

VDI

K

KUNSTSTOFFTECHNIK

Spritzgießen 2018

KUNSTSTOFFTECHNIK

Spritzgießen 2018

Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.deutsche-digitale-bibliothek.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.deutsche-digitale-bibliothek.de.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte, auch das des auszugebenen Nachdruckes, der auszugebenen oder vollständigen photomechanischen Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie) und das der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany

ISBN 978-3-18-234351-6

VDI-Programmausschuss Spritzgießtechnik

Tagungsleitung

Dipl.-Ing. Univ. Steffen Reuter, Küsnacht (Schweiz)

Dr.-Ing. Thomas Walther, ARBURG GmbH & CoKG, Loßburg

Dipl.-Ing. Roland Dörner, Tente-Rollen-GmbH, Wermelskirchen

Dipl.-Ing. Bernhard Hoster, GIRA Giersiepen GmbH & Co. KG

Dipl.-Ing. Kerstin Krallmann, Erwin Quarder Werkzeugtechnik GmbH & Co. KG, Espelkamp

Prof. Dr.-Ing. Karl Kuhmann, Evonik Resource Efficiency GmbH, Marl

Dipl.-Ing. Norbert Nobbe, Pöppelmann Holding GmbH & Co. KG, Lohne

Dipl.-Ing. Guido Peters, gwk Gesellschaft Wärme Kältetechnik mbH, Meinerzhagen

Dipl.-Ing. Univ. Steffen Reuter, Küsnacht (Schweiz)

Dr. Marco Wacker, Uvex Arbeitsschutz GmbH, Fürth

Dr.-Ing. Thomas Walther, ARBURG GmbH & Co KG, Loßburg

Dr.-Ing. Martin Wanders, Lanxess Deutschland GmbH, Dormagen

Dipl.-Ing. Martin Würtele, KraussMaffei Technologies GmbH, München (Vorsitz)

Dr. Thomas Zipp, Weber GmbH & Co.KG, Kunststofftechnik + Formenbau, Dillenburg

Inhalt

Plenarvorträge

Navigating Complexity – Wie können wir in der „VUCA – World“ nachhaltig erfolgreich sein?

Dr. F. Böttcher, Dr. K.-M. Schuhmann, Contarix GmbH, Kelkheim

1

Möglichkeiten und Grenzen der theoretischen DoE – Was entscheidet über gut und schlecht?

Dipl.-Ing. (FH) C. Mädje, Gira Giersiepen GmbH & Co. KG, Radevormwald;

Dipl.-Ing. (FH) M. Schmellenkamp, SIGMA Engineering GmbH, Aachen

15

Mehrwert in der Praxis – Intelligente Nutzung von Prozess- und Maschinendaten aus der Spritzgießproduktion

Dipl.-Ing. I. Brexeler, Krallmann Holding u. Verwaltungs GmbH, Hiddenhausen;

Dr.-Ing. S. Kruppa, KraussMaffei Technologies GmbH, München;

Prof. Dr.-Ing. R. Schifflers, M.Sc. A. Schulze Struchtrup, Universität Duisburg-Essen

19

Kurzberichte aus der Forschung

Von der Simulation in die Maschine – Objektivierte Prozesseinrichtung durch maschinelles Lernen

Prof. Dr.-Ing. Ch. Hopmann, Dr.-Ing. M. Theunissen, J. Heinisch, M.Sc.,
Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen, Aachen

29

Technologische Vereinigung des Spritzgießens mit der Oberflächenfunktionalisierung – Mit der In-Mold Technologie zu werkzeugfallenden 3D-MID-Bauteilen

Prof. Dr.-Ing. M. Gehde, Professur Kunststoffe, TU Chemnitz

43

Additive Fertigung mit Kunststoffen – Potenziale, Entwicklungen und Trends

Prof. Dr.-Ing. D. Drummer, Dr.-Ing. K. Wudy, Lehrstuhl für Kunststofftechnik,
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen

53

Automationslösungen für die effiziente Fertigung

Hochleistungs-Automation – Rolle, Ausblick, Entwicklung und Tücken
W. Czizegg, Waldorf Technik GmbH, Engen 65

Automationen beherrschbar gestalten – Erfahrungen aus der Praxis von H&B Electronic

Dipl.-Ing. (BA) Maschinenbau W. Stauß, H&B Electronic GmbH & Co.KG, Deckenpfronn 69

Fertigungszel len für dekorierte Bauteile – Automationslösungen rund um die Spritzgießmaschine

Dipl.-Ing. (FH) T. Brettnich, Sumitomo (SHI) Demag Plastics Machinery GmbH, Schwaig 71

Effizienz im Greiferbau

P. Hill, AGS Automation Greifsysteme Schwoppe, Bergisch Gladbach 77

Automationslösungen für kleine Losgrößen

Dipl.-Wirtschaftsingenieur (BA) Andreas Reich, ARBURG GmbH & Co KG, Lossburg 85

Smart Plastics in Smart Solutions

Neue Partikelschaumlösungen: Leicht, funktionsintegriert und dampffrei gefertigt

J. Vetter, M. Lucht, FOX Velution GmbH, Nürnberg 87

Spritzgieß-Kombinationstechnologien mit Organoblechen

C. Obermann, Bond-Laminates GmbH 99

Entwicklung und Fertigung von Bauteilen aus wärmeleitenden Kunststoffen

Dr.-Ing. S. Amesöder, A. Lober, M.Eng., RF Plast GmbH, Gunzenhausen 109

Additive Fertigungsprozessketten für 3D gedruckte Elektronik

Dr. M. Hedges, J. Hörber, M. Süttenbach, Neotech AMT GmbH 121

Smarte, multifunktionelle Oberflächen – Realität oder Zukunftsvision?

Dipl.-Ing. J. Guenther, Dipl.-Ing. D. Malecha, Kunststoff-Institut Lüdenscheid, Lüdenscheid 131

Navigating Complexity

Wie können wir in der „VUCA – World“ nachhaltig erfolgreich sein?

Dr. **F. Böttcher**, Dr. **K.-M. Schuhmann**, Contarix GmbH, Kelkheim

Zusammenfassung

Wir leben in einer „VUCA-World“ – ein Begriff, der vor einigen Jahren von Strategen des amerikanischen Militärs geprägt wurde. VUCA steht für „Volatility“, „Uncertainty“, „Complexity“ und „Ambiguity“. Die Digitalisierung ist die dabei wichtigste treibende Kraft. Um in der VUCA - World nachhaltig erfolgreich zu sein, reichen Effizienz und organisches Wachstum als bestimmende Erfolgsfaktoren nicht mehr aus. Vielmehr benötigen Unternehmen neue Strategien und Vorgehensmodelle, innovative Navigationssysteme, agile Strukturen und neue Formen der Kooperation in Business-Ökosystemen.

Today, we live in a "VUCA World" – an acronym which was created by U.S. Army strategists, standing for "Volatility", "Uncertainty", "Complexity", and "Ambiguity". In this context, digitization is seen as the major driving force. In the VUCA-world, efficiency and organic growth are no longer the most critical factors for sustainable success. Instead, companies need to develop and implement new strategies and process models as well as innovative navigation systems, agile structures and new forms of cooperation in business ecosystems.

Eine neue Dynamik von Veränderungen

Die Veränderungsprozesse in der VUCA-Welt unterscheiden sich in Ihrem CHARAKTER signifikant von früheren Veränderungen. Sie sind schneller, dynamischer, widersprüchlicher und haben dramatischere Auswirkungen. Die Gründe hierfür sind vielschichtig. Die Globalisierung muss hier sicher an erster Stelle genannt werden. Von größerer Bedeutung ist aber die Digitalisierung, die die Geschwindigkeit der Wissensgenerierung dramatisch steigert und Informations- bzw. Wissensflüsse eng verknüpft. Sie ist Treiber und Ausdruck einer Transformation, Dynamisierung und Potenzierung, die in einem bislang nicht bekannten Ausmaß alle Bereiche des Lebens verändert¹:

¹ Eine sehr differenzierte Darstellung und Diskussion dieser Trends ist nachzulesen unter [1] Kelly (2016)

- **Totale und globale Vernetzung.** Nahezu alle Gegenstände der realen Welt werden als Teil eines umfassenden Informations- und Kommunikationssystems in einer realen und virtuellen Welt verschmolzen sein. Die Interaktion der Komponenten ist nicht mehr Teil einer festen Umgebung bzw. Anwendung, sondern auf einen spontanen Zusammenschluss von Netzwerken ausgelegt. Im Zentrum der Kommunikation zwischen Gerät und Anwendung steht die allgegenwärtige Verfügbarkeit der Dienste und nicht das Gerät selbst.
- **Künstliche Intelligenz.** „Künstliche Intelligenz [wird]... ebenso wie Elektrizität vor 100 Jahren allgegenwärtig sein. Sie ist eingebettet in alle Dinge, die uns umgeben und wird die Art, wie diese Dinge funktionieren [und wie wir mit ihnen interagieren], vollständig verändern“. Dabei gibt es viele Formen von Intelligenz, die in ihrer Gesamtheit vollkommen neue Potenziale und Möglichkeiten eröffnen, aber auch das Auftreten von Disruptionen stark beschleunigen werden [2]. Intelligente, agile Maschinen in Form von autonomen, selbstorganisierenden humanoiden Robotern, Drohnen oder autonome Transportsysteme werden die Effizienz, Flexibilität, Robustheit und Transformationsfähigkeit der industriellen Produktion nachhaltig verbessern, aber auch sehr bald in vielen anderen Lebens- und Arbeitsbereichen zum Einsatz kommen [3,4].
- **Neue Realitäten,** Neue Formen von Präsenz und Interaktionen auf der Basis von Virtual und Augmented Reality eröffnen neue Erfahrungs- und Erlebniswelten, die mit der Überlappung von verschiedenen Realitäten einhergehen. Die Frage, was Realität ausmacht und wie Menschen ihr Weltbild konstruieren, wird dabei immer mehr in den Vordergrund gerückt. Die Diskussion über „Fake News“ muss in diesem Kontext als erstes schwaches Signal interpretiert werden. Schon heute oder in naher Zukunft kann der Anwender u.a.: mit *Microsofts HoloLens* über eine Brille mit durchsichtigem Display Objekte direkt in der Umgebung virtuell einblenden und so z.B. die Ergonomie von Armaturen testen; mit *Googles Tango* über eine App Möbel virtuell in einen realen Raum einpassen und Ensembles gleich online bestellen, via *Apples AR-Kit* über eine Kamera, wie sie bereits jetzt in den iPhones verfügbar ist, 3D-Abbilder der Umgebung erstellen, um freie Flächen auf dem Boden und auf Tischen zu erkennen und dort digitale Objekte zu platzieren.

- **Teilen und Teilhabe.** Viele der neuen, erfolgreichen Geschäftsideen wie Uber und AirBnB bieten primär einen Zugriff auf eine Leistung an, bei dem es um Nutzung von Funktionen im Bedarfsfall und nicht um den Besitz von Dingen geht [5]. Beim dieser als „Sharing“ bezeichneten Entwicklung geht es aber um mehr. Sharing ermöglicht und fördert Austausch und Kooperation, was neue Potenziale generiert. Es umfasst Dinge, Ideen, Emotionen, Geld, Zeit, Wohlergehen – und alles, was privat und geschäftlich geteilt werden kann.

Während die Automatisierung (in Zukunft verstärkt durch künstliche Intelligenz / KI) Menschen aus vielen Arbeitsprozessen ausschließt, nehmen das Bedürfnis und die Möglichkeit persönlicher Kreativität und Gestaltung des persönlichen Umfelds über Teilen und Teilhabe zu [6]. Dabei sind verschiedene Ausprägungen zu erkennen, wie beispielsweise

- Das Bedürfnis, Restriktionen in High-Tech-Produkten zu überwinden. Anwender greifen dabei in die Entwicklungsprozesse ein, bzw. werden als Prosumer Teil derselben.
- Das Entstehen von digitalen Währungen außerhalb tradierter Ökonomien.
- Unabhängigkeit bei der Produktion von Nahrungsmitteln (Urban-Gardening-Movement).
- Unabhängigkeit bei der Energieversorgung durch die Nutzung regenerativer Energien.

Es liegt nahe, dass diejenigen Unternehmen in Zukunft am erfolgreichsten sein werden, die Prozesse des „Sharings“ im weiten Sinn unterstützen, vereinfachen und erweitern [7].

Aufmerksamkeit richten. In einer Welt, in der jedes Jahr 8 Millionen neue Lieder, 2 Millionen neue Bücher, 16.000 neue Filme, 30 Millionen Blog Posts, 182 Milliarden Tweets und 400.000 neue Produkte in die Welt kommen, ist Aufmerksamkeit eine zunehmend rare Ressource [8]. Menschen müssen, mehr denn je, eine Auswahl treffen und in der unendlichen Wissenswelt eine eigene Insel mit persönlichen Kompetenzen, Erfahrungen, Interessen und Interpretationen schaffen. Erst im Austausch mit anderen kann dies gelingen, u.a. durch Bewertungen und Kommentare im Netz. Sie geben Orientierung und schaffen Vertrauen als Basis für das eigene Urteil und Handeln. Die zentrale Frage für Unternehmen lau-

tet also: wie wählen die Kunden aus, wie entscheiden sie und wie gelingt es, die Aufmerksamkeit auf das eigene Angebote zu lenken?

- **Unmögliches und Unerwartetes.** Die Digitalisierung verschiebt Grenzen und schafft neue Erfahrungsräume, was dazu führt, dass die Bedeutung von „Unmöglich“ immer relativer wird. So werden heute in „Moonshot-Projects“ Herausforderungen in Angriff genommen, mit denen scheinbar vorhandene Limitationen radikal aufgebrochen werden sollen. Beispiele sind Space X, Hyperloop, selbstfahrende Autos oder der Aufbau von dauerhaft bewohnten Siedlungen auf dem Mars. In seinem Buch „The Inevitable – Understanding The 12 Technological Forces That Will Shape Our Future“ fasst Kevin Kelly, Mitbegründer des Wired Magazine, dies mit der Aufforderung zusammen, dass wir nicht „unmöglich“ sagen sollen, sondern „Let's see“ [9].

Was müssen wir tun?

Kelly hält den durch die Digitalisierung eingeleiteten Wandel für unvermeidbar: „We can or should attempt to prohibit some of results or manifestations the technological shift, but the technologies are not going away. Change is inevitable. We now appreciate that everything is mutable and undergoing change, even though much of this alteration is imperceptible“[10].

Auch wenn die Digitalisierung unvermeidbar ist, bietet sie großen Raum für neue Ideen und Gestaltung mit enormen Chancen. Wie können diese Chancen aber in einer Welt genutzt werden, die sich so schnell verändert, dass unsere Fähigkeit, neue Dinge aufzunehmen nicht mehr ausreicht und wir permanent mit Dingen konfrontiert zu werden, bei denen es erst nach vielen Jahren gelingt, einen gesellschaftlichen Konsens über die Einsatzmöglichkeiten und Wirkungen herbeizuführen? Wie orientieren wir uns in einer Dynamik, in der wir uns, unabhängig von Alter und Erfahrung, endlos als Anfänger („Newbies“) erfahren, in der stetes „Werden (becoming)“ der Normalzustand ist?

Viele Unternehmen betreiben enorme Anstrengungen, um die digitale Transformation und ihre Prozesse in der VUCA-Welt zu bewältigen. Dabei zeigt sich, dass die einfache Steigerung von Effizienz und organischem Wachstum nicht mehr ausreicht [11]. Vielmehr müssen immer wieder durch neue Strategien und Vorgehensmodelle entwickelt werden, um die Handlungsfähigkeit und den langfristigen Erfolg zu sichern.

Navigationssysteme bereitstellen

In der „VUCA-World“ wird es für Führungskräfte und Unternehmen zunehmend schwierig, externe und interne Einflussfaktoren zu kontrollieren, Sicherheit von strategischen und operativen Entscheidungsprozessen zu garantieren und die erforderlichen Ressourcen, Kompetenzen und Fähigkeiten bereitzustellen. Viele Entwicklungen sind nicht mehr vorhersehbar, wichtige Informationen fehlen und können auch nicht beschafft werden. Auch in der Vergangenheit wurden Unternehmen und Führungskräfte immer wieder damit konfrontiert, dass hergebrachte Weltbilder und Modelle nicht mehr funktionieren. Solche Veränderungen zu erwarten und mit ihnen umzugehen, haben wir gelernt. Nicht jedoch mit der Komplexität und Dynamik, mit der wir heute konfrontiert werden. Um dennoch handlungsfähig zu bleiben, benötigen wir neue Instrumente und vor allem Navigationssysteme, die helfen

- die Position zu bestimmen und Bezugspunkte zu finden,
- Handlungsfelder und Ziele zu identifizieren,
- zu agieren und steuernd einzugreifen.

Zusammenstellungen von Kennzahlen wie Umsatz, Kosten oder Marktdaten bilden sicher die Grundlage eines Navigationssystems. Für das Navigieren in der VUCA-World ist aber eine deutlich weitergehende Transparenz notwendig, die u.a. ...

- über die INNOVATIONSLÜCKE („Innovation Gap“)² anzeigt, welche Anstrengungen im Innovationsbereich unternommen werden müssen, um auch langfristig erfolgreich zu sein. Sie gibt Orientierung, weil sie (a) eine plausible und konsistente Erklärung verlangt, wie die Wachstumslücke gefüllt werden soll und (b) eine enge Verknüpfung der Innovationsprojekte mit der Unternehmensstrategie und der Innovationsstrategie sicherstellt.
- Informationen zum erwarteten Umsatzbeitrag und zur Erfolgswahrscheinlichkeit der laufenden Projekte und der in den Projekten gebundenen Ressourcen gibt. Hierdurch wird überprüft, ob die richtigen Maßnahmen getroffen wurden und wie große die Möglichkeiten für ein weitergehendes Handeln bestehen.
- dafür sorgt, dass Signale erkannt werden, die auf einen unmittelbaren oder zukünftigen Entscheidungsbedarf hinweisen. Dabei sind vor allem die schwachen Signale wichtig, die früh Abweichungen von einem erwarteten Verhaltensmuster anzeigen und so eine Chance auf rechtzeitiges Handeln geben.

² Die Innovationslücke ist als Differenz zwischen der realistischen Umsatzprognose für die nächsten Jahre und dem angestrebten Wachstumsziel definiert

Strategic Mapping - Orientierung durch Visualisierung

Navigationssysteme müssen komplexe Zusammenhänge transparent machen und so vereinfachen, dass das Wesentliche schnell erkannt und verstanden wird. Gleichzeitig muss aber auch sichergestellt werden, dass dabei die relevanten und bestimmenden Verknüpfungen nicht verloren gehen. Strategische Landkarten (Strategic Mapping) [12] als kompakte, visualisierte Darstellungen von komplexen Zusammenhängen bieten hier besondere Möglichkeiten. In der praktischen Arbeit haben sich dabei Innovations- und Trendlandkarten als erfolgreich erwiesen.

Trendlandkarten visualisieren eine Landschaft von bereits wirkenden und noch kommenden Trends und Gegentrends, durch die ganze Industrien und Branchen verändert werden können. Durch die Darstellung der Tрендentwicklung entlang einer Zeitachse werden auch Aussagen darüber getroffen, wann bestimmte Trends spürbar werden, und wann sie voraussichtlich ihre maximale Wirkung entfalten werden. Nutzer der Trendlandkarte können für ihr Unternehmen und ihre Branche Schlüsse über die transformativen Entwicklungen ziehen und Maßnahmen rechtzeitig in die Wege leiten.

Grundlage der Trendlandkarte ist ein einfacher Trendkatalog, der regelmäßig über Umfragen unter den Mitgliedern und der weiteren Community unseres Cross-Industry-Netzwerks „future_bizz“³ in Verbindung mit Workshops aktualisiert und individuell an die Unternehmen angepasst wird.

³ future_bizz ist ein cross industry Netzwerk aus Großunternehmen und namhaften Unternehmen des Mittelstands einer großen Bandbreite von Branchen wie Pharma, Energie, Sanitär- und Heiztechnik, Bau, Gebäudetechnik und –ausstattung, Haushaltsprodukte, Möbel und Einrichtungen sowie Verbrauchs- und Konsumgüter (s. futurebizz.de)

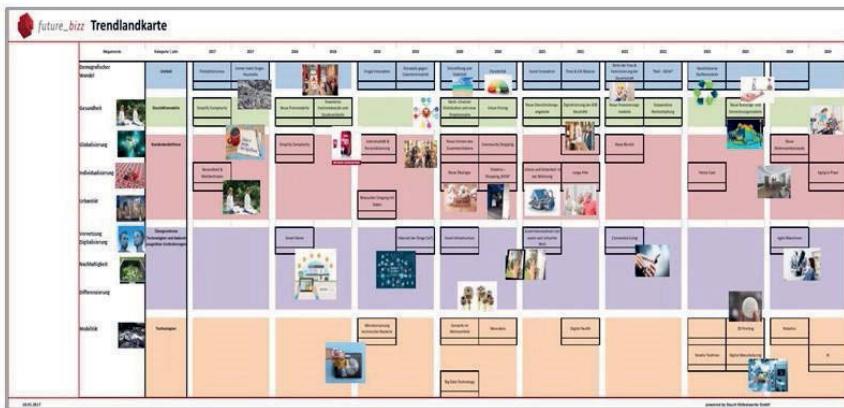


Bild 1: Das Zukunftsbild, das durch die Trendlandkarte aufgezeigt wird, eröffnet Möglichkeiten Schlüsse über transformative Entwicklungen zu ziehen und Maßnahmen rechtzeitig in die Wege zu leiten.

Die **Innovationslandkarte** erfüllt die Funktion des zentralen Navigationssystems, für das die Trendlandkarte die Grundlage darstellt. Sie enthält ...

- eine Beschreibung der Ist-Situation durch Visualisierung der wichtigsten Assets, der Chancen und Herausforderungen und der Innovationslücke, die die Anforderungen an die Innovationstätigkeit des Unternehmens vorgibt;
- ein Zukunftsbild, abgeleitet von den für das Unternehmen wichtigen Trends;
- bezogen auf Potenzial und Innovationsgrad bewertete Wachstumsfelder;
- eine Roadmap, die aufzeigt, wie das Unternehmen die Chancen der Wachstumsfelder nutzen und die Innovationslücken schließen will.

Die Effektivität und Leistungsfähigkeit eines Navigationssystem ergibt sich aus der Fähigkeit, die Mitarbeiter des Unternehmens in der Gesamtheit einzubinden, so dass sie kollektiv Veränderungen und Chancen im Markt (und dem weiteren Umfeld) erkennen, gemeinsam Ziele definieren und ihr Handeln so abstimmen. Das Erkennen und Vereinbaren von Prioritäten nimmt dabei eine zentrale Rolle ein, vor allem in einer Situation, in der die verfügbaren Ressourcen knapp sind und ein permanenter Wettbewerb zwischen dem Tagesgeschäft und zukunftsorientiertem Wachstum besteht. Kollektives Handeln setzt voraus, dass gemeinsa-

me Bilder der Wirklichkeit existieren und diese Bilder über Kommunikation immer wieder aktualisiert werden [13].

Die im Unternehmen geführte intensive Diskussion legt den Erfolg von Navigationssystemen und den Erfolg des Unternehmens insgesamt fest. Gerade hier greifen Landkarten ein. Strategic Mapping verlangt die Diskussion schon bei der Erstellung, aber auch bei Gesprächen an den Karten, die ausgedruckt als Plakate die Auseinandersetzung mit Fragen der zukünftigen Ausrichtung des Unternehmens anregen. Die Karten werden zu Arbeitsmitteln. Auf Ihnen wird geschrieben und notiert. Sie sind damit Gegenstand der permanenten Veränderungen und machen den Veränderungsprozess transparent.

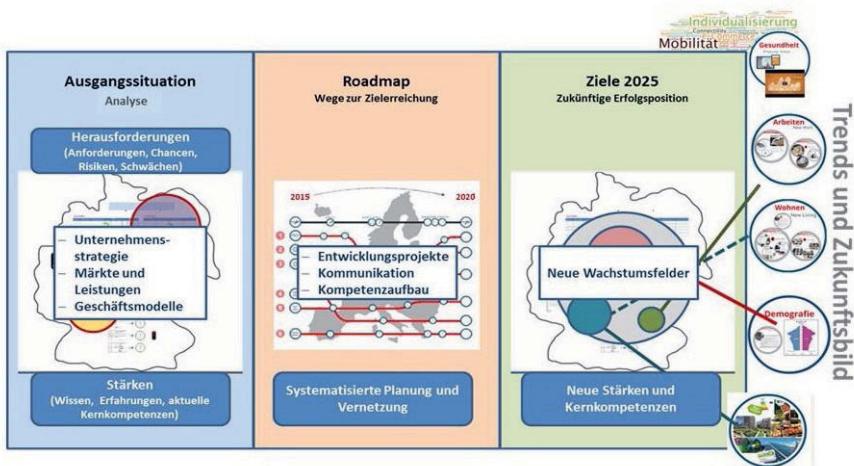


Bild 2: Die Innovationslandkarte zeigt in zusammenhängender Form Wege zu nachhaltigem Wachstum auf

Agile Organisationen realisieren

Navigation in der VUCA-World zeigt Handlungsmöglichkeiten und Handlungsbedarf auf. Aber nur agile Unternehmen können darauf angemessen reagieren. Dabei geht es um mehr, als um agiles Projektmanagement, SCRUM, Innovationlabs oder „Agile Workplaces“. Agilität beschreibt die Fähigkeit des Unternehmens, Veränderungen zu erkennen, selbst zu initiieren und daraus nachhaltige Wettbewerbsvorteile zu generieren. Das verlangt Offenheit, Flexibilität, die richtige Geschwindigkeit und vor allem konsequentes Handeln, sowie den uneinge-

schränkten Willen zur Gestaltung und eine immer wiederkehrende Bereitschaft, akzeptierte Regeln zu ändern.

Auch wenn agile Unternehmen als Organisationen stabil sind, passen sie ihre Strukturen flexibel an veränderte Rahmenbedingungen an. Sie verstehen die Welt als Prozess einer kontinuierlichen Veränderung und nutzen dies als Chance zum Wachsen.

Dies gelingt, indem Entscheidungen von Menschen (als Individuum oder im Team) getroffen, werden, die direkt mit der Notwendigkeit dieser Entscheidung konfrontiert werden, die aber auch die höchste Kompetenz zur Beurteilung der Situation haben [14]. Diese Personen müssen schnell gefunden und in den Prozess integriert werden, was in rigidien Hierarchien nicht möglich ist. Agilität setzt damit ein hohes Maß an individueller Verantwortung und Selbstorganisation als Bildung von neuen Kooperationen und Beziehungsmustern außerhalb definierter Strukturen voraus. Sie ermöglicht es, individuelle Fähigkeiten und Funktionen so zusammenbringen, dass über ein gemeinsames Wirken erst eine effiziente, kooperative Problemlösung möglich wird. Dabei haben in der Kultur verankerten Prinzipien eine wesentlich größere Bedeutung als feste Regeln und Prozesse [15].

Agilität ist im operativen Handeln ebenso verankert, wie in der strategischen Unternehmensführung, bezieht aber auch die Gestaltung der Organisation des umgebenden Business-Ökosystems mit ein. Projektmanagement und selbstorganisierte Projektteams sind dabei die tragenden Elemente agiler Unternehmen. In ihnen werden dynamisch und aufgabenspezifisch unterschiedliche Disziplinen zusammengeführt, dies auch als Co-Creation über Unternehmensgrenzen hinweg. Diese ‚Powerteams‘ (als Teil des agilen Projektmanagements) zeichnen sich aus, durch eine ...

- nahezu tägliche Zusammenarbeit von Fachexperten und Entwicklern während des Projektes,
- Selbstorganisation der Teams bei Planung und Umsetzung,
- Selbstreflexion der Teams über das eigene Verhalten zur Anpassung im Hinblick auf Effizienzsteigerung [16].

Gestaltung und kreative Wissensarbeit als Kerndisziplinen

Agile Unternehmen sind gestaltende Unternehmen, bei denen Performance vor Effizienz steht. Das Agieren in der VUCA-Welt wird als Gestaltungsprozess verstanden, der früh Handlungsbedarf und Handlungsoptionen identifiziert, einen kontinuierlichen Prozess der Transformation und des „Neu-Erfindens“ eingeleitet und auf kreativer Wissensarbeit aufsetzt.

Agile Gestaltung bezieht sich auf alle Ebenen des Unternehmens, d.h. die Reproduktion der Organisation über die Entwicklung und Anpassung der Mitarbeiterstruktur, die Aufbauorganisation, Arbeitsabläufe, individuelle Verhaltensmuster, Rollen und interne Kooperationsbeziehungen, aber auch die Gestaltung der Beziehungen zum umgebenden Business-Ökosystem. Menschen und ihre Interaktion, nach Möglichkeit im Gespräch von Angesicht zu Angesicht, rücken dabei in den Vordergrund. Das Unternehmen als Ganzes übernimmt dabei als fokale Institution die Aufgabe der Sinnstiftung, der Unterstützung und der Bereitstellung des Umfeldes, das motivierte Individuen für die Aufgabenerfüllung benötigen. Dies impliziert, dass Innovationshemmnisse identifiziert und beseitigt werden, um so auch die Arbeitsbelastung langfristig durch das Erkennen von Relevanz und Zusammenhängen, Auswahl und Vernetzung zu senken.

Kooperative Wertschöpfungssysteme aufbauen

Die im Text oben beschriebenen Trends sind Indikatoren für sehr reale Entwicklungen mit weit- und tiefreichenden Konsequenzen für so gut wie alle Industriezweige und Branchen. Sie bieten den Unternehmen, insbesondere über digitale Innovationen, neue Wachstumschancen durch Angebote und Geschäftsmodelle, die weit über die bekannten und beherrschten Tätigkeitsfelder hinausgehen. Unternehmen werden aber immer weniger in der Lage sein, alle hierfür notwendigen Kompetenzfelder für die Nutzung abzudecken. Gleichzeitig befinden sie sich zunehmend in einer Zwickmühle. Sie sind mit der Logik ihrer Branche und ihrer Kunden verwachsen, müssen sich aber für externe innovative Impulse und Kräfte öffnen, um Innovationslücken („Innovation Gaps“) zu schließen. Es wird zunehmend unmöglich, die immer schneller anwachsende Komplexität der Aufgabenstellungen einer sich wandelnden Welt im Alleingang zu bewältigen. So können beispielsweise die in neuen Geschäftsmodellen integrierten Serviceangebote häufig nur unterschiedlicher Marktteilnehmer erbracht werden. Produzierende und serviceorientierte Unternehmen, Software- und Hardwareanbieter, Grown-ups und Start-ups, Großkonzerne und Mittelständler, Universitäten und R&D-getriebene Unternehmen müssen dabei über die Grenzen von Branchen und Sektoren hinweg kooperieren. Die bislang praktizierte Koexistenz von klar differenzierten Unternehmen in Wertschöpfungsketten verschwindet: „Lösungen in den Bereichen Performance Contracting, Demand Response und Supply Chain Management werden für Kunden zu bevorzugten Geschäftsmodellen. Lieferanten müssen Servicekompetenzen und Dienstleistungskapazitäten entwickeln, um in den dynamischsten Marktbereichen zu agieren und hier die Wertschöpfung durch Co-Creation zu maximieren. Ein Geschäftsmodell, das eine Komplettlösung für den

Kunden darstellen will, muss die Konvergenz von dienstleistungs- und lösungsbasierten Branchen beinhalten“ [17].

Handlungsfähigkeit in der VUCA-World verlangt so, dass über die Agilität der Unternehmens hinaus auch, dass neue Modelle der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit entwickelt werden. Die heute üblichen Formen strategischer Allianzen wie Beteiligungen, Joint Ventures und gemeinsame FuE-Projekte sind nicht weitreichend genug. Sie ermöglichen nicht das Ausmaß an Flexibilität, welches für die Bewältigung der tatsächlichen Herausforderungen nötig ist. Das Agieren der Unternehmen im Markt kann nicht länger auf weitgehend statische, lineare Kunden-Lieferanten-Beziehungen oder den Wettbewerb reduziert werden. Klassische Rollen werden durch neue Bilder und Modelle der Zusammenarbeit ersetzt, in denen sich Unternehmen als Teil eines komplexen Business-Ökosystems verstehen. „Ein Unternehmen ist nicht mehr als Mitglied einer bestimmten Branche zu betrachten. Es ist vielmehr Teil eines Business-Ökosystems, das sich über die Grenzen einer Vielzahl von Branchen erstreckt. Innerhalb dieses Systems entwickeln Unternehmen gemeinsam Kompetenzen und Kapazitäten, die einer Innovation dienen und sich um sie herum gruppieren: die Teilnehmer arbeiten im kooperativen Wettstreit daran, neue Produkte zu fördern, Kundenbedürfnisse zu befriedigen, und letztendlich bereits die nächste Innovationsrunde einzuläutern ... Wie sein biologisches Gegenstück, so entwickelt sich auch ein Business-Ökosystem schrittweise von einer zufälligen Ansammlung bestimmter Komponenten zu einem besser strukturierten gemeinschaftlichen System. Business-Ökosysteme verdichten sich aus einem ursprünglichen, wirbelnden Sog von Kapital, Verbraucherinteresse und Talent heraus, der durch eine Innovation entsteht. Ganz so, wie sich eine erfolgreiche neue Spezies aus den natürlichen Lebensgrundlagen wie Sonnenlicht, Wasser und Bodennährstoffen erhebt“ [18].

Business-Ökosysteme beschreiben in neuer Weise den Rahmen, in dem Unternehmen agieren, in dem alle direkten und indirekten Austauschbeziehungen als zusammenhängendes, sich gegenseitig definierendes System deutlich gemacht werden. Für die Unternehmen ergeben sich daraus neue Gestaltungsoptionen und ein neues Verständnis zu Wettbewerb und Kooperation.

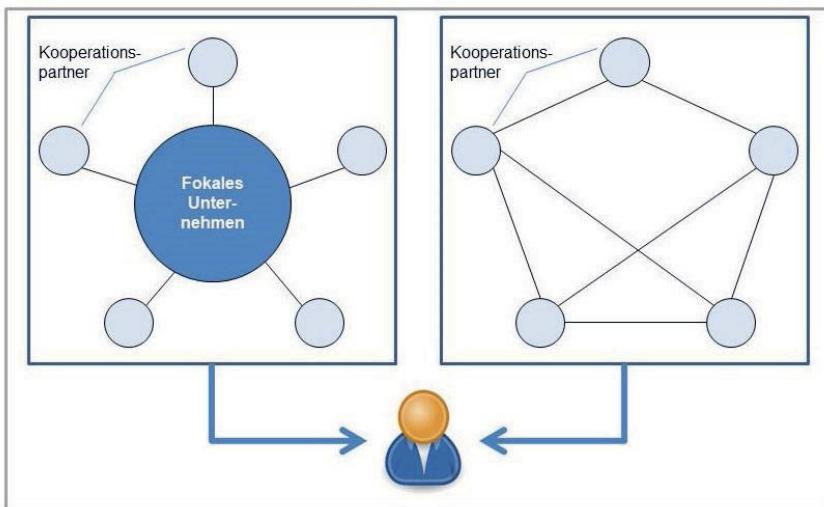


Bild 3: In kooperativen Wertschöpfungssystemen erbringen die Partner in gegenseitiger Abstimmung Leistungen für gemeinsame Kunden

Ein besonderer Aspekt der Business-Ökosysteme betrifft den bewussten und gezielten Aufbau von Kooperationsbeziehungen zwischen verschiedenen Partnern mit dem Ziel, eine gemeinsame Wertschöpfung zu generieren. Partner mit unterschiedlichen Kompetenzen, Rollen und Interessen arbeiten zusammen, um über WIN-WIN-Situationen kooperative Wettbewerbsvorteile zu generieren. „Dadurch, dass jeder beteiligte Partner seine spezifischen Kernkompetenzen ... einbringt, lässt sich der Zielkonflikt zwischen einer hohen Spezialisierung einerseits und einem breiteren, vielfältigeren Leistungsangebot andererseits auflösen. Im Verbund lassen sich Vorteile der flexibleren Aufgabenverteilung und Kapazitätsauslastung ... mit Spezialisierungsvorteilen auf der Ebene der Wertschöpfungseinheiten verbinden“ [19].

Management in der VUCA-Welt verlangt Management von Komplexität auf der Basis von wenigen, einfachen Regeln. Navigationssysteme, agile Organisationen und Kooperationssysteme bilden hierfür die Grundlage. Das kontinuierliche und gleichzeitige Gestalten von Angeboten und Geschäftsmodellen, Prozessen und Strukturen und des Business-Ökosystems auf der Ebene des „Daily Business“, des mittelfristig ausgerichteten „New Busi-

ness“ unter Einbeziehen der Zukunft über die schon heute stattfindende Entwicklung des zukünftigen Geschäfts stellt dabei die größte Herausforderung dar.

Quellenverzeichnis

- [1] Kelly,K (2016).: „The Inevitable: Understanding the 12 Technological Forces That Will Shape Our Future“, Penguin, New York 2016
- [2] s. Kelly (2016), S.42-50
- [3] Frost&Sullivan:”Top Technologies in Advanced Manufacturing and Automation (Technical Insights)”, D676-TI, May 2015
- [4] Frost&Sullivan:”Top Technologies in Sensors & Control (Technical Insights)”, D675-TI, May 2015
- [5] s. Kelly (2016), S.146ff
- [6] https://www.zukunftsinstitut.de/index.php?id=2015&utm_source=Zuk
- [7] s. Kelly (2016), S.136
- [8] s. Kelly (2016), S. 165f
- [9] s. Kelly (2016), S. 269ff
- [10] s. Kelly (2016), S. 2ff
- [11] Keeley, L.: “Ten Types of Innovation“, Wiley, New Jersey, 2013
- [12] s. hierzu auch: <https://www.business-wissen.de/hb/funktion-und-aufbau-einer-strategy-map/>
- [13] Weick,K.E.; Sutcliff, K.M.:“Managing the Unexpected“, Wiley, New Jersey 2015, S.21f
- [14] Weick,K.E.; Sutcliff, K.M.:“Managing the Unexpected“, Wiley, New Jersey 2015, S.115f
- [15] Anderson. H.; Uhlig, J.: „Das agile Unternehmen“, Campus, Frankfurt 2015, S.16
- [16] zit. nach Wikipedia https://de.wikipedia.org/wiki/Agile_Softwareentwicklung

- [17] Frost&Sullivan: "Service Business Models and Changing Competitive Landscape for Energy Management"; 9AAF-19, February 2015
- [18] Moore, J.F.: "Predators and Prey: A New Ecology of Competition"; Harvard Business Review 1993
- [19] Bach, N.; Buchholz, W.; Eichler, B.: „Geschäftsmodelle für Wertschöpfungsnetzwerke - Begriffliche und konzeptionelle Grundlagen“ in Bach, N.; Buchholz, W.; Eichler, B. (Hrsg.): „Geschäftsmodelle für Wertschöpfungsnetzwerke“; ilmedia 2010

Möglichkeiten und Grenzen der theoretischen DoE

Was entscheidet über gut und schlecht?

