

Abschlussbericht

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

„TURBU-DRUCK-GIESSEN – Ressourcenschonende Räderherstellung mit recy- celtem Material und optimaler Zellennutzung“

Bezug zu Förderthema 7:

Ressourceneffizienz durch innovative Produktionsprozesse, Werkstoffe und Oberflächen-
technologien



ENTECS-STRACON GMBH

Stiewingstraße 101
73433 Aalen

Ansprechpartner: Herr Ralf Bux
Tel.: +49 7361 88093-90
E-Mail: Ralf.Bux@entec-stracon.com

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	38505/01	Referat	21/2	Fördersumme	110.304,00 €
----	-----------------	---------	-------------	-------------	---------------------

Antragstitel
**„TURBU-DRUCK-GIESSEN –
 Ressourcenschonende Räderherstellung mit recyceltem Material
 und optimaler Zellennutzung“**

Stichworte Räderherstellung, Recyclingmaterial

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
12 Monate	01.02.2023	31.01.2024	

Bewilligungsempfänger

ENTEC-STRACON GMBH
 Stiewingstraße 101
 73433 Aalen

Tel +49 7361 88093-90

Fax +49 7361 88093-91

Projektleitung
 Herr Ralf Bux

Bearbeiter
 Herr Ralf Bux

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Weltweit werden bis zu rund 4 Mio. t/a Leichtmetalllegierungen zu Rädern verarbeitet. Leichtmetallräder werden heute fast ausschließlich mit dem Niederdruck-Kokillengussverfahren hergestellt. Eine langsame Formfüllung und lange Erstarrungszeiten sorgen dabei für ein grobes Gefüge. Technologische Defizite (minimal erreichbare Wandstärken, Festigkeitseigenschaften) müssen durch Zerspanungsprozesse und anschließende Wärmebehandlung ausgeglichen werden. Aufgrund der hohen Anforderungen für Räder im Automotive-Bereich (u.a. hinsichtlich Zugfestigkeit oder Dehnung) kann in der Räderproduktion im Niederdruckguss kein Recyclingmaterial eingesetzt werden. Es wird lediglich max. 30 % - 50 % vom Gussgewicht als direktes Kreislaufmaterial gereinigt und wieder aufgeschmolzen. Beim Niederdruckguss fallen in der Nachbearbeitung bisher verfahrensbedingt ausschließlich Späne (von bis zu 50 %), und damit minderwertiges verunreinigtes Sekundärmaterial, an.

Beim TURBU-DRUCK-GIESSEN wird verfahrensbedingt nahezu konturnah gegossen und es fällt somit überwiegend höherwertiges Sekundärmaterial (Anguss und Überläufe mit 25 %) an. Dieses höherwertige Sekundärmaterial besteht aus einem Stück und ist frei von Schmiermitteln, sodass ein Wiederaufschmelzen mit einem sehr hohen Wirkungsgrad realisiert werden kann.

Ziel des Vorhabens war es, das Sekundärmaterial vollständig wieder aufzuschmelzen und zusätzlich 100 % Recyclingmaterial für die Herstellung von Rädern im TURBU-DRUCK-Gussverfahren zu verwenden. Um dies bei sicherheitsrelevanten Bauteilen wie Leichtmetallrädern mit einem hohen Anspruch an Qualität in Kombination mit der Verfahrenskomplexität sicher stellen zu können, bedarf es einer genauen Überwachung aller hierfür relevanten Einflussparameter. Daher verfolgte das Projekt auch das Ziel der ganzheitlichen Qualitätskontrolle bereits beim Gießen. Mit dieser Transparenz soll gezielt gegengesteuert werden, um den Ausschuss zu minimieren. Je früher innerhalb der Wertschöpfungskette ein Abweichen der Einflussparameter zu erkennen ist, umso weniger Ausschuss entsteht.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im ersten Teil wurden die Einflussfaktoren auf Basis von Expertenwissen sowohl auf der Legierungsseite als auch auf der Verfahrensseite erarbeitet und je nach Einfluss auf das Gesamtergebnis untergliedert und priorisiert. So wurden beispielsweise bei der Legierung sowohl die Legierungsbestandteile, als auch die Spurenelemente untersucht und bewertet. Neben der Bewertung der Zugfestigkeit und Dehnung wurde auch der Einfluss auf Biegegewichselfestigkeit und Steifigkeit bewertet, da diese Einflussfaktoren wesentlich für die Erfüllung der Anforderungen der Anwender sind. Nachdem alle Grundlagen, Voruntersuchungen und Bewertungen auf der Materialseite ausgewertet waren, wurden diese unter wirtschaftlich-realisierbaren Bedingungen gewichtet und festgelegt.

Nach Abwägung aller Einflussgrößen wurden dann weitergehende Untersuchungen am Gussteil durchgeführt, um diese Thesen auf Basis von Expertenwissen und Materialprüfungen zu validieren. Des Weiteren wurde auch hierbei berücksichtigt was prozessseitig unter Serienbedingungen wirtschaftlich realisierbar ist. Hierbei wurde festgestellt, dass bereits bei der Aufbereitung der Schmelze (Oxidbildung), bei der Bereitstellung (Umschütten / Ruhen vor dem Abgießen) und dem Abguss (Vorerstarrung / turbulenzarmes Gießen) bis zur vollständigen Erstarrung (Abschreckrate und Polymere) sehr viele Einflussgrößen das Gesamtergebnis beeinflussen. Für diese Einflussparameter wurden Kategorien festgelegt und sie mit Gewichtung bewertet. Durch die komplexe Belastung der Leichtmetallräder im Fahrbetrieb sind viele Prüfstandsversuche notwendig, um die Einflüsse aller materialseitigen Bestandteile (primär, sekundär und recycelt) und auch der verfahrensseitigen Einflussparameter zur optimalen, ressourcenschonenden Felgenreparatur festzulegen.

Ergebnisse und Diskussion

In Summe wurde nachgewiesen, dass es mit dem TURBU-DRUCK-GIESEN, einem druckbeaufschlagten, turbulenzarmen Gießprozess für Leichtmetall-Legierungen erstmals möglich wird, komplexe Bauteile mit unterschiedlichen Wandstärken produktnah zu gießen. Der Prozess kann mit 100 % Recyclingmaterial und minimalem Ausschuss umgesetzt werden. Der Umweltentlastungseffekt beträgt beim Rohmaterial bis zu - 40 % und beim Energieverbrauch bis zu - 50 %. Die Verkürzung der Prozesskette bei der Nachbehandlung (Zerspanung, Wärmebehandlung) führt zu weiteren Vorteilen. Der Prozess verzichtet auf die Energiebereitstellung durch Gas und unterstützt damit die Decarbonisierung in dieser Branche.

Bei allen Gießversuchen innerhalb des Projekts wurden Leichtmetallräder in unterschiedlichen Ausführungen erzeugt und auf den Prüfständen im direkten Vergleich zum Straßeneinsatz verifiziert. Die auf den Prüfständen erzeugten Testergebnisse wurden anschließend bewertet, sodass nun die Materialspezifikationen und deren Einflussgrößen vorliegen und für den Anwendungsfall TURBU-DRUCK-GIESEN als Serienprozess verwendet werden können. Die unterschiedlichen Gussteile und die damit erzielten Ergebnisse auf den Prüfständen innerhalb des Förderprojektes waren zielführend und zeigten das enorme Potential dieses Verfahrens gerade beim ersten Produktansatz - dem Leichtmetallrad - auf. Dies gilt sowohl für den Einsatz von bis zu 100 % Recyclingmaterial als auch für die Prozessparameter, um auch in der Serienfertigung ein ganzheitliches Optimum umzusetzen. Diese Erkenntnisse sind direkt in die Konstruktion eingeflossen und werden zukünftig in Serienprozessen berücksichtigt.

Ein enormer Vorteil gegenüber dem Niederdruckgießen ist, dass es nun möglich ist, bereits zu Beginn der Wertschöpfungskette die wesentlichen Einflussparameter zu überwachen und gegebenenfalls gegenzusteuern, sodass sich alle bauteilspezifischen Parameter innerhalb ihrer Grenzen bewegen, um Ausschuss zu minimieren.

Nach div. Machbarkeitsstudien, gibt es nun zeitnah erste Fahrzeuge von namhaften Automobilherstellern, die mit Leichtmetallrädern ausgestattet werden, die mit dieser Technologie produziert werden. Aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht sind damit enorme Vorteile verbunden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Zusätzlich zu den direkten Ansprachen von Anwendern in der Automobilindustrie wird der Prozess über soziale Medien national und international bekannt gemacht.

Fazit

Bereits in 2025 und 2026 sollen die ersten Serien umgesetzt werden. Ebenfalls sagen Fahrzeughersteller, dass langfristig Niederdruckguss komplett durch TURBU-DRUCK-GUSS ersetzt werden soll.

