VDA | Verband der Automobilindustrie

FAT | Forschungsvereinigung Automobiltechnik

FAT-Schriftenreihe 346

Studie zur Abschätzung der Anwendungspotentiale, Risiken und notwendigen Forschungsbedarfe bei der Verwendung von Glashohlkugeln in Kombination mit thermoplastischem Schaumspritzguss

Studie zur Abschätzung der Anwendungspotentiale, Risiken und notwendigen Forschungsbedarfe bei der Verwendung von Glashohlkugeln in Kombination mit thermoplastischem Schaumspritzguss

Forschungsstelle

Kunststoff-Institut Lüdenscheid der mittelständischen Wirtschaft in NRW GmbH

Autoren

Dipl.-Ing. Uwe Kolshorn	Senior Expert Anwendungstechnik
Andreas Wortmann, B.Eng.	Projektingenieur

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) gefördert.

KUNSTSTOFF INSTITUT LÜDENSCHEID

Kunststoff-Institut für die mittelständische Wirtschaft NRW GmbH (K.I.M.W.)

Karolinenstraße 8 | 58507 Lüdenscheid
Telefon: +49 (0) 23 51.10 64-191/-192
Telefax: +49 (0) 23 51.10 64-190

Kunststoff-Institut Lüdenscheid GmbH | Karolinenstraße 8 | 58507 Lüdenscheid

Abschlussbericht für das von der

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.

geförderte Entwicklungsprojekt:

„Studie zur Abschätzung der Anwendungspotentiale, Risiken und notwendigen Forschungsbedarfe bei der Verwendung von Glashohlkugeln in Kombination mit thermoplastischem Schaumspritzguss"

Präambel

Ziel dieses Projektes ist die Ermittlung und Zusammenfassung von Ergebnissen zu Untersuchungen der Materialkombination glashohlkugelgefüllter thermoplastischer Kunststoffe in Verbindung mit thermoplastischem Schaumspritzguss sowie der Herstellung mit dem Werkzeugwerkstoff Aluminium.

Überlegungen vor dem Projektstart ergaben, dass nicht nur durch die Material- bzw. die Technologiekombination ein durchaus erhöhtes Potential an Einsparungen hinsichtlich Energie bzw. Ressourcen besteht, sondern auch eine überproportionale Effizienzsteigerung bei der Herstellung der Kunststoffbauteile, und auch während des Gebrauchs bietet.

Alle Ergebnisse und Untersuchungsberichte dieses Projektes können nach Freigabe durch die Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. selbstverständlich zur Verfügung gestellt werden und sind direkt bei der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. oder dem Kunststoff-Institut der mittelständischen Wirtschaft in NRW GmbH erhältlich.

Verfasser des Abschlussberichtes:

Kunststoff-Institut Lüdenscheid der mittelständischen Wirtschaft in NRW GmbH

Herr Dipl.-Ing. Uwe Kolshorn Senior Expert Anwendungstechnik

Herr Andreas Wortmann, B.Eng. Projektingenieur

Karolinenstraße 8

58507 Lüdenscheid

Deutschland

HRB-Nr. 5014
Amtsgericht Iserlohn
USt.-IdNr. DE 125 807 102

Aufsichtsratsvorsitzender:
Matthias Poschmann
St.-Nr. 332 5783 0411

Geschäftsführer:
Dipl.-Ing. Stefan Schmidt
Dipl.-Kfm. Michael Krause

Volksbank in Südwestfalen eG
Konto 231 039 500 (BLZ 447 615 34)
IBAN: DE41447615340231039500
SWIFT-BIC: GENODEM1NRD

Sparkasse Lüdenscheid
Konto 570 (BLZ 458 500 05)
IBAN: DE92458500050000000570
SWIFT-BIC: WELADED1LSD

Inhalt

Präambel 1
1. Recherche zum Stand der Technik 3
1.1 Schäumen von Thermoplasten 3
1.1.1 Chemisches Schäumen 4
1.1.2 Physikalisches Schäumen 4
1.2 Glashohlkugeln 5
1.3 Aluminium als Werkzeugwerkstoff 5
1.4 Verfahrenskombination Schäumen in Aluminiumwerkzeugen 5
1.5 Möglichkeit der topologischen Bauteilauslegung durch Schäumen 6
1.6 Patentsituation 7
2. Praktische Vorversuche 8
2.1 Herstellung von Prüfgeometrien und Kühlzeituntersuchungen 10
2.2 Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die tribologischen Eigenschaften 12
2.2.1 Kratzbeständigkeit nach BMW GS 97034-9 (2015-09) 13
2.2.2 Reibechtheitsprüfung nach VW Standard: TL 226 14
2.2.3 Abriebbeständigkeit in Anlehnung an DIN EN ISO 5470 1 (1999-09) 15
2.2.4 Zusammenfassung zu den Oberflächenprüfungen 15
2.3 Untersuchungen zur mechanischen Festigkeit 15
2.4 Untersuchungen zu Akustik- und Wärmeisolationseigenschaften 17
2.4.1 Akustisches Verhalten von Schäumen und Glashohlkugeln 17
2.4.2 Wärmeleitfähigkeit aufgrund von Schäumen und Glashohlkugeln 18
3. Potentialanalysen 18
3.1 Potentialanalyse: Bauteilgewicht 18
3.2 Potentialanalyse: Bauteilqualität 19
3.3 Potentialanalyse: Produktionskosten 20
3.4 Potentialanalyse: Ressourceneffizienz 21
4. Ausblick 22
4.1 Weiteres Vorgehen 22
5. Verzeichnisse 24
5.1 Abbildungsverzeichnis 24
5.2 Tabellenverzeichnis 24
5.3 Diagrammverzeichnis 25

1. Recherche zum Stand der Technik

1.1 Schäumen von Thermoplasten

Generell unterteilt man das Schäumen von Thermoplasten (TSG, Thermoplastschaumspritzguss) in chemische und physikalische Verfahren. Der große Unterschied liegt darin, wie und welches Treibmittel eingesetzt wird. Während bei den chemischen Verfahren reaktive Masterbatches, welche sich bei erhöhter Temperatur zersetzen und Treibgase abspalten, ins Granulat gemischt werden, wird bei den physikalischen Verfahren direkt Gas in das Granulat oder die Schmelze eingebracht, siehe auch Abschnitte 1.1.1 und 1.1.2.

Ihnen gemein ist, dass Gas über Diffusionsvorgänge unter Druck in der Polymerschmelze gelöst werden soll, sodass es beim Einspritzen in die Kavität expandieren kann, um eine Schumstruktur auszubilden (Abbildung 1).

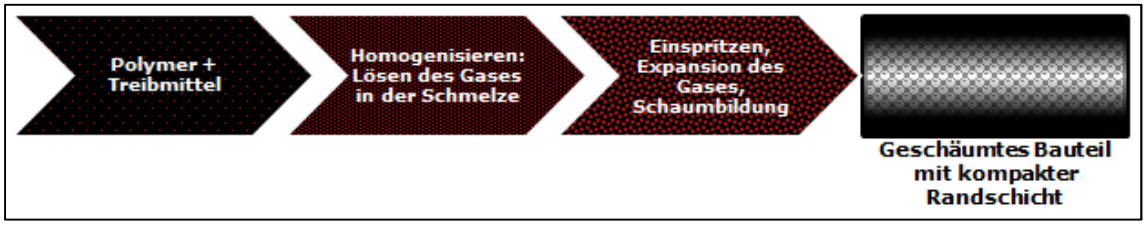

Abbildung 1: Schematischer Ablauf beim TSG

Im Werkzeug bilden sich durch den Druckabfall innerhalb der Matrix Nukleierungskeime und freie Gasmoleküle schließen sich den bereits gebildeten Zellen an. Während des Abkühlens und der gleichzeitig stattfindenden Materialschwindung haben die Zellen die Möglichkeit den in den Zellen vorhandenen Druck abzubauen: sie dehnen sich aus. Im weiteren Abkühlprozess fixieren sich die Zellwände und die Zellstruktur entsteht. In der Randschicht des Bauteils bilden sich aufgrund der hohen Abkühlgeschwindigkeit des Kunststoffes keine Zellen aus, vgl. Abbildung 2.

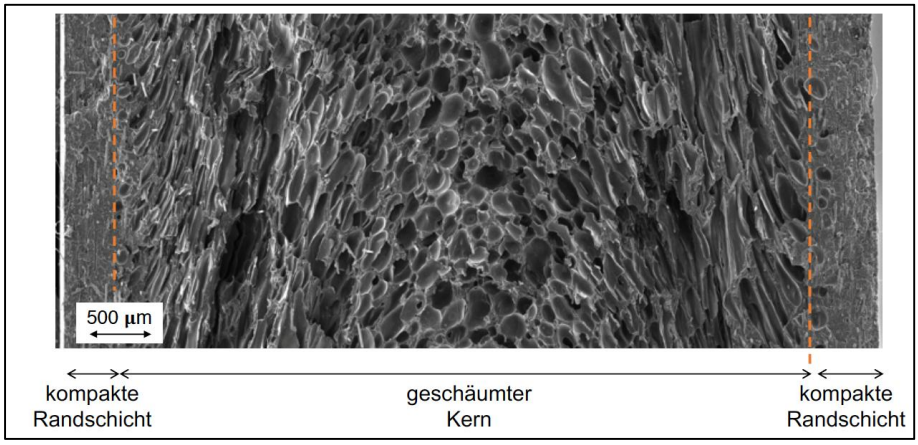

Abbildung 2: Typische Integralschaumstruktur von TSG-Bauteilen (Quelle: Neue Materialien Bayreuth GmbH)

Die Dicke der dann kompakten Randschicht ist abhängig von den Abkühleffekten des Thermoplasts im Werkzeug. Die Randschichtdicke kann unter anderem auch durch die eingestellte Werkzeugtemperatur bzw. durch die Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes,

aber insbesondere auch durch die Wärmeleitfähigkeit des Werkzeugwerkstoffes beeinflusst werden.

Das beim Schäumen expandierende Treibmittel führt dazu, dass zum einen Qualitätsprobleme wie Einfallstellen und Verzug durch das gleichmäßig in der Schmelze verteilte Gas reduziert bzw. eliminiert werden und zum anderen zu einer Materialeinsparung durch die entstehenden Hohlräume.

1.1.1 Chemisches Schäumen

Seit den 1960ern werden thermoplastische Kunststoffe chemisch geschäumt. Die ersten Versuche wurden mit handelsüblichem Backpulver durchgeführt. Anfang der 1970er entwickelte die Industrie spezielle Treibmittel für Kunststoffe.

Durch die beim Plastifizieren vorherrschende Temperatur läuft ein chemischer Prozess ab, bei dem sich Treibmittel abspalteten. Diese Treibmittel sind in der Regel CO_2, N_2 aber auch Wasser. Des Weiteren entstehen bei dieser chemischen Reaktion auch noch andere Spaltprodukte. Diese anderen Spaltprodukte können unter Umständen auch gesundheitsschädlich sein und entsprechen nicht den Vorgaben der REACH-Verordnung sodass sie vom Markt genommen wurden.

