

Abschlussbericht

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

„TURBU-DRUCK-GIESSEN – TEIL 2“ nach der Verfahrensentwicklung folgt die Auslegung der systembedingten Gießzelle

Bezug zu Förderthema 7: Ressourceneffizienz durch innovative Produktionsprozesse, Werkstoffe und Oberflächentechnologien

Ressourceneffizienz durch innovative Produktionsprozesse, Werkstoffe und Oberflächentechnologien



	<p>ENTECS-STRACON GMBH Stiewingstraße 101 D-73433 Aalen Ansprechpartner: Herr Ralf Bux Tel.: +49 7361 88093-90 E-Mail: Ralf.Bux@entec-stracon.com</p>
	<p>Oskar Frech GmbH + Co. KG Schorndorfer Straße 32 D-73614 Schorndorf-Weiler Ansprechpartner: Herr Helmar Dannenmann Tel.: +49 7181 702-319 E-Mail: Dannenmann.Helmar@frech.com</p>

Inhalt

1	Kurzfassung des Gesamtumfanges.....	3
2	Angaben zu den Antragstellern (Kooperationsgemeinschaft)	3
	2.1 ENTEC-STRACON GMBH.....	3
	2.2 Oskar Frech GmbH + Co. KG.....	4
3	Aktuelle Problemstellung und Stand Wissens und Technik	5
4	Eigene Vorarbeiten und bisherige Machbarkeitsstudien	5
5	Änderungen der Leistungsumfänge während Projektlaufzeit	7
	5.1 Details zum Gießprozess	8
	5.2 Details zur Gießmaschine	9
	5.3 Verlagerung des Bearbeitungsumfanges.....	9
	5.4 Umsetzung der Mittelumwidmung gemäß Antrag vom 21.03.2022.....	11
6	Herstellung und Einsatz der Projektumfänge.....	11
	6.1 Hochpräzise Dosiereinheit zur Schmelzbereitstellung	11
	6.2 Abstützung der verfahrensbedingten Vertikalkraft	12
	6.3 Verfahrenskomponenten zur Prozesssicherheit beim Gießen	13
	6.4 Qualitätsmerkmal Kornwachstum	14
	6.5 Absicherung der Kombination TURBU-DRUCK und Flowforming	14
7	Fortführung und Umweltperspektiven.....	15
8	Fazit.....	17

1 Kurzfassung des Gesamtumfanges

Zusammen mit Prof. Dr. Klein, Gießereiexperte mit mehr als 50 Jahren Erfahrung in seinem Gebiet, forschte die ENTEC-STRACON GMBH seit 2017 an einem neuen turbulenzarmen Gießverfahren. Die erste grundlegende Machbarkeitsstudie der neuen Technologie konnte bereits ein Jahr später belegt werden und wurde daraufhin zum Patent angemeldet.

Mit diesem Gießverfahren ist es erstmals möglich, schnell und wirtschaftlich komplexere Bauteile zu gießen mit unterschiedlichen Wandstärken. Insbesondere Leichtmetallräder können so nahezu produktnah, d. h. ohne viel Nacharbeit gegossen werden. Neben der Einsparung von Rohstoffen bei der Herstellung können auch Energie, Zeit und CO₂ eingespart werden.

Bisher werden über 90% aller Leichtmetallräder im Niederdruck-Kokillengussverfahren hergestellt, hierbei sorgt die sehr langsame Formfüllung zu einem sehr groben Gefüge. Im Vergleich zu anderen Gießverfahren wird zur Herstellung auch erheblich viel Zeit benötigt und es sind lediglich Wandstärken bis minimal 6mm möglich. Durch dieses langsame Gießen entsteht ein Gefüge mit sehr schlechten Festigkeitseigenschaften. Heutige Aluminiumräder haben aber Wandstärken von nur noch 2-3mm um das Gewicht möglichst gering zu halten, bei gleichzeitig höherer Belastung. Um dieses Ziel erreichen zu können muss der Gussrohling beim Niederdruckgießen nach dem Gießen intensiv durch Zerspannung bearbeitet werden. Darüber hinaus noch sehr aufwendig wärmebehandelt werden (T6 - vergüten durch Ausscheidungshärten). In den Grundlagenforschungen im Vorfeld auf diesem Gebiet konnte gezeigt werden, dass die Technologie des TURBU-DRUCK-GIESSEN grundlegend funktioniert und die mechanischen Kennwerte verbessert werden können. Sodass auf das aufwendige Vergütung (T6 Warmauslagerung) nach dem Gießen verzichtet werden kann.

Im Zeitraum des ersten Förderprojekts (Aktenzeichen 35798 → bis 31.12.2020) war das Ziel, schrittweise aus der Grundlagenforschung das Verfahren so weiterzuentwickeln, dass ein Serieneinsatz realisiert werden kann. Hierbei wurde durch stufenweise Weiterentwicklung nach der bereits erfolgreich abgeschlossenen ersten Machbarkeitsstudie konsequent Erweiterungsschritte umgesetzt und der Beweis erbracht, dass hierzu größere Erweiterungen des Systems zur Qualitätssteigerung notwendig sind.

Hieraus entstand dieses zweite Förderprojekt (Aktenzeichen 37339 → bis 30.11.2022) als Kooperationsprojekt zwischen der ENTEC-STRACON GMBH und der Oskar Frech GmbH + Co. KG mit dem Ziel das System zwischen Verfahren / Werkzeug und Gießanlage so weiter zu entwickeln, dass eine optimale Nutzung in Form einer passenden Gießeinheit möglich ist.

2 Angaben zu den Antragstellern (Kooperationsgemeinschaft)

2.1 ENTEC-STRACON GMBH

Anschrift A: Robert-Bosch-Straße 80, 73431 Aalen (bis 31.12.2021)

Anschrift B: Stiewingstraße 101, 73433 Aalen (ab 01.01.2022)

Ansprechpartner: Herr Ralf Bux

Tel: +49 7361 88093-90

Email: ralf.bux@entec-stracon.com

Herr Bux (Gründer und Geschäftsführer von ENTEC-STRACON) hat jahrelange Erfahrung in der Entwicklung und Produktion von Leichtmetallrädern und war 10 Jahre Entwicklungs-Ingenieur bei der Mercedes AG im Bereich Räder / Reifen.

In dieser Zeit hat er diverse Technologien wie die Hohlspeichentechnologie mit ATS und die Schmiedetechnologie mit Otto Fuchs sowie die Flowforming-Technologie mit diversen Radherstellern zur Serienreife gebracht. Bereits vor dieser Tätigkeit entwickelte er während seines Studiums im Rahmen der Diplomarbeit eine Prüftechnologie für Räder, die mit einem Umweltpreis der Stadt Esslingen gekrönt wurde. Im Jahr 2007 gründete Herr Bux die Firma ENTEC-STRACON und hat mittlerweile 10,5 Mitarbeiter. Herr Bux 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 vom Design bis zur Serienfreigabe. Mit mehr als 1000 Radentwicklungen besitzt er ein sehr fachkundiges Wissen sowohl beim klassischen Niederdruckgießen als auch beim Schmieden bzw. 3D-Fräsen von Leichtmetallrädern. TURBU-DRUCK-GIESSEN ist hierbei ein konsequentes Resultat seiner 25-Jährigen Erfahrung in diesem Umfeld.