Inhalt

1	Kurzfassung des Gesamtumfanges.....	3
2	Angaben zum Projektleiter / Antragsteller.....	3
3	Aktueller Stand Wissens und der Technik	3
4	Umweltrelevanz.....	4
4.1	Beschreibung der Umweltproblematik	4
4.2	Darstellung der umweltrelevanten Ziele des Projektes	5
4.3	Beschreibung der Umweltentlastung, die über die bisherige Praxis hinausgeht	5
4.4	Einfluss des Projektes auf Stoff- und Energieströme sowie deren Bilanzierung.....	5
5	Eigene Vorarbeiten und bisherige Aktivitäten auf dem Gebiet	6
5.1	Zielgruppe der Ergebnisse des Vorhabens.....	7
6	Umsetzung und Vergleich der Einflussfaktoren beim Prozess	7
6.1	Prozessrelevante Materialkennwerte innerhalb der Materialspezifikationen	7
6.2	Grenzen / Einflussfaktoren (Gießen, Prozesszeiten, Wärmemanagement)	10
6.3	Möglichkeiten zur Sicherstellung der vollautom. Qualitätskontrollen	15
7	Erkenntnisse vom Gießen und Einfluss auf die Bauteilprüfung.....	15
7.1	Prüfungen der Aluminiumräder gemäß Prüfvorgaben.....	16
7.2	Zugprobenentnahme zur Bewertung der Werkstoffkennwerte	16
7.3	Einflussfaktoren der Legierungsbestandteile auf Prüfergebnisse.....	17
8	Bewertung der Prüfergebnisse in Bezug auf Aufgabenstellung	17
9	Fortführung und Umweltperspektiven	18
10	Fazit	18

1 Kurzfassung des Gesamtumfanges

Aufgrund der hohen Anforderungen für Räder im Automotive-Bereich (u.a. hinsichtlich Zugfestigkeit oder Dehnung) und die bisherige Herstellung im Niederdruckguss kann in der Räderproduktion kein Recyclingmaterial eingesetzt werden und es wird lediglich max. 30% - 50% Kreislaufmaterial wieder eingesetzt. Da beim Niederdruckguss ausschließlich Späne anfallen, handelt es sich jedoch um minderwertiges Sekundärmaterial, unter anderem aufgrund der großen Oberfläche und der enthaltenen Verunreinigungen. Da durch das TURBU-DRUCK-GIESEN eine veränderte Ausgangssituation vorherrscht und ein konturnahes Gießen mit höherwertigem Sekundärmaterial (Anguss und Überläufe) vorliegt, wurde im Vorhaben der Anteil an Sekundärmaterial deutlich erhöht und auch recyceltes Material eingesetzt. So wurde innerhalb des Vorhabens bis zu 100% recyceltes Material für die Herstellung von Rädern im TURBU-DRUCK-Gussverfahren verwendet.

Um eine optimale ganzheitliche Lösung wirtschaftlich darstellen zu können, wurde die Kombination aus Sekundär- und Recyclingmaterial voll eingesetzt. Da im TURBU-DRUCK-GIESEN die Kombination aus schnellem Gießen in Verbindung mit Gesamtprozesszeit, von der Bereitstellung der Schmelze, bis zum Erreichen der Raumtemperatur mit der dementsprechenden Abkühlrate von entscheidender Wichtigkeit ist, ist eine genaue Prozessüberwachung unbedingt notwendig. So wurde direkt im Prozess nach dem Abschrecken das Gussergebnis über Sensorik auf Qualität geprüft. Diese Art der Qualitätskontrolle zur Ermittlung der Gesamtporosität ist durch genaue Wiegung der Schmelze vor dem Abguss im Vergleich zur Wiegung nach dem Erstarren in Verbindung mit der nachgespeisten Menge bewertbar. Mittels dieser Einzelprozessschritte ist nicht nur die Qualität kontrollierbar, sondern darüber hinaus ist auch noch sofort am Anfang der Wertschöpfungskette prüfbar, wenn sich die Qualität innerhalb der Grenzen verschlechtert hat und es kann gezielt gegengesteuert werden, um erst gar keinen Ausschuss entstehen zu lassen. Auf diese Weise erfolgt die wertvollste Form der Energie- bzw. Ressourcenreduktion. Darüber hinaus kann, solange der Greifer am Roboter das Bauteil lagerichtig festhält, dies für eine optimale Zellennutzung verwendet werden.

Mit dieser verfahrenstechnischen Optimierung und die Kombination von Qualitätskontrollen und Prozessschritten ist es möglich den Ausschuss weiter zu minimieren.

2 Angaben zum Projektleiter / Antragsteller

Herr Bux hat jahrelange Erfahrung in der Entwicklung und Produktion von Leichtmetallrädern und war 10 Jahre Entwicklungs-Ingenieur bei Mercedes im Bereich Räder und Reifen. In dieser Zeit hat er maßgeblich die Hohlspeichentechnologie mit ATS und die Schmiedetechnologie mit Otto Fuchs zur Serienreife gebracht. Bereits vor dieser Tätigkeit im Rahmen seines Studiums entwickelte er als seine Diplomarbeit eine Prüftechnologie für Räder, die mit einem Umweltpreis der Stadt Esslingen gekrönt wurde.

Im Jahr 2007 gründete er die Firma ENTEC-STRACON und entwickelt noch heute Leichtmetallräder für div. OEM und Tier1 Unternehmen. Gerade, verschärft durch WLTP und CO2, ist er als Entwicklungspartner sowohl bei Mercedes als auch bei dessen Radhersteller ein anerkannter Berater von Design bis zur Serienfreigabe. Mit mehr als 1000 Radentwicklungen und dem Einblick in die aktuelle Herstellung von Leichtmetallrädern weltweit, besitzt er ein sehr fachkundiges Wissen sowohl beim klassischen Niederdruckgießen als auch beim Schmieden. TURBU-DRUCK-GIESEN ist hierbei ein konsequentes Resultat einer 25-jährigen Erfahrung in diesem Umfeld.

3 Aktueller Stand Wissens und der Technik

Im Zuge des Klimawandels und der immer schärferen Grenzwerte im PKW Bereich sind die Hersteller angetan die entstehenden Emissionen immer weiter zu reduzieren. Dies kann man

aerodynamisch und / oder durch Effizienzsteigerungen der Motoren in Verbindung mit Gewichtsreduktion am gesamten Fahrzeug erreichen. Ein Bauteil, das sich in den letzten Jahrzehnten kaum verändert hat sind die Aluleichtmetallräder. In der Vergangenheit hat eine herkömmliches 18“ Aluminium-Leichtmetallrad maximal rund 12 kg mit einer Radlast von 690 kg gewogen. Heutige ist es notwendig das gleiche 18“ Alurad aufgrund von immer größeren PKWs sowohl bei den Verbrennungsmotoren als auch bei der schweren Elektromobilität (Batterie + Reichweite) in Verbindung mit den Aerodynamikansprüchen Radlasten von über 800 kg bis 1000 kg auszuhalten. Diese Anforderungen erhöhen bei gleichem Herstellungsverfahren das Radgewicht auf teilweise weit über 14,5 kg. Dabei wird versucht, über beispielsweise Kunststoffeinsätze dieses Mehrgewicht zu kompensieren und dennoch die Aerodynamik zu halten. Eine weitere Kompensationsmöglichkeit dieser Mehrgewichte ist das nachträgliche Auswalzen (Flowforming), dass durch die damit verbundene Festigkeitssteigerung eine Reduzierung der Querschnitte in Form weiterer mechanischer Bearbeitungsschritte ermöglicht. Diese enormen Aufwendungen bei Herstellung oder Bearbeitung stehen in keinem Verhältnis zum Nutzen bei Verbrauch und CO₂-Ausstoß.

Die Grundlage dieses Entwicklungsstilstands liegt im Herstellungsprozess. Aluminiumräder werden im Niederdruckgussverfahren hergestellt, da sich kein anderes Verfahren für die komplexen Strukturen mit extrem unterschiedlichen Wandstärken eignet. Die Mindestwandstärke bei diesem Verfahren liegt bei rund 6mm, da bei geringeren Wandstärken die Schmelze frühzeitig erstarren würde und somit kein gleichmäßiges Gießergebnis entsteht. Um aus dem Gussrohling im Niederdruckgussverfahren ein fertiges Aluminiumleichtmetallrad zu bekommen, muss dieses Bauteil sehr aufwendig mechanisch bearbeitet werden. Darüber hinaus ist es notwendig das vorbereitete Rad durch eine T6 Wärmebehandlung zu vergüten, um überhaupt die Festigkeitsanforderungen erfüllen zu können. Diese einzelnen Teilschritte sind enorm zeit-, kosten- und energieintensiv.

4 Umweltrelevanz

4.1 Beschreibung der Umweltproblematik

Aufgrund der hohen Anforderungen für Räder im Automotive-Bereich (u.a. hinsichtlich Zugfestigkeit oder Dehnung) und die bisherige Herstellung im Niederdruckguss kann in der Räderproduktion kein Recyclingmaterial eingesetzt werden und es wird lediglich max. 30% - 50% Kreislaufmaterial wieder eingesetzt. Da beim Niederdruckguss ausschließlich Späne anfallen, handelt es sich jedoch um minderwertiges Sekundärmaterial, unter anderem aufgrund der großen Oberfläche und der enthaltenen Verunreinigungen.

Da durch das TURBU-DRUCK-GIESSEN eine veränderte Ausgangssituation vorherrscht und ein konturnahes Gießen mit höherwertigem Sekundärmaterial (Anguss und Überläufe) vorliegt, wurde im Vorhaben der Anteil an Sekundärmaterial deutlich erhöht und auch recyceltes Material eingesetzt.

So wurde innerhalb des Vorhabens bis zu 100% recyceltes Material für die Herstellung von Rädern im TURBU-DRUCK-Gussverfahren verwendet. Dadurch ergibt sich eine geänderte Ausgangssituation, da einerseits höherwertiges Sekundäraluminium vorliegt und andererseits das Verfahren an sich in Kombination mit der zu entwickelnden „Rezeptur“ auch den Einsatz von Recyclingmaterial ermöglicht.

Grund hierfür ist die höhere Festigkeit und Dehnung, die beim TURBU-DRUCK-GIESSEN in Kombination mit der schnellen Erstarrung und dem anschließenden Abschrecken erzielt werden kann. Die durch das Verfahren erzielten Werte sind so viel besser, sodass auch „minderwertigeres“ Recyclingmaterial verwendet werden soll.

4.2 Darstellung der umweltrelevanten Ziele des Projektes

Mit den aus dem Projekt entstandenen Ergebnissen rückt der Einsatz von Recyclingmaterial in den Vordergrund und die Gießzelle wird so erweitert und optimiert, dass umweltschonender Räder produziert werden können.

- Effizienter Materialeinsatz von mehr als 30% - 50% Kreislaufmaterial
- Effizienter Materialeinsatz von bis zu 100% Recyclingmaterial
- Effizientere Herstellung durch geringeren Energieeinsatz (-50%) innerhalb der Produktion
- Fehleridentifikation direkt am Anfang der Wertschöpfungskette durch effizientes Erkennen von Ausschuss direkt nach dem Gießen, dadurch ist eine wirtschaftliche Produktion darstellbar.
- Effiziente Überwachung / Steuerung im Sinne von Ausschussvermeidung durch Prozesskorrekturen bereits für den Folgezyklus

In Summe wollen wir die Nachteile der höheren Anschaffungskosten solcher Anlagen für die Radhersteller durch Prozessvorteile derart attraktiveren, dass sich die Anlage schnell amortisiert. Wir sind der festen Überzeugung, dass allein die gewaltigen ökologischen Vorteile nur dann einen Investor überzeugen, wenn die wirtschaftlichen Vorteile für die Unternehmen genauso sichtbar und lukrativ sind.