Auch zeigen manche chemischen Treibmittel einen negativen Einfluss auf den zu schäumenden Kunststoff. Die Spaltprodukte selbst können mit dem Kunststoff reagieren oder aber das Trägermaterial ist inkompatibel und geht keinen homogenen Verbund mit dem Kunststoff ein. Effekte die hierbei auftreten können sind Vergilbung/Verfärbung oder auch eine Versprödung des Kunststoffes.

Das physikalische Schäumen beim Spritzgießen erfährt aktuell vermehrt Ansehen im Markt, das chemische Schäumen hat jedoch einen durchaus höheren Stellenwert und auch eine höhere Akzeptanz im Markt. Dies ist wohl auch damit begründet, dass die physikalischen Technologien einen höheren anfänglichen Hardware-Invest bedeuten.

Seitens des VDI gibt es einen Arbeitskreis der die Potentiale aber auch Schwierigkeiten der Implementierung der Schäumtechnologien verstanden hat und wird eine Richtlinie, insbesondere für die Automobiltechnik erstellen. In einer VDI Richtlinie (zurzeit in Erstellung) wird es um das Allgemeinverständnis der Kunden-Lieferantenbeziehung zu geschäumten Bauteilen gehen. Sie soll helfen das Schäumen weiter im Markt zu verbreiten und die Akzeptanz von geschäumten Produkten zu verbreitern.

1.1.2 Physikalisches Schäumen

Um die o. g. Nachteile des chemischen Schäumens zu vermeiden, begannen verschiedene Universitäten und Institute in den 1980er Jahren Entwicklungen zum rein physikalischen Schäumen. Mittlerweile existieren mehrere verschiedene physikalische Schäumtechnologien auf dem Markt. Es gibt zwei große Unterschiede wie die physikalischen Schäumtechnologien arbeiten:

- Zum einen wird das Granulat vor der Verarbeitung auf der Spritzgießmaschine mit unter Druck stehendem inertem Kohlendioxid (CO_2) beladen bzw. im Spritzgießzylinder mit verdichtetem inerten Gas (Stickstoff (N_2) oder CO_2) beim Einziehen in die Schnecke beaufschlagt.
- Zum anderen wird in die bereits plastifizierte Schmelze Gas (N_2 oder CO_2) im überkritischen Zustand eingebracht.

Auch hier soll das Gas in der Schmelze in Lösung gehen und erst im Werkzeug aufschäumen.

1.2 Glashohlkugeln

Glashohlkugeln weisen einen Durchmesser zwischen ca. 5 und 100 µm auf und die Wanddicke der Glasaußenhülle beträgt ca. 0,7 µm. Eine der Hauptanwendungen von Glashohlkugeln liegt im Bereich der Wärmeisolation. Als Isolationswerkstoff für Untersee-Pipelines minimieren die Glashohlkugeln in einer Polyurethanmatrix die Auskühlung des erwärmten Rohöls in den Pipelines. Auch im Bereich der Wärmedämmung von Gebäuden können Glashohlkugeln als Füllstoff von mineralbasierten Klebern eingesetzt werden, siehe www.deutscher-zukunftspreis.de.

Neben den oben genannten Anwendungsgebieten werden Glashohlkugeln als „kostengünstiger" Füllstoff in hochpreisigen Epoxidharz- und Vergussmassen eingesetzt.

Mit Glashohlkugeln gefüllte Spritzgießmaterialien sind zwar auf dem Markt erhältlich, jedoch sind aufgrund der Mehrkosten diese (Sonder-) Typen nur in Ausnahmefällen im Markt angekommen. Alleine durch die Dichtereduzierung durch Glashohlkugeln, sind die Mehrkosten nur in bestimmten Bereichen kostentechnisch vertretbar. Rücken dann aber weitere Anforderungen an das Bauteil in den Vordergrund, zum Beispiel hinsichtlich der Wärmeisolierung, der akustische Dämpfung, als auch der Anforderung auf Leichtbau im Rennsport, so sind dann unter Umständen die Mehrkosten durchaus vertretbar.

Abbildung 3: Heckdiffusor für PKW (Quelle: Fa. Weimat-Pesch Group Eupen, Foammelt Tagung Engel 2020)

1.3 Aluminium als Werkzeugwerkstoff

Im Werkzeugbau für Prototypen sowie in der Kleinserienfertigung von Spritzgussteilen sind Werkzeuge aus Aluminium aufgrund der geringeren Kosten nicht mehr wegzudenken. Aber aufgrund der hohen Anforderungen an den Werkzeugwerkstoff selbst, hat Aluminium in den meisten Fällen nicht eine ausreichende Performance, um in der (Groß)-Serienproduktion den mechanischen Anforderungen des Kompaktspritzgießprozesses Stand zu halten.

1.4 Verfahrenskombination Schäumen in Aluminiumwerkzeugen

Die Verfahrenskombination Schäumen in Aluminiumwerkzeugen ist in der „Schäumwelt" schon bekannt, wobei insbesondere in der Großserie noch der Werkzeugwerkstoff Stahl die Vorreiterrolle innehat. Toyota hat um 2015 damit begonnen, eigene Untersuchungen

dahingehend anzustoßen, dass geschäumte Bauteile auch in Großserie auf Aluminiumwerkzeugen gefertigt werden. Teilweise sind diese Werkzeuge mit einem Verschleißschutz versehen oder es handelt sich um „Aluminium-Stahl-Hybridwerkzeuge". Die Zahl der umgesetzten Bauteile in Aluminium-Werkzeugen steigt stetig.

1.5 Möglichkeit der topologischen Bauteilauslegung durch Schäumen

Im Kompaktspritzgießen muss der Konstrukteur des Bauteils bereits in der Bauteilauslegung die Anforderungen des Kompaktspritzgießprozesses berücksichtigen. Nur dann kann das Bauteil kostentechnisch vertretbar und den Qualitätsanforderungen entsprechend gefertigt werden. Diese Konstruktionsvorgaben wie das „Wanddicke-Rippen-Verhältnis", „Fließweg-Wanddicken-Verhältnis" oder auch die Angussauslegung „von-dick-auf-dünn" behindern bzw. verhindern theoretisch mögliche Wanddickenreduzierungen.

Zusätzlich muss der Nachdruck im Kompaktspritzgießprozess die unterschiedliche Schwindung des Kunststoffes über dem gesamten Bauteil ausgleichen. Diese Unterschiede in der Schwindung bedingen am Bauteil auch wieder unterschiedliche Schwindung im Bauteil, welche wiederum auf die maßlichen Anforderungen an das Bauteil negativen Einfluss (Verzug) haben.

Das Schäumen benötigt keinen externen Nachdruck durch die Spritzgießmaschine. Der Nachdruck kommt von innen aus der Schmelze heraus und wirkt gleichmäßig über dem gesamten Bauteil durch den „Gaseigendruck" in der noch teigigen Schmelze.

Dies bedeutet, dass der Konstrukteur das Bauteil nach den Bauteilanforderung auslegen kann – und nicht nach den Konstruktionsvorgaben für das Kompaktspritzgießen.

In diesem Fall spricht man von der „topologischen Bauteilauslegung".

Die topologische Bauteilauslegung beutet nicht nur, dass Wanddicken dünner gestaltet werden können, sondern bietet zudem auch die Möglichkeit, Bauteile weniger komplex zu gestalten, sodass mitunter kostenintensive Anforderungen an das Werkzeug entfallen können, z. B. Abbildung 4: Schieber können weggelassen werden. Diese andere Konstruktion wiederum verringert das Bauteilvolumen und somit auch das Bauteilgewicht. Zusätzlich werden durch die „andere Konstruktion" bei gleichzeitiger Ressourcenschonung auch noch Zykluszeiten zur Herstellung des Bauteils selbst verringert und so die Produktivität erhöht.

Abbildung 4: links: Kompakt-Spritzguss (176g); rechts: geschäumtes und topologisch optimiertes Bauteil (107g); Quelle: *Trexel GmbH*

1.6 Patentsituation

Patente gibt es bezüglich der Verwendung von Glashohlkugeln in der Extrusion u.a. durch die Fa. Rehau (EP2401137A1). Bei der Fa. Tesa gibt es aktuell ein Patentschutz für die Verwendung von expandierbaren Mikrohohlkugeln (keine Glashohlkugeln) in klebrigen Formmassen (EP2463332B1). Hinsichtlich der Kombination von Glashohlkugeln mit Schäumen (in Aluminiumwerkzeugen) sind bei der Patentrecherche keine gültigen Patente zu finden gewesen. Somit ist davon auszugehen, dass keine Komplikationen bei der Kombination der einzelnen Technologien zu erwarten sind. Des Weiteren ist nach erster Einschätzung aber auch davon auszugehen, dass alleine die Technologiekombination Schäumen von mit Glashohlkugeln gefüllten thermoplastischen Materialien in Aluminiumwerkzeugen keine patentfähige Entwicklung darstellt.

Das Resultat der Marktstudie war, dass es zwar bereits Bauteile mit Glashohlkugeln gefüllt in Serie gibt, die aber nur selten zusätzlich geschäumt werden. Dagegen ist die Fertigung von Kunststoffbauteilen in Aluminiumwerkzeugen weit verbreitet. Die Fa. Toyota projektiert bereits strategisch die Herstellung von geschäumten Kunststoffbauteilen in Aluminiumwerkzeugen auch in der Großserie.

Nun muss man sich aber auch die Frage stellen, warum aktuell die „Dreierkonstellation" noch nicht im Markt angekommen ist. Die Analyse hat ergeben, dass es zwar geschäumte Bauteile aus glashohlkugelgefüllten Materialien gibt, sich aber aufgrund der Kostenstruktur dieses noch nicht im Markt durchgesetzt haben.

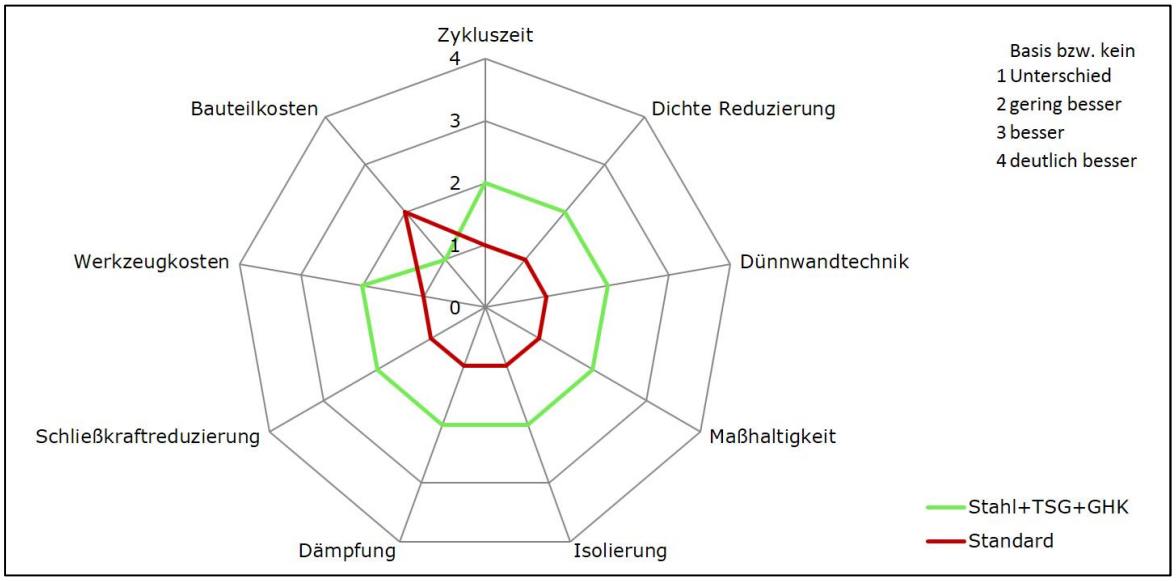

Diagramm 1: Einfluss der Kombination von GHK und TSG in Stahl- und Aluminiumwerkzeugen, Bauteileigenschaften und Kosten

Die Verwendung von glashohlkugelgefüllten Thermoplasten in Verbindung mit Stahlwerkzeugwerkstoffen zeigt in vielen Anwendungsbereichen Vorteile, jedoch wird aufgrund der Kostenstruktur dieser Anwendungen von der Verwendung noch weitestgehend abgesehen.