2.2 Oskar Frech GmbH + Co. KG

Anschrift:

Schorndorfer Straße 32
73614 Schorndorf-Weiler

Ansprechpartner: Herr Helmar Dannenmann

Tel: +49 7181 702-319

Email: dannenmann.helmar@frech.com

Die Unternehmensgruppe Oskar Frech GmbH + Co. KG gehört zu den Pionieren der Druckgießtechnik und hat mit zahlreichen Patenten die Branche über mehr als sieben Jahrzehnte hinweg maßgeblich geprägt. Heute verfügt der Weltmarktführer über das komplette High-Tech-Portfolio moderner Druckgießtechnik für NE-Metalle, von der Warm- und Kaltkammertechnik über die Peripherie, den Formenbau, das Consulting und die Dienstleistungen bis hin zu innovativen Verfahrenstechniken. Druckgießtechnik von Frech kommt rund um den Globus zum Einsatz, zum Beispiel in der Automobilbranche bei der Produktion von Motorblöcken, Getriebegehäusen oder komplexen Strukturteilen. In den letzten Jahren rückt neben den Themenfeldern Energie- und Ressourceneffizienz zunehmend der moderne Leichtbau in den Fokus der Druckgießindustrie. Die Leichtbauwerkstoffe Aluminium und Magnesium tragen hierzu einen wesentlichen Beitrag hinsichtlich Vorkommen und Recyclingfähigkeit bei und bilden somit zukunftsorientierte Materialgruppen.

Im Rahmen dieser Verfahrensentwicklung „TURBU-DRUCK-GIESSEN“ hat FRECH sehr engagiert ENTEC-STRACON unterstützt sowie eng und erfolgreich zusammengearbeitet. Aus diesem Grund ist dieses Gespann aus Erfinder / Entwickler / Maschinen- / Werkzeughersteller die ideale Ergänzung, um das Verfahren konsequent weiter zu entwickeln sowie schnellstmöglich einen Serieneinsatz realisieren zu können.

3 Aktuelle Problemstellung und Stand Wissens und Technik

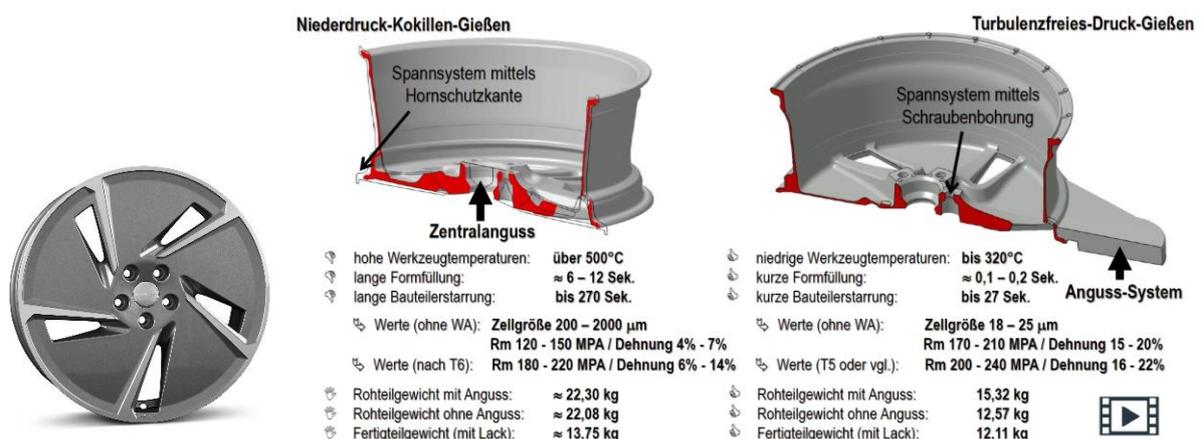
Im Zuge des Klimawandels und der immer schärferen Grenzwerte im PKW-Bereich sind die Hersteller angetan die entstehenden Emissionen immer weiter zu reduzieren. Dies kann man aerodynamisch und / oder durch Effizienzsteigerungen der Motoren in Verbindung mit Gewichtsreduktion am gesamten Fahrzeug erreichen. Ein Bauteil, das sich in den letzten Jahrzehnten kaum verändert hat ist das Aluminiumleichtmetallrad. 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 15 kg. Dabei wird versucht, über beispielsweise Kunststoffeinsätze dieses Mehrgewicht zu kompensieren und dennoch die Aerodynamik zu halten. Diese enormen Aufwendungen bei Herstellung, Bearbeitung der Räder in Verbindung mit der Herstellung der Kunststoffeinsätze und dem anschließenden Zusammenbau stehen in keinem Verhältnis zum Nutzen bei Verbrauch und CO₂-Ausstoß.

Die Grundlage dieses Entwicklungsstillstandes liegt im Herstellungsprozess. Aluminiumräder werden im Niederdruckgussverfahren herstellt, da sich kein anderes Verfahren für die komplexen Strukturen mit extrem unterschiedlichen Wandstärken eignet. Die Mindestwandstärke bei diesem Verfahren liegt bei rund 6-8mm, 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 Eigene Vorarbeiten und bisherige Machbarkeitsstudien

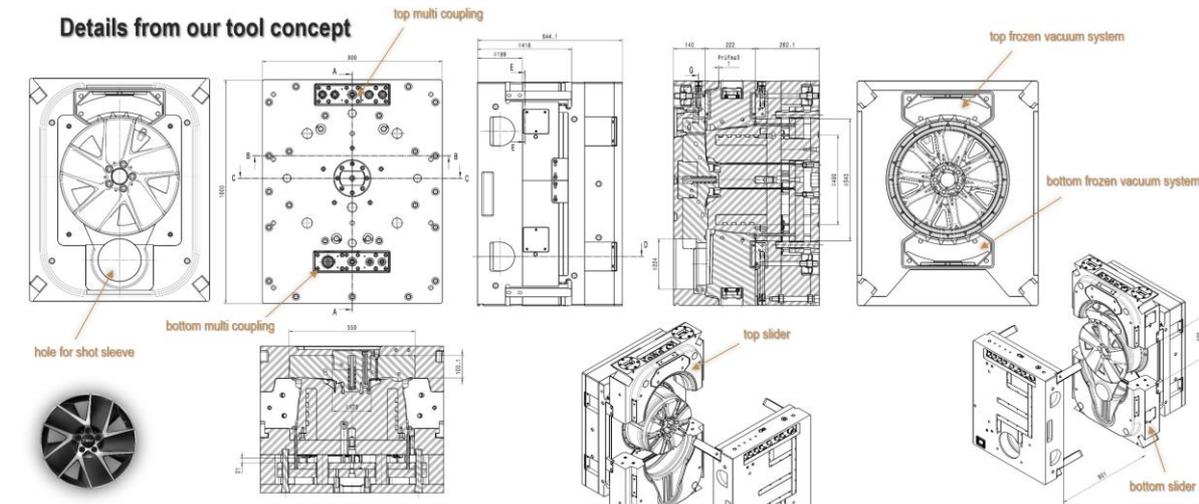
Die Erfinder und Patentinhaber Herr Prof. Dr. Klein, Gießereiexperte mit mehr als 50 Jahren Erfahrung in seinem Gebiet und Herr Ralf Bux als Diplom-Ingenieur und Radexperte forschen seit 2017 an diesem neuen turbulenzarmen Gießverfahren.

