

BMU-UMWELTINNOVATIONSPROGRAMM

Abschlussbericht

zum Vorhaben:

Innovative, material- und energieeffiziente Herstellung von Kavitäten mittels 3-Druck im SLM
(Selective Laser Melting) Verfahren

Zuwendungsempfänger/-in:

Overath SLM GmbH

Umweltbereich

(Energie- und Ressourceneffizienz)

Laufzeit des Vorhabens

28.04.2016 – 30.09.2020

Autoren

Rike Johnsen, Simon Scheuer, Daniela Derißen, Marcus Lodde

Gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare
Sicherheit

Datum der Erstellung

21.12.2021

Berichts-Kennblatt

Aktenzeichen UBA: 90 030/50	Vorhaben-Nr. 3206
Titel des Vorhabens: zum Vorhaben: Innovative, material- und energieeffiziente Herstellung von Kavitäten mittels 3D-Druck im SLM (Selective Laser Melting) Verfahren	
Autoren: Rike Johnsen, Simon Scheuer, Overath SLM GmbH Daniela Derißen, Marcus Lodde, Effizienz-Agentur NRW / prisma consult GmbH	Vorhabensbeginn: 28.04.2016 Vorhabensende (Abschlussdatum): 30.09.2020
Zuwendungsempfänger: Overath SLM GmbH Scheiderhöher Str. 30-38 53797 Lohmar	Veröffentlichungsdatum: 21.12.2021 Seitenzahl: 94
Gefördert im BMU-Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit	
Kurzfassung: Die Overath SLM GmbH hat die erstmalige großtechnische Herstellung bislang vertikal produzierter Kavitäten (Fertigung durch spanabhebende Verfahren (Fräsen, Bohren)) durch neu aufgebaute, mit dem SLM Verfahren (Selective Laser Melting) hergestellte Kavitäten erfolgreich umgesetzt. Zusätzlich wurde die neuartige, funktionsintegrierte, monolithische Kavität in einen neuartigen angepassten Formschaumautomaten integriert. Das technische Know-How wurde dabei vom Formschaumautomaten in die Kavität (Werkzeug) verlagert. Auch die Formschaumautomaten-Herstellung erfährt hierdurch neue Impulse. Die Ergebnisse des Vorhabens wurden in einem Messprogramm ermittelt und zeichnen sich durch die nachfolgenden positiven Effekte bzw. Umweltwirkungen aus: Bezogen auf 60 Werkzeuge für ein Musterprodukt „Basta Box Deckel XL“ sinkt der Materialverbrauch von 4.800 kg auf künftig 1.008 kg und der Energieverbrauch von 60,63 kWh/kg auf 40,87 kWh/kg. Absolut bedeutet dies eine Senkung des Energieverbrauchs zur Herstellung der 60 Werkzeuge von 291.024 kWh auf künftig 41.197,73 kWh und damit einhergehend eine Senkung der CO ₂ -Menge von 141.146,64 kg auf künftig 19.980,80 kg. Bei dem Einsatz des neuartigen Werkzeuges für den Basta Box Deckel XL im neuen angepassten Formschaumautomaten ergibt sich bei einer Stückzahl von 300.000 über die Laufzeit von 5 Jahren eine Einsparung von 1.558.440 kWh Dampf (78,63 %), 28.020 m ³ Wasser (91,84 %) sowie eine reduzierte CO ₂ Menge von 314.805 kg.	

Im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland gibt es im Bereich des Werkzeugbaus ca. 200 Betriebe, die die hier vorgestellte Technologie entsprechend anwenden können.

Schlagwörter: Selective Laser Melting, Formschaumautomat, Kavität

Anzahl der gelieferten Berichte

Papierform: 5

Elektronischer Datenträger: 1

Sonstige Medien

Veröffentlichung in der Loseblattsammlung der Effizienz Agentur NRW und im Internet geplant auf der Homepage:
<https://www.ressourceneffizienz.de>

Report-Coversheet

Reference-No. Federal Environment Agency: 90 030/50	Project-No.: 3206
Report Title:	
Authors: Rike Johnsen, ,Simon Scheuer, Overath SLM GmbH Daniela Derißen, Marcus Lodde, Effizienz-Agentur NRW / prisma consult GmbH	Start of project: 28.04.2016
	End of project: 30.09.2020
Overath SLM GmbH Scheiderhöher Str. 30-38 53797 Lohmar	Publication Date: 21.12.2021
	N of Pages: 94
Funded in the Environmental Innovation Programme of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety.	
<p>Summary:</p> <p>Overath SLM GmbH has successfully implemented the first large-scale production of cavities that were previously produced vertically (production by machining processes (milling, drilling)) by means of newly constructed cavities produced with the SLM process (Selective Laser Melting). In addition, the novel, function-integrated, monolithic cavity was integrated into a newly adapted moulded foam machine. The technical know-how was transferred from the moulding foam machine to the cavity (mould). This also gives new impetus to the production of moulded foam automats.</p> <p>The results of the project were determined in a measurement programme and are characterised by the following positive effects or environmental impacts:</p> <p>Based on 60 moulds for a sample product "Basta Box Lid XL", the material consumption is reduced from 4,800 kg to 1,008 kg in the future and the energy consumption from 60.63 kWh/kg to 40.87 kWh/kg. In absolute terms, this means a reduction in energy consumption for the production of the 60 tools from 291,024 kWh to 41,197.73 kWh in the future, and thus a reduction in the amount of CO2 from 141,146.64 kg to 19,980.80 kg in the future.</p> <p>Using the new mould for the Basta Box Lid XL in the new adapted moulded foam machine results in a saving of 1,558,440 kWh of steam (78.63 %), 28,020 m3 of water (91.84 %) and a reduced CO2 quantity of 314,805 kg for a production quantity of 300,000 over the 5-year period.</p> <p>In the area of the Federal Republic of Germany, there are about 200 companies in the toolmaking sector that can apply the technology presented here accordingly.</p>	
<p>Keywords:</p> <p>Selective Laser Melting, moulded foam machine, cavity</p>	

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	8
1. Einleitung	10
1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens.....	10
1.2 Ausgangssituation	10
2. Vorhabensumsetzung	13
2.1 Ziel des Vorhabens.....	13
2.2 Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)	19
2.3 Umsetzung des Vorhabens.....	22
2.4 Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)	39
2.5 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten, Konzeption und Durchführung der Erfolgskontrolle	39
3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung	40
3.1 Bewertung der Vorhabensdurchführung	40
3.2 Stoff- und Energiebilanz	43
3.3 Umweltbilanz	79
3.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	84
3.5 Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren	87
4. Übertragbarkeit	87
4.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung	87
4.2 Modellcharakter/Übertragbarkeit.....	88
5. Zusammenfassung/Summary	90
5.1 Zusammenfassung	90
5.2 Summary	92

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anwendungsbeispiele für thermoplastische Partikelschaumstoffe	10
Abbildung 2: Darstellung der Kavität	11
Abbildung 3: EPP Platte (Werkzeug K68).....	14
Abbildung 4: Darstellung des SLM Verfahrensprinzip	19
Abbildung 5: Schematische Abbildung eines gedruckten Werkzeuges	20
Abbildung 6: Konzeptdarstellung - Vergleich der konventionellen Dampfkammergröße und neue Dampfkammer, die bei zukünftigen SLM-Werkzeugen nur noch erhalten bleibt	21
Abbildung 7: Maschinenkonzept des neuen Formschaumautomaten	22
Abbildung 8: Aufbau SLM 500 in Anlageneinhausung (15.11.2016)	23
Abbildung 9: Werkzeugsegment Basta Box XL Deckel (insgesamt 8 Segmente) (15.03.2017).....	24
Abbildung 10: Werkzeug Massagerolle Y672 (01.03.2017).....	24
Abbildung 11: „Basta Box Deckel XL“ aus gedruckter Kavität	25
Abbildung 12: Yogaball und Duo-Yogaball	25
Abbildung 13: Sonnenblende B	25
Abbildung 14: Yogarolle.....	26
Abbildung 15: Lautsprecherbox Zeppy	26
Abbildung 16: Schematische Darstellung der gedruckten Kavität „Basta Box Deckel XL“	27
Abbildung 17: Maschine 10 K68	27
Abbildung 18: Versenkung der Haube in maschinenseitiger Dampfkammer	28
Abbildung 19: Auf dem Formschaumautomat eingespanntes Werkzeug (Produkt Lunchbox) mit konventioneller Trägerplatte und gedruckten Kavitäten.....	28
Abbildung 20: Einspannen der Kavität „Basta Box Deckel XL“ in den Formschaumautomaten.....	29
Abbildung 21: Gedruckte Kavität „Basta Box Deckel XL“ im alten Maschinenkonzept (Wärmebild)	29
Abbildung 22: Konzeptdarstellung - Vergleich der konventionellen Dampfkammergröße und neue Dampfkammer, die bei zukünftigen SLM-Werkzeugen nur noch erhalten bleibt	30
Abbildung 23: Schematische Darstellung der gedruckten Kavität „Basta Box Deckel XL V3“ inkl. mitgedruckter Dampfkammer	31

Abbildung 24: Basta-Box Deckel optische Probleme mit Schattenwurf links und neu ohne rechts.....	32
Abbildung 25: „Basta Box Deckel XL V3“ gedruckte Kavität: Kern Segmente von hinten (o.l.) und von vorne (u.l.) und Haube Segment von vorne (rechts)	32
Abbildung 26: Sonnenblende A	33
Abbildung 27: Sonnenblende B	33
Abbildung 28: Behl BSH104	34
Abbildung 29: Konzeptskizze integrierte Dampfkammer, sog. Monoblockbauweise	35
Abbildung 30: Ansicht der segmentierten Kavität „Basta Box Deckel XL V3“ Haube von hinten; Minimale Dampfkammerhöhe (roter Maßpfeil)	36
Abbildung 31: Kern (links) und Haube (rechts) der Kavität „Basta Box Deckel XL V3“ im Formschaumautomaten eingespannt.....	36
Abbildung 32: Haube der Kavität „TerraEPP“ auf Rückwandplatte montiert.....	37
Abbildung 33: Kern der Kavität „TerraEPP“ eingespannt in neuen Formschaumautomaten.....	37
Abbildung 34: Prozessablauf am neuen Formschaumautomaten	38
Abbildung 35: Schnitt Kavität: oben strukturierte Oberflächen, mittig Kühlebene, unten Tree-Supports und Dampfkammer	41
Abbildung 36: Kompression im Druckfüller	55
Abbildung 37: Kavität hydraulisch schliessen	56
Abbildung 38: Füllen des Rohstoffmaterials	56
Abbildung 39: Bedampfen der Kavität	56
Abbildung 40: Wasserkühlung der Kavität über Sprühdüsen.....	57
Abbildung 41: Pneumatische gesteuertes Auswerken des Formteils	57
Abbildung 42: Werkzeug Sonnenblende B auf neuem Formschaumautomaten mit gedruckten Kavitäten inkl. Dampfkammer und Aufnahmeplatte je Kavität.....	70

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verbrauchsdarstellung für den konventionellen und innovativen Herstellungsprozess des Werkzeugs der EPP-Platte.....	15
Tabelle 2: Verbrauchsdarstellung konventionell und innovativ für die Gesamtkapazität (mind. 60 Werkzeuge)	16
Tabelle 3: Umweltentlastung EPP-Platte mit neuer Kavität am konventionellen Formschaumautomaten.....	17
Tabelle 4: Umweltentlastung Basta Box Deckel XL mit neuer Kavität am innovativen Formschaumautomaten	18
Tabelle 5: Messstellen für Fertigung der neuen Kavität.....	39
Tabelle 6: Messstellen am Formschaumautomaten für Fertigung mit neuer Kavität	40
Tabelle 7: Wiege-Protokoll Materialverbrauch der SLM 500.....	44
Tabelle 8: Energieverbrauch Laser KW 13 – KW 38 2017	45
Tabelle 9: Wiegeprotokoll Kavität alt	46
Tabelle 10: Gegenüberstellung Gewicht SLM-Werkzeug versus konventionellem Werkzeug Basta Box Deckel XL.....	47
Tabelle 11: Anteiliger Materialmehraufwand bei unterschiedlichen Kavitätsgeometrien.....	48
Tabelle 12: Gewichtseinsparung und Volumenreduzierung bei SLM-gedruckten Kavitäten gegenüber konventionellen Kavitäten.....	48
Tabelle 13: Energieverbrauch Laser KW 24 – KW 43 2019	50
Tabelle 14: Prozentualer Anteil kumulierter Pulververbrauch zu Gewicht Kavität (z.B. durch Stützstrukturen oder nicht wieder verwendbarem Material)	50
Tabelle 15: Wiegeprotokoll Kavität	52
Tabelle 16: Gegenüberstellung Gewicht SLM-Werkzeug mit und ohne Monoblock versus konventionellem Werkzeug Basta Box Deckel XL.....	53
Tabelle 17: Anteiliger Materialmehraufwand bei unterschiedlichen Kavitätsgeometrien.....	54
Tabelle 18: Gewichtseinsparung und Volumenreduzierung bei SLM-gedruckten Kavitäten gegenüber konventionellen Kavitäten.....	55
Tabelle 19: Gegenüberstellung Zykluszeit Basta Box Deckel XL	58
Tabelle 20: Gegenüberstellung Zykluszeit Yogaball 80 mm	58
Tabelle 21: Gegenüberstellung Zykluszeit Sonnenblende B	59
Tabelle 22: Gegenüberstellung Zykluszeit Yogarolle.....	59

Tabelle 23: Gegenüberstellung Zykluszeit Zeppy	60
Tabelle 24: Kalkulationstabelle unter Berücksichtigung diverser technischer Spezifikationen, z.B. Öffnungs- und Schließzeiten von Dampfventilen	62
Tabelle 25: Dampf- und Wasserverbrauch am Beispiel einer EPP-Platte	64
Tabelle 26: Dampf- und Wasserverbrauch Basta Box Deckel XL.....	65
Tabelle 27: Dampf- und Wasserverbrauch Yogaball	66
Tabelle 28: Dampf- und Wasserverbrauch Sonnenblende B.....	67
Tabelle 29: Dampf- und Wasserverbrauch Yogarolle	68
Tabelle 30: Dampf- und Wasserverbrauch Zeppy	69
Tabelle 31: Gegenüberstellung Zykluszeit Sonnenblende A	71
Tabelle 32: Gegenüberstellung Zykluszeit Sonnenblende B	72
Tabelle 33: Gegenüberstellung Zykluszeit Basta Box Deckel XL	72
Tabelle 34: Gegenüberstellung Zykluszeit Terra EPP	73
Tabelle 35: Dampf- und Wasserverbrauch Sonnenblende A Monoblockwerkzeug (neues WKZ neue Maschine)	75
Tabelle 36: Dampf- und Wasserverbrauch Sonnenblende B Monoblockwerkzeug (neues WKZ neue Maschine)	76
Tabelle 37: Dampf- und Wasserverbrauch Basta Box Deckel XL Monoblockwerkzeug (neues WKZ neue Maschine)	77
Tabelle 38: Dampf- und Wasserverbrauch Terra EPP Monoblockwerkzeug (neues WKZ neue Maschine)	78
Tabelle 39: Darstellung des Energieverbrauchs des Herstellungsprozess der EPP Platte (Antrag) sowie Vergleich Basta Box Deckel (Messprogramm)	80
Tabelle 40: Darstellung des Energieverbrauchs, konventionell und innovativ für die Gesamtkapazität (mind. 60 Werkzeuge).....	81
Tabelle 41: Umweltentlastung für den innovativen Herstellungsprozess der EPP-Platte im Vergleich zu Basta Box Deckel XL V2 und V3 ...	82
Tabelle 42: Amortisationsrechnung nach Erfolgskontrolle des Projekts	86

1. Einleitung

1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens

Die Overath GmbH entwickelte sich seit 1987 von einem Hersteller für Verpackungsmaterial zu einem Unternehmen, das komplette Mehrweg-Systemverpackungen herstellt, vorwiegend für die Automobilindustrie und deren Zulieferer. Zudem werden thermisch isolierende Transportboxen für Logistiker (DHL) und den Einzelhandel hergestellt. Die eingesetzten Thermoplaste, expandiertes Polypropylen (EPP), Styropor (EPS) und expandiertes Polyethylen (EPE), werden mit der Technologie des Formschäumens verarbeitet. Diese Thermoplaste haben trotz geringer spezifischer Dichte die Eigenschaft, mechanisch gut belastbar zu sein, bei hervorragenden Isoliereigenschaften und geringem Gewicht.

Im Jahre 2015 wurde die Overath EPP GmbH erworben, die am Standort Oebisfelde (Sachsen-Anhalt) entsprechende Formteile aus EPP herstellt. Diese wurde zunächst Zuwendungsempfängerin. Im Juli 2018 wurden die SLM (Selective Laser Melting) Aktivitäten von der Overath EPP GmbH an die Overath SLM GmbH verkauft und diese hat die Rechtsnachfolge des Zuwendungsbescheides übernommen.

Basierend auf dem erarbeiteten Know-How konzentriert sich die technologische Weiterentwicklung des Unternehmens mit seinen über 12 Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen auf die Weiterentwicklung der Technologie des Formschäumens. Dazu werden die Bereiche Werkzeugbau, Maschinen- und Anlagentechnik sowie der Formschaumprozess an sich weiterentwickelt.

1.2 Ausgangssituation

Die Produktion mit thermoplastischen Partikelschaumstoffen (EPS, EPP, EPE) durch Formschaumautomaten auf Basis von Kavitäten (Werkzeuge) bietet ein sehr differenziertes Anwendungsgebiet mit hohem Potential.

Die Produkte sind extrem leicht und trotzdem robust und recycelbar, wie die nachstehenden Abbildungen verdeutlichen sollen.



Der volumenreduzierbare Ladungsträger für die Automobilindustrie.



Der volumenreduzierbare Ladungsträger für die Industrie.

Abbildung 1: Anwendungsbeispiele für thermoplastische Partikelschaumstoffe

Problemstellung und Nachteile der Herstellung der Werkzeuge

Konventionelle Werkzeuge werden in der Regel aus Aluminiumblöcken spangebend bearbeitet und wiegen zwischen 200 - 500 kg. Trotz Einsatz von modernsten 5-Achs Fräszentren sind keine optimalen Strukturen durch den Prozess herzustellen. So entstehen ungleich dicke Wandungen, die energieverzehrende „Hotspots“ oder „Coldspots“ verursachen. Zudem lassen sich viele technische- und Designanforderungen mit dieser Art der Herstellung nicht realisieren.

Das Werkzeug ist in der Regel eine zweiteilige Aluminiumform und besteht aus den Kavitäten, einer Dampfkammer und einem Rahmen, der als Verbindung zum eigentlichen Formschaumautomaten inklusive aller Anschlüsse für die Medien dient.

Prozessbedingt muss die ganze Kavität zudem aufwendig durch spezielle Dampfdüsen perforiert werden. Bei diesem Vorgang wird die ganze Oberfläche der Kavität mit tausenden Bohrungen versehen, in die dann händisch Messingdüsen eingeschlagen werden. Diese Düsen haben den entscheidenden Nachteil, dass sie die Oberfläche des Formteils so verunstalten, dass das fertige Produkt eine pickelige Oberfläche erhält, die es für viele Anwendungen disqualifiziert.

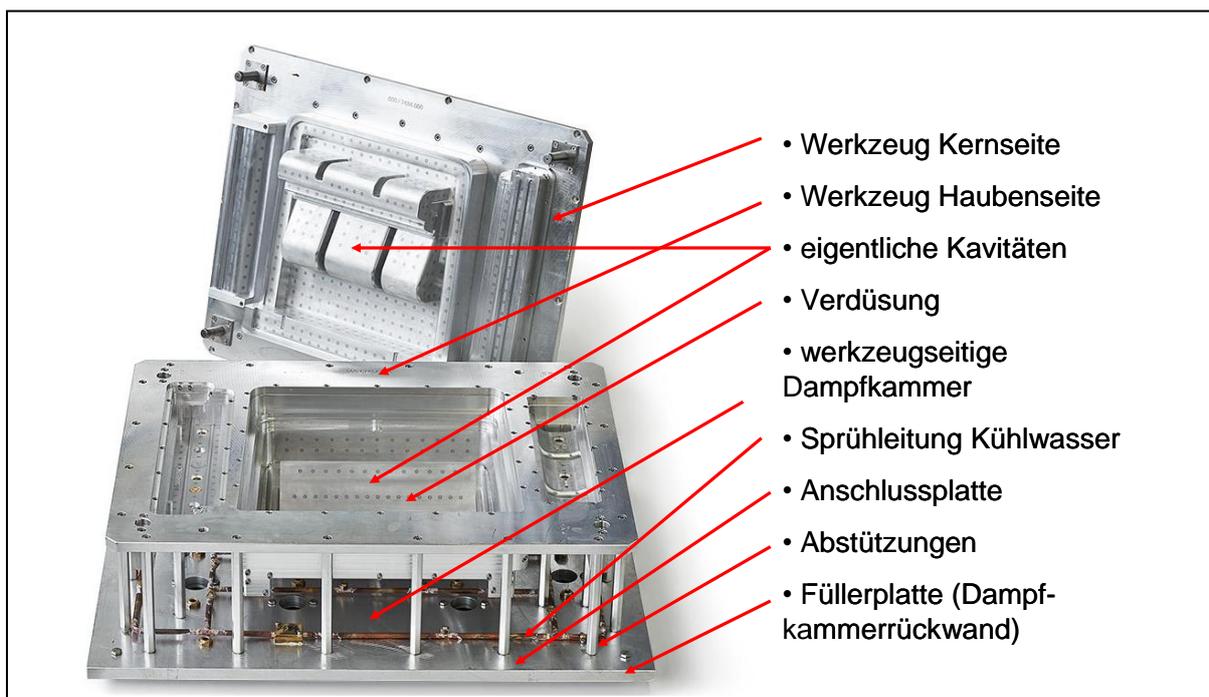


Abbildung 2: Darstellung der Kavität

Negativ ist der extrem hohe Ressourcenverbrauch für die Fertigung der Werkzeuge.

- Die verwendeten Kavitäten sind aufwändig herzustellen, werden energieintensiv vertikal aus Aluminium gefertigt (Fräsen und Bohren) und erzeugen dabei spanende Abfälle.
- Die Gestaltungsmöglichkeiten sind stark eingeschränkt.

Problemstellung und Nachteile des Formschäumungsprozesses mit bisher üblichen Kavitäten

Im Formschaumautomaten wird das zu bildende Formschaumteil im Werkzeug erzeugt. Die Partikel (EPP, EPS) werden mittels Druckluft und Vakuum in die Kavitäten gepresst. Heißdampf wird dann unter Druck in eine den Kavitäten vorgesezte Dampfkammer geleitet. Der Heißdampf kondensiert teilweise auf der Kavität und erhitzt sie dabei. Ein Teil des Dampfes strömt durch die in der Kavität befindliche Verdüsung und verschweißt dabei die Partikel.

Der heiße Dampf erhitzt die Oberfläche der thermoplastischen Partikel bis der Verschweißprozess einsetzt. Durch den aufgebauten Expansionsdruck werden die Partikel vollständig zu einem 3-dimensionalen Formteil verbunden. Zur Stabilisierung des Formteils wird die Dampfkammer mit der integrierten Kavität vollflächig mit Wasser besprüht und abgekühlt.

Negativ ist der extrem hohe Ressourcenverbrauch während des Formschäumens:

- Der Formschäumungsprozess ist bedingt durch sein Verfahren (eingepasste Werkzeugkonstruktion) äußerst energie- und dadurch kostenintensiv. Über 20 % der Produktionskosten sind Energiekosten.
- Für die Verschweißung der Partikel ist nur 1 % der eingesetzten Energie notwendig.
- Das eingesetzte Kühlwasser geht nahezu vollständig verloren.
- Die Taktzeiten zwischen Fertigung und Auswurf liegen zwischen 2 – 4 Minuten und sind im Vergleich zum Spritzgussverfahren zu hoch.
- Die Oberflächen der Formkörper sind optisch störend und erzeugen sichtbare Dampfdüsenabdrücke, die das Werkstück minderwertig erscheinen lassen.

Die Prozesstemperatur in der Kavität liegt bei 140 °C, worauf die gesamte Masse des Werkzeugs erhitzt werden muss. Das Formteil als erzieltes Produkt hingegen wiegt nur ca. 2 kg. Das bedeutet, dass fast die gesamte eingesetzte Energie (99 %) nicht für die Verschweißung der Partikel eingesetzt wird.

Beim Stabilisierungsprozess des Formteils wird die gesamte Werkzeugmasse auf 80 °C gekühlt. Dann startet der Zyklus erneut mit dem Aufheizen.

Die Energie des eingesetzten Wassers muss durch Kühltürme entzogen werden. Dieser Prozess verlängert auch die Zykluszeit.

Die Heißdampfproduktion wird durch eine zentrale Verdampfeinheit gewährleistet bei kontinuierlicher Erzeugung. Die Werkhallen heizen sich dabei extrem auf und müssen klimatisiert werden.

Der dargestellte Prozess ist extrem ressourcenverschwendend und wartungsintensiv.

2. Vorhabensumsetzung

2.1 Ziel des Vorhabens

Im Rahmen einer engen Kooperation zwischen der Overath GmbH mit der Fachhochschule Aachen, FB Maschinenbau und Mechatronik, im Forschungsbereich Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Rapid Prototyping und Weiterentwicklung des Additive Manufacturing, kristallisierte sich die Frage heraus, wie das hohe Potential der Partikelschaumstoffe einer weitergehenden Wertigkeit und Verwendung zugeführt werden könnte.

Zentrale Idee war dabei, die bislang vertikal¹ produzierten Kavitäten durch neu aufgebaute, mit dem SLM Verfahren² hergestellte Kavitäten zu ersetzen und weiterzuentwickeln. Das technische Know-How soll vom Formschaumautomat in das Werkzeug verlagert werden. Bisher bilden die gefrästen Werkzeuge nur die Kontur des Formteils ab und werden technisch so simpel wie möglich ausgeführt. Durch die Verwendung der gedruckten Werkzeuge werden die Schlüsselfunktionen in das Werkzeug integriert, um somit die Effizienz zu steigern.

Durch geförderte Forschungsvorhaben im Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (KF2292404FH1) wurde diese Fragestellung bearbeitet, wie auch die Idee der neuen Oberflächengestaltung des Formteils und die Integration von Kühlkanälen (EP141361) und Dampfkammer (EP150062) in die Kavität vorzunehmen ist. Dazu wurde die direkte Sprühkühlung, die im konventionellen Werkzeug über extra angefertigte Kupferleitungen und Düsen angefertigt wird, nun in Form einer Hohlkammerwand direkt in das Werkzeug integriert und kühlt es dadurch viel effizienter. Auch die Dampfkammer, die bei den Formschaumautomaten eine Standardgröße hat und nicht auf die Bauteilgeometrie angepasst wird, wurde mit in das Werkzeug integriert.