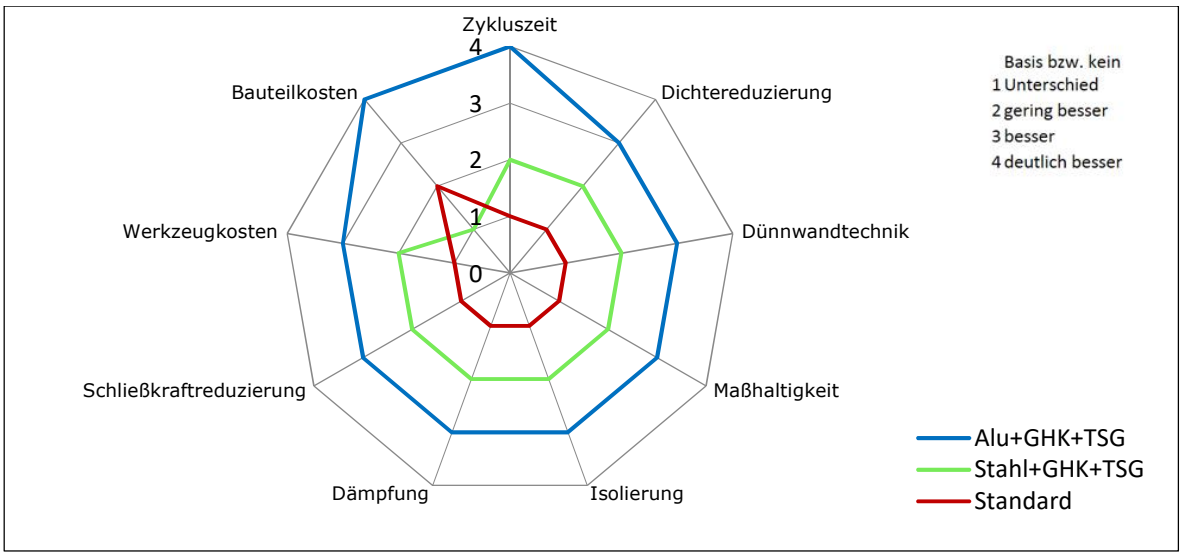

Diagramm 2: Einfluss der Kombination von GHK und TSG in Stahl- und Aluminiumwerkzeugen, Bauteileigenschaften und Kosten

Wenn man durch die Verwendung von Aluminium als Werkzeugwerkstoff die Möglichkeit hat die Kostenstruktur eines Bauteils so zu verändern, dass die bestehenden Vorteile sich noch weiter verbessern, bzw. die Kosten sogar verringern können, stünde der Kombination der Technologien nichts mehr im Wege.

2. Praktische Vorversuche

Aufgrund der Thematik die Vorteile der einzelnen Techniken zu kombinieren und nicht einzelne Themen zu optimieren, sind aufgrund des kurzen Projektzeitraumes die im ursprünglichen Projektplan angedachten Untersuchungen hinsichtlich der vorgeschalteten Materialcompoundierung außer Acht gelassen worden. Man hat auf die bereits im Markt miteinander vergleichbaren vorhandenen Materialien zurückgegriffen, diese sind:

PP1) Polyfort PPH GBF4030RD H3	(PP	GF28 GHK12)
PP2) Softell TKG2039N E2 HGK	(PP	GF25 GHK10)
PA1) PENTALLOY BP GVB16 H	(PA6/PP	GF12 GHK4)
PA2) PENTAMID B S GVB16 H2 R	(PA6	GF12 GHK4)
PA3) PENTAMID B GV10 MC20 H2 RC	(PA6	GF10 M20; ohne GHK)

PA2) und PA3) sind vergleichbare Materialtypen, da sich die Grundtypen sich nicht unterscheiden und der einzige Unterschied darin liegt, dass die Füllstoffe (12 Gew.-% Glasfasern und 20 Gew.-% Mineral) bei PA3) durch den gleichen volumetrischen Anteil an Glashohlkugeln ersetzt wird. Der Massenanteil der Glashohlkugeln liegt aufgrund der erheblichen Dichteunterschiede zwischen den „normalen" Füllstoffen und den Glashohlkugeln bei nur 4 Gew.-%.

Aufgrund der für alle Materialtypen gleichgehaltenen Spritzprozessparameter sind in den Voruntersuchungen an Fließspiralen der Einfluss der Zugabe von Glashohlkugeln, der

Einfluss von N_2 und CO_2 als Treibgas, und der Einfluss der Werkzeugtemperatur untersucht worden.

Abbildung 5: Fließspirale aus Material PA2. v. l. n. r.: kompakt, geschäumt mit N2, geschäumt mit CO2

Hinsichtlich des verwendeten Gases als Treibmittel (N_2, CO_2) sind widererwartend keine großen Unterschiede in der möglichen Fließweglänge an der Fließspirale zu erkennen, siehe Abbildung 5. In den weiterführenden Untersuchungen ist daher von der Verwendung von CO_2 abgesehen worden und somit werden nur die kompakten mit den mit N_2 geschäumten Bauteilen verglichen.

In den Verarbeitungsempfehlungen für die verwendeten Glashohlkugeln von der Fa. 3M ist empfohlen, den isostatischen Druck von maximal 1.100 bar nicht zu übersteigen. Da in der Praxis auch Spritzdrücken von über 1.100 bar nicht unüblich sind, sind die Fließspiralen mit Spritzdrücken von 1.000 bar als auch 1.500 bar als Spritzdruckgrenze während den Versuchen abgefahren worden.

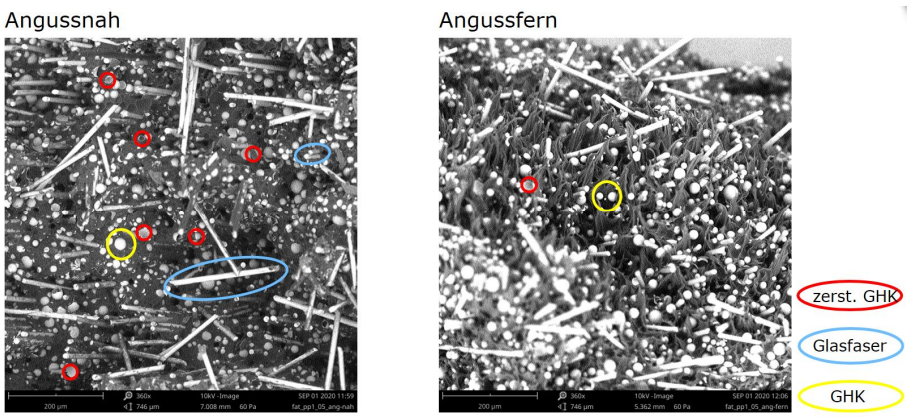

Abbildung 6:REM-Aufnahmen an Bruchflächen der Fließspirale mit maximalem Einspritzdruck 1500 bar. Es sind nur sehr wenige zerstörte Glashohlkugeln zu erkennen

Anhand von REM-Aufnahmen (Abbildung 6) sind Zerstörungen der Glashohlkugeln (GHK) beim Spritzdruck von 1.500 bar zu erkennen. Werden GHK beim Spritzvorgang zerstört,

erhöht sich integral die Dichte des Bauteils. Der Einfluss lässt sich mit Veraschungstests zeigen.

Bei den Veraschungen der Fließspiralen im Labor von 3M ist deutlich die Zunahme der Dichte als Resultat der Zerstörung der Glashohlkugeln zu erkennen. Eine durchschnittliche Erhöhung der Dichte von 2% je Prozessschritt ist seitens 3M im akzeptablen Bereich. In weiteren Untersuchungen wäre zu überprüfen, welchen Einfluss die erhöhte Zerstörung der Glashohlkugeln auf die zu untersuchenden Bauteileigenschaften hat.

Tabelle 1: Veraschungstest Fließspirale, Spritzdruck 1.500 bar

Probe	Dichte Bauteil g/cm³	Asche-gehalt wt%	Dichte Asche g/cm³	Zunahme Dichte %
PA1 Granulat	k.A.	13,3	1,442	
PA1 kompakt	1,12	15,2	1,545	7
PP2 Granulat	k.A.	37,1	1,304	
PP2 kompakt	1,01	37,0	1,504	15

Bei REM-Aufnahmen weiterer Versuchsreihen ist kein signifikant hoher Glasbruch aufgefallen. Genauere Untersuchungen zu dem Einfluss der Zerstörung der Glashohlkugeln sollten in weiteren Untersuchungen spezifiziert werden.

2.1 Herstellung von Prüfgeometrien und Kühlzeituntersuchungen

In den unten aufgeführten Skizzen (Abbildung 7 und Abbildung 8) ist der Werkzeugaufbau für die Herstellung der Prüfgeometrien dargestellt. In dem Plattenwerkzeug ist ein Thermofühler angussnah verbaut, um das Abkühlverhalten der Kunststoffschmelze bzw. des Bauteils im Werkzeug zu beurteilen und Ergebnisse während des Abkühlens aufzuzeichnen.

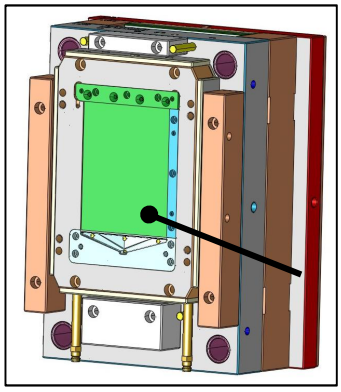

Abbildung 7: Schließseite des Werkzeuges. Wechselplatte (Aluminium oder Stahl) markiert

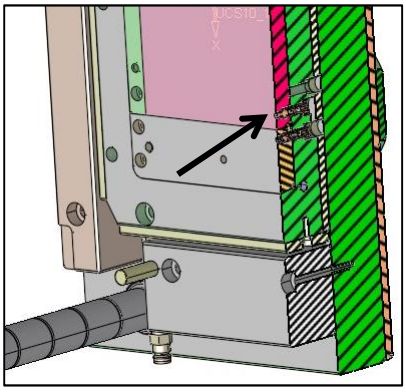

Abbildung 8: Detail der Düsenseite. Lage des Temperatursensors in den Wechselplatten (Pfeil)

Ein Ergebnis der Vorversuche war, dass man die Verwendung von CO_2 vorerst für die weiteren Untersuchungen vernachlässigen kann. Des Weiteren wurde davon abgesehen, die niedrigere Werkzeugtemperatur weiter im Versuchsplan zu belassen, da es aufgrund der längeren Plastifizierungszeiten des Kunststoffgranulates und der sehr geringen

Kühlzeitunterschiede bei der niedrigeren Werkzeugtemperatur zu größeren Messfehlern im weiteren Verlauf der Untersuchungen kommen würde.