Die grundlegende Machbarkeitsstudie war ein Handelsrad der Firma Borbet (Abbildung 1) welches im Niederdruckguss sehr aufwendig mit hoher Ausschussquote und enormen Aufwendungen produziert werden musste und als TURBU-DRUCK (TD) - Variante Potentiale bot:



(Abbildung 1: Basismachbarkeitsstudie Borbet → TD vs. ND)

Im nächsten Schritt wurde ein Handelsrad der Firma CMS (Abbildung 2) entwickelt welches als Niederdruckgussvariante gar nicht hergestellt werden konnte:



(Abbildung 2: zweite Machbarkeitsstudie CMS-TD01)

Bei der Werkzeugkonstruktion sind alle Vorkenntnisse bei der Gießteilauslegung eingeflossen, dennoch war es notwendig mittels schrittweiser Umsetzung die einzelnen Einflussfaktoren / Effekte beim Gießen zu erarbeiten (Abbildung 3 + 4). Dies wurde im Rahmen des ersten Förderprojektes (Aktenzeichen 35798) mittels einzelner Gieß-Sessions stufenweise herausgearbeitet:



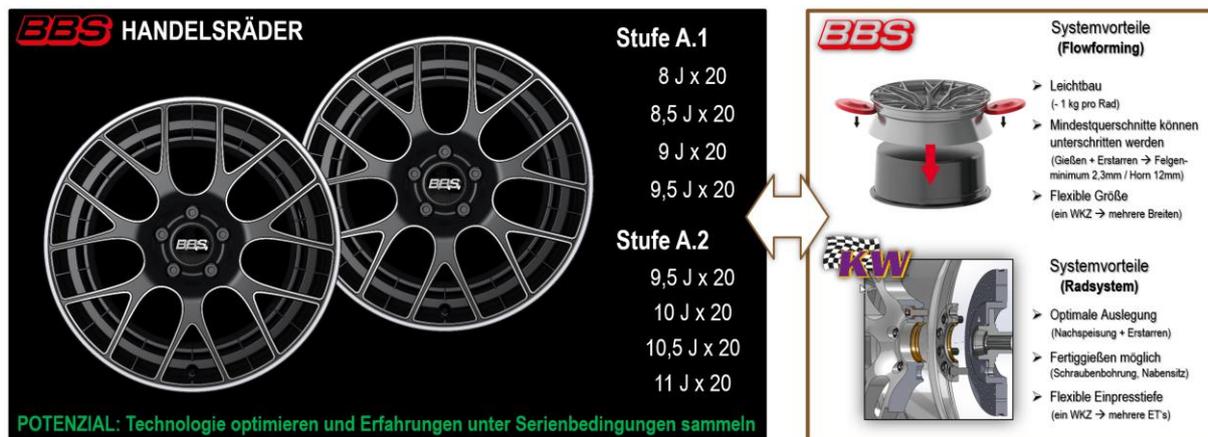
(Abbildung 3 und 4: Fortschritt bei der Entwicklung der Gießqualität)

So wurde in weit über 25 Gießsessions konsequent an der Gießqualität weiterentwickelt. Es wurde deutlich, dass am Prozess, am Werkzeug und vor allem an der Gießmaschine optimiert werden muss. In Summe wurden hierbei ca. 250 Räder gegossen.

Viele Einzelmaßnahmen zeigten, dass eine weitere Machbarkeitsstudie mit einem verbesserten Werkzeug und eine passende Anlage notwendig ist. Um diesen Schritt richtig anzugehen, wurde dieses Förderprojekt geschaffen um die Kombination zwischen Verfahren und Gießmaschine optimal entwickeln zu können.

So wurde in der dritten Ausbaustufe ein Handelsrad der Firma BBS entwickelt (Abbildung 5), das viele Vorkenntnisse und zukunftsweisenden Themen bereits implementiert hatte. Hinzu kam, dass neben der optimalen Prozessnutzung (Punkt 5) auch die Flexibilität durch Auswalzen (Flowforming) einen großen Vorteil beim TURBU-DRUCK-GIESSEN bietet.

Unter Abwägung aller Kriterien wurde das Werkzeug so ausgelegt, dass es in verschiedenen Radbreiten gefertigt werden kann. Für den Gießprozess bringt es keine Nachteile, sondern eher Vorteile bei der Querschnittsauslegung und am Bauteil kann die gießbare Untergrenze von 3mm auf die gewalzte Wanddicke von 2,3mm realisiert werden, was wiederum große Vorteile bei der Gesamtbilanz mit sich bringt:



(Abbildung 5: Systemerweiterung in Kombination mit Flowforming)

Diese Vorteile zeigten sich bereits in der Radauslegung (Simulation). Hier konnte sowohl das Befüllen wie auch das Erstarren viel zielführender ausgelegt werden, sodass in Form von Gießergebnissen dies als der größte Schritt Richtung serienreife betrachtet werden kann.

5 Änderungen der Leistungsumfänge während Projektlaufzeit

Aufgrund der Pandemie gab es Einflussfaktoren, die einen Höchsteinsatz der Projektpartner zum 14.06.2021 gemäß Bewilligungsschein nicht im vollen Umfang möglich machten.

Unumstritten war, dass die Kooperationsgemeinschaft das Projekt umsetzen wird, jedoch haben sich die Arbeitsaufteilung und die Terminplanung der Arbeitspakete ziemlich verschoben, sodass hier seitens der Kooperationspartner reagiert werden musste.

Die Kooperationsvereinbarung zwischen ENTEC-STRACON und Oskar Frech wurde im Juni 2021 verabschiedet, sodass anschließend mit der Umsetzung begonnen werden konnte.

Darüber hinaus hat sich nach einer Markt-Analyse gezeigt, dass gegenüber der Antragstellung der 2. Phase dieses Vorhabens, nicht wie geplant die Räder in den Größen 15 Zoll bis 20 Zoll im TURBU-DRUCK-GIESSEN die zukunftsweisenden Größen sind, sondern in Bezug auf der Elektromobilität und den aktuellen Trends diese sich zielführender in den Größen 18 Zoll bis 22 Zoll bewegen.