Die abgeschlossenen Forschungsvorhaben ergaben die nachfolgenden Pilotergebnisse:

- Die Wandflächen der Kavitäten aus dem SLM Verfahren sind gleichmäßig gestaltet und reduzierbar, was den Energieverbrauch bei der Produktion mit Partikelschaumstoffen auch durch kürzere Zykluszeiten wesentlich senkt und eine höhere Produktivität ermöglicht.
- Die konturnahe Kühlung ermöglicht die Reduzierung des Kühlwasserverbrauchs und einen trockenen Verarbeitungsprozess bei der Produktion mit Partikelschaumstoffen.
- Die Integration der Dampfkammer in die Kavität führt zu einer spektakulären Reduzierung des Energieeinsatzes bei der Produktion mit Partikelschaumstoffen.
- Die absolute Designfreiheit ermöglicht eine kreative Potentialfreisetzung und erlaubt bisher nicht realisierte Geometrien bei der Produktion mit Partikelschaumstoffen.

¹ Vertikal meint Fertigung durch spanabhebende Verfahren (Fräsen, Bohren).

² Das Selektive Laserschmelzen ist ein additives Fertigungsverfahren, bei dem der zu verarbeitende Werkstoff, in Pulverform in dünnen Schichten, auf einer Grundplatte, aufgebracht wird. Dieser Werkstoff wird dann mittels Laserstrahlung vollständig umgeschmolzen und bildet nach der Erstarrung eine feste Materialschicht.

Um die Nachteile des vertikalen Verfahrens zu eliminieren, beabsichtigte die Overath SLM GmbH die erstmalige großtechnische Anwendung des selektiven Laserschmelzens (SLM) mit additiver Fertigung³ umzusetzen.

Die neuartige, funktionsintegrierte, monolithische Kavität sollte künftig in einen vorhandenen Formschaumautomaten integriert werden.

Dies war nur durch Anwendung des „Selective Laser Melting“ (SLM) möglich, mit dem die neue Kavität realisiert werden sollte.

Im weiteren Verlauf sollte mit einem neuen, erstmalig auf die Anforderung der Kavitäten optimierten Formschaumautomaten, der eine ins Werkzeug integrierte Dampfkammer und Maschinenleichtbau beinhaltet, eine weitere Einsparung im Dampf- und Wasserverbrauch von mindestens 50 % erreicht werden. Durch eine angepasste Sensorik und Überwachung des Prozesses sollten deutlich einfacher und reproduzierbarer die Medienverbräuche aufgenommen, verwertet und bewertet werden.

Für die weitere Betrachtung der Umweltwirkung des Vorhabens sollte das nachfolgend hergestellte Produkt dienen:



Abbildung 3: EPP Platte (Werkzeug K68)

³ „Additive Fertigung“ oder wie international eingeführt „Additive Manufacturing“ ist der zusammenfassende Begriff, der außerhalb der Fachwelt auch mit 3-D Druck, generative Fertigung und Rapidprototyping bezeichnet wird.

Die Zielstellung des UIP-Projektes wird anhand der EPP Platte theoretisch aufgeführt und im späteren Verlauf durch Messungen an Beispielprodukten validiert. Für die Herstellung dieser EPP-Platte wird ein Werkzeug benötigt, dessen konventioneller und innovativer Herstellprozess mit den jeweiligen Verbräuchen in der nachfolgenden Tabelle 1 gegenübergestellt sind:

	Konventionell (vertikal produzierte Kavitäten) Material: Aluminium	Innovativ (selektiven Laserschmelzens (SLM)) Material: Edelstahlpulver	Einsparung
Materialverbrauch ⁴ in kg für ein Plattenwerkzeug 800x600x100mm	437,80	58,79	379,01 86,6 %
Energieverbrauch ⁵ in KWh Herstellung 1kg Kavität	60,11	33,50	26,61 44,3 %
Energieverbrauch in KWh für ein Plattenwerkzeug 800x600x100mm	26.314,71	1.969,18	24.345,53 92,5 %
CO ₂ -Menge ⁶ in kg für ein Plattenwerkzeug 800x600x100mm	13.867,85	1.037,76	12.830,09 92,5 %

Tabelle 1: Verbrauchsdarstellung für den konventionellen und innovativen Herstellungsprozess des Werkzeugs der EPP-Platte

⁴ Berechnet sich aus den Abmessungen des Produktes unter der Berücksichtigung eines durchschnittlichen Materialaufschlags und eines Erneuerungsfaktors für die notwendige siebenjährige Laufzeit.

⁵ Energiebedarf für Herstellung Material: Stahl hochlegiert (Legierungsanteil > 5 %): 95,66 MJ/kg; Aluminiumblech (0 % Recyclatanteil) 210 MJ/kg Quelle: <http://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/> + Energiebedarf für Werkzeugerstellung.

⁶ Primärenergieträger Strom: 527 g CO₂ je KWh (Stand: 2015)

Quelle: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/bilanz-2019-co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom>

Für die Gesamtkapazität von mind. 60 komplexen Werkzeugen pro Jahr der zwei Laseranlagen ergibt sich die nachfolgende Umweltbilanz:

	Konventionell (vertikal produzierte Kavitäten) Material: Aluminium	Innovativ (selektiven Laserschmelzens (SLM)) Material: Edelstahlpulver	Einsparung
Materialverbrauch in kg für 60 Plattenwerkzeuge 800x600x100mm	26.267,95	3.527,06	22.740,89 86,6 %
Energieverbrauch in KWh Herstellung 1kg Kavität	60,11	33,50	26,61 44,3 %
Energieverbrauch in KWh für 60 Plattenwerkzeuge 800x600x100mm	1.578.966,48	118.156,51	1.460.809,97 92,5 %
CO ₂ -Menge in kg für 60 Plattenwerkzeuge 800x600x100mm	832.115,33	62.268,48	769.846,85 92,5 %

Tabelle 2: Verbrauchsdarstellung konventionell und innovativ für die Gesamtkapazität (mind. 60 Werkzeuge)

In der Anwendung dieses Werkzeugs an den bestehenden konventionellen Formschaumautomaten ergeben sich darüber hinaus weitere Umweltentlastungen, die wir für das oben vorgestellte Produkt wie folgt berechnet haben:

Werkzeug EPP-Platte K68 Energie- und Wassereinsparungen im Prozess		2016	2017	2018	2019	2020	Summe über Laufzeit
Bauzahl pro Jahr		120.000	120.000	120.000	120.000	120.000	
Kavitäten / WKZ = Zyklen	1	120.000	120.000	120.000	120.000	120.000	
Zykluszeit konventionelles WKZ in sek	148						
Zykluszeit neues WKZ in Sek	85						
Dampfverbrauch kg konventionelles WKZ	13,5	1.620.000	1.620.000	1.620.000	1.620.000	1.620.000	
Dampfverbrauch kg neues WKZ	2,8	336.000	336.000	336.000	336.000	336.000	
Einsparungen Dampf kg		1.284.000	1.284.000	1.284.000	1.284.000	1.284.000	
Umrechnungsfaktor Dampf kg->KWh	0,888						
Energieeinsparung kWh pro kg Dampf	kWh	1.140.192	1.140.192	1.140.192	1.140.192	1.140.192	5.700.960
Dampferzeugung über Erdgas (CO ₂ -Äquivalent in kg)	0,202						
CO ₂ -Einsparung in	kg	230.319	230.319	230.319	230.319	230.319	1.151.594
Wasserverbrauch Liter konventionelles WKZ	385	46.200.000	46.200.000	46.200.000	46.200.000	46.200.000	
Wasserverbrauch Liter neues WKZ	34	4.080.000	4.080.000	4.080.000	4.080.000	4.080.000	
Einsparungen Wasser Liter		42.120.000	42.120.000	42.120.000	42.120.000	42.120.000	210.600.000
Einsparungen Wasser	m ³	42.120	42.120	42.120	42.120	42.120	210.600
Werte entsprechen den Maschinenparametern							

Tabelle 3: Umweltentlastung EPP-Platte mit neuer Kavität am konventionellen Formschaumautomaten

Die Tabelle 3 zeigt, dass die neu eingesetzte Kavitätstechnologie zwar enorme Einsparungen in konventionellen Formschaumautomaten generieren kann, eine angepasste Maschinenteknologie jedoch erst das volle Potential dieser Kavitätstechnologie umsetzen kann. Durch die große Masse des Formschaumautomaten wird ein Großteil der eingesetzten Energie durch den Maschinenrahmen absorbiert.

Diese Energie kann durch ein angepasstes Maschinenkonzept minimiert werden. Deshalb sollte in 2019 eine weitere Bewertung der Energieverbräuche auf einen innovativen Formschaumautomaten anhand eines neuen Musterbauteils Basta Box Deckl XL durchgeführt werden, deren Ergebnisse in der nachfolgenden Tabelle 4 prognostiziert wurden.

Energieeinsparungen im Prozess		2017	2018	2019	2020	2021	Summe über Laufzeit
Bauzahl pro Jahr		60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	300.000
Kavitäten / WKZ = Zyklen	1	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	300.000
Dampfverbrauch kg neues WKZ - alte Maschine	2,13	127.800	127.800	127.800	127.800	127.800	
Dampfverbrauch kg neues WKZ - neue Maschine	0,8	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	
Einsparungen Dampf kg		79.800	79.800	79.800	79.800	79.800	
Umrechnungsfaktor Dampf kg->KWh	0,888						
Energieeinsparung kWh pro kg Dampf	kWh	70.862	70.862	70.862	70.862	70.862	354.312
Dampferzeugung über Erdgas (CO ₂ -Äquivalent in kg)	0,202						
CO ₂ -Einsparung in	kg	14.314	14.314	14.314	14.314	14.314	71.571
Wasserverbrauch Liter neues WKZ - alte Maschine	10	600.000	600.000	600.000	600.000	600.000	
Wasserverbrauch Liter neues WKZ - neue Maschine	5	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	
Einsparungen Wasser Liter		300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	1.500.000
Einsparungen Wasser	m ³	300	300	300	300	300	1.500

Tabelle 4: Umweltentlastung Basta Box Deckel XL mit neuer Kavität am innovativen Formschaumautomaten

2.2 Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)

Selective Laser Melting (SLM) ist ein additives Fertigungsverfahren, aus dem Bereich der 3D-Druck-Verfahren, um räumliche Strukturen durch Sintern aus einem pulverförmigen, metallischen Ausgangsstoff⁷ (Edelstahl) herzustellen.

Edelstahl hat gegenüber anderen Werkstoffen, insbesondere dem herkömmlich verwendeten Aluminium Eigenschaften, die sowohl bei der Erstellung der Kavität mittels SLM, wie auch im späteren Produktionsprozess von Vorteil sind. Grundsätzlich kann man mit Edelstahlpulver eine detailliertere Auflösung im SLM Verfahren erreichen, wodurch feinere Strukturen möglich sind. Weiterhin neigt Edelstahlpulver zu einem geringeren Verzug, wodurch weitere Verarbeitungsschritte, z.B. eine Wärmenachbehandlung, vermieden werden. Auch hat Edelstahl eine bessere Altersbeständigkeit als Aluminium. Da Edelstahl eine höhere Festigkeit als Aluminium aufweist, können in den Kavitäten geringere Wandstärken realisiert werden. Dies ist nicht nur materialsparend, sondern führt auch im Produktionsprozess zu geringerem Energieeinsatz, da weniger Material erhitzt bzw. gekühlt werden muss. Für den späteren Produktionsprozess ist von Bedeutung, dass durch die höhere Festigkeit von Edelstahl im Vergleich zu Aluminium, die Instandhaltungskosten reduziert werden können.

Das Werkstück wird Schicht für Schicht aufgebaut. Durch die Wirkung der Laserstrahlen können so beliebige dreidimensionale Geometrien auch mit Hinterschneidungen erzeugt werden, z. B. Werkstücke, die sich in konventioneller mechanischer oder gießtechnischer Fertigung nicht herstellen lassen. Die nachfolgende Abbildung 4 verdeutlicht das SLM Verfahrensprinzip.

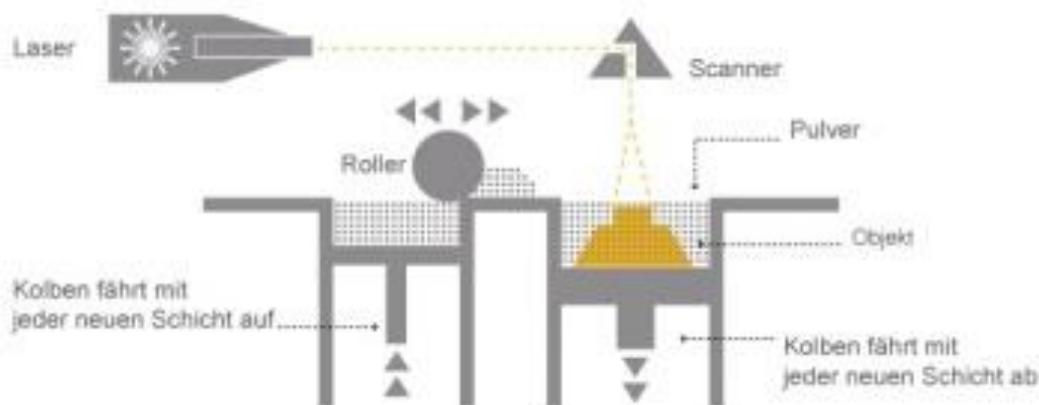


Abbildung 4: Darstellung des SLM Verfahrensprinzip

Nachdem eine Schicht erstarrt ist, wird die Bauplattform um eine Schichtstärke, 20-50 µm üblicherweise, gesenkt und neues Pulver über einen Roller aufgetragen und die nächste Schicht wird aufgeschmolzen. So entsteht Schicht für Schicht das komplette Bauteil und es wird nur das Material verbraucht, welches für das Bauteil benötigt wird. Das nicht aufgeschmolzene Pulver kann komplett wiederverwendet werden. Durch den schichtweisen

⁷ Edelstahl in Pulverform, chemische Zusammensetzung entsprechend 1.4404, X 2 CrNiMo 17 13 2, 316L

Aufbau können komplexe, monolithisch aufgebaute Bauteile aufgebaut werden, die herkömmlich nicht oder nur sehr aufwendig zu fertigen wären. Beispielhaft visualisiert Abbildung 5 ein neues gedrucktes Werkzeug mit seinen Eigenschaften.

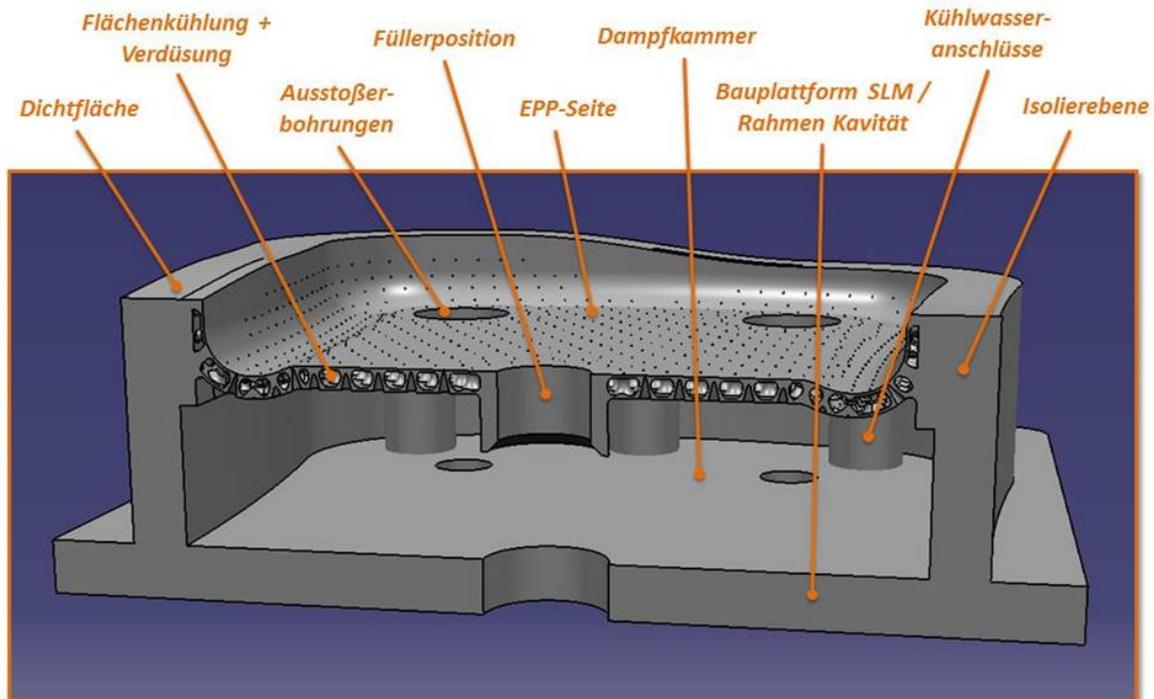


Abbildung 5: Schematische Abbildung eines gedruckten Werkzeuges

Durch die Integration aller wesentlichen Komponenten wie der Dampfkammer, der konturnahen hoch energieeffizienten Kühlung, aber auch einer Isolierung sowie der benötigten Anschlüsse und Schnittstellen zum Formschaumautomaten, ist eine ressourcenschonende Produktion der dargestellten Kavitäten im monolithischen Aufbau ohne weitere herkömmlich notwendigen Prozessschritte in einem Prozessschritt, dem 3D-Drucken, möglich.

Dabei sind alle integrierten Komponenten auf die jeweiligen Anforderungen der spezifischen Kavität optimiert und schöpfen somit das gesamte Potential des 3D-Druckens von Metall aus.

Beispielsweise verläuft die Kühlung dabei gleichmäßig nah an der Oberfläche und temperiert das in der Kavität befindliche Material effizient und ressourcenschonend. Die Dampfkammer ist auf das benötigte Volumen der Kavität reduziert und an die spezifischen Anforderungen angepasst. Auch hier ist eine deutliche Ressourceneinsparung und Energieschonung in Bezug auf die konventionelle Standard-Dampfkammer, die eine allgemeine Lösung für eine breite Masse von Produkten darstellt, aber eben nicht auf das jeweilige Produkt angepasst ist, vorzufinden.

Für die Umsetzung der Werkzeuge im 3D-Druck sollen zwei unterschiedliche 3D-Druck Laseranlagen in Bezug auf die Bauraumgröße beschafft werden. Damit soll das gesamte

Spektrum der Werkzeuganwendungen erfüllt werden, da große und kleine Werkzeuge entsprechend auch einen angepassten Bauraum benötigen, um möglichst effizient produzieren zu können.

Auf Basis der gesammelten Ergebnisse sollte mit einem neuen, auf die Anforderung der neuartigen Kavitäten, optimierten Formschaumautomaten die weiteren Umweltvorteile dargelegt werden. Durch eine integrierte Dampfkammer in der neuartigen Kavität kann die Maschinendampfkammer künftig eliminiert und somit die Aufheizung der kompletten Maschinenumgebung drastisch reduziert werden. Die eingesetzte Energie wird somit fokussiert in die benötigte Verschäumung der EPP-Perlen investiert und Energieverluste durch die große Masse der Maschine reduziert.

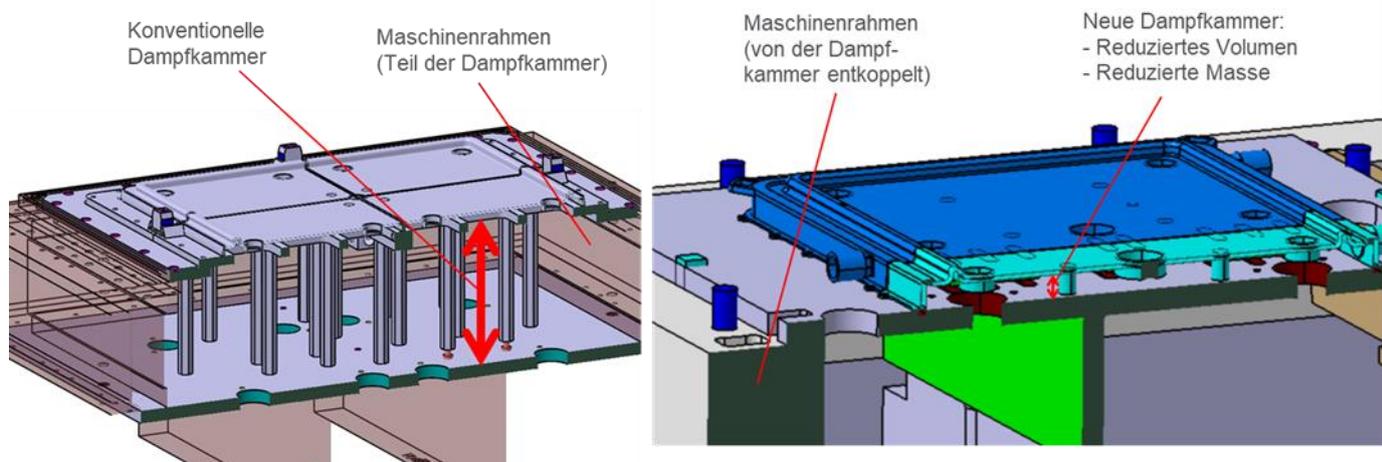


Abbildung 6: Konzeptdarstellung - Vergleich der konventionellen Dampfkammergröße und neue Dampfkammer, die bei zukünftigen SLM-Werkzeugen nur noch erhalten bleibt

In Abbildung 6 ist der Basta Box Deckel in der Standard Dampfkammer dargestellt. Hier ist das Potential dargestellt, was ein angepasster Formschaumautomat bieten würde. In diesem Fall ist die Aufnahmeplatte nach hinten freigeätzt, da der Dampf durch die Standard Dampfkammer einströmt und anschließend durch die gedruckte Kavität strömt. Könnte nur die gedruckte Kammer verwendet werden, würde das konventionelle Dampfkammervolumen komplett wegfallen und die Aufnahmeplatte hätte einen direkten Dampfanschluss und würde nur die dargestellte Höhe als Kammervolumen besitzen. Der Kompromiss der aufeinander gesetzten Dampfkammern, Standard und darauf gedruckt, ist dem Maschinenkonzept geschuldet und durch fehlende Möglichkeiten der zusätzlichen Dampfableitung nicht anders umsetzbar.

Das Maschinenkonzept des neuen Formschaumautomaten berücksichtigt dabei die nachfolgenden Anforderungen unserer neuartigen Werkzeugtechnologie:

- Leichtbau des gesamten Maschinenkonzepts durch drastische Massereduktion der Kavitätstechnologie inklusive Werkzeug.
- Ansteuerung der in das Werkzeug verlagerten Dampfkammer, die nicht konventionell an die Maschine gebunden ist und dadurch deutlich reduziert werden kann.
- Integration der Füllertechnologie direkt in das Werkzeug und nicht in das Gesamtmaschinenkonzept.

- Ansteuerung bzgl. Dampf und Wasser bei jeder einzelnen Kavität durch die Integration aller wesentlichen Komponenten in die neue Werkzeugumgebung und den entsprechenden Kavitäten.
- Einfacherer Werkzeugwechsel durch Umsetzung einer Dockingstation, bei der nicht das komplette Werkzeug, sondern nur einzelne Kavitäten getauscht werden können.
- Möglichkeit der Temperierung der Werkzeuge mit einem geschlossenen Temperierkreislauf.
- Exaktere Dampfsteuerung durch angepasste Ventiltechnologie, um möglichst wenig Energie in die Kavität einzubringen und diese entsprechend zu steuern.
- Messtechnik, die die Verbräuche der Maschine quantifizieren kann.
- Drucksensorik für eine materialspezifische Entformung nach Druckabbau der EPP-Perlen.

Die nachfolgende Abbildung 7 verdeutlicht das Maschinenkonzept schematisch.

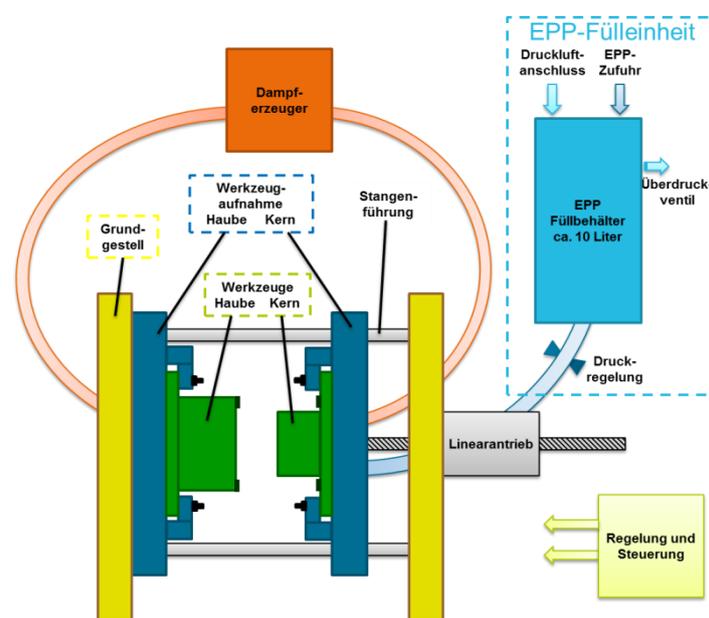


Abbildung 7: Maschinenkonzept des neuen Formschaumautomaten

2.3 Umsetzung des Vorhabens

Das Projekt wurde im Zeitraum 28.04.2016 – 31.05.2020 umgesetzt.

Zu Beginn des Vorhabens wurde bei der Fa. SLM Solution ein Benchmarkbauteil beauftragt. Dies bedeutet, dass ein Bauteil mit von uns spezifizierten Anforderungen vor dem Kauf eines Laser 3D-Druckers auf einer gleichwertigen Anlage bei SLM-Solutions aufgebaut wird, um sicher zu stellen, dass dieses Bauteil mit der entsprechenden Qualität produziert werden kann.

Bei unseren Vorversuchen bei der FH Aachen hatten wir mit einem Laser der Fa. Concept Laser GmbH aus Lichtenfels gearbeitet, der den Schichtaufbau der Metallstruktur mit einem Laser realisiert hatte und nur einen weniger als halb so großen Bauraum besaß.

Im Rahmen der Produktion dieses Benchmarkbauteiles traten Probleme auf. SLM hatte bisher nur mit Aluminium- und Werkzeugstahlpulver auf der größten zur Verfügung stehenden Anlage, der SLM-500, gearbeitet und zudem wurde bisher noch nie ein Bauteil mit Edelpulver in der von uns gewünschten Größe produziert.

Zudem arbeitete die Anlage mit vier Lasern. Während ein Laser nur ein lokales Schmelzbad erzeugt, entstehen bei vier simultan arbeitenden Lasern vier Schmelzbäder, die zu einem größeren Temperaturgradienten führen. Damit stellte sich ein verändertes Verzugsverhalten ein, welches neue Herausforderungen in der Prozessführung mit sich brachte. Auch die Stützstrukturen (kleine PINS) für das Bauteil mussten neu überdacht werden, da die zu beschichtende Fläche deutlich größer war und somit die Beschichtungseinheit darauf angepasst werden musste.

Nachdem diese Punkte geklärt werden konnten, wurde die erste Laseranlage der Firma SLM Solution am 26. August 2016 bestellt. Die Anlieferung der Anlage erfolgte am 14. November 2016.



Abbildung 8: Aufbau SLM 500 in Anlageneinhausung (15.11.2016)

Der Probetrieb begann in der 48. KW 2016 (ab 28.11.2016). Die ersten beiden Werkzeuge wurden fertiggestellt, wie die beiden nachfolgenden Bilder belegen.