Dipl.-Ing. (FH) **C. Mädje**,

Gira Giersiepen GmbH & Co. KG, Radevormwald;

Dipl.-Ing. (FH) **M. Schmellenkamp**,

SIGMA Engineering GmbH, Aachen

Kurzfassung

Die Anforderungen an die Artikelqualität ist in den letzten Jahren immer mehr gestiegen. Spritzgießteile sollen hochwertig erscheinen, makellos sein, nach Möglichkeit engste Toleranzen einhalten und in kürzerer Zeit als Fertigteil zur Verfügung stehen. Das Zusammenspiel zwischen Material, Werkzeug, Maschine, Peripherie müssen eng aufeinander abgestimmt sein, da eine Abweichung von nur Einem über ein Gut- oder Schlechtteil entscheidet. Heutzutage soll vor Serienstart bekannt sein, welche Einflussgröße über die Artikelqualität entscheidet. Dies ist der Ansatz für eine DoE (Design of experiments) bzw. einer statistischen Versuchsplanung.

1. Einführung

Bei der Qualifizierung eines Artikels aus einem Spritzgießwerkzeug sind in der Regel bestimmte Mitarbeiter mit der Aufgabe betraut, sämtliche Parameter zu validieren, um eine gute Artikelqualität zu erzielen. Hier spielt Erfahrung und spezielles Wissen über Prozess und Material eine große Rolle. In den besten Fällen folgen diese „Abmusterungen“ einer bestimmten Systematik, in vielen Fällen wird aus Zeitmangel oft in kürzester Zeit eine Einstellung gefunden, die anfänglich scheinbar in Ordnung scheint. Leider wird dabei nicht erkannt, wie robust diese Einstellung ist. D.h. erzielt diese Einstellung auch bei Chargenschwankungen, Änderung der Umgebungsbedingungen oder Maschinenschwankungen noch die gewünschte Artikelqualität? Ebenso werden keine Erfahrung in Bezug auf kürzt mögliche Zykluszeit, geringste mögliche Werkzeug- oder Massetemperaturen, auftretende Fehler bei Veränderung bestimmter Parameter oder Toleranzgrenzen an den Serienprozess übergeben. Dies hat zur Folge, dass im späteren Serienalltag Komplikationen bei der Produktion auftreten können. Dies kann zu Diskussionen, erhöhtem Ausschuss oder Nacharbeit führen.

Um den Ansprüchen eines späteren Serienartikels gerecht zu werden ist es hilfreich schon sehr früh mit der Optimierung zu starten. Angefangen von Bauteil-, über Werkzeug- und Prozessoptimierung lässt sich ein Höchstmaß an Wirtschaftlichkeit erreichen. Eine Bauteil- und Werkzeugoptimierung findet in der Regel schon in der Konstruktionsphase statt. Eine Prozessoptimierung üblicherweise an der Maschine. Durch technische Fortschritte und immer präziseren Simulationen lassen sich nun auch Prozesskennwerte innerhalb einer Simulation durchrechnen, was die Optimierung an der Maschine im Idealfall hinfällig werden lässt.

Können zukünftig wirklich die richtigen Einstellparameter festgelegt werden, ohne das Werkzeug abgemustert zu haben?

2. DoE

Eine statistische Versuchsplanung dient dazu, mit möglichst wenig Versuchsreihen die Einflussgrößen zwischen Maschinenstellgrößen und Qualitätsmerkmalen zu ermitteln. Die Anzahl der Versuchsreihen richtet sich an die Anzahl der Maschinenstellgrößen, d.h. an die Variablen des Prozesses. Bei der Erstellung eines Versuchsplans wird immer nur eine Stellgröße verändert. Daraus ergibt sich eine Funktion von 2^n Versuchsreihen. Der Spritzgießprozess bietet eine Vielzahl an Stellgrößen, so dass der Aufbau eines Versuchsplans schnell sehr ausschweifende Ausmaße annehmen kann. Bei der Veränderung von Werkzeugtemperatur, Nachdruckhöhe, Einspritzgeschwindigkeit, Staudruck, Kühlzeit und Massetemperatur würden sich schon $2^6 = 64$ Versuchsreihen ergeben. Dies ist in der Praxis selten umzusetzen, da es teure Personal- und Maschinenkapazitäten bindet. Für einen stabilen Prozess ist es allerdings anzuraten, Versuchspläne durchzuführen und auf einen robusten Betriebspunkt hin auszuwerten. Software unterstützt DoE's können helfen mit wenigen Versuchsreihen schnell einen Überblick über Qualitätslage und Einflussgrößen zu erhalten. Darüber hinaus können Prozessparameter für einen optimalen Arbeitspunkt errechnet werden.

3. Virtuelle DoE

Simulationen des Spritzgussprozesses, auch als Virtual Molding bezeichnet, bilden zunächst nur einen Prozesspunkt ab. Einen unbestreitbaren Vorteil bieten sie bei frühzeitigem Einsatz durch Aussagen hinsichtlich Artikelqualität und möglicher Produktionsprobleme. Der Fortschritt der Technik erlaubt eine größere Anzahl an Simulationsläufen in kurzer Zeit, daraus folgt der Bedarf nach schneller, zielgerichteter Auswertung der anfallenden Datenmengen.

Voraussetzung einer automatisierten Simulation zur Durchführung einer DoE oder auch einer Multi-Objective / Pareto-Optimierung ist die Definition von aussagekräftigen Zielen (Objectives)

und Variablen. Da in einer Simulation sämtliche Variablen frei verändert und miteinander kombiniert werden können, ist es verlockend, dass Versuchsfeld deutlich größer zu gestalten, als man es in einer Versuchsreihe im industriellen Umfeld auf Produktionsanlagen durchführen würde.

Der Vortrag beleuchtet die Möglichkeiten der virtuellen DoE als Vorbereitung einer realen DoE im Rahmen einer Musterung. Sie werden auch weiterhin notwendig sein, können aber weiter reduziert werden. Die Grenzen der virtuellen DoE liegen im Simulationsmodell. Es können ausschließlich Variablen abgebildet werden, die innerhalb des Spritzgusswerkzeuges liegen, sowie in Qualitätsmerkmalen, die eindeutig mathematisch zu beschreiben sind. Während eine maßliche Veränderung sehr gut mathematisch beschrieben werden kann, ist dies für die Gratbildung nicht automatisiert möglich. Änderungen der Massetemperatur oder der Einspritzgeschwindigkeit sind einfach zu bewertende Variablen, während Schneckendrehzahl oder Staudruck nicht betrachtet werden können.

Die virtuelle DoE zeigt vorab die bestimmenden Einflussgrößen in Bezug auf die Artikelqualität und reduziert somit deutlich den Umfang einer realen DoE. Außerdem kann im Vorfeld ein großer Teil des Prozessfensters vorbestimmt und die Prozessstabilität unter Idealbedingungen bewertet werden.

Quellen: Gira Giersiepen GmbH & Co. KG, SIGMA Engineering GmbH, STASA Steinbeis Anwendungstechnik Systemanalyse GmbH

Mehrwert in der Praxis – Intelligente Nutzung von Prozess- und Maschinendaten aus der Spritzgießproduktion

Dipl.-Ing. **I. Brexeler**,

Krallmann Holding u. Verwaltungs GmbH, Hiddenhausen;

Dr.-Ing. **S. Kruppa**, KraussMaffei Technologies GmbH, München;

Prof. Dr.-Ing. **R. Schiffers**, M.Sc. **A. Schulze Struchtrup**,

Universität Duisburg-Essen

Kurzfassung

Moderne Spritzgießmaschinen mit neuster Regelungstechnik ermöglichen es Kunststoffverarbeitenden Unternehmen, Prozesse mit hoher Bauteilqualität und geringen Ausschussraten zu betreiben. Dennoch können externe Störreinflüsse, wie z.B. Schwankungen in den Materialeigenschaften die Produktion von Schlechtteilen verursachen, welche häufig erst zeitlich verzögert erkannt wird und somit hohe Kosten nach sich zieht. Hiervon ausgehend beschreibt der vorliegende Beitrag eine Vorgehensweise, um aus den fortlaufend anfallenden Prozessdaten nützliche Informationen zu generieren und diese zur Steigerung der Prozessqualität einzusetzen. Anhand eines Beispiels aus der realen Spritzgieß-Produktion wird gezeigt, wie die Daten zur Prozessüberwachung und Prozessoptimierung genutzt werden können.

Abstract

Modern injection molding machines with state-of-the-art control technology enable plastic processing companies to operate processes resulting in high part quality and low reject rates. However, external interferences such as fluctuations in the material properties may cause the production of bad parts, which is often detected only with a time delay and thus entails high costs. Based on this, the present article describes a procedure to gain valuable information from the continuously generated process data and to use it profitably. An example from the real injection molding production shows how the data can be used for process monitoring and process optimization.

Ausgangssituation

Kunststoffverarbeitende Unternehmen in Hochlohnländern unterliegen einem permanenten Kosten- und Qualitätsdruck. Dies erfordert zum einen eine kontinuierliche Optimierung der Produktionsprozesse und resultiert zum anderen in einem hohen Aufwand für Qualitätssiche-

rung. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn eine Null-Fehler-Toleranz gefordert wird, beispielsweise bei sicherheitsrelevanten Bauteilen oder medizintechnischen Produkten. In solchen Fällen ist neben der Erfüllung der Qualitätsanforderungen häufig auch eine Dokumentation der Fertigungsprozesse samt lückenloser Rückverfolgung notwendig.

Im Zusammenhang zu den vorgenannten Anforderungen und Zielen ermöglichen heutige Spritzgießmaschinen höchste Reproduzierbarkeit der Einstellparameter. Dies ist isoliert betrachtet, auch bei robusten Betriebspunkten, jedoch nicht ausreichend, um eine Gutteil-Produktion unter allen Umständen sicher zu stellen. So können sich externe Störeinflüsse, wie z.B. chargebedingte Materialschwankungen, dennoch negativ auf die Prozessqualität auswirken. Moderne Steuerungs- und Regelungskonzepte, wie KraussMaffei APC (Plus) [1], [2], oder Engel iQ weight control [3] sind in der Lage diese (Viskositäts-) Einflüsse bis zu einem gewissen Grad zu kompensieren. Kommt es jedoch zu großen Schwankungen oder zu Störungen in anderen Maschinenteilen, ist eine Kompensation bzw. Erkennung noch nicht möglich. Hier ist es wichtig, die Quelle von Störpotentialen ausfindig zu machen, um zukünftige Produktionen zu optimieren.

Hinsichtlich der angesprochenen Dokumentationspflichten bieten Spritzgießmaschinen die Möglichkeit, ausgewählte Prozesskennzahlen („Istwerte“) über eine Protokollfunktion entweder manuell per USB-Schnittstelle oder automatisiert über z.B. die Euromap 63-Schnittstelle auf einen Leitrechner zu übertragen. Eine systematische Prozessüberwachung findet in der Regel jedoch nicht statt, da keine geeignete Analyseinfrastruktur verfügbar ist, die auf dieser Basis eine angemessene manuelle oder gar automatisierte Analyse erlauben würde.

Zielsetzung

Ausgehend von der beschriebenen Ausgangssituation ergeben sich Anknüpfungspunkte für eine Verbesserung des aktuellen Stands der Technik. Diese sind vor dem Hintergrund der langfristigen Forderung einzuordnen, welche die Fähigkeit der Spritzgießmaschine zur automatischen Erkennung von Änderungen von Prozessparametern sowie deren autonomen Kompensation beschreibt, soweit dies durch die Adaption von Maschineneinstellungen möglich ist [4], [5]. Um diesem Ziel näher zu kommen, sind verschiedene Stufen zu durchlaufen.

Zunächst gilt es, die nötige Transparenz zu schaffen. Dies bedeutet, dem Maschinenbediener die relevanten Informationen über den Prozesszustand in geeigneter Form zugänglich zu machen. Obgleich die erforderlichen Informationen in der Maschinensteuerung vorliegen, sind die eingeschränkten Visualisierungsmöglichkeiten im Rahmen der Maschinensteuerung in dieser Hinsicht für eine tiefgreifende Prozessanalyse nicht ausreichend [6]. Ein Ansatzpunkt bietet in

diesem Zusammenhang der KraussMaffei DataXplorer, ein Data-Logger, der bis zu 500 Signale als kontinuierliche Kurvenverläufe aufzeichnet [7], [8]. Dies können Standardparameter wie Einspritzzeit und -druck sein, aber auch vielfältige Sondersignale, wie etwa der Werkzeuginnendruck. Pro Signal und Zyklus wird jeweils eine Datei gebildet und ist bis zu sieben Tage lang an der Maschine abrufbar. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit zur Datenübertragung per USB-Stick oder Ethernet-Schnittstelle. Für Austausch oder Weiterverarbeitung erfolgt die Umwandlung in ein globales Datenformat. Die hohe Auflösung von 5 ms gestattet einen detaillierten Blick in die Tiefe von Prozess und Hardware. Dies kann als Ausgangspunkt gesehen werden, um auf Basis hochauflöster Daten Prozesse zu hinterfragen und sie mittels Analyse zu optimieren. Zudem kann auf dieser Grundlage eine manuelle Ursachenforschung bei Störung oder mangelhafter Bauteilqualität durchgeführt werden.

Um jedoch einen fortlaufenden Mehrwert zu generieren sind Methoden zur automatischen Überwachung prozessbeschreibender Kennzahlen und zur Findung von Ursachen von etwaiigen Auffälligkeiten erforderlich. Die automatisierte Analyse von Prozessdaten hilft somit, den Bediener zu entlasten und den Autonomiegrad der Spritzgießmaschine zu erhöhen. Durch die gezielte Überwachung aggregierter Kennzahlen zur Beschreibung des Gesamtprozesses kann der Bediener Prozessänderungen leicht identifizieren und diese in einer darauf aufbauenden Fehlersuche auf die einfließenden Kennzahlen zurückführen, was zur Steigerung der Prozess- und Produktqualität beiträgt. Parallel zur Prozessüberwachung kann die durchgängige Überwachung der Maschinen und Anlagen genutzt werden, um sie zustandsbasiert und somit effizient warten zu können oder detaillierte Daten zur Diagnose zur Verfügung zu haben („Condition Monitoring“).

Datenanalyse: Möglichkeiten und Vorgehen

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte hin zu einer automatisierten, datenanalyse-basierten Prozessüberwachung beschrieben. Wie bereits erwähnt, sind die Möglichkeiten zur Visualisierung und Analyse von Prozessdaten über die Maschinensteuerung mit Einschränkungen verbunden. Gleichzeitig stehen für eine manuelle Analyse außerhalb der Maschine lediglich ausgewählte Prozesskennzahlen, sogenannte Istwerte, zur Verfügung, die über USB- oder Euromap 63-Schnittstellen exportiert werden. Diese Kennzahlen sind zyklusbezogene, skalare Werte, die physikalische Größen zu einem bestimmten Zeitpunkt abbilden. Der DataXplorer bedient sich hingegen direkt am Maschinendatenbus und speichert fortlaufend Daten auf einem integrierten Solid-State-Drive (SSD). Ähnlich wie bei einem Flugschreiber können nun alle wesentlichen Anlagen- und Prozessdaten aus unterschiedlichen Signalquellen innerhalb der Spritzgießmaschine mit einer Frequenz von 200 Hz aufgezeichnet werden.

Mit den aufgezeichneten Kurvenverläufen lassen sich maßgeschneiderte Kennzahlen gewinnen, mit deren Hilfe tiefgreifendere Prozessanalysen möglich sind.

Die Analyse von prozess-spezifischen Kennzahlen (z.B. maximaler Massedruck beim Einspritzen), welche auch durch den Kunststoffverarbeiter definiert werden können bzw. deren zeitlichen Veränderungen, bildet die Grundlage für eine übergeordnete Prozessüberwachung auf Basis von aggregierten Kennzahlen. In diesen können die Informationen über den Prozesszustand, welcher durch mehrere hundert Prozesskennzahlen beschrieben wird, konsolidiert werden und so für den Bediener handhabbar gemacht werden. Schließlich liegt auf der obersten Ebene der Prozessüberwachung nur noch eine sehr geringe Anzahl an übergeordneten Kennzahlen vor, die in der Lage sind, den Gesamtprozess hinsichtlich seiner Güte und möglichen Auffälligkeiten charakterisieren. Dies können z.B. die Anomalie-Dichte oder die Ähnlichkeit des Prozesses zu einem zuvor definierten Referenz-Prozess sein.

Mit Blick auf die vorgestellten Ebenen der Datenanalyse stellt sich die Eingrenzung einer Störungsursache beispielsweise wie folgt dar: Zunächst ermöglicht die kontinuierliche Überwachung der aggregierten Kennzahlen eine frühzeitige Erkennung von Auffälligkeiten im Gesamtprozess. Zeigen sich auf dieser Ebene Ansatzpunkte für eine weitergehende Untersuchung, so werden die Prozesskennzahlen betrachtet, welche in die übergeordneten, aggregierten Kennzahlen einfließen. Auf diese Weise können die relevanten Prozesskennzahlen identifiziert werden, welche gezielt untersucht werden sollten. Dies wird durch die Analyse der in die Prozesskennzahlen einfließenden Signale realisiert. Durch die Art und Kombination der veränderten Kennzahlen kann schließlich die Störungsursache eingegrenzt werden und entsprechende Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

Anwendungsbeispiel: Mehrwert automatischer Datenanalyse in der Praxis

In diesem Abschnitt sollt der Mehrwert der kennzahlbasierten Prozessüberwachung anhand eines Beispiels aus der realen Spritzgieß-Produktion verdeutlicht werden. Hierzu werden der tatsächliche Ablauf und die Schritte des datenbasierten Ansatzes gegenübergestellt.

Im vorliegenden Beispiel wurden mit einer hydraulischen Spritzgießmaschine vom Typ Krauss-Maffei 80-100 CX Formteile aus einem PET/PBT-Blend mit 15 % Glasfaseranteil produziert, an die hohe Qualitätsanforderungen gestellt werden. Nach dem Einrichten des Werkzeugs läuft die Produktion für mehrere Wochen planmäßig. Dies ändert sich mit einem Wechsel in der verwendeten Materialcharge. Obgleich die Formteile einer Qualitätskontrolle unterliegen, wird die aus den Materialeigenschaftsänderungen resultierende Schlechtteilproduktion (Verletzung einer Maßtoleranz) erst mit Verzögerung bemerkt. Dies ist dadurch begründet, da zum einen der Zeitpunkt der Teileentnahme so liegt, dass die neu zugeführte Materialcharge erst

kurz nach der vorangegangenen Teileentnahme in die Maschine gelangte und zum anderen zwischen Teileentnahme und Messung eine gewisse Zeit vergeht. Nachdem die unzulässige Maßabweichung detektiert ist, wird zunächst versucht, durch Adaption der Maschineneinstellungen eine Guteilproduktion zu realisieren, allerdings ohne Erfolg. Zur Eingrenzung der Störungsursache – welche zu diesem Zeitpunkt noch unbekannt ist – wird das betroffene Werkzeug auf einer anderen Spritzgießmaschine gerüstet. Auch in diesem Fall kommt es zu einer Schlechtteilproduktion. Eine materialbedingte Ursache bestätigt sich später in Laborversuchen, bei denen sich entsprechende Unterschiede in Viskosität und pVT-Verhalten zeigen.

Ausgehend von dem dargestellten Ablauf soll im Folgenden eine Prozessüberwachung anhand einer aggregierte Kennzahl und eine darauf folgende Ursacheneingrenzung vorgestellt werden. Da die betroffene Spritzgießmaschine während des beschriebenen Zwischenfalls mit einem DataXplorer ausgerüstet ist, liegen zeitlich hochauflöste Prozessdaten über die Produktion vor. Diese werden genutzt um Kennzahlen zu bilden, welche durch eine prototypische Softwareanwendung kontinuierlich überwacht werden. In Anlehnung an das vorgestellte Ablaufschema sieht die Vorgehensweise wie folgt aus:

Als erste Stufe der datenbasierten Prozessüberwachung zeigen sich Auffälligkeiten in den übergeordneten Kennzahlen, welche aus der Summe aller Prozesskennzahlen gebildet werden, um den Gesamtprozess zu charakterisieren. Hierzu zählt der Kennzahl-Referenz-Index (KRI), welcher die Übereinstimmung des Prozesses in einem definierten Zyklus x mit einem zuvor festgelegten und als gut erachteten Referenzprozess beschreibt:

$$KRI(x) = 1 - \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^N \alpha_i} \cdot \sum_{i=1}^N \left[\alpha_i \cdot \min \left(\left(\frac{K_i(x) - K_{i,ref}}{K_{i,ref}} \right)^2, 1 \right) \right]}$$

Dies wird über den euklidischen Abstand in einem N-dimensionalen Raum erreicht, wobei N durch die Anzahl der einfließenden Prozesskennzahlen gegeben ist. Um Verzerrungen durch ungewöhnlich große Abweichungen in Einzelkennzahlen zu vermeiden, wird die wirksame Abweichung zusätzlich auf 100 % des Referenzwertes begrenzt. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die einzelnen Kennzahlen hinsichtlich ihrer Relevanz mit einem Gewichtungsfaktor α_i zu gewichten. Die Übereinstimmung zum Referenzprozess wird in diesem Fall auf einen Wertebereich zwischen 0 und 1 abgebildet, wobei 1 eine völlige Übereinstimmung repräsentiert. Bild 1 zeigt den Verlauf des Kennzahl-Referenz-Indexes über einen Zeitraum von 10.000 Zyklen, innerhalb dessen es zu den bereits beschriebenen, materialbedingten Qualitätsproblemen kommt. Ausgehend von einem als stabil zu bezeichnenden Niveau von ca. 0,7 kommt es ab

Zyklus 280.000 zu Auffälligkeiten, welche schließlich zu einem dauerhaften Absinken des KRI auf einen Wert von ca. 0,65 führen.

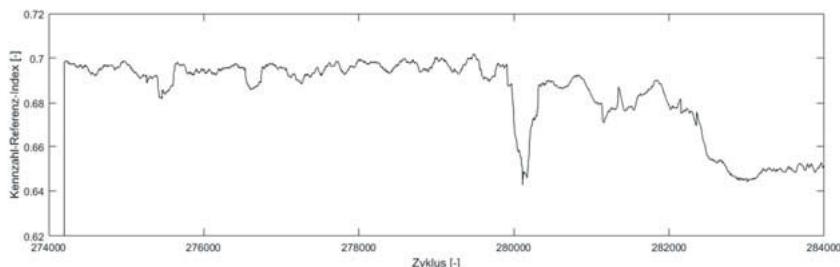


Bild 1: Kennzahl-Referenz-Index über 10.000 Zyklen

Die Erkennung der beschriebenen Auffälligkeiten kann als Ausgangspunkt für eine schrittweise Detaillierung der Ursachenfindung gesehen werden. Eine genauere Überprüfung der Prozessdaten legt die Prozesskennzahlen offen, die für Auffälligkeiten im Gesamtprozess verantwortlich sind. Dies sind:

- Einspritzarbeit [J]
- Massedruck am Umschaltpunkt [bar]
- Maximaler Massedruck beim Einspritzen [bar]
- Minimaler und maximaler Massedruck beim Nachdrücken¹ [bar]
- Mittlerer Massedruck beim Plastifizieren [bar]
- Nachdruckarbeit [J]
- Plastifizierarbeit [J]
- Restmassepolster [mm]
- Schneckenposition bei maximalem Massedruck [mm]
- Minimale Schneckenvorlaufgeschwindigkeit beim Nachdrücken [mm/s]
- Nachdruckhub [mm]
- Mittlere Einschaltauer Zylinderzone 1 [%]
- Standardabweichung Einschaltauer Zylinderzone1 [%]
- Mittlere Temperatur Zylinderzone 2 [°C]
- Mittlerer und maximaler Hydraulikdruck beim Einspritzen [bar]

¹ Auch bei druckgeregelten Nachdruckphasen kommt es aufgrund von Einflüssen aus der Antriebstechnik der Maschine zu Abweichungen vom eingestellten Sollwert.

- Maximaler Hydraulikdruck beim Nachdrücken [bar]
- Mittlerer Hydraulikdruck beim Plastifizieren [bar]

Bild 2 zeigt stellvertretend die Veränderungen im mittleren Hydraulikdruck während der Plastifizierphase. Diese besitzt einen starken Zusammenhang zum Plastifizierdrehmoment, welches wiederum mit der Materialviskosität korreliert.

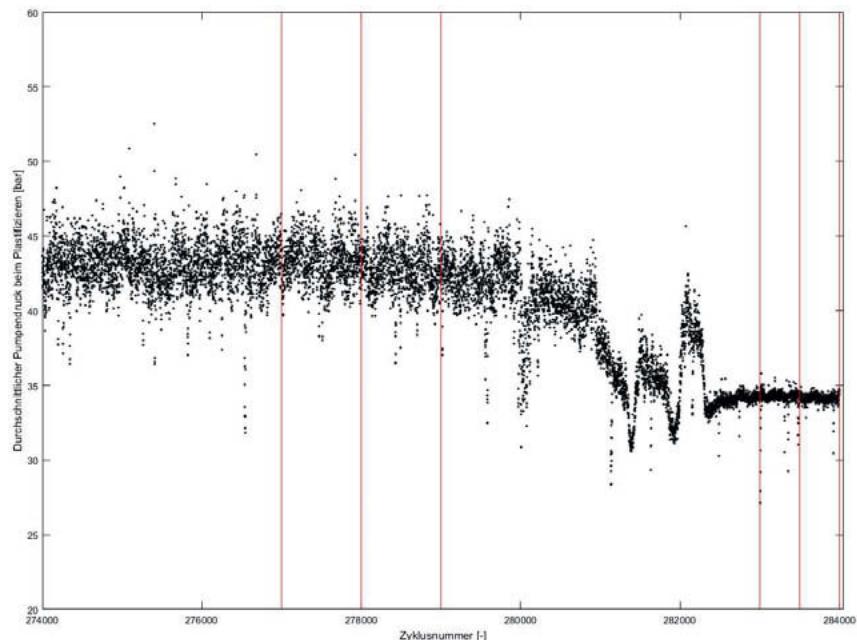


Bild 2: Mittlerer Hydraulikdruck in der Plastifizierphase über 10.000 Zyklen

In Bild 2 sind zudem die Zyklen 277.000, 278.000 und 279.000 sowie 283.000, 283.500 und 284.000 rot markiert. Diese können mit Hilfe des *ibaAnalyzer* im Detail analysiert werden. Beim *ibaAnalyzer* handelt es sich um ein leistungsfähiges Werkzeug der iba AG (Fürth), welches auf die mathematische und statistische Analyse von Prozessdaten spezialisiert ist [9]. Anhand der Gegenüberstellung der genannten Zyklen werden die Unterschiede im Hydraulikdruckverlauf vor und nach dem Chargenwechsel deutlich (Bild 3). Aus den Verläufen lässt sich entnehmen, dass die neu zugeführte Materialcharge eine geringere Schmelze-Viskosität aufweist, als die zuvor verarbeitete.

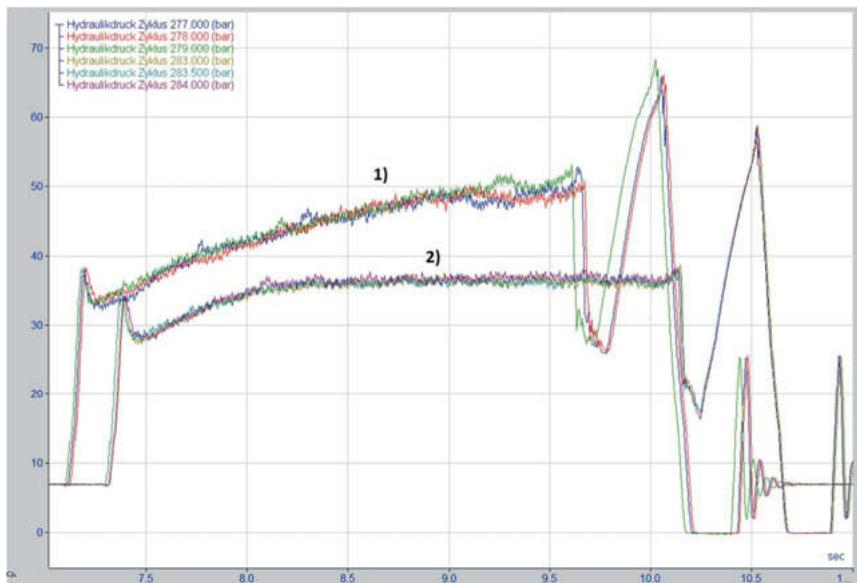


Bild 3: Hydraulikdruckverläufe in der Plastifizierphase vor dem Chargenwechsel (1) und danach (2)

Durch die Kombination der Prozesskennzahlen, welche im zeitlichen Zusammenhang ein anomales Verhalten aufweisen, kann die Störungsursache im untersuchten Fall auf das Material eingegrenzt werden. Diese Erkenntnis liegt unter Verwendung des beschriebenen datenbasierten Vorgehens bereits mit deutlich geringerem Zeitverzug vor, als es bei einer klassischen, zuvor dargestellten Ursachenfindung der Fall ist. Auf diese Weise profitieren Unternehmen daher von einer deutlichen Zeit- und Kostenersparnis bei der Reaktion auf Störungen und die Detektion der zugrundeliegenden Ursachen.

Fazit

Heutige Spritzgießmaschinen sind mit der entsprechenden Regelungstechnik in der Lage hohe Anforderungen an die Formteilequalität zu erfüllen und Störeinflüsse bis zu einem bestimmten Grad zu kompensieren. Dennoch können sich externe Störeinflüsse von der Spritzgießmaschine unbemerkt negativ auf die Bauteilequalität auswirken. Wird dies erst zeitlich verzögert erkannt, ist dies mit hohen Kosten für das kunststoffverarbeitende Unternehmen ver-

bunden. Im vorliegenden Beitrag wurde anhand eines Beispiels aus der realen Spritzgießproduktion gezeigt, wie eine datenbasierte Prozessüberwachung zu einer Ursachenfindung bei Störungen beitragen kann. Es wurde verdeutlicht, dass automatisierte Datenanalysemethoden eine schnellere Erkennung von Auffälligkeiten im Prozess ermöglichen und die darauf aufbauende Ursachenfindung unterstützen können. Auf diese Weise trägt die vorgestellte Methodik signifikant dazu bei, Zeit und Geld bei der Erkennung und Behebung von Prozessstörungen beim Spritzgießen einzusparen.

- [1] Holzinger, G., Schiffers, R., Moser, S., Kruppa, S.: An Adaptive Filling to Packing Switchover Method for Injection Molding. Society of Plastic Engineers (SPE) ANTEC, Las Vegas (USA), 2014.
- [2] Schiffers, R., Kruppa, S., Moser, S.: Für jeden Schuss der richtige Umschaltpunkt. Kunststoffe 11/2014, Carl Hanser Verlag, 2014.
- [3] Caliendo, H.: Injection Molding: Engel launches new version of iQ weight control software. URL: <https://www.ptonline.com/products/injection-molding-engel-launches-new-version-of-iq-weight-control-software>, abgerufen am 27.11.2017.
- [4] Wortberg, J., Schulze Struchtrup, A., Zhao, C.: Digitalisierung der Spritzgießproduktion - Intelligente Maschinen für effiziente Prozesse nutzen. VDI-Jahrestagung Spritzgießen, Baden-Baden, 2017.
- [5] Schiffers, R.: Process Control in Plastic Injection Molding – How Intelligent Machinery is Optimizing Production. 17th Annual International Polymer Colloquium, Madison (USA), 2017.
- [6] Heinzler, F., Kruppa, S., Schiffers, R. Wortberg, J.: Nutzbare Prozessdaten aus der Spritzgießmaschine. Kunststoffe 2/2014, Carl Hanser Verlag, 2014.
- [7] Lenz, M.: 500 Werte für mehr Prozesssicherheit. URL: <http://kmagazin.eu/index.php/2016/10/25/500-werte-fuer-mehr-prozesssicherheit/>, abgerufen am 12.10.2017.

- [8] Kruppa, S., Schifflers, R., Busl, M., Lettau, U.: Advanced Data Acquisition and Analysis for Injection Molders. Society of Plastic Engineers (SPE) ANTEC, Anaheim (USA), 2017.
- [9] N., N.: ibaAnalyzer. Die leistungsfähige Analysesoftware. URL:
<http://www.iba-ag.com/produkte/software/ibaanalyzer/>, abgerufen am 02.11.2017.

Von der Simulation in die Maschine – Objektivierte Prozesseinrichtung durch maschinelles Lernen

Prof. Dr.-Ing. Ch. Hopmann, Dr.-Ing. M. Theunissen,
J. Heinisch, M.Sc., Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV)
an der RWTH Aachen, Aachen

Kurzfassung

Die Prozesseinrichtung im Spritzgießen ist eine wiederkehrende Aufgabe, die einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität und Produktivität von Spritzgießprozessen hat. Heutzutage basiert die Prozesseinrichtung nach wie vor maßgeblich auf der Erfahrung des Maschinenbedieners und ist daher nicht objektiv und folglich stark abhängig von dem jeweiligen Bediener. Zudem wird der Einrichtungsprozess oft abgebrochen, sobald die geforderte Qualität erreicht wird, obwohl durch eine weitere gezielte Optimierung die Prozessrobustheit und die Produktivität weiter gesteigert werden könnte. Maschinen Lernen (ML) bietet die Möglichkeit, die Zusammenhänge zwischen Einstellparametern und Qualitätsgrößen zu modellieren und mit geeigneten Algorithmen zu optimieren. Dafür ist allerdings ein erheblicher praktischer Versuchsaufwand für die Datengrundlage notwendig. Dieser Versuchsaufwand kann mithilfe von numerischen Simulationen am Rechner durchgeführt werden. Die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen in der Simulation führen jedoch unweigerlich zu einem Simulationsfehler, sodass an der Maschine immer noch ein neuer Optimierungsprozess begonnen werden müsste. In einem neuen, kombinierten Lernansatz werden daher Modelle untersucht, die zunächst auf Simulationen basieren und anschließend mit möglichst wenig praktischen Spritzgießversuchen korrigiert werden (vgl. Bild 1).

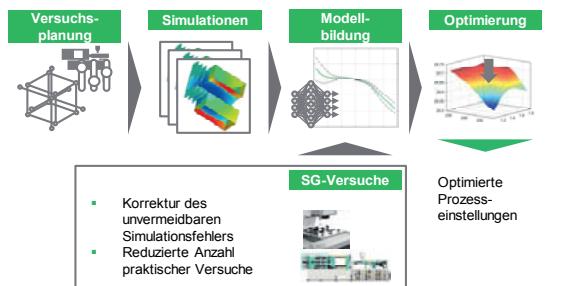


Bild 1: Prinzip des kombinierten Lernansatzes auf Basis von Experimenten und Simulationen

In diesem Beitrag werden zunächst geeignete künstliche Neuronale Netze (KNN) zur Modellierung der Zusammenhänge zwischen 6 Einstellparametern und 3 Qualitätsmerkmalen identifiziert und analysiert sowie die Lernalgorithmen für die Datengrundlage optimiert. Es zeigt sich, dass KNN mit 6 Neuronen in einer verdeckten Schicht gut geeignet sind. Um Probleme in Form einer Überanpassung bei relativ kleinen Datengrundlagen zu vermeiden, kann die Bayessche Regularisierung das Trainingsergebnis deutlich verbessern.

Hinsichtlich einer kombinierten Lernstrategie, die sowohl Simulationsergebnisse als auch experimentelle Daten benutzt, wird das Konzept eines Vortrainings mit Simulationsdaten untersucht. In diesem Konzept werden die Neuronengewichte aus einem Training mittels Simulationsdaten übernommen und als Ausgangsbasis für ein Training mit einer geringeren Anzahl an experimentell ermittelten Daten genutzt. Das Vortraining erlaubt, wenn wenig Daten genutzt werden, eine Verbesserung der Modellqualität und kann so den Einsatz von ML-Verfahren zur Prozesseinrichtung gangbarer machen.

Schließlich ermöglicht die Anwendung von Genetischen Algorithmen die gezielte Optimierung hinsichtlich qualitativer und wirtschaftlicher Aspekte. Somit ist die Machbarkeit von kombinierten ML-Modellen zur Prozesseinstellung nachgewiesen.

1. Stand der Technik

Bereits zu Beginn der 1990er Jahre wurden Versuche zur Vorhersage von Qualitätsmerkmalen von Kunststoffbauteilen durchgeführt. Zunächst wurden Kennzahlen für den Spritzgießprozess verwendet, die aus den Prozesskurvenverläufen im Spritzgießprozess gebildet werden [Gie92]. Der Einfluss dieser Kennzahlen auf die Qualitätsmerkmale wurde dann mittels verschiedener Regressionsmodelle ermittelt.

In der Folgezeit wurden zusätzlich zur multiplen Regression und Diskriminanzanalyse auch neuronale Netze zur Modellbildung eingesetzt [Vac96]. Es konnten gute Ergebnisse bezüglich der Vorhersagegenauigkeit neuronaler Netze erzielt werden. Als Eingangsdaten in die neuronalen Netze wurden entweder Messwerte oder Kennzahlen verwendet [Gie92].

In der Dissertation von Schnerr-Häselbarth wurden die multiple Regression und neuronale Netze als Modellbildungsverfahren miteinander verglichen [Sch00]. Es wurden mit beiden Verfahren gute Übereinstimmungen zwischen berechneten und gemessenen Werten erzielt. Außerdem wurde versucht, mittels neuronaler Netzwerke das Auftreten bestimmter Fehler in Spritzgießbauteilen vorherzusagen. Im Gegensatz zu kontinuierlichen Werten, wie dem Gewicht oder bestimmten Bauteilmaßen, sind die Werte bezüglich der Bauteilfehler entweder „vorhanden“ oder „nicht vorhanden“. Diese Merkmale werden als attributive Merkmale be-

zeichnet. Auch hier konnten, je nach Modellbildungsverfahren, gute Korrelationen zwischen Vorhersage- und Messdaten erzielt werden. Als Lernalgorithmus wurde das Gradientenabstiegsverfahren mit Momentum-Term eingesetzt. Variiert wurden das Layout der Netzwerke und die Lernparameter. Zur Vorhersage attributiver Merkmale wurden auch sogenannte Radial-Basis-Function-Netzwerke eingesetzt. Das Ergebnis von Schnerr-Häselbarth ist, dass diese Netzwerke zwar die Merkmale voraussagen können, der Aufwand bei der Anwendung, um das passende Layout zu bestimmen, sehr hoch ist. Deswegen seien Backpropagation-Netzwerke auch für diesen Anwendungsfall zu bevorzugen. Sie weisen aufgrund der einfacheren Handhabung künstlicher neuronaler Netze deutliche Vorteile gegenüber anderen statistischen Verfahren, wie der logistischen Regression, auf [Sch00].