Die Untersuchungen in der ersten Phase in Sachen Prozessnutzung in Verbindung mit den steigenden Größen zeigten, dass das Leichtbau-Potential teilweise geschuldet durch die langen Fließwege und dessen Erstarrungsverhalten schwindet bzw. eher von Nachteil ist. Um für den Gesamtprozess eine zukunftsweisende / optimale Technologie aus Wirtschaftlichkeit in Verbindung mit Nachhaltigkeit zur Reife zu entwickeln, wurde konzeptseitig in 2021 entschie-

den, die Gussgeometrie so zu definieren, dass durch einen anschließenden Fertigungsprozess, dem Auswalzen (Flowforming) die beste Lösung gerade bei steigenden Durchmessern weiterverfolgt wird.

Durch diesen Auswalzprozess in Form von Kaltumformung (Flowforming) reduziert sich der Bedarf an Gießwerkzeugen enorm und damit auch eine Einsparung bei der Vielfalt an Werkzeugen und die dementsprechende Lagerhaltung. Diese zusätzlichen Potentiale spiegeln sich somit nicht nur im reduzierten Herstellungspreis, sondern auch in der Werkzeugumlage pro Rad.

Heutzutage wird ein Flowforming-Prozess durch Erwärmung des gesamten Rades in Form eines gasbeheizten Ofens auf über 330°C realisiert. Bei einer Kombination zwischen TURBU-DRUCK-GIESSEN und Flowforming wurde der Prozess so verändert, dass nur die Felgengeometrie partiell für den Walzprozess über Induktion vorgewärmt wird. Somit lässt sich durch eine induktive Erwärmung der Felge der Energieeintrag um 2/3 reduzieren (gesamtes Rad 20kg → nur Felgenbereich 7kg).

Hinzu kommt die punktgenaue Nutzung der Energieform. D. h. die Induktion wird innerhalb weniger Sekunden in diesen partiellen Bereich des Rades (Felgengeometrie) eingebracht und nur dann, wenn es direkt im Anschluss ausgewalzt wird. Beim gasbeheizten Ofen ist dies nicht möglich, da dieser kontinuierlich geheizt werden muss, inklusive des Anfahrens und des Abkühlens wo keine Erwärmung des Rades möglich ist.

Für diesen Walzprozess ist die Qualität in dem Felgenbereich des Gussteils ein wichtiger Index, hierfür sind besondere Merkmale notwendig. Erstarrungszeit und Oberflächentemperatur und vor allem die Porosität müssen für die Kaltverformung optimal realisiert werden. Somit ist für die Gesamtauslegung des Bauteils einer der wichtigsten Ziele ein nahezu porositätsfreies Gussteil mit guter Festigkeit zu erzeugen. Dies bedarf in Summe eine Leckage freie und vakuumdichte Abstimmung aller gießrelevanten Baukomponenten zueinander.

Hinzu kommt die Betrachtung des notwendigen Temperaturniveaus wie auch die Verschleißfestigkeit während einer Serienfertigung.

5.1 Details zum Gießprozess

Es ist notwendig mittels kontinuierlicher Gießversuche und anschließender Bewertung der bearbeiteten Räder, erforderliche Leistungsdaten des Gießaggregates abzuschätzen und mögliche Lösungsansätze einzugrenzen.

Hierzu gehören:

- Vakuumanbindungsgestaltung, Leistungssteigerung der Absaugsysteme
- Temperaturführung der Gießkammer und des Gießkolbensystems
- Temperaturniveau der einzelnen Werkzeugkomponenten
- Anpassung der Stellgrade der hydraulischen Regelventile
- Optimierung des Entnahmeprozesses des Gussteiles aus dem Werkzeug bis zum Abschrecken
- Beeinflussung des Dosiervorganges auf die Porosität des Gussteils
- Qualität der Radrohlinge hinsichtlich Porosität durch spezielle Abdichtmaßnahmen
- Qualitätsverbesserung durch Legierungsoptimierung (von AlSi7Mg auf AlSi10MgMn)

5.2 Details zur Gießmaschine

In Anbetracht der allgemeinen Schwierigkeiten bei der aktuellen Beschaffung von Komponenten, insbesondere größere Stahlgussteile, sowie die Notwendigkeit einer schnellen Umsetzung der 2. Stufe wurde entschieden, auf Basis einer größeren und verfügbaren Standardnahen Druckgießmaschine mittels einer Anbaulösung schneller sowie effektiver an das Ziel zu gelangen. Hierbei war der Kooperationsgemeinschaft ebenfalls wichtig eine Flexibilität für spätere einfachere Anpassungs- und Gestaltungsmaßnahmen zu erschaffen.

Zusätzlich wurde beschlossen auf eine größere Technikum Maschine mit einem leistungsstärkeren Gießaggregat aufzusetzen welches mehr Potential für künftige Prozessentwicklungen bietet als eine exakt zugeschnittene Produktionsmaschine mit einer nicht veränderbaren Werkzeugaufnahme.

So hat sich die Phase 2, gegenüber der Antragsstellung im Nov. 2020, in der Form nach dem aktuellen Kenntnisstand im Laufe des Jahres 2021 so weiterentwickelt, dass die Abstützung nicht in Form von 2 komplette neu zu konstruierenden Aufspannplatten als gegossenen C-Form realisiert werden muss, sondern durch eine Erweiterung der Standardaufspannplatten in Form von Anbauteilen erfolgt.

In Anlehnung an das modifizierte Werkzeugkonzept und den ergänzenden Anforderungen wird von der Fa. ENTEC-STRACON diese Anbauvariante entwickelt und durch die Fa. Oskar Frech in die bestehende Geometrie eingearbeitet sowie auf Festigkeit geprüft.

Unverändert bleiben die generellen Anforderungen der Werkzeugaufnahme in Sachen Abstützung, sodass auch dies die Anbaulösung erfüllen kann.

Die grundsätzliche Vergrößerung der Räder im Durchmesser erfordert eine ebenso Vergrößerung der Werkzeuge. Aus diesem Grunde musste das Werkzeugkonzept auch hier angepasst werden.