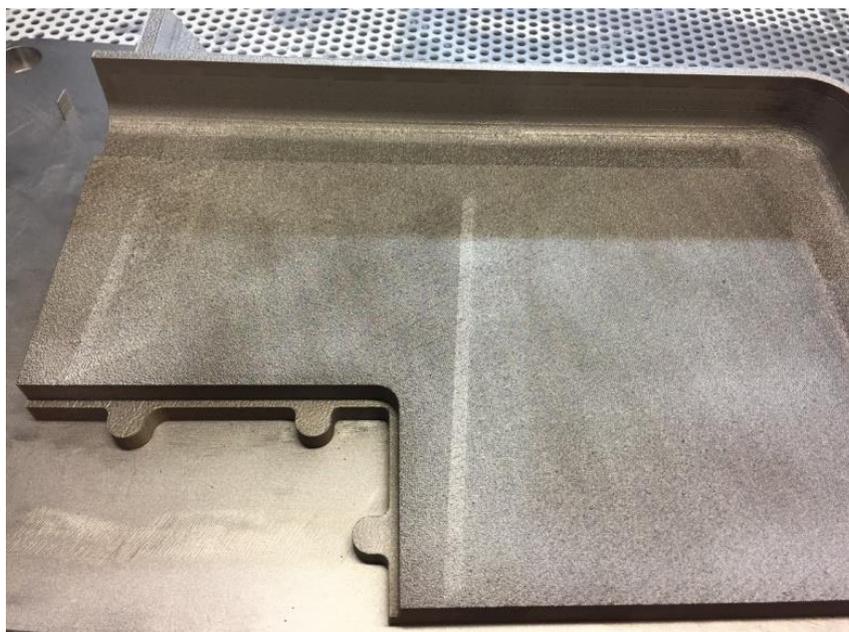


Abbildung 9: Werkzeugsegment Basta Box XL Deckel (insgesamt 8 Segmente) (15.03.2017)

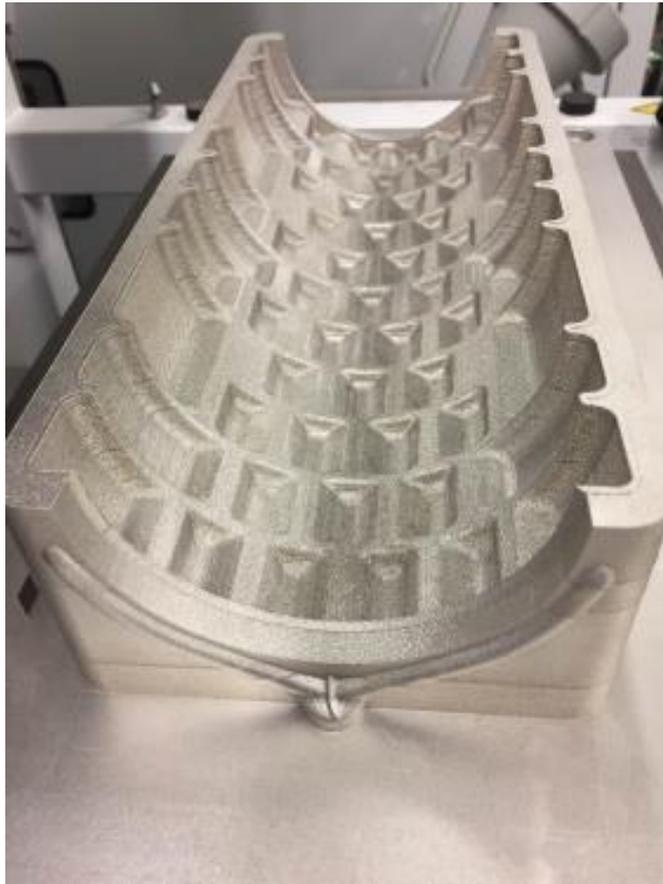


Abbildung 10: Werkzeug Massagerolle Y672 (01.03.2017)

Mit der Inbetriebnahme des ersten Lasers wurden insgesamt 5 Kavitäten für das alte Maschinenkonzept mit Standard Dampfkammer gedruckt. Weitere Produkte mit integrierter Dampfkammer werden im späteren Verlauf hergestellt und auf den neuen Formschaumautomaten adaptiert.

Fünf Produkte sollten die Grundlage für die durchzuführenden Messungen mit dem alten Formschaumautomaten sein. In Kapitel 2.5 - Tabelle 5 werden die Messungen am Laser erläutert, in Tabelle 6 die Messungen im EPP Prozess am Formschaumautomat, da sie mit alten und neuen Werkzeugen hergestellt werden:

1. Basta Box Deckel XL
2. Yogaball
3. Sonnenblende B
4. Yogarolle
5. Lautsprecherbox Zeppy

Die nachfolgenden Abbildungen 11 bis 15 zeigen die o.a. Produkte:

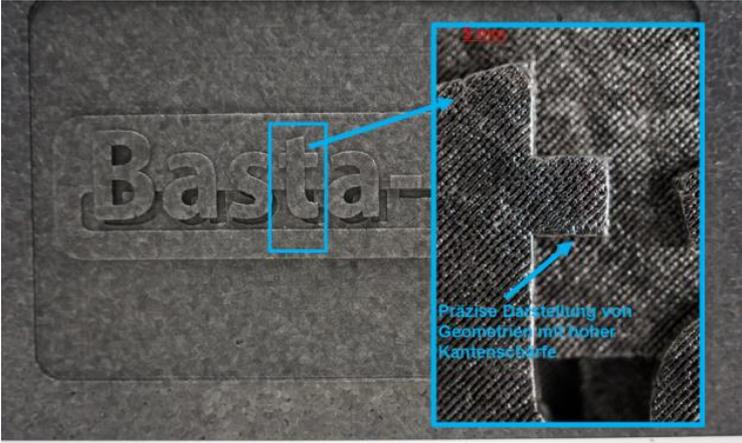


Abbildung 11: „Basta Box Deckel XL“ aus gedruckter Kavität



Abbildung 12: Yogaball und Duo-Yogaball



Abbildung 13: Sonnenblende B



Abbildung 14: Yogarolle



Abbildung 15: Lautsprecherbox Zeppy

Anhand des „Basta Box Deckel XL“ soll der Druck und der Einsatz der Kavität im Formschaumautomaten beispielhaft vorgestellt werden. Die nachfolgende Abbildung 16 zeigt schematisch den Aufbau des Werkzeugs des Basta Box Deckels XL. Hier sind vor allem die 4 einzelnen Segmente je Werkzeugseite (4 Segmente Haube und 4 Segmente Kern) zu erkennen, die separat gedruckt und anschließend durch Fügen mittels Schraubverbindung zusammengesetzt werden. Die Segmentierung ist hierbei erforderlich, da die Größe des EPP Bauteils (600mmx400mm) die Größe des verfügbaren Bauraums der Laseranlage übersteigt. Um das Produkt trotzdem umsetzen zu können, wird der gedruckte Teil aufgeteilt und einzeln gefertigt.

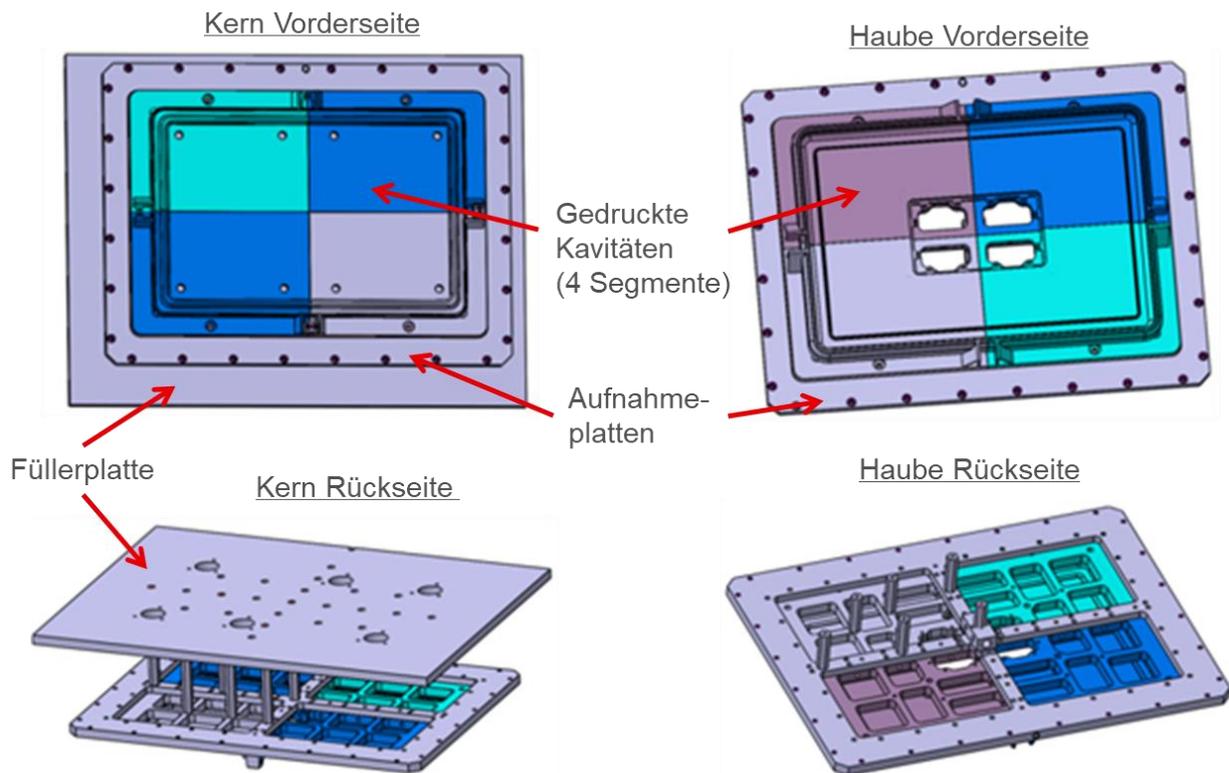


Abbildung 16: Schematische Darstellung der gedruckten Kavität „Basta Box Deckel XL“

Die gedruckten Kavitäten wurden ab Oktober 2017 nacheinander auf den bestehenden, bisher genutzten Formschaumautomaten (Maschine 10: K68) aufgebracht.



Abbildung 17: Maschine 10 K68

Bei dieser Anlage wird die Haube in der maschinenseitigen Dampfkammer versenkt, wie die nachfolgende Abbildung 18 verdeutlicht.

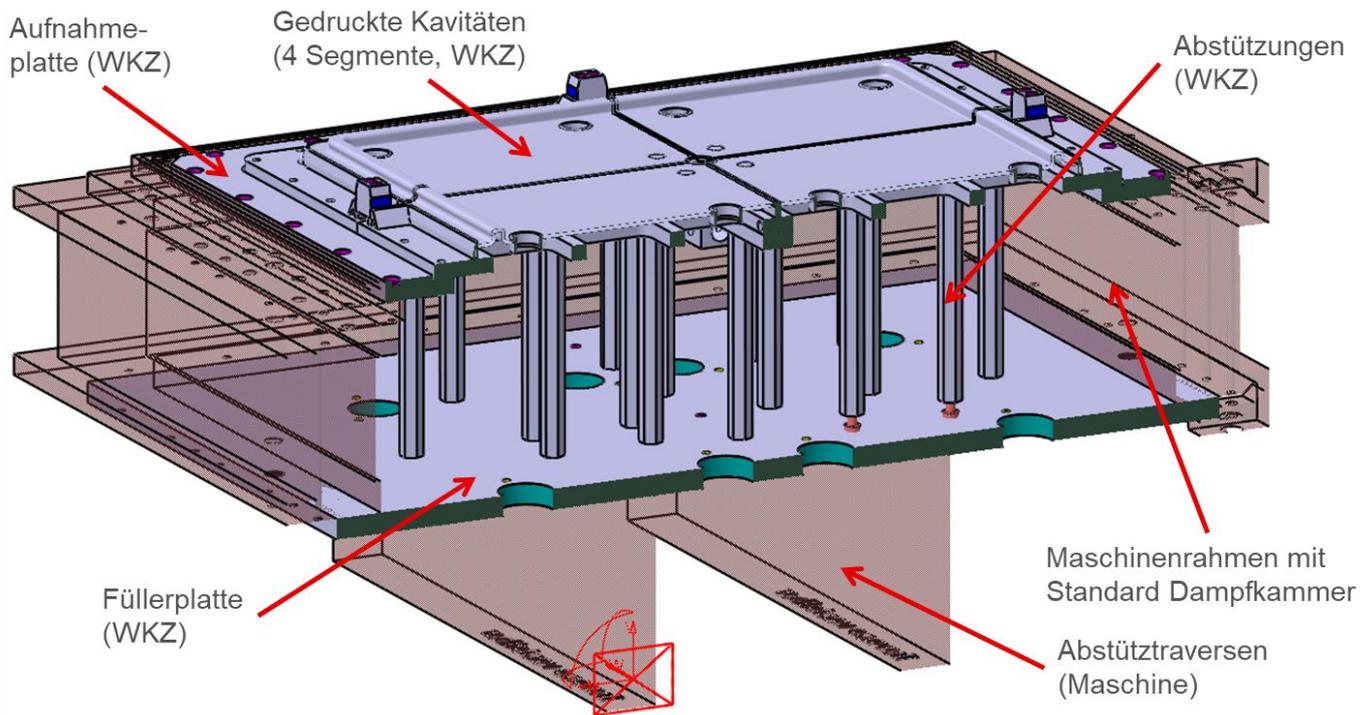


Abbildung 18: Versenkung der Haube in maschinenseitiger Dampfkammer

Die entsprechenden Kavitäten mussten noch auf eine Trägerplatte aufgebracht und in die bestehenden Formschaumautomaten integriert werden.

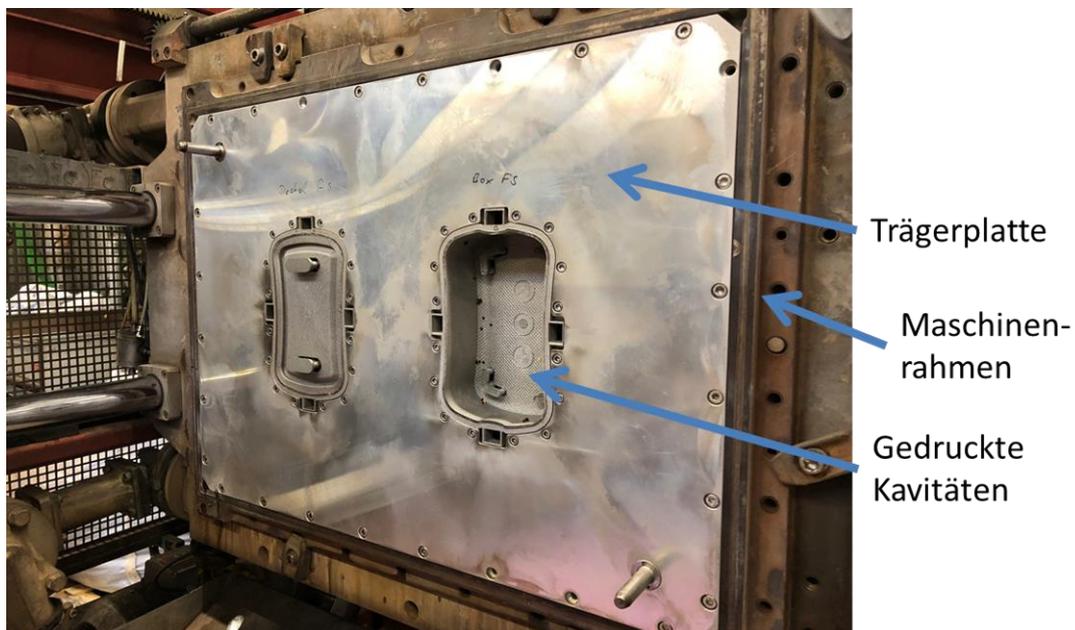


Abbildung 19: Auf dem Formschaumautomat eingespanntes Werkzeug (Produkt Lunchbox) mit konventioneller Trägerplatte und gedruckten Kavitäten

Die nachfolgenden Abbildung 20 verdeutlicht die technische Realisierung des „Basta Box Deckel XL“ als gedruckte Kavität auf den Formschaumautomaten.



Abbildung 20: Einspannen der Kavität „Basta Box Deckel XL“ in den Formschaumautomaten

Die nachfolgende Abbildung 21 verdeutlicht den Einsatz der gedruckten Kavität „Basta Box Deckel XL“ in das bestehende Maschinenkonzept und die damit verbundene Wärmeaufnahme in den kompletten Maschinenrahmen.

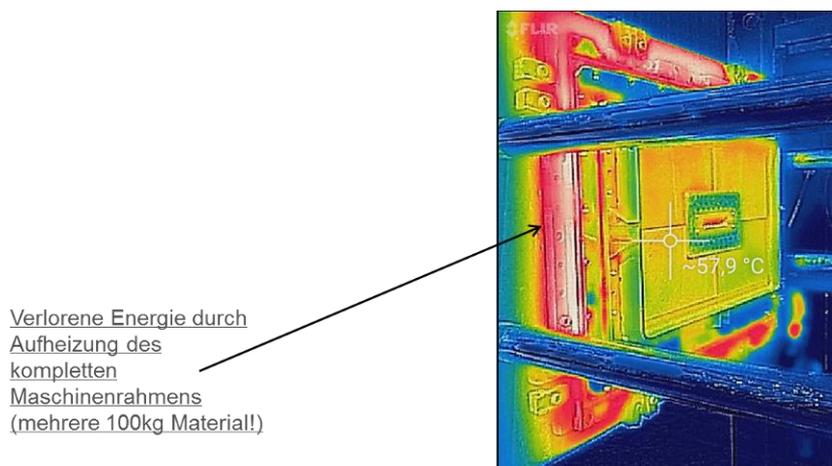


Abbildung 21: Gedruckte Kavität „Basta Box Deckel XL“ im alten Maschinenkonzept (Wärmebild)

Die gedruckte Kavität „Basta Box Deckel XL“ hat bewiesen, dass eine Segmentierung von gedruckten Werkzeugen möglich ist. Somit kann die Technologie auf bestehenden Maschinenkonzepten direkt umgesetzt werden und ist technisch gesehen auch für die größeren Maschinentypen valide.

Das volle Potential der Kavität wird aber erst mit einem eigenen Maschinenkonzept vollständig ausgeschöpft. Dazu bedarf es einer in das Werkzeug integrierten Dampfkammer und einem geschlossenen Kühl- (Temperier-) kreislauf sowie einer dezentralen Dampfversorgung.

Wie die Abbildung 22 verdeutlicht, sind in Zukunft zwei Konzepte für unterschiedliche Maschinentypen möglich:

- Bei bestehenden Konzepten wird die Haube in maschinenseitiger Standard Dampfammer versenkt. Sie wird weiterhin mitgenutzt.
- Bei einer in die Kavität integrierten Dampfammer für Monoblock-Anlagen und bei dem darauf angepassten Formschaumautomaten wird die Dampfammer direkt mitgedruckt und eine Standard Dampfammer ist dabei nicht mehr vorgesehen.

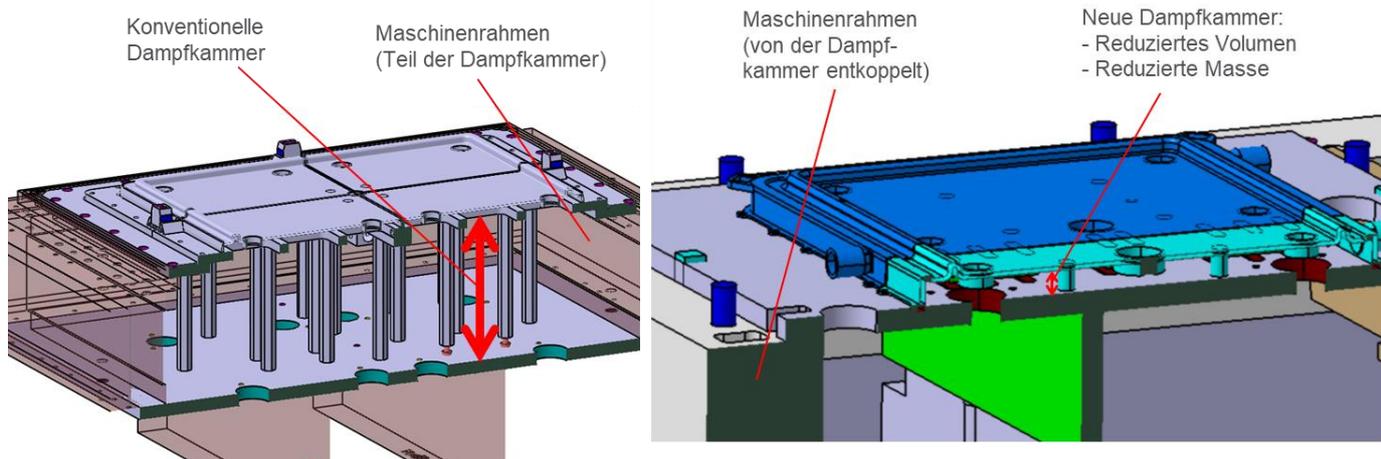


Abbildung 22: Konzeptdarstellung - Vergleich der konventionellen Dampfammergröße und neue Dampfammer, die bei zukünftigen SLM-Werkzeugen nur noch erhalten bleibt

Die Investition in den zweiten Laser sowie die Investition in den innovativen Formschaumautomaten mit Monoblockfunktion erforderten eine Überarbeitung des Werkzeugaufbaus und führten zu weiteren Einsparungen im Formschaumprozess. Der zweite Laser ermöglicht die Nutzung erweiterter SLM-Prozessparameter sowie die Generierung anderer Stützstrukturen, die für den Aufbau der Monoblockwerkzeuge inkl. der gedruckten Dampfammer erforderlich sind.

Monoblockbauweise bedeutet, dass die Dampfammer mit in das Werkzeug integriert wird und durch ein minimales Volumen abgebildet werden kann. Aus diesem Grund wurde die bisherige gedruckte Kavität um einen gedruckten Rahmen erweitert, der die Begrenzung der Dampfammer darstellte.

Die Inbetriebnahme des zweiten Lasers wurde an vier Projekten durchgeführt, wobei eine aktualisierte Version des Basta Box XL Deckels, sog. V3, im Monoblockkonzept gefertigt wurde, der die Segmentierung von großen Bauteilen im Monoblockkonzept validiert.

Vier Produkte sollten die Grundlage für die durchzuführenden Messungen sein:

1. Yogaball D80 & D120 V2019
2. Sonnenblende B
3. Trennsteg XXL

4. Basta Box Deckel XL V3

Der Druck und der Einsatz der Kavität im Formschaumautomaten wird nachfolgend anhand des „Basta Box Deckel XL V3“ beispielhaft vorgestellt. Die nachfolgende Abbildung 23 zeigt schematisch die gedruckte Kavität des Basta Box Deckels XL V3 mit der verkleinerten Dampfkammer.

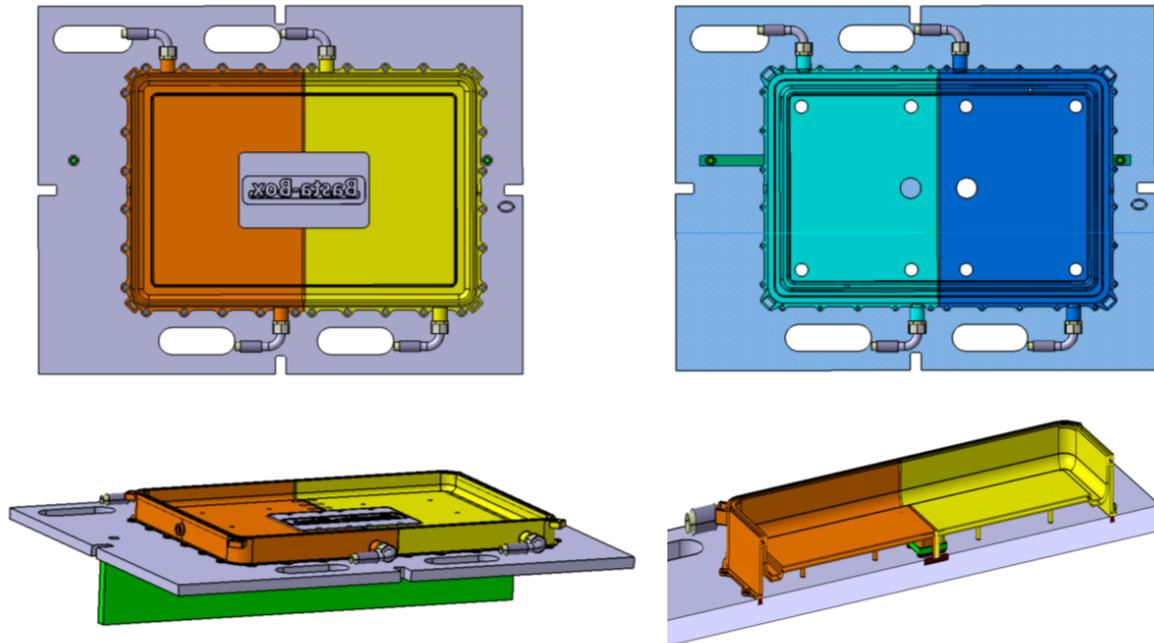


Abbildung 23: Schematische Darstellung der gedruckten Kavität „Basta Box Deckel XL V3“ inkl. mitgedruckter Dampfkammer

Die Optimierungsmöglichkeiten durch die Nutzung des zweiten Lasers, wie beispielsweise die Verbesserung der Parameter für die Stützstrukturen sowie die Verwendung des neuen Dampfkammerkonzeptes führte zu einer Überarbeitung des Segmentierungskonzeptes für den V3 des Basta Box Deckels.

Zum einen konnten die unterschiedlichen optischen Effekte, die durch verschiedene Druckrichtungen entstanden waren, eliminiert werden, sodass es nun keine optischen Unterschiede mehr zwischen den Oberflächen der einzelnen Segmente gab. Weiterhin wurden die Abdrücke der Trennkanten im Formteil erheblich reduziert. Dies wurde durch eine vorgelagerte Simulation der im SLM-Prozess thermisch induzierten Verzüge schon in der Konstruktionsphase erreicht und durch eine digitale Verformung der Bauteile behoben. Insofern konnten die optischen Probleme der Segmentierung jetzt vermieden werden.



Abbildung 24: Basta-Box Deckel optische Probleme mit Schattenwurf links und neu ohne rechts

Weiterhin wurde durch die Neukonzeptionierung die Reduzierung der Segmente von vier auf zwei pro Werkzeughälfte realisiert. Somit mussten anstatt acht „Baujobs“ nur noch vier „Baujobs“ für die Fertigung des gesamten Werkzeugs gedruckt werden. Die Bezeichnung „Baujobs“ bezieht sich auf den Druckprozess und beschreibt einen Fertigungszyklus im 3D-Drucker. Ein Baujob beinhaltet das Aufschweißen von einer definierten Anzahl von Schichten auf einer Bauplatzform (Stahlplatte), die in einem oder mehreren Bauteilen resultieren.



Abbildung 25: „Basta Box Deckel XL V3“ gedruckte Kavität: Kern Segmente von hinten (o.l.) und von vorne (u.l.) und Haube Segment von vorne (rechts)

Das volle Potential der neuartigen Werkzeugkonstruktion wurde in Verbindung mit dem neuen Formschaumautomaten erreicht. Dazu war die integrierte Dampfkammer und ein Kühl- und Temperierkreislauf in den Kavitäten vorgesehen.