4.3 Beschreibung der Umweltentlastung, die über die bisherige Praxis hinausgeht

Wie bereits beschrieben sind momentan im Niederdruckgussverfahren von Seiten der Automobilhersteller lediglich 30% (max. 50%) Kreislaufmaterial zugelassen, da die Qualität im Niederdruckgussverfahren ansonsten zu inkonstant und unbefriedigend ist, sobald der Anteil erhöht wird. Immer wieder versuchen Radhersteller im Niederdruckgussverfahren diesen Prozentsatz zu erhöhen, dies scheitert jedoch oftmals an der Streuung der Prüfergebnisse, da in Verbindung mit der Wärmebehandlung eine sehr unterschiedliche Veredelung stattfindet. In Verbindung mit TURBU-DRUCK-GIESSEN und dem Entfall der unnötigen Veredelung, besteht nun die Möglichkeit den Anteil von Kreislauf- aber auch Recyclingmaterial deutlich zu steigern. Die im Projekt erzielten Ergebnisse gehen damit weit über die bisher übliche Praxis hinaus und helfen damit auch gesetzliche Vorgaben einzuhalten und zu übertreffen.

4.4 Einfluss des Projektes auf Stoff- und Energieströme sowie deren Bilanzierung

Nachfolgende Tabelle verdeutlicht die Umweltvorteile durch den Einsatz von TURBU-DRUCK-GIESSEN bereits bei der Herstellung der Räder:

	Niederdruck-Kokillenguss	TURBU-DRUCK-GIESSEN
Ressourceneinsatz Aluminium	100%	ca. -15 bis -50%
Energieeinsatz und CO2 Reduzierung	100 %	ca. -50%
Abgussgewicht	25,7 kg	23,5 kg (-2,2 kg)
Rohteilgewicht (nach Angussentfernung)	25,5 kg	19,0 kg (-4,5 kg)
Zerspanung	ca. 7,8 kg	ca. 6,0 kg (-1,8 kg)
Fertigteilgewicht	17,5 kg	13,0 kg (-4,5 kg)

Durch die Steigerung des Einsatzes von Sekundärmaterial und der Nutzung von Recyclingmaterial kann nun darüber hinaus das bisher eingesetzte Primäraluminium (>70%) substituiert werden. Primäraluminium wird üblicherweise von großen Aufschmelzern / Aufbereitungsunternehmen durchgeführt. Aufgrund des hohen Energiebedarfs erfolgt dies in der Regel im Ausland. Dadurch fallen mit Blick auf die komplette Prozesskette auch sehr hohe Transportkosten an. Durch Senkung bzw. Verzicht auf Primäraluminium entfallen diese hohen Energie- und Transportaufwände. Denn zukünftig soll jeder Gießer (nach entsprechendem Rezept) Räder produzieren können, welche einen hohen Anteil an Sekundär- aber auch Recyclingmaterial haben. Der Bezug des Recyclingmaterials (alte Räder) kann dann ohne größere Transportwege dezentral (bspw. über lokale Schrotthändler) erfolgen.

Auch unter ökonomischen Gesichtspunkten bringt der Einsatz von Sekundär- bzw. Recyclingmaterial große Vorteile. Während Primäraluminium in der Anschaffung aktuell bei ca. 4.000 €/t liegt, ist Sekundärmaterial im Vergleich deutlich günstiger. Bei minderwertiger Qualität (Späne) liegt der Preis mit 2000 €/t noch höher, wird jedoch hochwertiges Sekundärmaterial verwendet (Anguss oder Überläufe), sind die Kosten mit ca. 500 €/t deutlich geringer. Das lokal bezogene Recyclingmaterial (alte Räder) liegt bei ca. 1.750 €/t. Diese Gegenüberstellungen verdeutlichen die ökonomischen Vorteile bei einem hohen Einsatz von Sekundär- und Recyclingmaterial.

5 Eigene Vorarbeiten und bisherige Aktivitäten auf dem Gebiet

Zusammen mit Prof. Dr. Klein, Gießereiexperte mit mehr als 50 Jahren Erfahrung in seinem Gebiet, forschte die ENTEC-STRACON GMBH im Jahr 2017 an dem neuen Turbulenzarmen Gießverfahren. Die erste grundlegende Machbarkeitsstudie der neuen Technologie konnte bereits ein Jahr später belegt werden und wurde daraufhin zum Patent angemeldet. Mehrere Patente folgten zur Anmeldung und inzwischen sind weltweit diverse Ansprüche erteilt oder veröffentlicht oder befinden sich noch vor der Offenlegung. Auf Basis der Technologie sind inzwischen mehrere Machbarkeitsstudien erfolgreich umgesetzt worden und sowohl national als auch international ist die Technologie als Mehrwert gegenüber des Niederdruckgießens anerkannt.

Bereits bei den Entwicklungsaktivitäten innerhalb des ersten Förderprojekts (Aktenzeichen 35798/01) der Verfahrensentwicklung haben ebenfalls in 2020 zum Erfolg geführt und es ermöglicht, die ersten Ansätze weiter zu entwickeln und durch konsequente Optimierung auf Basis von Simulationen und Versuchsreihen die Gießqualität zu verbessern. In Summe wurden viele Einzelspezifikationen festgelegt und erforscht mit dem Ziel schnellstmöglich eine Serientauglichkeit erreichen zu können.

In der zweiten Phase wurde gemeinsam mit FRECH als Maschinenhersteller innerhalb des Förderprojekts (Aktenzeichen 37339/01) ab Mitte 2021 eine Druckgussmaschine für das Verfahren optimiert und in 2022 aufgebaut. Mit dieser Anlage im Technikum der ENTEC in Aalen ist es nun möglich die Serienreife und den Ausbau weiter voranzutreiben, um eine optimale und hocheffiziente Gießzelle den Radherstellern anbieten zu können.

Um dies nachhaltig zu belegen, wurden die Verfahren in Bezug auf deren Energiebilanz genau aufgenommen und mit den Produktionsdaten beim Radhersteller BBS gegenübergestellt, mit folgenden vorliegenden Ergebnissen:

NIEDERDRUCK-KOKILLENGIESSEN (ND)		HERSTELLUNG [®]	TURBU-DRUCK-GIESSEN (TD)	
Merkmale	Strom / Gas [kWh/Rad]		Merkmale	Strom / Gas [kWh/Rad]
> T = 750°C	> 6,96 / 38,96	Aufschmelzen[®] (→ Primär- und Sekundärmaterial) (→ Kreislauf + Menge)	> T = 680°C	> 6,59 / 30,17
> Masse = 100%	> Summe → Σ 45,92 (40,3%)		> Masse = 88%	> Summe → Σ 39,48 (-14%)
> WKZ = 500°C	> 14,12 / --	Gießen[®] (Einsatz → Menge + Temperatur) (Thermomedium → Wärmekapazität)	> WKZ = 180°C	> 8,66 / --
> Luftkühlung	> Summe → Σ 14,12 (12,4%)		> Wasser / Öl	> Summe → Σ 9,48 (-30%)
> Rad = 25kg	> 8,32 / 6,58	Flowforming (Erwärmung → Gewicht + Umsetzung)	> Felge = 7,5kg	> -- / --
> Ofenerwärmung	> Summe → Σ 14,90 (13,1%)		> Induktionserwärm.	> Summe → Σ --
> notwendig	> 5,45 / 20,82	Wärmebehandlung (T6 → Lösungsglühn + Ausscheidungshärten)	> nicht notwendig	> -- / --
> verursacht Verzug	> Summe → Σ 26,27 (23,1%)		> somit wenig Verzug	> Summe → Σ --
> Beflammen	> -- / 1,83	Werkzeugaufheizung[®] (Verfahren + Temperatur)	> Wasser / Öl	> 0,12 / --
> inkl. 20% Konvektion	> Summe → Σ 1,83 (1,6%)		> inkl. 5% Konvektion	> Summe → Σ 0,12 (-93%)
> Bearbeitung	> 10,87 / --	Mechanische Fertigung[®] (Aufmaße → Verzug + Entgratungsumfang)	> Bearbeitung (59%)	> 7,52 / --
> Masse = 100%	> Summe → Σ 10,87 (9,5%)		> teilw. Fertiggießen	> Summe → Σ 7,52 (-30%)
Gesamt → Σ 113,91 kWh/Rad (100%)			Gesamt → Σ 56,96 kWh/Rad (-50%)	

Abbildung 1: Gegenüberstellung Niederdruck-Kokillengießen und TURBU-DRUCK-GIESSEN

In der Gegenüberstellung ist zu erkennen, dass bei der Herstellung von Rädern im TURBU-DRUCK-Gussverfahren nur 50% Energie notwendig ist, ebenso kann auf Gas komplett verzichtet werden.

5.1 Zielgruppe der Ergebnisse des Vorhabens

Durch die Projektergebnisse und den gesteigerten Anteil an Sekundär- sowie Recyclingmaterial werden die Umweltvorteile des TURBU-DRUCK-GUSS nochmals deutlich gesteigert.

In der Automotive-Branche besteht bereits großes Interesse an der Technologie, durch Herrn Bux als anerkannter Berater der Räderentwicklung bei Mercedes und weiteren Radherstellern sind hier bereits sehr gute Kontakte vorhanden, welche vertieft und ausgebaut werden sollen.

Aktuell laufen konkrete Projektgespräche neben Mercedes, auch bei BMW, Porsche, Audi, Volkswagen, der PSA-Gruppe und Volvo.

6 Umsetzung und Vergleich der Einflussfaktoren beim Prozess

Innerhalb des Projekts wurden zunächst Gruppen definiert, die in Absprache mit Materialexperten und Prozessexperten festgelegt wurden.