Wenn KNN zur Prozessoptimierung eingesetzt werden, werden die Trainingsdaten generell meist basierend auf einem Faktorenversuchsplan oder z. B. mit Taguchi-Versuchsplänen [Tag86] praktisch ermittelt oder durch Simulationen bestimmt [FMK13, FPVG16]. Teilweise wird eine Varianzanalyse durchgeführt, um die Parameter zu bestimmen, die den Prozess am stärksten beeinflussen und Parameter zu eliminieren, die keinen oder nur einen geringen Einfluss auf den Prozess haben [FMK13, FPVG16]. Die KNN stellen dann einen Zusammenhang zwischen den variierten Prozessparametern und den zu optimierenden Eigenschaften her [FMK13, FPVG16, KD15]. Alternativ zum Einsatz von KNN werden auch Grey Relational Analysis oder die Hauptkomponentenanalyse eingesetzt.

Häufig wird der Einsatz von KNN mit genetischen Algorithmen kombiniert, um eine automatische Optimierung vorzunehmen. Es werden sowohl einzelne Eigenschaften optimiert, als auch Mehrzieloptimierungen durchgeführt. Teilweise wird bei der Mehrzieloptimierung die Paretofront bestimmt teilweise wird aber auch eine Gewichtungsfunktion eingesetzt, die mehrere Parameter kombiniert, gewichtet und einen einzelnen zu optimierenden Wert ausgibt [FPVG16, KD15].

In den Veröffentlichungen, in denen der Trainingsalgorithmus angegeben ist, wird meist ein Gradientenabstiegsverfahren eingesetzt [Sch00, WC97]. Nur in einigen aktuelleren Veröffentlichungen wird der Levenberg-Marquardt Backpropagation Algorithmus eingesetzt [SGW10, YMH+11]. Allerdings setzte Shiau bereits im Jahr 2000 das Bayes'sche Regularisierungsverfahren ein – jedoch abseits der Kunststoffverarbeitung [STL00].

In allen Veröffentlichungen zum Einsatz von KNN in der Kunststoffverarbeitung wurden entweder Simulations- oder Realdaten zum Training eingesetzt. Ein Vergleich der Trainingsergebnisse beim Einsatz von Real- und Simulationsdaten wurde nicht durchgeführt. Eine Kombination von Simulations- und Realdaten, wie in diesem Beitrag vorgestellt wird, wurde bisher nicht beschrieben.

2. Versuchsaufbau und Methodik

Als Beispiel für die Prozesseinstellung wurde ein Probekörper aus Polypropylen vom Typ PP 579S des Herstellers Sabic, Riad, Saudi-Arabien hergestellt (vgl. Bild 2 rechts). Die sechs in Bild 2 angegebenen Parameter wurden sowohl in Simulationen mit der Software Cadmould 3D-F der Firma Simcon Kunststofftechnische Software GmbH, Würselen, als auch in praktischen Spritzgießversuchen in einem zentral zusammengesetzten Versuchsplan mit insgesamt 77 Versuchspunkten variiert. Die Spritzgießversuche wurden auf einer Spritzgießmaschine vom Typ KM 160-1000 CX der Firma KraussMaffei Technologies GmbH, München durchgeführt. Pro Versuchspunkt wurden im eingeschwungenen Zustand jeweils zehn Formteile hergestellt. Als Qualitätsdaten wurde das Bauteilgewicht sowie die beiden in Bild 2 eingezeichneten Maße verwendet. Die Gewichte wurden mittels einer auf 0,01 g gezeichneten Wage bestimmt. Die Maße wurde mithilfe eines optisch taktilen Messgeräts der Carl Zeiss AG, Oberkochen, des Typs O-INSPECT 442 ermittelt.

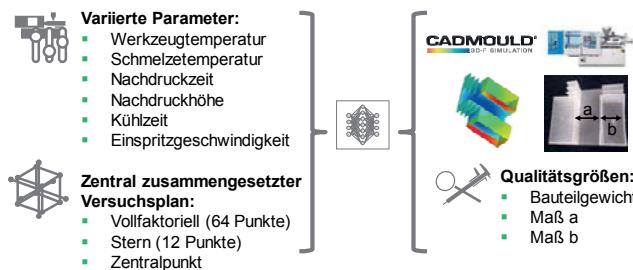


Bild 2: Eingangs- und Ausgangsgrößen für die Modellierung

Die KNN wurden mithilfe der Software Matlab R2017a und der Neural Network Toolbox des Herstellers The Mathworks, Inc., Natick, USA, implementiert. Als Trainingsalgorithmus wurde der Levenberg-Marquardt-Algorithmus eingesetzt. In ersten Untersuchungen hatte sich dieser im Vergleich zu anderen untersuchten Algorithmen durch ein gutes Konvergenzverhalten ausgezeichnet. Als Aktivierungsfunktionen wurden Sigmoidfunktionen verwendet. Es wurden jeweils 100 KNN trainiert und daraus Mittelwerte angegeben, um Fehler, die sich aus den zufällig initiierten Startgewichte der Neuronen und Biases ergeben, auszuschließen. Die Modellqualität wird jeweils mithilfe der mittleren Quadratischen Abweichung (MSE) anhand von 20 % der Daten, die nicht zum Training verwendet wurden (Testdaten), bewertet.

3. Analyse und Optimierung der Modellierbarkeit mithilfe Neuronaler Netze

Zunächst müssen geeignete Modelle für die Modellierung der Zusammenhänge zwischen den Einstellparametern und den Qualitätsgrößen gefunden werden. In Vorversuchen wurden Feedforward-KNN ausgewählt, die mithilfe des Levenberg-Marquardt-Algorithmus trainiert werden. Um die Zusammenhänge sinnvoll modellieren zu können, muss jedoch die Modellgüte analysiert und optimiert werden. Dazu wird im Folgenden das Training sowie die Netztopologie an die vorhandene Problemstellung angepasst.

Bild 3 zeigt den Trainings- und den Testfehler während des Trainings eines KNN mit 6 Neuronen in der verdeckten Schicht. Der Testfehler wird im Gegensatz zum Trainingsfehler anhand von Datenpunkten berechnet, die nicht zum Training verwendet werden. Es fällt auf, dass der Trainingsfehler nach ca. 40 Trainingszyklen auf einem konstanten Niveau ist und sich danach nur noch minimal verringert. Der Testfehler besitzt sein Minimum bei ca. 30 Zyklen und erhöht sich anschließend mit fortschreitendem Training. Dies ist ein typisches Zeichen von einer Überanpassung des Modells an die Trainingsdaten. Das Modell interpretiert zufällige Streuungen in den Trainingsdaten über und erreicht so einen geringeren Trainingsfehler. Da die Streuungen aber keine allgemein gültigen Zusammenhänge im Datensatz darstellen, wird das Vorhersageergebnis für unbekannte Daten verschlechtert.

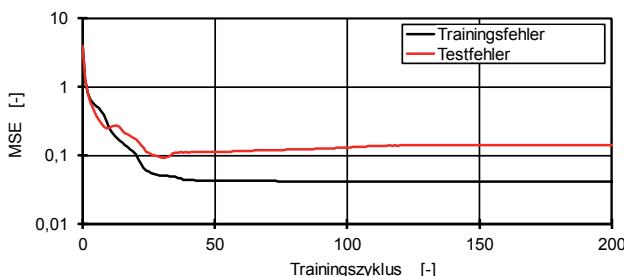


Bild 3: Trainingsverlauf eines Neuronalen Netzes anhand der Trainings- und Testdaten

Um eine Überanpassung zu vermeiden, ist es zunächst wichtig die richtige Netzwerkgröße für das vorliegende Problem zu bestimmen. In Vorversuchen hat sich herausgestellt, dass Netzwerke mit mehr als einer verdeckten Schicht nicht notwendig und deshalb für das vorliegende Problem auch nicht sinnvoll sind. In Bild 4 ist der Vorhersagefehler anhand von Trainings- und Testdaten in Abhängigkeit der Neuronenzahl angegeben. Es wurden 500 Trai-

ningszyklen mit den experimentellen Daten des vollständigen, zentral zusammengesetzten Versuchsplans durchgeführt. Die Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung der Vorhersage der 100 parallel trainierten Netze an. Diese relativ hohen Abweichungen, die sich aus den zufällig initiierten Startgewichten der Neuronen ergeben, sind ein Anzeichen dafür, dass das Training relativ instabil abläuft. Es zeigt sich, dass der Trainingsfehler mit zunehmender Anzahl an Neuronen zunimmt. Da der Testfehler bei 5 Neuronen minimal ist, ist ein geringer Trainingsfehler bei vielen Neuronen ein Zeichen von Überanpassung. Mit weniger als 4 Neuronen können die komplexen Zusammenhänge nicht mehr sinnvoll abgebildet werden und der Test- und Trainingsfehler erhöhen sich ebenfalls.

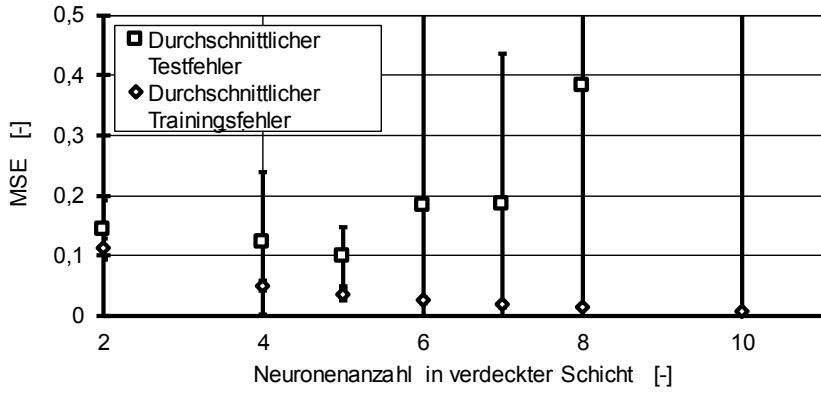


Bild 4: Durchschnittlicher Vorhersagefehler von 100 parallel trainierten Neuronalen Netzwerken mit einer verdeckten Schicht

Für ML Verfahren ist die Menge der genutzten Daten tendenziell eher klein. Daher scheint es sinnvoll, das Training weiter zu optimieren, um speziell eine Überanpassung zu vermeiden. Dazu ist eine Abbruchbedingung beim Training eine gebräuchliche Strategie [HDBD14]. Während des Trainings wird anhand von zusätzlichen Validierungsdaten, die nicht direkt zum Training verwendet werden, der Trainingsfortschritt überprüft und das Training abgebrochen, wenn nach einer bestimmten Anzahl an Trainingszyklen keine Verbesserung mehr erreicht wird. In Vorversuchen hat sich ein Abbruch nach 3 Trainingszyklen ohne Verbesserung als zweckmäßig erwiesen. Die Daten werden für das Training mit Abbruchbedingung in Trainings-, Validierungs- und Testdaten im Verhältnis 70:15:15 aufgeteilt. Bild 5 zeigt den Vorhersagefehler mit Abbruchkriterium. Es zeigt sich, dass die Standardabweichungen geringer

geworden sind und das Training somit wie angestrebter stabiler geworden ist. Zudem liegt der minimale Testfehler jetzt bei einer Neuronenzahl von 6.

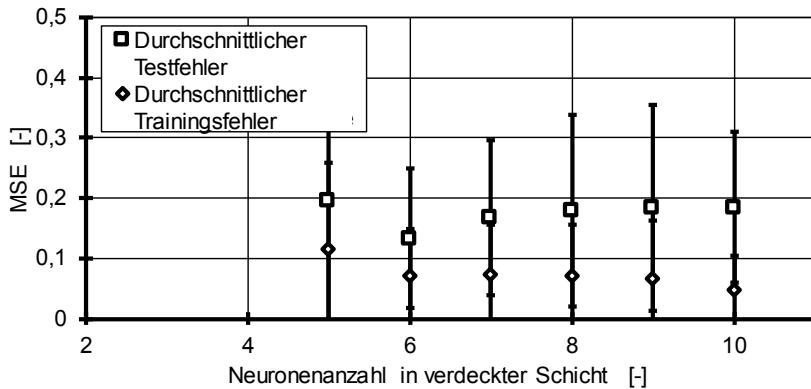


Bild 5: Durchschnittlicher Vorhersagefehler von 100 parallel trainierten neuronalen Netzwerken mit einer verdeckten Schicht mit Abbruchkriterium

Eine weitere Strategie zur Vermeidung einer Überanpassung ist die sogenannte Bayessche Regularisierung. Dabei wird nicht nur der MSE beim Training optimiert, sondern die Funktion F, die auch die Neuronengewichte (MSW) enthält, minimiert [Mac92]:

$$F = \alpha * MSW + \beta * MSE \quad (Gl. 1)$$

Die Parameter α und β werden in Abhängigkeit der tatsächlich geänderten Neuronengewichte und der Anzahl der Trainingsdaten und Neuronen sowie den aktuellen Gewichten und Trainingsabweichungen dynamisch angepasst. Bild 6 zeigt den Vorhersagefehler mit angewandter Bayesscher Regularisierung. Es fällt auf, dass sowohl die Trainingsfehler als auch die Testfehler durch die Regularisierung deutlich reduziert werden können. Der minimale Testfehler liegt jetzt bei KNN mit 6 Neuronen. Zusätzlich ist die Standardabweichung zwischen den 100 trainierten KNN deutlich geringer geworden. Dies zeugt davon, dass das Training mit Regularisierung deutlich stabiler geworden ist.

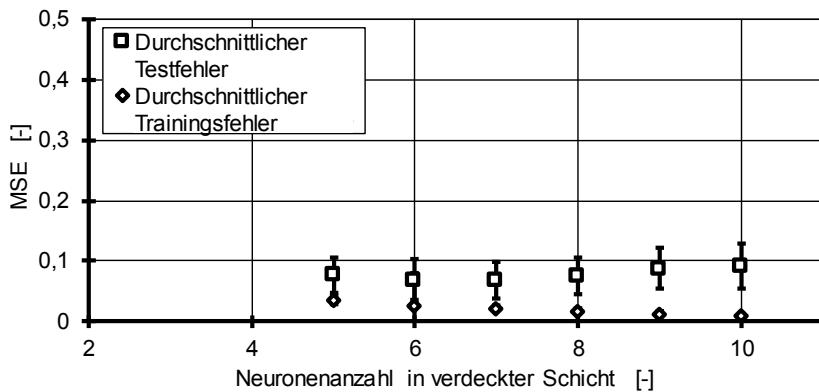


Bild 6: Vorhersagefehler von 100 neuronalen Netzwerken mit einer verdeckten Schicht mit Regularisierung

Im Folgenden wird daher die Bayessche Regularisierung für das KNN-Training eingesetzt und Netze mit 6 Neuronen verwendet. Bild 7 fasst die Ergebnisse in Form der gemittelten absoluten Abweichung an 15 Testpunkten getrennt für Simulationen und reale Experimente zusammen. Die KNN basierend auf Simulationen weisen deutlich geringere Abweichungen als die KNN-Modell basierend auf realen Experimenten auf. Dies ist mit den Streuungen aufgrund von zufälligen Störeinflüssen in den Experimenten begründet. Da die Differenz der Extremwerte innerhalb des Versuchsplans bei den Gewichten ca. 5 g und bei den Maßen ca. 4 mm betragen, sind die prozentualen Genauigkeiten der Modelle immer noch für die meisten Anwendungsfälle ausreichend und die Modellierbarkeit der Zusammenhänge zwischen den gewählten Einstell- und Qualitätsgrößen ist gegeben.

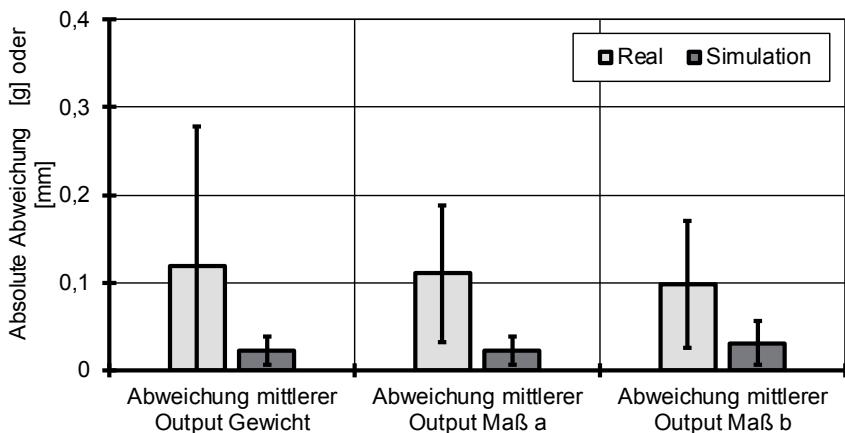


Bild 7: Mittlere absolute Abweichung der Vorhersage von 100 Neuronalen Netzwerken an den Testdaten aus Simulationen und Realdaten

4. Kombinierter Lernansatz

Nachdem zur Identifikation geeigneter Modelle und Trainingsalgorithmen zunächst separat basierend auf Simulationsdaten und experimentellen Daten trainiert wurde, werden in diesem Abschnitt beide Datentypen zum Training herangezogen. Der dazu verwendete Ansatz wird als Vortraining bezeichnet. D. h. die Netze werden zunächst mithilfe von Simulationsdaten trainiert. Die dabei gefundenen Neuronengewichte werden anschließend weiter für das Training mittels experimentell erhobenen Daten verwendet. Da KNN die Eigenschaft haben mit der Zeit zu „vergessen“ und die zuletzt im Training verwendeten Datensätze den stärksten Einfluss auf die Modellierung haben, werden so die experimentellen Daten stärker in den Modellen repräsentiert [HDBD14]. Bild 8 zeigt den Vorhersagefehler von KNN mit Vortraining im Vergleich zum Vorhersagefehler von KNN, die lediglich mit experimentellen Daten trainiert wurden. Wird der vollständige zentral zusammengesetzte Versuchsplan verwendet, gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Modellqualitäten. Wenn jedoch die Datengrundlage an experimentellen Versuchen reduziert wird, kann durch den Einsatz eines Vortrainings der Vorhersagefehler reduziert werden. Die Modellqualität wird jedoch auch insgesamt schlechter. Die 45, 29 und 21 Versuchspunkte beziehen sich auf reduzierte teilstatischen Versuchspläne (2^{6-1} , 2^{6-2} , 2^{6-3}), die anstatt des vollfaktoriellen Versuchsplans in den zentral zusammengesetzten Versuchsplan verwendet wurden. Der Ansatz eines Vortrainings kann

also einen Beitrag leisten, die notwendigen Experimente für gute Modelle zur Prozesseinstellung zu reduzieren. Es sollen jedoch noch weitere Methoden, wie die Nutzung eines auf Simulationsdaten basierenden Modells in Kombination mit dem Lernen des Simulationsfehlers analysiert werden. Dazu können die hier vorgestellten Modelle auf Basis von Simulationsdaten verwendet werden und deren Vorhersage mittels eines weiteren Modells, dass den Simulationsfehler korrigiert kombiniert werden.

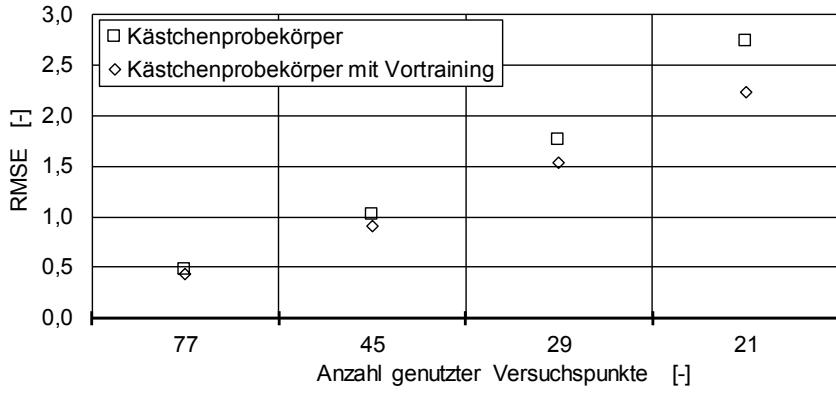


Bild 8: Vorhersagefehler mit und ohne Vortraining in Abhängigkeit der genutzten Datengrundlage

5. Optimierung der Prozesseinstellungen

Nachdem geeignete Modelle gefunden sind, ist der letzte Schritt für das Auffinden geeigneter Prozesseinstellungen die Optimierung der Einstellparameter hinsichtlich der Zielgrößen des Prozesses. Als Modelle werden im Folgenden KNN mit 6 Neuronen und Regularisierung verwendet. Der Sollwert für das Gewicht m_{soll} wurde dazu als Beispiel auf 54 g festgelegt, für das Maß a_{soll} auf 30,5 mm und für das Maß b_{soll} auf 37 mm. Als Optimierungsalgorithmus wurden genetische Algorithmen (GA) gewählt. Mithilfe der GA soll die Fitnessfunktion F minimiert werden (Gl. 2):

$$F = \sqrt{\left(\frac{a_{\text{ist}} - a_{\text{soll}}}{a_{\text{soll}}}\right)^2 + \left(\frac{b_{\text{ist}} - b_{\text{soll}}}{b_{\text{soll}}}\right)^2 + \left(\frac{m_{\text{ist}} - m_{\text{soll}}}{m_{\text{soll}}}\right)^2} \quad (\text{Gl. 2})$$

Diese beruht jeweils auf den quadratischen Abweichungen zwischen den Soll- und Istwerten der Qualitätsgrößen resultierend aus einzelnen Prozesseinstellungen. Eine Gewichtung der

einzelnen Qualitätsmerkmale wurde zunächst nicht eingeführt. Optimierte Einstellwerte für das definierte Problem ergeben z. B. ein Gewicht von 54,070 g ein Maß a von 30,672 mm und Maß b von 36,992 mm. Sollen zusätzlich noch wirtschaftliche Aspekte bei der Optimierung mit einbezogen werden, kann entweder die Zykluszeit mit in die Fitnessfunktion integriert werden oder es kann eine Mehrzieloptimierung durchgeführt werden. Bild 9 zeigt die Paretofront einer Mehrzieloptimierung von Kühlzeit und der Fitnessfunktion F. Die einzelnen Punkte stellen jeweils einen optimalen Punkt, der sich aus einer bestimmten Kühlzeit oder einem bestimmten Fitness-Wert ergibt, dar. Dementsprechend kann der Bediener einen Kompromiss zwischen Produktivität und Qualität selber wählen.

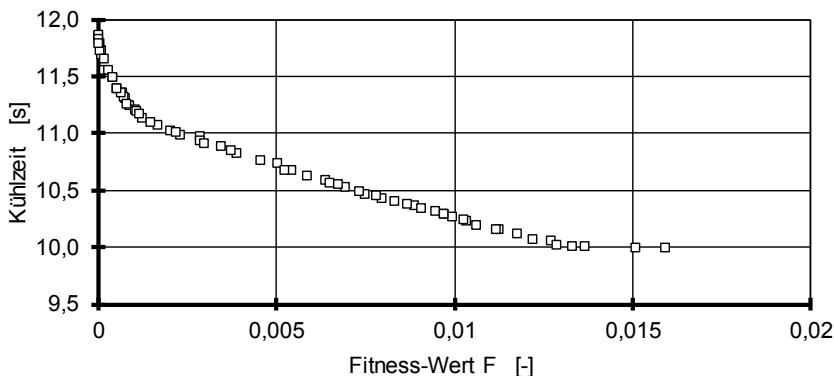


Bild 9: Mehrzieloptimierung von Kühlzeit und Qualität

5. Fazit

Der Einsatz von maschinellen Lernverfahren kann eine objektive Einrichtung des Spritzgießprozesses mit einer gezielten Optimierung ermöglichen. Neuronale Netze mit Levenberg-Marquardt Backpropagation Algorithmus und der Anwendung einer Bayesschen Regularisierung haben sich in diesem Zusammenhang als gut geeignet erwiesen, um die Zusammenhänge zwischen sechs Einstellparametern und drei Qualitätskriterien zu modellieren. Die Nutzung von Simulationsdaten kann über ein Vortraining dazu beitragen, die notwendige experimentelle Datengrundlage zu verringern und so das Verfahren anwendbar in der Praxis zu gestalten. In diesem Bereich sollen allerdings noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden und die Modellqualität mit wenigen experimentellen Daten weiter gesteigert werden. Die Optimierung mittels Genetischer Algorithmen erlaubt

schließlich das Auffinden optimierter Einstellwerte hinsichtlich Qualität und oder Wirtschaftlichkeit der Produktion.

Dank

Die vorgestellten Arbeiten wurden von der DFG im Rahmen des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ finanziell gefördert. Ihr gilt unser ausdrücklicher Dank.

Literatur

- [FMK13] FEI, N.C.; MEHAT, N.M.; KAMARUDDIN, S.: Practical Applications of Taguchi Method for Optimization of Processing Parameters for Plastic Injection Moulding: A Retrospective Review. *ISRN Industrial Engineering* (2013) DOI: 10.1155/2013/462174, S. 1-11
- [FPVG16] FERNANDES, C.; PONTES, A.J.; VIANA, J.C.; GASPAR-CUNHA, A.: Modeling and Optimization of the Injection-Molding Process: A Review. *Advances in Polymer Technology* (2016) DOI: 10.1002/adv.21683, S. 1-21
- [Gie92] GIERTH, M.M.: Methoden und Hilfsmittel zur prozeßnahen Qualitätssicherung beim Spritzgießen von Thermoplasten. RWTH Aachen, Dissertation, 1992, ISBN: 3-86073-073-8
- [HDBD14] HAGAN, M.T.; DEMUTH, H.B.; BEALE, M.H.; DE JESÚS, O.: *Neural network design*. Stillwater, USA: Martin Hagan, 2014, ISBN: 9780971732117
- [KD15] KASHYAP, S.; DATTA, D.: Process parameter optimization of plastic injection molding: A review. *International Journal of Plastics Technology* 19 (2015) 1, S. 1-18
- [Mac92] MACKAY, D.J.C.: Bayesian Interpolation. *Neural Computing* 4 (1992) 3, S. 415-447
- [Sch00] SCHNERR-HÄSELBARTH, O.: *Automatisierung der Online-Qualitätsüberwachung beim Kunststoffspritzgießen*. RWTH Aachen, Dissertation, 2000, ISBN: 3-89653-442-4
- [SGW10] SHI, H.; GAO, Y.; WANG, X.: Optimization of injection molding process parameters using integrated artificial neural network model and expected improvement function method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 48 (2010) 9, S. 955-962

- [STL00] SHIAU, Y.-R.; TSAI, I.-S.; LIN, C.-S.: Classifying Web Defects with a Back-Propagation Neural Network by Color Image Processing. *Textile Research Journal* 70 (2000) 7, S. 633-640
- [Tag86] GENICHI, T.: Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes. Tokyo, Japan: Asian Productivity Organization, 1986
- [Vac96] VACULIK, R.: Regelung der Formteilqualität beim Spritzgießen auf der Basis statistischer Prozeßmodelle. RWTH Aachen, Dissertation, 1996, ISBN: 3-86073-483-0
- [WC97] WOLL, S.L.B.; COOPER, D.J.: Pattern-based closed-loop quality control for the injection molding process. *Polymer Engineering & Science* 37 (1997) 5, S. 801-812
- [YMH+11] YIN, F.; MAO, H.; HUA, L.; GUO, W.; SHU, M.: Back Propagation neural network modeling for warpage prediction and optimization of plastic products during injection molding. *Materials & Design* 32 (2011) 4, S. 1844-1850

Technologische Vereinigung des Spritzgießens mit der Oberflächenfunktionalisierung – Mit der In-Mold Technologie zu werkzeugfallenden 3D-MID-Bauteilen

Prof. Dr.-Ing. **M. Gehde**, Professur Kunststoffe, TU Chemnitz

Kurzfassung

Für die Funktionalisierung spritzgegossener Kunststoffbauteile mit elektrisch leitfähigen Leiterbahnen (3D-MID) gehören Prozesse wie die Laserdirektstrukturierung zum Stand der Technik. Aufgrund ihrer Mehrstufigkeit und werkstofflichen Restriktionen sind die 3D-MID-Prozesse jedoch aufwendig und preisintensiv. Eine Alternative stellt das an der Technischen Universität Chemnitz (Professur Kunststoffe) entwickelte Verfahren der sogenannten In-Mold Funktionalisierung dar. Bei dieser sind der Spritzguss und die Oberflächenfunktionalisierung mit elektrischen Leiterbahnen in einem Prozess vereinigt. Somit ergibt sich die Möglichkeit, werkzeugfallend 3D-MID-Bauteile in nur einem Prozessschritt zu realisieren.

1. Einleitung und Motivation

Nicht nur die ökonomischen Anforderungen an die Kunststoffverarbeitung sind stetig steigend, auch die ökologischen Randbedingungen der Herstellung gewinnen immer weiter an Bedeutung. Ein Mittel der Wahl um diesen Trend zu berücksichtigen ist die Funktionsintegration der Bauteile. Funktionsintegration im Rahmen der heutigen Kunststoffverarbeitung beinhaltet sowohl den gleichen Umfang an Funktionen innerhalb einer Baugruppe mit weniger Einzelteilen und entsprechend geringerem Materialeinsatz zu gewährleisten, als auch zukünftig neue Funktionen zu implementieren. Dies hat nicht nur verringerte Materialkosten und eine Prozessverschlankung zur Folge, sondern bewirkt auch eine Vereinfachung der Montage durch weniger Einzelteile, das aus resultierend einfachere logistische Abläufe und einen effizienteren Gesamtfertigungsprozess [1]. Die Funktionsintegration kann somit nicht nur die ökologische, sondern auch die ökonomische Bilanz der Kunststoffverarbeitung verbessern.

Möglichkeiten der Funktionsintegration stellen unter anderem neue Werkstoff- bzw. Fertigungskonzepte im Rahmen der Hybrid- bzw. Werkstoffverbundbauweise dar, bei denen insbesondere thermo-mechanische Aspekte berücksichtigt werden. Doch auch die Integration von elektrischen Schaltungsträgern in die Kunststoffbauteile gewinnt zunehmend an Bedeutung. Nach herkömmlichen Fertigungsprinzipien erfolgen die Herstellung des Kunststoffbau-

teils und die des elektronischen Bauteils getrennt voneinander. Durch geeignete Fügeverfahren, beispielsweise durch Nieten, werden beide Komponenten miteinander verbunden. Der geometrischen Bauteilkomplexität und daraus resultierend der Möglichkeit zur Miniaturisierung sind hierbei jedoch Grenzen gesetzt.

Durch neue Fertigungstechnologien wird es zunehmend möglich, räumlich spritzgegossene Schaltungsträger (Molded Interconnect Devices, MID) zu fertigen und somit elektronische, optische und mikromechanische Komponenten direkt in Spritzgussbauteile zu integrieren (Bild 1). Zur Herstellung derartiger MID-Bauteile stehen verschiedene Fertigungstechnologien zur Verfügung, welche in den letzten Jahren zur Serienreife weiterentwickelt wurden. Aufgrund der Möglichkeit zur Miniaturisierung, der großen geometrischen Freiheit und der besonderen Serientauglichkeit kommt vor allem die Laserdirektstrukturierung (LDS-Verfahren) zum Einsatz.



Bild 1: Beispiele für 3D-MID Bauteile im Bereich der Kunststoffverarbeitung [2].

Nicht nur das LDS-Verfahren, sondern alle derzeit industriell eingesetzten Verfahren für die 3D-MID-Herstellung sind mehrstufige Prozesse bei denen nach der eigentlichen Spritzgussfertigung aufwendige Beschichtungs-, Maskierungs-, Ätz-, und Reinigungsstufen (oder Strukturierungen mittels Laser) durchgeführt werden. Die endgültige Metallisierung der Leiterbahnen erfolgt über eine außenstromlose oder galvanische Abscheidung auf dem Substrat. Dieses muss hierfür laseraktivierbare Additive wie Palladium beinhalten, sodass eine elektrolytische Abscheidung möglich wird. Neben dem hohen Herstellungsaufwand stellt so-

mit die Bereitstellung der preisintensiven Palladiumverbindungen für die Oberflächenstrukturierung einen bedeutsamen Kostenfaktor dar.

2. Die In-Mold Technologie als neuartiger Lösungsansatz

Ein im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren neuartiger Ansatz zur Oberflächenfunktionalisierung von Spritzgussbauteilen stellt die an der TU Chemnitz entwickelten In-Mold Funktionalisierung dar. Hierbei werden das Spritzgussverfahren und die Oberflächenfunktionalisierung in einem gemeinsamen Prozess vereinigt. Die Grundidee besteht darin, funktionelle Substanzen wie beispielsweise Dekorationsfarben oder leitfähige Stoffe auf die Werkzeugwand zu applizieren (Bild 2, Schritt 1), sodass diese während der Einspritzphase auf das entstehende Bauteil übertragen werden (Schritt 2). Durch den vollständigen Übertrag der funktionellen Substanz von der Werkzeugwand auf das entstehende Bauteil ist eine werkzeugfallende Funktionalisierung der Bauteilloberfläche möglich (Schritt 3), weitere Prozessschritte sind nicht notwendig.

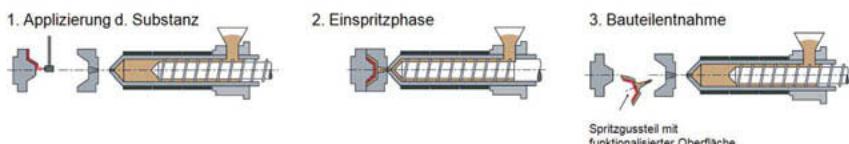


Bild 2: Schematischer Ablauf der Oberflächenfunktionalisierung mittels In-Mold Technologie [3].

Die Umsetzbarkeit der In-Mold Technologie am Beispiel von Dekorationsfarben konnte in zahlreichen Untersuchungen erfolgreich gezeigt werden [3-6]. Wie in Bild 3 dargestellt wird, ist es beispielsweise möglich Polycarbonat-Bauteile werkzeugfallend zu dekorieren, ohne dass nach dem Spritzgusszyklus Farbrückstände auf der Werkzeugwand verbleiben.

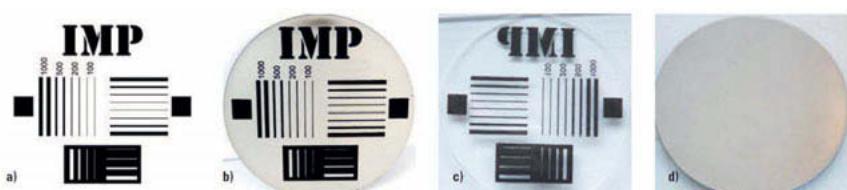


Bild 3: Farübertrag des Druckmotivs bei der In-Mold Dekoration: a) Druckbild, b) Tampondruck auf Werkzeug, c) In-Mold bedrucktes Polycarbonatteil, d) Werkzeugeinleger nach dem Hinterspritzen [4].

Bei dem gezeigten Beispiel aus Polycarbonat erfolgt die Applizierung der funktionellen Substanz mittels Tampondruckverfahren. Bei diesem indirekten Druckverfahren nimmt ein spezieller Drucktampon aus Silikonkautschuk das Farbmotiv von einer Druckform auf und gibt dieses auf dem Substrat wieder ab. Im Fall der In-Mold Funktionalisierung übernimmt die Werkzeugwand die Funktion des Substrates. Während der Bauteilherstellung fährt der Drucktampon zyklussynchron in das geöffnete Werkzeug ein und appliziert das Motiv entsprechend auf der Werkzeugwand. Für die Kombination mit dem Spritzgussverfahren wurde hierfür in Zusammenarbeit mit der Tamponcolor TC Druckmaschinen GmbH eine spezielle Tampondruckanlage entwickelt, welches als vertikales Nebenaggregat auf die Spritzgussmaschine aufgesetzt werden und mit dieser über die EUROMAP-Schnittstelle interagieren kann.

3. Herausforderungen der In-Mold Funktionalisierung

Während der Prozessführung der In-Mold Funktionalisierung kommt es zu mehreren Umlagerungen der funktionalen Substanz hinsichtlich ihrer Grenzfläche. Die optimalen Strukturschichten und das Haftungsverhalten zur jeweiligen Grenzoberfläche sind dabei in Abhängigkeit zum Prozesszeitpunkt teils gegenläufig. Dies stellt eine der Herausforderungen der Technologie dar, welche nur durch ein speziell angepasstes Prozessfenster gelöst werden kann.



Bild 4: Schematische Darstellung der Grenzflächenübergänge im Prozessverlauf [4].

In Bild 4 ist schematisch der Farübertrag von der Werkzeugwand auf das Bauteil während des Spritzgussprozesses dargestellt. Für eine vollständige Abbildung des Druckmotivs vom Drucktampon auf die Werkzeugoberfläche sind möglichst hohe Adhäsionskräfte zwischen der Farbsubstanz und Werkzeugoberfläche notwendig. Um eine hohe Lagestabilität während

des Überströmens mit Polymerschmelze zu gewährleisten und ein Verwischen des Druckmotives zu verhindern, sollte neben der Adhäsion zum Werkzeug auch die Kohäsion innerhalb der Farbsubstanz möglichst stark ausgeprägt sein. Ein Farbübertrag beim Entformen des Bauteils kann nur umgesetzt werden, wenn die Adhäsion der neu gebildeten Grenzfläche Kunststoff-Farbe größer ist, als die der Grenzfläche Farbe-Werkzeug. Entgegen der optimalen Randbedingung beim Bedrucken und während der Einspritzphase sollte die Adhäsion zum Werkzeug daher nun möglichst schwach ausgeprägt sein.

Möglich wird diese komplexe Überlagerung verschiedener Randbedingungen durch das Zusammenwirken physikalischer bzw. thermo-dynamischer Vorgänge (Benetzungsvorgänge, Trocknungsverhalten der Farbe, Strömungsmechanik der Schmelze, ...), welche durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden. Der Prozess zur erfolgreichen Stoffübertragung im Rahmen der In-Mold Funktionalisierung muss daher sowohl technologisch (Druckprozess, Spritzgussprozess) als auch werkstofflich (z.B. Viskosität und Trocknungsverhalten der Farbe) genau eingestellt werden und ist somit auch nur für bestimmte Substrat-Substanz-Kombinationen möglich.