Des Weiteren wurden für die Evaluation, die oben beschriebenen weiteren Produkte konstruiert und gedruckt. Entgegen der eigentlichen Planung musste das Produkt „Yogaball“ durch einen weiteren Typ einer Sonnenblende ersetzt werden. Dies resultierte aus einem konkreten Auftrag, der in der Produktion umgesetzt werden musste und somit direkt in der SLM Technologie gefertigt wurde. Der weitere Typ hat die Bezeichnung „Sonnenblende B“.

Folgend jeweils ein Bild zur Sonnenblende A und B:



Abbildung 26: Sonnenblende A

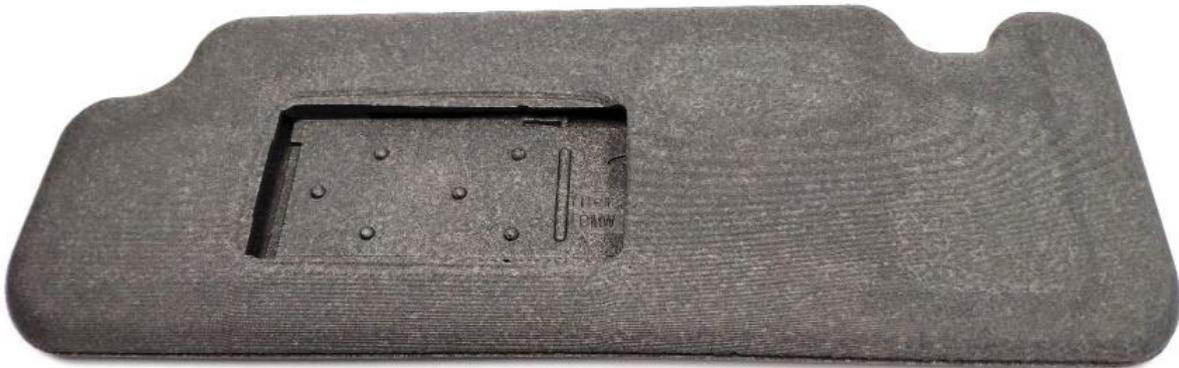


Abbildung 27: Sonnenblende B

Erfolgskontrolle zweiter Laser und Formschaumautomat

Nach der Installation des neuen Formschaumautomaten im Juli 2019 wurde die Erfolgskontrolle der Kavitäten in der neuen Produktionsumgebung durchgeführt. Diese teilt sich in zwei Schritte auf:

1. Erfolgskontrolle mit neuer Kavität **klein** auf neuem Formschaumautomaten
2. Erfolgskontrolle mit neuer Kavität **groß** auf neuem Formschaumautomaten

Um den Einfluss der Kavitätengröße auf die Performance der Werkzeuge zu evaluieren, wurde hier zunächst mit den oben vorgestellten kleineren Werkzeugen gestartet, um dann die

Segmentierung mit einzubringen und die Komplexität der Werkzeuge im zweiten Schritt somit zu erhöhen.

Die gedruckten Kavitäten wurden ab August 2019 nacheinander auf den neuen Formschaumautomaten der Firma Behl (Maschine BSH104) aufgebracht, die durch unterschiedliche Medienkreisläufe die Funktionen der Werkzeuge effizient ansteuern kann. Hierzu wurde ein Temperierkreislauf zu den Funktionen der Maschine hinzugefügt, der auf der einen Seite die Vorheizung des Werkzeugs über Dampf gewährleisten kann und auf der anderen Seite im Laufe des Zyklus mit Wasser beaufschlagt wird, um die Kavität auf Entformungstemperatur abzukühlen.



Abbildung 28: Behl BSH104

Für die kleinen Werkzeuge sind zwei Sonnenblenden Projekte ausgewählt worden, da diese in großen Stückzahlen laufen und hohe Anforderungen an die Bauteilqualität erfüllen müssen, von der Größe der Kavität aber in einem Stück gedruckt werden können. Folgende Projekte wurden ausgewählt:

1. Sonnenblende B
2. Sonnenblende A

Im nächsten Schritt wurde ab Dezember 2019 die Erfolgskontrolle der großen Kavitäten durchgeführt. Dazu wurden folgende Projekte mit mehreren Segmenten gewählt:

1. Basta Box Deckel XL V3 (2 Segmente pro Werkzeugseite)

2. Terra EPP (8 Segmente pro Werkzeugseite)

Der Basta Box Deckel XL V3 eignet sich aufgrund der Vergleichbarkeit der einzelnen Evolutionsstufen gut, da er in jeder technischen Entwicklung gefertigt wurde.

Die Terra EPP ist eine Unterlage für den Terrassenbau und hat eine Bauteilgröße von 1.200 x 800 mm. Durch diese Größe wird ein Werkzeug mit insgesamt 16 Segmenten aufgebaut. Jedes dieser Segmente verfügt über einen abgekoppelten Temperierkreislauf, sodass jeweils 8 Kreisläufe pro Werkzeugseite parallelgeschaltet werden müssen. Diese Anforderungen werden von der BSH104 erfüllt und ermöglichen die Fertigung dieser großen Bauteile mit den gedruckten Kavitäten.

Das neue Werkzeugkonzept für den Formschaumautomaten der Firma Behl sieht eine integrierte Dampfkommer vor, die von der Maschinenmasse entkoppelt ist. In Abbildung 29 ist das minimale Volumen der Dampfkommer erkennbar, sowie die konturnahe Temperierung durch ein Temperiermedium. Dieser Verbund in Kombination mit der Rückwandplatte nennt sich die Monoblockbauweise.

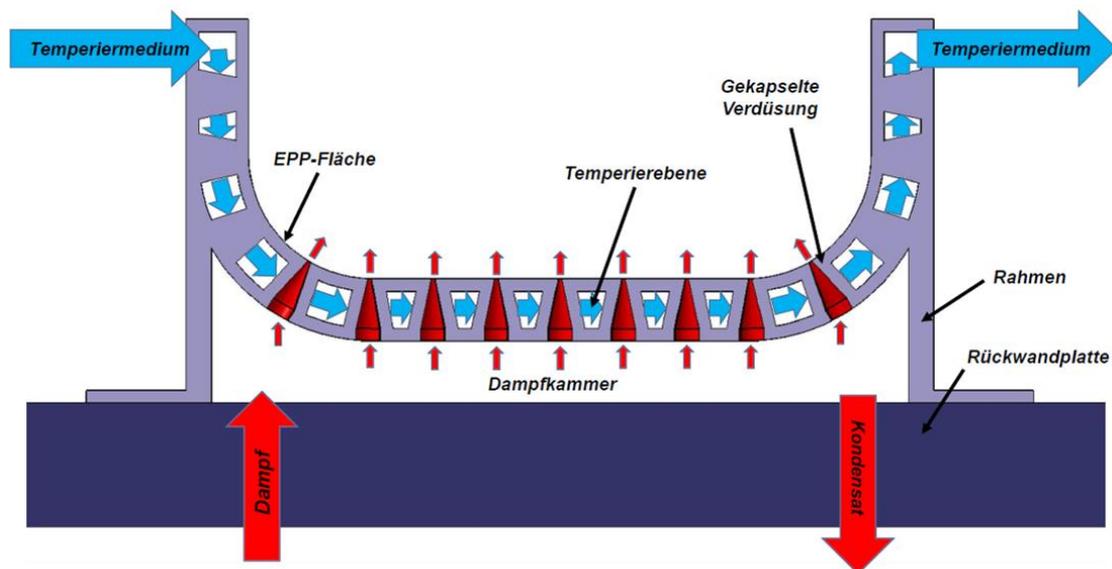


Abbildung 29: Konzeptskizze integrierte Dampfkommer, sog. Monoblockbauweise

In Abbildung 30 ist die Haube der Basta Box Deckel-Kavität zu erkennen. Die Segmentkante ist mit einem zusätzlichen Plättchen verschraubt und in der Mitte ist ein wechselbares Schild eingesetzt. Auf der Werkzeugfläche verteilt können die Rückseiten der konischen Dampfdufen wiedererkannt werden. Die Höhe der effektiven Dampfkommer ist mit einem roten Maßpfeil gekennzeichnet und ist nur noch ein Bruchteil der ursprünglichen Maschinendampfkommer.

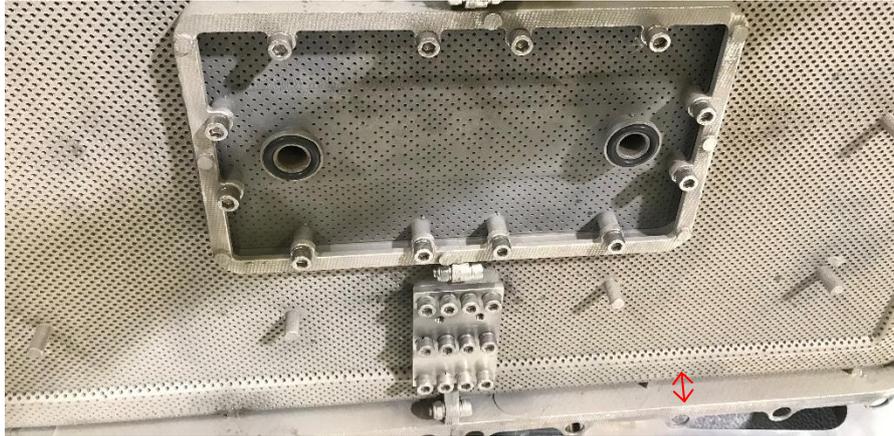


Abbildung 30: Ansicht der segmentierten Kavität „Basta Box Deckel XL V3“ Haube von hinten; Minimale Dampfkammerhöhe (roter Maßpfeil)

Nach dem Aufspannen des Werkzeugs in den neuen Formschaumautomaten können in Abbildung 31 die beiden Werkzeughälften mit den seitlichen Kühlan schlüssen für die Temperierebenen erkannt werden, wobei jedes Segment einzeln temperiert wird. Die Trennung der Segmente, jeweils horizontal mittig, ist im Werkzeug optisch sichtbar.

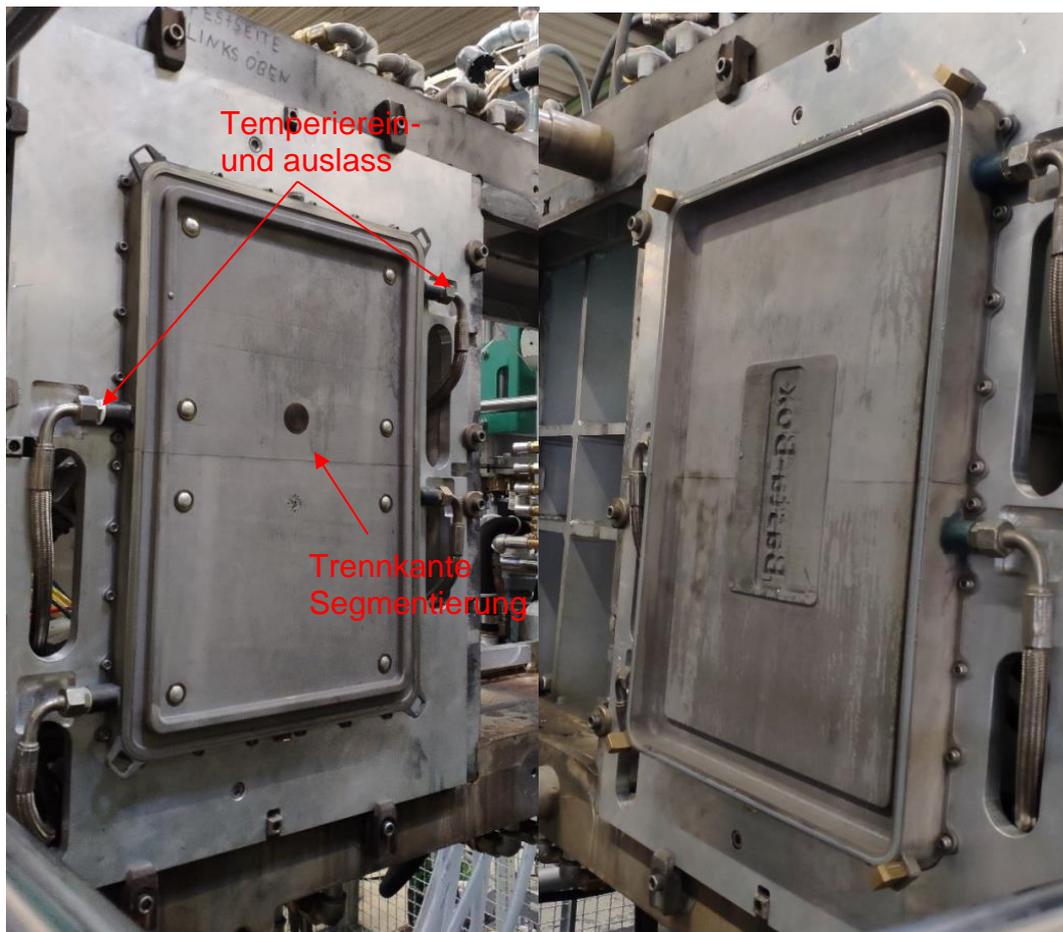


Abbildung 31: Kern (links) und Haube (rechts) der Kavität „Basta Box Deckel XL V3“ im Formschaumautomaten eingespannt

Das Terra EPP Werkzeug mit 8 Segmenten pro Werkzeugseite und einem Außenmaß von 1200x800mm ist in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellt.



Abbildung 32: Haube der Kavität „TerraEPP“ auf Rückwandplatte montiert



Abbildung 33: Kern der Kavität „TerraEPP“ eingespannt in neuen Formschaumautomaten

Der EPP-Verarbeitungsprozess verändert sich durch das Zusammenspiel der Leistungsfähigkeit der Werkzeuge sowie des neuen Formschaumautomaten. Der neue Prozessablauf ist in der folgenden Abbildung 34 dargestellt:



Abbildung 34: Prozessablauf am neuen Formschaumautomaten

Durch die zusätzliche Temperierebene ist eine weitere Funktionskammer hinzugekommen, die im Prozessablauf individuell betrachtet werden kann. Durch die Temperierebene können Prozessschritte parallel ablaufen und verlängern dadurch nicht die Zykluszeit des Prozesses.

So wird beispielsweise das Werkzeug vorgeheizt, was parallel zum Schließvorgang der Maschine sowie dem Einfüllen des EPPs passiert. Ebenso wird der Kühlvorgang mit der Stabilisierungsphase überlagert.

2.4 Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)

Zur Errichtung der Laseranlagen sowie des Formschaumautomaten war keine behördliche Genehmigung erforderlich, da dies nicht gesetzlich vorgeschrieben ist. Die Anlagen wurden sicherheitstechnisch beurteilt und sind nach Abnahme der Maschinen vor Ort für den Betrieb freigegeben.

2.5 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten, Konzeption und Durchführung der Erfolgskontrolle

Im Vorfeld der Durchführung des Messprogrammes für den Neu-Zustand wurden im September 2016 die Messstellen und Messparameter überprüft und endgültig zwischen der IWF GmbH, Institut für werkzeuglose Fertigung, An-Institut der FH Aachen, Fachbereich Maschinenbau und Mechatronik, der EFA und der Overath SLM GmbH abgestimmt. Die nachfolgende Tabellen 5 und 6 geben einen Überblick über die Messstellen:

Fertigung der neuen Kavität						
Nr.	Bezeichnung Messstelle	Medium	Einheit	Häufigkeit (1x pro ...)	Anzahl Messungen / IWF / O-EPP	Durchführung Messung
1	Materialeinsatz Werkzeug/ Kavität	Pulver	kg	Woche	2x24	Wiegen
2	Energieverbrauch Laser	Elektroenergie	kWh	Woche	2x24	Maschinenprotokoll
3.	Protokoll Wage	Kavität neu	kg	Bauprozess	1 je Kavität	Wiegen
4.	Protokoll Wage	Kavität alt	kg	Bauprozess	1 je Kavität	Wiegen

Tabelle 5: Messstellen für Fertigung der neuen Kavität

Der Einsatz der neuen Kavitäten bei dem bisherigen und dem angepassten Formschaumautomaten wurde durch die unterschiedlichen Lieferzeiten der Laserschmelzanlagen und den ersten Ergebnissen der neu eingesetzten Kavitäten am bestehenden Formschaumautomaten beeinflusst. Deshalb sollen hier auch jeweils zwei Messreihen über einem Zeitraum von einem halben Jahr durchgeführt werden. Die entsprechende Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Messstellen.

Fertigung mit neuer Kavität						
Nr.	Bezeichnung Messstelle	Medium	Einheit	Häufigkeit (1x pro ...)	Anzahl Messungen / IWF / O-EPP	Durchführung Messung
1.	Energieeinsatz Produktion (Bauteile)	Elektroenergie	kWh	Woche	2x24	Ablesung Zählerstand
2.	Materialeinsatz Produktion (Bauteile)	Pellets	kg	Woche	2x24	Ablesung Verbrauchsmenge
3.	Kondensat Werkzeug Austritt	Wasser	l/ m ³	Woche	2x24	Wiegen
4.	Kühlwasser Eintritt	Wasser	l/ m ³	Woche	2x24	Ablesen Niveau
5.	Kühlwasser Austritt	Wasser	l/ m ³	Woche	2x24	Ablesen Niveau
6.	Fertigteil Gewicht nass		g/kg	Woche	2x24	Wiegen
7.	Fertigteil Gewicht trocken	Elektroenergie	g/kg	Woche	2x24	Wiegen
8.	Energiebedarf Temperofen	Elektroenergie	kWh	Woche	2x24	Ablesung Zählerstand

Tabelle 6: Messstellen am Formschaumautomaten für Fertigung mit neuer Kavität

3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung

3.1 Bewertung der Vorhabensdurchführung

Bei dem hier vorgestellten innovativen Vorhaben ergaben sich einige Anpassungs- und Optimierungsarbeiten, die aufgrund der Komplexität vorher nicht zu prognostizieren waren. Erst mit der ersten großtechnischen Umsetzung stellten sich diese im Zeitablauf ein und werden nachfolgend beschrieben.

Durch die Größe der gedruckten Werkzeuge sind sowohl Rissbildungen bei großen Flächen wie auch ein großer Verschleiß der Beschichterlippen zu verzeichnen gewesen. Die Rissbildungen sind auf den hohen Wärmeeintrag zurückzuführen, der Verschleiß der Beschichterlippen der SLM-Anlage auf die großen Flächen, die überfahren wurden.

Es haben sich drei Hauptprobleme herauskristallisiert, die es zu lösen galt. Hierbei mussten sowohl parameter- als auch hardwareseitig einige Änderungen vorgenommen werden. Auch die Konstruktion der neu zu generierenden Bauteile musste angepasst werden.

1. Verzug und Rissbildung bei großen Flächen und großen Volumina

Verzug und Risse entstehen durch zu große Wärmeeinbringung im SLM-Prozess. Durch eine spezielle Belichtungsstrategie ist diese Problematik aber zu lösen. Hierbei werden nur lokal kleine Schmelzbäder erzeugt und somit die Wärme gleichmäßig auf das Bauteil verteilt.

Hierbei wurde intensiv mit SLM Solutions an Lösungen gearbeitet. Es wurden grundsätzlich alle bisher von SLM Solutions für kleine Edelstahlbauteile zur Verfügung gestellten Parameter überarbeitet. Diese Parameterstudie hat zu einer deutlichen Verzögerung des Projektes geführt. Auch eine Abkühlzeit von 2-3 Minuten bei großen Schichten hat zu einer geringen Rissanfälligkeit geführt und die Robustheit des Prozesses gesteigert.

2. Verschleiß des Beschichters

Die von SLM Solutions vorgesehene Beschichtung zum Pulverauftrag mit einer Gummilippe hat zu großen Problemen bei großen Flächen geführt. Der Beschichter ist regelmäßig an den großen Flächen (siehe Bild Basta Box XL Deckel) hängen geblieben und die Beschichterlippe musste ausgetauscht werden. In Zusammenarbeit mit SLM Solutions und dem Fraunhofer ILT wurde das Beschichtersystem angepasst. Es werden nun Bürsten eingesetzt, die eine höhere Standzeit und ein gleichmäßigeres Beschichtungsbild vorweisen.

3. Konstruktion der Stützgeometrien

Die Stützgeometrien mussten für die dargestellten großen Flächen angepasst werden. Hierbei wurde zum ersten Mal auf sogenannten Tree-Support zurückgegriffen, welcher direkt im 3D-Druck mit hergestellt wird. Diese ermöglichen im SLM-Prozess einerseits eine gute Anbindung und eine robuste Ausführung des Prozesses, andererseits haben diese einen Abstand, der groß genug ist. Folgend in blau der sogenannte Tree-Support, der in der zukünftigen Dampfkammer positioniert wird und die großen darüber liegenden Flächen trägt.

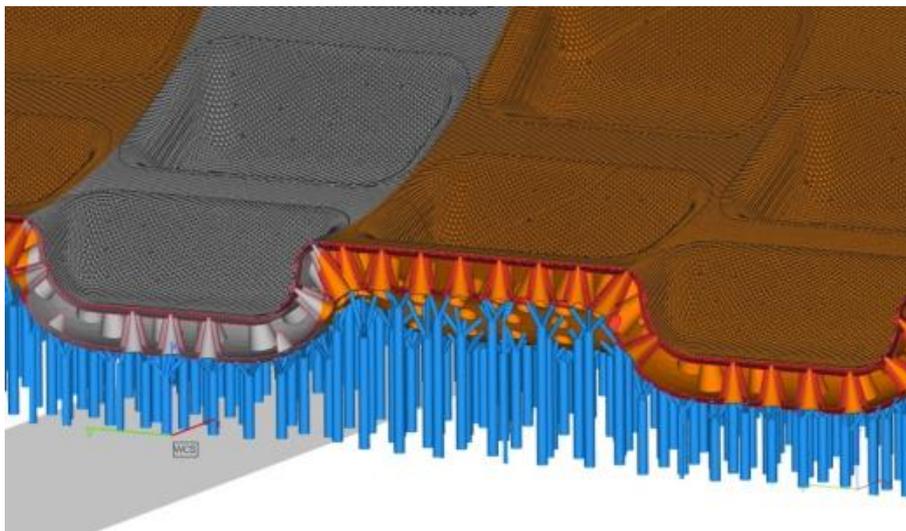


Abbildung 35: Schnitt Kavität: oben strukturierte Oberflächen, mittig Kühlebene, unten Tree-Supports und Dampfkammer

Insgesamt ist festzuhalten, dass durch die systematische Anpassung der dargestellten Parameter die Machbarkeit aller potenziellen Werkzeuge gegeben ist.

Bei dem Betrieb der Laseranlage stellte sich heraus, dass durch das komplette Aufschmelzen des pulverbasierten Werkstoffs thermisch induzierte Spannungen entstanden, die zu geometrischen Verzügen des Bauteils führten, die bis zu mehreren mm groß sein können.

Mit dem Erwerb einer Software, die eine thermische Simulation des gesamten SLM-Prozesses möglich macht, konnte das Problem gelöst werden. Die Simulation identifizierte die Verzüge des SLM-Prozesses im Bauteil und „predeformiert“ das Bauteil virtuell.

Das Bauteil wird also vor dem eigentlichen Druck virtuell umgeformt, so dass es nach dem Druck und dem Abtrennen von der Substratplatte gerade ist. In enger Zusammenarbeit mit dem Software-Hersteller konnten wir durch die Software den Verzug der Bauteile von mehreren Millimetern auf unter 0,5 mm reduzieren. Dadurch können wir nun ohne größeren Nachbearbeitungsaufwand die Kavitäten direkt nach dem Drucken im Formschaumprozess nutzen.

Der Kauf des zweiten Lasers für die großformatigen Produkte wurde zurückgestellt, da das Segmentierungskonzept des Projektes BastaBox Deckel XL gezeigt hatte, dass eine Segmentierung des Werkzeugs zu den gewünschten Einsparungen führte.

Es war jedoch eine Trennkante zwischen den Segmenten zu verzeichnen, was zu einer unzureichenden Oberflächenqualität geführt hätte. Dieses Segmentierungskonzept musste final abgeschlossen und sowohl technisch als auch wirtschaftlich bewertet werden, um eine Entscheidung bzgl. der Investition in eine großformatige SLM-Maschine zu treffen.

Das SLM-Verfahren bietet potentiell eine erhöhte Standfestigkeit durch die Substitution des Werkstoffs Aluminium durch Edelstahl. Diese Serientauglichkeit musste noch unter Beweis gestellt und quantifiziert werden. Es wurden bereits einige Tausend Schuss mit unterschiedlichen SLM-Werkzeugen gefahren, die Standfestigkeit in Bezug auf Großserien (über 100.000 Bauteile) war aber noch nicht evaluiert worden.

Um eine industrielle Serienfertigung gewährleisten zu können, musste ein Segmentierungskonzept evaluiert werden, das den Anforderungen des Marktes entspricht. Eine Investition in die großformatige SLM-Maschine war nur dann sinnvoll, wenn mit dieser Maschine ebenfalls segmentierte Werkzeuge gedruckt werden können. Die größere SLM-Maschine sollte einen Bauraum von 800 x 600 x 500mm haben, die EPP-Maschinen vor Ort bis 1.000 x 1.800 mm Aufspannflächen. Gerade im Hinblick auf Automotive-Einbauteile wie Stoßfänger musste auch für die größere Anlage das dargestellte Segmentierungskonzept umsetzbar sein.

Ohne eine hohe Standfestigkeit der Werkzeuge wären die Mehrinvestitionskosten der Werkzeuge für den Automotive-Kunden nicht tragbar und somit die Anwendung der Technologie nur begrenzt umsetzbar, das Business-Modell wäre dann nicht wirtschaftlich umsetzbar. Nur über Stückzahl und Laufzeit sind aktuell SLM-Werkzeuge für den EPP-Markt umsetzbar, die hierbei pro Schuss Mehrinvestitionskosten durch Einsparungen im Prozess rechtfertigen.

Das BastaBox Deckel XL-Werkzeug wurde erneut gefertigt und in Serie eingesetzt. Eine Stückzahl von ca. 50.000 - 60.000 Stück sollte einen Eindruck bzgl. Serientauglichkeit und Segmentierungskonzept geben, um anschließend bewerten zu können, ob eine weitere Investition in eine zweite kleine Maschine oder eine größere Maschine sinnvoll sei. Dies musste auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet werden, da der Druck und die Nachbearbeitung mehrere Segmente zwar aufwendiger war, der Druck einer größeren Kavität

in einem Schuss auf einer größeren Anlage durch die höheren Investitionskosten und den größeren Bauteilverzug im SLM-Prozess aber ebenfalls Herausforderungen beinhalten würde.

Das Segmentierungskonzept konnte im November 2018 final abgeschlossen und sowohl technisch als auch wirtschaftlich bewertet werden. Dabei konnte evaluiert werden, dass die gemessenen Einsparungen bei kleinen Bauteilen sich auch auf größere Bauteile mit mehreren Segmenten erzielen ließen.

Somit war eine wirtschaftliche Umsetzung des Vorhabens auch für größere Werkzeuge gegeben, was dazu führte, dass von einem großformatigen Laser Abstand genommen wurde und eine weitere SLM-500-Anlage der Firma SLM Solutions gekauft wurde.