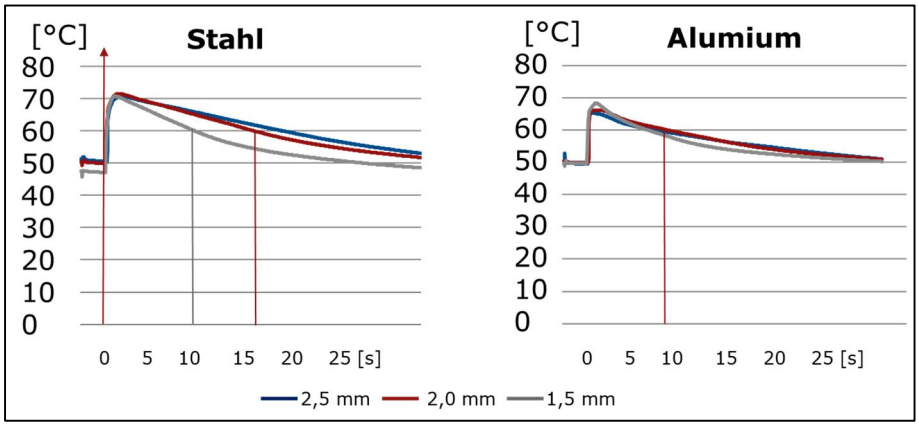

Diagramm 3: Abkühlverhalten der unterschiedlichen Werkzeugwandmaterialien bei unterschiedlichen Bauteildicken

Im obigen Diagramm ist herauszulesen, dass die entsprechende Temperatur am Thermofühler in Abhängigkeit des Werkzeugmaterials unterschiedlich ist. Bei Stahl ist deutlich zu erkennen, dass es einen Einfluss auf die resultierende gemessene Werkzeugoberflächentemperatur bei unterschiedlichen Bauteildicken gibt. Die Temperaturkurven zeigen bei Stahl einen unterschiedlichen Verlauf. Dies liegt darin begründet, dass der Stahl die durch den Kunststoff eingebrachte Wärme langsamer in das Werkzeug abtransportiert als bei dem verwendeten Aluminium. Der Temperaturverlauf bei Aluminium deutet darauf hin, dass das Aluminium mindestens genauso schnell die Wärmemenge, die der Kunststoff an das Werkzeug abgibt im Werkzeug an die Temperierung abgegeben wird.

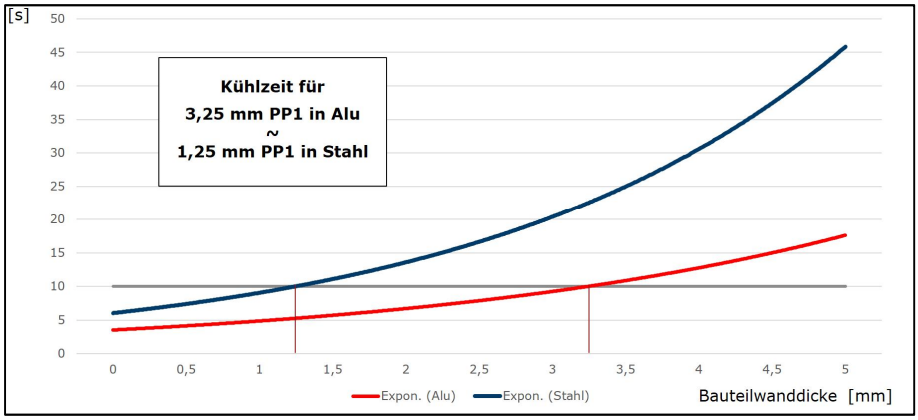

Diagramm 4: Theoretische Kühlzeitbetrachtung

Im Graphen von Diagramm 4 ist der Vergleich der theoretischen Kühlzeit von unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffen dargestellt. Zum einem der stärker exponentiell ausgeprägte Verlauf der reinen Kühlzeit eines Bauteiles aus PP in einem Stahlwerkzeug (blau) und zum anderen in einem Aluminiumwerkzeug (rot). Aufgrund der stark unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit von Stahl und Aluminium ist zu erkennen, dass ein Bauteil mit ca. 1,25 mm Wanddicke im Stahlwerkzeug gefertigt, die gleiche Kühlzeit benötigt wie ein 3,25 mm dickes Bauteil aus einem Aluminiumwerkzeug.

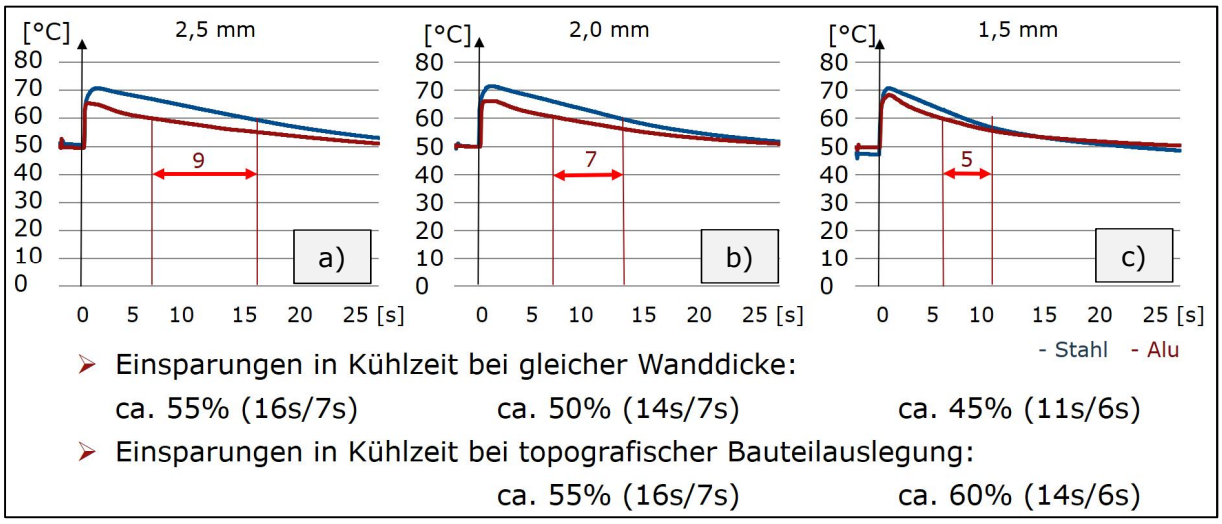

Diagramm 5 a, b, c: Vergleich der gemessenen Abkühlkurven für unterschiedliche Wanddicken in Stahl und Aluminium, hier für Material „PP1 kompakt", Werkzeugwandtemperatur 50°C

Die Verringerung der Unterschiede in der Zeit bei gleichen Bauteildicken, aber unterschiedlichen Werkzeugmaterialien (Stahl / Aluminium), nimmt bei Abnahme der Bauteildicke ab. Dies liegt darin begründet, dass generell ein dünneres Bauteil eine geringere Wärmemenge ins Werkzeug einbringt und somit auch generell eine geringere Abkühlzeit benötigt wird.

Dies bedeutet konkret in diesem Fall, dass einem kompakten Bauteil mit einer Wanddicke von 2,5 mm ein geschäumtes Bauteil mit 2,0 mm Grundwanddicke gegenüberstünde. Letztendlich würde dies dann zu einer Kühlzeitreduzierung von ca. 55% führen (16 s kompakt in Stahl vs. 7 s geschäumt in Aluminium).

Übertragen auf eine Ausgangswanddicke von 2,0 mm bei kompakten Bauteilen (in Stahl 14 s)) würde dies ein Kühlzeitvorteil von geschäumten Bauteilen (Wanddicke ca. 1,5 mm und in Alu (6 s)) von ca. 60% bedeuten.

2.2 Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die tribologischen Eigenschaften

Beim Einspritzen der gasbeladenen Schmelze in die Kavität platzen an der Fließfront Gaszellen auf und lassen bei dem Kontakt mit der kalten Werkzeugwand Schlieren auf der Bauteiloberfläche entstehen. Diese Schlieren lassen ein Kunststoffbauteil unansehnlich erscheinen, haben aber auch nur einen minimalen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Bauteils. Um diese Schlieren zu verhindern oder zu kaschieren kann man zusätzliche Technologien mit dem Schäumen kombinieren, z. B.

- je nach Kunststoff, kann man das Material selbst modifizieren,
- Erhöhen der Kontakttemperatur, bspw. über Beschichtung der Werkzeugoberfläche oder über dynamische Temperierung
- Aufbringen von Gas-Gegendruck in der Kavität.

Da das Aluminium den Abkühlprozess in der Randzone des Bauteils beschleunigt, könnte sich eine dickere amorphe Randschicht am Bauteil ausbilden. Diese ggf. dickere amorphe

Randschicht könnte sich auf die tribologischen bzw. verschleißtechnischen Eigenschaften des Kunststoffbauteils auswirken.

Um nun den Einfluss auf die tribologischen Einflüsse durch die unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffe (Stahl und Aluminium) zu untersuchen, sind verschiedene Untersuchungen an den Musterplatten durchgeführt worden.

2.2.1 Kratzbeständigkeit nach BMW GS 97034-9 (2015-09)

Die Prüfung dient der Bestimmung der Kratzfestigkeit von lackierten sowie unlackierten Kunststoffbauteilen. Zu diesem Zweck wird an der Oberfläche des Bauteils eine Kratzbeanspruchung durchgeführt (Abbildung 11 und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Für die Prüfungen wurde ein Lineartester 249 der Firma Erichsen verwendet. Die Prüfung wird nach GS97034 - 9 durchgeführt. Die Spitze hat einen Durchmesser von 0,75 mm.