4. Erfolgreiche Überführung zur 3D-MID-Fertigung

Der nächste Schritt der In-Mold Funktionalisierung stellt die Weiterentwicklung des gezeigten Prinzips unter Verwendung elektrisch leitfähiger Substanzen anstatt von Dekorationsfarben dar, um 3D-MID-Bauteile herstellen zu können. Hierzu wurden Untersuchungen mit einer Auswahl an Substrat-Substanz-Kombinationen durchgeführt und erste Demonstratorenbauteile hergestellt, wobei eines stellvertretend in Bild 5 dargestellt ist.

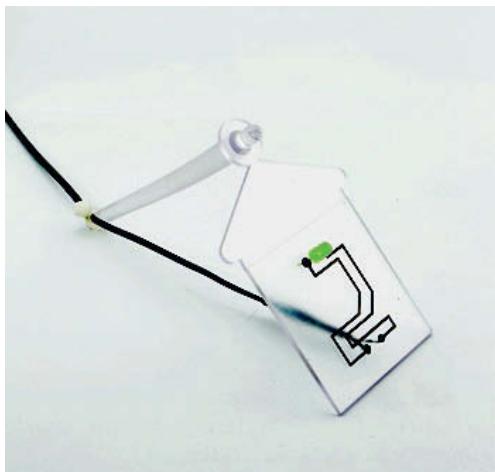


Bild 5: Beispielhaft mit elektrischer Leiterbahn functionalisiertes PC-Bauteil mitsamt kontaktierter LED.

Der gezeigte Demonstrator aus Polycarbonat wurde mittels In-Mold Funktionalisierung unter Verwendung einer Silberleitpaste hergestellt und mit einer Leuchtdiode kontaktiert. Substrate die in weiteren Untersuchungen eingesetzt wurden, sind PC/ABS, PA66, PET und PBT. Als elektrisch leitfähige Substanzen kamen unter anderem PEDOT-Tinten sowie silber- und kupferhaltige Systeme zum Einsatz. Die beiden letzteren haben sich für den Einsatz besonders bewährt. In Bild 6 ist beispielhaft ein Auszug einer Leiterbahn aus Silberleitpaste gezeigt, welche auf einen PA66-Probekörper appliziert werden konnte. Durch Mehrfachdrucke in das Werkzeug kann die Schichtdicke, im gezeigten Beispiel beträgt diese im Mittel 23 µm, gezielt beeinflusst werden. Wie der Querschnitt des Kontaktierungspfades zeigt, konnte eine gleichmäßige Integration der elektrisch leitfähigen Leiterbahn umgesetzt werden.

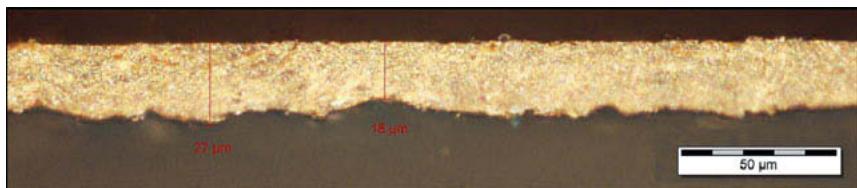


Bild 6: Mittels Tampondruck In-Mold functionalisierte Leiterbahn auf PA66 im Querschnitt (polarisiert).

Dass die In-Mold Technologie größtenteils unabhängig von der Art und Weise der Applizierungsmethode der funktionalen Substanz auf die Werkzeugwand ist, wird durch Bild 7 verdeutlicht. Bei diesem Versuch erfolgte die Applizierung der Substanz nicht mit dem Tampondruckverfahren, sondern mittels Aerosol-Jet®. Die Dimension der applizierten Leiterbahn ist hinsichtlich Breite und Höhe der Leiterbahn wesentlich feiner als mit dem Tampondruckverfahren, dennoch konnte auch hier eine hohe Lagestabilität beim Überströmen der Schmelze erreicht werden. Wie auch bei den mittels Tampondruck hergestellten Bauteilen konnte die angestrebte Funktionalisierung der Bauteiloberfläche durch ein entsprechend angepasstes Prozessfenster erfolgreich realisiert werden.

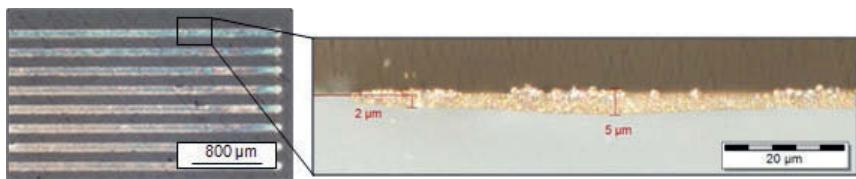


Bild 7: Mittels Aerosol-Jet® In-Mold funktionalisierte Leiterbahn auf PA66 im Querschnitt (polarisiert).

Neben der Funktionstüchtigkeit der aufgebrachten Leiterbahnen, welche unter anderem mittels der Leuchtdioden gezeigt werden kann, ist die Haftfestigkeit auf dem Substrat eine entscheidende Charakterisierungsgröße. Diese lässt sich mittels Gitterschnittpfung nach ISO 2409:13 mit kombiniertem Klebebandabzug als Schälzugbelastung bewerten. Hierbei werden durch eine spezielle Mehrfachschneidrolle 6-fach gekreuzte Schnitte bis in das Grundmaterial eingebracht, sodass die Beschichtung in Gittern freiliegt und nur auf dem Substrat haftet. Eine seitliche kohäsive Verankerung der zu prüfenden Beschichtung wird somit unterbunden. Anschließend wird auf das freiliegende Gitterquadrat flächig Klebeband aufgeklebt und abgezogen, sodass eine Schälzugbelastung erfolgt. Bei schlechter Haftung würde die leitfähige Substanz mit dem Klebeband abgezogen oder zumindest beschädigt. Nach der optischen Erfassung ist jedoch erkennbar, dass die Gitterschnittpfung weder Abplatzungen zur Folge hat, noch sonstige Substanzabtragungen vorliegen (Bild 8). Die Bewertung der Haftfestigkeit nach der Gitterschnittpfung ist somit „sehr gut“ (Kennwert: Gt 0).

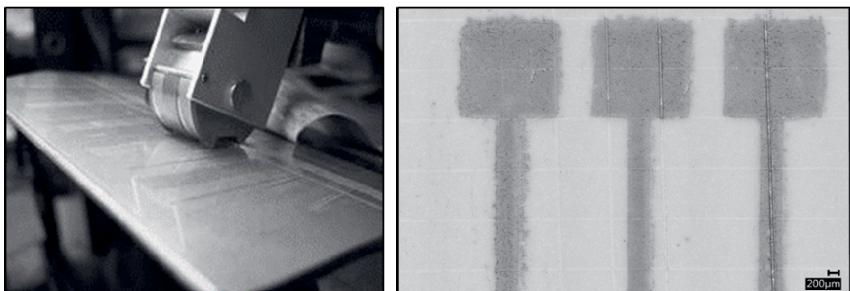


Bild 8: Gitterschnittprüfung an PA66, ohne dass die aufgebrachten elektrischen Leiterbahnen beschädigt werden.

Eine weitere Möglichkeit die Güte der Oberflächenfunktionalisierung zu bewerten, ist die Bestimmung der Kratzbeständigkeit nach DIN EN ISO 1518-2:2012. Hierbei wird ein Rockwelldiamant über die Beschichtung geschoben, wobei die vertikal aufgebrachte Normalkraft kontinuierlich entlang des Prüfweges ansteigt (1 N bis 50 N). Anschließend erfolgt die Einschätzung über gegebenenfalls stattfindende Rissbildung, kohäsives Schichtversagen oder auftretende Delaminationen.

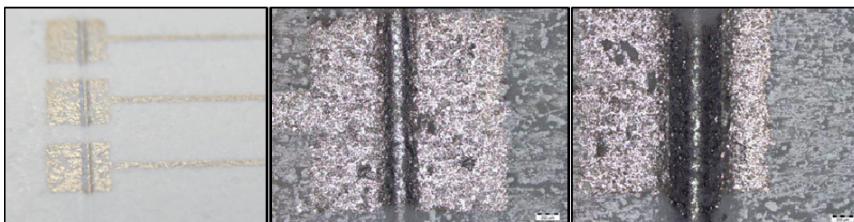


Bild 9: Mikroskopische Aufnahmen der funktionalisierten PA66-Oberfläche nach Bestimmung der Kratzbeständigkeit: Mitte $F_N = 10$ N, recht: $F_N = 37$ N.

Wie sich in Bild 9 am Beispiel von PA66 in Kombination mit funktionalisierten Leiterbahnen aus Silberleitpaste zeigt, weist die Auswertung der Ritzspuren auf eine gute Haftung der beiden Komponenten hin. Das Substrat wird zwar unter der Prüfbelastung plastisch verformt, es konnten jedoch keine negativen Auswirkungen auf die Haftung der Leitsubstanz auf dem Substrat festgestellt werden. Weder eine adhäsive Schädigung der Grenzfläche noch eine kohäsive Beeinflussung der Drucksubstanz ist zu erkennen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die an der TU Chemnitz entwickelte In-Mold Funktionalisierung ermöglicht es, Spritzgussbau-teile werkzeugfallend mit elektrisch leitfähigen Leiterbahnen herzustellen. Möglich wird dies durch die neuartige Vereinigung des Druckens leitfähiger Substanzen mit dem Spritzgussprozess, wobei die Werkzeugwand als Druckfläche dient und das Motiv bzw. die gedruckten Leiterbahnen während der Einspritzphase von derurgeformten Bauteiloberfläche übernommen wird. Durch die Substanzaufnahme während der eigentlichen Bauteilentstehung sind die Leiterbahnen direkt in den Kunststoff integriert, ohne dass nachgelagerte Prozessschritte notwendig werden.

In mehreren Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass verschiedene Substanz-Substrat-Kombinationen für die In-Mold Technologie geeignet sind und eine Kontaktierung beispielsweise an Leuchtdioden möglich ist. Des Weiteren zeichnen sich die applizierten Leiterbahnen durch eine sehr hohe Haftfestigkeit an das Substrat aus, welche auf die direkte Verankerung der leitfähigen Substanz mit dem Kunststoff während der eigentlichen Oberflächenentstehung zurückzuführen ist.

Perspektivisch gilt es unter anderem, die entwickelte Technologie auf weitere polymere Materialsysteme zu übertragen und entsprechende Prozessfenster für einen vollständigen Stoffübertrag zu finden. Dass hierbei nicht nur thermoplastische Werkstoffe in Frage kommen, zeigen erste Vorversuche mit duroplastischen Formmassen. Diese zeichnen sich insbesondere durch ihre vorteilhaften thermo-mechanischen Eigenschaften bei auch hohen Einsatztemperaturen von bis zu 300 °C aus. Bei ersten Vorversuchen konnte gezeigt werden, dass auch mit diesem Material der Stoffübertrag im Rahmen der In-Mold Technologie möglich ist. Die Funktionsintegration, beispielsweise für sensorische Systeme in Hochtemperaturanwendungen, ist somit zukünftig denkbar.

Literaturhinweise

- [1] Klug, F.: „*Logistikmanagement in der Automobilindustrie: Grundlagen der Logistik im Automobilbau*“. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2010.
- [2] N.N.: „*Kunststoffverarbeitung: Konstruktion, Werkzeugbau, Oberflächenveredelung*“. Technische Broschüre. N&H Technology GmbH, Willich, 2016.
- [3] Härtig, T.; Nagel, J.; Gehde, M.: „*Prozessintegrierte Oberflächenmodifizierung beim Spritzgießen*“. In: Kunststoffe (2010), Nr. 1/2010, S. 38-42. Carl Hanser Verlag, München, 2010.
- [4] Härtig, T. et al.: „*Bedrucken im Werkzeug*“. In: Kunststoffe (2013), Nr. 03/2013, S. 46-48. Carl Hanser Verlag, München, 2013.
- [5] Härtig, T.: „*Stoffübertrag beim Spritzgießen*“. Dissertation, TU Chemnitz, 2013.
- [6] Kalinowska, A.: „*Wissenschaftlich-technischer Beitrag zum prozessintegrierten Bedrucken von Kunststoffteilen während des Spritzgießens*“. Dissertation, TU Chemnitz, 2016.

Additive Fertigung mit Kunststoffen

Potenzielle, Entwicklungen und Trends

Prof. Dr.-Ing. **D. Drummer**, Dr.-Ing. **K. Wudy**,

Lehrstuhl für Kunststofftechnik,

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen

Kurzfassung

„Additive Fertigungsverfahren mit Kunststoffen stehen an der Schwelle zur Revolutionierung des Fertigungsumfeldes“ oder „Weg vom reinen Rapid Prototyping bewegen sich additive Fertigungsverfahren hin zur Herstellung von Serienbauteilen“ – solche oder ähnliche Aussagen sind in nahezu jedem Artikel, der sich mit additiven Technologien beschäftigt zu finden. Aber wo stehen kunststoffbasierte additive Fertigungsverfahren wirklich? Wo sind deren Limitation sowie deren Stärken? Welche Trends sind in diesem hochdynamischen Umfeld zu beobachten und welchen Themenstellungen widmet man sich im universitären Umfeld? Eben diese Fragen soll die vorliegende Veröffentlichung offenlegen und näher beleuchten.

Abstract

"Additive manufacturing processes with plastics are on the threshold of revolutionizing the manufacturing environment" or "Additive manufacturing techniques are developing from rapid prototyping to serial production" – such or similar statements can be found in commercial and scientific publications in the field of additive technologies. What is the state of the art in additive technologies? Where are the challenges and strength of additive techniques? Which trends can be observed in this highly dynamic environment and which topics are dedicated to the university environment? These are the questions that the present publication is pointing out.

1. Einleitung und Motivation

Additive Fertigung, Additive Manufacturing, Rapid Manufacturing, Freeform Fabrication, 3D Druck und 3D Printing sind nur einige Begrifflichkeiten die in der Forschung, Industrie sowie Gesellschaft kursieren und meist Synonyme für die Verwendung additiver Verfahren sind. Doch adressieren alle Terme wirklich die gleichen Technologien? Der Begriff „3D Druck“ und sein englischsprachiges Pendant „3D Printing“ wird oftmals im medialen Kontext sowie für Consumer 3D Druck angewandt. Bei Branchenexperten und im technischen Umfeld haben sich hingegen die Begriffe „Additive Fertigung“ und im englischsprachigen Raum „Additive Manufacturing“ (AM) etablieren können. Diese Entwicklung zeigt sich zudem in der Auswertung der Suchbegriffe „Additive Manufacturing“ und „3D Printing“ in Google Trends. In Bild 1 wird der

zeitliche Verlauf des weltweiten Suchinteresses der jeweiligen Begrifflichkeiten aufgetragen. Wobei der 100 % Wert den Höchstwert in dem betrachteten Zeitraum darstellt. Im Vergleich zu dem Term „Additive Manufacturing“ scheint „3D Printing“ in der Gesellschaft viel weiter verbreitet zu sein. Wenngleich die Begrifflichkeiten synonym verwendet werden, impliziert der Begriff 3D Druck auch immer die Fertigung von Prototypen.

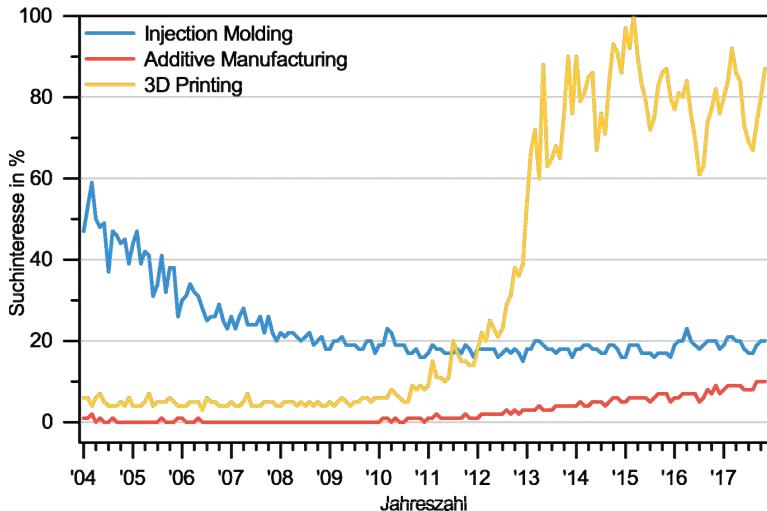


Bild 1: Google-Suchinteresse der Begriffe „Injection Molding“, „Additive Manufacturing“ und „3D Printing“ zwischen 2004 und 2017

2. Vergleichende Vorstellung und Bewertung additiver Fertigungsverfahren

2.1. Gegenüberstellung additiver Fertigungsverfahren

Im ISO/ASTM 52900-15 Standard werden Additive Fertigungsverfahren wie folgt definiert: „process by joining materials to make parts from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing and formative manufacturing methodologies“. Im deutschsprachigen Raum, hat sich hingegen die Terminologie „Generative Fertigungsverfahren“ aus der VDI Richtlinie 3404 etabliert. Nichtsdestoweniger werden alle Verfahren, deren Bauteilgenerierung durch schichtweises Hinzufügen von formlosem oder formneutralem Material erfolgt zu den Additiven Fertigungsverfahren gezählt. Der rasante Wandel sowie die Vielzahl neuer Verfahren, macht eine Gegenüberstellung und Bewertung der Leistungsfähigkeit additiver Verfahren schwierig.

Prinzipiell lassen sich kunststoffbasierte additive Fertigungsverfahren nach der Darreichungsform ihres jeweiligen Ausgangswerkstoffs einteilen. Flüssigkeiten bilden beispielsweise den Basiswerkstoff bei der **Stereolithographie**. Bei diesem Verfahren, das oftmals in der Erzeu-

gung von patientenindividuellen Hörgeräten Anwendung findet, werden flüssige Photopolymere, respektive Monomere, mittels einer Strahlquelle lokal und schichtweise ausgehärtet. Die Bauteilerzeugung erfolgt durch Reaktion der photosensitiven Flüssigkeiten, wenn diese mit der UV Laserstrahlung interagieren. Nach der Erzeugung eines Bauteilquerschnittes wird die Höhe der Bauplattform um eine Schichtdicke reduziert, sodass der darauffolgende Bauteilquerschnitt belichtet werden kann. Entwicklungen in diesem Bereich beschäftigen sich z.B. mit der Reduktion der Schichtdicken auf unter 10 µm sowie der Erhöhung der realisierbaren Auslösung [1]. Dieser Trend wird unter dem Begriff Mikro-Stereolithographie zusammengefasst [1]. Zudem besteht die Möglichkeit, den Flüssigkeiten Füllstoffe beizumengen. In Bae und Haliloran [2] werden beispielsweise keramische Feingußformen mittels Stereolithographie hergestellt.

Nach dem heutigen Stand der Technik tummeln sich eine Vielzahl von Derivatverfahren der Stereolithographie auf dem Markt. So widmet sich ein Spin-off der TU Wien, Cubicure der Herstellung von technischen Bauteilen aus temperaturbeständigen und schlagzähmodifizierten Photopolymeren im sogenannten „**Hot Lithography**“ Verfahren [3].

Die vom US Unternehmen Carbon angewandte **CLIP** (Continuous Liquid Interface Production) Technologie arbeitet hingegen mit einer Kombination aus einer sauerstoffdurchlässigen Optik und der digitalen Lichtprojektion, sodass flüssige Photopolymere in der Grenzfläche zwischen einer sogenannten „Dead zone“ und dem Harz reagieren und somit kontinuierlich zu einem Bauteil heranwachsen [4]. Aufgrund der Diffusion von Sauerstoff durch das halbdurchlässige Baufenster, entsteht eine sauerstoffhaltige „Dead zone“, an dessen flüssig-flüssig Grenzfläche das UV härtende Polymer polymerisiert wird [4]. Dadurch kann im Gegensatz zur schichtbasierten Stereolithographie eine kontinuierliche Bauteilerzeugung erfolgen.

Beim **Fused Deposition Modeling (FDM)** wird ein thermoplastisches Halbzeug, ein meist amorphes Filament, mittels Extrusionsdüse aufgeschmolzen. Die Düse, welche unter Zuhilfenahme von zwei Achsen bewegt werden, kann extrudiert zunächst einen Schmelzestrang auf eine Substratplatte, die Bauplattform. Hierdurch wird der erste Bauteilquerschnitt erzeugt. Anschließend wird einer weiterer Schmelzestrang mit der zuerst aufgetragenen Schicht verschweißt, sodass schichtweise das Bauteil erzeugt wird. Hierbei wird die Bauplattform in z-Richtung bewegt. Aufgrund des einfachen Bauteilerzeugungsprinzip sowie der niedrigen Kosten der einzelnen Anlagenkomponenten, hat sich dieses Verfahren im Home-User Bereich durchgesetzt. Dieser Trend führte in der Vergangenheit in der Gesellschaft zur Gleichsetzung dieser Technologie mit dem Überbegriff „3D Druck“ [5]. Im industriellen Umfeld gibt es vermehrt Bemühungen zur Entwicklung roboterbasierter FDM Systeme, die nicht mehr mit Filamenten sondern mit z. B. Einschneckenextrudern arbeiten, bei denen direkt Granulat zugeführt werden kann.

Neben den flüssig- und strangbasierten Verfahren konnten sich in den letzten Jahren Technologien, die aus einem Pulverbett arbeiten, etablieren. Schmid [6] schreibt dem **selektiven Lasersintern** das größte Potential für die Fertigung von Serienbauteilen mit hohen mechanischen Kennwerten zu. Beim selektiven Lasersintern von Kunststoffen wird ein meist teilkristallines Thermoplastpulver, dessen mittlere Partikelgröße im Bereich von 50 µm liegt, mittels CO₂ Laser lokal aufgeschmolzen. Der sogenannte Bauraum wird auf eine Temperatur zwischen dem Onset der Kristallisation und dem Onset des Schmelzens vortemperiert, sodass während des gesamten Bauprozesses, der Theorie nach, Schmelze und pulverförmiger Feststoff vorliegen können [7]. Nachdem alle Schichten generiert wurden, erfolgt die Abkühlung der Bauteile sowie des nicht aufgeschmolzenen Pulvers auf Raumtemperatur. Aus dem schichtbasierten Bauprinzip resultieren zum einen unterschiedliche mechanische Kennwerte in Abhängigkeit der Orientierung im Bauraum und zum andern Maß- und Formabweichungen, die nur partiell durch z.B. richtungsabhängige Schwindungsfaktoren ausgeglichen werden können. Weitere etablierte additive Verfahren sind beispielsweise das PolyJet Verfahren, mit welchem mehrfarbige Anschauungsobjekte herstellbar sind oder Pulver Binder Systeme, die häufig für Feingußformen Anwendung finden. Eine Zusammenfassung etablierter additiver Fertigungsverfahren, deren Energieeintrag, Wirkprinzip und möglicher Limitationen eingeteilt nach der jeweiligen Darreichungsform des Ausgangswerkstoffes findet sich in Tabelle 1.

Tabelle 1 : Übersicht über etablierte additive Fertigungsverfahren mit Kunststoffen in Anlehnung an [5, 8]

Ausgangs-werkstoff	AM-Technologie	Wirkprinzip	Energie-eintrag	Phasen-über-gang	Werkstoffe	Bemerkungen / Limitationen
Flüssigkeiten	Stereolithogra-phie (SLA)	Photo-polymeri-sation	UV-Laser	flüssig – fest	Photopolymer	- hohe Auflösung - hohe Aufbauraten - geringe mech. Kennwerte
	Hot Lithography	Photo-polymeri-sation	UV-Laser	flüssig – fest	Hochleistungs-photopolymer	- Photopolymer mit hoher Zählig-keit sowie - Temperaturbe-ständigkeit
	CLIP (Continuous Liquid Interface Production)	Photo-polymeri-sation		flüssig – fest	Polyurethane, Cyanatoesterharz, Epo-xidharz	- (halb)-kontinuier-liches Verfahren
	PolyJet / Inkjet Printing	Photo-polymeri-sation	UV-Laser	flüssig – fest	Photopolymer	- mehrfarbig - hohe Oberflä-chengüte - niedrige mech. Kennwerte
Flüssigkeiten / Pulver	Bind Jetting / 3D Printing (3DP)	Aushärte-reak-tion	IR-Strahler	flüssig – fest	Sand, Kun-ststoffpulver + Phenolharz-Bin-der	- mehrfarbig - hohe Porosität
	Selektives Laser-sintern (SLS)	Aufschmelzen eines Thermo-plasten	CO ₂ Laser	fest – viskos – fest	v.a. teilkristalline Thermoplaste, thermoplastische Elastomere	- hohe mech. Kennwerte - hohe Langzeitsta-bilität
Halzeug	Fused Deposition Modeling (FDM)	Aufschmelzen eines Thermo-plasten	Wärmeleitung	fest – viskos – fest	v.a. amorphe Thermoplaste	-

2.2. Geometrische und werkstoffliche Möglichkeiten und Restriktionen

Die Grundvoraussetzung für alle AM Technologien ist die möglichst effiziente Schaffung einer Anbindung bzw. Verbindung zwischen zwei Schichten [9]. Vier Klassen von Bindungsmechanismen die Polymerisation, das Fest-Phasen-Sintern, das Schmelzen sowie das Verbinden über eine Sekundärphase sind hierbei zu unterscheiden [9]. Je nach Bindungsmechanismus finden verschiedene Werkstoffklassen Anwendung. Flüssigbasierte AM Verfahren arbeiten fast ausschließlich mit Prepolymeren, sodass die Verbindung von zwei Schichten über z.B. eine lichtaktivierte Polymerisation von stattent geht. Dieser Bereich wird somit von Duroplasten dominiert. Im Gegensatz hierzu ist die Ausbildung eines Zusammenhalts aufgrund des Schmelzens von Kunststoffen der Hauptbindungsmechanismus beim Fused Deposition Modeling sowie beim selektiven Lasersintern, sodass in erster Linie Thermoplaste zum Einsatz kommen.

Typische Werkstoffe für die **Stereolithographie** sind zusammengesetzt aus Monomeren, Oligomeren, Photoinitiatoren und weiteren Additiven, wie Inhibitoren, Antioxidantien, Trennmitteln oder ähnlichem [9]. Die ersten Photopolymere für die SLA bestanden meist aus Acrylat- oder Vinylester-Harzen, die jedoch Schwindungswerte von 5 bis 20 % [10] nach der Polymerisation aufweisen. Zudem wird bei Acrylatharzen die Polymerisationsreaktion durch Sauerstoff inhibiert. Um diese Herausforderungen zu umgehen, wurde die Entwicklung photopolymerisierbarer Expoxidmonomere vorangetrieben, da diese durch die Ringöffnung polymerisieren und somit kaum Verschwindung aufweisen [11]. Kommerzielle SLA Photopolymere sind meist Mischungen aus Expoxid-, Acrylat- und weiteren Oligomeren [9]. Die Formulierungen von Photopolymeren für Jetting Technologien, wie dem Binder Jetting oder PolyJet sind meist ähnlich zu denen klassischen SLA Werkstoffen [9].

Bei additiven Extrusionsverfahren, wie dem **Fused Deposition Modeling**, werden bevorzugt amorphe Thermoplaste eingesetzt. Prominente Vertreter sind hier z.B. ABS und PLA, die sich ideal zur Materialextrusion durch Düsen mit Durchmessern von 0,2 bis 0,5 mm eignen [9]. Im industriellen FDM Umfeld finden zudem, oftmals Hochtemperaturwerkstoffe wie PEI Anwendung. Im Gegensatz zu vielen flüssigkeits- und pulverbasierten Verfahren, können Überhänge bei der Materialextrusion, nur durch zusätzliche Stützstrukturen realisiert werden. Hierbei unterscheiden sich zwei Vorgehen zur Erzeugung von Stützstrukturen. Zum einen können diese meist weniger dichten Elemente über Gitterstrukturen aus dem gleichen Werkstoff erzeugt werden. Zum anderen gibt es eine Vielzahl von 2-Komponenten-Systemen, bei dem eine Düse das z.B. wasserlösliche Stützmaterial baut. In der Nachbearbeitungsphase, dem sogenannten Post-Processing, werden die Stützen entfernt. [9]

Tabelle 2: Übersicht über kommerzielle sowie forschungsseitige Kunststoffe im Bereich der additiven Fertigung

AM-Technologie	Werkstoffklasse	Kommerzielle Werkstoffe	Forschungsaktivitäten
Stereolithographie (SLA)	Photopolymere	Photopolymers: Epoxy-Acrylat-Harz, z.B. Poly1500 (materialise), Accura 60 (3D Systems)	Photopolymere mit Füllstoffen (Keramik [12, 13], ...) ...
Selektives Lasersintern (SLS)	Teilkristalline Thermoplaste	PA12 (PA2200, PA2201, PA2202 black, PA2210 FR, PA2221)	PBT [14] PBT/PC [15]
		PA12 gefüllt (PA3200 GF, CarbonMide, Alu-Mide)	Gefülltes PA12
		PA11 (PA1101, PA1102 black, Rilsan PA11)	PP [16, 17]
		PA6 (Ultrasint PA6)	POM [16, 18]
		PP (Luvosint PP)	PE [16] UHMW-PE [19, 20]
		PEEK (PEEK HP3)	PEEK [21]
	Amorphe Thermoplaste	PS (PrimeCast 101)	...
Fused Deposition Modeling (FDM)	Amorphe Thermoplaste	TPE-A (PEBA 2301)	
		TPU (Luvosint TPU)	
		ABS	Gefüllte Kunststoffe ([22-24], ...)
		PLA	
		EVA	FDM von Keramiken ([25-27], ...)
		PEI	
		PC/ABS	...

Beim **Selektives Lasersintern** mit Kunststoffen wird, das meist teilkristalline Thermoplastpulver mit Hilfe von IR-Strahlern vorgewärmt und mittels CO₂ Laser aufgeschmolzen. Nach dem Modell des quasi-isothermen Lasersintern liegen Feststoff und Schmelze parallel vor. Analysen von Rietzel [16] zeigen, dass auch bei Temperaturen oberhalb der mittels DSC bestimmten Kristallisationstemperatur bereits Kristallisationsvorgänge von stattfinden gehen können. Dies gilt es, bei der Entwicklung neuer Pulver, für das selektive Lasersintern zu berücksichtigen. Im

Gegensatz zum FDM sowie SLA werden beim SLS keine zusätzlichen Stützstrukturen benötigt, die anschließend wieder entfernt werden müssen [9]. Die Entfernung der Pulverreste an den Bauteilen erfolgt meist mittels Glaskugelstrahlen oder ähnlichen Methoden. Die Oberflächenqualität wird durch Belichtungsparameter determiniert und resultiert aus der Einbettung der Schmelze in das Pulverbett. Die Partikelgröße bestimmt somit zudem die Bauteiloberfläche. Aufgrund der Darreichungsform des Ausgangswerkstoffes als Pulver ist die Materialvielfalt im SLS derzeit noch stark eingeschränkt. Eine Übersicht über kommerziell verfügbare Werkstoffe und Materialien additiver Verfahren die kommerziell verfügbar sind sowie forschungsseitig beleuchtet werden zeigt Tabelle 2.

2.3. Gegenüberstellung Bauteileigenschaften Additive Fertigung – Spritzgießen

Die geometrische Freiheit additiver Verfahren ist ein Hauptcharakteristikum dieser Fertigungsverfahren. Mit einigen wenigen Ausnahmen kann der Konstrukteur bei additiven Verfahren alle geometrischen Freiheitsgrade bei der Bauteilgestaltung ausnutzen. Das fertigungsgerechte konstruieren, wie es aus dem Spritzgießen bekannt ist z.B. mit dem Vorsehen von Entformungsschrägen entfällt quasi gänzlich. Die Bauteiloberfläche von AM Bauteilen ist hingegen im Gegensatz zur Bauteilerzeugung mittels Spritzgießen immer ein intrinsisches Ergebnis des schichtweisen Prozesses. Beim Spritzgießen hingegen lassen sich z.B. über die Strukturierung der Kavität unterschiedliche Oberflächen abbilden. Allen additiven Fertigungsverfahren ist zudem gemein, dass die verfügbare Werkstoffvielfalt derzeit noch eingeschränkt ist. Zudem kann nicht, wie im Spritzgießen die Bauteilmorphologie über Maschinenparameter, wie die Werkzeugtemperatur eingestellt oder geändert werden. Die Bauteilmorphologie im Lasersintern von Kunststoffen ergibt sich beispielsweise auf Basis der Historie beim Abkühlen, die weder gesteuert noch geregelt wird. Hier wird das Pulver mit den darin eingeschlossenen Bauteilen ohne äußere Einflüsse sich selbst überlassen. Im Lasersintern resultiert außerdem eine gewisse Restporosität von ca. 3 bis 5 %, die zur Schwächung des Bauteiles beitragen kann. Schlussendlich gilt in Abhängigkeit der Losgröße, der notwendigen Bauteilkomplexität und der Produktentwicklungsduer zu evaluieren ob additive Fertigungsverfahren für ein spezifisches Bauteil Anwendung finden sollten. Die Adaption konventioneller konstruierter Bauteile auf die additive Fertigung impliziert auch immer ein Redesign, das es zudem zu berücksichtigen gilt.

3. Aktuelle Trends in der Forschung

In nahezu allen kunststoffbasierten additiven Fertigungstechnologien wird derzeit mit Nachdruck an der Erweiterung der verfügbaren Materialvielfalt gearbeitet. Dies kann z. B. in der Entwicklung von Hochleistungphotopolymeren im Bereich der „Hot Lithography“ beobachtet

werden. Der pulverförmige Ausgangswerkstoff beim selektiven Lasersintern in Kombination mit den hohen Prozessanforderungen z.B. hinsichtlich thermischer Eigenschaften macht die Entwicklung neuer Werkstoffe für diesen Prozess zu einer besonderen Herausforderung, derer sich viele Einrichtung mit unterschiedlichen werkstofflichen Schwerpunkten annehmen. Trends im Bereich des Fused Deposition Modeling gehen derzeit vor allem in Richtung gefüllter Systeme sowie Hochleistungswerkstoffe.

Neben der Weiterentwicklung der Werkstoffvielfalt werden auch die Teilprozessschritte additiver Fertigungsverfahren optimiert. Meist ist hier die Zielstellung die Prozesse in ihrer Robustheit und Reproduzierbarkeit zu steigern sowie zu beschleunigen. Bei pulverbettbasierten Verfahren erfolgt dies z.B. durch die definierte Einstellung der Pulverschüttung. Auch Heiz-, Temperier- und Belichtungsstrategien werden vielfach analysiert. Hier greift die Simulation der Prozesse aktiv ein, die vor allem im universitären Umfeld stark vorangetrieben wird. Des Weiteren stellt der additive Fertigungsprozess meist extreme Randbedingungen beispielsweise hinsichtlich resultierender Temperaturgradienten an den Kunststoff. Diese können mit konventionellen Methoden nicht volumäglich erfasst werden, weshalb die prozessangepasste Analyse (ähnlich zum pVT Verhalten von Kunststoffen im Spritzguß) einen wichtigen Forschungsschwerpunkt darstellt.

Zudem sind die Themen

- Datenaufbereitung,
- Design,
- Konstruktionsrichtlinien,
- Nachbearbeitung sowie
- juristische Aspekte

Inhalt einiger Forschungsinitiativen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Der Vielfach diskutiert Durchbruch additiver Fertigungsverfahren lässt immer noch auf sich warten. Gründe hierfür sind unter anderem:

- die eingeschränkte Prozessreproduzierbarkeit und –robustheit,
- die Reproduzierbarkeit der Teileigenschaften,
- die fehlende Prozessüberwachung und –regelung,
- die nur partiell implementierte Qualitätssicherung,
- der geringe Automationsgrad,
- der oftmals hohe Nachbearbeitungsaufwand und
- die Produktivität,

um nur einige Hürden zu nennen. Nichtsdestoweniger widmen sich eine Vielzahl von Unternehmen, oftmals in Kooperation mit Forschungsinstituten, diesen Aufgaben, sodass additive Verfahren zukünftig in das Fertigungsumfeld eingebunden werden können. Additive Fertigungsverfahren werden wohl immer als Ergänzung oder Erweiterung etablierter Technologien dienen und dort Anwendung finden, wo diese gegebenenfalls z.B. hinsichtlich konstruktiver Aspekte an ihre Grenzen stoßen.

Literatur

- [1] Choi, J. S.; et al.: Development of micro-stereolithography technology using a UV lamp and optical fiber. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 41 (2009), S. 281-286.
- [2] Bae, C. J.; Halloran, J. W.: Integrally Cored Ceramic Mold Fabricated by Ceramic Stereolithography. In: *International Journal of Applied Ceramic Technology* 8 (2011), S. 1255-1262.
- [3] Ebert, J.; Gmeiner, R.: *Stereolithographievorrichtung mit Heizeinrichtung*, 2016.
- [4] Tumbleston, J. R.; et al.: Continuous liquid interface production of 3D objects. In: *Science* 347 (2015), S. 1349-1352.
- [5] Bikas, H.; et al.: Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 83 (2016), S. 389-405.
- [6] Schmid, M.: *Selektives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen - Technologie, Prozesse und Werkstoffe* Carl Hanser Verlag München, 2015. - ISBN 978-3-446-44562-8
- [7] Alischer, G.: *Das Verhalten teilkristalliner Thermoplaste beim Lasersintern*. Universität-GH Essen, Fachbereich 12 - Maschinenwesen, Dissertation. 2000
- [8] Gao, W.; et al.: The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. In: *Computer-Aided Design* 69 (2015), S. 65-89.
- [9] Bourell, D.; et al.: Materials for additive manufacturing. In: *CIRP Annals* 66 (2017), S. 659-681.
- [10] Crivello, J. V.; Dietliker, K.: *Photoinitiators for Free Radical Cationic & Anionic Photopolymerisation 2nd Edition: Chemistry & Technology of UV & EB Formulation for Coatings, Inks & Paints*. Wiley, 1998. - ISBN 0471978922

- [11] Fedchenko, F.; Jacobs, P. F.: Stereolithography and other RP&M Technologies. In: *Fedchenko, RP, Jacobs, PF, Eds* (1996), S. 1.
- [12] Stampfl, J.; et al.: Photopolymers with tunable mechanical properties processed by laser-based high-resolution stereolithography. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 18 (2008), S. 125014.
- [13] Doreau, F.; et al.: Stereolithography for Manufacturing Ceramic Parts. In: *Advanced Engineering Materials* 2 (2000), S. 493-496.
- [14] Schmidt, J.; et al.: A novel process for production of spherical PBT powders and their processing behavior during laser beam melting. In: *AIP Conference Proceedings* 1713 (2016), S. 140008.
- [15] Greiner, S.; et al.: Selective laser sintering of polymer blends: Bulk properties and process behavior. In: *Polymer Testing* 64 (2017), S. 136-144.
- [16] Rietzel, D.: *Werkstoffverhalten und Prozessanalyse beim Laser-Sintern von Thermoplasten*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Dissertation. 2011
- [17] Amado, A.; et al.: Characterization and modeling of non-isothermal crystallization of Polyamide 12 and co-Polypropylene during the SLS process, 5th International Polymers & Moulds Innovations Conference, 2012, pp. 207-216.
- [18] Kruth, J.-P.; et al.: Consolidation of Polymer Powders by Selective Laser Sintering, 3rd International Conference PMI2008, Ghent, Belgium, 2008, pp. 1-16.
- [19] Goodridge, R. D.; et al.: An empirical study into laser sintering of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE). In: *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2010), S. 72-80.
- [20] Rimell, J. T.; Marquis, P. M.: Selective Laser Sintering of Ultra High Molecular Weight Polyethylene for Clinical Applications. In: *John Wiley & Sons, Inc.* 53 (1999), S. 414-420.
- [21] Rechtenwald, T.: *Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten: eine Betrachtung werkstoff- und prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, Dissertation. 2011

- [22] Shofner, M.; et al.: Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling. In: *Journal of Applied Polymer Science* 89 (2003), S. 3081-3090.
- [23] Shofner, M.; et al.: Single wall nanotube and vapor grown carbon fiber reinforced polymers processed by extrusion freeform fabrication. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 34 (2003), S. 1207-1217.
- [24] Zhong, W.; et al.: Short fiber reinforced composites for fused deposition modelling. In: *Materials Science & Engineering* 301 (2001), S. 125-130.
- [25] Bellini, A.: *Fused Deposition of Ceramics: A Comprehensive Experimental, Analytical and Computational Study of Material Behavior, Fabrication Process and Equipment Design*. Drexel University, 2002
- [26] Bellini, A.; Guceri, S.: Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling. In: *Rapid Prototyping Journal* 9 (2003), S. 252-264.
- [27] Bellini, A.; et al.: New developments in fused deposition modeling of ceramics. In: *Rapid Prototyping Journal* 11 (2005), S. 214-220.