3.2 Stoff- und Energiebilanz

Messung „Fertigung der neuen Kavitäten“

Messungen 1. Laser (Messzeitraum 01.04. – 30.09.2017)

Mit der Inbetriebnahme des Lasers wurden insgesamt 5 Kavitäten gedruckt, die auf fünf Produkten basieren, die mit alten und neuen Werkzeugen hergestellt werden können:

1. Basta Box Deckel XL
2. Yogaball
3. Sonnenblende
4. Yogarolle
5. Zeppy

Die Messungen für die „Fertigung der neuen Kavitäten“, gemäß Tabelle 4 „Fertigung der neuen Kavität“ wurden am 1. April 2017 gestartet und am 30. September 2017 beendet.

Nr. 1 (Materialeinsatz Werkzeug / Kavität)

Wie das nachfolgende Protokoll aufzeigt, erfolgte das Wiegen des Pulvers über mehrere Wiegevorgänge.

Protokoll: Materialverbrauch der SLM 500

Protokoll: Materialverbrauch der SLM 500				
Jobbezeichnung:	muss der Datei zugeordnet werden können			
Bauhöhe:	z.B. berechnet aus Anzahl Schichten			
Jobstart:	Datum/Uhrzeit			
Bauzeit:	Vom Programm berechnete Bauzeit			
Messung-Nr.	Durchführung	Anweisung	Messungen	
			Datum/Uhrzeit	Gewicht im Tank/ Nachfüllmenge
Baujob-1	Gewicht der leeren Substratplatte	<i>Substratplatte vor Einbau wiegen</i>		<i>Bauteilgewicht</i>
Tank-1	Vor Jobstart	<i>Daraufachten, dass vor der Messung das Sieb nicht mehr läuft und die Leitungen leer sind!</i>		<i>"Tank-Gewicht" laut Software</i>
Tank-2	Nach Jobende, vorm Entpacken	<i>Messung unmittelbar nach Jobende, vor dem Entpacken (!) durchführen!</i>		<i>"Tank-Gewicht" laut Software</i>
Tank-3	Nach dem Entpacken	<i>Messung nach dem Entpacken durchführen! Daraufachten, dass das Sieb nicht mehr läuft und die Leitungen leer sind!</i>		<i>"Tank-Gewicht" laut Software</i>
Pulver-1	Pulver nachgefüllt?	<i>Menge des nachgefüllten Pulvers zwischen "Tank-1" und "Tank-3" dokumentieren!</i>		<i>Pulvergewicht</i>
Baujob-2	Gewicht der vollen Substratplatte	<i>Substratplatte samt Aufbau und Pulverresten direkt nach dem Entpacken wiegen!</i>		<i>Bauteilgewicht</i>
Baujob-3	Gewicht Bauteil nach Entsupporten	<i>Bauteil nach fertigem Entsupporten wiegen!</i>		<i>Bauteilgewicht</i>
Recycling-1	Wiederverwendbares Pulver	<i>Wieviel Pulver wurde beim Entsupporten zur Wiederverwendung aufgefangen?</i>		<i>Pulvergewicht</i>

Tabelle 7: Wiege-Protokoll Materialverbrauch der SLM 500

Nr. 2 Energieverbrauch Laser

Die Messung erfolgte über Stromzähler. Wichtig war eine konstante Parameterwahl. Eine Änderung der Laserleistung führt zu anderer Leistungsaufnahme und anderen Ergebnissen.

Wir konnten

- den Durchschnittsverbrauch pro h und
- die benötigte Leistung pro kg verarbeitetem kg Material (Edelstahl) ermitteln.

Die nachfolgende Tabelle 8 fasst die Ergebnisse der Messungen zusammen.

Nummerierung	Kalenderwoche der Messung	Laufzeit des Lasers in h	Energieverbrauch des Lasers in kWh	Verarbeitetes Material inkl. Support in kg		Benötigte Leistung pro kg	
						Durchschnittsverbrauch pro h in kWh	aufgeschmolzenem Material in kWh/kg
1	KW 13	47	482	4,40		10,3	109,55
2	KW 14	47	461	4,70		9,8	98,09
3	KW 15	47	468	4,00		10,0	117,00
4	KW 16	47	473	4,60		10,1	102,83
5	KW 17	59	593	3,70		10,1	160,27
6	KW 18	59	586	4,40		9,9	133,18
7	KW 19	59	596	5,00		10,1	119,20
8	KW 20	59	592	4,10		10,0	144,39
9	KW 21	24	239	11,20		10,0	21,34
10	KW 22	22	262	10,80		11,9	24,26
11	KW 23	28	278	1,60		9,9	173,75
12	KW 24	26	262	1,10		10,1	238,18
13	KW 25	35	351	2,10		10,0	167,14
14	KW 26	38	360	1,90		9,5	189,47
15	KW 27	32	318	4,70		9,9	67,66
16	KW 28	34	342	5,50		10,1	62,18
17	KW 29	58	561	5,10		9,7	110,00
18	KW 30	60	620	5,40		10,3	114,81
19	KW 31	58	587	6,30		10,1	93,17
20	KW 32	60	570	7,50		9,5	76,00
21	KW 33	58	613	5,20		10,6	117,88
22	KW 34	60	571	4,70		9,5	121,49
23	KW 35	58	555	5,40		9,6	102,78
24	KW 36	60	615	4,60		10,3	133,70
25	KW 37	34	380	5,00		11,2	76,00
26	KW 38	30	300	4,70		10,0	63,8
	Summe	1199	12035	127,70		10,1	113,0

Tabelle 8: Energieverbrauch Laser KW 13 – KW 38 2017

Nr. 3 Protokoll Waage Kavität neu

Die Gewichtsmessung erfolgte über eine Waage (Hubwagen) und die Gewichtsdocumentation über ein Messprotokoll.

Ergebnis:

Prozentualer Anteil kumulierter Pulververbrauch zu Gewicht Kavität (z.B. durch Stützstrukturen oder nicht wieder verwendbarem Material).

Nr. 4 Protokoll Waage Kavität alt

Die Gewichtsmessung erfolgte über eine Waage und die Gewichtsdocumentation über eine Exceltabelle.

In der nachfolgenden Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Messungen dokumentiert.

Kalenderwoche der Messung	Bezeichnung	Resultierendes benötigtes Material im			Nicht- wiederverwendbares		Anteiliger		Gewichts- einsparung Kavität
		Bauhöhe in mm	Baujob in kg	Grundfläche in x-y in mm ²	Material (z.B. Stützstrukturen) in kg	Protokoll Waage Kavität neu in kg	Materialmehraufwand gegenüber Kavitäts-gewicht	Protokoll Waage Kavität alt in kg	
KW 13	Kavität Basta Box Deckel XL Haube 1/4	89,35	120,6	97573	1,60	2,8	36%		
KW 14	Kavität Basta Box Deckel XL Haube 2/4	89,35	120,6	97573	1,80	2,9	38%		
KW 15	Kavität Basta Box Deckel XL Haube 3/4	89,35	120,6	97573	1,20	2,8	30%		
KW 16	Kavität Basta Box Deckel XL Haube 4/4	89,35	120,6	97573	1,90	2,7	41%		
KW 17	Kavität Basta Box Deckel XL Kern 1/4	105,6	142,6	93440	1,00	2,7	27%		
KW 18	Kavität Basta Box Deckel XL Kern 2/4	105,6	142,6	93440	1,90	2,5	43%		
KW 19	Kavität Basta Box Deckel XL Kern 3/4	105,6	142,6	93440	1,80	2,8	39%		
KW 20	Kavität Basta Box Deckel XL Kern 4/4	105,6	142,6	93440	1,30	2,8	32%		
	Summe Basta Box Deckel XL Kern					11,2		13,9	19%
	Summe Basta Box Deckel XL Haube					10,8		13,1	18%
KW 21	Yogaball 80 mm Haube	62	83,7	22500	0,50	1,1	31%	1,8	39%
KW 22	Yogaball 80 mm Kern	62	83,7	22500	0,20	0,9	18%	1,6	44%
KW 23	Yogaball Duo 80 mm Haube	57	77,0	34352	0,80	1,3	38%	2,1	38%
KW 24	Yogaball Duo 80 mm Kern	57	77,0	34352	0,90	1	47%	1,8	44%
KW 25	Sonnenblende Kavität 1 Haube (Lower)	89,7	121,1	120120	1,80	2,9	38%		
KW 26	Sonnenblende Kavität 1 Kern (Lower)	81,7	110,3	121304	1,90	3,6	35%		
KW 27	Sonnenblende Kavität 2 Haube (Upper)	89,7	121,1	120120	1,70	3,4	33%		
KW 28	Sonnenblende Kavität 2 Kern (Upper)	81,7	110,3	121304	1,50	3,9	28%		
	Summe Sonnenblende Haube					6,3		14,6	57%
	Summe Sonnenblende Kern					7,5		14,5	48%
KW 29	Yogarolle Kavität Kern 1	143	193,1	108088	1,30	3,9	25%	6,8	
KW 30	Yogarolle Kavität Haube 1	111,5	150,5	107932	1,80	2,9	38%	5,1	
KW 31	Yogarolle Kavität Kern 2	143	193,1	108088	1,60	3,8	30%	6,8	
KW 32	Yogarolle Kavität Haube 2	111,5	150,5	107932	1,80	2,8	39%	5,1	
KW 33	Yogarolle Kavität Kern 3	143	193,1	108088	1,30	3,7	26%	6,8	
KW 34	Yogarolle Kavität Haube 3	111,5	150,5	107932	1,80	2,9	38%	5	
KW 35	Yogarolle Kavität Kern 4	143	193,1	108088	1,70	3,9	30%	6,7	
KW 36	Yogarolle Kavität Haube 4	111,5	150,5	107932	2,10	2,7	44%	5	
	Summe Yogarolle Kavität Kern					15,3		27,1	44%
	Summe Yogarolle Kavität Haube					11,3		20,2	44%
KW 37	Zeppy Kavität Haube	105	141,8	69258	1,30	2,7	33%	4,5	40%
KW 38	Zeppy Kavität Kern	71,25	96,2	47970	0,80	1,2	40%	2,8	57%

Tabelle 9: Wiegeprotokoll Kavität alt

An dieser Stelle erfolgt nun eine Bewertung der Messergebnisse.

Zu Nr. 1: Übersicht Gewicht von SLM-gefertigter und konventionell gefertigter Kavität

	SLM	konventionell
Summe Kavität in kg	16,7	20,5
Summe Aluplatten in kg	54,1	54,1
Zukaufteile in kg	5,4	5,4
Summe	76,2	80,0
Temperaturrelevantes Gewicht in kg	16,7	80,0
Gewichtseinsparung in %	79%	

Tabelle 10: Gegenüberstellung Gewicht SLM-Werkzeug versus konventionellem Werkzeug Basta Box Deckel XL

Durch Isolierung der SLM-gedruckten Kavität von der Werkzeug- und Maschinenumgebung ist nur das Kavitätsgewicht temperaturrelevant und die Gewichtseinsparung beträgt 79 %. Nach Umstellung der Formschaumautomaten entfallen künftig die Aluplatten und die verwendeten Zukaufteile bei den gedruckten Kavitäten. Unter Zukaufteilen versteht man z.B. die Abstandsbolzen, die an einer gefrästen Kavität zusätzlich montiert werden müssen, die in Zukunft aber direkt im SLM-Prozess mit angedruckt werden.

Zu Nr. 2: Energieverbrauch Laser

Es ist ein relativ konstanter Stromverbrauch von durchschnittlich 10,1 kWh des Lasers festzustellen. Der Durchschnittsverbrauch ist eine gute Kenngröße zur Kalkulationsbasis für die Nachkalkulation der Projekte (Leistung pro kg aufgeschmolzenem Pulver). Somit kann in Zukunft der verbrauchte Strom anhand des Kavitätsgewichts vorab grob ermitteln werden, um die Kosten abzuschätzen.

Zu Nr. 3: Protokoll Kavität neu

Bezeichnung	Nicht-wiederverwendbares Material (z.B. Stützstrukturen) in kg		Anteiliger Materialmehraufwand gegenüber Kavitätsgewicht	
	Protokoll	Waage	Kavität neu	
	in kg	in kg		
Kavität Basta Box Deckel XL Haube 1/4	1,60		2,8	36%
Kavität Basta Box Deckel XL Haube 2/4	1,80		2,9	38%
Kavität Basta Box Deckel XL Haube 3/4	1,20		2,8	30%
Kavität Basta Box Deckel XL Haube 4/4	1,90		2,7	41%
Kavität Basta Box Deckel XL Kern 1/4	1,00		2,7	27%
Kavität Basta Box Deckel XL Kern 2/4	1,90		2,5	43%
Kavität Basta Box Deckel XL Kern 3/4	1,80		2,8	39%
Kavität Basta Box Deckel XL Kern 4/4	1,30		2,8	32%
Yogaball 80 mm Haube	0,50		1,1	31%
Yogaball 80 mm Kern	0,20		0,9	18%
Yogaball Duo 80 mm Haube	0,80		1,3	38%
Yogaball Duo 80 mm Kern	0,90		1	47%
Sonnenblende Kavität 1 Haube (Lower)	1,80		2,9	38%
Sonnenblende Kavität 1 Kern (Lower)	1,90		3,6	35%
Sonnenblende Kavität 2 Haube (Upper)	1,70		3,4	33%
Sonnenblende Kavität 2 Kern (Upper)	1,50		3,9	28%
Zeppy Kavität Haube	1,30		2,7	33%
Zeppy Kavität Kern	0,80		1,2	40%

Tabelle 11: Anteiliger Materialmehraufwand bei unterschiedlichen Kavitätsgeometrien

Der Gesamtmaterialverbrauch ist abhängig von der Bauteilgeometrie. Der Materialmehraufwand durch Stützstrukturen liegt je nach Bauteil bei ca. 20 - 50 % (stark von Grundfläche abhängig). Nicht das komplette Pulver kann wiederverwendet werden! Auch diese Erkenntnis muss in die spätere Kalkulation einfließen.

Zu Nr. 4: Protokoll Kavität alt

Bezeichnung	Gewichtseinsparung	Volumenreduzierung
Summe Basta Box Deckel XL Kern	19%	75%
Summe Basta Box Deckel XL Haube	18%	74%
Yogaball 80 mm Haube	39%	81%
Yogaball 80 mm Kern	44%	83%
Yogaball Duo 80 mm Haube	38%	81%
Yogaball Duo 80 mm Kern	44%	83%
Summe Sonnenblende Haube	57%	87%
Summe Sonnenblende Kern	48%	84%
Summe Yogarolle Kavität Kern	44%	83%
Summe Yogarolle Kavität Haube	44%	83%
Zeppy Kavität Haube	40%	81%
Zeppy Kavität Kern	57%	87%

Tabelle 12: Gewichtseinsparung und Volumenreduzierung bei SLM-gedruckten Kavitäten gegenüber konventionellen Kavitäten

Je nach Bauteilgeometrie der Kavitäten sind unterschiedliche Gewichtseinsparungen möglich. Im Mittel können bis zu 41 % der Masse eingespart werden. Im Mittel kann das zu

verarbeitende Volumen um über 80 % reduziert werden. Weitere Einsparungen sind durch Integration der Dampfkammer in die Kavität möglich.

Messungen 2. Laser (Messzeitraum 11.06. – 30.11.2019)

Die Messungen für die „Fertigung der neuen Kavitäten“ mit dem zweiten Laser wurden am 11. Juni 2019 gestartet und am 30. November 2019 beendet.

Vier Produkte sollten die Grundlage für die durchzuführenden Messungen sein:

1. Yogaball D80 & D120 V2019
2. Sonnenblende B
3. Trennsteg XXL
4. Basta Box Deckel XL V3

Nr. 1 (Materialeinsatz Werkzeug / Kavität)

Auch hier erfolgte das Wiegen des Pulvers über mehrere Wiegevorgänge und wurde entsprechend protokolliert.

Nr. 2 Energieverbrauch Laser

Die Messung erfolgte über Stromzähler. Wichtig war eine konstante Parameterwahl. Eine Änderung der Laserleistung führte zu anderer Leistungsaufnahme und anderen Ergebnissen.

Wir konnten

- den Durchschnittsverbrauch pro h und
- die benötigte Leistung pro kg verarbeitetem kg Material (Edelstahl)
ermitteln.

Die nachfolgende Tabelle 13 fasst die Ergebnisse der Messungen zusammen.

Nummer- ierung	Kalenderwoche der Messung	Laufzeit des Lasers in h	Energieverbrauch des Lasers in kWh	Verarbeitetes Material inkl. Support in kg		Benötigte Leistung pro kg aufgeschmolzenem Material in kWh/kg	
						Durchschnittsverbrauch pro h in kWh	
1	KW24	14	142	4,52		9,8	31,40
2	KW25	14	148	4,60		10,5	32,16
3	KW26	16	162	3,39		10,0	47,74
4	KW27	16	167	3,21		10,4	51,97
5	KW28	43	451	5,37		10,4	83,93
6	KW29	44	453	5,50		10,3	82,31
7	KW30	48	485	6,20		10,2	78,28
8	KW31	49	501	6,16		10,2	81,38
9	KW32	48	486	5,93		10,2	81,92
10	KW33	48	482	5,87		10,1	82,08
11	KW34	51	516	6,74		10,2	76,52
12	KW35	51	505	6,80		9,9	74,23
13	KW36	67	665	5,69		10,0	116,86
14	KW37	66	682	5,74		10,3	118,80
15	KW38	70	711	6,89		10,1	103,22
16	KW39	69	702	6,81		10,2	103,11
17	KW40	96	1016	7,38		10,6	137,64
18	KW41	95	984	7,28		10,3	135,14
19	KW42	73	785	7,16		10,7	109,56
20	KW43	74	751	7,28		10,1	103,1
	Summe	1052,79	10794	118,55		10,2	86,6

Tabelle 13: Energieverbrauch Laser KW 24 – KW 43 2019

Nr. 3 Protokoll Waage Kavität neu

Die Gewichtsmessung erfolgte über eine Waage (Hubwagen) und die Gewichtsdocumentation über ein Messprotokoll.

Ergebnis:

Nicht- wiederverwendbares Material (z.B. Stützstrukturen) in kg	Protokoll Waage Kavität neu in kg	Anteiliger Materialmehraufwand gegenüber Kavitätsgewicht	
	1,36	3,16	30%
	1,36	3,24	30%
	0,63	2,76	19%
	0,63	2,58	20%
	1,43	3,94	27%
	1,43	4,07	26%
	1,43	4,77	23%
	1,43	4,73	23%
	1,39	4,54	23%

Tabelle 14: Prozentualer Anteil kumulierter Pulververbrauch zu Gewicht Kavität (z.B. durch Stützstrukturen oder nicht wieder verwendbarem Material)

Nr. 4 Protokoll Waage Kavität alt

Die Gewichtsmessung erfolgte über eine Waage und die Gewichtsdocumentation über eine Exceltabelle.

Ergebnis:

Die Gewichtseinsparungen der einzelnen Kavitäten gegenüber den konventionellen Kavitäten sind in Tabelle 15 dargestellt. Bei den Yogaball Kavitäten ist eine Gewichtseinsparung von 62% - 69% umsetzbar gewesen. Bei den Sonnenblenden eine Einsparung von 32% - 42% und beim Basta Box Deckel V3 von 14% - 20%.

Die Gesamtbilanz des Werkzeuggewichts ist dagegen in Tabelle 16 anhand des Basta Box Deckels V3 nochmal exemplarisch dargestellt und anschließend erläutert.

Kalenderwoche der Messung	Bezeichnung	Resultierendes benötigtes Material im			Nicht- wiederverwendbares Material (z.B. Stützstrukturen) in kg	Protokoll Waage Kavität neu in kg	Anteiliger Materialmehraufwand gegenüber Kavitätsgewicht	Protokoll Waage Kavität alt in kg
		Bauhöhe in mm	Baujob in kg	Grundfläche in x-y in mm ²				
KW24	Yogaball D120 Ball V2019 Haube 4x	106,8	85,4	104940	1,36	3,16	30%	10,0
KW25	Yogaball D120 Ball V2019 Kern 4x	106,8	85,4	104940	1,36	3,24	30%	10,4
KW26	Yogaball D120 Duoball V2019 Haube 2x	111,99	89,6	48792	0,63	2,76	19%	7,2
KW27	Yogaball D120 Duoball V2019 Kern 2x	111,99	89,6	48792	0,63	2,58	20%	6,8
KW28	Sonnenblende F44 Lower Haube 1/2	158,79	127,0	110415	1,43	3,94	27%	
KW29	Sonnenblende F44 Lower Haube 2/2	158,79	127,0	110415	1,43	4,07	26%	
KW30	Sonnenblende F44 Lower Kern 1/2	123,22	98,6	109844	1,43	4,77	23%	
KW31	Sonnenblende F44 Lower Kern 2/2	123,22	98,6	109844	1,43	4,73	23%	
KW32	Sonnenblende F44 Upper Haube 1/2	161,42	129,1	107254	1,39	4,54	23%	
KW33	Sonnenblende F44 Upper Haube 2/2	161,42	129,1	107254	1,39	4,48	24%	
KW34	Sonnenblende F44 Upper Kern 1/2	133,01	106,4	122731	1,59	5,15	24%	
KW35	Sonnenblende F44 Upper Kern 2/2	133,01	106,4	122731	1,59	5,21	23%	
	Summe Sonnenblenden Haube					17,03		29,2
	Summe Sonnenblenden Kern					19,86		29,0
KW36	Trennsteg XXL Haube 1/2	310,32	248,3	115600	1,50	4,19	26%	
KW37	Trennsteg XXL Haube 2/2	310,32	248,3	115600	1,50	4,24	26%	
KW38	Trennsteg XXL Kern 1/2	323,52	258,8	116946	1,52	5,37	22%	
KW39	Trennsteg XXL Kern 2/2	323,52	258,8	116946	1,52	5,29	22%	
KW40	BastaBox Deckel XL V3 - Haube 1/2	311,22	249,0	129529	1,68	5,70	23%	
KW41	BastaBox Deckel XL V3 - Haube 2/2	311,22	249,0	129529	1,68	5,60	23%	
KW42	BastaBox Deckel XL V3 - Kern 1/2	297,8	238,2	124394	1,61	5,55	23%	
KW43	BastaBox Deckel XL V3 - Kern 1/2	297,8	238,2	124394	1,61	5,59	22%	
	Summe Basta Box Deckel XL V3 Kern					11,14		13,9
	Summe Basta Box Deckel XL V3 Haube					11,30		13,1

Tabelle 15: Wiegeprotokoll Kavität

An dieser Stelle erfolgt nun eine Bewertung der Messergebnisse:

Zu Nr. 1: Übersicht Gewicht von SLM-gefertigter Kavität Basta Box Deckel XL mit und ohne Monoblock sowie konventionell gefertigter Kavität Basta Box Deckel XL.

	Basta Box Deckel XL SLM Monoblock V3	Basta Box Deckel XL SLM	Basta Box Deckel XL konventionell
Summe Kavität in kg	16,8	16,7	20,5
Summe Aluplatten in kg	38,4	54,1	54,1
Zukaufteile in kg	5,4	5,4	5,4
Summe	60,6	76,2	80
Temperaturrelevantes Gewicht in kg	16,8	16,7	80
Gewichtseinsparung in %	79%	79%	

Tabelle 16: Gegenüberstellung Gewicht SLM-Werkzeug mit und ohne Monoblock versus konventionellem Werkzeug Basta Box Deckel XL

Durch Isolierung der SLM-gedruckten Kavität von der Werkzeug- und Maschinenumgebung ist nach wie vor nur das Kavitätsgewicht temperaturrelevant und die Gewichtseinsparung beim Basta Box Deckel XL beträgt weiterhin 79 %.

Der neue Formschaumautomat erfordert nur zwei Aufnahmeplatten, die aus Aluminium gefertigt werden müssen, im Gegensatz zu drei Platten aus dem vorherigen Konzept. Das Gewicht der Aluminiumplatten reduziert sich somit um ca. 33 %. Diese Platte wird auch beim Monoblockkonzept nicht mehr gekühlt und heizt sich während des Formschaumprozesses anfangs auf und hält die Temperatur, sodass keine weiteren Verluste durch diese Platte eingerechnet werden müssen. Somit bleibt die temperaturrelevante Masse gleich und die erreichte Gewichtseinsparung kann weiterhin bestätigt werden, da keine Energie für das Heizen und Kühlen in diese Masse eingebracht werden muss.

Das frühere, ungewollte Aufheizen des gesamten Maschinenrahmens kann nun ausgeschlossen werden, da die nun genutzte Monoblock-Aluminiumplatte dazu führt, dass die Maschinenkomponenten nicht mehr mit dem Dampf in Berührung kommen.

Insofern konnten die hohen Energieeinsparungen für die eigentliche Formteilproduktion beim alten Maschinenkonzept nur erreicht werden, in dem eine zusätzliche Kühlung für den Rahmen ergänzt wurde. Da hier aber wieder Energie verbraucht wird, wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt, sondern die Arbeiten voll auf das neue Konzept konzentriert.

Zu Nr. 2: Energieverbrauch Laser

Auch der zweite Laser hat einen relativ konstanten Stromverbrauch zu verzeichnen. Der Durchschnittsverbrauch pro kg variiert etwas stärker, da auch das Gewicht der Kavitäten pro Job etwas stärker variiert hatte. Der konstante absolute Stromverbrauch ist auf die Kühlung in der Maschine zurück zu führen, die für das Temperaturmanagement der Laser- und Scanner-Systeme verantwortlich ist. Diese verbrauchen trotz der unterschiedlichen Aufbauraten und aufgeschmolzenem Material immer annähernd gleich viel elektrische Energie.

Zu Nr. 3: Protokoll Kavität neu

Bezeichnung	Nicht-wiederverwendbares Material (z.B. Stützstrukturen) in kg		Anteiliger Materialmehraufwand gegenüber Kavitätsgewicht	
	Protokoll	Waage	Kavität neu	
Yogaball D120 Ball V2019 Haube 4x	1,36		3,16	30%
Yogaball D120 Ball V2019 Kern 4x	1,36		3,24	30%
Yogaball D120 Duoball V2019 Haube 2x	0,63		2,76	19%
Yogaball D120 Duoball V2019 Kern 2x	0,63		2,58	20%
Sonnenblende F44 Lower Haube 1/2	1,43		3,94	27%
Sonnenblende F44 Lower Haube 2/2	1,43		4,07	26%
Sonnenblende F44 Lower Kern 1/2	1,43		4,77	23%
Sonnenblende F44 Lower Kern 2/2	1,43		4,73	23%
Sonnenblende F44 Upper Haube 1/2	1,39		4,54	23%
Sonnenblende F44 Upper Haube 2/2	1,39		4,48	24%
Sonnenblende F44 Upper Kern 1/2	1,59		5,15	24%
Sonnenblende F44 Upper Kern 2/2	1,59		5,21	23%
Trennsteg XXL Haube 1/2	1,50		4,19	26%
Trennsteg XXL Haube 2/2	1,50		4,24	26%
Trennsteg XXL Kern 1/2	1,52		5,37	22%
Trennsteg XXL Kern 2/2	1,52		5,29	22%
BastaBox Deckel XL V3 - Haube 1/2	1,68		5,70	23%
BastaBox Deckel XL V3 - Haube 2/2	1,68		5,60	23%
BastaBox Deckel XL V3 - Kern 1/2	1,61		5,55	23%
BastaBox Deckel XL V3 - Kern 1/2	1,61		5,59	22%

Tabelle 17: Anteiliger Materialmehraufwand bei unterschiedlichen Kavitätsgeometrien

Der Gesamtmaterialverbrauch ist abhängig von der Bauteilgeometrie. Der Materialmehraufwand durch Stützstrukturen liegt je nach Bauteil bei ca. 19 -30 % (stark von Grundfläche abhängig).