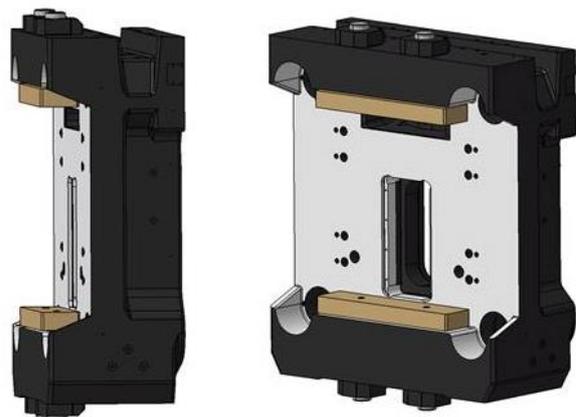
Aus Zeit und Kostengründen bei der Beschaffung ist angedacht, stufenweise den Automatisierungsgrad zu erhöhen. D. h. um weiter gießen zu können, werden diverse automatische Schnellspannsysteme und die Erweiterungen des Wechselsystems zwar konstruktiv, aber nicht sofort hardwareseitig komplett bei der nächsten Stufe dargestellt, da vordergründig die prozessrelevante und serientaugliche Aufnahme, Abstützung und Dichtheit des Gesamtkonzeptes im Fokus steht.

Die konstruktive Auslegung weicht zeitlich von der hardwareseitigen Umsetzung ab, so dass sich sowohl die Auslegungsinhalte als auch der zeitliche Mitarbeiterereinsatz zwischen den Kooperationspartnern ENTEC-STRACON und Oskar Frech verlagert.

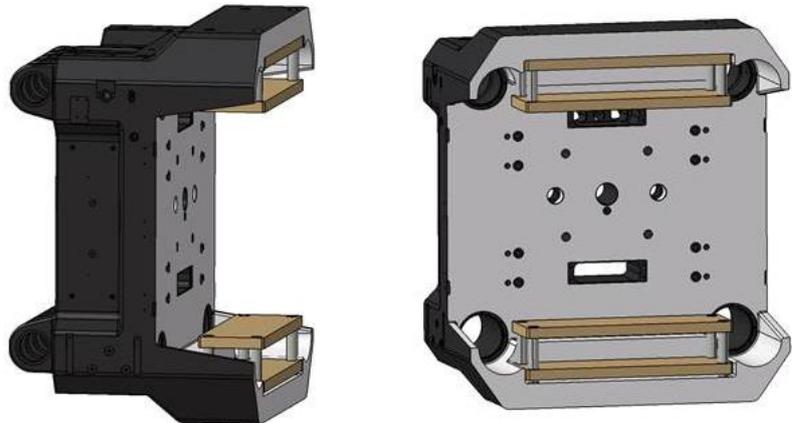
5.3 Verlagerung des Bearbeitungsumfanges

Bei der Antragsstellung bestand das Forschung & Entwicklungsprojekt aus einer Schließereinheit, bestehend aus zwei Aufspannplatten, die für diese speziellen Anforderungen die beim TURBU-DRUCK-GIESSVERFAHREN notwendig sind zu erweitern.

Hierbei war angedacht die Aufspannplatten als Gussteil (nahezu einteilig) so auszulegen, dass diese durch eine vertikale Abstützung die enormen Kräfte aufnehmen können.

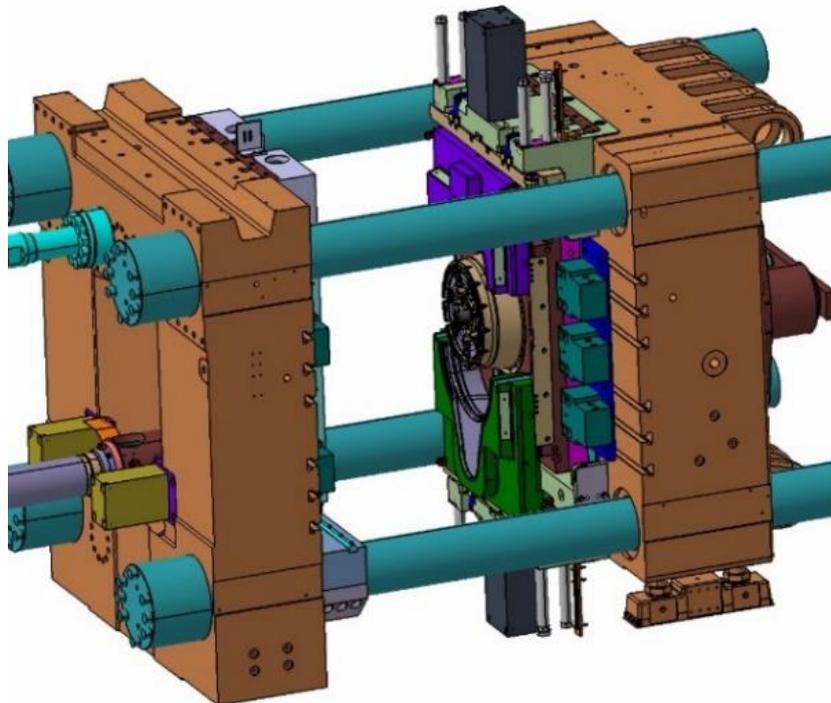


Diese Auslegung wurde zur Antragsstellung sowohl für die feste Aufspannplatte (Abbildung 6) als auch für die bewegliche Aufspannplatte (Abbildung 7) zum damaligen Zeitpunkt favorisiert.



(Abbildung 6 und 7: Ansatz der gegossenen Aufspannplatten)

Auf Basis des aktuell zum Startzeitpunkt des Förderprojekts 37339/01-21/2 vorliegenden Erkenntnisse wurden folgende Umfänge erneut bewertet und optimiert:



(Abbildung 8: Konstruktion der Vertikalkraftabstützung mittels Anbauvariante)

- Wechsel der gegossenen Aufspannplatten auf eine Anbauvariante (Abbildung 8, besser für die flexible Einsatzmöglichkeit in Punkto Maschinengröße, Reifegrad)
- Ausweitung der Voruntersuchungen für Erweiterung Auswalzen (Flowforming) (neue Bewertungen in Sachen Evakuierung, Erstarrung, Gefüge, Porosität)
- Vergrößerung des Werkzeugs für Einsatz bis 22 Zoll (Wechsel- und Spannkonzepht musste konstruktiv neu bewertet werden)
- Leistungsoptimierung der hydraulischen Spannelemente (zweiter Hydraulikkreislauf) (genaue Bewertung der Anforderungen Maschinendruck zu Spannelemente)

Diese Aufgabenstellung wurde konstruktiv seitens ENTEC zum Großteil erarbeitet, da hier die Schnittstelle und das Domainwissen zum Werkzeug vorhanden ist. Dies betrifft sowohl die Baugruppen bezüglich Aufspannplatten, als auch die ganzheitliche Vergrößerung der Rad-durchmesser (von 15 Zoll bis 20 Zoll, auf 18 Zoll bis 22 Zoll) plus die Erweiterung durch Auswalzen bei der Verfahrensdefinition in Form von Gussteilen oder auf die Geometrieänderung des Werkzeugkonzeptes.

Es waren ebenfalls weitere zusätzliche Voruntersuchungen notwendig und dabei wurde klar, dass die verschiedenen Hydraulikdrücke der einzelnen Aktuatoren im System der K-Wheel Gießzelle besser über zwei Kreisläufe entwickelt werden sollten. Deshalb ist auch dieser Teil des zweiten Hydrauliksystems zur Aufgabenstellung seitens ENTEC übergegangen, da diese bei der Konstruktion und der Krafteinleitung / -abstützung wie auch bei der Steuerung von der reinen Gießmaschine abgekoppelt betrachtet werden kann.