Hierzu wurden alle Experten seitens Anlagenhersteller Fa. Frech (Schorndorf), Prozesseigner Fa. Entec (Aalen), Softwareentwickler Fa. DE-computing (Tamm) und Aluminiumhersteller Fa. Rheinfelden (Rheinfelden) befragt. Anschließend wurden die vorliegenden Ergebnisse aus den Vorversuchen bewertet. Hierbei kristallisierten sich folgende Haupteinflussfaktoren heraus, die optimal funktionieren müssen um ein zielführendes Gießergebnis zu erzielen.

Diese Haupteinflussfaktoren sind:

- 1) Prozessrelevante Materialkennwerte innerhalb der Materialspezifikationen
- 2) Grenzen / Einflussfaktoren (Gießprofil, Prozesszeiten, Wärmemanagement)
- 3) Möglichkeiten zur Sicherstellung der vollautomatischen Qualitätskontrollen

6.1 Prozessrelevante Materialkennwerte innerhalb der Materialspezifikationen

Aus den Erfahrungen der vorhergehenden Abgussversuchen mit anschließendem Testen der Bauteile auf den Prüfständen wurde festgestellt, dass die Aluminiumlegierung AlSi10MnMg die zielführendste Legierung für unseren Druckgussprozess darstellt.

Beim Aluminiumhersteller Rheinfelden wird diese mit dem Handelsnamen Silafont 36 angeboten.

Chemische Zusammensetzung der Silafont-36, AlSi10MnMg

[%]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr	P	andere gesamt
min.	9,5			0,5	0,1		0,04	0,010		
max.	11,5	0,15	0,03	0,8	0,5	0,07	0,15	0,025	0,001	0,10

Abbildung 2: Auszug aus der chemischen Spezifikation von AlSi10MnMg (SF36), Quelle: Rheinfelden

Bekannt ist, dass für das Belastungsprofil eines Aluminiumrades sowohl die Dehnung als auch die Festigkeit die entscheidenden Größen darstellen.

Für das TURBU-DRUCK-GIESSVERFAHREN sind hierbei Si (Silizium), Fe (Eisen), Cu (Kupfer), Mn (Mangan) und Mg (Magnesium) die Einflussfaktoren für die Betriebsfestigkeit. Einerseits ist es notwendig die Einflussfaktoren die hierbei den größten Stellhebel verursachen herauszufinden, andererseits sollte die Industrialisierung nicht zu sehr eingeschränkt werden, da die Materialtoleranzen sowohl bei der Herstellung, als auch bei der Aufschmelzung durch Abbrand schwanken können.

Veredelungsmöglichkeiten über Sr (Strontium) sind ebenfalls nicht zu vernachlässigen, jedoch können diese durch den schnellen Abbrand als ständige Qualitätssicherstellung jederzeit nachgelegt werden.

Dennoch ist es zielführend zunächst auf die Expertenbewertung zurückzugreifen. Aus diesem Grunde wurden zunächst diese detailliert gegenübergestellt:

- Si (Silizium) → min. 9,5% - max. 11,5%

So ermöglicht It. Rheinfelden der Silizium-Gehalt um 10,5 % ein ausgezeichnetes Formfüllungsvermögen, so dass die Legierung gut gießbar ist. Jedoch hat sich bei Aluminiumrädern in Verbindung mit unserem Verfahren gezeigt, dass ein niedrigerer Wert diverse Vorteile nicht nur für die Betriebsfestigkeit, sondern auch für die Bearbeitung verbessert.

- Fe (Eisen) → max. 0,15%

Da bei Leichtmetallrädern hohe Verformungswerte gefordert werden, sollte der Eisen-Gehalt so niedrig wie möglich gehalten, um den Anteil der im Gefüge auftretenden plattenförmigen Al-FeSi-Phasen möglichst klein zu halten. Diese Phasen sind wesentliche Ursache für niedrige Festigkeits- und Dehnungswerte, da sie aufgrund ihrer Morphologie bei der verformenden und besonders bei dynamischer Belastung als Ausgangsstelle für die Bildung von Rissen wirken.

Dennoch gibt es den Zielkonflikt, dass beim Einsatz von Recyclingmaterial durch Vermischung der schwer trennbare Eisenanteil steigt, sodass wir bei der Bewertung der Einflussfaktoren hier trotz der Empfehlung des Aluminiumherstellers auf die obere Grenze gegangen sind.

- Cu (Kupfer) → max. 0,03%

Bei Leichtmetallrädern ist wie eingangs beschrieben die Festigkeit ein wichtiger Index für die ganzheitliche Auslegung des Rades, da Querschnitte reduziert werden können, wenn es die Festigkeit zulässt und somit ein Rad im gesamten ein leichteres Ergebnis bringt. Dennoch haben Voruntersuchungen gezeigt, dass der Kupferanteil sich sehr schädlich auf die Korrosionseigenschaften auswirkt und da ein wichtiger Anteil bei der Freiprüfung eines Rades die Korrosionsbeständigkeit (CASS-Test) darstellt, sollte dieser unbedingt eingehalten werden.

- Mn (Mangan) → min. 0,5% - max. 0,8%

Aus der Literatur ist bekannt, dass in einer AlSiMg-Legierung Mangan die Dehnung ab einem Gehalt von 0,2 % reduzieren soll. Aus diesem Grund wird Mangan als Zugabe zu einer Druckgusslegierung als Ersatz für oder in Kombination mit Eisen nicht empfohlen. Dennoch zur Verringerung der Klebeigung und zur Erhöhung der Gestaltfestigkeit der Gussstücke wurde der Mangan-Gehalt gemäß Legierungsspezifikation auf 0,5% bis 0,6% angehoben. Mangan hat bezüglich der Herabsetzung der Klebeigung gegenüber der Druckgussform die gleiche Wirkung wie Eisen. Im Gegensatz zum Legierungselement Eisen sind jedoch die sich während der Erstarrung bildenden Ausscheidungen globulitisch und nicht nadelig.

- Mg (Magnesium) → min. 0,1% - max. 0,5%

Gerade bei dieser AlSiMg-Druckguss-Legierung kann mit dem Magnesium-Gehalt die gewünschte Duktilität und Festigkeit an die Bauteilanforderung angepasst werden, besonders wenn die Gussstücke wärmebehandelt werden. Bei diesen Optimierungen entstanden für Silafont-36 fünf Legierungsvarianten:

- V1 → 0,13% – 0,19% Mg: Für crashrelevante Bauteile und Verbindungen wie Bördeln
- V2 → 0,18% – 0,28% Mg: Für gestaltsfeste und doch crashbare Sicherheitsbauteile mit Dauerschwingbelastung.
- V3 → 0,24% – 0,35% Mg: Für Bauteile mit hoher Betriebsfestigkeit gegen Schlagbeanspruchung.
- V4 → 0,28% – 0,35% Mg: Für wärmebehandelte Bauteile mit Luftabschreckung nach dem Lösungsglühen; auch für Anwendung T5
- V5 → 0,35% – 0,45% Mg: Für festigkeitsbetonte Bauteile im Gusszustand oder nach O, T4, T6

Auch hier im Hinblick auf das Anforderungsprofil und die bereits im Vorfeld gefahrenen Lastkollektive ist klar zu erkennen, dass Bereiche unter 0,2% und über 0,35% Magnesium für Räder im TURBU-DRUCK-GUSS nicht zielführend sind.

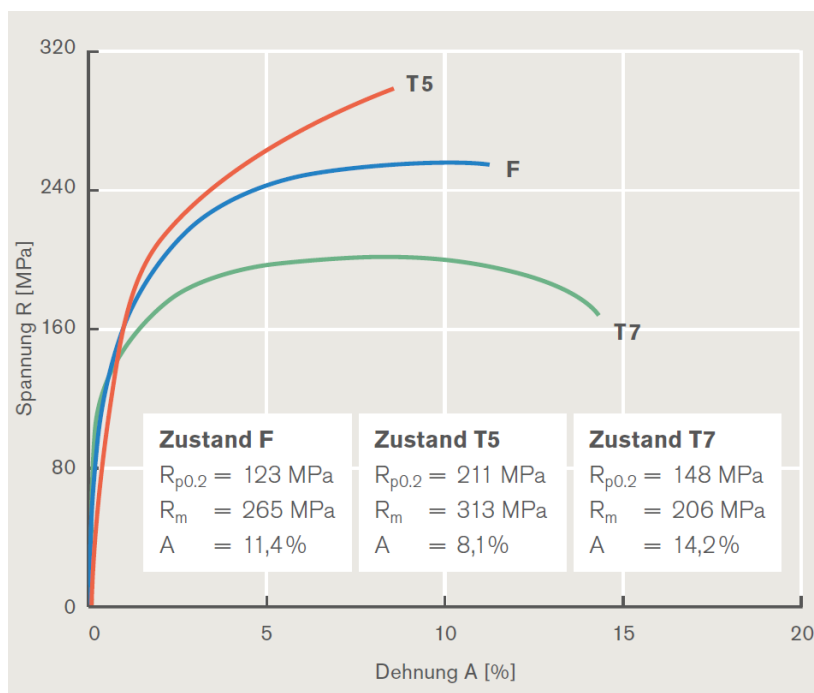


Abbildung 3: Spannungs-Dehnungs-Kurve von Silafont-36, AlSi10MnMg, Quelle: Rheinfelden

Des Weiteren sind die „ANDERE GESAMT“ mit 0,1% nicht zu vernachlässigen. D. h. so sind Spurenelemente und Verunreinigungen hier ebenfalls zu bewerten. Vorteil am TURBU-DRUCK-GIESEN ist, dass kein Lösungsglügen (T6) realisiert wird und somit diese Grenzbeurteilungen verhältnismäßig geringer ausfallen sollte.

Dennoch findet beim Lackieren des Aluminiumleichtmetallrades ein T5 (Warmauslagerungsprozess) statt. Dieser Prozess ermöglicht zunächst eine Festigkeitszunahme jedoch bei zu langer Zugabe von Wärme ein T7 (Überalterungsprozess) statt. Diese Grenzen sind zu beachten und zu berücksichtigen.