Hochleistungs-Automation – Rolle, Ausblick, Entwicklung und Tücken

W. Czizegg, Waldorf Technik GmbH, Engen

Kurzfassung

Die fortschreitende Automatisierung von Prozessen wird sowohl der maßgebliche Treiber für weiteres Wachstum wie auch der Treiber für massive Veränderungen in unserem beruflichen Umfeld werden. Waldorf Technik als einer der führenden Hersteller von Hochleistungs-Automationen für Spritzgießer berichtet über Chancen und Risiken, und wagt einen Ausblick in die weitere Zukunft.

1. Kurzer Einblick in das Geschäft von Waldorf Technik

Waldorf Technik ist Teil der globalen Hahn Group und unterstützt seine Kunden im Spritzguss-Sektor seit über 30 Jahren mit kundenspezifisch entwickelten Hochleistungsautomationen. Hochautomatisierte Prozesse machen unsere Kunden konkurrenzfähig und erfolgreich. Waldorf Technik hat sich hierbei auf die Branchen MedTech und Verpackung spezialisiert, ein weiteres großes Feld innerhalb der Hahn Group sind Anwendungen im Bereich Automotive.

2. Automation als Anker aller erfolgreichen Industrie- und Schwellenländer

Unsere westlichen Wirtschaftssysteme sind auf permanentes Wachstum geeicht; ohne solches Wachstum laufen wir Gefahr, dass ein Wirtschaftssystem in sich zusammenfällt. Um dieses Wachstum gerade in Deutschland trotz in den letzten Jahren rückläufigem und in Zukunft bestenfalls stagnierendem Bevölkerungswachstum auch in Zukunft stets aufrecht zu erhalten, ist die Wirtschaft in allen Bereichen zur permanenten Produktivitätsteigerung verdammt; das ist nur über radikal vereinfachte oder eben automatisierte Prozesse möglich. Automatisierung ist daher lebenswichtig für unsere heutige Gesellschaft.

3. Zentrale Effizienz-Treiber: Sensorik, Daten, Vernetzung und Performance

Eine Vernetzung der Datenströme von bisher nicht bekannten Ausmaß beschleunigt künftig Prozesse; eine Vervielfachung von Sensorik in allen Bereichen des Lebens wie auch in automatisierten Prozessen liefert hierzu die Daten, so dass zB. Prozessfehler wesentlich früher

erkannt und realtime abgestellt werden können. Gleichzeitig erklimmt man hinsichtlich Performance immer neue Höhen, sei es bei Kavitätenzahlen im Spritzguß, sei es bei der Prozesszeitenverkürzung oder auch bei der Minituarisierung der Anlagen. So kann man zB. in der Herstellung von Pipettenspitzen mit dem neuartigen Vario TIP-Verfahren von Waldorf Technik auf der gleichen Reinraumfläche heute in etwa 24 mal mehr Teile (!) herstellen als noch vor 6 Jahren; dies ist das Ergebnis aus einer Vervierfachung der Kavitätenzahl im Werkzeug von 32 auf 128 Kavitäten, Reduzierung der benötigten Fläche um 75 % und einer Zykluszeitreduzierung von gut 30 % ...

4. Automatisierung erschließt sich immer neue Felder

Waldorf Technik konzentriert sich auf Medical Consumables; tatsächlich aber ist die Automatisierung in allen Bereichen der Herstellung von Produkten wie auch in der Dienstleistung nicht aufzuhalten. Die Entwicklung, die wir durch das Online-Banking bereits seit Jahren kennen und die über Jahrzehnte stabile Organisationsstrukturen von Banken auf den Kopf gestellt hat, wird vermutlich über künstliche Intelligenz, Cloud-basierte Angebote und internet-affine Nutzer auch in Bereichen der Medizinischen Versorgung, bei Anwälten und anderen Dienstleistern Einzug halten.

5. Grenzen und Fokus der Entwicklungen

Bäume wachsen auch in der Automation nicht in den Himmel, heißt: bei allem Wachstumsstreben muss man auch die damit verbundenen Risiken abschätzen.

So lassen sich z. B. gerade in der Mechanik bestehende Funktionsprinzipien nicht einfach immer weiter nach oben skalieren. Nicht nur aber allein physikalische Begrenzungen führen diesen Weg an einem vorab schwer erkennbaren Punkt in die Größer-Schneller-Weiter-Falle; denken Sie etwa an die Entwicklung von Kavitätenzahlen oder Zykluszeiten: irgendwann ist bei einer Kavitäten-Erhöhung im Werkzeug ein Limit erreicht, wo zunehmende Anlagen-Stopps z. B. durch Werkzeugverschleiß oder Ungleichmäßigkeiten im Spritzprozess den ursprünglich kalkulierten Output-Zugewinn auffressen.

Einher geht damit auch die Komplexitäts-Falle: Je mehr Funktionalität in eine Anlage integriert wird, desto mehr Möglichkeiten für Ausfälle entstehen. Beispiel: das Internet der Dinge erfordert eine Vielzahl von Sensorik in künftigen Anlagen, und jeder Sensor mit seiner physikalischen Anbindung an den Rechner ist ein zusätzliches Potential für Störungen. Auch hier führt eine Überfrachtung zu vermehrten Stillständen, welche die ökonomischen Vorteile des All-in-

One ab einem bestimmten Punkt ins Negative laufen lassen. Positiver Aspekt: den deutschen Ingenieuren sagt man ein gewisses Streben nach Perfektion nach; zunehmende Komplexität wird sich nicht vermeiden lassen, und gerade da ist das Streben nach Perfektion sehr gefragt.

Automatisierung wird in den kommenden Jahrzehnten einer der stärksten Treiber unserer Weltwirtschaft sein. Wie bereits angedeutet, geht es einerseits immer wieder um Gewinnoptimierung durch Einsparungen im Bereich Arbeitskosten. Darüber hinaus jedoch geht es auch um Einspar-potentiale im Bereich der Qualitätskosten und des Ressourceneinsatzes wie etwa Materialeinsatz und Verschleiß. Trotz aller Vorteile: Kostenvorteile sind in ihrer Wirkung auf das Unternehmensergebnis immer beschränkt und können maximal 100 % der heutigen Kosten begrenzt.

Viel größeren Einfluss auf die Gewinnoptimierung dürfte aus der Effizienzsteigerung und damit deutlich höherem Output bei gleichem Ressourceneinsatz zu erzielen sein; hier ist der Einfluss auf den Gewinn nach oben praktisch unbegrenzt. Damit ist auch erklärlich, dass Unternehmen weniger auf Sparen denn auf Maximierung von Output mittels Einsatz von Automation und Robotern streben. Wie gesagt: Outputsteigerung um Faktor 24 von 2011 bis 2017 auf gleicher Reinraumfläche zB. durch Einsatz von Vario TIP Automationen bei der Pipettenspitzenherstellung; dort liegt der Gewinn !

Engen, 2.Januar 2017

Automationen beherrschbar gestalten

Erfahrungen aus der Praxis von H&B Electronic

Dipl.-Ing. (BA) Maschinenbau **W. Stauß**,
H&B Electronic GmbH & Co.KG, Deckenpfronn

Wer mit Automatisierungen zu tun hat, kennt beide Seiten der Medaille. Zum einen die Chance effizient in High Cost Countries produzieren zu können und sich Wettbewerbsvorteile zu erschaffen. Auf der anderen Seite bei nicht beherrschten Anlagen in ein sehr problematisches Unterfangen zu geraten.

Des Weiteren besteht ein Irrglaube darin mit juristisch perfektionierten Verträgen eine funktionsfähige Anlage bei Sondermaschinenbauer erzwingen zu können. Denn es gibt auch hier kein schwarz/weiß, sondern entscheidend ist stets das Zusammenspiel zwischen Automation, Werkzeugen, Mitarbeitern, Produkt- und Prozesstoleranzen sowie dem gesamten Umfeld.

Es bleibt folglich nichts anderes übrig sich eine Strategie zurecht zu legen, wie Automationslösungen sicher und effizient entwickelt werden können. Die Hauptenergie gilt es in die Entstehungsphase zu legen, auch Frontloading genannt, damit das entwickelte Konzept später sehr nahe am Ideal liegen wird. Denn eine nachträgliche Konzeptänderung ist in der Realität nahezu ausgeschlossen.

Ebenso sind zur Sicherstellung von stabilen Ausbringungsquoten grundlegende Gesetzmäßigkeiten und Vorkehrungen zu treffen, die andernfalls im Nachgang sehr teuer und aufwendig nachgerüstet werden müssen.

Bei H&B Electronic sind mehrere Automationslösungen im Einsatz bedingt durch eine Vielfalt an kundenspezifischen Produkten. Bedient werden die Marktbereiche Automotive, Industrielektronik und Medizintechnik. Anhand von diversen Beispielen werden konkrete Lösungen und Empfehlungen aufgezeigt.

Fertigungszellen für dekorierte Bauteile – Automationslösungen rund um die Spritzgießmaschine

Dipl.-Ing. (FH) **T. Brettnich**,
Sumitomo (SHI) Demag Plastics Machinery GmbH, Schwaig

Kurzfassung

Als direktes Bindeglied zwischen Mensch und Bauteil spielt die Oberfläche von Spritzgießteilen eine wichtige Rolle. In den vergangenen Jahren ist dabei der Fokus von rein optischen über haptische Anforderungen mehr und mehr in Richtung Funktionsintegration gegangen, wie zum Beispiel bei Touch-Oberflächen. Um bei der Produktion dieser anspruchsvollen Komponenten nachgelagerte Fertigungsschritte, aufwändiges Teilehandling mit erhöhtem Produktionsrisiko und der Gefahr hoher Ausschussraten zu vermeiden, werden mehr und mehr Fertigungsschritte automatisiert und in den Spritzgießprozess integriert.

1. Generelle Trends in der Oberflächenveredelung von spritzgegossenen Kunststoffbauteilen

Das Prinzip spritzgegossene Bauteile nachträglich zu veredeln wird seit vielen Jahren erfolgreich angewandt. Nachdem zunächst rein optische Effekte damit verfolgt wurden, kommen in den letzten Jahren weitere Aspekte verstärkt zum Tragen. Dazu gehören lichttechnische Effekte wie zum Beispiel das sogenannte Tag- und Nachtdesign, Verbesserungen in der Haptik und damit der Oberflächenbeschaffenheit bis hin zur Integration elektronischer Funktionen wie zum Beispiel Touch-Funktionalitäten.

Der Kreativität von Designern und Produktentwicklern sind kaum Grenzen gesetzt. Ebenso ist die Akzeptanz moderner Technologien bei Kunden und Anwendern sehr hoch. Ansprechende Oberflächen, gepaart mit moderner Funktionalität werten jedes Produkt deutlich auf.

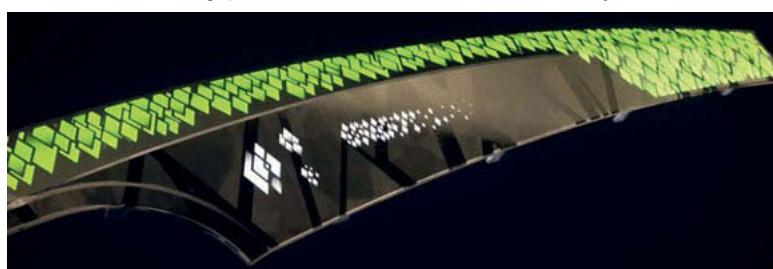


Bild 1: Dekoriertes Bauteil mit Lichteffekt und Touch-Sensorik [1]

2. Grenzen klassischer Dekorationsverfahren

Um die Oberfläche von Kunststoffbauteilen zu veredeln, kamen und kommen sehr häufig nachgelagerte Veredelungsverfahren wie zum Beispiel das Lackieren oder auch das Galvanisieren zum Einsatz. Die prozesstechnische Trennung von Herstellungs- und Veredelungsprozess sorgt dabei für einige Nachteile.

So ist durch den mehrstufigen Herstellprozess ein deutlich aufwändigeres Teilehandling erforderlich: Die hergestellten Spritzgussteile werden aus der Maschine entnommen, verpackt und zur Weiterbehandlung transportiert. Zumindest innerhalb eines Unternehmens, häufig aber auch zu externen Dienstleistern, die sich auf die Nachbehandlung spezialisiert haben. Dort werden die Teile wieder ausgepackt und dem nachfolgenden Prozessschritt, zum Beispiel einer Lackierung, zugeführt, anschließend wieder verpackt und ggf. weiteren Schritten zugeführt. Problematisch ist in diesem Zusammenhang neben den Handlings-, Lagerungs- und Transportkosten insbesondere die Gefahr von Beschädigungen und Verunreinigungen, also höheren Ausschussraten. Zusätzlich dazu nehmen auch die Kosten für den Ausschuss dramatisch zu, wenn Fehler, die aus dem Spritzgießprozess resultieren, erst in nachgelagerten Prozessen zum Ausschuss führen. In diesem Fall sind zwischenzeitlich erhebliche weitere Kosten entstanden. Auch wird die Regelstrecke zum Korrigieren von Spritzgießfehlern deutlich länger wenn Fehler erst nach dem Veredelungsschritt erkannt werden. So sind in diesen Fällen bis zum Erkennen von fehlerhaften Spritzgießteilen möglicherweise bereits Tage oder gar Wochen vergangen. Dies birgt die Gefahr, dass in der Zwischenzeit größere Mengen potenziell fehlerhafter Bauteile produziert wurden.

Die Aufteilung von Produktionsschritten auf mehrere Beteiligte sorgt zudem dafür, dass die Wertschöpfung beim Spritzgießer relativ gering, das Produktionsrisiko aber vergleichsweise hoch ist. Dies macht solche Anwendungen für kleinere und mittlere Unternehmen häufig uninteressant.

Der hohe Fertigungsaufwand, das gesteigerte Produktionsrisiko sowie die potenziell hohen Ausschussraten und –Kosten sorgen für hohe Stückkosten, welche einen Einsatz solcher Bauteile bisher häufig auf hochpreisige Produkte begrenzt. Beispiele dafür sind Autos der Ober- und Luxusklasse oder auch Artikel für Haushaltsgeräte im oberen Preissegment.

3. Möglichkeiten durch integrierte Prozessschritte

Viele der genannten Grenzen lassen sich durch die Integration nachgelagerter Fertigungsschritte in den Spritzgießprozess eliminieren. Mit dem sogenannten IMD-Verfahren (In-Mould-Decoration) als Basis zur Integration für oberflächendekorierte Bauteile konnten in den letzten Jahren beachtliche Erfolge realisiert werden.

Auf diese Weise werden Bauteile während des Spritzgießprozesses lackiert. Eine mit einem Lacksystem bedruckte Trägerfolie wird vor dem Spritzen in der Kavität platziert und dann hintspritzt. Durch die beim Spritzguss auftretenden Drücke und Temperaturen wird die Lackschicht von der Trägerfolie auf das Bauteil übertragen. Ein grundsätzlicher Vorteil der IMD-Technologie liegt in der hohen Flexibilität des Designs und damit auch in der günstigen Herstellung verschiedenster Varianten eines Bauteils. In Kombination mit schnell austauschbaren Werkzeugeinsätzen, beispielsweise mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen, lässt sich die Varianz der hergestellten Teile von rein optischen Veränderungen auch noch um haptische Modifikationen erweitern.

In Mould Decoration "IMD" Grundsätzlicher Prozessablauf

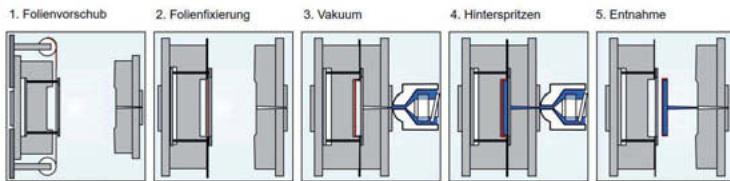


Bild 2: Grundsätzlicher Prozessablauf beim IMD-Verfahren

Auf der Seite der Folienentwicklung wurden in den letzten Jahren enorme Fortschritte erzielt. Dies betrifft neben optischen Verbesserungen und dem Einsatz von Lichteffekten auch die Möglichkeit höhere Verstreckungsgrade zu realisieren. In Kombination mit auf Folie gedruck-

ten Leiterbahnen können zudem elektrische Signale verarbeitet werden [2]. Einsatzgebiete für solche Folien sind beispielsweise Oberflächen mit integrierten (Touch-) Sensoren.

Neben rasanten Weiterentwicklungen auf der Folienseite steht auch die Prozessintegration im Fokus der Entwicklungen. So werden die per IMD-Verfahren dekorierten Bauteile heute direkt innerhalb der Spritzgießmaschine weiterverarbeitet. Dazu gehört neben der Trennung und Entsorgung von Angusslaschen insbesondere die Härtung des Lacks sowie die Reinigung der Bauteile. Auch die Überprüfung von Qualitätsmerkmalen bereits bevor das Bauteil die Spritzgießmaschine verlässt, ist in die Fertigungszeile integriert.

Die Prozessintegration bietet enorme Vorteile bezüglich des Platzbedarfs. So wird in einem modernen System die Breite der Spritzgießmaschine um weniger als einen Meter vergrößert. Auf dieser zusätzlichen Stellfläche werden alle nötigen Nachbehandlungen für das Bauteil realisiert. Aus der Maschine kommt nach jedem Zyklus ein vollständig dekoriertes, ausgehärtetes, gereinigtes, markiertes und qualitätsgeprüftes Bauteil.

Diese extreme Form der Integration auf engstem Bauraum bietet verschiedene Vorteile. Zeit- und Kostenaufwändiges Teilehandling wird vermieden. Die Gefahr von Verunreinigungen und Beschädigungen wird minimiert und die Regelstrecke zwischen Erkennung von Fehlern und der Einleitung von Gegenmaßnahmen wird auf wenige Minuten reduziert. Die Kosten für Lagerung und Transport gehen gegen Null. Ermöglicht wird dies durch den Einsatz von 6-Achs-Robotern, die mit vergleichsweise aufwändigen Greifern alle Handlingaufgaben innerhalb der Schutzverkleidung der Spritzgießmaschine auf engstem Raum realisieren. Trotz der Investition in die Automatisierung sind die Investitionskosten beispielsweise im Vergleich zur Investition in eine Lackieranlage sehr gering.

Ansicht der Bediengegenseite Moderne IMD-Anlage im Schema

 Sumitomo
DEMAG

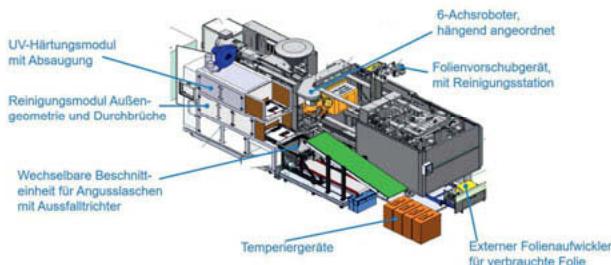


Bild 3: Schema einer modernen IMD-Anlage - Minimale Verbreiterung der Bediengegenseite einer SGM



Bild 4: Umsetzung des Konzepts an einer Systec Servo 210 (2.100kN) zur Produktion von dekorierten Touch-Displays

Für den Spritzgießer liegt neben der Reduzierung des Produktionsrisikos ein wesentlicher Vorteil darin, dass die Wertschöpfung für dekorierte Teile durch Integration in den Spritzgießprozess im eigenen Haus bleibt.

4. Fazit

Oberflächendekorierte Bauteile tragen in vielen Anwendungsgebieten zur Individualisierung und zur Wertsteigerung von Kunststoffbauteilen bei. Durch Weiterentwicklungen auf der Seite der eingesetzten Folien konnten die Möglichkeiten und Einsatzgebiete weiter ausgebaut werden. Gleichzeitig wurden sowohl das Produktionsrisiko, die Ausschussraten und besonders auch die Ausschusskosten durch Integration von Verfahrensschritten in den Spritzgießprozess deutlich reduziert. Auch der Aufwand für Transport, Lagerung und Verpackung sinken dramatisch. Moderne Anlagen zur Oberflächendekoration im IMD-Verfahren integrieren alle dem Spritzgießprozess nachgelagerten Prozessschritte auf minimaler Produktionsfläche. Die damit einhergehende Senkung der Produktions- und Stückkosten macht IMD dekorierte Bauteile für viele Branchen Attraktiv. Neben den klassischen Anwendungen im Interieur Bereich von Automobilen sind dies aktuell hauptsächlich Anwendungen im Bereich der Konsumgüter- und Elektronik-Industrie.

- [1] Homepage der LEONHARD KURZ Stiftung & Co. KG, Fürth; abgerufen am 06.12.2017
- [2] Homepage der PolyIC GmbH & Co. KG, Fürth; abgerufen am 06.12.2017

Effizienz im Greiferbau

EOAT construction efficiency

P. Hill, AGS Automation Greifsysteme Schwope, Bergisch Gladbach

Der Kunststoffspritzguss in all seinen Varianten und Anwendungsgebieten hat in den vergangenen Jahrzehnten eine enorme Entwicklung durchlebt. Eine der Facetten dieser Entwicklung ist der Einzug der Robotik mit all seinen Chancen und Anforderungen.

Obwohl es immer noch viele ‚fallende Teile‘ gibt, kann man sich den Spritzguss ohne Entnahmeroboter kaum noch vorstellen. Auch in Bereichen in denen Kunststoffteile per Auswerfer entformt werden und danach aus der Form fallen sieht man heute zunehmend Roboter die Einleger in die Spritzgussform einbringen oder die Spritzlinge aus einer Kavität in eine andere Umsetzen, so dass auch dort vermehrt Roboter zum Einsatz kommen.

Im Allgemeinen wird heute pro Spritzgusswerkzeug ein Entnahmegreifer gefertigt der dem Werkzeug fest zugeordnet ist.

Flexible Greifsysteme die sich auf Knopfdruck auf unterschiedliche Werkstücke anpassen existieren zwar, sind aber nach wie vor Exoten.

Die alltägliche Anforderung an den Greiferbau ist also mit möglichst geringem Aufwand immer neue Greifer zu fertigen, die folgende Eigenschaften haben müssen:

- Geringes Gewicht (der Roboter gibt das Maximum vor)
- Gute Einstellbarkeit (Montage und Inbetriebnahme müssen kurz sein)
- Hohe Festigkeit (Abzugskräfte)
- Geringe Kosten

Dies zusammen sind die Parameter an denen sich der Greiferbau messen lassen muss.

1. Historie

Die ersten Entnahmegreifer waren oft Bleche oder Platten mit aufgebohrten Saugnäpfen, die vor allem eine Eigenschaft hatten: Sie waren mit den Mitteln eines Werkzeugbaus leicht her zu stellen. Parallel dazu wurden erste Systemkomponenten zum Greiferbau verwandt, vor allem um dreidimensionale Strukturen zu erzeugen, was mit der Plattenbauweise sehr aufwändig ist. Zur Verfügung standen damals vor allem Rundrohrsysteme und Konstruktions-

profile mit Nutensteinen, wie sie heute immer noch oft im Vorrichtungsbau und in der Arbeitsplatzgestaltung eingesetzt werden. Typische Markennamen sind Bosch, Item oder Rose & Krieger für Nutensteinprofile bzw. für Rundrohrsystem.

Noch heute gibt es Anwendungen für Greifer die auf Rundrohren basieren, auch wenn sie weitgehend verdrängt wurden. Rundrohre haben den entscheidenden Vorteil dass der Anwender praktisch frei in der Auswahl der Materialien ist. Es können sowohl für leichte Anwendungen Aluminium Rohre verwendet werden als auch für korrosive Umgebungen Kunststoff- oder Edelstahlrohre verwandt werden.

Die Gründe warum man diese Technik heute im Spritzguss kaum noch sieht liegen allerdings auf der Hand. Das Verhältnis Verwindungssteifigkeit zu Gewicht ist ungünstig und das Einstellen einer Rundrohrklemmung dauert in der Montage und vor allem auf der Maschine deutlich zu lange. Zu dem tragen die Materialvorteile im Spritzguss kaum, da die weitaus meisten Applikationen den Einsatz von Aluminiumprofilen zulassen.

2. Vor- und Nachteile der Systeme

Der Greiferaufbau auf einer gefrästen Grundplatte bietet den Vorteil dass durch die Auswahl einer geeigneten Grundplatte die Festigkeit der Konstruktion praktisch beliebig wählbar ist. Zudem können Anwendungen realisiert werden die eine extrem hohe Genauigkeit erfordern, was z.B. beim Umspritzen von elektrischen Kontakten notwendig sein kann. Auch ein Profil-basiertes Greiferaufbaukastensystem wie das **PreciGrip** System von **AGS** kommt bei Toleranzfenstern im Positionieren kleiner als 0,02mm an Grenzen.

Problematisch ist natürlich das hohe Gewicht dieser Konstruktionen. Hier kann man durch gezieltes Ausfräsen schwachbelasteter Partien entgegenwirken. Ein weiteres, großes Problem ist die Einstellbarkeit, die nicht gegeben ist. Der Praktiker weiß das der letzte Schliff der Justage immer auf der Maschine stattfindet und er weiß auch das man ohne diese Einstellung sehr häufig nicht in die Produktion gehen kann. Letzten Endes entscheidend ist aber wohl der hohe Konstruktions- und Fertigungsaufwand der diese Technik weitgehend auf Präzisionsanwendungen beschränkt.

Folgerichtig war also die Entwicklung des ersten nutensteinbasierten Greiferaufbaukastens durch Franz Schwöpe im Jahr 1984.

Mit diesem System, das auf gewichtsoptimierten Nutensteinprofilen und speziell dafür entwickelten Verbindern basierte, konnte die Verwindungssteifigkeit im Verhältnis zum Gewicht verbessert werden und die Montage wurde vereinfacht.

Der größte Vorteil für den Anwender lag allerdings darin, dass der Konstruktionsaufwand durch weitgehende Standardisierung der Komponenten enorm zurückging.

Dieses System wurde kontinuierlich weiterentwickelt und naheliegender Weise hat es sich im Verlauf von zwei Jahrzehnten weltweit etabliert und wird heute von den meisten Anbietern verwendet.

Die AGS GmbH ist im Jahr 2011 mit einem weiterentwickelten Baukastensystem auf den Markt gegangen, das sich durch einen weiteren Fortschritt auszeichnet. Das AGS System namens **PreciGrip** verzichtet erstmals im profilbasierten Greiferbau auf Nutenstein. Die Verbindungstechnik basiert hier zentral auf Schwalbenschwanzklemmungen, wodurch eine höhere Präzision in Montage und Inbetriebnahme erreicht werden konnte. Durch den Verzicht auf Nuten in den Strangpressprofilen konnte erneut das Verhältnis von Verwindungssteifigkeit zu Gewicht verbessert und die Montagezeit verkürzt werden.

Wie ist nun der heutige Stand der Technik?

Die bestehende Technik in der Konstruktion von Kunststoff-Spritzguss-Entnahmegreifern ist weitgehend dominiert von Nutenstein- und **PreciGrip**-System.

In den letzten Jahren gewannen aber neue Fertigungstechniken und neue Materialien an Attraktivität und genießen mehr und mehr Zuspruch.

Der 3D-Druck und verschiedene Laser-Sinter-Verfahren gaben der Branche einen Schub. Diese Techniken erlauben nun formschlüssige Aufnahmen mit integrierten Vakuumkanälen und in die Kontur einschraubbaren Saugern, so dass sich die Verschlauchung auf ein Minimum reduziert. Das Gewicht lässt sich auch hier optimieren, z.B. durch integrierte Wabenstrukturen.

Aktuell ist zwar der Konstruktionsaufwand zusammen mit den Maschinenkosten noch deutlich höher als bei vergleichbaren profilbasierten Konstruktionen, aber diese Technik lässt sich inzwischen aus dem modernen Greiferbau nicht mehr wegdenken.

Greifsysteme aus verklebten Kohlefaserprofilen und/oder Platten zeichnen sich durch ein noch geringeres Gewicht als Aluminium-Profil-Greifer aus, bei bekannt hoher Belastbarkeit.

Auch hier schlagen allerdings die Probleme zu Buche die aus der Plattenbauweise und dem 3D Druck bekannt sind – hoher Konstruktionsaufwand und kaum Möglichkeiten bei der Inbetriebnahme Einstellungen an zu passen.

3. Aktuelle Herausforderungen und Lösungsansätze

Wie in jeder technischen Disziplin ist die Entwicklung die bisher geschildert wurde kein Selbstzweck, sondern durch die Anwendung des Kunden getrieben.

Die maßgeblichen Anforderungsbereiche die wir bisher betrachtet haben waren

- Das Gewichtslimit des Roboters
- Die Einstellbarkeit, insbesondere bei der Inbetriebnahme
- Die Verwindungssteifigkeit
- Die Präzision
- Der Preis

Die Anforderungen gehen allerdings weiter und drängen nach weiteren Entwicklungsschritten, denn sowohl die Qualitätsanforderungen als auch der Kostendruck in der Produktion steigen. Letztlich muss die Effizienz im Greiferbau verbessert werden, und zwar entlang der gesamten Produktionskette. Hier gibt es mehrere Ansatzpunkte.

Effizienz beim Anfragen eines Greifsystems

Im technischen Einkauf wird selbstverständlich auf den Preis Wert gelegt. Eine einfache Möglichkeit die Preisgestaltung positiv zu beeinflussen ist z.B. weniger Kosten beim Lieferanten zu erzeugen. Frühzeitig im Projekt möglichst vollständige Daten zur Verfügung zu stellen vereinfachen die Preisstellung und die Konstruktion und gibt dadurch dem Greiferauer mehr Spielraum. Zudem wird der Angebotsprozess beschleunigt.

Effizienz in der Greiferkonstruktion / Komponentenauswahl

Es ist in der Konstruktion üblich auf Online-Datenbanken von Komponentenherstellern zurück zu greifen und fertige Modelle in die eigene Entwicklung ein zu binden. Die Arbeit kann jedoch vereinfacht werden indem man nicht nur auf Komponenten, sondern auf Funktionsmodule zurückgreift die online bereit gestellt sind.

Die Komponentenauswahl kann wesentlich vereinfacht werden indem man auf eine Konfigurationssoftware zurückgreift, in unserem Fall das Programm **CAD-Grip**, wie sie bei Pneumatik oder Lineartechnik Systemlieferanten schon länger gängig sind. Der Vorteil liegt darin das nur passende Komponenten vorgeschlagen werden und die Zeit zum Suchen entfällt.

Effizienz im Greiferbau

Es hat sich bewährt eine Schulung des Personals im Greiferbau beim Hersteller in Erwägung zu ziehen. Das Resultat ist nicht nur mehr Effizienz im Greiferbau durch übernommenes Knowhow. Vielmehr spiegelt sich das Ergebnis in mehreren Facetten wieder. Erreichbar sind z.B. Reduktion der Anzahl der eingesetzten Komponenten, Verlängerung der Wartungsintervalle, Verringerung des Gesamtgewichts (und damit Verlängerung der Lebensdauer der Roboterachsen) usw.

Effizienz in der Inbetriebnahme

Der Greiferbau birgt eine wesentliche Möglichkeit die Kosten eines Projekts zu senken der oft vernachlässigt wird: Die Stillstandszeit der Spritzgießmaschine während der Inbetriebnahme.

Hier kommt der wesentliche Vorteil eines Greiferbaukastensystems zum Tragen. Durch die freie und leichte Einstellbarkeit aller Komponenten bringt auch ein unvorhergesehenes Problem die Inbetriebnahme nicht zum Erliegen, was das größte Problem wäre und Kosten verursachen kann die weit über den Kosten des Greifers liegen.

Effizienz durch Einsatz von Wechselsystemen

Manche Anwender arbeiten ohne Wechselsystem (Manuell/Automatisch) am Roboter. Die Argumente sind im Allgemeinen die Gewichtersparnis und der geringere Materialaufwand. Die Gewichtersparnis kann tatsächlich relevant sein, der Materialaufwand hingegen oft nicht, denn eine Standard-Grundplatte für einen manuellen Wechsler (gleich welches Fabrikat) kostet im Allgemeinen weniger als eine neutrale Grundplatte mit Schraublöchern und Passbohrungen an zu fertigen.

Effizienz in der Dokumentation / Ersatzteilhaltung

Dokumentationen haben oft eines gemeinsam: Wenn man sie braucht sind sie nicht zur Hand. Hier geht die **AGS** einen neuen Weg und legt die Dokumentationen (auf Kundenwunsch) in einer Privat-Cloud ab, so dass sie jederzeit abrufbar ist. Ab nächstem Jahr kommt eine wesentliche Vereinfachung hinzu. Die Typenschilder werden mit QR-Codes

ausgestattet, so dass beispielsweise ein Instandhalter die Dokumentation am Greifer mittels eines Smartphones direkt abrufen kann. So kann zum Beispiel die Ersatzteilliste aufgerufen werden und man kann sogar ein Ersatzteil sofort nachbestellen (bzw. das Angebot anfordern). Da auch bestellte Komponenten mit QR-Codes ausgestattet werden gilt Dasselbe natürlich für die Ersatzteilhaltung. Mitgelieferte QR-Codes am Fach/Regal liefert die **AGS-APP** den direkten Zugang zu allen Informationen bezüglich des Bauteils inklusive Anfrage/Bestellfunktion.

Effizienz in der Industrie 4.0

Eines der beherrschenden Themen in der Industrie 4.0 ist die Datenerfassung. Hier kann der Greiferausbau insbesondere durch die Identifikation der wechselbaren Greifer, z.B. durch RFID Technik helfen. Damit aber nicht genug. Selbstverständlich kann man hier auch der übergeordneten Steuerung Informationen über die Anzahl bisher gefahrene Zyklen oder die aktuelle Reaktionszeit der Wirkelemente, deren Änderung oder der Überschreitung von Grenzwerten liefern. Dadurch erschließen sich neue Möglichkeiten, z.B. in der vorbeugenden Instandhaltung.

Neue Materialien im Greiferausbau

Sinterkomponenten wurden schon als Ergänzung des Greiferausbaukastens erwähnt. Die neuesten Technologien öffnen aber auch hier neue Optionen. Inzwischen ist es auch möglich die weitgehend frei geformten Komponenten mit Faserverstärkung her zu stellen. Die dadurch erzielbare Festigkeit lässt eine weitere Reduktion des Gewichtes zu.

Auch wenn hier bisher nur Prototypen zur Verfügung stehen zeigt sich hier doch ein neuer Weg im Greiferausbau der in Zukunft eine größere Rolle spielen könnte.

Die Nachteile des konventionellen Einsatzes von Kohlefaserwerkstoffen wurden bereits erwähnt. Was ist aber die Lösung für den Anwender wenn der Einsatz von CFK aus Gewichtsgründen unumgänglich ist?

Der **AGS** Ansatz ist folgender:

Wir kombinieren den Vorteil von CFK mit den Vorzügen des Greiferausbaukastens.

Standard-Kohlefaserprofile werden an den notwendigen Verbindungspunkten mit **PreciGrip** Verbindern bestückt, so dass alle 2300 Systemkomponenten an jeder notwendigen Stelle

angebracht werden können, man weder bei der Montage noch bei der Einstellbarkeit Kompromisse machen muss und dabei den dabei den Gewichtsvorteil voll nutzen kann.

Durch den Einsatz von Standard-Kohlefaserprofilen ist ein gutes Preis-Leistungsverhältnis und gleichbleibend hohe Qualität gesichert.

Man kann zusammenfassen dass der Greiferbau nicht still steht, sondern kontinuierlich neue Entwicklungen hervor bringt und dass es letztlich eine Vielzahl an Möglichkeiten gibt die Effizienz im Spritzguss durch geschickten Einsatz der Greiftechnik zu erhöhen.

Automationslösungen für kleine Losgrößen

Dipl.-Wirtschaftsingenieur (BA) **Andreas Reich**,
ARBURG GmbH & Co KG, Lossburg

Warum ist das von Ihnen referierte Thema aus Ihrer Sicht bedeutungsvoll?

Mein Vortrag „Automationslösungen für kleine Losgrößen“ zeigt, wie sich Spritzgießprozesse trotz immer kleinerer Losgrößen und kürzerer Produktlebenszyklen effizient und flexibel automatisieren lassen. Besonders unserer Kunden aus der Automobilindustrie stehen vor einer auf den ersten Blick widersprüchlichen Aufgabe: Einerseits müssen sie für verschiedene Kunden ähnliche Produkte und somit eine hohe Variantenvielfalt produzieren und andererseits ist aus Gründen von Kostendruck und Qualität eine Automation unerlässlich.

Was konkret ist neu?

In der Automation gibt es zwei Trends: Zum einen steigt die Komplexität der Anlagen, zum anderen sind sehr flexible Automationslösungen gefragt. Lösungen, die der Branche noch großes Potenzial bieten, sind z. B. innovative Aufbereitungs-möglichkeiten für Einlegeteile über Schiebetisch, Drehtisch oder Tray sowie eine möglichst flexible Teileaufbereitung über Anyfeeder. Außerdem gehe ich in meinem Automationsvortrag darauf ein, wie sich dank Modularität und Standardisierung Rüstzeiten minimieren lassen.

