich auf Basis der nun exzellent funktionierenden Anlage erhebliche weitere Entwicklungspotentiale erschließen lassen werden.

5 Zusammenfassung / Verbreitung und weitere Anwendung der Anlage

Der Materialverbrauch je kg Titan-Fertigteil in der Luftfahrt beträgt mehr als 10 kg, wenn das Bauteil durch Fräsen erzeugt wird. Durch Gießen kann der Materialverbrauch auf gut 2 kg je kg reduziert werden. Bedingt durch die aufwändige Rohmaterialherstellung ist somit auch der Energieaufwand von 1.090 kWh je kg beim Fräsen etwa der vierfache im Vergleich zum Gießen mit 266 kWh je kg. Auch der CO₂-Ausstoß liegt mit 650 kg je kg Fertigteil mehr als viermal so hoch wie bei durch Gießen erzeugten Bauteilen mit 127 kg je kg Fertigteil. Bei einer erwarteten Produktionsmenge von 15.000 kg/a errechnet sich eine CO₂-Einsparung von 7.845 t/a.

Der ursprünglich budgetierte Investitionsansatz in Höhe von 2.849.200 € wurde für das Projekt nur unwesentlich durch die tatsächlichen Kosten in Höhe von 2.915.861 € überschritten. Die im Bericht dargestellten über der Planung liegenden Einsparmöglichkeiten im Material- (2.794.500 €) und Energieverbrauch (97.500 €) stehen dieser Überschreitung aber positiv entgegen.

Die von uns errechnete Amortisationszeit für die innovative Technik konnte von 3,2 Jahren bei der Planung auf 2 Jahre reduziert werden. Unter Berücksichtigung der Gebäudekosten betragen die Amortisationszeiten 10,1 Jahre bei der Planung bzw. 5,9 Jahre bei der Realisierung. Dieses Ergebnis untermauert die Sinnhaftigkeit dieser Zukunftsinvestition für unser Unternehmen.

Neben der vom Bundesumweltministerium geförderten Investitionssumme hat die gesamte Peripherie einschließlich weiterer Gebäude- und Anlageninvestitionen, die für die komplette Fertigung unabdingbar waren, das Unternehmen fast 8 Mio. € gekostet.

Mit der erfolgreichen Inbetriebnahme der innovativen Ofentechnik ist der erstmalige großtechnische Einsatz dieser Technik in der Bundesrepublik Deutschland realisiert worden.

Der Leichtbau wird auch zukünftig ein Wachstumsmarkt bleiben. Im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland gibt es im Bereich der Gießereien mehrere Betriebe, die mit Werkstoffen arbeiten, die ein Erschmelzen unter Vakuum erfordern. Die hier vorgestellte Technologie kann in modifizierter Form auch von diesen Betrieben angewandt werden.

Ebenso können natürlich andere Feingießereien, die den Werkstoff Titan als neue Legierung in ihr Programm aufnehmen möchten, das entwickelte Verfahren übernehmen.

Der Ofen kann auch für andere Werkstoffe genutzt werden (z.B.: Zirkon). Der Ofenhersteller ALD ist in der Lage, diese Technologie auch für andere Kunden auf deren Bedürfnisse zu übertragen.

Ebenso mag es auf Basis der Ergebnisse unserer Analyse für einige Zerspanungsbetriebe sinnvoll sein, ihre bisherige Technik durch die Feingusstechnologie abzulösen oder zu ergänzen.

Der Schmelz- und Gießofen und die damit verbundene Technologie kann, selbstverständlich nach vorheriger Terminvereinbarung, bei uns in Bestwig (Sauerland) besichtigt werden.