5.4 Umsetzung der Mittelumwidmung gemäß Antrag vom 21.03.2022

In Summe wurde auf Basis aller vorliegenden Erkenntnisse der für das Projekt notwendigen Aufwendungen sowohl bei den Mitarbeitern als auch bei den Fremdleistungen neu kalkuliert und für die Laufzeit des Förderzeitraums umgelegt.

6 Herstellung und Einsatz der Projektumfänge

Nachdem alle Konstruktionsdetails entwickelt waren und die Herstellung gemäß Einzelteilzeichnungen erfolgte, wurde die Anlage aufgebaut und das Werkzeug montiert:

6.1 Hochpräzise Dosiereinheit zur Schmelzbereitstellung

Hierbei war es wichtig, die korrekte Schmelzmenge in der optimalen Prozesszeit für einen Abguss bereit zu stellen, aus diesem Grund wurde hierzu ein Roboter in der speziell für das Verfahren notwendigen Gießgarnitur eingesetzt (Abbildung 9):



(Abbildung 9: Exakte Dosierung der Schmelzmenge mittels Roboterführung)

6.2 Abstützung der verfahrensbedingten Vertikalkraft

Aus den Versuchsreihen der zweiten Machbarkeitsstudie war zu erkennen, dass es für den Konzeptanspruch notwendig ist, die Abstützung der Kernzugeinheiten direkt auf die Aufspannplatten zu übertragen. Im ersten Ansatz waren die gegossenen Aufspannplatten eine mögliche Lösung, doch im Zuge der Erweiterung / Detaillierung wurde das Konzept so umgebaut, dass dies auch über Anbauteile realisierbar ist (Abbildung 10 und 11).

Vorteil an dieser Ausführung ist, dass das Nachrüsten von vorhandenen Gießanlagen ohne neue Aufspannplatten umsetzbar ist:



(Abbildung 10 und 11: Umgesetzte Anbaulösung der Aufspannplatten – feste und bewegliche Seite)



(Abbildung 12: Umgesetzte Anbaulösung der Aufspannplatten – bewegliche Seite ohne Werkzeug)



(Abbildung 13: Umgesetzte Anbaulösung der Aufspannplatten – feste Seite ohne Werkzeug)

Bereits bei den ersten Abgüssen war klar zu erkennen, dass die Abstützung (Abbildung 12 und 13) funktioniert und somit die beim Verfahren auftretenden Kräfte abgefangen werden und das Werkzeug Leckage frei ist. Aktuell sind in den 5 Gieß-Sessions ca. 200 Räder gegossen worden, hierbei gab es kein einziges Überspritzen der Gießform.

6.3 Verfahrenskomponenten zur Prozesssicherheit beim Gießen

Aus diesen Gießversuchen wurde deutlich, dass alle Umfänge die Teil des Verfahrens darstellen, unbedingt exakt wiederholbar umgesetzt werden müssen. Hierzu zählen bereits alle Temperaturen und Zeiten beim Dosieren, als auch beim gesamten Gießprozess bis hin zum Abschrecken des Gussteiles.

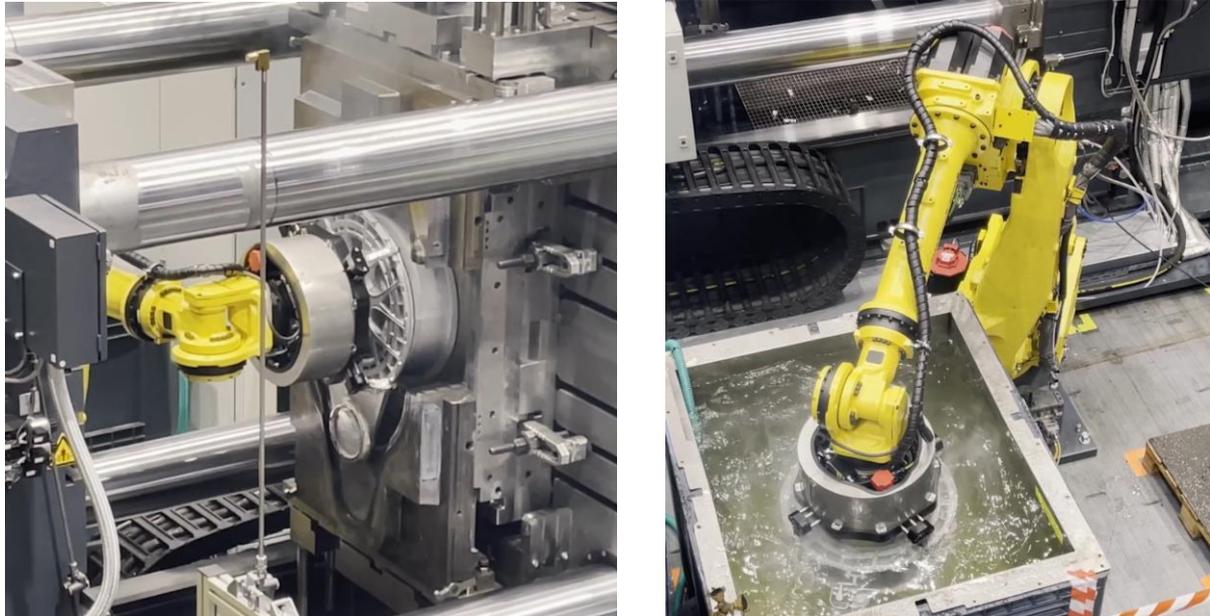
Ergebnis daraus ist eine gleichbleibende Qualität (Abbildung 14):



(Abbildung 14: Gießergebnisse mit optimierter Aufspannplatten und verbessertem Werkzeug)

6.4 Qualitätsmerkmal Kornwachstum

Um Prozesssicherheit bezüglich Gießqualität, Festigkeit und Dehnung abzusichern, ist es notwendig sich auf den Automatisierungsgrad zu konzentrieren. D. h. die Entnahme mittels Roboter und Greifsystem wiederholbar sicherzustellen:



(Abbildung 15 und 16: Entnahmeprozess mittels Roboter mit Greifsystem)

Mit diesem Greifsystem (Abbildung 15 und 16) konnte dieser Entwicklungsschritt der Bauteilentnahme nach öffnen der Gießform umgesetzt werden. Dieser exakt wiederholbare Prozess ist mitentscheidend für die positive Ausbildung der notwendigen Gefügestruktur.