Im Vergleich zur vorhergehenden Dokumentation ist der Wert von 20 – 50 % auf 19 – 30 % gefallen. Dies ist auf die Optimierung der Stützstrukturen zurück zu führen, welche sich durch den 2. Laser ergeben haben. Nicht das komplette Pulver kann wiederverwendet werden!

Zu Nr. 4: Protokoll Kavität alt

Bezeichnung	Gewichtseinsparung	Volumenreduzierung
Yogaball D120 Ball V2019 Haube 4x	69%	90%
Yogaball D120 Ball V2019 Kern 4x	69%	90%
Yogaball D120 Duoball V2019 Haube 2x	62%	88%
Yogaball D120 Duoball V2019 Kern 2x	63%	88%
Summe Sonnenblenden Haube	42%	82%
Summe Sonnenblenden Kern	32%	79%
Summe Basta Box Deckel XL V3 Kern	20%	75%
Summe Basta Box Deckel XL V3 Haube	14%	73%

Tabelle 18: Gewichtseinsparung und Volumenreduzierung bei SLM-gedruckten Kavitäten gegenüber konventionellen Kavitäten

Je nach Bauteilgeometrie der Kavitäten sind unterschiedliche Gewichtseinsparungen möglich. Im Mittel können bis zu 46 % der Masse eingespart werden. Im Mittel kann das zu verarbeitende Volumen um 83 % reduziert werden. Dies ist auf die Monoblocktechnologie im Zusammenhang mit dem neuen Formschaumautomaten der Firma Behl zurück zu führen.

Messung „Fertigung mit neuen Kavitäten aus dem Laser SLM Solution“

Bevor wir die Ergebnisse der Messungen für die Fertigung der einzelnen Produkte präsentieren, stellen wir kurz den Prozess der Fertigung mit der neuen Kavität dar:

1. Kompression: Im Druckfüller wird das EPP-Granulat pneumatisch komprimiert.

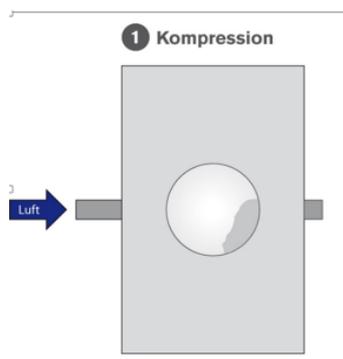


Abbildung 36: Kompression im Druckfüller

2. Kavität schließen: Dies geschieht zunächst hydraulisch. Erst wenige Zentimeter vor dem Nullpunkt greifen hydraulische Spannzangen und sorgen für die notwendige Zuhaltkraft.

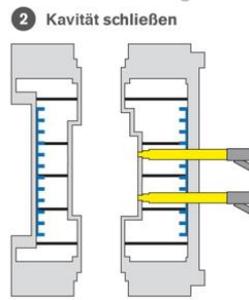


Abbildung 37: Kavität hydraulisch schliessen

3. Füllen unter Druck: Bei der Druckfüllung muss zuerst im geschlossenen Werkzeug ein Staudruck aufgebaut werden. Anschließend wird das Rohstoff-Material aus den Druckfüllbehältern über Füllinjektoren in das Werkzeug injiziert.

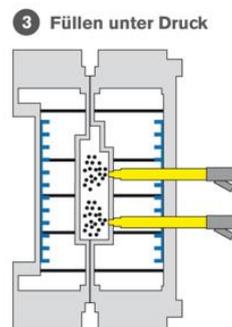


Abbildung 38: Füllen des Rohstoffmaterials

4. Bedampfen: Bei der Querbedampfung wird zuerst auf einer Seite das Dampfventil und auf der anderen Seite das Abwasserventil ganz geöffnet oder erst bei erreichtem Staudruck geregelt. Anschließend wird der gleiche Vorgang auf der anderen Seite wiederholt. Der Dampf strömt von der einen Dampfkammer über die Dampfdüsen im Werkzeug durch das Formteil in die andere Dampfkammer. Dampfdruck und Bedampfungsdauer bestimmen über die Verschweißung des Formteils.

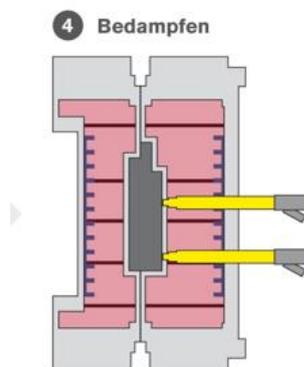


Abbildung 39: Bedampfen der Kavität

5. Kühlen: Die nachfolgende Wasserkühlung erfolgt über Sprühdüsen hinter dem Werkzeug. Vor dem Entformen benötigt das Formteil noch eine Stabilisierungszeit, damit der Schaumdruck bis auf ein akzeptables Maß absinkt.

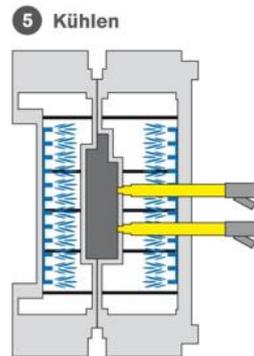


Abbildung 40: Wasserkühlung der Kavität über Sprühdüsen

6. Entformen: Beim Öffnen der Form wird das Formteil mit pneumatisch gesteuertem Auswerfen und teilweise mit Druckluftunterstützung aus der Haube gedrückt.

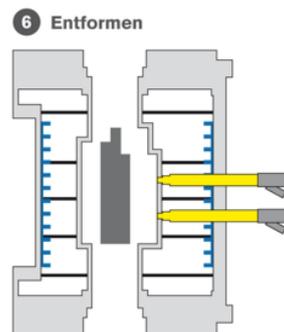


Abbildung 41: Pneumatische gesteuertes Auswerfen des Formteils

Das Messprogramm "Fertigung mit neuen Kavitäten aus dem Laser SLM Solution" gemäß „Tabelle 5: Messstellen am Formschaumautomaten für Fertigung mit neuer Kavität“ wurde im Messzeitraum 1. Oktober 2017 – 31. März 2018 für die o.a. fünf Produkte durchgeführt.

Dabei wurden zunächst die Zykluszeiten mit der jeweiligen gedruckten Kavität bei der Fertigung der Produkte erfasst. Die nachfolgenden Tabellen 19 bis 23 stellen jeweils die Zykluszeit für die konventionelle Kavität der gedruckten Kavität für das jeweilige Produkt gegenüber. Das daraus ermittelte Einsparpotenzial wird prozentual ausgewiesen.

Auswertung: Basta Box Deckel XL



	konventionell	SLM	
Summe	173,00	80,00	54 %
Zykluszeit Medieneinsatz	72,00	12,00	83 %
Bedampfungszeit	12,00	7,00	42 %
Kühl-und Stabilisierungszeit	120,00	35,00	71 %
Restliche Zykluszeit	41,00	38,00	7 %

Tabelle 19: Gegenüberstellung Zykluszeit Basta Box Deckel XL

Auswertung: Yogaball 80 mm



	konventionell	SLM	
Summe	102,00	59,80	41 %
Zykluszeit Medieneinsatz	48,00	8,80	82 %
Bedampfungszeit	9,00	3,80	58 %
Kühl-und Stabilisierungszeit	54,00	20,00	63 %
Restliche Zykluszeit	39,00	36,00	8 %

Tabelle 20: Gegenüberstellung Zykluszeit Yogaball 80 mm

Auswertung: Sonnenblende B



	konventionell	SLM	
Summe	119,00	56,00	53 %
Zykluszeit Medieneinsatz	80,00	19,00	76 %
Bedampfungszeit	35,00	11,00	69 %
Kühl-und Stabilisierungszeit	60,00	24,00	60 %
Restliche Zykluszeit	24,00	21,00	13 %

Tabelle 21: Gegenüberstellung Zykluszeit Sonnenblende B

Auswertung: Yogarolle



	konventionell	SLM	
Summe	149,00	122,00	18 %
Zykluszeit Medieneinsatz	100,00	31,00	69 %
Bedampfungszeit	20,00	11,00	45 %
Kühl-und Stabilisierungszeit	95,00	80,00	16 %
Restliche Zykluszeit	34,00	31,00	9 %

Tabelle 22: Gegenüberstellung Zykluszeit Yogarolle

Auswertung: Zeppy



	konventionell	SLM	
Summe	118,00	61,50	48 %
Zykluszeit Medieneinsatz	74,00	15,50	79 %
Bedampfungszeit	14,00	5,50	61 %
Kühl-und Stabilisierungszeit	70,00	25,00	64 %
Restliche Zykluszeit	34,00	31,00	9 %

Tabelle 23: Gegenüberstellung Zykluszeit Zeppy

Aus diesen Messungen kann man zusammenfassend festhalten:

- Einsparung der Medieneinsatzzeiten bei 70-80 %.
- Einsparung der Zykluszeit bei dünnen Bauteilen bei 50 %.
- Deutlich geringere Einsparung bei dickwandigen EPP-Bauteilen, da das EPP-Material eine deutlich längere Stabilisierungszeit benötigt.
- Größter Einfluss der Werkzeugtechnologie in der EPP-Verschäumung ist bei Medieneinsatzzeiten festzustellen.
- Zykluszeit von 50 Sekunden mit konventionellen Maschinenkonzepten möglich.
- Zykluszeitbegrenzung wird momentan durch Maschinenzeiten (ca. 35-40 Sekunden pro Zyklus) und Materialträgheit definiert.

Abweichend zum dargestellten Messprogramm wurde der Fokus auf die Einsparung des Wasser- und Dampfverbrauchs gelegt. Gründe hierfür lagen in der Gesamtbetrachtung der

Verbräuche im Unternehmen und den Einfluss der Werkzeugtechnologie auf diese Verbräuche.

Sowohl die Dampferzeugung als auch der Wasserverbrauch pro Schuss mit konventioneller Werkzeugtechnik sind enorm und werden durch die neue Werkzeugtechnologie drastisch reduziert.

Die elektrische Energie, die zum Betrieb der Maschinen genutzt wird, ist dabei verschwindend gering und wurde nicht erfasst. Hauptverbraucher der elektrischen Energie sind die hier installierten Druckluftgeneratoren. Die neue Werkzeugtechnologie hat dabei keinen Einfluss auf den Verbrauch der Druckluft.

Die Erfahrungen der letzten Monate haben außerdem gezeigt, dass die Werkzeugtechnologie keinen Einfluss auf den Materialeinsatz von EPP, ebenso nicht auf das Fertigteil Gewicht nass und das Fertigteil Gewicht trocken hat. Grund hierfür ist, dass Standardfüller genutzt werden und über die Füllinjektoren durch Variation des Fülldrucks und der Füllzeit identische Bauteilgewichte erzielt werden konnten.

Auch der Energiebedarf des Temperofens wurde von der neuen Werkzeugtechnologie nicht beeinflusst, da die nachgelagerte Ofenbehandlung, das sog. Tempern der Bauteile EPP-spezifisch und somit bauteilabhängig durchgeführt werden muss.

Die wesentlichen Einflüsse der Werkzeugtechnologie sind die reduzierte Zykluszeit und der reduzierte Wasser- und Dampfverbrauch.

Die oben dargestellten zeitlichen Einsparungen wurden mithilfe einer auf Erfahrungswerten basierten Kalkulationstabelle unter Berücksichtigung diverser technischer Spezifikationen, z.B. Öffnungs- und Schließzeiten von Dampfventilen, quantifiziert. Tabelle 24 wurde für alle oben dargestellten Produkte ausgeführt und erstellt.

Basta Box XL Deckel		
Konventionell		SLM
max. Aufspannfläche	0,72	max. Aufspannfläche
Dampfventil Eingang [DN]	50	Dampfventil Eingang [DN]
Dampfventil fest + beweglich	40	Dampfventil fest + beweglich
KvS-Wert	38	KvS-Wert
theo. Durchfluss	0,71 kg/s	theo. Durchfluss
Vordruckfaktor	9	Vordruckfaktor
Korrekturfaktor	75	Korrekturfaktor
Nenndurchfluss	0,53 kg/s	Nenndurchfluss
Zykluszeit	173 s	Zykluszeit
Zyklus/ h	21 Zyklen	Zyklus/ h
Zyklen / Tag	479 Zyklen	Zyklen / Tag
Teile für Boxen / Tag	479 Teile	Teile für Boxen / Tag
Abfallquote	1,0%	Abfallquote
Teile für Boxen netto / Tag	474 Teile	Teile für Boxen netto / Tag
Kondensat/Dampf vor bzw. bei Füllen	5,0 s	Kondensat/Dampf vor bzw. bei Füllen
1. Querdampf	2,0 s	1. Querdampf
2. Querdampf	2,0 s	2. Querdampf
Autoklav	3,0 s	Autoklav
Summe Dampfzeit	12,0 s	Summe Dampfzeit
Dampf pro Zyklus	7,44 kg	Dampf pro Zyklus
Dampf pro Stunde	155 kg	Dampf pro Stunde
Kosten Dampf / kg	0,030	Kosten Dampf / kg
Kosten Dampf / Zyklus	0,22 €	Kosten Dampf / Zyklus
Kondensieren/Druckabbau	1,0 s	Kondensieren/Druckabbau
Kühlzeit feste Seite	60,0 s	Kühlzeit feste Seite
Kühlzeit bewegliche Seite	60,0 s	Kühlzeit bewegliche Seite
Anzahl Düsen feste Seite	25 Stk	Anzahl Düsen feste Seite
Anzahl Düsen bew. Seite	25 Stk	Anzahl Düsen bew. Seite
Nenndurchfluss Spühdüse	0,033 m³/s	Nenndurchfluss Spühdüse
Wasser Kondensieren	1,7 l	Wasser Kondensieren
Wasser Kühlen feste Seite	50,0 l	Wasser Kühlen feste Seite
Wasser Kühlen bew. Seite	50,0 l	Wasser Kühlen bew. Seite
Wasser pro Zyklus	101,7 l	Wasser pro Zyklus
Wasserkosten Aufbereitung pro m³	0,03 €	Wasserkosten Aufbereitung pro m³
Wasserkosten / Zyklus	€ 0,0031	Wasserkosten / Zyklus

Tabelle 24: Kalkulationstabelle unter Berücksichtigung diverser technischer Spezifikationen, z.B. Öffnungs- und Schließzeiten von Dampfventilen

Die entsprechenden Dampf- und Wassereinsparungen wurden dann auf den entsprechenden Jahresbedarf hochgerechnet. Hierbei ist zu erkennen, dass die durch die neue Werkzeugtechnologie generierten Einsparungen den im Antragstext definierten Zielen größtenteils entsprechen. Durch die noch vielseitigere Verwendung der Technologie können weitere Einsparungen bei weiteren Produkten vorgenommen werden.

Die nachfolgende Tabelle 25 beinhaltet den im Antrag formulierten Dampf- und Wasserverbrauch am Beispiel eines Plattenwerkzeugs.

Diese Tabelle wurde auf die hier dargestellten Projekte

1. Basta Box Deckel XL
2. Yogaball
3. Sonnenblende
4. Yogarolle
5. Zeppy

übertragen und die Einsparungen pro Projekt bzgl. der Einsparungen gegenüber der konventionellen Werkzeugtechnologie dokumentiert. Diese sind im Folgenden in Tabelle 25 bis 30 dargestellt.

Werkzeug EPP-Platte Energieeinsparungen im Prozess		2016	2017	2018	2019	2020	Summe über Laufzeit
Bauzahl pro Jahr		120.000	120.000	120.000	120.000	120.000	
Kavitäten / WKZ = Zyklen	1	120.000	120.000	120.000	120.000	120.000	
Zykluszeit konventionelles WKZ	148 sek						
Zykluszeit neues WKZ	85 sek						
Dampfverbrauch kg konventionelles WKZ	13,5	1.620.000	1.620.000	1.620.000	1.620.000	1.620.000	
Dampfverbrauch kg neues WKZ	2,8	336.000	336.000	336.000	336.000	336.000	
Einsparungen Dampf kg		1.284.000	1.284.000	1.284.000	1.284.000	1.284.000	
Umrechnungsfaktor Dampf kg->KWh	0,888						
Energieeinsparung kWh pro kg Dampf	kWh	1.140.192	1.140.192	1.140.192	1.140.192	1.140.192	5.700.960
Dampferzeugung über Erdgas (CO ₂ -Äquivalent in kg)	0,202						
CO ₂ -Einsparung in	kg	230.319	230.319	230.319	230.319	230.319	1.151.594
Wasserverbrauch Liter konventionelles WKZ	385	46.200.000	46.200.000	46.200.000	46.200.000	46.200.000	
Wasserverbrauch Liter neues WKZ	34	4.080.000	4.080.000	4.080.000	4.080.000	4.080.000	
Einsparungen Wasser Liter		42.120.000	42.120.000	42.120.000	42.120.000	42.120.000	210.600.000
Einsparungen Wasser	m ³	42.120	42.120	42.120	42.120	42.120	210.600

Tabelle 25: Dampf- und Wasserverbrauch am Beispiel einer EPP-Platte

BastaBox Deckel XL Energieeinsparungen im Prozess		2017	2018	2019	2020	2021	Summe über Laufzeit
Bauzahl pro Jahr		60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	300.000
Kavitäten / WKZ = Zyklen	1	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	300.000
Dampfverbrauch kg konventionelles WKZ	7,44	446.400	446.400	446.400	446.400	446.400	
Dampfverbrauch kg neues WKZ	2,13	127.800	127.800	127.800	127.800	127.800	
Einsparungen Dampf kg		318.600	318.600	318.600	318.600	318.600	
Umrechnungsfaktor Dampf kg->KWh	0,888						
Energieeinsparung kWh pro kg Dampf	kWh	282.917	282.917	282.917	282.917	282.917	1.414.584
Dampferzeugung über Erdgas (CO ₂ -Äquivalent in kg)	0,202						
CO ₂ -Einsparung in	kg	57.149	57.149	57.149	57.149	57.149	285.746
Wasserverbrauch Liter konventionelles WKZ	101,7	6.102.000	6.102.000	6.102.000	6.102.000	6.102.000	
Wasserverbrauch Liter neues WKZ	10	600.000	600.000	600.000	600.000	600.000	
Einsparungen Wasser Liter		5.502.000	5.502.000	5.502.000	5.502.000	5.502.000	27.510.000
Einsparungen Wasser	m ³	5.502	5.502	5.502	5.502	5.502	27.510

Tabelle 26: Dampf- und Wasserverbrauch Basta Box Deckel XL

Yogaball Energieeinsparungen im Prozess		2017	2018	2019	2020	2021	Summe über Laufzeit
Bauzahl pro Jahr		100.000	300.000	300.000	300.000	300.000	1.300.000
Kavitäten / WKZ = Zyklen	1	100.000	300.000	300.000	300.000	300.000	1.300.000
Dampfverbrauch kg konventionelles WKZ	1,59	159.000	477.000	477.000	477.000	477.000	
Dampfverbrauch kg neues WKZ	0,43	43.000	129.000	129.000	129.000	129.000	
Einsparungen Dampf kg		116.000	348.000	348.000	348.000	348.000	
Umrechnungsfaktor Dampf kg->KWh	0,888						
Energieeinsparung kWh pro kg Dampf	kWh	103.008	309.024	309.024	309.024	309.024	1.339.104
Dampferzeugung über Erdgas (CO ₂ -Äquivalent in kg)	0,202						
CO ₂ -Einsparung in	kg	20.808	62.423	62.423	62.423	62.423	270.499
Wasserverbrauch Liter konventionelles WKZ	66,7	6.670.000	20.010.000	20.010.000	20.010.000	20.010.000	
Wasserverbrauch Liter neues WKZ	10	1.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000	
Einsparungen Wasser Liter		5.670.000	17.010.000	17.010.000	17.010.000	17.010.000	73.710.000
Einsparungen Wasser	m ³	5.670	17.010	17.010	17.010	17.010	73.710

Tabelle 27: Dampf- und Wasserverbrauch Yogaball

Sonnenblende B Energieeinsparungen im Prozess		2017	2018	2019	2020	2021	Summe über Laufzeit
Bauzahl pro Jahr		20.000	100.000	300.000	500.000	1.000.000	1.920.000
Kavitäten / WKZ = Zyklen	1	20.000	100.000	300.000	500.000	1.000.000	1.920.000
Dampfverbrauch kg konventionelles WKZ	10,63	212.600	1.063.000	3.189.000	5.315.000	10.630.000	
Dampfverbrauch kg neues WKZ	3,19	63.800	319.000	957.000	1.595.000	3.190.000	
Einsparungen Dampf kg		148.800	744.000	2.232.000	3.720.000	7.440.000	
Umrechnungsfaktor Dampf kg->KWh	0,888						
Energieeinsparung kWh pro kg Dampf	kWh	132.134	660.672	1.982.016	3.303.360	6.606.720	12.684.902
Dampferzeugung über Erdgas (CO ₂ -Äquivalent in kg)	0,202						
CO ₂ -Einsparung in	kg	26.691	133.456	400.367	667.279	1.334.557	2.562.350
Wasserverbrauch Liter konventionelles WKZ	76,7	1.534.000	7.670.000	23.010.000	38.350.000	76.700.000	
Wasserverbrauch Liter neues WKZ	15	300.000	1.500.000	4.500.000	7.500.000	15.000.000	
Einsparungen Wasser Liter		1.234.000	6.170.000	18.510.000	30.850.000	61.700.000	118.464.000
Einsparungen Wasser	m ³	1.234	6.170	18.510	30.850	61.700	118.464

Tabelle 28: Dampf- und Wasserverbrauch Sonnenblende B

Yogarolle Energieeinsparungen im Prozess		2017	2018	2019	2020	2021	Summe über Laufzeit
Bauzahl pro Jahr		50.000	200.000	200.000	200.000	200.000	850.000
Kavitäten / WKZ = Zyklen	1	50.000	200.000	200.000	200.000	200.000	850.000
Dampfverbrauch kg konventionelles WKZ	5,31	265.500	1.062.000	1.062.000	1.062.000	1.062.000	
Dampfverbrauch kg neues WKZ	3,19	159.500	638.000	638.000	638.000	638.000	
Einsparungen Dampf kg		106.000	424.000	424.000	424.000	424.000	
Umrechnungsfaktor Dampf kg->KWh	0,888						
Energieeinsparung kWh pro kg Dampf	kWh	94.128	376.512	376.512	376.512	376.512	1.600.176
Dampferzeugung über Erdgas (CO ₂ -Äquivalent in kg)	0,202						
CO ₂ -Einsparung in	kg	19.014	76.055	76.055	76.055	76.055	323.236
Wasserverbrauch Liter konventionelles WKZ	135	6.750.000	27.000.000	27.000.000	27.000.000	27.000.000	
Wasserverbrauch Liter neues WKZ	35	1.750.000	7.000.000	7.000.000	7.000.000	7.000.000	
Einsparungen Wasser Liter		5.000.000	20.000.000	20.000.000	20.000.000	20.000.000	85.000.000
Einsparungen Wasser	m ³	5.000	20.000	20.000	20.000	20.000	85.000

Tabelle 29: Dampf- und Wasserverbrauch Yogarolle

Zeppy Energieeinsparungen im Prozess		2017	2018	2019	2020	2021	Summe über Laufzeit
Bauzahl pro Jahr		50.000	200.000	200.000	200.000	200.000	850.000
Kavitäten / WKZ = Zyklen	1	50.000	200.000	200.000	200.000	200.000	850.000
Dampfverbrauch kg konventionelles WKZ	5,31	265.500	1.062.000	1.062.000	1.062.000	1.062.000	
Dampfverbrauch kg neues WKZ	1,59	79.500	318.000	318.000	318.000	318.000	
Einsparungen Dampf kg		186.000	744.000	744.000	744.000	744.000	
Umrechnungsfaktor Dampf kg->KWh	0,888						
Energieeinsparung kWh pro kg Dampf	kWh	165.168	660.672	660.672	660.672	660.672	2.807.856
Dampferzeugung über Erdgas (CO ₂ -Äquivalent in kg)	0,202						
CO ₂ -Einsparung in	kg	33.364	133.456	133.456	133.456	133.456	567.187
Wasserverbrauch Liter konventionelles WKZ	101,7	5.085.000	20.340.000	20.340.000	20.340.000	20.340.000	
Wasserverbrauch Liter neues WKZ	18,3	915.000	3.660.000	3.660.000	3.660.000	3.660.000	
Einsparungen Wasser Liter		4.170.000	16.680.000	16.680.000	16.680.000	16.680.000	70.890.000
Einsparungen Wasser	m ³	4.170	16.680	16.680	16.680	16.680	70.890

Tabelle 30: Dampf- und Wasserverbrauch Zeppy

Alle technischen Ziele (Zykluszeiteinsparung, Massereduzierung, Reduzierung Energieverbrauch) wurden erreicht.

Das volle Potential ist erst mit eigenem Maschinenkonzept vollständig ausschöpfbar, indem eine Entkopplung der Wärmeeinbringung in das Maschinengerüst erfolgt. Eine weitere Massereduzierung von 70 – 80 % ist umsetzbar, da der Großteil der Maschinenmasse nicht mehr mit Dampf in Berührung kommt und somit nicht in die Energiebilanz mit eingeht. Dadurch werden weitere Einsparungen bzgl. der Zykluszeit und der Medienverbräuche erwartet.

Das Messprogramm "Fertigung mit neuen Kavitäten aus dem 2. Laser SLM Solution" wurde im August 2019 für kleine Kavitäten gestartet und wird für das Projekt Sonnenblende B auf dem neuen Formschaumautomaten durchgeführt.

Anschließend wurde ab Dezember 2019 das Messprogramm für die großen Kavitäten anhand einer aktualisierten Version des Basta Box Deckels XL für den neuen Formschaumautomaten durchgeführt, um die Vergleichbarkeit der einzelnen Entwicklungsstufen zu ermöglichen.

Die Kavitäten mussten noch auf eine Trägerplatte aufgebracht und in die bestehenden Formschaumautomaten integriert werden.