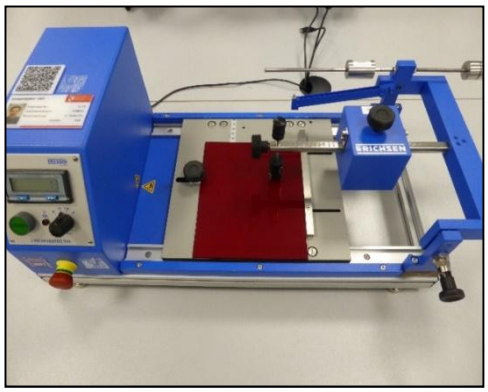

Abbildung 9: Lineartester 249

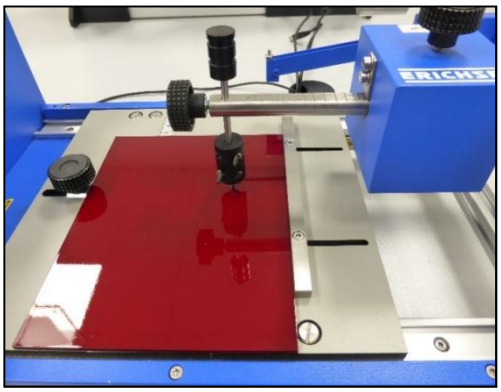

Abbildung 10: Detail „Erichsenspitze" mit Prüfgewichten

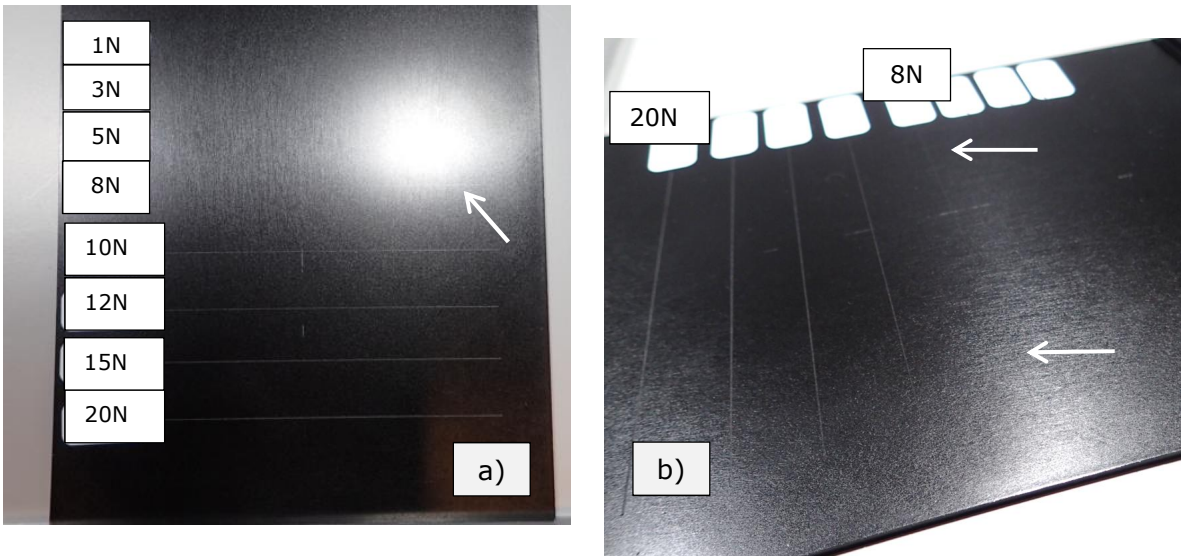

Abbildung 11: Platte nach Kratzprüfung, hier PA2, in Stahl, kompakt. Beim Ausspiegeln sind Kratzspuren ab 5 N Belastung zu erkennen – auf dem Foto ab 8 N (Pfeile)

Bei allen Tests zur Kratzbeständigkeit sind keine Unterschiede zwischen sowohl Aluminium- bzw. Stahlwerkzeugeinsatz als auch zwischen kompakt und geschäumt

gefertigten Teilen festgestellt worden. Dies bedeutet, dass die Kratzbeständigkeit eines Bauteils weder durch die Oberflächenstruktur (ohne Schlieren bei Kompakt gegenüber schlierig wenn geschäumt) noch die Randschichtdicke (Aluminium gegenüber Stahl als Werkzeugwerkstoff) einen großen Einfluss auf die Kratzbeständigkeit hat.

2.2.2 Reibechtheitsprüfung nach VW Standard: TL 226

Für die Reibechtheitsprüfung wurde ein Lineartester 249 der Firma Erichsen sowie Filzen verwendet.

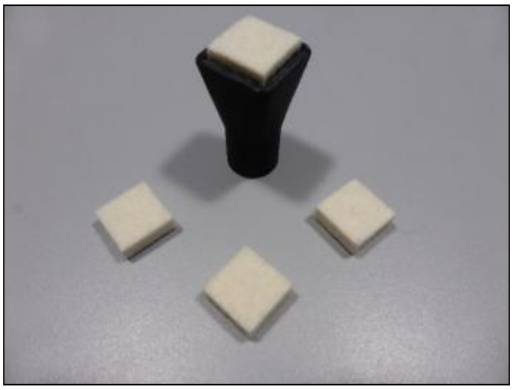

Abbildung 12: Reibzapfen mit Filzen

Abbildung 13: Platte nach Reibprüfung, hier PA2, in Stahl, kompakt. Beim Ausspiegeln sind leichte Schattierungen erkennbar. Unten: 30 Hübe, 9 N, Medium Diesel

Untersucht wurden PP Platten mit destilliertem Wasser, einer 1%-igen Pril-Lösung und Handschweißlösung nach DBL-Prüfstandard. Die PA Materialien wurden Tests mit destilliertem Wasser, sowie Super-Benzin und auch Diesel unterzogen. Die Auswahl der Testlösungen spiegelt den Anwendungsbereich des PPs im Interieur und des PAs im Bereich „Under the Hood" wieder.

Der Vergleich beim PP zeigt hinsichtlich der unterschiedlichen Einflussgrößen (Aluminium vs. Stahl; kompakt vs. geschäumt) so gut wie keine Unterschiede im Reibverhalten.

Bei der Gegenüberstellung bei den PA Typen treten Unterschiede im Erscheinungsbild der Proben auf. Beim „Trockenlauf" zeigt die kompakt gespritzte Variante ein deutlich besseres Verschleißverhalten als die geschäumten Platten. Dies ist unabhängig vom Werkzeugwerkstoff.

Im „Nasslauf" der PA-Proben mit den unterschiedlichen Medien zeigt sich bei den Untersuchungen ein besseres Reibverhalten gegenüber kompakt. Durch das Vorhandensein der Schlieren ist beim Reiben ohne Medium die generell höhere Oberflächenrauigkeit der Grund für den schnelleren Verschleiß der geschäumten Proben. Hingegen hält sich bei geschäumten Bauteilen das Medium länger in den „Taschen" die durch die Schlieren gebildet werden. Dieses Ergebnis bestätigt somit die Entscheidung einiger Automobilzulieferer Polyamidbauteile mit Reib- bzw. Verschleißanforderungen zu Schäumen.

2.2.3 Abriebbeständigkeit in Anlehnung an DIN EN ISO 5470 1 (1999-09)

Die Prüfung mit dem Taber-Abraser (ASTM D 4060) wird durchgeführt, um festzustellen, wie resistent eine Kunststoff- oder Lackoberfläche gegen Abrieb ist. Die Abriebfestigkeit bezeichnet die Widerstandsfähigkeit von festen Oberflächen gegenüber mechanischer Beanspruchung wie Reiben oder Erosion.

Der Abriebtest wird durch zwei Reibrollen, die mit definierter Kraft auf den rotierenden Probenhalter wirken, durchgeführt.

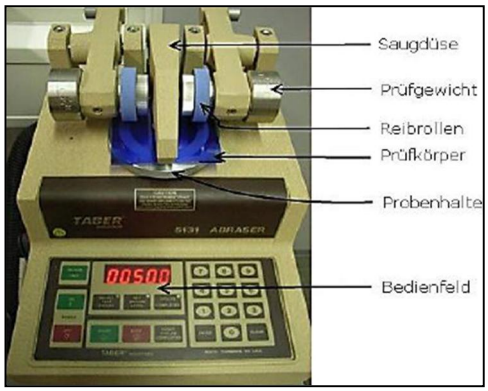

Abbildung 14: Prüfgerät Taber-Abraser

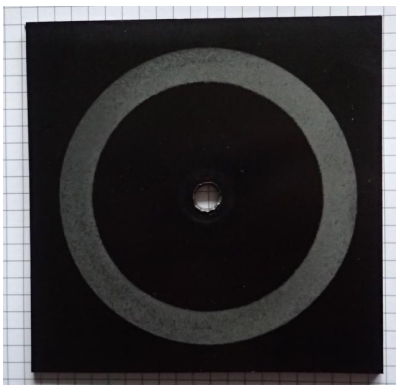

Abbildung 15: Typische Abriebmarkierung, hier PA3 kompakt

2.2.4 Zusammenfassung zu den Oberflächenprüfungen

Generell ist die Abriebbeständigkeit aller Materialien als „sehr gut" einzuschätzen, da die gewählten Prüfbedingungen aller Untersuchungen für die Materialien einer starken Belastung entsprechen. Als Beispiel ist insbesondere der Test der Abriebbeständigkeit zu erwähnen. Die gewählten Testparameter des Gewichtes pro Rolle von 1000 g, die Anzahl von 500 Umdrehungen und der Verwendung der groben Reibrolle (H-18) entsprechen im Gebrauch einer starken Belastung. Diese Ergebnisse bestätigen die Theorie, dass die Glashohlkugeln zwar keine Erhöhung der Oberflächenhärte darstellen, jedoch eine Verbesserung des generellen Reib- bzw. Verschleißverhaltens bei Polyamid bewirken.

2.3 Untersuchungen zur mechanischen Festigkeit

Aus den „DIN A5 Platten" (Maße ca. 190x150 mm) wurden Probekörper für Zugprüfung und Drei-Punkt-Biegetests herausgefräst, vereinzelt und entgratet. Die Prüfungen geschahen in Anlehnung an die Normen DIN EN ISO 527 bzw. DIN EN ISO 178.

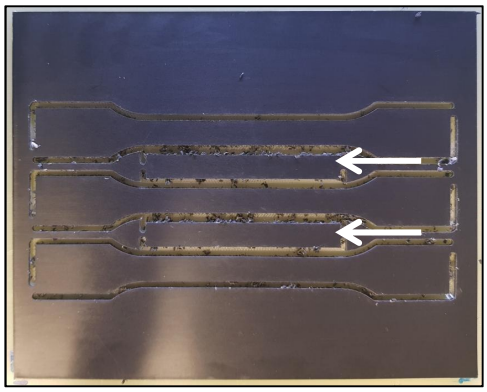

Abbildung 16: Gefräste Probekörper. Je Platte drei Zugstäbe Typ 1A sowie zwei Probekörper für die Biegeprüfung (siehe Pfeile). Der Schmelzefluss wäre hier im Bild von links nach rechts

Folgende Materialien wurden eingebunden:

- Polyfort PPH GBF4030RD H3 (PP1)
- PENTAMID B S GVB16 H2 R (PA2)
- PENTAMID B GV10 MC20 H2 RC (PA3)

Als Varianten wurden die Dicken 1,5 mm und 2,5 mm, jeweils kompakt und geschäumt, sowie je in Stahl- und Aluminium-Werkzeugeinsätzen gefertigt in die Versuche eingebunden. Die Probekörper lagerten vor der Prüfung mindestens vier Tage offen im Normalklima (23 °C / 50 % r.H.). Es fanden Mehrfachbestimmungen statt.

Als Kennwerte wurden ermittelt:

- Zugprüfung (DIN EN ISO 527):
  Zug-E-Modul, Streckspannung / -dehnung, Zugfestigkeit, Dehnung bei Zugfestigkeit, Bruchspannung /-dehnung
- Biegeversuch (DIN EN ISO 178):
  Biege-E-Modul, Biegespannung bei Normdurchbiegung, Spannung bei 3,5% Dehnung, Biegefestigkeit, Randfaserdehnung, Biegespannung bei Bruch, Biege-Bruchdehnung

Aus den mechanischen Untersuchungen konnte kein signifikanter Einfluss der Werkzeugeinsätze (Stahl oder Aluminium) auf die mechanischen Kennwerte festgestellt werden. Sowohl bei den geschäumten als auch kompakt hergestellten Probekörpern lagen die ermittelten Kennwerte je Dicke und Material auf etwa gleichem Niveau. Unterschiede lagen meist im unteren einstelligen Prozentbereich.