6.5 Absicherung der Kombination TURBU-DRUCK und Flowforming

Im Anschluss nach dem Gießen wurden Teile aufgearbeitet und zum Auswalzprozess zum Radhersteller BBS geschickt:



(Abbildung 17: Vergleich Gussteil – vorgedreht zum Auswalzen – Ergebnis nach dem Flowforming)

Hierzu ist es notwendig das Gussteil für die finale Radbreite vorzdrehen und im Bereich der Felge kurz vor dem Auswalzprozess auf Temperatur zu bringen:



(Abbildung 18 und 19: Der Flowformingprozess – mit Walzen wird die Felge in die Zielbreite verformt)

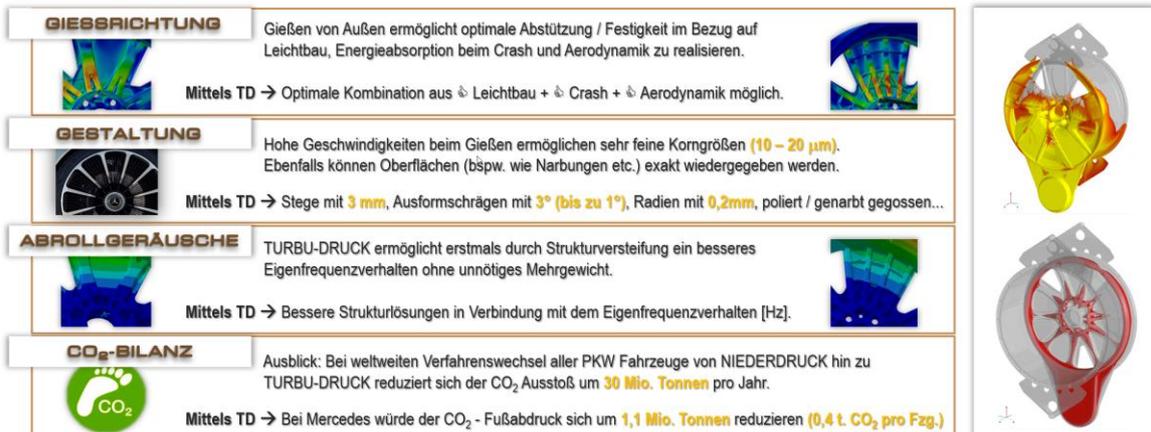
Auch dieser Prozessschritt wurde auf Basis der guten Werkstoffkennwerte realisiert bzw. umgesetzt bzw. umgesetzt (Abbildung 18 und 19). Dennoch zeigen die Versuchsreihen, dass kleinste Änderungen Auswirkungen auf die Qualität verursachen.

7 Fortführung und Umweltperspektiven

Nachdem die Grundlagenforschung positiv mit dem Abschluss der Basismachbarkeitsstudie (Borbet-Rad) abgeschlossen wurde, folgte mit der ersten Machbarkeitsstudie (CMS-Rad) die Entwicklung in Richtung Serie (Förderprojekt, Aktenzeichen (Aktenzeichen 35798 → bis 31.12.2020). Anschließend wurde auf dem Wissen aufgesetzt und all die Erfahrungen in die zweite Serienmachbarkeitsstudie eingebracht (BBS-Rad). Parallel hierzu wurde die Gießzelle mit diesem Förderprojekt (Aktenzeichen 37339 → bis 30.11.2022) weiterentwickelt und ausgebaut. Auch hier wurden alle Entwicklungsansätze in Bezug auf die Gießanlage und die Erweiterung in Richtung Auswalzen konsequent umgesetzt und durch Hardware bestätigt.

Das TURBU-DRUCK-GIESEN ist eine Art des Gießens welches zukunftsweisende und riesige Potentiale bietet. (Abbildung 20). Dies gilt für viele ähnlich komplexe Bauteilgeometrien die mittels dieses Verfahrens produktnah umweltverträglicher und Energie- und Ressourcensparender hergestellt werden können. Eine Technologie für Morgen:

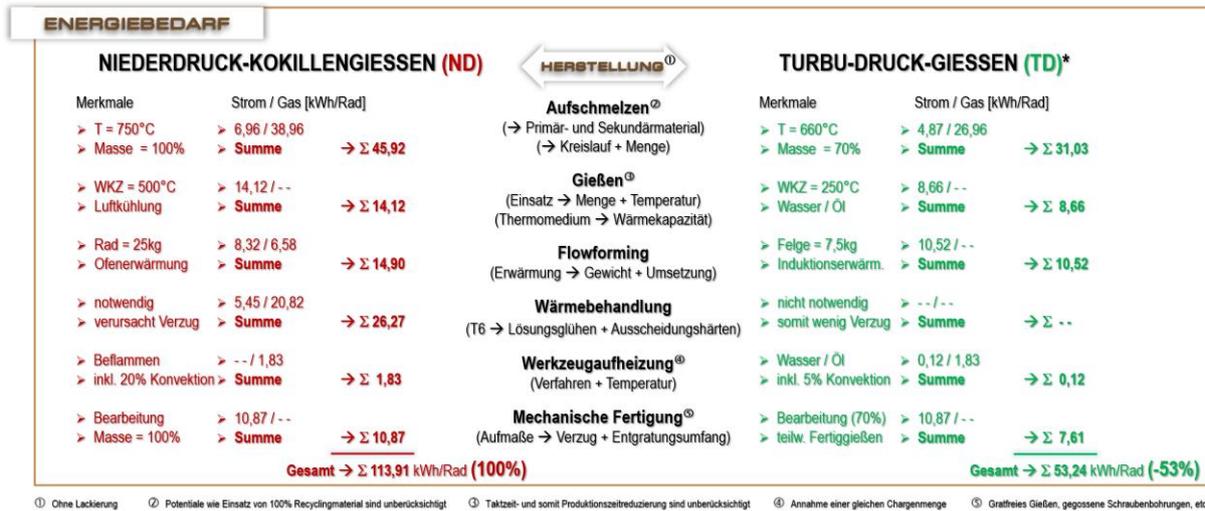
... bietet in Summe Potentiale in allen Bereichen → durch TURBU-DRUCK-GIESEN



(Abbildung 20: Darstellung der Potentiale in verschiedensten Bereichen)

Außerdem ergeben sich hierdurch völlig neue Gestaltungsmöglichkeiten in der Bauteilgeometrie, die bisher nicht hergestellt oder nur in Verbindung mit zusätzlichen Kunststoffelementen realisiert werden konnten.

Des Weiteren wurde beispielhaft beim Radhersteller BBS die notwendige Energie für die Herstellung eines Niederdruckgussrades ausgewertet und mit dem Energieaufwand beim TURBU-DRUCK-GIESSEN gegenübergestellt (Abbildung 21):



(Abbildung 21: Gegenüberstellung Energiebedarf ND vs. TD)

Diese über 50%igen Energieeinsparung bei einem Bauteil welches mind. 4x pro Fahrzeug benötigt wird (egal ob Elektro- oder Verbrennerfahrzeug) ist eines der größten Potentiale. Für ein Rad werden alleine für die Herstellung im Niederdruckgießen über 150kW (inkl. Lackierung) benötigt, sodass durch einen Systemwechsel auf TURBU-DRUCK-GIESSEN der Energieverbrauch auf 75kW reduziert werden kann, das ist mit einem anderen System kaum möglich.