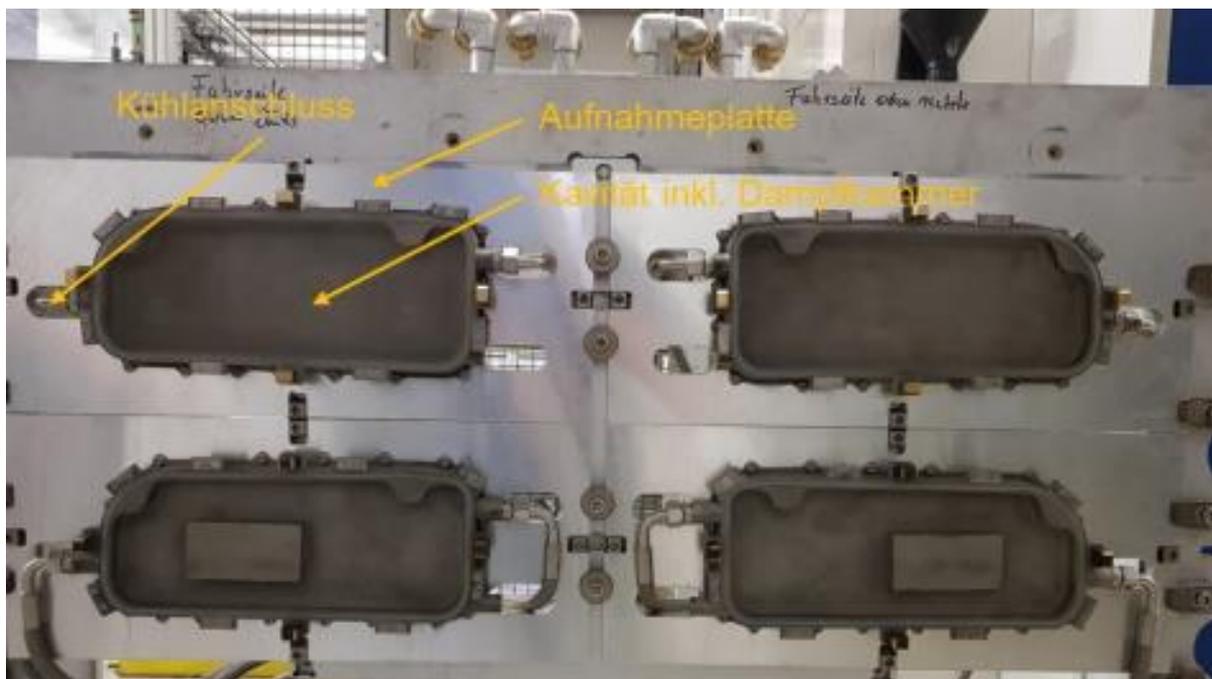


Abbildung 42: Werkzeug Sonnenblende B auf neuem Formschaumautomaten mit gedruckten Kavitäten inkl. Dampfkommer und Aufnahmeplatte je Kavität

Das Messprogramm "Fertigung mit neuen Kavitäten aus dem 2. Laser SLM Solution" gemäß „Tabelle 5: Messstellen am Formschaumautomaten für Fertigung mit neuer Kavität“ wurde im Messzeitraum 1. August 2019 – 31. Mai 2020 durchgeführt und es wurden die Zykluszeiten mit der jeweiligen gedruckten Kavität bei der Fertigung der Produkte erfasst.

Die nachfolgenden Tabellen stellen jeweils den Vergleich der Zykluszeit zwischen der konventionellen Kavität und der gedruckten Kavität für das jeweilige Produkt dar. In den Fällen,

wo ein SLM Werkzeug bereits auf einer konventionellen Maschine (K68) gelaufen ist, wird auch dieser Wert mit aufgenommen.

Auswertung: Sonnenblende A



	konventionell	SLM K68	SLM Monoblock	Einsparung SLM K68 - konv.	Einsparung SLM Monoblock - konv.
Summe	127,50	66,00	42,80	48 %	66 %
Zykluszeit Medieneinsatz	81,00	25,00	16,30	69 %	80 %
Bedampfungszeit	36,00	15,00	10,30	58 %	71 %
Kühl-und Stabilisierungszeit	65,00	28,00	14,00	57 %	78 %
Restliche Zykluszeit	26,50	23,00	12,50	13 %	53 %

Tabelle 31: Gegenüberstellung Zykluszeit Sonnenblende A

Auswertung: Sonnenblende B



	konventionell	SLM K68	SLM Monoblock	Einsparung SLM K68 - konv.	Einsparung SLM Monoblock - konv.
Summe	121,00	58,00	40,50	52 %	67 %
Zykluszeit Medieneinsatz	80,00	19,00	11,00	76 %	86 %
Bedampfungszeit	35,00	11,00	9,00	69 %	74 %
Kühl-und Stabilisierungszeit	60,00	24,00	17,00	60 %	72 %
Restliche Zykluszeit	26,00	23,00	12,50	12 %	52 %

Tabelle 32: Gegenüberstellung Zykluszeit Sonnenblende B

Auswertung: Basta Box Deckel XL



	konventionell	SLM K68	SLM Monoblock	Einsparung SLM K68 - konv.	Einsparung SLM Monoblock - konv.
Summe	173,00	80,00	64,10	54 %	63 %
Zykluszeit Medieneinsatz	72,00	12,00	12,00	83 %	83 %
Bedampfungszeit	12,00	7,00	7,00	42 %	42 %
Kühl-und Stabilisierungszeit	120,00	35,00	25,00	71 %	79 %
Restliche Zykluszeit	41,00	38,00	27,10	7 %	34 %

Tabelle 33: Gegenüberstellung Zykluszeit Basta Box Deckel XL

Auswertung: Terra EPP



	konventionell	SLM Monoblock	Einsparung SLM Monoblock - konv.
Summe	132,80	77,60	42 %
Zykluszeit Medieneinsatz	71,00	24,00	66 %
Bedampfungszeit	23,00	14,00	39 %
Kühl-und Stabilisierungszeit	63,00	20,00	68 %
Restliche Zykluszeit	46,80	33,60	28 %

Tabelle 34: Gegenüberstellung Zykluszeit Terra EPP

Aus diesen Messungen kann man zusammenfassend festhalten:

- Einsatz der Monoblocktechnologie auf dem neuen Formschaumautomaten hebt weitere Einsparpotentiale
- Einsparung der Medieneinsatzzeiten bei 66-86 %
- Einsparung der Zykluszeit bei dünnen Bauteilen bei über 60 %
- Größter Einfluss der Werkzeugtechnologie in der EPP-Verschäumung ist auch beim neuen Formschaumautomaten bei den Medieneinsatzzeiten festzustellen
- Zykluszeitreduzierung mit Monoblocktechnik und neuem Formschaumautomaten noch weiter erhöht

- Weitere Potentiale können in Zukunft in Kooperation mit dem Materialhersteller herausgearbeitet werden, durch die Anpassung des Werkstoffs an die neue Werkzeugtechnologie

Analog zur Auswertung der Umwelteffekte zuvor, wird der Fokus auf die Einsparung von Wasser und Dampf im Formschaumprozess gesetzt. Der Grund dafür wurde bereits bei den ersten Messungen erläutert.

Durch den neuen Formschaumautomaten konnte ein neuer Einfluss bei den Nass- und Trockengewichten der EPP-Bauteile festgestellt werden, der bei den alten Maschinen nicht aufgetreten ist. Die Differenz zwischen Nass- und Trockengewichten liegt im konventionellen Prozess zwischen ca. 10 – 15 %. Durch den trockeneren Prozess mit den neuen Werkzeugen auf dem neuen Formschaumautomaten kann die Differenz und somit der Wassergehalt der Bauteile auf 2 bis 5 % gesenkt werden. Dies bedeutet, dass die Bauteile, je nach Anwendungsfall nicht mehr zwangsweise getempert werden müssen. Außerdem hat der Wassergehalt der Bauteile einen Einfluss auf den zu erwartenden Schrumpfung. Dieser fällt niedriger aus als bei konventionellen Werkzeugen.

Die aus den zuvor dargelegten zeitlichen Einsparungen resultierenden Dampf- und Wassereinsparungen wurden nachfolgend auf den entsprechenden Jahresbedarf hochgerechnet. Daraus resultierend sind die Gesamteinsparungen für Dampf, CO₂ und Wasser dargestellt. Dafür wurden die bereits gemessenen Produkte, Sonnenblende A, Sonnenblende B, Basta Box Deckel und Terra EPP verwendet.

Sonnenblende A Energieeinsparungen im Prozess		2019	2020	2021	2022	2023	Summe über Laufzeit
Bauzahl pro Jahr		352.000	352.000	352.000	352.000	352.000	1.760.000
Kavitäten / WKZ = Zyklen	4	88.000	88.000	88.000	88.000	88.000	440.000
Dampfverbrauch kg konventionelles WKZ	15,9	1.399.200	1.399.200	1.399.200	1.399.200	1.399.200	
Dampfverbrauch kg neues WKZ - neue Maschine	3,98	350.240	350.240	350.240	350.240	350.240	
Einsparungen Dampf kg		1.048.960	1.048.960	1.048.960	1.048.960	1.048.960	
Umrechnungsfaktor Dampf kg->KWh	0,888						
Energieeinsparung kWh pro kg Dampf	kWh	931.476	931.476	931.476	931.476	931.476	4.657.382
Dampferzeugung über Erdgas (CO ₂ -Äquivalent in kg)	0,202						
CO ₂ -Einsparung in	kg	188.158	188.158	188.158	188.158	188.158	940.791
Wasserverbrauch Liter konventionelles WKZ	85,1	7.488.800	7.488.800	7.488.800	7.488.800	7.488.800	
Wasserverbrauch Liter neues WKZ - neue Maschine	8,5	748.000	748.000	748.000	748.000	748.000	
Einsparungen Wasser Liter (altes WKZ zu neues WKZ mit neuer Maschine)		6.740.800	6.740.800	6.740.800	6.740.800	6.740.800	33.704.000
Einsparungen Wasser	m ³	6.741	6.741	6.741	6.741	6.741	33.704

Tabelle 35: Dampf- und Wasserverbrauch Sonnenblende A Monoblockwerkzeug (neues WKZ neue Maschine)

Sonnenblende B Energieeinsparungen im Prozess		2019	2020	2021	2022	2023	Summe über Laufzeit
Bauzahl pro Jahr		80.000	400.000	1.200.000	2.000.000	4.000.000	7.680.000
Kavitäten / WKZ = Zyklen	4	20.000	100.000	300.000	500.000	1.000.000	1.920.000
Dampfverbrauch kg konventionelles WKZ	10,63	212.600	1.063.000	3.189.000	5.315.000	10.630.000	
Dampfverbrauch kg neues WKZ - alte Maschine	3,19	63.800	319.000	957.000	1.595.000	3.190.000	
Dampfverbrauch kg neues WKZ - neue Maschine	2,13	42.600	213.000	639.000	1.065.000	2.130.000	
Einsparungen Dampf kg (altes WKZ zu neues WKZ mit neuer Maschine)		170.000	850.000	2.550.000	4.250.000	8.500.000	
Umrechnungsfaktor Dampf kg->KWh	0,888						
Energieeinsparung kWh pro kg Dampf	kWh	150.960	754.800	2.264.400	3.774.000	7.548.000	14.492.160
Dampferzeugung über Erdgas (CO ₂ -Äquivalent in kg)	0,202						
CO ₂ -Einsparung in	kg	30.494	152.470	457.409	762.348	1.524.696	2.927.416
Wasserverbrauch Liter konventionelles WKZ	76,7	1.534.000	7.670.000	23.010.000	38.350.000	76.700.000	
Wasserverbrauch Liter neues WKZ - alte Maschine	15	300.000	1.500.000	4.500.000	7.500.000	15.000.000	
Wasserverbrauch Liter neues WKZ - neue Maschine	8	160.000	800.000	2.400.000	4.000.000	8.000.000	
Einsparungen Wasser Liter (altes WKZ zu neues WKZ mit neuer Maschine)		1.374.000	6.870.000	20.610.000	34.350.000	68.700.000	131.904.000
Einsparungen Wasser	m ³	1.374	6.870	20.610	34.350	68.700	131.904

Tabelle 36: Dampf- und Wasserverbrauch Sonnenblende B Monoblockwerkzeug (neues WKZ neue Maschine)

Basta Box Deckel XL Energieeinsparungen im Prozess		2017	2018	2019	2020	2021	Summe über Laufzeit
Bauzahl pro Jahr		60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	300.000
Kavitäten / WKZ = Zyklen	1	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	300.000
Dampfverbrauch kg konventionelles WKZ	7,44	446.400	446.400	446.400	446.400	446.400	2.232.000
Dampfverbrauch kg neues WKZ - alte Maschine	2,13	127.800	127.800	127.800	127.800	127.800	639.000
Dampfverbrauch kg neues WKZ - neue Maschine	1,59	95.400	95.400	95.400	95.400	95.400	477.000
Einsparungen Dampf kg (altes WKZ zu neues WKZ mit neuer Maschine)		351.000	351.000	351.000	351.000	351.000	1.755.000
Umrechnungsfaktor Dampf kg->KWh	0,888						
Energieeinsparung kWh pro kg Dampf	kWh	311.688	311.688	311.688	311.688	311.688	1.558.440
Dampferzeugung über Erdgas (CO ₂ -Äquivalent in kg)	0,202						
CO ₂ -Einsparung in	kg	62.961	62.961	62.961	62.961	62.961	314.805
Wasserverbrauch Liter konventionelles WKZ	101,7	6.102.000	6.102.000	6.102.000	6.102.000	6.102.000	30.510.000
Wasserverbrauch Liter neues WKZ - alte Maschine	10	600.000	600.000	600.000	600.000	600.000	3.000.000
Wasserverbrauch Liter neues WKZ - neue Maschine	8,3	498.000	498.000	498.000	498.000	498.000	2.490.000
Einsparungen Wasser Liter (konventionelles WKZ zu neues WKZ mit neuer Maschine)		5.604.000	5.604.000	5.604.000	5.604.000	5.604.000	28.020.000
Einsparungen Wasser	m ³	5.604	5.604	5.604	5.604	5.604	28.020

Tabelle 37: Dampf- und Wasserverbrauch Basta Box Deckel XL Monoblockwerkzeug (neues WKZ neue Maschine)

Terra EPP Energieeinsparungen im Prozess		2019	2020	2021	2022	2023	Summe über Laufzeit
Bauzahl pro Jahr		120.000	200.000	200.000	200.000	200.000	920.000
Kavitäten / WKZ = Zyklen	1	120.000	200.000	200.000	200.000	200.000	920.000
Dampfverbrauch kg konventionelles WKZ	9,56	1.147.200	1.912.000	1.912.000	1.912.000	1.912.000	
Dampfverbrauch kg neues WKZ - neue Maschine	2,92	350.400	584.000	584.000	584.000	584.000	
Einsparungen Dampf kg (altes WKZ zu neues WKZ mit neuer Maschine)		796.800	1.328.000	1.328.000	1.328.000	1.328.000	
Umrechnungsfaktor Dampf kg->KWh	0,888						
Energieeinsparung kWh pro kg Dampf	kWh	707.558	1.179.264	1.179.264	1.179.264	1.179.264	5.424.614
Dampferzeugung über Erdgas (CO ₂ -Äquivalent in kg)	0,202						
CO ₂ -Einsparung in	kg	142.927	238.211	238.211	238.211	238.211	1.095.772
Wasserverbrauch Liter konventionelles WKZ	165	19.800.000	33.000.000	33.000.000	33.000.000	33.000.000	
Wasserverbrauch Liter neues WKZ - neue Maschine	96	11.520.000	19.200.000	19.200.000	19.200.000	19.200.000	
Einsparungen Wasser Liter (altes WKZ zu neues WKZ mit neuer Maschine)		8.280.000	13.800.000	13.800.000	13.800.000	13.800.000	63.480.000
Einsparungen Wasser	m ³	8.280	13.800	13.800	13.800	13.800	63.480

Tabelle 38: Dampf- und Wasserverbrauch Terra EPP Monoblockwerkzeug (neues WKZ neue Maschine)

3.3 Umweltbilanz

Um die Vergleichbarkeit der Einsparungen zu gewährleisten, die in den Antragsunterlagen definiert wurden, wird der Basta Box Deckel XL als Referenzbauteil ausgewählt. Dieses Produkt kommt von seinen Abmaßen am nächsten an die definierte EPP Platte heran und wurde in allen drei Entwicklungsstufen umgesetzt und gemessen. Anhand dieses Vergleichs werden anschließend die Umwelteffekte bewertet und mit den Antragszielen abgeglichen.

Die Spalten 1 und 2 mit den Daten der EPP-Platte (grüner Hintergrund) sind aus der Antragsstellung übernommen, siehe Tabelle 1. Die Gewichte des Basta Box XL Deckels (hellblauer Hintergrund Zeile 1) sind aus den Messwerten der Tabelle 16 übernommen. Die folgenden Werte zu Energieverbrauch pro kg, Energieverbrauch gesamt für Werkzeug und die CO₂ Menge (Zeile 2-4) wurden aus den Messwerten der Maschinenleistungsaufnahme sowie der Energiebedarf bei der Herstellung des Grundmaterials ermittelt.

Für die Herstellung der EPP-Platte bzw. des Basta Box Deckels XL wird ein Werkzeug benötigt, dessen konventioneller und innovativer Herstellprozess (Laser 1 und Laser 2) mit den jeweiligen Verbräuchen in den nachfolgenden Tabellen gegenübergestellt sind:

	Konventionell Material: Aluminium EPP-Platte Bei Antragstellung	Innovativ Material: Edelstahl EPP-Platte Bei Antragstellung	Reduktion	Konventionell Material: Aluminium Basta Box Deckel XL Messprogramm	Innovativ Material: Edelstahl Basta Box Deckel XL Messprogramm	Reduktion
Finales Gewicht der Kavität in kg	437,80	58,79	379,01 86,6 %	80,00	16,80	63,20 79,0 %
Summe Energieverbrauch in kWh für finale Kavität ⁸	26.314,71	1.969,18	24.345,53 92,5 %	4.850,40	687,63	4.163,77 85,8 %
Energieverbrauch in kWh für die Herstellung; Kennwert pro 1 kg finale Kavität	60,11	33,50	26,61 44,3 %	60,63	40,87	19,76 32,6 %
CO ₂ -Menge ⁹ in kg	13.867,85	1.037,76	12.830,09 92,5 %	2.352,44	333,01	2.019,43 85,8 %

Tabelle 39: Darstellung des Energieverbrauchs des Herstellungsprozess der EPP Platte (Antrag) sowie Vergleich Basta Box Deckel (Messprogramm)

⁸ Summe der Energieverbräuche aus dem Herstellungsverfahren des Rohmaterials und des Fertigungsverfahrens zur Weiterverarbeitung (Fräsen und 3D-Druck)
Berechnungswerte: Energiebedarf für Herstellung Material: Stahl hochlegiert (Legierungsanteil > 5 %): 95,66 MJ/kg; Aluminiumblech (0 % Recyclatanteil): 210 MJ/kg; Quelle: <http://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/>

⁹ Primärenergieträger Strom:
Grundlage EPP Platte bei Antragsstellung: 527 g CO₂ je kWh (Stand 2015)
Grundlage Basta Box Deckel XL Messprogramm: 485 g CO₂ je kWh (Stand 2017)
Quelle: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/bilanz-2019-co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom>

Für die Gesamtkapazität (mind. 60 komplexe Werkzeuge, bis zu 140 einfache Werkzeuge) der Laseranlagen ergibt sich die nachfolgende Umweltbilanz:

	Konventionell Material: Aluminium EPP-Platte Bei Antragstellung	Innovativ Material: Edelstahl EPP-Platte Bei Antragstellung	Reduktion	Konventionell Material: Aluminium Basta Box Deckel XL Messprogramm	Innovativ Material: Edelstahl Basta Box Deckel XL Messprogramm	Reduktion
Finales Gewicht der Kavität für 60 Werkzeuge in kg	26.267,95	3.527,06	22.740,89 86,6 %	4.800,00	1.008,00	3.792,00 79,0 %
Summe Energieverbrauch in kWh für finale Kavität bei 60 Werkzeugen	1.578.966,48	118.156,51	1.460.809,97 92,5 %	291.024,00	41.197,73	249.826,27 85,8 %
Energieverbrauch in kWh für die Herstellung; Kennwert pro 1 kg finale Kavität	60,11	33,50	26,61 44,3 %	60,63	40,87	19,76 32,6 %
CO ₂ -Menge in kg	832.115,33	62.268,48	769.846,85 92,5 %	141.146,64	19.980,90	121.165,74 85,8 %

Tabelle 40: Darstellung des Energieverbrauchs, konventionell und innovativ für die Gesamtkapazität (mind. 60 Werkzeuge)

Bezogen auf 60 Werkzeuge für einen Basta Box Deckel XL sinkt der Materialverbrauch von 4.800 kg auf künftig 1.008 kg und der Energieverbrauch von 60,63 kWh/kg auf 40,87 kWh/kg. Absolut bedeutet dies eine Senkung des Energieverbrauchs zur Herstellung der Werkzeuge von 291.024 kWh auf künftig 41.197,73 kWh und damit einhergehend eine Senkung der CO₂-Menge von 141.146,64 kg auf künftig 19.980,90 kg.

Wird der direkte Vergleich zwischen der EPP-Platte bei Antragstellung sowie dem Basta Box Deckel im realen Messprogramm gezogen, so kann man erkennen, dass die angedachten Ziele bei der Reduzierung des Materialverbrauch mit 79,0 % versus 86,6 % und des Energieverbrauchs zur Herstellung der Werkzeuge mit 85,8 % versus 92,5 % nahezu erreicht wurden. Dies kann als Erfolg und Erreichen der Ziele bezeichnet werden.

In der Anwendung der neuen gedruckten Werkzeuge in den Formschaumautomaten ergeben sich darüber hinaus weitere Umweltentlastungen, die wieder im Vergleich mit den erwarteten Einsparungen der EPP-Platte und dem Basta Box Deckel XL ins Verhältnis gesetzt werden. Dazu wurden die Gesamtwerte der Einsparungen über die Laufzeit der Produkte ermittelt bzw. aus den zuvor bereits angegebenen Tabellen (EPP-Platte: Tabelle 3; Basta Box Deckel XL: Tabelle 38) herangezogen und verglichen. Folgende Tabelle 41 ergibt sich in der Gesamtübersicht:

Vergleich Gesamteinsparung EPP-Platte vs. Basta Box Deckel XL über Laufzeit						
	Prognostizierte Werte Antrag: EPP-Platte bisheriger Form-schaumautomat	Erreichte Werte Messprogramm: Basta Box Deckel XL V2 bisheriger Form-schaumautomat	Erreichte Werte Messprogramm: Basta Box Deckel XL V3 innovativer Form-schaumautomat	Vergleich Einsparung EPP Platte (Spalte 2) zu BBDXL V2 bisheriger FSA (Spalte 3)	Vergleich Einsparung EPP Platte (Spalte 2) zu BBDXL V3 innovativer FSA (Spalte 4)	Vergleich Einsparung BBDXL V2 bisheriger FSA (Spalte 3) zu BBDXL V3 innovativer FSA (Spalte 4)
Zykluszeit konventionelles WKZ	148,00 s	173,00 s	173,00 s	42,57 %	42,57 %	50,87 %
Zykluszeit neues SLM WKZ	85,00 s	85,00 s	64,00 s	50,87 %	63,01 %	63,01 %
Zykluszeit Prozentuale Einsparung	42,57 %	50,87 %	63,01 %	-8,30 %	-20,44 %	-12,14 %
Bauzahl über Laufzeit	600.000 Stk	300.000 Stk	300.000 Stk			
Dampfverbrauch kg konventionelles WKZ	8.100.000	2.232.000	2.232.000			
Dampfverbrauch kg neues WKZ	1.680.000	639.000	477.000	79,26 %	79,26 %	71,37 %
Einsparungen Dampf kg	6.420.000	1.593.000	1.755.000	71,37 %	78,63 %	78,63 %
Prozentuale Einsparung Dampf	79,26 %	71,37 %	78,63 %	7,89 %	0,63 %	7,26 %
Umrechnungsfaktor Dampf kg->KWh: 0,888						
Energieeinsparung kWh pro kg Dampf in kWh	5.700.960	1.414.584	1.558.440	4.286.376	4.142.520	143.856
Dampferzeugung über Erdgas (CO ₂ -Äquivalent in kg): 0,202						
CO2-Einsparung in kg	1.151.594	285.746	314.805	865.848	836.789	29.059
Wasserverbrauch Liter konventionelles WKZ						
Wasserverbrauch Liter neues WKZ	231.000.000	30.510.000	30.510.000			
Wasserverbrauch Liter neues WKZ	20.400.000	3.000.000	2.490.000	91,17 %	91,17 %	90,17 %
Einsparungen Wasser Liter	210.600.000	27.510.000	28.020.000	90,17 %	91,84 %	91,84 %
Prozentuale Einsparung Wasser	91,17 %	90,17 %	91,84 %	1,00%	-0,67 %	1,67 %
Einsparungen Wasser in m ³	210.600	27.510	28.020			

Tabelle 41: Umweltentlastung für den innovativen Herstellungsprozess der EPP-Platte im Vergleich zu Basta Box Deckel XL V2 und V3

Bei der Betrachtung der absoluten Energie- und Wassereinsparung sind die Bauzahl und die Anzahl der verwendeten Zyklen pro Jahr von entscheidender Bedeutung. Bei der EPP-Platte wird von einer Bauzahl in Höhe von 600.000 Stück über die Laufzeit und Zyklen ebenfalls in Höhe von 600.000 ausgegangen. Der Basta-Box-Deckel XL kommt auf eine Bauzahl von lediglich 300.000 Stück und ebenso eine Zyklenanzahl von 300.000 über die Laufzeit des Produktes.

Da die Stückzahl sowie der Wasser- und Dampfverbrauch sehr stark bauteilbezogen und bei einem gemischten Produktportfolio sehr stark verteilt sind, wird die prozentuale Einsparung der Produkte miteinander verglichen. In Tabelle 41 werden die Zielwerte aus dem Antrag für die EPP-Platte mit der Zwischenstufe Basta Box Deckel V2 SLM-Werkzeug auf bisherigem Formschaumautomat sowie Basta Box Deckel V3 SLM-Werkzeug auf innovativem Formschaumautomat prozentual verglichen. Außerdem ist in der letzten Spalte der Vergleich der Basta Box XL Deckel auf bisherigem und innovativem Formschaumautomat dargestellt, um den Sprung zwischen den beiden Werkzeugständen zu vergleichen. Im Folgenden werden die Werte aus Tabelle 41 näher erläutert.

Mit dem mittleren Werkzeugstand Basta Box XL Deckel V2 auf dem bisherigem Formschaumautomat wurden die prozentualen Ziele bei der Zykluszeitreduzierung bereits um 8,3 % (Tabelle 41 Spalte 5) übertroffen. Dieser konnte durch den innovativen Formschaumautomaten auf 20,44 % (Tabelle 41 Spalte 6) ausgebaut werden, was einer Gesamteinsparung in der Zykluszeit von über 63 % (Tabelle 41 Spalte 4) entspricht.

Bei der Einsparung von Dampf lag der mittlere Werkzeugstand mit bisherigem Formschaumautomaten mit 7,89 % (Tabelle 41 Spalte 5) weniger Einsparung noch leicht unter den gesetzten Antragszielen. Durch den innovativen Formschaumautomaten konnte das Ziel der prognostizierten Dampfersparnis auf 78,63 % (Tabelle 41 Spalte 4) erhöht und somit das Ergebnis mit 0,63 % (Tabelle 41 Spalte 6) Abweichung erreicht werden. Die Wasserersparnis wurde beim mittleren Werkzeugstand bis auf 1 % (Tabelle 41 Spalte 5) bereits erreicht und konnte mit dem neuen Formschaumautomaten auch nochmal mit 0,67 % (Tabelle 41 Spalte 6) übertroffen werden. Somit konnten die Einsparungen durch den innovativen Formschaumautomaten nochmals gesteigert werden. Ein weiterer großer Vorteil ergibt sich durch die weitere Ersparnis in der Zykluszeit, um die Produktivität der Maschinen zu erhöhen.