Erwartungsgemäß sanken bei den geschäumten Teilen die Festigkeitswerte (E-Modul, Festigkeit, Spannungen) wohingegen sich die Dehnraten zumeist erhöhten (PA2 und PA3). Die Materialien werden durch das Schäumen tendenziell also eher weicher und elastischer. Dies hat allerdings keinen Einfluss auf die eigentliche (Oberflächen-)Härte.

Die auftretenden Effekte und erreichbaren Schaumgrade sind nicht nur materialspezifisch, sondern können auch maßgeblich über die Prozessführung beeinflusst werden. Darüber hinaus ist bekannt, dass es eine Ortsabhängigkeit gibt: In angussnahen Bereichen liegt bei ähnlicher Wanddicke eine andere Schaumstruktur als in angussfernen Bereichen vor. Angussfern bilden sich mitunter größere Zellen aus.

Je länger der Fließweg ist, desto stärker ist dies aufgrund des Druckgefälles entlang des Fließweges ausgeprägt. Als „Faustregel" gilt, dass bei teilkristallinen Kunststoffen bis zu

einer Gewichtsreduzierung von ca. 10% die mechanischen Kennwerte ebenfalls um bis ca. 10 % verringert werden. Bei amorphen Kunststoffen ist dieser überproportionale Abfall der mechanischen Festigkeiten bereits ab 8% zu erkennen.

Diese Ortsabhängigkeit bzw. die Abhängigkeiten des Fließweges kann Teil von Folgeversuchen sein. Denkbar wären bspw. kleinere/kürzere Probekörper, welche jeweils z. B. lediglich 1/3 oder 1/4 des Fließweges abdecken, um so eine lokalere Aussage treffen zu können.

2.4 Untersuchungen zu Akustik- und Wärmeisolationseigenschaften

An den gefertigten Bauteilen sind Untersuchungen hinsichtlich der akustischen und thermischen Bauteileigenschaften durchgeführt worden.

Aus Erfahrungen im Bereich der Anwendung von geschäumten Bauteilen im Anwendungsgebiet „Under the Hood" haben geschäumte Bauteile bei höheren Frequenzen über ca. 1100 Hz hinsichtlich ihrer Dämpfung bessere Eigenschaften. Als Beispiel seien hier eine Motorraumabdeckung und auch Ventilhauben als Anwendungsgebiet im Automobilbau genannt.
Bei den Untersuchungen an den Plattengeometrien mit Gewichtsreduzierungen zwischen 6 und 7% gegenüber dem kompakten Ausgangsgewicht, konnte hinsichtlich des akustischen Dämpfungseigenschaften keine bemerkenswerten Unterschiede festgestellt werden.

2.4.1 Akustisches Verhalten von Schäumen und Glashohlkugeln

In Diagramm 6 ist das Mittlere Übertragungsmaß über die verschiedenen Varianten der Materialien PA2 und PA3 dargestellt. Insbesondere der Vergleich der Varianten „Stahl & kompakt" gegenüber „Aluminium & geschäumt" (1. & 4. Balken und 5. & 8. Balken) zeigen keine markanten Veränderungen. Es ist davon auszugehen, dass die angedachten Vorteile durch das Schäumen nicht eindeutig nachgewiesen werden konnten, jedoch sind auch keine negativen Einflüsse aus den ermittelten Daten ersichtlich.

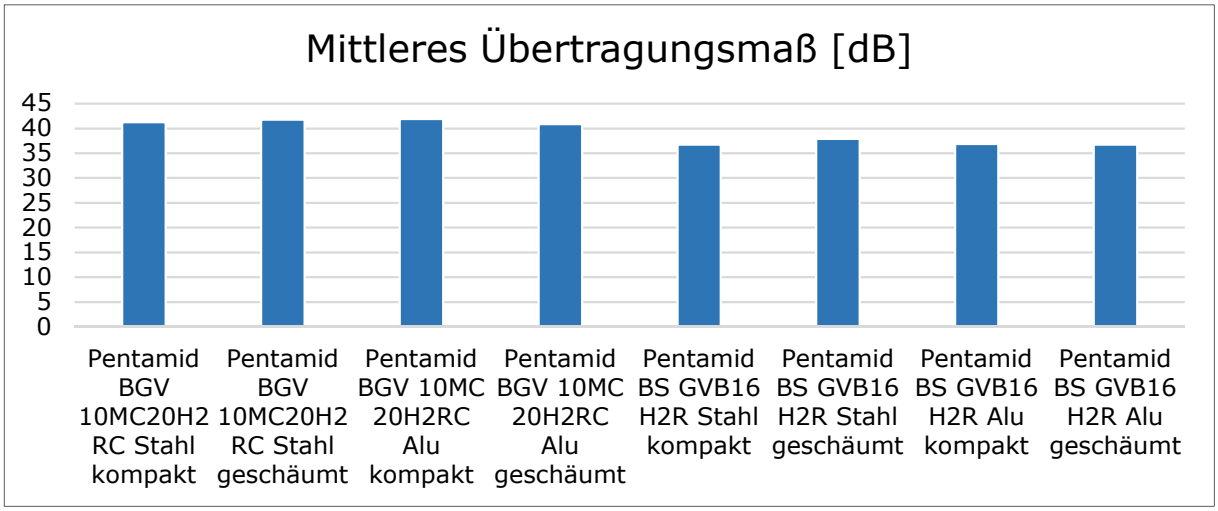

Diagramm 6: Mittleres Übertragungsmaß

2.4.2 Wärmeleitfähigkeit aufgrund von Schäumen und Glashohlkugeln

Diagramm 7 stellt den Unterschied in der Wärmeleitfähigkeit zwischen einem kompakten Kunststoffbauteil in Stahl gefertigt gegenüber einem geschäumten Kunststoffbauteil in Aluminium gefertigt dar. Durch die Kombination Schäumen in Aluminium verringert sich die Wärmeleitfähigkeit bei den einzelnen Materialien ohne Glashohlkugeln (PA 3) um ca. 10%, respektive um ca. 3% bei dem glashohlkugelgefüllten Material (PA 2). Da sich die Wärmeleitfähigkeit bereits bei dem mit Glashohlkugeln gefüllten Materialien um ca. 15% verringert, fällt die weitere Verringerung bei dem bereits mit Glashohlkugeln gefülltem Material (Balken 3 und 4 in Diagramm 7) geringer aus. Trotzdem sinkt die Wärmeleitfähigkeit weiter und verglichen mit dem kompakten und nicht mit Glashohlkugeln versehenen Material verringert sich der Kennwert um ca. 18%.

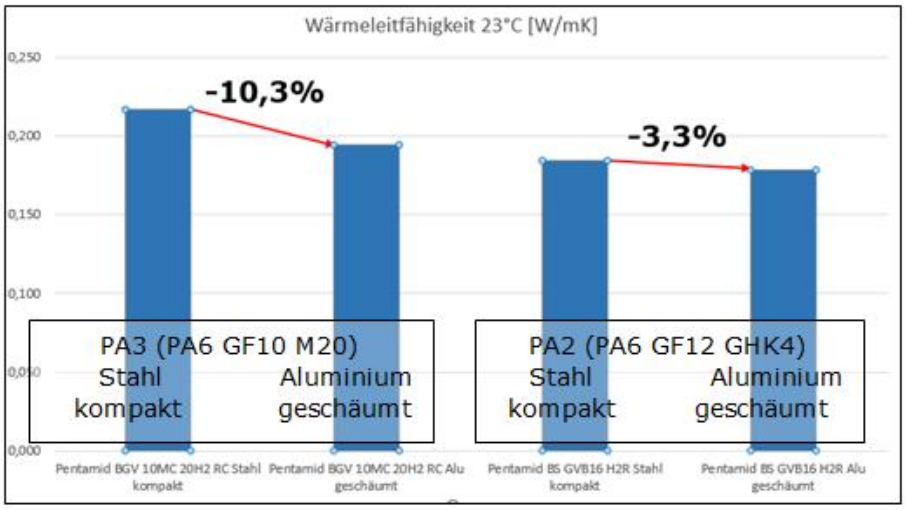

Diagramm 7: Wärmeleitfähigkeit kompakt & Stahlwerkzeug vs. geschäumt & Aluminiumwerkzeug für PA3 und PA2

3. Potentialanalysen

3.1 Potentialanalyse: Bauteilgewicht

Betrachtet man das Potential der Material- bzw. Verfahrenskombination Glashohlkugeln mit dem Schäumen in Aluminiumwerkzeugen, bringt dies einen erheblichen Vorteil in der Bauteilkonstruktion und somit im Bauteilgewicht. Diese Kombination ermöglicht das „andere Konstruieren" von Bauteilen und somit verringert sich der Materialeinsatz an Kunststoff generell.

In Diagramm 8 ist dargestellt, dass bei der Verwendung von Glashohlkugeln je nach Materialtype sich die Ausgangsdichte um bis zu 10% bei technischen Materialien durchaus verringern lässt.

Die reine Gewichtsreduzierung von Bauteilen beim Schäumen liegt aktuell in der Praxis bei etwa 8 bis 10%.

Kombiniert man Materialien mit Glashohlkugeln mit dem reinen Schäumen, ist normalerweise mit einer Bauteilgewichtsreduzierung von ca. 20% zu rechnen.

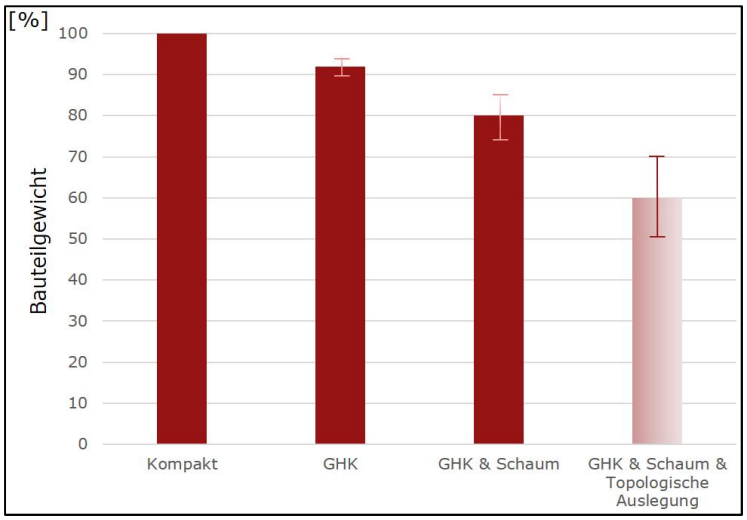

Diagramm 8: Einfluss verschiedener Konzepte auf das Bauteilgewicht

Wendet man nun die topologische Bauteilauslegung kombiniert mit den verschiedenen Technologien an, können Bauteile durchaus um 40% leichter werden.