Welche industriellen Anwendungen sind relevant?

Relevant sind vor allem die Fälle, in denen eine Spritzgießmaschine oder Fertigungszelle nicht mit einem einzigen Produkt voll ausgelastet ist. In erster Linie sind hier – besonders in Verbindung mit Einlegeteilen – die Bereiche Automotive und Elektronik zu nennen, aber auch Verpackung und Investitionsgüter.

Welche Einsparpotenziale bzw. Optimierungen sind denkbar?

Einsparpotenziale Kosten sehe ich vor allem bei der Minimierung von Rüstzeiten und Reduzierung von Personalkosten. Gleichzeitig kann eine flexibel ausgelegte und gut durchdachte Automation die Teilequalität verbessern und ein höherer OEE-Kennwert (Overall Equipment Efficiency) erreicht werden.

Inhalte Vortrag: „Automationslösungen für kleine Losgrößen“

- Möglichkeit der Variantenvielfalt dank Modularität
- Erfolge bei der Rüstzeitminimierung
- Einsatz flexibler Roboterzellen
 - ➔ Modularität, 6-Achs-Roboter
- Anforderungen an die Mensch-Roboter-Kooperation
 - ➔ Sicherheitsaspekte, Robot- und Greifertechnik

Neue Partikelschaumlösungen: Leicht, funktionsintegriert und dampffrei gefertigt

J. Vetter, M. Lucht, FOX Velution GmbH, Nürnberg

Kurzfassung

Partikelschäume haben sich mit ständig wachsender Werkstoffvielfalt als eigenständige Materialgruppe etabliert und dringen zunehmend in das thermisch-mechanische Anwendungssegment komplexer technischer Applikationen ein.

Neue Prozesse auf Basis mittelwelliger IR-Strahlung und hochdynamisch-variothermer Kavitäten ermöglichen – ergänzend zur konventionellen, dampfbasierten Produktion – die energieeffiziente Verarbeitung (selbst hoch-)temperaturbeständiger Thermoplaste sowie eine werkzeugfallende Fertigung funktionsintegrierter Leichtbaulösungen mit lastgerechten Verstärkungen, Design-/Haptikoberflächen und Einlegern aller Art.

1. Partikelschaum: Vom Commodity zum Konstruktionswerkstoff

Polymerschäume sind mit einem globalen Marktvolumen von 19,1 Mio. t (2013) in einer Vielzahl von Anwendungsgebieten vertreten; bis 2019 erwartet man ein kontinuierliches Wachstum um etwa 4,8 % p.a. auf 25,3 Mio. t [1].

Neben den in der Gesamtheit deutlich dominanten PU-Systemen (Anteil in 2013: ca. 65%), die meist aus reaktiven Komponenten verarbeitet werden, kommen vermehrt thermoplastische Partikelschäume zum Einsatz. Sie bestehen aus Schaumperlen, besitzen geringe Dichten im Bereich 15..80(..200) g/l und zeichnen sich durch sehr gute spezifische mechanische Eigenschaften, ein (i.d.R.) hohes thermisches Dämmvermögen sowie enormes Leichtbaupotenzial aus [2].

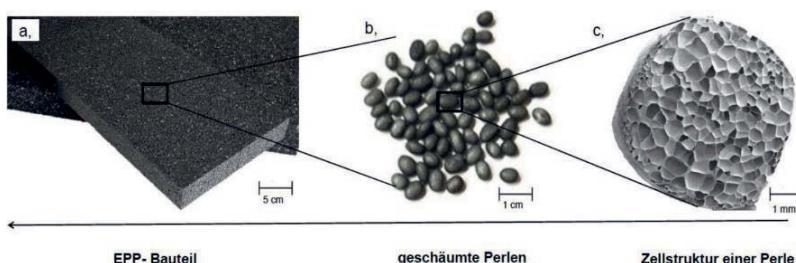


Bild 1: 'Hierarchischer' Aufbau eines EPP-Bauteils (a) aus geschäumten Perlen (b) und ihrer typischen Zellstruktur (c) [3]

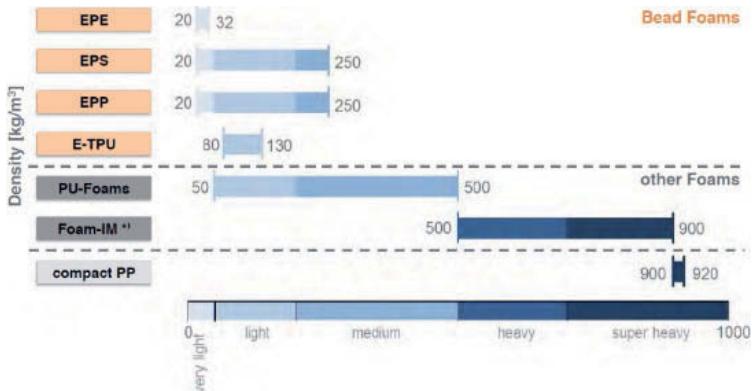


Bild 2: Dichte kommerziell eingesetzter Partikelschäume in Relation zu anderen Schaumlösungen mit Kunststoffen und zu kompaktem Polypropylen [4]

Die Verwendung expandierfähigen bzw. expandierten Polystyrols wurde durch die I.G. Farben AG bereits 1950 zum Patent angemeldet und von der BASF AG zwei Jahre später unter dem Handelsnamen Styropor® auf der Düsseldorfer Kunststoffmesse vorgestellt. In 2011 wurden allein in Europa 1,8 Mio. Tonnen EPS verbraucht; hauptsächlich für Dämm- und Verpackungsapplikationen [5].

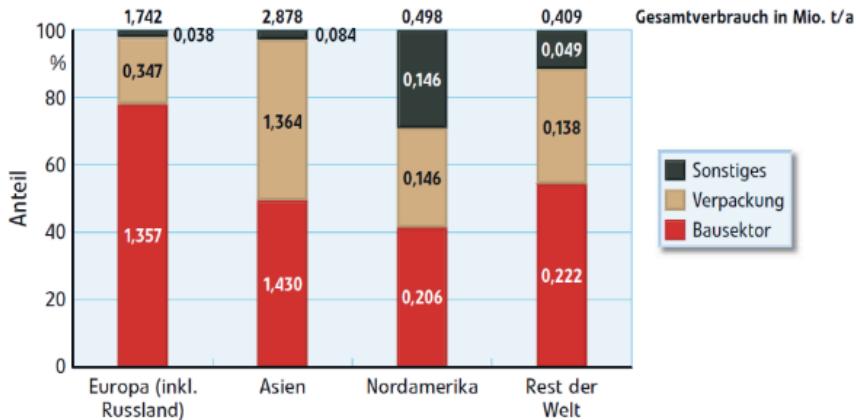


Bild 3: Weltweiter Jahresverbrauch von EPS, nach Anwendungsgebieten gegliedert [5]

Die Produktion technischer Partikelschaumformteile hat sich in den letzten Jahren verstärkt entwickelt, wobei die Markteinführung von E-TPU-Typen für Sportschuhe durch die BASF SE (*Infinergy*[®]) und die HUNTSMAN Int. LLC (*smartLite*[®]) einen Innovationsschub bei Herstellern von Werkzeugen, Befüllsystemen und Komplettanlagen mitinitiierte.

Neben der Verarbeitungstechnik entwickeln sich auch die Anwendungen von 'nur' geometrisch passenden 'Schutzhüllen' (Verpackungen) oder Ein-/Anbauelementen (im Automobil- bzw. Gebäudesegment) zur Massenminimierung, Wärmedämmung und Absorption von Stoßeinwirkungen zu funktionsintegrierten Lösungen weiter. Hier spielen speziell strukturierte oder 'verhautete' Oberflächen, Verstärkungen (z.B. lastgerecht umflochtene und anschließend mittels RTM infundierte Schaumkerne) sowie funktionale Einleger (elektronische Komponenten, Befestigungselemente, Medienführungen, ...) eine zunehmend bedeutende Rolle.

Parallel sind eine Reihe neuartiger Partikelschaumsysteme entwickelt oder bereits kommerzialisiert worden, die das bisher genutzte Auslegungsfenster (thermo-mechanische Lastkollektive) durch den Einsatz sog. technischer oder gar HT-Thermoplaste erheblich erweitern. Beispielhaft seien hier PMI (*Rohacell*[®], EVONIK Industries AG), E-PBT (Polymer Engineering, Universität Bayreuth), und E-PET (*ArmaFORM*[®], Armacell Benelux S.A.) genannt.

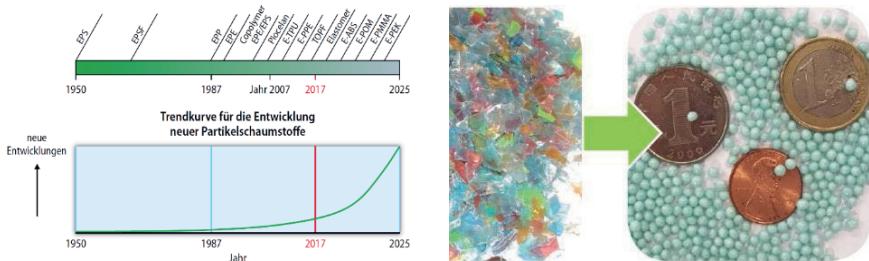


Bild 4: Chronologische Entwicklung neuer Partikelschäume (links) [6] sowie expandierbare (mit Treibmittel beladene) ArmaFORM[®]-Schaumperlen aus rezykliertem PET (rechts) [7]

Auch auf Basis nachwachsender Rohstoffe respektive mit biologisch abbaubaren Bestandteilen gibt es mittlerweile spezielle Partikelschäume, wie *ecovio*[®] (BASF SE) oder die E-CP- und E-CAB-Typen des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie (ICT).

2. Konventionelle, dampfbasierte Verarbeitung

Traditionell lassen sich thermoplastische Partikelschäume mit Wasserdampf verarbeiten. Beim Vorschäumen, einem zyklischen Schüttgutprozess, wird produktionsseitig mit Treibmittel ausgestattetes bzw. beladenes Mikrogranulat erwärmt, wodurch die dann erweichte Matrix zu einer

zellulären Struktur aufschäumt. Im Anschluss findet oft eine Auslagerung von wenigen Stunden bis einigen Tagen statt, um durch Diffusionsprozesse die Materialeigenschaften für die nachfolgenden Prozessschritte zu optimieren.



Bild 5: Prinzip des dampfbasierten Vor-/Weiterschäumens von EPS (links) [8] sowie großer Dampfvorschäumer zur industriellen Serienproduktion von EPS-Halbzeugen für die Gebäudedämmung (rechts) [9]

Die eigentliche Formgebung erfolgt kavitätsgebunden, wobei lokal vorgeschaumte (z. B. EPS) oder rohstoffherstellerseitig beigestellte (da ohne separate Druckbeladung/-füllung nicht treibfähige) Schaumperlen (wie bei EPE, EPP oder E-TPU) über spezielle Injektoren in den Forminnenraum eingebracht und dort durch erneute Dampfeinwirkung oberflächlich plastifizieren und miteinander schweißen. Nach einer indirekten Kühlung mit Wasser kann das nasse Bauteil entformt und der Konditionierung und/oder Weiterverarbeitung zugeführt werden.



Bild 6: Prinzip des dampfbasierten Formschäumes von Partikelschäumen am Beispiel einer automobilen Bordwerkzeughalterung aus EPP (links) [4] sowie aktueller Formteilautomat für die industrielle Serienproduktion (rechts) [10]

Herausfordernd wird das Ganze bei Partikelschäumen auf Basis technischer Thermoplaste mit Erweichungs- bzw. Kristallitschmelztemperaturen oberhalb von etwa 200 °C. Durch solche Typen lassen sich zwar erweiterte thermische Einsatzbereiche erschließen, allerdings werden dafür deutlich erhöhte Dampfdrücke von über 20 bar benötigt.

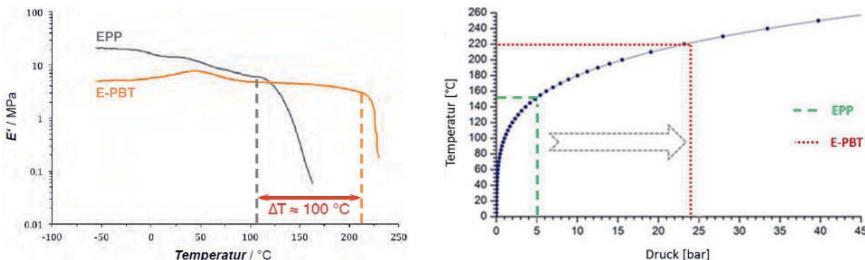


Bild 7: Temperaturabhängige Steifigkeit (links) und Dampfdruckkurve (rechts) bei der konventionellen Verarbeitung von EPP und E-PBT [11]

3. Prozess-, Werkzeug- und Anlagentechnik für das trockene Vor-/Formschäumen

Ein ganzheitlicher Fertigungsansatz mit zwei komplett trockenen Prozessen hingegen ist von einem deutsch-österreichisch-schweizerischen Konsortium zunächst für den Hochleistungs partikelschaum *Rohacell®* (PMI) entwickelt (2012 .. 2014) und nachfolgend durch systematisches 'Cross-border Engineering' für verschiedene Partikelschäume adaptiert/optimiert worden.



Bild 8: Holistischer Lösungsansatz für Leichtbauapplikationen (links) sowie Schlüsselpartner schaften der FOX Velution GmbH zur Weiterentwicklung und Industrialisierung dampffreier Verarbeitungsprozesse (rechts)

Das Vor- bzw. Weiterschäumen findet dabei im Durchlauf statt und nutzt die gezielte Absorption von mittelwelliger IR-Strahlung zur ebenso 'schlagartigen' wie (über das Volumen) gleichmäßigen Expansion treibmittelbeladener Substrate (Mikrogranulat, Mahlgut oder Schaumperlen).



Bild 9: Prinzip des strahlungsbasierten Vor-/Weiterschäumens (links) [12] sowie erste Technikumsanlage an der Neuen Materialien Bayreuth GmbH (rechts) [13]

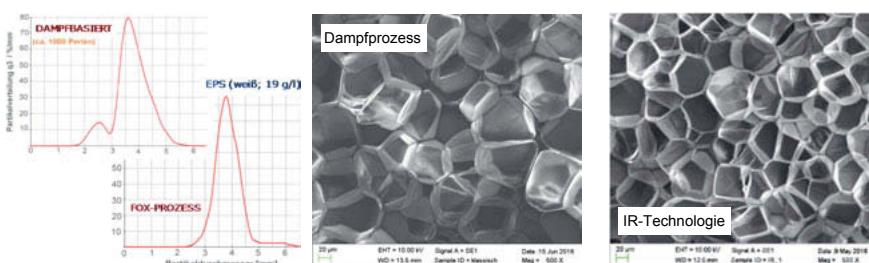


Bild 10: Vergleich von konventionellem und strahlungsbasiertem Vorschäumen ungefärbten PS-Mikrogranulats (SUNPOR® A 245 SE, SUNPOR Kunststoff GmbH) hinsichtlich Größenverteilung der erzeugten EPS-Schaumperlen (links) [3] sowie ihrer Zellmorphologie (Mitte: Dampfprozess, rechts: IR-Technologie) [14]

Bei identischen Ausgangsstoffen lassen sich somit deutlich verkürzte Durchlaufzeiten erreichen, nachfolgende Konditionierungen weitgehend (bis vollständig) eliminieren und eine deutlich engere Größenverteilung der produzierten Schaumperlen sicherstellen. Darüber hinaus ermöglichen gezielte Variationen der Prozessparameter eine von der definierten Vorschäumdichte weitgehend entkoppelte Morphologieausprägung mit z.T. signifikant verbesserten Eigenschaftsprofilen hinsichtlich Steifigkeit, Druckfestigkeit und Wärmedämmung.

Die weitere Verarbeitung kann entweder auf konventionellen Formteilautomaten erfolgen oder in einem ebenfalls dampffreien Schritt. Hier stellen hochdynamisch-variotherme Kavitäten der Werkzeugbau Siegfried Hofmann GmbH der technologische Schlüssel dar: Sie ermöglichen eine schnelle, genaue und reproduzierbare Temperierung konturgebender Werkzeugflächen ohne jegliche Zwangskonvektion im Forminnenraum oder irgendwelche Dampf-/Luftdüsen in dessen Wandungen.

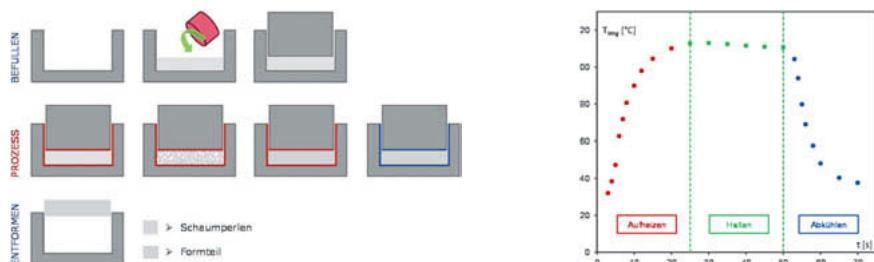


Bild 11: Prinzip des dampffreien Formschäumens in hochdynamisch-variothermen Kavitäten (links) sowie exemplarischer Temperaturverlauf am werkzeugintegrierten Sensor für eine beidseits vollflächig folierte EPS-Platte ($d = 10 \text{ mm}$) mit einem variothermen SINGLE-Wassertemperiergerät erster Generation (rechts)



Bild 12: Kunststoffmodell eines 3D-gedruckten 'Variotherm'-Umformwerkzeugs mit verzweigtem Kanalnetz der Flächentemperierung (links) [15] sowie servo-elektrisch angetriebener Formenträger der FILL Ges.m.b.H. mit hochdynamisch-variothermen Stammwerkzeug der Werkzeugbau Siegfried Hofmann GmbH und variothermer Öltemperieranlage zum dampffreien Formschäumen im Partikelschaumtechnikum der FOX Velution GmbH (rechts)

Dieser primär auf Wärmeleitung (in bzw. über den Schaum) basierende Erwärm- und Schweißvorgang ist prinzipbedingt zwar auf kleine bis moderate Bauteilquerschnitte limitiert (material- und dichteabhängig liegt die entsprechende 'Komfortzone' zwischen 2,5 mm und ca. 15..25 mm). Dem gegenüber steht eine Reihe verfahrensbedingter Vorteile hinsichtlich anwendungsspezifisch abform-/-verhautbarer Oberflächen(-bereiche) durch bloße Anpassung des örtlich definierten Zeit-Temperatur-Druck-Profilen oder (selbst wiederholt) austauschbare Struktureinleger.

4. Applikationspotenzial lokal funktionalisierter Materialverbunde

Auch im konventionellen Fertigungsprozess zur Funktionsintegration versucht, nachgeschaltete Fügeschritte durch Verwendung von Inserts zu reduzieren. Als Beispiele seien hier die werkzeugfallende Produktion automobiler Innenraumkomponenten mit EPP-Kernen oder die stetig mit zusätzlichen Features ausgestatteten Schutzhelme auf Basis von EPS-Schalen genannt.



Bild 13: Ausgezeichnete Gemeinschaftsentwicklung einer durch Einlegekomponenten im Formschäumen funktionsintegrierten Mittelarmlehne (spritzegegossene PP-Teile, umgeformte TPO-Folie und EPP-Kern, links) [4] sowie neuartiger Fahrradhelm mit EPS-Korpus, PC-Außenschale und vielen Funktionselementen [16]

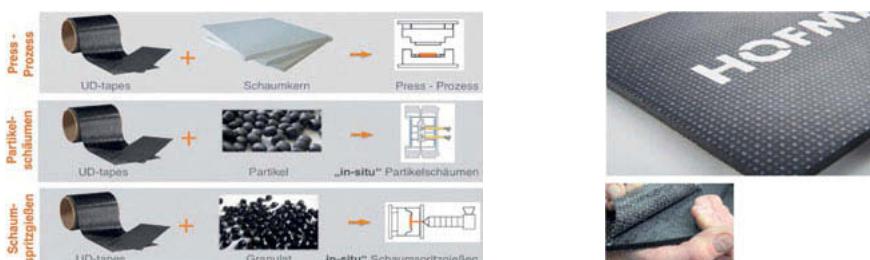


Bild 14: Konzepte zur konventionellen FVK-Produktion (Pressen, dampfbasiertes Formschäumen, Schaumspritzgießen) mit thermoplastischen Schaumkernen (links) [4] sowie 'In-situ'-Fertigung einer beidseits vollflächig verstärkten PP-GF-Sandwichstruktur mit EPP-Hybridschaumkern (rechts)

Bei der lastgerechten Verstärkung tragender Strukturen kommen die bisher bekannten Ansätze – insbesondere bei geschlossenen Designs – jedoch an prozessbedingte Grenzen, weil vollflächige Tapes oder Laminate meist nicht dampfdurchlässig sind. Gleiches gilt für beidseitig folierte Komponenten, die Verwendung wasser-, temperatur- oder druckempfindlicher Dekore und das

Einschäumen von empfindlicher Sensorik oder Elektronik. Hier eröffnet die trockene Formgebung in hochdynamisch-variothermen Kavitäten vollkommen neue Möglichkeiten der 'In-situ'-Produktion lokal funktionalisierter Sandwichlösungen.



Bild 15: Mit Naturstoffen (Kork, Blatt und Flachs) 'in-process' dekorierte EPS-Platten (links) sowie dampffrei-werkzeugfallend gefertigter Elektronikdemonstrator 'FilliCard' für die Fill Ges.m.b.H. (rechts) [17]

5. Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit

Bezogen auf das Volumen als wesentliche Größe beim konstruktiven Werkstoffeinsatz zeichnen sich Partikelschäume rein produktionsseitig durch eine hervorragende Ökoeffizienz aus. Allerdings sollten bei dieser Werkstoffklasse weitere 'Beiträge' zum Energieverbrauch – durch Transport, Verarbeitung und Gebrauch – mit in die Bilanz einbezogen werden.

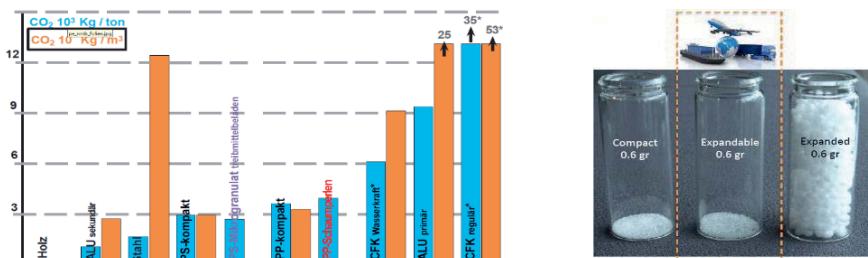


Bild 16: CO₂-Emission bei der Rohmaterialproduktion verschiedener Werkstoffe (links) [18] sowie Volumenvergleich von (un-)beladenem PS-Mikrogranulat mit vorexpandierten EPS-Schaumperlen (rechts) [4]

Bei der Wertschöpfungskette für Produkte aus treibfähigen Partikelschäumen ist ein Transport von Mikrogranulat bzw. möglichst kompakten Schaumperlen vorzuziehen, damit das Schüttgut

beim Teileproduzenten vor Ort auf anwendungsgerechte Dichten vor-/weiterexpandiert werden kann und dadurch 'Volumen-/Lufttransporte' vermieden werden.

Vergleicht man das dampfbasierte Vor-/Weiterschäumen mit dem neuartigen IR-Prozess, lässt sich für EPS und Zieldichten von 80 g/l (strukturelle Applikation) der durchsatzbezogene Energieverbrauch um etwa ein Viertel reduzieren. Diese schon vor zwei Jahren auf einer Laboranlage ermittelten Werte werden sich im Zuge der laufenden Skalierung und Industrialisierung des Verfahrens voraussichtlich weiter verbessern.

Beim 'trockenen' Formschäumen hingegen liegen noch keine belastbaren Messwerte zur Energieeffizienz vor. Allerdings zeigen bereits Optimierungen des konventionellen Dampfverfahrens für eine Plattenfertigung im Technikumsmaßstab (Abmessungen: 1000 x 500 x 90 mm, Dichte: 60 g/l) CO₂-Einsparungen von knapp 6 kg. Bei konsequenter Umsetzung des dampffreien Ansatzes in generativ gefertigten Kavitäten mit geringen variothermen Massen sollte sich dies weiter in Richtung des aktuell nur theoretisch abschätzbar Minimums reduzieren lassen, zumal dann keinerlei Dampfinfrastruktur mehr betrieben oder unterhalten werden müsste.



Bild 17: Energieverbrauch als Gesamtkostenanteil beim Formschäumen von EPP vor bzw. nach systematischer Prozessoptimierung von Bedampfung, Füllinjektoren und Kühlung zur Reduktion der Verbrauchsmedien Dampf, Druckluft und Wasser (links) sowie praktische vs. theoretische Energiebilanz des dampfbasierten EPP-Formschäumens (rechts) [18]

6. Literaturverzeichnis

- [1] <http://www.smithersrapra.com/news/2014/may/polymer-foam-market-to-consume-25-3-million-tonnes>
- [2] <http://www.nmbgmbh.de/werkstoffe/partikelschaumstoffe>
- [3] Neue Materialien Bayreuth GmbH, Bayreuth
- [4] V. Altstädt + T. Neumeyer: Bead Foams – current Trends and future Developments, HOFMANN-Technologietage, Lichtenfels, Juni 2016
- [5] H. Winterling + N. Sonntag: Trendbericht Polystyrol-Hartschaumstoff (EPS, XPS), KUNSTSTOFFE, Oktober 2011
- [6] E. Bürkle: Partikelschaum – eine attraktive Ergänzung zum Spritzgießen, KUNSTSTOFFE, Oktober 2017
- [7] http://localarmacell.com/fileadmin/cms/pet-foams/flyer/beads_eu_20170627_05.pdf
- [8] KURTZ GmbH, Kreuzwertheim
- [9] RYGOL Dämmstoffe, GmbH & Co. KG, Painten
- [10] http://www.erlenbach.de/fileadmin/user_upload/erlenbach_machines/emotion/de/web_em_motion_prospekt_de.pdf
- [11] T. Neumeyer: Bead Foams – Materials for lightweight Construction, Design and Functionality, SKZ-Fachtagung 'Polymerschäume', Würzburg, Mai 2016
- [12] M. Lucht + J. Vetter: Partikelschaumverarbeitung – mal ganz ohne Dampf, HOFMANN-Technologietage, Lichtenfels, Juni 2016
- [13] www.nmbgmbh.de/news/einzelansicht/article/partikelschaeume-ganz-ohne-dampf/
- [14] D. Schulz: Trends in der Partikelschaumverarbeitung – dampffrei verpackte Luft mit viel Potential, VDWF IM DIALOG, April 2016
- [15] C. Doriat: Den gordischen Knoten durchschlagen, KUNSTSTOFFE, Februar 2017
- [16] <http://www.livall.com>
- [17] <https://www.fill.co.at/de/automotive/kunststofftechnik/partikelschaum/1415.html>
- [18] V. Altstädt: Energieeffizienz und Ressourcenschonung in der Fertigung und Anwendung mit Polymerschäumen, 2. WAK-Symposium, Fürth, Februar 2017

Spritzgieß-Kombinationstechnologien mit Organoblechen

C. Obermann, Bond-Laminates GmbH

Kurzfassung

Die Kombination von endlosfaserverstärkten, thermoplastischen Kunststoffen (Organobleche) mit kurz- oder langfaserverstärkten, thermoplastischen Kunststoffen mittels des Spritzgießprozesses bietet die hervorragende Möglichkeit, neben dem werkstofflichen auch konstruktiven Leichtbau durch Anspritzen von verstifenden und stabilisierenden Rippen, Krafteinleitungselementen, Funktionselementen und Konturen im Randbereich des Bauteils zu betreiben.



Bild 1: Ausschnitt aus einem typischen Hybridbauteil aus Organoblech und kurzfaser verstärktem Kunststoff

Bei geeigneter Materialauswahl und Prozessführung erhält man komplexe, hochbelastbare Leichtbauteile mit einer stoffschlüssigen Verbindung der beiden Komponenten. Darüber hinaus lassen sich auch attraktive Oberflächen erzielen.

Folgende Spritzgieß-Kombinationstechnologien mit Organoblechen werden vorgestellt:

- Insert-Molding
- Hybrid-Molding
- Hybrid-Molding mit variothermer Prozessführung
- Hybrid Molding in Kombination mit In-Mold-Decoration (IMD)

Diese Verfahrensinnovationen gehen zurück auf das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Spriform“, welches mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)

gefördert wurde [1]. Diese Technik hat sich seitdem kontinuierlich weiterentwickelt. Der Maschinenhersteller Krauss-Maffei vermarktet diese Kombinationstechnologie unter dem Namen „FiberForm“, der Maschinenhersteller Engel unter dem Namen „Organomelt“.

1. Endlosfaserverstärkte, thermoplastische Kunststoffe (Organobleche)

Organobleche stehen für eine Werkstoffgruppe vollständig imprägnierter und konsolidierter, plattenförmiger Verbundhalbzeuge (Laminate) aus hochfesten Endlosfasern und einer thermoplastischen Matrix. Diese lassen sich durch Erwärmung und anschließender Umformung in kurzen Zykluszeiten zu komplexen Bauteilen verarbeiten. Als Endlosfasern dienen hauptsächlich Glas- und/oder Carbonfasern in Form von Geweben, Gelegen oder anderen textilen Halbzeugen. Matrixmaterialien sind Thermoplaste wie Polypropylen, Polyamid 6, Polyamid 66 und Polyamid 12, Polycarbonat, thermoplastisches Polyurethan und Polyphenylensulfid.

Die Stärken von Organoblechen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- hohe Steifigkeit
- sehr hohe Festigkeit
- sehr geringe Dichte
- sehr hohes Energieabsorptionsverhalten
- niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient
- sehr kurze Zykluszeiten bei der Bauteilfertigung
- thermoplastische Matrix gestattet das Umspritzen und Schweißen
- hohe Formgebungsfreiheit
- Lösungsmittelfreiheit
- werkstofflich rezyklierbar
- unbegrenzte Lagerfähigkeit bei Raumtemperatur ohne Eigenschaftsänderung
- gute Form-, Chemikalien- und Korrosionsbeständigkeit

Die meist mehrachsige Belastung von hochbelasteten Bauteilen erfordert mehrere Faserorientierungen, woraus sich unterschiedliche Laminataufbauten (Mehrschichtverbunde) ergeben. Neben den klassischen gewebefaserverstärkten Organoblechen lassen sich auch multiaxiale Aufbauten bis hin zu quasiisotropen Eigenschaften realisieren (siehe Bild 2). Damit wird dem Konstrukteur die Chance eröffnet, das Laminat belastungsgerecht auszulegen [2].

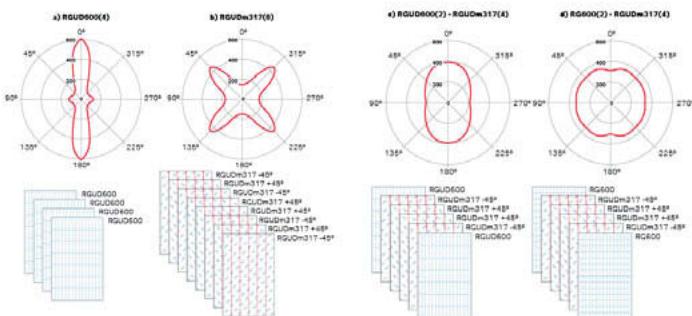


Bild 2: Weitere möglich Laminataufbauten von Organoblechen, neben den klassischen gewebfaser verstärkten, (Festigkeit eines glasfaser verstärkten PA6 als Funktion des Winkels, Darstellung als Polardiagramm)

2. Insert-Molding und Hybrid-Molding

Grundsätzlich wird zwischen einem zweistufigen (hier Insert-Molding genannt) und einem einstufigen Prozess (hier Hybrid-Molding genannt) unterschieden. Beide Verfahren einen folgende Vorteile:

- sehr hohe Formgebungs freiheit
- Möglichkeit der Integration von weiteren Funktionen und damit Reduktion von Folgeschritten
- Kombination von werkstofflichem und konstruktivem Leichtbau
- kurze Zykluszeiten
- reproduzierbare und voll automatisierbare Prozesse
- verfügbare und beherrschbare Anlagentechnik

Beim Insert-Molding-Verfahren findet das Umformen des Organoblechs und das Über- bzw. Anspritzen mit dem kurz- oder langfaser verstärktem Kunststoff in jeweils getrennten Werkzeugen und Maschinen statt. Um eine stoffschlüssige Verbindung bzw. Verschweißung mit der angespritzten Kunststoffmasse zu erzielen, empfiehlt es sich, das zunächst vorgeformte Bauteil (Insert) noch einmal zu erwärmen, bevor es anschließend in der Spritzgießform positioniert wird. Nur so erreicht man bei diesem zweistufigen Prozess die gewünschte Verschweißung der beiden Komponenten.

Beim Hybrid-Molding hingegen erfolgen die Umformung des Organoblechs und das Anspritzen gemeinsam in einem Spritzgießwerkzeug. Die Schließeinheit der Spritzgießmaschine

dient dabei als Umformpresse. Das Werkzeug, welches somit diverse Aufgaben zu übernehmen hat, muss für diesen Prozess speziell ausgelegt werden.

Der aufwändigeren, zweistufige Insert Molding Prozess gestattet die Herstellung sehr komplexer Bauteile mit hohen Qualitätsanforderungen, während das einstufige Hybrid-Molding eine sehr hohe Wirtschaftlichkeit bietet. In [2] wird eine sehr interessante Kombination der beiden Verfahren vorgestellt.

3. Hybrid-Molding mit variothermer Prozessführung

Mit Hilfe einer variothermen Prozessführung lässt sich die Oberflächenqualität von Kunststoffteilen weiter erhöhen. Bei der variothermen Werkzeugtemperierung werden die Werkzeugwände vorübergehend auf eine Temperatur zwischen Glasübergangs- und Schmelztemperatur des verwendeten Kunststoffs aufgeheizt, erst nach Abschluss der Formteilbildung wird das Werkzeug wieder abgekühlt (Bild 3). Diese Erhöhung der Werkzeugwandtemperatur verzögert die Erstarrung der Schmelze, sodass sich die Oberfläche hiermit hergestellter Bauteile gut ausbilden kann.

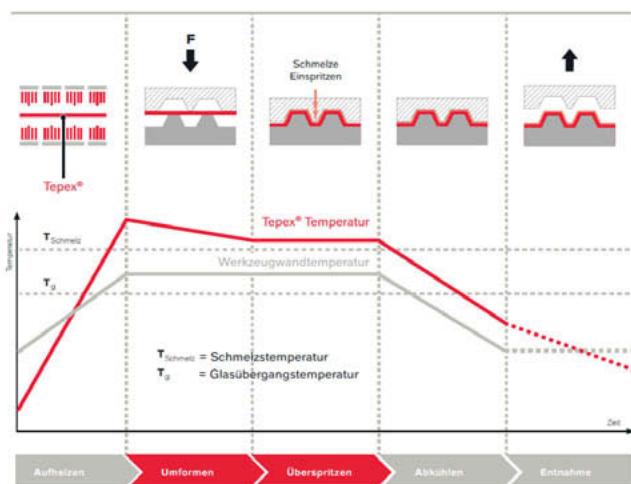


Bild 3: Zeitlicher Temperaturverlauf bei variothermer Prozessführung

4. Hybrid Molding in Kombination mit In-Mold-Decoration (IMD)

Die In-Mold-Dekoration ist ein Fertigungsverfahren, bei dem eine Heißprägefolie durch das Spritzgießwerkzeug geführt wird und beim Schließen des Werkzeugs zwischen dessen Hälften geklemmt. Die hohe Temperatur der eingespritzten Schmelze bewirkt, dass sich die Lackschicht der Heißprägefolie mit dem Kunststoff verbindet. Dieses bekannte Verfahren zur optischen aber auch haptischen Veredelung von Oberflächen lässt sich auch auf das Thermoformen von hybriden Organoblechbauteilen anwenden. Mit diesem sehr reproduzierbaren Prozess lässt sich ein aufwendiges Lackieren nach der Herstellung vermeiden. Zur Anwendung kommen hauptsächlich flächige Bauteile wie sichtbare Abdeckungen und Gehäuseteile.

5. Grundlagen der Verarbeitungstechnik

Der grundsätzliche Prozessablauf zur Herstellung von hybriden Bauteilen mittels Spritzgieß-Kombinationstechnologien enthält folgende Schritte:

- Aufheizen des Organoblechzuschnitts oberhalb der Schmelztemperatur des thermoplastischen Kunststoffes
- Transport des erwärmten Zuschnitts zum Werkzeug
- Aufnahme und Positionierung des erwärmten Zuschnitts im Werkzeug
- Umformung des Organoblechs
- Anspritzen einer thermoplastischen Komponente (geeigneter Weise der selbe Kunststoff, wie die Matrix des Organoblechs)
- Abkühlung und Entnahme aus dem Werkzeug

Die Umformung von Organoblechen wird oftmals auch als Thermoformen bezeichnet. Hierbei ist aber zu beachten, dass nicht wie beim klassischen Thermoformen im kautschukelastischen Temperaturbereich umgeformt wird, sondern oberhalb der Schmelztemperatur.