Die Einsparungsziele im konventionellen und innovativen Formschaumprozess wurden also komplett erreicht. Durch den Vergleich der Zielwerte der EPP-Platte und der erreichten Werte des Basta Box Deckel XL im Messprogramm können die absoluten Werte nicht direkt verglichen werden, da das Bauteilgewicht und die Bauzahlen zu unterschiedlich sind. Dennoch ergibt sich bei der Herstellung des Basta Box Deckels XL mittels neuen Werkzeugs im innovativen Formschaumautomaten und einer Stückzahl von 300.000 Stück über die Laufzeit eine Einsparung von 1.558.440 kWh Dampf (78,63 %), 28.020 m³ Wasser (91,84 %) sowie einer CO₂ Menge von 314.805 kg gegenüber der Herstellung mit einem konventionellen Werkzeug in einem konventionellem Formschaumautomaten (Tabelle 41 Spalte 4).

Die Erhöhung der absoluten Einsparungen wird über die Umsetzung von weiteren Produkten mit hoher Laufzeit und Stückzahl weiter vergrößert und mit der Zeit immer weiter steigen, je mehr gedruckte Werkzeuge im Markt im Einsatz sind.

3.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Bisher wurden Werkzeuge bei Werkzeugbauern zugekauft. Wir sind nun in der Lage einen Teil unserer Werkzeuge innerhalb der Overath Gruppe selbst herzustellen. Für die Anzahl von voraussichtlich 60 Werkzeugen mit je 2 Kavitäten pro Jahr können daher die externen Einkaufskosten eingespart werden.

Die Kosten für ein Werkzeug mit zwei Kavitäten liegen je nach Komplexität zwischen 10.000 € und ca. 30.000 €. Die Herstellkosten für ein vergleichbares Werkzeug mit einer im SLM-Verfahren hergestellten Kavität kosten ca. das 2-3-fache. Das ist aber kein Hinderungsgrund, wie uns in zahlreichen Gesprächen auch mit externen Verwendern bestätigt wurde.

Der für den Verwender eigentliche Vorteil liegt in dem enormen Einsparpotential bei den laufenden Herstellkosten in der Formteilproduktion, wie es unter Punkt „3.2 Stoff- und Energiebilanz“ bereits ausführlich dargestellt wurde.

- Die Gaskosten für die Dampferzeugung werden um ca. 60-70 % sinken
- Die Kosten für das Kühl- und das Abwasser werden durch geschlossenen Kreislauf um 90 % sinken.
- Die Zykluszeiten werden um mehr als 50 % sinken

Dadurch ergibt sich für den Verwender trotz des relativ gesehen hohen Preises ein relativ kurzer ROI. Darüber hinaus spielt das wachsende Bewusstsein zur notwendigen Einsparung von CO₂ weitere positive Verkaufsargumente. Dies gilt insbesondere heute schon für Verwender in Ländern, in denen CO₂ bereits besteuert wird, wie z.B. in Schweden, wo die Kosten für 1 Tonne CO₂ heute bei ca. 115 € liegen.

In Summe sind das solch gravierende Vorteile, dass kein Formschäumer intern sowie extern, der z.B. automobile Einbauteile herstellt, darauf verzichten kann. In Kombination mit der bisher nicht gegebenen absoluten Gestaltungsfreiheit und der neuen Freiheit bei der Gestaltung von Formteiloberflächen, führt zukünftig kein Weg an dieser Technik vorbei.

Die Herstellung der Werkzeuge ist durch die Overath SLM patentiert und bleibt vorerst dieser vorbehalten. In Zukunft könnten Lizenzierungsmodelle eine Alternative sein, um anderen Werkzeugherstellern die Werkzeugtechnologie zugänglich zu machen. Wir sind nach Durchführung des Projektes nun zu dem Schluss gekommen, dass es zwei Ausbaustufen der Technologie gibt, die wir unserer Schwestergesellschaft sowie dem externen Markt von Formschäumern anbieten.

Um kurzfristig Umsatz erzielen zu können, müssen wir den aktuell größten Markt und damit den bestehenden Maschinenpark bei unserer Schwestergesellschaft sowie bei externen Formschäumern erreichen. Das bedingt, dass es einen „Adapter-Satz“ für konventionelle Maschinen geben wird, durch den eine solche Maschine mit den SLM-Werkzeugen produzieren kann. Ein Konzept für einen solchen Adaptersatz ist erarbeitet und wird bereits getestet. Hierdurch können bereits große Anteile der Einsparungen an Energie und Zeit erreicht werden. Voll umsetzbar sind hier die Oberflächen- und Designvorteile.

Auch gibt es sog. Monoblock-Maschinen im Markt. Deren Anzahl ist deutlich geringer, womit der Zielmarkt hier kleiner ist. Aber diese Maschinentechologie ermöglicht bereits den Einsatz unserer sog. „Double Action-Tools“ (neues Monoblockwerkzeug auf neuem Formschaumautomat) und damit die Realisierung der Energieeinsparungen dieser Werkzeugtechnologie.

Diese beiden Ansätze liegen daher vertrieblich im Fokus des Unternehmens.

In einem nächsten Schritt soll es ein Entwicklungsprojekt zur Konzipierung eines neuen Maschinenkonzeptes geben, welches zusätzlich die Peripherie einer Formschaumfabrik berücksichtigt. Hier sehen wir noch weitere, große Einsparpotentiale für Energie und damit CO₂. Eine solche Fabrik würde nur noch mit Double-Action-Tools produzieren. Da dies aber größere Investitionen bei den Verwendern erfordert, kann das nur mittelfristig zu Umsätzen bei der Overath SLM GmbH führen.

Wie zu Beginn des Projektes bereits angenommen, haben wir zunächst ausschließlich für den Eigenbedarf produziert. Es hat sich bestätigt, dass in dieser Zeit noch viele Erkenntnisse gewonnen wurden, die zu weiteren Verbesserungen an unserem Konzept geführt haben.

Unser Ziel war es, zur Kunststoffmesse K im Oktober 2019 in Düsseldorf serienreife Werkzeuge vorstellen zu können. Die ist uns gelungen. Wir haben während der K Messe potentielle Kunden aus Europa und Ländern außerhalb Europas in das Formteilwerk in Oebisfelde einladen können und unseren Formteilautomaten mit einem Double-Action Tool in Produktion vorgestellt.

Dies war der Auftakt unserer vertrieblichen Aktivitäten mit externen Formschäumern. Seit dem wurden nun auch weitere Formschäumer aus Deutschland und Europa angesprochen. Hierbei haben wir uns noch auf solche Formschäumer konzentriert, die auch mit Innovationswillen am Markt sind.

Anfang 2020 konnte daraus der erste externe Werkzeugauftrag generiert werden. Weitere Projekte sind angelaufen und befinden sich in der Bearbeitung. Hierbei wurde nun auch erstmals aufgenommen, dass die Technologie auch für EPS geeignet ist und hierfür weiterentwickelt werden kann.

Leider sind die meisten dieser Projekte im 1. Halbjahr 2020 aufgrund der Covid-19 Pandemie unterbrochen worden. Dieses Ereignis wird uns in der wirtschaftlichen Entwicklung sicher um 1 Jahr zurückwerfen und ggfls. auch eine flachere Wachstumskurve ermöglichen. Dennoch sehen wir eine Amortisation unserer Investitionen nach spätestens 8 Jahren, wie die nachfolgende Tabelle 42 aufzeigt.

3.5 Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

Über 20 % der Herstellungskosten eines Formschäumproduktes sind Energiekosten, aber nur 1 % davon werden zur Formteilbildung genutzt. Diese Verbräuche ergeben sich unter anderem durch die eingesetzte Verfahrenstechnologie, insbesondere die bisher eingesetzten konventionellen Kavitäten. Üblich ist die Herstellung über mehrachsige CNC-gesteuerte Maschinen. Das Werkzeug ist in der Regel eine zweiteilige Aluminiumform und besteht aus den Kavitäten, einer Dampfkammer und einem Rahmen, der als Verbindung zum eigentlichen Formschäumautomaten inklusive aller Anschlüsse für die Medien dient.

Die verarbeitenden Technologien sind veraltet. Die Energie des eingesetzten Kühlwassers im Prozess wird zu annähernd 100 % verbraucht. Hohe Zykluszeiten in der Fertigung von bis zu 4 Minuten je Formteil sind vergleichbar extrem hoch und damit kostenintensiv. In der Verarbeitung werden hohe Dampf- und Wassermengen durch das offene Anlagenkonzept in die Produktionshalle freigesetzt, was die Korrosionsanfälligkeit und damit die Standzeit der Anlagen wesentlich reduziert. Die Oberflächengestaltung der Produkte ist technologisch stark eingeschränkt und wenig präsentabel.

Die EPS-Branche ist gekennzeichnet durch Unternehmen, die sich in der Regel nur auf eine Technologie konzentrieren, die Formschäumautomaten-Herstellung mit extern gefertigten Werkzeugen oder als Werkzeughersteller und Verschäumer. Jeder fokussiert Optimierungen nur im jeweiligen Bereich. Deshalb werden nach wie vor Nassverfahren unter den genannten Bedingungen als Stand der Technik eingesetzt.

Mit unserem Projekt konnten wir die bislang vertikal¹⁰ produzierten Kavitäten durch neu aufgebaute, mit dem SLM Verfahren¹¹ hergestellte Kavitäten ersetzen und weiterentwickeln. Das techn. Know-How wurde dabei von der Maschine in das Werkzeug verlagert. Auch die Formschäumautomaten-Herstellung erfährt hierdurch neue Impulse.

4. Übertragbarkeit

4.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Während der Herstellung der unterschiedlich gedruckten Werkzeuge über die vergangenen Jahre und der damit einhergehenden Einsparungen der Medien kristallisierte sich die enorme Tragweite dieser neuartigen Technologie heraus. Die Energiebedarfe in der konventionellen Standardfertigung lassen sich auf die drei Bereiche Werkzeug, Maschine und Peripherie aufteilen.

Dabei fallen ca. 60 % der verbrauchten Energie im Werkzeug während des Formschaumprozesses an, weitere 5 % der Energie wird durch den Formschaumautomaten

¹⁰ Vertikal meint Fertigung durch spanabhebende Verfahren (Fräsen, Bohren).

¹¹ Das Selektive Laserschmelzen ist ein additives Fertigungsverfahren, bei dem der zu verarbeitende Werkstoff, in Pulverform in dünnen Schichten, auf einer Grundplatte, aufgebracht wird. Dieser Werkstoff wird dann mittels Laserstrahlung vollständig umgeschmolzen und bildet nach der Erstarrung eine feste Materialschicht.

verbraucht. Der nicht unerhebliche Teil von 35 % der Energie fällt in der Peripherie der Fabrik an, das bedeutet, durch Leitungsverluste der Dampfleitungen, Kühlwasseraufbereitung usw..

Diese 60 % Energie, die im Werkzeug anfallen, konnten wir durch den Einsatz der 3-D-gedruckten Werkzeuge bereits drastisch reduzieren.

Um die Energiebilanz der kompletten Fertigung zu optimieren, muss aber ein ganzheitlicher Ansatz gewählt und das Fertigungslayout überarbeitet werden.

- Dazu zählt eine dezentrale Versorgung mit Medien an den Maschinen, die durch den verringerten Medieneinsatz deutlich kleiner ausfallen kann als bisher. So wird die Fertigung flexibler, da auch einzelne Maschinengruppen autark betrieben werden können, ohne die komplette Peripherie mitnutzen zu müssen.
- Dazu zählen ein maschinenbezogener geschlossener Kühlkreislauf sowie Schnelldampferzeuger und Kompressoren.

Es resultiert eine Fabrik der Zukunft, mit geändertem Layout und deutlich verbesserter Energiebilanz. Diese Fabrik der Zukunft soll in einem potentiellen Folgeprojekt betrachtet werden.

4.2 Modellcharakter/Übertragbarkeit

Eine derart beschriebene Technik zur Herstellung von Kavitäten existierte zum Zeitpunkt der Antragstellung nicht. Üblich war die Herstellung über mehrachsige CNC-gesteuerte Maschinen. Der Einsatz dieser innovativen, neuen SLM-Technologie bei der Overath Gruppe war damit die erste weltweit.

Wir können von einem weltweiten Bedarf von jährlich 40.000 Werkzeugen im Jahr ausgehen. Dies entspricht der Erwartung beim Start des Projektes 2016. Das ergibt sich aus folgenden Marktkennzahlen:

- Weltmarktbestand an EPP Maschinen: 1.200 Stück
- Weltmarktbestand an EPS Maschinen: 12.000 Stück
- Summe: ca. 13.200 Stück**
- Annahme: 3 neue Werkzeuge pro Maschine pro Jahr
- 13.200 Maschinen x 3 Werkzeuge = 40.000 Werkzeuge pro Jahr

Jedes Werkzeug besteht aus mehreren Kavitäten. Wir gehen konservativ davon aus, dass es im Schnitt 2 Kavitäten pro Werkzeug sind. Daher muss man die oben dargestellten Einsparungen bei einem 100 % Ersatz aller eingesetzten Kavitäten mit 80.000 Kavitäten multiplizieren.

Im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland gibt es im Bereich des Werkzeugbaus ca. 200 Betriebe, die die hier vorgestellte Technologie entsprechend anwenden können.

Neben den genannten direkten Vorteilen durch das SLM Verfahren sind auch die indirekten Vorteile durch Material- und damit auch Gewichtseinsparungen von zunehmender Bedeutung.

Die Übertragbarkeit ist durch die gestalterische Freiheit, die Kostenreduktion und die daraus entstehenden Diversifikationsmöglichkeiten optimiert.

SLM-seitig können die erzielten Diversifikationsmöglichkeiten auf weitere Produkte übertragen werden, um damit neue Märkte zu erschließen. Die Gestaltung und Funktionalisierung der Oberfläche SLM-gefertigter Bauteile macht weitere Nachbearbeitungsschritte obsolet. Die Prozessweiterentwicklung zur Produktion verzugsfreier großer Bauteile ist auf weitere Branchen und Anwendungen übertragbar. Durch die systematische Untersuchung der Darstellbarkeit von Oberflächenstrukturen und Wandstärken, werden erste konstruktive Leitlinien des SLM-Prozesses erarbeitet und in wissenschaftliche Gremien einfließen.

Mit dem neuen Verfahren und den damit verbundenen positiven Einflüssen auf die Herstellkosten werden viele Unternehmen motiviert, Ihre Fertigungstechnologien neu zu überdenken und in Innovationen zu investieren. Aus einer anderen Sichtweise wird damit die Innovationskraft angeregt. Unabdingbar ist ein Austausch der Kavitäten, auch um in Zukunft neue weitergehende Produkte herzustellen, die bislang technologisch nicht herstellbar waren. Zudem lässt sich auch der Arbeits- und Gesundheitsschutz wesentlich verbessern, was zusätzlich entscheidende Vorteile erzielt. Dazu zählt die Senkung der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit in der Fertigungshalle, was auf die Minimierung des Dampfeinsatzes und den trockeneren Prozess zurückzuführen ist. Die enormen Temperaturen von dauerhaft bis zu 30° C und bis zu 100 % Luftfeuchtigkeit sind in der konventionellen Fertigung eine enorme Belastung für die Maschinenbediener der Formschaumautomaten.

5. Zusammenfassung/Summary

5.1 Zusammenfassung

Einleitung

Die Overath GmbH entwickelte sich seit 1987 von einem Hersteller für Verpackungsmaterial zu einem Unternehmen, das mit Ihrer Tochter Overath EPP GmbH komplette Mehrweg-Systemverpackungen aus expandiertem Polypropylen (EPP), Styropor (EPS) und expandiertem Polyethylen (EPE) mit der Technologie des Formschäumens herstellt. Im Juli 2018 wurden die SLM (Selective Laser Melting) Aktivitäten von der Overath EPP GmbH an die Overath SLM GmbH verkauft und diese hat die Rechtsnachfolge des Zuwendungsbescheides übernommen.

Die Produktion mit thermoplastischen Partikelschaumstoffen (EPS, EPP, EPE) durch Formschaumautomaten auf Basis von Kavitäten (Werkzeuge) bietet ein sehr differenziertes Anwendungsgebiet mit hohem Potential. Konventionelle Werkzeuge werden in der Regel aus Aluminiumblöcken spangebend bearbeitet und wiegen zwischen 200 - 500 kg. Trotz Einsatz von modernsten 5-Achs Fräszentren sind keine optimalen Strukturen durch den Prozess herzustellen. So entstehen ungleich dicke Wandungen, die energieverzehrende „Hotspots“ oder „Coldspots“ verursachen. Zudem lassen sich viele technische- und Designanforderungen mit dieser Art der Herstellung nicht realisieren.

Beim Einsatz dieser Werkzeuge im Formschaumautomat stellen sich extrem hohe Ressourcenverbräuche ein:

- Der Formschäumungsprozess ist bedingt durch sein Verfahren (eingepasste Werkzeugkonstruktion) äußerst energie- und dadurch kostenintensiv. Über 20 % der Produktionskosten sind Energiekosten.
- Für die Verschweißung der Partikel ist nur 1 % der eingesetzten Energie notwendig.
- Das eingesetzte Kühlwasser geht nahezu vollständig verloren.
- Die Taktzeiten zwischen Fertigung und Auswurf liegen zwischen 2 – 4 Minuten und sind im Vergleich zum Spritzgussverfahren zu hoch.
- Die Oberflächen der Formkörper sind optisch störend und erzeugen sichtbare Dampfdüsenabdrücke, die das Werkstück minderwertig erscheinen lassen.

Vorhabenumsetzung

Um die Nachteile der spanabhebenden Fertigung der Kavitäten zu eliminieren, beabsichtigte die Overath SLM GmbH die erstmalige großtechnische Anwendung des selektiven Laserschmelzens (SLM) mit additiver Fertigung umzusetzen. Dies war nur durch Anwendung des „Selective Laser Melting“ (SLM) möglich, mit dem die neue Kavität realisiert werden sollte. Durch ein ganzheitliches SLM Anlagenkonzept ließ sich eine material- und energieschonende Produktion erzielen.

Die neuartige, funktionsintegrierte, monolithische Kavität sollte zunächst in einem vorhandenen Formschaumautomaten integriert werden. Im weiteren Verlauf sollte mit einem neuen, erstmalig auf die Anforderung der Kavitäten optimierten Formschaumautomaten, der eine integrierte Dampfkammer und Maschinenleichtbau beinhaltet, eine weitere Einsparung im Dampf- und

Wasserverbrauch von mindestens 50 % erreicht werden. Durch eine angepasste Sensorik und Überwachung des Prozesses sollten deutlich einfacher und reproduzierbarer die Medienverbräuche aufgenommen, verwertet und bewertet werden.

Ergebnisse

Im Rahmen eines durchgeführten Messprogramms wurde das Produkt Basta Box Deckel XL als Referenzbauteil ausgewählt.

Bezogen auf 60 Werkzeuge für einen Basta Box Deckel XL sinkt der Materialverbrauch in der Herstellung von 4.800 kg/a auf künftig 1.008 kg/a und der Energieverbrauch von 60,63 kWh/kg auf 40,87 kWh/kg. Absolut bedeutet dies eine Senkung des Energieverbrauchs zur Herstellung der Werkzeuge von 291.024 kWh auf künftig 41.197,73 kWh und damit einhergehend eine Senkung der CO₂-Menge von 141.146,64 kg auf künftig 19.980,80 kg.

In der Anwendung des neuen gedruckten Werkzeugs in den Formschaumautomaten ergeben sich darüber hinaus weitere Umweltentlastungen. Der Basta-Box-Deckel XL kommt auf eine Bauzahl von 300.000 Stück und ebenso eine Zyklanzahl von 300.000 über die Laufzeit des Produktes. Mit dem mittleren Werkzeugstand Basta Box XL Deckel wurden auf dem bisherigem Formschaumautomaten die prozentualen Ziele bei der Zykluszeitreduzierung bereits um 8,3 % übertroffen. Dieser konnte durch den innovativen Formschaumautomaten auf 20,44 % ausgebaut werden, was einer Gesamteinsparung in der Zykluszeit von über 63 % entspricht.

Bei der Einsparung von Dampf lag der mittlere Werkzeugstand mit dem bisherigen Formschaumautomaten mit 7,89 % weniger Einsparung noch leicht unter den gesetzten Antragszielen. Durch den innovativen Formschaumautomaten konnte das Ziel der prognostizierten Dampfersparnis auf 91,84 % erhöht und somit das Ergebnis um 0,63 % übertroffen werden. Die Wasserersparnis wurde beim mittleren Werkzeugstand bis auf 1 % bereits erreicht und konnte mit dem neuen Formschaumautomaten auch nochmal mit 0,67 % übertroffen werden. Somit konnten die Einsparungen durch den innovativen Formschaumautomaten nochmals gesteigert werden.

Die Einsparungsziele im konventionellen und innovativen Formschaumprozess wurden also komplett erreicht. Beim Basta Box Deckel XL ergibt sich bei einer Stückzahl von 300.000 Stück über die Laufzeit von 5 Jahren eine Einsparung von 1.558.440 kWh Dampf (78,63 %), 28.020 m³ Wasser (91,84 %) sowie einer CO₂ Menge von 314.805 kg.

Ausblick

Mit dem neuen Verfahren und den damit verbundenen positiven Einflüssen auf die Herstellkosten werden viele Unternehmen motiviert, Ihre Fertigungstechnologien neu zu überdenken und in Innovationen zu investieren. Aus einer anderen Sichtweise wird damit die Innovationskraft angeregt. Unabdingbar ist ein Austausch der Kavitäten, auch um in Zukunft neue weitergehende Produkte herzustellen, die bislang technologisch nicht herstellbar waren.

Im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland gibt es im Bereich des Werkzeugbaus ca. 200 Betriebe, die die hier vorgestellte Technologie entsprechend anwenden können.

Das Vorhaben setzt neue Maßstäbe in der Material- und Energieeffizienz. Um die Energiebilanz der kompletten Fertigung zu optimieren, muss aber ein ganzheitlicher Ansatz gewählt und das Fertigungslayout überarbeitet werden.

- Dazu zählt eine dezentrale Versorgung mit Medien an den Maschinen, die durch den verringerten Medieneinsatz deutlich kleiner ausfallen kann als bisher. So wird die Fertigung flexibler, da auch einzelne Maschinengruppen autark betrieben werden können, ohne die komplette Peripherie mitnutzen zu müssen.
- Dazu zählen ein maschinenbezogener geschlossener Kühlkreislauf sowie Schnelldampferzeuger und Kompressoren.

Es resultiert eine Fabrik der Zukunft, mit geändertem Layout und deutlich verbesserter Energiebilanz.

Um die erfolgreichen Projektergebnisse bekannt zu machen, werden wir das Vorhaben zusammen mit der Effizienz-Agentur NRW in deren Loseblattsammlung veröffentlichen.

5.2 Summary

Introduction

Since 1987, Overath GmbH has developed from a manufacturer of packaging materials to a company that, with its subsidiary Overath EPP GmbH, produces complete reusable system packaging made of expanded polypropylene (EPP), polystyrene (EPS) and expanded polyethylene (EPE) using moulded foam technology. In July 2018, the SLM (Selective Laser Melting) activities were sold by Overath EPP GmbH to Overath SLM GmbH, which took over the legal succession of the grant.

Production with thermoplastic particle foams (EPS, EPP, EPE) using moulded foam machines based on cavities (moulds) offers a very differentiated field of application with high potential. Conventional moulds are usually machined from aluminium blocks and weigh between 200 - 500 kg. Despite the use of state-of-the-art 5-axis milling centres, no optimal structures can be produced by the process. This results in walls of unequal thickness, which cause energy-consuming "hotspots" or "coldspots". In addition, many technical and design requirements cannot be realised with this type of production.

The use of these tools in the moulded foam machine results in extremely high resource consumption:

- The mould foaming process is extremely energy-intensive and therefore cost-intensive due to its procedure (fitted mould design). More than 20 % of the production costs are energy costs.
- Only 1 % of the energy used is required for welding the particles.
- The cooling water used is almost completely lost.
- The cycle times between production and ejection are between 2 - 4 minutes and are too high compared to the injection moulding process.

- The surfaces of the moulded parts are visually disturbing and create visible steam nozzle marks that make the workpiece appear inferior.

Project implementation

To eliminate the disadvantages of machining the cavities, Overath SLM GmbH intended to implement the first large-scale application of selective laser melting (SLM) with additive manufacturing. This was only possible through the application of "Selective Laser Melting" (SLM), with which the new cavity was to be realised. A holistic SLM system concept made it possible to achieve material- and energy-saving production.

The new, functionally integrated, monolithic cavity was initially to be integrated into an existing moulded foam machine. In the further course, a new moulding foam machine, optimised for the first time to meet the requirements of the cavities, which included an integrated steam chamber and lightweight machine construction, was to achieve further savings in steam and water consumption of at least 50 %. By means of an adapted sensor system and monitoring of the process, the media consumption should be recorded, evaluated and assessed in a much simpler and more reproducible manner.

Project results

As part of a measurement programme, the Basta Box Lid XL product was selected as a reference component.

Based on 60 tools for a Basta Box Lid XL, the material consumption in production is reduced from 4,800 kg/a to 1,008 kg/a in the future and the energy consumption from 60.63 kWh/kg to 40.87 kWh/kg. In absolute terms, this means a reduction in energy consumption for the production of the tools from 291,024 kWh to 41,197.73 kWh in the future and a concomitant reduction in the amount of CO₂ from 141,146.64 kg to 19,980.80 kg in the future.

The use of the new printed mould in the moulded foam machines also results in further environmental benefits. The Basta Box lid XL has a production run of 300,000 units and a cycle count of 300,000 over the lifetime of the product. With the medium tooling station Basta Box XL lid, the percentage targets for cycle time reduction have already been exceeded by 8.3 % on the previous moulded foam machine. This could be increased to 20.44 % with the innovative moulded foam machine, which corresponds to a total cycle time saving of over 63 %.

In terms of steam savings, the average mould stand with the previous mould foaming machine was still slightly below the application targets with 7.89 % less savings. Thanks to the innovative mould foaming machine, the target for the predicted steam savings was increased to 91.84 % and the result was thus exceeded by 0.63 %. The water savings had already been achieved with the medium mould level down to 1 % and could also be exceeded again with 0.67 % with the new mould foaming machine. Thus, the savings achieved with the innovative mould foaming machine could be increased once again.

The savings targets in the conventional and innovative moulded foam process were thus completely achieved. With the Basta Box Lid XL, a quantity of 300,000 units over a period of 5 years results in savings of 1,558,440 kWh of steam (78.63 %), 28,020 m³ of water (91.84 %) and a CO₂ quantity of 314,805 kg.

Prospects

With the new process and the associated positive impact on manufacturing costs, many companies are motivated to rethink their manufacturing technologies and invest in innovations. From another point of view, this stimulates innovation. An exchange of the cavities is indispensable, also in order to manufacture new, more advanced products in the future, which could not be manufactured technologically up to now.

In the Federal Republic of Germany, there are about 200 companies in the toolmaking sector that can apply the technology presented here accordingly.

The project sets new standards in material and energy efficiency. However, in order to optimise the energy balance of the entire production, a holistic approach must be chosen and the production layout must be revised.

- This includes a decentralised supply of media to the machines, which can be much smaller than before due to the reduced use of media. This makes production more flexible, as individual machine groups can be operated autonomously without having to use the entire periphery.
- This includes a machine-related closed cooling circuit as well as high-speed steam generators and compressors.

The result is a factory of the future, with a modified layout and significantly improved energy balance.

In order to publicise the successful project results, we will publish the project together with the Effizienz-Agentur NRW in their loose-leaf collection.