In Verbindung mit der Verwendung von Aluminiumwerkzeugen, ist es möglich, auch bei erhöhter Werkzeugwandtemperatur Kühlzeiten zu minimieren, da der Wärmetransport aus dem Kunststoffbauteil heraus die Kühlzeit des Bauteils bestimmt.

Gleichfalls steigt die Werkzeugtemperatur auch bei größeren Wanddicken nicht. Somit ist die Wärmeleitung im Kunststoff kühlzeitbestimmend, da der Temperaturanstieg an der Werkzeugoberfläche marginal ist und der Temperaturunterschied zwischen Kunststoff und Aluminium höchstmöglich ausfallen. (ΔT hoch).

Letztendlich bedeutet dies, dass durch eine erhöhte Werkzeugtemperatur nur ein kleiner Nachteil in der Kühlzeit besteht, der jedoch durch verminderte Einfriereffekte beim Füllen des Werkzeuges andere Vorteile mit sich bringt.

Diese Vorteile bedeuten, dass ein einfacheres Füllen des Bauteils möglich ist.

Dies wiederum verringert den benötigten Fülldruck und führt somit zu einer verringerten Zerstörung der Glashohlkugeln im gefertigten Bauteil.

Zum anderen ermöglich ein geringerer Druck in der Kavität das Potential einer weiteren Wanddickenreduzierung.

3.2 Potentialanalyse: Bauteilqualität

Beim Kompaktspritzgießen muss der volumetrischen Schwindung beim Abkühlen des Kunststoffes im Werkzeug mit Nachdruck entgegengewirkt werden. Dieser externe Einfluss auf das Bauteil bewirkt, dass der Kunststoff im Bauteil unterschiedlich stark schwindet. Dies wiederum bewirkt einen Verzug am Bauteil, was sich dementsprechend nachteilig auf die Bauteilqualität auswirken kann. Durch die Zugabe der Glashohlkugeln verringert sich dieses Verhalten aufgrund der erhöhten Isotropie des Schwindungsverhaltens in allen drei Dimensionen (Längs-, Quer-und Dickenschwindung).

Beim Schäumen wird kein externer Nachdruck eingebracht, somit gleicht sich die Materialschwindung in allen Dimensionen auch wieder an und optimiert gleichermaßen wie die Glashohlkugeln den Verzug des Fertigbauteils.

Im Gegenzug bringt das Aluminium auf den ersten Blick keinen direkten Vorteil hinsichtlich der Verzugsproblematik. Aber aufgrund des besseren Wärmeabtransports im Werkzeug sind die Temperaturen an der Werkzeugoberfläche homogener, was wiederum zu einem gleichmäßigeren Abkühlen des Kunststoffes führt und sich somit in einer gleichmäßigeren Schwindung am Bauteil auswirkt.

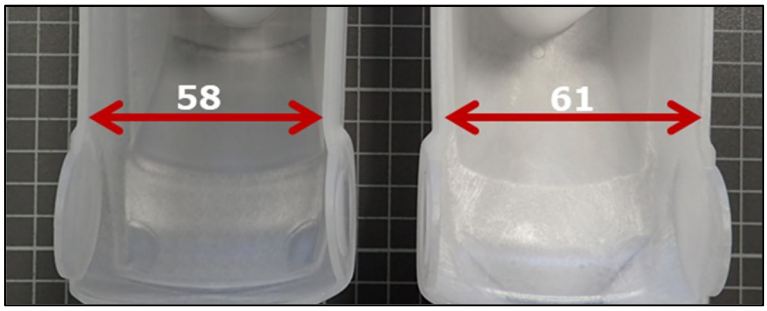

Abbildung 17: Kastenförmiges Demonstrator-Bauteil, lichter Abstand zwischen den Innenseiten; links: Kompakt (mit nur wenig Nachdruck), rechts: Verzugsminimierung durch Schäumen

Nachteilig bei der Bauteilqualität kann sich die Oberflächenbeschaffenheit von geschäumten Bauteilen auswirken. Je nach Material, Werkzeugbeschichtung, Spritzgießparameter und Bauteiloberfläche können Oberflächenschlieren (Abbildung 18, mittleres Bauteil) sichtbar werden, welche bei Sichtbauteilen i. d. R. unerwünscht sind.

Abbildung 18: Links: kompakt gespritzt. Mitte: geschäumt mit Schlieren an der Oberfläche. Rechts: geschäumt, aber ohne Schlieren durch Gasgegendrucktechnik.

3.3 Potentialanalyse: Produktionskosten

Zusätzlich erhöht die „andere Bauteilkonstruktion", neben dem geringeren Materialeinsatz, auch noch das Potential der Kühlzeitverkürzung. Dies nicht nur aufgrund der Verwendung von Aluminiumwerkzeugen, sondern auch, da man den Vorteil einer

dünneren Wanddicke nutzen kann, welche natürlich auch einer geringeren Restkühlzeit bedarf.

Weitere potentielle Vorteile sind:

- Verwendung von kleineren Spritzgießmaschinen aufgrund geringerem Druckbedarfs (Einspritzen, Nachdruck, Zuhalten) möglich. Dies verringert auch überdurchschnittlich die Produktionskosten des einzelnen Bauteils drastisch.

- Kombiniert man die o. g. Potentiale mit einer höherfachigen Auslegung des Produktionswerkzeuges bei der gleichen Maschinengröße, können sich die Ausbringungsmengen aufgrund der kürzeren Gesamtzykluszeit je Teil erhöhen.
    - Je nach Produktionsvolumen des einzelnen Bauteils kann eventuell auch auf eine Produktion des gleichen Bauteils auf mehreren Werkzeugen verzichtet werden.

- Der Zykluszeitvorteil kann ebenfalls genutzt werden, um bestehende Maschinen mit verschiedenen Bauteilen auszulasten:
    - Eine höhere Produktivität bzw. ein höherer Umsatz je Spritzgießmaschine trotz geringeren Bauteilkosten kann erzielt werden.
    - Evtl. kann die Gesamtanzahl an Maschinen im Unternehmen verringert werden. Dies kann wiederum zu Einsparungen im Maschinenpark führen oder sich gar auf den generellen Gebäudebedarf des Unternehmens auswirken.

3.4 Potentialanalyse: Ressourceneffizienz

Studien der Fa. Trexel Inc. haben ergeben, dass alleine durch das Schäumen von Bauteilen und die Verringerung der Materialmenge eine Reduzierung des CO_2 Ausstoßes um 8% möglich ist.

Nimmt man nun weiter die potentielle Verringerung der Gesamtzykluszeit in Betracht, würden sich Kunststoffteile mit ca. 19% weniger CO_2 Einsatzes herstellen lassen.

Ergänzt um die Potentiale der topologischen Bauteiloptimierung, könnte beim gesamten Prozesszyklus von Materialtransport, Trocknung, Plastifizieren und Abkühlen des Kunststoffmaterials bei niedrigeren Prozesstemperaturen eine Verringerung um ca. 35% erreicht werden.

Bezogen auf die Erstellung eines Spritzgießwerkzeuges aus Stahl oder Aluminium schlagen die Unterschiede der Rohstoffkosten bzw. die benötigten Ressourcen zur Herstellung des Rohstoffes nur gering ins Gewicht. Jedoch sind gerade die Bearbeitungszeiten von Aluminiumwerkstoffen gegenüber Stählen deutlich verkürzt.

In der Gesamtbetrachtung auf einem Lebenszyklus der kompletten Produktion eines Bauteiles fällt trotz der energieintensiven Herstellung von Stahl oder auch des Aluminiums nur ein ganz geringer Teil auf die Werkzeugerstellung bzw. auf das Werkzeug zurück.

4. Ausblick

Bei den Recherchen zum Stand der Technik sind Rückmeldungen vom Markt gekommen, dass die Verknüpfung der Technologien aktuell im Markt noch nicht angekommen ist.

Gründe dafür seien unter anderem, dass

kein „Vertrauen" in Aluminium als Werkzeugwerkstoff bestehe

- Glashohlkugeln kostentechnisch nicht vertretbar seien
- die Kombination der Technologien nicht mechanisch simulierbar sei.

In den letzten Jahren sind hochfeste Aluminiumlegierungen für Spritzgießwerkzeuge auf den Markt gekommen. Gerade in Verbindung mit dem Schäumen und der geringeren Beanspruchung der Werkzeuge durch die geringere Drücke, kann man diese Bedenken ausräumen. Zudem werden auch die Oberflächen der Werkzeuge beschichtet. Dies führt zu längeren Werkzeugstandzeiten, da aufgrund der passenden Beschichtung des Werkzeuges die Abrasion durch den Kunststoff verringert wird.

In Verbindung mit Aluminium als Werkzeugwerkstoff und dem Schäumen sind die Nachteile der Mehrkosten durch die Glashohlkugeln vertretbar bzw. fallen diese aufgrund des geringeren Materialeinsatzes nicht mehr so stark ins Gewicht bzw. bestehen erst gar nicht.

Aktuell gibt es Berechnungsmodelle, die das Füllen von Werkzeugen und den Verzug von Bauteilen bereits in der Entwicklungsphase unterstützen und voraussagen können - auch in Verbindung mit Aluminium und den Glashohlkugeln als weiteren Füllstoff. Spezialisierte Unternehmen entwickeln aktuell anwendungsspezifische Lösungen zur Simulation der mechanischen Eigenschaften nicht-kompakter Materialien. Diese sind jedoch weder allgemein anwendbar, noch im Markt erhältlich.

Dies bedeutet aber auch, dass „der Markt" Unterstützung bei der Entwicklung und Auslegung von geschäumten Bauteilen benötigt.

Weitere Fragen hinsichtlich der Recyclingfähigkeit von den im Kunststoff eingemischten Glashohlkugeln sind im Markt noch nicht ausreichend erörtert worden. Des Weiteren ist zu klären, inwieweit der Füllstoff Glashohlkugeln die Modelle beeinflusst bzw. ob der Werkzeugwerkstoff Stahl bzw. Aluminium unterschiedliche Strukturen aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleiteigenschaften im Bauteil hervorruft. Zum einen sind Kennwerte hinsichtlich der quasistatischen Berechnung notwendig, zum anderen sind, bspw. in der Automobiltechnik, Untersuchungen zum Bauteilverhalten im Crashfall von Nöten.

4.1 Weiteres Vorgehen

Ein Zwischenbericht des Projektes wurde dem AK Leichtbau der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. vorgestellt. Aufgrund der bis dahin ermittelten Ergebnisse ist seitens des AK Leichtbau eine Einreichung einer Projektskizze für ein AiF-Projekt an die Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. angeregt worden.

Diese eingereichte Projektskizze ist seitens der Forschungsvereinigung positiv bewertet worden und daraufhin soll bis Ende Februar 2021 ein Vollantrag zur Förderung eines AiF Projektes an die Forschungsvereinigung eingereicht werden.