6.2 Grenzen / Einflussfaktoren (Gießen, Prozesszeiten, Wärmemanagement)

Beim TURBU-DRUCK-GIESEN ist der größte Einflussfaktor auf Festigkeit die Prozesszeit. Diese Zeit vom Zeitpunkt der Bereitstellung der Schmelze bis zum Erreichen einer Gussteiltemperatur unter 130°C, da hier keine Gefügeausbildung mehr stattfindet.

Darüber hinaus sind wie im letzten Teil beschrieben, die Einhaltung der festgelegten Toleranzen der Legierungsbestandteile und die der Schmelzequalität. So ist bis zur Bereitstellung der Schmelze der Anteil an Oxiden ein wichtiger Bestandteil für Festigkeit und Streuung, ebenso die in der Schmelze befindlichen Verunreinigungen, dem entsprechend ist diese Gemäß den Prozessvorgaben unbedingt einzuhalten und auch in genau beschriebenen Zeiten durch Spektralanalyse zu kontrollieren.

Hier ein Auszug aus der Spektralanalyse vor dem Vergießen der Legierung in unserem Technikum:

	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %
↓ x ↑	9.70	0.109	0.021	0.556	0.249	0.0015	0.0028	0.0079
	Ti %	Ag %	B %	Ba %	Be %	Bi %	Ca %	Cd %
↓ x ↑	0.054	<0.0001	0.0005	<0.0001	<0.0000	<0.0010	0.0002	<0.0001
	Ce %	Co %	Ga %	In %	Li %	Na %	Pb %	Sb %
↓ x ↑	<0.0015	<0.0005	0.0090	<0.0003	<0.0001	0.0003	<0.0005	<0.0020
	Sn %	Sr %	V %	Zr %	Hg %	Al %		
↓ x ↑	<0.0010	0.0046	0.0084	0.0065	<0.0020	89.27		

Abbildung 4: Spektralanalyse der Legierungsbestandteile von AlSi10MnMg, Quelle: ENTEC-STRACON

In Summe ist die festgelegte Reinigung durch Impeller, die Laufzeit des Impellers, die Ruhezeit vor dem Vergießen und bis zum Absaugen der in der Pfanne befindlichen Schmelze einzuhalten. Je genauer dieser Prozessteil der Bereitstellung der Schmelze gleichbleibend eingehalten wird, um so weniger entstehen Ablagerungen und Entmischungen. Ebenso werden erst gar keine Oxide aus einer verunreinigten Schmelze in das Bauteil transportiert und verursachen somit auch keine Streuungen während der Bauteilerprobung.

Wenn wir die Prozesszeit nun genauer betrachten, so beginnt diese mit der Entnahme aus der Schmelzpfanne über die Dosierglocke:



Abbildung 5: Entnahme der Schmelze über eine Dosierglocke, Quelle: ENTEC-STRACON

Ab diesem Zeitpunkt können Einflussfaktoren das Gießergebnis beeinflussen. Temperatur / Druck / Kontakt mit Sauerstoff, etc. sind hierbei wesentliche Faktoren für das Gießergebnis.

Nachdem die exakte Schmelzmenge mit der Dosierglocke zur Gießkammer transportiert wurde, beginnt der eigentliche Gießprozess und somit auch die Prozesszeit. D. h. sobald die Schmelze in die Gießkammer dosiert wird können die Einflussfaktoren ebenfalls das Gießergebnis beeinflussen:



Abbildung 6: Dosieren der Schmelze in die Gießkammer, Quelle: ENTEC-STRACON

Der Startpunkt für die Prozesszeit ist der Moment sobald der Stößel an der Dosierglocke gezogen wird und die Schmelze in die Gießkammer dosiert wird. Wie beschrieben ist diese Prozesszeit relevant für die Kornbildung und schlussendlich auch für die Bauteilfestigkeit und die Dehnung.

Anschließend nach dem Dosieren erfolgt der Gießprozess bestehend aus der 1. Phase (langsame Füllung von ca. 50% bis ca. 100%) und der 2. Phase (Formfüllung) gemäß Profileinstellung:

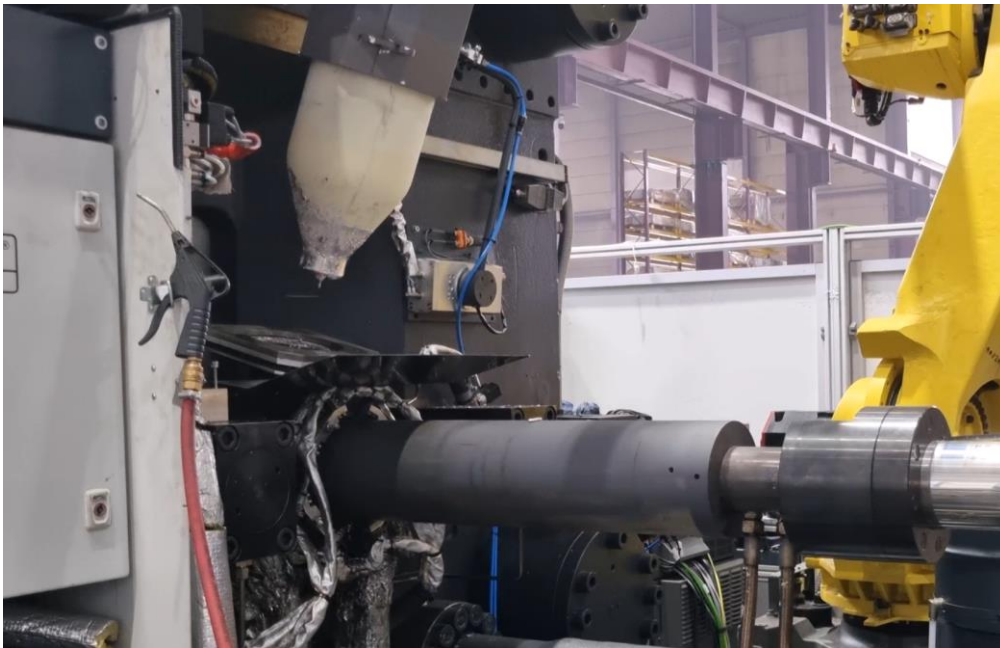


Abbildung 7: Druckgussprozess (1. Phase / 2. Phase), Quelle: ENTEC-STRACON

Sobald die Schmelze innerhalb der Kavität erstarrt ist, öffnet die Gießmaschine die Form und ein Roboter muss schnellstmöglich das Gussteil einnehmen:

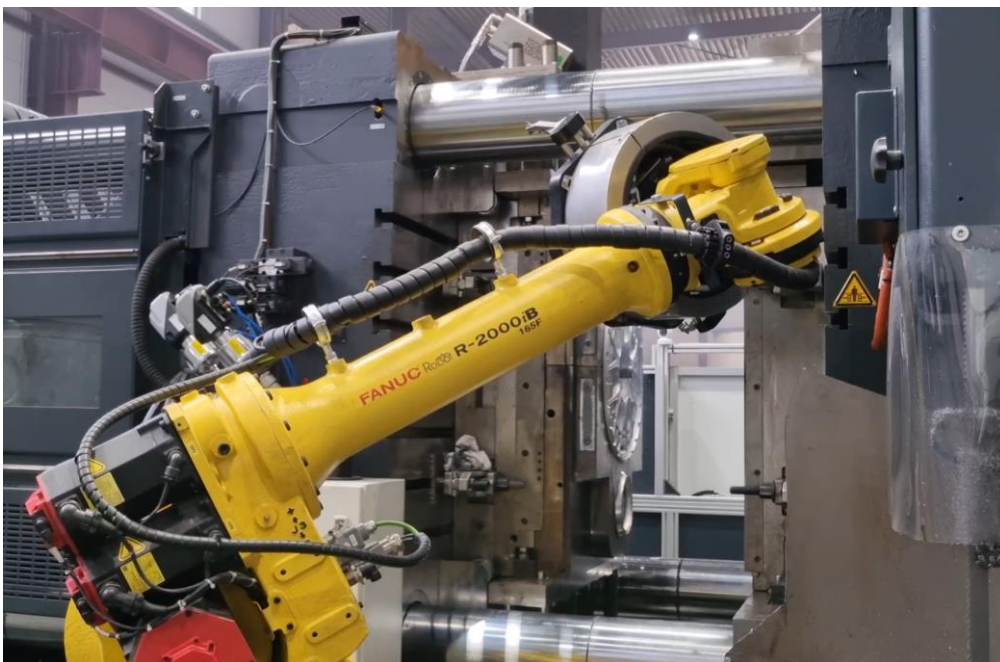


Abbildung 8: Öffnen der Beweglichen Formhälfte zur Gussteilentnahme, Quelle: ENTEC-STRACON

Auch hier gilt: Je schneller desto geringer die Gefügeausbildung (Kornwachstum).

Somit ist das Ziel das Gussteil schnellstmöglich zu Greifen und in ein Abschreckbecken zu transportieren:



Abbildung 9: Entnahme des Gussteils mittels Robotergreifer, Quelle: ENTEC-STRACON

Die im Wasserbecken erreichbare Abschreckrate ist ebenfalls ein wichtiger Stellhebel für die Bauteilfestigkeit:



Abbildung 10: Entnahme des Gussteils mittels Robotergreifer, Quelle: ENTEC-STRACON

Erst nach dem Erreichen einer Bauteiltemperatur unter 100°C ist sichergestellt, dass die Kornbildung und die Materialeigenschaften eingefroren sind. Ab diesem Zeitpunkt endet die Prozesszeit und ist dementsprechend zu dokumentieren.