Aufheizen es Organoblechs

Durch das Aufheizen wird die Viskosität der thermoplastischen Matrix so weit herabgesetzt, dass die einzelnen Fasern während des Umformvorgangs ausreichend Bewegungsfreiheit erhalten. Nur so lassen sich die nahfolgend erläuterten Drapiermechanismen realisieren sowie Faltenbildung und Risse im Material vermeiden. Dem Aufheizen fällt eine zentrale Aufgabe zu, folgende Randbedingungen sind dabei einzuhalten:

- die Umformung muss grundsätzlich oberhalb der Schmelztemperatur des eingesetzten thermoplastischen Kunststoffes erfolgen

- die Aufheiztemperatur ist ausreichend hoch zu wählen, so dass die Fasern auch nach dem Transport in das Werkzeug im Moment der Schließbewegung noch ausreichend Bewegungsfreiheit haben
- aus diesem Grund ist auch die Transportzeit bzw. -weg möglichst kurz zu halten
- die Aufheiztemperatur und -zeit ist so zu wählen, dass oxidative Schädigungen vermieden werden
- der Aufheizprozess ist so zu gestalten, dass sich eine absolut gleichmäßige Temperaturverteilung über der gesamten Organoblech-Fläche einstellt
- die Temperaturregelung ist derartig zu konzipieren, dass Temperaturüberhöhungen bzw. -spitzen vermieden werden
- das Aufheizen sollte im Sinne einer effizienten Prozessführung nicht zur zykluszeitbestimmenden Größe werden

Transport und Positionierung im Werkzeug

Eine ebenfalls wichtige Rolle für eine notwendige Reproduzierbarkeit des Fertigungsprozesses und der Bauteileigenschaften spielt auch das Handling des aufgeheizten Organblechs. Es verlässt die Aufheizstation im plastifizierten Zustand und ist somit biegeschlaff. Dies muss sowohl beim Transport zum Werkzeug, beim Schließen des Werkzeugs, beim eigentlichen Umformen als auch beim Über- oder Hinterspritzen berücksichtigt werden. Folgende Aufgaben hat das Handlingsystem zu übernehmen:

- Sicherer Greifen während bzw. nach der Aufheizung
- Vermeidung einer lokalen Abkühlung durch die Greifer
- Schneller Transport auf kürzestem Weg zum Werkzeug
- Reproduzierbares und positionsgenaue Übergabe an das Werkzeug

Anschließend muss im Werkzeug sichergestellt werden, dass der Zuschnitt ohne unzulässigen Wärmeverlust positionsgenau aufgenommen, und dieser während der Schließbewegung des Werkzeugs für die Umformung bzw. Drapierung freigegeben wird. Für den Transport zwischen Aufheizstation und Werkzeug empfehlen sich folgende Greifertechniken für das Handling:

- Nadelgreifer inkl. Abstreiferhülse (werden in Organblechzuschnitt gestochen)
- Klemmstifte, Punktgreifer (beidseitige Klemmung)
- Vakuum-Sauger
- Pins (nehmen den Organblechzuschnitt in vorher eingebrachte Löcher auf)

Für die Aufnahme im Werkzeug können

- Nadeln zum Aufstecken des Zuschnittes
- schwenkbare Haltefinger
- Klemmstifte in beiden Werkzeughälften, mit denen der Zuschnitt mittig zwischen beiden Werkzeughälften übernommen wird
- Vakuum-Sauger

eingesetzt werden. Um eine vorzeitige Abkühlung des Organoblechs im Werkzeug zu verhindern, ist bei der Auslegung des Übernahmesystems auf die Vermeidung eines frühzeitigen Kontakts mit den relativ kalten Werkzeugwänden zu achten.

Umformung des Organoblechs

Die Umformung, auch Drapierung genannt, verläuft nur im geringen Maße durch Fließvorgänge wie bei den klassischen Kunststoffverarbeitungsverfahren, sondern basiert im Wesentlichen auf der Verformung des textilen Halbzeugs (Drapieren). Man unterscheidet im Wesentlichen zwei verschiedene Drapier- bzw. Umformmechanismen (Faserdehnung, Faserstreckung und Faserschlupf werden hier vernachlässigt):

- Winkeländerungen bzw. Gewebescherung des textilen Halbzeugs, auch Trellis Effekt genannt
- Verschiebungen einzelner Lagen untereinander, auch Interply shear genannt (bei mehrlagigem Aufbau des Laminats)

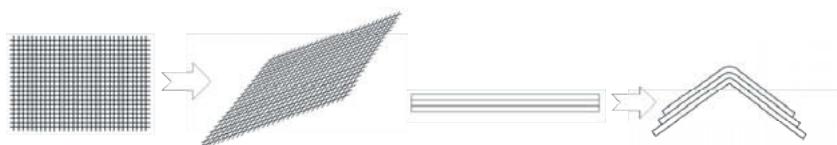


Bild 4: Umformmechanismen von Organoblechen; links: Trellis-Effekt; rechts: Verschieben der Einzellagen

Diese beiden Mechanismen gestatten einzeln oder in Kombination sehr hohe Umformgrade. In Bereichen des Bauteils mit starker dreidimensionaler Verformung findet demnach eine mehr oder weniger starke Änderung der Faserorientierung gegenüber dem Ausgangszustand statt (Bild 5). Die Folge ist zunächst eine nicht zu vermeidende Aufdickung des Materials, welche bei der Werkzeugauslegung zu berücksichtigen ist. Bei einer weiteren Steigerung der Drapierung kann es zu einem Blockieren des Textils kommen, die Folge ist dann eine unerwünschte Faltenbildung. Eine Drapiersimulation ergibt Aufschlüsse über solche kritischen Umformgrade, sodass geeignete Gegenmaßnahmen ergriffen werden können. Dar-

über hinaus liefert diese Analyse die genaue Faserorientierung, eine entscheidende Eingangsgröße für die nachfolgende mechanische Auslegung bzw. Berechnung des Bauteils (siehe hierzu auch Kapitel 6)

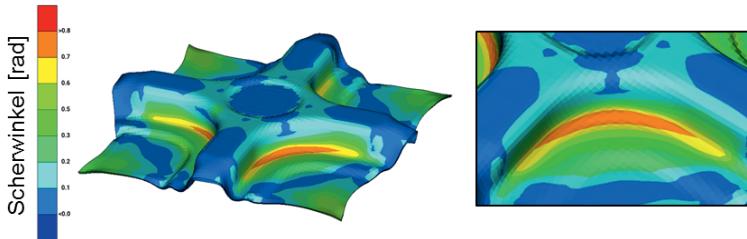


Bild 5: Ergebnis einer Drapiersimulation (Scherwinkel als Maß für die Gewebescherung)

Hinterspritzen des Organoblechs

Durch das Hinterspritzen muss eine gute Verbundfestigkeit zwischen den beiden Komponenten durch Verschweißen gewährleistet sein. Diese Verbundhaftung hängt im Wesentlichen von der Temperatur des Organoblechs und der Temperatur der Schmelze im Moment des Anspritzens ab. Daraus ergeben sich folgende verfahrenstechnische Schlussfolgerungen, die durch entsprechende Untersuchungen bestätigt werden können:

1. Umso höher die Temperatur des Organoblechs und je höher die Temperatur der angespritzten Schmelze, umso besser die Verbundhaftung. Da mit relativ hohen Schmelztemperaturen angespritzt wird und sich eine Kontakttemperatur an der Verbindungsstelle ergibt, können oft auch Organoblech-Temperaturen unterhalb der Schmelztemperatur ausreichen.
2. Die Transferzeit zwischen Aufheizen des Organoblechs und der Umformung sollte so kurz wie möglich sein, um ein Abkühlen zu vermeiden (gilt generell).
3. Die Einspritzgeschwindigkeit hat einen signifikanten Einfluss auf die Verbundhaftung. Je höher diese gewählt wird, umso mehr Scherung bringt man in die Schmelze ein und umso geringer sind die Abkühleffekte, was sich positiv auf die Verschweißung auswirkt. Insbesondere in angussfernen Bereichen kommt dieser Effekt zum Tragen.
4. Ein hoher Nachdruck wirkt sich ebenfalls positiv auf die Verbundfestigkeit aus.

6. Konstruktion und Berechnung

Die computergestützte rechnerische Auslegung (CAE) von hybriden Organoblech-Bauteilen ist ein Muss, um zu kurzen Entwicklungszeiten, wirtschaftlichen Fertigungsprozessen und zu

einer optimal auf die Lastfälle abgestimmten Bauteilauslegung zu kommen. Hierbei bezieht sich die Auslegung nicht nur auf den Fertigungsprozess, sondern auch auf das mechanische Verhalten des Bauteils und die Wechselwirkung zwischen Fertigung und Bauteileigenschaften [4].

Die für die Auslegung wichtigste Größe ist die Berücksichtigung der ausgeprägten Anisotropie des Werkstoffes, d.h. dessen Richtungsabhängigkeit aufgrund der Faserorientierung. Aus der Architektur des textilen Halbzeugs resultiert darüber hinaus noch eine Zug-Druck-Asymmetrie, eine Abhängigkeit in Dickenrichtung (Layer-Aufbau) und für den Herstellprozess die Drapierbarkeit. Aus den Matrixeigenschaften ergeben sich die Abhängigkeit von Temperatur und u.U. Feuchtigkeitsgehalt, sowie je nach Belastungsart zeitabhängiges Kriechen. Sowie der Herstellprozess als auch das Bauteilverhalten können mit gängigen FE-Methoden und üblichen Rechenprogrammen (Solvorn) recht gut beschrieben werden, wobei die Genauigkeit und die Prognosegüte sowohl vom verwendeten Modellansatz und dem Umfang der zugrundeliegenden Messdaten abhängt, aber auch von den spezifischen Aspekten die ermittelt werden sollen.

Um den Herstellprozess, die resultierende Faserorientierung sowie die Bauteileigenschaften bis hin zum Bruchverhalten hinreichend prognostizieren zu können, hat LANXESS auf dem FE-Solver ABAQUS basierende Tools entwickelt, welche die genannten Eigenschaften und Einflüsse beschreiben und die somit im Entwicklungsprozess direkt eingesetzt werden können. Diese FE-Tools verwenden Materialdaten, die durch richtungsabhängige Zugversuche, teilweise unter hohen Dehnraten, sowie durch verschiedene Scher- und Biegeversuche ermittelt werden.

Das von LANXESS entwickelte Composite-Materialmodell für Tepex®, in Kombination mit den für die Bauteilgeometrie im One-Step-Draping-Verfahren bestimmten Faserorientierungen ermöglicht eine sehr gute Vorausberechnung der Steifigkeit, Festigkeit, Crasheigenschaften sowie des Schwingungsverhaltens des hybriden Bauteils (Bild 6). Hierdurch kann der Konstrukteur bereits am Rechner auf die mögliche Schwachstelle eines Bauteils reagieren – so etwa durch Optimierung von Wanddicken oder Verlegen von Verstärkungsrippen. Beide Tools haben ihre Tauglichkeit und Genauigkeit in der Entwicklung zahlreicher Prototyp- und Serienbauteile bewiesen.

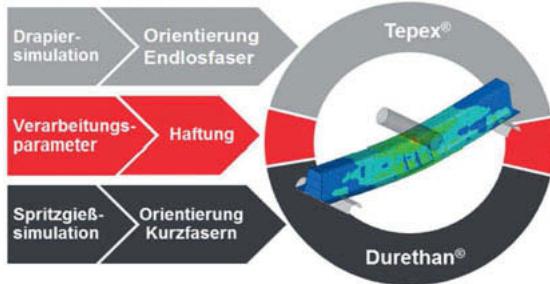


Bild 6: Integrative Simulation von Tepex®-Hybridbauteilen

7. Zusammenfassung

Die Technik zur Herstellung von Leichtbauteilen aus endlosfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen mittels Spritzgießkombinationstechnologien hat sich in den letzten Jahren enorm weiterentwickelt. Dies gilt sowohl für die Herstell- als auch für die Simulations-technik. Sein enormes Leichtbaupotenzial und die hohe Wirtschaftlichkeit hat diese Verfahren durch eine Vielzahl an umgesetzten Serienbauteilen unter Beweis gestellt.

- [1] Kombination von Thermoplast-Spritzguss und Thermoformen kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste für Crashelemente (SpriForm) : Gemeinsamer Schlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt; Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2007 - 31.03.2011
- [2] Bonefeld, Sontag, Lutter, Obermann: „Großserienreif, Multiaxial verstärkte thermoplastische Composites für den Leichtbau“; Kunststoffe 10/2015
- [3] Häfelin, Wagner, Beutler, Lutter, Jecmeniza: „Nicht zu bremsen“; Kunststoffe 3/2017
- [4] Lanxess Broschüre; Tepex®: Hinweise für den Verbraucher; Bestell-Nr.: LXS-HPM-058DE; Ausgabe 2017-10

Entwicklung und Fertigung von Bauteilen aus wärmeleitenden Kunststoffen

**Dr.-Ing. S. Amesöder, A. Lober, M.Eng.,
RF Plast GmbH, Gunzenhausen**

Kurzfassung

Wärmeleitende Kunststoffe finden als Metall- und Keramikersatz verstärkt Anwendung in innovativen Technologiefeldern wie der Beleuchtungsindustrie oder der E-Mobilität. Die Basis verfügbarer Werkstoffe (Compounds) hat sich in den vergangenen Jahren deutlich verbreitert, so dass im Rahmen der Produktentwicklung auf eine Vielzahl an Compounds zurückgegriffen werden kann. Die Auswahl erfordert dabei fundierte Kenntnisse über die benötigten Materialeigenschaften sowie die Fertigungs- und Verarbeitungstechnologie für das jeweilige herzustellende Produkt. Das gezielte Ausnutzen des gesamten Werkstoffpotentials von wärmeleitenden Kunststoffen ist häufig nötig um im Wettbewerb zu Metall oder Keramik erfolgreich zu bestehen. Deshalb sind in der Produktentwicklung besondere Kenntnisse über das Material- und Verarbeitungsverhalten nötig. Anhand von ausgewählten Beispielen wird im Beitrag dieser Produktentstehungsprozess mit wärmeleitenden Kunststoffen beleuchtet.

1. Einleitung

Die Bedeutung von Kunststoffen als Konstruktionswerkstoff nimmt unter anderem in den Bereichen Leichtbau und Elektronik stetig zu. Eine Ursache für das steigende Anwendungspotential ist die Möglichkeit der Funktionalisierung, so dass beispielsweise in mechatronischen Anwendungen auch elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie magnetische Eigenschaften in Kunststoffen erzielt werden. Mit den Vorteilen der Gestaltungsfreiheit und von maßschneiderbaren Eigenschaften finden Funktionskunststoffe zunehmend Einsatz in Anwendungsbereichen wie Comfort, Beleuchtung, Batterietechnik und Antriebssysteme. Beispielhaft werden innerhalb des Beitrags eine Anwendung als Heiz-/Kühlelement eines Cupholders im Automobil sowie einer Gehäuserückwand als Wärmesenke der Platine in einem LED-Strahler im nachfolgenden Bild 1 dargestellt.

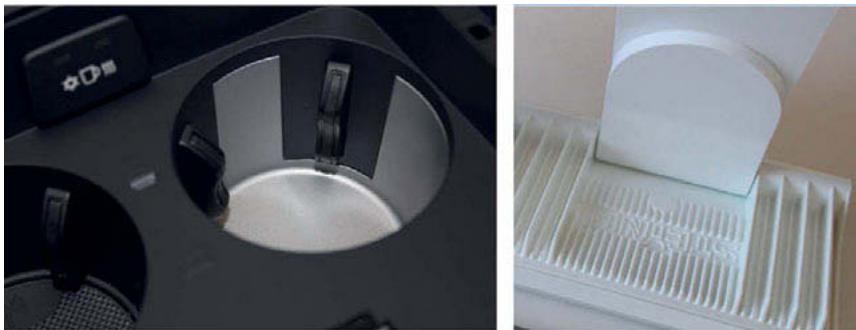


Bild 1: Anwendungsbeispiele für Komponenten aus wärmeleitenden Kunststoffen

links: Cup-Holder mit Innenteil aus wärmeleitendem Kunststoff zur aktiven Temperierung in einer KFZ-Mittelkonsole
(Hersteller Fa. Weber; Bild RF Plast GmbH)

rechts: Gehäuserückwand eines LED-Scheinwerfers aus wärmeleitendem Kunststoff zur Entwärmung der mit LEDs bestückten Leiterplatte
(Hersteller Fa. Steinel, Bild RF Plast GmbH)

2. Datenbasis wärmeleitender Compounds

Die Auswahl von passenden Werkstoffen steht im Rahmen der Produktentwicklung am Anfang der technischen Umsetzung. Basierend auf einem Lastenheft können die verfügbaren Werkstoffe, z.B. mittels V-Methode, systematisch-methodisch, beleuchtet und ein nach technischen und kaufmännischen Gesichtspunkten geeigneter Werkstoff herausgefiltert werden.

Voraussetzung für dieses Vorgehen ist eine breite Kenntnis von Werkstoffen, die im industriellen Maßstab oder ggf. auch als Vor- und Versuchsprodukte zur Verfügung stehen.

Bei RF Plast wurde in den vergangenen Jahren deshalb ein guter Kontakt zu Materialherstellern und Compoundierern gepflegt und deren Werkstoffe mit den vor Ort vorhandenen Möglichkeiten sowie Unterstützung von Industrie- und Hochschulpartnern geprüft. Dabei sind sowohl die Kenntnis der Werkstoffeigenschaften, als auch Erfahrungen zum Verarbeitungsverhalten bedeutsam.

Die **Kenntnis der Werkstoffeigenschaften** bezieht sich grundsätzlich auf eine Vielzahl von unterschiedlichen Kennwerten. Die bei RF Plast aufgebaute Werkstoffdatenbank fokussiert jedoch aufgrund des ansonsten immensen Umfangs nur eine ausgewählte Zahl an mechani-

schen, elektrischen, thermischen und betriebswirtschaftlichen Kennwerten. Bei den betriebswirtschaftlichen Kennwerten sind neben Preis und Verfügbarkeit auch ideologische Aspekte aus den Bereichen Ethik (z.B. Dott Frank Act) berücksichtigt.

Technische Angaben sind teilweise gegliedert in richtungs- und temperaturabhängige Kennwerte. Beispielhaft ist in Bild 2 die Wärmeleitfähigkeit als Kennwert verschiedener Compounds aufgetragen. Farblich unterschieden wird im Bild die Gruppe der thermisch leitfähigen und gleichzeitig elektrisch isolierenden Compounds (blaue Punkte) und der Gruppe der thermisch und elektrisch leitfähigen Compounds (orange Punkte). Signifikant zeigt sich, dass sich mit elektrisch leitfähigen Füllstoffen wie beispielsweise Graphit eine deutlich höhere thermische Leitfähigkeit erzielen lässt. Dies bedeutet, dass für viele Elektronikanwendungen die Auswahl der Compounds deutlich eingeschränkt ist oder aber der Schichtaufbau mechatronischer Baugruppen entsprechend den Randbedingungen angepasst werden muss. Hierzu werden diverse Konzepte für die Kombination von elektronischen Schaltungen und wärmeleitenden Kunststoffen in der Entwicklungsabteilung von RF Plast validiert, um das für die Anwendung am besten geeignete Konzept auswählen zu können. Eine weitergehende Einschränkung ergibt beispielsweise der Preis, da die Kosten für Füllstoffe stark variieren können. Hierbei müssen jedoch neben den thermischen, mechanischen und wirtschaftlichen Aspekten der Materialien auch Fragen über Werkzeugstandzeiten und Abrasionsverhalten der Compounds geklärt werden.

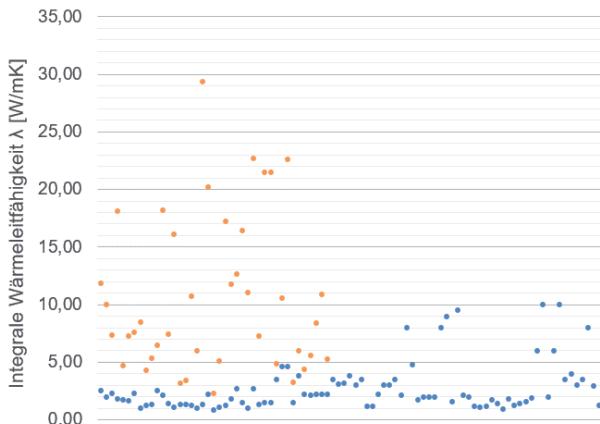


Bild 2: Wärmeleitfähigkeit kommerzieller Compounds aus RF Plast GmbH Datenbank

orange Punkte: elektrisch leitfähige Compounds

blaue Punkte: elektrisch isolierende Compounds

Zweiter wesentlicher Punkt für die Datenbasis wärmeleitender Compounds ist das Sammeln von Erfahrungen zum Verarbeitungsverhalten unterschiedlicher Materialien. Dies betrifft einerseits den klassischen Bereich des Füll- und Fließverhaltens. Hierzu werden Prüfkörper wie Zugstäbe und Plättchen in verschiedenen Geometrien verwendet, so dass Längen, Wanddicken, Fließquerschnitte und Anspritzgeometrien variiert und deren Einfluss auf das Füll- und Abkühlverhalten untersucht werden können. Ziel ist es, durch einfache Versuche mit ähnlichen geometrischen Bedingungen die Herstellbarkeit komplexer Produkte abzuschätzen.

Dies geschieht parallel auch mit modernen Softwaretools zur Verarbeitungssimulation. Hier gilt es die Datenbasis für die Simulationsberechnungen in der Software anzupassen bzw. neue Datensätze zu generieren und in das Programm zu integrieren.

Ein Vergleich praktischer Verarbeitungsuntersuchungen und Ergebnisse aus den Simulationsberechnungen lässt sich mit dem RF Probekörper „Kühlkörper“ darstellen und wurde in verschiedenen Vergleichsuntersuchungen bereits erfolgreich bestätigt. Das Werkzeug „Kühlkörper“ ist mit verschiedenen Werkzeugeinsätzen ausgestattet, so dass unterschiedliche Geometrien hergestellt werden können. Eine Temperierung ist bis 200°C möglich und erfolgt mit elektrischen Heizpatronen. Zur optimalen Entlüftung und Entformung ist hinter jedem Kühlpin ein Auswerfer angebracht. Mit Werkzeuginnendruckmessungen können die notwendigen Verarbeitungsdrücke aufgezeichnet werden. Dieser aufwendige Werkzeugaufbau ermöglicht eine Verarbeitung unterschiedlichster Compounds und einen Vergleich des Verarbeitungsverhaltens.

Als weitere Besonderheit ist mit dem vorhandenen Werkzeug die Verarbeitung mit Kalt- und alternativ mit Heißkanal möglich. Hinsichtlich der Auslegung der Verarbeitungsmaschinen sind ebenfalls Fragestellungen zu Verweilzeit (im Zylinder / im Heißkanal) oder erzielbare Oberflächeneigenschaften wichtig und können am praktischen Produkt, in diesem Fall dem in Bild 3 dargestellten Probekörper, für verschiedene Werkstoffe sichtbar gemacht werden.



Bild 3: Probekörper "Kühlkörper" zur Ermittlung des Verarbeitungsverhaltens von wärmeleitenden Kunststoffen aus thermo- und duroplastischen Werkstoffen im Hause RF Plast GmbH

2. Einbezug von Simulation bei der Auslegung des Gebrauchsverhaltens und der Verarbeitung

Die Anforderungen an verkürzte Entwicklungszeiten, aber auch die steigenden Möglichkeiten im Bereich der Finite-Elemente-Methoden bewirken im Allgemeinen eine Zunahme des Einsatzes von Softwaretools im Rahmen der Produktentwicklung und –entstehung.

Im Anwendungsfeld der wärmeleitenden Kunststoffe sind insbesondere

- die Verarbeitungssimulation,
- die thermische und
- die mechanische Simulation

für die Produktauslegung erforderlich.

Für die Verarbeitungssimulation wurden materialspezifische Kennwerte für Fließ- und Abkühlverhalten in die Materialdatenbank der Software Moldflow übertragen. Anschließend werden die Simulationsergebnisse mit Füllstudien gegenübergestellt und verglichen.

Als Merkmale in der Verarbeitungssimulation sind einerseits die grundsätzliche Füllbarkeit und der dabei notwendige Druckbedarf und andererseits die Entlüftungssituation inkl. Bindenähte für die Auslegung der Formteile und Werkzeuge wichtig. Insbesondere die korrekte Auslegung von Angusskanal und Anschnitt ist eine häufig unterschätzte Thematik, welche im späteren Verlauf der Produktion zu Prozessstörungen und Bauteilfehlern führen kann. Um dies bereits in der Entwicklungsphase zu vermeiden, kann durch iterative Simulationsstudien eine aus fertigungstechnischen Gesichtspunkten ideale Angussauslegung erfolgen.

In Bild 4 ist beispielhaft der Vergleich zweier Anspritzvarianten für ein Batteriegehäuse aus einem wärmeleitenden Kunststoff dargestellt. Die seitliche Anspritzung zeigt im Zusammenfluss ein stärkeres Voreilen der Masse im Randbereich gegenüber der mittigen Anspritzung. Zudem unterscheiden sich die Temperaturen der Schmelzefront aufgrund der unterschiedlichen Fließweglängen, was sich wiederum direkt auf die Bindenahthproblematik auswirkt. Für die Entlüftung und die Ausprägung der Bindenähte ergeben sich deshalb Vorteile durch die mittige Anspritzung, weshalb diese in der praktischen Umsetzung gewählt wurde.

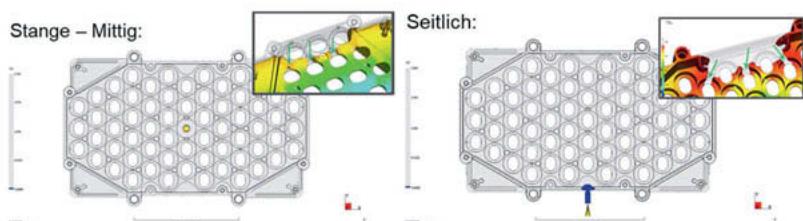


Bild 4: Vergleich verschiedener Anspritzvarianten zur Füllung eines Batteriegehäuses aus dem wärmeleitenden Kunststoff Alcom PA6 900/31 FR TCD1 mittels Moldflow Simulation zur Beurteilung der Entlüftungs- und Bindenahtsituation

Für die thermische Simulation müssen Randbedingungen aus der Anwendung festgelegt werden. Dabei sind sowohl geometrische Zustände als auch stofflich-werkstoffliche Größen relevant. Für einfache Systeme sind quasistationäre Randbedingungen ausreichend, um eine grundsätzliche Machbarkeit beim Einsatz von wärmeleitenden Kunststoffkomponenten als Metall- oder Keramikersatz aufzuzeigen. Dynamische Systeme sowie Ansätze mit Einflüssen von strömenden Medien (Luft- oder Flüssigkeitsströmung) erfordern komplexere Ansätze, sind jedoch mit geeigneten Simulationstools bereits auch Standard und finden ein breites Anwendungsgebiet.

Aus werkstofflicher Sicht ist bei den Kenndaten der Kunststoffkomponenten häufig die Anisotropie der Wärmeleitung im Bauteil sinnvoll zu berücksichtigen. Im Geometrie-Werkstoff-Modell erfordert dies eine bessere Detailierung, so dass daraus ein erhöhter Aufwand in der Vorbereitung resultiert.

Mechanische Untersuchungen sind aufgrund der besonderen mechanischen Kennwerte bei wärmeleitenden Materialen ebenfalls bei Neuentwicklungen sinnvoll. Gegenüber Standardkunststoffen ist v.a. die reduzierte Bruchdehnung zu berücksichtigen.

2. Produktentwicklung an Beispielen

Zur Darstellung des Werkstoffpotentials von wärmeleitenden Kunststoffen in Industrieanwendungen wurden im Rahmen von Industrie- und Forschungscooperationen bei der RF Plast GmbH unter anderem die Demonstratoren „Wärmetauscher“ und „LED-Lampe“ entwickelt und aufgebaut. Dabei wurden die oben genannten Werkzeuge im Zuge des Produktentstehungsprozesses angewendet. An diesen beiden Beispielen wird im Folgenden erläutert, wie konkret die Umsetzung erfolgen kann.

Als **Kunststoffwärmeübertrager** – im Allgemeinen als Kunststoffwärmetauscher bezeichnet – wurde das Grundkonzept aus zwei Schalen konzipiert, so dass eine Hydraulikseite im Inneren der Schale mit einer Flüssigkeit und eine Dampfseite im Äußeren mit einem Gas beschickt werden kann. Als Kriterien für die Produktentwicklung wurden die in nachfolgender Tabelle 1 aufgelisteten Punkte definiert.

Tabelle 1: Wichtige Anforderungskriterien an einen Kunststoffwärmeübertrager-Demonstrator

Kriterium	Anforderungsbereich	Umsetzungsansatz
Grundaufbau Außenmaße 170 x 300 mm Hydr.-Anschluß D25 mm	Geometrie	Doppelschalenkonzept: Hydraulikseite innen Dampfseite außen
Optimierung der Wärmeübertragung durch turbulente Strömung	Strömungskonzept	optimierte Verteilung der Fluidkomponente im Durchlauf (Fischgrätenmuster)
Mechanische Stabilität Überdruck: 5 bar Durchfluss 150 l/h	Geometrie Rippen und Auflagepunkte	Abstützen der Doppelschalen gegenseitig
Plattenaufbau	Geometrie Bauteilsymmetrie	Gleichteil für beide Komponenten der Doppelschale
Zusammenbau	Geometrie Fixierung	Absicherung durch Poka Yoke Lösung

Der Anforderungskatalog zeigt, dass insbesondere die Geometrie des Wärmetauschers die Funktionalität beeinflusst. Deshalb wurde im Zuge der Produktentwicklung ein besonderes Augenmerk auf ein durchdachtes Geometriekonzept gelegt. Zunächst war der Strömungsverlauf zur guten Wärmeübertragung mit einer gegenläufigen, V-förmigen Rippenstruktur (Fischgräten) als Innenkontur definiert worden. Anschließend wurden die Außenrippen auf der Luftseite sowohl strömungstechnisch als auch im Hinblick auf die mechanische Belastung ausgelegt. Hierzu wurden CFD-Strömungssimulationen und mechanische Simulationen wie in Bild 5 dargestellt verwendet. Weiterhin wurden für den Zusammenbau die Fixierungspunkte, Verschraubungsstellen sowie der Anschluss festgelegt.

Die Werkstoffauswahl resultierte aus einem Kompromiss zwischen optimaler Wärmeübertragung und Druckbeständigkeit von 5 bar Innendruck, weshalb das Zusammenspiel zwischen thermischen und mechanischen Eigenschaften der Kunststoffcompounds betrachtet werden musste. Aufgrund des hohen Füllgrades und der im Vergleich zu Standardkunststoffen höheren Abkühlgeschwindigkeit, stand in erster Linie die Füllbarkeit im Fokus, welche durch Füllsimulationsberechnungen bestätigt werden konnte. In der praktischen Herstellung der Einzelplatten bestätigte sich die gute Verarbeitung, u.a. durch eine gleichmäßige Füllung mit einem maximalen Fülldruck kleiner 700 bar.

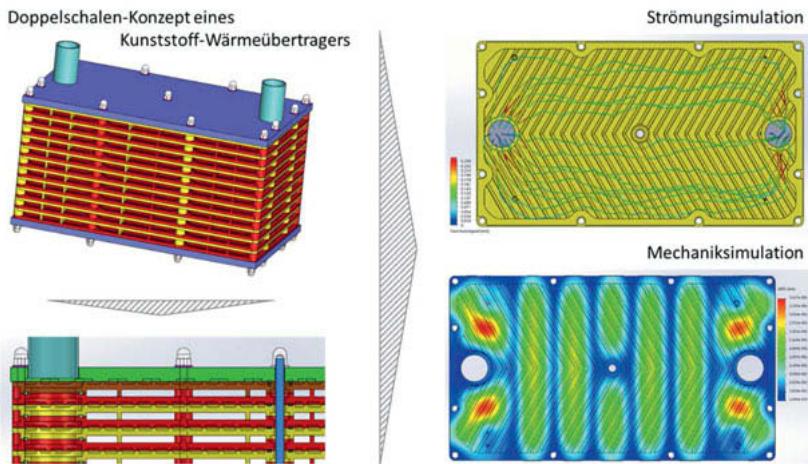


Bild 5: Entwicklungsschritte beim Design und der Auslegung eines Kunststoffwärmeübertragers mit Hydraulik- und Dampfseite hergestellt aus spritzgegossenen, wärmeleitenden Kunststoffplatten

Als Anwendungsbeispiel im Bereich der Mechatronik bzw. einer mechatronischen Baugruppe wurde eine **LED-Lampe** durch Hinterspritzen einer bereits bestückten Kupferkernleiterplatte in einem Kooperationsprojekt der Firmen 3M Technical Ceramics, Häusermann, Lehmann und Voss, Osram und RF Plast aufgebaut. Das geometrische Konzept ist in Bild 6 dargestellt und zeigt, dass die entstehende Verlustwärme der LED und der Elektronik über einen Kupferkern in der Leiterplatte an den Kunststoffkühlkörper geführt und über diesen an die Umgebung abgeleitet wurde. Wichtige Kriterien bei der Konzeption des Demonstrators sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Das thermische Konzept der Lampe basiert auf einer direkten thermischen Ankoppelung der beiden Hauptkomponenten Leiterplatte und Kühlkörper. Somit kann der durchgängige Wärmeleitpfad von der LED über den Kupferkern bis an die Kühlkörperrippen ohne weitere thermische Widerstände von Zwischenschichten ermöglicht werden. Voraussetzung ist eine gute, möglichst stoff- und formschlüssige Anbindung (thermische Kontaktierung) zwischen Leiterplatte und Kühlkörper, die sich beim Umspritzen ausbilden muss. Auch die thermische Anbindung der Elektronik erfolgt durch die Leiterplatte auf den Kühlkörper. Die beiden Bereiche LED und Elektronik lassen sich auch als eigenständige Komponenten abbilden. So kann der LED-

Bereich mit Reflektor als Downlight und der Elektronikbereich mit den Kühlrippen als Elektronikgehäuse betrachtet und auch separat ausgeführt werden. Beide Ansätze sind somit im LED-Lampen-Konzept umgesetzt, was insbesondere durch die L-förmig ausgeprägte Leiterplatte ermöglicht wird.

Das Einlegen der Leiterplatte in das Spritzgießwerkzeug und das Hinterspritzen erfordern eine thermisch und mechanisch abgestimmte Verarbeitungstechnologie. Strömungs- und Druckverhältnisse müssen durch die Auslegung der Leiterplatte (Wanddicke) und Fließquerschnitte aneinander angepasst werden.

Tabelle 2: Wichtige Anforderungskriterien an einen LED-Lampen-Demonstrator

Kriterium	Anforderungsbereich	Umsetzungsansatz
Entwärmung	Wärmeableitung	Konzeption eines Wärmeleitpfades LED-Kupferkern-Kunststoffkühlkörper
Entwärmung	thermische Kontaktierung	Anbindung (Haftung) der Leiterplatte zum Kühlkörper
Geometrie	Taschenlampenform	Lampenreflektor und Handgriff mit Kühlrippen
Integration	Mechanik Leiterplatte	Ausreichende Stabilität der Leiterplatte beim Hinterspritzen

Die Füllung des Formteils wurde in Verarbeitungssimulationen für unterschiedliche Geometrievarianten bestimmt und hinsichtlich Druckbedarf und Entlüftung bewertet. Zudem war insbesondere im Rippenbereich die Ausprägung der Rippen hinsichtlich der Entformung festzulegen.

In parallel durchgeführten thermischen Simulationen wurde die Eignung verschieden hoch wärmeleitender Compounds mit den jeweiligen Geometriekonzepten abgeglichen. Dabei sind anisotrope Wärmeleitfähigkeiten aus vorab hergestellten Prüfplatten für die verwendeten Eingabedaten in den Simulationsrechnungen notwendig.

Exemplarisch ist der Vergleich der Temperaturverteilung eines Standardkunststoffes ($\lambda = 0,3 \text{ W/mK}$) und eines gut wärmeleitenden Kunststoffes ($\lambda = 4 \text{ W/mK}$) im eingeschwungenen Zustand in Bild 6 dargestellt. Während für den Standardkunststoff die Verlustwärme der LED nur in geringem Maße abgeleitet werden kann, ermöglicht die erhöhte Wärmeleitfähigkeit im Kühlkörper einen Wärmeabtransport, so dass hinter der LED eine maximale Temperatur unterhalb der für LED wichtigen Junction-Temperatur erreicht wird.

Die praktischen Untersuchungen an der hergestellten Lampe bestätigen die Temperaturrentwicklung und damit die Übertragbarkeit der Simulationsberechnungen.

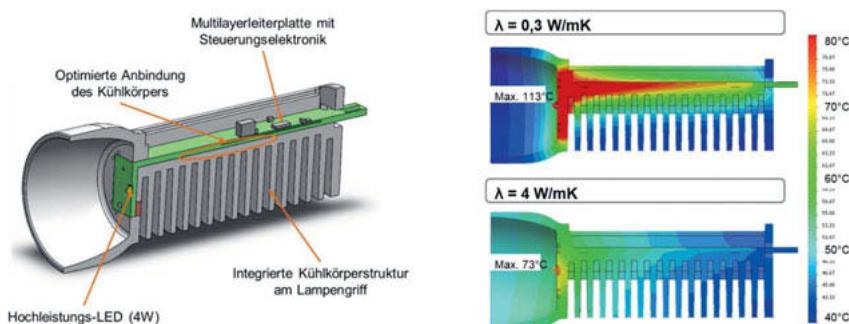


Bild 6: Geometriekonzept der LED-Lampe (links) und Temperaturverteilung für verschiedene wärmeleitende Compounds aus Simulationsberechnungen (rechts)

4. Zusammenfassung und Ausblick

Wärmeleitfähige Kunststoffen erreichen Leitfähigkeiten bis über 20 W/mK und damit eine Größenordnung von niedrigleitenden Metallen, z.B. Edelstahl, oder Keramiken. Damit erschließt sich ein Einsatzpotenzial in diversen Industrieapplikationen. Eingeschränkt wird die Werkstoffauswahl, durch Randbedingungen wie elektrische Isolation, Verarbeitung oder Kosten, welche jedoch im Gesamtkonzept betrachtet werden müssen. Durch die einhergehende Bauteilfunktionalisierung können ehemals notwendige Prozessschritte entfallen, weshalb der im Vergleich zu Standardkunststoffen erhöhte Materialpreis wärmeleitfähiger Compounds relativ zum gesamten Produktentstehungsprozess betrachtet werden muss. Maßgeschneiderte Compounds können je nach Anwendung erzeugt und durch geschickte Konstruktion in ihrem Werkstoffpotential weitgehend ausgenutzt werden. Dies betrifft auch die Verarbeitbarkeit sowie die mechanischen Eigenschaften, Oberflächenqualität oder Farbausprägung.

Im Produktentstehungsprozess sind die relevanten Simulationsansätze mittlerweile auch bei wärmeleitenden Kunststoffen verfügbar und etabliert. Insbesondere mit der Verarbeitungssimulation und den thermischen Simulationen kann der Produktentstehungsprozess von der Idee zur Serie signifikant unterstützt und begleitet werden.

Im Beitrag wurden anhand von Beispielen das Vorgehen und die Möglichkeiten dargestellt.

Zukünftig gilt es die Werkstoffdaten weiter zu analysieren und in der Breite den Simulations-tools als Eingangsdaten zur Verfügung zu stellen, um breitflächigen Einsatz zu finden und wärmeleitfähige Kunststoffe in diversen Anwendungen aus den Bereichen Beleuchtungstechnik, Elektronik, Energietechnik o.ä. zu etablieren.