Name AiF-Projekt:

TSGlass4CarAPP

Thema AiF-Projekt:

Ermittlung grundlegender Materialeigenschaften von geschäumten und glashohlkugelgefüllten Spritzgießformmassen als funktionalisierter Leichtbauwerkstoff für Automobilapplikationen

Kunststoff-Institut für die mittelständische Wirtschaft NRW GmbH (K.I.M.W.) | Karolinenstraße 8 | 58507 Lüdenscheid | www.kunststoff-institut.de

5. Verzeichnisse

5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Ablauf beim TSG 3
Abbildung 2: Typische Integralschaumstruktur von TSG-Bauteilen (Quelle: Neue Materialien Bayreuth GmbH) 3
Abbildung 3: Heckdiffusor für PKW (Quelle: Fa. Weimat-Pesch Group Eupen, Foammelt Tagung Engel 2020) 5
Abbildung 4: links: Kompakt-Spritzguss (176g); rechts: geschäumtes und topologisch optimiertes Bauteil (107g); Quelle: Trexel GmbH 6
Abbildung 5: Fließspirale aus Material PA2. v. l. n. r.: kompakt, geschäumt mit N2, geschäumt mit CO2 9
Abbildung 6:REM-Aufnahmen an Bruchflächen der Fließspirale mit maximalem Einspritzdruck 1500 bar. Es sind nur sehr wenige zerstörte Glashohlkugeln zu erkennen 9
Abbildung 7: Schließseite des Werkzeuges. Wechselplatte (Aluminium oder Stahl) markiert 10
Abbildung 8: Detail der Düsenseite. Lage des Temperatursensors in den Wechselplatten (Pfeil) 10
Abbildung 9: Lineartester 249 13
Abbildung 10: Detail „Erichsenspitze" mit Prüfgewichten 13
Abbildung 11: Platte nach Kratzprüfung, hier PA2, in Stahl, kompakt. Beim Ausspiegeln sind Kratzspuren ab 5 N Belastung zu erkennen – auf dem Foto ab 8 N (Pfeile) 13
Abbildung 12: Reibzapfen mit Filzen 14
Abbildung 13: Platte nach Reibprüfung, hier PA2, in Stahl, kompakt. Beim Ausspiegeln sind leichte Schattierungen erkennbar. Unten: 30 Hübe, 9 N, Medium Diesel 14
Abbildung 14: Prüfgerät Taber-Abraser 15
Abbildung 15: Typische Abriebmarkierung, hier PA3 kompakt 15
Abbildung 16: Gefräste Probekörper. Je Platte drei Zugstäbe Typ 1A sowie zwei Probekörper für die Biegeprüfung (siehe Pfeile). Der Schmelzefluss wäre hier im Bild von links nach rechts 16
Abbildung 17: Kastenförmiges Demonstrator-Bauteil, lichter Abstand zwischen den Innenseiten; links: Kompakt (mit nur wenig Nachdruck), rechts: Verzugsminimierung durch Schäumen 20
Abbildung 18: Links: kompakt gespritzt. Mitte: geschäumt mit Schlieren an der Oberfläche. Rechts: geschäumt, aber ohne Schlieren durch Gasgegendrucktechnik 20

Bilder ohne Quellenangabe sind Eigentum des Kunststoff-Instituts Lüdenscheid

5.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Veraschungstest Fließspirale, Spritzdruck 1.500 bar 10

5.3 Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Einfluss der Kombination von GHK und TSG in Stahl- und Aluminiumwerkzeugen, Bauteileigenschaften und Kosten 7
Diagramm 2: Einfluss der Kombination von GHK und TSG in Stahl- und Aluminiumwerkzeugen, Bauteileigenschaften und Kosten 8
Diagramm 3: Abkühlverhalten der unterschiedlichen Werkzeugwandmaterialien bei unterschiedlichen Bauteildicken 11
Diagramm 4: Theoretische Kühlzeitbetrachtung 11
Diagramm 5 a, b, c: Vergleich der gemessenen Abkühlkurven für unterschiedliche Wanddicken in Stahl und Aluminium, hier für Material „PP1 kompakt", Werkzeugwandtemperatur 50°C 12
Diagramm 6: Mittleres Übertragungsmaß 17
Diagramm 7: Wärmeleitfähigkeit kompakt & Stahlwertzeug vs. geschäumt & Aluminiumwerkzeug für PA3 und PA2 18
Diagramm 8: Einfluss verschiedener Konzepte auf das Bauteilgewicht.....19

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2016)

Nr.	Titel
283	Verformungs- und Versagensverhalten von Stählen für den Automobilbau unter crashartiger mehrachsiger Belastung, 2016
284	Entwicklung einer Methode zur Crashsimulation von langfaserverstärkten Thermoplast (LFT) Bauteilen auf Basis der Faserorientierung aus der Formfüllsimulation, 2016
285	Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf realer Fahrbahn, 2016
286	χMCF - A Standard for Describing Connections and Joints in the Automotive Industry, 2016
287	Future Programming Paradigms in the Automotive Industry, 2016
288	Laserstrahlschweißen von anwendungsnahen Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2016
289	Untersuchung der Bewältigungsleistung des Fahrers von kurzfristig auftretenden Wiederübernahmesituationen nach teilautomatischem, freihändigem Fahren, 2016
290	Auslegung von geklebten Stahlblechstrukturen im Automobilbau für schwingende Last bei wechselnden Temperaturen unter Berücksichtigung des Versagensverhaltens, 2016
291	Analyse, Messung und Optimierung des Ventilationswiderstands von Pkw-Rädern, 2016
292	Innenhochdruckumformen laserstrahlgelöteter Tailored Hybrid Tubes aus Stahl-Aluminium-Mischverbindun für den automobilen Leichtbau, 2017
293	Filterung an Stelle von Schirmung für Hochvolt-Komponenten in Elektrofahrzeugen, 2017
294	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter kombinierter Beanspruchung, 2017
295	Wechselwirkungen zwischen zyklisch-mechanischen Beanspruchungen und Korrosion: Bewertung der Schädigungsäquivalenz von Kollektiv- und Signalformen unter mechanisch-korrosiven Beanspruchungsbedingungen, 2017
296	Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur, 2017
297	Analyse zum Stand und Aufzeigen von Handlungsfeldern beim vernetzten und automatisierten Fahren von Nutzfahrzeugen, 2017
298	Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes von realen Nutzfahrzeugen im Fahrversuch und Vergleich verschiedener Verfahren zur numerischen Simulation, 2017
299	Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen, 2017
300	Thermisches Rollwiderstandsmodell für Nutzfahrzeugreifen zur Prognose fahrprofilspezifischer Energieverbräuche, 2017
301	The Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter in Ambient Air, 2017
302	Design Paradigms for Multi-Layer Time Coherency in ADAS and Automated Driving (MULTIC), 2017
303	Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit von Scheiben auf die Kondensatbildung, 2017
304	Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Umgebungsbedingungen, 2018
305	Simulationsgestützte Methodik zum Entwurf intelligenter Energiesteuerung in zukünftigen Kfz-Bordnetzen, 2018

306 Einfluss der Kantenbearbeitung auf die Festigkeitseigenschaften von Stahl-Feinblechen unter quasistatisch und schwingender Beanspruchung, 2018

307 Fahrerspezifische Aspekte beim hochautomatisierten Fahren, 2018

308 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter zeitvarianten Betriebsbedingungen, 2018

309 Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schraubverbindungen mit gefurchtem Gewinde, 2018

310 Konzept zur Auslegungsmethodik zur Verhinderung des selbsttätigen Losdrehens bei Bauteilsystemen im Leichtbau, 2018

311 Experimentelle und numerische Identifikation der Schraubenkopfverschiebung als Eingangsgröße für eine Bewertung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen, 2018

312 Analyse der Randbedingungen und Voraussetzungen für einen automatisierten Betrieb von Nutzfahrzeugen im innerbetrieblichen Verkehr, 2018

313 Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von Aluminiumwerkstoffen für die Crashsimulation, 2018

314 Definition einer „Äquivalenten Kontakttemperatur“ als Bezugsgröße zur Bewertung der ergonomischen Qualität von kontaktbasierten Klimatisierungssystemen in Fahrzeugen, 2018

315 Anforderungen und Chancen für Wirtschaftsverkehre in der Stadt mit automatisiert fahrenden E-Fahrzeugen (Fokus Deutschland), 2018

316 MULTIC-Tooling, 2019

317 EPHoS: Evaluation of Programming - Models for Heterogeneous Systems, 2019

318 Air Quality Modelling on the Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter Concentrations Using a High-Resolution Brake Use Inventory, 2019

319 Dehnratenabhängiges Verformungs- und Versagensverhalten von dünnen Blechen unter Scherbelastung, 2019

320 Bionischer LAM-Stahlleichtbau für den Automobilbau – BioLAS, 2019

321 Wirkung von Systemen der aktiven, passiven und integralen Sicherheit bei Straßenverkehrsunfällen mit schweren Güterkraftfahrzeugen, 2019

322 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen - Umsetzung und Anwendung, 2019

323 Transitionen bei Level-3-Automation: Einfluss der Verkehrsumgebung auf die Bewältigungsleistung des Fahrers während Realfahrten, 2019

324 Methodische Aspekte und aktuelle inhaltliche Schwerpunkte bei der Konzeption experimenteller Studien zum hochautomatisierten Fahren, 2020

325 Der Einfluss von Wärmeverlusten auf den Rollwiderstand von Reifen, 2020

326 Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen, 2020

327 Entwicklung der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Kontext verschiedener AIS-Revisionen, 2020

328 Entwicklung einer Methodik zur Korrektur von EES-Werten, 2020

329 Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen, 2020

330 Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen, 2020

331 Effiziente Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von LFT für Crashsimulation, 2020

332 Charakterisierung und Modellierung des Versagensverhaltens von Komponenten aus duktilem Gusseisen für die Crashsimulation, 2020

333 Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen Punktschweißverbindungen für die Crashsimulation, 2020

334 Simulationsgestützte Analyse und Bewertung der Fehlertoleranz von Kfz-Bordnetzen, 2020

335 Absicherung des autonomen Fahrens gegen EMV-bedingte Fehlfunktion, 2020

336 Auswirkung von instationären Anströmeffekten auf die Fahrzeugaerodynamik, 2020

337 Analyse von neuen Zell-Technologien und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem Batteriepack, 2020

338 Modellierung der Einflüsse von Mikrodefekten auf das Versagensverhalten von Al-Druckguss-komponenten mit stochastischem Aspekt für die Crashsimulation, 2020

339 Stochastisches Bruchverhalten von Glas, 2020

340 Schnelle, breitbandige Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2021

341 Wasserstoffkompatibilität von Aluminium-Legierungen für Brennstoffzellenfahrzeuge, 2021

342 Anforderungen an eine elektrische Lade- und Wasserstoffinfrastruktur für gewerbliche Nutzfahrzeuge mit dem Zeithorizont 2030, 2021

343 Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process, 2021

344 Review of non-exhaust particle emissions from road vehicles, 2021

345 Ganzheitliche Betrachtung von Rollwiderstandsverlusten an einem schweren Sattelzug unter realen Umgebungsbedingungen, 2021

346 Studie zur Abschätzung der Anwendungspotentiale, Risiken und notwendigen Forschungsbedarfe bei der Verwendung von Glashohlkugeln in Kombination mit thermoplastischem Schaumspritzguss, 2021

Impressum

Herausgeber FAT
Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.
Behrenstraße 35
10117 Berlin
Telefon +49 30 897842-0
Fax +49 30 897842-600
www.vda-fat.de

ISSN 2192-7863

Copyright Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2021

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de
Twitter @VDA_online

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de/fat

VDA | Verband der Automobilindustrie

FAT | Forschungsvereinigung Automobiltechnik