Im nächsten Schritt wir das Gussteil gewogen und vermessen:

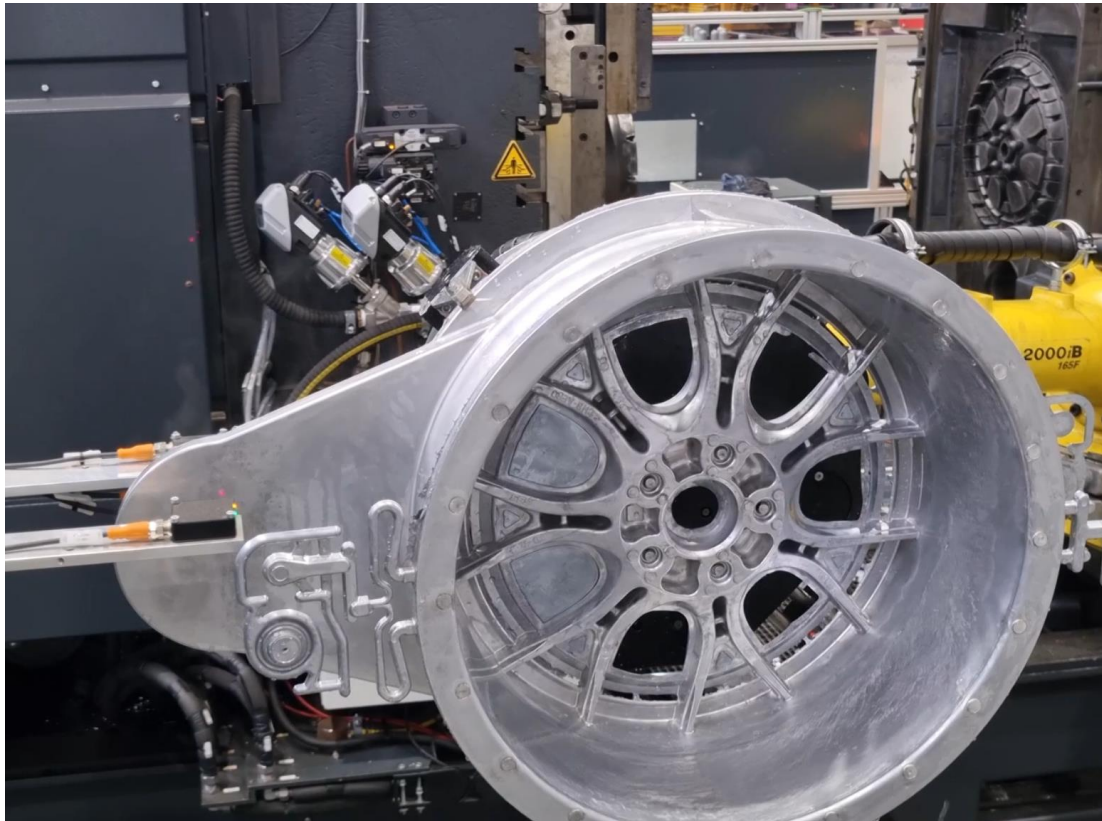


Abbildung 11: Vermessung des Gussteils, Quelle: ENTEC-STRACON

Mit diesen Auswertungen schließt sich der Kreis und es ist möglich Rückschlüsse auf Gussteilqualität (durch Nachdruckweg, aus Druckdiagramm und Pressrestdicke) im Verhältnis zum Gießgewicht auswerten zu können.

Neben dem Gießprozess ist auch das Wärmemanagement nicht nur für die Abschreckrate (Wassertemperatur und Anströmung), sondern auch die Oberflächentemperatur des Werkzeuges maßgeblich und muss vor dem Abgießen kontrolliert und vor allem dokumentiert werden:

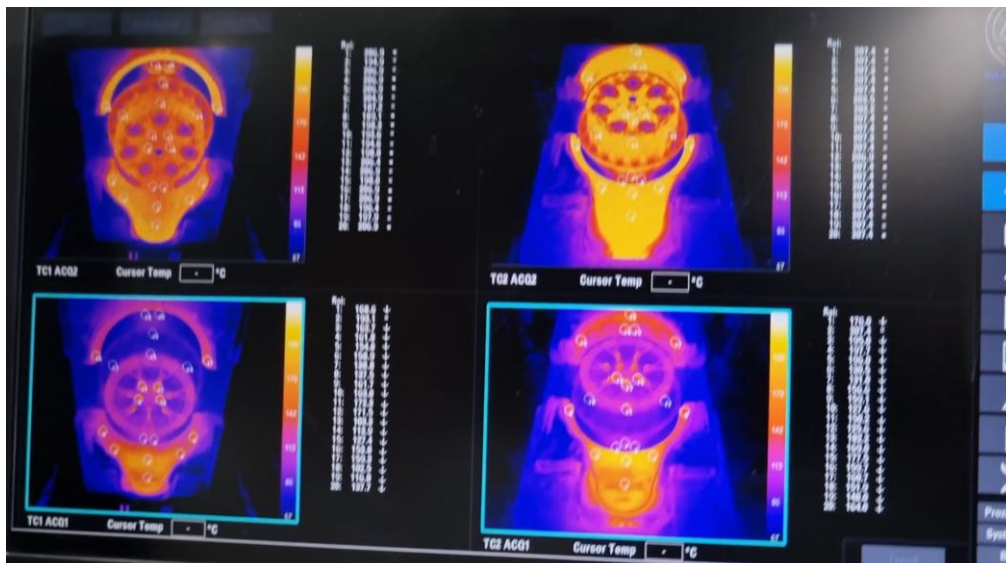


Abbildung 12: Wärmebildauswertung beim TURBU-DRUCK-GIESSEN, Quelle: ENTEC-STRACON

Über sogenannte ROI's werden die festigkeitsrelevanten Bereiche festgelegt und nur wenn die Oberflächentemperatur der vorgegebenen Temperatur entspricht, wird der nächste Abguss gestartet.

6.3 Möglichkeiten zur Sicherstellung der vollautom. Qualitätskontrollen

Zur Industrialisierung bzw. Überwachung der Wiederholbarkeit ist ein ganzheitliches Qualitätssystem notwendig. Diese Anlagensteuerung bestehend aus einer Master-SPS und einem Hochleistungsrechner hat die Aufgaben alle Prozessparameter in der richtigen Abtakte zu dokumentieren und zu visualisieren, wie verändern sich die Parameter beim jedem weiteren Abguss gegenüber den vorher festgelegten Grenzwerten.

In Summe kommen bei einem Abguss schnell mal 20.000 Einzelparameter zusammen und hierbei ist es von entscheidender Wichtigkeit, Trends bereits vor Erreichen der Grenzwerte zu erkennen und Gegenmaßnahmen zu ergreifen um möglichst keinen Ausschuss erzeugen zu müssen.

Hierzu haben wir eine Software mit der Fa. DE computing entwickelt, die uns diese Trends darstellt und uns die Möglichkeit gibt, alles zu jeder Zeit bewerten zu können.

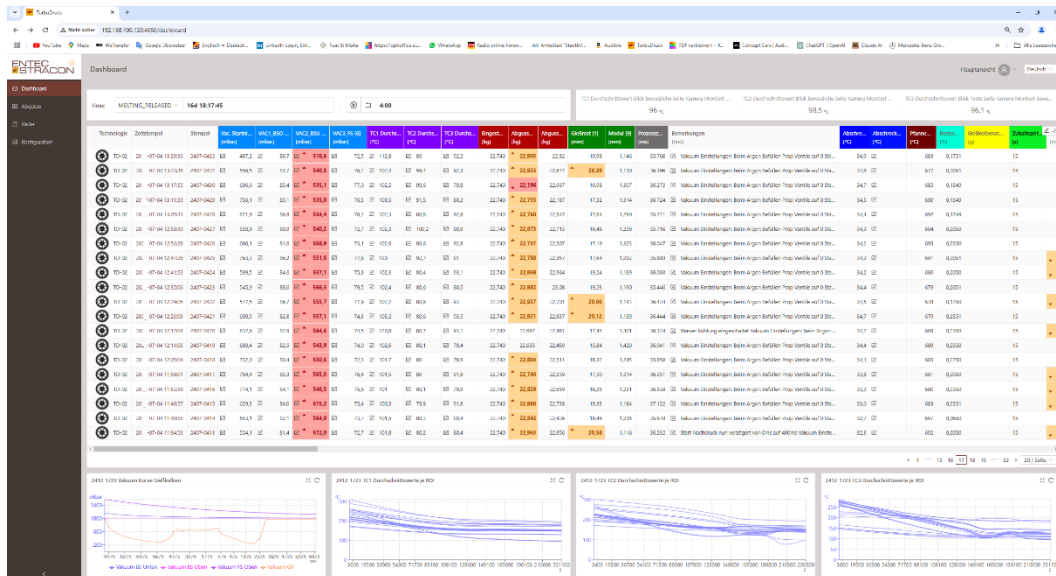


Abbildung 13: Qualitätstabelle beim TURBU-DRUCK-GIESSEN, Quelle: ENTEC-STRACON

7 Erkenntnisse vom Gießen und Einfluss auf die Bauteilprüfung

Nach Festlegung der Legierungsbestandteile in Verbindung mit der Gießparameter und der Temperaturen während des Gießens bei der Formel Schmelze, auf der Formoberfläche wurden dann in mehreren Schleifen Gussteile erzeugt und anschließend bearbeitet und lackiert:



Abbildung 14: Radproduktion nach TURBU-DRUCK-GUSS-Vorgaben, Quelle: ENTEC-STRACON

7.1 Prüfungen der Aluminiumräder gemäß Prüfvorgaben

In der Räderbranche gibt es auf Basis der Anforderungen im Straßenbetrieb ein Prüfablauf indem diverse Anforderungen abgeprüft werden. D. h. die Aluminiumräder werden auf Prüfständen so abgeprüft, dass ein Belastungskollektiv ähnlich einer Straßenbelastung realisiert werden kann:



Abbildung 15-17: Radprüfung gemäß KBA-Vorgaben (Richtlinien einer Radprüfung, Quelle: ENTEC-STRACON)

7.2 Zugprobenentnahme zur Bewertung der Werkstoffkennwerte

Anschließend wurden noch Zugproben aus den Bauteilen entnommen und durch Zugversuche auf Ihre Festigkeit und Dehnung untersucht:

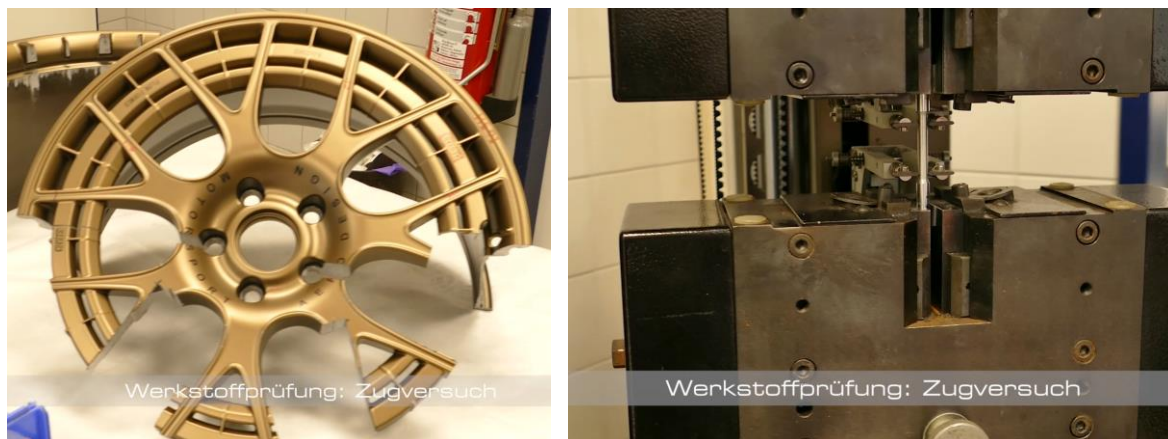


Abbildung 18 und 19: Zugprobenentnahme und Prüfmaschine, Quelle: ENTEC-STRACON

Gerade bei den Zugproben sind die Einflüsse aus dem Herstellungsprozess in Verbindung mit den Legierungsbestandteilen zu erkennen:

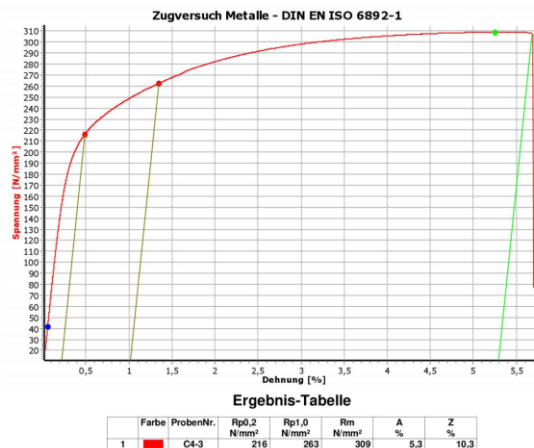


Abbildung 20: Spannungs- Dehnungsdiagramm, Quelle: PWT - Prüf und Werkstofftechnik GmbH

7.3 Einflussfaktoren der Legierungsbestandteile auf Prüfergebnisse

Des Weiteren ist auch auf den Prüfständen die Einflussgrößen der Legierungsbestandteile direkt wieder zu erkennen, hier am Beispiel einer Variante bei Biegeumlauf, bei dem ein Aluminiumrad mit 75% und mit 100% Lastkollektiv geprüft wurde:

- Umlaufbiegeergebnis mit 10,5% Silizium und 0,35% Magnesium:

4 Festigkeit- und Funktionsprüfung für Al-Scheibenräder				
4.2 Umlaufbiegeprüfung				D
Rad Nr.	1	2	3	4
Prüfungsstands Nummer	Makra 1	Makra 1		
Datum	12.09.20	12.09.20		
Prüfer	F. Kronberger	F. Kronberger		
Zustand	lackiert	lackiert		
Radgewicht [kg]	14,25	14,26		
Radspiegel-Vorsp. vor Prüflauf [mm]	0,035	0,037		
Radspiegel-Vorsp. nach Prüflauf [mm]	0,03	0,04		
Kugelpunkthöhe vor Prüflauf [mm]	33,27	33,24		
Kugelpunkthöhe nach Prüflauf [mm]	33,25	33,22		
Radschrauben	Kugel Ø28 M14x1,5			
Anzugsmoment [Nm]	150	150		
Prüfmoment [%]	100	100	100	100
Prüfmoment [Nm]	5,755	5,755		
Drehzahl [UpM]	1593-1947	1596-1950		
Soil-Lastwechsel (gerundet) [LW]	200.000	200.000	200.000	200.000
Soil-Lastwechsel rissfrei * [LW]	Anrisse	Anrisse		
Ist-Lastwechsel ** [LW]	313.079	520.821		
Soil-Lastwechsel Serienüberprüfung				

* Visuell beurteilt
** Abschaltkriterium ist Schwingweg nach dem Nachziehen + 10%.

4.2 Umlaufbiegeprüfung					D
Rad Nr.	5	6	7	8	
Prüfungsstands Nummer	Makra 1	Makra 1			
Datum	13.09.20	16.09.20			
Prüfer	F. Kronberger	F. Kronberger			
Zustand	lackiert	lackiert			
Radgewicht [kg]	14,26	14,26			
Radspiegel-Vorsp. vor Prüflauf [mm]	0,033	0,034			
Radspiegel-Vorsp. nach Prüflauf [mm]	0,031	0,032			
Kugelpunkthöhe vor Prüflauf [mm]	33,26	33,23			
Kugelpunkthöhe nach Prüflauf [mm]	33,24	33,21			
Radschrauben	Kugel Ø28 M14x1,5				
Anzugsmoment [Nm]	150	150			
Prüfmoment [%]	75	75	75	75	
Prüfmoment [Nm]	4,316	4,316			
Drehzahl [UpM]	1678-2050	1668-2038			
Soil-Lastwechsel (gerundet) [LW]	800.000	800.000	800.000	800.000	
Soil-Lastwechsel rissfrei * [LW]	Anrisse	Anrisse			
Ist-Lastwechsel ** [LW]	1.296.486	1.406.165			
Soil-Lastwechsel Serienüberprüfung					

* Visuell beurteilt
** Abschaltkriterium ist Schwingweg nach dem Nachziehen + 10%.

Abbildung 21: Prüfergebnis n.i.O. Quelle: ENTEC-STRACON

- Umlaufbiegeergebnis mit 9,5% Silizium und 0,25% Magnesium:

4 Festigkeit- und Funktionsprüfung für Al-Scheibenräder				
4.2 Umlaufbiegeprüfung				D
Rad Nr.	1	2	3	4
Prüfungsstands Nummer	Makra 1	Makra 1		
Datum	17.09.20	18.09.20		
Prüfer	F. Kronberger	F. Kronberger		
Zustand	lackiert	lackiert		
Radgewicht [kg]	14,29	14,28		
Radspiegel-Vorsp. vor Prüflauf [mm]	0,039	0,036		
Radspiegel-Vorsp. nach Prüflauf [mm]	0,037	0,034		
Kugelpunkthöhe vor Prüflauf [mm]	33,28	33,25		
Kugelpunkthöhe nach Prüflauf [mm]	33,26	33,23		
Radschrauben	Kugel Ø28 M14x1,5			
Anzugsmoment [Nm]	150	150		
Prüfmoment [%]	100	100	100	100
Prüfmoment [Nm]	5,755	5,755		
Drehzahl [UpM]	1597-1951	1592-1946		
Soil-Lastwechsel (gerundet) [LW]	200.000	200.000	200.000	200.000
Soil-Lastwechsel rissfrei * [LW]	Anrisse	keine Anrisse		
Ist-Lastwechsel ** [LW]	542.655	554.369		
Soil-Lastwechsel Serienüberprüfung				

* Visuell beurteilt
** Abschaltkriterium ist Schwingweg nach dem Nachziehen + 10%.

4.2 Umlaufbiegeprüfung					D
Rad Nr.	5	6	7	8	
Prüfungsstands Nummer	Makra 1	Makra 1			
Datum	18.09.20	19.09.20			
Prüfer	F. Kronberger	F. Kronberger			
Zustand	lackiert	lackiert			
Radgewicht [kg]	14,28	14,29			
Radspiegel-Vorsp. vor Prüflauf [mm]	0,036	0,034			
Radspiegel-Vorsp. nach Prüflauf [mm]	0,034	0,032			
Kugelpunkthöhe vor Prüflauf [mm]	33,24	33,27			
Kugelpunkthöhe nach Prüflauf [mm]	33,22	33,25			
Radschrauben	Kugel Ø28 M14x1,5				
Anzugsmoment [Nm]	150	150			
Prüfmoment [%]	75	75	75	75	
Prüfmoment [Nm]	4,316	4,316			
Drehzahl [UpM]	1678-2052	1670-2040			
Soil-Lastwechsel (gerundet) [LW]	800.000	800.000	800.000	800.000	
Soil-Lastwechsel rissfrei * [LW]	keine Anrisse	keine Anrisse			
Ist-Lastwechsel ** [LW]	1.415.624	1.960.721			
Soil-Lastwechsel Serienüberprüfung					

* Visuell beurteilt
** Abschaltkriterium ist Schwingweg nach dem Nachziehen + 10%.

Abbildung 22: Prüfergebnis i.O. Quelle: ENTEC-STRACON

8 Bewertung der Prüfergebnisse in Bezug auf Aufgabenstellung

Auf Basis der Aufgabenstellung wurden alle Einflussfaktoren innerhalb des Verfahrens und der Legierungsbestandteile analysiert und bewertet. Teilweise sind Legierungsbestandteile für „gut“ oder „schlecht“ der Hebel, teilweise sind es aber auch die Prozesszeiten in Verbindung mit der Oberflächentemperatur.

Gerade wenn es um Zonen der Festigkeit am Bauteil geht und diesen extremen Einfluss auf das Prüfergebnis des Aluminiumrades haben, wird es schwer rein auf Basis der Zugprobenanalyse Rückschlüsse auf das Prüfergebnis zu erhalten.

So haben wir gegenüber einem „glattgebügeltem“ T6 Warmauslagerungsprozess bei einem Niederdruckgussrad verschiedenen Festigkeitszonen die prüfergebnisrelevant sind andere wiederum nicht.