Additive Fertigungsprozessketten für 3D gedruckte Elektronik

Additive Manufacturing Process Chains for 3D Printed Electronics

Dr. M. Hedges, J. Hörber, M. Süttenbach, Neotech AMT GmbH

1. Kurzfassung

Diese Präsentation beschreibt den derzeitigen Stand der Technik bezüglich der Integration elektronischer Komponenten in 3D-gefertigte Substrate zur Herstellung vollständig gedruckter, mechatronischer Systeme.

Die vollständig CAD-gestützte, gedruckte Elektronikfertigung wird durch ein frei konfigurierbares Prozessspektrum aus Druck-, Vor- und Nachbearbeitungstechnologien in Kombination mit SMD-Technologien ermöglicht. Einfache Rekonfiguration bei gleichzeitiger Skalierbarkeit für hohe Stückzahlen sind Merkmale der resultierenden flexiblen Prozesskette, um auf schnelle Änderungen des Produkttyps zu reagieren. Darüber hinaus wird eine Übersicht aktueller Anwendungen, wie z.B. dreidimensionaler elektronischer Schaltungen, Antennen, Heizmuster und Sensoren präsentiert und ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen bei der Herstellung 3D-gedruckter Elektronik gegeben.

2. 3D gedruckte Elektronik – Stand der Technik

Bei 3D gedruckter Elektronik (3D GE) handelt es sich um eine neuartige, schnell wachsende Technologie auf Basis digitaler Druckverfahren, um mechanischen Bauteilen elektronischen Nutzen hinzuzufügen. 3D GE vereint Design-Flexibilität, reduzierte Kosten und erhöhte Umweltverträglichkeit (Abbildung 1). Im Jahr 2009 wurde mit der Entwicklung auf diesem Gebiet begonnen und das erste 3D-fähige Drucksystem Anfang 2010 im Rahmen einer Machbarkeitsstudie 3D gedruckter Schaltungen installiert. 2011 wurde ein verbessertes 3D-Drucksystem entwickelt und 2012 das erste System für die Serienproduktion 3D gedruckter Elektronik auf mehreren Druckstationen freigegeben, das 45X. Das patentierte System arbeitet parallel mit bis zu vier Druckköpfen auf einer 5-Achigen Plattform, um an die Anforderungen der Herstellung hoher Stückzahlen angepasst werden zu können. (> 1 Mio 3D gedruckte Teile/Jahr/System)

Design Flexibilität	Ökonomie	Umwelt
Integration von Mechanik- Elektronik-Optik Formflexibilität Miniaturlisierung Funktionserweiterung	Verringerte Teileanzahl Kürzere Prozessketten Geringerer Materialeinsatz Gesteigerte Zuverlässigkeit	Geringere Materialvielfalt Vereinfachte Wiederverwen- dung und Entsorgung Geringere Materialanzahl Geringerer Materialtransport

Bild 1: Vorteile der 3D gedruckten Elektronik

Für die meisten 3D gedruckten Applikationen wird metallisches, leitfähiges Material eingesetzt, um relativ einfache Funktionen abzubilden. Hierzu werden Schaltkreise, Antennen, Heizmuster und Sensoren auf traditionell hergestellte Bauteile gedruckt. Antennen von Mobiltelefonen und Schaltkreise werden beispielsweise in Form leitfähiger Tinten auf Silberbasis auf spritzgegossene Materialien wie PC-ABS und PA gedruckt (Abbildung 2). Diese Herangehensweise bietet eine höhere Design Flexibilität sowie Kosten-Vorteile gegenüber derzeit angewandten Nass-chemischen Verfahren.

Abbildung 3 zeigt ein Heizmuster, welches durch den Einsatz hochviskoser Silberpaste (>20.000mPas) gedruckt wurde. Die Silberpaste enthält Silberpartikel der Größe im Mikrometerbereich. Diese Strukturen weisen zur Übertragung eines deutlich höheren Stroms (> 1 Ampère) einen nennenswert größeren Querschnitt auf, als jene im Beispiel der Antennenstruktur. Die Heizfunktion erhält das Bauteil durch die auf PTC (Positiver Temperatur Koeffizient) basierende Tinte. Die besondere Eigenschaft des Materials ist die spezifische Arbeitstemperatur. Wenn Strom appliziert wird, steigt die Temperatur im Material bis zur Arbeitstemperatur. Sobald diese erreicht ist, steigt der Widerstand im Material exponentiell an, sodass kein weiterer Strom fließen kann. Somit ist es unmöglich das Material über die gesetzte Arbeitstemperatur hinaus zu erwärmen, was es zu einer inhärent sicheren Methode für Transportanwendungen macht.

Einfache sensorische Fähigkeiten können ebenfalls durch den Druck leitfähiger Materialien abgebildet werden. Abbildung 4a veranschaulicht gedruckte, kapazitiv wirkende Sensoren (Fingerartig ineinandergrifffende Strukturen auf beiden Seiten des gefüllten Tanks), die den Füllstandlevel des Wassertanks registrieren. Die LEDs veranschaulichen den Füllstand. Sobald eine Seite des Tanks gefüllt ist, sorgt ein Signal an die Pumpe dafür, dass die andere

Seite gefüllt wird. In Abbildung 4b ist ein einfacher Berührungssensor dargestellt, über den ein Feld aus LEDs kontrolliert wird. Beide Beispiele verwenden lediglich ein Druckmaterial. Die eingesetzte Silbertinte enthält Silberpartikel in Nanometergröße und erfüllt zweierlei Funktionen: Schaltung und Sensor. Applizierte SMD-Bauteile vervollständigen das Gerät.



Bild 2: Gedruckte Antenne eines Mobiltelefons auf PC-ABS.

Quelle: LITE-ON, Mobile Mechanical SBG

w

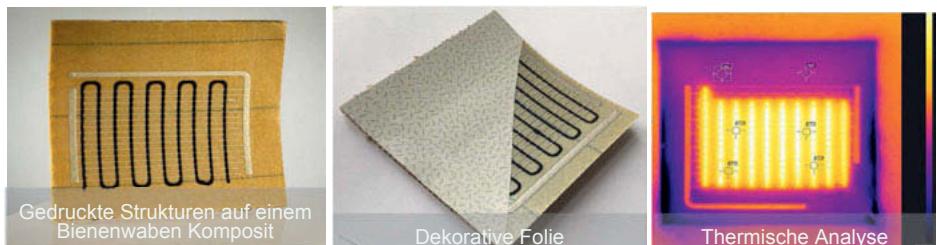
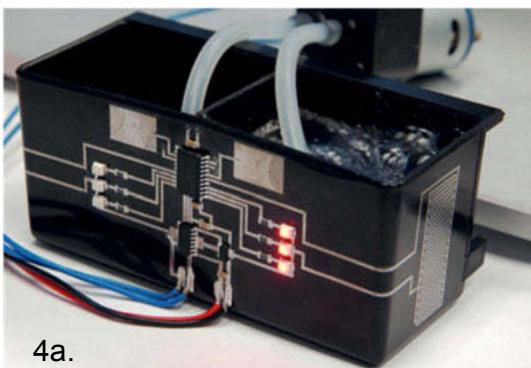
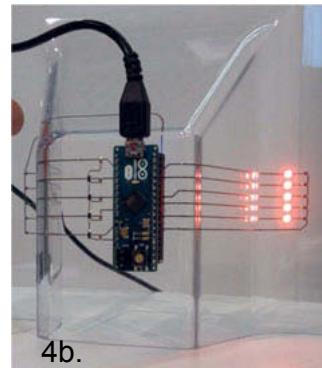


Bild 3: Heizmuster-Demonstrator für Flugzeugkabinen Ausstattung. Silber-Leiterbahnen + PTC Heizelement auf einem Bienenwaben Verbundwerkstoff. Quelle: LuFo Projekt in Zusammenarbeit mit Fraunhofer PYCO & der Universität Erlangen Nürnberg FAPS



4a.



4b.

Bild 4: Gedruckte Sensoren; 4a) Kapazitiver Sensor zur Messung des Flüssigkeitslevels, Silber-Leiterbahnen und Sensor auf PA6. FKIA Projekt; 4b) Berührungssensor zur Kontrolle eines LED Feldes, Silber auf PC

Bei den in den Abbildungen 2-4 veranschaulichten 3D GE Beispielen handelt es sich um traditionell gefertigte Bauteile aus dem Spritzguss oder Verbundwerkstoff-Verfahren. 3D GE kann jedoch auch auf den ‚klassischen 3D Druck‘ appliziert werden. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel einer 3D gedruckten (Fused Deposition Modeling) PLA-Komponente mit aufgedruckten Dehnungsmessstreifen bestehend aus Silbernanotinte. Der Druck leitfähiger Tinte auf klassische 3D gedruckte Bauteile stellt die Basis einer flexiblen Prozesskette für den vollständig digitalen Herstellungsprozess dar (Abbildung 6). Die Prozesskette besteht aus Modulen für die Additive Fertigung, den Druckprozess vorbereitende Prozesse auf dem 3D-Bauteil, SMD-Bestückung, Druck der Elektronik und nachbereitende Prozesse. Die Prozesskette kann abhängig der individuellen Anwendungen rekonfiguriert und die modularen Funktionen zu Mehrzweckplattformen kombiniert werden.

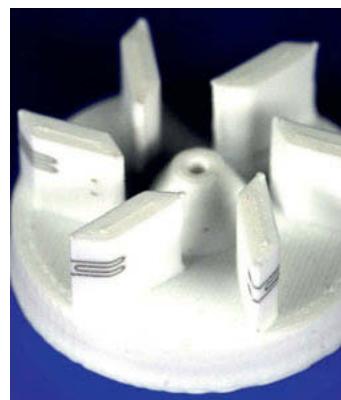


Bild 5: 3D Struktur mit Silber-Dehnungsmesstreifen
Quelle: Fraunhofer IFAM

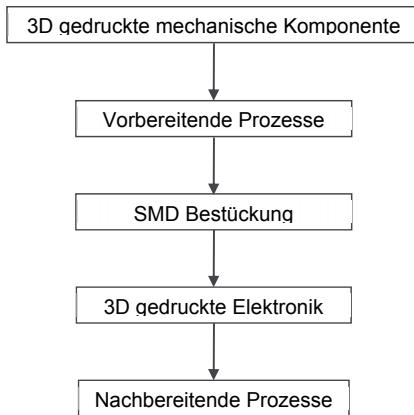


Bild 6: Flexible Prozesskette für die 3D GE

Die in der Prozesskette eingesetzten Module basieren auf einer mit spezifischen Prozesswerkzeugen ausgestatteten 5-Achs-Druckplattform:

Modul 1: Additive Fertigung des Strukturkörpers

Dieser Prozessbaustein erlaubt die schichtweise Auftragung von Standardmaterialien wie z.B. PLA, PC, ABS, Nylon und weiteren, flexiblen Filamenten bis hin zu Hochtemperatur-Materialien ($>300^{\circ}\text{C}$). Die Motion 3D Software ermöglicht das Slicen des CAD Modells in jede beliebige Richtung. Somit werden Geometrien ohne Stützstrukturen und Bauteile mit verbesserten mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu klassisch anisotrop aufgebauten 3D Körpern realisiert (Schwächen in Z-Richtung) (Abbildung 7). Der FDM-Prozess ermöglicht es weiterhin gedruckte, elektronische Strukturen in die mechanische Struktur einzubetten bzw. zu kapseln, indem in einer 5-Achs simultanen Bewegung über die Außenflächen gedruckt wird.

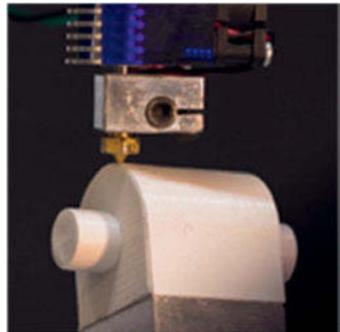


Bild 7: 5-Achs Druck von PLA

Modul 2: Vorbereitende Prozesse

In den meisten Fällen sind vorbereitende Maßnahmen des Strukturkörpers nicht notwendig.

Spritzgussbauteile für die 3D gedruckte Elektronik weisen eine trockene und saubere Oberfläche auf und bieten somit einen geeigneten, haftenden Untergrund für die Tinte. Einige Tinten, wie solche auf Wasserbasis mit Silberpartikeln im Nanometerbereich, haften jedoch nicht auf Materialien wie PC oder PC/ABS. Um die Oberflächenspannung des Substratmaterials zu erhöhen wird in diesem Fall ein Kaltplasma appliziert. Das ermöglicht schließlich eine saubere Leiterbahnstruktur und verbessert die Adhäsion.

Im Falle der gedruckten Elektronik auf bereits 3D gedruckten Bauteilen ergibt sich eine weitere Herausforderung hinsichtlich der Oberflächenqualität. Im FDM oder SLS-Verfahren hergestellte Bauteile weisen im Allgemeinen eine eher raue und unebene Oberfläche auf. Diese Oberflächen eignen sich daher nicht für den direkten Druck flüssiger (<200mPas) Tinten mit Nano-Partikeln. Zur Bewältigung dieser Herausforderung kann ein 5-Achs Fräsmodul in die Prozesskette integriert werden, um die 3D-Oberfläche zu ebnen und zu reinigen.

Der integrierte CNC-Schritt ermöglicht es außerdem Taschen und Gräben für oberflächenmontierbare Bauteile (SMD) zu schaffen, um diese im Modul 3 in das Bauteil einzubetten.



Bild 8: Gedruckte Leiterbahn in einem gefrästen Graben (Silber auf FDM PLA)

Modul 3: 3D Bestückung (P&P) oberflächenmontierbarer Bauteile (SMDs)

Obwohl es möglich ist, verschiedenste Materialien für den Druck einzusetzen, sind diese noch nicht vollends ausgereift, um Funktionen wie Widerstände, Kondensator, Dioden und Transistoren abzubilden. Im Vergleich zu herkömmlichen SMDs weisen gedruckten Strukturen allgemein schlechtere Werte hinsichtlich Leistung und Stabilität auf. Für komplexe, elektronische 3D-Systeme bedarf es demnach SMD Komponenten. Dieses Modul platziert Standard SMD-Bauelemente auf dem Strukturaufbau, um die elektronischen Fähigkeiten des Systems über die oben beschriebenen, relativ einfachen Funktionen (grundlegender elektrischer Schaltkreis, Antenne, Sensoren und Heizmuster), hinaus zu erweitern.

Modul 4: 3D Druck elektronischer Bestandteile

Dieses Modul ist der Kernprozess der Prozesskette und druckt den im Stand der Technik beschriebenen Haupt-Schaltkreis. Zusätzlich kann das Modul genutzt werden, um Verbindungen zwischen einzelnen, mithilfe von Modul 3 platzierten, SMDs herzustellen. Abbildung 9 zeigt einen in die Oberfläche des Bauteils eingebetteten QFN (Quad Flat No-lead) Mikrokontroller mit ca. 230µm großen Kontaktflächen. Ein 2-Komponenten-Kleber dient der Befestigung des Kontrollers sowie als Stützstruktur für die gedruckten Verbindungen.

Mithilfe dieses Prozessablaufs kann auf anschließendes Löten verzichtet werden. Die für den Schaltkreis und die Verbindungen eingesetzte Tinte weist eine Prozesstemperatur von 120°C oder weniger auf, was eine Fertigung auf niedrigem Temperaturniveau ermöglicht. Die Standard PCB-Herstellung erfordert einen lötenden Prozessschritt von über 200°C, um die SMDs in die Schaltung zu integrieren – welche außerhalb der zulässigen Höchst-Temperatur vieler 3D gedruckter Kunststoffe liegt.

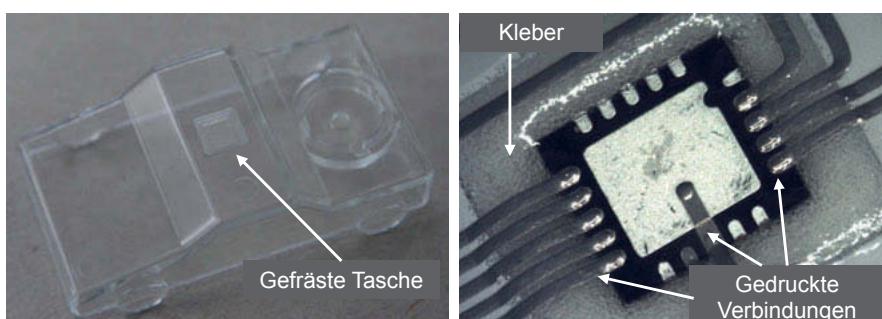


Bild 9: Eingebetteter QFC Mikrokontroller. Quelle: Universität Erlangen-Nürnberg FAPS.
Silber-Leiterbahnen und Verbindungen ca. 230µm

In einigen Fällen kommt es zu Fehlplatzierungen der SMDs, da die ausgesparte Tasche größer sein muss, als das zu platzierende Bauteil. Es kann zu Abweichungen in X- und Y-Richtung sowie einer Verdrehung kommen (Abhängig von der relativen Differenz der Dimensionen von SMD zu Tasche). Die gedruckten Verbindungen können so die relevanten Kontaktflächen verfehlten. Abbildung 10 stellt die hierfür entwickelte Korrektur mittels adaptiver Druckpfadkorrektur dar, die solche Platzierungsfehler automatisch korrigiert. In dem gezeigten Beispiel werden blanke LEDs in durch Lasern hergestellten Taschen platziert, die bereits mit durch UV-Licht aushärtendem Acryl-Kleber gefüllt sind. Anhand zweier geometrischer Markierungen korrigiert

das Kamerasystem in Modul 4 zunächst Platzierungsfehler, indem das Koordinatensystem an die tatsächliche Lage der Markierungen angepasst wird. Im Anschluss wird der Schaltkreis gedruckt. Zur automatischen Anpassung des Druckpfads wird als nächstes die tatsächliche Position jeder Kontaktfläche der LED ermittelt und schließlich die Verbindungen zwischen dem bereits gedruckten Schaltkreis und den Kontaktflächen der LED hergestellt.

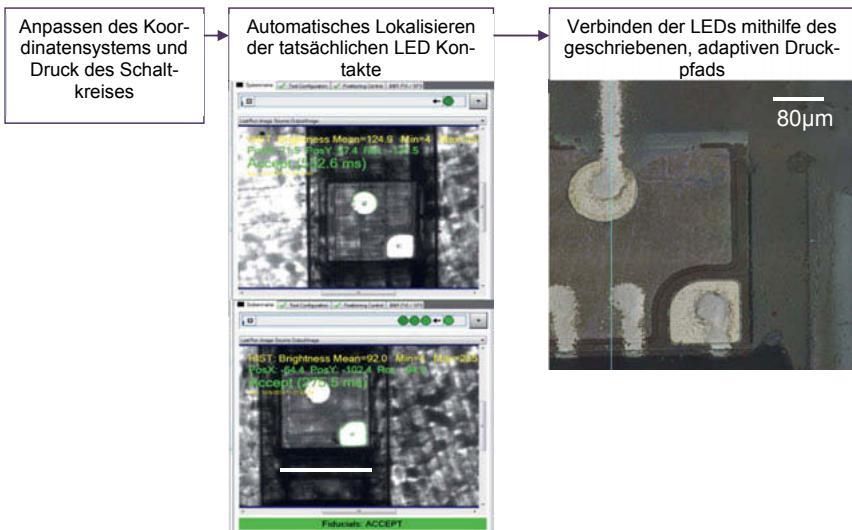


Bild 10: Beispiel für einen adaptiven Druckpfad, um Fehlplatzierungen von SMDs zu korrigieren. PET-Substrat mit einer durch einen Laser ausgefrästen Tasche. Die LED ist $350 \times 350 \mu\text{m}^2$ groß.

Modul 5: Nacharbeitende Prozesse

Zur Erzielung der endgültigen Eigenschaften ist ein Nacharbeiten der gedruckten Schaltung und des aufgebrachten Materials notwendig. Da die Bewegungsplattform in Modul 5 analog zu anderen 5-Achs Modulen aufgebaut ist, können photonische Sinterköpfe integriert werden, die ein Trocknen, Sintern oder Härteln des gedruckten Materials ermöglichen. Wie auch beim Druckprozess muss der Abstand bei dem zum Einsatz kommenden Sinterprozess zur Oberfläche groß genug sein, um die Bearbeitung komplexer geometrischer Körper zu ermöglichen. Derzeit kommen anwendungsspezifische Laser und Halogenlampen Systeme zum Einsatz.

3. Vollständig Additiv – weitere Konvergenz der 3D GE & 3D Druck

Die obige, prinzipielle Prozesskette erlaubt eine flexible, vollständig additive Fertigung. Die digitale Grundlage eines jeden Moduls ermöglicht es auch auf sich ändernde Märkte schnell und adäquat zu reagieren und mitzuhalten. Zwei wesentliche Initiativen werden diese Fähigkeiten weiter ausbauen:

- a) Elf Partner aus Deutschland und den Niederlanden werden im Rahmen des von der EU PENTA geförderten Hyb-Man Projektes hybride 3D Fertigungsmethoden entwickeln, die eine flexible Herstellung intelligenter System nach dem ‚First-Time-Right‘ Prinzip ermöglichen. Die neue hybride 3D-Fertigung wird den 3D-Druck von Polymeren als Kerntechnologie in Kombination mit dem Aufbau und der Integration elektronischer Bauteile nutzen. Als Teil der vollständigen Prozesskette werden In-Line Prüfung sowie Qualitätssicherungsprozesse integriert. Ergebnisse des Projektes werden verbesserte Additive Fertigungsprozesse, eine hybride Fertigungszeile und Prototypen integrierter, elektronischer Produkte sein (LED Leuchten, adaptive Automobilsensoren), die wiederum mithilfe der hybriden Fertigungszeile hergestellt werden.
- b) Im Rahmen des EU Manunet Projektes AMPECS wird ein vollständig additiver Herstellungsprozess entwickelt, um gedruckte Elektronik auf und in keramischen Substraten zu vereinen. Ein Deutsch-Spanisches Konsortium wird für den 3D-Druck geeignete keramische Materialien zum Aufbau des Strukturkörpers entwickeln und anschließend gedruckte Elektronik in und auf diesen integrieren. Endnutzeranwendungen werden die Bereiche Automobil, Luftfahrt ebenso wie die Telekommunikation abdecken.

1 Zusammenfassung

Der derzeitige auf die 3D gedruckte Elektronik bezogene Stand der Technik wurde dargestellt. Es wurde eine Prozesskette zur additiven Fertigung vollständig gedruckter, elektronischer 3D Systeme vorgestellt. Die Prozesskette besteht aus zentral kontrollierbaren und einfach konfigurierbaren Modulen, wodurch schnell auf sich ändernde Märkte reagiert werden kann.

Smarte, multifunktionelle Oberflächen – Realität oder Zukunftsvision?



Dipl.-Ing. J. Guenther, Dipl.-Ing. D. Malecha,
Kunststoff-Institut Lüdenscheid, Lüdenscheid

1. Kurzfassung

Schon lange werden Kunststoffbauteile durch die unterschiedlichsten Verfahren veredelt. Veredeln bedeutet, ihr eigentliches Erscheinungsbild in positiver Hinsicht zu verbessern, um die Bauteile den verschiedenen Anforderungen der Kunden anzupassen. Hierzu steigen von Jahr zu Jahr neben neuen Designwünschen auch die Anforderungen an die Funktionalität und Beständigkeit der Oberflächen.

2. Einleitung

Historisch betrachtet, startete die Oberflächentechnik für Kunststoffe ursprünglich mit der Anforderung, Kunststoffbauteile im Sichtbereich bunter, kratzfester und beständiger zu machen. Danach folgten weitere Designanforderungen, dem Kunststoffbauteil ein noch hochwertigeres Erscheinungsbild z.B. über Metallisierung, Mehrfarbigkeit oder Strukturen zu verleihen und auch besondere Haptiken zu erzeugen, gepaart mit passiver Kennzeichnung/Beschriftung von exponierten Bereichen.

In den letzten 20-30 Jahren kamen dann noch die Kombination mit Symbol- und Ambientebeleuchtungen dazu.

In jüngster Zeit verfolgen die aktuellen Entwicklungen den Industrie 4.0 Teilaспект der *Smart-Products* vielfach der Funktionsintegration von elektrischen Komponenten in Form von integrierten Schaltern, Slidern etc. durch *Printed-Electronics*. Die Zielsetzung der Funktionsintegration in die Oberflächen ist dabei, auf die klassische Leiterplatte zu verzichten, die Bauteilanzahl für die Funktionalität zu reduzieren und neue, smarte Bauteile zu schaffen.

Bei allen neuen Designs und Funktionen steigen allerdings auch immer parallel die Grundanforderungen an die Oberfläche – die Langlebigkeit und Beständigkeit gegen unterschiedlichste Einflüsse. Weiterhin werden gerade durch den Trend der hochglänzenden Oberflächen Zusatzfunktionen, wie Anti-Bakteriell, Anti-Glare/Anti-Reflex, Anti-Fingerprint oder Easy-to-Clean gewünscht.

3. Kratzfestigkeit

Eine hohe Kratzfestigkeit wird bei Anfragen nach Oberflächenbeschichtungen häufig schon als selbstverständlich angesehen und die stetige Verbesserung ist eines der Hauptziele bei Neuentwicklungen.

Als wichtiger Aspekt muss jedoch benannt werden, dass es nicht „die Kratzfestigkeit“ gibt und Kratzfestigkeit auch nicht gleichzusetzen ist mit der Härte einer Oberfläche.

Es existiert eine Vielzahl von Verfahren zur Beurteilung der Kratzfestigkeit von Oberflächen, die häufig nicht miteinander korrelieren und manchmal auch einfach ungeeignet sind.

Grundlegend unterschieden werden müssen die beiden Anwendungsfälle „*Flächige Belastung*“, z.B. durch Reinigen von Oberflächen mit einem Tuch, und „*Punktuelle Belastung*“, z.B. durch Beanspruchung mit scharfkantigen Gegenständen. Die Auswertung der Prüfungen, die reale Bedingungen nachstellen sollen, erfolgt dabei häufig rein visuell durch den Prüfer. Um reproduzierbare Ergebnisse bei solchen Prüfungen zu erhalten, sollten gerade einfach anmutende Prüfungen, wie z.B. die Erichsen-Härte mit sauberem Prüfgerät/Proben und möglichst unter Normklima durchgeführt werden, da allein schon die Luftfeuchtigkeit durch Beeinflussung der Reibung einen nicht unerheblichen Einfluss haben kann.

Des Weiteren muss die visuelle Bewertung ,im Hinblick auf Betrachtungsabstand, Winkel/Ausspiegeln der Proben und Normlichtbedingungen, genau definiert werden.

Wo es möglich ist, hat sich als alternative Auswertemethode die Glanzmessung von Oberflächen als zweckmäßig herausgestellt (vor/nach Belastung).

Die Kratzfestigkeit von heutigen Oberflächen kann als hervorragend bezeichnet werden. Gerade die UV-aushärtenden Lack- und Foliensysteme, welche sich zunehmend im Markt etabliert haben, konnten in den letzten 10 Jahren zu einer deutlichen Verbesserung beitragen.

Als neuere Entwicklung kann die Applikation von PUR-Systemen direkt im Spritzguss bezeichnet werden, die es ermöglicht, selbstheilende Oberflächen herzustellen. Diese Möglichkeit wird allerdings häufig noch nicht von gängigen Prüfvorschriften berücksichtigt – der Zeitfaktor zwischen Prüfung und Auswertung ist hier die entscheidende Kenngröße.

Das Kunststoff-Institut bietet aktuell ein industriefinanziertes Firmenverbundprojekt mit 45 teilnehmenden Unternehmen an, in dem u.a. ein Benchmark von unterschiedlichsten Kratzfestsystemen durchgeführt wird. Außerdem wird die PUR-Lackierung im Spritzgießwerkzeug hinsichtlich weiterer Funktionalisierungen und Optimierung der Prozessführung untersucht.

[VBO]

4. Antibakteriell

Wenn antibakterielle Oberflächen angesprochen werden, ist die erste Assoziation fast immer das Thema Medizintechnik. Dies ist grundsätzlich nicht falsch, da in dieser Branche die Keimfreiheit natürlich eine extrem wichtige Rolle spielt. Bei weiterer Betrachtung im Hinblick auf Bauteile, die von vielen Personen berührt werden, kommt man dann schnell auf noch ganz andere Oberflächen, wo Ansteckungsgefahren lauern, wie z.B. in Mietwagen/Taxis/Car-Sharing, Türgriffe und Schalter, Küche/Kühlschrank etc.

In den Anfängen wurden insbesondere Silber/Silbernanopartikel zur Erzielung einer antibakteriellen Wirkung in Kunststoffe und Lacksysteme eingesetzt. Silber wird jedoch nicht vom Körper abgebaut und bringt noch weitere Nachteile mit sich, wodurch alternativ auch Partikel auf Kupferbasis eingesetzt werden. Diese müssen jedoch in höherer Konzentration vorliegen und können dadurch die mechanischen Eigenschaften der Bauteile verschlechtern.

Ein internationales Forschungsprojekt, an dem das Kunststoff-Institut maßgeblich beteiligt ist, beschäftigt sich aktuell damit, die vorhandenen Nachteile durch die Verwendung passiv wirkender Nanopartikel zu verbessern und auch alternative Applikationsmethoden zu entwickeln, damit wirksame Partikel nur da vorhanden sind, wo sie auch benötigt werden.

Grundsätzlich sollte jedoch nicht unerwähnt bleiben, dass eine antibakterielle Wirkung – egal durch welches System - nur bei regelmäßiger Reinigung der Oberflächen gegeben ist.

5. Anti-Reflex / Antiglare

Speziell für Displayabdeckungen aber auch für Bereiche mit Symbolbeleuchtung und Bauteile im PKW Frontscheibenbereich existiert der Wunsch nach Antiglare/ Antireflex Oberflächen.

Während Antiglare-Oberflächen die Reflexion externer Lichtquellen durch diffuse Streuung reduzieren, ist die Aufgabe von Antireflex-Oberflächen die Minimierung externer und interner Kontraste bei gleichzeitiger Transmissionsverbesserung.

Antireflex-Oberflächen werden heute über relativ aufwändige Multilayer-Beschichtungen hergestellt, die jedoch aufgrund der hohen Kosten meist wirklich nur für Displays gerecht fertigt/nutzbar sind. Eine alternative Methode ist die Herstellung von Mottenaugestrukturen auf Bauteilen durch Abformung der Werkzeugoberfläche. Hier hat das Fraunhofer IWM ein interessantes Verfahren in Kombination mit der PUR-Überflutung entwickelt, welches in Verbindung mit variothermen Spritzgussverfahren einen vielversprechenden Lösungsansatz darstellt. [IWM] Im Rahmen des benannten Verbundprojekts am Kunststoff-Institut erfolgen aktuell ebenfalls Untersuchungen im Bereich der Mikrostrukturabformung von Oberflächen mittels PUR und die Überprüfung der mechanischen Festigkeiten. [VBO]

6. Anti-Fingerprint

Jeder Besucher einer Automobilmesse kennt es:

Es werden Fahrzeuge mit hochwertige Oberflächen in Piano-Black Optik und spiegelnden Oberflächen präsentiert und nach kurzer Zeit verliert sich der schöne Eindruck durch eine Vielzahl von Fingerabdrücken.

Unter einem Fingerabdruck oder Daktylogramm versteht man ein Muster der Papillarleisten am Endglied eines Fingers. Auf allen Gegenständen und Flächen, die wir berühren, bleiben Spuren von Bestandteilen aus unseren Fingerabdrücken zurück. Der Hauptteil der übertragenen Substanzen besteht aus körpereigenen Produkten, deren Zusammensetzung individuell starken Schwankungen unterliegt.

Weil sich durch die übertragenen Partikel und Anhaftungen die Charakteristik des von der verunreinigten Oberfläche reflektierten Lichts verändert, wird der Fingerabdruck für den Betrachter sichtbar. Alle Effekte, die zur Sichtbarkeit eines Fingerabdrucks beitragen, können zusammenfassend als optischer Kontrast zur sauberen Oberfläche beschrieben werden. Es wird die Intensität des Lichts durch Absorption vermindert, was den Abdruck dunkel erscheinen lässt. Außerdem wirken Partikel als Streuzentren und die Oberfläche wirkt im Bereich von Fingerprints rau und heterogen. Des Weiteren wird der wahrgenommene Farbbeindruck durch Beugung oder Brechung modifiziert, so dass die Oberfläche eingefärbt erscheint. Die mikroskopisch kleinen Anhaftungen sind für das menschliche Auge einzeln nicht erkennbar, makroskopisch erhält die Oberfläche jedoch eine Schattierung. [Af]

Anti-Fingerprint Systeme basieren auf dem Prinzip, den optischen Kontrast zwischen Oberfläche und einem darauf befindlichen Fingerabdruck zu minimieren bzw. im metallischen Bereich ein Anlaufen der Oberfläche zu vermeiden. Derzeit ist kein System und keine Methode bekannt, welche einen Fingerabdruck physikalisch vollständig verhindern kann!

Dies ist auch die Ursache, warum aktuell für hochglänzende Oberflächen kein echtes Anti-Fingerprint System existiert, da es immer zu Reflexionsänderungen zwischen Fingerprint und hochglänzender Oberfläche kommt.

Die aktuell einzige Methode zur Situationsverbesserung besteht darin, die Anhaftungen durch entsprechend niedrigenergetische Oberflächen möglichst gering zu halten und leicht reinigbar auszustatten.

7. Easy-to-clean

Um insbesondere den negativen Einfluss von Fingerprints zu reduzieren aber auch das Anschmutzverhalten von Oberflächen grundsätzlich möglichst zu verbessern, wurden in der Vergangenheit bereits vielfältigste Methoden und Beschichtungen entwickelt.

Im Zuge des *Nano-Hypes* Mitte der 2000er Jahre versprach insbesondere der Lotus-Effekt® einen vielversprechenden Ansatz, der auch vom Kunststoff-Institut im Rahmen mehrerer Verbundprojekte umfangreich untersucht wurde. Das System zur Reinigung von Oberflächen mittels bewegtem Wasser und einer speziellen Rauigkeit ist jedoch für viele Anwendungsfälle nicht geeignet. Es zeigt keine Wirkung bei ölhaltigen Substanzen und die mechanische Belastbarkeit der notwendigen speziellen Rauigkeit ist trotz immer wieder neuer Methoden zur Herstellung nicht gegeben.

Auch superhydrophile Oberflächen, denen ein Unterspülen des Schmutzes als Prinzip zu Grunde liegt, konnten sich am Markt nicht in größerer Breite durchsetzen.

Heutige Easy-to-clean Systeme basieren meist auf einer sehr geringen Oberflächenenergie und einer inerten, hochvernetzten Beschichtung, die sich gut mit Kratzfestbeschichtungen kombinieren lässt.

8. Prüfung der Reinigungsfähigkeit

Bereits 2008 wurde am Kunststoff-Institut ein Verfahren entwickelt und in eine Hausnorm überführt [KI], um die Easy-to-clean Eigenschaften einer Oberfläche zu bestimmen, da in der gesamten Normenlandschaft keine brauchbare Methode gefunden werden konnte.

Diese Prüfvorschrift wurde aufgrund des erneut großen Interesses der OEMs an solchen Oberflächen im Rahmen des o.g. Verbundprojekts weiter validiert und optimiert.

Der Zweck der Prüfmethode ist, easy-to-clean – Beschichtungen durch einen praktischen Test in ihrer Reinigbarkeit zu charakterisieren. Folgende Randbedingungen wurden für die Entwicklung vorgegeben:

- Einfacher, reproduzierbarer und praxisnaher Aufbau
- Verschiedenartige Verschmutzungen
- Reinigungsmedium Wasser oder trocken

Besondere Herausforderung hierbei war insbesondere Testmedien zu finden, die real auftreten, unterschiedliche Charakteristika aufweisen und dauerhaft in gleicher Zusammensetzung erhältlich sind, um nicht mit ähnlichen Problemen konfrontiert zu werden, wie es bei der Thematik der Cremebeständigkeit Mitte 2000 der Fall war.

Ausgewählt wurden letztendlich Coca Cola, O-Saft, Instantkaffee, Druckerschwärze, Handschweißlösung sowie Hand- und Sonnencreme. Die Applikation erfolgt mittels Stempel und die Reinigung über ein Crockmeter mit definiertem Tuch und Hubzahlen.

Durch Anwendung dieser Prüfung konnte beispielsweise festgestellt werden, dass zuckerhaltige Stoffe wie Coca Cola bei nahezu allen getesteten Beschichtungen ein starkes Anhaften zeigten. Ein getrockneter Cola-Tropfen zeichnet sich beispielsweise aufgrund des großen Kontaktwinkels bei easy-to-clean Oberflächen mit niedriger Oberflächenenergie viel höher ab als bei Oberflächen mit normaler Oberflächenenergie (Spreiten des Cola-Tropfens). Dadurch müssen bei den easy-to-clean Oberflächen wesentlich mehr Reinigungshübe durchgeführt werden, um die anhaftende Verunreinigung zu entfernen und die niedrige Oberflächenenergie der easy-to-clean Oberflächen wirkt in diesem Fall kontraproduktiv.

Daraus schlussfolgernd muss bei dem Wunsch nach einer easy-to-clean Oberfläche eigentlich immer die Frage gestellt werden in Bezug zu welcher Verschmutzung das System wirksam sein soll.

9. Fazit / Ausblick

Um die nahezu für alle Anwendungen perfekte, unzerstörbare, nicht anschmutzende, glänzende und gleichzeitig nicht reflektierende Oberflächenbeschichtung zu erhalten, sind noch eine Vielzahl von Weiterentwicklungen nötig, auch wenn heute schon hervorragende Beschichtungen auf dem Markt verfügbar sind.

Weitere, zeitnahe Verbesserungschancen sehen wir im Bereich der Lackiertechnik durch die Weiterentwicklung der UV-Monocure Lacke in Verbindung mit der LED-Aushärtungstechnik und im Bereich der Folientechnik durch die Entwicklung von Hardcoats, die nach dem Hinterspritzprozess und nicht schon nach der Verformung endausgehärtet werden.

Langfristig sehen wir eine gute Chance, dass durch die Fortführung der Printed-Electronics Aktivitäten die häufig genannte Vision der *schaltbaren Oberfläche* tatsächlich Realität werden könnte.

- [VBO] VB-Projekt: *Oberflächenbehandlung*, Kunststoff-Institut Lüdenscheid, 9/2016-8/2018
- [IWM] Vortrag: *Antiglare/Antireflex*, Burmeister/Fromm/Gurr/Elsässer, Fraunhofer IWM, Fachtagung Oberflächentechnik am Kunststoff-Institut Lüdenscheid, 9/2014
- [Af] Studie: *Antifingerprint*, Guenther/Malecha:, Kunststoff-Institut Lüdenscheid, 2008
- [KI] KIMW Norm 004: *Prüfung der Reinigungsfähigkeit*, Guenther/Malecha,
Kunststoff-Institut Lüdenscheid, 08/2009