Darüber hinaus haben wir beim Aluminiumeinsatz verfahrensbedingt die Möglichkeit bis zu 5kg pro Rad einzusparen. Was das für die Herstellung von Primar-Aluminium ausmacht soll diese CO₂ Berechnung zeigen:

So gehört die Aluminiumherstellung zu den energieintensivsten und umweltschädlichsten Herstellungsverfahren überhaupt. Um eine Tonne Primäraluminium herzustellen benötigt man rund 17,7 MWh an Energie, es entstehen ca. 3t giftiger Rotschlamm¹, der in riesigen Seen deponiert wird und zu massiven Umweltproblemen in den Regionen führt. Aluminium lässt sich zwar gut recyceln und benötigt nur rund 1/10 der Energie von Primäraluminium, es senken sich aber durch die nicht mehr sortenreine Trennung der Legierungen die mechanischen Kennwerte. Daher wird für die Produktion von Leichtmetallräder im Niederdruckgussverfahren ein Mix aus Primär- und Sekundäraluminium mit max. 30% erlaubt.

Weltweit werden jährlich rund 75 Mio. PKWs produziert (25% Europa, 30% China, 27% USA, 18% Andere). Hierdurch werden allein in Europa ca. 1,01 Mio. Tonnen Aluminium (4 Felgen pro PKW und einem durchschnittlichen Gewicht von 13,5 kg pro Felge; Primär und Sekundär) verarbeitet und 9.450.000 Tonnen CO₂ emittiert². So können allein durch die Einsparung an Rohmaterial 3.783.000 Tonnen CO₂ jährlich eingespart werden.

Neben der Produktion kann weiterhin auch Kohlenstoffdioxid während des Produktlebens eingespart werden. Durch die Kombination aus geringerem Gewicht und verbesserter Aero-

¹ <https://www.regenwald.org/themen/aluminium#start>

² https://www.ffgmbh.de/images/stories/Berichte/924_Dynamis_Steckbriefe/CO2-Verminderung_in_der_Prim%C3%A4raluminium.pdf

dynamik (neue sparsamere Geometrien möglich) können so 0,5 g CO₂ / km eingespart werden. Bei einer jährlichen Fahrleistung von 630.843 Mio. km³ allein in Deutschland ergeben sich somit Einsparungen von 315.422 Tonnen CO₂. (2.423.700 Tonnen CO₂ in Europa). Insbesondere bei BEVs führt die verbesserte Aerodynamik zu einer Erhöhung der Reichweite von bis zu 10km (ca. 3%).⁴



CO₂ Fußabdruck

(EUROPA: Einsparung gegenüber Niederdruck → - 7,45 Mio. Tonnen pro Jahr)
 (WELTWEIT: Einsparung gegenüber Niederdruck → - 29,87 Mio. Tonnen pro Jahr)

- Reduzierung Materialeinsatz (Fertiggießen) - 40 % → - 3,8 [Mio. Tonnen]
- Entfall Veredelungsprozesse (WA – T6) - 100 % → - 0,25 [Mio. Tonnen]
- Entfall Nachverdichtungen (SSM / FF) - 100 % → - 0,05 [Mio. Tonnen]
- Weniger Bearbeitungsabfälle (Späne) - 80% → - 0,15 [Mio. Tonnen]
- Leichtbau + Aerodynamik umsetzbar - 30 % → - 2,4 [Mio. Tonnen]
- Dezentrale Produktion weniger Transport -75% → - 0,8 [Mio. Tonnen]

Grundlage (EU): 75 Mio. PKW p.a. / 13,5 kg p.p. / Laufleistung 4.8*10⁷ Mio km p.a. / Strommix 0,363 kg/kWh

(CO₂ Einsparung pro Fahrzeug gegenüber Niederdruck → - 0,4 Tonnen)

(Abbildung 22: CO₂-Foodprint beim Wechsel von ND auf TD)

Aktuelle Radentwicklungen bei den OEMs zeigen welche Anstrengungen unternommen werden um die Aerodynamik zu verbessern. Dies gelingt nur bedingt im aktuellen Niederdruckverfahren, da ein geschlossenes Design entweder Gewicht verursacht oder durch Kunststoffeinleger kompensiert werden muss. In Summe treffen und belasten beide Ansätze unsere Umwelt mehr, da die Kunststoffeinsätze auch nicht recyclingfähig sind und somit keine zukunftsweisende Lösung darstellt. Solange das TURBU-DRUCK-Verfahren noch nicht verfügbar ist, bleibt den Automobilherstellern aktuell keine andere Wahl als diese Kunststoffeinsätze.

Im nächsten Schritt ist es für das prozesssichere Herstellen dieser sicherheitsrelevanten Bauteile notwendig, den Automatisierungsgrad zu erhöhen und eine hierfür passende systembedingte Gießzelle zur Marktreife auf Basis der Verfahrensentwicklung fertig zu konzipieren. Alle eingesetzten Medien / Temperaturen und Zeiten sind Teil dieses Gesamtsystems und beeinflussen die Qualität des Ergebnisses.

8 Fazit

Gasbildung und ungleichmäßiger Materialeinsatz bei der Legierung oder bei den Schmier- und Trennstoffen sind wesentlich für die Bauteilqualität. Des Weiteren ist ein hoher Automatisierungsgrad zur Prozessüberwachung von Vorteil, als auch das passende Domainwissen welchen Einfluss durch welche Veränderung entsteht. D. h. sobald die Prozess-Sicherheit steht, kann wissenschaftlich weiterentwickelt werden. In wie weit eventuell ein größerer Anteil von Sekundäraluminium eingesetzt werden kann, ist ein weiterer wichtiger Aspekt.

Das Verfahren und die passende Umsetzung dieser Technologie birgt ganzheitliche Lösungen sowohl ökonomisch (wirtschaftlich) als auch ökologisch (Umweltseitig) in allen Bereichen. Dies gilt sowohl für Räder als auch für andere Bauteile wie Gehäuse von Elektromoto-

³ https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_node.html

⁴ <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0305189DE/neuartige-%E2%80%9Eaerodynamik-raeder%E2%80%9C-fuer-den-vollelektrischen-bmw-ix3>

ren oder Achsbauteilen. Ebenso können durch das Verfahren auch andere Werkstoffe erstmals einen Einsatz finden die bislang in diesen Bauteilen einfach nicht umgesetzt werden konnten.

Weitere Quellennachweise / Literaturverzeichnisse:

- Siehe Direktverweise in der Fußzeile
- Alle anderen Daten, Abbildungen 1-22 und Fotografien sind selbst erzeugt und unterliegen keine weiteren veröffentlichten Quelle Dritter.