Aus dieser Bruchdarstellung ist zu erkennen, dass gerade in der Randschale (Kerbwirkung) wo der Festigkeitseinfluss entscheidend für das Prüfergebnis ist es geometrisch gar nicht möglich ist, eine Zugprobe zu entnehmen:

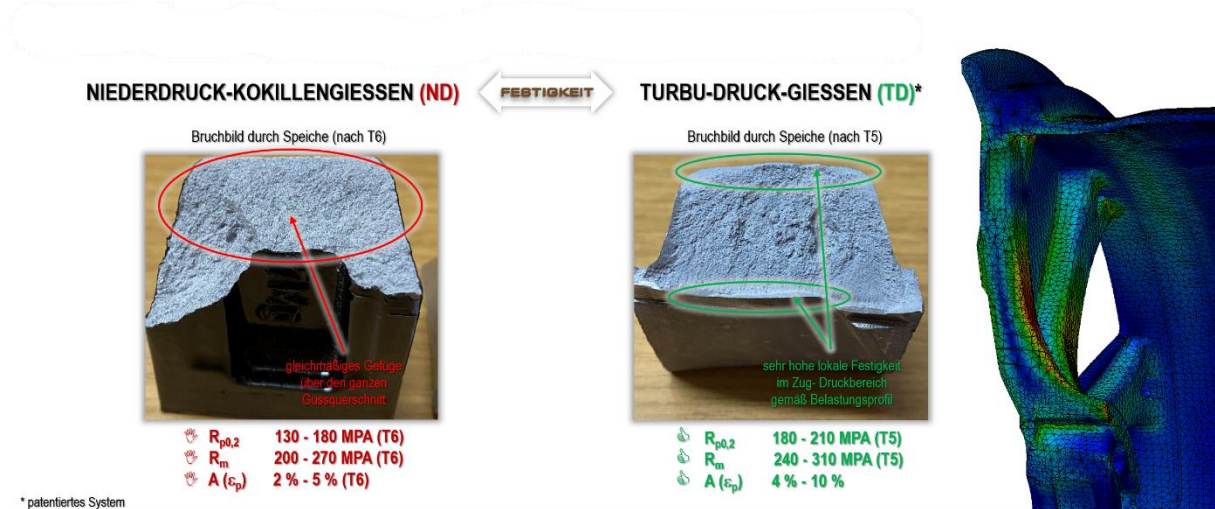


Abbildung 23: Vergleich Bruch durch Speiche mit harter Radschale, Quelle: ENTEC-STRACON

Dennoch zählt für einen Straßenbetrieb nicht das Zugprobenergebnis, sondern die Zulassung auf Basis der Prüfstands Erprobung.

Um so wichtiger ist die Erkenntnis, dass das Fertigungsfenster für die Technologie sehr eng ist und es einer Anlage bedarf, die eine 100% Überwachung sehr sicher realisieren kann.

Beim Einsatz von bis zu 100% Recyclingmaterial wurden keine Unterschiede festgestellt, so dass der Einsatz in Verbindung mit TURBU-DRUCK-GIESSEN möglich ist.

9 Fortführung und Umweltperspektiven

Nachdem der grundsätzliche Nachweis erbracht wurde das es keinen Unterschied macht ob die Legierung aus Primärmaterial oder aus 100% Recyclingmaterial ist, spricht nichts gegen einen gezielten Einsatz dieser Technologie aus Umweltaspekten. Die gepaart mit den Vorteilen in Sachen Leichtbau und den Vorteilen bei der Herstellung zeigt, dass wir mit dem Verfahrensansatz auf dem richtigen Weg sind sowohl ökologisch als auch wirtschaftlich.

Was uns jedoch diese wissenschaftlichen Untersuchungen gezeigt haben, ist das wir gerade mit den computerunterstützten Systemen einen höheren Überwachungsaufwand in die Gießzellen integrieren müssen, da es menschlich nicht möglich ist bis zu 20.000 Messwerte und rund 220 Einstellparameter ständig alle 2 – 4 Minuten nachkorrigieren geschweige denn Trends bei Veränderungen zu erkennen.

Für eine solche Aufgabe ist ein Einsatz einer KI sicher eine Sinnvolle Weiterentwicklung, die auf Basis unseres Domainwissens genau diese Veränderungen kontinuierlich überwacht und im Rahmen des erlaubten auch anpasst. Und genau dann ist es möglich optimal auch höchstem Niveau zu produzieren.

10 Fazit

Zusammenfassend haben einige Radhersteller erkannt, dass unsere Technologie der richtige Schritt für Ihre Zukunft ist. Natürlich sind die Investitionssummen nicht unerheblich, jedoch die Potentiale daraus auch in einer Hochlohngegend einen zielführenden Ertrag zu generieren liegen auf der Hand und wir hoffen auf schnellstmögliche Umsetzung im Markt.

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	38505/01	Referat	21/2	Fördersumme	110.304,00 €
----	----------	---------	------	-------------	--------------

Antragstitel

**„TURBU-DRUCK-GIESSEN –
Ressourcenschonende Räderherstellung mit recyceltem Material und
optimaler Zellennutzung“**

Stichworte

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
12 Monate	01.02.2023	31.01.2024	

Zwischenbericht

24.10.2023 – Kurzbericht_DBU_38505_ENTEC_2023-10-24_RB an Fr. Schnarrs

Bewilligungsempfänger

ENTEC-STRACON GMBH
Herrn Ralf Bux
Stiewingstraße 101
73433 Aalen

Tel +49 7361 88093-90

Fax +49 7361 88093-91

 Projektleitung
Herr Ralf Bux

 Bearbeiter
Herr Ralf Bux
Kooperationspartner

Keine direkten Kooperationspartner im Sinne der Forderung
Projektpartner (Gießzelle) Fa. Oskar Frech GmbH & Co. KG
Projektpartner (Software) Fa. DE computing GmbH

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Für die Herstellung von Leichtmetallrädern im TURBU-DRUCK-GUSS-Verfahren ist neben dem Prozess auch die Bewertung und schlussendlich auch die Eingrenzung der Legierungsbestandteile von entscheidender Wichtigkeit.

Hintergrund ist die Ausgangssituation, dass bereits nach dem Abguss direkt die Festigkeit vorliegt und somit diese auch entscheidend für die Bauteilfestigkeit und die Festigkeit im Fahrbetrieb ist. Diesbezüglich ist der verfahrensseitige Systemvorteil, dass gegenüber dem Niederdruckgussverfahren auf energieintensive Warmlagerungsprozesse (T6) verzichtet werden kann. Beim Niederdruckgussverfahren hilft das wiederum die Fehler, die beim Guss entstehen können, direkt zu kompensieren, was ohne den Prozess dann einfach nicht mehr möglich ist.

Durch die detaillierte Untersuchung während des Vorhabens bezüglich der Einflüsse der Legierungsbestandteile ist es nun möglich, nachweislich 100% Recyclingmaterial einzusetzen. Jedoch müssen egal ob Primär-, Sekundär- oder Recyclingmaterial die prozessrelevanten Parameter unbedingt eingehalten werden, weil diese im direkten Zusammenhang mit der Bauteilfestigkeit stehen. Um Verunreinigungen durch Fremdstoffe im Bereich der Spurenelemente bewerten zu können, wurde auch Material sowohl auf der primären Seite, als auch auf der Recyclingseite vergossen und ausgewertet bzw. gegenübergestellt.

Des Weiteren ist erarbeitet worden, dass die prozessrelevanten Parameter klassifiziert und zu 100% überwacht werden müssen. Diese systemrelevanten Parameter bei der Herstellung im TURBU-DRUCK-Verfahren mit sehr unterschiedlichen Wanddicken sind entscheidend für eine optimale Auslegung.

Nach Festlegung aller werkstoff- und prozesseitigen Einflussgrößen in Verbindung mit dem TURBU-DRUCK-GIESEN nicht nur generell, sondern auch mit Herstellungstoleranzen und Prozesssteuerungsgrenzen versehen, kann nun auch die Spezifikationen so beschrieben werden, dass eine komplette Definition von Ausgangsmaterial wie Recyclinganteil und Legierungsbestandteile bis zur idealen Parameterdefinition bezogen auf das einzelne Gussteile definiert werden. Ziel hierbei ist unter Serienbedingungen sowohl ökonomisch als auch ökologisch im Einklang zu stehen und das bestmögliche Ergebnis hierbei zu erzielen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im ersten Teil wurden auf Basis von Expertenwissen sowohl auf der Legierungsseite als auch auf der Verfahrensseite die Einflussfaktoren erarbeitet und je nach Einfluss auf das Gesamtergebnis untergliedert und priorisiert. Auch wurde hierbei berücksichtigt, ob und in welcher Form was auch wirtschaftlich realisierbar ist, ebenso was prozesseitig unter Serienbedingungen überhaupt umsetzbar ist.

Nach Abwägung aller Einflussgrößen wurden dann Voruntersuchungen gemacht um diesen Thesen und deren Kombinierbarkeit gerecht zu werden. Bereits bei der Aufbereitung der Schmelze als auch bei der Bereitstellung und dem Abguss bis zur vollständigen Erstarrung mussten alle Einflussgrößen festgelegt und bewertet werden.

Diese Erkenntnisse sind dann direkt in die Konstruktion eingeflossen und hardwareseitig umgesetzt. In Gießversuchen wurde das anschließend umgesetzt und auf den Räderprüfständen im direkten Vergleich zum Straßeneinsatz verifiziert bzw. erarbeitet. Anschließend bewertet und dementsprechend festgelegt.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

Ergebnisse und Diskussion

Die Gießergebnisse innerhalb des Fördervorhabens waren zielführend und zeigen umso mehr, das ganzheitliche enorme Potential dieses Verfahren gerade beim ersten Produktansatz → dem Leichtmetallrad ermöglicht. Aus diesem Grund ist es zielführend alle einzelnen Potentiale zu bewerten und auf Gewichtung auszureizen und umzusetzen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Nach div. Projekten die nicht über die Machbarkeitsstudie hinausgekommen sind, gibt es nun zeitnah einzelne erste Fahrzeuge die mit dieser Technologie ausgestattet werden. Aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht mit enormer Verbesserung in Sachen CO₂-Reduktion und der Energiebilanz. Hierzu versuchen wir über soziale Medien und Preise sowohl national als auch international das Verfahren bekannt zu machen.

Fazit

Wie erwähnt sollen bereits in den Jahren 2025 und 2026 die erste Serie umgesetzt werden. Ebenfalls gibt es Automobilhersteller die sagen, dass langfristig Niederdruckguss komplett durch TURBU-DRUCK-GUSS ersetzt wird.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>